



HAL
open science

MatCal: évaluation multimodale des matériaux de calage biosourcés pour le conditionnement des objets du patrimoine

Julie Arnouil

► **To cite this version:**

Julie Arnouil. MatCal: évaluation multimodale des matériaux de calage biosourcés pour le conditionnement des objets du patrimoine. Science des matériaux [cond-mat.mtrl-sci]. 2024. dumas-04762850

HAL Id: dumas-04762850

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04762850v1>

Submitted on 31 Oct 2024

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

ARNOUIL Julie
N° 381927
Année universitaire 2023-2024
UFR Humanités
MASTER 2 Archéologie, sciences pour l'archéologie
Parcours **ARCHÉOMÉTRIE**

MatCal : Évaluation multimodale des matériaux de calage biosourcés pour le conditionnement des objets du patrimoine.



Université Bordeaux Montaigne
Domaine universitaire F-33607 PESSAC Cedex
tél : +33 (0)5 57 12 44 44
www.u-bordeaux-montaigne.fr

© Image des réserves du Musée du quai Branly - Jacques Chirac / Arnouil Julie.

Remerciements

Je tenais à remercier toutes les personnes qui m'ont accompagné sur ce projet et permis la réalisation de ce travail.

Tout d'abord, je souhaite exprimer ma gratitude envers Eléonore Kissel et Sandie Le Conte pour leur encadrement, leurs conseils avisés et leur bienveillance tout au long de ce projet. Un immense merci pour m'avoir offert l'opportunité de réaliser ce stage très formateur dans ces lieux d'exception que sont le Musée du quai Branly - Jacques Chirac et le laboratoire du département des restaurateurs de l'Institut national du Patrimoine.

Je remercie chaleureusement Chloé Ranchoux pour sa patience, sa disponibilité, ses sages conseils et sa supervision bienveillante lors de mes manipulations au laboratoire de l'INP. Merci également à Julie Gordon, pour son accompagnement pendant mes analyses au MEB et ses recommandations.

Un grand merci à Anaëlle, Ash, Blandine, Charlotte, Clothilde, Fabrice, Fanny, Vincent du Musée, ainsi qu'à Demba, Mylène et Nicolas de l'INP, pour avoir rendu mon stage au sein de ces deux institutions agréable et mon séjour à Paris aussi enrichissant.

Je tiens également à remercier M. Ayed Ben Amara pour son soutien dans cette périlleuse recherche de stage et pour m'avoir encouragé tout au long de ce processus à ne pas perdre espoir et à persévérer.

À mes parents, mes frères et ma famille, merci de continuer à m'encourager dans la poursuite de mes études. Je vous promets que cette aventure se termine bientôt.

Enfin, un immense merci à mes amis Chloé, Jeanne, Luna et Morgan, qui ont rendu ces deux années de master inoubliables par leur soutien indéfectible, leur amitié précieuse et les moments de partage que nous avons vécus ensemble.

Avant-propos.....	6
Liste des illustrations et tableaux.....	7
Glossaire et abréviations:.....	10
Introduction.....	11
PREMIÈRE PARTIE : REPENSER LES MÉTHODES DE CONDITIONNEMENT DES OBJETS DU PATRIMOINE : ÉTAT DES LIEUX ET PROBLÉMATIQUE.....	12
<i>I. État des lieux du conditionnement des objets du patrimoine.....</i>	<i>12</i>
1) Le Conditionnement des objets du patrimoine : Une perspective historique.....	12
2) Le calage et son importance.....	15
<i>II. Conditionnement et développement durable : Un défi pour la préservation du patrimoine.....</i>	<i>19</i>
1) Musées écoresponsables : stratégies et pratiques de développement durable.....	19
2) Problématiques des matériaux non recyclables dans une perspective durable.....	20
<i>III. Vers une innovation dans les matériaux de conditionnement.....</i>	<i>22</i>
1) Etat de la recherche des nouveaux matériaux dans le contexte muséal.....	22
2) Les matériaux biosourcés : une solution plus écologique pour le conditionnement ?	24
DEUXIEME PARTIE : MATERIEL D'ETUDE ET METHODOLOGIE.....	26
<i>I. Matériaux de calage biosourcés.....</i>	<i>26</i>
1) Les fibres végétales.....	26
1.1 Kapok.....	26
1.2 Élanocrin.....	27
1.3 Crin végétal.....	29
2) Balles de Céréales (Millet et Sarrasin).....	30
2.1 Millet commun.....	30
2.2 Sarrasin (Cosses de sarrasin).....	30
3) Fibