

CONSERVATION RESTAURATION

DES BIENS CULTURELS



PERSPECTIVES EN CONSERVATION-RESTAURATION

**7^e COLLOQUE INTERNATIONAL DE L'ARAAFU
PARIS - INSTITUT NATIONAL D'HISTOIRE DE L'ART
7-8 MARS 2024**

7^e colloque international de l'ARAAFU

DIRECTRICE DE LA PUBLICATION

Silvia Païn

COMITÉ D'ORGANISATION DU COLLOQUE

David Aguilera Cueco
Denis Guillemard
Claude Laroque
Pascale Le Roy
Marie-Anne Loeper-Attia
Françoise Joseph
Silvia Païn
Caroline Relier
Nina Robin

RELECTURE-CORRECTIONS

Silvia Païn
Inocencia Queixalos
Caroline Relier

TRADUCTIONS

Julie Masson McLean
Silvia Païn

MAQUETTE ET MISE EN PAGE

Laurent Tournier

COUVERTURE

Silvia Païn (sur une maquette de Cécile Reichenbach)

ISBN : 978-2-907465-29-5

© ARAAFU, 2025

Sommaire

5 SILVIA PAÏN

Avant-propos. *Perspectives en conservation-restauration*, un colloque anniversaire

7 MATHILDE BEZON

Le traitement des moisissures dans les pastels : étude comparative de différents traitements par fumigation et de leurs propriétés fongistatiques et fongicides

22 ANAÏS DIEZ

L'imagerie 3D : un outil d'analyse pour la conservation-restauration des arts graphiques

33 ANNE-SOPHIE GAGNAL

Au service des collections patrimoniales universitaires de Montpellier : l'atelier de conservation-restauration du Service de coopération documentaire interuniversitaire

51 LIONEL LEFÈVRE

Utilisation de la terre cuite comme matériau de comblement

64 GAELLE SILVANT, ADRIEN LUCCA, SARAH BEN-RUBI, ISABELLE GARACHON

Le contretypage informatique adapté à la réintégration chromatique des lacunes. Application de la méthode en atelier pour limiter le métamérisme

77 ASH DUPUIS

La dégradation du verre dans les collections de spécimens en fluide. Étude de la collection Ariëns Kappers conservée au musée Vrolik, Amsterdam

90 CHRISTIAN DEGRIGNY, ROMAIN JEANNERET

MiCorr, *Pleco*® et *DiscoveryMat*, trois outils d'aide au diagnostic des métaux archéologiques et historiques au service des professionnels de la conservation-restauration

101 ÈVE PAILLAUX, SOTIRIS BAMPITZARIS, JANE ECHINARD, GILLES BARON, CESAR ESCOBAR-CLAROS, MAGALI BRUNET, LUC ROBBIOLO, ÉLODIE GUILMINOT

Conservation-restauration d'un fragment d'aile de Spitfire Supermarine Mk. VII. Entre patrimoine archéologique et industriel : recherche sur la préservation des alliages d'aluminium et leurs traitements

118 SOPHIE FIERRO-MIRCOVICH

Caoutchouc : difficultés de stabilisation d'un matériau contemporain archéologique

130 MYLÈNE DUCHARME

Le nylon en conservation-restauration : de sa fabrication à son vieillissement

141 NICOLAS MORET

Tapa taché ? ou de l'usage des gels aqueux pour le traitement des marques d'eau sur une étoffe polynésienne

159 GUNNAR SIEDLER, SEBASTIAN VETTER, NICOLAS MARTIN-BEAUMONT

Méthodes modernes de documentation pour la restauration et la conservation du patrimoine

174 DIANE LE CORRE, GAËL LATOUR

Méthodes de protection de la couche picturale limitant l'apport d'eau : pistes de recherche et étude comparative du cyclododécane et du menthol

- 189** MARIE-NOËLLE LAURENT-MIRI, THIERRY SARMANT, NICOLAS WILKIE-CHANCELLIER, SANDIE LE CONTE, ANTONIO IACCARRINO-IDELSON, PIERRE LEVEAU

Reprise de déchirures d'une peinture sur toile, étude de la déformation et traitement minimal

- 201** GRAZIA NICOSIA, JULIEN LONGHI, BRUNO BACHIMONT

État de conservation d'un bien culturel.
Précision sémantique et conceptuelle

- 216** MAGALIE TROY

Chantier de restauration des peintures Nextel
– Fondation Vasarely

- 229** SANDIE LE CONTE, LOÏC FORMA, HENRI BOUTIN, MARGUERITE JOSSIC, NICOLAS WILKIE-CHANCELLIER

Vibrations et conservation

- 237** CAROLINE RELIER

Les archives des conservateurs-restaurateurs

AVANT-PROPOS

Perspectives en conservation-restauration, un colloque anniversaire

Ce volume recueille les contributions des participants au 7^e colloque de l'Association des restaurateurs d'art et d'archéologie de formation universitaire (ARAAFU), intitulé *Perspectives en conservation-restauration*. À l'origine de ce projet était le souhait de fêter dignement le 40^e anniversaire de l'association, née en 1982 pour la défense et la promotion de la formation universitaire en conservation-restauration et des valeurs professionnelles qui l'animaient, aujourd'hui largement partagées par la communauté professionnelle. Les incertitudes liées à l'épidémie de Covid 19 ont retardé l'organisation de cet événement, qui a eu lieu les 7 et 8 mars 2024.

La meilleure manière de célébrer cet anniversaire était d'organiser une manifestation scientifique axée sur une thématique tournée vers l'avenir, les nouveautés, les perspectives. Ce sujet fait écho à certains des précédents colloques : le premier (1987), axé sur l'actualité, intitulé *Recherches et techniques actuelles*; le sixième (2014), *Retours d'expérience et regards rétrospectifs*, orienté plutôt vers les bilans et l'histoire de la discipline. Comme il est de tradition dans les colloques de l'ARAAFU, le sujet était transversal et permettait à de nombreuses spécialités de s'exprimer. Il a réuni plus de 150 professionnels dans l'auditorium de l'Institut national d'histoire de l'art et 250 en visioconférence pendant deux jours.

Quatre thématiques principales, proposées dans l'appel à communiquer, ont été abordées lors de ce colloque.

Certains intervenants ont exploré **de nouvelles approches de problèmes parfois anciens** – voire éternels. Certains d'entre eux ont bénéficié d'une approche plutôt théorique, comme la réflexion développée par Grazia Nicosia sur le constat d'état, d'ordre conceptuel, qui interroge la manière dont le numérique modifie la pratique du constat.

Nous avons entendu également des interventions sur des aspects techniques. Marie-Noëlle Laurent-Miri a exploré l'élaboration d'outils de compréhension des contraintes mécaniques en fonction des différents systèmes de consolidation des déchirures des peintures de chevalet. Diane Le Corre a présenté sa recherche sur l'application de consolidants temporaires pour la protection de peintures sur toile en vue d'interventions au revers. Lionel Lefèvre a partagé son expérience sur l'utilisation de la terre cuite comme matériau de comblement.

Du côté institutionnel, Anne-Sophie Gagnal a présenté de nouvelles approches de la conservation au sein d'une bibliothèque patrimoniale. Caroline Relier a abordé un problème qui concerne tous ceux qui travaillent en dehors des institutions : celui de la préservation des archives professionnelles après la cessation d'activité, qui a donné lieu à un débat avec la salle mettant en évidence des différences d'approche entre professionnels.

La deuxième thématique était celle des **domaines patrimoniaux, matériaux et typologies d'objets récemment investis** par la conservation-restauration. Ash Dupuis a présenté ses

travaux sur l'altération des bocaux en verre utilisés en histoire naturelle pour conserver des spécimens dans du formol. Jane Echinard et Ève Paillaux ont traité des interventions effectuées sur une aile d'avion de la Seconde Guerre mondiale, disparu en mer en 1944, repêché dans les années 80 et entreposé en extérieur pendant près de 40 ans en tant qu'objet mémoriel. Mylène Ducharme a évoqué la restauration du nylon et ses recherches sur la dégradation de ce matériau. Sophie Fierro Mircovich est intervenue sur le caoutchouc en contexte archéologique, issu de fouilles sur des sites de la Seconde Guerre mondiale. Nous avons entendu Magalie Troy sur le traitement de peintures de Vasarely, réalisées avec des peintures industrielles Nextel®, pour lesquelles un protocole de nettoyage non aqueux a dû être élaboré.

En troisième lieu figuraient **les nouveaux outils et produits** mis au point dans notre domaine ou adaptés pour notre usage : Nicolas Moret a parlé des gels aqueux pour le traitement des marques d'eau sur une étoffe polynésienne et Mathilde Bezon du traitement des moisissures sur les pastels avec des produits moins nocifs. Nicolas Martin-Beaumont a abordé la documentation de façon plutôt pratique, avec un exposé sur le logiciel Metigo Map et ses fonctionnalités pour les relevés et la 3D. Michaela Florescu a présenté oralement un projet européen sur une technologie verte pour le nettoyage sans contact d'œuvres d'art, basé sur l'utilisation de l'oxygène atomique généré par plasma à pression atmosphérique, absent de ces pages faute de contribution écrite.

Enfin, nous proposons de traiter de **nouvelles méthodes d'examen et d'analyse** comme aides à la conservation-restauration. Nous avons entendu Christian Degriigny sur trois outils d'aide au diagnostic des métaux archéologiques et historiques : les applications MiCorr et DiscoveryMat et le pinceau électrolytique Pleco®. Sandie Le Conte a développé sa réflexion sur l'étude des vibrations au service de la conservation. Anaïs Diez a traité de l'imagerie 3D comme outil d'analyse pour la conservation-restauration des arts graphiques, en particulier pour le suivi des déformations; Gaëlle Silvant a exposé son expérience sur le contretypage informatique adapté à la réintégration chromatique des lacunes.

Le programme a permis aux participants de faire des rapprochements fructueux entre les recherches présentées et leurs propres expériences et questionnements. Voici enfin les actes de ce colloque, qui permettront de garder trace des présentations et de nourrir les recherches futures.

Silvia Païn

LE TRAITEMENT DES MOISSURES DANS LES PASTELS : ÉTUDE COMPARATIVE DE DIFFÉRENTS TRAITEMENTS PAR FUMIGATION ET DE LEURS PROPRIÉTÉS FONGISTATIQUES ET FONGICIDES

Mathilde Bezon

Résumé

Les œuvres réalisées avec des pastels sont particulièrement vulnérables à diverses problématiques de conservation, notamment aux infestations fongiques. Les options de traitements curatifs sont limitées en raison de la sensibilité de la couche picturale à l'abrasion et aux solvants. Le nettoyage à sec à l'aspirateur muséal est une méthode essentielle pour traiter les moisissures dans les pastels, mais il comporte des limites en matière d'effet résiduel comme l'action est menée de manière très localisée. La fumigation avec des produits fungitoxiques était autrefois courante, mais est désormais prohibée à cause de la toxicité des fumigants traditionnellement employés pour l'être humain, l'environnement et les œuvres. Cependant, elle reste une mise en œuvre intéressante à explorer pour le traitement des moisissures dans les pastels car elle permet une approche indirecte qui peut être appliquée de façon simple par des conservateurs-restaurateurs indépendants et des institutions modestes. L'objectif principal de cette recherche était ainsi de trouver des fumigants alternatifs à l'oxyde d'éthylène ou au thymol pour compléter les méthodes de nettoyage à sec, qui soient inoffensifs pour les œuvres, l'être humain et l'environnement.

Abstract Works executed in pastel are particularly vulnerable to various conservation issues, notably fungal infestations. Curative treatment options are limited due to the sensitivity of the pictorial layer to abrasion and solvents. Dry cleaning using a museum vacuum is an essential method for addressing mould in pastels, yet it has limitations in terms of residual effect, as the action is conducted in a very localised manner. Fumigation with fungitoxic products was once common practice but is now prohibited because of the toxicity of the fumigants traditionally employed for humans, the environment, and the artworks. Nonetheless, it remains an interesting approach to explore for the treatment of mould in pastels as it allows for an indirect method that can be readily applied by independent conservators-restorers and smaller institutions. The primary objective of this research was, therefore, to identify alternative fumigants to ethylene oxide or thymol to complement dry cleaning methods, ensuring they are harmless to the artworks, human beings, and the environment.

Resumen Las obras producidas con pasteles son particularmente vulnerables a diversos problemas de conservación, en particular a las infestaciones fúngicas. Las opciones de tratamiento curativas son limitadas debido a la sensibilidad de la capa pictórica a la abrasión y los solventes. La limpieza a seco con la aspiradora del museo es un método esencial para tratar los mohos en pasteles, pero tiene límites en el efecto residual a medida que la acción se lleva a cabo de una manera muy localizada. La fumigación con productos fungitóxicos fue una vez común, pero ahora está prohibida debido a la toxicidad de los fumigantes utilizados tradicionalmente para los humanos, el medio ambiente y las obras. Sin embargo, sigue siendo una implementación interesante para explorar el tratamiento de los mohos en pasteles porque permite un enfoque indirecto que

puede aplicarse de manera simple por conservadores-restauradores independientes e instituciones modestas. El objetivo principal de esta investigación era encontrar fumigantes alternativos al óxido de etileno o timol para completar los métodos de limpieza en seco, que sean inofensivos para obras, seres humanos y el medio ambiente.

Mots-clés traitement, pastel, infestation, moisissure, fumigation, fongicide, huile essentielle, alcool

Le développement et le traitement des moisissures dans les pastels

Les œuvres créées avec des pastels secs présentent des couches picturales composées de particules de pigments faiblement liées entre elles. Cette particularité leur confère des propriétés optiques spécifiques de diffusion de la lumière et leur apporte leur aspect mat et velouté si caractéristique. Cependant, leur composition et leur structure les rendent aussi vulnérables à diverses problématiques de conservation, notamment aux infestations fongiques.

Plusieurs facteurs peuvent expliquer que les couches picturales des pastels constituent des milieux propices à la croissance des colonies de *fungi*. Les multiples anfractuosités qu'elles présentent et leur caractère hygroscopique offrent de nombreuses zones d'accroche aux spores et l'humidité nécessaire à leur développement. Ce sont également des milieux riches en ressources nutritives pour les *fungi* en raison de la diversité de matières organiques présentes dans la stratigraphie de ce type d'œuvre (au sein des liants des *media*, des éventuels fixatifs, des supports papier et leur encollage, etc.) (Szczepanowska, Cavaliere, 2003, p. 128). Des microclimats peuvent aussi se former dans les encadrements en cas de variations hygrométriques importantes (Padfield *et al.*, 2002). Les taux d'activité en eau nécessaires au développement des moisissures peuvent alors être rapidement atteints.



Figure 1 Anonyme, *Cecil Girl*, 1973, pastel sur papier pumicif marouflé sur carton, collection privée. Détail des infestations fongiques localisées sur les tracés bruns (d'après Szczepanowska, Cavaliere, 2003, p. 138).

Les colonies de micromycètes vont souvent croître de façon préférentielle sur les tracés des pastels en fonction des pigments présents (Szczepanowska, Cavaliere, 2003, p. 128) ; certains sont en effet caractérisés par une bioréceptivité importante, notamment ceux riches en carbone, en azote et en fer (Cantigniau, 1998, p. 42). Cela concerne principalement les laques organiques mais, surtout, les pigments noirs, les ocres et les terres. Ce phénomène est assez bien illustré dans cet exemple, tiré de la littérature, d'un pastel sur papier pumicif marouflé sur carton, de 1973, d'auteur anonyme, titré *Cecil Girl*, où l'on remarque que les micromycètes se sont développés de manière significative sur les tracés contenant très probablement du noir ou des terres (**fig. 1**).

La biodétérioration par les microorganismes est de manière générale un défi majeur dans la préservation des biens culturels à base de matières organiques. La conservation préventive est universellement reconnue comme étant le moyen le plus efficace de prévenir et de contrôler les infestations fongiques mais cela n'empêche malheureusement

pas toujours les infestations fongiques de survenir. Celles-ci peuvent causer d'importants dégâts et les options de traitements curatifs efficaces et sûrs sont encore relativement limitées. Dans le cas des pastels, ces options sont encore plus réduites en raison des nombreuses limites qu'impose la sensibilité de leur couche picturale, notamment à l'abrasion et à l'application directe de solvants. En cas d'infestation, le traitement se concentre en général sur un nettoyage à sec à l'aide d'un aspirateur muséal muni d'un embout de précision sous la forme de pipette Pasteur en verre ou en plastique (fig. 2, 3). Il permet de retirer la majorité des hyphes et des spores et de rétablir l'intégrité esthétique des œuvres mais il n'apporte théoriquement pas d'efficacité résiduelle. En effet, comme cette action est très localisée, le risque que des spores demeurent dans la couche picturale et que l'infestation reprenne si des conditions favorables sont de nouveau réunies est important. La mise en œuvre de traitements de désinfection en complément du nettoyage à sec est donc recommandée, surtout dans le cas où des prélèvements auraient révélé que les colonies présentes étaient toujours viables.



Figure 2 Visuel de la mise en œuvre d'un traitement de nettoyage à sec de moisissures sur un pastel sec à l'aide d'un aspirateur muséal. © Mathilde Bezon.



Figure 3 Détail de l'embout de précision utilisé pour ce type de traitement. © Mathilde Bezon.

La fumigation est une mise en œuvre adaptée au traitement des pastels infestés car elle permet de procéder de manière totalement indirecte par l'exposition à des vapeurs de produits fongitoxiques dans des enceintes hermétiques. Cependant, les composés fongitoxiques les plus employés par le passé — l'oxyde d'éthylène et le thymol — sont toxiques pour l'homme et l'environnement et peuvent avoir des effets néfastes à long terme sur les supports papier et les *media*. Leur utilisation est donc désormais majoritairement prohibée. Malgré cela, la fumigation demeure une option intéressante à explorer pour le traitement des moisissures dans les pastels secs. Il s'agit en effet d'une mise en œuvre accessible pour des institutions modestes ou des conservateurs-restaurateurs indépendants, ce qui la distingue des méthodes nécessitant un appareillage plus conséquent, telle que l'irradiation aux rayonnements gamma. L'objectif de la partie expérimentale de cette recherche était donc de trouver des fumigants alternatifs à l'oxyde d'éthylène et au thymol, non-toxiques pour l'être humain et l'environnement, possédant une activité fongicide élevée et qui pourraient être utilisés en complément du nettoyage à sec à l'aspirateur muséal.

Protocole expérimental

Les critères établis pour la recherche des fumigants à tester ont été les suivants :

- large spectre d'activité antifongique ;
- bonne stabilité chimique ;
- haute volatilité ;
- faible coût ;
- non toxique pour l'homme ;
- non toxique pour l'environnement ;
- pas d'effet indésirable connu sur le papier et les *media*

Après consultation de la littérature, deux familles de produits antifongiques sont apparues comme répondant à la majorité des critères : les alcools et les huiles essentielles.

Les alcools sont des microbiocides dont les effets délétères se concentrent sur la membrane cellulaire, dont ils sont capables de dénaturer les protéines et les lipides (Paulus, 2004, p. 22). Deux alcools sont particulièrement efficaces contre les micromycètes : l'éthanol et le butanol (Bacílková, 2006, p. 187). Les solutions aqueuses d'alcool sont en général plus efficaces que les alcools purs. Pour l'éthanol, la concentration optimale pour un effet biocide est 70 % ; pour le butanol, la concentration recommandée est 90 % (Bacílková, 2006). Il n'a pas été démontré à ce jour de diminution significative des propriétés mécaniques du papier après l'application d'éthanol ou de butanol. Ces deux alcools sont donc des candidats prometteurs dans la recherche de fumigants alternatifs au thymol et à l'oxyde d'éthylène. Leur usage est déjà relativement démocratisé dans la pratique des conservateurs-restaurateurs, en particulier celui de l'éthanol, et leurs effets sur la cellulose et les *media* sont relativement bien étudiés.

Les huiles essentielles sont des métabolites secondaires produits par les végétaux, principalement constitués de terpènes et terpénoïdes qui sont capables d'agir sur les parties lipidiques des membranes cellulaires des *fungi* et d'affecter la fonction de diverses structures moléculaires (Saad *et al.*, 20). Les terpénoïdes phénoliques, comme le thymol, sont les plus efficaces, mais ils peuvent être nocifs pour le foie, irritants pour la peau et les muqueuses et néfastes pour les supports papier à long terme. Il a pu être constaté que certains alcools terpéniques comme le géraniol possédaient une activité antifongique équivalente à celle des phénols (Natu, 2019, p. 60) tout en démontrant une toxicité beaucoup plus réduite (Clarke, 2008).

Dans le contexte de cette recherche, il a donc été décidé de se concentrer sur deux huiles essentielles dont le principe actif antifongique principal était le géraniol : l'huile essentielle de citronnelle de Java et l'huile essentielle de palmarosa – et d'éviter au maximum celles contenant des phénols. Ces deux huiles se sont avérées également être celles possédant le meilleur pouvoir antifongique en phase gazeuse dans le *screening* de Delespaul, réalisé en 2001 (Delespaul *et al.*, 2000). Bien que largement utilisées dans l'industrie alimentaire et cosmétique pour leurs propriétés microbiocides, les huiles essentielles ne sont pas encore couramment employées dans le cadre de traitement de désinfection de biens culturels (Drábková *et al.*, 2021). Leur utilisation dans ce domaine suscite cependant un intérêt croissant (Menicucci *et al.*, 2023). Les effets à long terme sur les supports papier sont cependant moins étudiés que ceux des alcools ; leur usage fait également davantage débat car certaines études ont déjà signalé que le linalol, par exemple, pouvait provoquer des altérations de la couleur du papier et une perte de résistance mécanique (Rakotonirainy *et al.*, 2007).

Les souches sélectionnées pour tester les propriétés des fumigants ont été *Aspergillus niger* et *Penicillium pinophilum*. Celles-ci font partie des genres les plus fréquemment rencontrés lors d'infestations fongiques sur des œuvres graphiques (Pinheiro *et al.*, 2019). Il s'agissait de plus d'espèces à la croissance rapide et à la sporulation importante, ce qui permettait d'avoir des résultats probants en peu de temps.

La phase expérimentale a été divisée en deux parties : une phase de tests préliminaires et une phase de tests approfondis.



Figure 4 Visuel de l'inoculation des boîtes de Pétri à l'aide d'une micropipette. © Mathilde Bezon.

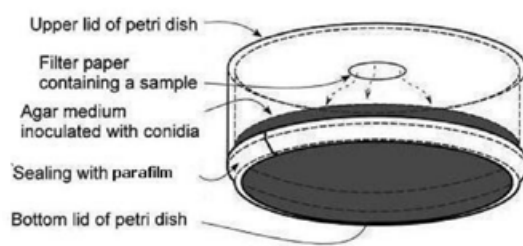


Figure 5 Schéma de la mise en œuvre des fumigations en microatmosphère, d'après Massoud *et al.*, 2012, p. 299.

La première phase de test a été réalisée *in vitro*, c'est-à-dire sur des souches inoculées sur des milieux de culture malt-agar à 2 %, additionné de chloramphénicol 50 ppm. Les éprouvettes ont été préparées à la mycothèque de l'université catholique de Louvain-la-Neuve

(UCL) (fig. 4) et ont été exposées à des fumigations en microatmosphère¹ immédiatement après inoculation (fig. 5). La quantité de fumigant (50 µL) et le temps d'exposition (7 jours) ont été identiques pour tous les fumigants. La croissance des mycéliums dans les boîtes de Petri a été documentée à l'aide d'un dispositif photographique durant deux mois. Le diamètre des mycéliums a été calculé grâce au logiciel ImageJ 1.53. À partir de ces données, les pourcentages d'inhibition² des fumigants ont pu être calculés (fig. 6 et 7) et des graphiques de croissance des mycéliums ont également été réalisés (fig. 8 et 9).

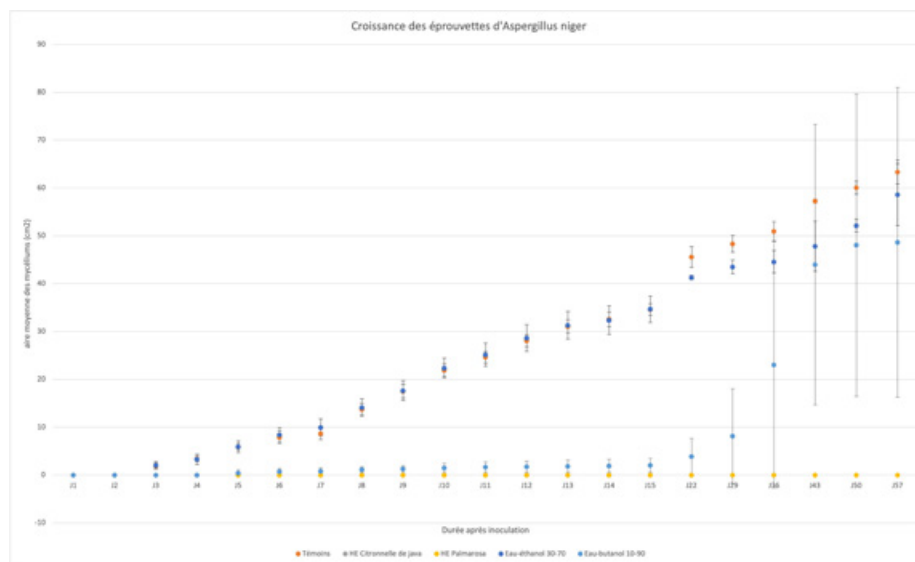


Figure 6 Graphique de la croissance des échantillons d'*Aspergillus niger* exposés aux différents fumigants.

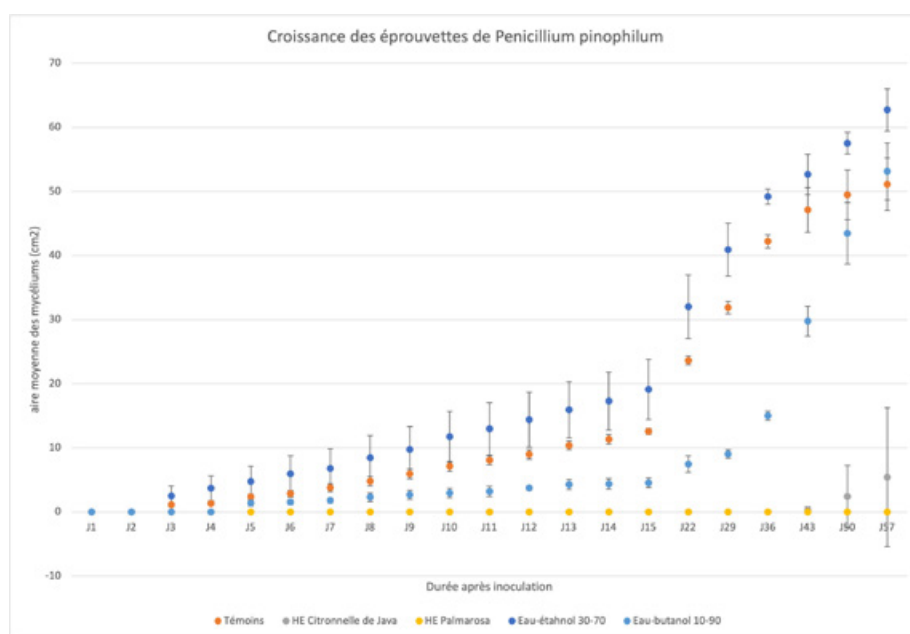


Figure 7 Graphique de la croissance des mycéliums de *Penicillium pinophilum* exposés aux différents fumigants.

¹ Mise en œuvre de fumigation dans des boîtes de Pétri, où le fumigant est imbibé sur un papier filtre, collé sur le couvercle de la boîte. Le tout est ensuite scellé avec du Parafilm®.

² Le pourcentage d'inhibition des fumigants a été calculé grâce à la formule $\frac{DC - DT}{DC} \times 100$, où Dc = aire de la colonie témoin, et Dt = aire de la colonie traitée.

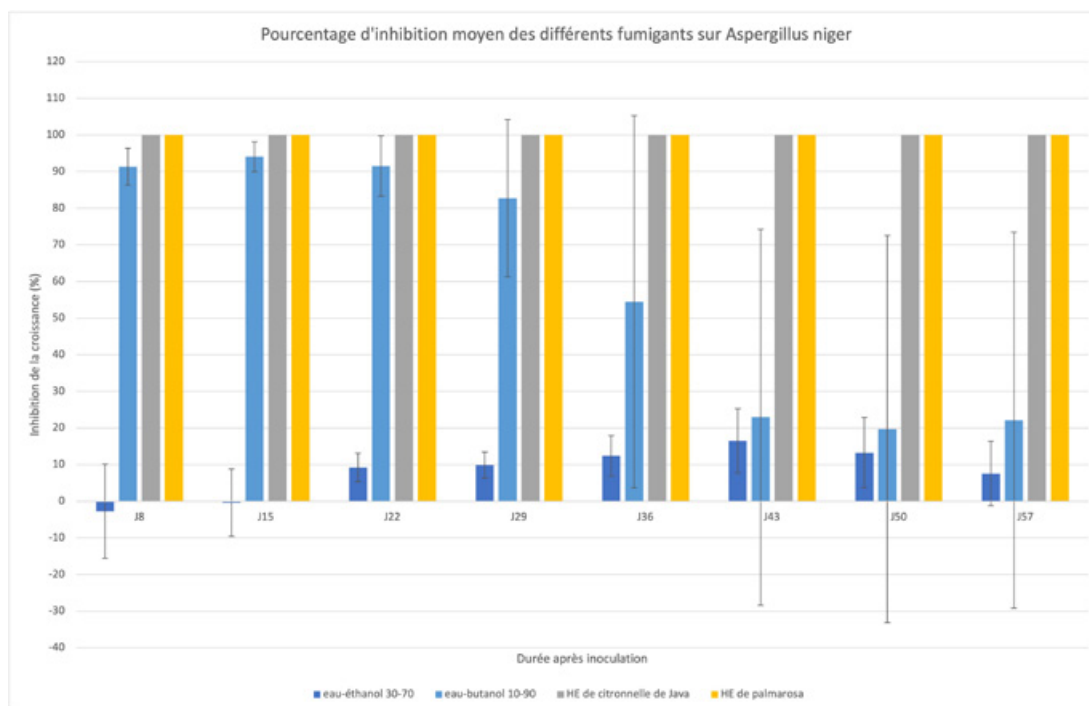


Figure 8 Pourcentage d'inhibition moyen des différents fumigants sur *Aspergillus niger*.

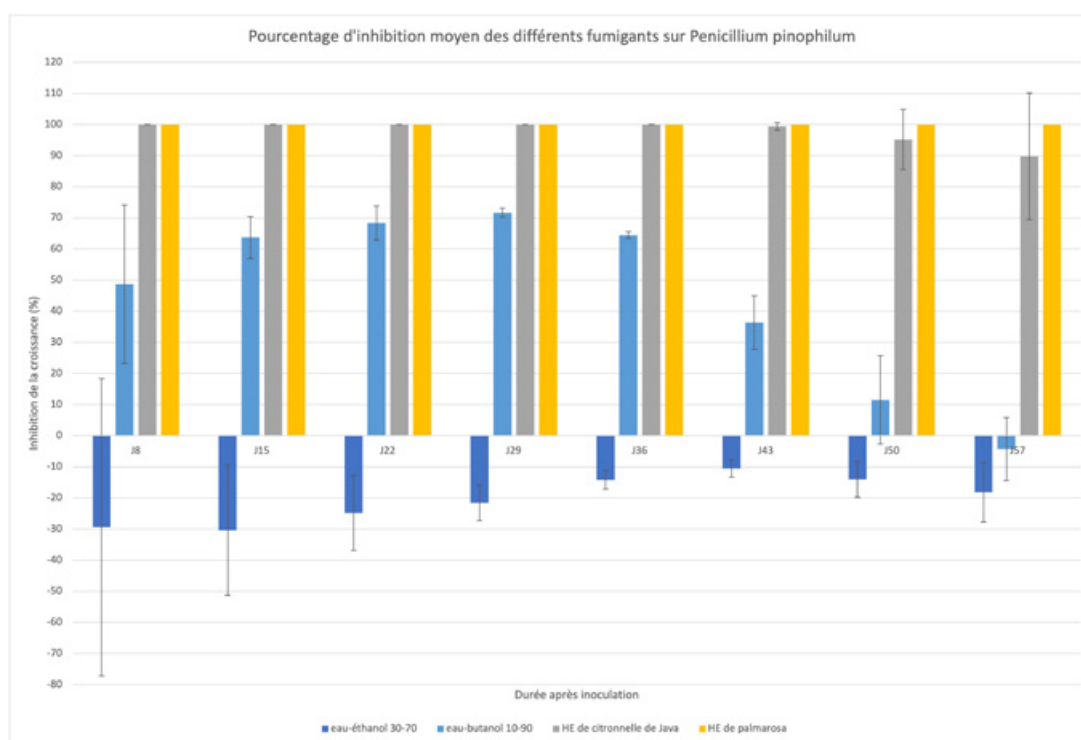
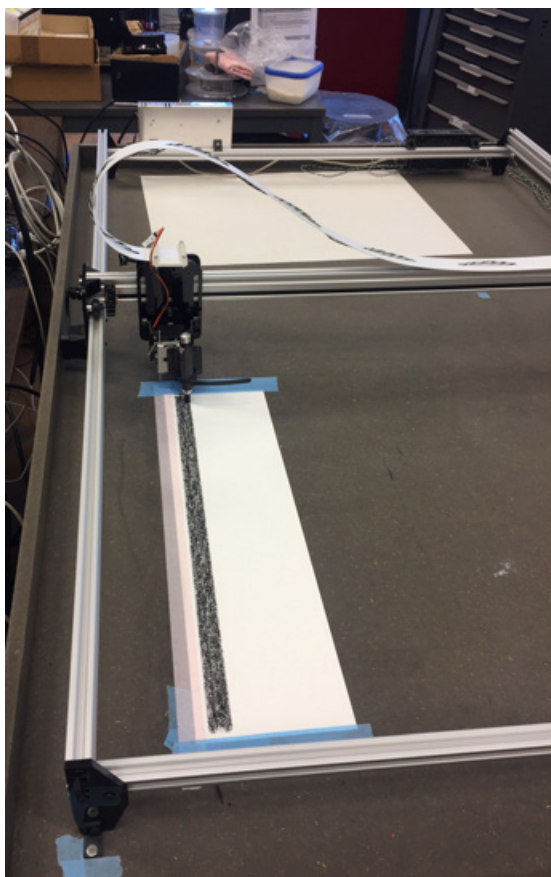


Figure 9 Pourcentage d'inhibition moyen des différents fumigants sur *Penicillium pinophilum*.



L'objectif de la phase approfondie était de tester les propriétés des fumigants sur les mêmes souches mais *in situ*, en les inoculant sur des éprouvettes prenant la forme de *mock-up* de pastels secs sur papier vélin, composés de bandes de différentes couleurs.

Il était important d'avoir une approche la plus systématique possible pour la réalisation des *mock-up* qui allaient servir d'éprouvettes. Ceux-ci ont donc été réalisés mécaniquement à l'aide d'un traceur XY, ou «*pen plotter*» au FormLab de l'académie des Beaux-Arts de Gand (fig. 10).

Figure 10 Visuel d'un *mock-up* en cours de réalisation. © Mathilde Bezon.



Figure 11 Visuel de l'inoculation des *mock-up* à l'aide d'une micropipette. © Mathilde Bezon.

Les éprouvettes ont été inoculées à la mycothèque de l'UCL de la même manière que pour la phase de test préliminaire (fig. 11). Elles ont été placées en incubation, face vers le haut, sur un milieu de culture malt-agar à 2 % additionné de chloramphénicol 50 ppm dans une boîte de Pétri durant 5 jours. Il a pu être constaté le développement très rapide de mycéliums au niveau des zones inoculées à la surface des éprouvettes. Néanmoins, comme les matériaux utilisés pour la confection des éprouvettes n'étaient pas stériles, de nombreuses contaminations externes sont également survenues, ce qui a complexifié l'interprétation des résultats de cette phase.

Après l'incubation initiale, les éprouvettes ont été mises à sécher durant 48 h dans des enceintes préalablement désinfectées en prévision des traitements. Trois types de traitement ont ensuite été effectués, alors que les éprouvettes étaient déposées dans des boîtes de Pétri stériles ne contenant pas de milieu de culture : des éprouvettes ont été traitées uniquement avec l'aspirateur muséal, d'autres ont été traitées par

aspiration et fumigation et d'autres, enfin, ont été traitées uniquement par fumigation. Les fumigations ont été réalisées en microatmosphère, à l'instar de la phase de tests préliminaires. Après les traitements, les éprouvettes ont été replacées en incubation dans de nouvelles boîtes comprenant des milieux de culture malt-agar à 2 % additionné de chloramphénicol 50 ppm. L'évolution de la croissance mycélienne a été documentée durant 2 mois, à l'aide du même dispositif que pour la première phase de tests. Le logiciel ImageJ, en revanche, n'a pas pu être utilisé pour une quantification précise du diamètre des colonies à cause de l'hétérogénéité du développement mycélien et des très nombreuses contaminations externes. L'évaluation des résultats s'est donc basée uniquement sur des observations visuelles.

Interprétations et discussions des résultats

Lors de la phase de tests préliminaires, les deux huiles essentielles ont eu un effet fongicide très important sur les souches d'*Aspergillus niger* et de *Penicillium pinophilum*, même si ces dernières se sont avérées plus résistantes à l'huile de citronnelle de Java. Il a pu être remarqué en effet sur un des répliques des boîtes inoculées avec *Penicillium pinophilum*, le développement d'un mycélium à partir de J44 (fig. 12). Sa croissance, bien que fortement retardée s'est ensuite déroulée de manière similaire aux témoins. Dans le cas de l'huile de palmarosa, aucun développement fongique n'est survenu dans les boîtes de Pétri inoculées et une efficacité résiduelle d'au moins deux mois a été relevée (fig. 13).

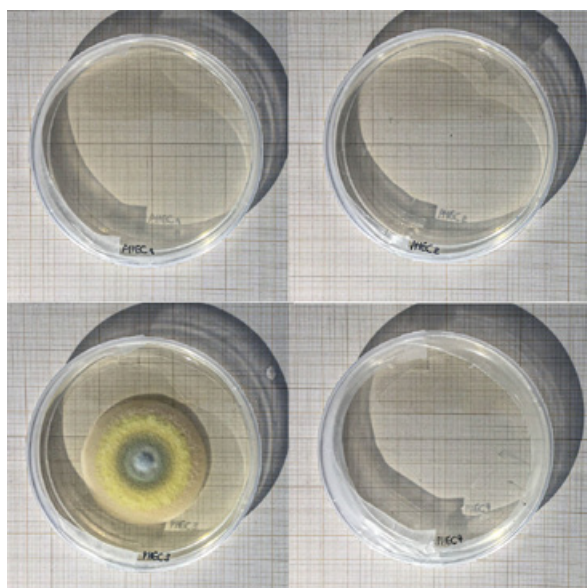


Figure 12 Visuel des 4 éprouvettes de *Penicillium pinophilum* exposées aux vapeurs d'huile essentielle de citronnelle de Java à J57. © Mathilde Bezon.

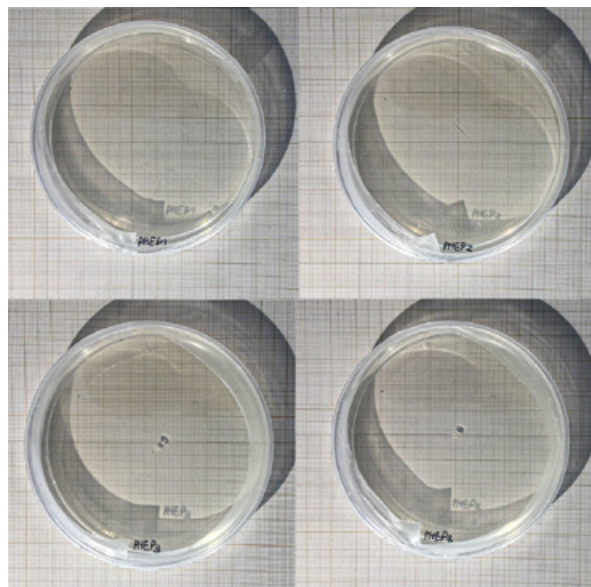


Figure 13 Visuel des 4 éprouvettes de *Penicillium pinophilum* exposées aux vapeurs d'huile essentielle de palmarosa à J57. © Mathilde Bezon.

L'efficacité plus importante de l'huile essentielle de palmarosa pourrait être liée à sa composition. Cette huile est en effet composée à 80 % de géraniol, là où l'huile de citronnelle de Java n'en contient que 22 %. Les résultats obtenus dans cette phase ont suggéré que le géraniol est un composé déterminant dans l'effet antifongique des deux huiles sélectionnées. La solution d'eau-butanol 10-90 % a eu un effet uniquement fongistatique sur les deux souches. Elle a permis d'endiguer significativement le développement des colonies durant

le premier mois et celles-ci avaient un aspect assez différent des témoins (**fig. 14 et 15**). Il a pu cependant être constaté qu'à terme la croissance des mycéliums exposés aux vapeurs de butanol était relativement équivalente à celle des témoins pour les deux espèces.

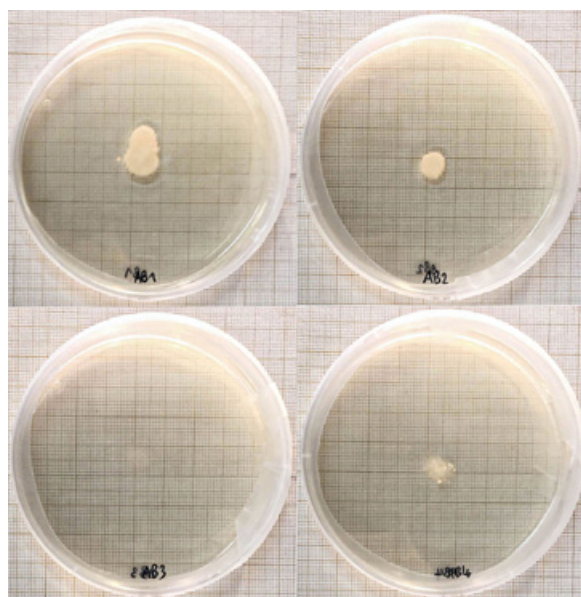


Figure 14 Visuel des 4 éprouvettes d'*Aspergillus niger* exposées aux vapeurs d'eau-butanol à J8.
© Mathilde Bezon.

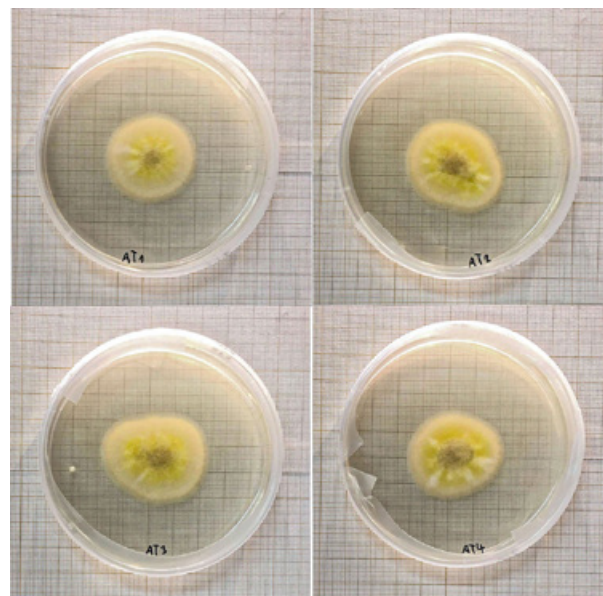


Figure 15 Visuel des 4 éprouvettes témoins d'*Aspergillus niger* à J8. © Mathilde Bezon.

La solution d'eau-éthanol 30-70 % s'est avérée être le fumigant le moins efficace, avec un effet inhibiteur très limité sur la croissance des souches d'*Aspergillus niger* (**fig. 6**). Dans le cas de *Penicillium pinophilum*, le diamètre moyen des souches fumigées a été même plus important que celui des témoins (**fig. 7**). Ce phénomène était cependant lié à une manipulation inadéquate lors de la préparation des éprouvettes.

L'effet fongicide important des huiles essentielles durant cette phase a pu être potentialisé par leur rétention importante dans les milieux de culture. En effet, même deux mois encore après le retrait des papiers-filtres une très forte odeur caractéristique de ces huiles se dégageait des boîtes de Pétri.

À l'inverse, la moindre efficacité des alcools par rapport aux huiles essentielles sur les deux souches a pu être également amoindrie par la mise en œuvre. En effet, Il a pu être constaté, par la suite, dans la littérature que l'efficacité des alcools —notamment l'éthanol— était fortement conditionnée par des facteurs environnementaux, en particulier par la température (Dao, Dantigny, 2011), qui n'a pas été contrôlée dans le cadre de cette expérimentation. Pour pouvoir réellement conclure sur les propriétés antifongiques des alcools, en particulier l'éthanol, il faudrait mener de nouveau ces expérimentations avec un dispositif différent, permettant un meilleur contrôle des conditions environnementales, tel qu'un dessiccateur.

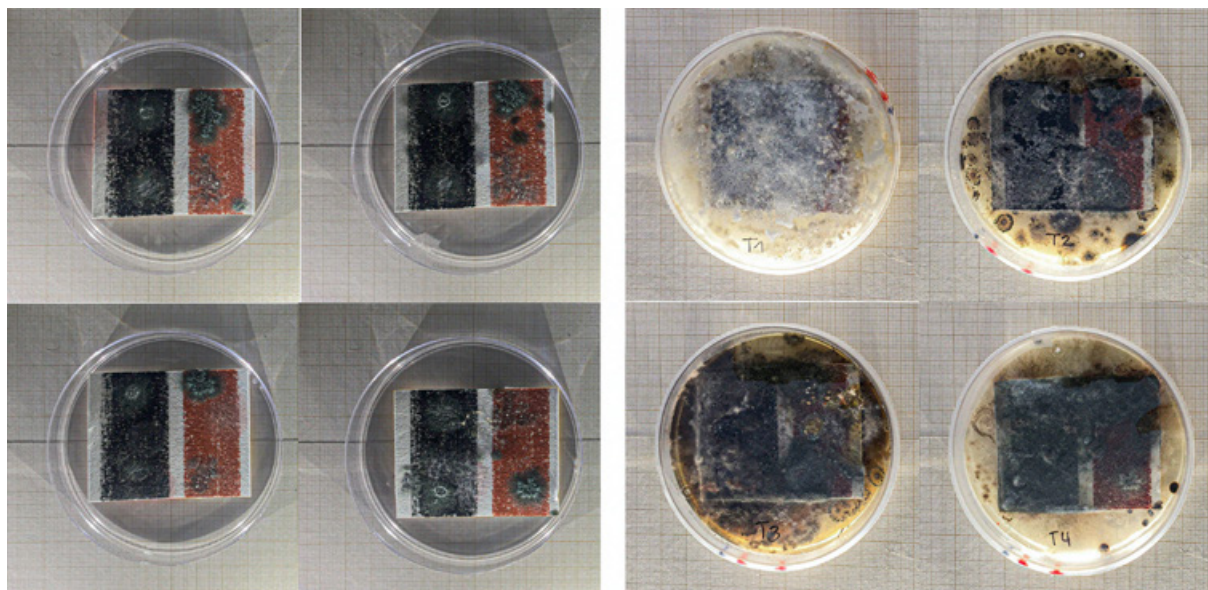


Figure 16 Visuel des éprouvettes témoins à J1 (gauche) et J57 (droite). © Mathilde Bezon.

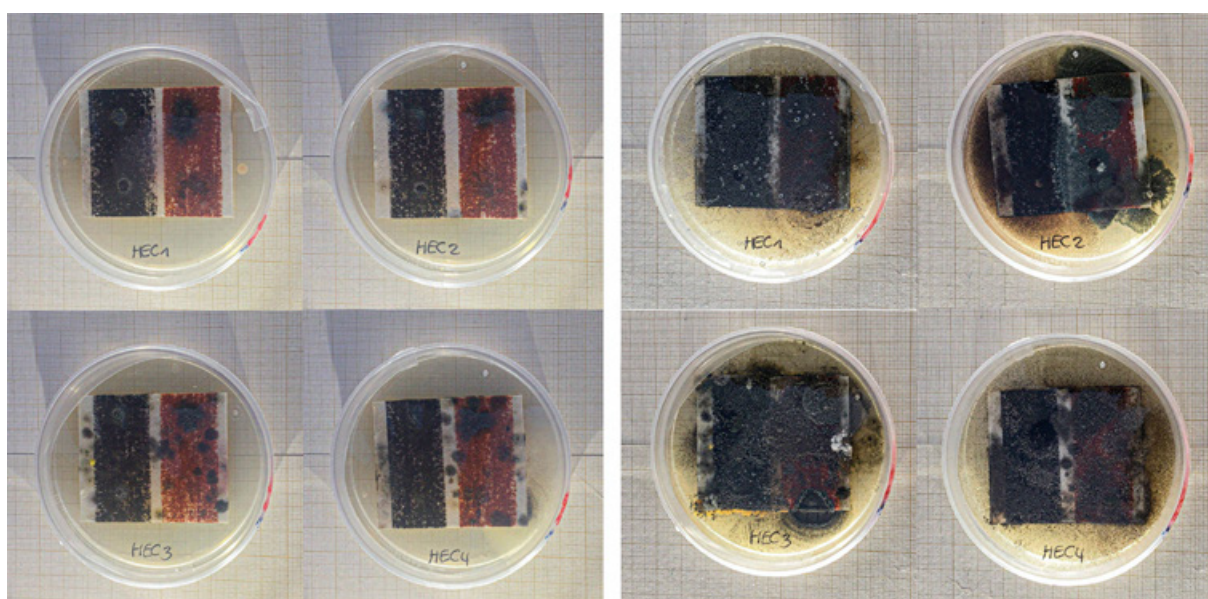


Figure 17 Visuel des éprouvettes exposées aux vapeurs d'huile essentielle de citrondelle de Java à J8 (gauche) et J57 (droite). © Mathilde Bezon.

Les résultats de la phase de tests approfondis ont été assez différents de ceux de la phase de tests préliminaires. Les huiles essentielles ont démontré une efficacité beaucoup plus réduite. L'huile essentielle de citrondelle de Java a permis d'inhiber la croissance durant 2 semaines mais on a pu constater à terme que l'ampleur de l'infestation était relativement équivalente à celle des éprouvettes non traitées (**fig. 16 et 17**). L'huile essentielle de palmarosa a démontré de nouveau une efficacité supérieure à la citrondelle de Java et a totalement inhibé la croissance de nouveaux mycéliums sur la moitié des éprouvettes (**fig. 18**).

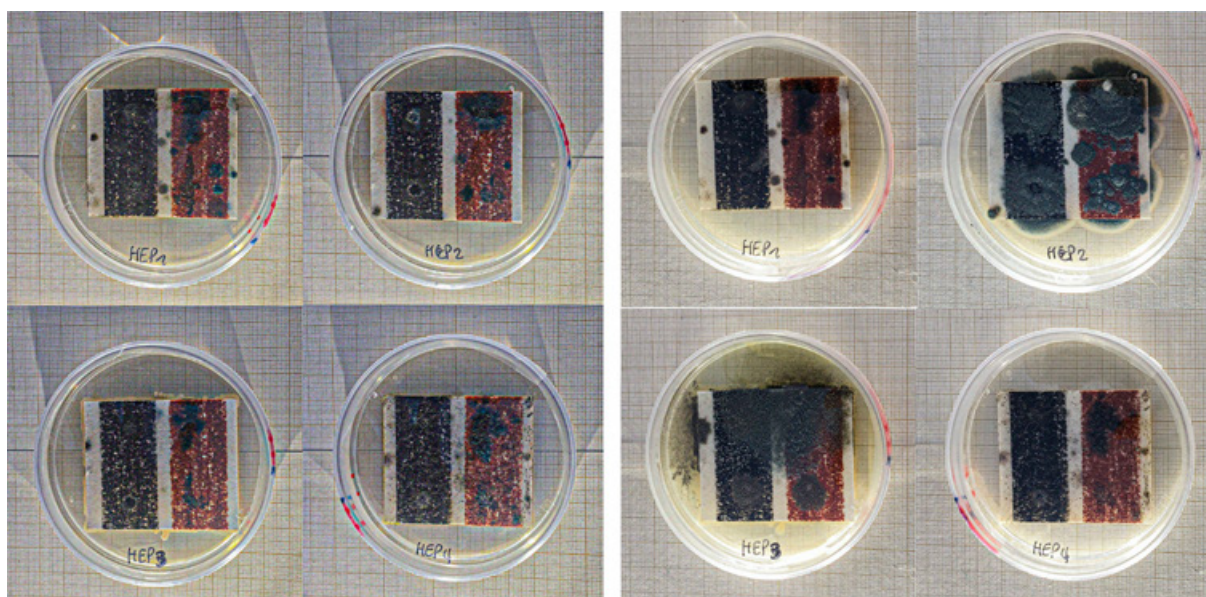


Figure 18 Visuel des éprouvettes exposées aux vapeurs d'huile essentielle de palmarosa à J8 (gauche) et J57 (droite). © Mathilde Bezon.

La solution d'eau-éthanol (30-70 %) a démontré de meilleures propriétés fongistatiques que durant la phase de tests préliminaires. Bien que son effet soit resté très mitigé, le fumigant a inhibé la croissance de nouvelles colonies durant les 4 premiers jours de la période de documentation. À terme, l'infestation était légèrement moins étendue que pour les éprouvettes témoins (**fig. 19**).

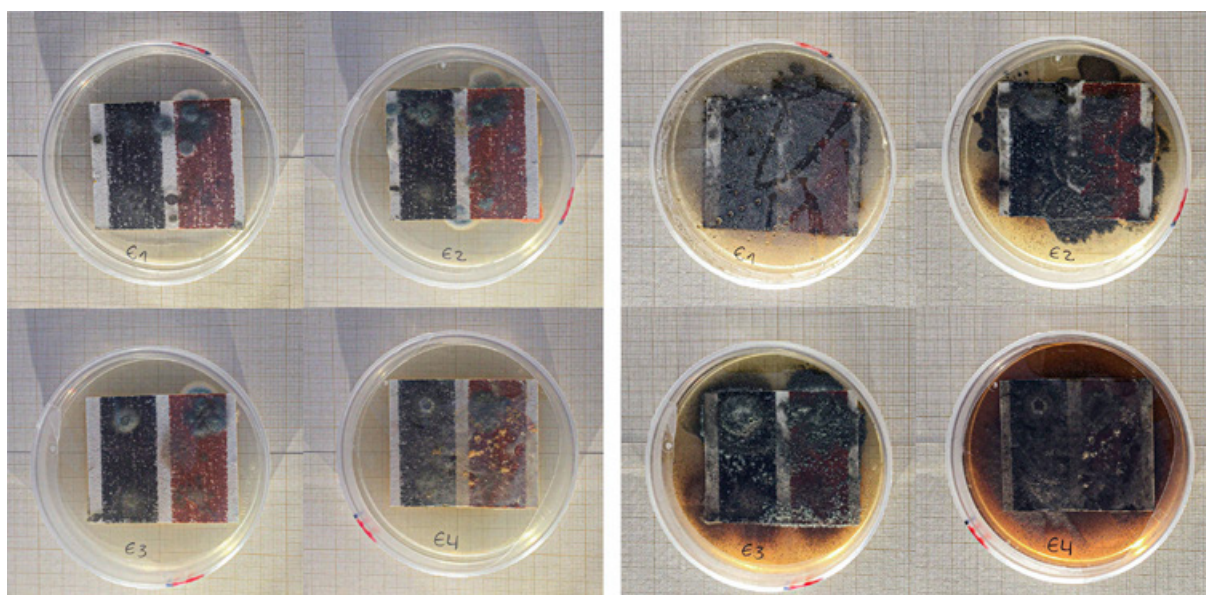


Figure 19 Visuel des éprouvettes exposées aux vapeurs d'eau-éthanol à J8 (gauche) et J57 (droite). © Mathilde Bezon.

La solution d'eau-butanol (10-90 %) s'est avérée également beaucoup plus efficace lors de la deuxième phase. Elle a montré les propriétés fongicides les plus significatives de tous les fumigants, avec des effets résiduels durant au moins deux mois sur trois des quatre réplcats (**fig. 20**).

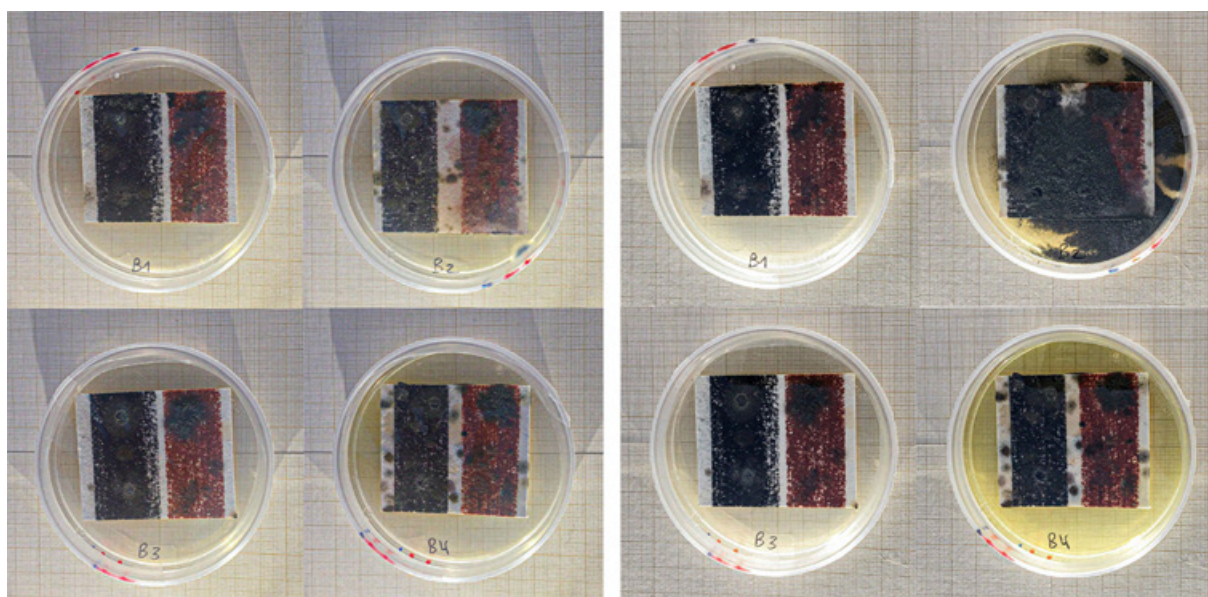


Figure 20 Visuel des éprouvettes exposées aux vapeurs d'eau-butanol à J8 (gauche) et J57 (droite).
© Mathilde Bezon.

Il est possible que les huiles essentielles aient été moins efficaces sur des colonies à un stade de développement plus avancé, là où durant la phase de tests préliminaires les fumigations avaient été effectuées dès leur premier stade de développement (avant la germination). Il pourrait être intéressant dans une autre étude d'approfondir cette question.

La phase de tests approfondis a permis de démontrer l'hypothèse initiale que les traitements à l'aspirateur muséal, lorsqu'ils sont très localisés, ne procuraient aucune efficacité résiduelle. Les mycéliums ont repris leur croissance dans les zones inoculées dès le deuxième jour et au terme de la période de documentation, la surface des éprouvettes était presque intégralement envahie, à l'instar des éprouvettes témoins (**fig. 21**).

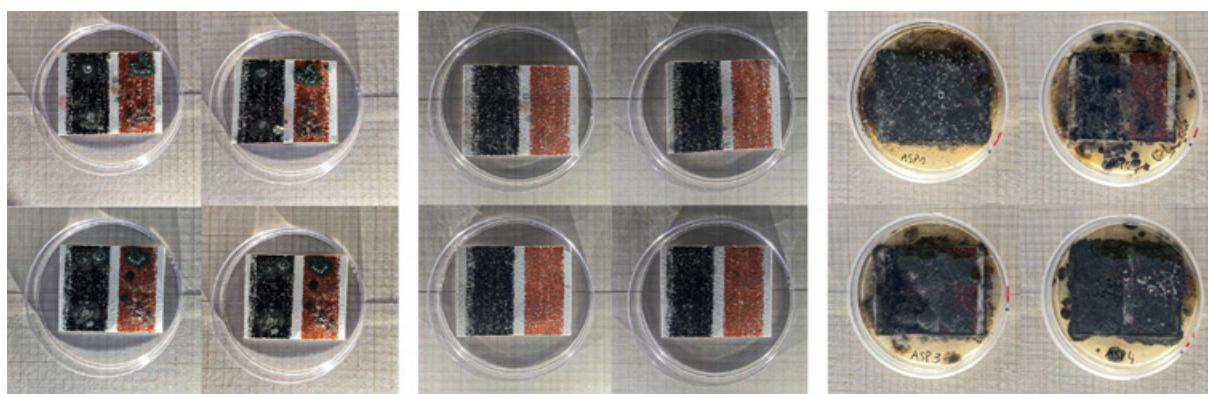


Figure 21 Visuel des éprouvettes traitées à l'aspirateur muséal avant traitement (gauche), après traitement (centre), et à J57 (droite). © Mathilde Bezon.

Il est important tout de même de tempérer ces résultats. En effet, il a pu être constaté dans de nombreux cas que les traitements à l'aspirateur muséal semblaient avoir étendu l'infestation par rapport aux éprouvettes traitées uniquement par fumigation (**fig. 22**). Sur les éprouvettes traitées à l'aspirateur, les colonies étaient néanmoins plus éparées et moins denses. Il a pu être déduit qu'un temps de séchage plus long après l'incubation initiale aurait dû être

mis en place pour assurer un meilleur retrait des mycéliums. En effet, ceux-ci adhéraient relativement fort au support lors des traitements de nettoyage à sec, suggérant que les infestations étaient *a priori* encore très actives. L'action apportée par l'aspirateur a pu également davantage disperser les spores à la surface des *mock-up*. L'observation de ces phénomènes a cependant permis de mettre particulièrement en lumière l'importance de réaliser les traitements de nettoyage à sec sur des infestations parfaitement inactives.

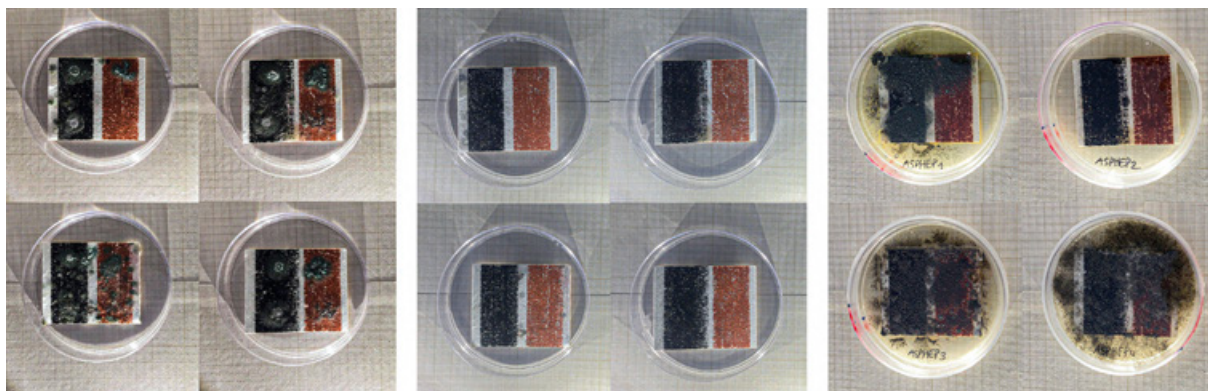


Figure 22 Visuel des éprouvettes traitées à l'aspirateur muséal et exposées aux vapeurs d'huile essentielle de palmarosa avant traitement (gauche), après traitement (centre) et à J57 (droite).

© Mathilde Bezon.

Conclusion

Il ressort de la partie expérimentale de cette recherche que le butanol et l'huile essentielle de palmarosa constituent des pistes solides dans la recherche d'un fumigant efficace contre les micromycètes, avec une toxicité réduite pour l'humain et l'environnement.

Les résultats obtenus durant les deux phases suggèrent également que le géraniol serait un composé déterminant dans l'effet antifongique des deux huiles sélectionnées. L'huile de palmarosa, composée à 80 % de géraniol, s'est avérée en effet beaucoup plus efficace que celle de citronnelle de Java. Il serait ainsi intéressant dans la continuité de cette recherche de pouvoir évaluer les propriétés du géraniol seul et de les comparer avec celles du butanol. Un temps d'exposition et une concentration unique ont été appliqués pour tous les fumigants afin de réduire le nombre de variables, mais il serait intéressant de pouvoir moduler ces facteurs afin de déterminer la quantité et le temps d'exposition minimaux nécessaires à l'inhibition. Les effets des fumigants ont été évalués uniquement sur deux souches, mais pour compléter cette recherche il faudrait pouvoir évaluer le spectre d'activité en testant sur un panel plus large d'espèces.

L'avantage des alcools par rapport aux huiles essentielles est que nous disposons d'un plus grand nombre d'études et de plus de recul sur les effets qu'ils peuvent avoir sur les supports papier. Un aspect essentiel qui n'a pas non plus pu être évalué dans le cadre de cette recherche est l'impact de ces fumigants sur les *media* et la cellulose. L'objectif ici était avant tout d'évaluer les propriétés fongicides et fongistatiques des fumigants mais la continuité logique de la recherche serait de s'assurer de l'innocuité de ces composés sur le long terme.

Les résultats obtenus sur les éprouvettes uniquement fumigées ont permis d'évaluer les propriétés des fumigants de manière plus fiable que ceux obtenus pour les éprouvettes aspirées

et fumigées. Afin de pouvoir confirmer ou infirmer que combiner aspiration et fumigations est efficace, il serait nécessaire de conduire de nouvelles expérimentations. Il serait intéressant de tester également l'impact de la réalisation des traitements de fumigations en amont du nettoyage à sec plutôt qu'après celui-ci.

Cette étude a permis d'ouvrir de nombreuses pistes de recherche dans le domaine du traitement des moisissures dans les pastels et de découvrir des candidats potentiels pour la mise en œuvre de fumigations plus respectueuses pour l'être humain et l'environnement.

Références bibliographiques

- Bacílková B.** (2006), « Study on the effect of butanol vapours and other alcohols on fungi », *Restaurator*, N° 27 (3), p. 186-199.
- Cantigniau A.** (1998), *Comprendre et prévenir l'attaque des toiles peintes par les moisissures*, mémoire de master de Conservation-restauration d'œuvres d'art, École nationale supérieure d'art de la Cambre, 156 p.
- Clarke S.** (2008), « Families of compounds that occur in essential oils », dans *Essential chemistry for aromatherapy*, Churchill Livingstone, p. 41-77.
- Dao T., Dantigny P.** (2011), « Control of food spoilage fungi by ethanol », *Food control*, N° 22 (3-4), p. 360-368.
- Delespaul Q., de Billerbeck V.-G., Roques C.-G., Michel G., Marquier-Viñuales C., Bessière J.-M.** (2000), « The antifungal activity of essential oils as determined by different screening methods », *Journal of essential oil research*, N° 12 (2), p. 256-266.
- Drábková K., Krejčí J., Škrdlantová M., Ďurovič M., Bacílková B.** (2021), « Influence of disinfectants on natural textile fibres », *Restaurator*, N° 42 (2), p. 67-86.
- Massoud M.-A., Saad A.-S.-A., Soliman E.-A., El-Moghazy A.-Y.** (2012), « Antifungal activity of some essential oils applied as fumigants against two stored grains fungi », *Journal of the advances in agricultural researches*, N° 17 (2), p. 296-306.
- Menicucci F., Palagano E., Michelozzi M., Ienco A.** (2023), « Essential oils for the conservation of paper items », *Molecules*, N° 28 (13), p. 1-11.
- Natu K.-N., Tatk, P.-A.** (2019), « Essential oils – prospective candidates for antifungal treatment? », *Journal of essential oil research*, N° 31 (5), p. 347-360.
- Padfield T., Berg H., Dahlstrom N. et al.** (2002), « How to protect glazed pictures from climatic insult », dans ICOM-CC (éd.), *ICOM Committee for Conservation 13th Triennial Meeting (20-27 September 2002)*, Rio de Janeiro, International council of museums, Committee for conservation, p. 80-85.
- Paulus W.** (2004), *Directory of microbiocides for the protection of materials - A handbook*, Dordrecht, Springer, 787 p.
- Pinheiro A.-K.-B., Sequeira S., Macedo M.-L.-R.** (2019), « Fungi in archives, libraries, and museums : a review on paper conservation and human health », *Critical reviews in microbiology*, N° 45 (5-6), p. 686-700.
- Rakotonirainy M.-S., Juchauld F., Gillet M., Othman-Choulak M., Lavedrine B.** (2007), « The effect of linalool vapour on silver-gelatine photographs and book-binding leathers », *Restaurator*, N° 28, p. 95-111.
- Saad N.-Y., Muller C.-D., Lobstein A.** (2013), « Major bioactivities and mechanism of action of essential oils and their components : essential oils and their bioactive components », *Flavour and fragrance Journal*, N° 28 (5), p. 269-279.
- Szczepanowska H.-M., Cavaliere A.-R.** (2003), « Artworks, drawings, prints, and documents—Fungi eat them all! », dans Koestler R.-J. et al. (éd.), *Art, biology, and conservation: biodeterioration of works of art*, New York, Metpublication, p. 128-152.

L'auteur

Mathilde Bezon Conservatrice-restauratrice indépendante spécialisée en arts graphiques, diplômée de l'ENSAV la Cambre à Bruxelles. mathilde@atelierkozo.be

L'IMAGERIE 3D : UN OUTIL D'ANALYSE POUR LA CONSERVATION-RESTAURATION DES ARTS GRAPHIQUES

Anaïs Diez

Résumé

Cet article examine l'intégration croissante des technologies d'imagerie 3D appliquées au patrimoine culturel, un domaine où elles gagnent en importance depuis ces 10 dernières années. Ces technologies permettent de capturer précisément les volumes et l'état de surface des objets, facilitant ainsi leur analyse, leur documentation et leur reproduction. L'accent est mis sur l'application de la numérisation 3D aux œuvres graphiques, notamment à travers un protocole de numérisation pour la restauration d'une peinture chinoise en rouleau, démontrant l'efficacité de cette méthode pour documenter et mesurer les plis. Malgré des défis techniques et financiers, l'imagerie 3D se révèle prometteuse pour l'avenir de la conservation du patrimoine, offrant des solutions précises et non invasives pour documenter les œuvres en deux dimensions, dont relèvent les arts graphiques.

Abstract This article examines the growing integration of 3D imaging technologies in the field of cultural heritage—a domain in which they have gained considerable importance over the past decade. These technologies enable the precise capture of an object's volume and surface condition, thereby facilitating its analysis, documentation, and reproduction. The focus is placed on the application of 3D scanning to graphic works, particularly through a scanning protocol developed for the restoration of a Chinese scroll painting, which demonstrates the method's effectiveness in documenting and measuring the folds. Despite facing technical and financial challenges, 3D imaging proves promising for the future of heritage conservation, offering precise, non-invasive solutions for documenting two-dimensional works as within the graphic arts.

Resumen Este artículo examina la creciente integración de las tecnologías de imágenes 3D aplicadas al patrimonio cultural, un área donde han ganado importancia durante los últimos 10 años. Estas tecnologías permiten capturar con precisión los volúmenes y el estado de la superficie de los objetos, facilitando así su análisis, su documentación y su reproducción. El énfasis se hace en la aplicación de la digitalización 3D a las obras gráficas, en particular a través de un protocolo de digitalización para la restauración de una pintura china enrolladora, lo que demuestra la efectividad de este método para documentar y medir los pliegues. A pesar de los desafíos técnicos y financieros, la imagen 3D es prometedora para el futuro de la conservación del patrimonio, ofreciendo soluciones precisas y no invasivas para documentar obras de dos dimensiones, entre las cuales figuran las artes gráficas.

Mots-clés 3D, numérisation 3D, déformations, plis, arts graphiques, peinture chinoise, rouleau

Introduction

Depuis ces vingt dernières années, le perfectionnement des appareils de numérisation et leur démocratisation ont permis aux technologies 3D de trouver leur place dans de nombreux domaines. Si l'imagerie 3D a rapidement interpellé les sciences médicales et l'industrie, son accessibilité grandissante lui a également permis de s'intégrer au champ du patrimoine culturel. La possibilité de retranscrire précisément la réalité tridimensionnelle d'objets, d'espaces ou de monuments en fait un outil précieux, largement exploité depuis les années 1990 et dont les applications ne cessent d'évoluer ces dix dernières années. Par bien des aspects, l'imagerie 3D permet la diffusion et la valorisation du patrimoine auprès d'un plus large public : les modèles 3D servent de support à l'enseignement, facilitent l'accessibilité du patrimoine aux personnes en situation de handicap par le biais d'expériences tactiles, mais aussi aux plus jeunes par l'insertion de supports visuels plus dynamiques au sein des institutions patrimoniales.

L'imagerie poussée de notre patrimoine bénéficie aussi bien au personnel des musées dans leur travail quotidien qu'aux visiteurs et chercheurs, en produisant des archives numériques durables et inaltérables des objets patrimoniaux, garantissant leur préservation virtuelle et permettant leur exploitation par les générations futures.

L'imagerie 3D en conservation-restauration

Les possibilités offertes par l'imagerie 3D en matière de conservation-restauration du patrimoine sont illimitées. Cependant, les recherches récentes font ressortir trois principaux usages de ces technologies, qui s'intègrent dans la pratique des conservateurs-restaurateurs. Tout d'abord, les différentes techniques de numérisation 3D en font un outil d'analyse et d'investigation précieux. Obtenir un modèle 3D haute résolution d'une œuvre ou d'un monument historique permet de mener toutes sortes d'analyses : métriques, volumétriques ou seulement visuelles, sans aucune manipulation réelle de l'objet. Les modèles 3D servent également de supports visuels pour la documentation des œuvres, permettant d'archiver des données multimédia qui ne proviennent pas nécessairement de la 3D, mais qui sont produites dans le cadre d'études scientifiques (relevés graphiques 2D, photographies, UV, IR, multispectral). Ils servent de support pour cartographier toutes les données recueillies sur l'œuvre au cours des différents projets scientifiques dont elle a fait l'objet (Scopigno, 2003; Acke *et al.*, 2021). Enfin, la numérisation 3D permet bien évidemment à elle seule de reproduire tout ou partie d'un objet, servant de source pour la reproduction d'éléments manquants, que ce soit de manière uniquement virtuelle (Tucci, 2017; Brown, 2000) ou physique, par le biais de l'impression 3D (Antlej, 2011; Acke, 2019; Zhou, 2023).

Une étude scientifique, menée par le groupe de recherche ARCHES de la faculté des Sciences du design de l'université d'Anvers, s'est tout particulièrement intéressée à l'utilisation des technologies 3D par les professionnels de la conservation-restauration (Acke *et al.*, 2021). Cette étude démontre le grand intérêt de notre profession pour l'imagerie 3D, avec plus de 75 % de professionnels intéressés et près de 44 % d'utilisateurs parmi le groupe d'universitaires et d'étudiants interrogés. Une proportion bien majoritaire des recherches publiées concerne les objets en volume, dans des spécialités telles que la céramique, le verre et la sculpture. À ce jour, peu de publications portent sur des études menées sur des œuvres en 2D telles que les arts graphiques, la photographie et la peinture. Ces lacunes dans des domaines

où l'utilisation de la 3D est sans doute moins intuitive relèvent d'une méconnaissance des possibilités d'application de ces technologies à nos domaines respectifs de compétences. L'idée qu'il s'agit de technologies inaccessibles, le coût des équipements et finalement la complexité des technologies 3D dans leur mise en œuvre et leur exploitation sont autant de raisons qui excluent ces nouvelles technologies de certains domaines du patrimoine. Dans les études mentionnées, l'imagerie est toujours réalisée par une tierce personne (une entreprise d'imagerie ou un laboratoire), ce qui l'exclut instinctivement de la pratique d'un conservateur-restaurateur indépendant. De plus, il n'existe aucun cadre d'apprentissage pour leur usage par des professionnels de la conservation-restauration.

Les techniques de numérisation 3D

L'imagerie 3D est un vaste domaine regroupant diverses technologies capables de reproduire la réalité tridimensionnelle d'objets, d'espaces ou de monuments. Les techniques de numérisation 3D applicables pour le patrimoine culturel sont variées, parfois mixtes, et offrent plusieurs gammes de résolution, qui s'adaptent aux caractéristiques physiques des objets et à leur sensibilité. La surface des objets anciens étant particulièrement sensible aux frottements et aux manipulations, il est impératif que les procédés mis en œuvre pour acquérir les données 3D tiennent compte de ces fragilités.

Les scanners laser (temps de vol ou triangulation)

Le scanner laser 3D utilise un laser pour balayer la surface de l'objet. Le laser émet une lumière qui se réfléchit sur l'objet et un capteur mesure le temps que met la lumière à revenir au scanner (temps de vol) ou l'angle de réflexion (triangulation). Ces données sont utilisées pour calculer les distances précises entre le scanner et différents points sur la surface de l'objet, créant ainsi un nuage de points en 3D. Les scanners à triangulation laser peuvent capturer des détails extrêmement fins, souvent de l'ordre du micromètre. Cependant leurs principaux inconvénients sont le coût matériel et l'encombrement de l'équipement, qui le rend difficile à transporter et peut poser des problèmes d'accès dans certains espaces patrimoniaux. Enfin, ils sont relativement sensibles aux conditions environnementales telles que la lumière ambiante et les surfaces réfléchissantes.

La photogrammétrie

La photogrammétrie est la plus ancienne des méthodes mentionnées ici. Le procédé consiste à prendre de nombreuses photographies d'un objet sous différents angles, puis à compiler et aligner ces clichés à l'aide de différents algorithmes de traitement d'images. Un logiciel utilise ces photos pour identifier des points communs entre les images et reconstruire un modèle 3D en en formant un nuage de points. Celui-ci est ensuite maillé et converti en volume. Facile d'accès, cette méthode peut être réalisée avec un appareil photo ou un simple smartphone auquel est intégré un logiciel de traitement d'images, ce qui la rend aussi peu coûteuse par rapport aux autres techniques. L'équipement nécessaire est léger, facile à transporter et idéal dans un contexte *in situ*. Néanmoins, malgré ses avantages, elle présente aussi plusieurs inconvénients. La précision de la photogrammétrie dépend de la qualité des photos et du logiciel utilisé, mais demeure souvent inférieure à celle des scanners laser et à lumière structurée. Enfin, la reconstruction de modèles haute définition se faisant à partir

de la compilation de nombreux clichés, les ressources informatiques et le temps nécessaire peuvent être démesurés.

Les scanners à lumière structurée

Similaires aux dispositifs des numériseurs par triangulation laser, les numériseurs à lumière structurée projettent sur l'objet une lumière dont on connaît les caractéristiques physiques. Il s'agit généralement d'un motif calibré de lumière blanche ou bleue, telles que des bandes, des lignes, une grille ou une matrice de points. Les capteurs enregistrent les déformations du motif lumineux provoquées lorsque celui-ci rencontre les courbes, les dépressions ou les reliefs de l'objet. La caméra enregistre la réflexion lumineuse en milliers de points par seconde, et le capteur calcule la distance de chaque point dans le champ de vision. Les coordonnées précises de tous ces points nous fournissent un nuage de points, plus ou moins dense en fonction de la précision du capteur, que le logiciel de traitement des données va pouvoir convertir en volume. Cette méthode offre une des meilleures définitions possibles et peut capturer des détails fins, comparables à ceux des scanners laser. Il s'agit également d'une méthode rapide, car l'acquisition des données 3D peut varier de quelques minutes à seulement quelques heures pour les objets les plus volumineux. Les systèmes de numérisation sont également compacts, faciles à transporter et moins coûteux que les systèmes à triangulation laser. En revanche, ces systèmes possèdent le défaut similaire d'être particulièrement sensibles aux conditions environnementales.

Chacune de ces techniques présente des avantages et des inconvénients qu'il convient de prendre en considération selon les besoins spécifiques du projet de numérisation, les caractéristiques physiques de l'objet étudié et l'objectif d'exploitation du modèle.

L'imagerie 3D pour les arts graphiques

Si les publications sont nombreuses sur l'utilisation de ces technologies en conservation-restauration, elles restent cependant axées sur leur application aux objets en volume (3D) et ne fournissent aucune information pratique permettant leur utilisation sur des œuvres en deux dimensions. Font exception quelques articles dont les problématiques très spécifiques ne permettent pas de généraliser un protocole (Galushkin *et al.*, 2019) ou dont les sources sont trop anciennes et relèvent de problèmes liés à des technologies qui paraissent aujourd'hui obsolètes.

La numérisation de manuscrits et de documents graphiques est pourtant une pratique courante au sein des bibliothèques, des archives et des institutions abritant des collections rares. Le but de ces campagnes régulières de numérisation est de préserver, mais également de diffuser sous format numérique le contenu de ces œuvres, tout en limitant au maximum la manipulation de l'objet original et les altérations potentielles qui en découlent. Cependant, ces campagnes ne concernent généralement que les rectos des documents et sont principalement réalisées au moyen de scanners traditionnels 2D et de systèmes de prise de vue multizone. Ces numérisations permettent en effet d'obtenir une image 2D en très haute résolution de l'œuvre, d'une fidélité au support et aux couleurs bien supérieure à la photographie standard. Ce type de numérisation est bien adapté à l'analyse iconographique et historique des documents mais présente ses limites quant à leur analyse scientifique et matérielle. Dans les années 2000 le constat avait déjà été fait que les techniques de numérisation classique

n'étaient pas toujours adaptées aux documents plus anciens, sur lesquels le temps et un stockage parfois inadapté auraient laissé des traces (Brown, 2000). De plus, les aspérités de surface ne sont pas restituées, de même que les reliefs et altérations du support (gondolements, déchirures, plis, déformations). Les épaisseurs des matériaux constitutifs sont également difficilement perceptibles, rendant ces procédés inadaptés pour l'étude de la matérialité des œuvres. Ces numérisations 2D ne permettent donc pas d'archiver et de documenter de manière exhaustive l'état physique de l'œuvre à un instant T et d'en suivre les dégradations potentielles au fil du temps.

Les méthodes traditionnelles de documentation et de mesure sont lentes, chronophages et présentent des limitations évidentes (subjectivité de l'observateur, imprécisions, risque pour l'objet). Dans le cas d'œuvres sur supports organiques, par nature sensibles à l'environnement et aux sollicitations mécaniques répétées, une prise de mesures figée dans le temps et uniquement virtuelle n'offre que des avantages. La numérisation 3D surfacique permet de scanner précisément un objet, une forme, sa texture comme ses reliefs, et d'exploiter le modèle numérique obtenu pour différents examens. Cela, au même titre que pour les objets en volume, présente plusieurs intérêts dans le domaine des arts graphiques.

Étude de cas : la conservation-restauration d'une peinture chinoise en rouleau

Dans le cadre d'un projet d'étude à l'Institut national du patrimoine, nous avons sélectionné l'imagerie 3D comme outil d'analyse comparatif afin d'étudier l'efficacité de différents traitements de mise à plat. L'objet de cette étude était une peinture chinoise horizontale, à l'encre et couleurs sur soie de près de 7 mètres de long, conservée au musée national des Arts asiatiques - Guimet. Elle a fait l'objet d'une étude historique, scientifique et technique, ainsi que d'un projet de conservation-restauration à l'Institut national du patrimoine, dans lequel s'inscrit cette recherche (Diez, 2022). Cette œuvre présentait des altérations caractéristiques des peintures asiatiques en rouleaux (**fig.1**), qu'elles soient sur soie ou papier, et dont la morphologie était similaire aux altérations du plan que l'on peut rencontrer sur un grand nombre de documents graphiques (déformations, plis, cassures).



Figure 1 Vues de détail des plis cassés altérant la peinture. © Anaïs Diez.

Afin d'élaborer un protocole de restauration adapté aux défis spécifiques posés par cette œuvre, plusieurs sujets ont été abordés, tels que la mise en place d'une chaîne opératoire destinée à résorber ses nombreux plis (Diez, 2024). Pour suivre l'évolution de ces plis et

obtenir des données sur l'efficacité des différents traitements de mise à plat, nous avons choisi d'explorer le potentiel de la numérisation 3D surfacique par le biais de mesures ciblées. Dans ce contexte, l'utilisation de la numérisation 3D servait un double intérêt : répondre à la problématique de conservation-restauration posée par l'objet qui motivait cette recherche et déterminer la pertinence de l'imagerie 3D pour mesurer la déformation d'œuvres graphiques.

Étude des plis par des mesures ciblées

Plus de 430 plis et cassures pouvaient être observés sur toute la longueur de la peinture, constituant un problème majeur pour sa conservation et sa lisibilité. Pour tester diverses combinaisons de traitements de mise à plat et de stabilisation, un protocole expérimental a été mis en œuvre sur plusieurs séries d'éprouvettes. Ces éprouvettes étaient constituées des mêmes matériaux que l'œuvre originale¹, avec des profils de plis simplifiés mais représentatifs des plis moyens rencontrés sur la peinture (fig. 2). Pour évaluer la faisabilité et la précision de la numérisation 3D dans ce contexte, ainsi que pour standardiser le procédé pour des œuvres présentant des problématiques similaires, le protocole de numérisation s'est principalement concentré sur ces séries d'éprouvettes.

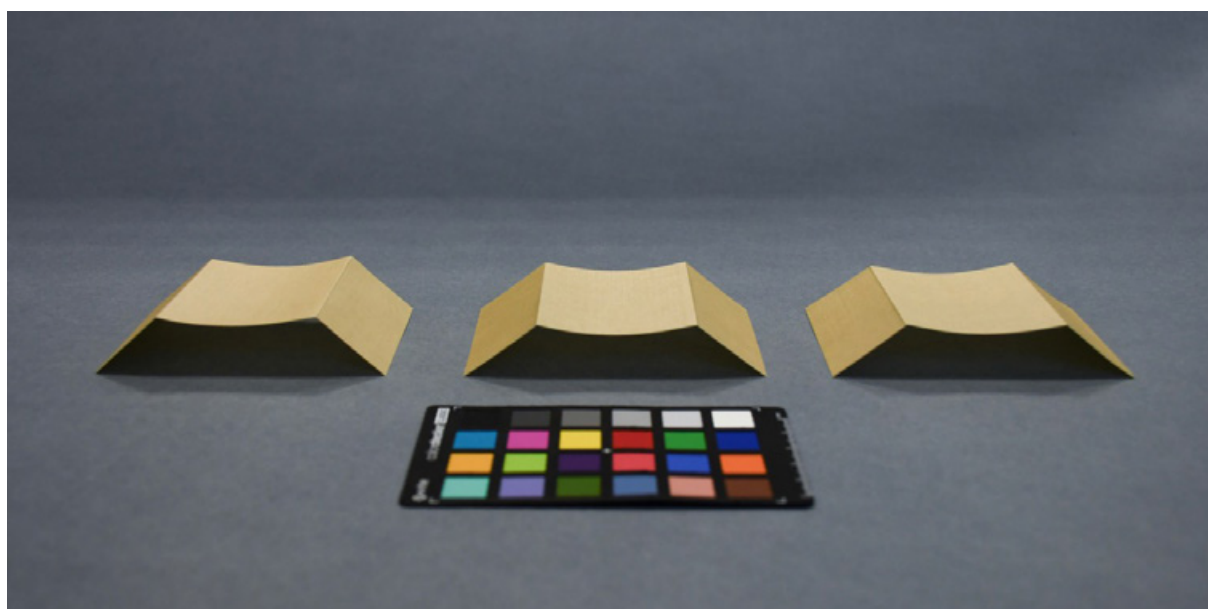


Figure 2 Vue de profil des éprouvettes en soie doublées de papier et pliées avant traitement.

© Anaïs Diez.

Matériel et méthode

Numériseur à lumière structurée

Pour numériser les éprouvettes avant et après traitement de mise à plat, nous avons utilisé un scanner à lumière structurée : le modèle Einscan 2X Pro de SHINING 3D®, disponible au laboratoire de l'Institut national du patrimoine. Ce scanner, doté d'une précision de 0,1 mm et d'une vitesse d'acquisition de 1 500 000 points par seconde, permet d'obtenir des données

¹ Vieillis artificiellement.

3D de manière rapide et extrêmement précise, même employé en mode « simplifié » (mode rapide manuel). Une caméra complémentaire peut être intégrée au système pour acquérir l'image ou la texture de l'objet scanné, ce qui est normalement réalisé en complément par la photogrammétrie à corrélation dense. Ce procédé de numérisation permet également l'utilisation de marqueurs cibles facilitant la captation des éléments par le scanner. Ces capteurs sont particulièrement utiles lorsqu'il devient difficile de distinguer l'objet du fond ou de la table, comme cela peut être le cas pour des dessins en raison de leur planéité.

Logiciels et post-production

Un premier traitement des données est réalisé avec le logiciel associé à la machine, EXScan Pro, permettant le nettoyage des aberrations, la sélection des points à conserver et la génération du nuage de points. Le maillage du nuage de points est opéré sans optimisation excessive pour éviter le lissage des aspérités de surface, qui nous intéressent dans le cadre de cette étude. Le logiciel permet ensuite d'enregistrer le modèle sous des formats standard (STL, OBJ, PLY, ASC, 3MF), exploitables par tous les logiciels de post-production. Pour son interface intuitive et sa large gamme de mesures, nous avons sélectionné Autodesk Meshmixer® pour la suite du protocole. Ce logiciel intègre facilement un plan numérique sous les éprouvettes et permet d'effectuer de nombreuses mesures ciblées. D'autres logiciels avec des fonctionnalités similaires existent, laissant la possibilité à chacun de choisir l'outil qui correspond à son niveau de compétence et à l'objectif de sa recherche.

Acquisition des données

Numérisation

La numérisation des éprouvettes a été réalisée avec le scanner sur un fond gris contrastant, sur lequel l'installation de capteurs a facilité la distinction du plan. Le scanner est calibré selon les instructions du fabricant, avec des ajustements d'éclairage pour optimiser la lisibilité. Une distance minimale de 0,2 mm entre les points du maillage a été sélectionnée : il s'agit de la précision maximale que peut atteindre la machine. La numérisation est effectuée en quelques secondes en suivant l'acquisition du nuage de points sur l'écran de l'ordinateur, et chaque modèle numérique est nettoyé sur EXScan Pro. Une découpe distinctive en forme de triangle est réalisée sur l'éprouvette pour en rappeler le sens lors des manipulations entre les différents logiciels (**fig. 3**). La surface plane sous l'éprouvette, identifiée par le scanner, est supprimée au moment du nettoyage pour être remplacée par un plan virtuel. Ce plan est inséré dans le logiciel Meshmixer®, sous chaque éprouvette, au niveau des points de contact de l'éprouvette avec la table. Bien que relativement chronophage, au vu du nombre d'éprouvettes, cette étape permet d'avoir deux objets distincts dans l'espace tridimensionnel, facilitant ainsi la réalisation de mesures ciblées entre les deux objets.

Prise de mesures

Les mesures « point-à-point » sont souvent nécessaires lorsqu'on étudie des objets et peuvent être simplement calculées à partir d'un modèle 3D en utilisant une fonction de mesure linéaire. Plusieurs mesures, exprimées au millièème de millimètre, sont prises entre le plan et le sommet des plis à chacune de leurs extrémités (**fig. 3**). Une fois les réglages effectués

sur Meshmixer®, la mesure est réalisée dans l'axe vertical entre les deux points sélectionnés respectivement à la surface des deux objets. Afin d'assurer la précision et la fiabilité des mesures, celles-ci sont effectuées trois fois pour chaque point sur le modèle 3D de chaque éprouvette, soit 144 valeurs pour l'ensemble des séries². Les valeurs avant traitement sont comparées et confirment l'homogénéité des séries d'éprouvettes, dont la hauteur des plis varie seulement de 0,01 mm avant traitement, permettant d'en tirer des moyennes exploitables.

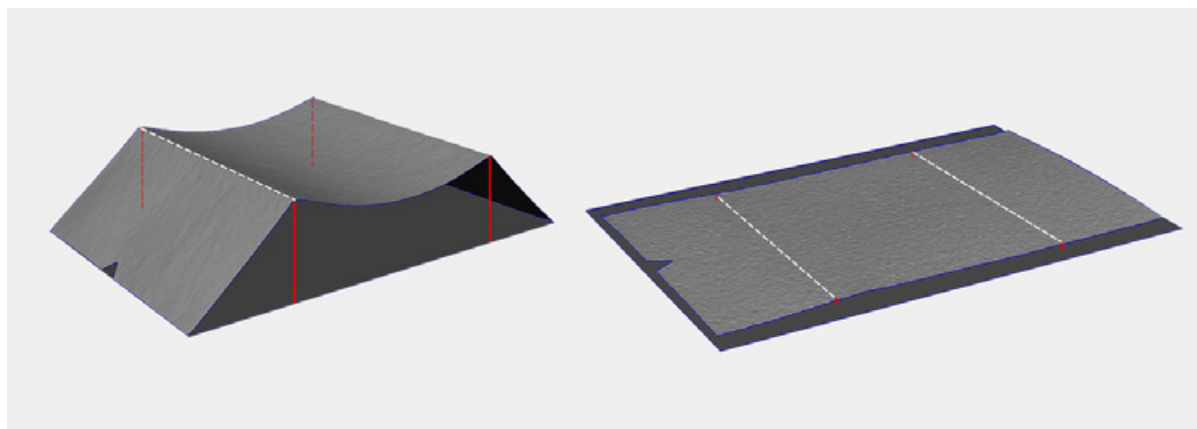


Figure 3 Modèle 3D d'une éprouvette numérisée avant et après traitement. En rouge : mesures linéaires effectuées sur Meshmixer. © Anaïs Diez.

Le protocole est ensuite réalisé de la même façon sur les éprouvettes à l'issue des différentes combinaisons de traitement, et les résultats sont comparés afin de sélectionner la méthode la plus efficace pour résorber les plis. Grâce à l'automatisation de la prise de mesures entre le plan virtuel et les éprouvettes, des valeurs métriques peuvent être acquises sur la hauteur des plis malgré la planéité obtenue après traitement et l'imperceptibilité de la déformation résiduelle (**fig. 3**).

Résultats

La différence entre les moyennes de chaque point avant et après traitement, pour chaque système de mise à plat étudié, est exprimée en pourcentage (%) de résorption de la déformation. Un taux de 100 % de résorption correspond au niveau du plan virtuel intégré dans le logiciel Meshmixer®. Parmi les nombreux profils d'éprouvettes obtenus, seuls ceux démontrant une résorption des plis à hauteur de 98 % ont été retenus (**fig. 4**). Les profils démontrant une réduction des plis au-delà de 100 % (**fig. 4**) traduisent une compression trop importante des plis et la formation d'une contrainte dans une zone adjacente (tuilage), ils ont par conséquent été écartés. Cette comparaison, qui n'aurait pas été possible avec des outils de mesure classiques, nous fournit des données objectives pour sélectionner la méthode de traitement optimale pour la restauration de la peinture (Diez, 2024).

² Données brutes disponibles dans Diez, 2022, annexe II, p. 266.

	Systèmes de mise à plat étudiés					
	S1	S1R	S1RP	S2	S2R	S2RP
Moyennes (AVT)	18,352		18,390	18,302		19,532
Moyennes (APT)	-5,190	-4,369	-6,080	0,520	-1,889	0,444
Résorption des plis (%)	128%	124%	133%	97%	110%	98%

Figure 4 Tableau de résorption des plis (%) à partir des valeurs moyennes mesurées sur les éprouvettes avant et après traitement, en fonction des différents systèmes de mise à plat étudiés. © Anaïs Diez.

Numérisation de la peinture

En nous basant sur ces résultats, nous avons choisi d'appliquer le protocole de numérisation 3D à une section du rouleau, la plus représentative des différents niveaux de pli et de cassure visibles sur toute sa longueur (**fig. 5**). La numérisation, effectuée avant et après traitement, a offert une meilleure compréhension des altérations et permis de documenter la restauration en suivant visuellement l'évolution des déformations. Bien que les mesures linéaires n'aient pas été réalisées comme sur les éprouvettes, car ce n'était pas l'objectif principal de l'étude, des essais ont été réalisés confirmant ainsi leur faisabilité.

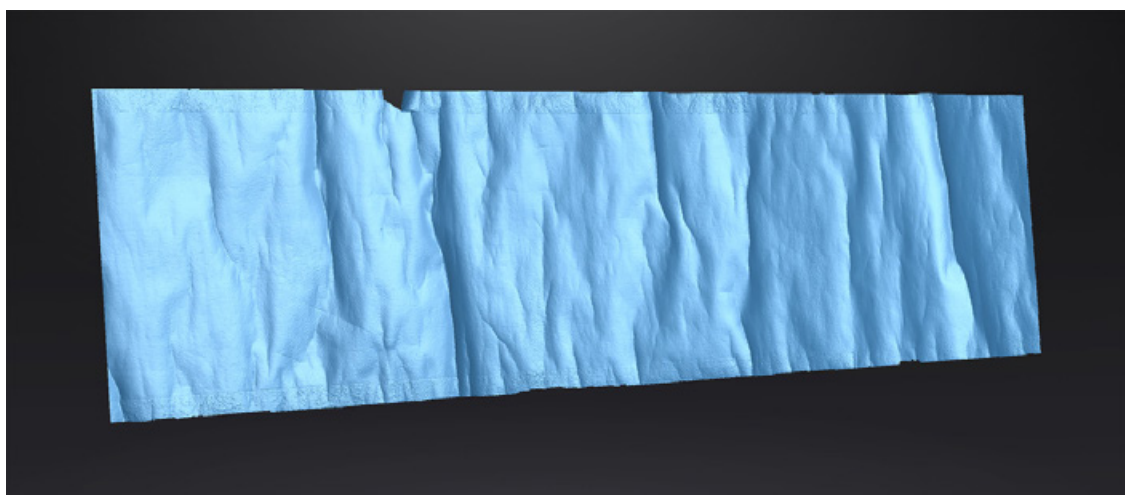


Figure 5 Numérisation 3D d'une section de la peinture représentative de ses altérations structurelles (sans couleurs). © Anaïs Diez.

La numérisation 3D post-traitement a offert une vision claire de la résorption des déformations, que ce soit avec ou sans représentation des couleurs. La texture et les motifs de la peinture pouvant parfois induire en erreur sur l'état réel de conservation structurelle, la numérisation sans couleurs fournit une lecture objective de l'état de la déformation (**fig. 6**) et de l'efficacité du traitement. La suppression de l'hétérogénéité de couleur, qu'il s'agisse des matériaux naturels ou du bruit visuel créé par les scènes peintes, a grandement amélioré la lisibilité des volumes (**fig. 5 et 6**). Enfin, comme la version 3D de cette section reflète aussi fidèlement son état de conservation, elle pourra être utilisée ultérieurement pour détecter toute reprise éventuelle des déformations.



Figure 6 Numérisation 3D d'une section de la peinture (fig. 5) avec superposition de l'image.
© Anaïs Diez.

Conclusion

L'imagerie 3D a prouvé son efficacité et sa polyvalence dans le domaine de la conservation-restauration des arts graphiques. En permettant une analyse détaillée et non invasive des œuvres, elle offre aux conservateurs-restaurateurs des outils précieux pour documenter, étudier et restaurer les objets patrimoniaux avec une précision inédite. Les études de cas, comme celle de cette peinture chinoise, montrent clairement l'impact positif de ces technologies sur la compréhension et la préservation des œuvres.

En facilitant la mesure et la comparaison de déformations avant et après traitement, l'imagerie 3D permet non seulement de documenter des altérations plus ou moins superficielles mais aussi de nous guider vers des choix de restauration plus adaptés. La numérisation 3D produit une vue d'ensemble de l'état de l'œuvre (informations structurales et surfaciques) et fournit une archive numérique plus complète et fidèle que la photographie.

L'imagerie 3D sur les œuvres en deux dimensions, bien qu'encore à ses débuts, semble être une voie prometteuse pour les institutions patrimoniales qui souhaitent documenter plus en détail leurs collections, tout en limitant la manipulation et la fragilisation des œuvres.

Malgré les défis techniques et financiers associés à l'adoption de ces technologies, il est évident que leur utilisation va croissant, soutenue par des initiatives nationales et internationales. La photogrammétrie, les scanners laser et à lumière structurée, bien que différents dans leurs applications et leur précision, démontrent chacun des avantages selon les besoins spécifiques de chaque projet de restauration.

Références bibliographiques

Acke L., De Vis K., Verwulgen S., Verlinden J. (2021), « Survey and literature study to provide insights on the application of 3D technologies in objects conservation and restoration », *Journal of cultural heritage*, Vol. 49, p. 272-28.

Acke L., De Vis K., Verwulgen S., Verlinden J. (2019), « Compiling a digital toolbox : the use of 3D technology for the restoration of intricate artworks », dans ICOM-CC (éd.), *Recent Advances in glass and ceramics conservation 2019*, London, Interim Meeting of the ICOM-CC Working Group, p. 211-216.

Antlej K., Erič M., Šavnik M., Županek B., Slabe J., Battestin B. (2011), « Combining 3D technologies in the field of cultural heritage : three case studies », dans *The 12th International Symposium on virtual reality, archaeology and cultural heritage VAST*, Prato, Italy, p. 1-4.

Brown M., Seales W.B. (2000), « Beyond 2D images : effective 3D imaging for library materials », dans ACM (éd.), *Proceedings of the fifth ACM conference on Digital libraries*, San Antonio, Association for Computing Machinery (ACM), p. 27-36.

Diez A., Gilot S., Lee V., Zaleski V. (2024), « Une chaîne de traitement pour la mise à plat et la stabilisation structurelle des peintures asiatiques en rouleaux », *Support tracé*, N° 24, p. 98-107.

Diez A. (2022), *Au fil de l'eau. Étude et conservation-restauration d'une peinture traditionnelle chinoise* (Remontée du fleuve lors du festival Qingming, Paris, musée national des Arts asiatiques - Guimet). *Optimisation d'une chaîne de traitement pour la mise à plat et la stabilisation structurelle d'un rouleau horizontal de sept mètres en soie et papier*,

évaluée par imagerie 3D, mémoire de master de Restauration du patrimoine, Institut national du patrimoine, 313 p.

Galushkin A., Gonobobleva S., Parfenov V., Zhuravlev A. (2019), « Application of 3D scanning for documentation and creation of physical copies of estampages », *Restaurator. International Journal for the preservation of library and archival material*, N° 40, p. 1-14.

Scopigno R., Cignoni P., Callieri M., Ganovelli F., Impoco G., Pingi P., Ponchio F., Salimbeni R. (2003), « Using optically scanned 3D data in the restoration of Michelangelo's David », dans SPIE (éd.), *Proceedings Optical Metrology for arts and multimedia*, Munich, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE), p. 44-53.

Tucci G., Bonora V., Conti A., Fiorini L. (2017), « High-quality 3D models and their use in a cultural heritage conservation project », dans CIPA (éd.), *The International Archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, Vol. XLIII-2/W5, 2017, 26th International CIPA Symposium 2017, Ottawa, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS), p. 687-693.

Zhou Z., Aura-Castro E., Nebot Díaz E. (2023), « 3D printing technology and its application in the conservation and restoration of porcelain », dans CIPA (éd.), *Documenting, understanding, preserving cultural heritage : humanities and digital technologies for shaping the future*, 29th CIPA Symposium Florence, Italy, *Annals of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, Vol. X-M-1-2023, p. 25-30.

L'auteur

Anaïs Diez Conservatrice-restauratrice d'œuvres et documents graphiques, anaisdiez.cr@gmail.com

AU SERVICE DES COLLECTIONS PATRIMONIALES UNIVERSITAIRES DE MONTPELLIER : L'ATELIER DE CONSERVATION-RESTAURATION DU SERVICE DE COOPÉRATION DOCUMENTAIRE INTERUNIVERSITAIRE

Anne-Sophie Gagnal

Résumé

Le patrimoine universitaire de Montpellier est exceptionnel, son patrimoine documentaire en particulier. Pour préserver ces collections prestigieuses, en 2021, les deux universités de Montpellier ont mutualisé (au sein du Service de coopération documentaire interuniversitaire) la gestion des ateliers de conservation-restauration et de numérisation-photographie créés par l'ancienne Bibliothèque interuniversitaire.

Dispositif aujourd'hui rare au sein des universités françaises, l'atelier de conservation-restauration a fêté en 2023 ses 40 ans. L'article présentera la construction d'une politique de conservation des collections reposant sur la présence et la montée en compétence de cet atelier, bien au-delà d'un simple opérateur de réparations.

Ces deux dernières décennies, l'accent a été mis sur l'importance cruciale de la conservation préventive, la priorisation des opérations, le degré d'intervention et la documentation des traitements. Les évolutions mises en œuvre ont pour objectifs d'assurer l'accessibilité aux collections, leur valorisation et leur transmission dans un dialogue entre conservateurs et restaurateurs.

Abstract Montpellier's academic heritage is exceptional, particularly its documentary heritage. To preserve these prestigious collections, in 2021 the two universities of Montpellier shared (within a merged university documentation framework, the Service de coopération documentaire interuniversitaire) the management of the conservation-restoration and digitization-photography workshops established by the former Interuniversity Library

Today a rarity among French universities, the conservation-restoration workshop celebrated its 40th anniversary in 2023. This article outlines the development of a collections conservation policy based on the presence and growing expertise of this workshop, far surpassing the role of a mere repair operator.

Resumen La herencia universitaria de Montpellier es excepcional, su patrimonio documental en particular. Para preservar estas prestigiosas colecciones, en 2021, las dos universidades de Montpellier han compartido (dentro del servicio de Cooperación documental Interuniversitaria) la gestión de los talleres de conservación-restauración y digitalización-fotografía creados por la antigua Biblioteca interuniversitaria.

Sistema raro hoy en las universidades francesas, el Taller de Conservación-restauración celebró su 40 aniversario en 2023. El artículo presentará la construcción de una política de conservación de las colecciones basada en la presencia y el aumento de competencia de este taller, mucho más allá de un operador de reparaciones simples.

Estas últimas dos décadas, el énfasis se ha puesto en la importancia crucial de la conservación preventiva, la priorización de las operaciones, el grado de intervención y la documentación de los tratamientos. Los cambios implementados están destinados a garantizar el acceso a las colecciones, su valoración y su transmisión en un diálogo entre conservadores y restauradores.

Mots-clés patrimoine documentaire, politique patrimoniale documentaire, universités, atelier de conservation-restauration, déontologie, conservation préventive, conservation curative, restauration, intervention minimaliste, degré d'intervention, traçabilité, histoire des collections, histoire de la conservation-restauration, montée en compétence, procédure de traitement, formation, sensibilisation

C'est par l'appel à communication de l'ARAAFU pour son 7^e colloque, avec ces quelques mots « nouvelles approches de problèmes parfois anciens : visions différentes, réponses nouvelles, développement soutenable » que l'idée a germé à Montpellier de proposer une rapide rétrospective du fonctionnement de l'atelier de conservation-restauration du service de Coopération documentaire interuniversitaire (SCDI).

Si cet article ne présente *a priori* pas de démarche innovante, il propose de faire le bilan des changements opérés ces quinze dernières années, proposant une vision différente, une évolution dans le traitement de conservation des collections patrimoniales documentaires des universités de Montpellier. Il met en lumière une politique de conservation qui s'est modifiée, en s'appuyant sur la présence d'un atelier de conservation-restauration, pour transmettre un patrimoine écrit et graphique de très grande valeur mais aussi extrêmement fragile.

Le patrimoine universitaire montpelliérain, témoin d'une riche histoire

Une ville modelée par l'histoire de ses universités

Ville devenue emblématique du sud de la France, l'histoire de Montpellier s'est écrite depuis le Moyen Âge avec celle de ses universités. C'est en 1220 qu'est fondée l'école de médecine de Montpellier grâce au cardinal Conrad d'Urach, légat apostolique du Pape Honorius III, qui lui concède ses premiers statuts.

À partir de cette date, la vie universitaire s'organise à travers la ville, la façonnant par des lieux et des collections emblématiques toujours visibles :

- l'amphithéâtre d'anatomie Saint-Côme (actuelle chambre de commerce);
- le bâtiment historique de la faculté de Médecine, ancien palais épiscopal situé à côté de la cathédrale, où se trouve le conservatoire d'anatomie (probablement l'un des lieux les plus connus de Montpellier);
- le jardin des Plantes, créé au XVI^e siècle par Pierre Richier de Belleval;
- l'herbier constitué de plus de 6 millions de planches, rassemblées dans un lieu dédié construit au début du XIX^e siècle;
- le droguier, constitué à partir du XVI^e siècle, et le musée de la pharmacie Albert Ciurana », conservés à la faculté de Pharmacie;
- ou encore le musée des moulages, fondé en 1890 et constitué à partir d'une collection unique de moulages antiques utilisés pour l'enseignement de l'archéologie. À cet ensemble s'ajoutent des collections photographiques et documentaires relatives à des campagnes de fouilles menées par les archéologues montpelliérains.

La plupart de ces lieux est encore gérée aujourd'hui par l'une des deux universités de Montpellier : l'université Paul-Valéry Montpellier 3 et l'université de Montpellier.

La toponymie actuelle de la ville est aussi façonnée par cette histoire universitaire. Hôpital Lapeyronie, rues Chaptal, Magnole ou de Rouville, avenues Buisson ou Flahaut, la poste Rondelet sont autant d'hommages à ces éminents scientifiques qui ont fait la réputation universitaire de Montpellier dans des domaines variés comme la médecine, la botanique, la géologie, l'agriculture ou encore l'archéologie.

C'est donc tout un patrimoine immobilier et mobilier qui a servi à l'enseignement qui est aujourd'hui conservé.

Un patrimoine documentaire exceptionnel

À la source de la science et l'enseignement, c'est la constitution ancienne d'un patrimoine documentaire exceptionnel, qui s'organise autour des bibliothèques et, notamment, celle de Médecine, qui fait la singularité de Montpellier. À partir de la fin du XVIII^e siècle, de grands ensembles documentaires sont constitués, d'abord par les dons de ses enseignants, puis suite aux confiscations révolutionnaires et, enfin, par la production scientifique locale fournie par les différentes facultés.

Aujourd'hui ils se trouvent répartis principalement dans les cinq bibliothèques universitaires (BU) de Montpellier : Pharmacie, Lettres, Langues et Sciences humaines, Droit (qui gère également la bibliothèque de l'académie des Sciences et Lettres de Montpellier), Sciences et, bien entendu, la plus connue pour ses fonds documentaires, la bibliothèque universitaire historique de Médecine (BUHM). Elle conserve près de 1 000 manuscrits, plus de 300 incunables et plusieurs centaines de milliers d'ouvrages anciens; elle est aussi liée à un musée de dessins, le musée Atger, où se trouvent près de 1 000 dessins du XVI^e au XVIII^e siècle¹.

Lors d'une grande enquête menée en 2017 par la bibliothèque interuniversitaire (BIU) de Montpellier (présentée plus loin dans l'article), une estimation réalisée évaluait à environ 5 kilomètres linéaires les collections patrimoniales documentaires et graphiques conservées dans les BU.

Parmi les documents qui ont fait la réputation de Montpellier vous trouverez des manuscrits comme le *Psautier* dit de Charlemagne du VIII^e siècle², le *Chansonnier* de Montpellier du XIII^e siècle³, les *Chirurgies* de Roger de Parme, Albucassis ou Gui de Chauliac du XIV^e siècle⁴, des incunables et des dessins de Tiepolo ou Fragonard⁵. Vous pourrez aussi consulter des fonds très techniques constitués aux XIX^e et XX^e siècles, comme les fonds de géologie⁶ ou autour de la vigne et de la crise du phylloxera⁷. Enfin on signalera également des fonds plus

¹ De nombreux ouvrages cités en bibliographie retracent cette histoire des collections patrimoniales documentaires.

² H 409, BUHM, université de Montpellier.

³ H 196, BUHM, université de Montpellier.

⁴ H 89 – H 89bis – H 89ter – H 184, BUHM, université de Montpellier.

⁵ Musée Atger, université de Montpellier.

⁶ Fonds GEOL, BU sciences, université de Montpellier.

⁷ Fonds de l'école d'Agriculture, BU Pharmacie, université de Montpellier.

contemporains comme les fonds Cocteau et Arts du cirque⁸, constitués grâce et avec les laboratoires de recherche (fig. 1).



Figure 1 Panel de quelques documents patrimoniaux emblématiques des universités de Montpellier. De haut en bas et de gauche à droite : (1) scène enluminée de dissection, *La Grande Chirurgie* de Gui de Chauliac, XIV^e siècle (H 184, BUHM-UM); (2) reliure en velours bleu et fermoirs ornés, *L'Estrif de Fortune et Vertu de Martin le Franc*, XV^e siècle (H 248, BUHM-UM); (3) plats laqués pour un recueil de poésie persanes, XVII^e siècle (H 202, BUHM-UM); (4) photographie Jean Cocteau par Lucien Clergue, XX^e siècle (COC B 174-5, BULLSH-UPVM); (5) boîtes métalliques pour biscuits *Le Cirque*, XX^e siècle (CIR Boîtes, BULLSH-UPVM); (6) dessin à la sanguine *Homme assis avec tricorne et bottes* dit *Le Postillon*, Jean-Honoré Fragonard, XVIII^e siècle (MA77, musée Atger-UM); (7) miniature du *Roi David*, psautier dit de *Charlemagne*, VIII^e siècle (H 409, BUHM-UM); (8) miniature de la *Chirurgie* de Roger de Salerne, XIV^e siècle (H 89, BUHM-UM); (9) dessin plume et lavis *Moine portier* de Giambattista Tiepolo, XVIII^e siècle (MA178r, musée Atger-UM). © SCDI de Montpellier-Service photographique.

À ces collections de bibliothèques s'ajoutent également des pièces remarquables conservées par les archives historiques, comme les registres d'inscriptions de l'école de Médecine⁹ depuis le XV^e siècle et des instruments ou documents de recherche conservés par des centres de documentation pédagogique et scientifique qui se trouvent à proximité des unités de recherche et de formation (UFR) ou de certains laboratoires de recherche¹⁰.

⁸ BU Lettres, Langues et Sciences humaines-université Paul-Valéry Montpellier 3.

⁹ Université de Montpellier.

¹⁰ On citera également la mission PATSTEC menée par la direction de la Culture scientifique et du Patrimoine historique de l'université de Montpellier ou encore les collections des CDPS de Géographie, Archéologie ou Égyptologie de l'université Paul-Valéry.

Ainsi, disséminé à travers la ville, ce patrimoine, géré par les universités, peut ponctuellement être amené à converger vers les ateliers de conservation-restauration et numérisation-photographie du service de Coopération documentaire interuniversitaire de Montpellier basés actuellement sur le site Route de Mende de l'université Paul-Valéry Montpellier 3.

Évolution du contexte administratif pour un atelier dédié au patrimoine documentaire

De l'atelier de reliure à l'atelier de conservation-restauration pour les collections des bibliothèques universitaires de Montpellier.

En 2023, l'atelier de conservation-restauration, qui s'occupe des collections patrimoniales documentaires, a fêté ses 40 ans. Mais c'est au début des années 1960, alors qu'au nord de la ville deux nouveaux campus sont construits pour les facultés de Lettres, Langues et Sciences humaines (LLSH) et Sciences, qu'un atelier de reliure est créé pour les BU de Montpellier.

Comme pour beaucoup d'importantes bibliothèques, le premier objectif de cette création est de pouvoir réaliser en interne à l'institution, au fil de l'eau, la reliure des collections de périodiques ou d'ouvrages. Dès 1972, un espace dédié est donc équipé dans la nouvelle bibliothèque, sur le campus LLSH¹¹.

Aucune mention alors du traitement du patrimoine n'est faite. On sait par les archives, même si elles sont souvent laconiques, qu'il existe déjà une identification de « réserves » pour les ouvrages anciens dans les BU, mais que seuls les manuscrits les plus précieux de la faculté de Médecine pouvaient être expédiés sur Paris pour être confiés aux bons soins des restaurateurs des ateliers de la Bibliothèque nationale.

C'est en 1983 que la bibliothèque interuniversitaire (BIU) qui gère alors l'ensemble des BU de Montpellier, décide d'opter pour un traitement interne de ses collections les plus précieuses, grâce à l'arrivée récente de trois relieurs-restaurateurs, techniciens d'art, formés dans les ateliers parisiens (Bibliothèque nationale et Archives nationales). L'atelier de reliure devient « atelier de restauration-reliure ». Considéré comme un des services centraux, il est sous l'autorité de la direction de la BIU. La reliure sur les collections dites « courantes »¹² est alors abandonnée progressivement, jusqu'à disparaître complètement au tournant des années 2000, l'atelier se concentrant exclusivement sur la conservation-restauration des collections patrimoniales des BU.

Dans chaque BU ont donc été identifiés des « responsables des réserves »¹³, missionnés pour prendre contact directement avec l'atelier. Celui-ci propose alors un fonctionnement sur le même principe que les trains de reliure : le responsable de fonds identifie des ouvrages en

¹¹ L'ouverture de la bibliothèque se fait en 1967. A l'heure de l'écriture de cet article, aucune archive n'a été retrouvée mentionnant un atelier de reliure à cette date. Seuls quelques témoignages d'anciens collègues nous sont parvenus et font état d'un personnel recruté. En 1972, une extension du bâtiment est construite pour les magasins. L'atelier de reliure est alors clairement identifié au même endroit que l'actuel atelier de conservation-restauration du SCDI. Dès 1978, la précédente équipe de relieurs-restaurateurs entament ses activités.

¹² Périodiques et ouvrages en libre accès, susceptibles d'être désherbés au bout de quelques années, en opposition aux collections patrimoniales à conserver.

¹³ En fonction des BU, ceux-ci peuvent être conservateurs, bibliothécaires (BIB) ou bibliothécaires assistants spécialisés (BIBAS).

« mauvais état » qu'il confie par lot. L'atelier de restauration traite entre 5 et 10 ouvrages par BU, en fonctionnant par roulement, pour une réponse se voulant équitable, apportée annuellement à chacune des cinq BU.

À partir de 2006, commence le renouvellement de l'équipe des restaurateurs. Confrontée à une difficulté administrative (les techniciens d'art relèvent du ministère de la Culture, les universités du ministère de l'Enseignement supérieur, les mutations furent un échec et le recrutement pas voie de concours pour un autre ministère fut exclu par le ministère de la Culture), la direction de la BIU décide de recruter par voie contractuelle des détenteurs de masters en Conservation-restauration des biens culturels. Entre 2009 et 2015 une nouvelle équipe voit le jour et est constituée d'une variété de spécialités autour du livre et du papier, pour pouvoir prendre en charge une large typologie de documents, du manuscrit aux arts graphiques. Les recrutements ultérieurs ont ensuite suivi cette règle pour accompagner le développement d'une politique de conservation cohérente et adaptée à la nature et l'histoire des collections, stabilisant aussi progressivement et durablement l'équipe. L'atelier de restauration devient donc définitivement « atelier de conservation-restauration ».

En parallèle à ce renouvellement d'équipe, en 2010 l'atelier de numérisation est créé, puis est inauguré en 2014 la bibliothèque patrimoniale numérique *Foli@*. Rapidement la question de l'état des ouvrages avant leur numérisation se pose. C'est donc à partir de cette période que les deux ateliers commencent à travailler de manière synchronisée. Des évolutions dans la routine de travail et l'approche des documents s'opèrent donc naturellement pour l'atelier de conservation-restauration.

En 2015 un nouveau virage est pris lors de la fusion des universités : la BIU doit se restructurer, elle crée alors le service du Patrimoine écrit et graphique (SPEG) qui regroupe, sous une même direction, les responsables des réserves d'ouvrages anciens, rares et précieux et les ateliers de conservation-restauration, photographie et numérisation. Une nouvelle dynamique de travail à l'échelle de l'établissement voit le jour.

Avec cette nouvelle manière de travailler, les interactions entre les ateliers se font de plus en plus nombreuses. L'éloignement géographique entre les deux ateliers complique les échanges et représente des risques pour les ouvrages en transit. En 2016, alors que les ateliers de conservation-restauration et photographie nécessitent des travaux de réhabilitation (mise aux normes d'hygiène et de sécurité), l'opportunité est donnée de réunir l'ensemble des ateliers, simplifiant et sécurisant ainsi les échanges. La décision est validée par l'université Paul-Valéry Montpellier 3 qui donne subventions et espaces pour rapprocher l'atelier de numérisation, jusqu'alors sur un autre site¹⁴ et ainsi créer un plateau technique cohérent et fonctionnel, dédié aux collections patrimoniales documentaires.

Une dernière évolution fin 2020-début 2021 modifie le rythme de travail : c'est la dissolution de la BIU et le transfert de la gestion de la politique documentaire - et donc des collections patrimoniales - à chacune des universités. Les personnels travaillant dans les BU, sur les collections patrimoniales, poursuivent leurs actions sous l'autorité distincte de l'université Paul-Valéry Montpellier 3 et l'université de Montpellier¹⁵. Les deux universités décident alors de créer un service interuniversitaire qui les aidera conjointement sur la logistique documen-

¹⁴ Qui devient « atelier de numérisation-photographie ».

¹⁵ Les politiques documentaires sont aujourd'hui gérées par les services communs de documentation. À l'université de Montpellier le service des Collections patrimoniales documentaires est rattaché à la direction de la Culture scientifique et du Patrimoine historique.

taire, l'informatique documentaire et la conservation-valorisation des collections patrimoniales grâce aux deux ateliers (ou « ateliers patrimoniaux ») : c'est le service de Coopération documentaire interuniversitaire (SCDI) de Montpellier.

Ainsi depuis 40 ans, le choix de créer, puis de maintenir un atelier de conservation-restauration fut constant. Même si on ne peut nier les difficultés rencontrées entre statut administratif discordant et monde universitaire exsangue (particulièrement cette dernière décennie), l'activité de l'atelier n'a jamais été remise en question. Les enjeux de la bonne conservation de ce qui fut d'abord un matériel pédagogique sont connus des deux universités : ce patrimoine savant constitué par le travail des chercheurs témoigne à la fois de l'histoire, de la culture et des valeurs transmises dans ces communautés universitaires.

Une politique d'intervention actuelle volontairement documentée et mesurée

Une déontologie de la conservation-restauration affirmée

Aujourd'hui trois conservatrices-restauratrices travaillent à l'atelier du SCDI. Leurs spécialités autour du livre et des œuvres graphiques leur permettent d'être complémentaires, répartissant ainsi les chantiers en fonction des opérations de numérisation, des demandes d'exposition ou de chantiers des collections qui nécessitent des opérations de stabilisation des documents.

Une des originalités de l'atelier est probablement une approche un peu spécifique, et peu répandue en institution publique, pour le traitement des ouvrages enluminés. Une des restauratrices est formée pour la prise en charge de ces ouvrages. Elle peut ainsi stabiliser des couches picturales. Cette spécificité s'est montrée nécessaire avec la montée en puissance de la numérisation et l'objectif de mise en ligne progressive de l'ensemble des manuscrits, en couleur et haute définition. Ainsi dès 2012, le recrutement s'est orienté dans cette direction pour au moins un des postes de l'atelier (**fig. 2**).



Figure 2 Traitement de la couche picturale d'une enluminure sous la caméra stéréoscopique de l'atelier de conservation-restauration du SCDI de Montpellier. © SCDI de Montpellier-Service photographique.

La mission première de l'atelier de conservation-restauration est bien entendu de réaliser des interventions directes sur les œuvres. Pour mener cette démarche, la totalité de la procédure a été revue et améliorée ces dernières années. En effet, comme beaucoup d'ateliers et d'institutions, faute d'archives détaillées, il est parfois difficile de comprendre certains traitements ou certains choix de conservation faits par le passé. Ré-intervenir si besoin est compliqué. L'objectif depuis les années 2010 est de remédier à ce manque.

Ainsi, de manière poussée et précise, il est demandé à l'équipe de restaurateurs de documenter et argumenter leurs interventions et surtout de mener des études plus approfondies des œuvres en amont de leur traitement. Ce travail peut donc donner lieu à des réponses parfois très peu interventionnistes, des traitements curatifs minimalistes pour préserver au maximum les traces historiques, des reliures notamment.

Depuis un peu plus d'une dizaine d'années, c'est une réponse graduée qui est proposée aux conservateurs responsables de fonds, de l'intervention la plus minimale à la plus poussée, en tenant compte à la fois de la matérialité, de l'histoire mais aussi de l'usage qui est fait de l'ouvrage. En effet, comme pour toutes les bibliothèques publiques, dans les BU de Montpellier on considère que le livre même patrimonial, a vocation à être utilisé, et notamment consulté en salle de lecture. Le chercheur qui en fait la demande doit pouvoir y accéder de manière directe, en s'assurant bien entendu que toutes les précautions soient prises pour sa bonne conservation¹⁶. Lors d'un traitement curatif mené à l'atelier de conservation-restauration, les choix d'interventions proposés tiendront donc compte à la fois de l'histoire, de la fragilité du bien et cette réalité d'usage qui s'impose. Collégialité, démarche scientifique et recherche de consensus sont systématiques; elles sont essentielles pour permettre au conservateur responsable de fonds de prendre la décision la plus éclairée.

Mais le compromis peut aussi se faire en faveur de l'histoire du livre et moins de sa facilité d'accès. Ce fut le cas par exemple pour deux brochés des travaux de Antoine Lavoisier conservés à la BU Sciences pour lesquels, en 2022, la restauratrice a proposé « simplement » une mise en boîte et une légère stabilisation du papier de couverture de la brochure et ce, grâce aux premières recherches faites sur ces documents ([fig. 3](#)).

Ces deux brochés, imprimés en 1801 et 1805, après le décès d'Antoine Lavoisier (guillotiné le 8 mai 1794), aux frais et à la demande de son épouse, ont été expédiés par cette dernière à des savants sympathisants des travaux de son mari.

Nombre de bibliothèques possèdent ces éditions. Mais la question de l'atelier de conservation-restauration était de savoir combien ont conservé cette forme de brochure d'éditeur comme les exemplaires montpelliérains. Ils représentent potentiellement un témoignage intéressant à conserver. Toute intervention impliquant obligatoirement la nécessité de changer cette forme, la décision d'une première étape extrêmement minimaliste a donc été prise. Reste au responsable de fonds de Montpellier la charge d'identifier le destinataire de ces exemplaires et comment ils sont arrivés dans les collections de la BU Sciences¹⁷, ceci

¹⁶ Mise à disposition de matériel adapté pour faciliter la consultation, instructions spécifiques données au lecteur, surveillance.

¹⁷ « L'histoire de la transmission de ces textes via un réseau scientifique, tentaculaire et bien vivant, animé par le clan Lavoisier. Celui-ci développe alors une véritable stratégie de diffusion agressive de ses travaux pour faire triompher la nouvelle chimie lavoisienne. » E. Denton, conservatrice, en 2022, dans une note archivée avec le rapport de traitement.

pouvant déboucher par la suite sur une décision d'intervention plus poussée pour les rendre communicables.



Figure 3 Mise en état de conservation d'un des deux brochés des œuvres de Lavoisier : *Mémoires de chimie* (éd. 1805. Cote : RES 44, BUS, université de Montpellier) et *Traité élémentaire de chimie* (éd. 1801. Cote : 130562, BUS, université de Montpellier). © SCDI de Montpellier-Service photographique.

C'est donc le principe qui considère les collections comme des pièces historiques de grande importance qui permet à Montpellier de faire la balance des interventions pour préserver au maximum les informations codicologiques livrées par les ouvrages.

Une volonté de traçabilité

Depuis 2021 la priorité s'est donc portée pour les ateliers sur la redéfinition de la méthodologie de la collecte des données. Ceci est devenu d'autant plus important qu'ils se trouvent sur des sites distincts des collections et qu'ils travaillent pour deux institutions différentes. Il était indispensable pour le SCDI de pouvoir tracer les mouvements des collections patrimoniales vers et depuis les ateliers, de pouvoir communiquer aisément les informations collectées avec les responsables de fonds dans les BU mais aussi d'assurer la pérennité des informations collectées.

Le choix a été fait de s'équiper d'une base de données¹⁸. L'ensemble des procédures de traitement a été revu en fonction des scénarios de travail. L'objectif affiché est de centraliser en un seul outil, géré par le SCDI, l'ensemble des informations liées à la vie des œuvres :

- les événements et mouvements, et plus particulièrement les opérations de conservation-restauration ou de numérisation-photographie (campagnes photographiques ou de microfilms comprises comme témoins d'états antérieurs);

¹⁸ Le choix s'est porté sur Flora Musée, une solution portée par l'entreprise Decalog.

- les expositions (information sur les lieux, les pièces sélectionnées, les *facility reports*, etc.);
- les recherches menées ou la bibliographie relative;
- les éléments codicologiques collectés.

Cette base est alimentée de manière collective et est accessible à tous les acteurs du patrimoine universitaire montpelliérain. Pour des raisons de confidentialité sur certains éléments, elle n'est en revanche pas publique. La seule « porte ouverte » sur l'extérieur, accessible pour le chercheur comme le visiteur curieux, est l'accès aux ouvrages numérisés via la visionneuse de *Foli@*.

Ce récent développement a permis à l'atelier de conservation-restauration de faire évoluer la forme du rapport de traitement, qui a fait l'objet d'une restructuration complète. Ce moment est aussi pour les ateliers de conservation-restauration et de photographie, l'opportunité d'identifier leurs archives parfois éparées pour permettre d'alimenter l'histoire de la conservation des collections depuis près de cinq décennies.

Une évolution structurée par des retours d'expérience précis

Pour faire évoluer cette politique globale de conservation des collections documentaires et du positionnement de l'atelier de conservation-restauration, plusieurs chantiers et événements ont été moteurs.

Fournir les images pour la bibliothèque virtuelle de Clairvaux

Le premier chantier d'envergure fut sans conteste le chantier Clairvaux, mené en 2013-2014. Cette opération est la première qui fit travailler conjointement restaurateurs et opérateurs de numérisation.

En 2013, dans la perspective des 900 ans de la fondation de l'abbaye de Clairvaux, la médiathèque du Grand Troyes se lance dans la reconstitution virtuelle de l'abbaye, selon le catalogue de 1472. A cette date, la bibliothèque se composait de 1790 manuscrits, seuls 1115 nous sont parvenus. La majorité est conservée à Troyes, 95 manuscrits sont conservés par d'autres bibliothèques publiques. Parmi celles-ci, la bibliothèque universitaire historique de Médecine de Montpellier en détient 72.

Cette opération amena pour les équipes de Montpellier des changements profonds et durables dans leurs pratiques.

La première étape fut une révision complète du système d'évaluation de l'état de conservation des collections, la mise en place d'une grille d'évaluation et la réalisation d'un diagnostic d'état préalable pour définir si l'opération de numérisation était possible, ou non, en l'état. Les échanges entre les ateliers et les responsables de fonds ont ensuite été revus pour rationaliser et organiser les traitements des 72 reliures dans le temps imparti (neuf mois). Durant cette période, l'ensemble de l'effectif a été mobilisé sur le chantier, le service aux autres BU se retrouvant donc stoppé.

Pour l'atelier de conservation-restauration, le chantier Clairvaux fut le premier vrai chantier qui introduisit l'objectif de numérisation dans le traitement curatif des collections. La BIU jusqu'alors ne s'y était pas encore confrontée, privilégiant dans les premières années de l'atelier de numérisation des collections identifiées comme en « bon état ». Pour la première

fois fut également introduit auprès des opérateurs de la numérisation la prise en compte du degré d'ouverture des ouvrages et des notions de risques liés aux manipulations sous le numériseur (notamment la notion de matériaux anciens, fragiles et secs, et de phénomènes électrostatiques à la surface des pages lors du mouvement de la vitre du numériseur)¹⁹.

C'est donc la première opération qui a permis aux ateliers de conservation-restauration et numérisation de travailler de manière synchronisée. Les mouvements des manuscrits entre la BUHM et les deux ateliers (trois sites différents) ont nécessité une logistique précise pour rationaliser et sécuriser les déplacements.

L'étude de la collection des manuscrits

Deux ans plus tard, en 2016, après avoir fait le bilan de cette première opération et soulevé des questions auprès des conservatrices des collections de la BUHM, l'atelier de conservation-restauration a proposé de mener une grande étude centrée sur la collection des manuscrits, collection la plus prestigieuse.

Force avait été de constater que sur ces 72 manuscrits, nombre n'avaient pas pu être numérisés en l'état. Des stabilisations importantes, voire des démontages pour re-reliure se sont imposés pour quelques pièces.

L'équipe de l'atelier de conservation-restauration avait également constaté sur ces manuscrits provenant de Clairvaux des dégradations difficiles à expliquer sans avoir vu l'entièreté de la collection.

L'atelier a donc proposé de mener une étude qui a permis d'obtenir une grille d'état. Cette grille est actuellement toujours utilisée dans le quotidien de travail. Elle permet par exemple de savoir quelles précautions prendre lors de la communication en salle de lecture. Elle facilite également les discussions de planification entre les conservatrices et les restauratrices lors des demandes de numérisation ou d'exposition²⁰.

L'enquête climatique et un bilan bâtiminaire : vers une introduction des PSBC

En parallèle de cette question de dégradations constatées sur les collections, il est rapidement apparu évident qu'une étude de climat ainsi qu'un bilan bâtiminaire permettraient aux responsables de collections d'avoir des éléments précis sur l'état des espaces de stockage, des problématiques rencontrées et des points de vigilance à avoir pour améliorer les conditions de conservation dans les réserves.

¹⁹ Le SCDI de Montpellier travaille majoritairement avec un numériseur Zeuchel OS14000 A1.

²⁰ Vous pouvez en lire un compte rendu de la méthodologie employée et les conclusions dans un article (Marandet, Gagnal, 2020).

À Montpellier, jusqu'aux grands programmes de réhabilitation des bibliothèques lancés autour des années 2020²¹, quasiment aucun des dix-huit espaces de stockage identifiés (pour cinq BU) ne disposait de système de climatisation²² ou de surveillance des climats.

Pour assister et centraliser de manière homogène les informations et apporter une vision plus globale, l'atelier de conservation-restauration a semblé être, pour la direction de la BIU, le bon interlocuteur. Il a donc été missionné sur ces deux enquêtes.

L'étude bâtiminaire, menée en 2014 et 2015, a permis de faire un premier bilan et de mettre en évidence les faiblesses de certaines zones de stockage. Ceci a pu donner lieu en fonction des BU, à une réévaluation du rangement des collections selon leur préciosité, leurs usages et les faiblesses des espaces de stockage.

L'étude des climats, qui s'est déroulée de février 2015 à février 2016 a fait l'objet d'une synthèse fournie fin 2016 à la direction de la BIU. Les équipes en charge du patrimoine savaient déjà, de manière « empirique » (sud de la France oblige) que le climat dans les espaces de stockage était globalement chaud et sec. Mais cette première étude a permis de mettre des chiffres précis et comprendre les variations climatiques internes pour chacun des espaces où se trouvaient des collections patrimoniales. Par la suite, la veille globale dans les BU s'est poursuivie jusqu'en 2020 : elle fut réalisée et centralisée par l'atelier de conservation-restauration qui effectuait, le même jour, le relevé trimestriel de l'ensemble des 42 thermo-hygromètres.

Faire un bilan, analyser puis modifier des habitudes ou des pratiques pour le bien des collections patrimoniales étaient les objectifs de ces études. Elles ont pu aussi servir par la suite aux responsables en discussion avec les instances dans les chantiers (actuels) de mise aux normes des bâtiments.

Ces deux études ont ainsi de manière logique introduit la question de la réponse à l'urgence et de la nécessité de déployer des plans de sauvegarde des collections (ou PSBC) dans chacune des BU. Au sein du SPEG, une vraie adhésion des équipes en BU a permis dès 2015 de commencer à travailler sur la question.

À défaut d'avoir un plan parfaitement rédigé et éprouvé dans les plus brefs délais, l'atelier de conservation-restauration a été missionné pour constituer les premiers kits d'urgence pour répondre aux petits sinistres du quotidien (fig. 4). Il a aidé les responsables de fonds dans les premières étapes de la priorisation des collections, à assurer la logistique lors de grandes opérations de dépoussiérage, et à sensibiliser les bibliothécaires en les mettant à l'épreuve de l'eau.

²¹ La nouvelle bibliothèque ATRIUM, pour les Lettres, Langues et Sciences Humaines vient d'être livrée à l'université, la BUHM bénéficie d'un chantier de mise aux normes des protections contre l'incendie dans le bâtiment historique situé en centre-ville de Montpellier.

²² À l'exception la BU Droit (site Richter) qui vit sa climatisation définitivement coupée en 2017, le groupe froid étant définitivement hors service.

Le travail entamé n'est pas sans difficulté. Il faut expliquer les enjeux aux instances dirigeantes, informer et former le personnel, sensibiliser de manière générale aux risques.

Ainsi, par sa formation initiale en conservation préventive plus poussée, l'équipe de l'atelier de conservation-restauration a été, depuis les années 2010, identifiée comme un soutien pour le responsable de fonds dans les opérations de conservation préventive sur les collections patrimoniales des bibliothèques.

Plus que de simples opérations de reliure, de (re)mise en état des collections, à Montpellier, le choix a donc été fait de solliciter l'atelier de conservation-restauration au-delà de la seule table de travail.

Participer à un travail d'équipe

L'équipe de l'atelier de conservation-restauration peut apporter une expertise et une aide matérielle dans le domaine de la conservation préventive et dans la gestion matérielle des collections.

Elle peut être amenée à :

- accompagner des collègues de l'atelier de numérisation lors de certaines opérations délicates, apportant sa connaissance précise du document et de son état ([fig. 5](#));
- préparer des collections à l'exposition par la réalisation de supports sur mesure ou de dessins techniques pour la fabrication de supports adaptés (stabilisation de l'état des documents, réalisation de supports de présentation, constat d'état, mise en place)²³ ([fig. 6](#));
- être mise en relation plus directe avec certains chercheurs, notamment ceux travaillant sur la matérialité du livre;
- assister en cas de sinistres et notamment lors de petits dégâts des eaux.



Figure 5 Opération de numérisation en cours avec une restauratrice et la responsable de la numérisation du SCDI. © SCDI de Montpellier-Service photographique.

²³Laury Grard, ancien membre de l'équipe, a proposé une synthèse de la question dans un article (Grard, 2022).

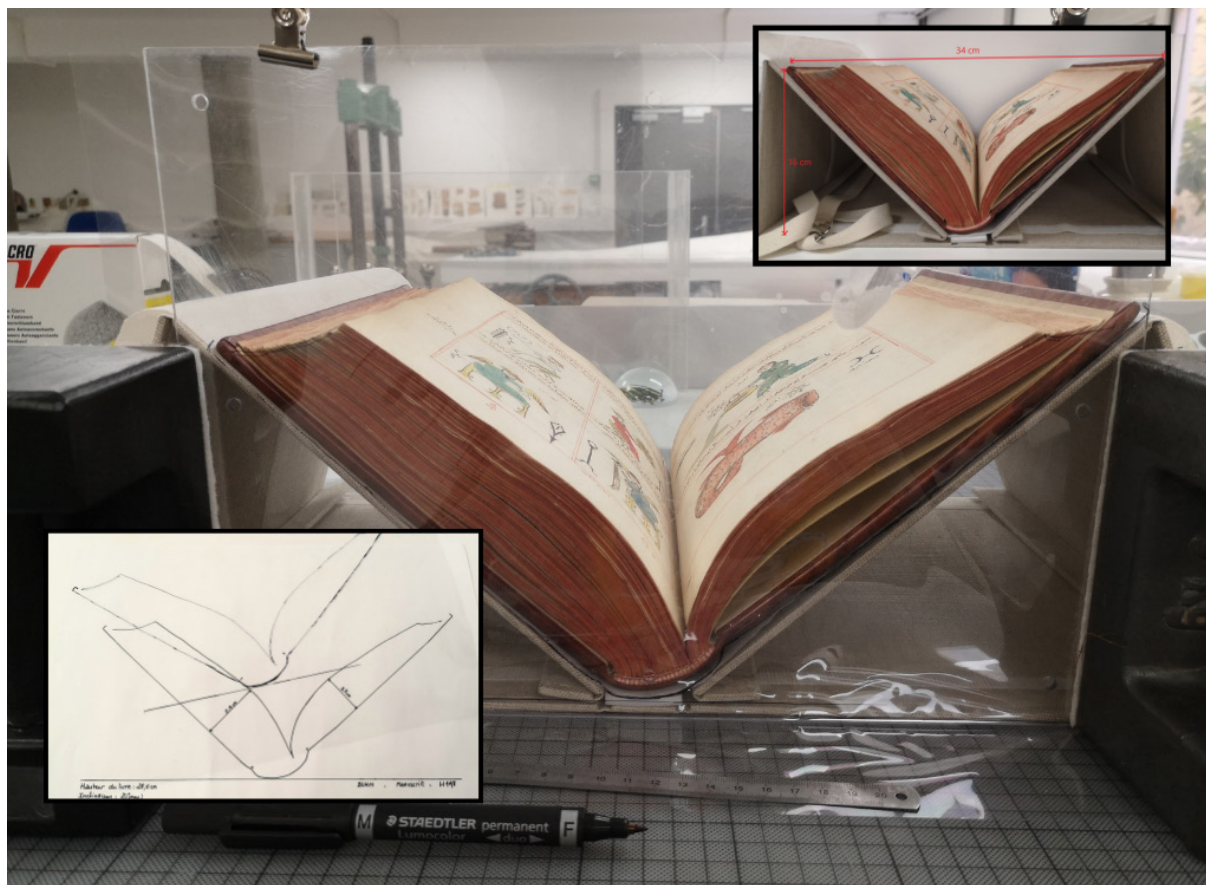


Figure 6 Préparation d'un support d'exposition pour un manuscrit (H 148, BUHM-université de Montpellier) : l'ouvrage est ouvert en situation, une vitre et une feuille de polyester sont utilisés comme écran pour réaliser le schéma (en bas à gauche). Les mesures détaillées sont ensuite exploitées (en haut à droite) soit par un prestataire sélectionné par l'emprunteur, soit par l'atelier lui-même. © SCDI de Montpellier- atelier de conservation-restauration.

Former les équipes en bibliothèque

Pour sensibiliser le maximum de personnes à la conservation préventive appliquée à toutes les étapes du traitement matériel du document et de son stockage, c'est également l'atelier qui est sollicité pour former les bibliothécaires aux notions de base : risques et causes de dégradation des collections, mesures de prévention ou de traitement, procédures de manipulation des documents ou de certains traitements initiaux comme l'estampillage, modes de conditionnements adéquats aux collections et identification de l'état matériel des documents. Il donne ces formations en interne ou avec l'organisme de formation Médiad'oc, centre de formation aux carrières des bibliothèques de la région Occitanie (fig. 7).



Figure 7 Formation *Le livre patrimonial dans l'exposition*, proposée au catalogue de Médiad'oc en 2023. © SCDI de Montpellier-Service photographique.

Se faire connaître et sensibiliser le grand public

Parce qu'ils sont basés au cœur d'une université dite des « humanités », les deux ateliers organisent régulièrement des visites découvertes pour des étudiants en Histoire, Histoire de l'art et Archéologie.

Dans cet esprit d'ouverture sur le public, les deux ateliers du Service de coopération documentaire interuniversitaire se sont associés pour présenter à l'automne 2023 l'exposition *Ex Bibliotheca, les vies secrètes du livre*, qui présente la déontologie et les actions des ateliers. Cette exposition itinérante vit aujourd'hui également virtuellement²⁴.

Conclusion

Ainsi, dans le prolongement de l'émulation intellectuelle qui a permis la constitution des collections documentaires universitaires, les équipes du service de Coopération documentaire interuniversitaire de Montpellier et celles en charge du patrimoine des universités ont pu faire évoluer la politique de conservation, dans un quotidien intellectuellement très stimulant. Mais il ne faut pas se méprendre, la tâche n'est pas toujours aisée et repose aussi sur un réel engagement des personnels : si les universités sont fières de leur richesse patrimoniale, il n'en reste pas moins qu'il est parfois difficile de l'assumer. Souvent il faut à ces équipes prendre le temps de se retourner pour voir le chemin parcouru et réaffirmer le caractère utile (voire indispensable) des actions menées. C'est l'objectif visé aujourd'hui par cet article : rappeler les enjeux et valeurs historiques et morales que véhiculent ces pièces historiques conservées par des institutions qui n'ont pas la conservation comme mission première.

²⁴ <https://exbibliotheca.scdi-montpellier.fr>

Dans ce contexte, à une échelle plus large, l'atelier de conservation-restauration du SCDI, bien conscient de cette difficulté, qui n'est probablement pas un cas unique, encourage donc les autres institutions, et notamment les plus petits ateliers tels que le nôtre, à retracer leur propre histoire pour nourrir l'histoire de la conservation-restauration au sein des institutions publiques françaises.

Références bibliographiques

Aressy L., Caron B. et al. (2014), *Le monde en perspective. Vues et récréations d'optique au siècle des Lumières*, Montpellier, DRAC Occitanie (coll. Duo monuments-objets), 80 p. Disponible sur : https://www.scdi-montpellier.fr/sites/default/files/2019-11/duo_vues_%20doptiques.pdf (consulté le 22 mars 2024).

Comte Y., Palouzié H., Pinchon J.-F. (2012), *Le campus de la Faculté des lettres et sciences humaines de Montpellier, une création architecturale et artistique des années 1960*, Montpellier, DRAC Occitanie, (coll. Duo monuments-objets), 80 p. Disponible sur : <https://www.culture.gouv.fr/Regions/Drac-Occitanie/Ressources-documentaires/Publications/Collection-DUO> (consulté le 22 mars 2024).

Denton E., Todeschini P. (éd.) (2019), *Des livres et des hommes : naissance de la bibliothèque de l'école de médecine de Montpellier*, Montpellier, catalogue d'exposition, 56 p.

Denton E., Todeschini P. (éd.) (2021), « La richesse du fonds patrimonial documentaire de la bibliothèque universitaire historique de médecine », dans DRAC Occitanie (éd.), *Le 8e centenaire de l'université de Médecine de Montpellier*, Montpellier, DRAC Occitanie, (coll. Duo monuments-objets), p. 56-59. Disponible sur : <https://www.culture.gouv.fr/Regions/Drac-Occitanie/Ressources-documentaires/Publications/Collection-DUO> (consulté le 22 mars 2024).

Grard L. (2022), « L'exposition du livre patrimonial : les supports d'exposition », *Conservation-restauration des biens culturels*, N° 39, p. 127-141.

Lorblanchet H. (dir.) (2012), *La plume et le bistouri : étudier la médecine à Montpellier au Moyen Âge et à la Renaissance*, Montpellier, catalogue d'exposition, 74 p. Disponible sur : https://www.scdi-montpellier.fr/sites/default/files/2019-11/extrait_plume_et_bistouri.pdf (consulté le 22 mars 2024).

Lorblanchet H. (dir.) (2015), *L'Art du savoir : manuscrits médiévaux de Clairvaux à Montpellier*, Montpellier, catalogue d'exposition, 82 p. Disponible sur : <https://www.scdi-montpellier.fr/sites/default/files/2019-08/extrait-catalogueartdusavoir.pdf> (consulté le 22 mars 2024).

Lorblanchet H. (2021), « Le musée Atger, trésor du dessin ancien », dans DRAC Occitanie (éd.), *Le 8e centenaire de l'université de médecine de Montpellier*, Montpellier, DRAC Occitanie, (coll. Duo monuments-objets), p. 60-61. Disponible sur : <https://www.culture.gouv.fr/Regions/Drac-Occitanie/Ressources-documentaires/Publications/Collection-DUO> (consulté le 22 mars 2024).

Marandet L., Gagnal A.-S., (2020), « Bien connaître sa collection, pour une gestion raisonnée et éclairée : la collection des manuscrits de la faculté de médecine de Montpellier à l'étude », *Conservation-restauration des biens culturels*, N° 36, p. 125-141.

Palouzié H. (dir.) (2017), *Prodiges de la nature, les créations du Docteur Auzoux (1797-1880)*. Collection de l'université de Montpellier, Montpellier, DRAC Occitanie, (coll. Duo monuments-objets), 88 p. Disponible sur : <https://www.calameo.com/read/005375114bcdafdd17c51> (consulté le 22 mars 2024).

Palouzié H., Jarry D.-M., Lavabre-Bertrand T. (2019), *Le jardin des Plantes de Montpellier*, Montpellier, DRAC Occitanie, (coll. Duo monuments-objets), 96 p. Disponible sur : <https://www.calameo.com/read/0053751146d288d8bfd57> (consulté le 22 mars 2024).

Plana R., Mallet G., Gabolde G., Mathieu B. (2015), *Musée des moulages, catalogue abrégé*, Montpellier, PULM, 64 p.

Plana R., Mallet G. (2011), « Le projet de rénovation et de valorisation du musée des moulages et les collections d'Art et d'Archéologie de l'université Paul-Valéry Montpellier 3 », *In Situ, Revue des patrimoines*, N° 17. Disponible sur : <https://journals.openedition.org/insitu/880?lang=en> (consulté le 22 mars 2024).

L'auteur

Anne-Sophie Gagnal Conservateur-restaurateur de formation, spécialité papier/arts graphiques, Anne-Sophie Gagnal est diplômée de l'École de Condé (2008). Arrivée en 2009 à Montpellier pour travailler sur les collections patrimoniales des bibliothèques universitaires de Montpellier, principalement la collection du musée Atger, elle devient responsable de l'atelier de conservation-restauration de la bibliothèque interuniversitaire (BIU) de Montpellier en 2012, puis depuis 2012 du service de Coopération documentaire interuniversitaire de Montpellier (SCDI).

Service de Coopération documentaire interuniversitaire de Montpellier, Atelier de conservation-restauration, université Paul-Valéry - Montpellier 3, route de Mende, 34090 Montpellier, anne-sophie.gagnal@univ-montp3.fr

UTILISATION DE LA TERRE CUITE COMME MATÉRIAU DE COMPLEMENT

Lionel Lefèvre

Résumé

Des personnes désirant faire restaurer une céramique ou une sculpture en terre cuite demandent parfois si le comblement sera réalisé en terre cuite. On a longtemps pensé que ce n'était pas possible à cause du retrait de l'argile au séchage et à la cuisson, mais des essais de comblements et restitutions réalisés avec des terres cuites de différentes couleurs sur divers matériaux, terre cuite, pierre calcaire, marbre ou plâtre, ont permis de montrer le contraire. Cette technique présente des avantages : les parties restituées sont beaucoup plus résistantes mécaniquement que du mortier de chaux, du plâtre ou de l'enduit et leur mise en place est réalisée comme s'il s'agissait d'un fragment original. La réversibilité est aisée car le pseudo-fragment peut être démonté sans destruction du comblement. Différentes terres permettent d'ajuster la couleur des restitutions et la stabilité de la terre cuite est le garant d'un bon vieillissement. La dureté de la terre cuite peut être ajustée par la température de cuisson. Des reprises sont possibles après cuisson avec des outils diamantés. Cette technique reste néanmoins plus adaptée à des restitutions ou des comblements de petite taille.

Abstract People wishing to have a ceramic or terracotta sculpture restored sometimes ask if the fill will be made from terracotta. It was long thought that this was not possible because of the clay's shrinkage during drying and firing, but tests involving fills and restorations using terracotta in various colours on different materials—terracotta, limestone, marble, or plaster—have proven otherwise. This technique offers several advantages: the restored parts are much more mechanically robust than those made with lime mortar, plaster, or render, and their positioning is done as if they were original fragments. The reversibility is straightforward since the pseudo-fragment can be removed without damaging the fill. Different clays allow for fine-tuning the restoration's colour, and the stability of terracotta ensures good aging. Moreover, the hardness of the terracotta can be adjusted by varying the firing temperature, and touch-ups can be made after firing using diamond tools. However, this technique is still best suited for small-scale restorations or fills.

Resumen Las personas que quieren hacer restaurar una cerámica o una escultura en terracota preguntan a veces si el relleno va a ser hecho en cerámica. Se considero que no era posible a causa de la retracción de la arcilla, durante el secado y la cocción, pero los ensayos de rellenos y restituciones realizados con arcillas cocidas de diversos colores sobre diferentes materiales, (terracota, piedra calcárea, mármol o yeso), mostraron lo contrario. La técnica presenta ventajas: las partes restituidas son más resistentes mecánicamente que el mortero de cal, el yeso o la masilla y se los pone en su lugar fácilmente, como si fueran fragmentos originales. La reversibilidad está asegurada porque el pseudo-fragmento puede ser desmontado sin ser destruido. Diferentes arcillas permiten ajustar el color de las restituciones et la estabilidad de la terracota garantiza el buen envejecimiento. La dureza de la terracota puede ser modificada en función de la temperatura de cocción. Se puede trabajar una vez cocida con útiles diamantados. Esta técnica es adaptada a pequeños restituciones o rellenos.

Mots-clés comblement, terre cuite, argile

Introduction

Des personnes désirant faire restaurer une céramique ou une sculpture en terre cuite demandent parfois si le comblement sera réalisé en terre cuite. J'ai pensé pendant très longtemps que ce n'était pas possible en raison du retrait de l'argile, lié au séchage et à la cuisson. Mon avis a maintenant changé à la suite de plusieurs comblements et restitutions réalisés avec des terres cuites de différentes couleurs sur divers matériaux : terre cuite, bien sûr, mais aussi pierre calcaire, marbre ou plâtre.

Des exemples de comblements pour des musées (Annecy, Lyon, Marseille) ou des sculptures classées au titre des Monuments historiques sont présentés pour illustrer l'utilisation de ce matériau de comblement.

Une première proposition de comblements réalisés en terre cuite

En 2001, Monsieur Jean-René Gaborit, conservateur du département des sculptures du musée du Louvre, avait été consulté à propos de la restauration d'une œuvre en terre cuite attribuée à l'atelier des Della-Robbia (**fig. 1**). Après analyses, ce bas-relief conservé au château d'Avignon, en Camargue, s'était avéré être une œuvre composite formée à partir d'une *Sainte Conversation* de l'atelier Della-Robbia postérieure à 1520 et d'une *Vierge d'Annonciation* de l'atelier Buglioni, antérieure à 1520 (**fig. 2 et 3**). Afin de combler l'espace entre les deux œuvres imbriquées, Jean-René Gaborit avait suggéré de faire des comblements en terre cuite, ce qui avait été réalisé en cuisant quatre éléments à 1050 °C (**fig. 4**). Le retrait de la terre était d'environ 7 %. Les éléments réalisés, reliant les deux œuvres originales, correspondaient plus à une sorte de cadre séparant les deux œuvres qu'à un comblement à proprement parler.



Figure 1 *Sainte Conversation* attribuée à l'atelier Della-Robbia. © L. Lefèvre.



Figure 2 Après démontage de la *Vierge*, la plaque de marbre sous-jacente apparaît. © L. Lefèvre.



Figure 3 Remontage sur un châssis ouvrant en acier inoxydable. © L. Lefèvre.



Figure 4 Complements en terre cuite. © L. Lefèvre.

La technique est reprise après quelques années



En 2008, un buste de *Michel-Ange* par Carrier-Belleuse (**fig. 5**), avait nécessité le modelage de trois complements (**fig. 6**). Afin de minimiser le retrait, la cuisson avait été faite à 500 °C. Le résultat était satisfaisant, aussi bien pour un comblement périphérique, une pointe de col de vêtement (**fig. 7**) que pour des complements entourés de matière originale

Figure 5 Le buste de *Michel-Ange* après intervention. © L. Lefèvre.



Figure 6 La restitution de la pointe du col, modelée en terre cuite. © L. Lefèvre.



Figure 7 Après cuisson, le pseudo-fragment est collé. © L. Lefèvre.

En 2010, les cinq doigts d'un personnage d'un groupe en marbre blanc, copie du *Laocoon*, sculpté à Rome en 1786 par Chinard, avaient été cassés par vandalisme (fig. 8). Une demande du musée des Beaux-Arts de Lyon, où est conservée la sculpture, avait été faite pour restituer en marbre, les doigts d'environ 12 mm de long. Afin de servir de modèles, les doigts avaient été modelés dans une pâte de porcelaine blanche (Solargil - *Southern Ice*) et cuits à 1300 °C avec un retrait de 13,3 % (fig. 9). Le résultat avait suffisamment satisfait Christian Briend, le conservateur responsable de l'œuvre, pour que la solution provisoire devienne définitive et que la taille des restitutions en marbre soit abandonnée (fig. 10).



Figure 8 Les cinq doigts de la main droite de l'enfant manquent. © L. Lefèvre.



Figure 9 Modelage des cinq doigts en pâte porcelaine. © L. Lefèvre.



Figure 10 Les doigts réintégrés de l'enfant situé à senestre. © L. Lefèvre.

La technique prometteuse devient usuelle

En 2017, des restitutions devaient être réalisées sur un autel en pierre de Cruas, daté de 1865 et conservé dans l'église de Saint-Symphorien d'Ozon. Il s'agissait d'un fleuron (fig. 11), dont une partie en pierre avait été retrouvée dans les gravats (fig. 12), et de trois crochets de chapiteaux manquants. La pierre de Cruas présente des veines roses et blanches dont la restitution en pierre se heurtait à l'obtention d'un bloc de pierre compatible avec la pierre de l'autel, car la carrière est maintenant uniquement utilisée pour produire du gravier concassé. Les crochets manquants des chapiteaux et du fleuron central ont été restitués en moulant les éléments originaux disponibles et en effectuant les tirages nécessaires avec de la terre mêlée rose et blanche, cuite à 900 °C (fig. 13 et fig. 14).



Figure 11 Autel en pierre de Cruas après nettoyage et remontage. Le fleuron sommital manque. © L. Lefèvre.



Figure 12 À partir d'un crochet en pierre subsistant, restitution du fleuron en terres mêlées. © L. Lefèvre.



Figure 13 La terre mêlée s'harmonise à la pierre. © L. Lefèvre.



Figure 14 Après mise en place du fleuron au sommet du gâble. © L. Lefèvre.

En 2018, des comblements ont été effectués sur une céramique de Max Claudet (**fig. 15**), conservée au musée du sel à Salins les Bains et datant de la fin du XIX^e siècle. L'œuvre présentait des manques (**fig. 16**) qui ont été comblés par modelage de terre blanche directement sur le plat original (**fig. 17**), puis retouchés à l'aquarelle (**fig. 18**).



Figure 15 Faïence fine de Max Claudet avant intervention. © L. Lefèvre.

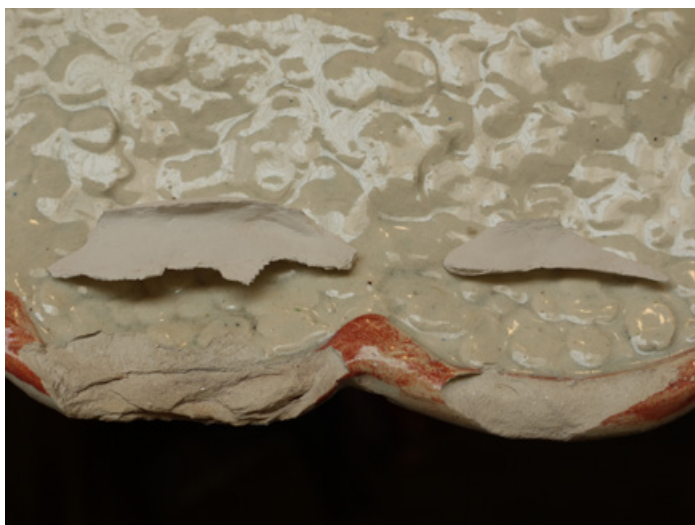


Figure 16 Modelage des restitutions en argile. © L. Lefèvre.

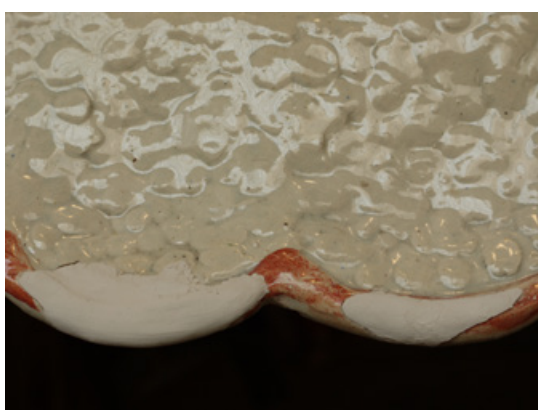


Figure 17 Après cuisson, collage des restitutions. © L. Lefèvre.



Figure 18 Après retouche des comblements à l'aquarelle. © L. Lefèvre.

Sur une barbotine du même artiste (**fig. 19**), un décor de feuilles en relief de quelques millimètres d'épaisseur a été complété en terre cuite. Ce dernier matériau présente une résistance mécanique plus importante que celle de l'enduit, du plâtre ou d'un mortier de chaux. Après cuisson à 950 °C, les comblements ont été collés comme s'il s'agissait de tessons originaux. Ils ont ensuite été retouchés à l'aquarelle (**fig. 20**), facilement utilisable sur le matériau terre cuite, poreux et hydrophile.

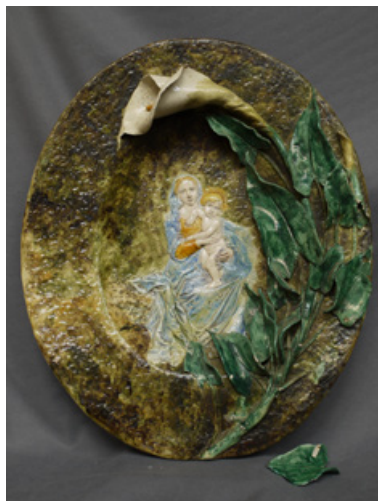


Figure 19 Barbotine de Max Claudet avant intervention.
© L. Lefèvre.



Figure 20 Restitutions en terre cuite blanche, réintégrées à l'aquarelle. © L. Lefèvre.

Cette même année 2018, des comblements étaient nécessaires sur une sculpture en plâtre de Barthélémy-François Chardigny, intitulée *Le mariage samnite*, datée de 1803-1804 et conservée au palais Longchamp à Marseille (**fig. 21**). Après nettoyage (**fig. 22**), les membres fracturés des personnages ont été remis en place. Compte tenu de la fragilité de l'œuvre, il était important que les comblements (**fig. 23 et fig. 24**) aient une bonne résistance mécanique. Une terre blanche a été utilisée et cuite à 950 °C.



Figure 21 *Le mariage samnite*, plâtre de Chardigny, avant intervention. © L. Lefèvre.



Figure 22 Nettoyage du plâtre par gel pelable et photoablation. © L. Lefèvre.

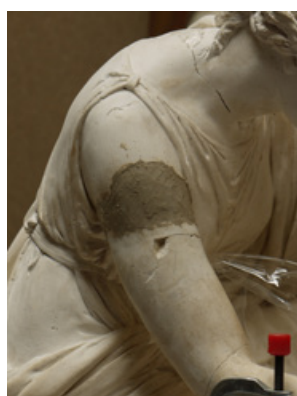


Figure 23 Comblement d'un manque avec de l'argile. © L. Lefèvre.



Figure 24 Après cuisson, le pseudo-fragment est collé en place. © L. Lefèvre.

Le retrait du comblement situé au niveau d'une épaule a été important et a nécessité l'ajout d'une bande de terre formant entretoise avant de coller l'ensemble des éléments. Les joints ont été mastiqués à l'aide d'un enduit à base de carbonate de calcium. Les zones mastiquées ont ensuite été retouchées à l'aide d'une émulsion acrylique (Liquitex) (fig. 25). La solidité des comblements en terre cuite a évité la mise en place d'un goujon métallique, toujours dangereux en cas de nouvel accident.



Figure 25 Après intervention, les zones fragiles sont consolidées.
© L. Lefèvre.

En 2019, un *Saint Bruno* en pierre calcaire blanche (fig. 26) avait nécessité de restituer des éléments manquants, crosse, doigts, plis de vêtement, fragment de la bible (fig. 27). La statue, réalisée en 1782 par Joseph Chinard pour la chartreuse de Séguinac, est maintenant conservée dans l'église de Saint-Denis-lès-Bourg. Les modelages ont été faits et cuits avant l'installation de la sculpture sur son nouveau piédestal (fig. 28) et mis en place après déplacement de la sculpture.



Figure 26 *Saint Bruno* de Joseph Chinard avant intervention. © L. Lefèvre.



Figure 27 Restitutions en terre cuite. © L. Lefèvre.



Figure 28 Après nettoyage et mise en place des restitutions.
© L. Lefèvre.

Par rapport à la taille du même élément en pierre, le modelage en terre est plus rapide à réaliser, surtout si on ne veut pas affranchir les zones de fracture sur la sculpture originale. Dans ce cas, compte tenu des nombreux accidents répartis sur l'épiderme, le masticage de tous les joints entre les restitutions et la pierre originale n'était pas indispensable. Certaines zones mastiquées l'ont été avec un mortier de chaux aérienne et poudre de calcaire. Comblements et masticages ont été retouchés à l'aquarelle.



En 2022, un petit ramoneur de Paul-Louis Cyfflé (**fig. 29**), appartenant au musée du Louvre, en dépôt au Musée-Château d'Annecy, a nécessité une restauration pour pouvoir être présenté dans le musée. La sculpture avait été longtemps conservée en extérieur et avait subi des dégradations liées au gel. Les deux tronçons principaux, haut du corps et jambes, avaient été réparés par des agrafes en fer qui avaient lâché. Après dépose des agrafes et nettoyage de l'épiderme, les fragments avaient été recollés et des comblements effectués en terre cuite, en particulier pour remplacer les agrafes métalliques.

Figure 29 Fragment supérieur de la sculpture en terre cuite avant intervention. © L. Lefèvre.

La terrasse présentait un angle manquant (**fig. 30**) de taille relativement importante (15 à 20 cm de côté). Cette dimension est trop grande pour être restituée en terre d'un seul morceau, car le retrait est trop important. Le modelage de ce comblement a été divisé en trois éléments juxtaposés, séparés par des feuilles de papier (**fig. 31**), séchés (**fig. 32**) et cuits à 900 °C. Des entretoises entre les trois restitutions ont été nécessaires pour obtenir un angle de terrasse adapté (**fig. 33 et fig. 34**). On touche ici une limite de la technique.



Figure 30 Fragment inférieur de la sculpture en terre cuite avant intervention. © L. Lefèvre.



Figure 31 La restitution de l'angle de la terrasse est réalisée en trois éléments. © L. Lefèvre.



Figure 32 Séparation des trois éléments pour obtenir un séchage homogène. © L. Lefèvre.



Figure 33 Entretoises en terre pour ajuster la dimension de l'angle restitué. © L. Lefèvre.



Figure 34 Après nettoyage, collage des comblements et réintégration. © L. Lefèvre.

Enfin en 2023, *L'Espoir vaincu*, sculpté par Joseph Bernard en 1898, avait perdu son nez (**fig. 35**), une partie de son oreille gauche (**fig. 36**) et trois de ses doigts de la main droite. La sculpture avait été conservée en extérieur dans un square de la ville de Vienne et y avait souffert. Elle est maintenant conservée en intérieur dans le stade nautique de Saint Romain-en-Gal. La pâte céramique choisie (Omyacolor Duroc), très légèrement grisâtre, était parfaite pour ce marbre dépoli et granuleux, provenant probablement de Carrare (**fig. 37**).

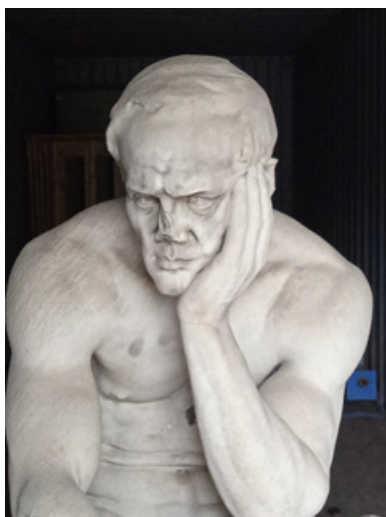


Figure 35 Avant intervention, le nez de *L'Espoir vaincu* manque. © L. Lefèvre.



Figure 36 Un fragment de l'oreille gauche manque. © L. Lefèvre.



Figure 37 Le nez est restitué en terre. © L. Lefèvre.

Les restitutions du nez et de l'oreille (**fig. 38**) ont été collées avec une colle cellulosique. Les doigts ont été remis en place avec des tourillons en bois faisant office de goujons. La sculpture est simplement exposée au milieu du public, entourée par une banquette circulaire qui offre une petite mise à distance. Quelques mois après l'installation de la sculpture, un gamin a rapporté à la directrice du centre nautique un des doigts, tombé au sol, fort heureusement intact. La sculpture sera en principe transférée dans le futur musée de Vienne, actuellement en projet.

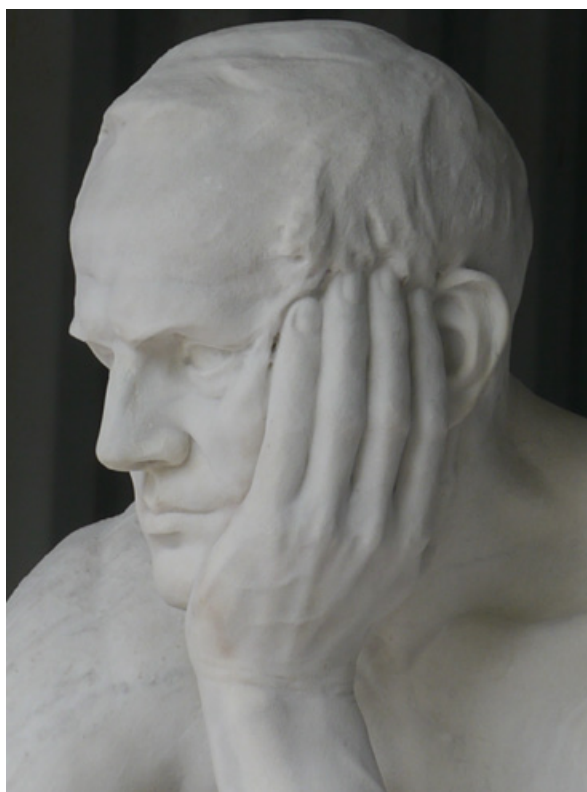


Figure 38 Après mise en place des restitutions en terre cuite. © L. Lefèvre.

En conclusion, cette technique présente des avantages

- Lors de la mise en œuvre, la mise en forme du comblement est réalisée par modelage en terre directement sur l'œuvre, sans altérer le matériau original, au contraire de la résine polyester, souvent utilisée comme comblement des manques sur les faïences, dont le ponçage provoque des rayures de l'émail original autour du comblement.
- *A priori*, l'exécution d'un modelage en terre est beaucoup plus rapide que le modelage en plâtre ou en enduit. La terre doit être retirée encore humide pour sécher de manière lente et homogène, à l'inverse du plâtre ou de l'enduit, qui doivent sécher en place avant d'être poncés.
- La dureté du comblement en terre cuite est ajustable par la température de cuisson, qui peut varier de 500 °C à 1300 °C environ. Une terre cuite à basse température facilite les reprises ou corrections du modelage après cuisson avec des outils diamantés. Par contre, la couleur peut être fortement modifiée en fonction de la température (fig. 39).



Figure 39 Variation de la couleur de la terre en fonction de la température. © L. Lefèvre.

- La stabilité de la terre cuite est le garant d'un bon vieillissement du comblement. Les parties restituées sont beaucoup plus résistantes mécaniquement que du mortier de chaux, du plâtre ou de l'enduit et leur mise en place est réalisée comme s'il s'agissait d'un fragment original.
- La réversibilité est aisée, car le pseudo-fragment collé peut être démonté à l'aide de solvants sans destruction du comblement si un adhésif réversible a été utilisé.

- Des terres de différentes couleurs permettent de réaliser des imitations de matériaux difficiles à se procurer, comme des pierres présentant un veinage particulier, ou de réaliser du nériage, une terre mêlée.
- La terre cuite est un matériau hydrophile qui permet la retouche à l'aquarelle afin d'ajuster la couleur des restitutions.

Des inconvénients sont cependant à noter

- L'inconvénient le plus important est l'éventuelle réduction de taille du modelage après cuisson. Le retrait dépend de la composition de la terre, de la température de cuisson et, surtout, du taux d'humidité de la pâte argileuse utilisée au départ. Cette technique est plus adaptée à des restitutions de petite taille. Il est toutefois possible de réaliser des restitutions de taille relativement importante en fragmentant le modelage en plusieurs tronçons et en incorporant des ajustements formant des entretoises entre les éléments déjà réalisés (cf. les œuvres de Chardigny et de Cyfflé).
- Des comblements en terre cuite sur des œuvres conservées en intérieur ne posent pas de problèmes. Pour une conservation en extérieur, la gélivité éventuelle de la terre employée serait à vérifier au préalable.
- Si le modelage est une opération rapide, le séchage de la terre nécessite généralement plusieurs jours. Le temps nécessaire à la cuisson est d'environ deux jours si l'on dispose d'un four d'essai de taille relativement modeste, mais dépend de la température de cuisson choisie.
- Comme pour un comblement en pierre, si l'on ne veut pas affranchir le plan de fracture, après cuisson, la terre cuite doit être ajustée par meulage avec des outils diamantés, en s'aidant d'un papier carbone pour repérer les points de contact gênants et les éliminer.

En conclusion, la terre-cuite permet la réalisation de comblements stables et réversibles sur des objets ou des sculptures exécutés dans des matériaux divers. Les pseudo-fragments réalisés sont traités comme des fragments originaux et présentent une alternative au plâtre, enduits ou mortiers divers, attachés au matériau original lors de la restauration.

L'auteur

Lionel Lefèvre Diplômé de l'IFROA (INP) département des objets d'art en 1986, ingénieur chimiste ICPI (CPE) diplômé en 1977. Intervenant à l'IFROA (INP) de 1993 à 2001. Intervention en restauration sur des matériaux divers : céramique, verre, pierre, bronze, ivoire... Restaurateur du patrimoine dans les domaines des objets d'art et de la sculpture, installé en indépendant dans un atelier pluridisciplinaire au 8, rue Dumenge, 69004 Lyon depuis 1987. lefevrelianel@orange.fr.

LE CONTRETYPEPAGE INFORMATIQUE ADAPTÉ À LA RÉINTÉGRATION CHROMATIQUE DES LACUNES. APPLICATION DE LA MÉTHODE EN ATELIER POUR LIMITER LE MÉTAMÉRISME

Gaelle Silvant, Adrien Lucca, Sarah Benrubi, Isabelle Garachon

Résumé

Le métamérisme est un phénomène optique qui décrit la variation de l'apparence colorée de deux couleurs de compositions différentes qui apparaissent identiques sous un certain éclairage. En conservation-restauration il se manifeste le plus souvent entre la teinte de l'original et celle du matériau de retouche. La formulation de couleurs par ordinateur est un procédé développé à des fins industrielles dans les années 60 pour pallier ce problème. Il s'agit de définir informatiquement la composition précise d'un mélange de colorants, pour reproduire une couleur de référence. Bien que prometteuse, l'utilisation du contretypage informatique en conservation-restauration est limitée car la méthode est chronophage et coûteuse et qu'elle repose sur l'utilisation d'algorithmes complexes. Partant de ce constat, l'étude a pour but d'adapter le procédé à une pratique d'atelier afin de faciliter la réintégration chromatique des céramiques émaillées, dont les décors bleus sont particulièrement sensibles au métamérisme.

Abstract Metamerism is an optical phenomenon that describes the variation in the coloured appearance of two differently composed colours that appear identical under a specific lighting. In conservation and restoration, it most often manifests between the hue of the original and that of the retouch material. Computer-based colour formulation is a process developed for industrial purposes in the 1960s to address this problem. It involves computationally defining the precise composition of a mixture of colorants in order to reproduce a reference colour. Although promising, the use of computerised colour matching in conservation and restoration is limited because the method is time-consuming and costly and relies on complex algorithms. Based on this observation, the study aims to adapt the process for workshop practice to facilitate the chromatic reintegration of glazed ceramics, whose blue decorations are particularly sensitive to metamerism.

Resumen El metamerismo es un fenómeno óptico que describe la variación en la apariencia de dos colores de diferentes composiciones que parecen idénticos bajo cierta iluminación. En conservación-restauración se manifiesta con mayor frecuencia entre el color del original y el del material de retoque. La formulación de color por la computadora es un proceso desarrollado con fines industriales en la década de 1960 para superar este problema. Se trata de definir informáticamente la composición precisa de una mezcla de colorantes, para reproducir un color de referencia. Aunque es prometedor, este uso de la computadora en restauración es limitado porque el método lleva mucho tiempo, es costoso y se basa en el uso de algoritmos complejos. Teniendo en cuenta esta observación, el estudio tiene como objetivo adaptar el proceso a una práctica de taller para facilitar la reintegración cromática de la cerámica esmaltada, cuyos azules son particularmente sensibles al metamerismo.

Mots-clés retouche, métamérisme, contretypage informatique, réintégration chromatique, spectrocolorimètre, couleurs

La réintégration chromatique des lacunes est une des dernières étapes d'un traitement de conservation-restauration et, de ce fait, conditionne sa réception par le public et/ou le commanditaire de l'intervention. Elle détermine l'aspect visuel final de l'objet traité et joue un rôle important dans la valorisation générale du traitement réalisé. Une des problématiques de la retouche en conservation-restauration est le métamérisme. Il décrit la variation de l'apparence colorée de deux couleurs de compositions différentes qui apparaissent identiques sous un certain éclairage. Il se manifeste généralement par une discordance de teinte entre l'original et le matériau de retouche. Lorsque le métamérisme se produit, l'apparence esthétique globale de l'objet restauré est bouleversée et les lacunes prennent visuellement le dessus sur la matière originale. Les tons bleus sont particulièrement sujets au phénomène et ont tendance à prendre une teinte plus violacée. Leur omniprésence dans les arts céramiques fait du métamérisme une problématique récurrente lors de la retouche de ces pièces (**fig. 1**).



Figure 1 La même retouche éclairée par deux sources de lumière différentes. Sur le détail à droite la retouche illusionniste à la même apparence colorée que la matière originale. Sur le détail à gauche la réintégration chromatique prend une teinte violacée à cause du métamérisme. Dans ce cas, le métamérisme est révélé par un changement d'éclairage entre les deux photographies. L'apparence colorée de cette retouche était similaire à celle de la céramique dans l'atelier de restauration. Assiette en faïence de Delft, premier quart du XVII^e siècle, Rijksmuseum, Amsterdam. © Isabelle Garachon.

L'apparition du métamérisme est intrinsèquement liée à la composition pigmentaire de la retouche. L'objectif de l'étude est donc d'optimiser la sélection de ces pigments grâce à un procédé informatique s'appuyant sur la colorimétrie, appelé formulation de couleur par ordinateur. La recherche s'inscrit dans la continuité de celles effectuées depuis le début des années 2000 par Norman Tennent et James Nobbs (Tennent, Nobbs *et al.*, 2005, 2006, 2007, 2018). Elle tente de solutionner la question du métamérisme en développant une nouvelle méthodologie de contretypage informatique adaptée spécifiquement à la retouche des céramiques émaillées dans le cadre d'une pratique d'atelier.

Définition du métamérisme

L'apparence colorée d'un objet dépend de la distribution spectrale de la source qui l'éclaire et de sa réflectance propre, liée à la nature du matériau. Cela signifie qu'un changement de l'une ou l'autre de ces deux variables peut conduire à un changement d'apparence : c'est ce qu'on appelle le métamérisme. Deux couleurs sont dites métamères si elles ont la même apparence colorée, c'est-à-dire les mêmes valeurs *tristimulus*, sous certaines conditions d'observation, mais que leurs couleurs diffèrent lorsqu'une de ces conditions est modifiée. Dans le cas du métamérisme de l'illuminant, majoritairement en cause, on entend par « conditions d'observation » l'environnement lumineux, soit la ou les sources d'éclairage (**fig. 2**). D'un point de vue physique, le métamérisme est lié à une différence de réflectance¹ entre les deux surfaces colorées métamères. Chaque couleur possède une infinité d'autres métamères, puisque la vision humaine fonctionne par un système de sensibilité énergétique. Deux *stimuli* avec une distribution spectrale différente peuvent donner la même réponse s'ils excitent de la même façon les cônes photorécepteurs.

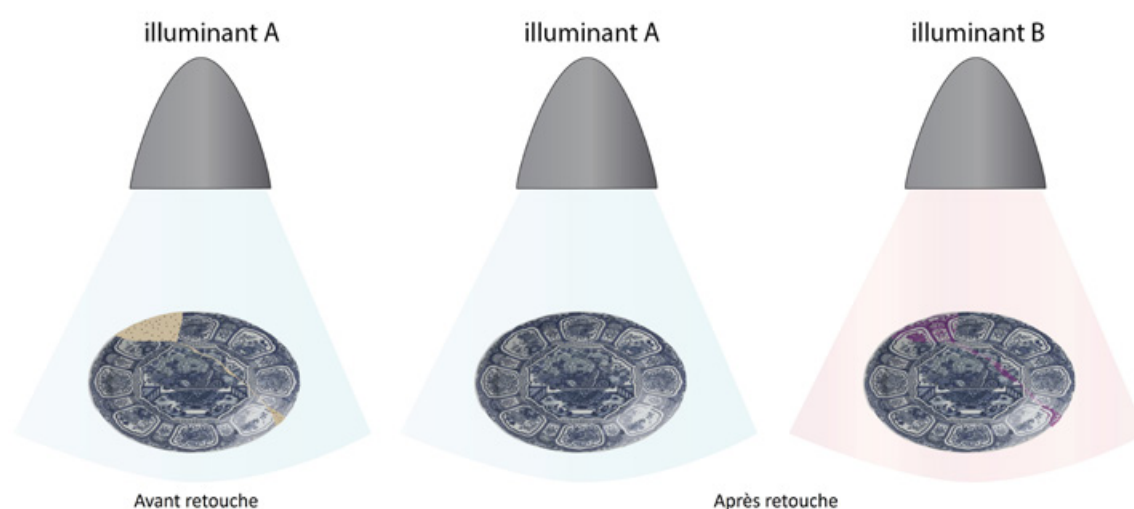


Figure 2 Schéma représentant l'apparition du métamérisme lorsque les conditions d'éclairage sont modifiées. © Isabelle Garachon.

¹ La réflectance décrit le pourcentage de lumière réfléchi par un objet en fonction de la longueur d'onde.

Certaines couleurs et, en particulier, les teintes vives comme les bleus sont plus sensibles aux variations du fait de leurs propriétés spectrales. Les spectres ayant des valeurs maximales élevées, c'est-à-dire des pics de forte intensité et une amplitude importante, réagissent plus facilement aux changements d'éclairage (**fig. 3**).

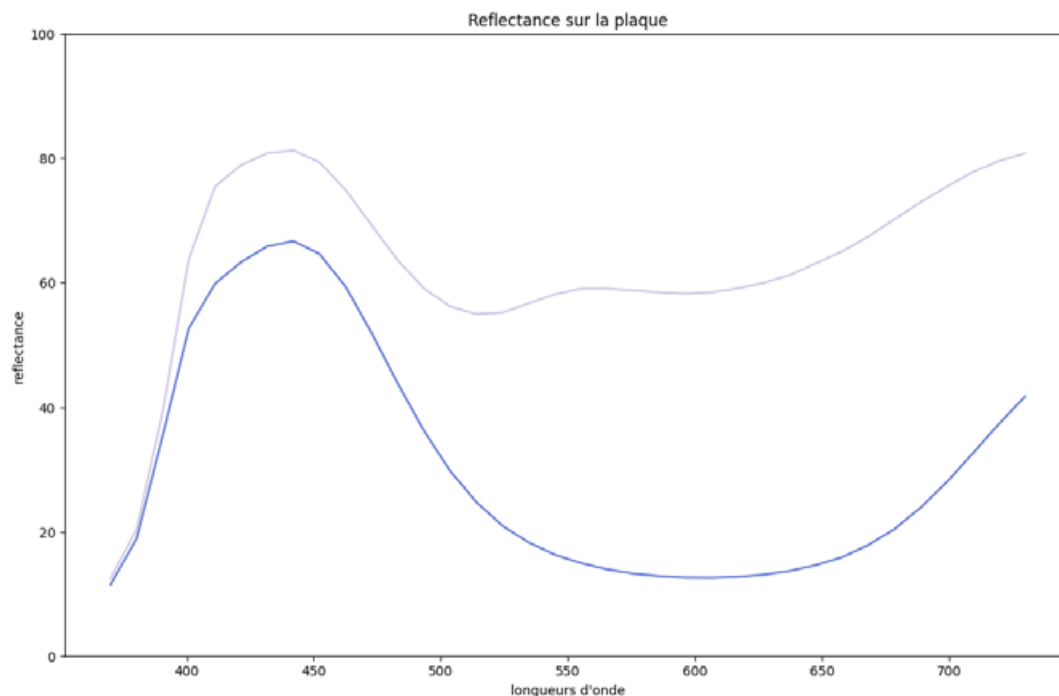


Figure 3 Le diagramme présente la réflectance (en %) de deux pigments en fonction de la longueur d'onde (en nm). Le spectre violet correspond au pigment violet outremer, le spectre bleu à celui du bleu outremer. Le bleu d'outremer est beaucoup plus vif et chromatique que le violet d'outremer, son spectre a également une amplitude beaucoup plus importante. Il est possible de penser qu'il réagira davantage aux variations d'éclairage et sera donc plus sujet au métamérisme.

Métamérisme et éclairage des collections patrimoniales

Le métamérisme est mis en évidence par un changement des conditions lumineuses entre le moment de la réintégration chromatique, dans l'atelier de restauration, et le moment de l'exposition de la pièce. De façon générale, en plus de la lumière naturelle, il existe trois types de sources artificielles de lumière blanche utilisées pour l'éclairage des collections patrimoniales. Elles se regroupent selon leur mode de fonctionnement : l'incandescence, la fluorescence et l'électroluminescence (LED). La lumière a une composition spectrale singulière, en fonction de son mode de production et des propriétés propres à chaque dispositif : fabricant, modèle de l'ampoule, qualité, etc. (**fig. 4**).

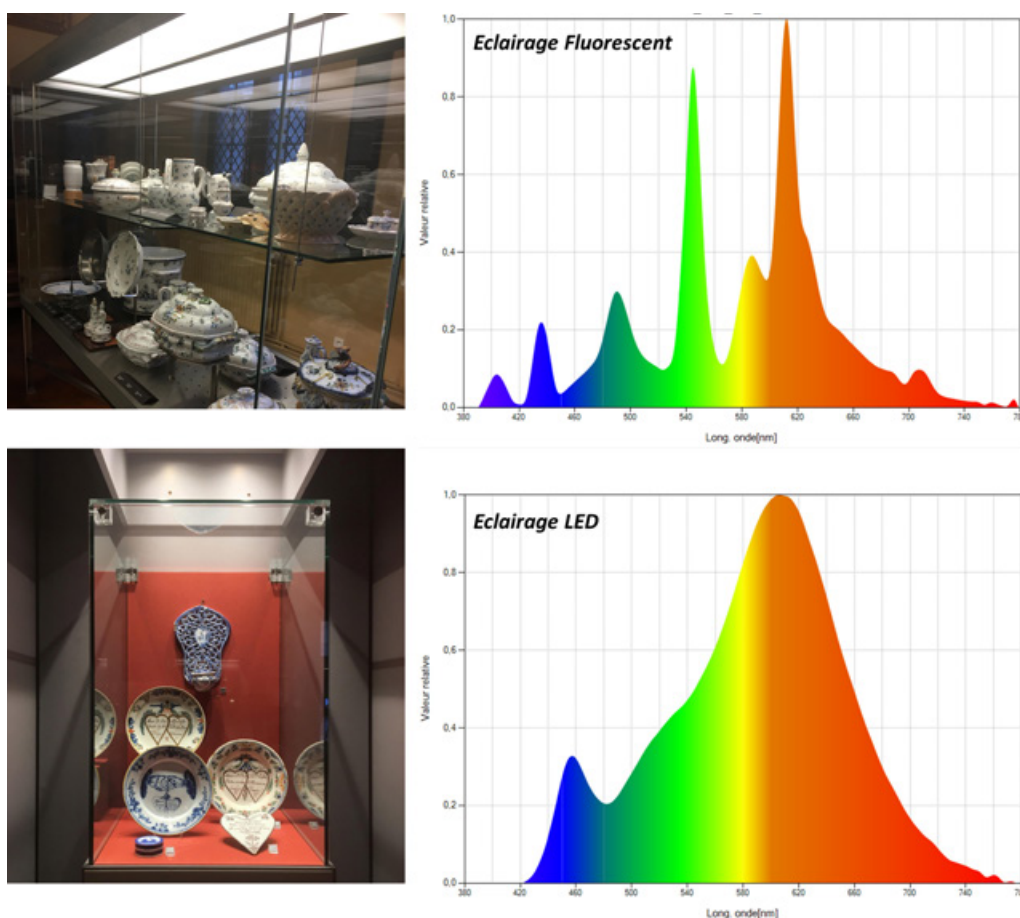


Figure 4 La composition spectrale de la lumière varie selon la source. Les éclairages fluorescents ont un spectre continu sur lequel se superposent des raies plus marquées à certaines longueurs d'ondes. Le spectre des ampoules électroluminescentes est quasi-continu mais possède toujours des pics caractéristiques selon le type de LED. Les deux graphiques proviennent d'une enquête réalisée dans le cadre de cette recherche sur les politiques d'éclairage dans les lieux d'exposition. © Gaelle Silvant.

Dans les musées, les galeries, ou tout autre lieu d'exposition, l'éclairage est souvent une combinaison de lumière diffuse et de lumière directe. Il provient de plusieurs sources qui sont parfois de nature différente. L'éclairage a un rôle majeur puisqu'il permet de moduler l'environnement d'exposition pour correspondre aux normes de conservation préventive, mais aussi pour mettre en avant les valeurs conceptuelles et artistiques des œuvres d'art.

La variété des options d'éclairage est nécessaire à la bonne perception des objets, mais constitue un défi majeur pour les restaurateurs puisque leur multiplicité et leur non-uniformité accroît le risque d'apparition du métamérisme.

Subjectivité de la réintégration chromatique des lacunes

Outre la question de l'éclairage, l'apparition du métamérisme est liée à la composition du mélange utilisé pour la retouche des lacunes. Dans le cas de la retouche des céramique émaillées, plusieurs problèmes se posent. D'une part les matériaux de retouche ont une nature très différente des oxydes métalliques cuits, de compositions variables, utilisés pour les décors émaillés. Il est donc impossible de réaliser une retouche ayant les mêmes caractéristiques

spectrales que l'original. Ceci explique notamment la forte proportion de retouches métamères visibles sur des céramiques, comparativement à d'autres matériaux.

D'autre part, la réintégration chromatique des lacunes est une étape de restauration subjective. Elle traduit la sensibilité des restaurateurs et s'inscrit dans un processus d'habitude singulier. C'est-à-dire que si certains paramètres comme le niveau de réintégration, les matériaux ou la technique employés sont déterminés en adéquation avec les principes de la conservation-restauration, le choix des pigments relève quant à lui d'avantage d'une affection particulière qui n'est pas forcément motivée par des considérations déontologiques. Autrement dit, pour arriver à une même teinte, une multitude de recettes sont possibles et aucune n'est objectivement « meilleure » qu'une autre.

Le contretypage informatique

La formulation de couleur par ordinateur, ou contretypage informatique, est un procédé développé dans les années 1960 à des fins industrielles. Elle permet de définir la composition d'un mélange de colorants dans des concentrations précises, afin de reproduire une couleur de référence. On parle de formulation par ordinateur puisque le procédé est informatisé, et basé sur un algorithme fonctionnant par calculs informatiques. Le contretypage informatique permet théoriquement de gagner du temps par rapport à un échantillonnage manuel et de garantir un contretypage non métamérique.

Le contretypage informatique repose sur la théorie de Kubelka-Munk à deux constantes (K) et (S). La peinture utilisée pour la retouche est un matériau hétérogène dont les propriétés optiques sont déterminées par deux paramètres : le coefficient d'absorption (K) et le coefficient de diffusion (S) ; les deux en fonction de la longueur d'onde. Chacun de ces coefficients dépend des propriétés physiques et chimiques du feuil considéré. Kubelka et Munk considèrent que la lumière qui frappe un feuil de peinture n'est diffusée que dans deux directions : vers le haut ou le bas. Partant de cela, la lumière réfléchie par la surface dépend de l'épaisseur du film de peinture, des coefficients de diffusion et d'absorption du matériau colorant, et de la réflectance du fond sur lequel la peinture est appliquée. Dans un film opaque, la concentration relative des pigments détermine la réflectance. Un mélange de plusieurs peintures donne donc une réflectance caractéristique qui dépend des constantes (K) et (S) de chacun des pigments qui la compose, et communique de ce fait des informations sur la composition du mélange. Pour un film de peinture composé d'un mélange de pigments, l'absorption totale du feuil est égale à la somme des constantes (K) de chacun des pigments proportionnellement à leur concentration dans le mélange, tout comme la constante (S) et, ce, en fonction de la longueur d'onde.

Pour paramétrer la formulation, une base de données est sélectionnée, de laquelle sont extraites les constantes (K) et (S) de chacun des pigments qui la composent. Des contraintes de formulation sont ensuite définies en fonction des exigences requises par la recherche.

Adaptation du procédé pour une utilisation en conservation-restauration

Pour être utile aux conservateurs-restaurateurs, la méthode doit s'ancrer dans la pratique de la conservation-restauration et s'adapter à la spécificité de la réintégration chromatique des céramiques émaillées. Pour ce faire, la méthodologie mise en place s'appuie sur quatre axes correspondant à des objectifs distincts.

Développer une méthode reproductible et standardisée

La formulation de couleur par ordinateur repose sur le calcul informatique de recettes dans le but de correspondre à un standard défini préalablement. La première étape est d'établir à partir de quelles couleurs de référence le contretypage doit être effectué, grâce à l'étude spectro-colorimétrique d'un panel prédéfini. Nous sélectionnons un ensemble de céramiques formant un groupe cohérent et partageant les mêmes caractéristiques spectrales. Il s'agit de douze plaques en faïence de Delft (musées royaux d'Art et d'Histoire de Bruxelles) provenant majoritairement de Delft, mais aussi de Arnhem, Rotterdam, Amsterdam et Utrecht; datées entre la première moitié du XVII^e siècle et le XIX^e siècle. Ces plaques ont une apparence colorée très variable, avec aussi bien des bleus contrastés et chromatiques, que des bleus clairs plus gris (**fig. 5 et 6**).



Figure 5 Ensemble du panel de plaques en faïence de Delft ayant servi pour l'étude spectro-colorimétrique et la détermination des bleus de référence. © Gaëlle Silvant.

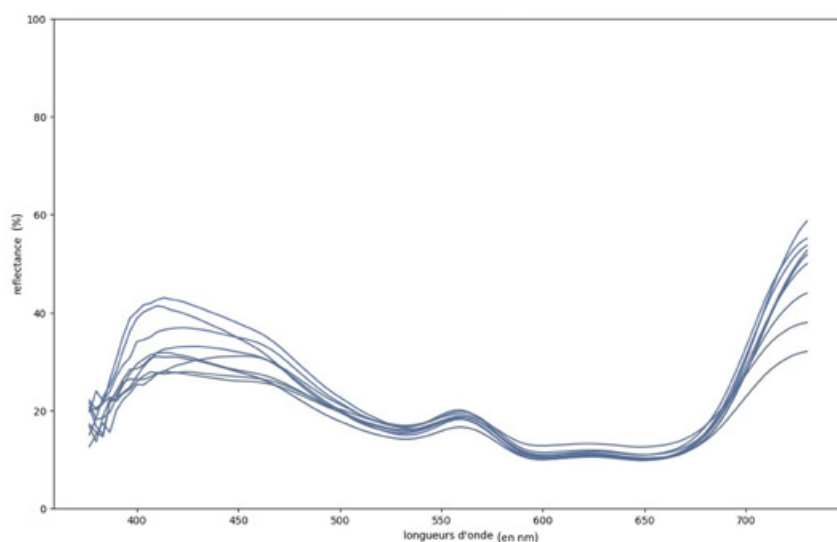


Figure 6 Pour chacune des douze plaques, vingt points de mesure sont réalisés avec le spectrocolorimètre (5x4 zones de mesures : fond blanc, décor bleu clair, moyen et foncé). Sur le diagramme chaque spectre correspond à la moyenne des cinq mesures réalisées dans les tons moyens pour une plaque. Le graphique souligne la grande similarité des spectres de l'ensemble des plaques du panel.

Correspondre à la pratique réelle de la retouche en atelier

Le contretypage informatique repose sur l'utilisation d'une base de données qui doit être adaptée à l'objectif de la formulation, ici la réintégration chromatique des faïences stannifères à décor bleu. La revue de la littérature et l'enquête réalisée² à ce sujet permettent de sélectionner la gamme de peintures acryliques de la marque Golden Artist Colors®, largement utilisée par les conservateurs-restaurateurs de céramique. Quarante-cinq pigments, soit la quasi-totalité de la gamme, sont sélectionnés. Cela permet à l'algorithme d'avoir une plus grande liberté de formulation, d'être plus efficace et, ceci, sans être restreint aux combinaisons traditionnellement utilisées par les restaurateurs.

La caractérisation spectro-colorimétrique du panel de plaques souligne l'influence des fonds blancs sur la chromaticité et la réflectance des décors peints. Les décors bleus ne sont pas complètement opaques mais plutôt fondus dans l'émail : plus les couleurs sont claires et plus elles sont concentrées en émail blanc. Cet émail ne correspond pas à un blanc parfait, totalement réfléchissant, mais plutôt à un gris coloré tirant vers le rouge, le jaune ou le vert (fig. 7).



Figure 7 La comparaison de ces revers d'assiettes en faïence de Delft illustre l'hétérogénéité de l'émail blanc d'une manufacture ou d'un objet à l'autre. L'émail stannifère n'est pas parfaitement blanc mais a une sous-teinte colorée variable. Photo d'une vitrine du Kunstmuseum Den Haag. © Gaelle Silvant.

Ce constat amène à considérer le blanc et le bleu comme des paramètres distincts, ce qui se rapproche de la pratique d'atelier. L'aspect vitrifié, extrêmement lisse et avec une certaine profondeur des décors émaillés, est souvent imité au moment de la retouche par la superposition de couches plus ou moins transparentes, appliquées sur un comblement préalable teinté dans la masse ou sur une teinte de fond opaque reproduisant l'émail stannifère « blanc ». D'un point de vue méthodologique, cette dissociation blanc/bleu permet d'obtenir un bleu de Delft « universel » faisant office de référence pour le contretypage informatique.

² Un questionnaire a permis de recueillir les habitudes de retouche de 21 restauratrices exerçant dans différents pays d'Europe et aux Etats-Unis.

Autrement dit, on considère un bleu tout à fait transparent apposé sur un fond blanc variable (fig. 8). De cette façon la notion de transparence est introduite dans l'étude et l'algorithme est optimisé puisque les deux couleurs sont considérées indépendamment.



Figure 8 Comparaison de la chromaticité des bleus en fonction du fond pour la plaque (tableau rectangulaire représentant une kermesse, Anonyme, d'après une gravure de Nicolas de Bruyn ou Boetius Adam Bolswert d'après Vinckboons, 1640, 62x58cm, Delft, Inv.EV319, MRAH, Bruxelles). Le dégradé de gauche correspond à l'apparence colorée réelle du bleu. Le dégradé de droite montre l'apparence colorée du bleu une fois dissocié de l'émail blanc et appliqué sur un fond parfaitement réfléchissant (blanc parfait).

Proposer une méthode facilement applicable

Traditionnellement, le contretypage informatique permet d'obtenir des recettes où chaque pigment est introduit dans une concentration précise afin de garantir un résultat non métamérique. Dans le cas de la réintégration chromatique des lacunes il n'est pas envisageable d'utiliser de telles recettes, trop contraignantes pour les restaurateurs. Celles-ci impliquent de peser d'infimes quantités de peinture, et de réitérer le processus à la moindre variation de teinte au niveau de l'original à reproduire. La méthode mise en place vise plutôt à repérer, à l'issue de la formulation, les combinaisons de pigments les plus efficaces pour limiter le métamérisme. Et à l'inverse, d'identifier celles qui donnent les moins bons résultats en fonction de la tolérance choisie.

Il est possible de s'intéresser uniquement à la nature des matériaux plutôt qu'à leurs concentrations en limitant l'algorithme à deux pigments par recette. Diminuer le nombre de pigments permet de prédire précisément leur comportement sous différents éclairages, et d'avoir une amplitude plus importante concernant leurs proportions dans le mélange.

Correspondre à la multiplicité des modes d'éclairage

Le choix des illuminants de référence pour la formulation de couleur est primordial puisqu'il définit les conditions dans lesquelles l'ordinateur doit produire une recette métamère. L'objectif est de formuler des couleurs faiblement métamères, dont l'apparence colorée ne tranche pas avec celle de la céramique sous un maximum de sources de lumière, c'est-à-dire des couleurs dont l'indice de métamérisme est inférieur à la tolérance de la vision humaine, à son seuil de perception. La méthode développée permet de prendre en considération les réflexions théoriques sur l'éclairage des collections patrimoniales en soumettant les recettes à quatre illuminants différents :

- l'illuminant A (CIE);
- l'illuminant D65 (CIE);
- un tube fluorescent Philips Graphica 965 à 6000K ayant un IRC de 95. Il représente un éclairage fluorescent de bonne qualité, qui pourrait être utilisé dans un atelier de restauration;
- une LED haut de gamme à 3200K, ayant un IRC de 97. Cette LED correspond aux recommandations actuelles en matière d'éclairage muséal.

Résultats et discussion

À l'issue de la formulation, le programme³ nous propose cent-vingt-deux recettes. L'analyse statistique des résultats permet de réduire progressivement ce nombre à sept recettes et huit pigments. La sélection se compose de trois bleus : bleu d'anthraquinone, bleu d'outremer, bleu de phtalocyanine (teinte verte); trois rouges : rouge de quinacridone, magenta de quinacridone, violet de quinacridone; ainsi que deux violets : violet d'outremer et violet de dioxazine (**fig. 9**). À noter que le bleu d'anthraquinone est présent dans six recettes sur les sept proposées. Nous pouvons aisément supposer qu'il peut être considéré comme base pour la retouche des bleus de Delft.

	pigment 1	pigment 2
1	bleu d'anthraquinone	bleu d'outremer
2	bleu d'anthraquinone	dioxazine violet
3	bleu d'anthraquinone	violet d'outremer
4	bleu de phtalocyanine (teinte verte)	violet d'outremer
5	bleu d'anthraquinone	magenta de quinacridone
6	bleu d'anthraquinone	rouge de quinacridone
7	bleu d'anthraquinone	violet de quinacridone

Figure 9 Liste des recettes sélectionnées à l'issue de la formulation de couleur par ordinateur.

La liste des pigments retenus est surprenante, puisque la gamme est restreinte et comprend essentiellement des teintes vives et chromatiques, avec une majorité de pigments organiques.

³ Un algorithme spécifique a été écrit et programmé par Adrien Lucca.

Après une expérimentation en atelier les doutes sont levés. Chacune des sept recettes permet de contretyper efficacement chacune des douze plaques dans les tons bleu clair, moyen et foncé (**fig.10**).



Plaquette n°4



Contretype recette n°1, ton foncé

Figure 10 Exemple du contretype de la plaque n° 4 pour le ton bleu foncé réalisé avec la recette n° 1 (anthraquinone bleu et outremer bleu). L'ensemble des échantillons est réalisé de la même façon : une plaquette correspond à une recette et trois tons bleu clair, moyen et foncé pour une plaque. La couleur est appliquée sur un fond blanc imitant l'émail stannifère identique pour l'ensemble des échantillons. © Gaelle Silvant.

L'ensemble des échantillons est ensuite soumis à des analyses spectrales et colorimétriques. Ces tests expérimentaux attestent que les recettes sont des métamères du bleu de Delft, mais aussi qu'elles donnent un résultat satisfaisant sous les quatre illuminants sélectionnés. Parallèlement, le contretypage informatique nous permet aussi de mettre en exergue les pigments en présence dans les recettes les plus métamères. Les résultats sont déconcertants puisqu'ils révèlent que les pigments à base de cobalt (bleu de cobalt et de cæruleum) sont les plus sensibles au métamérisme, alors même que l'émail est composé d'oxyde de cobalt. Les observations réalisées tout au long de l'étude et les résultats obtenus permettent de formuler des recommandations générales afin d'appréhender plus facilement la retouche des bleus de Delft. Premièrement il est indispensable de réaliser la retouche sous un éclairage de qualité. L'obsolescence de l'éclairage fluorescent doit ouvrir la voie à une généralisation de l'éclairage LED de haute qualité dans les ateliers de restauration. Ces derniers utilisent encore souvent des dispositifs anciens dont les performances ne sont pas optimales. L'étude souligne également l'intérêt de se doter de lampes munies de variateurs de température de

couleur intégrés. Celles-ci permettent de visualiser facilement d'éventuelles variations de teintes liées au métamérisme.

Concernant la retouche en elle-même, nous préconisons la réalisation d'une retouche en deux temps avec d'un côté la réintégration du fond « blanc » (opaque) et de l'autre celle des décors bleus (superposition de couches transparentes). Ce procédé permet à la fois de se rapprocher de la matérialité des faïences stannifères mais aussi de limiter le nombre de pigments utilisés en jouant avec la transparence des couleurs. En effet, la recherche insiste sur la nécessité de réduire la palette pour limiter le métamérisme. De façon générale nous considérons qu'en plus du blanc de titane et du noir de carbone, deux pigments seulement suffisent pour reproduire une couleur. Le noir et le blanc permettent de moduler les teintes sans influencer l'emprunte spectrale des mélanges. Dans le cas des bleus de Delft, les deux autres pigments doivent être choisis parmi les sept recettes identifiées grâce à la formulation de couleur : bleu anthraquinone/bleu outremer, bleu anthraquinone/violet de dioxazine, bleu anthraquinone/violet d'outremer, bleu de phtalocyanine (teinte verte)/violet d'outremer, bleu d'anthraquinone/magenta de quinacridone, bleu d'anthraquinone/rouge de quinacridone, ou bleu d'anthraquinone/violet de quinacridone. Il est possible de choisir l'une ou l'autre recette en fonction de la pièce traitée ou sur la base de la simple préférence personnelle en fonction des propriétés d'un pigment (transparence, pouvoir tinctorial, etc.). Dans chaque mélange on retrouve un pigment primaire, ici majoritairement le bleu d'anthraquinone, et un pigment secondaire. C'est ce second pigment qui détermine la sous-teinte de la retouche.

Conclusion

Le contretypage informatique est un bon outil pour aider les conservateurs-restaurateurs dans le cadre de la réintégration chromatique des lacunes. Son efficacité est cependant conditionnée par sa méthodologie d'utilisation. C'est-à-dire que la formulation de couleur par ordinateur doit être utilisée dans le cadre d'études globales, comme celle menée ici, plutôt que pour l'analyse ponctuelle d'un objet. En effet, l'avantage de ce type de procédé informatique réside dans le traitement simultané et quasi-instantané d'un grand nombre de données afin de pouvoir réaliser des comparaisons statistiques et mieux comprendre des phénomènes récurrents.

L'étude a établi une nouvelle méthodologie pour l'utilisation de la formulation de couleur par ordinateur appliquée à la retouche des bleus de Delft. Celle-ci a permis de tirer des recommandations facilement utilisables par les restaurateurs au moment de leurs retouches, dans leur atelier.

Si l'état actuel de la recherche se limite à la réintégration chromatique des bleus de Delft, nous ne pouvons que souligner l'intérêt de poursuivre la caractérisation colorimétrique d'autres groupes cohérents de céramiques dans le but d'appliquer la méthodologie de retouche développée ici. Une brève recherche préliminaire a notamment permis de constater la constance de la réflectance des bleus à travers plusieurs productions européennes de faïence et de porcelaine tendre. Parallèlement nous avons pu observer que les porcelaines chinoises possédaient des caractéristiques spectrales différentes, motivant de poursuivre l'étude dans ce sens.

Références bibliographiques

Allen E. (1980), « Colorant formulation and shading », dans Grum F., Bartleson C. J. (éd.), *Optical radiation measurements*, Vol. 2 : *Color measurement*, New York, Academic Press, p. 290.

Berns Roy S. (2005), *A retouching palette that minimize metamerism*, Rochester, New York, USA, Rochester Institute of technology, 15 p.

Berns Roy S. (2016), *Color science and the visual arts. A guide for conservators, curators, and the curious*, Los Angeles, The Getty conservation institute, 264 p.

Garside D., Curran K., Korenberg C., Macdonald L., Teunissen K. (2017), « How is museum lighting selected? An insight into current practice in UK museums », *Journal of the Institute of conservation*, Vol. 40, N° 1, p. 3-14.

Johnston-Feller R. (2001), *Color science in the examination of museum object. Non-destructive procedures*, Los Angeles, The J.P. Getty trust, 384 p.

Kettler W. et al. (2016), *Color technology of coatings*, Vincentz Network GmbH & Co.KG, Hanovre, p. 19-20.

Kirchner E. (Juillet 2019), « Instrumental color mixing to guide oil paint artist », *Journal of the international colour association*, N° 24, p. 24-34.

Michalsky S., Druzik J. R. (2012), *Guidelines for selecting solid-state lighting for museums*, Los Angeles, Ottawa, J.P. Getty trust, Canadian conservation institute, 58 p.

Staniforth S. (Août 1985), « Retouching and color-matching : the restorer and metamerism », *Studies in conservation*, Vol. 30, N° 3, p. 101-111.

Tennent N. H. (2005), « The use of computer-colour prediction in the restoration of ceramics », dans ICOM-CC (éd.), *Conférence : ICOM-CC 14th Triennial Meeting, La Haye*, London, James & James/Earthscanp, p. 146-153.

Tennent N. H., Nobbs J. H., Lawton S., Pugh S. L. (2006), « Developments in color measurements for the restoration of blue and white dutch tiles », dans SFIIIC (éd.), *Conférence : SFIIIC, International institute for conservation of historic and artistic works*, Paris, SFIIIC, p. 259-265.

Tennent N. H., Lamain B., Nobbs J. H., Pugh S. L., Lawton S., Van Elteren J. T. (2008), « The restoration of two blue and white Chinese porcelain plates : new application of colour science and analytical chemistry », dans *Conservation science conference, Milan*, London, Éd Archetype Publications Ltd, p. 110-115

Tennent N. H., Garachon I., Nobbs J. H., Slager M. (2018), « The implementation of computer-match pigment selection for overcoming metamerism in ceramic glaze reinstatement », dans *GlazeArt2018 International conference, Glazed ceramics in cultural heritage*, Lisbonne, LNEC, p. 227-237.

Walowit E. (1988), « Spectrophotometric color-matching based on two-constant Kubelka-Munk theory », *Color research and application*, Vol. 13, N° 6, p. 358-362.

Les auteurs

Gaëlle Silvant Conservatrice-restauratrice indépendante de céramique et verre, Bruxelles et Paris, gaelle.silvant@lacambre.be

Adrien Lucca Artiste plasticien et chercheur indépendant, Bruxelles.

Sarah Benrubi Conservatrice-restauratrice indépendante de céramique et verre et professeure de restauration dans l'atelier de conservation-restauration de céramique et verre de l'ENSAV La Cambre, Bruxelles, sarah.benrubi@lacambre.be

Isabelle Garachon Conservatrice-restauratrice de céramique, verre et matériaux pierreux, Rijksmuseum, Amsterdam, I.Garachon@rijksmuseum.nl

LA DÉGRADATION DU VERRE DANS LES COLLECTIONS DE SPÉCIMENS EN FLUIDE. ÉTUDE DE LA COLLECTION ARIËNS KAPPERS CONSERVÉE AU MUSÉE VROLIK, AMSTERDAM

Ash Dupuis

Résumé

Cet article porte sur les phénomènes d'altération chimique et physique affectant les contenants en verre des collections de spécimens en fluide. En s'appuyant sur une collection du début du XX^e siècle conservée au Vrolik Museum d'Amsterdam, il a été possible d'établir un nouveau modèle d'altération spécifique aux verres de format rectangulaire utilisés dans les collections en fluide, mettant en avant les interactions entre altérations chimiques et physiques. Des récipients en verre très dégradés ont été étudiés à l'aide d'outils variés : cet article se concentrera sur l'étude fractographique, les observations sous polariscope et les analyses réalisées au microscope électronique à balayage couplé à la spectroscopie à rayons X à dispersion d'énergie (MEB-EDS). Cette étude a permis de mettre en évidence les forces physiques affectant les parois des contenants et leurs interactions avec l'altération chimique du verre.

Abstract This article examines the chemical and physical degradation phenomena affecting the glass containers in fluid specimen collections. Drawing on an early 20th century collection housed at the Vrolik Museum in Amsterdam, a new degradation model specific to the rectangular glass vessels used in fluid collections has been developed, highlighting the interactions between chemical and physical alterations. Highly degraded glass containers were studied using various methods; this article focuses on fractographic analysis, observations under a polarising microscope, and analyses performed with a scanning electron microscope coupled with energy-dispersive X-ray spectroscopy (SEM-EDS). The study reveals the physical forces impacting the container walls and their interplay with the chemical deterioration of the glass.

Resumen Este artículo trata de los fenómenos de alteración química y física afectando los frascos de vidrio que contienen especímenes conservados en fluido. Estudiando una colección de principios del siglo XX conservada en el Vrolik Museum de Amsterdam, fue posible establecer un nuevo modelo de alteración específica de los frascos rectangulares utilizados para colecciones en fluido, notando las interacciones entre alteraciones químicas y físicas. Recipientes de vidrio muy degradados fueron estudiados con varios útiles; este artículo se concentra sobre el estudio fractográfico, las observaciones mediante un polaroscopio y los análisis realizados con un microscopio electrónico acoplado a la espectroscopía de rayos X a dispersión de energía (MEB-EDS). Este estudio permitió de poner en evidencia las fuerzas físicas que afectan las paredes del frasco y sus interacciones con la alteración química del vidrio.

Mots-clés altération du verre, spécimens en fluide, anatomie, histoire naturelle, forces physiques, stress résiduel, lixiviation, fractographie, polariscope, MEB-EDS

Introduction

Cet article est tiré d'un mémoire de fin d'étude en conservation-restauration, soutenu à la Haute-École Arc de Neuchâtel, en août 2023. Il a été réalisé en partenariat avec le musée Vrolik d'Amsterdam, où est conservée la collection de cerveaux du professeur Ariëns Kappers, sujet du mémoire.

Histoire de la collection

Assemblée au cours de la première moitié du XX^e siècle, la collection de cerveaux du professeur Cornelius Ubbo Ariëns Kappers, premier directeur de l'Institut de neuroscience des Pays-Bas entre 1908 et 1946, est considérée comme l'une des plus anciennes et complètes au monde. C'est sur cette collection que le professeur a basé ses recherches pionnières en la matière (Eling, Hofman, 2014, p. 110-111).

Cette collection comportait à ses débuts 500 spécimens en fluide, d'origine animale principalement, issus du monde entier (Hofman, Johnson, 2011, p. 65). Cependant, seulement 292 de ces flacons nous sont parvenus, impliquant une perte de 42 % de la collection en 78 ans. Les contenants restants sont en majeure partie de base carrée ou rectangulaire et de formats divers, allant de 5x5x13 cm à 12x12x20,5 cm. Bien que l'origine de cet appauvrissement important soit difficilement identifiable en l'absence d'archives, les quatre déménagements de la collection au cours de son histoire y sont peut-être pour quelque chose. Le dernier en date a eu lieu en 2016 lors du transfert définitif du fonds au musée Vrolik d'Amsterdam. La collection n'étant plus utilisée pour l'enseignement et la recherche, mais gardant une valeur historique importante, sa patrimonialisation a été décidée conjointement entre l'institut et le musée.

Objectifs de l'étude

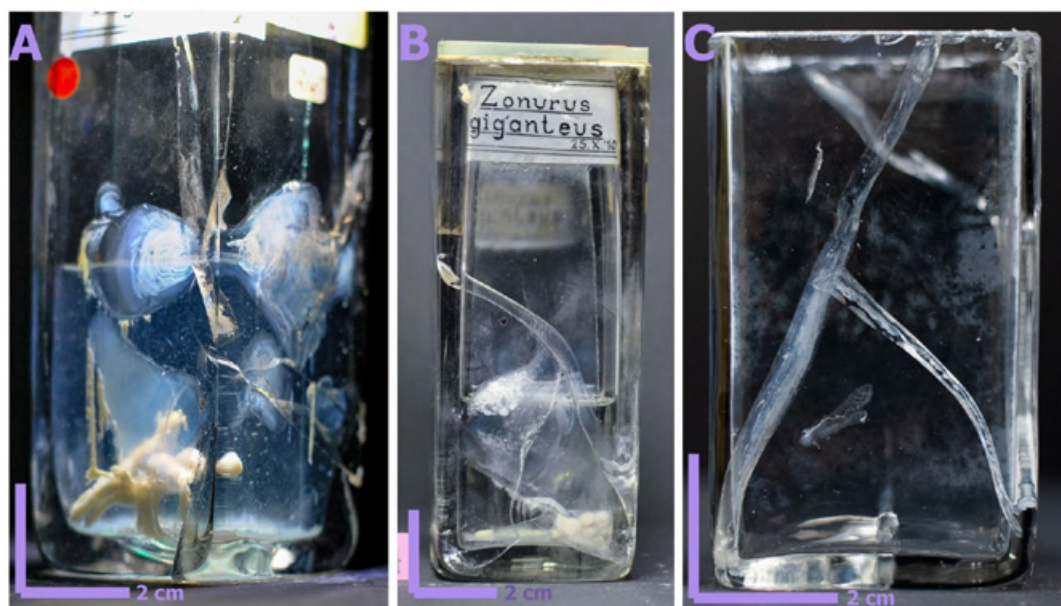


Figure 1 Exemples de flacons altérés de la collection de cerveaux du professeur Ariëns Kappers. Le cliché A correspond au contenant VGP14, présentant les altérations les plus avancées. Les clichés B et C représentent respectivement les flacons VGP4 et VGP45. Ce dernier a été vidé préalablement à la prise de vue. © Ash Dupuis / Haute-École Arc / Museum Vrolik.

En amont du projet, une première étude de la collection par Inge Dijkman, conservatrice-restauratrice de spécimens en fluide au musée Vrolik, a permis d'établir un constat préliminaire : 55 des 292 flacons restants présentent des altérations du verre très avancées. Ces dernières se caractérisent par d'importantes fractures et fissurations, associées à un blanchissement des surfaces de fracture, engendrant une perturbation visuelle importante, une perte des fluides de conservation, divers précipités et efflorescences (**fig. 1**).

À partir de ce constat, le musée souhaitait savoir s'il était possible d'envisager une intervention de conservation curative des flacons de manière à ce qu'ils puissent continuer à contenir les spécimens en fluide sur le long terme. Bien que la conservation du spécimen prime sur la conservation du contenant, ce dernier s'inscrit dans un ensemble et représente un document informant l'histoire matérielle de la collection. Si possible, il convient donc de le conserver et de le garder associé au spécimen. Pour répondre à cette question, deux axes de recherche ont été établis.

Le premier vise à mieux comprendre les phénomènes de dégradation affectant les contenants en verre des collections de spécimens en fluide, question encore peu investie par la conservation-restauration. L'objectif de cette étude est d'explorer une hypothèse de départ selon laquelle deux types de mécanisme de dégradation entreraient en jeu : des mécanismes physiques liés à des changements de pression internes et des mécanismes chimiques liés à la part aqueuse des fluides de conservation, l'étendue de leurs interactions étant jusqu'alors inconnue.

Le second axe de recherche, qui n'est pas présenté dans cet article, se penche sur l'étude de la compatibilité entre les polymères utilisés pour la conservation-restauration du verre historique et les fluides de conservation; ce qui constitue une première étape logique vers l'établissement d'un protocole de conservation curative.

Au-delà de la volonté de restaurer cette collection, étudier ces phénomènes d'altération représente un intérêt scientifique majeur. En effet, peu de recherches ont été menées sur le sujet, bien que ces altérations puissent potentiellement toucher l'ensemble des contenants en verre présents dans les collections de spécimens en fluide. Mieux connaître ces mécanismes est une étape nécessaire pour assurer la préservation sur le long terme des spécimens et des flacons qui les contiennent.

Étude des altérations

Pour cette étude, 66 flacons ont fait l'objet d'observations approfondies et de constats d'état détaillés. Ont été sélectionnés les 55 verres présentant d'importantes dégradations et 11 autres servant de comparaison. Ont été considérés uniquement les contenants rectangulaires de base carrée, puisqu'ils sont les plus altérés et considérés comme représentatifs de la majorité des verres de la collection. Cette typologie de flacons était probablement destinée initialement à la chromatographie, mais leurs faces planes en font des contenants particulièrement appropriés pour le stockage de spécimens en fluide; comparés aux récipients circulaires plus anciens : ils limitent les déformations optiques des spécimens lorsqu'ils sont observés à travers le verre. Enfin, le corpus d'étude a intégré plusieurs flacons vides ayant été dissociés de leurs spécimens. Ces verres ont principalement été utilisés pour les observations sous lumière polarisée.

De manière générale, la paroi par laquelle le spécimen est destiné à être observé est polie et l'arrière du flacon est peint en noir sur la face extérieure. Les spécimens reposent simplement au fond du flacon ou sont montés sur des plaques de verre. Les lèvres des contenants sont plates et abrasées et les couvercles sont de simples rectangles de verre collés par un silicone transparent ou un mastic blanc.

Mécanismes physiques de dégradation

Polariscope

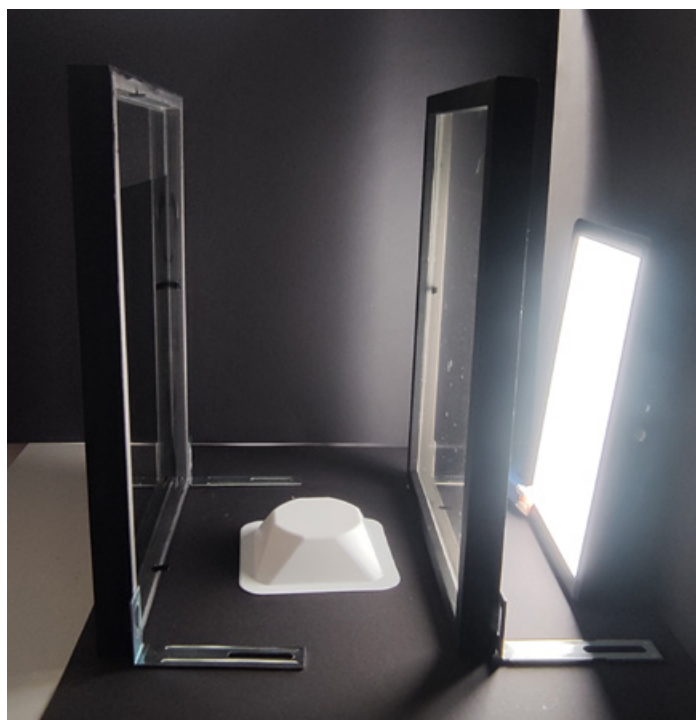


Figure 2 Polariscope construit pour cette étude. La source lumineuse est à l'arrière, le flacon observé est placé entre les deux filtres. © Ash Dupuis / Haute-École Arc / Museum Vrolik.

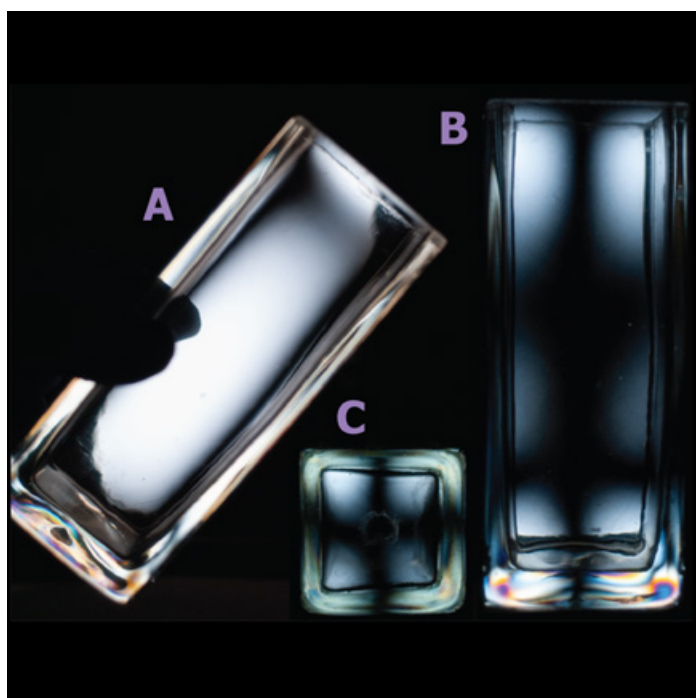


Figure 3 Flacon vide associé à la collection. Les zones blanches et colorées indiquent une biréfringence du verre trahissant la présence de tensions internes au matériau. Les prises de vue B et C montrent une concentration des tensions au niveau des arrêtes et des angles. La prise de vue A montre le même flacon, penché, mettant en avant la présence de tensions résiduelles à travers toute la paroi en verre. © Ash Dupuis / Haute-École Arc / Museum Vrolik.

Le premier outil utilisé pour l'étude des mécanismes physiques de dégradation est un polariscope. Il s'agit d'un appareil utilisant la lumière polarisée pour rendre visibles les tensions au sein d'un matériau transparent. Quand le verre est contraint, ce dernier devient biréfringent - il a deux indices de réfraction (Redner, 1995, p. 180). Bien que des polariscopes de qualité industrielle existent, un appareil fabriqué à la main en laboratoire était suffisant pour révéler les zones sous tension des flacons. Il se compose d'une source lumineuse uniforme et de deux films polarisants appliqués sur des plaques de verre. La source lumineuse est située à l'arrière. La lumière traverse un premier filtre, puis l'objet, puis un second filtre (fig. 2). Les observations se font à travers le deuxième filtre : les zones biréfringentes du verre sont mises en avant par la lumière et apparaissent blanches ou colorées, tandis que le reste du flacon n'est pas illuminé et demeure noir (fig. 3). Le détail des éléments utilisés est disponible dans les annexes du mémoire (Dupuis, 2023, p. 127).

Les observations ont été effectuées sur les flacons vides conservés avec la collection, ainsi que sur certains contenants ayant encore leurs spécimens. L'arrière des flacons en utilisation étant peint, les meilleures observations ont été faites sur les flacons vides.

De cette manière, des tensions résiduelles ont pu être mises en avant au sein du verre. Elles sont principalement localisées au niveau des coins et des arêtes des flacons, mais les parois peuvent-être touchées également (fig. 3). L'origine supposée de ces tensions est technologique. En effet, les tensions principales sont localisées dans les coins et dans les arêtes, ce qui correspond aux zones où le verre est le plus contraint lorsqu'il est soufflé dans un moule. De plus, lors de la réalisation d'un objet en verre, la dernière étape (hors travail à froid) est celle du recuit. Elle consiste à refroidir lentement le verre afin d'éviter l'apparition de contraintes internes. En refroidissant, la structure amorphe du verre se resserre. Un refroidissement inégal et trop rapide empêche une restructuration homogène du réseau siliceux et engendre des tensions dites « résiduelles » dans la matière (Davison, 2003, p. 11-12; Janssens, 2008, p. 10). Ces tensions sont intrinsèques au matériau et existent indépendamment de contraintes externes.

Fractographie

La fractographie est l'étude des surfaces de fracture pour en comprendre l'origine (Quinn, 2016). Une analyse approfondie a été faite sur deux flacons, VGP60 et VGP18 (Dupuis, 2023, p. 54-55), appuyée par des observations complémentaires sur d'autres contenants de la collection. Ces observations ont permis d'aboutir au schéma présenté en figure 4.

Ces observations peuvent se résumer de la manière suivante : à l'échelle d'une paroi, les ondes de Wallner primaires (*primary Wallner lines*) permettent de définir la direction dans laquelle avance une fracture. Sur les contenants étudiés, les fractures se forment à la lèvre du flacon en descendant vers le bas sans forcément l'atteindre, puis continuent latéralement en traversant une ou plusieurs arêtes, avant de remonter vers la lèvre et s'y terminer, formant une fracture en forme de "U" distinctive. L'observation des ondes de Wallner secondaires (*secondary Wallner lines*) et des lignes de crête (*hackle marks*) permet de déterminer la nature des forces à l'origine de ces fractures. Ici, elles indiquent une flexion des parois s'exerçant vers l'intérieur, amenant à la compression de la surface externe du verre (*compressive side*), et à la mise sous traction de la surface interne (*tensile side*). À cette flexion est associée une torsion, interprétable grâce à la présence de lignes de crête en escalier (*step hackle marks*) (fig. 4 et 5).

Surface de fracture formée par une force de flexion avec torsion

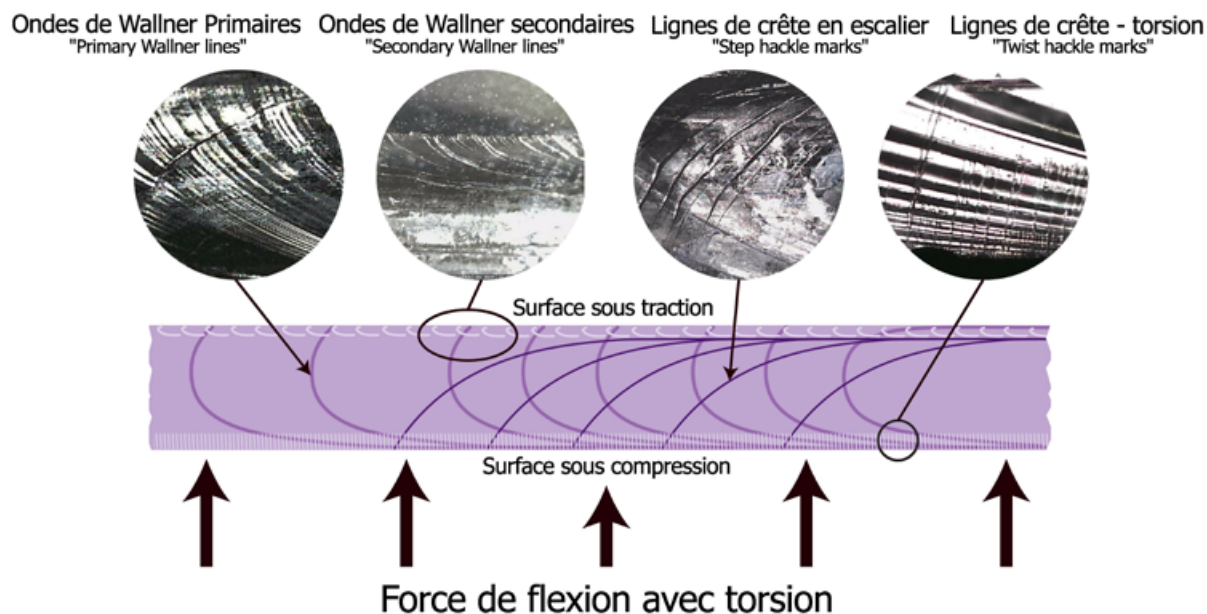


Figure 4 Schéma fractographique résumant les observations faites sur le flacon VGP60, représentatif des observations pouvant être faites sur l'ensemble des fractures de la collection. © Ash Dupuis / Haute-École Arc / Museum Vrolik.



Figure 5 Relevé détaillé des fractures du flacon VGP18, illustrant une organisation typique des fractures observables sur la collection. Les ronds marquent les points de départ des trois fractures. © Ash Dupuis / Haute-École Arc / Museum Vrolik.

Ces observations sont cohérentes et confirment l'hypothèse formulée par Andries Van Dam (Van Dam, 2000), selon laquelle les fractures se forment suite à des changements de pression interne. En effet, il est supposé que lors d'une baisse de la température ambiante, le volume du liquide de conservation diminue, augmentant l'espace entre le fluide de conservation et le couvercle. Or, si le flacon est scellé hermétiquement, cet espace ne peut se remplir d'air, créant à la place un effet de vide qui se répercute sur les parois du flacon, qui se retrouvent « aspirées » vers l'intérieur. Cet effet se reporte également sur le couvercle, qui exerce alors une force de compression sur les parois (fig. 6). Cependant, l'origine des forces de torsion ressortissant de l'analyse fractographique n'est pour le moment pas bien définie. Il est possible qu'elles résultent d'une compression inégale du couvercle sur les parois en verre, ou alors de tensions résiduelles au sein du matériau, ou bien de l'épaisseur inégale des parois. Il est fort possible qu'une combinaison de ces trois facteurs en soit la source, mais des études complémentaires sont nécessaires pour s'en assurer.

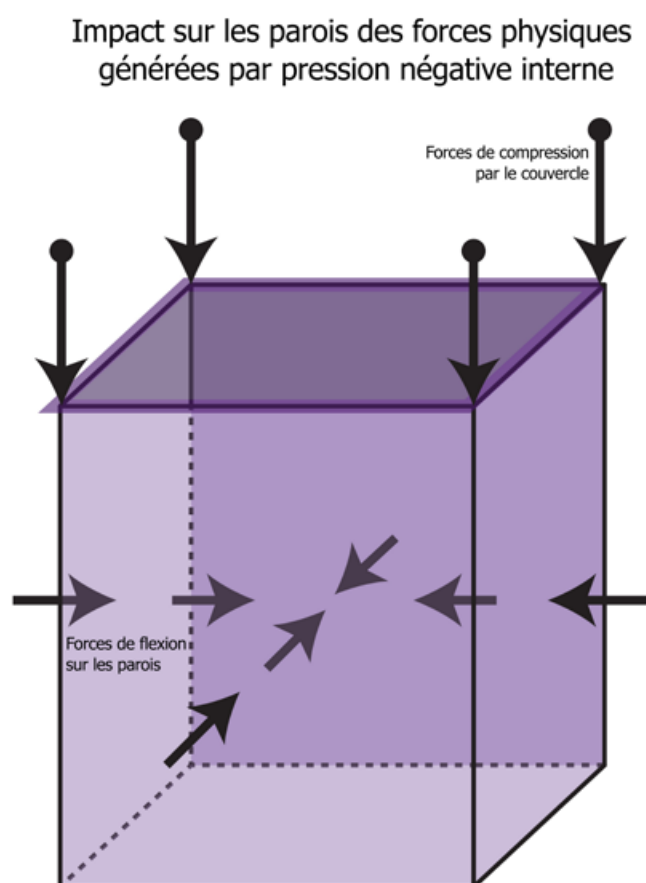


Figure 6 Schéma montrant les forces physiques appliquées sur un flacon scellé lors d'une baisse de pression interne. À ces forces s'ajoutent les possibles tensions résiduelles présentes à l'intérieur du verre suite à sa manufacture. © Ash Dupuis / Haute-École Arc / Museum Vrolik.

Mécanismes chimiques de dégradation

L'étude des mécanismes chimiques de dégradation s'est faite principalement par observation au microscope électronique à balayage (MEB) associé à des analyses de composition via la spectroscopie par dispersion d'énergie de rayons X (EDS). L'ensemble des images et des analyses ont été réalisées en collaboration avec la Haute École d'Art de Berne par le Professeur Nadim Scherrer.

Présentation des échantillons

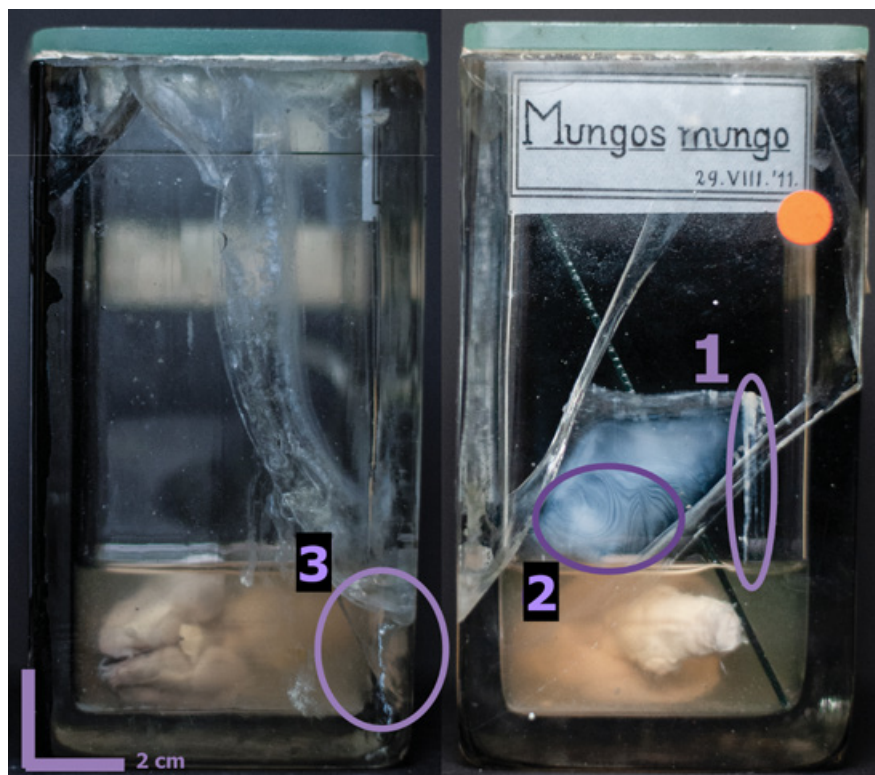


Figure 7 Emplacement des échantillons prélevés sur le flacon VGP18 pour analyses SEM-EDS. © Ash Dupuis / Haute-École Arc / Museum Vrolik.

Pour des raisons de clarté et de synthèse, seulement trois échantillons seront présentés dans cet article, renommés échantillons 1, 2 et 3. Tous proviennent du flacon VGP18, choisi car arborant un éventail d'altérations représentatif de l'ensemble de la collection. L'échantillon 1 se présente sous la forme d'une poudre issue d'un précipité blanc se formant à l'intérieur du flacon, à l'interface entre une surface de fracture et le fluide. L'échantillon 2 est un fragment de verre prélevé sur une fracture de la face avant et a été enrobé dans une résine pour permettre l'observation en coupe de la fracture. L'échantillon 3 est un tesson déjà présent sur le flacon, localisé au coin inférieur avant-droit, qui permet l'observation et la comparaison des surfaces internes et externes de la paroi.

Observations MEB

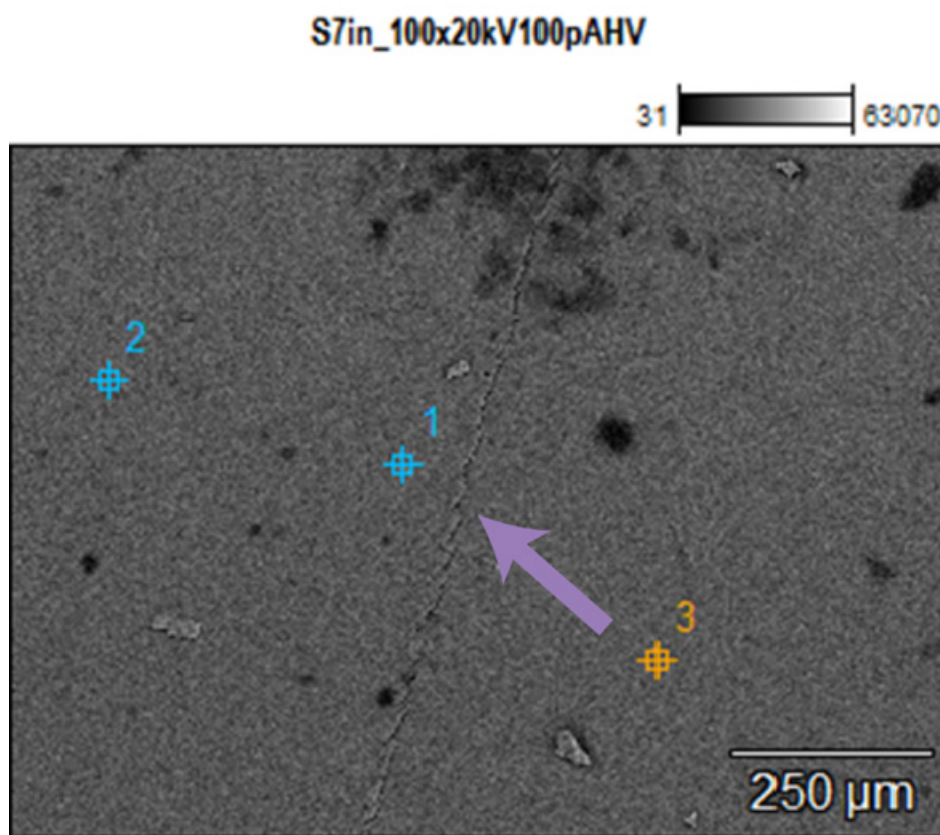


Figure 8 Image prise au microscope électronique à balayage (MEB) de la surface interne du flacon “VGP18” (échantillon 3) montrant la présence de micro-fissurations en surface, dues au phénomène de lixiviation. © Nadim Scherrer / Hochschule der Künste Bern.

L'observation des échantillons sous MEB a permis de mettre en évidence la présence de micro-fissurations en surface des parois exposées au fluide de conservation (**fig. 8**). Les observations réalisées sur la surface externe du contenant (échantillon 3) n'ont pas démontré la présence de micro-fissurations.

Il s'agit d'une altération attendue, pouvant être imputée à la lixiviation des éléments alcalins. En effet, tout verre sodocalcique est à risque lorsqu'il est conservé en milieu aqueux pendant une longue période. À l'échelle moléculaire, les ions sodium et potassium sont dissous, extraits du réseau siliceux et remplacés par des ions hydrogène. Cet échange cause la formation d'une couche d'altération en surface dite « hydratée » et engendre des contraintes mécaniques liées à l'extraction des alcalins et à la taille plus petite des ions hydrogène qui les remplacent; ceci entraîne l'apparition de micro-fissurations et la rétraction du réseau (Davison, 2003, p. 5). Le phénomène est, bien entendu, limité aux zones exposées au fluide de conservation (surface interne du flacon et surfaces de fracture).

Analyses de composition par EDX

Composants	Échantillon 2		Échantillon 3	
	Verre non-altéré	Surface de fracture	Surface interne	Surface externe
SiO ₂	73.2 - 74.56	98.25	89.60	72.02
SO ₃	0 - 0.81	-	0.88	0.59
Na ₂ O	15.59 - 15.92	-	-	17.94
K ₂ O	1.28 - 1.38	-	0.94	1.18
CaO	8.24 - 8.65	0.88	8.59	8.27
MgO	-	-	-	-
Cl	-	0.87	-	-

Figure 9 Tableau reprenant les compositions estimées d'après analyse par spectroscopie à rayons X à dispersion d'énergie (EDS) des différentes surfaces des échantillons 2 et 3. Les données sont en pourcentage molaire (mole %), converties à partir du pourcentage massique. Résultats donnés en fourchette correspondant à plusieurs points analysés sur l'échantillon. Analyses effectuées par Pr. Nadim Scherrer à la Hochschule der Künste Bern.

L'estimation de la composition de la masse du verre ne semble pas indiquer d'instabilité particulière et reste dans la gamme de ce qui est considéré comme un verre stable : une concentration en silice supérieure à 66,7 % (molaire), une quantité totale de fondants (Na₂O et K₂O) inférieure à 20 % (molaire) et une quantité de stabilisant (CaO) du réseau entre 4 et 15 % (molaire) (Verhaar, 2018, p. 36-37).

Les résultats pour la paroi interne du verre indiquent la formation d'une couche altérée caractérisée par l'absence quasi-totale des fondants. Mais le stabilisant reste présent, ce qui peut s'expliquer par sa plus grande stabilité chimique, due à sa capacité à former deux liaisons ioniques avec le réseau siliceux (Davison, 2003, p. 5). Cette couche correspond à une surface hydratée résultant de la lixiviation des fondants. Il s'agit du profil d'altération attendu pour n'importe quel verre sodo-calcique en contact constant avec une solution aqueuse. La paroi extérieure du verre ne présente quant à elle pas d'altération notable.

Cependant, les compositions obtenues en analysant les surfaces de fracture montrent une altération plus importante, avec une lixiviation totale des fondants et une perte presque totale du stabilisant. Cela indique un niveau de dégradation chimique plus élevé, résultant d'un mécanisme d'altération complexe et beaucoup moins commun. Comme ce phénomène n'est observé qu'au niveau des interfaces de fracture, par définition des zones exiguës, il est concevable que les fondants lessivés par le fluide de conservation y soient restés partiellement emprisonnés, créant un environnement localisé et accroissant progressivement le pH. Or, le réseau siliceux est susceptible de se dissoudre (hydrolyse) quand ce dernier atteint la valeur de 9 (Verhaar, 2018, p. 29-32; Janssens, 2013, p. 21). La dissolution du réseau siliceux à l'interface entre deux surfaces de fracture est également démontrée par le spectre obtenu sur l'échantillon 1, correspondant au précipité se formant à l'interface fracture/fluide (fig. 10).

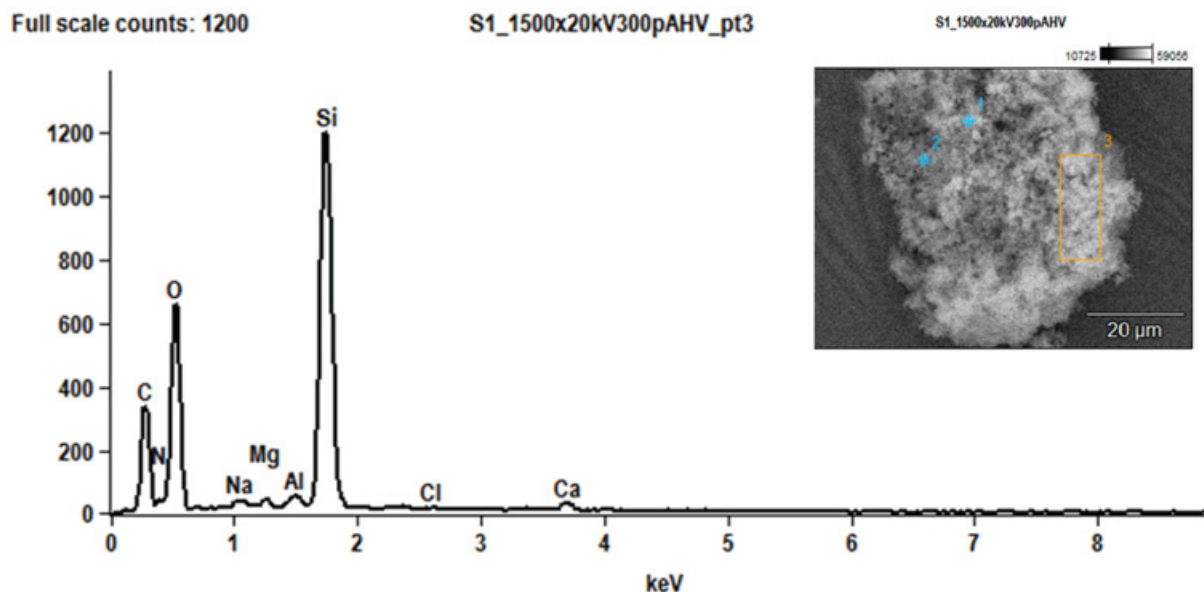


Figure 10 Spectre obtenu par EDS sur le précipité prélevé sur le flacon VGP18 (échantillon 1). Ce spectre démontre une présence importante de silice, témoin d'une dissolution du réseau siliceux au niveau des surfaces de fracture. © Nadim Scherrer / Hochschule der Künste Bern.

Proposition d'un nouveau modèle de dégradation

En combinant les résultats des études des mécanismes d'altération chimique et physique décrits ci-dessus, il est possible de proposer un système de dégradation exhaustif pour les contenants rectangulaires en verre de la collection Ariëns Kappers.

Tout d'abord, il y a une dégradation de la surface interne des parois en verre des flacons, comme les observations et analyses par SEM-EDX le démontrent. Cette altération correspond à la lixiviation des fondants résultant d'une exposition constante à un liquide de conservation aqueux. Même si la composition estimée du matériau ne semble pas indiquer une instabilité particulière, aucun verre sodocalcique n'est à l'abri d'une dégradation chimique par l'eau lorsqu'il y est constamment exposé. La couche superficielle est alors privée de ses fondants, et se forme en surface une strate d'altération à la fois hydratée et micro-fissurée. À ce stade du mécanisme de dégradation chimique du verre, la formation de cette couche ne constitue pas nécessairement une menace structurelle pour la plupart des objets. Cependant, dans le cadre des collections de spécimens en fluide, d'autres phénomènes d'altération entrent en jeu.

L'étude fractographique a permis de démontrer que les parois en verre étaient soumises à des forces de flexion allant de l'extérieur vers l'intérieur, provoquant la compression de leurs surfaces externes et l'étirement de leurs surfaces internes. Ce phénomène est causé par la formation d'une pression interne négative suite à une diminution du volume de liquide de conservation, elle-même résultant d'une baisse de température ambiante. Ce phénomène est certainement cyclique, suivant les variations de l'environnement. À cette force de flexion s'ajoutent d'autres forces physiques, provenant des contraintes résiduelles présentes au sein du verre, ainsi que des forces de compression engendrées par le couvercle, attiré vers l'intérieur par la pression négative. *In fine*, l'altération chimique des parois est telle qu'elles ne

sont plus en mesure de résister aux forces physiques auxquelles elles sont soumises et se fracturent.

Sans interventions de conservation-restauration rapides, les surfaces de fracture nouvellement formées sont à leur tour exposées à l'eau contenue dans le fluide de conservation et attaquées chimiquement. Au fur et à mesure que la désalcalinisation progresse, les éléments lixivifiés du verre restent présents en plus grande quantité entre les deux surfaces, augmentant le pH localement. Lorsqu'un pH de 9 ou plus est atteint, le réseau de silice est susceptible de se dissoudre, et des précipités se forment dans le fluide de conservation à l'interface entre la paroi et le liquide. Plus la surface de fracture est importante, plus le degré d'altération chimique observé est important, ce qui suppose que plus la surface de fracture est importante, plus il est difficile pour les éléments alcalins de s'en extraire.

Enfin, il est certain que d'autres facteurs entrent en jeu dans les mécanismes d'altération décrits ci-dessus, comme par exemple la composition exacte du fluide de conservation ou l'ampleur des variations de température. Cependant, l'étude de ces paramètres était en dehors du champ de ce projet et des études complémentaires sont nécessaires pour compléter le schéma proposé.

Conclusion

Pour conclure, cette étude a permis de mettre en évidence la spécificité des phénomènes d'altération affectant les contenants en verre des collections de spécimens en fluide et a abouti à la proposition d'un premier modèle mettant en exergue les liens étroits entre mécanismes chimiques et mécanismes physiques de dégradation. Pour ce faire, elle s'est basée sur des observations macroscopiques et microscopiques, sur des analyses physico-chimiques, ainsi que sur les connaissances déjà établies au sujet de la dégradation des verres historiques et archéologiques.

En plus de compléter ces savoirs, cette étude contribue à l'ouverture d'un nouveau champ de recherche pour la conservation-restauration : celui de la dégradation des contenants en verre dans les collections de spécimens en fluide. Mais il s'agit avant tout d'une première étape : le modèle proposé a pour vocation d'être complété, revu et questionné par de futures recherches.

Références bibliographiques

Davison S. (2003), *Conservation and restoration of glass*, 2^e édition, Oxford, Butterworth-Heinemann, 392 p.

Dupuis A. (2023), *A brain teaser: investigating the chemical and physical alteration mechanisms of glass in fluid collections and their conservation implications for the Ariëns Kappers Brain Collection*, mémoire de Master of Arts HES-SO en Conservation-restauration, orientation objets archéologiques et ethnographiques, Haute-École Arc, 177 p.

Eling P., Hofman M. (2014), « The Central Institute for brain research in Amsterdam and its directors », *Journal of the history of the neurosciences*, Vol. 23, N° 2, p. 109-119.

Hofman M., Johnson J. (2011), « The C. U. Ariëns Kappers brain collection », *Annals of the New York Academy of Sciences*, Vol. 1225, n° S1, p. E64-E84.

Janssens K. (2013), *Modern methods for analyzing archaeological and historical glass*, Vol. 1, Chichester, John Wiley & Sons Inc, 690 p.

Quinn G. (2016), *Fractography for ceramics and glass*, 2^e édition [en ligne], National Institute of standards and technology, U.S. Department of commerce. Disponible sur : <https://doi.org/10.6028/NBS.SP.960-16> (consulté le 22 mars 2025).

Redner A. (1995), « Measuring stress in glass production: a key quality control operation », *Glass production technology international*, p. 180-195.

Van Dam A. (2000), « The interaction of preservation fluid, specimen container, and sealant in a fluid collection », *Collection Forum*, Vol. 14, p. 78-92.

Verhaar G. (2018), *Glass sickness: detection and prevention*, Amsterdam, université d'Amsterdam, 224 p.

L'auteur

Ash Dupuis Conservateur-restaurateur indépendant ;
conservatrice-restauratrice indépendante,
ash.dupuis.cr@gmail.com

MICORR, PLECO® ET DISCOVERYMAT, TROIS OUTILS D'AIDE AU DIAGNOSTIC DES MÉTAUX ARCHÉOLOGIQUES ET HISTORIQUES AU SERVICE DES PROFESSIONNELS DE LA CONSERVATION-RESTAURATION

Christian Degrigny, Romain Jeanneret

Résumé

Depuis une quinzaine d'années la Haute École Arc Conservation-restauration - Neuchâtel, Suisse, développe des outils d'analyse des métaux archéologiques et historiques portables, abordables et accessibles. L'analyse se fonde sur la comparaison des résultats obtenus avec ceux de bases de données spécifiques à chaque outil. L'objectif est d'offrir aux professionnels une aide au diagnostic multi-échelle, partant de l'observation macroscopique des objets, en passant par l'examen localisé de la nature des métaux et/ou de leurs produits de corrosion. Cette approche interdisciplinaire met à contribution responsables de collection, conservateurs-restaurateurs et chercheurs en conservation-restauration pour créer des synergies et enrichir les bases de données, ce qui augmente d'autant la pertinence de ces outils collaboratifs. Le savoir acquis est souvent jugé satisfaisant par les utilisateurs. Ils gagnent en autonomie et en expertise dans leur tâche quotidienne et peuvent ainsi cibler davantage toute demande d'analyse complémentaire.

Abstract For approximately fifteen years, the Haute École Arc Conservation-restauration in Neuchâtel, Switzerland, has been developing portable, affordable, and accessible tools for the analysis of archaeological and historical metals. Analysis is based on the comparison of the results obtained to those in databases specific to each tool. The objective is to provide professionals with multi-scale diagnostic support, starting from the macroscopic observation of the objects and extending to the localised examination of the nature of the metals and/or their corrosion products. This interdisciplinary approach brings together collection managers, conservator-restorers, and conservation-restoration researchers to create synergies and enrich the databases, thereby increasing the relevance of these collaborative tools. The knowledge acquired is frequently deemed satisfactory by users, who gain in autonomy and expertise in their daily tasks and are thus better equipped to target any requests for additional analyses.

Resumen Durante los últimos quince años, la conservación de la -Haute Ecole ARC -Conservación- Restauración (Neuchâtel, Suiza), ha estado desarrollando herramientas para analizar metales arqueológicos e históricos portátiles, asequibles y accesibles. El análisis se basa en la comparación de los resultados obtenidos con los de la base de datos específica de cada herramienta.

El objetivo es ofrecer ayuda profesional al diagnóstico a múltiples escalas, comenzando con la observación macroscópica de objetos, incluido el examen localizado de la naturaleza de los metales y/o sus productos de corrosión. Este enfoque interdisciplinario reúne responsables de colección, conservadores-restauradores e

investigadores en conservación-restauración para crear sinergias y enriquecer la base de datos. El conocimiento adquirido a menudo se considera satisfactorio por el usuario. Los conservadores-restauradores adquieren autonomía y experiencia en su tarea diaria y, por lo tanto, pueden hacer solicitudes de análisis adicional más pertinentes.

Mots-clés métaux patrimoniaux, diagnostic, analyse, applications en ligne, interdisciplinarité

Introduction

Les professionnels de la conservation-restauration utilisent au mieux les outils à leur disposition pour diagnostiquer les métaux patrimoniaux. L'œil est primordial et permet d'apprécier l'état de conservation des matériaux dans leur globalité, tandis que des outils de grossissement optique, comme la loupe, offrent la possibilité d'ausculter la matière au plus près. Ce constat d'état se fait souvent *in situ*, dans le lieu de conservation des objets, afin d'appréhender l'environnement immédiat et les éventuelles causes de l'altération observée. Une fois l'objet en laboratoire, l'observation sous binoculaire précise l'état de conservation à de multiples échelles. D'autres outils analytiques concourent à affiner encore la connaissance de la matière. Ainsi, la fluorescence des rayons X (FRX) donne accès à la composition élémentaire des constituants des couches altérées, voire de la matière résiduelle du matériau d'origine. Les spectroscopies infrarouges à transformée de Fourier (FTIR) et Raman, ainsi que la diffraction des rayons X (DRX) renseignent sur l'arrangement moléculaire et/ou cristallin entre les éléments constitutifs (fig. 1).

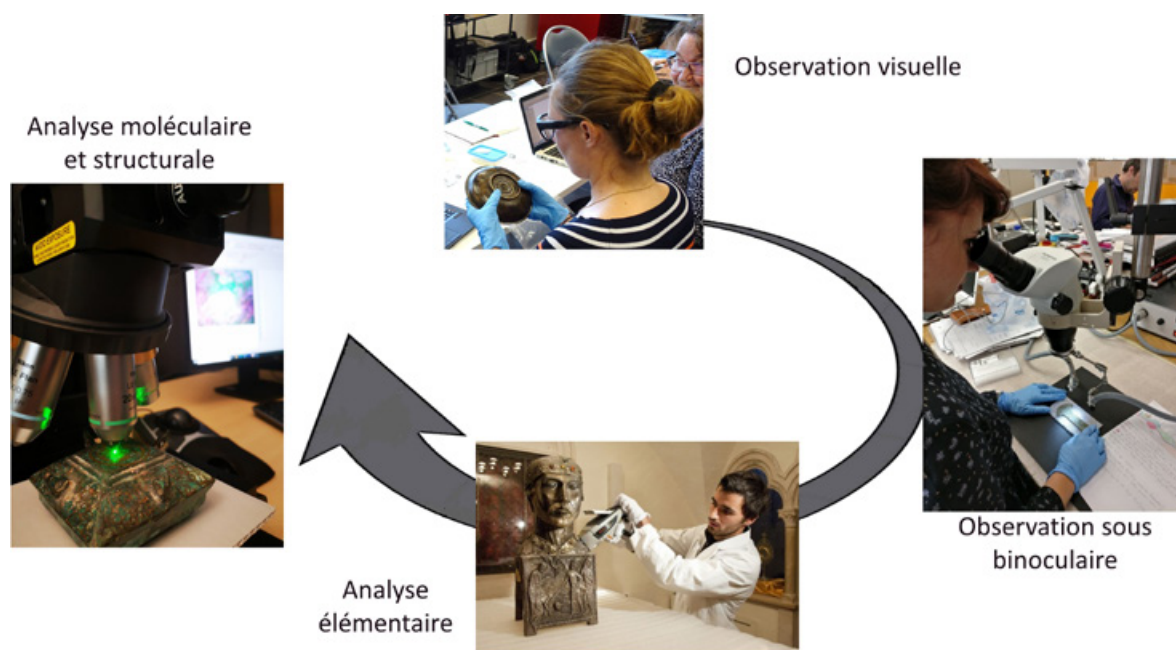


Figure 1 Les étapes du diagnostic sur les métaux patrimoniaux.

Les analyses FRX, FTIR, Raman, DRX ne sont pas systématiques, même si elles permettent de valider des altérations présumées, comme la corrosion active due à la présence de chlorures dans les couches de corrosion des objets base cuivre ou fer. Dans d'autres cas, elles permettent de préciser leur nature, comme pour le ternissement (Ag_2S et AgCl ou Cu-O , Cu-S ou Ag-Cu-S) sur des alliages Ag-Cu (Degriigny *et al.*, 2015, Tissot *et al.*, 2017). Elles requièrent

toutefois une expertise scientifique et l'accès à des instruments spécifiques, engendrant des frais non négligeables. Si le projet n'incluait pas à l'origine un budget pour des analyses, il est difficile de l'implémenter après coup et ce malgré l'intérêt d'une telle démarche scientifique. Même lorsque le budget a été prévu, des délais dus à l'indisponibilité des experts ou des instruments sont à prévoir.

Pressés par le temps du fait des impératifs imposés par les donneurs d'ordre, les professionnels de la conservation-restauration se passent souvent de cet examen analytique complémentaire et comptent donc sur leur expérience et leur bonne appréhension du problème posé. L'erreur d'appréciation est possible et parfois courante, d'où le risque d'un mauvais diagnostic, et donc d'un traitement inadéquat, voire d'une reprise de corrosion à moyen et/ou long terme.

Une des solutions est de mettre à disposition de ces mêmes professionnels des outils analytiques répondant à leurs besoins d'examen, adaptés à leurs conditions de travail (portables, non ou micro-invasifs) et accessibles (abordables financièrement et techniquement). Devant mener eux-mêmes ces analyses, ils devraient gagner en autonomie et en expertise, ce qui leur permettrait ensuite de cibler et justifier les analyses complémentaires qu'ils jugeraient pertinentes. Le gain en temps et en coût serait certain.

Des outils de diagnostic à la disposition des professionnels de la conservation-restauration

Cette approche n'est pas nouvelle et ne concerne pas que le domaine de la conservation-restauration. L'action européenne COST PortASAP (European Network for the promotion of portable, affordable and simple analytical platforms - <https://portasap.eu/>) s'y est consacrée pendant quatre ans (2018-2022) avec des applications dans les domaines de la santé, du traitement de la pollution, de l'agroalimentaire et de la criminologie. Un des groupes de travail a œuvré plus spécifiquement sur la diffusion d'outils portables, abordables et accessibles auprès des professionnels de la conservation-restauration. La HE-Arc CR et son représentant, l'auteur principal de cet article, se sont positionnés au sein du groupe via trois outils :

- l'application *MiCorr* (<https://micorr.org/>) qui permet autant d'identifier la famille métallique des objets étudiés, sur la base de leurs propriétés physiques, que de préciser les formes de corrosion présentes via l'examen stratigraphique des structures de corrosion (Degrigny *et al.*, 2022);
- l'application *Discovery Mat* (<http://discoverymat.he-arc.ch:8080/>) qui consiste en l'étude locale du comportement électrochimique des métaux au contact de trois solutions pour préciser leur composition (Degrigny *et al.*, 2018);
- enfin, le pinceau électrolytique *Pleco*© (<https://github.com/fablabneuch/Pleco/wiki>) qui permet de déterminer localement la nature de certains produits de corrosion lors de leur réduction électrolytique (Degrigny *et al.*, 2018, Degrigny *et al.*, 2015).

Si ces outils respectent bien les critères requis par l'action PortASAP, d'autres plus spécifiques au domaine de la conservation-restauration, ont été souhaités et mis en place par la HE-Arc CR. *Discovery Mat* et, surtout, *MiCorr* utilisent des applications en ligne ou téléchargeable gratuitement. L'analyse est basée sur la comparaison des résultats obtenus avec ceux de bases de données spécifiques à chaque instrument via des algorithmes. Le *Pleco*, quant

à lui, est un outil en *open source*. Il peut toutefois être acquis en kit à monter soi-même ou prêt à l'utilisation. Ces trois instruments sont sous licence et le nom « Pleco » est protégé. L'approche est participative : si les bases de données sont mises à la disposition des utilisateurs, ces derniers peuvent les enrichir pour améliorer leur pertinence.

Ces outils sont *a priori* au service des conservateurs-restaurateurs mais d'autres professionnels s'y intéressent, comme les responsables de collection. C'est ainsi que *MiCorr* s'est dotée récemment d'un nouveau moteur de recherche d'identification de la famille métallique des objets étudiés.

Exemples d'application

Les trois exemples suivants illustrent l'application des outils *Discovery Mat*, *Pleco* et *MiCorr* à des études de cas réelles.

Analyse des éléments en alliage d'aluminium des systèmes de refroidissement de véhicules Bugatti du MNAM

Le musée national de l'Automobile de Mulhouse (MNAM) possède un important ensemble de véhicules Bugatti au sein de ses collections (**fig. 2a**). Ceux-ci souffrent de problèmes de fuites au niveau de leurs systèmes de refroidissement en alliages d'aluminium (**fig. 2b**) qui remettent en cause leur utilisation sur le circuit de démonstration de véhicules roulants du MNAM (Granget *et al.*, 2022).



Figure 2 Bugatti Type 30, 1922, MNAM (a) et corrosion localisée d'une pipe du système de refroidissement (b). © E. Granget - HE-Arc CR.

Des mesures *Discovery Mat* (suivi du potentiel de corrosion du métal au cours du temps dans trois solutions distinctes - eau Evian®, KNO₃ 1% (m/v) et sesquicarbonate de sodium 1% (m/v)) sur des pièces détachées de plusieurs véhicules (**fig. 3a**) ont permis d'obtenir des tracés de matériaux représentatifs de ceux rencontrés au sein des collections du MNAM. Ils ont ensuite été comparés à ceux des matériaux de la base de données initiale, contenant des alliages d'aluminium courants (**fig. 3b**). Du fait des divergences observées, ces nouveaux alliages ont été analysés par FRX, ce qui a permis de les intégrer à la base de données et de constituer ainsi une version optimisée.

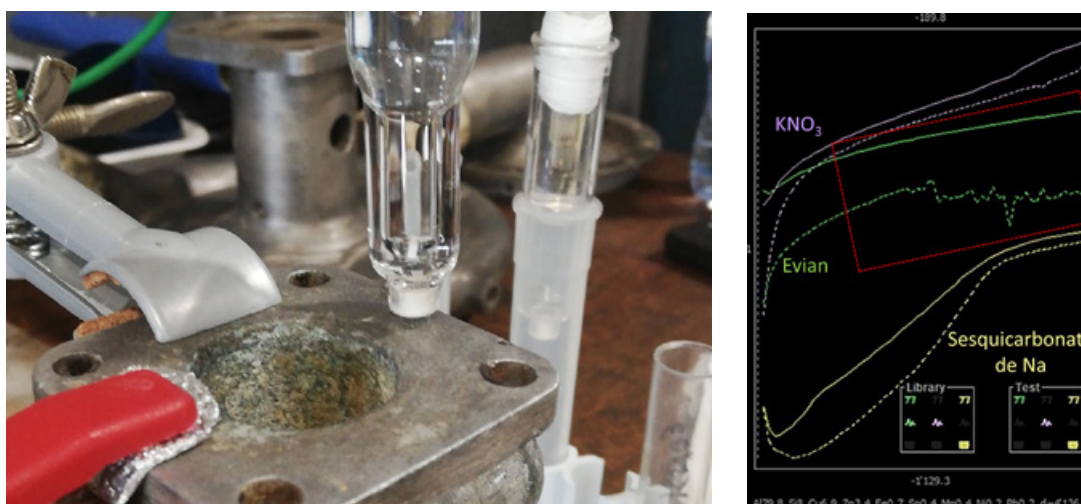


Figure 3 Mesure *Discovery Mat* sur une pièce détachée d'un véhicule Bugatti, MNAM (a), tracés obtenus (traits pleins) comparés à ceux d'un matériau de la base de données (traits pointillés) (b). Des divergences de comportement sont observées en milieu Évian (rectangle rouge). ©E. Granget - HE-Arc CR.

Les mesures *Discovery Mat* menées directement sur les pièces du système de refroidissement du véhicule Bugatti B30 sont, dans un premier temps, comparées à celles des matériaux de la base de données initiale. Elles donnent des résultats médiocres : la distance « d » entre les différents tracés est élevée (>2300) et seules des familles d'alliages peuvent être proposées (**fig. 4**). En travaillant avec la base de données optimisée, les résultats sont bien meilleurs ($1073 < d < 2651$) et des propositions d'alliages plus plausibles émergent. Il apparaît qu'ils contiennent tous à la fois du cuivre et du silicium. Si le silicium est attendu pour des pièces de fonderie (Guillet, 1926), la présence de cuivre induit des phénomènes de corrosion localisée par piles galvaniques. C'est ce phénomène qui permet d'expliquer la présence de fuites. Des analyses FRX menées en parallèle sur les pièces avec un analyseur portable Niton XL3t XRF, 50 kV, anode d'Ag, Thermo Fisher Scientific montrent des résultats assez proches (**fig. 4**).

N°	Base non optimisée	Discovery Mat		FRX	
		d	Base optimisée	d	
B30a	Al, Cu, Si (Zn ou Mg)	4796	AlCu8.4Si2.4Fe1.3Zn0.6Pbo.1Ni0.1	2651	Al84Cu11.2Si2.3Fe1.2Zn1Sno.3Pbo.2
B30b	Al, Zn, Cu, Si, Pb	4228	AlCu10Si1-2Fe0.5Zn1	1187	Al75.5Cu17.6Zn2.4Si2Fe1.5Pbo.4Sno.6
B30c	Al, Si, Cu, Zn	6543	AlCu11Si1.3Zn1.1Fe1.1Pbo.2	2436	Al82.9Cu11.9Si2.3Fe1.4Zn1Sno.3Pbo.2
B30d	Al, Cu	3284	AlCu7-12Si1-2Zno.5Fe	1073	Al77.5Cu16.5Si2.4Zn1.5Fe1.1Sno.5Pbo.5
B30e	Al, Cu, Mg	2383	AlCu7-12Si1-2Zno.5Fe	1438	Al85.9Cu9.4Si1.7Fe1.8Zno.9Sno.2Pbo.1
B30f	Al, Si, Cu, Zn, Fe	6160	AlCu11Si1.3Zn1.1Fe1.1Pbo.2	1870	Al86.4Cu10.2Si1.5Fe1Zno.7Sno.1Pbo.1

Figure 4 Propositions de composition de plusieurs éléments du système de refroidissement de la Bugatti 30 par comparaison des mesures *Discovery Mat* avec celles des entrées des bases de données initiale et optimisée et aux analyses FRX sur ces éléments. © E. Granget – HE-Arc CR.

1 Somme des distances pour chaque solution entre le tracé du matériau étudié et celui d'un matériau de la base de données, calculées à partir des pentes, des courbures et des valeurs de potentiel.

Cette campagne d'analyses a eu d'importantes répercussions puisque le MNAM a décidé de ne plus faire rouler les véhicules Bugatti. Ainsi l'intégrité des véhicules a été privilégiée.

Analyse du ternissement d'un encrrier des frères Gély du MHL

L'encrrier des frères Gély du Musée historique de Lausanne, Suisse (**fig. 5a**) présente un niveau de ternissement habituel pour un objet régulièrement nettoyé : les coupelles des contenants (encre et poudre) sont surtout ternies dans les creux des reliefs (**fig. 5b**), plus difficilement accessibles au nettoyage, et les pieds de celles-ci, en forme de dauphins, sont irisés (**fig. 5c**). Les différents éléments sont en alliage Ag-Cu (3 à 8,5 % en masse).

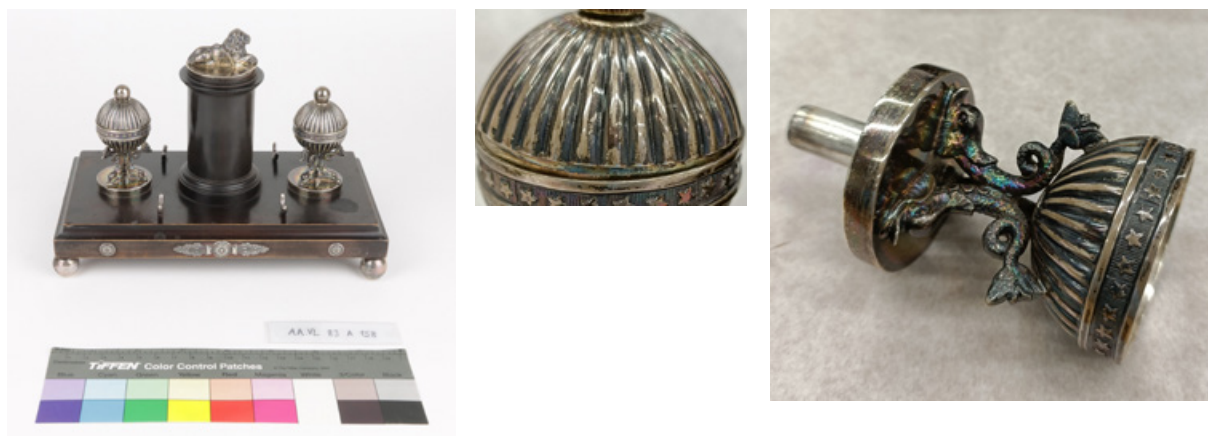


Figure 5 Encrrier des frères Gély du MHL, 1813-1830, vue générale (a) et détails d'une coupelle (b) et d'un pied (c). © Romain Jeanneret, HE-Arc CR.

De tels pourcentages en cuivre laissent présager la présence de produits de corrosion du cuivre dans la couche de ternissement. Pourtant, la voltamétrie linéaire cathodique réalisée avec le Pleco (**fig. 6a**) sur un pied d'une coupelle montre la prépondérance des produits de corrosion de l'argent (Ag_2S et AgCl) par rapport à ceux du cuivre (Cu_2S) (**fig. 6b**). Ceci pourrait être dû à la présence d'un enrichissement de surface en argent, en partie lacunaire, expliquant la présence d'un petit pic de réduction de Cu_2S .

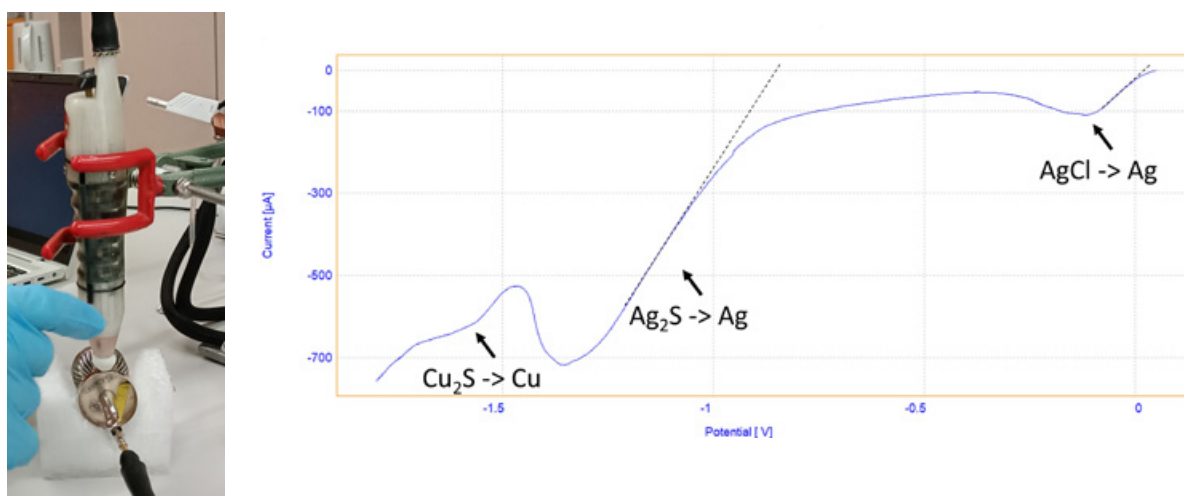


Figure 6 Voltamétrie linéaire cathodique réalisée avec le Pleco© sur un pied d'une coupelle de l'encrrier (a) en solution KNO_3 1% (m/v), vitesse de balayage = 10 mV/s, électrode de référence : carbone vitreux (450 mV/ENH) (b).

Le Pleco a également été utilisé pour le nettoyage de certains éléments de l'encrier. Afin d'éviter tout risque de réduction des composés du cuivre, causant l'apparition de taches noires indélébiles, nous avons procédé à un retrait préalable de ces composés par complexation en milieu EDTA tétrasodique (5 % en masse), soit par immersion, soit en gel d'agar-agar.

Diagnostic sur une épingle du Laténium présentant une patine lacustre

L'épingle HR 3071 appartient aux collections du Laténium - Neuchâtel, Suisse (fig. 7a). Elle est le siège de deux formes de corrosion très différentes : la tige est couverte d'une couche de corrosion jaunâtre d'aspect homogène et très lacunaire (fig. 7b), alors que la tête présente des produits de corrosion verdâtres, typiques pour un alliage base cuivre issu de fouilles terrestres (fig. 7c).



Figure 7 Épingle HR 3071, Laténium, (a) et détails de surface sur la tige (b) et la tête (c).
© HE-Arc CR.

La figure 8 montre les stratigraphies numériques *MiCorr* déduites de l'observation de la tige et de la tête de l'épingle HR 3071 sous binoculaire et construites avec le moteur de recherche « *by stratigraphy representation* » de l'application.

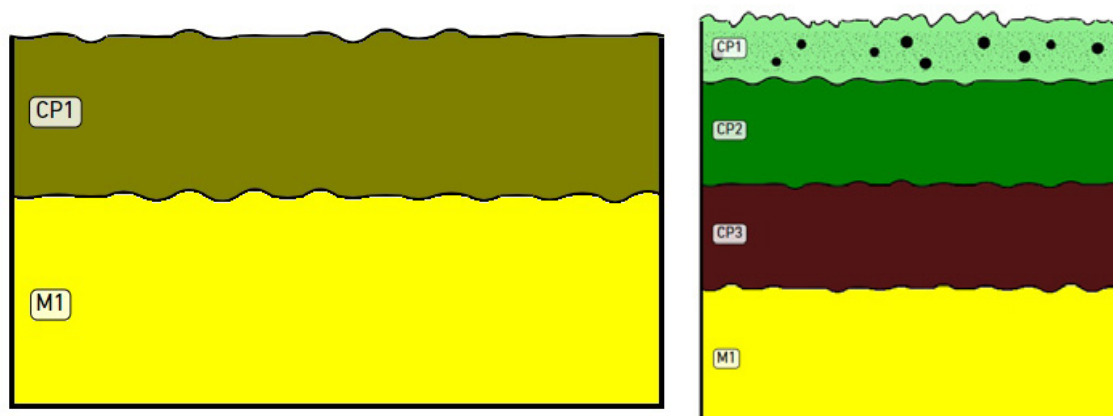


Figure 8 Stratigraphies numériques *MiCorr* de la tige (a) et de la tête (b) de l'épingle HR 3071.

La comparaison de la stratigraphie de la tige de l'épingle (fig. 8a) avec celles de la base de données du moteur de recherche « *by stratigraphy representation* » nous conduit à proposer une stratigraphie proche, mais obtenue à partir d'une coupe (fig. 9a) issue d'un prélèvement d'une autre épingle HR 18152 (fig. 9b). Celle-ci conserve majoritairement sa couche de corrosion dénommée « patine lacustre » (Schweizer, 1994). Puisqu'un prélèvement a été réalisé sur cette épingle, il a pu être observé en microscopie électronique à balayage (MEB) sur coupe et analysé par spectroscopie en dispersion d'énergie – SDE (fig. 9c). La couche de corrosion de surface est riche en Cu, S et Fe. Son analyse Raman révèle qu'il s'agit de chalcopryrite - CuFeS_2 (fig. 9d).

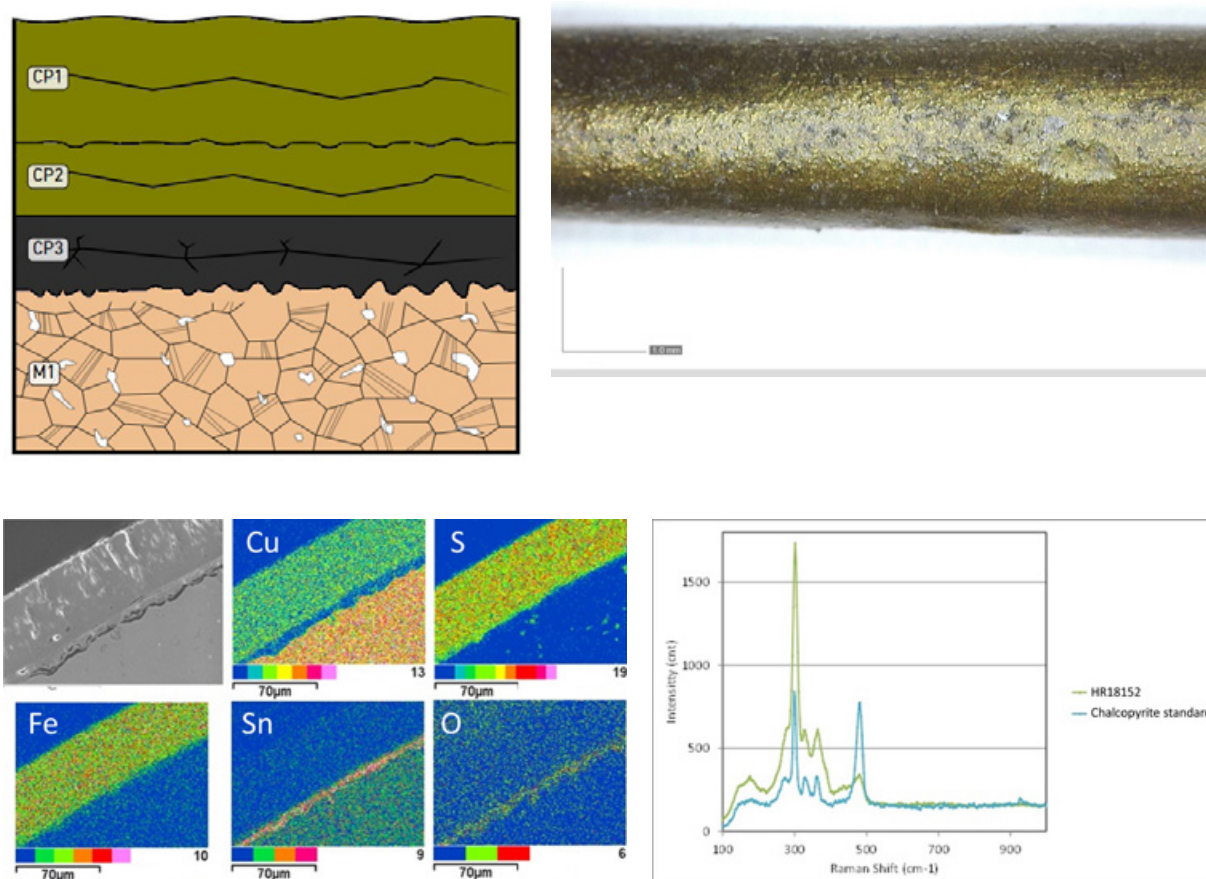


Figure 9 Stratigraphie numérique de l'épingle HR 18152 (a), détail de surface (b), image MEB et cartographies X de la couche de corrosion (c) et analyse Raman de la couche de surface (d). © HE-Arc CR.

Cette patine lacustre est typique des objets en bronze découverts sur le site de Haute-rive-Champréveyres (nord du lac de Neuchâtel en Suisse), occupé longuement à la fin de l'Âge du Bronze : ils témoignent d'une exposition en milieu anaérobie (fond du lac) et riche en fer. La tête de l'épingle HR3071 montre toutefois que cette partie de l'objet a vu son environnement évoluer (baisse du niveau du lac), de telle sorte que des composés typiques d'un enfouissement terrestre se sont également développés.

Ainsi, à partir d'un examen micro-invasif de l'épingle HR3071 (stratigraphie lors du dégagement au scalpel), on peut en déduire, via *MiCorr* et son algorithme comparatif, des informations sur la nature chimique des couches de corrosion formées à la surface du matériau et leur fragilité physique, comme le montre l'observation au MEB (fig. 9c).

Un développement incertain

Comme énoncé ci-dessus, les outils développés fonctionnent par comparaison des résultats obtenus avec ceux de leurs bases de données spécifiques. Leur enrichissement est primordial si l'on souhaite qu'ils gagnent en pertinence. Si les étudiants et les professionnels utilisant ces outils semblent convaincus de leur intérêt, ils ne contribuent malheureusement que très peu à leur développement.

Le projet ENDLESS Metal

Constatant les difficultés des professionnels de la conservation-restauration à s'approprier ces outils, nous avons déposé un projet de *COST Innovators Grant*, *ENDLESS Metal*, faisant suite au projet PortASAP et visant à promouvoir l'utilisation de ces outils au sein de la communauté précitée. Celui-ci ayant été retenu, nous avons pu mettre en œuvre des activités financées par le programme COST pendant une année : formations, ateliers, séminaires, missions de courte durée.

Ainsi, 150 professionnels ont été formés à l'utilisation des outils, les bases de données ont été enrichies et les outils optimisés. Un de nos objectifs était aussi de tester leur complémentarité. L'étude d'un corpus d'objets du musée du Diocèse catholique romain de Timisoara en Roumanie, nous en a donné l'occasion (**fig. 10a**). En combinant les résultats des différents outils, nous avons obtenu des résultats plus fiables. Ainsi, les points noirs observés à la surface d'une soucoupe (**fig. 10b**) identifiée comme un alliage Ag-Cu par l'application MiCorr (**fig. 10c**) et suspectés d'être des sulfures de cuivre (**fig. 10b**), se sont révélés être, via le Pleco (**fig. 10d**) un mélange d'Ag₂S et d'AgCl (**fig. 11e**), le pic de réduction de Cu₂S n'étant que ponctuellement détecté. Il se pourrait donc que la coupelle ait été argentée, ce qui expliquerait la seule présence des composés du ternissement de l'argent.

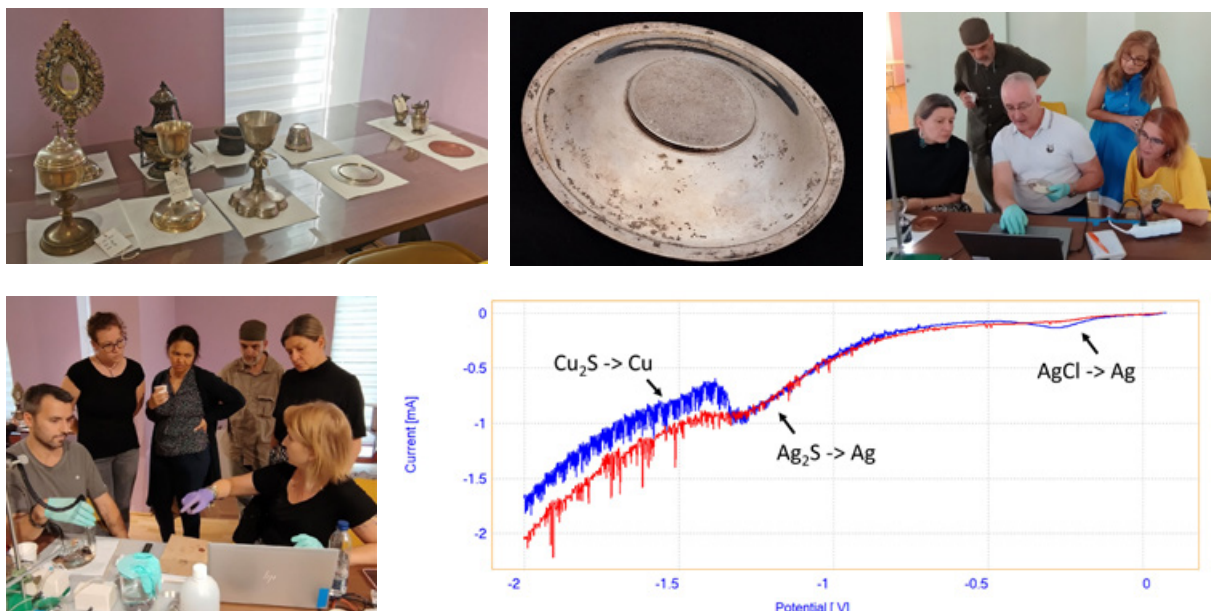


Figure 10 Étude du corpus du musée du Diocèse catholique romain de Timisoara (a), soucoupe présentant des « points noirs » sur son revers (b) et identification du matériau comme un alliage Ag-Cu (c), expérimentations avec le Pleco© (d) et voltammétries linéaires cathodiques sur deux points noirs (e). © Monique Drieux et Eva Menart.

Depuis, les outils ont été utilisés dans le cadre de nombreux projets illustrés sur le site *d'ENDLESS Metal* (<https://endlessmetal.portasap.eu/>). Plusieurs institutions en Europe se sont également équipées d'un ou plusieurs outils du pack *ENDLESS Metal* (fig. 11). Cela nous a conduit à créer un réseau d'utilisateurs afin que ceux-ci soient régulièrement informés de tout nouveau développement et des nouvelles applications. Ce réseau est informel et se base sur la même approche participative que celle conduisant à enrichir les bases de données des outils.

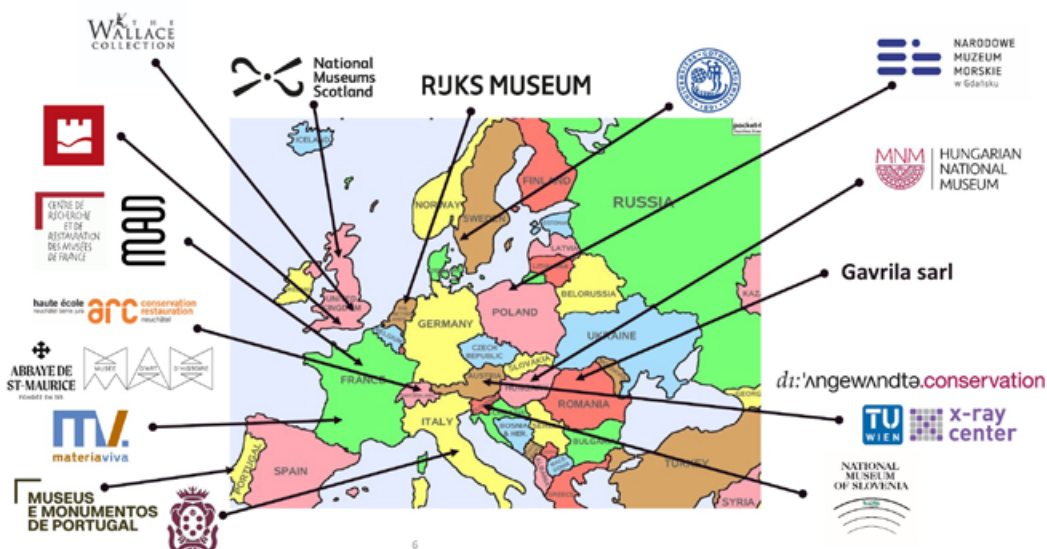


Figure 11 Réseau européen des utilisateurs des outils *MiCorr*, *Discovery Mat* et *Pleco*.

Conclusion

MiCorr, *Discovery Mat* et *Pleco*® ont trouvé leur place parmi les outils analytiques d'aide au diagnostic sur les métaux patrimoniaux. Utilisés par les professionnels de la conservation-restauration pour effectuer un premier diagnostic qualitatif, ils leur permettent de poursuivre sans délai leur travail sur les objets. Des examens complémentaires peuvent ensuite être menés sans que ceux-ci aient bloqué l'avancée du travail. Ces mêmes professionnels sont aussi les contributeurs directs à ces outils, dont la pertinence dépendra grandement de la proactivité de chacun.

Remerciements

Ce travail n'aurait pas été possible sans le soutien financier de l'association COST au travers du projet COST *Innovators Grant ENDLESS Metal* et du réseau de compétence Design et Arts visuels de la HES-SO, que nous remercions. Nos remerciements vont également aux institutions qui ont mis à disposition les objets sur lesquels nous avons pu travailler : le musée national de l'Automobile de Mulhouse, le Musée historique de Lausanne, le Laténium - Neuchâtel et le musée du Diocèse catholique romain de Timisoara, Roumanie.

Nous tenons également à remercier l'équipe d'*ENDLESS Metal*, composée, en plus des présents auteurs, d'Eva Menart (Musée national de Slovénie), Katarzyna Schaefer-Rychel (Musée national maritime de Pologne), Monique Drieux (laboratoire *Materia Viva* de Toulouse), Paula Menino Homem (université de Porto) et Razvan Gavrilă (H.A. Studio Restaurare de Timisoara).

Références bibliographiques

Degrigny C., Jeanneret R., Witschard D. (2015), « Local cleaning of tarnished Saint Candide reliquary head of the treasury of Saint-Maurice Abbey, Valais (Switzerland) with the Pleco electrolytic pencil », *e-Preservation Science*, N° 12, p. 20-27.

Degrigny C., Menart E., Erny G. (2018), « Easy-to-use, low-cost electrochemical open-source hardware to analyze heritage metals: possibilities and limits », *Current Topics in electrochemistry*, N° 20, p. 15-23.

Degrigny C., Dillmann P., Gaspoz C., Neff D. (2022), « Exploitation and dissemination of MiCorr as a diagnostic support tool for heritage metals », dans Murray A., Vila A. (éd.), *Diagnosis: before, during, after, CONSERVATION 360°*, N° 2, p. 362-375.

Granget E., Chalançon B., Degrigny C. (2022), « DiscoveryMat, A freeware electrochemical tool for the *in situ* analysis of aluminum alloys in the cooling systems of historical vehicles », dans Mardikian P., Näsänen L., Arponen A. (éd.), *Metal 2022, Proceedings of the ICOM-CC Metal WG interim meeting*, Helsinki (Finland), ICOM-CC, p. 87-92.

Guillet L. (1926), « L'Alpax », *Revue de l'aluminium*, N° 15, p. 240-247.

Schweizer F. (1994), « Bronze objects from lake sites: from patina to "bibliography" », dans Scott D.A., Podany J., Considine B.B. (éd.), *Ancient and historic metals, conservation and scientific research*, Los Angeles, The Getty Conservation Institute, p. 33-50.

Tissot I., Monteiro O.C., Barreiros M.A., Correia J., Guerra M.F. (2017), « The influence of the constituent elements on the corrosion mechanisms of silver alloys in sulphide environments : the case of sterling silver », *RSC Advances*, N° 7, p. 28564-28572.

Les auteurs

Christian Degrigny Chercheur en conservation, christian.degrigny@he-arc.ch

Haute École Arc Conservation-restauration / HES-SO Haute École Spécialisée de Suisse Occidentale, Espace de l'Europe, 11, 2000 Neuchâtel, Suisse

Romain Jeanneret Conservateur-restaurateur, romain.jeanneret@he-arc.ch

Haute Ecole Arc Conservation-restauration / HES-SO Haute École Spécialisée de Suisse Occidentale, Espace de l'Europe, 11, 2000 Neuchâtel, Suisse. Atelier de restauration de l'abbaye de Saint-Maurice, Avenue d'Agaune 15, 1890 St-Maurice, Suisse

CONSERVATION-RESTAURATION D'UN FRAGMENT D'AILE DE SPITFIRE SUPERMARINE MK. VII. ENTRE PATRIMOINE ARCHÉOLOGIQUE ET INDUSTRIEL : RECHERCHE SUR LA PRÉSERVATION DES ALLIAGES D'ALUMINIUM ET LEURS TRAITEMENTS

Ève Paillaux, Sotiris Bampitzaris, Jane Echinard, Gilles Baron,
Cesar Escobar-Claros, Magali Brunet, Luc Robbiola, Élodie Guilminot

Résumé

L'étude proposée par le laboratoire Arc'Antique porte sur la conservation d'un fragment de bord d'attaque de Spitfire de la Seconde Guerre mondiale, disparu en 1944, retrouvé en 1988 dans un fond marin et stocké dans un jardin privé. Le mauvais état de l'objet a nécessité de prendre des décisions de conservation en considérant son importance patrimoniale et ses valeurs historiques, industrielles, techniques et scientifiques. À terme, il deviendra un mémorial pour le pilote décédé lors de la mission. Le projet vise à trouver la meilleure solution pour la conservation et l'exposition, basée sur des essais de nettoyage et de traitements appropriés menés dans le cadre du projet PROCRAFT (*Protection and conservation of heritage aircraft*). Cette étude illustre la mise en œuvre d'un projet européen de conservation-restauration et l'application de la théorie de la conservation du patrimoine industriel aux artefacts archéologiques.

Abstract The study proposed by the Laboratory Arc'Antique focuses on the conservation of a fragment of a World War II Spitfire's wingtip, which was lost in 1944, rediscovered in 1988 in a marine environment, and subsequently stored in a private garden. The poor condition of the object necessitated conservation decisions that considered its heritage significance as well as its historical, industrial, technical, and scientific values. Ultimately, it is intended to serve as a memorial for the pilot who lost his life during the mission. The project aims to determine the best solution for both conservation and display, based on cleaning trials and appropriate treatments conducted as part of the PROCRAFT project (PROtection and conservation of heritage airCRAFT). This study exemplifies the implementation of a European conservation-restoration project and the application of industrial heritage conservation theory to archaeological artifacts.

Resumen El estudio propuesto por el Laboratorio ARC'Antique se centra en la conservación de una fama de ataque de Spitfire de la Segunda Guerra mundial, que desapareció en 1944 y se encontró en 1988 en un fondo marino, almacenado en un jardín privado. El mal estado del objeto requirió tomar decisiones de conservación considerando su importancia patrimonial y sus valores históricos, industriales, técnicos y científicos. Finalmente, se convertirá en un monumento para el piloto que murió durante la misión. El proyecto tiene como objetivo encontrar la mejor solución para la conservación y la exposición, basada en las pruebas de limpieza y tratamiento adecuadas que se llevan a cabo como parte del proyecto Procraft (Protección y

conservación de aeronaves del patrimonio). Este estudio ilustra la implementación de un proyecto europeo de conservación- restauración y la aplicación de la teoría de la conservación del patrimonio industrial a los artefactos arqueológicos.

Mots-clés patrimoine culturel de la Seconde Guerre mondiale, alliages d'aluminium, Supermarine Spitfire, traitement de nettoyage, conservation-restauration, artefact archéologique

Introduction - Présentation du projet PROCRAFT

La Seconde Guerre mondiale est un jalon majeur de l'aviation militaire, avec environ 14 000 avions impliqués dans des batailles épiques comme la bataille d'Angleterre (chasseurs, bombardiers et avions de transport). Malheureusement, la plupart de ces avions ont été perdus, détruits ou recyclés pendant ou après le conflit, ne laissant qu'une infime fraction d'épaves à l'air libre. À la fin de la Seconde Guerre mondiale, certains des avions restant en état de fonctionnement ont été utilisés dans d'autres conflits, mais ils ont été en majorité mis au rebut, fondus ou abandonnés (Carpentier, 2022). Cependant, de nombreux vestiges archéologiques sont encore présents dans toute l'Europe, sous terre comme en mer, rares témoins de l'histoire aéronautique, matérielle et technique.

Ce patrimoine de la Seconde Guerre mondiale a une valeur historique et émotionnelle indéniable pour les Européens, mais ces vestiges archéologiques ne sont entrés que récemment dans le domaine de l'archéologie et de la conservation du patrimoine culturel (Le Maner, 2008). Leur présence dans les musées nationaux est limitée; ils sont d'ailleurs souvent pris en charge par des associations de bénévoles.

La découverte d'une épave d'avion est un *challenge* à plusieurs points de vue : sa composition et ses matériaux, son histoire, son statut juridique, sa taille et son état. Pour relever ces défis, le laboratoire Arc'Antique collabore depuis 2020 avec 4 partenaires principaux (CEMES- Centre d'élaboration de matériaux et d'études structurales de Toulouse, université de Bologne, université de Ferrare, université technique tchèque de Prague) et 21 partenaires associés dans le cadre du projet PROCRAFT (*Protection and conservation-restauration of heritage aircraft*). Ce sont des scientifiques, des représentants de l'État, des conservateurs, des universitaires, des musées, des associations, originaires du Canada, de Grèce, de Suède, d'Italie, de République tchèque et de France. Ils représentent tous les différents acteurs de cette chaîne patrimoniale.

Le projet PROCRAFT vise à développer des solutions innovantes pour chaque phase de préservation des avions de la Seconde Guerre mondiale, notamment :

- des techniques de conservation-restauration adaptées;
- des revêtements pour la protection en environnement non contrôlé;
- des solutions préventives adaptées aux environnements confinés ou semi-ouverts (de type hangars, etc.);
- des lignes directrices pour la conservation des alliages d'aluminium.

Ses résultats permettront :

- d'améliorer et partager les connaissances sur la conservation des avions de la Seconde Guerre mondiale, en mettant l'accent sur les alliages d'aluminium;
- de contribuer à la préservation du patrimoine aéronautique;
- de promouvoir notre travail auprès du public.

Les phases du projet PROCRAFT comprennent :

- la gestion de la coordination des différents acteurs (phase 1);
- la documentation des matériaux et des altérations des épaves d'avions de la Seconde Guerre mondiale (phase 2);
- des essais de nettoyages chimiques et mécaniques selon les états de la corrosion (phase 3);
- les études de protection de surface pour les alliages d'aluminium (phase 4) :
- des clés de compréhension de la sensibilité des alliages permettant la caractérisation de la corrosion (phase 5);
- la définition de lignes directrices pour la conservation préventive (phase 6);
- la sensibilisation du public et la diffusion des informations (phase 7).

Le fragment d'aile de Spitfire MB887, confié par le DRASSM, illustre bien les défis de la préservation de ce type de patrimoine archéologique avec :

- de grandes surfaces portant des restes de peinture d'origine;
- diverses dégradations et types de corrosion;
- des parties inaccessibles;
- un lieu de stockage non climatisé (**fig. 1**).

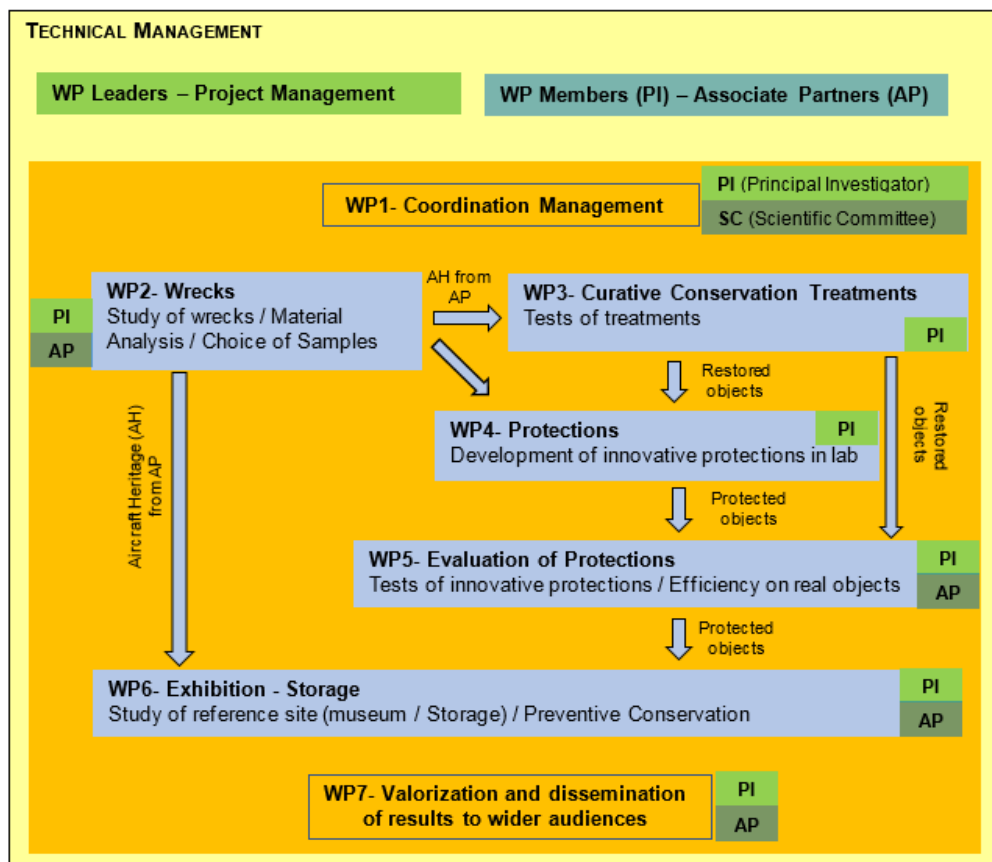


Figure 1 Organisation des phases du projet PROCRAFT. © Arc'Antique.

En raison de son importance historique et technique, les résultats des phases 3 et 5 du projet PROCRAFT ont été appliqués à la conservation-restauration du fragment du Spitfire MB887. Après un diagnostic complet, mêlant approche archéologique et technique, des tests de nettoyage ont été effectués pour déterminer les conditions de traitement adaptées. L'article décrit les différentes actions entreprises pour garantir la conservation de l'aile du Spitfire, illustrant une collaboration entre bénévoles, restaurateurs, scientifiques et représentants de l'État.

Avion Supermarine Spitfire MVII

Études historiques et techniques

Ce fragment d'aile de Spitfire a été récupéré en 1988 sur un fond marin à moins de trois miles des côtes françaises dans la Manche. Le fragment représente le bord d'attaque, la partie avant d'une aile tribord de type universel (ou type C) de Mark VII ([fig. 2](#)).

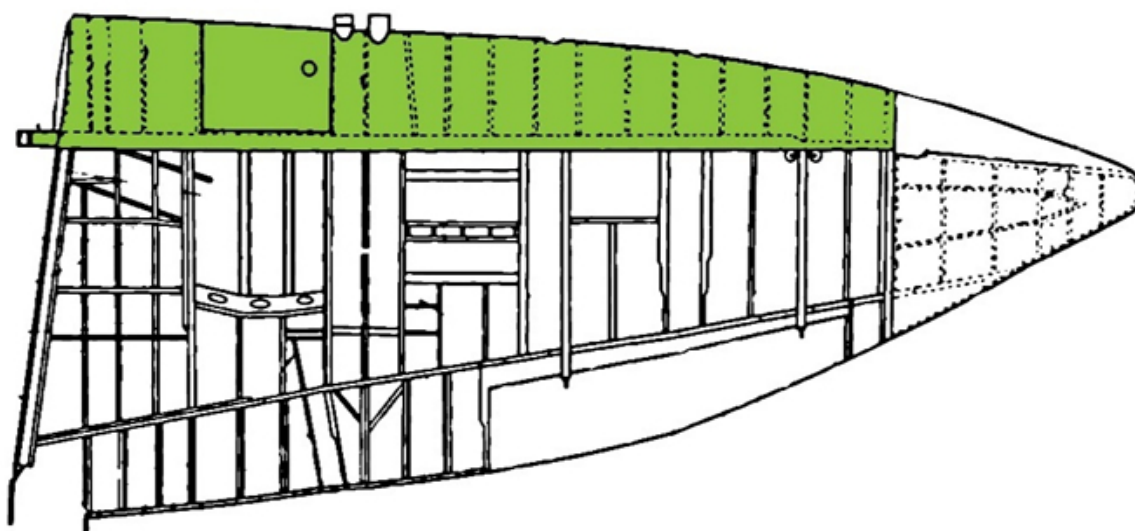


Figure 2 Schéma de la position représentée en vert du bord d'attaque tribord. © Eve Paillaux, Arc'Antique.

Les mitrailleuses ont disparu, mais certaines pièces du train d'atterrissage sont encore attachées. L'objet a été sauvé de la destruction par un bénévole qui l'a conservé pendant plus de trente ans dans son jardin. Les autorités locales, soutenues par l'Association bretonne du souvenir aérien 39-45 (ABSA 39-45) et le DRASSM, responsable de la conservation de l'objet, ont décidé de restaurer le fragment d'aile et de l'exposer en tant que mémorial en l'honneur du pilote.

Grâce à la plaque d'identification associée au fragment de l'aile, les membres de l'association ABSA 39-45 ont pu retrouver dans les archives les informations liées au pilote et à sa mission. Le 1^{er} juin 1944, lors de l'opération *Rhubarb*, l'officier James Atkinson, membre d'un escadron de quatre pilotes disparaissait en mer avec son avion, le MB887, après avoir attaqué un train de marchandises en France.

Le Spitfire a été produit en grandes quantités tout au long de la Seconde Guerre mondiale et a subi de nombreuses modifications pour améliorer ses performances (Jackson, 2011). Le Mark VII a été développé spécifiquement pour le vol en haute altitude et seulement 140

exemplaires ont été produits. Ce modèle de Spitfire disposait d'un réservoir de carburant interne dans les ailes pour les montées à haute altitude. Le réservoir est toujours présent sur le fragment d'aile récupéré (**fig. 3**). Un exemplaire complet est exposé au Smithsonian's national Air and Space museum, mais cet avion n'a jamais pris part à des combats actifs et n'a été utilisé que comme avion d'évaluation.

Ainsi, le MB887 possède des valeurs significatives à plusieurs titres;

- valeur historique : représentatif d'un avion emblématique de la Seconde Guerre mondiale, l'objet est un symbole poignant des batailles aériennes meurtrières de l'époque;
- valeur scientifique et technique : l'objet fait partie d'une série de 140 exemplaires seulement et présente une innovation majeure en matière de réservoir de carburant;
- valeur sociale et authenticité : l'objet est directement lié à la mort du jeune pilote australien James Atkinson (des traces d'impact de balles sont visibles sur l'aile) et pourrait constituer un mémorial approprié en son honneur, accompagné d'explications sur le contexte historique;
- valeur esthétique : malgré la détérioration due à sa longue exposition à l'eau de mer, l'objet peut être facilement interprété et sa fonction comprise.

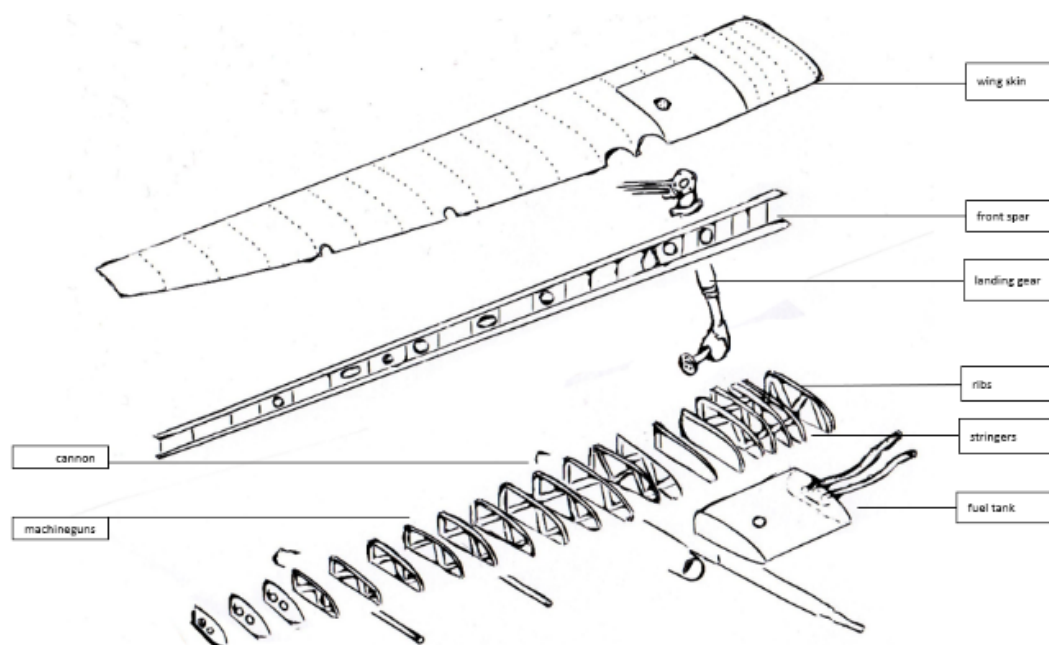


Figure 3 Vue éclatée du fragment d'aile de Spitfire Mk VII. © Eve Paillaux, Arc'Antique.

Examen et diagnostic

L'objet est fabriqué à partir des matériaux suivants : alliages d'aluminium, alliages ferreux, élastomères, matériaux synthétiques, peinture (restes). L'aile est principalement constituée d'un alliage d'aluminium (Al-Cu) très sensible à la corrosion. L'analyse SEM-EDS a déterminé que la plupart des pièces sont en duralumin avec une composition élémentaire d'Al (93,3 %), Cu (4,2 %), Mg (0,9 %), Mn (0,65 %), Si (0,5 %), Fe (0,4 %) et des traces de Ni, Zn, Ti, Cr.

Le fragment d'aile du Spitfire, après 44 ans dans l'océan et 34 ans dans un jardin privé (**fig. 4**), présente diverses détériorations : dégradations mécaniques dues aux combats et au crash (**fig. 5a**), dégradations liées à l'eau de mer (**fig. 5b et c**) et au développement de la végétation

pendant le stockage en extérieur (**fig. 5d**). Une évaluation exhaustive, incluant la dégradation mécanique et chimique, a été entreprise, dont les principales observations sont résumées dans le tableau (**fig. 6**).



Figure 4 Le fragment d'aile de Spitfire Mk VII entreposé dans le jardin. © Arc'Antique.

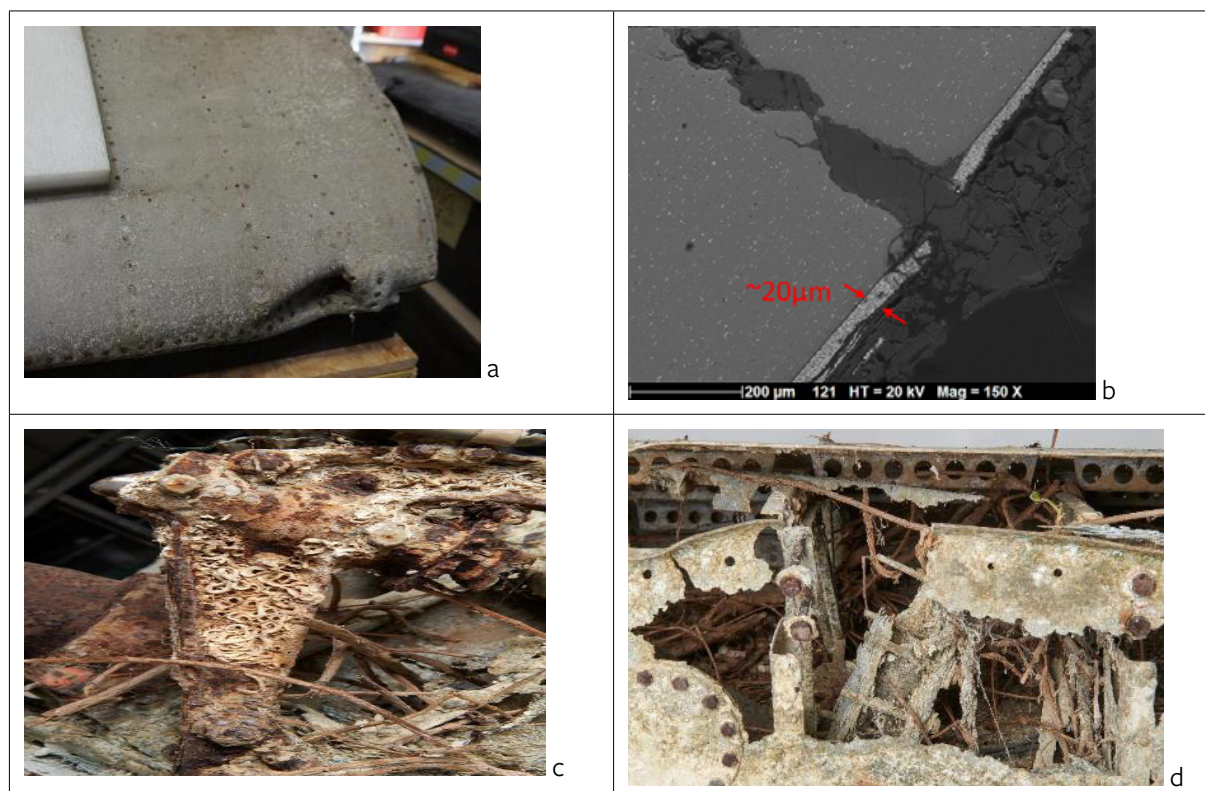


Figure 5 Exemples de dégradations observées sur le fragment d'aile du Spitfire Mk VII : impact de balle (a); photo MEB d'un échantillon en coupe transversale de l'aile montrant une corrosion généralisée, avec corrosion inter et intragranulaire en relation avec des précipités intermétalliques micrométriques (b); développement de micro-organismes marins, appelés « concrétions » (c); présence de sous-bois à l'intérieur de l'aile (d). © Arc'Antique.

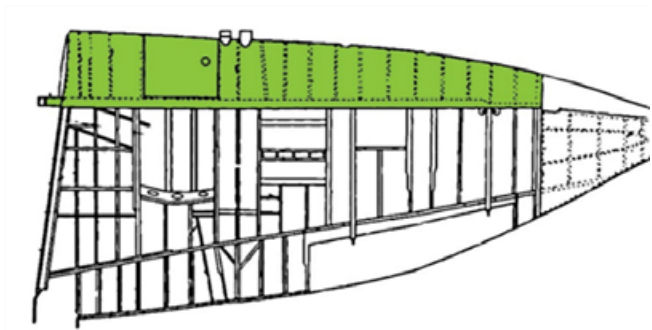
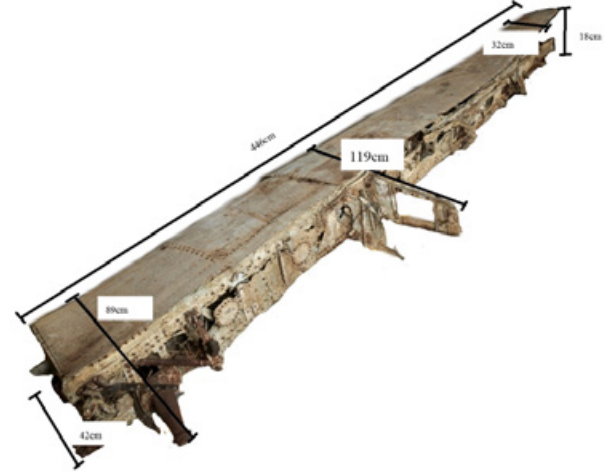
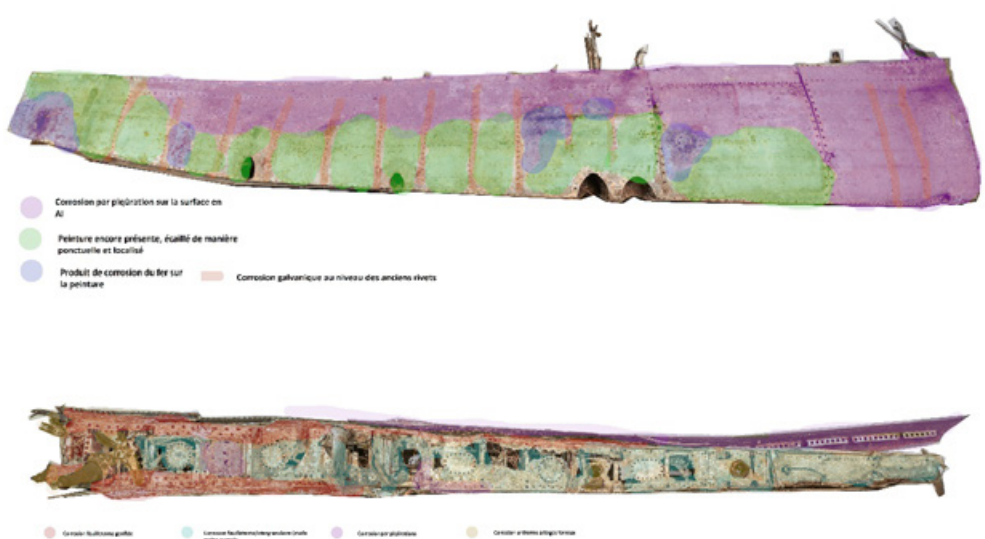
Ce schéma représente une aile complète de Spitfire. En vert, localisation du fragment récupéré.	
Dimensions récupérées: L : 446 cm H: 18 à 42 cm l : 32 à 119 cm	
Principales altérations causées par la corrosion	 Corrosion par piqûration sur la surface en Al Peinture encore présente, écaillée de manière ponctuelle et localisée Produit de corrosion du fer sur la peinture Corrosion galvanique au niveau des anciens rivets Corrosion multiforme profonde Corrosion multiforme en creux (trou de vermine) Corrosion par piqûration Corrosion à l'interface métal/peinture
Principales altérations mécaniques	Dépôts adhérents et non adhérents (concrétions marines/restes de végétation). Déformations graves, lacunes, désolidarisation, fissures, ruptures, éléments structuraux manquants, principalement (95 %) sur la structure interne. Déformations légères, lacunes, fissures, taches et éléments structuraux manquants sur la structure de la peau (30 %).

Figure 6 Principaux dommages identifiés sur le fragment d'aile de l'avion Supermarine Spitfire.

© Arc'Antique.

La dégradation mécanique majeure est probablement due au crash (fig. 6). Des impacts de balles sont visibles et ont perforé la structure externe. L'enfouissement marin et le stockage extérieur ont entraîné une importante corrosion. Les altérations varient considérablement entre les parties intérieures et extérieures, avec notamment une dégradation structurelle et une corrosion des nervures et des longerons en interne (fig. 7) et une corrosion localisée et des résidus de peinture d'origine en externe avec une épaisseur moyenne de 20 µm (fig. 5).

On observe des rivets manquants qui ont entraîné une désolidarisation des assemblages. Ces rivets en alliage Al-Cu sont plus riches en Mg que le duralumin et sont plus sensibles à la corrosion. Les boulons en fer ont mieux résisté, mais ont accéléré la dégradation des alliages d'aluminium par un phénomène de corrosion galvanique. Les éléments en fer sont légèrement corrodés et leurs produits de corrosion ont provoqué des taches d'oxydes à la surface de l'aile. Le réservoir et les pièces en élastomère semblent avoir mieux résisté.

Le duralumin est très sensible à la corrosion en présence de chlorures, développant des corrosions localisées, telles que des piqûres, et une corrosion intergranulaire accentuée par la présence de précipités intermétalliques (Vargel, 2004, p. 65, 129, 185) (fig. 5b). Les archives montrent que les pièces en duralumin du Spitfire étaient généralement protégées par un placage en Al (Al pur laminé à chaud sur les deux faces de l'alliage, pour offrir une plus grande résistance à la corrosion) et une peinture (Jackson, 2011). Cependant, l'analyse au MEB-EDS d'échantillons prélevés à différents endroits de l'aile n'a révélé la présence d'un tel revêtement que sur les longerons.

Pendant la période de stockage dans le jardin, le fragment d'aile se trouvait sous une bâche en plastique, entouré de végétation, ce qui générait des conditions humides entraînant une corrosion accrue de l'alliage d'aluminium. La corrosion s'est généralisée dans certaines zones, notamment au niveau de la structure interne, entraînant un feuilletage et une fragilisation structurelle importante. Les alliages d'aluminium sont très sensibles aux variations d'humidité relative, qui produisent des produits de corrosion engendrant des contraintes et une détérioration mécanique accrue.

Les différentes dégradations des surfaces externes sont classées en quatre catégories : corrosion localisée avec piqûres, résidus de peinture d'origine, taches de rouille et rivets manquants (fig. 8). Le revêtement de l'aile est en relativement bon état, mais peut gagner en lisibilité, notamment pour les restes de peinture.

Les piqûres et la corrosion intergranulaire sont fréquents sur les épaves archéologiques en alliage d'aluminium. Dans le cas d'une épave d'avion DC-3 (Tengnér, 2014), cette variabilité des dégradations a aussi été observée : certaines pièces étaient très dégradées, tandis que d'autres semblaient sortir d'usine. Pour les épaves récupérées en mer, les premiers traitements développés se sont inspirés de la stabilisation des matériaux ferreux (Mac Leod, 2014, Degryny, 2014) avec des rinçages chimiques ou électrochimiques pour éliminer les chlorures. Cependant, une étude sur l'efficacité de ces traitements a montré que très peu de chlorures restent présents dans les alliages d'aluminium lorsque l'objet n'est plus en contact avec un environnement chloruré (Tissier, Guilminot, Berges, 2014). En effet, l'absence de composés contenant du chlore et de l'aluminium est probablement due à la grande solubilité de ces composés (Graedel, 1989). L'étape d'extraction des chlorures n'est donc pas jugée nécessaire, mais des traitements de conservation supplémentaires restent indispensables pour assurer la préservation de ce type d'épave en alliage d'aluminium.



Figure 7 Exfoliation du longeron à l'origine de la déformation de la tôle d'aluminium. © Eve Paillaux, Arc'Antique.

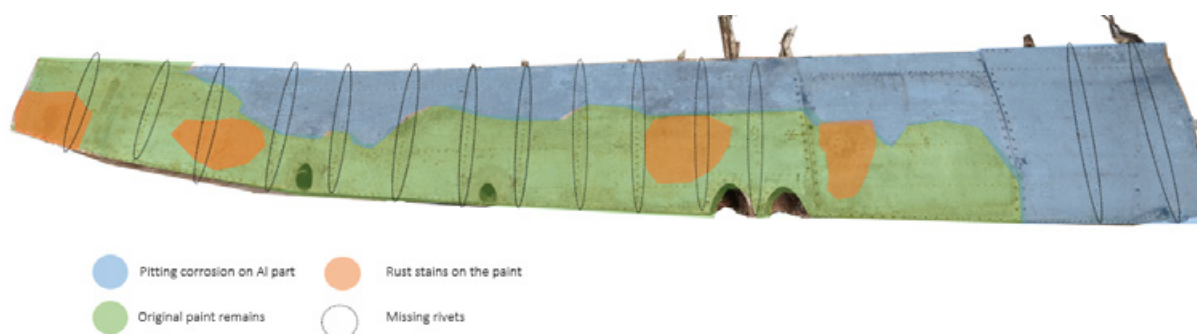


Figure 8 Localisation des différentes dégradations sur le fragment d'aile du Spitfire Mk VII. © Eve Paillaux, Arc'Antique.

En raison de la corrosion du duralumin, les parties de la structure interne sont en très mauvais état, en particulier le longeron et les nervures (**fig. 7**). Le longeron, élément structurel principal, nécessite un traitement de conservation urgent (**fig. 5d**), car il présente une exfoliation importante. Le retrait de certaines nervures (environ 10 %) doit être envisagé au vu de leur état de dégradation. La surface peut gagner en lisibilité pour mieux mettre en valeur les restes de peinture.

Objectifs de conservation

En tenant compte de l'histoire, de l'état de conservation, des résultats du diagnostic et des attentes en matière d'exposition, les objectifs de conservation sont les suivants :

- préservation et consolidation des éléments essentiels pour comprendre les caractéristiques fonctionnelles et techniques;
- élimination des éléments instables ou trop altérés sans intérêt scientifique;
- homogénéisation de l'aspect final de la surface pour la mise en valeur des restes de peinture;
- élimination des dépôts exogènes et des concrétions marines, ainsi que des produits de corrosion de surface, principalement des hydroxydes d'aluminium;
- protection adéquate de la surface pour maintenir sa stabilité lors de l'exposition, malgré les conditions environnementales instables.

Le traitement de conservation-restauration de l'aile du Spitfire a utilisé les résultats des tests de la phase 3 du projet PROCRAFT.

Matériels et méthodes

Analyse SEM-EDS

Elle est réalisée en découpant de petits échantillons de l'objet, en les enrobant dans de la résine époxy, en les polissant successivement avec du papier de SiC avec granulométrie variant de 800 à 4000 puis avec de la pâte diamantée de 3 µm à 1 µm. Pour cette analyse, le microscope électronique à balayage (MEB) JEOL JSM 5800LV est utilisé, avec une tension de 20 kV, et est couplé à la spectroscopie X à dispersion d'énergie (EDS) pour l'analyse élémentaire. Six zones de 500x500 µm² sont analysées, avec un minimum de 100 000 coups pour chaque spectre.

Préparation du gel d'agar

Il s'agit un agent gélatineux dérivé de polysaccharides d'algue rouge qui est utilisé à 3%p/v. La solution de traitement est chauffée à 50°C, puis la poudre d'Agar Art est ajoutée lentement, le mélange est ensuite chauffé à 90°C et mélangé jusqu'à obtenir une solution homogène et translucide. Après un refroidissement de 24 heures, le gel est chauffé une seconde fois à 90°C. Pour l'application par pulvérisation, le gel est inséré dans le réservoir d'un pistolet de pulvérisation à 70°C, utilisant un modèle de pulvérisateur mural Wagner W450.

Projet PROCRAFT : résultats pour les choix de traitement

Résultats des essais de nettoyage

La variabilité des surfaces de l'aile a nécessité la détermination d'un protocole de traitement spécifique prenant en compte les résultats des tests précédents. La phase 3 du projet a permis d'établir des protocoles de nettoyage sur diverses surfaces métalliques, corrodées et peintes, provenant d'épaves d'avions de la Seconde Guerre mondiale, telles qu'une pale d'hélice, un fragment de raidisseur et une plaque de Messerschmitt Bf109. L'évaluation et la description des couches de corrosion ont précédé l'évaluation de différentes méthodes de nettoyage.

Les tests ont permis de comparer les techniques mécaniques et chimiques de nettoyage, incluant le brossage avec ou sans eau, l'utilisation de scalpels et d'un microtour et le sablage

Traitement mécanique	Impacts sur la surface métallique propre	Impacts sur la surface corrodée	Impacts sur la surface peinte
Scalpel	Inadapté Chronophage pour les grandes surfaces Risque de rayures	Convient aux produits de corrosion locaux	Convient à une utilisation locale
Microtour avec brosse en acier	Inadapté Chronophage pour les grandes surfaces Risque de rayures	Inadapté	Inadapté
Sablage avec un abrasif végétal		Très efficace pour éliminer la corrosion superficielle légère, donne une surface homogène.	
Brosse douce avec de l'eau déminéralisée			Efficace uniquement si la peinture adhère fortement à la surface

Figure 9 Traitements mécaniques et résultats du projet PROCRAFT. © Arc'Antique.

Les traitements chimiques ont consisté en l'application de gels d'agar ou de xanthane, sélectionnés en se basant sur des études antérieures sur les alliages d'aluminium. Toutes les solutions de traitement chimique sont répertoriées ci-dessous (**fig. 10**). Le rinçage a été effectué uniquement après tous les autres traitements, consistant à frotter légèrement avec un coton-tige imbibé d'eau déminéralisée jusqu'à ce qu'aucun résidu ne se dépose plus sur les tampons.

Solution de traitement	pH	Gel	Références	Résultats
Acide citrique (0,055 M)	5,4	Agar	RAF Museum, n.d., Bailey, 2004	Les solutions d'acide citrique ou de citrate tri-ammonium (TAC) éliminent les produits de corrosion, mais 6 à 12 applications de gel pendant dix minutes sont nécessaires pour des surfaces propres et brillantes
Tri-ammonium citrate (TAC) (5%w/v)	7,5	Agar	Morrison, 2007; Giraud, 2021	Le TAC a nettoyé les dépôts en surface, éliminé les produits de corrosion, mais aussi quelques résidus de la couche peinte du Messerschmitt. Efficacité limitée, pas de modification de la peinture.
Acide éthylène diamine tétra-acétique (EDTA) (0,5 M)	8	Agar ou xanthane	MacLeod, 2014; MacLeod, Kelly, 2001	L'EDTA a nettoyé la plupart des dépôts de surface et éliminé les produits de corrosion, la surface était propre après un minimum de 6 applications de gel de dix minutes. La solution d'EDTA est la plus efficace, mais peut légèrement endommager la peinture.
Métasilicate de sodium (2%w/v)	9	Xanthane	MacLeod, Kelly, 2001	Le métasilicate de sodium a eu peu d'effet sur les produits de corrosion, même après 60 minutes de traitement. Sur la surface peinte, le métasilicate de sodium a donné les meilleurs résultats dans la mesure où il a éliminé les dépôts exogènes sans provoquer de décoloration de la surface peinte
Sulfate d'ammonium (0,125 M) + ammoniac (NH ₃) (0,25 M)	9,6	Xanthane	MacLeod, 1983	Le mélange sulfate d'ammonium et ammoniac a bien fonctionné, mais la finition est mate. Le mélange dissout les restes de peinture, il est donc non recommandé pour ces surfaces.
Résine cationique de CTS (120H Cation)	2,9	Seulement avec eau	Carlino, Guilminot, 2020	La résine cationique 120H a également donné d'excellents résultats, cependant son temps de réaction rapide présente des limites et n'est pas adapté aux grandes surfaces

Figure 10 Solutions de traitement testées pour le nettoyage des alliages d'aluminium. © Arc'Antique.

Sur les surfaces corrodées, le sablage avec un abrasif végétal ou l'application d'un gel d'EDTA ont donné les meilleurs résultats tandis que, sur les surfaces peintes, les traitements chimiques étaient plus efficaces, sélectionnés en fonction des composés à éliminer. Lorsque la peinture était fortement adhérente, des techniques mécaniques comme le sablage à l'abrasif végétal ou le brossage à l'eau ont également été efficaces. Les résultats des tests précédents ont été utilisés pour les fragments d'aile du Spitfire Mk VII. Notamment, le TAC en gel est choisi comme solution de traitement pour les parties présentant des résidus de peinture.

Choix du traitement pour le fragment d'aile de Spitfire Mk VII MB887

La première étape a impliqué le nettoyage de la zone interne pour éliminer les sédiments, la terre, le sable, les concrétions et la végétation restants, réalisé principalement par microaspiration. Ce nettoyage initial a considérablement amélioré la lisibilité de l'objet. Ensuite, les parties les plus endommagées de la structure ont été consolidées. Pour les parties très corrodées, une double consolidation a été effectuée, d'abord en profondeur avec du Paraloid B44 à 15 % p/v dans de l'acétone, puis en surface avec du Paraloid B44 à 30 % p/v dans de l'acétone. Le longeron a été renforcé avec de la fibre de verre et du Paraloid B72 à 30 ou 60 % p/v dans de l'acétone. Des remplissages avec du Paraloid B72 (à 60 ou 70 % p/v dans de l'acétone) chargé de microsphères de verre et de pigments ont été nécessaires pour stabiliser les éléments internes et restaurer l'aspect général de l'objet. Les concrétions marines sur les pièces ferreuses ont été retirées mécaniquement, principalement par rotation ou microburin. Sur les pièces structurelles en alliage d'aluminium, le sablage végétal était généralement suffisant, complété par l'élimination des concrétions à l'aide d'une compresse de coton imprégnée d'acide nitrique à 10 % (v/v) (pH=1) pendant 30 secondes suivie d'un rinçage abondant. Pour le nettoyage de la surface de l'aile, qui présentait des résidus de peinture, des produits de corrosion de l'aluminium et des taches de rouille, un premier cycle de nettoyage chimique a été employé avec une solution de TAC à 5 % p/v appliquée par du gel d'Agar à 3 % p/v (**fig. 11**). Comparé à d'autres agents chimiques, le TAC était moins agressif et plus efficace pour éliminer la saleté. Le gel a été pulvérisé à chaud, conformément à un protocole déterminé pour l'application sur de grandes surfaces (Giordano, Cremonesi, 2021). Trois applications de 20 minutes ont été nécessaires pour éliminer la crasse et réduire les taches de rouille (**fig. 12**). Le nettoyage de la peau de l'aile a été suivi d'un sablage à l'abrasif végétal pour homogénéiser la surface.



Figure 11 Utilisation d'un gel d'agar par pulvérisation. Le retrait du gel se présente comme un film.
© Lisa Preud'homme, Arc'Antique.



a



b



c



d



e



f

Figure 12 Nettoyage mécanique avant et après traitement (a et b) et consolidation (c); nettoyage chimique avec du TAC 5 % p/v appliqué avec du gel d'agar à 3% p/v par pulvérisation (d); enlèvement de la surface du gel avant le nettoyage (e); surface après le nettoyage (f). © Arc'Antique.

Après le nettoyage, la protection de la surface est une étape importante pour assurer la préservation à long terme de l'objet. Pour cela, nous avons utilisé la surface sans et avec les résidus de peinture pour conduire les tests de la phase 5 :

- tests de protection en extérieur et en intérieur;
- développement d'une protection innovante à base de cutine (extrait de peau de tomate) très prometteuse;

- tests avec des protections plus classiques : cire, résines (Paraloïd B72, Dinitrol 4010, Lesonal), inhibiteur (carboxylates).

L'efficacité des revêtements a été évaluée par plusieurs moyens, notamment par spectroscopie d'impédance électrochimique, dont les résultats feront l'objet d'une publication spécifique. Les premiers résultats ont cependant montré que les meilleures protections pour l'aile sont la cutine, le Lesonal et le Dinitrol. La cutine est une protection expérimentale mise en œuvre par nos collègues italiens de l'université de Ferrare. Elle utilise les propriétés anti-oxydantes de la cutine contenue dans les peaux de tomate. Celle-ci est utilisée pour produire en deux étapes une résine de poly(ester-uréthane). À l'état de développement, cette résine n'est pas commercialisée. Le Lesonal est très difficile à appliquer. Il est donc actuellement préférable de conseiller le Dinitrol 4010, préférentiellement pour les objets en extérieur ou dans les zones confinées (intérieur des structures).

En fonction du futur projet d'exposition, en intérieur ou en extérieur, nous adapterons le revêtement à appliquer sur les surfaces internes et externes (**fig.13**). En complément, nous préconisons les mesures suivantes :

- l'objet doit être monté de manière à renforcer la structure et à permettre une interprétation technique de l'objet;
- la surface intérieure doit être accessible pour permettre un dépoussiérage et un entretien à long terme;
- la sécurité du public doit être assurée et des informations claires doivent être fournies pour l'aider à comprendre l'objet;
- il doit inclure un mémorial en l'honneur du pilote James Atkinson.



Figure 13 Inauguration de l'exposition *Mémoires des airs* aux Archives départementales de Loire Atlantique à Nantes (du 15 avril au 30 juin 2024). © Arc'Antique.

Conclusions

Cet objet illustre le large éventail de questions liées au patrimoine technique et archéologique. Les études historiques et techniques du fragment d'aile mettent en évidence son importance considérable en termes de patrimoine et de valeur historique, émotionnelle, esthétique, scientifique et technique. Le projet de conservation a également permis de développer des techniques de nettoyage innovantes pour les alliages d'aluminium. Des techniques de nettoyage mécanique éprouvées ont été associées à un nettoyage chimique. La prochaine étape de la conservation du fragment d'aile est l'application de la protection sélectionnée à partir des tests effectués dans le cadre du projet PROCRAFT. L'objet sera ensuite exposé localement en Bretagne (France) en souvenir du pilote.

Remerciements

Les auteurs expriment leur sincère gratitude à l'association ABSA 39-45 pour avoir fourni des informations sur l'objet et au DRASSM (département des Recherches archéologiques subaquatiques et sous-marines) pour son temps. Nous remercions également la direction régionale des Affaires Culturelles (DRAC) Pays de Loire et les JPI-CH pour leur soutien financier. Enfin, nous remercions tout particulièrement Lisa Preud'homme pour ses photos.

Références bibliographiques

- Bailey G.T.** (2004), « Stabilization of a wrecked and corroded aluminium aircraft », dans ICOM-CC (éd.) *Metal 2004, Proceedings of the ICOM-CC Metals Working Group Interim Meeting, 4-8 October, 2004, Canberra, Australia*, ICOM, p. 453-464.
- Bailey G.** (2014), « A critical review of the 1996 conservation treatment of a World War II aircraft carried out at the Australian War Memorial », dans Chemello C., **Collum M., Mardikian P., Sembrat J., Young L.** (éd.), *Aluminum: history, technology and conservation, Proceedings from the 2014 International Conference*, Washington DC (USA), Smithsonian Scholarly Press, p. 103-106.
- Carlino M., Guilminot E.** (2020), « Utilisation des résines échangeuses d'ions pour le nettoyage d'objets métalliques archéologiques ou historiques », *CeROArt*, N° 12. Disponible sur : <https://doi.org/10.4000/ceroart.8014>.
- Carpentier V.** (2022), *Pour une archéologie de la Seconde Guerre mondiale*, Paris, La Découverte, 368 p.
- Degrigny C.** (1995), « Stabilisation de moteurs d'avions immergés », *Studies in conservation*, N° 40, p. 10-18.
- Degrigny C.** (2014), « The conservation of historical marine, terrestrial and industrial aluminium objects : a review », dans Chemello C., **Collum M., Mardikian P., Sembrat J., Young L.** (éd.), *Aluminum: history, technology and conservation, Proceedings from the 2014 International Conference*, Washington DC (USA), Smithsonian Scholarly Press, p. 87-95.
- Fournier L.** (2018), « La protection des aéronefs au titre des monuments historiques », *In Situ*, N° 35. Disponible sur : <http://journals.openedition.org/insitu/17047>.
- Giordano A., Cremonesi P.** (2021), « New methods of applying rigid agar gels: from tiny to large-scale surface areas », *Studies in conservation*, N° 66, p. 437-448. Disponible sur : <https://doi.org/10.1080/00393630.2020.1848272>.
- Giraud T., Gomez A., Lemoine S., Pelé-Meziani C., Raimon A., Guilminot E.** (2021), « Use of gels for the cleaning of archaeological metals. Case study of silver-plated copper alloy coins », *Journal of cultural heritage*, N° 52, p. 73-83. Disponible sur : <https://doi.org/10.1016/j.culher.2021.08.014>.
- Graedel T.E.** (1989), « Corrosion mechanisms for aluminum exposed to the atmosphere », *Journal of electrochemical society*, N° 136, p. 204C-212C.
- Jackson R.** (2011), *Spitfire, la légende*, Ed. Techniques pour l'automobile et l'industrie, 158 p.

Le Maner Y. (dir.) (2008), *Tombés du ciel. Les aviateurs abattus au-dessus du Nord-Pas-de-Calais (1940-1944)*, Saint-Omer, Éditions La Coupole, 179 p.

MacLeod I. (1983), « Stabilization of corroded aluminium », *Studies in Conservation*, N° 28, p. 1-7.

MacLeod I., Kelly D. (2001), « The effects of chloride ions on the corrosion aluminium alloys used in the construction of Australia II », *AICCM Bulletin*, décembre 2001, p. 10-19.

MacLeod I. (2014), « Conservation of aluminum alloys corroded under water: from in-situ conservation through storage to exhibition », dans Chemello, C., Collum, M., Mardikian, P., Sembrat, J., Young, L. (éd.), *Aluminum: history, technology and conservation, Proceedings from the 2014 International Conference*, Washington DC (USA), Smithsonian Scholarly Press, p. 39-45.

Morrison R., Bagley-Young A., Burnstock A., Jan van den Berg K., Van Keulen H. (2007), « An investigation of parameters for the use of citrate solutions for surface cleaning unvarnished paintings », *Studies in Conservation* N° 52, p. 255-270. Disponible sur <https://doi.org/10.1179/sic.2007.52.4.255>.

Royal Air Force Museum. « Dornier 17 Media. » Royal Air Force Museum. Disponible sur <https://www.rafmuseum.org.uk/about-us/media-vault/dornier-17-media/> Accessed on 26/07/22.

Tengnér C. (2014), « The preservation of a marine archaeological DC-3 aircraft », dans Chemello, C., Collum, M., Mardikian, P., Sembrat, J., Young, L. (éd.), *Aluminum: history, technology and conservation, Proceedings from the 2014 International Conference*, Washington DC (USA), Smithsonian Scholarly Press, p. 97-102.

Tissier Y., Guilminot E., Berges S. (2014), « Characterization of two propeller blades from submerged WWII-era wrecks », dans Chemello, C., Collum, M., Mardikian, P., Sembrat, J., Young, L. (éd.), *Aluminum: history, technology and conservation, Proceedings from the 2014 International Conference*, Washington DC (USA), Smithsonian Scholarly Press, p. 79-86.

Vargel C. (2004) *Corrosion of Aluminum*, Oxford, Elsevier, 700 p.

Wreck Diving Liguria. « Archeo-aeronautics. » Wreck Diving Liguria. Disponible sur <http://www.wreckdivingliguria.com/newsite/archeo-aeronautics.html> (accessed on 26/07/22)

Les auteurs

Eve Paillaux Conservatrice-restauratrice au Centre de restauration et d'études archéologique municipal (CREAM), Vienne (38), France, epaillaux@mairie-vienne.fr

Sotiris Bampitzaris Étudiant en conservation-restauration, université d'Athènes.

Jane Echinard Cheffe de service, GPLA-Arc'Antique, département de Loire-Atlantique, arc.antique@loire-atlantique.fr

Cesar Escobar-Claros Ingénieur matériaux au Centro tecnológico de componentes CTC, Santander, ingcesarescobar@gmail.com

Magali Brunet CEMES-CNRS, université de Toulouse, France, magali.brunet@cemes.fr

Gilles Baron Responsable du secteur patrimoine sous-marin, GPLA-Arc'Antique, département de Loire-Atlantique, arc.antique@loire-atlantique.fr

Luc Robbiola TRACES UT2J, université de Toulouse, CNRS, France, robbiola@univ-tlse2.fr

Élodie Guilminot GPLA-Arc'Antique, département de Loire-Atlantique, Elodie.GUILMINOT@loire-atlantique.fr

CAOUTCHOUC : DIFFICULTÉS DE STABILISATION D'UN MATÉRIAU CONTEMPORAIN ARCHÉOLOGIQUE

Sophie Fierro-Mircovich

Résumé

Depuis quarante ans, l'archéologie contemporaine a pris son essor, au départ grâce à l'archéologie des conflits. Ce faisant, le prélèvement de matériaux contemporains, issus de l'industrialisation, entraîne la mise au jour de nombreux produits synthétiques issus de la chimie organique, dont les processus de dégradation liés à l'enfouissement sont trop rarement étudiés, malgré les problèmes de conservation qu'ils posent.

Une paire de brodequins américains constitués de semelles de caoutchouc et provenant des fouilles d'un camp de la Seconde Guerre mondiale à Stenay a été traitée en 2021 à ARC-Nucléart. Le traitement a été choisi à la suite d'une documentation bibliographique.

En raison de sa compatibilité avec les élastomères et de son utilisation dans l'industrie caoutchoutière, les objets ont été immergés dans une solution de PEG 400 à 30% dans l'eau. Puis, du fait du caractère cryoprotecteur du PEG et des très faibles températures de transition vitreuse des caoutchoucs, les objets ont été lyophilisés.

Abstract For forty years, contemporary archaeology has been on the rise, initially propelled by conflict archaeology. In this context, the recovery of contemporary materials, derived from industrialisation, leads to the unearthing of numerous synthetic products derived from organic chemistry, whose degradation processes due to burial are too rarely studied despite the conservation challenges they pose. In 2021, a pair of American combat boots, consisting of rubber soles and excavated from a World War II camp in Stenay, was treated at ARC-Nucléart. The treatment method was selected following a review of the literature. Due to its compatibility with elastomers and its use in the rubber industry, the objects were immersed in a 30% PEG 400 aqueous solution. Then, owing to the cryoprotective properties of PEG and the very low glass transition temperatures of rubbers, the objects were freeze-dried.

Resumen Desde hace cuarenta años ha despegado la arqueología contemporánea, inicialmente gracias a la arqueología de los conflictos. Los materiales contemporáneos, como resultado de la industrialización, conducen al descubrimiento de muchos productos sintéticos de la química orgánica, cuyos procesos de degradación vinculados al entierro están demasiado raramente estudiados, a pesar de los problemas de conservación que plantean. Un par de zapatos estadounidenses con suelas de goma, provenientes de las excavaciones de un campamento de la Segunda Guerra mundial en Stenay, fueron tratados en 2021 en ARC Nucléart. El tratamiento se eligió como resultado de la documentación bibliográfica. Debido a su compatibilidad con los elastómeros y su uso en la industria del caucho, los objetos se han sumergido en una solución de PEG 400 a 30% en agua. Luego, debido al carácter crioprotector del PEG y las temperaturas muy bajas de transición de vidrio de las gomas, los objetos fueron liofilizados.

Mots-clés caoutchouc, élastomère, vulcanisant, séchage contrôlé, polyéthylène glycol, PEG, agent cryoprotecteur, température de transition vitreuse

Archéologie du contemporain

L'archéologie du monde contemporain continue de se développer depuis les années 1990 et diversifie ses objets d'études, en s'étendant désormais à tous les domaines sociétaux (INRAP, 2020).

C'est, en premier lieu, l'archéologie des conflits contemporains qui a initié cette expansion (Hurard, 2019). Effectivement, cette discipline, au départ controversée et parfois jugée inutile en raison de l'abondance des archives historiques et d'objets militaires conservés hors fouilles en bon état, devient une spécialité reconnue à partir des années 1990-2000. Cela est notamment dû aux fouilles très médiatisées de la fosse de Saint-Rémy-La-Calonne, en 1991, qui ont permis la mise au jour de la dépouille du lieutenant Alain Fournier, soldat de la Première Guerre mondiale et auteur du roman *Le grand Meaulnes*, formellement identifiée par Frédéric Adam, avec l'aide d'historiens.

Ce n'est cependant qu'en 2016 que l'archéologie des conflits récents apparaît dans la programmation nationale de la recherche archéologique et que le Code du patrimoine incorpore les sites de la Première Guerre mondiale dans le patrimoine archéologique (Cochet, 2022).

L'archéologie des conflits contemporains est porteuse d'informations essentielles à la compréhension des affrontements récents et complète les nombreuses sources historiques. Les fouilles peuvent mettre en évidence les formes de consommation et révéler les écarts entre les réglementations et les libertés prises. Selon François Cochet : « *Ces vestiges, conservés en contexte d'utilisation (baraquements, tranchées, dépotoirs, latrines...) permettent de restituer des gestes, des usages, des conditions d'utilisation et de circulation qui ne sont pas relatés par les autres sources, soit parce qu'ils ne font pas partie des usages autorisés, soit parce qu'ils appartiennent à des gestes tellement quotidiens qu'ils n'ont pas besoin d'être dits. Les données que l'archéologie exhume sur les conditions du combat, sur les pratiques funéraires ou les aspects techniques et logistiques sont une mine d'informations sur les manières d'adapter les pratiques sociales à ces situations de crise. Les vestiges sont des données brutes, dans la mesure où elles sont issues d'un processus de conservation aléatoire, sans sélection. Cette documentation livre sans censure, loin des discours officiels, la violence de guerre, les sociabilités particulières, la pénibilité de la vie de camp.*¹ » (Cochet, 2022).

Dès lors, le prélèvement de matériaux issus de l'industrialisation entraîne la mise au jour de nombreux produits synthétiques issus de la chimie organique, dont les processus de dégradation liés à l'enfouissement sont trop rarement étudiés, malgré les problèmes de conservation qu'ils posent.

Contexte archéologique

Les opérations archéologiques menées par l'INRAP à Stenay appartiennent à ce domaine de l'archéologie du monde contemporain.

Ces fouilles ont permis la mise au jour des vestiges d'un camp américain de prisonniers de la Seconde Guerre mondiale.

Il s'agissait, au départ, d'une caserne militaire, construite entre 1890 et 1894, prise par les allemands puis par les américains pendant la Première Guerre mondiale, avant d'être restituée

¹ François Cochet est professeur émérite à l'université de Lorraine-Metz, président du Conseil d'orientation scientifique de l'EPCC « Mémorial Champ de bataille de Verdun ».

à la France. Le même schéma se répète à l'identique pendant la Seconde Guerre mondiale. Ensuite, cette caserne fit l'objet de plusieurs phases de destruction et de réaménagement au cours de la seconde moitié du XX^e siècle, avec la construction d'un collège en 1965, sans aucune étude historique ou archéologique préalable à la disparition des vestiges de l'occupation militaire la plus ancienne du site. De 1992, année de construction d'une zone d'activités commerciales, à 2006, il n'existe aucun suivi de travaux. Puis, la loi de 2001 permet l'établissement de diagnostics archéologiques préventifs. En 2007, l'opération réalisée par l'INRAP, sur prescription par le SRA de Lorraine, révèle la présence de structures et vestiges liés aux occupations militaires des deux guerres mondiales, dont le camp de prisonniers allemands détenus par l'armée américaine : le *Continental central prisoners of war, enclosure n° 17* (CCPWE17). En l'absence de prescription de fouilles, les vestiges sont alors détruits au fur et à mesure de l'avancée des travaux. En 2013, à l'occasion d'une nouvelle extension de la ZAC, un nouveau diagnostic est réalisé, à la suite duquel le SRA de Lorraine prescrit en 2016 la fouille des nombreuses structures liées aux deux guerres mondiales. L'une des zones aide à la compréhension du quotidien des soldats de l'armée allemande, détenus sur le site de 1944 à 1947. Enfin, une dernière phase, réalisée par l'INRAP en 2021, complète la connaissance de l'organisation du CCPWE17 et révèle la présence de structures militaires de l'entre-deux-guerres (Vernard *et al.*, 2016).

La détention de prisonniers allemands sur le territoire français de 1944 à 1948 est un sujet peu connu. Pourtant, plus de 300 000 prisonniers (hommes, femmes, adolescents et quelques enfants) ont été détenus dans le camp américain de Stenay (Musée de la Bière de Stenay, 2023).

Contexte de traitement des objets de Stenay

En 2021, ARC-Nucléart s'est vu confier le traitement d'objets composites, issus des fouilles du camp de la Seconde Guerre mondiale à Stenay. Le délai de restitution devait permettre la présentation muséographique en vue d'une exposition au musée de la Bière. Ce délai bref n'autorisait aucune étude de caractérisation avant la stabilisation des objets.

Le mobilier comprend des typologies d'objets et de matériaux très variées (caoutchouc, tissu enduit de plastique, bakélite, cuir, etc.).

L'exposition s'est déroulée en deux volets. Le premier volet, *Dans la peau d'un soldat 1884-1938*, présenté de décembre 2022 à mars 2023, a été consacré à la vie quotidienne au sein de la caserne Chanzy, de sa création jusqu'à l'entre-deux-guerres. Les objets à traiter par ARC-Nucléart s'inscrivaient dans la programmation du deuxième volet de l'exposition, qui s'est tenu de juin à décembre 2023 : *Dans la peau d'un prisonnier de guerre 1944-1947*.

Ces expositions ont été réalisées en partenariat avec l'INRAP, le département de la Meuse et le musée de la Bière de Stenay.

L'opération archéologique a livré de nombreux objets composites. Les matériaux les plus fréquemment rencontrés sont les métaux (alliages ferreux et cuivreux essentiellement) et les matériaux organiques (cuir, bois, organiques synthétiques). La complexité de l'opération a résidé dans le traitement des objets constitués de matériaux organiques synthétiques contemporains, issus de l'industrialisation. Parmi 300 objets, 12 ont été sélectionnés pour être traités à ARC Nucléart en collaboration avec le Laboratoire d'archéologie des métaux, à Nancy.

Parmi les matériaux issus de l'industrialisation qui constituaient les objets à traiter, figuraient des objets composites, dont une paire de brodequins américains avec des semelles de caoutchouc (fig. 1 et 2).



Figure 1 Brodequins avant traitement.
© ARC-Nucléart.



Figure 2 Brodequins après traitement.
© LAM.

Les élastomères caoutchouc

Le terme « caoutchouc » est devenu un synonyme usuel d'élastomère, qui comprend les caoutchoucs naturels et synthétiques d'origine organique, mais aussi de nature minérale (caoutchoucs-silicones).

Les élastomères appartiennent à la famille des polymères, mais ne sont pas des matériaux plastiques à proprement parler.

Contrairement aux polymères thermoplastiques, les macromolécules du caoutchouc présentent un certain degré de réticulation. Elles n'ont pas de structure linéaire et sont plus ou moins entrelacées, comme dans un filet qui contraint les macromolécules à se déplacer autour de points fixes (les nœuds du réseau) et leur permet de reprendre leur forme initiale après sollicitation. Un élastomère supporte de très grandes déformations (jusqu'à environ 1000 %) presque totalement réversibles avant rupture.

Le caoutchouc naturel est le plus souvent issu de l'*Hevea brasiliensis* (de la famille des euphorbiacées), mais peut aussi provenir d'autres espèces contenant du latex, présent dans l'écorce de l'arbre et jouant un rôle protecteur en cas d'agression extérieure. Le latex est une suspension colloïdale très instable qui donne le caoutchouc, par évaporation de l'eau et coagulation.

En 1860, le chimiste anglais Charles Hanson Greville Williams montre que ce matériau est un polyisoprénoïde.

De nos jours, le caoutchouc est obtenu par évaporation ou par coagulation à l'aide d'acides (acide acétique ou acide formique). À l'état brut, les élastomères n'ont pas de bonnes propriétés mécaniques, ont peu de tenue dimensionnelle et n'offrent aucune stabilité aux agressions extérieures. Pour améliorer la résistance à la déformation ainsi que les propriétés mécaniques du matériau, on réalise une vulcanisation (brevet Charles Goodyear en 1844) en ajoutant du soufre dont les atomes, par pontage chimique, créent la réticulation responsable du comportement élastique, permettant ainsi de réduire le taux d'oxydation, d'améliorer la résistance à l'abrasion, la tenue thermique du caoutchouc, sa force de cohésion, son élasticité et d'éviter le suintement. Le soufre peut être remplacé par le chlorure de soufre, le sélénium, le poly nitrobenzène, les peroxydes organiques, les quinones, etc. (L'Elémentarium, 2019).

C'est à l'occasion des Première et Seconde Guerres mondiales – et durant les pénuries qui en découlèrent – que les caoutchoucs synthétiques commencèrent à se développer. Dans les années 1930, des chimistes allemands mettent au point des produits désignés sous le nom générique de *Buna* (polymérisation du butadiène sous l'action catalysante du sodium). Ne parvenant pas à obtenir de l'isoprène synthétique, leurs recherches se sont portées sur le butadiène. De ce même procédé est alors né le styrène-butadiène (SBR) aux États-Unis, au début des années 1940.

Afin d'améliorer les performances mécaniques et physico-chimiques du caoutchouc, de nombreux éléments y sont ajoutés, qui auront des rôles différents.

Les agents vulcanisants améliorent les propriétés mécaniques ainsi que la tenue chimique. Il existe plusieurs systèmes de vulcanisation. Le nombre de liaisons chimiques créées et leur répartition auront une influence sur les propriétés mécaniques et dynamiques de l'élastomère. Les charges (craie, chaux, sulfates de baryum, carbonate de calcium, silice, talc) visent à renforcer le matériau, à améliorer sa résistance à l'usure, à obtenir une coloration, à augmenter la tenue au feu, les propriétés mécaniques et électriques, l'imperméabilité au gaz, ou à diminuer le coût du matériau. Des plastifiants (huiles minérales, d'origine végétale ou synthétique) facilitent la mise en œuvre et l'introduction de charges dans le caoutchouc au moment du mélangeage ou malaxage, permettent d'ajuster les propriétés mécaniques d'allongement et de dureté et d'apporter des propriétés spécifiques, telles que la tenue au froid ou l'autolubrification. Des agents protecteurs (dérivés aminés ou phénoliques) protègent quant à eux contre le vieillissement, les UV, la chaleur, l'oxygène et l'ozone. Ces molécules chimiques réagissent avec les agents extérieurs avant que le caoutchouc ne le fasse. Elles sont donc consommées au cours de la vie du matériau et disparaissent progressivement. Il existe des antioxydants, des anti-ozonants, des anti-UV, des cires microcristallines ou paraffiniques, mais aussi des colorants et des stabilisants (Genestoux, 2023).

En fonction des formulations, il existe plusieurs familles de caoutchoucs : les élastomères d'usage général (caoutchouc naturel ou cis-1,4-polyisoprène (NR)) ; le « naturel synthétique » ou polyisoprène synthétique (IR), très voisin du NR ; le polybutadiène (BR) et le copolymère styrène-butadiène (SBR) ; mais aussi les caoutchoucs spéciaux (co- ou terpolymères d'éthylène propylène et diène (EPM et EPDM), copolymères d'isobutylène isoprène, chlorés ou bromés (IIR, BIIR, CIIR), copolymères de butadiène acrylonitrile (NBR) et polychloroprènes (CR)) et, enfin les caoutchoucs très spéciaux (caoutchoucs de silicone (VMQ, FVMQ), élastomères fluorés (FKM), polyéthylènes chlorés et chlorosulfonés (CM, CSM), les polyacrylates (ACM),

copolymères éthylène acétate de vinyle (EVM) et éthylène acrylate de méthyle (AEM), caoutchoucs nitriles hydrogénés (HNBR) et caoutchoucs d'épichlorhydrines (CO, ECO, GECO), polyuréthanes malaxables (AU, EU)) (Genestoux, 2023).

Les élastomères caoutchoucs ont donc des formulations très variées, capables de leur donner certaines propriétés et de les rendre plus ou moins sujets à certaines formes de dégradation.

Le caoutchouc naturel et les caoutchoucs de synthèse présentent des problèmes de conservation similaires.

L'oxydation entraîne la formation de radicaux libres au niveau des ruptures de liaisons et se traduit par une rigidification ou un ramollissement du caoutchouc. La photo-dégradation provoque une dégradation *via* la photo-oxydation. L'ozonolyse, issue des rayonnements ultraviolets ou de contacts électriques, provoque des scissions de chaînes avec pour conséquence l'apparition de craquelures profondes pouvant mener à la désintégration du matériau.

La cristallisation, favorisée lorsque l'élastomère est en tension ou déformé, rend les caoutchoucs inélastiques, rigides et cassants en vieillissant. Les dégradations thermiques peuvent provoquer un durcissement du caoutchouc (froid) ou catalyser les réactions chimiques et produire des déformations permanentes du caoutchouc (chaleur).

L'humidité a une action moindre, mais peut favoriser la présence de moisissures ou l'action des polluants acides et accélérer la photo-oxydation, l'ozonolyse et le lessivage des antioxydants et des additifs de protection. Les tensions mécaniques accentuent la diffusion de l'oxygène *via* le volume de dilatation, accélérant ainsi les dégradations. Enfin, le contact avec des métaux ou des solvants et le développement des micro-organismes, bien que rare, peuvent accroître les altérations du matériau (Pagano, 2023).

Comparaison bibliographique

Les sources concernant la stabilisation des caoutchoucs gorgés d'eau sont particulièrement rares. Il a donc fallu procéder à une recherche et synthèse des informations.

Le CSS *H. L. Hunley* (1864) est un sous-marin à propulsion humaine actuellement présenté à Charleston aux États-Unis. Les caoutchoucs concernés sont essentiellement des joints constitués de plusieurs épaisseurs, renforcés de couches successives de feuilles de coton, qui ont été au contact d'éléments métalliques. Après nettoyage, ils ont été placés sur des supports permettant le maintien en volume de l'objet et d'éviter les déformations durant un séchage contrôlé sous bâche noire. Seuls quatre éléments se sont rétractés, durcis et fendus (Riveira, Kasprzok, 2017).

Le cuirassé *USS Monitor* (1862) est un célèbre navire de la marine américaine ayant combattu durant guerre de Sécession, découvert en 1973, puis renfloué et transféré au musée de la Marine de Newport, entre 1998 et 2001. Les pièces de caoutchouc qu'il comporte sont aussi des joints, constitués d'une alternance de couches de caoutchouc et de textile, dont la quantité est variable selon chaque pièce. Il est fait mention d'un traitement au glycérol qui a modifié la surface du caoutchouc en une substance gélatineuse, avec des résidus en surface et traces grasses sur les matériaux en contact. Mais, après rinçage et nettoyage des ions métalliques, les objets ont bénéficié d'un séchage contrôlé sur des supports morphologiques dans des sachets en polyéthylène.

Tous les objets qui s'étaient délaminés au cours du stockage post-fouilles sont retournés à leur forme originale au cours du séchage (Grieve, 2006, 2007, 2008; King et al., 2020).

Le *SS Xantho* est un bateau à vapeur utilisé dans la colonie d'Australie occidentale pour transporter des passagers, des prisonniers aborigènes et des marchandises commerciales, qui a coulé à Port Gregory en 1872. L'épave a été découverte en 1979, puis progressivement restaurée pour être exposée au *Western Australian museum* à partir de 1985. Des joints de caoutchoucs de diverses typologies ont été traités. Leur état de dégradation était hétérogène ainsi que leur typologie, puisque certains étaient constitués de textile, mais pas la totalité. Ils ont bénéficié d'un séchage contrôlé sans traitement préalable, avec un résultat satisfaisant (Godfrey et al., 2006).

Dans ces différents cas, après stabilisation, les objets ont été conditionnés dans des matériaux sans acide en conditions anoxiques, sous vide et avec des absorbeurs d'oxygène, à 50 % d'humidité relative et en absence totale de lumière.

L'université de Caroline du sud a édité en 2004 un manuel de conservation à destination des archéologues, qui préconise une brumisation de PEG 400, au motif qu'il est présent dans de nombreux antioxydants des caoutchoucs commerciaux (Rodgers, 2004).

Parks Canada évoque le traitement de trois chaussures complètes provenant de latrines d'officiers, antérieures à 1871. À la suite des tests de séchage réalisés par David Grattan et donnant une moyenne de 9 % de retrait, les caoutchoucs ont subi un séchage contrôlé. Les résultats ont présenté un faible retrait. Toutefois, sur une seule des chaussures, les parties les plus dégradées, devenues très poisseuses, ont été consolidées en surface par application d'un vernis de caoutchouc commercial : le *Armour All*², qui contient en solution dans l'eau du PDMS (silicone), du diéthylène glycol, de la glycérine et divers additifs chimiques. Il a été considéré comme très efficace, fixant instantanément la surface de l'objet (Clavir, 1982).

Le retour d'expérience qui semble le plus en lien avec les objets que nous avons eu à traiter vient du laboratoire Arc'Antique, qui a procédé au traitement d'objets provenant du camp de prisonniers de La Touchelais, sur la commune de Savenay.

Parmi les vestiges se trouve une chaussure presque complète, de marque *Michelin*, dont la semelle d'usure et le talon sont en caoutchouc naturel vulcanisé. Le cuir étant plus présent que le caoutchouc, l'ensemble a bénéficié d'une imprégnation dans une solution de polyéthylène glycol (PEG) 400 à 30 %, suivie d'un séchage contrôlé. Il est constaté que le caoutchouc reste élastique après un séchage non contrôlé. L'observation sous MEB entre un échantillon non traité et un échantillon traité au PEG laisse cependant apparaître une structure fibreuse du caoutchouc après l'imprégnation (Becker et al., 2019).

Traitement des brodequins de Stenay

Concernant les brodequins de Stenay, en raison des contraintes de temps liées au projet de présentation muséographique et de l'impossibilité de procéder à des prélèvements destructifs, c'est à la suite de recherches documentaires que la décision a été prise de procéder au traitement de l'ensemble en privilégiant le matériau cuir.

² Armor All is an American brand of car care products that is manufactured by Armored AutoGroup of Danbury, Connecticut, United States. The company markets sprays, gels, liquids, and wipes to clean, shine, and protect interior and exterior automobile surfaces.

L'objet a donc été nettoyé au stylo à ultrasons et avec des pinceaux. Il a ensuite été procédé à une mise sous contrainte des chaussures afin de leur restituer un volume déformé par l'enfouissement. L'ensemble a ensuite été imprégné par immersion dans une solution à 30 % de PEG 400 dans l'eau, additionnée d'un inhibiteur de corrosion (2 % d'Hostacor®) en raison de la présence de rivets métalliques, puis séché par lyophilisation.

Le PEG 400 ne présente pas d'incompatibilité chimique théorique avec la composition d'origine du caoutchouc. Il est utilisé, dans l'industrie caoutchoutière comme additif, pour augmenter le pouvoir lubrifiant et la plasticité, neutraliser l'acidité des additifs, réduire la consommation d'énergie pendant la mise en œuvre en accélérant la vulcanisation et la densité de réticulation ou encore prolonger la durée de vie des produits. Il offre une bonne compatibilité avec le matériau caoutchouc, avec d'excellentes propriétés lubrifiantes, hydratantes et dispersantes. Il a donc plusieurs fonctions.

Concernant la lyophilisation, malgré les inconnues, le procédé ne nous semblait pas nécessairement présenter de risque, d'un point de vue théorique, du moins !

Effectivement, si le caoutchouc était resté imperméable malgré les altérations liées à son enfouissement, il ne devait pas être gorgé d'eau ; auquel cas, il pouvait sembler possible de se référer à sa température de transition vitreuse. Les températures de transition vitreuse des caoutchoucs les plus courants sont très basses, toujours inférieures à -60°C . Pour cette raison, il semblait donc que même altéré et non caractérisé précisément, le matériau pouvait subir une congélation voisine des -30°C .

Si le caoutchouc était devenu gorgé d'eau en raison de sa dégradation, cela aurait impliqué une quantité d'eau dans l'objet et donc des risques liés à l'expansion des cristaux de glace au moment de la congélation. Afin d'éviter ce phénomène, une imprégnation préalable de PEG, agent cryoprotecteur, aurait été nécessaire. Les cryoprotecteurs agissent par différents mécanismes pour prévenir la formation de cristaux de glace et le stress osmotique. Les cryoprotecteurs pénétrants, comme le PEG, agissent de plus comme des agents colligatifs, ce qui signifie qu'ils abaissent le point de congélation de la solution en augmentant le nombre de particules de soluté. Cela réduit la quantité d'eau qui peut former des cristaux de glace et réduit également le gradient osmotique entre les cellules et le liquide extracellulaire (Pei *et al.*, 2023).

Enfin, le vide créé par la lyophilisation n'est pas un vide très poussé. La lyophilisation de ce type d'objets se fait en moyenne entre 0,6 et 1,2 mbar. L'utilisation de joints de caoutchoucs dans la fabrication de sous-marins, d'avions et d'autres machines soumises à d'importantes différences de pression, nous semblait être l'indicateur d'un possible comportement « sans risque » du matériau au vide exercé lors de la lyophilisation.

Toutefois, sans connaissance précise du matériau et de son état de dégradation, la pratique aurait pu contredire la théorie.

Malgré tout, le résultat a été jugé très satisfaisant. Aucune dégradation n'a été constatée. L'aspect est resté inchangé, la souplesse conservée.

En raison des interventions à suivre, et de la présentation muséographique, les chaussures ont été placées dans des conditionnements sans acide avec des recommandations sur les conditions environnementales à respecter (fig. 3, 4, 5, 6).



Figure 3 Semelle droite avant traitement.
© ARC-Nucléart.



Figure 4 Semelle gauche avant traitement.
© ARC-Nucléart.



Figure 5 Semelle droite après traitement.
© LAM.



Figure 6 Semelle gauche après traitement.
© LAM.

Conclusion

Dans le domaine de la conservation du patrimoine contemporain, les matériaux et leurs dégradations commencent à être relativement bien documentés. Il est regrettable que ce développement ait pris autant de temps pour ces mêmes matériaux lorsqu'ils sont issus de fouilles archéologiques. Effectivement, l'enfouissement engendre des altérations susceptibles de transformer les caractères physico-chimiques selon des mécanismes encore inconnus. Les conditions environnementales de conservation à long terme restent aussi à étudier.

Le retard est d'autant plus conséquent à rattraper que la variété des matériaux organiques synthétiques issus de l'industrialisation est immense. Il est donc urgent d'échanger et de diffuser les connaissances et les retours d'expérience concernant ces nouvelles problématiques.

Références bibliographiques

Archéologie du contemporain

Carpentier V., Brang J., Bolly A., Sauvage C., Labbe B., Landolt M., Le Boulair A. (2023), « Pour une archéologie de la Seconde Guerre mondiale », *Archeologia*, N° 621, p. 26-39.

Cochet F. (automne 2022), « L'archéologie des conflits contemporains », dans *Chemins de mémoire*, Paris, ministère des Armées /SGA/DMCA, p. 6-10. Disponible sur : <https://www.cheminsdememoire.gouv.fr/fr/revue/larcheologie-des-conflits-contemporains> (consulté en mars 2025).

Coulaud A., Perarnau R. (2021), « Éditorial », *Revue d'archéologie contemporaine*, N° 1, p. 8-9. Disponible sur : <https://www.cairn.info/revue-revue-d-archeologie-contemporaine-2021-1-page-8.htm> (consulté en décembre 2023).

Hurard S. (2019), « Archéologie. Entre ruptures et continuités », *L'archéologie du monde contemporain. Culture et recherche*, N° 139, p. 13-14. Disponible

sur : https://inrap.hal.science/hal-02779833/file/Hurard_Archeologie-monde_contemporain_Culture-et-Recherche-139.pdf (consulté en décembre 2023).

Hurard S., Roumegoux Y., Chaoui-Derieux D. (2014), « L'archéologie à l'épreuve de la modernité, de l'opportunisme à la maturité », *Archéologie moderne et contemporaine*, N° 137, p. 3-9. Disponible sur : <https://journals.openedition.org/nda/2574> (consulté en décembre 2023).

Appel à contribution, *Calenda*, (juillet 2018), *L'archéologie des conflits contemporains : méthodes, apports, enjeux*, [en ligne]. Disponible sur : <https://calenda.org/446520> (consulté en décembre 2023).

INRAP (2020), [en ligne], <https://www.inrap.fr/periodes/periode-contemporaine>, <https://www.inrap.fr/20-ans-de-recherche-sur-les-epoques-moderne-et-contemporaine-16212> (consultés en décembre 2023).

Le camp de Stenay

Vernard L., Adam F., Panisset B. (2016), « Le camp de prisonniers allemands de Stenay (Meuse) durant la Seconde Guerre mondiale. Identifier et conserver des vestiges », *Archéologie de la réclusion et de la détention, Les Nouvelles de l'archéologie*, N° 143, p. 54-58. Disponible sur : <https://journals.openedition.org/nda/3421> (consulté en décembre 2023).

Musée de la Bière de Stenay (2023), *Dans la peau d'un prisonnier de guerre 1944-1947 – Archéologie d'un camp de détention américain*, Musée de la Bière de Stenay, du 16 juin 2023 au 1er décembre 2024, livret d'exposition.

Caoutchoucs

Colin X. (2023), « Dégradation des élastomères : mécanismes et méthodes d'accélération », dans C2RMF (éd.), *Les élastomères dans tous leurs états 17/10/2023*, journées d'études du C2RMF.

conservation. Disponible sur : <https://www.canada.ca/fr/institut-conservation/services/conservation-preventive/lignes-directrices-collections.html> (consulté en mars 2025).

Connors S.A. (1998), *Chemical and physical characterization of the degradation of vulcanized natural rubber in the museum environment*, mémoire de master of Art conservation, Queen's university Kingston, Ontario, Canada, September 1998, 163 p. Disponible sur : <https://www.collectionscanada.gc.ca/obj/s4/f2/dsk2/ftp01/MQ36018.pdf> (consulté en décembre 2023).

Genestoux M. (2023), « Formulation et transformation du caoutchouc », dans C2RMF (éd.), *Les élastomères dans tous leurs états, 17/10/2023*, Journées d'études du C2RMF.

Fenn J., Scott William R. (2018), « Le soin des plastiques et des caoutchoucs », dans ICC, *Lignes directrices de conservation de l'Institut Canadien de*

Grasland F. (2018), *Vieillesse du caoutchouc naturel par thermo-oxydation : études de ses conséquences sur la cristallisation sous déformation, la fissuration et la rupture*, thèse de doctorat en Matériaux, université de Lyon, 210 p. Disponible sur : <https://theses.hal.science/tel-02090732/document> (consulté en décembre 2023).

Pagano S. (2023), « Les familles d'élastomères, leur apparition, leurs propriétés et leurs utilisations », dans C2RMF (éd.), *Les élastomères dans tous leurs états*, 17/10/2023, Journées d'études du C2RMF.

Pire M. (2011), *Caoutchouc naturel époxydé et réticulation par les acides dicarboxyliques : chimie, cinétique et propriétés mécaniques*, thèse de doctorat en Matériaux, université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 219 p. Disponible sur : <https://pastel.hal.science/pastel-00732940> (consulté en mars 2025).

Shashoua Y. (2008), *Conservation of plastics, materials science, degradation and preservation*, Heidelberg, Butterworth Heinemann, 286 p.

Vandenbroucke A. (2010), *Étude du comportement mécanique pour différentes températures d'un élastomère: caractérisations expérimentale et numérique*, thèse de doctorat en Mécanique des matériaux, université de Bretagne Sud, 176 p. Disponible sur : <https://theses.hal.science/tel-00836556/document> (consulté en décembre 2023).

Ward C., Shashoua Y. (1999), « An interventive conservation treatment for plastics and rubber artefacts in the British museum », dans Bridgland J. (éd.), *Preprints of the 12th Triennial Meeting Lyon 29 August – 3 September 1999*. London, James & James, p. 888-893.

Xu M., Xue H., Tin W.Y., Wang H., Yong Z., Wang Q. (2021), « Synergistic Effect by polyethylene glycol as interfacial modifier in silane-modified silica-reinforced composites », *Polymers* 2021, 13, 788, 17 p. Disponible sur : <https://doi.org/10.3390/polym13050788> (consulté en décembre 2023).

L'Elémentarium, [en ligne]. Disponible sur : <https://lelementarium.fr/wp-content/uploads/2018/08/Caoutchoucs-2019.pdf>; <https://lelementarium.fr/product/caoutchoucs-elastomeres-resines-styreniques/> (consultés en décembre 2023).

En ligne

[http://www.polymere.wikibis.com/caoutchouc_\(matériau\).php#cite_note-caoutchouc10-1](http://www.polymere.wikibis.com/caoutchouc_(matériau).php#cite_note-caoutchouc10-1) (consultés en décembre 2023).

Applications du PEG dans l'industrie caoutchoutière

En ligne

<https://fr.fy-ppg.net/polyethylene-glycol-powder/polyethylene-glycol-peg-4000-powder.html>

[https://www.horizonadmixtures.com/The-role-of-PEG-4000-in-rubber-id8557863.html#:~:text=\(PEG\)%20The%20role%20of%20polyethylene%20glycol%20in%20rubber&text=It%20mainly%20neutralizes%20the%20acidity,lubricity%2C%20moisturizing%20and%20dispersing%20properties.](https://www.horizonadmixtures.com/The-role-of-PEG-4000-in-rubber-id8557863.html#:~:text=(PEG)%20The%20role%20of%20polyethylene%20glycol%20in%20rubber&text=It%20mainly%20neutralizes%20the%20acidity,lubricity%2C%20moisturizing%20and%20dispersing%20properties.)

<https://patents.google.com/patent/KR100426060B1/en>

<http://www.atomer.fr/1/1a-Tg-temperature-transition-vitreuse.html>

<http://www.atomer.fr/1/1ac1.html>

(consultés en décembre 2023).

Rahayu M.S., P urwaningrum Y., Tistamar R. & Nurhayati J. B. (2020), « Polyethylene glycol (peg) and salicylic acid as alternative stimulants », dans N. Baba Rahim (éd.), *Multidisciplinary Research as agent of change for industrial revolution 4.0*, vol. 81. Disponible sur : <https://www.europeanproceedings.com/article/10.15405/epsbs.2020.03.03.12> (consulté en mars 2025).

Les agents cryoprotecteurs

Pei J., Qin L., Baolin L., Wei L. (2023), « Effect of cryoprotectant-induced intracellular ice formation and crystallinity on bacteria during cryopreservation », *Cryobiology*, Vol. 113. Disponible sur : <https://doi.org/10.1016/j.cryobiol.2023.104786> et <https://www.linkedin.com/advice/1/what-best-cryoprotectants-minimizing-ice-crystal> (consultés en décembre 2023).

/10.1016/j.cryobiol.2023.104786 et <https://www.linkedin.com/advice/1/what-best-cryoprotectants-minimizing-ice-crystal> (consultés en décembre 2023).

Traitements de caoutchoucs archéologiques gorgés d'eau

Becker J., Corbin G., Lemoine G., Pelé-Meziani C. (2019), « Archéologie du contemporain : quand le cuir et le plastique se rencontrent », dans ARAAFU (éd.), *Biographie de l'objet*, actes des XXX^{es} Journées des restaurateurs en archéologie, Toulouse, octobre 2016, Paris, ARAAFU, (coll. CRBC-Cahiers techniques, 24), p. 79-91.

Clavir M. (1982), « An initial approach to the stabilization of rubber from archaeological sites and in museum collections », *Journal of the international Institute for conservation – Canadian group* (J.IIC-CG), Vol. 7, p. 3-10.

Godfrey I., King-Smiths N., Morin K., Rochards V. (2009), « The analysis and conservation of organic materials from the SS Xantho », dans M. McCarthy (éd.), *Iron, steel & steamship archaeology proceedings of 2nd Australian seminar, Fremantle, Melbourne and Sydney, 2006*, Sydney, Australian centre of excellence for maritime archaeology, (Special publication, 13), p. 92-95.

Grieve S. (2006), « Archaeological conservation of modern materials : a case study of waterlogged rubber gaskets from the USS Monitor (1862), the Mariners Museum USS Monitor Project », *Journal of middle Atlantic archaeology*, Vol. 22, p. 79-90.

Grieve S. (2007), « The conservation of mid-19th century waterlogged rubber », dans K. Straetkvern, D.J. Huisman (éd.), *Proceedings of the 10th ICOM group on wet organic archaeological materials conference*, Amsterdam, Netherlands, p. 677-686.

Grieve S. (2008), « The excavation, conservation, storage, and display of rubber artifacts recovered from the USS Monitor (1862) », *Journal of the American institute for conservation*, Vol. 47, N° 2, p. 139-148.

King L., Haines L., Mc Gat M. A. (2020), « Sticky situation: conservation of historical waterlogged rubber », AIC 2020, poster, 1 p. Disponible sur : (PDF) A Sticky Situation: Conservation of Historical Waterlogged Rubber (consulté en mars 2025).

Riviera J., Kasprzok L. (2017), « Mass treatment of waterlogged rubber gaskets and seals from the american submarine H. LL Hunley (1864) », dans ICOM-CC (éd.), *ICOM-CC 18th triennial conference 2017*, Copenhagen, poster, 1 p.

Rodgers B-A. (2004), *The archaeologist's manual for conservation. A guide to non-toxic, minimal intervention artifact stabilization*, New York, Kluwer academic publishers, Chap. 7, p. 173-175.

L'auteur

Sophie Fierro-Mircovich Diplômée depuis 2004 en Conservation-restauration des biens culturels, spécialité Objets archéologiques, à l'université Paris 1-Panthéon Sorbonne. Conservatrice-restauratrice au Ribe og Ringkøbing Konserveringscentret en 2005 puis, depuis 2006, au laboratoire ARC-Nucléart, spécialisée dans le traitement des matériaux organiques.
ARC-Nucléart / CEA, 17, avenue des Martyrs - 38045 Grenoble Cedex 9, Sophie.fierro-mircovich@cea.fr

LE NYLON EN CONSERVATION-RESTAURATION : DE SA FABRICATION À SON VIEILLISSEMENT

Mylène Ducharme

Résumé

Le nylon est une fibre textile synthétique inventée au XX^e siècle. Grâce à sa popularité, notamment due à ses caractéristiques physico-chimiques, de nombreux objets dans les collections muséales en sont composés. La fibre de nylon est également utilisable en conservation-restauration. Malgré sa grande résistance au vieillissement, le nylon peut se dégrader. C'est le cas d'un prototype de robe de mariée en nylon conservée au palais Galliera. Des tests de vieillissement artificiels ont été réalisés afin de comprendre le processus de dégradation lié et tirer des conclusions sur l'histoire du stockage de la robe.

Abstract Nylon is a synthetic textile fibre invented in the 20th century. Owing to its popularity, particularly due to its physico-chemical properties, many objects in museum collections are composed of it. The nylon fibre is also used in conservation-restoration. Despite its high resistance to aging, nylon can undergo degradation. This is the case with a prototype nylon wedding dress preserved at the Palais Galliera. Artificial aging tests were carried out to understand the associated degradation process and to draw conclusions regarding the dress's storage history.

Resumen El nylon es una fibra textil sintética inventada en el siglo XX. Gracias a su popularidad, en particular a sus características físicoquímicas, compone muchos objetos ahora en las colecciones de museos. La fibra de nylon también se puede utilizar en conservación- restauración. A pesar de su gran resistencia al envejecimiento, el nylon puede deteriorarse. Este es el caso con un vestido de novia prototipo en nylon que pertenece al Palais Galliera. Se han realizado pruebas de envejecimiento artificial para comprender el proceso de degradación vinculado y sacar conclusiones sobre la historia del almacenamiento de la vestimenta.

Mots-clés nylon, polyamide, polyamide 6.6, cigaline, fibres textiles, vieillissement artificiel

Introduction

Le nylon est un matériau utilisé en conservation-restauration pour sa stabilité dans le temps, sa transparence et sa grande résistance à l'abrasion et à la traction. Le fil de nylon (ou de pêche) est un outil polyvalent pour tous les restaurateurs, utilisé à la fois pour les restaurations, les conditionnements et les mises en exposition. Les restauratrices de textiles utilisent également le tulle de nylon, notamment pour les restaurations en transparence. Il existe cependant des cas d'objets en nylon qui se dégradent de manière spectaculaire, c'est le cas d'une robe de Madame Grès, entièrement réalisée dans une étoffe de nylon, nommée la cigaline. Cette robe, conservée au palais Galliera, a fait l'objet d'étude pour le mémoire *Gris de Grès* soutenu à l'Institut national du patrimoine (INP) en septembre 2022 (Ducharme, 2022).

Afin de comprendre le matériau, il sera ici question de l'historique de l'invention de la fibre de nylon jusqu'à son insertion dans les maisons de haute couture. Les processus de fabrication et d'altération permettent de comprendre l'ensemble de son vieillissement. Le cas particulier de la robe en cigaline vient compléter l'ensemble avec une dégradation spectaculaire, peu commune, de ce matériau.

Historique du matériau

Création d'une fibre nouvelle

Les fibres chimiques, fabriquées par l'homme, apparaissent dès la fin du XIX^e siècle. Issues de matières naturelles, elles ont été inventées dans le but d'imiter la soie. Fabriquées à base de matériaux protéiniques ou cellulosiques, ces nouvelles fibres étaient qualifiées de « soie artificielle », quels que soient leur procédé de fabrication ou la matière naturelle de laquelle elles étaient issues. Rapidement, le consommateur restait dans l'ombre face à ce qu'il achetait réellement. Ces fibres nouvelles étaient alors perçues comme une alternative bas de gamme à la soie naturelle.

Durant la recherche et dès les débuts de la commercialisation du nylon, l'entreprise Dupont de Nemours commercialise la fibre pour elle-même, en lui définissant son identité propre (Handley, 1999). À coup de publicités, l'entreprise américaine crée une convoitise autour de cette nouvelle fibre : la première fibre synthétique, issue de la pétrochimie. Ne voulant pas qu'elle subisse le même sort que les soies naturelles, Dupont de Nemours s'acharne à la distinguer des autres fibres pour en faire une fibre de choix, de modernité, voire de luxe.

Utilisations

En 1939, Dupont de Nemours présente le bas nylon à la 1939 *New York World's Fair*; la fibre, très résistante, ravit les consommatrices (Handley, 1999). Le nylon suscite l'intérêt de la gent féminine et la fibre trouve rapidement sa place dans les foyers américains avec des bas nylon, de la lingerie, des jupons, des chemises de nuit, etc. Avec ses nombreuses publicités, la société Dupont attise l'intérêt des consommatrices en vantant les qualités du nylon : grande résistance, légèreté, coloris vifs, facilité d'entretien : infroissable, insalissable et séchage rapide (Handley, 1999) : de quoi plaire à toutes les ménagères.

Cette fibre, commercialisée peu de temps avant l'entrée en guerre des États-Unis, a été amenée à contribuer à l'effort de guerre. Sa grande résistance à l'abrasion et aux intempéries en fait un matériau de choix pour les parachutes, les sangles et les câbles de sécurité. Aussi rapidement que la fibre est commercialisée, elle disparaît des rayons. Malgré son apparition et sa disparition rapides, le nylon ne perdra pas en popularité et « une fois la guerre finie, les femmes vont se ruer sur les bas nylon, synonymes d'une nouvelle liberté » (Fauque, Bramel, 1999).

Le nylon est naturellement de couleur blanche et translucide. Les parachutes abandonnés par les parachutistes pendant et après la guerre sont récupérés et remaniés. De nombreuses femmes profitent de ces laizes de tissu blanc pour confectionner leur robe de mariée. Nombreuses sont les collections muséales à en conserver¹.

¹ En France, on en retrouve au Mémorial de Caen, au musée de la Résistance de l'Ain, au musée du Débarquement d'Utah Beach, à l'Airborne Museum et dans les collections familiales.

Le nylon est par ailleurs plus blanc que les fibres naturelles. Le coton, comme la soie, est naturellement écru et doit subir des blanchiments pour atteindre une blancheur qui ne rivalise pas avec celle du nylon.

Haute-couture et le pari de Dupont

En parallèle, et afin d'associer la fibre de nylon à l'élégance et à l'innovation (Handley, 1999), Dupont de Nemours contacte les fabricants de tissus où s'approvisionnent les grands couturiers. La malléabilité du nylon en faisait une fibre innovante et les fabricants de tissu l'ont déclinée en de nombreuses étoffes. C'est une époque marquée par l'innovation et les recherches scientifiques, développant à la fois de nouvelles étoffes et de nouveaux procédés d'ennoblissement textiles (Guillaume, 2000).

La maison Bucol

La maison de soierie Bucol est l'une des premières à innover avec la fibre de nylon. Dès la fin des années 1940, ce fabricant propose des étoffes gaufrées et transparentes aux maisons de haute-couture et aux particuliers. Leur première étoffe en nylon, le cracknyl, est rapidement suivie par l'invention du voilnyl, du crepnyl, du lucionyl et de la cigaline (**fig. 1**). Toutes ces étoffes de nylon présentent des particularités différentes par leur relief ou encore leur transparence. Issues de la même fibre, elles se distinguent les unes des autres par leur mode de tissage, puis par leurs déclinaisons, avec des ennoblissements et des apprêts. C'est le cas de la cigaline enduite, le cigalack, « une cigaline d'intempérie ».



Figure 1 Cigaline de Bucol © Mylène Ducharme.

Les maisons de haute couture et les publicités

Les étoffes de nylon ont séduit les maisons de haute couture par leur aspect, leur modernité et l'innovation qu'elles représentaient. Ainsi, pour reprendre l'exemple de la maison Bucol, de nombreuses pièces griffées Balenciaga sont composées de cracknyl dès sa commercialisation (Fauque, Bramel, 1999). Lors de la sortie de la cigaline, ce même couturier s'empresse de l'utiliser pour sa collection suivante. Yves Saint-Laurent, Maggy Rouff, Chanel, Dior, Madame Grès, Lanvin et bien d'autres la déclinèrent, usant de son tombé et de sa transparence. Les magazines de mode de l'époque en répertorient de nombreuses créations.

En effet, les étoffes utilisées par les grands couturiers étaient mentionnées dans les magazines de mode tels que *Vogue*, *L'Officiel*, *Harper's Baazar*, etc. Les nouveaux modèles de la saison étaient présentés dans les magazines et le tissu figurait dans la légende, tout comme les labels (Nylfrance pour le nylon). Ainsi, les couturières ou les particuliers pouvaient se procurer les mêmes étoffes pour leurs créations maison. Les tissus en nylon se sont ainsi fait une place dans le secteur de la mode.

La fibre de nylon

La fabrication du fil de nylon, son mode de synthèse et les traitements chimiques qu'il reçoit caractérisent ses propriétés physico-chimiques. Bien qu'il puisse être ardu de connaître la composition exacte d'une fibre, celle-ci détermine ces caractéristiques et sa résistance au vieillissement. Du procédé de fabrication à ses apprêts et à ses ennoblissements, la fibre de nylon sans additifs possède des caractéristiques précises.

Les polyamides

Le polyamide est souvent appelé à tort nylon. Effectivement, le nylon est un type particulier de polyamide. Il s'agit du polyamide 6.6, la première fibre de polyamide inventée par Dupont en 1938. Suite à son invention, la famille des polyamides s'est élargie avec le polyamide 4, le polyamide 6, le polyamide 6.10, le polyamide 11, le polyamide 12, etc. Ils sont tous composés de chaînes de polymères liées par des liaisons amide (-NH-CO-). Le chiffre ou le nombre indiqué dans le nom des différents polyamides indique le nombre d'atomes de carbone contenus dans la chaîne moléculaire. La majorité des polyamides sont polymérisés par polycondensation, mais certains, comme le polyamide 6, sont produits par polyaddition. Les polyamides les plus courants dans le domaine du textile sont le polyamide 6, le polyamide 6.6 et le polyamide 11 ([fig. 2](#)).

Nom (symbole)	Nom (UIPAC)	Noms commerciaux	Mode de synthèse	Produits
Polyamide 6 (PA 6)	Poly-caprolactame	Perlon, Celon Polyfibres, Lilion	Polyaddition d'un lactame	Amino-acide + lactame
Polyamide 6,6 (PA 6,6)	Poly-hexaméthylène adipamide	Nylon, Nylfrance	Polycondensation d'un diacide avec une diamine	Acide adipique +hexaméthylène diamine
Polyamide 11 (PA 11)	Poly-undécanamide	Rilsan	Polycondensation d'un acide aminé	Huile de ricin

Figure 2 Les polyamides les plus fréquents dans le domaine des textiles. © Mylène Ducharme.

Processus de fabrication de la fibre

Le polyamide 6.6, le nylon, est produit par polycondensation d'hexaméthylènediamine avec de l'acide adipique. Le polyhexaméthylène adipamide $[\text{NH}-(\text{CH}_2)_6-\text{NH}-\text{CO}-(\text{CH}_2)_4-\text{CO}]$ se présente sous la forme de granules avant d'être filé.

Le fil de polyamide est formé par un filage au fondu : les granules sont fondus et la masse liquide est extrudée en passant à travers les pores d'une filière. Les fils issus sont alors refroidis et étirés à froid. Ce même procédé est utilisé lors de la fabrication de nombreuses fibres synthétiques, telles que le polyester (Weidmann, 2024).

Traitement de la fibre et des tissus

Avant le passage de la masse fondue de nylon dans la filière, de nombreux additifs peuvent y être ajoutés. Ceux-ci peuvent impacter la couleur (agents azurants, blanchissants, matifiants) et les propriétés du nylon, tels que des agents anti-odeurs, anti-taches, antistatiques ou ignifugeants (Inderfurth, 1953). Ces traitements sont dans « la masse », c'est-à-dire qu'ils ont été ajoutés dans la masse liquide du polymère avant l'extrusion du fil et refroidissement. Ces additifs sont alors intrinsèques au matériau.

Des apprêts et ennoblissements peuvent être réalisés suite au tissage des fils de nylon. Ils sont généralement moins stables et plus sensibles aux dégradations, car ils sont déposés sur le tissu et ne pénètrent pas au cœur de la fibre. L'ensemble des produits (fig. 3) pouvant être ajoutés dans la fibre ou sur le tissu de nylon est vaste et ils influencent le vieillissement du matériau.

Apprêts et ennobissements	Produits possibles
Blanchiment	Charge minérale
Teinture / azurant	Colorant, pigment
Matage	Oxyde de titane
Anti-taches / oléofugation	Composés à base d'huile organique, résines, de silicone ou fluorées
Anti-odeur / biocides	Composés organiques de zinc, composés organiques d'étain, dichlorophényl-esters, dérivés de benzinidazole, triclosan et isothiazolinone
Ignifugation	Brome / chlore ou oxydes de phosphine et les esters de phosphate
Antistatisme	Composés d'ammonium quaternaire ou esters d'acide phosphorique

Figure 3 Les apprêts et ennobissements possibles sur le nylon. © Mylène Ducharme.

Caractéristiques du nylon

Le nylon est un thermoplastique, c'est-à-dire qu'il peut être refondu et refilé/moulé. Lors de sa fabrication, le fil de nylon s'approprie ses caractéristiques physico-chimiques. Lorsque le fil est extrudé, les chaînes moléculaires s'organisent à la fois en zones cristallines et en zones amorphes. Le moment de l'étirage et du refroidissement détermine de nombreuses caractéristiques du nylon : lors de ce processus, les chaînes moléculaires s'alignent et le taux de zones cristallines augmente. Le taux de cristallinité augmente alors de 30 à 50 % (Timár-Balázsy, Eastop, 1998). Le polyamide est ainsi un semi-cristallin.

Les zones amorphes lui confèrent une bonne élasticité, sa transparence et une certaine hygroscopicité. Ce sont ces zones qui sont sensibles aux facteurs de dégradation tels que les polluants, l'eau et l'oxygène. Les zones cristallines génèrent quant à elles la résistance, la solidité, la rigidité et la brillance de la fibre. Elles sont chimiquement plus stables que les zones amorphes et résistent ainsi mieux au vieillissement.

Processus de dégradation

La fibre de polyamide 6.6 est reconnue pour sa grande résistance à la traction, à l'abrasion et à l'usure. Certains facteurs de dégradation peuvent cependant entraîner un processus d'altération irréversible. On note parmi les dégradations du nylon, une décoloration ou un assombrissement de la fibre et une fragilisation de celle-ci avec apparition de pertes, de fentes et de lacunes.

Comme la majorité des fibres naturelles ou chimiques, le nylon est sensible à la lumière, à l'humidité relative, à la chaleur et aux polluants atmosphériques. Bien que moins sensible que la majorité des fibres, le nylon peut être altéré par ces facteurs de détérioration s'il y est longtemps exposé.

La chaleur

La chaleur peut provoquer une perte de résistance et une décoloration induite par une thermo-oxydation (Diogo, 2015). Cette sensibilité à la chaleur est induite par le procédé de fabrication lors duquel se forment des radicaux libres issus de la présence d'hydroperoxydes et de composés carbonylés. Ceux-ci entraînent une réaction en chaîne d'hydroperoxydes qui provoque une perte de résistance mécanique (Mather, 2015).

L'oxydation des fibres peut également se traduire par une décoloration. Celle-ci est induite par la formation de groupes azométhine en réaction avec les groupes amines oxydés du polymère.

La lumière et les ultra-violets

La photo-oxydation se traduit par une perte de résistance mécanique. La lumière et les UV induisent des ruptures de chaîne et la création de radicaux libres qui dissocient les liaisons chimiques dans les chaînes moléculaires localisées dans les zones amorphes du polymère (Angelloz, Caramaro, Laine, Vaija, 2016).

Les additifs présents dans la fibre peuvent influencer la sensibilité à la lumière du nylon. L'oxyde de titane, souvent utilisé pour blanchir ou matifier les fibres, est le principal catalyseur. Cet additif peut provoquer une sensibilisation à la photo-oxydation, les radicaux libres formant des groupes aldéhydes et d'acide carboxylique qui fragilisent la fibre (Mather, 2015).

L'humidité

La fibre étant hygroscopique suite à la présence de zones amorphes, elle est sensible à l'humidité relative instable (Mather, 2015). De plus, le nylon étant produit par condensation, s'il est exposé à une température élevée (plus de 150°C), la réaction inverse de la condensation, l'hydrolyse, peut se produire.

Les polluants atmosphériques

Les polluants atmosphériques tels que dioxyde de soufre, dioxyde d'azote, sulfure d'hydrogène, formaldéhyde, etc. peuvent catalyser l'oxydation des fibres induite par la thermo-oxydation ou la photo-oxydation (Timar-Balazsy, Eastop, 1998).

Étude de cas - robe en cigaline de Madame Grès, mémoire de fin d'études en Conservation-restauration

Le prototype de robe de mariée de Madame Grès ([fig. 4](#)) datant de sa collection printemps/été 1960 et provenant de la collection du palais Galliera, a été étudié pour un mémoire de l'Institut national du patrimoine (Ducharme, 2022). Cette robe, fabriquée dans une étoffe de cigaline, présentait un état de dégradation avancé déjà observé au moment de son acquisition en 2016 ([fig. 5](#)).



Figure 4 Prototype de robe de mariée, Madame Grès, collection printemps/été 1960. © INP Chloé Bernard.



Figure 5 Dégradation de l'étoffe de cigaline sur le prototype. © Mylène Ducharme.

Composition de la fibre

La fibre a été analysée afin de déterminer sa composition. Les magazines de mode de l'époque présentant des pièces en cigaline indiquaient le label « Nylfrance » et les archives du fabricant² nous indiquaient qu'il s'agissait bel et bien de polyamide. Les analyses de spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (IRTF) nous ont confirmé qu'il s'agissait de polyamide 6.6. Les analyses de microfluorescence X (MFX) nous ont, quant à elles, indiqué la présence d'oxyde de titane dans les fibres (Ducharme, 2022)³.

Dégradations observées

À son arrivée à l'INP, la robe de mariée était dans un mauvais état de conservation. Elle présentait de nombreuses déchirures, des zones lacunaires et des fentes localisées dans le haut de la robe, des effilochures et des décousures. Un empoussièrément généralisé hétérogène altérait sa lisibilité.

Les zones lacunaires et les fentes observées semblaient intrinsèques au matériau. Comme indiqué dans les processus de dégradation du nylon, plusieurs paramètres pouvaient être la cause des ruptures de chaînes moléculaires ayant entraîné la fragilisation des fibres, les pertes de matière, les fentes et les lacunes.

² Les archives Bucol, incorporées au groupe Holding Textiles Hermès, conservent les robracks des différentes gammes de cigaline.

³ Rapport d'analyses INP-2021-89 produit par le laboratoire de l'INP (Ducharme, 2022, p. 184).

Viellissement de la cigaline

Afin de s'assurer de la compatibilité des produits de lavage avec l'étoffe de cigaline altérée, des tests d'empoussièrement et de vieillissement ont été réalisés sur des éprouvettes découpées dans une étoffe de cigaline ne présentant aucune dégradation. Cette étoffe a été préalablement analysée afin de vérifier qu'elle était bien de composition identique à celle de la pièce de Madame Grès. Afin de comprendre le cycle d'altération ayant provoqué la fragilisation de l'étoffe, nous avons procédé à plusieurs cycles de vieillissement artificiel sur les éprouvettes de cigaline en bon état. Ils nous ont permis d'obtenir des détériorations similaires à celles des zones lacunaires de la robe à l'étude (Ducharme, 2023).

Quatre jeux d'éprouvettes ont subi différents cycles de vieillissement artificiel. Les quatre ont subi le même temps d'exposition (206 heures).

Dans le but d'observer les effets de la lumière, le premier jeu a été exposé à un vieillissement à la lumière dans l'enceinte de SUNTEST XLS + à 756 W/m^2 à 35°C (paramètre maximal de la machine).

Dans le but d'observer les effets de la chaleur et de l'humidité, le second jeu a été exposé à un vieillissement en chambre climatique alternant 2 séquences de température et d'humidité relative : 4 heures à 25°C et 90 % d'humidité, suivi de 20 heures à 50°C et 50 % d'humidité relative. Ces séquences ont été répétées et arrêtées au bout des 206 heures.

Dans le but d'observer les effets de la lumière, puis de la chaleur et de l'humidité, le troisième jeu a été exposé pendant 103 heures à la lumière dans l'enceinte de SUNTEST XLS + à 756 W/m^2 à 35°C , puis à la chaleur et l'humidité pendant 103 heures avec les séquences de 4 heures à 25°C et 90 % d'humidité, suivi de 20 heures à 50°C et 50 % d'humidité relative.

Enfin, dans le but d'observer les effets de la chaleur et de l'humidité puis de la lumière, le quatrième jeu a été exposé à un vieillissement en chambre climatique alternant 2 séquences de température et d'humidité relative : 4 heures à 25°C et 90 % d'humidité, suivi de 20 heures à 50°C et 50 % d'humidité relative puis pendant 103 heures à la lumière dans l'enceinte de SUNTEST XLS + à 756 W/m^2 à 35°C (fig. 6).

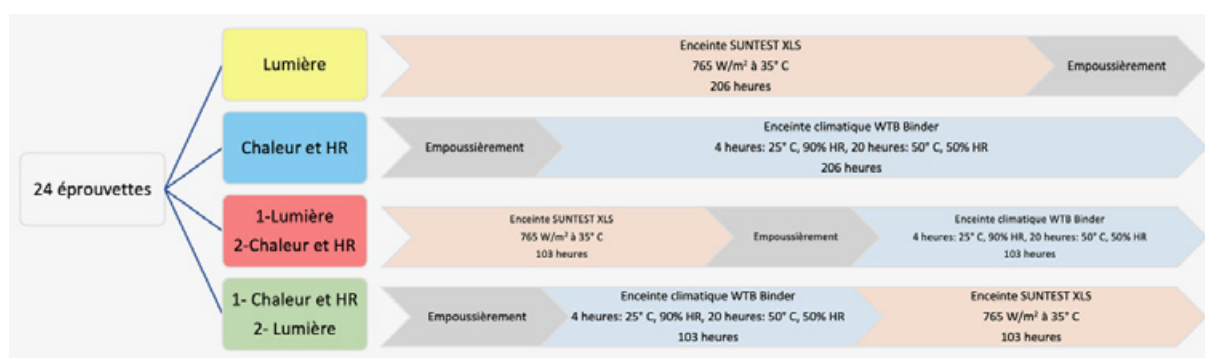


Figure 6 Séquences de vieillissement des éprouvettes. © Mylène Ducharme.

L'hypothèse des cycles d'altération menant à la fragilisation des fibres était que l'un des procédés d'altération en catalysait un autre, tel la thermo-oxydation qui engendrait ensuite une photo-oxydation ou encore l'inverse.

À la fin des différents cycles, les éprouvettes présentant une fragilisation des fibres étaient celles qui sortaient d'un vieillissement à la lumière de 206 heures (premier jeu). Ce lot

d'éprouvettes présentait également une décoloration importante (fig. 7). Le second jeu ne présentait aucune fragilisation évidente et aucune décoloration. Le troisième et le quatrième jeu présentaient une certaine fragilisation et une décoloration.



Figure 7 Éprouvettes du lot 1 après vieillissement, de gauche à droite : aucune traction, légère traction manuelle et traction manuelle maximale. © Mylène Ducharme.

Suite à ces vieillissements, nous avons pu conclure que le prototype de robe de mariée a été exposé longuement à la lumière avant d'être acquis par le palais Galliera. Une charge d'oxyde de titane avait été analysée à la MFX. Il est possible que cette charge ait catalysé la dégradation de la fibre de la cigaline à la lumière.

Conclusion

En conclusion, la fibre de nylon, de polyamide 6.6, a une histoire intimement liée à la mode et à l'habillement. Malgré sa grande solidité, elle a servi à produire de délicates et élégantes étoffes. Son procédé de fabrication lui confère des caractéristiques qui sont intéressantes pour les équipements de sécurité tels que des sangles et des câbles. Néanmoins, le nylon peut être altéré et la robe de mariée créée par Madame Grès en est un exemple. Probablement catalysée par la présence de charges, la dégradation observée est spectaculaire et peu commune sur la fibre de nylon.

La robe de mariée a été restaurée à l'INP. Elle a été lavée en bain, dans une formulation d'eau de lavage au préalable testée (Ducharme, 2023), puis elle a été restaurée selon les techniques de restauration classiques : consolidation aux points de restauration pour les zones lacunaires et déchirées, points de feston pour les effilochures et réassemblage des coutures au point avant. La pièce a regagné les réserves du palais Galliera en 2022 et peut de nouveau être présentée au public en prenant des précautions particulières du point de vue de son éclairage.

Références bibliographiques

Angeloz C., Caramaro L., Laine P. et al. (2005), *Comportement au vieillissement de fibres textiles synthétiques composantes de sangles, élingues et cordes toronnées*, Institut national de recherche et de sécurité (INRS), 35 p.

Arrieta C. (2016), *Étude sur le vieillissement, la dégradation et la durée de vie des équipements de protection contre les chutes - cordes d'assurance* [en ligne], rapport R-925, Québec, Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST), 98 p. Disponible sur : <http://deslibris.ca/ID/10063042.L> (consulté le 21 novembre 2021).

Ducharme M. (2022), *Étude et conservation-restauration d'un prototype de robe de mariée réalisé par Madame Grès, collection printemps/été 1960 (musée de la Mode de la ville de Paris, palais Galliera), Évaluation de l'efficacité et de l'impact du lavage aqueux sur une étoffe en polyamide altérée*, mémoire de diplôme de Restaurateur du patrimoine, Aubervilliers, Institut national du patrimoine, 204 p.

Ducharme M. (2023), « Évaluation de l'efficacité et de l'impact du lavage aqueux sur une étoffe en nylon empoussiérée et vieillie artificiellement », *Support/Tracé*, N° 22-23, p. 183-189.

Diogo O. (2015), *Thermo-oxydation des polyamides*, thèse de doctorat, ENSAM, 208 p. Disponible sur : <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-01346299>.

Eichhorn S., Hearle J., Jaffe M., Kikutani T. (2009), *Handbook of textile fibre structure*, Cambridge, Woodhead Publishing.

Fauque Cl., Bramel S. (1999), *Une seconde peau : fibres et textiles d'aujourd'hui*, Paris, Éditions. Alternatives, 164 p.

Guillaume V. (2000), *Mutation// Mode, 1960-2000*, catalogue d'exposition, musée Galliera, Paris, Paris Musées.

Handley S. (1999), *Nylon: the manmade fashion revolution; a celebration of design from art silk to nylon and thinking fibres*, London, Bloomsbury, 192 p.

Inderfurth K. (1953), *Nylon technology*, Textile technology series, New York, McGraw-Hill, 360 p.

Mather R.R., Wardman R.H. (2015), *The chemistry of textile fibres*, Cambridge, Royal Society of Chemistry, 439 p.

Moezzi M., Yekrang J., Ghane M., et al. (2020), « The effects of UV degradation on the physical, thermal, and morphological properties of industrial nylon 66 conveyor belt fabrics », *Journal of industrial textiles*, Vol.50, N° 2, p. 240-260.

Quye A. (2014), « Factors influencing the stability of man-made fibers: A retrospective view for historical textiles », *Polymer Degradation and Stability*, Vol.107, p. 210-218.

Tímár-Balázs Á. (2000), « Wet cleaning of historical textiles: surfactants and other wash bath additives », *Studies in Conservation*, Vol. 45, N° 1, p. 46- 64.

Tímár-Balázs Á., Eastop D. (1998), *Chemical principles of textile conservation*, Oxford, Boston, Butterworth-Heinemann, 480 p.

Weidmann D. (2024), *Technologie des textiles : de la fibre à l'article*, Paris, Dunod, 240 p.

L'auteur

Mylène Ducharme Conservateur-restaurateur indépendante, spécialité Arts textiles, Paris
mylene.ducharme@gmail.com

TAPA TACHÉ ? OU DE L'USAGE DES GELS AQUEUX POUR LE TRAITEMENT DES MARQUES D'EAU SUR UNE ÉTOFFE POLYNÉSIENNE

Nicolas Moret

Résumé

L'utilisation des gels aqueux pour l'atténuation de marques d'eau sur les *tapa* a fait l'objet de peu de publications jusqu'à aujourd'hui. Cet article présente les tests et les traitements réalisés pour traiter deux grandes marques situées sur les bords adjacents du *tapa* MI/1611 appartenant au musée cantonal d'Archéologie et d'Histoire de Lausanne (Suisse). Les traitements à base de gels aqueux d'agar ont permis de diminuer l'impact visuel de ces marques, tout en abaissant la conductivité et en élevant le pH de ces zones, leur permettant notamment de recouvrer une certaine souplesse.

Abstract The use of aqueous gels to mitigate water marks on *tapa* has received little attention in the literature to date. This article presents the tests and treatments carried out to treat two large marks located on the adjacent edges of *tapa* MI/1611, which belongs to the Cantonal Museum of Archaeology and History in Lausanne (Switzerland). Treatments using agar aqueous gels allowed to reduce the visual impact of these marks while lowering the conductivity and raising the pH of these affected areas, notably restoring a degree of flexibility.

Resumen El uso de geles acuosos para la atenuación de las marcas de agua en *Tapa* ha sido solo objeto de pocas publicaciones hasta hoy. Este artículo presenta los ensayos y el procesamiento realizado para tratar dos marcas principales ubicadas en los bordes adyacentes de la *tapa* MI/1611 que pertenece al museo cantonal de Arqueología e Historia de Lausana (Suiza). Los tratamientos con geles de agar acuosos hicieron posible reducir el impacto visual de estas marcas al tiempo que reducen la conductividad y elevan el pH de estas áreas, lo que les permite recuperar una cierta flexibilidad.

Mots-clés *tapa*, étoffe, agar, gomme gellane, gel, marque d'eau, tache, Polynésie

Le musée cantonal d'Archéologie et d'Histoire de Lausanne (Suisse) conserve, parmi sa collection d'objets d'ethnographie, un *tapa* – une étoffe à base de *liber* – polynésien entré dans les collections en mars 1910 (**fig. 1**). Faussement référencé comme provenant d'Abyssinie, il est plus probablement originaire de Sâmoa. Son parcours dans différentes institutions de la ville de Lausanne pendant plus d'un siècle et son stockage dans des lieux peu appropriés, comme des greniers, sont en partie responsables de ses nombreuses altérations. Sa conservation-restauration en 2020 a été le sujet d'un mémoire de master, réalisé à la Haute-École ARC Conservation-restauration de Neuchâtel (Suisse)¹.

¹ Le texte de cet article est en partie repris du mémoire (Moret, 2020).



Figure 1 Tapa - étoffe de *liber* d'arbre battu, teint (curcuma) et peint (ocre rouge et suie/charbon); rapporté en Europe avant 1910; auteurs non documentés; Polynésie occidentale – Sâmoa; n° d'inventaire MI/1611. ©Nadine Jacquet.

L'une des problématiques de cet objet était l'atténuation des deux marques d'eau longilignes qui parcouraient deux de ses côtés. Le choix de traitements aqueux pour le nettoyage des *tapa* est proposé dans la littérature depuis la fin des années 1970 (Firnhaber, 1979, p. 20) et, dès lors, plusieurs autres publications ont fait part de leurs techniques (ainsi que de certaines réserves) concernant ce type de traitement (Guillemard, Michelet, 1987, p. 127; Norton, 1990, p. 223; Barton, Weik, 1994, p. 31; Gorel, 2010; Botti *et al.*, 2011, p. 7; Kim, 2011, p. 122). Bien que l'usage des gels se soit largement répandu dans le domaine de la conservation-restauration ces dernières années, il n'a été trouvé qu'une seule référence relative aux *tapa* (Arrighi *et al.*, 2017). Cette contribution a pour but d'aider à combler ce manque.

L'article se compose d'une présentation de l'objet et de la problématique des marques d'eau, des tests réalisés pour choisir le traitement idoine et des traitements de restauration en tant que tels. Enfin, les résultats et critiques ponctuent le propos.

Présentation de l'objet

Données techniques et technologiques

Comme indiqué en introduction, l'objet en question est une étoffe polynésienne communément appelée *tapa*² et réalisée à partir de *liber* d'arbre. Le procédé général de fabrication est

² Le terme *tapa* est le nom généralement attribué au matériau et aux objets faits dans ce matériau en Polynésie (Lavondes, 1985, p. 27; Kooijman, 1988, p. 15). C'est pourquoi il est en italique et au singulier dans le texte.

de prélever le *liber*, qui se trouve entre le bois et l'écorce, de le faire macérer dans de l'eau pendant plusieurs jours, afin d'assouplir la matière, et de le frapper à l'aide d'un battoir sur une enclume, le plus souvent tous deux en bois, pour étendre et amincir les fibres. Ensuite, dans le cas de cet objet, les lés sont collés en couches successives avec une résine végétale pour obtenir les dimensions souhaitées. En plus d'être décoré à main levée à l'aide de pigments rouge (ocre) et noir (suie ou charbon), il a été probablement teinté avec du curcuma³ (fig. 2). L'objet mesure au maximum 263 cm de long et 173 cm de large avec une épaisseur de 0,4 mm et un poids de 573 g⁴.

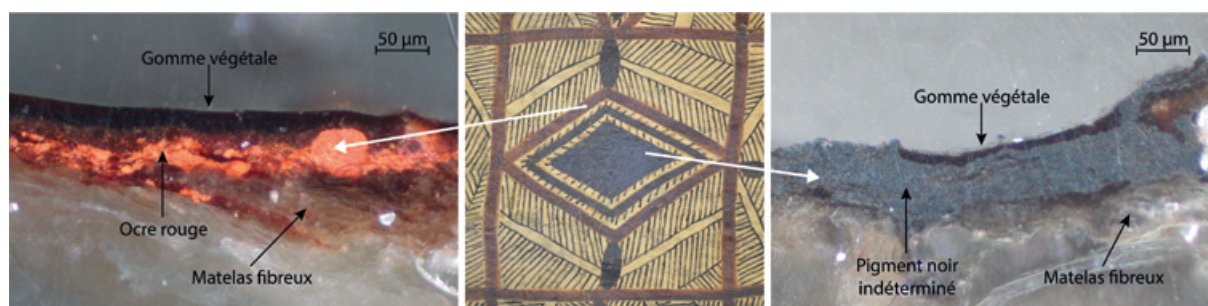


Figure 2 Coupes transversales des couches picturales. ©Nicolas Moret, HE-ARC CR, MCAH.

Les côtés courts, bordés de franges irrégulières et non décorées, indiquent la largeur originale de l'objet. Les côtés longs sont, dans un cas, également l'extrémité de l'objet, car le motif s'arrête (bas), tandis que l'autre suit nettement le bord du motif peint (haut), indiquant une coupe à cet endroit précis. Il est en effet commun pour les *tapa*, utilisés lors de cérémonie pour couvrir l'allée empruntée par une personne de haut rang, d'être coupés afin de les répartir entre les personnes présentes (Kooijman, 1988, p. 52-53; Garnier, 2011, p. 62 et 348). Il est également connu que certains *tapa* ont été coupés dans le cadre muséal afin de correspondre à des dimensions souhaitées (fond de vitrine, cadre, livres, etc.) ou pour distribuer des échantillons entre diverses institutions⁵.

Parcours muséal

Le *tapa* entre dans les collections en mars 1910 par le don d'un certain Delessert – dont l'identité complète reste inconnue à ce jour – sous l'appellation « tapis d'Abyssinie ». Bien que cette provenance géographique ait pu être corrigée grâce aux caractéristiques technologiques et esthétiques de l'objet, indiquant qu'il serait originaire de Polynésie occidentale et plus particulièrement de Sāmoa (Moret, 2024, p. 45), son parcours jusqu'à Lausanne n'a pour l'heure pas pu être retracé. Néanmoins, son histoire muséale est mieux documentée, grâce aux archives conservées dans plusieurs institutions (Moret, 2024, p. 40-42), et il est possible de suivre son parcours à travers divers musées, résumé dans la figure 3.

³ La détermination des pigments et teintures a été réalisée par FTIR (Moret, 2020, p. 54-56).

⁴ La masse surfacique de l'objet est d'environ 130 g/m².

⁵ Voir Ferloni, Poulpiquet, 2017 ou Holdcraft (2001, p. 101-102) pour des exemples de tapa en fond de vitrine. Le MCAH conserve un tiputa (sorte de poncho) en tapa, provenant des îles de la Société, dont une partie a été découpée et transférée au Musée industriel en 1861 pour en enrichir la collection (Brizon, 2019, p. 100). La collection d'ethnographie du Musée industriel est aujourd'hui conservée au MCAH.

Avant 1910	Inconnu	
1910-1946	Musée d'art industriel	Palais de Rumine, Lausanne
1946-1952	Musée d'art industriel et décoratif	
1952-1958	Musée d'art décoratif	
1958-1966	Ecole commerciale/Ecole primaire de Floréal (greniers), Lausanne	
1966-1986	Musée des arts décoratifs	Villamont, Lausanne
1986-1987	Musée de l'Ancien-Evêché	Ancien-Evêché, Lausanne
Dès 1987	Musée cantonal d'archéologie et d'histoire	Dépôt et abri de biens culturels, Lucens

Figure 3 Parcours du tapa MI/1611 à travers différents musées et institutions. © Nicolas Moret, HE-ARC CR, MCAH.

Problématique des marques d'eau

Le tapa présentait de nombreuses altérations apparues au fil de la vie de l'objet (**fig. 4**), dont un nombre important de déchirures, dont le cumul avoisine les 16 mètres, des lacunes d'une surface totale équivalant à une feuille A3 et de nombreux plis, marques de plis et courbures sur toute la surface. Le dos de l'objet comportait 38 consolidations : 35 d'entre elles sont en papier kraft clair ou foncé et enduit de colle animale et 3 sont en tissu recouvert d'un adhésif synthétique thermocollant à base de PVC et PVA.

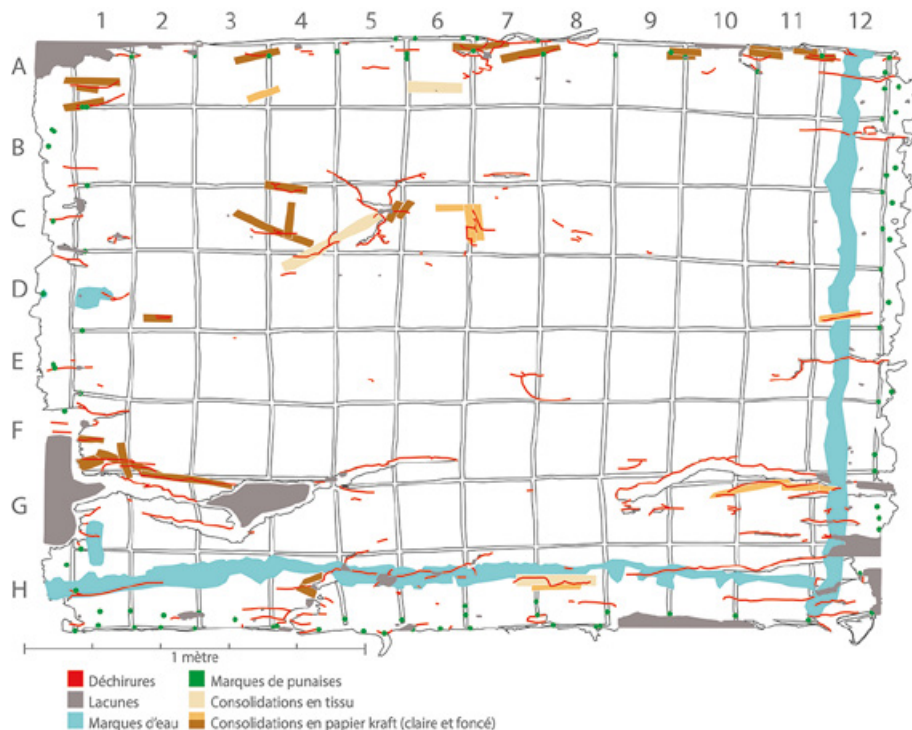


Figure 4 Représentation schématique du constat d'état MI/1611. © Nicolas Moret, HE-ARC CR, MCAH.

Les bords présentent des petits trous avec un enfoncement circulaire autour, parfois avec des traces d'oxydes ferreux, indiquant la présence ancienne de punaises. L'emplacement des marques de punaises permet de déduire qu'il était fixé sur un cadre, comme indiqué sur la

figure 5. Cela est confirmé par l'indication « monté sur cadre de bois » inscrite dans le *Catalogue des collections du musée d'Art décoratif de la Ville de Lausanne* datant des années 1950⁶.

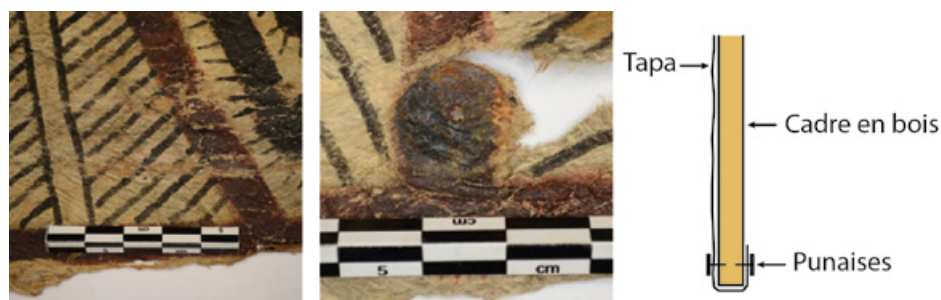


Figure 5 Marques d'usure en bas de l'objet, marques de punaises et hypothèse du montage sur cadre du tapa. ©Nicolas Moret, HE-ARC CR, MCAH.

Les marques d'eau, quant à elles, forment deux grandes lignes qui bordent l'objet sur deux côtés : une dans sa longueur en bas et l'autre dans sa hauteur à droite⁷. Au vu de leur relative linéarité, il est probable qu'elles soient apparues lorsque l'objet était fixé sur son cadre, mais non exposé, car il devait être posé au sol. Dans la vie muséale de l'objet, l'endroit le plus propice pour que ce genre d'altérations apparaisse semble être le grenier de l'École commerciale, soit un bâtiment qui a déjà plus de cinquante ans lors du dépôt de l'objet. Cette hypothèse ne peut néanmoins pas être vérifiée. Il est intéressant de remarquer que, pour que les marques apparaissent sur deux côtés adjacents, l'objet a dû être tourné d'un quart de tour après l'apparition de la première marque en bas, sans pour autant être surélevé. Ainsi, la deuxième marque est apparue et coupe la première marque (**fig. 6**).



Figure 6 Marque d'eau verticale qui coupe la marque d'eau horizontale. ©Nicolas Moret, HE-ARC CR, MCAH.

⁶ Document sans cote conservé au Musée historique de Lausanne. Il s'agit d'une photocopie; l'original, à ce jour, n'a pu être retrouvé.

⁷ Deux marques d'eau plus petites se trouvent sur le côté gauche de l'objet. Elles sont moins étendues et plus claires, ce qui les rend moins visibles et moins problématiques du point de vue de la dégradation de l'objet. C'est pourquoi il n'en est pas fait mention ici, bien qu'elles aient été traitées de la même manière lors du travail de mémoire.

La couleur de ces marques est brun foncé et se voit des deux côtés de l'objet. Leur aspect diffère en fonction de leur emplacement : la marque du bas est nette et mince tandis que la marque verticale est plus large et a des bords estompés. Cela correspond au sens des fibres du *tapa*, parallèles à la longueur de l'objet. Le *tapa* au niveau des marques d'eau est devenu plus rigide et cassant.

Des mesures de pH montrent que l'objet est de manière générale relativement acide (**fig. 7**). Au niveau des marques d'eau le pH est légèrement plus acide, tandis qu'il l'est moins dans les zones lessivées, sauf au niveau des décors rouge et noir qui sont dans les deux cas moins acides.

La conductivité au niveau des marques d'eau est environ 5 fois plus élevée que sur le reste du matelas fibreux, tandis que la conductivité des zones lessivées est diminuée d'environ 10 fois (**fig. 7**). La conductivité des zones décorées et recouvertes d'une couche de gomme végétale diminue au niveau des marques d'eau et diminue encore au niveau des zones lessivées.

		Matelas fibreux	Décor rouge	Décor noir
pH	De l'objet	4,77	4,75	4,69
	Marques d'eau	4,26	4,97	5,10
	Parties lessivées	5,38	5,65	5,62
Conductivité (mS/cm)	De l'objet	2,81	1,40	1,70
	Marques d'eau	5,25	0,92	1,20
	Parties lessivées	0,23	0,21	0,44

Figure 7 pH et conductivité des marques d'eau et des parties lessivées (valeurs moyennes).

© Nicolas Moret, HE-ARC CR, MCAH.

Tests d'atténuation

Une série de tests préalables a été nécessaire afin d'identifier le moyen le plus adapté à l'atténuation des marques d'eau en fonction des caractéristiques de l'objet et de ses sensibilités. Avant de procéder aux tests, un dépoussiérage de l'objet a été mené sur l'ensemble de ses deux faces avec un pinceau large synthétique et souple couplé avec une aspiration (Moret, 2020, p. 127).

Partant du constat que les marques brunes ont une origine aqueuse, il a été déduit qu'un traitement de même base permettrait de les traiter, ce qui a été démontré par un test de solubilité (**fig. 8**). Les buvards imprégnés d'eau de ce test présentent une saturation plus élevée pour un même temps donné que ceux posés sur le matelas fibreux teinté ou les décorations. Il a été également possible de démontrer l'inaction apparente des autres solvants communs⁸.

⁸ Les solvants utilisés ont été choisis pour leur emplacement répartis à différents endroits du triangle de solubilité ainsi que pour leur usage courant en conservation-restauration. L'eau utilisée pour ce test est déminéralisée.



Figure 8 Test de solubilité de la marque d'eau. ©Nicolas Moret, HE-ARC CR, MCAH.

Afin de mieux maîtriser l'apport d'eau et sa diffusion, l'utilisation de gels semblait adéquate. De plus, ces derniers offrent l'opportunité, par leur transparence, de pouvoir suivre l'évolution du traitement, ce qui n'est pas le cas avec l'utilisation de cataplasmes ou de buvards humides. Quatre gels ont été choisis en fonction de leur différentes spécificités et disponibilité⁹ : l'hydroxypropylcellulose (Klucel® G), la gomme xanthane (Vanzan® NF-C), la gomme gellane (Kelcogel®) et l'agar (AgarArt®).

Les éthers de cellulose, dont la Klucel® G fait partie, sont les premiers gélifiants à avoir été employés en conservation-restauration (Cremonesi, 2013, 179-180; Maheux, 2015, p. 70). Par leur consistance visqueuse, ils permettent de limiter la quantité de solvants utilisée et ralentir leur pénétration, mais nécessitent généralement un frottement à l'aide d'un pinceau ou d'un coton-tige (Iannuccelli, Sotgiu, 2010, p. 27). Cette interaction avec la surface de l'objet peut parfois conduire à des dégradations. Le retrait se fait avec un coton-tige suivi d'un rinçage impératif afin de retirer au maximum les résidus qui pourraient adhérer aux fibres et former des auréoles en fonçant la matière ainsi qu'en la rigidifiant (Iannuccelli, Sotgiu, 2010, p. 27).

La gomme xanthane (C₃₅H₄₉O₂₉), gélifiant alimentaire (E415) issu de la fermentation de molécules hydrocarbonées par la bactérie *Xanthamonas campestris*, est couramment employée pour remplacer les éthers de cellulose. Semblable à ceux-ci en apparence, elle présente l'avantage de ne pas avoir de fonction adhésive. Un rinçage est néanmoins conseillé pour éviter au maximum les résidus.

Que ce soit pour les éthers de cellulose ou la gomme xanthane, le rinçage aqueux apparaissait contreproductif vis-à-vis des efforts mis en place avec la gélification afin d'éviter l'apport d'eau (Cremonesi, 2013, p. 179-180).

Les gels rigides¹⁰, formés par de longues chaînes de polymères dispersées dans un solvant (principalement de l'eau) présentent l'avantage de ne pas nécessiter de rinçage, car ils n'ont pas de fonction adhésive et ne laissent pas de résidus (Iannuccelli, Sotgiu, 2010, p. 34; Botti *et al.*, 2011, p. 7; Cremonesi, 2013, p. 181; Cremonesi, 2016, p. 362) ou très peu (Sullivan *et al.*, 2017). Les plus utilisés en conservation-restauration sont l'agar ou sa forme purifiée, l'agarose, et la gomme gellane.

⁹ Le mémoire, dont est issu cet article, a été réalisé entre février et septembre 2020 alors que la pandémie de Covid-19 était en pleine expansion et perturbait entre autres les commandes et les livraisons de matériels (Moret, 2022). Les gels utilisés pour les tests étaient déjà présents au MCAH.

¹⁰ À l'instar de l'article de Bertasa *et al.* (2017, p. 11), les gels d'agar, mais aussi d'agarose et de gomme gellane, peuvent également être appelés « gels semi-rigides ».

L'agar ($C_{12}H_{18}O_9$), gélifiant alimentaire (E406), est un polysaccharide complexe composé d'agarose et d'agaropectine, ayant tous deux pour base le galactose (Cremonesi, 2016, p. 363). Il est issu d'algues rouges du genre *Gelidium* ou *Gracilaria* (Perego, 2005, p. 36). Seule l'agarose a des propriétés gélifiantes, mais son utilisation sous forme purifiée est rare à cause de son prix élevé¹¹.

La gomme gellane, polyoside¹² composé de D-glucose, L-rhamnose, acide D-glucuronique est un gélifiant alimentaire (E418) produit naturellement par la bactérie *Pseudomonas elodea* en milieu marin (Maheux, 2015, p. 70). Le gel formé permet d'obtenir un film homogène à haut degré viscoélastique (Botti *et al.*, 2011, p. 1).

L'agar et la gomme gellane sont des gels thermoréversibles qui sont coulés sur des surfaces planes – ou directement sur l'objet, s'il le supporte – juste avant leur gélification (Cremonesi, 2016, p. 363-364). Ils peuvent être découpés selon la forme voulue pour agir localement. La solution pénètre graduellement puis solubilise des substances qui sont ensuite en partie captées par le gel, selon le gradient de concentration, afin d'atteindre l'équilibre (Iannucelli, Sotgiu, 2010, p. 33). L'application peut être simple ou répétée (Iannucelli, Sotgiu, 2010, p. 35).

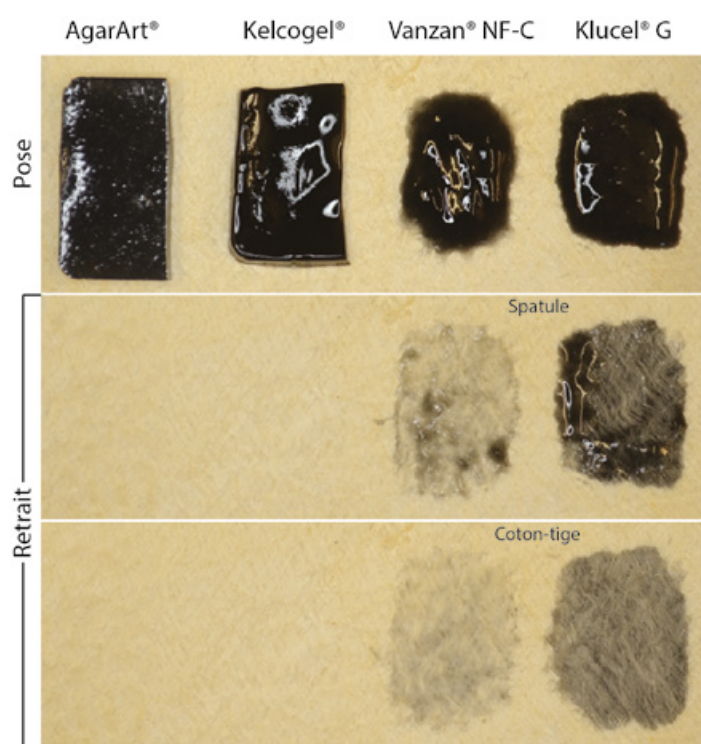


Figure 9 Résidus de gels après une application de 5 minutes. ©Nicolas Moret, HE-ARC CR, MCAH.

Un premier test avec les quatre gels a été effectué sur un morceau de tapa neuf¹³ afin de comparer l'application, le retrait et les résidus de chacun (**fig. 9**). Chaque gel, à 4 % dans l'eau déminéralisée et teinté en noir avec un colorant alimentaire¹⁴, a été appliqué pendant 15 minutes, puis retiré (**fig. 10**). Bien que la Klucel® G et la Vanzan® NF-C soient plus rapides à préparer, leur application et leur retrait à la spatule puis au coton-tige sont moins précis et laissent des résidus. La Klucel® G a même détrempe le tapa et la tache grise est visible des deux côtés. De plus, ces deux gels ont rigidifié le tapa à l'endroit de leur application. Les deux gels rigides ont permis d'agir localement facilement, tant pour l'application que pour le retrait, et n'ont pas laissé de résidus.

¹¹ Le prix au kilogramme de l'agarose (Sigma-Aldrich, A9539) se situe aux environs de 2080,00 CHF tandis que l'agar (CTS, AgarArt®) est à 71,30 CHF. En comparaison, l'HPC (CTS, Klucel® G) est à 104,80 CHF, la gomme xanthane (CTS, Vanzan® NF-C) à 57,50 CHF et la gomme gellane (CTS, Gellano Kelcogel®) à 357,60 CHF.

¹² Glucide composé de l'union de plusieurs oses.

¹³ BarkTex®_Ivory 0303 provenant de chez Bark Cloth, Gewerbestrasse 9, D-79285 Ebringen.

¹⁴ Cette coloration artificielle n'a pour but que de mettre en évidence les résidus laissés par les différents gels sur le tapa.

	Application	Retrait	Eau libérée	Résidus
AgarArt® (3 %)	Dépose facile	Retrait facile	Légère humidification	Aucun
Kelcogel® (2 %)	Gel très mou et peu pratique à manipuler	Gel très mou et peu pratique à manipuler	Légère humidification	Aucun
Vanzan® NF-C (4 %)	Étalage peu précis	Complicé (en gros à la spatule puis au coton-tige)	Humidification importante	Importants
Klucel® G (5 %)	Étalage peu précis	Complicé (en gros à la spatule puis au coton-tige)	Détrempé	Très importants

Figure 10 Comparaison de gels appliqués sur du *tapa* neuf. ©Nicolas Moret, HE-ARC CR, MCAH.

Ce test a permis d'écarter les gels visqueux à cause de la quantité de résidus laissés dans la porosité du matelas fibreux, ainsi que de la rigidification occasionnée à ce dernier. La suite des tests ne concerne que l'agar et la gomme gellane.

Afin d'identifier la concentration des gels rigides permettant une humidification du support et un bon contact avec la surface, tout en limitant la diffusion de la solution gélifiée, des gels aqueux d'agar et de gomme gellane de 2 à 5 % ont été préparés et appliqués sur un morceau de *tapa* neuf teinté avec de l'aquarelle bleue, dans le but d'améliorer le contraste pour l'observation des zones humides (**fig. 11**).

La gomme gellane à 2 % a directement été écartée, car le gel était visqueux. Après 90 minutes de pose, seul l'agar à 2 % présente une diffusion importante autour du gel. C'est à 3-4 % que l'agar est le plus adapté car, au-delà, il est trop rigide et le contact se fait de manière irrégulière. Pour la gomme gellane, c'est à 3 % que l'application est la plus adaptée.

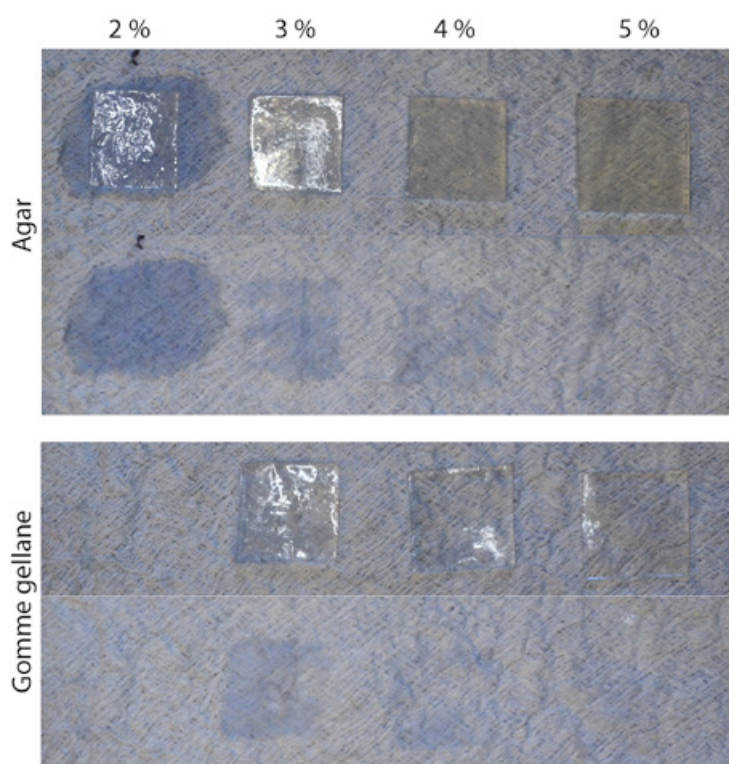


Figure 11 Test de diffusion des gels d'agar et de gomme gellane (2-5 %). ©Nicolas Moret, HE-ARC CR, MCAH.

Les gels aqueux d'agar et de gomme gellane à 3 % ont été appliqués ensuite sur une zone de la marque d'eau horizontale (**fig. 12**) pour confirmer leur action. Après un temps de pose de 25 minutes, les gels ont été retirés. Ils se sont teintés en brun au contact de la marque d'eau, mais de manière plus marquée pour l'agar, et en formant une auréole autour de la gomme gellane (encore visible après séchage). La marque d'eau s'est estompée légèrement sous les deux gels. Au terme de ce test, il a été constaté qu'à concentration égale, l'agar a une meilleure rétention que la gomme gellane et une plus forte capacité d'absorption.

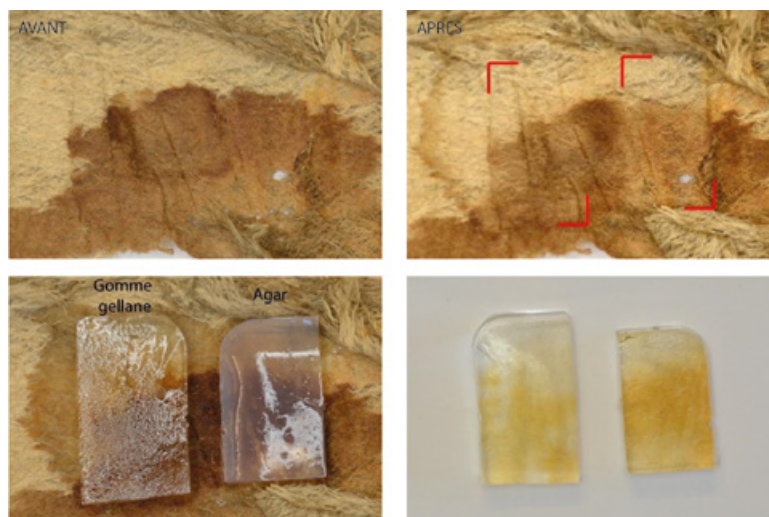


Figure 12 Comparaison des gels aqueux d'agar et de gomme gellane à 3 %. ©Nicolas Moret, HE-ARC CR, MCAH.

Un morceau de gel d'agar à 3 % dans l'eau déminéralisée a été appliqué sur l'avvers de l'objet pour vérifier l'innocuité du traitement sur les décors. Après 60 minutes d'application, le gel s'est fortement teinté en brun au contact de la marque d'eau, mais n'a montré aucune différenciation entre les surfaces qu'il recouvrait (**fig. 13**). La gomme végétale a conservé son aspect brillant et les peintures n'ont montré aucun changement d'apparence.

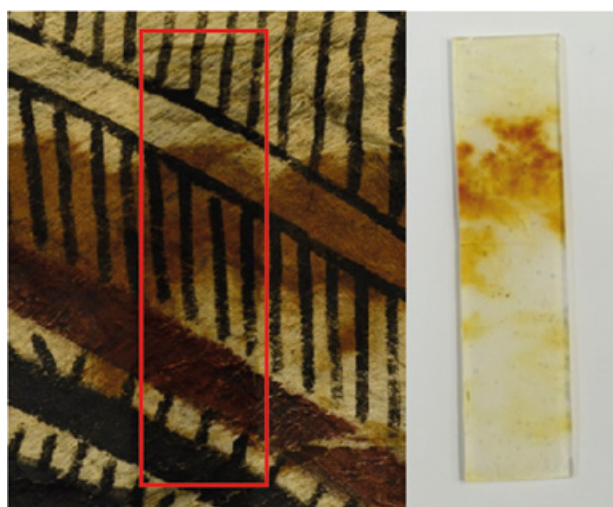


Figure 13 Application du gel d'agar (3 %) sur les décors de l'avvers. ©Nicolas Moret, HE-ARC CR, MCAH.

Les gels aqueux d'agar et de gomme gellane à 3 % ont été testés de manière successive afin de comparer leur effet sur le pH et la conductivité de la surface. Trois applications de 90 minutes ont été effectuées et permettent d'atténuer légèrement la marque d'eau (fig. 14). Quel que soit le gel, le pH de la surface augmente d'environ 0,5 point et la conductivité se rapproche de la valeur nulle après traitement (fig. 15). Les valeurs de conductivité plus élevée de la gomme gellane sont dues à la conductivité de départ plus haute, ainsi qu'à la conductivité de départ de ce gel (1,74 mS/cm) qui est supérieure à celle de l'agar (0,26 mS/cm). Dans les deux cas, les conditions hypotoniques favorisent l'extraction des ions dans les gels.

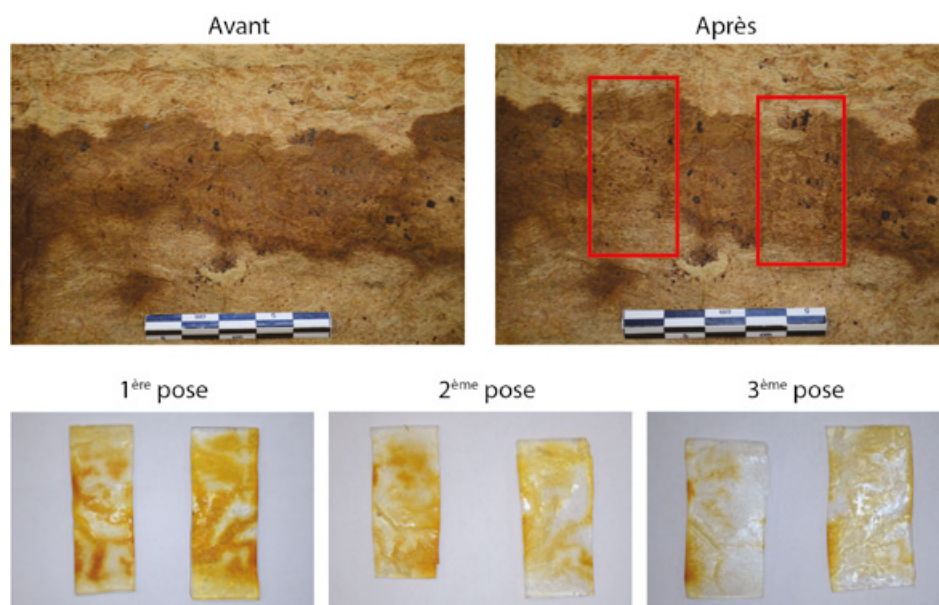


Figure 14 Trois applications de gels aqueux d'agar (gauche) et de gomme gellane (droite) à 3 %. ©Nicolas Moret, HE-ARC CR, MCAH.

	Agar		Gomme gellane	
	pH	Conductivité (mS/cm)	pH	Conductivité (mS/cm)
Surface avant traitement	4,35	7,00	4,58	8,32
1 ^{ère} pose	4,55	5,36	4,72	7,78
2 ^{ème} pose	4,39	4,72	4,91	6,19
3 ^{ème} pose	4,56	4,22	5,02	5,25
Surface après traitement	4,91	0,11	5,09	0,24

Figure 15 pH et conductivité des trois applications de gels aqueux d'agar et de gomme gellane à 3 % et effet produit. ©Nicolas Moret, HE-ARC CR, MCAH.

L'atténuation des marques d'eau faisant reculer leur perception de manière satisfaisante, sans porter atteinte aux décorations peintes ou rigidifier le matelas fibreux, tout en élevant légèrement le pH et en baissant la conductivité de la zone traitée, sont des arguments favorables à l'application successive de gels aqueux rigides pour le traitement de ces altérations. Bien que moins transparent que la gomme gellane, l'agar permet tout de même de percevoir l'évolution du traitement de manière satisfaisante. En outre, son prix est environ cinq fois

moins élevé, ce qui au vu de l'étendue et la répétition du traitement est non négligeable. Pour cela, l'agar est préféré à la gomme gellane.

Une succession de gels d'agar appliquée au revers de l'objet sur une portion de la marque d'eau a permis de déterminer qu'il fallait quatre poses successives de 90 minutes jusqu'à ce qu'il n'y ait presque plus de coloration du gel (**fig. 16**). Un buvard a été placé sous l'objet afin de retenir ce qui n'était pas absorbé par le gel et ainsi limiter la diffusion (**fig. 17**). Une plaque de verre maintient le contact du gel avec la surface de l'objet et un poids accentue légèrement le relâchement d'eau.

La marque d'eau est grandement atténuée, surtout au niveau du revers, grâce à l'action absorbante du gel d'agar et la diffusion dans le matériau des composés solubles qui descendent par gravité et sont en partie absorbés par le buvard. Les gels et les buvards sont de moins en moins colorés au fil des applications. Les gels sont un peu plus étendus à chaque fois pour éviter les effets de bord (Maheux, 2015, p. 76).

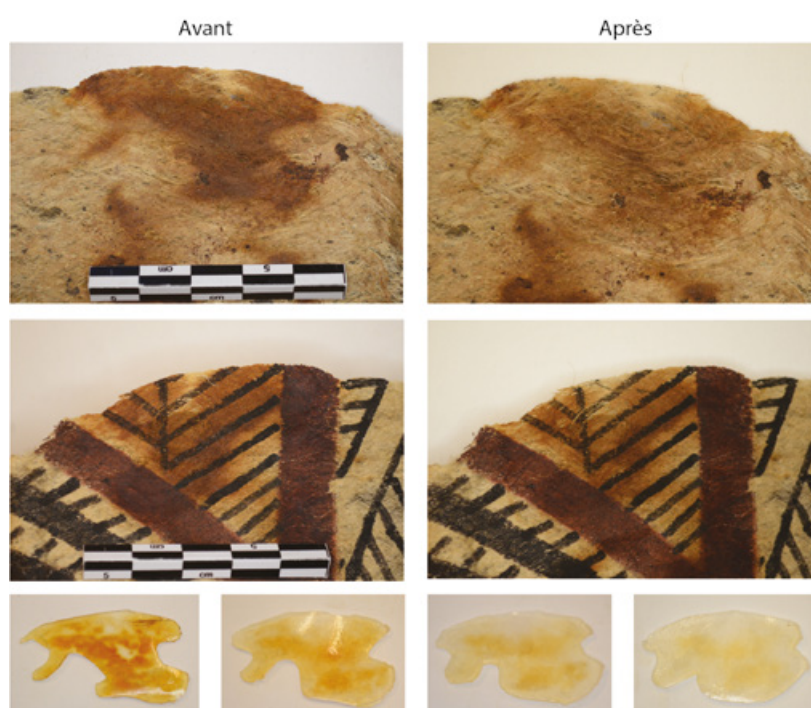


Figure 16 Quatre applications de gel d'agar sur une portion de marque d'eau. ©Nicolas Moret, HE-ARC CR, MCAH.

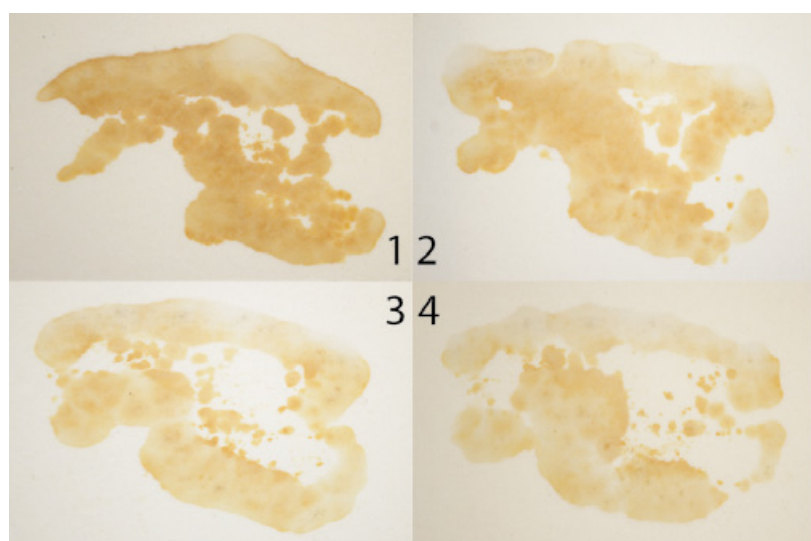


Figure 17 Buvards des quatre applications de gel. ©Nicolas Moret, HE-ARC CR, MCAH.

Puisque les buvards n'ont pas absorbé la grande majorité des composés solubles à l'avant – la couleur étant plus foncée qu'au revers – et que, de ce fait, les marques d'eau pouvaient encore être estompées, un gel aqueux d'agar à 5 % a été appliqué à trois reprises pendant 120 minutes dans ce but. La concentration du gel plus élevée a été choisie pour limiter la diffusion de l'eau dans le matelas fibreux et pour avoir une meilleure capacité d'absorption. En effet, la diffusion est inversement proportionnelle à la concentration du gel et les pores sont plus petits à haute concentration, augmentant le phénomène de capillarité (Botti *et al.*, 2011, p. 2; Hughes, Sullivan, 2016, p. 31).

Les gels atténuent progressivement la marque d'eau au fur et à mesure des applications et l'humidification est moins profonde qu'avec les gels à 3 % utilisés pour le revers. Des applications localisées supplémentaires n'ont pas montré d'absorption significative. Une fois sèche, la marque d'eau s'est éclaircie de manière satisfaisante (fig. 18).



Figure 18 Atténuation de la marque d'eau depuis l'avant avec des gels d'agar à 5 % dans l'eau déminéralisée. ©Nicolas Moret, HE-ARC CR, MCAH.

Au terme de ces tests, il a pu être démontré qu'un traitement à l'aide d'applications successives de quatre gels aqueux d'agar à 3 % pendant 90 minutes sur le revers, puis trois à 5 % pendant 120 minutes sur l'avant, permet d'atténuer de manière significative les marques d'eau.

Traitements

Les marques d'eau horizontales et verticales ont été traitées en sept fois – sans compter la partie utilisée lors de tests (fig. 19). Pour chaque zone, quatre gels aqueux d'agar à 3 % ont été découpés selon le contour des marques d'eau et appliqués successivement pendant 90 minutes en les couvrant de plaques transparentes et de poids afin d'améliorer le contact et la diffusion. Une cinquième application a été testée sur la première partie traitée sans montrer de coloration significative du gel. Un buvard placé en dessous permet d'absorber ce qui est solubilisé par l'eau en traversant la matière.

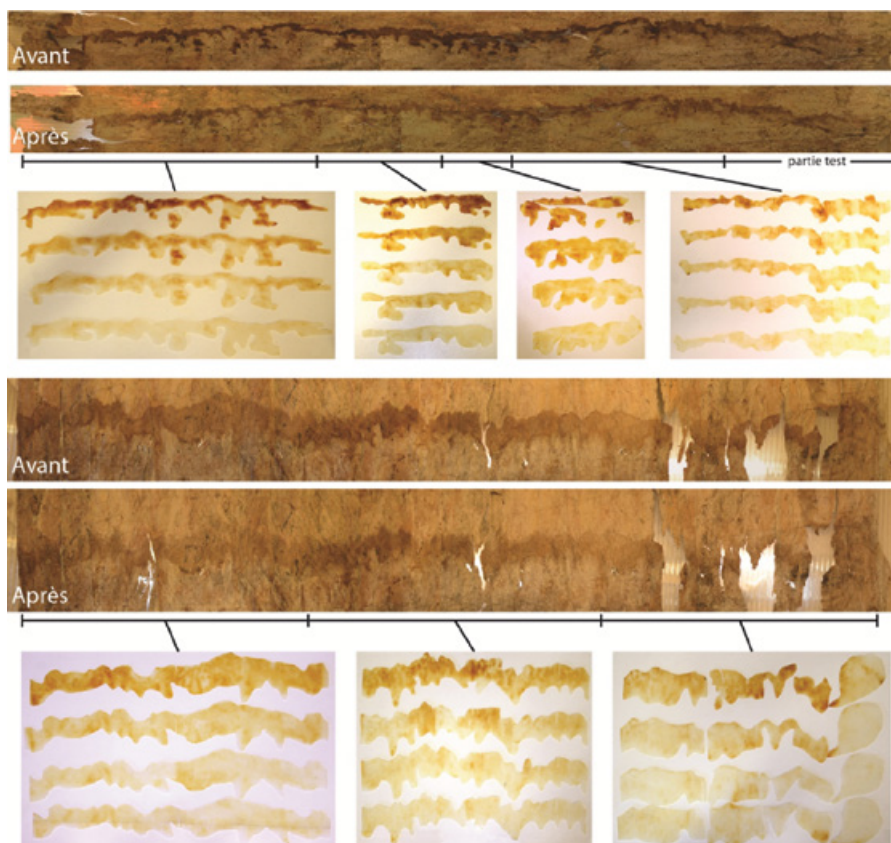


Figure 19 Atténuation des marques d'eau horizontale (haut) et verticale (bas) au revers. ©Nicolas Moret, HE-ARC CR, MCAH.

Les gels, chauffés au four à micro-ondes jusqu'à ébullition, sont coulés sur une plaque de verre avec des rebords (fig. 20). Ensuite, la plaque est posée sur la section de la marque traitée et découpée précisément à l'aide d'un scalpel.



Figure 20 Dispositif pour le découpage du gel d'agar. ©Nicolas Moret, HE-ARC CR, MCAH.

Une mesure ponctuelle de la conductivité et du pH de surface a été effectuée¹⁵ et montre une forte diminution de la conductivité (de 6,19 mS/cm à 32 µS/cm) et une augmentation notable du pH (de 4,41 à 5,24). Le gel d'agar montre également une évolution en ce sens : il s'acidifie au contact du *tapa* puis les valeurs augmentent et la conductivité augmente drastiquement lors de la première pose avant de diminuer fortement proche de zéro (fig. 21).

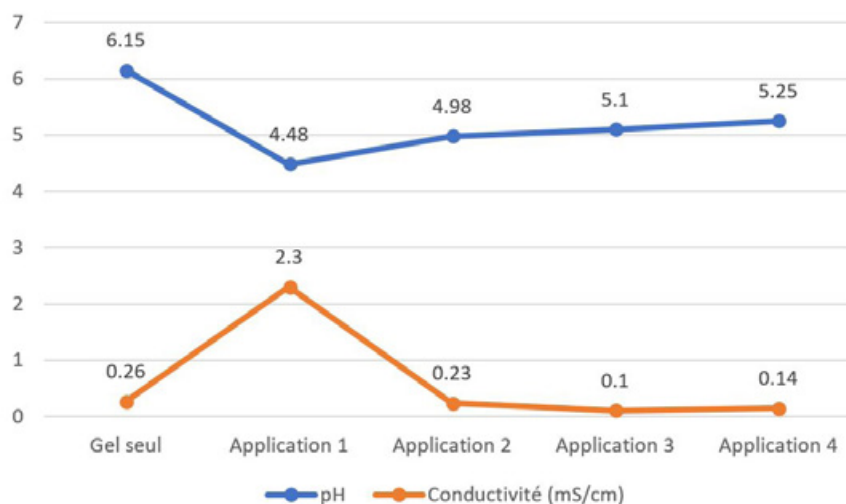


Figure 21 Évolution ponctuelle du pH et de la conductivité de la marque d'eau au revers. ©Nicolas Moret, HE-ARC CR, MCAH.

Visuellement, c'est la marque d'eau horizontale qui montre le plus grand écart entre son état initial et après traitement, probablement parce qu'elle était plus concentrée. Elle ne s'est pas complètement estompée, contrairement à la marque d'eau verticale qui, par endroits, est devenue à peine perceptible.

Sur l'avvers, les marques d'eau se sont aussi estompées, mais de manière moins marquée. C'est pourquoi un deuxième traitement depuis ce côté a été entrepris, en appliquant successivement quatre gels aqueux d'agar à 5 % pendant 120 minutes chacun (fig. 22).



Figure 22 Atténuation des marques d'eau horizontale (haut) et verticale (bas) à l'avvers. ©Nicolas Moret, HE-ARC CR, MCAH.

¹⁵ La prise de mesures est identique à celle utilisée pour caractériser le pH et la conductivité des parties de l'objet et de ses altérations.

Critiques

Le résultat final montre une atténuation significative des marques d'eau mais pas un retrait total. Le gain visuel est moins important que l'amélioration au niveau chimique (augmentation du pH et diminution de la conductivité) et physique, car la matière a recouvré une plus grande souplesse.

Le traitement des marques d'eau s'est déroulé sur presque deux semaines, soit 75 heures, dont environ 15 heures de travail effectives et, ce, sans compter les tests préalables. Il s'agit d'un temps considérable qui, en dehors d'un mémoire ou d'un travail de recherche, pourrait être difficile à justifier.

Enfin, les composés solubles, qui ont formé les marques d'eau, n'ont pas pu être identifiés précisément. Des fragments de matelas fibreux prélevés dans ces zones et des gels d'agar teints ont été analysés par FTIR et HPLC sans donner de résultats concluants (Moret, 2020, p. 66-67).

Conclusion

Au terme du traitement des marques d'eau, la perception du *tapa* dans son ensemble est améliorée par leur atténuation. Avec les autres traitements de conservation-restauration, l'objet peut à nouveau être étudié sans risquer de le dégrader (fig. 23).

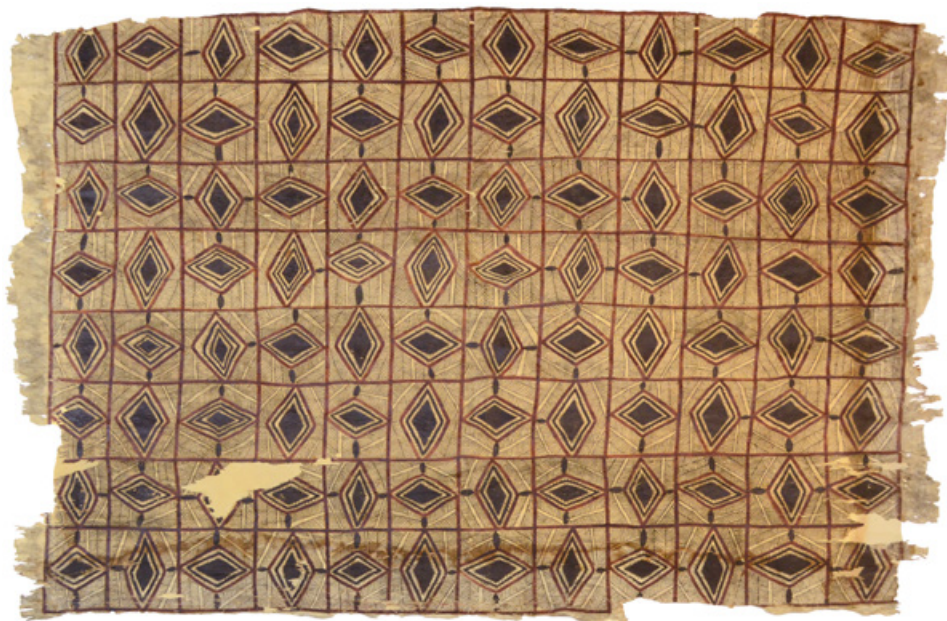


Figure 23 Tapa Ml/1611 après traitement. ©Nicolas Moret, HE-ARC CR, MCAH.

Bien que nécessitant un temps de traitement long, l'usage de gels aqueux d'agar a permis de traiter les marques d'eau de manière précise et contrôlée. De plus, ce traitement peut être considéré comme durable car il ne présente pas de risque pour la santé ou l'environnement. Ce travail a permis de confirmer l'utilisation des gels aqueux rigides pour le traitement des taches sur les *tapa*. Néanmoins, cela dépend de la nature des taches et il serait intéressant d'investiguer sur la généralisation de l'emploi de ces gels sur un plus grand échantillon d'objets. Aussi, il serait intéressant de tester d'autres gels rigides, comme les gels Nanorestore®

qui n'ont pas pu être testés à cause des problèmes de commande et de livraison liés à la pandémie de Covid-19.

Enfin, des nouvelles mesures de pH sur les zones traitées, maintenant (soit quatre ans après le traitement) ou dans quelques temps, permettraient de constater une éventuelle évolution de la valeur et ainsi de se rendre compte si l'augmentation mesurée après traitement est stable.

Références bibliographiques

Arrighi C., Quarato M. F., Rossi L. (2017), « Treating chromatic alterations on barkcloth with agar gel », dans Angelova L., Ormsby B., Townsend J. H., Wolbers R. (éd.), *Gels in the conservation of art*, Londres, Archetype Publications, p. 110-112.

Barton G., Weik S. (1994), « The conservation of tapa », *The conservator*, N° 18, p. 28-33.

Bertasa M., Chiantore O., Poli T., Riedo C., Tullio (di) V., Canevali C., Sansonetti A., Sclarone D. (2017), « A study of commercial agar gels as cleaning materials », dans Angelova L., Ormsby B., Townsend J. H., Wolbers R. (éd.), *Gels in the conservation of art*, Londres, Archetype Publications, p.11-18.

Botti L., Corazza A., Iannuccelli S., Placido M., Residori L., Ruggiero D., Sotgiu S., Tireni L., Berzioli M., Casoli A., Isca C. et Cremonesi P. (2011), « Evaluation of cleaning and chemical stabilization of paper treated with a rigid hydrogel of gellan gum by means of chemical and physical analyses », dans ICOM (éd.) *Proceedings of ICOM-CC's 16th Triennial conference, Lisbon, 2011*, Lisbonne, ICOM, P. 1-11. Disponible sur : https://www.researchgate.net/publication/285731526_Evaluation_of_cleaning_and_chemical_stabilization_of_paper_treated_with_a_rigid_hydrogel_of_gellan_gum_by_means_of_chemical_and_physical_analyses (consulté le 21 mars 2024).

Brizon C. (2019), « Voyageurs, naturalistes et militaires. Des collectes dans les îles du Pacifique et de l'océan Indien aux réserves du musée cantonal d'Archéologie et d'Histoire à Lausanne », dans *PatrimoineS; Collections cantonales vaudoises*, Lausanne, Musée cantonal d'Archéologie et d'Histoire, (Hors-série N° 1), 128 p.

Cremonesi P. (2013), « Rigid gels and enzyme cleaning », dans UPV-MCI (éd.), *New insights into the cleaning of paintings, Proceedings from the cleaning 2010 international conference, Universidad politecnica de Valencia and Museum conservation institute*, Valence, Smithsonian institution, p. 179-183.

Cremonesi P. (2016), « Surface cleaning? Yes, freshly grated agar gel please », *Studies in conservation*, Vol. 60, N° 6, p. 362-367.

Ferloni J., Poulpique (de) A.-C. (2017), « Les vicissitudes de la collection de tapa du Muséum d'histoire naturelle de Rouen. De la collecte à la restauration », dans ARSET (éd.), *Les collections ethnographiques, traitement et exposition d'objets composites, 2017*, Tours, Association des restaurateurs de sculpture de l'école de Tours, p. 41-69.

Firnhaber N. (1979), « The conservation of bark cloth », *Newsletter (Museum ethnographers group)*, N° 8, p. 19-21.

Garnier N. (2011), *Motifs d'Océanie*, Paris, Editions Hazan, 492 p.

Gorel F. (2010), « Assessment of agar gel loaded with micro-emulsion for the cleaning of porous surfaces », [en ligne], CeROArt, N° EGG 1. Disponible sur : <https://doi.org/10.4000/ceroart.1827> (consulté le 21 mars 2024).

Guillemard D., Michelet A. (1987), « Conservation et restauration des écorces battues de Polynésie », dans ARAAFU (éd.), *Recherches et techniques actuelles, 1er colloque de l'ARAAFU, Paris, 15-16 octobre 1987*, Paris, ARAAFU, p. 126-131.

Holdcraft T. R. (2001), « Research, exhibition and preservation of the barkcloth collections from the Pacific in the Harvard Peabody museum », dans Wright M. (éd.), *Barkcloth; aspects of preparation, use, deterioration, conservation and display*, Londres, Archetype Publications, (coll. Conservators of ethnographic artefacts, 2), p. 96-111.

Hughes A., Sullivan M. (2016), « Targeted cleaning of works on paper : rigid polysaccharide gels and conductivity in aqueous solutions », *The book and paper group annual*, N° 35, p. 30-41.

Iannuccelli S., Sotgiu S. (2010), « Wet treatments of works of art on paper with rigid gellan gels », *The book and paper group annual*, N° 29, p. 25-39.

Kim S. (2011), « Damage to and conservation treatment of textile cultural properties », dans Yu J., Lee J., Park H., *Conservation of papers and textiles*, Daejeon, National research institute of cultural heritage, p. 114-131.

Kooijman S. (1988), *Polynesian barkcloth*. Princes Risborough, Shire Publications Ltd, (coll. Shire Ethnography, 7), 64 p.

Lavondes A. (1985), « Le tapa à Tahiti et dans les archipels voisins » dans Krottoff (éd.), *Approche du tapa océanien*, Aix-en-Provence, Musée des tapisseries, p. 27-30.

Maheux A. F. (2015), « Cross-disciplinary uses for gelatin gum in conservation », *The book and paper group annual*, N° 34, p. 69-79.

Moret N. (2020), *Les tapa du musée cantonal d'Archéologie et d'Histoire de Lausanne : Conservation-restauration du spécimen MI/1611 et projet de conservation-restauration pour la collection*, mémoire de master en Conservation-restauration, Haute-École ARC Conservation-restauration de Neuchâtel, 238 p.

Moret N. (2022), « Barkcloth conservation at the musée cantonal d'Archéologie et d'Histoire in Lausanne (CH); Managing a master's thesis with the Covid-19 pandemic », *ICOM-CC objects from indigenous and world cultures, Conservation newsletter*, N° 6, p. 8-16. Disponible sur : https://www.icom-cc.org/en/newsletters/objects-from-indigenous-and-world-cultures-newsletter-6_june-2022 (consulté le 21 mars 2024).

Moret N. (2024), « A barkcloth's study from the musée cantonal d'Archéologie et d'Histoire (Switzerland) », *Pacific arts, The journal of the pacific arts association*, N° 23 (2), p. 38-54. Disponible sur : https://escholarship.org/content/qt3ob918j9/qt3ob918j9_noSplash_aod9f836614f9f95f97b3cfd4b6404c2.pdf?t=s7ln4l (consulté le 21 mars 2024).

Norton R. E. (1990), « Conservation of artifacts made from plant materials », dans Florian M.-L. E., Kronkright D. P., Norton R. E., *The Conservation of artifacts made from plants materials*, Los Angeles, The J. Paul Getty Trust, p. 195-286.

Perego F. (2005), *Dictionnaire des matériaux du peintre*, Paris, Éditions Belin, 896 p.

Sullivan M. R., Duncan T. T., Berrie B. H. et Weiss R. G. (2017), « Rigid polysaccharide gels for paper conservation : a residue study », dans Angelova L., Ormsby B., Townsend J. H., Wolbers R. (éd.), *Gels in the conservation of art*, Londres, Archetype Publications, p. 42-50.

L'auteur

Nicolas Moret est conservateur-restaurateur au musée cantonal d'Archéologie et d'Histoire de Lausanne de 2020 à 2024. Il a terminé un *bachelor* en Conservation en 2017 et un master en Conservation-restauration en 2020, avec une spécialisation pour les objets archéologiques et d'ethnographie, avec des mémoires portant respectivement sur le conditionnement de hamacs sud-américains et la conservation-restauration du *tapa* dont il est question dans l'article. En 2024, il suit le diplôme universitaire « Recherche de provenances des œuvres : circulations, spoliations, trafics illicites et restitutions » de l'université Paris-Nanterre.
Nicolas MORET, rue Saint-Théodule 6, 1950 Sion (Suisse), nmoret@hotmail.com, +41 79 798 02 44

MÉTHODES MODERNES DE DOCUMENTATION POUR LA RESTAURATION ET LA CONSERVATION DU PATRIMOINE

Gunnar Siedler, Sebastian Vetter, Nicolas Martin-Beaumont

Résumé

L'expérience des auteurs dans les domaines de la documentation de la conservation du patrimoine et du développement de logiciels les a conduits à acquérir les connaissances de base nécessaires pour développer des méthodes de traitement d'images et de cartographie numérique. L'entreprise Fokus GmbH Leipzig a été impliquée dans plusieurs projets de documentation et d'étude des peintures murales médiévales, en particulier en Allemagne, en Suède et en Suisse.

La lasergrammétrie ou la photogrammétrie numérique (*structure from motion* - SfM) sont utilisées pour enregistrer les formes (voûtes, absides), les surfaces structurées et les déformations (murs, plafonds, sols). Le modèle photogrammétrique de surface (SfM) qui en résulte est automatiquement texturé avec les images utilisées. La documentation photographique est réalisée simultanément à l'aide d'un appareil photo numérique de moyen format, afin de garantir une résolution d'image suffisante. Souvent, des images de fluorescence UV sont également prises. À l'aide d'un modèle de surface et des images orientées, les textures et les projections orthographiques des voûtes et des murs peuvent être calculées. Les fichiers tif 2D multicouches peuvent ensuite être fusionnés en une seule image. Des images historiques supplémentaires ou des images de fluorescence UV peuvent être traitées de la même manière (en utilisant le même système de coordonnées), afin de produire des plans d'images juxtaposés. En fonction de la taille de l'image et de la résolution requise, des fichiers d'images 2D de plusieurs centaines de Mo sont créés. À l'heure actuelle, ces fichiers ne peuvent être évalués efficacement qu'en 2D. Le projet de recherche PRO-QUATO (2016-2018) a été lancé par l'Institut de photogrammétrie et de télédétection de l'université technique de Dresde et Scan 3D GmbH de Berlin, afin de remédier aux problèmes actuels liés au traitement de la documentation 3D. L'objectif principal du projet était l'affichage de différents contenus d'images sur un modèle de surface multi-texturé et le développement d'outils pour une cartographie 3D efficace en étroite collaboration avec les restaurateurs.

Abstract The authors' experience in the fields of heritage conservation documentation and software development has enabled them to acquire the foundational knowledge necessary to develop methods for image processing and digital mapping. The company Fokus GmbH Leipzig has been involved in several projects documenting and studying medieval wall paintings, particularly in Germany, Sweden, and Switzerland. Laser scanning or digital photogrammetry (Structure from Motion – SfM) are employed to record forms (vaults, apses), structured surfaces, and deformations (walls, ceilings, floors). The resulting photogrammetric surface model (SfM) is automatically textured using the captured images. Photographic documentation is simultaneously performed with a medium-format digital camera to ensure sufficient image resolution. Often, ultraviolet fluorescence images are also acquired. Using a surface model and oriented images, the textures and orthographic

projections of vaults and walls can be computed. The multi-layered 2D Tif files can then be merged into a single image. Additional historical images or ultraviolet fluorescence images can be processed in the same way (using the same coordinate system) to produce juxtaposed image plans. Depending on the image size and the required resolution, 2D image files of several hundred megabytes are generated. Currently, these files can only be effectively evaluated in 2D. The PROQUATO research project (2016–2018) was initiated by the Institute of Photogrammetry and Remote Sensing at the Dresden University of Technology in collaboration with Scan 3D GmbH of Berlin to address current issues related to the processing of 3D documentation. The main objective of the project was the display of various image contents on a multi-textured surface model and the development of tools for efficient 3D mapping in close collaboration with conservators.

Resumen La experiencia de los autores en los campos de la conservación del patrimonio y la documentación del desarrollo de software los ha llevado a adquirir el conocimiento básico necesario para desarrollar el procesamiento de imágenes y los métodos de mapeo digital. La compañía Fokus GmbH Leipzig estuvo involucrada en varios proyectos para documentar murales medievales, en particular en Alemania, Suecia y Suiza. Lasergrametría o fotogrametría digital se utilizan para grabar formas (bóvedas, ABSE), superficies estructuradas y deformaciones (paredes, techos, pisos). El modelo fotogramétrico resultante (SFM) se texturiza automáticamente con las imágenes utilizadas. La documentación fotográfica se lleva a cabo simultáneamente utilizando una cámara de formato medio digital, para garantizar una resolución de imagen suficiente. A menudo, también se toman imágenes de fluorescencia UV. Se puede calcular un modelo de superficie e imágenes orientadas, texturas y proyecciones de ortografía de las bóvedas y paredes. Los archivos 2D 2D multicapa se pueden fusionar en una sola imagen. Se pueden tratar imágenes históricas adicionales o imágenes de fluorescencia UV de la misma manera (usando el mismo sistema de coordenadas), para producir imágenes yuxtapuestas. Dependiendo del tamaño de la imagen y la resolución requerida, se crean archivos de imágenes 2D de varios cientos de MB. Actualmente, estos archivos solo se pueden evaluar de manera efectiva en 2D. El proyecto de investigación Proquato (2016-2018) fue lanzado por el Instituto de fotogrametría y de teledetección de la Universidad técnica de Dresde y GMBH 3D en Berlín, para remediar los problemas actuales vinculados al procesamiento de la documentación 3D. El objetivo principal del proyecto era la visualización de diferentes imágenes en un modelo de superficie de textura múltiple y el desarrollo de herramientas para un mapeo 3D efectivo en estrecha colaboración con los restauradores.

Mots-clés numérisation d'objets en 3D, relevé 2D/3D, projections orthographiques, cartographie 3D

Définition des paramètres de qualité

Échelle de l'image / résolution de l'image

La résolution détaillée requise (taille des pixels sur l'objet), qui dépend de l'échelle et de la résolution de l'image, ainsi que la précision métrique doivent être spécifiées en fonction de la tâche à accomplir sur l'objet. Ainsi, l'utilisateur ultérieur (architecte, planificateur, conservateur, société d'exécution...) peut procéder à sa propre évaluation graphique / métrique et à l'interprétation du contenu dans un logiciel de CAO ou de cartographie.



Figure 1 Résolution des détails en fonction de l'échelle de l'image 1:20, 1:50, 1:100 pour une résolution d'image de 400 dpi. © fokus GmbH Leipzig.

La résolution de détail requise est traditionnellement définie par l'échelle et la résolution de l'image (Siedler, Vetter, 2018). Pour une résolution d'image de 400 dpi (400 points par pouce = 25,4 mm), la taille du point est de 0,0635 mm. En multipliant la taille du point par l'échelle de l'image, on obtient la taille métrique du pixel de l'objet, soit, en arrondissant, 0,06 mm pour une échelle de 1:1, 1,3 mm pour une échelle de 1:20 et 3,2 mm pour une échelle de 1:50 (**fig. 1**).

Le tableau suivant (**fig. 2**) présente les échelles d'évaluation, deux niveaux de qualité (200 et 400 dpi) et les exigences en matière de précision d'évaluation résultant de l'échelle de l'image pour différents exemples d'application. En général, les peintures murales sont traitées à l'échelle 1:10 et à 400 dpi (taille de point de 0,6 mm). Pour les objets plus détaillés, on utilise une échelle de 1:5 et 400 dpi (taille de point de 0,3 mm).

Sector Pixel size 400dpi Pixel size 200dpi Accuracy	1:1 0.06mm 0.13mm 0.5mm	1:2 0.13mm 0.25mm 1.0mm	1:5 0.32mm 0.64mm 2.5mm	1:10 0.64mm 1.3mm 5.0mm	1:20 1.3mm 2.6mm 1.0cm	1:50 3.2mm 6.4mm 2.5cm	1:100 6.4mm 12.7mm 5.0cm
architects/ consultant				x	x	x	x
building archaeology			detail	stone by stone detail	stone by stone	general overviews	
field archaeology			graves, other details	sections, elevations graves	plans		
Conservation	1:1	1:2	1:5	1:10	1:20	1:50	1:100
stone				x	x	x	
wall painting / stucco			x	x	x		
wood / objects archaeology		x	x	x			
wall painting / textile / paper	x	x	x	x			

Figure 2 Vue d'ensemble de la résolution de détail requise en fonction des exemples d'application; résolution de détail (taille des pixels au niveau de l'objet) pour 400 dpi et 200 dpi; précision de l'évaluation en fonction de l'échelle de l'image (0,5 mm x échelle de l'image); peinture murale mise en évidence dans les cases rouges.

Capteur de l'appareil photo

Un appareil photo reflex avec un capteur plein cadre (24 × 36 mm) est un minimum requis. L'utilisation de capteurs à haute résolution ne permet d'obtenir les résultats souhaités que si l'on utilise de nouveaux objectifs calculés avec une capacité de résolution optique appropriée. En outre, l'éclairage de l'objet est nécessaire pour permettre l'enregistrement d'images avec une faible sensibilité ISO.

Pour la documentation d'objets de haute qualité dans le domaine des intérieurs historiques/ peintures murales, l'utilisation d'un appareil photo avec un capteur de taille moyenne est plus utile. Actuellement, nous utilisons pour nos projets des appareils photo moyen format PhaseOne 645D-P65 de 65 mégapixels et PhaseOneXF IQ4 de 150 mégapixels.

Ces systèmes de caméras sont avantageux pour les conditions intérieures en raison de la plage dynamique élevée du capteur moyen et du faible bruit numérique. Une image prise par un appareil photo moyen format de 150 mégapixels remplace quatre à six images prises par un appareil photo reflex. Le nombre réduit d'images qui en résulte diminue la quantité de travail et le risque d'erreurs lors de l'adaptation des couleurs des images.

Méthodes d'évaluation

Toutes les méthodes d'évaluation ne conviennent pas à tous les projets. En fonction de la surface de l'objet (murs plats, voûtes, ornements en stuc), la méthode appropriée doit être choisie (Luhmann, 1978; Pietschner *et al.*, 2003).

La rectification d'images 2D permet la transformation mathématique d'un plan 2D à l'intérieur du faisceau de rayons d'une caméra (projection centrale). Le résultat est un plan d'image à l'échelle réelle qui permet de prendre des mesures de l'objet.

La projection orthogonale 3D suppose toujours l'enregistrement 3D de la surface de l'objet. Les données 3D (nuage de points, modèle de surface texturé) sont projetées orthogonalement sur une géométrie de référence : plan, cylindre, cône (Vetter, Siedler, 2011). La création de données 3D peut être réalisée par photogrammétrie numérique (SfM) ou par lasergrammétrie (TLS). Le résultat est un plan-image à l'échelle réelle (orthophoto), qui permet de prendre des mesures sur tous les plans qui sont parallèles par rapport à la géométrie de référence (Brumana *et al.*, 1992, p. 786-793; Stephani, 1992, p. 821-824).

La documentation 3D des objets est basée sur l'enregistrement 3D de la surface de l'objet par nuage de points à l'aide de TLS ou de SfM. Dans une deuxième étape, les points sont reliés par triangulation pour créer un modèle numérique de surface (MNS). Si nécessaire, le MNS est texturé à l'aide d'images orientées. Le résultat est un MNS texturé à l'échelle réelle, qui permet des mesures tridimensionnelles, la création d'analyses de sections et de déformations ainsi que la création de projections orthogonales sur plusieurs géométries.

Toutes ces méthodes sont applicables mais, sans de bonnes images photographiques, il n'est pas possible d'obtenir un bon résultat. Selon la société de services, la rectification en 2D est la méthode la moins chère, mais elle offre également la meilleure qualité d'image. La projection orthogonale en 3D est la méthode la plus coûteuse en temps, car les images doivent être orientées par photogrammétrie et une numérisation 3D opérée par lasergrammétrie ou photogrammétrie.

Documentation d'un objet en 3D sous la forme d'un modèle de surface texturé

Un avantage du SfM est la création d'un modèle de surface texturé en plus du nuage de points. Ce processus est automatisé, bien que l'utilisateur puisse contrôler la résolution de la texture, la sélection de l'image et les régions d'une image à texturer. Cependant, l'adaptation de la couleur des images et l'attribution de la texture aux régions sélectionnées du modèle de surface sont des processus automatisés (fig. 3).

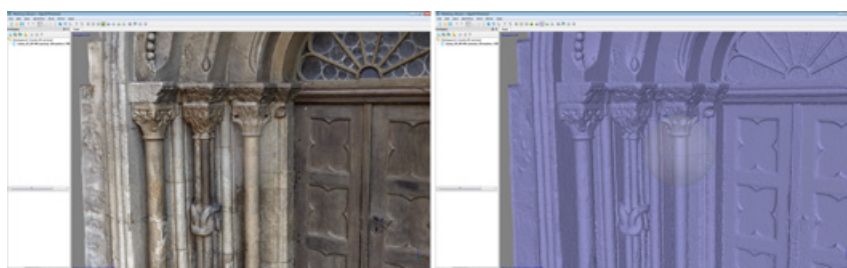


Figure 3 Le modèle de surface texturé (SfM) - distance entre les points de 2 à 3 mm, résolution de la texture à l'échelle 1:20, à gauche; le modèle de surface sans texture d'image (SfM), à droite.

Projection ortho 3D d'images orientées supplémentaires

Dans cette méthode, les images orientées par photogrammétrie avec une résolution de 0,3 à 0,6 mm sont projetées orthogonalement sur un plan d'objet ou un cylindre en tant que plan d'image 2D à l'aide d'un MNS (distance entre les points de 2 à 3 mm). Cette procédure est généralement utilisée pour l'enregistrement des peintures murales. Actuellement, la quantité de données d'image ne peut pas être affichée correctement sur un modèle de surface en raison de la résolution de détail requise de 1:5 / 1:10.

En outre, les images uniques professionnelles avec un éclairage approprié ne peuvent pas être remplacées par un grand nombre de petites images prises pour calculer les nuages de points par SfM. L'adaptation automatique des couleurs et la texturation par SfM sont imprécises, de sorte que l'adaptation des couleurs et le montage des images dans Adobe Photoshop sont difficilement remplaçables.

Exemple de projet de documentation à haute résolution et à l'échelle

Église Saint Christophe à Haufeld

Dans l'église Saint-Christophe à Haufeld (Thuringe), la documentation photogrammétrique de la peinture murale (XIV^e siècle) a été traitée en 2014 par déroulement avec projection orthogonale à l'échelle 1:5 pour une résolution de 300 dpi.

Sur place, près de 200 coordonnées de référence ont été mesurées à l'aide d'un tachéomètre et 39 images de l'état actuel ont été prises avec un PhaseOne 645D-P65.

En outre, la pièce a été numérisée par un scanner laser sous la forme d'un nuage de points dans le même système de coordonnées. Ce nuage de points a servi de base à la création d'un modèle numérique de surface (fig. 4, à gauche).

À l'aide des coordonnées de référence, les images ont été orientées par photogrammétrie et projetées orthogonalement sur un cylindre (géométrie de déroulement) à l'aide du modèle de surface.

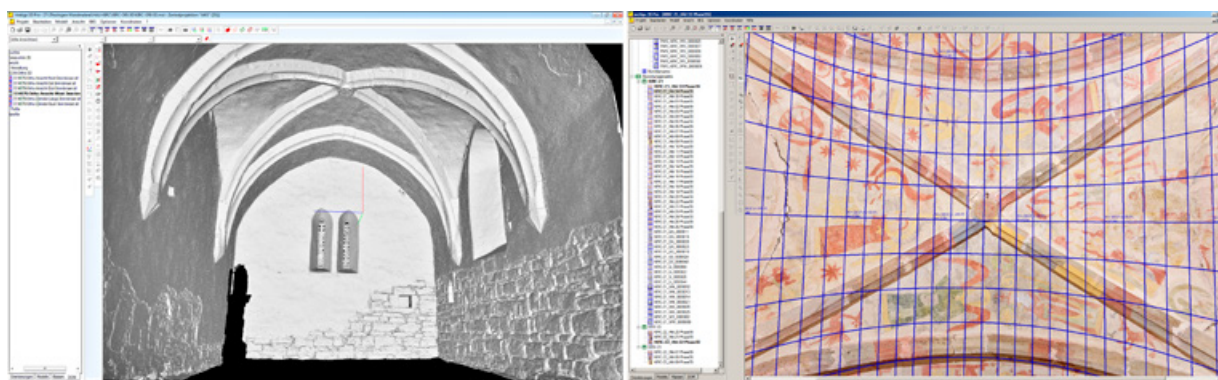


Figure 4 Modèle de surface (TLS), à gauche; projection de la géométrie de déroulement dans l'image orientée, à droite.

Vingt-quatre diapositives historiques en couleur datant de 1944 et conservées au Zentralinstitut für Kunstgeschichte (ZIKG) de Munich ont été scannées à 4000 dpi (5500 × 3700) et

avec une profondeur de couleur de 16 bits (Siedler, Sacher, 2006, p. 189-198). Ces images ont été orientées photogrammétriquement et projetées orthogonalement en utilisant la même géométrie de déroulement. Cela a permis d'obtenir des plans d'images juxtaposés des deux états (1944 et 2014) de la voûte (**fig. 5**).

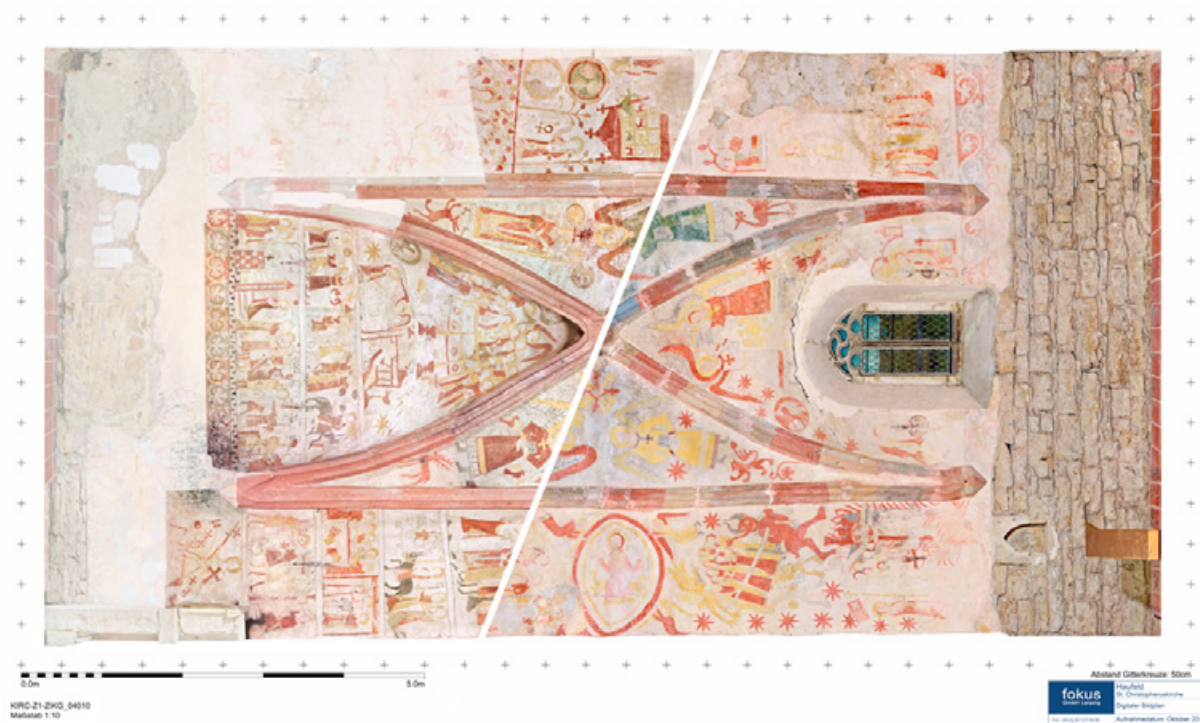


Figure 5 Haufeld, église St-Christophe : déroulement numérique avec projection orthographique à l'échelle 1:10 : diapositive couleur historique du ZIKG, à gauche; documentation (2014), à droite.

Chapelle Saint-Joseph d'Isny

La *Gottesackerkapelle St-Josef* est une rotonde du XVIII^e siècle, qui contient une voûte avec une peinture illusionniste sur une surface d'environ 13 × 18m et a nécessité une évaluation à l'échelle 1:5 pour 300 dpi.

L'enregistrement automatisé de la géométrie par SfM et la texturation automatisée simultanée de haute qualité ont été entrepris. 150 images ont été prises par un appareil photo numérique moyen format (PhaseOne 645D-P65) avec un chevauchement de 60 à 80 %, suffisant pour l'enregistrement de la géométrie. Soixante images supplémentaires ont été prises avec le même appareil à une échelle d'image plus élevée à l'aide d'un système de flash comprenant 4 réflecteurs de 600 watts pour l'enregistrement de la texture (**fig. 6**).

En raison de l'effort plus important requis pour l'éclairage et le placement de l'appareil photo, ces images supplémentaires n'ont été prises qu'avec un chevauchement de 20 %. Toutes les images ont été développées et adaptées en couleur avec Capture One (de la société Phase One).



Figure 6 Image de PhaseOne 645D-P65 pour la création d'un modèle de surface par SfM, à gauche; texturation (résolution plus élevée), à droite.

30 points de contrôle ont été mesurés à l'aide d'un tachéomètre afin de servir de référence pour l'orientation de l'image photogrammétrique. Les deux groupes d'images ont été traités dans Agisoft Photoscan pour le calcul simultané de l'orientation de l'image et la création d'un nuage de points dense (**fig. 7**).

Le modèle de surface (triangulation) a été calculé avec 5,2 millions de points (distance entre les points d'environ 4-5 mm). Pour l'exportation du modèle de surface texturé, la texture a été créée à l'échelle 1:5 et à 300 dpi.

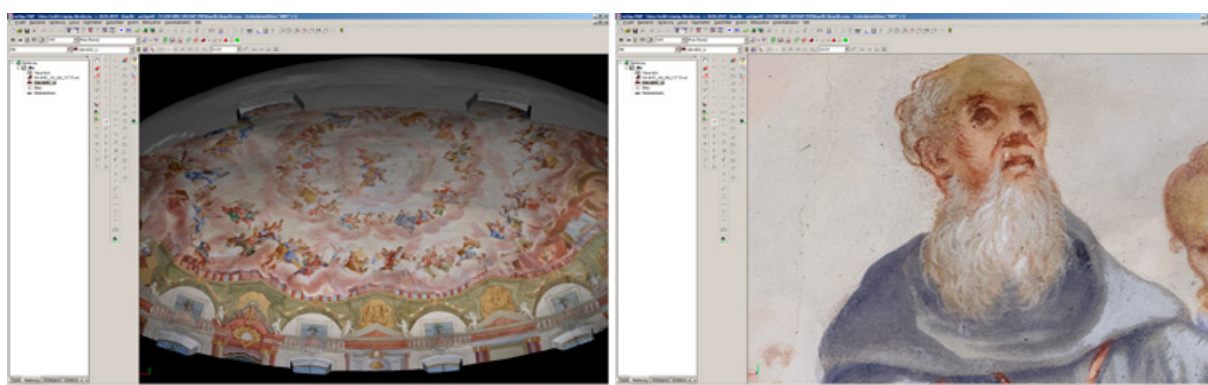


Figure 7 Affichage du modèle de surface texturé dans metigo® 3D : vue d'ensemble, à gauche; détail montrant la qualité de la texture, à droite.

L'exportation de la projection orthographique verticale à l'échelle réelle (**fig. 8**, TIFF) et le déroulement avec projection orthogonale pour huit sections de la voûte sont calculés pour permettre le travail de documentation par les restaurateurs (cartographie de l'état, planification et documentation du travail de conservation).



Figure 8 Plans de l'image fidèle à l'échelle originale traitée à l'échelle 1:5 pour 300dpi : projection orthogonale du plafond, à gauche; déroulement combiné à la projection orthogonale, à droite.

Résultats actuels du projet de recherche et développement PROQUATO

Le logiciel de cartographie Metigo® MAP a été développé depuis l'an 2000 pour créer des cartographies numériques vectorielles, y compris le calcul des masses. Le logiciel est utilisé dans divers domaines de la conservation. Les petits projets peuvent être traités comme un seul projet de cartographie, tandis que les projets complexes, comme une cathédrale, peuvent être organisés comme un projet hiérarchisé, avec plusieurs projets de cartographie pour chaque mur.

Dans le cadre du projet de recherche et développement PROQUATO (optimisation des processus, élargissement de la qualité et outils d'évaluation pour les modèles de surface multi texturés, 2016-2018), les exigences en matière de cartographie 3D ont été analysées et développées en étroite collaboration avec les clients.

Importation de données

Metigo® MAP permet l'importation de modèles de surface texturés au format VRML et OBJ ou sans texture (STL). Pour la cartographie, un maillage composé de triangles est toujours nécessaire.

La fenêtre d'importation (**fig. 9, à gauche**) permet d'insérer un facteur d'échelle pour importer les modèles de surface à l'échelle réelle. La mise à l'échelle à l'intérieur du projet de cartographie n'est pas possible ultérieurement.

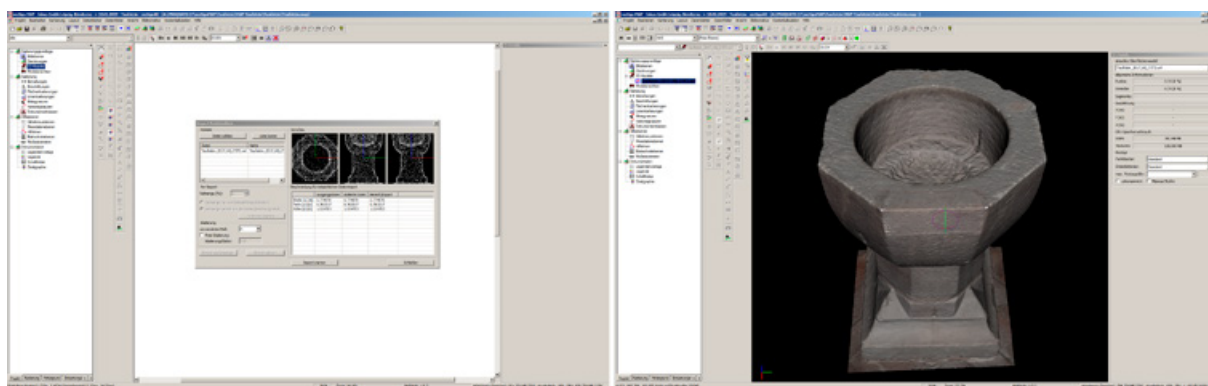


Figure 9 Fenêtre d'importation d'un modèle de surface dans les fichiers STL, VRML et OBJ avec insertion d'un facteur d'échelle et d'une unité, à gauche; affichage 3D d'un modèle de surface texturé, à droite.

Il est possible de naviguer librement dans l'affichage 3D. Dans l'affichage 2D des vues du modèle (projections orthogonales), les données d'image sont réduites à l'échelle et à la résolution du projet.

Si le modèle de surface texturé a été créé dans un système de coordonnées défini, il est possible de combiner la projection orthogonale avec les plans CAO existants (**fig. 10**).

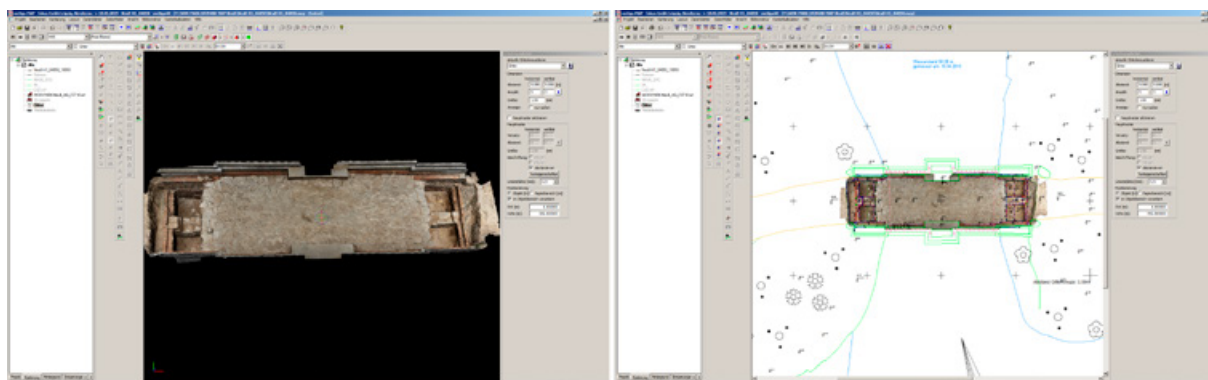


Figure 10 Affichage en 3D du modèle de surface texturé d'une construction de pont exposée, à gauche; combinaison du dessin CAO avec la projection orthogonale, à droite.

Évaluation de modèles de surface complexes par segmentation du modèle

En général, les données 3D sont affichées par OpenGL via la carte graphique. Cela signifie que les performances de l'affichage 3D dépendent principalement des caractéristiques de la carte graphique.

Si le modèle de surface est trop grand pour le matériel utilisé, il est possible d'effectuer l'évaluation uniquement sur des parties du modèle de surface complet. La segmentation permet de charger partiellement le modèle de surface (**fig. 11 et 12**). Au début, l'utilisateur peut charger le modèle de surface à résolution réduite comme un nuage de points complet pour définir des segments, par exemple des parties individuelles d'une façade. Par la suite, seuls les segments souhaités doivent être chargés pour la cartographie.

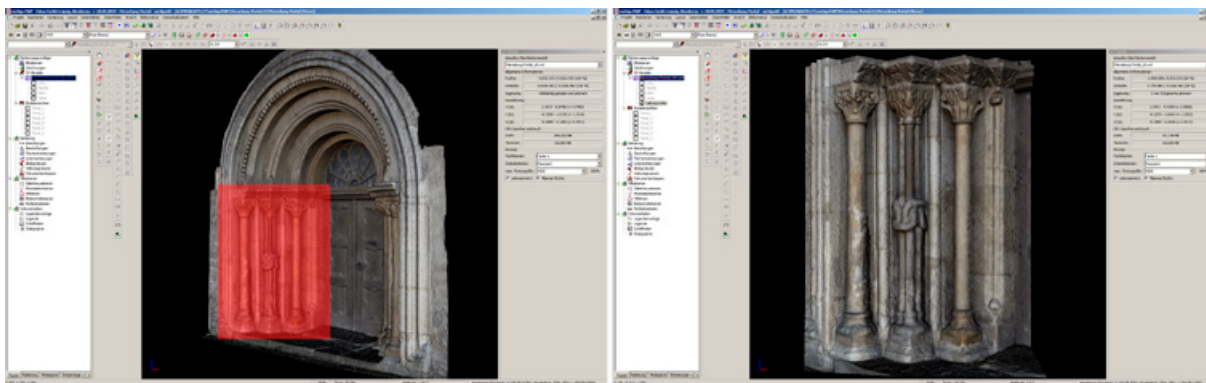


Figure 11 Affichage 3D avec sélection d'un nouveau segment, à gauche; affichage 3D du nouveau segment, à droite.

Pour les objets complexes tels que les figures humaines, il est utile de créer des segments individuels, par exemple pour les bras, les jambes et les mains, car cela facilite la navigation et l'évaluation des endroits cachés (par exemple, à l'intérieur d'un bras).

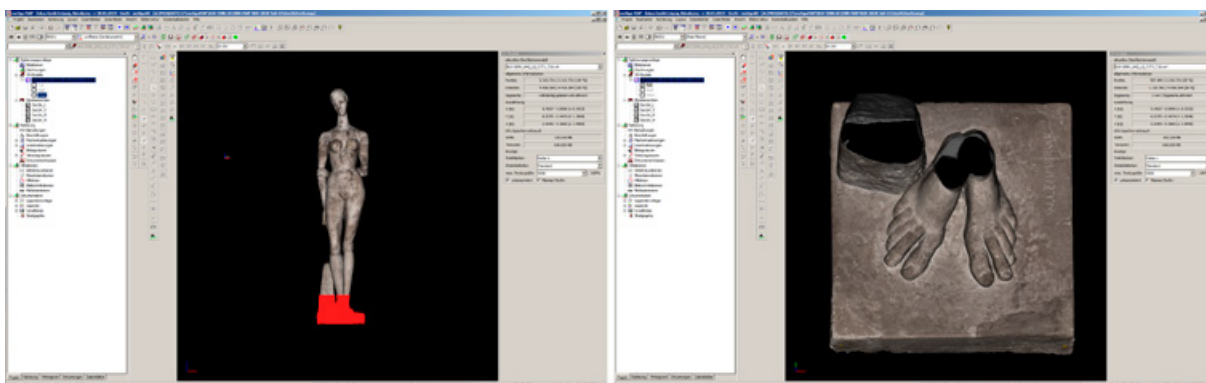


Figure 12 Affichage 3D avec sélection d'un nouveau segment, à gauche; affichage 3D du nouveau segment, à droite.

Modes de dessin pour la cartographie 3D

Le mode polygone 3D permet de cartographier des lignes 3D (fissures, interstices, etc.) ainsi que des zones 3D. Par conséquent, le polygone dessiné est intersecté avec le modèle de surface et son résultat est stocké en tant qu'objet 3D individuel (fig. 13).

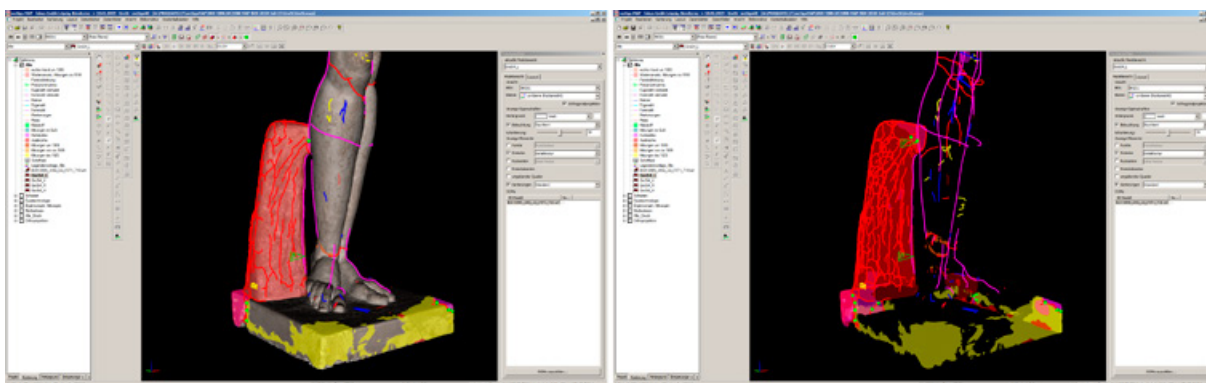


Figure 13 Affichage 3D avec modèle de surface texturé et éléments cartographiés, à gauche; affichage 3D d'éléments cartographiés sans modèle de surface, à droite.

Les outils de coupe pour la cartographie de zone sont disponibles de la même manière que pour la cartographie 2D. Ils permettent d'étendre ou de réduire ultérieurement les zones cartographiées, ainsi que de découper les zones adjacentes en fonction des besoins. En outre, des symboles vectoriels ou des éléments de texte peuvent être utilisés.

La longueur et la surface des polygones 3D sont toujours calculées pour le mètre (fig. 14).

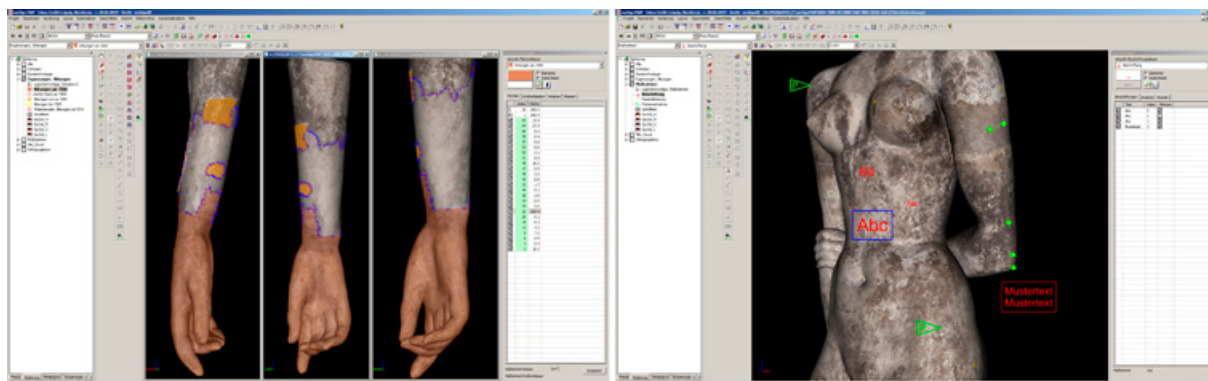


Figure 14 L'affichage 3D montre le découpage personnalisé des zones adjacentes, à gauche; l'affichage 3D montre les symboles vectoriels et les textes pour la cartographie, à droite.

Les lignes de délimitation et le remplissage des zones transparentes peuvent être affichés dans la représentation 3D. Les hachures n'apparaissent que dans les vues du modèle 2D (fig. 15).

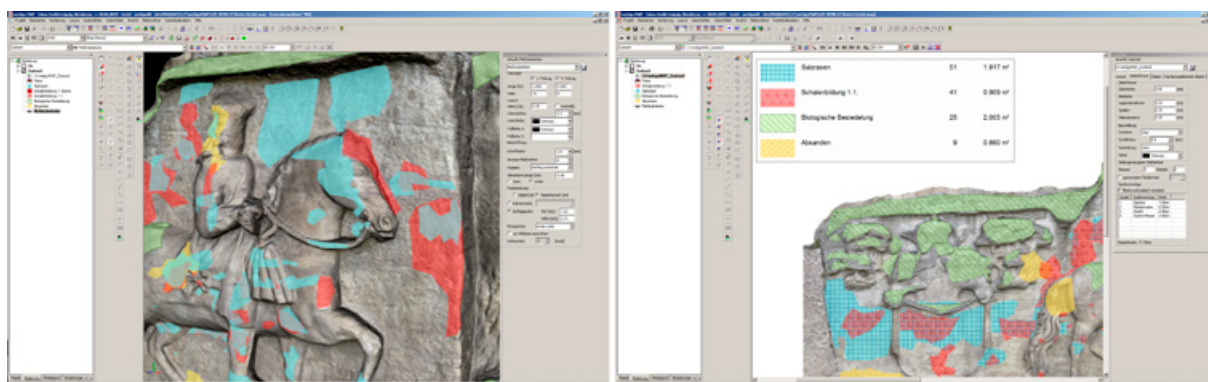


Figure 15 Affichage 3D de la cartographie d'une zone avec remplissage transparent, à gauche; hachures sur la vue du modèle 2D avec projection orthogonale et légende, à droite.

Impression à l'aide de vues de modèles 2D

Il est possible de créer une vue du modèle 2D à l'échelle de l'affichage 3D choisi, qui sera utilisée pour l'impression 2D (fig. 16). Les options d'affichage telles que la qualité de la texture, l'ombrage, l'échelle, la position et le mode de projection (orthogonal/perspective) peuvent être définies.

La création automatisée du « déroulement de la vue du modèle » (intérieur/extérieur; 4/6 vues) permet un affichage complet de l'objet (fig. 16 et 17).

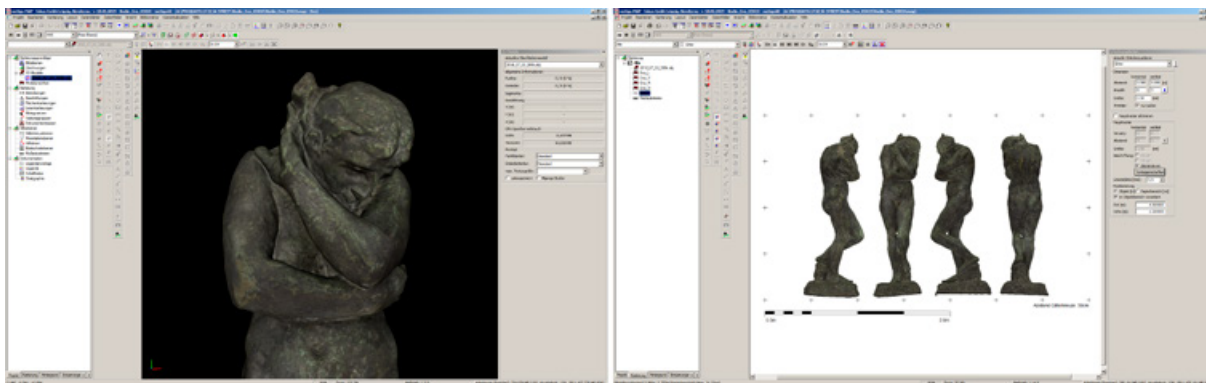


Figure 16 Affichage 3D d'un modèle de surface texturé, à gauche; déroulement extérieur fidèle à l'échelle de quatre vues du modèle par projection orthogonale, à droite.

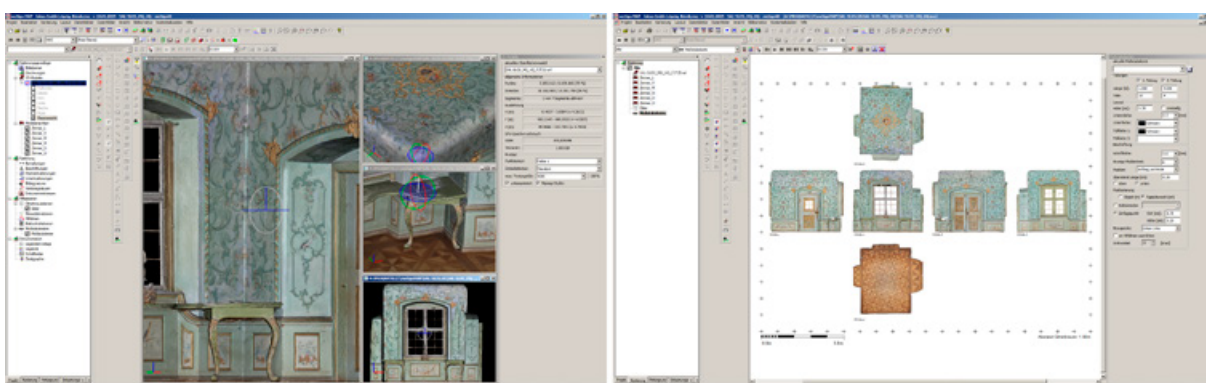


Figure 17 Affichage 3D du modèle de surface texturé de la pièce, à gauche; déroulement intérieur à l'échelle réelle de six vues du modèle avec projection orthogonale, à droite.

Le plan peut être complété par l'insertion de croix de quadrillage, d'une barre d'échelle et d'un cartouche.

L'affichage 3D peut être contrôlé, comme les vues du modèle 2D, à l'aide de groupes de graphiques et d'une légende de groupe (fig. 18).

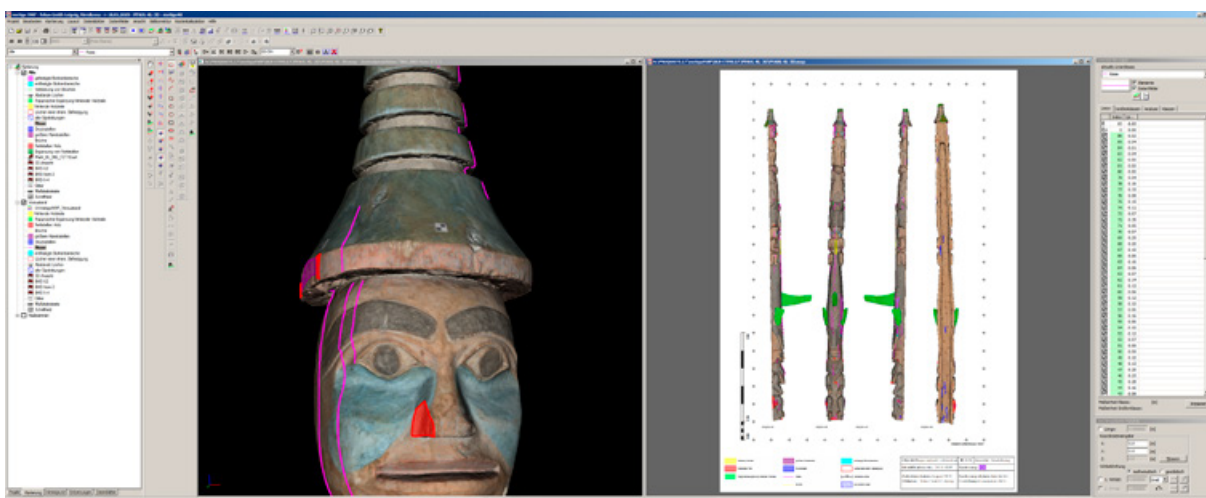


Figure 18 Affichage 3D du modèle de surface texturé du totem avec cartographie : déroulement extérieur à l'échelle réelle de quatre vues du modèle avec projection orthogonale, à gauche; cartographie et légende de groupe, à droite.

L'impression ou la sortie d'image à l'échelle réelle s'effectue de la même manière que pour les graphiques 2D. Actuellement, la cartographie 3D ne peut être transmise qu'en tant que projet de cartographie complet avec le logiciel de visualisation gratuit.

La mesure des quantités est déterminée automatiquement sur la base du modèle de surface à l'échelle. Ainsi, la quantité, la longueur et la surface des éléments cartographiés sont calculées immédiatement et la somme peut être affichée dans la légende pour chaque classe. Si la surface totale de l'objet a été relevée, un pourcentage peut également être indiqué pour chaque classe de graphique dans la légende (fig. 19).

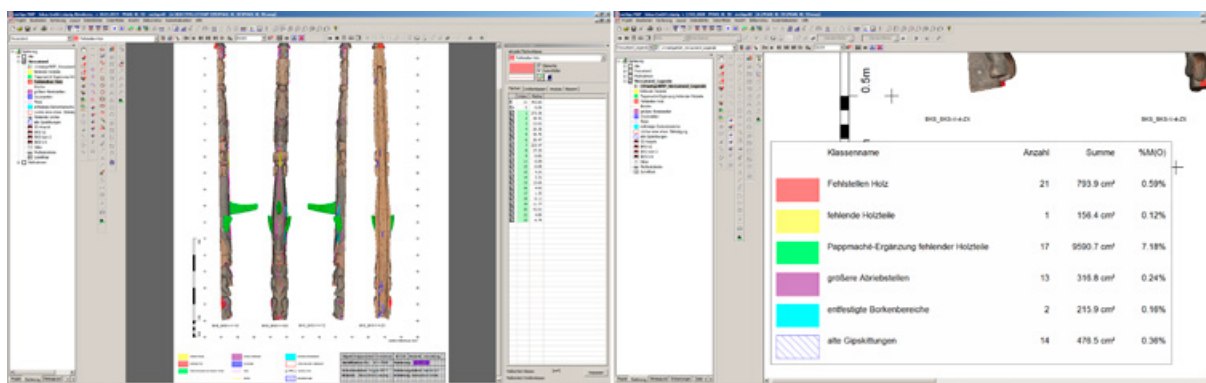


Figure 19 Affichage en 3D du modèle de surface texturé du totem avec cartographie, à gauche; légende de la cartographie incluant le relevé quantitatif, à droite.

Développement actuel

Alors que les plans en 2D peuvent être combinés de manière cohérente pour une évaluation simultanée, il n'existe actuellement pas d'outils appropriés pour ce flux de travail sur une surface en 3D. Il existe actuellement des développements qui permettent une nouvelle texturation d'un modèle de surface, ainsi que la gestion de plusieurs textures sur un modèle de surface. Par conséquent, l'évaluation d'un modèle de surface à textures multiples est possible (fig. 20).

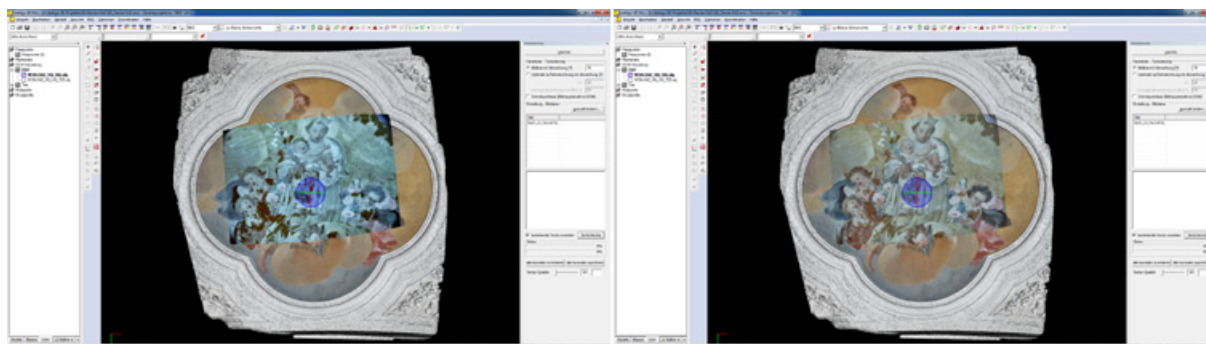


Figure 20 Modèle de surface multi texturé avec une image de lumière du jour et une image de lumière UV : image de lumière UV avec une opacité de 100 %, à gauche; image de lumière UV 3D avec une opacité de 50 %, à droite.

Conclusion

Les procédures décrites permettent de documenter à l'échelle réelle des artefacts en reproduisant fidèlement leur texture. L'objectif est de répondre aux exigences d'une cartographie pour la restauration et d'une qualité photographique adaptée à la peinture murale, et cela même pour les textures des modèles 3D. Les coûts du matériel nécessaire baissent significativement. Le passage de l'évaluation bidimensionnelle à l'évaluation tridimensionnelle est donc désormais possible, en fonction des exigences du projet.

Références bibliographiques

Brumana R., Galeazzo G. (1992), « St. Marcus' Basilica in Venice. An apply of image projection on a dome », dans Atkinson K.B., *XVII ISPRS Congress Technical Commission V: Close-Range Photogrammetry and Machine Vision*, Whittles Publishing, Washington, D.C., Etats-Unis, p. 786-793.

Luhmann T. (1978), *Nahbereichsphotogrammetrie – Grundlagen, Methoden und Anwendungen*. Verlag für Bauwesen, Berlin, Allemagne, 798 p.

Pietschner W., Regensburger J., Rüger K. (2003), *Photogrammetrie. Verfahren und Geräte*, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, Allemagne.

Siedler G., Sacher G. (2006). « Photogrammetrische Auswertung historischer Fotografien und Messbilder », dans *Führerauftrag Monumentalmalerei, Veröffentlichungen des ZIKG, Band XVIII*, Cologne, Böhlau Verlag GmbH & Cie, p. 189-198.

Siedler G., Vetter S. (2011). « Automated 3D-object documentation on the base of an image set », dans *Proceedings of the 13th International CIPA Symposium, Prague, République Tchèque* [en ligne]. Disponible sur : (PDF) *Automated 3D-Objectdocumentation on the Base of an Image Set* (consulté le 16/3/2025).

Siedler G., Vetter S. (2016), « Modern Methods of documentation – Photogrammetric evaluation of historic images », dans ICOM-CC (éd.), *Actes de l'ICOM CC - Interim Meeting of the Wood, Furniture, and Lacquer & the Sculpture, Polychromy, and Architectural Decorations Working Groups*, Potsdam, Allemagne [en ligne], 11 p. Disponible sur : [Siedler-Vetter_ICOM-CC-2016](#) (consulté le 16/3/2025).

Siedler G., Vetter S. (2018), « Qualitätskriterien bei der Ausschreibung von photogrammetrischen Leistungen », dans Petitz G. et al (éd.), *Natursteinsanierung Stuttgart 2018 – Neue Natursteinrestaurierungsergebnisse und messtechnische Erfassungen sowie Sanierungsbeispiele*, Stuttgart, Allemagne, Fraunhofer IRB Verlag, Seiten, p. 7-22.

Stephani M. (1992), « Object Modelling and Visualization in Architecture », dans *XVII ISPRS Congress Technical Commission V: Close-Range Photogrammetry and Machine Vision*, Washington, D.C., Whittles Publishing, p. 821-824.

Les auteurs

Gunnar Siedler Ingénieur

Sebastian Vetter Ingénieur

Nicolas Martin-Beaumont Photographe et réalisateur. Fokus GmbH Leipzig, Lauchstädter Str. 20, 04229 Leipzig, Allemagne, home@fokus-gmbh-leipzig.de

MÉTHODES DE PROTECTION DE LA COUCHE PICTURALE LIMITANT L'APPORT D'EAU : PISTES DE RECHERCHE ET ÉTUDE COMPARATIVE DU CYCLODODÉCANE ET DU MENTHOL

Diane Le Corre, Gaël Latour

Résumé

Dans le cadre d'un mémoire à l'Institut national du patrimoine (Paris), une œuvre à restaurer nous a été confiée par le musée national de la Renaissance (Écouen). Il s'agit d'une peinture à l'huile sur toile de l'école espagnole du XVII^e siècle (préparation à base d'argiles rouges) ayant subi un dégât des eaux. Elle présente des degrés avancés de chancis, ainsi qu'un ancien rentoilage altéré. La question se pose alors de la technique de protection de la couche picturale pour pouvoir intervenir au revers. Cet article fait la revue des techniques de protection pour des couches picturales sensibles à l'eau et présente l'étude d'une technique à base de consolidants temporaires.

Abstract In the context of a thesis at the Institut National du Patrimoine (Paris), a work was entrusted for restoration by the Musée National de la Renaissance (Ecouen). This is an oil painting on canvas from the 17th-century Spanish school (preparation with red clays) that suffered water damage. It exhibits advanced levels of opacity, as well as an altered historical re-lining. The question then arose regarding the technique to protect the pictorial layer in order to work on the reverse side. This article reviews the techniques for protecting water-sensitive pictorial layers and presents a study of a method based on temporary consolidants.

Resumen Como parte de una memoria en el Instituto nacional del patrimonio (París), el museo nacional del Renacimiento (Ecouen) confió un trabajo de restauración. Es una pintura al óleo sobre lienzo de la escuela española del siglo XVII (preparación basada en arcillas rojas) dañada por el agua. Tiene grados avanzados de chancis, así como un antiguo reentelado alterado. Luego surgió la pregunta de la técnica de protección de la capa pictórica para poder intervenir en el reverso. Este artículo revisa las técnicas de protección para capas pictóricas sensibles al agua y presenta el estudio de una técnica basada en consolidadores temporarios.

Mots-clés protection de la couche picturale, *facing*, consolidants temporaires, cyclododécane, menthol

Introduction

La protection de la couche picturale en spécialité peinture est souvent associée à l'application d'un papier fin (notamment en fibres de chanvre) collé avec des adhésifs aqueux (comme de la colle de pâte diluée ou des éthers de cellulose) afin de le rendre facilement retirable. Plusieurs termes sont employés pour désigner cette pratique – la pose d'un papier de protection, le *facing* ou le cartonnage – selon l'objectif. Ces papiers encollés peuvent en effet avoir différents rôles, comme maintenir ensemble des parties détachées d'une œuvre (bords de déchirure, bords de la toile au châssis ou au plan de travail), consolider la couche picturale (écailles mobiles), protéger la surface peinte ou encore reprendre des déformations de la toile. Dans tous les cas, il s'agit d'une intervention temporaire effectuée dans l'attente d'une intervention de restauration ou durant des interventions structurelles (dépose, doublage, refixage, etc.).

Dans de nombreux cas, cette technique ne pose pas de problème, notamment pour les œuvres peintes dont le liant est huileux et avec une bonne cohésion. Toutefois, certaines techniques picturales ou certains phénomènes d'altération de la peinture peuvent rendre l'application d'un papier de protection risquée, notamment dans le cas de :

- composés de la couche picturale (pigments, liants ou additifs) réactifs à l'eau,
- défauts de cohésion, comme une pulvérulence ou un chanci du liant de la peinture ou du vernis,
- sous-couche soluble ou absorbante, comme une préparation argileuse.

Étant confrontés à une œuvre à risque, nous nous sommes donc demandé quelles sont les alternatives pour protéger temporairement la couche picturale en limitant l'apport d'eau, voire sans apport d'eau.

État de l'art

La littérature sur la restauration des peintures montre que peu d'articles abordent ce sujet, rendant nécessaire un détour par les travaux d'autres spécialités. Nous allons présenter ces travaux de recherche en deux parties : les techniques limitant l'apport d'eau et les alternatives à l'apport d'eau.

Protection de la couche picturale avec peu d'apport d'eau

Les papiers réactivés par humidification

La thématique des papiers encollés a été particulièrement étudiée dans la spécialité arts graphiques et, ce, depuis les années 1980-90. Les objectifs diffèrent un peu, car il s'agit de doubler des papiers ou renforcer des déchirures de façon pérenne. Ces recherches se sont, en majorité, concentrées sur des techniques aqueuses, mais quelques-unes cherchent à limiter l'apport d'eau en substituant au collage dans le frais un collage de papiers préencollés et légèrement réhumidifiés.

Cette idée fait suite à l'introduction des éthers de cellulose dans les pratiques d'atelier. Facilement réactivables par humidification, ils permettent de faire un collage-contact très superficiel, avec peu de diffusion de l'adhésif et de l'humidité dans l'œuvre (Brückle et Wagner, 1996; Pataki, 2011; Lechuga, 2011).

Théorisation de la protection des couches picturales

Les rares publications sur le sujet en spécialité peinture s'inspirent des techniques de réactivation par humidification développées en arts graphiques. Les critères établis sont en effet souvent similaires (New, 2011) : faible apport d'humidité, faible retrait au séchage, souplesse de l'adhésif, faible diffusion de l'adhésif.

Les papiers de protection ont également été décrits en fonction de leur action sur la peinture, établissant deux types de *facing* (Alba *et al.*, 2019) : ceux servant à protéger (collage-contact) et ceux servant à consolider (collage dans le frais). L'étude la plus récente se concentre, là encore, sur des papiers préencollés et réactivés par humidification de l'adhésif, afin de privilégier les *façings* superficiels, dits de protection.

Et dans la pratique?

La technique du collage-contact par réactivation, avec son faible apport d'humidité et retrait au séchage, ne répond cependant pas toujours aux attendus en restauration de support toile¹.

Dans les cas où il est souhaité de limiter la diffusion de l'eau, pour éviter qu'elle vienne altérer le liant de la peinture et générer des chancis, une autre solution a été développée et consiste en l'application d'une couche intermédiaire entre la couche picturale et ces papiers encollés très humides. Très souvent il s'agit d'un vernis appelé « d'intervention » ou « sacrificiel ».

Protection de la couche picturale sans apport d'eau

Les adhésifs réactivés dans des solvants, par pression ou chaleur

L'emploi d'adhésifs solubilisés ou réactivés avec des solvants, plutôt que de l'eau, est une autre option qui a été explorée. Une vaste étude comparative a testé de nombreux polymères en faisant varier le mode de réactivation (par solvant, chaleur ou pression). Cette étude a permis de mettre en évidence un certain nombre de limites à l'emploi d'adhésifs non aqueux (Bedenokovic, 2018) :

- l'incompatibilité de nombreux solvants (tel l'éthanol) avec les couches picturales pose problème au moment de la réactivation de l'adhésif, mais aussi lors du retrait de résidus;
- dans le cas de la réactivation avec des solvants, certains de ces adhésifs, vite solubilisés, tendent à se diffuser dans la couche picturale. Cela peut rendre difficile le collage du papier, car ils ne forment pas un joint de colle à l'interface peinture-papier, soulevant la question de l'intérêt de faire un *facing*. Si l'adhésif pénètre beaucoup, autant envisager directement une intervention de consolidation;

¹ Par exemple, l'apport d'humidité peut être souhaité afin de détendre et assouplir les matériaux le temps d'une reprise de déformation. Le retrait au séchage permet une reprise de tension.

- l'introduction de ces adhésifs, souvent synthétiques, dans des œuvres où de telles natures de matériaux n'étaient pas présentes auparavant, pose des questions déontologiques. Cela entraîne une modification de l'œuvre, notamment optique, avec un changement de couleur souvent perceptible (Thuer, 2012). Il y a potentiellement un caractère irréversible à ces méthodes, qui sont en cela invasives.

Ces adhésifs seraient donc peu appropriés à un usage temporaire, alors que c'est la vocation d'une protection de la couche picturale.

Les consolidants temporaires

Une autre catégorie de matériaux non aqueux peut être envisagée : les consolidants temporaires. Leur usage a trouvé une multitude d'applications pratiques dans plusieurs spécialités de la conservation-restauration (archéologie, peinture murale et arts graphiques) pour leur capacité consolidante, hydrophobe, isolante et leur propriété de sublimation. On dit qu'ils sont volatiles ou réversibles, car ils ont cette capacité de passer de l'état solide à l'état gazeux dans les conditions ambiantes.

Ils ont aussi révélé de bonnes capacités structurelles, permettant par exemple la dépose de décors muraux ou le retrait de doublages, notamment d'un carton au revers d'un papier peint (White, 2015) et d'un rentoilage au revers d'une détrempe sur toile (Miguirditchian, 2008).

Délimitation de l'étude

Étant donné les limites et les inconvénients des techniques diminuant l'apport d'eau et de celles avec des adhésifs synthétiques non aqueux, l'alternative que constituent les consolidants temporaires nous a semblé être une piste intéressante à explorer.

Les nombreux cas d'application et d'expériences de terrain avec le cyclododécane (CDD), nous ont amené à l'intégrer dans cette étude, ainsi que le menthol, aussi commercialisé comme consolidant temporaire, mais dont les propriétés diffèrent². Nous avons ainsi souhaité mener un protocole expérimental pour mieux comprendre le comportement, le potentiel et les limites de ces deux consolidants temporaires dans le cas d'une protection de la couche picturale en vue d'interventions sur le support d'une peinture sur toile.

La technique que nous cherchons à mettre au point consiste en l'application (fig. 1) :

- 1) d'une couche de consolidant temporaire, pour consolider la couche picturale et protéger sa surface de l'apport d'eau;
- 2) des papiers de chanvre fin encollés, pour renforcer la couche de consolidant et servir de couche d'interface;
- 3) des bandes de tension en intissé de polyester collées à la face, afin de maintenir l'œuvre sur tout son périmètre.

² Une tableau comparatif figure en bilan de cet article (fig. 9).

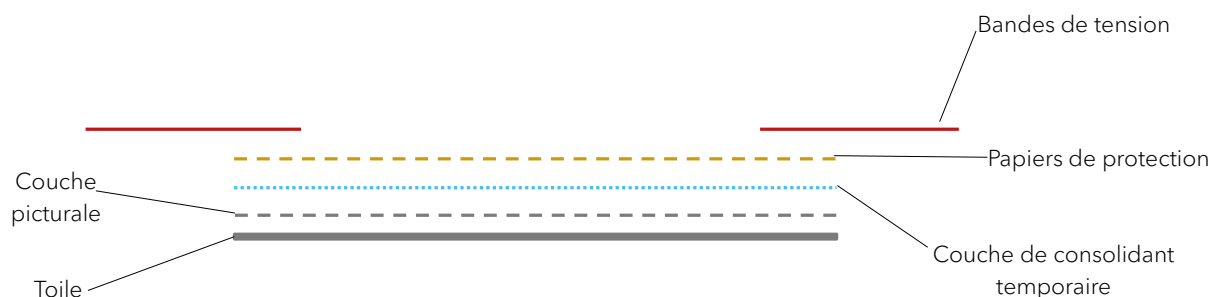


Figure 1 Schéma de la technique de protection et montage sur bâti.

Les objectifs de l'étude se répartissent en deux phases expérimentales (**fig. 2**) : ceux liés à la couche de consolidant temporaire (1) et ceux liés au montage sur un bâti de l'œuvre ainsi protégée (2 et 3).

Étude de la protection	Étude de la mise sur bâti
Recouvrir la surface de façon homogène et combler les craquelures	Résister à la tension exercée lors de la mise sur bâti
Présenter une stabilité temporelle permettant des interventions sur le support	Assurer une bonne adhésion des couches entre elles
Être réversible	Isoler les adhésifs et permettre un retrait facile des résidus
Avoir une température d'application modérée	

Figure 2 Tableau des différents objectifs de l'étude.

Étude de la protection

Recouvrir la surface et combler les craquelures

Pour appliquer les consolidants temporaires, il est nécessaire de les rendre liquides. Cela est possible de deux façons : par chauffage ou par dissolution dans un solvant. Une fois le produit liquide appliqué sur une surface, il va de nouveau passer à l'état solide. Le choix de mise en œuvre – fondu, en solution ou fondu avec une part de solvant – a une influence sur la structure du dépôt solide formé.

Ces différences de formation sont très claires, visibles sous microscope optique en lumière blanche et par tomographie de cohérence optique (OCT)³ dans le cas du CDD (**fig. 3**).

³ L'OCT est une technique d'imagerie optique tridimensionnelle, sans contact et non-destructive, permettant d'obtenir une image en coupe des milieux traversés, adaptée aux milieux transparents ou semi-transparentes. Dans le cas de l'analyse d'une peinture de chevalet, l'image s'apparente donc à une coupe stratigraphique virtuelle des couches de vernis et glacis. L'OCT utilisé pour cette étude a été mis à disposition par le laboratoire d'Optique et Biosciences (École polytechnique, Palaiseau). Pour plus de renseignements sur cette technique d'imagerie : voir Latour, Robinet, 2019.

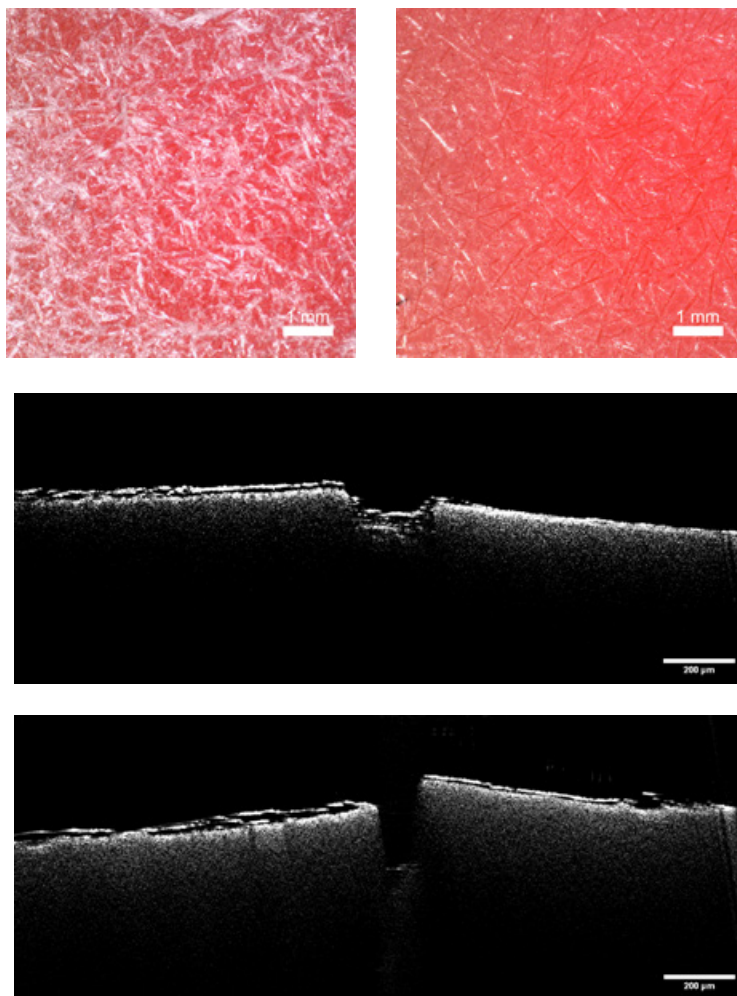


Figure 3 Vues en microscopie optique; barre d'échelle : 1 mm (a, b) et en OCT (coupes transverses, équivalentes à une coupe stratigraphique); barre d'échelle : 200 μ m (c, d). CDD en solution dans du Siedegrenzbenzin 30-75 (2 :1) en une application (a, c). CDD en solution dans du Siedegrenzbenzin 100-140 (2 :1) en une application (b, d). © Diane Le Corre, INP (a, b); Gaël Latour, LOB (c, d)

Choix du solvant lors d'une application en solution

Lorsque le CDD est préparé en solution dans différents hydrocarbures, on observe qu'avec un hydrocarbure à basse température d'évaporation le consolidant se solidifie plus vite, même dans les petites anfractuosités, alors que si le temps d'évaporation est plus long, il tend à former des aiguilles plus étendues, au niveau de la surface et non dans les craquelures.

Ajout de solvant lors d'une application fondue

L'ajout de solvant aide à l'application du CCD fondu, en offrant un temps d'application plus long du produit et en permettant également de diminuer la température de fusion : le CDD reste liquide à des températures inférieures à sa température de liquéfaction. Elle est

normalement de 60-65 °C, et descend à 55°C avec 10 % de solvant et à 50 °C avec 20 % de solvant.

La présence de deux formes liquides implique un passage à l'état solide de deux façons : le CDD se fige par refroidissement, mais n'est complètement solidifié qu'une fois les solvants évaporés. Le dépôt formé est plus ou moins dense selon la part de solvant et le nombre d'aiguilles formées dans la couche. Le CDD fondu pur conduit à un dépôt plus dense et imperméable.

Afin de recouvrir la surface et combler les craquelures, nous avons donc privilégié pour le CDD des méthodes d'application permettant une solidification rapide : fondu pur ou avec une part de solvant (10 et 20 %). Nous avons également fait des applications en deux couches, avec l'idée que, peut-être, la première couche faite de CDD fondu avec une part de solvant ou pur en solution puisse isoler la couche picturale de la chaleur apportée par la seconde application de CDD fondu pur à température élevée.

Pour le menthol, la difficulté lors de l'application est moins grande car sa température de fusion est plus basse, 40 °C, rendant l'application à la brosse plus facile et le risque lié à la température moindre. Étant donné la grande capacité de pénétration du menthol dans les matériaux, il est nécessaire de superposer les applications pour obtenir une couche en surface. On a ainsi choisi le menthol selon deux méthodes d'application : fondu et en solution, en appliquant 4 couches ou 8 couches.

Cyclododécane		Menthol
En solution dans du Siedegrenzbenzin 30/75 (2:1) À cette concentration, le CDD sature le solvant. Il en reste donc à l'état solide au fond du flacon (CDDs)		En solution dans du Siedegrenzbenzin 60/95 (3:1) (Ms) Il est possible de mettre davantage de menthol en solution avant de saturer le solvant. Il faut souvent attendre plusieurs jours avant que le menthol soit totalement solubilisé
Fondu avec 10% de Siedegrenzbenzin 100/140 (CDDf10)		Fondu pur (Mf)
Fondu avec 20% de Siedegrenzbenzin 100/140 (CDDf20)		
Fondu pur (CDDf)		
1 technique d'application	Superposition de 2 techniques d'application	Application en 4 ou 8 couches

Figure 4 Tableau des techniques d'application sélectionnées. Nomenclature : les proportions sont toujours indiquées en masse. Pour chaque technique d'application, nous indiquons entre parenthèses la nomenclature utilisée lors de l'étude, reprise dans les graphiques présentés dans la suite de cet article. Pour le CDD, nous avons ajouté au nom de la première couche la mention « /f », pour une seconde couche de CDD fondu pur, ou « /f10 », pour une seconde couche de CDD fondu avec 10 % de solvant. Cela donne, par exemple « CDDf10/f ». Pour le menthol, nous avons ajouté la mention « -4 » ou « -8 » pour préciser le nombre de couches appliquées.

Présenter une stabilité temporelle suffisante

Comme les consolidants temporaires tendent à se sublimer au cours du temps, on s'est demandé sur quelle durée ils assurent leur rôle. L'enjeu est de s'assurer un temps de travail suffisant pour mener les interventions au revers de l'œuvre.

Nous avons donc effectué un suivi du processus de sublimation en mesurant la variation de la masse des éprouvettes au cours du temps. Des éprouvettes sont laissées à l'air libre quand d'autres sont stockées dans une pochette hermétique⁴. L'idée est de voir à quel point un dispositif de pare-vapeur⁵ simple peut ralentir la sublimation.

L'étude de la masse de consolidant temporaire restant au bout de sept jours en fonction de la mise en place ou non d'un pare-vapeur permet de mettre en évidence que le pare-vapeur ralentit dans tous les cas la vitesse de sublimation, et que ce gain est variable selon les techniques d'application (**fig. 5**). Par exemple, dans le cas du menthol, une application fondue en quatre couches donne des dépôts peu durables s'ils sont laissés à l'air libre. Cependant, le pare-vapeur améliore grandement leur durabilité. Le menthol appliqué en huit couches et laissé sous pare-vapeur donne par ailleurs les meilleurs résultats de stabilité dans le temps sur sept jours. En comparaison, dans le cas du CDD, la durabilité dépend beaucoup de la structure du dépôt formé, et le cyclododécane fondu pur, dense, permet d'avoir un dépôt assez stable, même sans pare-vapeur. On voit que sous pare-vapeur les écarts de stabilité dans le temps des différentes techniques de consolidation temporaire sont grandement réduits et ils acquièrent tous une assez bonne durabilité.

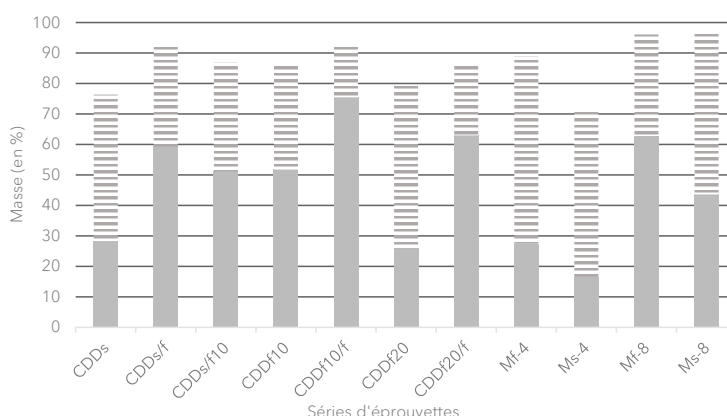


Figure 5 Pourcentage de consolidant encore présent sept jours après application en fonction de la présence d'un pare-vapeur (hachures) ou son absence (barres pleines).

Lors de ce suivi, les éprouvettes ont été examinées par OCT et leur aspect documenté par photographie. Cela a permis de mettre en évidence que les couches de menthol se subliment en s'amincissant de façon régulière et homogène, alors que le CDD se sublime de façon variable sur la surface de l'éprouvette, laissant à terme des amas locaux de consolidant. Dans

⁴ La pochette consiste en des feuilles de polyester (type Mélinex®) scellées entre elles avec du ruban adhésif aluminium. Ces matériaux sont hermétiques aux vapeurs des consolidants temporaires.

⁵ Le pare-vapeur est le dispositif servant à limiter les échanges entre le consolidant temporaire et l'air afin de ralentir sa sublimation. On utilise là aussi du Mélinex® fixé avec du ruban adhésif aluminium.

la majorité des cas, après sept jours sans pare-vapeur, même s'il n'y a plus de consolidant en surface, il est possible d'en observer dans les craquelures, confirmant qu'elles ont bien été comblées lors de l'application.

Être réversible

Une fois les consolidants temporaires sublimés, les éprouvettes ont été observées à l'œil nu afin de s'assurer de l'absence de modifications optiques induites par les produits ou leur mise en œuvre. Aucune modification perceptible n'est constatée pour le cyclododécane. En revanche, les éprouvettes ayant reçu du menthol en huit couches, fondu comme en solution, présentent des effets de lustrage. Il convient donc de vérifier l'absence d'interaction entre le menthol et la technique picturale de l'œuvre avant d'employer cette technique.

Avoir une température d'application modérée

L'apport de chaleur à la surface de l'œuvre lors de l'application de consolidants temporaires fondus peut avoir des conséquences selon la sensibilité de la peinture, ses finitions et vernis de surface ou ses adhésifs de refixage. La question se pose en particulier pour le cyclododécane, dont la température de fusion se situe entre 60 et 70 °C lorsqu'il est pur.

Comme le cyclododécane fondu pur est la méthode d'application la plus avantageuse du point de vue de la stabilité du dépôt dans le temps, nous avons souhaité étudier sa vitesse de refroidissement lors de l'application, ainsi que pour le CDD fondu avec 10 % et 20 % de Siedegrenzbenzin 100-140.

Pour cela, des prises de vue avec une caméra thermique par infrarouge⁶ ont été faites lors de l'application, puis toutes les dix secondes pendant deux minutes (fig. 6). Les courbes de refroidissement montrent une décroissance rapide pour les CDD fondu avec une part de solvant, avec une différence de 10 °C entre la température du produit au bain-marie et la première mesure effectuée sur l'éprouvette. On constate ensuite une baisse de 5 °C durant les vingt premières secondes. La courbe d'évolution de la température pour le CDD fondu pur présente une allure différente, avec une stagnation de la température au-dessus des 50 °C durant les 40 premières secondes. Il met deux fois plus de temps à descendre à 30 °C.

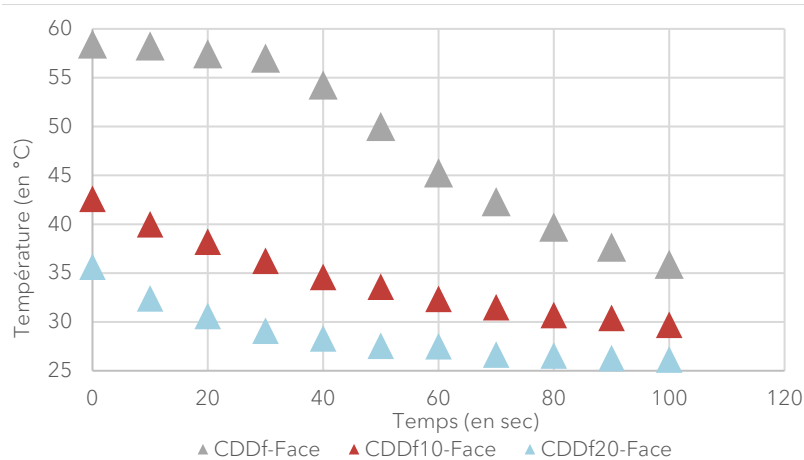


Figure 6 Courbes de refroidissement du CDD fondu, mesures prises à la face.

⁶ Nous avons utilisé la caméra FLIR Cx-Series modèle C5.

Ensuite, nous avons cherché à évaluer si une couche intermédiaire de CDD, en solution ou fondu avec une part de solvant (donc appliqué moins chaud), peut protéger la surface peinte de la chaleur apportée par le CDD fondu pur. Pour cela nous avons comparé des mesures de la température prises au revers des éprouvettes (fig. 7). Les températures mesurées au revers, lors de l'application de CDD pur sur une première couche de CDD fondu avec une part de solvant, sont légèrement plus basses qu'en l'absence d'une couche intermédiaire. Toutefois, elles sont supérieures aux températures mesurées à la face lors de l'application de CDD avec une part de solvant. Le rôle isolant d'une couche intermédiaire est donc modéré et fondre le CDD avec du solvant est la meilleure façon de diminuer l'apport de chaleur à la surface de la couche picturale.

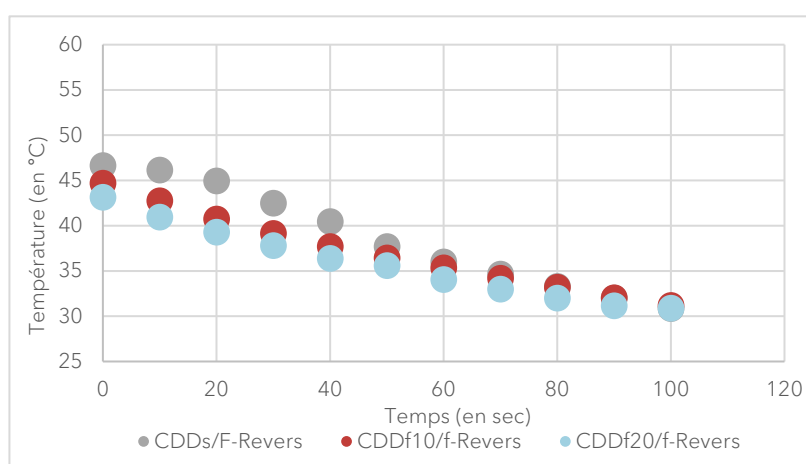


Figure 7 Courbes de refroidissement du CDD fondu, mesures prises au revers.

Étude de la mise sur bâti

Résister à la tension exercée lors de la mise sur bâti

Afin de monter l'œuvre sur un bâti, il est nécessaire de pouvoir coller sur la couche de consolidant temporaire des bandes de tension. Nous avons préféré ne pas les coller directement dessus, pour ne pas risquer que la force de traction exercée lors de la mise sur bâti ne vienne arracher le consolidant. Deux couches de papier de chanvre fin sont alors collées sur la couche de consolidant temporaire avant d'y coller les bandes de tension en intissé de polyester fin. Suite à des tests de cisaillement par traction⁷, nous avons choisi les adhésifs pour le collage des papiers de chanvre et les intissés de polyester. Lorsque ces deux matériaux sont collés avec du Plextol B500®, l'adhésif suit la déformation de l'intissé de polyester et l'ensemble s'arrache plus facilement que dans le cas d'un mélange Plextol B500®-Tylose MH300® (1 :1). Des essais complémentaires ont montré que la Tylose MH300® seule suffit pour coller le papier de chanvre, avec des intissés collés grâce au mélange Plextol B500®-Tylose MH300® (1 :1). Ce système a été appliqué sur toutes les techniques de consolidant temporaire et la rupture s'est à chaque fois faite dans la bande d'intissé, en dehors de la zone de collage sur

⁷ Cette série de tests a été effectuée en atelier à l'aide d'un étau, pour maintenir l'éprouvette au dessus du vide, et d'un ourlet à l'extrémité de la bande d'intissé, afin d'y glisser une tige à laquelle accrocher un sachet. Des billes de plomb ont été versées progressivement dedans en respectant des temps de pose entre chaque ajout.

l'éprouvette. La masse moyenne à la rupture est de 4,16 kg. Rapportée aux dimensions de l'éprouvette, cela revient à une contrainte exercée de 1,63 N/cm² et une tension de 8,16 N/cm⁸. Ces valeurs nous paraissent suffisantes pour une mise en tension sur bâti, d'autant plus que nous adaptons l'ouverture des angles du bâti à la tension des intissés, en veillant à ne pas provoquer leur déchirure.

Assurer une bonne adhésion des couches entre elles

L'adhésion entre les couches d'intissé de polyester, de papier de chanvre et le consolidant temporaire a été évaluée par pelage à la main afin de jauger les faiblesses. Ces observations servent à envisager le risque de décollement entre les différentes couches lors des interventions au revers.

La résistance au pelage à la surface de CDD fondu pur est la plus faible. Elle donne un résultat intermédiaire pour le CDD fondu avec 10 % de solvant et elle est la plus forte à la surface du menthol.

Isoler les adhésifs et permettre un retrait facile des résidus

Après sublimation des consolidants temporaires, les adhésifs qui avaient été appliqués persistent à la surface de la peinture. Dans le cas du CDD, le dépôt poudreux n'est pas adhérent et peut être complètement retiré par dépoussiérage. En revanche, le menthol ne semble pas avoir empêché la diffusion des adhésifs, puisqu'un voile blanc adhérent reste à la surface de la peinture.

Lors d'un test d'imprégnation par le revers, nous avons observé que les colles de peau et d'esturgeon se diffusent jusqu'à la surface peinte et parviennent à dissoudre la peinture, quand celle-ci est couverte de menthol. Le CDD a, quant à lui, empêché ce phénomène. Cela indique que le menthol a une certaine perméabilité ou une sensibilité à l'humidité, et peut aussi expliquer la meilleure adhésion des couches de protection à sa surface

Bilan

Suite à cette étude, il est possible de dresser un bilan complet réunissant sur un même type de figure la réponse des techniques testées à l'ensemble des critères⁹ (fig. 8).

Cela permet de mettre en évidence que le CDDf20 seul n'est pas plus intéressant que le CDDs seul sur les trois critères testés, et représente donc un apport de chaleur inutile.

Les doubles applications faites de CDDf20 ou de CDDf10, avec pour seconde couche du CDDf, ont un comportement proche : leur durée dans le temps est la meilleure, mais avec un léger défaut au niveau de l'adhésion et le problème de l'apport de chaleur.

Le CDDf10 seul présente la meilleure réponse à la majorité des critères, sauf celui de la durée dans le temps, légèrement inférieure mais suffisante pour notre application.

⁸ La contrainte correspond à une force appliquée sur une surface et s'exprime en donc en N/cm², alors que la tension est une force linéaire qui s'exprime en N/cm. Ces deux valeurs ont été calculées à partir de la masse ajoutée au moment de la rupture, rapportée à l'aire ou à la longueur du bord de l'éprouvette.

⁹ Le CDD en solution et le CDD fondu avec 20 % de solvant n'ont pas été évalués pour les critères liés à la mise en tension sur bâti, d'où l'absence de valeurs sur une moitié du graphique.

Fondu, le menthol a une meilleure durée dans le temps, mais on constate que sa réversibilité est très variable selon le nombre de couches appliquées et peut-être la composition de la couche picturale.

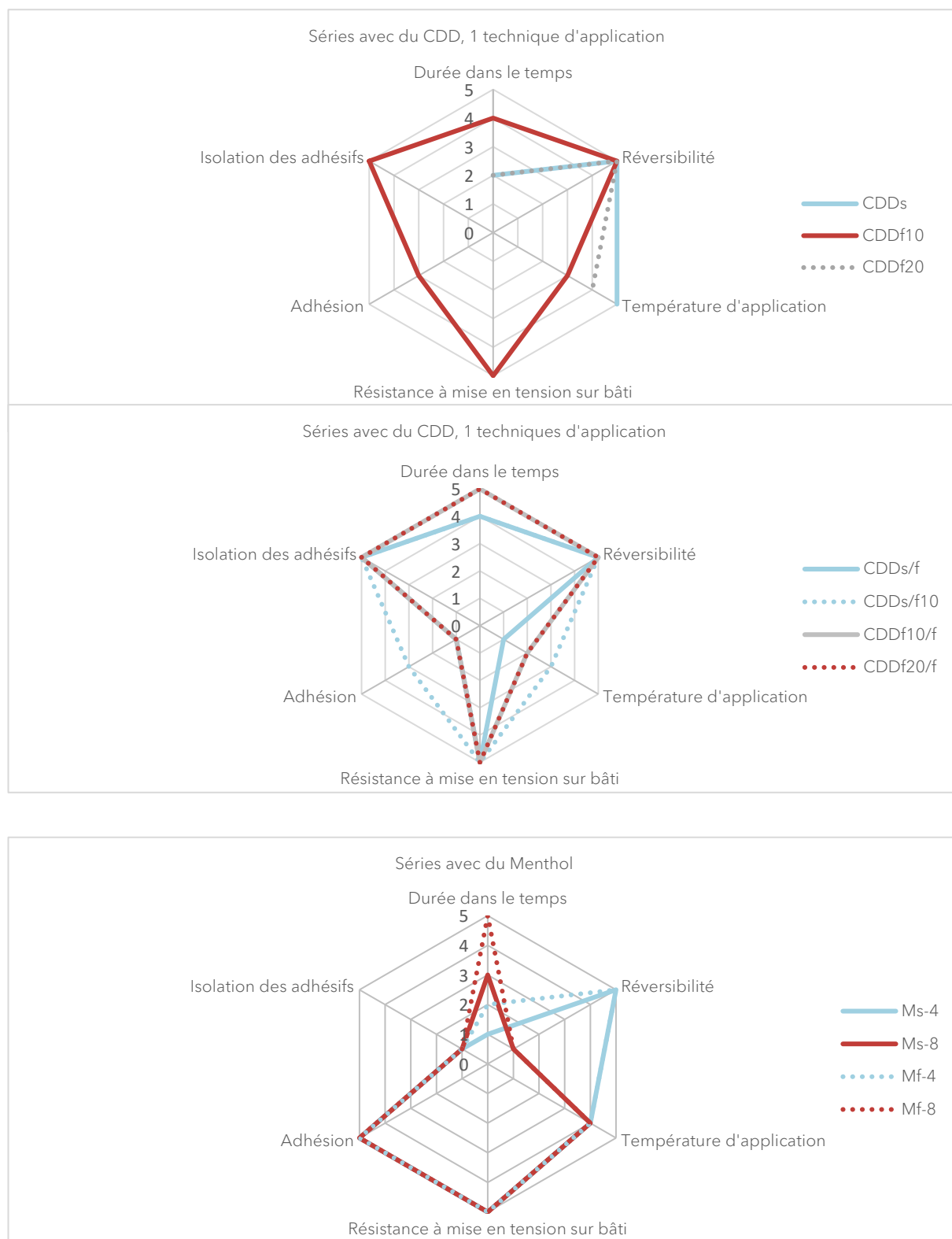


Figure 8 Graphiques radar synthétisant les résultats de l'étude pour les différents systèmes testés.

Grâce à cette synthèse, il a ainsi été possible de choisir un consolidant temporaire et une méthode d'application appropriés – le CDD fondu avec 10 % de Siedegrenzbenzin 100-140 – permettant de répondre à tous nos attendus pour une protection de la couche picturale et une mise sur bâti de l'œuvre.

Tous ces tests furent également l'occasion de comparer le comportement de deux consolidants temporaires et de dresser leurs avantages et inconvénients (fig. 9) afin d'aider dans le choix de ces matériaux de restauration.

	Cyclododécane	Menthol
Avantages	Domaine de solubilité restreint : hydrocarbures Hydrophobe Bonne réversibilité Diffusion moyenne dans le substrat, mais comble les aspérités Sublimation lente même sans pare-vapeur, 1) si fondu pur, 2) si fondu avec 10% solvant Pas de modification optique de la couche picturale Imperméable, si fondu Adhésion possible avec adhésifs aqueux, si fondu avec 10% de solvant	Domaine de solubilité varié : hydrocarbures et alcools Produit naturel ou synthétique Moins onéreux et plus accessible Température de fonte modérée (40°C) Facilité d'application à la brosse Bonne brossabilité Forme des couches régulières Bonne diffusion dans les substrats poreux Sublimation assez rapide, mais lente si appliqué en couche épaisse et avec pare-vapeur
Inconvénients	Produit chimique de synthèse Onéreux et pas facile d'accès Haute température de fonte (60-65°C), sauf si part de solvant Difficile à appliquer en couche régulière	Hydrophobie modérée Interactions avec la couche picturale (modifications optiques à étudier) Perméable

Figure 9 Tableau comparatif des qualités du CDD et du menthol.

Perspectives

Comme cette étude s'est concentrée sur un cas d'application, plusieurs questionnements sont restés en suspens et d'autres pistes de recherche pourraient être suivies afin d'explorer les perspectives d'utilisation du cyclododécane et du menthol.

Dans le cas du menthol, il serait nécessaire d'approfondir la connaissance sur ses capacités d'interaction avec les matériaux organiques, afin de mieux cerner ses limites et pouvoir envisager son utilisation. On peut se demander si les modifications optiques observées sont liées à la nature du liant de la peinture (les éprouvettes étaient peintes à l'acrylique) et si le temps de contact du menthol à la surface de la peinture a également un rôle.

Si le menthol est indiqué pour protéger certaines surfaces, il serait utile de chercher une méthode de collage de papier de chanvre et d'intissé de polyester dont l'adhésif ne se diffuse pas à travers le menthol, dans le but d'en faire un substitut du CDD intéressant.

Dans le cas du cyclododécane, la question du risque d'interaction avec les matériaux de l'œuvre peut se poser dans le cas d'une peinture composée d'un liant ou vernie avec une résine, qui sont susceptibles de réagir avec l'apport de chaleur ou de solvants de type hydrocarbures. On peut penser à la cire, à certaines peintures modernes et contemporaines, et à certains vernis synthétiques employés en restauration.

Lors de la mise en œuvre des interventions de restauration et sur des essais préalables d'atelier, il a semblé que les consolidants temporaires, et le CDD en particulier, peuvent agir sur la diffusion des adhésifs appliqués par le revers. Il serait intéressant de mieux caractériser la façon dont les consolidants temporaires peuvent fermer la porosité de la couche picturale et à quel niveau se situe le front de diffusion de l'adhésif de refixage dans la stratigraphie.

Enfin une piste complémentaire serait de mener l'étude de la technique des vernis intermédiaires, afin d'évaluer leur capacité à protéger la couche picturale des altérations liées à l'eau et leur adhésion au cartonnage selon la résine, sa concentration, le solvant de mise en œuvre et le temps de séchage, et également leur limitation de la diffusion des adhésifs appliqués par le revers. Il pourrait être envisagé alors d'établir un protocole de test afin d'évaluer la capacité des vernis à remplir ces rôles et d'aider à décider de l'utilisation ou non d'une alternative telle que les consolidants temporaires. Pour finir, une étude des diverses pratiques de cartonnage en restauration des peintures sur toile reste à mener.

Remerciements

Cette publication fait suite à une recherche menée lors d'un projet de fin d'études en conservation-restauration à l'Institut national du patrimoine en 2023. Ce travail fut encadré par Gaël Latour, mais également suivi par les encadrants du mémoire, Claudia Sindaco et Jean-François Hulot, conservateurs-restaurateurs de peinture et enseignants à l'INP, ainsi que le laboratoire de l'INP. Le laboratoire d'Optique et Biosciences a contribué à la réalisation de ce projet, en accueillant une partie de l'étude expérimentale et en donnant accès à l'OCT.

Références bibliographiques

- Alba P., Martin-Rey S., Domenech-Carbo M. T.** (2019), « Analysis of facing materials used as remoistenable temporary supports for facing on canvas », *CeROArt*, N° 11. Disponible sur : [Analysis of facing materials used as remoistenable temporary supports for facing on canvas paintings](#) (consulté le 9/3/2025).
- Bedenikovic T., Eva-Green S., Baatz W.** (2018), « Non-aqueous facing methods in paper conservation – Part I: Testing facing materials », *Restaurator. International journal for the preservation of library and archival material*, N° 39, p. 185-214.
- Brückle I.** (1996), « Update: remoistenable lining with methylcellulose adhesive preparation », *The Book and paper group annual*, N° 15, p. 25-26.
- Latour G., Robinet L.** (2019), « La microscopie optique tridimensionnelle. De l'imagerie biomédicale à la caractérisation des objets du patrimoine », dans Benech C., Cantin N., *Instrumentation portable. Quels enjeux pour l'archéométrie?*, Paris, Éditions des archives contemporaines, (coll. Sciences archéologiques), p. 283-300.
- Lechuga K.** (2011), « Aquazol-coated remoistenable mending tissues », dans CCI (éd.), *Adhesives and consolidants for conservation: research and applications*, Ottawa, Canadian conservation institute, p. 1-13.
- Miguirditchian M.** (2008), *Les peintures murales de l'église Abba Antonios, région de Gondär, Ethiopie, XVII^e siècle (musée du Quai Branly, Paris). Découvertes et analyses d'une technique picturale. Restauration et proposition de présentation d'un fragment test (Saint Théodore l'Oriental) en vue du traitement et remontage de l'ensemble du cycle*, mémoire de fin d'études en Conservation-restauration, spécialité peinture, Institut national du patrimoine, p. 167-170.
- New B.** (2011), « Aqueous facing : materials and revised application methods », *The picture restorer*, N° 38, p. 22-23.
- Pataki A.** (2009), « Remoistenable tissue preparation and its practical aspects », *Restaurator*, N° 30, p. 51-69.
- Thuer C.-H.** (2012), « Facing adhesives for size-tempera painted wood : results of a research internship for Historic Scotland », dans Barros D'Sa A., Bone L., *Adhesives and consolidants in painting conservation*, Londres, Archetype publications, p. 68-84.
- Wagner S.** (1996), « Remoistenable tissue part II: variations on a theme », *The book and paper group annual*, N° 15, p. 27-28.
- White G.** (2015), « The use of cyclododécane as an alternative for temporary facings in paper conservation », dans Rozeik C., *Subliming surfaces : volatile binding media in heritage conservation*, Cambridge, University of Cambridge museums, p. 83-90.

Les auteurs

Diane Le Corre conservatrice-restauratrice de peintures, gérante de l'entreprise DLeCorre Conservation-restauration. Diplômée du master en conservation-restauration des biens culturels dans la spécialité peinture à l'Institut national du patrimoine, Diane Le Corre a étudié l'usage des consolidants temporaires à l'université de Cologne (TH-Köln ou CICS), puis a consacré une partie de son projet de fin d'études à leur application pour la protection de la couche picturale en vue d'interventions sur le support d'une peinture sur toile. Elle exerce à présent en indépendant et travaille sur des peintures de chevalet et des peintures murales, dans le cadre de marchés publics ou pour des clients privés. Le Corre, conservation-restauration, 50 hent Prajoumarc, 29170 Fouesnant, dlecorre.crbc@gmail.com.

Gaël Latour physicien, spécialiste en microscopie optique, enseignant-chercheur à l'université Paris-Saclay (depuis 2012), activité de recherche au laboratoire d'Optique et Biosciences (CNRS, Inserm, École polytechnique-IP Paris). Son activité de recherche vise à développer des nouvelles approches d'imagerie optique pour l'analyse sans contact et non-destructive en sciences du patrimoine, telle que la tomographie par cohérence optique et la microscopie optique non-linéaire. En complément, un traitement adéquat des images et des données permet d'accéder à une information quantitative. gaël.latour@universite-paris-saclay.fr.

REPRISE DE DÉCHIRURES D'UNE PEINTURE SUR TOILE, ÉTUDE DE LA DÉFORMATION ET TRAITEMENT MINIMAL

Marie-Noëlle Laurent-Miri, Thierry Sarmant, Nicolas Wilkie-Chancellier, Sandie Le Conte, Antonio Iaccarrino-Idelson, Pierre Leveau

Résumé

Pour intervenir sur les déformations provoquées par une déchirure sur une peinture de chevalet, l'hypothèse issue de la pratique a longtemps été d'augmenter la rigidité du support toile par un doublage ou la pose d'un renfort ponctuel au revers de l'œuvre. Ces dernières années, les recherches sur l'évolution des contraintes internes au sein d'une peinture ont modifié profondément les pratiques. Dans cette approche, les recherches menées sur les déchirures à partir des années 2000 se sont concentrées sur le collage proprement dit de la déchirure sans consolidation supplémentaire du support toile. L'objectif de notre recherche est d'étudier au moyen de la DIC-3D, ou corrélation d'image digitale, les risques de déformation d'une reprise de déchirure en fonction de différentes consolidations localisées.

Abstract To address deformations caused by a tear in an easel painting, the assumption based on practical experience has long been to increase the rigidity of the canvas support by adding a lining or applying a local reinforcement on the reverse side of the work. In recent years, research on the evolution of internal stresses within a painting has profoundly changed these practices. Since the 2000s, studies on tears have focused on gluing the tear itself without further consolidating the canvas support. Our research aims to use DIC-3D (3D Digital Image Correlation) to study the risk of deformation in tear repairs in function of various localised consolidations.

Resumen Para intervenir sobre las deformaciones provocadas por un desgarramiento sobre una pintura, la hipótesis surgida de la práctica fue durante mucho tiempo de aumentar la rigidez del soporte tela con un doblaje o un refuerzo en el reverso de la obra. Estos últimos años, la investigación sobre la evolución de las tensiones internas en el seno de una pintura han modificado profundamente las prácticas. En este marco, las investigaciones sobre los desgarramientos a partir de los años 2000 se concentraron sobre la pegadura del desgarramiento sin consolidación suplementaria del soporte tela. El objetivo de esta investigación es de estudiar, mediante la DIC-3D, la correlación de la imagen digital, los riesgos de deformación de la reparación de un desgarramiento en función de diferentes consolidaciones locales.

Mots-clés peintures de chevalet, déchirures, déformations, contraintes, comportement mécanique, corrélation d'image digitale

Introduction

Une meilleure compréhension du comportement mécanique des peintures de chevalet et des processus de dégradation est indispensable pour assurer leur conservation à long terme et répondre aux exigences d'une conservation des œuvres dans le respect de la déontologie. Cependant, bien que la recherche ait fourni à la fois des données empiriques et théoriques sur le comportement mécanique des toiles peintes, peu d'études ont cherché à analyser les phénomènes mécaniques et le comportement au cours du temps d'une déchirure du support toile.

L'une des questions que pose la reprise d'une déchirure, au-delà de la solidité de son maintien dans le temps, est la question de son invisibilité, et cette question pose celle de la conservation du plan de l'image.

Une peinture de chevalet, à savoir une toile peinte tendue sur un châssis, peut se définir comme la représentation d'une image sur une surface plane, quelle que soit la réalité tridimensionnelle de l'image représentée. Au contraire d'une structure en volume, l'œuvre est lisible dans sa totalité immédiate et le plan de l'image est un élément de sa lisibilité. Plus l'image sera complexe et subtile, plus elle pourra être perturbée par une distorsion de son plan de référence.

Une déchirure qui reste visible par la remontée mécanique des bords ou par le creusement du joint peut gêner la perception de l'image représentée par la rupture qu'elle provoque mais devient aussi un élément perturbateur de l'intégrité du plan de représentation. Elle remet en cause la nature même de l'œuvre et pose la question de sa lisibilité et du niveau d'intégrité structurelle attendu.

L'une des questions essentielles dans la conservation des peintures de chevalet est de limiter la réponse aux contraintes externes afin de réduire les variations des contraintes internes et, donc, les altérations structurelles qu'elles peuvent entraîner. Le moyen le plus simple serait bien sûr de coller l'œuvre sur un support rigide. Si cette solution n'est guère envisageable dans le cadre du respect de l'intégrité de l'œuvre, elle a posé la question de la rigidité comme solution.

Le rentoilage à la colle répond empiriquement à cette attente par le complexe colle protéinique/toile de lin qui, en augmentant la rigidité de l'ensemble toile de rentoilage/toile originale, répond au maintien des déchirures dans le plan, mais avec pour corollaire une très forte augmentation des contraintes internes et une forte réactivité aux variations thermo-hygrométriques.

Malgré le moratoire demandé par Percivall-Prescott (2003) dès la conférence de Greenwich en 1974 à propos des rentoilages et, de manière plus large, du collage d'un support rapporté, malgré le questionnement de W. Mehra sur notre capacité à accepter la présence d'altérations plutôt que le changement de nature que peuvent induire nos traitements, le collage d'une toile ou d'un renfort rapporté au revers de l'œuvre est restée une pratique universelle considérée pendant longtemps comme la mesure la plus adaptée à la consolidation d'une déchirure. Et les méthodes traditionnelles de rentoilage à la colle ont continué à être utilisées pour assurer la conservation de la planéité.

Mecklenburg a montré que les propriétés des différentes couches de peintures évoluent dans le temps vers des registres de plus grande rigidité, là où la toile aura tendance à évoluer de manière contraire (Mecklenburg, 1982). Avec le vieillissement des matériaux constitutifs, le

déséquilibre entre la couche picturale qui se durcit alors que la toile perd en tension et en rigidité ne cesse d'augmenter.

Pour Berger (1993), ce déséquilibre rend inévitable le doublage de la toile pour la rendre plus rigide et préserver l'image représentée. La solution de doubler consiste à coller la peinture déformée sur un support assez rigide pour résister aux forces générées par des charges inégales, la rigidité devenant le facteur majeur de la reprise de la planéité. Un doublage réalisé à titre préventif serait même préférable à des altérations progressives ou à des traitements qui n'ont pas d'effets sur les causes principales de détérioration (Berger, 1990). Ces recherches conduisirent Hedley (1981) à préconiser pour le doublage des œuvres l'utilisation de toiles à haut module d'élasticité, telle la toile polyester de type *sailcloth*, afin de garantir la stabilité.

Pour étudier cette question, l'IIC a lancé dès 1987 un large programme qui s'est poursuivi jusqu'en 2014, ajoutant le facteur temps à l'analyse des données. Pour être efficace dans la reprise des déformations, les doublages doivent supporter la tension imposée à l'œuvre durant un court moment, lors de la mise en tension ou lors d'un choc; durant quelques jours, lors de la relaxation de l'œuvre tendue; quelques mois, face aux variations de température et d'humidité, et de nombreuses années face au vieillissement et au fluage des matériaux (Michalski, Daly, 1996). Si les déchirures ne font l'objet que d'essais rapides et peu étendus, l'ensemble du projet apporte d'importantes données sur la capacité d'un renfort collé au revers d'une peinture sur toile à reprendre et maintenir dans le temps les déformations du support original.

Si les doublages sont moins fréquents aujourd'hui, comme le montrent les études et les analyses publiées, ce n'est pas tant parce que les toiles sont devenues plus stables. Ces dernières années, un changement fondamental est apparu dans la pratique de la conservation-restauration qui a mis l'accent sur la préservation de l'intégrité de l'œuvre et une application croissante du principe d'intervention minimale. Les priorités en matière de conservation cherchent désormais à préserver les matériaux d'origine dans la mesure du possible, ce qui se traduit par une approche différente du choix des interventions.

Au niveau structurel, la notion d'intégrité recouvre la continuité mécanique de la toile tout en conservant *a minima* la stabilité d'origine. Elle rejoint l'idée de modifier le moins possible l'authenticité matérielle de l'œuvre et son comportement dans le temps en réduisant l'apport de matériaux exogènes.

Le collage fil à fil d'une déchirure dans sa compréhension stricte du collage un par un des fils se faisant face, avec la reconstruction du tissage, répond à cette exigence et à la recherche d'une intervention traitant l'altération et elle seule. Le but recherché est de reproduire la trame du textile par un collage et un retissage suffisant pour permettre la mise en tension de l'œuvre sans recourir au collage de pièces ou au doublage de l'œuvre (Flock, 2020). La technique doit permettre de retrouver une résistance élevée permettant la mise en tension et sa conservation dans le temps.

Le critère principal est de reconstituer les propriétés mécaniques et optiques de la toile déchirée et, en ce sens, de retrouver l'armure, la couleur de la toile d'origine et sa résistance à la traction. Dans cette optique, les recherches se sont concentrées sur le choix de l'adhésif, le collage de la déchirure devant offrir une résistance suffisante aux contraintes internes au sein de l'œuvre et empêcher leur propagation (Demuth, 2011).

Or, la reconstitution de la toile support est loin d'être le seul élément à prendre en compte. Les critères de choix de l'adhésif sont à définir en fonction de multiples paramètres dont la résistance à la tension n'est qu'un des aspects.

Comme base de réflexion, Young établira dès 2003 qu'une reprise de déchirure doit permettre de retrouver la continuité physique de la toile, ce qui implique la continuité de son comportement mécanique (Young, 2003).

Elle pose comme critères de réflexion :

- la restauration de l'intégrité mécanique de la toile;
- une résistance adaptée aux contraintes au sein de l'œuvre;
- la question de la propagation de la déchirure;
- une redistribution des contraintes ayant provoqué la déchirure;
- le renfort de la zone fragilisée;
- le maintien de la déchirure dans le plan de l'œuvre.

Malgré ces changements dans la pratique, la recherche ne nous permet pas encore de savoir quelles sont les meilleures méthodes pour stabiliser la structure globale ou comment déterminer la rigidité et l'élasticité requises. Une peinture de chevalet n'est pas une juxtaposition de couches indépendantes mais bien au contraire un stratifié de couches interdépendantes. La reconstruction d'une toile déchirée ne peut se concentrer uniquement sur la consolidation mécanique du support toile, indépendamment des couches qu'elle supporte : encollage, préparation, couche picturale, vernis. Elle doit aussi prendre en compte la réactivité de l'ensemble au cours du temps face aux contraintes extérieures.

Se pose la question de la rigidité comme solution au défaut de planéité et celle de concilier la stabilité et la réduction des contraintes avec le maintien dans le plan d'une œuvre tendue. Les questions des propriétés mécaniques de l'œuvre, de la planéité du support original, de la tension et de la distribution des contraintes similaires à celle de l'œuvre originale restent entières.

Données de l'étude

Caractéristiques d'une déchirure

Les déchirures d'une œuvre peinte sur toile présentent une grande diversité, tant au niveau de l'état matériel de l'œuvre que de la nature même de la déchirure. Ces différents éléments peuvent cependant être regroupés en deux grands types de déchirure : les déchirures à bords coupés net et celles à bords effilochés, qui correspondent à deux mécanismes différents (Flock, 2020).

Si la toile n'est pas mécaniquement fragilisée et offre encore une certaine élasticité ou si la rupture s'est produite lentement, une déformation plastique se produira au moment de la déchirure et les bords de la déchirure ne seront pas nets, les fils seront arrachés, effilochés et les extrémités irrégulières (**fig. 1**). Si la toile est cassante ou la rupture rapide, il y aura peu ou pas de déformations plastiques au moment de la déchirure et les arêtes de la déchirure seront dentelées, les fils cassés, les extrémités courtes et pointues (**fig. 2**).



Figure 1 Déchirures à bords coupés nets. © Marie-Noëlle Laurent.



Figure 2 Déchirures effilochées. © Marie-Noëlle Laurent.

Caractéristiques des différents types de collage

En fonction du type de déchirures, quatre types de collage ont été répertoriés :

- joint bout à bout : les fils se font face sans manque et peuvent être collés au contact;
- joint avec chevauchement : les fils se chevauchent;
- joint par entremêlage des fils : les fils sont très effilochés et peuvent être entremêlés;
- joint avec fil de pontage : la perte de fibres demande un ajout de fibres pour retrouver la continuité du fil.

Le collage d'une déchirure est actuellement défini dans le cadre déontologique de la profession par le « collage fil à fil » et les recherches se sont concentrées sur ce modèle de reprise de déchirure.

Or cette mise en œuvre très précise est chronophage et parfois complexe à mettre en place et la pratique en est parfois très éloignée. En effet, le terme « collage fil à fil » peut donner l'impression d'un collage où les extrémités des fils se font face comme des tiges. Si les fils peuvent dans certains cas particuliers présenter des sections transversales nettes, il est assez courant que leurs extrémités ressemblent davantage à une touffe de fibres, avec des manques ou des fils trop courts qu'il faut pouvoir rapprocher pour coller les sections transversales des extrémités de chaque fil. La grande difficulté de cette technique est aussi le retissage du textile. Ce dernier demande en effet des fils encore suffisamment cohérents pour pouvoir être manipulés et placés rigoureusement les uns au-dessous des autres, un contrôle très précis du sens du tissage et le maintien des fils en place, surtout s'il s'agit de fils rajoutés. Le dépôt de colle se fait au moyen d'une aiguille pour contrôler l'apport d'adhésif et l'utilisation d'un stylo chauffant est considérée comme indispensable pour éviter la diffusion de la colle et conserver un contact correct entre les fils en accélérant le séchage. Dans le cas de déchirures anciennes, si l'œuvre a été très restaurée, le joint peut être englué de colle, de repeints huileux, de mastics impossibles à éliminer sans détruire le fil déjà très altéré et rend d'autant plus difficile la mise en place de fils rajoutés pour le retissage des zones lacunaires.

Caractéristiques de l'adhésif

La question du choix de l'adhésif a fait l'objet de nombreuses expérimentations, reprises de manière systématique et rigoureuse depuis les années 2000. Dans un premier temps, les études ont cherché à déterminer quels critères offraient une réponse adéquate aux problèmes posés par la reprise d'une déchirure afin de définir ses propriétés optimales.

Il est ainsi essentiel que le module d'élasticité de l'adhésif soit suffisamment élevé pour que la mise en tension au niveau de la déchirure se situe en-dessous de son seuil d'élasticité, tout en permettant assez de flexibilité pour éviter toute accumulation de contraintes autour du joint lorsque les contraintes au sein de l'œuvre sont modifiées, par exemple par des variations environnementales. Par ailleurs, il faut aussi que l'adhésif présente peu de fluage mais avec une résistance inférieure à celle de la toile autour du joint.

Dans le cas d'un collage bout à bout, la moindre contrainte pourra générer des forces de compression ou de traction susceptibles d'affaiblir ou de décoller le joint si elles dépassent la résistance de l'adhésif à la flexion ou à la traction-compression. Le renforcement du fil original par un fil rapporté permettra alors de solliciter l'adhésif en cisaillement et d'augmenter la surface de collage.

L'adhésif choisi ne devra pas compromettre les traitements ultérieurs et être facilement repris. L'adhésif devra aussi présenter une bonne mouillabilité facilitant son application et sécher rapidement.

Face à ces données, les colles protéiniques sont apparues comme une alternative intéressante. Elles ont été étudiées dans le cadre d'une reprise de déchirure dès les années 1990, principalement en Allemagne, même si les dispersions de résines vinyliques demeurent toujours très utilisées en raison de leur facilité d'utilisation, de leur flexibilité et de leur meilleure réversibilité par rapport à d'autres adhésifs.

Pose de renforts au revers

Les éléments rapportés, que ce soient des renforts localisés au niveau de la déchirure ou des renforts sur l'ensemble de la surface du support toile dans le cas d'un rentoilage ou d'un doublage, ont pour fonction de consolider la toile rompue et fragilisée. Ils offrent un maintien par recouvrement mais aussi une redistribution des tensions autour de la déchirure. Ils sont aussi choisis pour permettre la conservation dans le temps du plan de l'image. Cette recherche de planéité a pour conséquence pratique la pose de renforts ou d'éléments rapportés permettant de rigidifier l'ensemble. Dans ce cadre, différents systèmes ont été mis en place, soit directement au niveau du collage de la déchirure, avec l'emploi d'adhésifs très peu élastiques et déformables, soit par éléments rajoutés, pièces, éléments perpendiculaires, fils enduits, tiges métalliques (Bracht, 2003). Les pièces anciennes en toile ou en papier ont été remplacées par des systèmes superposés de pièces en matériaux non hygroscopiques de faible épaisseur, pour ne pas déformer la toile originale, mais en couches successives de taille décroissante pour augmenter la rigidité de l'ensemble et tenter de conserver la mise dans le plan par un transfert des contraintes (**fig. 3**).



Figure 3 Systèmes de doubles pièces de renfort en intissé polyester sur monofilament de polyester. © Marie-Noëlle Laurent.

Se pose alors le problème de la déformation induite par ces pièces ou ces éléments rapportés. La pose d'un renfort peut provoquer une déformation sur la face sauf s'il n'induit aucun changement mécanique en étant plus flexible que l'original mais, dans ce cas, il risque de ne jouer qu'un rôle de soutien sans reprise de la déformation (Young, 2003).

Afin d'éviter le risque de remontée des pièces ou des renforts ponctuels mis au revers de la déchirure, les études se sont concentrées sur le collage proprement dit de la déchirure en absence de consolidation supplémentaire du support toile. Les recherches actuelles ont mis l'accent sur la force du collage et le maintien mécanique de la déchirure, les fils de pontage ou les pièces ne pouvant remplacer une connexion solide des fils individuels de l'original (Heiber, 2003). Les renforts rajoutés sont alors perçus comme un simple maintien supplémentaire utilisés uniquement dans le cas d'une fibre très fragilisée, sans questionnement sur leur rôle dans la reprise de planéité.

Si ce choix répond à la volonté d'une intervention minimale, et en considérant qu'un collage fil à fil correctement conduit permet de retrouver la solidité mécanique de l'œuvre sous tension, quelle planéité offre une déchirure consolidée ainsi par un simple collage fil à fil et quelles sont les possibilités de conserver cette planéité dans le temps?

Évolution de la recherche

La reprise d'une perte de cohésion structurelle, déchirure/lacune de toile, peut ainsi être interprétée de deux manières :

- la rigidité comme facteur de maintien dans le plan dans une recherche de stabilité dans le temps;
- la simple reconstruction de la continuité mécanique pour retrouver l'état mécanique de l'œuvre avant déchirure, dans le but d'un traitement minimaliste parfaitement compatible avec toutes les données de l'œuvre.

Étudier la rigidité comme facteur déterminant s'appuyait sur un présupposé lié à la pratique courante. Plutôt que partir de ce présupposé, le propos de cette recherche a été de trouver un moyen de modéliser la réponse mécanique d'une peinture de chevalet dans le cas d'une déchirure du support toile afin d'appuyer le choix du traitement de conservation-restauration sur des mesures objectives, de comprendre l'évolution dans le temps de son comportement et lui apporter le traitement le plus adapté.

La recherche s'est donc orientée vers l'étude d'éprouvettes très simples permettant d'évaluer les mécanismes élémentaires et de définir les paramètres responsables de la déformation au niveau de la déchirure. Une fois les paramètres constitutifs définis, le principe aurait été de modifier une seule variable à la fois au sein du système afin de pouvoir établir un lien direct de causalité entre la variation de planéité du plan de la toile par rapport au facteur modifié. Cette étude ne suffirait pas si elle n'était pas mise en perspective et si l'évolution de ces différents systèmes n'est pas étudiée au cours du temps, d'autant que la déformation de la déchirure restaurée n'est pas toujours immédiate. Ces différents systèmes devaient donc être soumis à des variations de l'humidité et/ou de la température en fonction de cycles qui permettraient d'étudier leur comportement mécanique au cours du temps.

Nous pouvons considérer en quelque sorte que l'étude du comportement d'une peinture sur toile déchirée et restaurée revient à se placer dans un référentiel défini par trois axes : un axe correspondant aux caractéristiques de l'éprouvette déchirée, par exemple l'axe x, l'axe

y pour les caractéristiques de l'éprouvette restaurée en fonction des différentes méthodes mises en place et l'axe z pour les facteurs de dégradation. Cette approche permet de visualiser les différents plans d'expérience possibles. Il est ainsi possible d'étudier le comportement d'une œuvre pour un type de restauration en faisant varier les caractéristiques de l'œuvre ou, à l'inverse, étudier une œuvre en fonction des différentes restaurations possibles. Croiser l'étude de différents types d'œuvres déchirées avec les différents traitements possibles revient à se situer dans le plan xy au temps T de la restauration. Il est aussi possible de se déplacer sur l'axe z en fonction des facteurs de dégradation étudiés.

Si une étude dans le temps de toutes les variations de contrainte possibles venait compléter la recherche, c'est l'ensemble du corpus de la conservation-restauration qui serait étudié. La recherche s'est ainsi rapidement heurtée à l'impressionnante quantité de paramètres à faire varier. En effet, choisir ne serait-ce que 4 types de peinture différents, 2 types de déchirure, dans les deux sens (trame et chaîne), 2 méthodes de collage du joint et 4 types de renfort possibles, dans le cadre d'une étude statistique même très réduite de 5 échantillons répétés, donne pour résultat plus de 600 éprouvettes, alors que le choix du type de peinture est déjà fort restreint. Réduire drastiquement ces paramètres posait le risque de passer à côté d'un paramètre essentiel sans que le choix puisse être réellement justifié. Quant à l'évolution dans le temps du comportement mécanique de la déchirure, elle est en effet un élément fondamental qui ne peut être réduit aux simples variations climatiques, les variations thermo-hygrométriques n'étant qu'un facteur parmi d'autres.

Plutôt qu'aborder l'étude de la déchirure par des modèles prédictifs, nous avons décidé de concentrer notre recherche sur les différents systèmes de restauration possibles et, plus particulièrement, sur la pose de renforts ponctuels. Une seule éprouvette serait prise comme éprouvette de référence et l'impact sur la reprise de planéité de différentes restaurations serait étudié à travers les variations hygrométriques qu'elle peut subir dans le temps.

Le choix des paramètres d'intervention s'est appuyé sur l'étude de terrain réalisée auprès des professionnels de la conservation structurelle des peintures de chevalet. Les méthodologies mises en œuvre sont extrêmement précises et les recherches ont montré que la manière de les réaliser joue un rôle essentiel dans le résultat. Parallèlement à un sondage permettant d'interroger l'ensemble de la profession, nous avons procédé par témoignages et rencontres directes. Nous pouvons ainsi détailler plus précisément les méthodologies pratiquées et affiner notre questionnement. Les premiers éléments qui se dégagent font apparaître comme méthodologie courante ou innovante, la pose de fils collés transversalement sans pose de renforts systématique, la recherche de rigidité au moyen de renforts spécifiques avec une recherche parfois très poussée des matériaux utilisés, l'utilisation de tiges rigides collées en travers du joint de collage.

Méthodologie d'observation

La corrélation d'images numériques 3D (DIC) s'est imposée, après plusieurs essais, comme la méthode la plus adaptée à notre étude. En effet, pour observer et quantifier les déformations, nous avons besoin d'une méthode capable d'enregistrer simultanément les déplacements dans le plan et hors plan et de les quantifier en fonction des contraintes auxquelles le matériau est soumis.

La DIC 3D répond parfaitement à cette attente. Il s'agit d'une technique sans contact qui peut fournir une mesure tridimensionnelle des déformations et des déplacements dans le plan et hors plan.

Dans la méthode DIC 3D, pour chaque état d'un objet, deux images sont enregistrées simultanément par deux caméras qui regardent l'objet depuis des directions légèrement différentes. Pour effectuer la corrélation, la zone d'intérêt est divisée en une grille virtuelle, régulièrement espacée (sous-ensembles). Les déplacements sont calculés pour chaque point de cette grille afin de déterminer la déformation à travers tout le champ. Chaque point $P(x,y)$ dans l'image de référence (avant la déformation) est comparé à son état déformé $P'(x',y')$. Les algorithmes de corrélation comparent les sous-ensembles de l'image de référence avec les mêmes sous-ensembles dans les images suivantes. En faisant correspondre les motifs, le logiciel calcule les vecteurs de déplacement pour chaque sous-ensemble. Les données de déplacement sont ensuite traitées pour calculer les champs de contrainte à partir des gradients spatiaux de déplacement par un logiciel de traitement d'image, en l'occurrence le logiciel Istra 4D V.4.4.7 de Dantec Dynamics. La condition préalable est la présence d'un modèle stochastique adapté à l'enregistrement pour la comparaison inter-images. Dans le cas de notre éprouvette, les irrégularités de surface ou la structure de tissage suffisent à obtenir une image (fig. 4). Grâce aux avancées des capteurs photographiques, cette méthode permet d'observer les déformations sur une large gamme de déplacements, y compris des mouvements très faibles. Il est alors possible de suivre et de visualiser de manière dynamique ou statique les déplacements et les déformations dans le plan et hors plan. La mesure peut se faire soit par rapport à la première image de référence, soit par rapport à l'image précédente sous la forme d'une corrélation incrémentale.

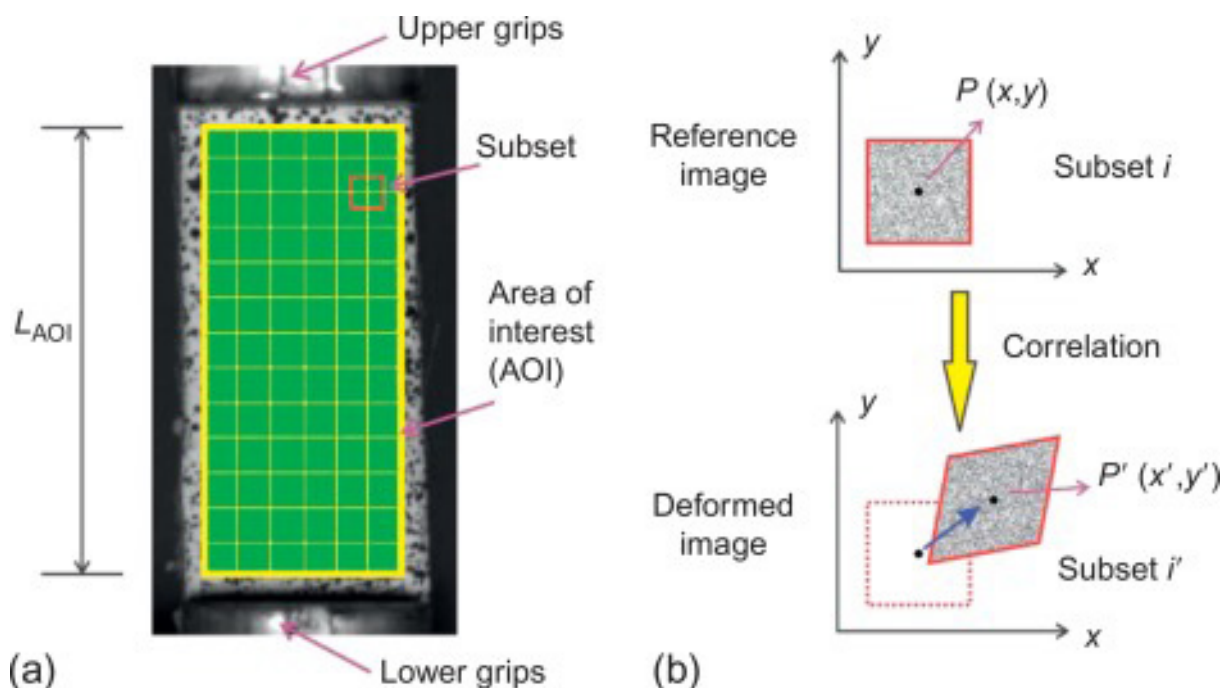


Figure 4 Schéma de corrélation. © Marie-Noëlle Laurent.

Conclusion

La méthodologie ainsi mise en place, l'observation du domaine d'étude va pouvoir être entamée. Les éprouvettes seront observées dans leur état initial et des ensembles seront ensuite constitués pour chaque adhésif retenu. Chaque groupe sera déchiré et observé en DIC-3D avant et après collage du joint. Les éprouvettes seront alors réparties en quatre ensembles. L'un sera laissé sans renforts collés, les trois autres seront traités suivant les trois types de renfort retenus. L'analyse des déformations et des contraintes internes en DIC-3D sera réalisée au moment du collage. Les œuvres seront ensuite observées sur le long terme à travers des cycles contrôlés de variations hygrométriques.

Cette recherche se propose de questionner la restauration d'une déchirure par des renforts localisés sous l'angle de son maintien dans le plan, avec la notion de rigidité comme point de départ de la réflexion. La question sera de déterminer quels sont réellement les facteurs prédominants et si la seule reconstitution mécanique du joint est envisageable sans autre apport de matériaux exogènes. Cette recherche se place dans un débat plus large concernant la question de ce qu'est une intervention minimaliste et de ce que sont réellement les critères de choix prédominants. Si la réversibilité, le respect de l'intégrité de l'œuvre peuvent conduire à des interventions peu invasives, la question même de la notion de planéité est à interroger dans notre rapport à la sensation d'altération.

Ce travail a bénéficié du soutien de l'École universitaire de recherche *Humanités, Création, Patrimoine* (EUR PSGS HCH) et d'une aide de l'État gérée par l'Agence nationale de la recherche au titre du Programme d'investissements d'avenir, intégré à France 2030, portant la référence ANR-17-EURE-0021.

Références bibliographiques

Ackroyd P. (1995), « Glue-paste lining of paintings: an evaluation of the bond performance and relative stiffness of some glue-paste linings », dans UKIC (éd.), *Review: lining and backing - The support of paintings, paper and textiles*, London, United Kingdom Institute for conservation, p. 83-91.

Berger G. A., Russell W. H. (2000), *Conservation of paintings. Research and innovations*, London, Archetype Publications, 360 p.

Berger G. A., Russell W. H. (1993), « Tears in canvas paintings: resulting stress changes and treatment », dans ICOM (éd.), *ICOM Committee for Conservation Triennial Meeting*, Washington, USA, p. 113-117.

Berger G. A., Russell W. H. (1990), « Changes in resistance of canvas to deformation and cracking (modulus of elasticity "E") as caused by sizing and lining », dans ICOM (éd.), *ICOM Committee for Conservation Triennial Meeting*, Dresden, Germany, p. 107-112.

Berger G. A., Russell W. H. (2000), « Tears in canvas paintings and their proper closing », dans *Conservation of paintings. Research and innovations*, London, Archetype publications, p. 45-61.

Demuth P., Vogel H., Nagler C., Reuber L. (2011), « Review: adhesives for thread-by-thread tear mending in torn fabric-supported paintings », dans CCI (éd.), *Proceedings of symposium Adhesives and consolidants for conservation: research and applications*, Ottawa, Canada, Canadian Conservation Institute, p. 242-275

Floch H., Diebels S., Jägers E., Possart W. (2020), « Thread-by-thread tear mendings in conservation of canvas paintings: a problem of reproducibility in bonding qualities », *The journal of adhesion*, Vol. 99 N° 14, p. 1-22.

Floch H., Diebels S., (2021), « New investigations of adhesives for tear repair of canvas paintings », *Studies in conservation*, N° 66, p. 321-343.

Floch H., Demuth P., Diebels S., Jägers E. (2022), « Will it hold? About the single thread bonding technique », dans CCR La Venaria Reale (éd.), *Structural treatments on double sided paintings*, 1 (2), La Venaria Reale, CCR La Venaria Reale, p. 168-199.

Floch H., Demuth P., Diebels S., Jägers E. (2023), « The thread-by-thread tear-mending method: new insights into the choice of adhesives and their application », dans Schwarz et al (éd.), *Conserving canvas*, Los Angeles, Getty Publications, p. 234-246.

Glanzer I., Bracht E., Wijnberg L. (2006), « Cathedra - Barnett Newman », *Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung*, 20 (1), p. 63-86.

Gerry H. (1981), « The stiffness of lining fabrics: theoretical and practical considerations » dans ICOM (éd.), *ICOM Committee for Conservation Triennial Meeting, Ottawa, Canada, Paris, ICOM, 81/2/2, 13 p.* Disponible sur : Preprints : ICOM Committee for Conservation, 6th triennial meeting, Ottawa, 21-25 September 1981 : ICOM Committee for Conservation. Meeting (6th : 1981 : Ottawa, Ontario) : Free Download, Borrow, and Streaming : Internet Archive (consulté le 23/3/2025).

Heiber W. (1996), « Die Rissverklebung », *Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung*, 10 (1), p. 117-144.

Heiber W. (2003), « The thread-by-thread tear mending method », dans Bustin M., Caley T. (éd.), *Alternatives to lining: the structural treatment of paintings on canvas without lining*, London, United Kingdom Institute for conservation, p. 35-48.

Heiber W. et al. (2020), « Tear mending and other structural treatments of canvas paintings before or

instead of lining », dans Hill Horner J., Rushfield R., *Conservation of easel paintings*, London, Ed. JC, RR, 34 p.

Hough P., Michalski S. (1999), « Preliminary results of a research project exploring local treatments of cupped cracks in contemporary paintings », dans ICOM (éd.), *ICOM Committee for Conservation Triennial Meeting*, Lyon, France, 8 p.

Mecklenburg M., McCormick-Goddhart M. (1994), « Investigation into deterioration of paintings and photographs using computerized modeling of stress development », *Journal of the American Institute for Conservation*, Vol. 33, No. 2, p. 153-170.

Mecklenburg M. (2022), « An introduction to mechanics and the Giulio Cesare Procaccini double-sided banner », dans CCR La Venaria Reale (éd.) *Structural treatments on double sided paintings*, 1(2), La Venaria Reale, CCR La Venaria Reale, p. 233-242.

Percival-Prescott W. (2003), « The lining cycle: causes of physical deterioration in oil paintings on canvas - lining from the 17th century to the present day », dans *Lining paintings : papers from the Greenwich Conference on Comparative Lining Techniques*, London, Archetype publications, p. 1-47.

Young C. (2003), « The mechanical requirements of tear mends », dans UKIC (ed.), *Alternatives to lining: the structural treatment of paintings on canvas without lining*, London, United Kingdom Institute for conservation, p. 120-128.

Young C. (2023), « Canvas complexity: the life of a complex composite », dans Schwarz, C., McClure, I. and Coddington, J. (eds.), *Conserving Canvas*, Getty Publications: Los Angeles, p. 120-128.

Les auteurs

Marie-Noëlle Laurent-Miri* Conservatrice-restauratrice de peintures de chevalet, doctorante à l'université Cergy-Paris, Centre Voltaire de conservation-restauration, 20 rue Voltaire, 93100 Montreuil, marienoelle.laurent@gmail.com

Thierry Sarmant Conservateur général du patrimoine, archiviste paléographe, chercheur associé à l'UMR Heritage, thierry.sarmant@culture.gouv.fr

Nicolas Wilkie-Chancellier Professeur des universités, CY Cergy-Paris université, laboratoire SATIE-UMR 8029, nicolas.wilkie-chancellier@cyu.fr

Sandie Le Conte Responsable du laboratoire de recherche de l'INP, sandie.leconte@inp.fr

Antonio Iaccarrino-Idelson CEO de Equilibrato SRL, conservation company, iaccarino.a@gmail.com

Pierre Leveau Docteur ès philosophie, université Aix-Marseille, pierre.leveau@ac-aix-marseille.fr

* auteur à qui doit être adressée la correspondance

ÉTAT DE CONSERVATION D'UN BIEN CULTUREL. PRÉCISION SÉMANTIQUE ET CONCEPTUELLE

Grazia Nicosia, Julien Longhi, Bruno Bachimont

Résumé

Aujourd'hui, la généralisation des systèmes d'information de gestion (SIG) ne cesse de réinterroger les standards de nos documents, les processus de production et la structuration de l'information produite. La clarification sémantique et conceptuelle du constat d'état s'avère aujourd'hui impérieuse afin de garantir une interopérabilité des systèmes d'information et de leur migration. Cet article précisera le sens du concept *état* dans le cadre de l'examen diagnostique et s'inscrira dans les champs disciplinaires de la conservation-restauration, de la documentation muséale et de la linguistique par l'analyse discursive textuelle (ADT). Après un état de l'art, relevant les usages et sens du terme *état* dans la littérature contemporaine spécialisée en conservation-restauration, nous compléterons cette étude, à l'aide d'outils textométriques, par l'analyse de textes fondateurs de la discipline moderne de la conservation-restauration, relevant de formations discursives (FD) différentes, au sens foucauldien du terme, mais adressées à un même public expert. Nous démontrerons que le concept d'*état* passe d'une formation discursive à l'autre sortant d'un registre physicaliste pour s'inscrire dans une perception phénoménologique. L'état est alors la résultante d'une représentation holistique de la matérialité, de l'identité et de la fonctionnalité du bien, basé sur une mémoire et des références sous-jacentes communes.

Abstract Today, the widespread adoption of Management Information Systems (MIS) continually challenges the standards of our documents, production processes, and the structuring of the information produced. Clarifying the semantics and conceptual underpinnings of the condition report is now imperative to ensure system interoperability and facilitate their migration. This article will clarify the meaning of the concept of *state* within the context of diagnostic evaluation and will integrate the scope of conservation-restoration, museum documentation, and linguistics through discursive textual analysis (DTA). After reviewing the current literature, which highlights the usage and meanings of the term *state* in specialised contemporary conservation-restoration literature, we will supplement our study using textometric tools with the analysis of foundational texts from the modern conservation-restoration discipline -texts which stem from different discursive formations, as defined by Foucault, but are yet intended for a same expert audience. We will show that the concept of *state* shifts from one discursive formation to another, moving from a physicalist register to a phenomenological perception. In this perspective, the *state* becomes the outcome of a holistic representation of the materiality, identity, and functionality of the object, based on an underlying shared memory and common references.

Resumen Hoy la generalización de los sistemas de información y de gestión (SIG) interroga los estándares de nuestros documentos, los procesos de producción y la estructuración de la información producida. La clarificación semántica y conceptual del informe del estado aparece necesaria para garantizar la interoperabilidad de los sistemas de información y de su migración. Este artículo precisa el sentido del concepto *estado* en el marco del examen diagnóstico y se inscribe en los campos disciplinarios de la conservación-restauración,

de la documentation de musée y de la linguística por medio del análisis discursivo textual (ADT). Después de un estado del arte, subrayando el uso y sentido del término *estado* en la literatura contemporánea especializada en conservación-restauración, completaremos este estudio con el análisis de textos fundadores de la disciplina moderna de la conservación-restauración mediante útiles textométricos, relacionado con formaciones discursivas diferentes, en el sentido que le da Foucault, pero dirigidas a un mismo público experto. Demostraremos que el concepto de estado pasa de una formación discursiva a la otra saliendo de un registro fisicalista para inscribirse en una percepción fenomenológica. El estado es así el resultado de una representación holística de la materialidad, de la identidad y de la funcionalidad del bien, basado sobre una memoria y referencias subyacentes comunes.

Mots-clés patrimoine culturel matériel, constat d'état, diagnostic, conservation-restauration, analyse discursive textuelle

Introduction

Dans le langage courant, les constats d'état sont nommés soit par leur nature (constat comparatif, diagnostic) soit par leur destination (constat de récolement, de prêt ou de traitement). Cependant, lorsqu'il s'agit de les classer de manière formelle, d'autres taxonomies émergent. Le CEN les classe, par exemple, en trois catégories fonctionnelles dans sa norme dédiée au constat d'état (NF EN 16095, 2012) : la connaissance et la compréhension, le suivi de l'état de conservation et la programmation. Le *Collection Trust*¹ les répartit en revanche en trois niveaux différents, dans la norme *Spectrum*, selon le niveau d'expertise et de qualification du rédacteur. Les objectifs, le statut et le contenu du document peuvent changer, mais le constat d'état reste invariablement l'enregistrement de l'état du bien (NF EN 15898, 2019). Son évaluation, contrairement à l'état de santé qui repose sur des constantes physiologiques prédéfinies, est relative, au sens où elle porte sur la différence qui existe entre l'état actuel du bien et son état de référence, qui se rapporte soit à un état antérieur soit à une représentation de son intégrité matérielle présumée. Mais que relève-t-on lorsque l'on enregistre l'état d'un bien, son état de conservation ou son état général ?

Dans cet article, nous nous efforcerons de clarifier la signification du concept d'état dans le contexte de l'examen diagnostique, en situant son étude dans les domaines disciplinaires de la conservation-restauration, de la documentation muséale et de la linguistique par l'analyse discursive textuelle (ADT).

Nous commencerons par dresser un état de l'art, en relevant les usages et les différents sens du terme dans la littérature contemporaine spécialisée en conservation-restauration. Puis, nous les confronterons à l'étude du concept dans deux textes fondateurs de la discipline à l'aide d'outils textométriques. Nous caractériserons enfin, dans une dernière partie, les sens du terme *état*, pour en proposer un raffinement sémantique contextualisé qui contribuera au raffinement des ontologies (Bachimont, 2000) dans le champ de l'examen diagnostique en conservation-restauration.

¹ Collection *Trust* vise, avec la création de la norme *Spectrum*, à l'unification des procédures muséales.

Méthode

Le corpus

Nous avons choisi, dans un premier temps, d'inventorier les usages et les sens contemporains de l'*état* dans des publications internationales de genres différents : normatif (CEN), procédural (ECCO) et ontologique (CIDOC-CRM). Cette étude ne se veut pas exhaustive, mais dresse plutôt un paysage langagier général, dans le champ actuel de l'examen diagnostique en conservation-restauration.

Nous avons souhaité compléter cette analyse de publications contemporaines par l'étude de textes fondateurs de la discipline pour relever d'éventuelles divergences ou similitudes dans le traitement du concept d'*état*. Notre choix s'est porté sur deux ouvrages du milieu du XX^e siècle, de genres discursifs opposés, mais adressés à un même public expert. Le premier, théorique, est publié par Cesare Brandi en 1963 et le second, narratif, est un collectif consacré à une étude de cas, dirigé par Paul Coremans, en 1953.

On ne les a pas seulement choisis parce qu'ils font partie des textes fondateurs de la discipline moderne de la conservation-restauration, mais aussi et surtout parce qu'ils relèvent de formations discursives (FD) différentes, au sens foucaldien du terme (Foucault, 2008). Ces dernières se définissent comme des pratiques langagières partagées par une communauté, caractérisées par des connaissances, des pratiques ou des idéologies socioculturelles communes (Oger, 2019).

Après la Seconde Guerre mondiale, l'historien d'art Cesare Brandi et le chimiste Paul Coremans, qui dirigeaient respectivement un institut de restauration et un laboratoire du patrimoine, ont posé les principes et défini les moyens à mettre en œuvre pour résoudre, dans le secteur des peintures, l'énigme léguée par les siècles passés, conformément aux résolutions prises par la communauté internationale dans l'entre-deux-guerres (Leveau, 2017). Leurs formations académiques – en sciences humaines pour l'un, en sciences de la nature pour l'autre – expliquent leurs approches radicalement différentes de l'œuvre d'art. Tandis que C. Brandi la considère comme un objet intentionnel à reconnaître (Brandi, 2021), dans une perspective phénoménologique, Paul Coremans la tient pour un objet matériel à traiter (Coremans, 1953) d'un point de vue physicaliste. Ces approches firent d'eux les chefs de file de FD et d'écoles rivales dans le paradigme de la conservation-restauration, qui se normalisait simultanément.

L'Agneau mystique au laboratoire, dirigé par Paul Coremans, édité en langue française, comprend douze chapitres. Nous avons focalisé notre étude sur les neuf premiers, qui traitent spécifiquement de la matérialité de l'œuvre et de sa restauration. Nous n'avons pas intégré les chapitres traitant de l'étude stylistique des frères Van Eyck. La *Teoria del restauro* de Cesare Brandi a été publiée en 1963 à Rome. Nous avons choisi d'étudier les huit premiers chapitres de la publication en langue italienne, à l'exclusion de ses appendices, édités en 2000 par Einaudi (Brandi, 2000). Ces deux publications ont été analysées à l'aide d'outils textométriques.

Analyse textuelle discursive et textométrie

L'analyse discursive textuelle (ADT) postule que le sens des mots n'existe pas en soi et qu'ils sont inclus dans des champs langagiers spécifiques (Rastier, 1998) avec lesquels ils

interagissent : les FD. Si deux mots différents A et B sont simultanément présents dans un segment de texte, A sémantise B et inversement.

Les méthodes d'analyse textométrique (Lebart *et al.*, 1994) proposent une quantification de ces cooccurrences, c'est-à-dire un comptage des mots et des relations qu'ils ont entre eux dans un segment de texte défini.

Nous utiliserons pour chaque auteur deux typologies d'exploitation de données : la classification hiérarchique descendante (CHD) et l'analyse factorielle correspondante (AFC). La CHD identifie des classes statistiques d'après les univers lexicaux mobilisés dans le texte. Elle permet une différenciation et une hiérarchisation des thèmes abordés par les auteurs. L'AFC met en évidence la proximité lexicale des mots et des classes sous la forme d'un graphique. Les formes se distribuent autour de deux axes perpendiculaires qui font apparaître des oppositions et des rapprochements lexicaux.

Les textes ont été préalablement lemmatisés² : les formes différentes d'un même mot sont regroupées sous une forme unique afin d'optimiser les études statistiques. Les textes ont été formatés pour être analysés : conversion en format texte, suppression des notes et des numéros de pages. Nous avons choisi une variable correspondante au chapitrage du texte.

D'après ces résultats, nous pourrions identifier les thèmes majeurs développés par les auteurs et vérifier dans quelle classe lexicale le lexème *état* est catégorisé. Cette analyse nous permettra d'identifier les ascendances sémantiques (Longhi, 2009) proposées par les auteurs.

Outils textométriques : Iramuteq et TXM

Nous avons utilisé deux logiciels d'analyse textométrique, libres de droits : Iramuteq³ et TXM⁴. Le second, utilisé pour le corpus de publications contemporaines, permet la localisation et le comptage de groupes de mots et d'expressions (voir plus loin « Analyse du corpus de textes contemporains »); le premier, fondé sur la méthode Alceste créée par Marx Reinert, est basé sur les langages R et Python et propose les fonctionnalités CHD et AFC (voir plus loin « Analyse du corpus des deux textes historiques »).

Résultat

Analyse du corpus de textes contemporains

Le Comité européen de normalisation, CEN/TC 346, qui a pour mission de rédiger et de réviser les normes du domaine de la conservation des biens culturels, aborde, dans trois de ses publications, les concepts qui nous intéressent : NF EN 15898 (2019) qui fixe les principaux termes généraux du domaine, NF EN 16095 (2012) qui établit les prescriptions pour l'établissement du constat d'état des biens mobiliers et NF EN 16853 (2017) qui définit le processus de conservation-restauration.

² La lemmatisation permet de regrouper sous un même lemme des formes dérivées, les verbes conjugués, par exemple, sont lemmatisés par leur infinitif, ou les adjectifs par le masculin singulier. Le lemme *état* renvoie ainsi à 2 formes : *état* et *états*.

³ <http://www.iramuteq.org/>

⁴ <http://textometrie.ens-lyon.fr/>

Nous avons ainsi identifié 55 occurrences du terme *état*, hors *constat d'état* qui a un sens spécifique. Il est associé dans 38 % des cas à un groupe nominal marquant une appartenance (du bien, du patrimoine, de l'objet, de la collection) ou seul à 35 % (sans épithète ou groupe nominal). Il est également qualifié à 16 % par un adjectif (*stable, approprié, comparable, physique, antérieur et actuel*), l'*état de conservation* ne représente ici que 7 % des occurrences.

Le terme *état* désigne dans ces normes la même idée de condition matérielle d'un bien culturel. Dans la NF 15898 une section est consacrée à la *description de l'état* (§ 6.6) qui est définie comme l'enregistrement des informations constatées et des changements soupçonnés par rapport à un *état* soit antérieur, soit initial, soit précédemment constaté. L'appréhension du changement physique induit factuellement un comparatif avec un état de référence qui n'est plus, mais qui est soit documenté soit conjecturé.

Le CEN catégorise les modifications selon leurs origines : anthropiques ou naturelles. L'altération est définie comme le résultat d'un jugement qualitatif et évaluatif observable par les adjectifs (*favorable, bénéfique*).

Contrairement à l'approche définitoire du CEN, ECCO adopte une démarche procédurale. Elle conçoit la conservation-restauration comme un projet, dont elle détaille les étapes dans une carte conceptuelle (ECCO *et al.*, 2023, p. 18-19). L'*état du bien* ou l'*état de conservation* ne sont pas nominativement cités, tandis que l'*état physique* l'est au 2^e rang du processus de l'examen diagnostique. Les concepts que l'ECCO et le CEN utilisent s'avèrent assez similaires, malgré leurs approches et leurs terminologies différentes. L'*état physique* désigne, dans les deux modèles, la condition matérielle du bien culturel.

La référence à un état antérieur, selon ECCO, est implicite dans « l'histoire des changements » et dans les « causes d'altération ». Ces dernières étant le résultat du diagnostic, elles sont le corollaire ici de la « collecte de preuves », que nous pouvons considérer comme une interprétation sémiotique des signes présents.

Diverses ontologies ont modélisé les concepts qui nous intéressent dans le domaine patrimonial, dont celle du CIDOC CRM, inspiré par la classification de Ranganathan (Tzompanaki *et al.* 2011). Nous retrouvons les dimensions immatérielles (E28) et matérielles (E18) propres au patrimoine culturel. L'état de conservation (E3) est une sous-classe de l'entité temporelle (E2). C'est, plus précisément, la résultante de l'activité (E7) de l'évaluation de l'état (E14). Il décrit la condition physique, caractéristique ou prédominante, d'un objet matériel pendant une période de temps spécifique E52 (Le Boëuf, 2013) (**fig. 1 et 2**).

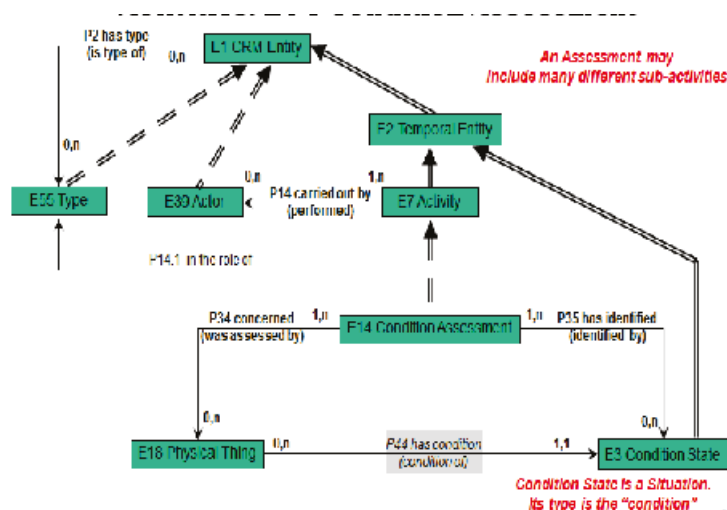


Figure 1 Activités : E14 Évaluation de l'état (d'après Doerr, Stead, 2009, p. 31).

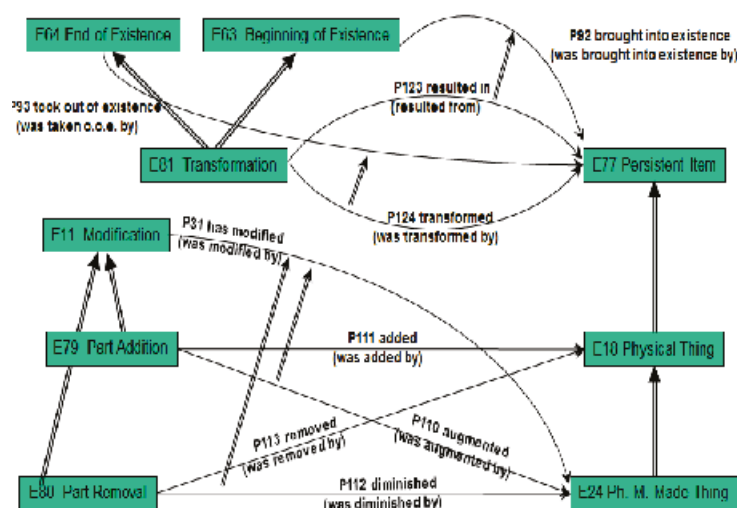


Figure 2 Possibilité de changement des objets (d'après Doerr, Stead, 2009, p. 36).

Cette ontologie offre plusieurs moyens pour catégoriser le changement de l'état de conservation. Le fait qu'il existe plusieurs solutions pour modéliser une même information (Szabados *et al.*, 2012, p. 13-15) compromet l'interopérabilité des systèmes (fig. 3).

Plusieurs extensions du CIDOC-CRM affinent les concepts d'*état de conservation* et de changement en choisissant des entrées par domaine (Moraitou *et al.*, 2019), ce qui diversifie les moyens de catégorisation. Citons par exemple Core (Moraitou *et al.*, 2018), ou Parcours (Bannour *et al.*, 2018) qui considèrent les altérations comme des événements et les catégorisent selon leur localisation et leur agent dégradant. Mondis (Cacciotti *et al.*, 2013) propose un système plus complexe, où l'altération est reconnue d'après une manifestation tangible, puis catégorisée suivant son phénomène et son agent dégradant. Nubes Sacre (Messaoudi *et al.*, 2019) a été développé pour lier des relevés 3D à des données hétérogènes dans un système holistique qui catégorise ici les altérations en données spatiales et morphologiques.

Le concept d'*état* présente un caractère polysémique qui pose un problème de constante de valeurs dans le relevé d'informations lors du diagnostic en conservation-restauration (Païn, 2020). L'état de l'art conduit à le présenter comme un relevé de la matérialité du bien qui n'exclut pas forcément les valeurs patrimoniales. Les modifications de l'état sont perçues, suivant le domaine d'application, soit comme la résultante d'une activité humaine, d'événements naturels ou circonstanciés, soit comme une spécificité physique d'un bien, soit comme un changement d'identité du bien, dans les cas extrêmes.

Classes	Superclasses		Examples
Condition state (E3)	Temporal entity (E2)		The Peterhof Palace near Saint Petersburg being in ruins from 1944 – 1946 (E3)
Condition assessment (E14)	Condition state (E3)		1997 condition assessment of silver cup 232 (E14) has identified oxidation traces were present in 1997 (E3)
Modification (E11)	Activity (E7)		The impregnation of the Vasa warship in Stockholm for preservation after 1956
Transformation (E81)	Beginning of existence(E63)	End of existence(E64)	The death and mummification of Tut-Ankh-Amun (transformation of Tut-Ankh-Amun from a living person to a mummy) (E69, E81, E7)
Physical feature(E 26)	Physical object(E19)		The damage to the nose of the great sphinx in Giza

Figure 3 Tableau récapitulatif des classes permettant l'inscription de la modification d'un bien culturel. Classes et exemples (d'après CRM Special interest group, 2020, p. 44-88).

Ces divergences issues des différences d'interprétation des domaines d'application des extensions du CIDOC-CRM sont induites soit par la typologie des objets (archéologie, peinture, monument), soit par le champ disciplinaire (sciences appliquées, histoire de l'art, conservation-restauration, documentation). Ces divergences induisent une hétérogénéité des valeurs associées au constat d'état qui met en cause le principe même d'interopérabilité des systèmes et de leur migration.

Analyse du corpus des deux textes historiques

Dans *L'Agneau mystique*, hors l'expression *constat d'état*, la forme *état* est citée 60 fois, dont 43 occurrences sont qualifiées par un adjectif (*actuel, originel, matériel, général, mauvais, bon, satisfaisant, parfait, meilleur*); 17 sont complétées par un groupe prépositionnel marquant une appartenance (*du bien, des tableaux, du patrimoine*) et, enfin, 12 se retrouvent associées dans l'expression *état de conservation*.

Cesare Brandi utilise en revanche peu la forme *stato*; nous ne dénombons que 11 occurrences, soit qualifiées par les adjectifs *original* (1), *précédent* (1) *parfait* (1) et *imparfait* (1), soit complétées par des groupes nominaux *de consistance de la matière* (3), *de conservation de la matière* (1), *de ruine* (1), *dans le quel il se trouve* (1) et enfin *dans tous les états qu'il a traversés* (1).

Paul Coremans, L'Agneau mystique au laboratoire (1953)

La figure 4 propose une classification hiérarchique descendante (CHD) du texte de *L'Agneau mystique au laboratoire*. Sur les 1271 segments de texte, 1061 segments analysés ont été répartis (83,48 %) en 6 classes.

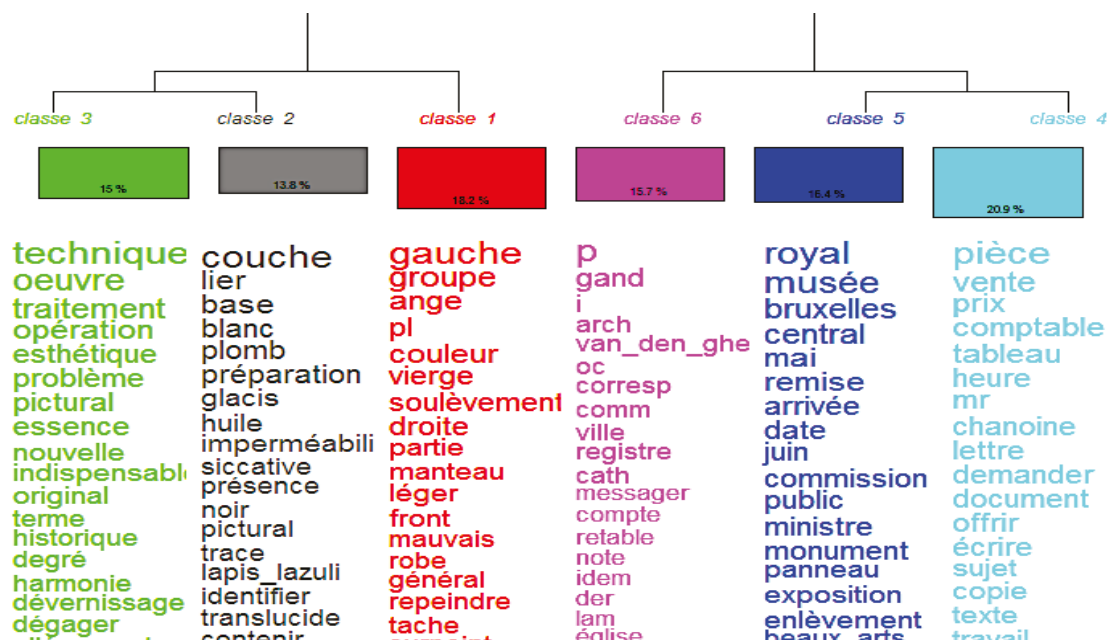


Figure 4 Classification hiérarchique descendante (CHD).

Deux ensembles se distinguent : les classes 1,3 et 2 d'une part; les classes 4, 5 et 6 d'autre part. À la lecture des lexèmes et des segments représentatifs de chacune d'elles, nous avons pu déduire les thématiques suivantes, hiérarchisées comme indiqué dans la figure 5.

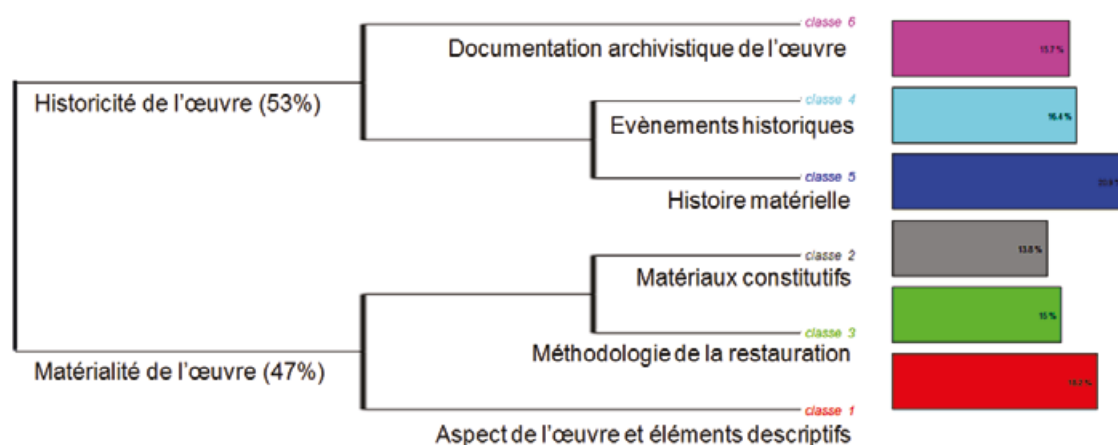


Figure 5 Dendrogramme de CHD et identifications des thématiques.

Le graphe de l'AFC (fig. 6) permet de visualiser la proximité sémantique des lexèmes et des classes du corpus étudié. Nous observons une scission de part et d'autre de l'axe des ordonnées qui oppose l'historicité à la matérialité de l'œuvre. Les classes 3 (méthodologie de la

restauration) et 4 (événements historiques) ont une place centrale et se confondent le long de l'axe vertical.

La classe 3 (méthodologie de la restauration) est également centrale vis-à-vis de l'axe des abscisses, qui sépare aussi la classe 2 (matériaux constitutifs) de la classe 3 (aspect de l'œuvre).

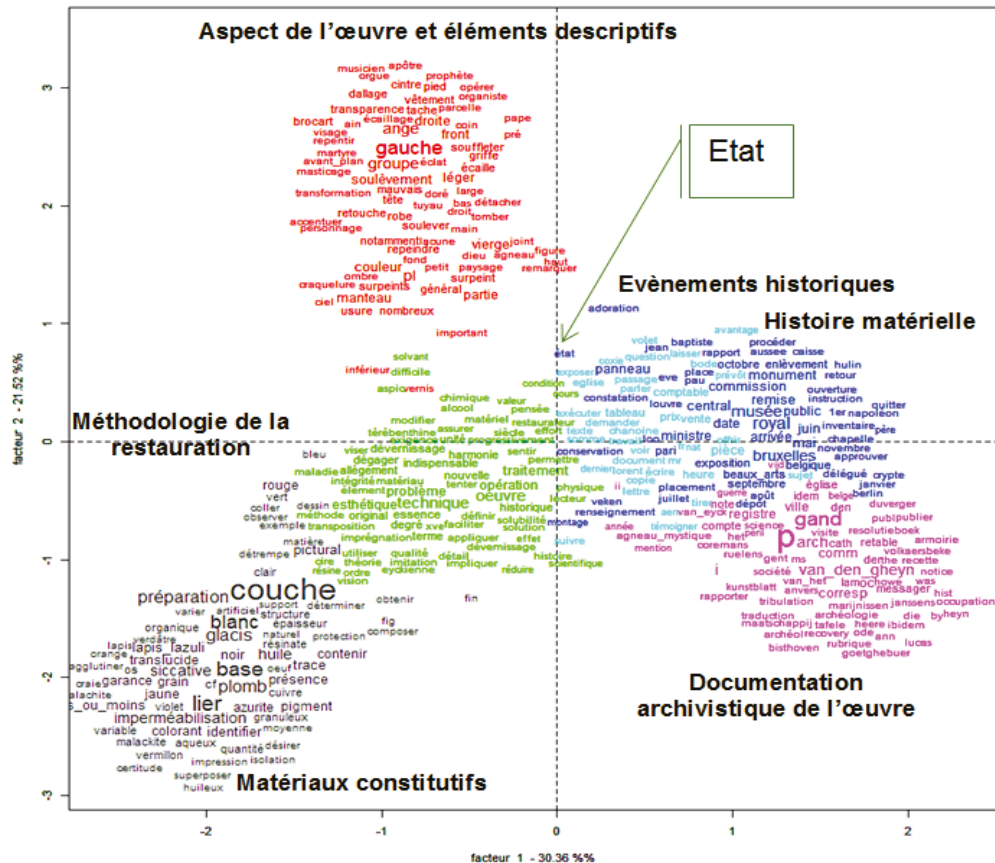


Figure 6 Analyses factorielles des correspondances.

Le lexème *état* est ici inclus dans la classe 5 (histoire matérielle de l'œuvre) et se situe sur la partie positive des abscisses, sur l'axe des ordonnées. Il a ainsi une place centrale entre les classes 1 et 3, d'une part, 4 et 5, d'autre part. Le lexème *état* est ainsi à équidistance de la triangulaire thématique suivante : historicité de l'œuvre, aspect de l'œuvre et méthodologie de la restauration.

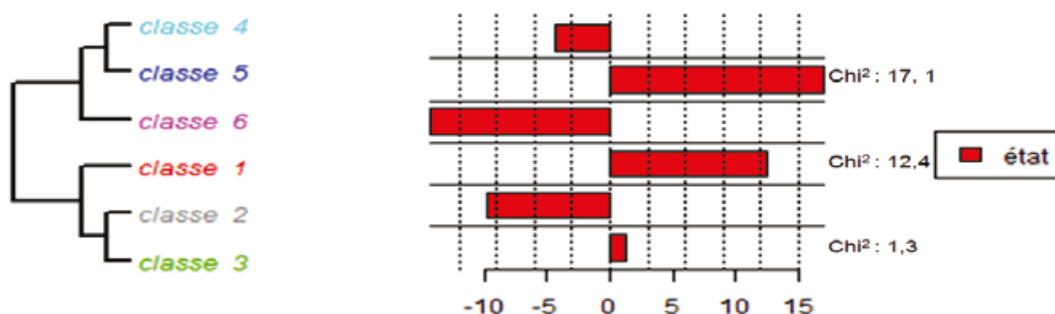


Figure 7 Localisation et Chi² de la forme *état*.

La figure 7 nous permet de visualiser que le lexème *état* est inclus dans trois classes différentes : 1 (aspect de l'œuvre et éléments descriptifs), 3 (méthodologie de la restauration), 5 (histoire matérielle). Son contexte syntaxique varie dans chaque classe : on remarque que *l'état général* est exclusivement dans la classe 1 ; que *l'état de conservation* est à 73 % inclus dans la classe 5 et que la classe 3 regroupe 4 types d'occurrence : *avant traitement*, *matériel*, *actuel* et *original* (fig. 7).

Cesare Brandi, La théorie de la restauration, 1963

La figure ci-dessous propose une CHD du texte de Cesare Brandi. Sur les 433 segments de texte, 393 (90,76 %) segments analysés se répartissent en 6 classes (fig. 8).

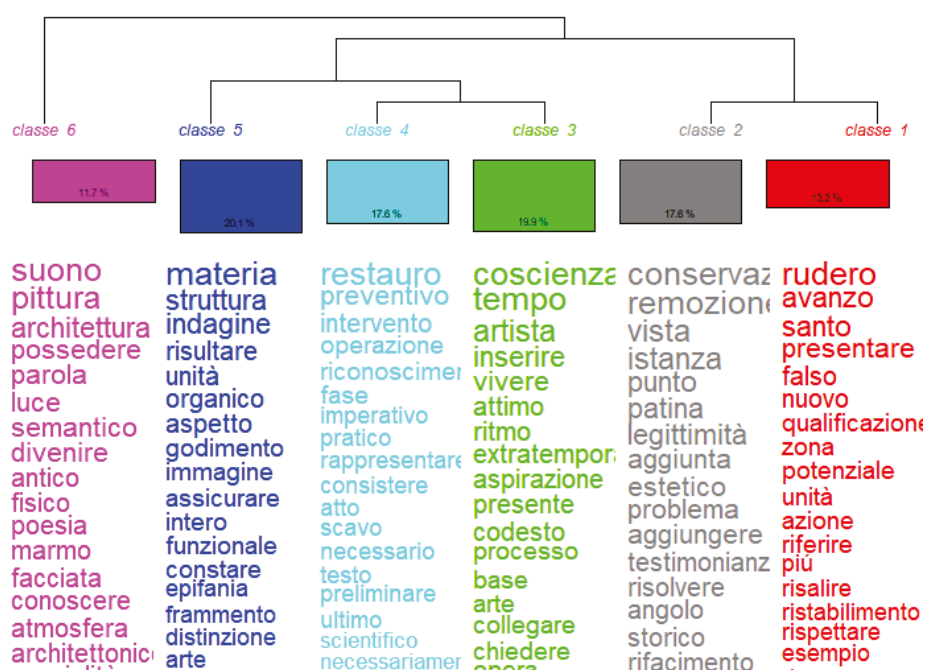


Figure 8 Classification hiérarchique descendante (CHD).

Trois ensembles se distinguent : les classes 1 et 2 d'une part ; les classes 3, 4, 5 d'autre part et, enfin, la classe 6. À la lecture des lexèmes et des segments représentatifs des classes, on a déduit les thématiques suivantes, hiérarchisées comme indiqué dans la figure 9.

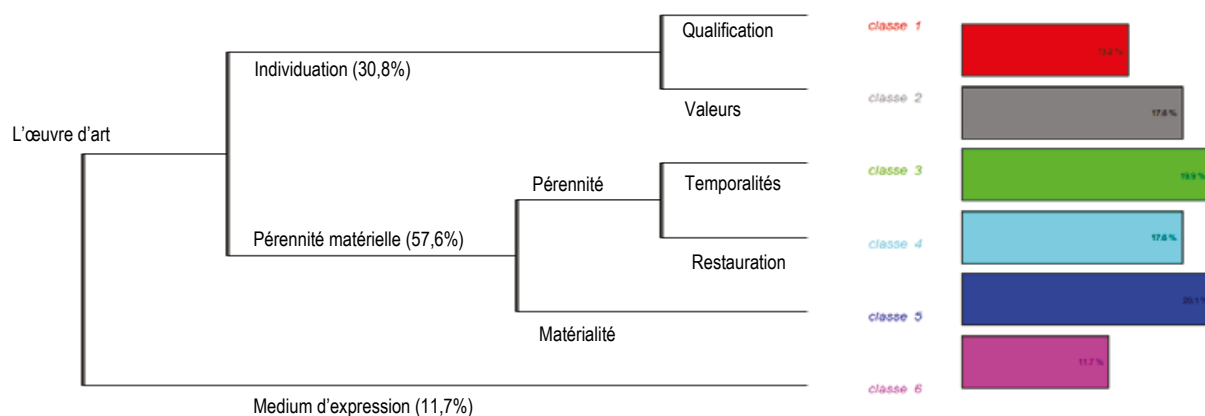


Figure 9 Dendrogramme de CHD et identification des thématiques.

La distribution des classes est plus complexe et plus étendue que dans le texte de Paul Coremans, qui est scindé de manière symétrique entre la matérialité et l'historicité de l'œuvre.

L'analyse des cooccurrences du texte de Cesare Brandi oppose le long de l'axe vertical les concepts de temporalité et de matérialité à la restauration. La classe 6 est restée indépendante et regroupe les lexèmes qui positionnent les formes par rapport à leur forme d'expression physique ou non.

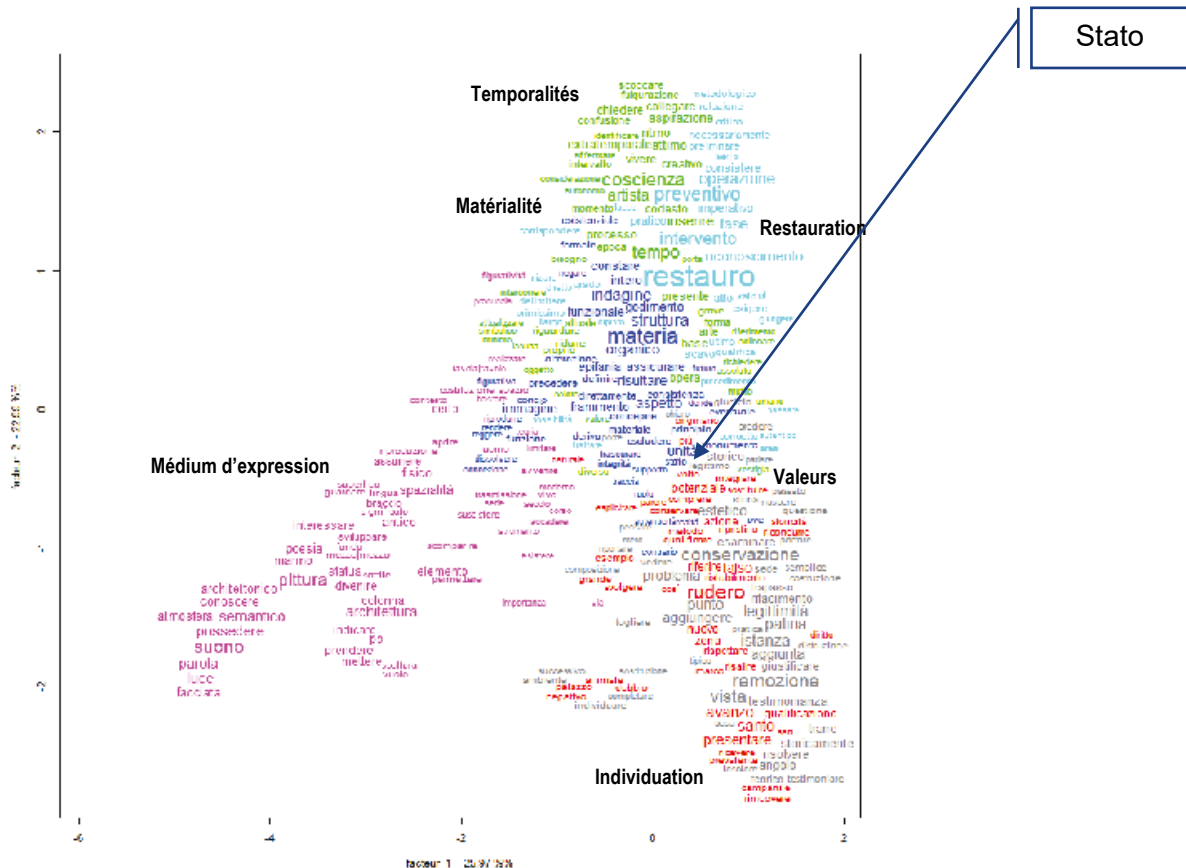


Figure 10 Analyses factorielles des correspondances

Dans le graphe de l'AFC ci-dessus, une scission horizontale oppose la pérennité de la matérialité (classes 3, 4 et 5) à l'individualisation de l'œuvre (classe 1 et 2) (fig. 10).

La matérialité de l'œuvre (classe 5) est au centre du graphique et le lexème *aspect* qui se trouve à l'intersection des deux axes relie les champs lexicaux liés à la matérialité, au temps, à la restauration, aux médiums d'expression et à l'individualisation de l'œuvre.

L'analyse textométrique démontre que C. Brandi associe les valeurs immatérielles de l'œuvre à son identité (représentée ici par les lexèmes : *potentielle, ruine, faux, copie...*). Ces deux notions s'opposent, le long de l'axe des abscisses, aux concepts de conservation-restauration, de matérialité et de temps.

Dans la partie la plus basse de la classe 6 (médium d'expression) nous retrouvons tous les lexèmes se référant au contexte de réception de l'œuvre (Brandi, 2021, p. 18) : *atmosphère, lumière, espace physique*.

Dans la figure 11, le lexème *état* est inclus majoritairement dans la classe 5 (matérialité de l'œuvre). Dans l'AFC (fig. 10) il relie la matérialité à la conservation-restauration et à l'individualisation de l'œuvre. Notons également qu'*état* est inclus entre les deux termes *d'unité potentielle*⁵ (classe 1).

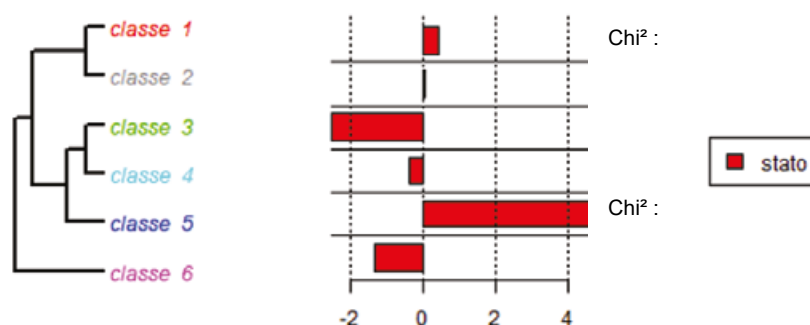


Figure 11 Localisation et Chi² de la forme *état*.

Discussion

L'état d'un bien culturel est souvent défini par la négative, c'est-à-dire par l'énonciation d'une modification. L'appréhension du changement se fait par comparaison avec un état de référence, souvent nommé *état antérieur*.

Ce dernier correspond au choix d'une certaine représentation du bien basé sur des constructions socioculturelles, institutionnelles ou individuelles. Bien que parfois l'état de référence semble se superposer à l'état d'origine, il reste une construction théorique d'un état disparu qui est alors soit documenté, soit induit.

L'état de référence peut se définir comme le repère spatiotemporel permettant le discernement des modifications par rapport à un état actuel. Ces dernières sont alors qualifiées de normales et d'acceptables, ou de pathologiques si elles altèrent l'intégrité de l'œuvre présumée.

Analyse sémantique de l'état d'après le corpus

L'analyse des littératures contemporaines et professionnelles nous a permis, dans un premier temps, de préciser deux significations du lexème *état*. Une première désigne la résultante de l'évaluation d'un bien sur une période circonscrite. Une seconde l'identifie à sa condition matérielle à un instant donné. Mais comme l'évaluation de l'état implique dans les faits une comparaison avec un état de référence antérieur, ces deux définitions désignent, de fait, la même chose. En revanche, la première est procédurale et se réfère au sujet en décrivant une activité, tandis que la seconde se réfère à l'objet et décrit sa condition physique.

⁵ « Tout cela montre que l'unité organico-fonctionnelle de la réalité existentielle réside dans les fonctions logiques de l'intelligence, alors que l'unité figurative de l'œuvre d'art se donne en même temps que l'intuition de l'image comme œuvre d'art. » (Brandi, 2021, n. 10, p. 22).

L'analyse textométrique a permis d'affiner et d'enrichir les sens d'*état* employé par les professionnels de la conservation-restauration dans différentes formations discursives, théoriques ou pratiques.

Dans la publication de P. Coremans, nous avons noté que le lexème *état* est souvent associé à un registre évaluatif : *bon, mauvais, satisfaisant, insatisfaisant* et est inclus dans trois classes thématiques différentes : une première qui s'attache à la description de l'aspect de l'œuvre⁶ (χ^2 : 12,4), une seconde qui est caractérisée par des repères spatio-temporels prééminents (χ^2 : 17,1) ; une dernière enfin, dans une moindre mesure, qui décrit la méthodologie de la restauration (χ^2 : 1,3).

Certaines expressions comprenant *état* sont spécifiques aux classes thématiques. L'*état général* se retrouve exclusivement dans la classe 1 tandis que l'*état de conservation* est majoritairement inclus dans la classe 5, histoire de l'œuvre.

L'état qui est classé dans le thème de la description de l'aspect de l'œuvre rejoint plus ou moins les définitions déjà identifiées dans la littérature professionnelle contemporaine. L'*état* est, dans ce contexte, la description de la situation de l'œuvre au moment de l'examen, il désigne ainsi le degré de conformité de l'état actuel par rapport à l'état de référence.

L'*état général* du bien s'attache, ici, à évaluer cette conformité, en tant que tout, en dehors de toute pathologie particulière. Il peut se rapporter à l'œuvre ou à une de ces parties matérielles, comme l'*état général du support*.

L'*état* listé dans la classe 5 est le plus souvent associé à une date et/ou un lieu. C'est alors un élément constitutif de l'histoire de l'œuvre. L'*état de conservation* désigne ainsi la capacité d'un bien à être conservé, c'est-à-dire à perdurer dans le temps. Le concevoir demande non seulement d'évaluer des modifications entre l'état actuel par rapport à l'état de référence, mais aussi de pronostiquer son évolution à l'avenir. L'*état de conservation* désigne alors la capacité d'un bien à être conforme à son état de référence aujourd'hui et à l'avenir. Ce sens du terme ne se définit plus comme précédemment sur une période de temps circonscrite entre le présent et le passé.

La classe 3 regroupe trop peu d'occurrences d'*état* pour être prise en compte dans les matrices statistiques d'Iramuteq. Notons toutefois qu'il en existe deux pour chacun des groupes nominaux suivants : *avant traitement, original* et *actuel*. L'état est ici un point saillant de la chronologie d'une opération de conservation-restauration ou une étape dans l'évolution autonome du bien culturel.

Chez Cesare Brandi, le lexème *état* est très peu utilisé. Il est inclus de manière privilégiée dans la classe 5 (matérialité de l'œuvre). Les occurrences, comme l'*état d'origine* ou *état premier*, marquent des étapes dans l'évolution de l'identité de l'œuvre, qui peut finir à l'état de ruine. L'inclusion graphique (fig. 11) d'*état* entre les deux lexèmes d'unité potentielle (classe 1), pointe ici les caractéristiques matérielles et immatérielles de l'œuvre perçues comme un tout par la conscience. Ces dernières notions ne sont pas sans rappeler les caractéristiques holistiques de l'*état général* énoncées plus haut, mais fortement marquées ici par ses composants immatériels, esthétiques et historiques.

⁶ Le χ^2 représente la force du lien entre formes et classes : plus le χ^2 est élevé, plus l'hypothèse de dépendance entre la forme et la classe est vraisemblable.

Conclusion

Cette étude s'inscrit dans une recherche globale qui vise à identifier les valeurs associées au constat d'état à l'heure des humanités numériques. L'emploi d'outils statistiques textuels nous a permis d'identifier et de préciser les sens de l'état dans le domaine de la conservation-restauration. Cette étude n'est pas exhaustive, mais démontre que les valeurs associées à l'état d'un bien culturel relèvent de trois registres différents, chacun associé à une perception du temps : continu, discontinu et circonscrit.

Le premier indique un degré de conformité par rapport à un état de référence, circonscrit entre le présent historique et le passé. Il entend garantir aux générations présentes l'accessibilité directe au bien dans le respect de son intégrité. Le second désigne une pérennité potentielle dans un temps continu. L'examen réalisé dans le présent historique cherche ses références dans le passé pour se projeter dans l'avenir par extrapolation. Il souhaite garantir aux générations présentes et futures l'accessibilité directe au bien, dans le respect de son intégrité. Le dernier, enfin, désigne des étapes ou des périodes dans l'évolution du bien culturel ou de ses procédures de restauration, qui alimentent de manière discontinue l'histoire de l'œuvre.

La perception et l'évaluation de l'état ne s'attachent donc pas uniquement aux caractéristiques matérielles de l'objet, mais au bien lui-même considéré comme un tout. Cesare Brandi le désigne sous le nom d'*unité potentielle* et Paul Coremans s'en rapproche avec la notion d'*état général de l'œuvre*. Le concept d'état passe d'une formation discursive à l'autre et sort du registre physicaliste pour s'inscrire dans une perception phénoménologique. L'état est ici la résultante d'une représentation holistique de la matérialité, de l'identité et de la fonctionnalité du bien, basé sur une mémoire et des références sous-jacentes communes.

Ce travail a bénéficié d'une aide de l'État gérée par l'Agence nationale de la recherche au titre du programme d'investissements d'avenir intégré à France 2030, portant la référence ANR-17-EURE-0021.

Références bibliographiques

Bachimont B. (2000), « Engagement sémantique et engagement ontologique : conception et réalisation d'ontologies en Ingénierie des connaissances » dans Charlet et al. (éd.), *Ingénierie des connaissances : évolutions récentes et nouveaux défis*, Paris, Eyrolles. p. 305-324.

Bannour I., Marinica Cl., Bouiller L. et al. (2018), « CRMcr - a CIDOC CRM extension for supporting semantic interoperability in the conservation and restoration domain », dans *Digital Heritage 2018, San Francisco* [en ligne]. Disponible sur : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01872164>.

Brandi C. (2021), *Théorie de la restauration*, traduction Baccelli M. (1^{re} éd. : 1963), Paris, Allia, 160 p.

Brandi C. (2000), *Teoria del restauro*, (1^{re} éd. : 1963), Turin, Einaudi, 168 p.

Cacciotti R., Valach J., Kunes P. et al. (2013), « Monument damage information system (MONDIS): an ontological approach to cultural heritage documentation », *ISPRS Annals of photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, II-5/W1, p. 55-60.

Coremans P. (2020), *L'Agneau mystique au laboratoire : examen et traitement*, (1^{re} éd. : 1953), Anvers, de Sikkels, 130 p.

CRM Special interest group (2020), *Definition of the CIDOC conceptual reference model - version 7.0*, ICOM/CIDOC, [en ligne] Disponible sur : <http://www.cidoc-crm.org/Version/version-7.0>.

ECCO (2013), *Compétences requises pour l'accès à la profession de conservateur-restaurateur*,

(trad. Aguilera-Cueco D., Joseph F.). Disponible sur : https://www.ecco-eu.org/fileadmin/assets/documents/publications/ECCO_Competences_FR.pdf.

Doerr M., Stead S. (2009), « The CIDOC CRM, a Standard for the integration of cultural information », dans *CIDOC Conceptual Reference Model Special Interest Group, Imperial College, London*, 62 p. (http://old.cidoc-crm.org/docs/crm_for_imperial_2009.ppt, consulté le 09/04/2025).

Foucault M. (2008), *L'archéologie du savoir*, Paris, Gallimard, 294 p.

Le Bœuf P. (2013), « Le modèle conceptuel de référence du CIDOC : de la sémantique des inventaires aux musées en dialogue », *Cultures & Musées*, Vol. 22, N°1, p. 89-111.

Lebart L., Salem A. (1994), *Statistique textuelle*, Paris, Dunod, 342 p.

Leveau P. (2017), *L'institution de la conservation du patrimoine culturel dans l'entre-deux-guerres*, Dijon, OCIM, 406 p.

Longhi J. (2009), « Stabilité, instabilité et plasticité de libéral(isme) : normes et formes du sens commun en discours », dans Gautier C., Laugier S., *Normativité du sens commun*, Paris, PUF, p. 259-276.

Messaoudi T., De Luca L., Véron P. et al. (2019), « Vers une ontologie de domaine pour l'analyse de l'état de conservation du bâti patrimonial », *In Situ – Revue des Patrimoines*, N° 39, [en ligne]. Disponible sur <https://journals.openedition.org/insitu/22470>.

Moraitou E., Aliprantis J., Christodolou Y. (2019), « Semantic bridging of cultural heritage disciplines and tasks », *Heritage*, Vol. 2, N°1, p. 611-630.

Moraitou E., Kavakli E. (2018), « Knowledge management using ontology on the domain of artworks conservation », dans Ioannides M. (éd.) *Digital Cultural Heritage*, Cham, Springer, p. 50-62.

Oger Cl. (2019), *Formation discursive* [en ligne], 12 p. Disponible sur : <http://publictionnaire.huma-num.fr/notice/formation-discursive>.

Païn S. (2020), « Inventaire et documentation au service de la conservation préventive », *CRBC*, N°36, p. 106-124.

Rastier F. (1998), « Le problème épistémologique du contexte et le statut de l'interprétation dans les sciences du langage », *Langages*, Vol. 32, N° 129, p. 97-111.

Szabados A-V., Letricot R. (2012), « L'ontologie CIDOC CRM appliquée aux objets du patrimoine antique », dans *JIAF juin 2012*, Paris, [en ligne]. Disponible sur : <https://halshs.archives-ouvertes.fr/Halshs-00752996> (consulté le 11 novembre 2021).

Tzompanaki K., Doerr M. (2011), « A new framework for querying semantic networks », dans ICS/FORTH, *Technical Report: ICS-forth/TR-419*, 12 p.

NF EN 15898 - *Conservation du patrimoine culturel – Principaux termes généraux et définitions*, Paris, AFNOR, 2019.

NF EN 16853 - *Conservation du patrimoine culturel – Processus de conservation – Prise de décisions, programmation et mise en œuvre*, Paris, AFNOR, 2017.

NF EN 16095 - *Conservation des biens culturels – Constater l'état du patrimoine culturel mobilier*, Paris, AFNOR, 2012.

Les auteurs

Grazia Nicosia Après avoir exercé en conservation-restauration en tant que libérale, a rejoint en 2015 le service de la Conservation préventive (direction du Soutien aux collections) du musée du Louvre. Elle a bénéficié à plusieurs reprises des allocations de recherche du CNAP. Actuellement doctorante à l'EUR « Humanités, Création, Patrimoine » (université de Cergy-Pontoise et INP), elle conduit une recherche sur le diagnostic de l'état des biens culturels dans le cadre des constats d'état à l'ère des humanités numériques, sous la direction de Julien Longhi (AGORA & IDHN) et Bruno Bachimont (COSTECH, EA 2223).

Julien Longhi AGORA et IDHN - université de Cergy-Pontoise, Institut universitaire de France.

Bruno Bachimont COSTECH, EA 2223, université de Technologie de Compiègne, France.

CHANTIER DE RESTAURATION DES PEINTURES NEXTEL – FONDATION VASARELY

Magalie Troy

Résumé

La Fondation Vasarely, située à Aix-en-Provence, rassemble des œuvres intégrées à l'architecture. Parmi elles, les œuvres *Tridim Blanc* et *Zett* sont des compositions emblématiques utilisant une peinture industrielle spécifique : Nextel®. Les altérations subies ont motivé un chantier de restauration ayant pour objectif de minimiser les risques structurels, de ralentir la dégradation des matériaux et d'améliorer l'impression visuelle et esthétique des œuvres. La peinture Nextel® était altérée par une cristallisation d'acide adipique en surface, créant un voile blanc opaque altérant la lisibilité. Comme cette peinture ne tolère aucune méthode aqueuse, il a fallu élaborer un protocole de nettoyage à sec (gommage et micro-abrasion), alors que sur le fond glycérophthalique de *Tridim blanc* on a pu utiliser des méthodes de nettoyage aqueuses. Après les interventions structurelles et le nettoyage des surfaces, la retouche des œuvres a été exécutée avec des méthodes à sec : pastel Écu et crayon de couleur.

Abstract The Vasarely Foundation, located in Aix-en-Provence, brings together works integrated into architecture. Among them, the works *Tridim Blanc* and *Zett* are emblematic compositions using a specific industrial paint: Nextel®. The deterioration they experienced led to a restoration project aimed at minimizing structural risks, slowing the degradation of the materials, and improving the overall visual and aesthetic impression of the works. The Nextel® paint was affected by the crystallization of adipic acid on its surface, creating an opaque white veil that compromises legibility. As this paint does not tolerate any aqueous methods, it was necessary to develop a dry cleaning protocol (rubbing and micro-abrasion), whereas on the glycerophthalic substrate of *Tridim Blanc* aqueous cleaning methods could be used. After the structural interventions and surface cleaning, the retouching of the works was carried out using dry methods: Écu pastel and coloured pencil.

Resumen La fundación Vasarely, situada en Aix-en-Provence, reúne obras integradas a la arquitectura. Entre ellas, *Tridim Blanc* y *Zett* son composiciones emblemáticas utilizando una pintura industrial específica: Nextel®. Las alteraciones motivaron una operación de restauración con el objetivo de minimizar los riesgos estructurales, disminuir la degradación de los materiales y mejorar la impresión visual y estética de las obras. La pintura Nextel® estaba alterada por una cristalización de ácido adipico en la superficie, creando un film opaco que alteraba la lectura. Como esta pintura no tolera ningún método acuoso, hubo que elaborar un protocolo de limpieza a seco (goma y micro-abrasión). Sobre el fondo gliceroftálico de *Tridim blanc* se pudieron utilizar métodos de limpieza acuosos. Después de las intervenciones estructurales y la limpieza de las superficies, el retoque fue ejecutado con métodos a seco: pastel Écu y lápices de colores.

Mots-clés Nextel, Vasarely, nettoyage

Introduction

La conservation et la restauration des œuvres d'art contemporaines présentent des défis uniques, particulièrement lorsque les matériaux utilisés sont issus de technologies industrielles. La Fondation Vasarely, située à Aix-en-Provence, est un centre artistique et architectural majeur du XX^e siècle. Conçue par Victor Vasarely, elle rassemble des œuvres intégrées à l'architecture, caractérisées par des formes géométriques et des jeux de lumière et de couleur. Parmi elles, les œuvres *Tridim Blanc* et *Zett*, datant de 1975 et classées au titre des monuments historiques depuis 2013, sont des compositions emblématiques utilisant une peinture industrielle spécifique : Nextel®.

Cette peinture, initialement développée pour l'aéronautique et l'industrie automobile, est reconnue pour son aspect ultra-mat qui absorbe la lumière, créant une profondeur singulière. Cependant, sa stabilité à long terme reste mal documentée. Ces œuvres ont subi des altérations notables rendant leur restauration complexe et exigeante. Ce chantier de restauration s'est concentré sur ces deux œuvres majeures de la Fondation, classées monuments historiques depuis 2013. Installées au sein même du bâtiment conçu par l'artiste, elles participent à la fusion entre art et architecture qui caractérise l'ensemble du projet Vasarely. Cependant, leur vieillissement a mis en évidence plusieurs problématiques majeures :

- altérations colorimétriques : la peinture Nextel®, sensible aux UV et aux agressions chimiques, a subi des changements chromatiques irréversibles, notamment un jaunissement des blancs et une atténuation des contrastes;
- efflorescences et voile blanchâtre : l'apparition d'un dépôt cristallin, identifié comme de l'acide adipique, altère l'uniformité des surfaces et réduit la lisibilité des motifs géométriques;
- instabilité structurelle : les supports en MDF (*medium density fibreboard*), pour *Tridim Blanc*, et en carton, pour *Zett*, présentent des décollements et des tensions mécaniques, menaçant l'intégrité de l'œuvre;
- dégradations anthropiques : griffures, inscriptions, empreintes digitales et tentatives de nettoyage inadéquates ont contribué à l'accélération de la détérioration.

Face à ces constats, l'objectif du chantier a été de développer et de mettre en place une méthodologie de restauration respectueuse des propriétés matérielles et esthétiques de la peinture Nextel®, tout en garantissant une stabilisation durable des œuvres. L'intervention s'est appuyée sur une approche interdisciplinaire impliquant des analyses scientifiques avancées, des tests expérimentaux et des solutions techniques innovantes adaptées aux spécificités de ce matériau. En collaboration avec la Fondation Vasarely, la conservation régionale des Monuments historiques (CRMH DRAC PACA), le CICRP et le laboratoire CARAA, ainsi que plusieurs experts en conservation-restauration, cette intervention a permis d'approfondir notre compréhension des mécanismes de dégradation de la peinture Nextel® et d'ouvrir la voie à de nouvelles stratégies de conservation pour ce type de matériau industriel en contexte muséal.

Problématique de conservation

L'intégration *Tridim Blanc* (fig. 1) est composée d'un revêtement de peinture industrielle de marque 3M, appliquée au pulvérisateur, allant du gris au blanc, à l'aspect mat velouté « peau de

daim ». Elle rassemble 44 parallélogrammes, 8 triangles, 3 losanges et 24 carrés de 60 × 60 cm. Ces modules sont collés au mur de plâtre, lui-même recouvert d'une peinture glycérophthalique blanche. L'adhésif de collage est de marque 3M, EC 776 (colle de type néoprène).



Figure 1 *Tridim Blanc* restauré. © Magalie Troy ARCOART.

L'intégration *Zett* (fig. 2), est composée d'un revêtement de peinture industrielle de marque 3M, appliquée au pulvérisateur, allant du rouge au gris, à l'aspect mat velouté « peau de daim ». Elle rassemble 242 carrés dans un carré et 242 ronds dans un carré, à l'emporte-pièce. Les modules sont collés au mur de plâtre avec le même adhésif que pour *Tridim Blanc*.

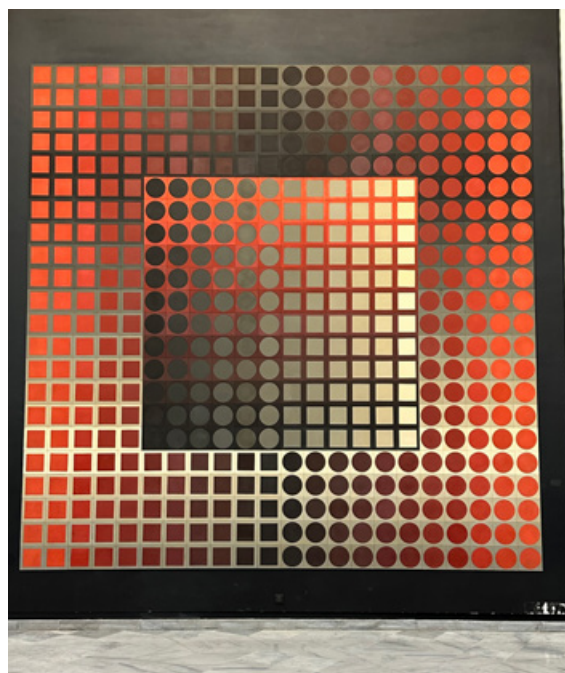


Figure 2 *Zett* restauré. © Magalie Troy ARCOART.

La restauration des œuvres réalisées en peinture Nextel® soulève plusieurs défis majeurs liés à leur vieillissement, à la complexité de leur interaction avec leur environnement ainsi qu'à la nature même de cette peinture.

Sensibilité chimique et altérations colorimétriques

La peinture Nextel®, composée d'un mélange de pigments, de résines polyuréthanes et de microbilles de néoprène, est particulièrement vulnérable aux rayons UV, à l'oxydation, au frottement et aux agents atmosphériques. Dès les premiers mois suivant sa création, *Tridim Blanc* a montré des modifications chromatiques notables, notamment un jaunissement progressif des teintes blanches et une diminution des contrastes. De nuances de gris et de blanc au départ, elle est aujourd'hui composée de teintes chaudes, ocres, sépia et gris foncé. Victor Vasarely avait décidé de la conserver ainsi. Plusieurs hypothèses sont émises sur l'évolution des deux intégrations à base de peintures Nextel® :

- cause endogène et une sensibilité aux UV ayant entraîné une variation chromatique : transformation de certains pigments sous l'action de la lumière et de l'humidité;
- influence des conditions climatiques du bâtiment datant des années 70, influençant l'absorption des polluants atmosphérique et citadin à proximité des autoroutes A8 et A51;
- sensibilité à l'eau et aux solvants organiques, composants des produits ménagers pouvant avoir été mis en contact avec la surface peinte.

Apparition d'efflorescences et de voiles blanchâtres

Un phénomène particulièrement préoccupant observé sur ces œuvres est l'apparition d'un dépôt blanc diffus (fig. 3 et 4), rendant la surface picturale moins lisible et altérant la perception du spectateur. Le CICRP et le laboratoire CARAA ont réalisé des analyses de ces dépôts par spectroscopie FTIR et microscopie électronique à balayage. Ces études ont révélé qu'il s'agissait de cristaux d'acide adipique. Les cristaux d'acide adipique sont réversibles à l'eau. Néanmoins, la peinture Nextel® ne tolère pas les méthodes aqueuses. Le traitement de ces efflorescences représente un défi, car toute action de nettoyage peut modifier la surface mate de la peinture, nécessitant une approche méticuleuse et des tests préalables approfondis.

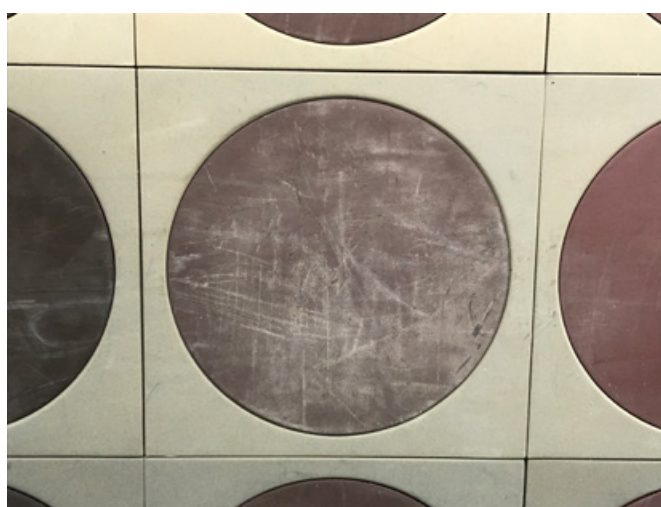


Figure 3 Cristaux d'acide adipique sur Zett. © Magalie Troy, ARCOART.

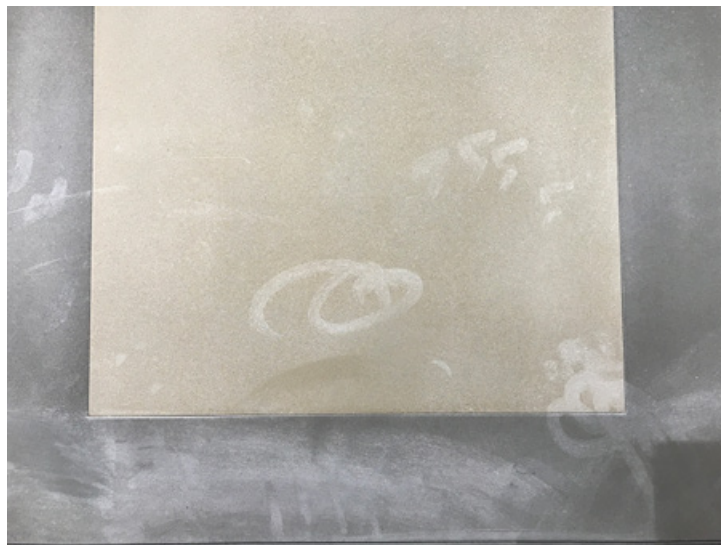


Figure 4 Cristaux d'acide adipique sur *Tridim Blanc*.
© Magalie Troy, ARCOART.

Problèmes structurels des supports du film de peinture

Les œuvres *Tridim Blanc* et *Zett* ne sont pas seulement des peintures murales, mais des installations sculpturales intégrées à l'architecture. Leur support, constitué d'éléments en MDF et en carton collés sur un mur en plâtre, présente des instabilités mécaniques croissantes :

- décollements progressifs des panneaux sous l'effet de la gravité et des variations hygrométriques;
- fissurations et soulèvements de la peinture à la jonction de certains modules;
- déformation et relâchement des adhésifs d'origine (colle néoprène), réduisant la cohésion structurelle.

Ces problèmes nécessitent une approche combinant stabilisation mécanique et interventions minimales pour éviter toute détérioration supplémentaire.

Certains modules de *Zett* présentent des soulèvements de la peinture Nextel®. Un refixage est nécessaire pour stabiliser les écailles. L'adhésif retenu devra préserver l'intégrité de cette peinture mate.

Facteurs anthropiques et interventions humaines

En plus des altérations naturelles, les œuvres ont subi des dégradations liées à l'activité humaine.

Plusieurs types d'altération sont constatées :

- inscriptions et gravures volontaires altérant considérablement la surface picturale (numéros de téléphone, prénoms, grilles de morpion, encre de stylo à hauteur d'homme);
- dépôts graisseux et empreintes digitales modifiant l'apparence et la perception optique des œuvres, présents jusqu'à 2,40 m du sol;

- formation de voiles blanchâtres jusqu'à 8 mètres de hauteur, aggravée par des nettoyages agressifs effectués sans protocole adapté.

Ces altérations témoignent de la nécessité de mettre en place des stratégies de conservation préventive incluant des mesures de protection physique et une sensibilisation accrue du public.

Phase de tests préalables

Avant toute intervention sur les œuvres *Tridim Blanc* et *Zett*, une phase de tests préalables rigoureuse a été menée en collaboration avec Paolo Cremonesi et l'équipe scientifique d'ARCOART. Cette étape a permis de caractériser les matériaux constitutifs et de définir les interventions les plus adaptées, en évitant toute altération irréversible des surfaces traitées.

Identification des caractéristiques de la peinture Nextel®

Les analyses ont porté sur plusieurs paramètres :

- composition chimique et stabilité : identification des pigments et résines par spectroscopie FTIR et fluorescence X;
- mesures du pH et de la conductivité, en utilisant un gel d'agarose non ionique pour limiter les interactions chimiques indésirables. Nous avons réalisé ces tests sur la tranche des panneaux recouverts de peinture Nextel® pour éviter tout marquage des monochromes, ainsi que sur le fond glycérophthalique de *Tridim blanc*. À la suite de ces mesures, des solutions de nettoyage et de rinçage ajustées et équilibrées ont démontré un résultat de nettoyage très satisfaisant (**fig. 5**);
- observation en microscopie sous Dino-Lite : analyse des microstructures pour comprendre et préserver le relief de la surface mate, avant, pendant et après intervention (**fig. 6**).

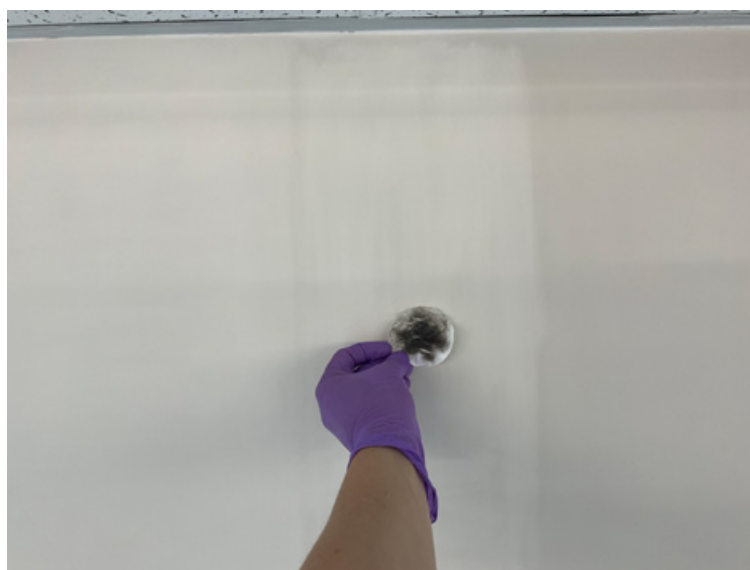


Figure 5 Nettoyage du fond glycérophthalique de *Tridim Blanc*.
© Magalie Troy, ARCOART.

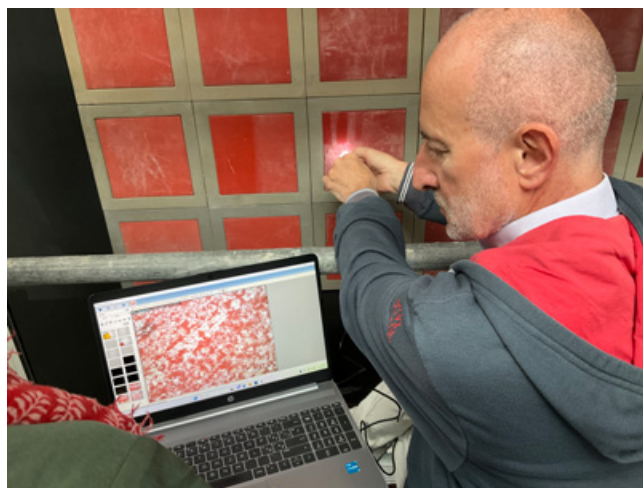


Figure 6 Observation sous Dino-Lite de la surface mate Nextel® par Paolo Cremonesi. © Magalie Troy, ARCOART.

Expérimentation des méthodes de nettoyage

Des tests ont été réalisés afin de déterminer les solutions de nettoyage les plus adaptées à la sensibilité des surfaces Nextel®.

- Tests de solubilité : évaluation de l'impact de différentes solutions aqueuses et différents solvants organiques apolaires. Ces derniers ont été exclus, pour éviter toute interaction avec les phtalates présents dans la couche picturale. Concernant les méthodes aqueuses, elles ont été complètement exclues pour le nettoyage de la peinture Nextel® et validées pour une utilisation sur le fond glycérophthalique de *Tridim blanc*. Elles ont été utilisées en plaques de gel d'agar ajustées et équilibrées (**fig. 7**).



Figure 7 Plaque d'agar gel ajustée et équilibrée. © Magalie Troy, ARCOART.

- Tests de nettoyage mécanique : utilisation de gommes spéciales (Akatissue® et Akapad®), brosses en poils de chèvre et micro-aspiration HEPA pour retirer les contaminants sans endommager la couche picturale. Utilisation de gomme et de papier abrasifs pour retirer les cristaux d'acide adipique formant parfois une croûte en surface (fig. 8).



Figure 8 Gommage avec des Akatissue® et des Akapad®. © Magalie Troy, ARCOART.

- Tests de nettoyage chimique : expérimentation de gels solvants, à base de gel Velvesil Plus® et d'alcool benzylique, pour retirer les traces d'encre sur le fond glycérophthalique. Ces gels sont rincés au cyclométhicone D5, ce qui permet également de dissoudre les éclaboussures de produits ménagers. En effet, toute la partie basse de *Tridim Blanc* est recouverte d'un voile, formé par l'accumulation d'éclaboussures du produit lustrant utilisé pour le lavage du sol de l'alcôve pendant plusieurs dizaines d'années.

Les résultats ont mis en évidence que toute méthode aqueuse avait une action de nettoyage très intéressante sur le fond glycérophthalique blanc. Néanmoins, elle entraînait une détérioration visible du revêtement Nextel®, confirmant la nécessité d'un protocole exclusivement mécanique et non invasif.

Protocole d'intervention

À la suite des résultats des tests préalables, une méthodologie d'intervention a été mise en place en plusieurs étapes.

Nettoyage des surfaces

- Dépoussiérage à sec : le fond glycérophthalique a été épousseté avec des microfibres. La partie Nextel® a été nettoyée à sec avec une micro-aspiration HEPA couplée à l'utilisation de brosses antistatiques.
- Gommage sélectif : application de gommes Akatissue® pour retirer les voiles blanchâtres et contaminants superficiels. Les passages de gommage se sont succédé jusqu'à rétablir la lisibilité esthétique des modules mats. Un système de récupération des résidus a été mis en place à l'aide d'une feuille plastifiée insérée entre les modules

le temps du gommage. Les résidus de gomme étaient ainsi récupérés et immédiatement aspirés.

- Micro-abrasion ciblée : pour les zones les plus affectées par les cristaux d'acides adipiques, utilisation d'éponges abrasives à grain moyen pour ne pas lustrer la surface. Puis gommages successifs jusqu'à obtention du meilleur compromis. Cette micro-abrasion nécessitait un geste doux et précis avec contrôle systématique de la matité de surface grâce à un brillancemètre (fig. 9).

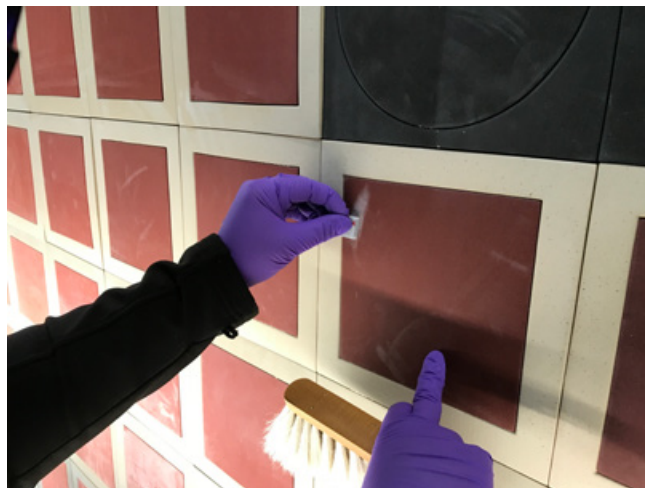


Figure 9 Micro-abrasion de la surface. © Magalie Troy, ARCOART.

Consolidation structurelle

- Quelques modules de Zett présentent des soulèvements de la peinture Nextel® sur les tranches au niveau des zones de jonction. L'adhésif retenu est le Beva® gel, appliqué délicatement au petit pinceau sous les écailles. Les zones sont mises sous presse localisée. Cet adhésif respecte parfaitement l'indice de réfraction de la surface mate (fig. 10).



Figure 10 Refixage des écailles de peinture Nextel®. © Magalie Troy, ARCOART.

- Collage des cartons décollés : sur *Zett*, nous avons préparé les zones à traiter. Les résidus de colle néoprène ont été retirés avec des solvants gels pour la partie murale et avec une action mécanique pour la colle présente au revers des cartons. Les modules ont été ensuite recollés avec une colle contact de type PVA à prise rapide et une pression de 5 minutes. La cartographie précise de cette intervention est documentée dans le rapport (**fig. 11**).



Figure 11 Mise sous pression ponctuelle des cartons de *Zett* © Magalie Troy, ARCOART.

- Les panneaux de MDF de *Tridim Blanc* sont stables. Seules quelques zones sont très partiellement décollées. Un collage nécessitait une mise sous pression complète du module avec un risque pour la peinture Nextel®. En concertation avec la Fondation, il est décidé de ne pas intervenir sur ces altérations.

Réintégration esthétique

- Atténuation des zones altérées : application de retouches à sec aux pastels à l'écu Sennelier® et aux crayons de couleur pour homogénéiser la perception colorimétrique (**fig. 12**). Sur les zones usées, la poudre colorée est appliquée au *blush* pour créer un fondu parmi la multitude de nuances présentes en surface. Les retouches sont stables et adhérentes. Leur réversibilité est effective avec un simple gommage.

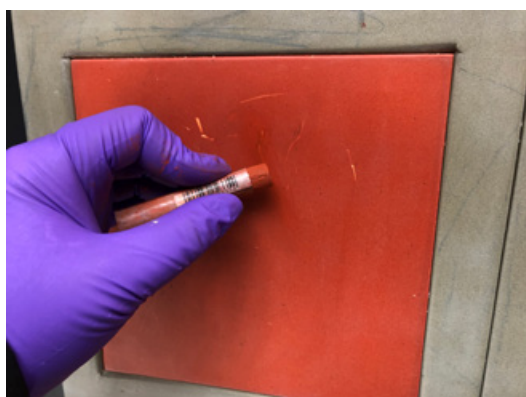


Figure 12 Retouche au pastel écu de Sennelier®. © Magalie Troy, ARCOART.

- Vérification de la matité : l'utilisation d'un brillancemètre pour s'assurer du respect de l'aspect d'origine est indispensable durant toute l'intervention de retouche (fig. 13).

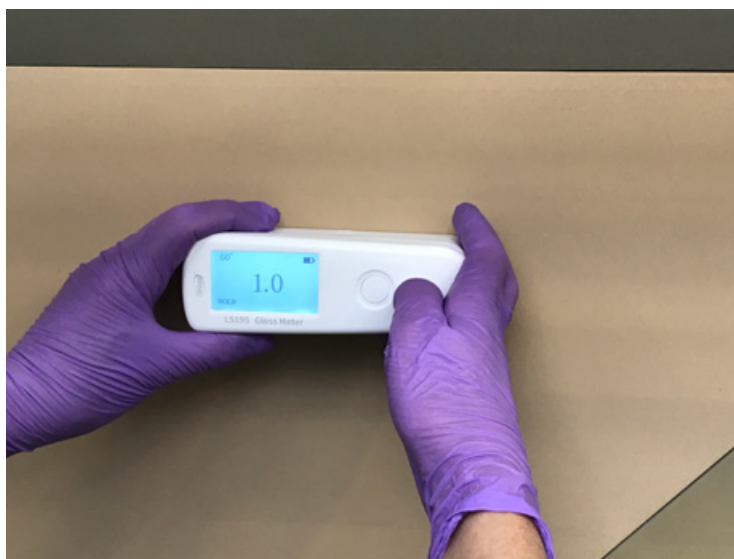


Figure 13 Contrôle au brillancemètre. © Magalie Troy, ARCOART.

Conservation préventive

- Mise en place de protections physiques : limitation de l'accès aux œuvres pour éviter les contacts accidentels. Les mises à distance historiques ont été renforcées par des potelets pour tenir le spectateur à distance.
- Formation du personnel de la Fondation Vasarely : sensibilisation aux risques liés à la proximité des œuvres avec le public, au nettoyage inadapté et aux variations environnementales en interne, via les précieux conseils de Pascale Girard, responsable du pôle Collections et Expositions et, durant l'intervention, lors de réunions d'information. Ce protocole a permis une intervention optimisée garantissant la préservation des œuvres tout en respectant les propriétés intrinsèques de la peinture Nextel®.

Résultats et perspectives

Résultats de l'Intervention

L'application du protocole de restauration a permis plusieurs avancées significatives dans la conservation des œuvres *Tridim Blanc* et *Zett* :

- élimination des efflorescences blanches : l'action combinée du gommage Akatissue® et de la micro-abrasion légère a permis de retirer la majorité des dépôts cristallins d'acide adipique, redonnant aux surfaces leur lisibilité d'origine;
- stabilisation structurelle des panneaux : le refixage des éléments instables à l'aide de résines réversibles a restauré l'adhésion sans rigidifier les supports, garantissant une meilleure cohésion matérielle;

- amélioration de la lisibilité esthétique : les retouches aux pastels secs et aux crayons pigmentaires ont permis d'homogénéiser l'apparence des surfaces altérées, sans modifier la matité spécifique de la peinture Nextel®;
- conservation préventive renforcée : l'installation de protections physiques et des conseils pour la mise en place d'un programme de surveillance climatique ont réduit les risques de nouvelles altérations.

Enseignements et défis restants

Malgré les succès obtenus, certains défis demeurent :

- impossibilité de restaurer certaines altérations profondes : les inscriptions et griffures pénétrant la couche picturale restent visibles, la peinture Nextel® ne permettant pas d'accrocher des liants traditionnels pour une retouche illusionniste.
- vulnérabilité persistante du matériau : la sensibilité intrinsèque de la peinture Nextel® impose une vigilance accrue dans son entretien et sa manipulation future.
- problématiques de vieillissement à long terme : l'évolution chimique des résines polyuréthanes et des plastifiants utilisés dans la peinture Nextel® pourrait entraîner de nouvelles formes de dégradation nécessitant une surveillance continue.

Perspectives pour la conservation future

La restauration des peintures Nextel® nécessite de repenser les approches traditionnelles de conservation-restauration. Ce chantier de restauration a ouvert des pistes prometteuses pour la sauvegarde des œuvres en peinture Nextel®, notamment :

- le développement de nouveaux protocoles de nettoyage et de consolidation adaptés aux matériaux industriels;
- la mise en place de protections physiques pour limiter les risques de contact et d'altération futures;
- la définition d'un cadre de surveillance climatique rigoureux afin de stabiliser les paramètres environnementaux et limiter l'impact des variations hygrométriques;
- l'élargissement de la recherche sur la peinture Nextel® : collaboration avec d'autres institutions pour approfondir les études sur la stabilité chimique et physique de ce matériau;
- la sensibilisation du public et des professionnels : organisation d'ateliers et de formations sur la spécificité de la conservation des surfaces mates et industrielles.

Conclusion

Ce chantier constitue une référence pour la conservation-restauration des œuvres en peinture industrielle et souligne l'importance d'une approche interdisciplinaire associant chimistes, restaurateurs et institutions culturelles.

L'auteur

Magalie Troy a dirigé durant seize semaines le chantier de restauration des peintures Nextel® de la Fondation Vasarely avec l'aide d'une équipe pluridisciplinaire comprenant le chimiste Paolo Cremonesi.

Reportage réalisé durant le chantier : <https://www.youtube.com/watch?v=SljXGBAetEs>

Magalie Troy Conservatrice-restauratrice de peinture, diplômée de l'Institut national du patrimoine, spécialisée en art contemporain. Travaillant pour la Fondation Vasarely depuis 2019, elle est co-auteur en 2021 de l'article intitulé « Victor Vasarely and his monumental matte monochromes: the challenge of consolidating alkyd paints and serigraphic ink », paru dans l'ICOM-CC Modern Materials- Contemporary Art Newsletter. Toute sa carrière est vouée au patrimoine : fondatrice de l'entreprise ARCOART atelier et laboratoire en 2007, elle travaille pour l'UNESCO et pour de nombreuses institutions. Elle est aussi chargée d'enseignement à l'université Paris 1 Sorbonne pour les masters 2 concernant les méthodes de nettoyage aqueuses. En 2024, elle est co-fondatrice du PEPAC Grand Ouest, un pôle pluridisciplinaire basé sur l'excellence des savoir-faire et rassemblant des professionnels du patrimoine. Membre actif de l'ICOM, elle est déléguée Bretagne de la FFCR et du Bouclier bleu France et membre associé de l'ARAAFU.

VIBRATIONS ET CONSERVATION

Sandie Le Conte, Loïc Forma, Henri Boutin, Marguerite Jossic,
Nicolas Wilkie-Chancellier

Résumé

Des différentes nuisances que peut subir un objet du patrimoine, les vibrations sont les dernières à avoir été considérées par les responsables de collection et *a fortiori* par les scientifiques. Pourtant la soumission ponctuelle ou répétée à des sollicitations vibratoires de faibles amplitudes provoque un effet de fatigue pouvant conduire à la rupture. Aujourd'hui, la communauté patrimoniale ne peut que constater les dommages à l'échelle macroscopique provoqués par les vibrations basses fréquences ([20-500 Hz]) sur les collections publiques en attendant l'arrivée de nouvelles solutions techniques.

La présente communication proposera une méthode d'évaluation des propriétés absorbantes des chocs et vibrations des matériaux de calage usuels et en donnera les résultats en fonction de la fréquence de la vibration à « neutraliser ». Une ouverture sera également proposée en présentant des matériaux biosourcés pouvant être utilisés de manière alternative aux mousses pétro-sourcées. Parallèlement à ces travaux, une recherche de solution alternative sera présentée : une preuve de concept de l'application du contrôle actif pour diminuer l'amplitude de vibration en contexte muséal.

Abstract Of the various disturbances that a heritage object may suffer, vibrations have been the last to be considered by collection managers and all the more so by scientists. Yet occasional or repeated exposure to low-amplitude vibratory forces induces fatigue that can eventually lead to breakage. Today, the heritage community can only observe the macroscopic damage caused by low-frequency vibrations ([20–500 Hz]) on public collections while awaiting new technical solutions. This paper will present a method for assessing the shock- and vibration-absorbing properties of common support materials, with results provided according to the frequency of the vibration to be “neutralised”. It will also introduce bio-sourced materials as a potential alternative to petrochemical-based foams. In parallel with this work, an alternative solution will be presented—a proof of concept for applying active control to reduce the amplitude of vibrations in a museum context.

Resumen Entre los diferentes problemas que pueden afectar un objeto patrimonial, las vibraciones son las que fueron consideradas más recientemente por los responsables de colección y a fortiori por los científicos. Sin embargo, someterlo puntualmente o de manera repetitiva a sollicitaciones vibratorias de débil amplitud provoca un efecto de fatiga que pueden conducir a la ruptura. Hoy la comunidad patrimonial puede solo constatar los daños a escala macroscópica provocadas por vibraciones de baja frecuencia (20-500 Hz) sobre colecciones públicas, esperando que lleguen nuevas soluciones técnicas. La presente comunicación propone un método de evaluación de las propiedades absorbentes de los materiales de embalaje usuales y dará resultados en función de la frecuencia de la vibración a « neutralizar ». Una pista será propuesta sobre materiales biológicos que pueden ser usados como alternativa a espumas derivadas del petróleo. Paralelamente a esta investigación, presentaremos una solución alternativa: la demostración conceptual de la aplicación del control activo para disminuir la amplitud de la vibración en contexto de museo.

Mots-clés vibrations, matériaux de calage, transport d'œuvres d'art

Des différentes nuisances que peut subir un objet du patrimoine, les vibrations sont les dernières à avoir été considérées par les responsables de collection et *a fortiori* par les scientifiques. Pourtant, la soumission ponctuelle ou répétée à des sollicitations vibratoires de faibles amplitudes provoque un effet de fatigue pouvant conduire à la rupture. Aujourd'hui, la communauté patrimoniale ne peut que constater les dommages à l'échelle macroscopique provoqués par les vibrations basses fréquences (20-500 Hz) sur les collections publiques, en attendant l'arrivée de nouvelles solutions techniques.

Les vibrations

À l'origine de la vibration, il y a une source qui applique une force mécanique à d'autres éléments qui se mettent à vibrer. Une fois la vibration créée, celle-ci se transmet via un milieu de propagation, solide ou fluide (mur, sol, air...). La vibration se propage alors jusqu'à atteindre un objet dans son contexte d'exposition ou de transport, également appelé système (fig. 1).

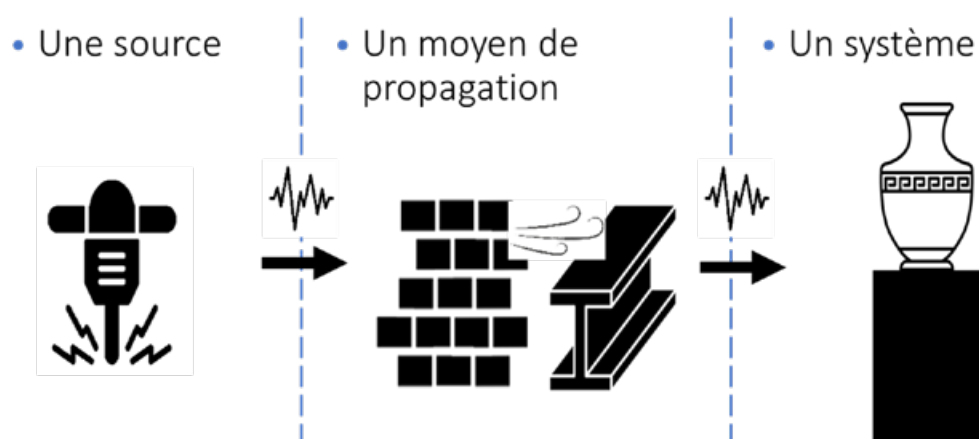


Figure 1 Schéma représentant le chemin emprunté par une vibration, de sa création par une source à sa propagation jusqu'au système.

D'un point de vue physique, la vibration est un déplacement autour d'un point d'équilibre en fonction du temps. Un mécanisme simple rendant compte de ce phénomène est celui du système de pendule. Une bille est attachée à un fil, ce dernier étant fixé à son autre extrémité. La bille est libre d'osciller en se déplaçant. Le premier paramètre décrivant le comportement oscillatoire est l'amplitude du mouvement (exprimée en mètres, ou millimètres), c'est-à-dire la distance entre la position extrême du mouvement et le point d'équilibre. Le second est le temps que met la bille pour faire un aller-retour en partant d'une position extrême. Cette durée qui est appelée « période » (symbole T , exprimée en secondes), est inversement proportionnelle à la fréquence (symbole $f=1/T$, exprimée en Hertz), grandeur plus communément utilisée représentant donc le nombre d'aller-retours, d'oscillations, par seconde.

Bien évidemment, les vibrations d'objets de la vie courante ont des comportements plus complexes que celui du système présenté. Pourtant, leurs vibrations peuvent être considérées comme la superposition d'un très grand nombre, voire d'une infinité de vibration de système simple, chacune avec une amplitude et une fréquence propre. C'est l'opérateur mathématique *transformée de Fourier* (Flandrin *et al.*, 2019) qui permet cette décomposition.

Vibrations et fatigue

Le caractère dangereux des vibrations est lié au principe de rupture de fatigue. Un objet en mouvement subit une répétition de contraintes qui peuvent entraîner des micro-fractures. L'objet se fragilise et finit par rompre alors que sa charge est nettement inférieure à celle nécessaire pour le casser lorsqu'aucun mouvement n'est appliqué. Cet effet est visible sur la figure 2, mettant en avant des fissures causées par des vibrations générées par des travaux à proximité de l'espace patrimonial. Cependant, aucune norme n'existe concernant la prévention vis-à-vis des vibrations.



Figure 2 Schéma d'une peinture murale romaine représentant la mort d'Iracus : représentation schématique mettant en avant les fissures apparues durant les travaux, d'après Thickett, 2002, fig. 4, p. 93.

Sources de vibration en contexte muséal

Les premières sources de vibrations qui viennent à l'esprit sont les transports d'œuvre. En effet, que ces déplacements soient internes à l'espace muséal (des réserves vers les salles d'exposition, vers des ateliers de restauration, etc.) ou externes, pour des prêts d'œuvres à l'occasion d'expositions temporaires, l'objet est déplacé, ce qui entraîne des vibrations. À titre d'exemple, un transport d'œuvre a pu être instrumenté. Il s'agit d'un transport externe, en caisse transportée dans un camion à suspension hydraulique. Les capteurs n'ont pas pu être posés sur l'œuvre, mais sur la caisse. Un capteur de référence a, quant à lui, été collé sur le sol du camion. La figure 3 représente, dans le domaine fréquentiel, les deux signaux captés sur le sol du camion et sur le sommet de la caisse.

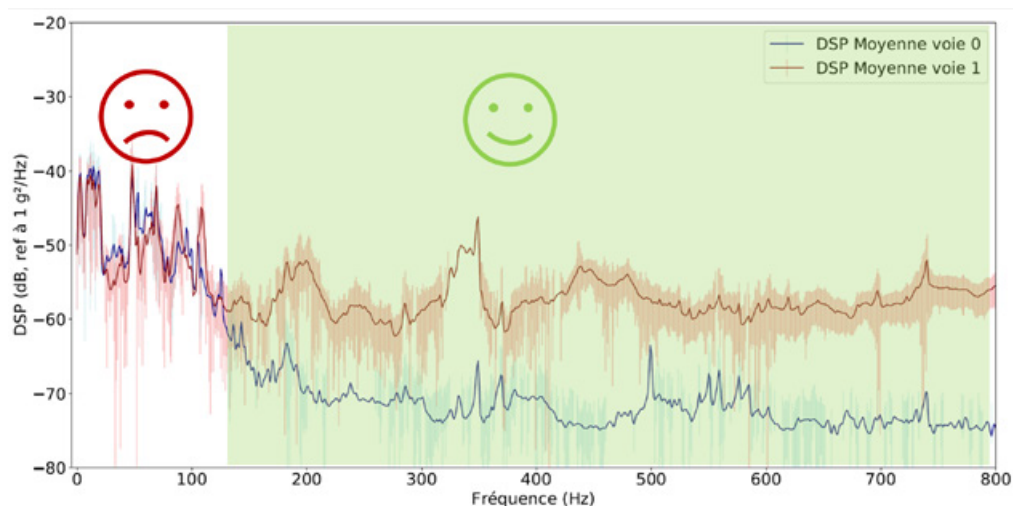


Figure 3 Représentation fréquentielle des accélérations mesurées sur la caisse (bleu) et sur le sol du camion (rouge) dans la direction verticale.

La figure 3 montre que le niveau de vibration de la caisse, après 150 Hz, est bien inférieur à celui du sol du camion. En revanche, entre quelques hertz et 150, la caisse vibre de la même façon que le sol. Cette expérience ne peut pas nous indiquer le niveau de vibration de l'objet mais nous indique que les basses fréquences ne sont pas filtrées par la caisse.

Une autre source de vibrations présente en contexte muséal est le pas des visiteurs, qui peut entraîner la vibration des supports. Une illustration est la mesure réalisée au musée de l'Homme sur la harpe des bustes. Les accéléromètres ont été collés sous un socle de buste et ont enregistré le niveau de vibration en l'absence de public (signal appelé bruit de fond) et en présence de visiteurs. Ces signaux sont représentés sur la figure 4.

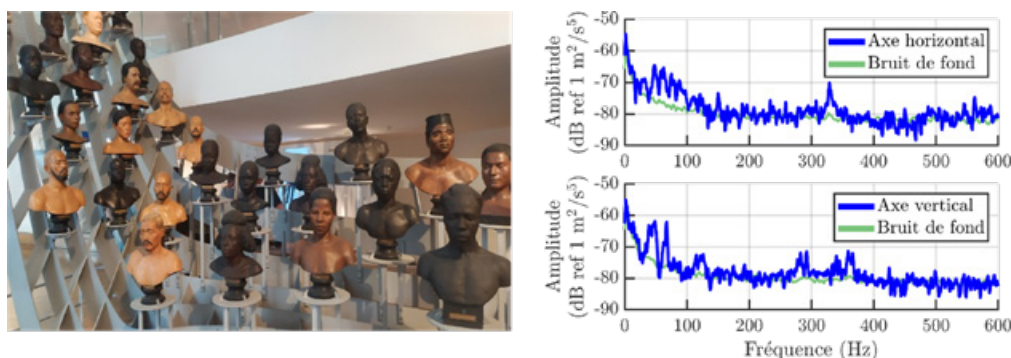


Figure 4 Représentation fréquentielle des signaux captés sur le socle d'un buste en l'absence (vert) et en présence de visiteurs (bleu).

Le graphique de la figure 4 montre un niveau plus élevé des vibrations, qu'elles soient verticales ou horizontales, en basses fréquences, à savoir entre quelques hertz et 200 Hz.

Nous pouvons également citer les vibrations générées lors de la fermeture / ouverture de la vitrine. La figure 5 illustre ce cas de figure en présentant une mesure réalisée au musée du quai Branly – Jacques Chirac. Là encore, les capteurs sont positionnés sous le support d'œuvre. Cette vibration s'apparente à un choc puisqu'elle est très brève dans le temps.

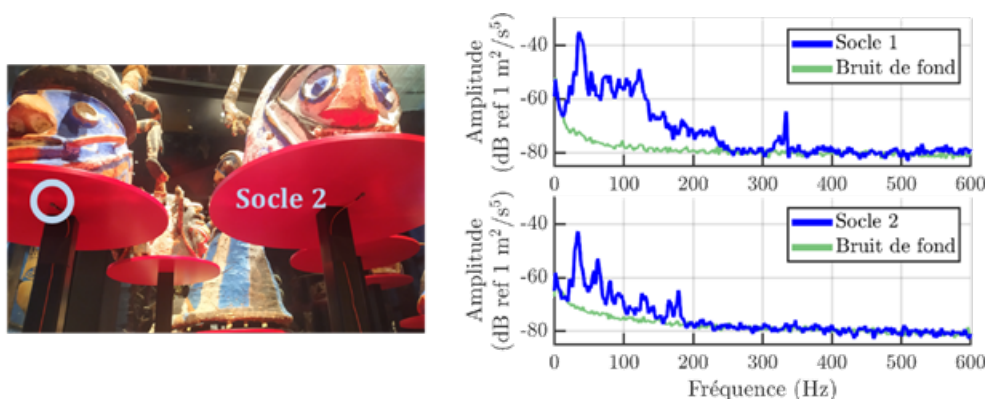


Figure 5 Représentation fréquentielle de vibrations générées par l'ouverture et la fermeture d'une vitrine.

Une nouvelle fois, ce sont les basses fréquences (jusqu'à 200 Hz) qui sont très présentes dans les vibrations de type impulsionnel.

Les autres sources de vibrations connues sont les travaux de génie civil à proximité ou dans les espaces muséaux, et plus récemment, les événements sonorisés dans les espaces patrimoniaux. Les mesures démontrent encore une fois la prédominance des vibrations basses fréquences.

Compte tenu de l'impact néfaste des vibrations à basses fréquences sur les objets, on se propose d'évaluer les propriétés absorbantes des matériaux de conditionnement, classiquement utilisés, dans cette bande de fréquence.

Mesure de propriétés absorbantes des matériaux de conditionnement

La méthode utilisée consiste à reproduire en laboratoire un support d'œuvre sur lequel différents matériaux de conditionnement sont positionnés et le tout est excité en vibration grâce à l'action d'un pot vibrant. Le pot vibrant est piloté via un ordinateur, ce qui permet de contrôler le type de vibration que l'on envoie au support, en amplitude et en bande de fréquence. Puis deux accéléromètres sont positionnés : l'un sous le support et l'autre sur un simulacre d'objet. Le principe de la mesure est donc de mesurer le niveau de vibration du support, celui de l'objet et de faire le rapport des deux. Le dispositif expérimental est représenté sur la figure 6.



Figure 6 Dispositif expérimental simulant la mise en vibration d'un support et mesurant le niveau de vibration du support et de l'objet.

Ce système physique se modélise assez simplement par un système dit « masse-ressort » et le rapport de l'accélération de l'objet sur celle du support se représente par la courbe théorique donnée en figure 7.

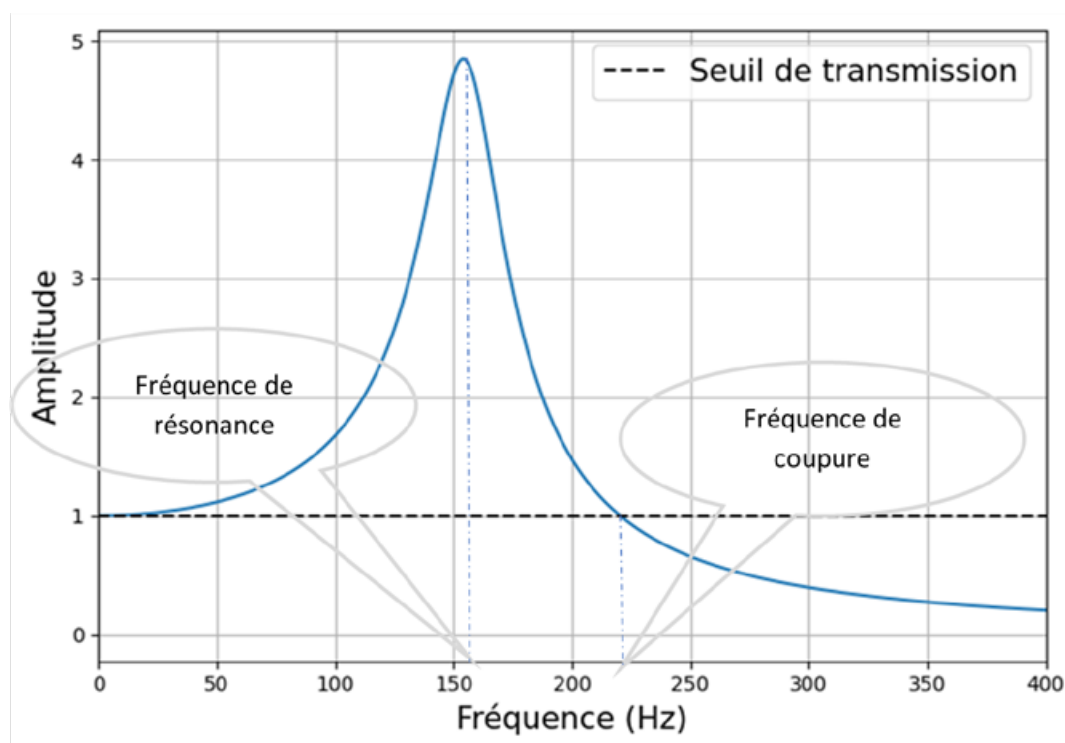


Figure 7 Simulation du rapport de l'accélération de l'objet sur l'accélération du support. Ce rapport s'appelle transmissibilité.

Lorsque la transmissibilité est supérieure à la valeur 1, cela signifie que le niveau de vibration de l'objet est supérieur à celui du support. Le maximum de la courbe est atteint pour une fréquence caractéristique, appelée « fréquence de résonance » du système, qui est proportionnelle au rapport de la masse de l'objet sur l'élasticité du matériau de conditionnement. Enfin, la fréquence au-delà de laquelle la transmissibilité est inférieure à la valeur 1 est appelée « fréquence de coupure ». Elle est proportionnelle au rapport de l'élasticité de la mousse sur l'épaisseur de la mousse et sur la charge statique de l'objet. La charge statique est la masse surfacique de l'objet.

Ainsi, avec ce protocole expérimental, il est intéressant de relever les fréquences de coupure, c'est à dire les fréquences à partir desquelles les matériaux de conditionnement absorbent les vibrations (puisque le niveau de vibration de l'objet sera inférieur à celui du support).

Les matériaux habituellement utilisés ont été évalués. Ils nous ont été transmis par les services de régie de nos partenaires ([fig. 8](#)).

Les informations adossées aux types de matériaux sont celles disponibles dans les catalogues de matériel. Aucune mention n'est faite de leur élasticité.

		Type de mousse	Épaisseur	Propriétés et usages					
	Type of foam	Thickness	Properties and use	Polyuréthane	2 cm	Chimiquement instable			
	Polyurethane	2 cm 5 cm	Chemically unstable Transportation: efficient against vibrations						
		Ethafoam	1 cm 2 cm 3 cm		Chemically stable Storage Transportation of heavy objects	5 cm	Transport : efficient vis-à-vis des vibrations		
		Plastazote	0,5 cm 1 cm 2 cm 4 cm	Chemically stable Storage (shelves, drawers...)					
			Type of foam	Thickness	Properties and use			Ethafoam	1 cm
	Polyurethane		2 cm 5 cm	Chemically unstable Transportation: efficient against vibrations					
	Ethafoam		1 cm 2 cm 3 cm	Chemically stable Storage Transportation of heavy objects	2 cm	Stockage			
		Plastazote	0,5 cm 1 cm 2 cm 4 cm	Chemically stable Storage (shelves, drawers...)			3 cm	Transport d'objets lourds	
			Type of foam	Thickness					Properties and use
Polyurethane			2 cm 5 cm	Chemically unstable Transportation: efficient against vibrations					
	Ethafoam		1 cm 2 cm 3 cm	Chemically stable Storage Transportation of heavy objects	1 cm	Stockage (tiroirs, étagères...)			
		Plastazote	0,5 cm 1 cm 2 cm 4 cm	Chemically stable Storage (shelves, drawers...)			2 cm		

Figure 8 Tableau des matériaux testés.

La figure 9 montre à gauche la validation du modèle masse-ressort, en présentant des courbes expérimentales de transmissibilité en présence de mousses (de différentes épaisseurs) comparée à celle de transmissibilité en l'absence de mousse. À droite, la fréquence de coupure est représentée en fonction de la charge statique de l'objet.

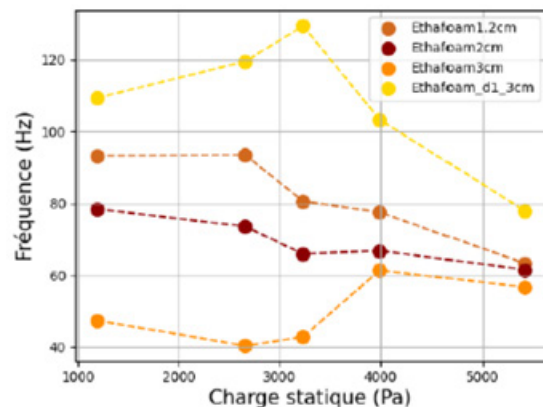
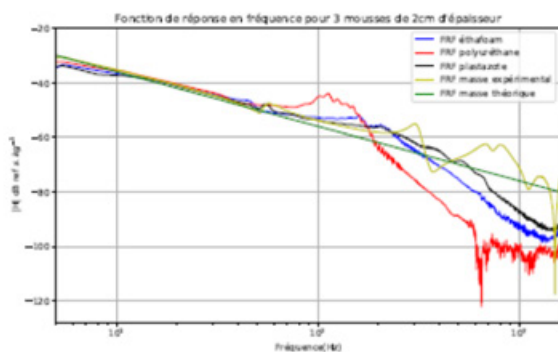


Figure 9 Mesures expérimentales de la transmissibilité de différentes mousses (à gauche); mesure des fréquences de coupure (à droite).

Le graphique de gauche de la figure 9 montre en vert foncé la représentation fréquentielle de l'objet en l'absence de mousse. Les autres couleurs codent différentes mousses indiquées en légende. Force est de constater que la courbe rouge est au-dessus de la verte aux alentours de 100 Hz et passe dessous vers 200 Hz. Ceci signifie que dans le cas d'une masse de 1 kg posée sur de la mousse de polyuréthane, la mousse amplifie les vibrations plutôt que de les atténuer.

Elle ne commence à être efficace qu'à partir de 200 Hz. Ce même constat est fait pour les autres matériaux, à des fréquences légèrement différentes.

Le graphique de droite montre l'évolution de la fréquence de coupure (qui est assez haute au regard des signaux de vibrations enregistrés dans différents contextes (figures 3, 4, 5) en fonction de la charge statique. Cette fréquence descend difficilement.

Conclusion

Après avoir dressé un constat des différentes sources de vibrations présentes en contexte muséal, certaines d'entre elles ont donné lieu à des mesures. Leur point commun est que toutes ces sources émettent des vibrations dont les fréquences sont basses (comprises entre quelques hertz et 400 Hz). À partir de ce constat, les matériaux de conditionnement classiques ont été évalués du point de vue de l'atténuation des vibrations. Il apparaît que dans le domaine d'intérêt, à savoir les basses fréquences, ces matériaux sont transparents aux vibrations voire, dans certains cas spécifiques, amplifient même les vibrations de la source.

Les perspectives de ce travail sont donc vers la caractérisation de « nouveaux matériaux » de conditionnement ou de nouvelles mises en forme de matériaux classiques, comme les coussins, et le travail de recherche sur une solution adaptative, s'appuyant sur le principe du contrôle actif (Forma, 2023).

Remerciements

Ce travail a bénéficié d'une aide de l'État gérée par l'Agence nationale de la recherche au titre du programme d'investissements d'avenir intégré à France 2030, portant la référence ANR-17-EURE-0021- l'École universitaire de recherche Paris Seine Humanités, Création, Patrimoine – Fondation des sciences du patrimoine.

Références bibliographiques

Flandrin P., Jaffard S., Morel J.-M. (2019), « L'analyse de Fourier, pilier du numérique », *Pour la science*, n° 495, p. 54-62

Forma L. (2023), *Système de contrôle actif de vibrations pour la conservation des objets du patrimoine*, thèse de doctorat en Génie électrique et électronique, CY Cergy Paris Université.

Thickett D. (2002), « Vibration damage levels for museum objects », dans ICOM-CC (éd.), *The 13th triennial meeting Rio de Janeiro preprints*, Vol. I, London, James & James, p. 90-95.

Les auteurs

Sandie Le Conte Institut national du patrimoine, 124 rue Henri Barbusse, 93300 Aubervilliers.

Loïc Forma SATIE CY Cergy Paris Université, 5 mail Gay Lussac, 95000 Neuville.

Henri Boutin STMS-Sorbonne Université, IRCAM) 1 place Igor Stravinsky, 75004 Paris.

Marguerite Jossic ECR, Musée de la musique, CRC UAR3224, 221 av. Jean Jaurès, 75019 Paris.

Nicolas Wilkie-Chancellor SATIE, CY Cergy Paris Université, 5 mail Gay Lussac, 95000 Neuville.

LES ARCHIVES DES CONSERVATEURS-RESTAURATEURS

Caroline Relier

Résumé

Le laboratoire UTICA, spécialisé en conservation-restauration d'objets archéologiques et en conservation préventive, a travaillé pendant trente ans exclusivement sur les collections publiques. À sa fermeture, s'est posée la question du devenir de ses archives, qui avaient été conservées intégralement depuis la création de la structure. L'objectif était que ce fonds soit conservé dans son ensemble. Les différentes étapes de la procédure de son dépôt aux Archives nationales se sont échelonnées sur trois ans. Au-delà de ce cas particulier, se pose plus globalement la question du devenir des archives des conservateurs-restaurateurs indépendants qui, en raison de la pyramide des âges de la profession, vont cesser bientôt leur activité et souhaiteraient déposer leurs fonds. Quelles archives conserver ? À quel organisme les transmettre ? Différentes pistes sont évoquées. Il serait souhaitable que, quel que soit le lieu de dépôt, les fonds puissent demeurer traçables et accessibles.

Abstract The Laboratory UTICA, specialised in the conservation-restoration of archaeological objects and in preventive conservation, worked exclusively on public collections for thirty years. Upon its closure, the question arose regarding the future of its archives, which had been preserved in their entirety since the institution's inception. The objective was to ensure that the entire archival collection would be maintained. The various stages of the process for depositing these archives at the National Archives spanned three years. Beyond this particular case, a broader issue emerges concerning the fate of the archives of independent conservators-restorers who, due to the aging demographics within the profession, are soon to retire and wish to deposit their collections. Which archives should be preserved? To which institution should they be entrusted? Several approaches are discussed. It would be desirable that, regardless of the deposit location, these archives remain both traceable and accessible.

Resumen El laboratorio UTICA, especializado en la conservación- restauración de objetos arqueológicos y la conservación preventiva, trabajó durante treinta años exclusivamente en colecciones públicas. Cuando se cerró, surgió la cuestión del futuro de sus archivos, que se había preservado desde la creación de la estructura. El objetivo era que este fondo se mantuviera en su conjunto. Las diferentes etapas del depósito en los Archivos nacionales se desarrollaron durante tres años. Más allá de este caso particular, la cuestión del futuro de los archivos de los conservadores-restauradores independientes surge de manera más general ya que, debido a la pirámide de edades de la profesión, pronto terminará su actividad y deseará depositar sus fondos. ¿Qué archivos conservar? ¿A qué organización transmitirlos? Se mencionan diferentes pistas. Sería deseable que, sea cual sea el lugar de depósito, los fondos puedan permanecer rastreables y accesibles.

Mots-clés UTICA, fonds d'archives, conservateurs-restaurateurs, Archives nationales, procédures de dépôt, traçabilité, accessibilité

Introduction

Un an avant la fermeture de l'Unité de traitement et d'information en conservation archéologique (UTICA), programmée pour la fin 2020 (date à laquelle l'auteur a cessé son activité), nous nous sommes interrogés, conjointement avec les membres du conseil d'administration, sur le devenir des archives produites pendant trente ans et sur la responsabilité qui nous incombait de trouver un lieu d'accueil à ce fonds. En effet, la structure étant une association régie par la loi de 1901, qui allait être dissoute, le fonds se retrouverait sans propriétaire légal, la personne morale ayant cessé d'exister.

Parallèlement, il nous est apparu que d'autres professionnels de la conservation-restauration se posaient les mêmes questions. Si le problème n'existe pas pour les conservateurs-restaurateurs exerçant au sein de structures publiques, qui gèrent elles-mêmes administrativement leurs propres archives (musées, collectivités territoriales), il reste entier pour tous les professionnels indépendants qui souhaiteraient conserver leurs fonds et les rendre accessibles. Il est naturel que ce questionnement prenne de l'importance dans la période où de nombreux professionnels issus des premières formations ont cessé ou vont cesser leur activité : la maîtrise de sciences et techniques de Conservation-restauration des biens culturels de l'université de Paris 1 (MST) a été créée en 1973 et l'Institut français de restauration des œuvres d'art (IFROA) en 1977. Ceux-ci se situant au sommet de la pyramide des âges de la profession, il est logique de penser que le problème de la conservation de ces archives va se généraliser dans les années à venir. Il représente un enjeu important pour le patrimoine dans son ensemble, puisque ces conservateurs-restaurateurs ont travaillé sur des œuvres nombreuses, diverses et parfois majeures, appartenant au domaine public : musées, monuments historiques, archives, bibliothèques ou archéologie. Outre cet intérêt patrimonial, ces fonds constituent potentiellement un apport essentiel à l'histoire de la discipline.

Au-delà du cas individuel d'UTICA, nous nous proposons d'évoquer ici quelques pistes de réflexion.

Le fonds d'UTICA

Créée en 1989 à Saint-Denis (93), UTICA était spécialisée dans le domaine de l'archéologie (métal et matériaux organiques) et de la conservation préventive. Conformément à ses statuts, la structure ne travaillait que pour le domaine public : État, collectivités territoriales, INRAP et autres opérateurs d'archéologie préventive, CNRS. Si le laboratoire a effectué beaucoup de chantiers sur la ville de Saint-Denis et sur le département de la Seine-Saint-Denis, il intervenait sur tout le territoire national ainsi que, ponctuellement, sur des collections provenant de chantiers européens ou extra-européens (Proche-Orient, Mongolie, Kazakhstan). Il employait deux à trois salariés, auxquels s'ajoutaient des contrats à durée déterminée et des stagiaires de l'université. Parallèlement, les salariés avaient diverses activités d'enseignement et d'encadrement de diplômés : Institut national du patrimoine (INP) en formation initiale et continue, École du Louvre, universités.

Dès la création de la structure, l'option a été de conserver toute la documentation produite. Cette politique a pu être poursuivie pendant trente ans car la taille des locaux permettait le stockage des cartons d'archives et la structure n'a jamais été contrainte de déménager.

La documentation produite se répartit de la façon suivante :

- documentation technique : dossiers clients, fiches de traitement, rapports (y compris les étapes intermédiaires), cahiers d'atelier, relevés techniques journaliers;
- documentation administrative : courriers, devis et factures, dossiers d'appel d'offre, comptes rendus d'assemblées générales, documents de création et de clôture, registre d'entrée et de sortie des collections;
- documentation comptable : bilans, suivis de trésorerie, taxes, relevés bancaires;
- documentation des ressources humaines : CV des salariés et des stagiaires, registre du personnel, congés maladie et maternité;
- documentation annexe : cours, rapports de stages, mémoires.

Les supports d'archives sont extrêmement variés jusqu'en 2010 : papier, disquettes 3,5 pouces, CD, puis en grande partie numériques, sur base de données FileMaker avec sauvegarde externe. À cela s'ajoutent d'autres types de documents : photos argentiques, diapositives, radiographies X.

L'ensemble représente environ 15 ml pour 150 cartons d'archives, qui se répartissent en 90 cartons de documentation technique et 60 autres. Un inventaire par carton a été établi.

La recherche concrète d'un lieu pouvant accueillir les archives a débuté quelques mois avant la fermeture du laboratoire. L'idée générale qui s'était dégagée des discussions au sein du conseil d'administration était de trouver un lieu d'accueil pour le fonds dans sa totalité, sans avoir à privilégier la seule documentation technique, considérant que l'ensemble des archives pouvait faire sens.

Parcours du fonds

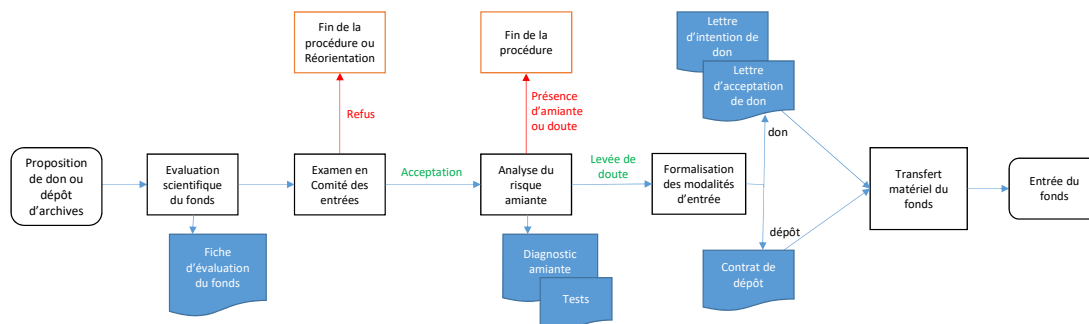
Les étapes de ce parcours se sont révélées extrêmement instructives car elles ont permis de poser un regard extérieur sur l'intérêt du fonds.

Archives nationales du monde du travail à Roubaix

Les Archives nationales du monde du travail¹ prennent en charge des archives sélectionnées pour leur intérêt historique ou patrimonial. Leur champ de compétence concerne à l'échelle nationale les archives des entreprises, des mutuelles, des syndicats ainsi que de certaines associations et particuliers. Elles sont acceptées sous forme de don ou de dépôt² pour être mises à disposition des chercheurs (**fig. 1**)

¹ <https://archives-nationales-travail.culture.gouv.fr/Informations-pratiques/Nous-confier-vos-archives>

² Pour connaître les différentes modalités d'entrée de fonds privés au sein d'archives publiques (don, dépôt, legs ou dation) voir le lien : <https://archives.bas-rhin.fr/et-vos-archives-/archivesprivees/comment-confier-vos-archives/>.



Archives nationales du monde du travail - 2022

Figure 1 Procédure d'entrée des fonds d'archives aux Archives nationales du monde du travail. © AN/ANMT.

Confier le fonds à ce service public nous semblait intéressant car cela lui conférerait une valeur professionnelle et non uniquement patrimoniale. Après un premier contact individuel favorable, le fonds a été refusé car ne correspondant pas aux critères de sélection, sans plus de précisions. Cette piste n'est cependant pas à exclure définitivement pour d'autres ensembles d'archives de conservateurs-restaurateurs.

Archives municipales de Saint-Denis et Archives départementales de la Seine-Saint-Denis

Parallèlement, nous avons contacté les Archives municipales de Saint-Denis, qui représentaient le lieu de dépôt le plus naturel. La responsable du service Archives-Documentation, après avoir rapidement évalué le fonds, a produit une note de synthèse : « ce fonds est intéressant et rare, à la fois par sa complétude (...), son organisation, et bien sûr la nature des travaux menés, témoignage de la méthodologie et de l'activité autour de la conservation préventive et curative des objets archéologiques depuis trente ans ».

Le fonds n'a malheureusement pas pu être pris en charge en raison du volume et de l'incapacité du service à le traiter et à le valoriser dans un délai raisonnable. En revanche, la note a été transmise par ce service aux Archives départementales, susceptibles, à son avis, d'accepter le fonds.

Après expertise, deux archivistes du Département augmentent la note de synthèse en insistant sur l'intérêt national du fonds et estimant que celui-ci relève des Archives nationales, le laboratoire ayant exercé bien au-delà du territoire départemental. Ce sont elles qui se chargent de leur transmettre le dossier.

Archives nationales

Début 2021, le responsable des fonds associatifs aux Archives nationales³ effectue une évaluation sur place et émet un rapport général : administration et activités de la structure, statut juridique du fonds, contenu des archives, état matériel et sanitaire du fonds. Ce rapport se conclut par une synthèse mettant en avant les points suivants :

- le fonds est clos et complet;
- le fonds documente le fonctionnement et l'activité scientifique de conservation et restauration de l'association pendant une trentaine d'années, ce qui permet d'apprécier l'évolution de la méthodologie et des pratiques des restaurateurs;
- cette durée permet également d'appréhender l'évolution de la fonction de restaurateur, la professionnalisation du métier et l'institutionnalisation du champ archéologique en France;
- l'association a travaillé exclusivement pour le domaine public. Cette situation permet de souligner la complémentarité de ses archives avec d'autres fonds publics conservés aux Archives nationales (musées nationaux, direction des Musées de France, sous-direction de l'Archéologie);
- le fonds est rare car l'association est spécialisée dans le traitement d'objets en métal et en matériaux organiques exclusivement. À ce titre, les cahiers d'atelier et le cahier de suivi quotidien de traitement de lyophilisation depuis 1989 sont des documents uniques.

Au-delà de cette analyse qui peut sembler flatteuse, il est apparu lors de cette expertise que l'intérêt du fonds, outre ses aspects techniques et scientifiques, reposait fortement sur l'unicité de certains documents.

Cette synthèse ayant été validée par une première commission, une seconde expertise a été effectuée sur site quelques mois plus tard par quatre autres spécialistes :

- une spécialiste de la conservation préventive qui a évalué l'état matériel du fonds, en particulier la vingtaine de cartons ayant subi une inondation et qui avaient été isolés;
- une spécialiste de l'amiante qui a demandé à visiter les locaux où étaient conservées les archives;
- deux informaticiennes qui ont souhaité avoir des précisions sur le classement numérique des documents, leur support de sauvegarde ainsi que sur la nature de la base de données employée.

Après avis favorable de cette seconde commission et la signature de la lettre de don (qui notifie le transfert de propriété du fonds), l'ensemble des cartons a été pris en charge au début de l'année 2022 par le personnel des Archives nationales, qui a assumé lui-même le transport jusqu'au site de Pierrefitte-sur-Seine. Le transfert de responsabilité a été notifié sur une fiche de prise en charge de documents reprenant les numéros de chaque carton. Le don a été officialisé en décembre 2023 avec attribution du numéro d'entrée 20220100 – sous-série 231 AS.

³ <https://archives-nationales.culture.gouv.fr>

Protocole des Archives nationales

Les dons privés aux Archives nationales sont régis par un protocole très complet qui se révèle particulièrement précis sur les droits du donateur. Il nous a semblé bon d'en exposer ici les points principaux, car ils peuvent servir de base de réflexion pour tout don d'archives privées, quel que soit le lieu d'accueil. Qui plus est, les différents services d'archives publiques se réfèrent très fréquemment aux normes des Archives nationales dans leurs propres protocoles.

Critères de choix

Les propositions sont instruites par un comité des Entrées qui se réunit deux fois par an.

Ce comité peut demander éventuellement une ou plusieurs expertises.

L'acceptation d'un fonds repose sur deux critères essentiels :

- l'intérêt national du fonds;
- la préférence marquée pour le don (matérialisé par la lettre de don avec description du fond), car il implique le transfert de propriété. Le don n'entraîne que le transfert de la propriété matérielle, le donateur ou ses ayants droit restant propriétaires de l'œuvre immatérielle et des droits afférents (droits d'auteur), sauf disposition spécifique.

Si le don est accepté, et après la prise en charge, le donateur reçoit un numéro dans le registre d'entrée des archives. Après classement de ses archives, il en reçoit un répertoire descriptif qui sera mis en ligne sur le site Internet des Archives nationales.

Prise en charge

Le transport est assuré par le personnel des Archives nationales. Il prend effet après la lettre de don. Le donateur ou son représentant doit être présent; il lui est remis un reçu qui lui signifie le transfert de responsabilité.

Mode de conservation et protection des archives

Les archives privées sont conservées dans les mêmes bâtiments et aux mêmes conditions que les archives de l'État. Ces bâtiments bénéficient d'un contrôle de température et d'hygrométrie, d'un contrôle d'accès des personnes (badge nominatif) et d'un contrôle de sécurité incendie. Un service de sécurité assure la surveillance extérieure et intérieure du site 7 jours sur 7 et 24 heures sur 24.

Le matériel de conservation est le même que celui utilisé pour les archives publiques. Les archives privées sont conservées dans des magasins spéciaux dont l'accès est réservé à une petite partie du personnel. Les communications en salle de lecture sont tracées par système informatique et les documents les plus précieux ou susceptibles de vol sont estampillés « Archives nationales ».

Mode de description des archives

Une fois le N° d'entrée du fonds attribué, les cartons reçoivent un numéro, la cote, définitive après classement. Dans un délai de six mois, les archives sont signalées sommairement dans

la salle des Inventaires virtuelle des Archives nationales, rubrique « Parcourir les fonds ». Dans un délai de 2 ans un répertoire est fourni au donateur (descriptif au carton). L'instrument de recherche (ensemble des documents décrivant les archives) sera ensuite publié sur Internet après avoir été préalablement soumis au donateur.

Numérisation des archives

Aucune copie numérique intégrale n'est fournie en échange du don. Certains documents peuvent cependant être numérisés à la demande du donateur ou des Archives nationales dans le cadre de programmes de valorisation.

Copies et archives numériques

Les Archives nationales n'acceptent que des originaux. Elles acceptent aussi des archives nativement numériques, mais celles-ci doivent être décrites comme les documents papier au moment du don.

Élimination

Il n'y a pas de tri des archives; seuls sont éliminés les exemplaires multiples ou les conditionnements usagés. Dans ce cas, le donateur en est informé et les documents éliminés peuvent lui être restitués s'il le souhaite.

Communication des archives

Le don des archives implique leur communication⁴. La communication se fait dans la salle de lecture des Archives nationales et toutes les demandes sont tracées. La communication privilégiée est celle qui vaut pour les archives publiques (Code du patrimoine, droit de la propriété intellectuelle, Règlement européen relatif à la protection des données à caractère personnel (RGPD)).

La copie à usage privé est libre, mais les images ne peuvent être cédées ou diffusées de quelque manière que ce soit.

Si le donateur le souhaite, la communication et les reproductions peuvent être soumises à son autorisation. Il doit alors préciser le délai de non-communication et désigner éventuellement un mandataire et/ou un successeur. Les lecteurs intéressés devront alors remplir un formulaire de demande qui sera communiqué au donateur. Enfin, la communication peut être sur autorisation pour les lecteurs mais libre pour un groupe de personnes désignées (famille, associations). La liste doit figurer dans la lettre de don.

Accès du donateur à ses archives

Le donateur peut consulter ses archives en salle de lecture une fois pourvu d'un numéro de lecteur. Il peut aussi avoir accès aux magasins sur demande accompagné d'un agent pour vérifier les conditions de conservation.

⁴ La communicabilité des archives privées. Disponible sur <https://francearchives.gouv.fr/fr/article/380801239>.

Autres lieux de versement d'archives

Quelques professionnels⁵ ont entrepris des démarches auprès de deux autres institutions afin de verser leurs fonds. Les données exposées ici reflètent leurs expériences ainsi que les informations qu'ils nous ont communiquées.

Centre de recherche et de restauration des musées de France

Le C2RMF possède un service des archives privées. Il a, conformément à ses missions de transmission et de sauvegarde, vocation à recevoir des fonds d'archives de conservateurs-restaurateurs. En 2023, trois conservateurs-restaurateurs y ont déjà versé leurs archives privées.

Types de fonds

Le service collecte des archives papier ainsi que des archives numériques concernant la restauration (rapports écrits, rapports techniques, études préalables, documents d'enseignement) mais aussi des fonds photographiques. Si ce service n'a pas encore reçu de dons en conservation préventive, il se destine à en recevoir à l'avenir.

Actuellement, le C2RMF conserve sur sa base de données 80 000 dossiers répertoriés par œuvres, techniques et dates.

Versement

Le versement peut se faire par don : il est alors contractualisé par une lettre de don. Il est aussi possible de procéder à un dépôt pour un temps donné. Ces démarches peuvent être effectuées après décès par le biais des héritiers. Le service étudie aussi la possibilité de recevoir une documentation plus large (publications, revues, colloques) qui pourrait venir enrichir son fonds documentaire.

Le C2RMF assure le transport après estimation sur place du volume des archives. Une liste décrivant le fonds est remise au donateur.

Conservation des fonds

Le C2RMF a pour charge :

- de maintenir les archives en bon état de conservation en vue de la consultation;
- d'effectuer un classement en boîtes d'archives de conservation pour la documentation papier;
- d'inventorier les archives en respectant les mêmes procédures que les Archives nationales;
- de permettre la consultation (aucune précision n'a été fournie sur le lieu de consultation : sur place ou par Internet).

⁵ L'auteur tient à remercier Florence Herrenschmidt et Silvia Brunetti pour les informations fournies.

Règles de consultation

Elles sont les mêmes que pour les archives publiques (détails non encore précisés).
L'État peut décider de délais de consultation.

Respect des fonds

Le C2RMF se réserve tout droit d'élimination après en avoir averti le donateur.

L'instrument de recherche est mis en ligne une fois le fonds inventorié.

Les règles de reproduction sont précisées dans la lettre de don. Au-delà de la copie libre à titre privé, toute utilisation d'ensembles de documents (pour une exposition par exemple) est soumise à autorisation du donateur, charge au demandeur de conclure les cessions de droit conformément au Code de la propriété intellectuelle.

Le C2RMF est autorisé de façon permanente à utiliser les documents cédés à des fins de reproduction ou d'exposition, dans le respect de la réglementation en vigueur relative à la propriété intellectuelle.

Enfin, le C2RMF pourra effectuer à ses frais des reproductions de tout ou partie des documents reçus en don. Ces documents seront la propriété du C2RMF. Les règles de communication et d'exploitation seront les mêmes que pour les originaux.

Lieu de conservation

Les archives sont regroupées en un seul lieu, à Saint-Cyr-l'École.

Il faut noter cependant que l'un des trois fonds déjà déposé a été réparti entre deux institutions restant en lien : les archives concernant les musées sont restées sous responsabilité du C2RMF à Saint-Cyr-l'École, alors que celles concernant les Monuments historiques ont été versées à la médiathèque de l'Architecture et du Patrimoine à Charenton.

Médiathèque de l'architecture et du patrimoine (MAP)

La MAP, créée en 1996, dépend du service du Patrimoine du ministère de la Culture ; c'est le service d'archives des Monuments historiques et du patrimoine photographique de l'État.

Ce service regroupe les archives, la bibliothèque et la documentation des Monuments historiques et, plus largement, les archives du patrimoine national (immobilier, mobilier, archéologie, photographie).

La MAP a vocation à rassembler les archives professionnelles des conservateurs-restaurateurs ayant travaillé pour le patrimoine (cartons d'archives, manuscrits, thèses, etc.). Plusieurs conservateurs-restaurateurs y ont déjà versé tout ou partie de leurs archives professionnelles après avoir signé une convention de don ; d'autres dons sont en cours.

Les modalités pratiques qui nous ont été communiquées sont les suivantes :

- le transport, la conservation, le classement et l'inventaire sont assurés par la MAP ;
- les répertoires et inventaires des documents cédés sont établis en deux exemplaires papier dont l'un est remis au donateur. Cet inventaire est mis en ligne sur le site Internet de la Médiathèque ;

- la mise en ligne et la communication des archives sont conformes à celles des archives publiques;
- la reproduction, la numérisation et l'exposition des archives sont régies par la réglementation en vigueur après autorisation du donateur.

La MAP est répartie sur trois sites : Paris, Charenton (siège) et Saint-Cyr-l'École (réserves).

Conclusion

Les archives des conservateurs-restaurateurs indépendants représentent une part importante de l'histoire de la discipline. En cela, la conservation de ces archives est un sujet d'avenir.

D'un point de vue individuel, tout d'abord : le professionnel souhaite-t-il un jour verser ses archives? Dans ce cas, que doit-il conserver? Il est apparu au cours de diverses discussions que le conservateur-restaurateur n'était pas obligatoirement le mieux placé pour déterminer l'intérêt de ses propres archives. C'est plutôt le regard extérieur qui va en donner une lecture signifiante. En effet, il est imaginable que dans le futur, selon le biais d'étude (technique, scientifique, historique, sociologique) posé par d'éventuels chercheurs, l'interprétation des archives soit bien différente. Ce qui peut sembler insignifiant au quotidien pourrait se révéler parlant pour une personne extérieure. Quoi qu'il en soit, tout document original (et pas seulement manuscrit) n'existant qu'à un seul exemplaire, pourrait être bon à sauvegarder.

Quant au choix du lieu de versement souhaité (services de l'État, archives municipales, départementales, régionales, autres), c'est au professionnel de le choisir en fonction de ses propres critères, les modalités pouvant varier d'une structure à l'autre. Souhaite-t-il verser tout ou partie de ses archives? Selon quel mode? Accepte-t-il qu'elles soient triées et/ou que certaines pièces soient éliminées? Souhaite-t-il les voir communiquer en tout ou partie? Quel droit de regard veut-il conserver sur leur utilisation? Veut-il en conserver l'accès?

Plus globalement, quels que soient les lieux choisis, il serait souhaitable que la profession établisse un répertoire de ceux-ci, après autorisation de chaque professionnel, permettant ainsi une traçabilité des fonds. Enfin, il est possible d'imaginer qu'une réflexion globale soit menée un jour entre conservateurs-restaurateurs et archivistes, afin d'envisager la création d'un fonds d'archives de la conservation-restauration. Au-delà de la mémoire d'une pratique individuelle et d'une discipline, cela scellerait l'existence d'une profession.

L'auteur

Caroline Relier conservatrice-restauratrice d'objets archéologiques, ex-directrice d'UTICA, caroline.relier@wanadoo.fr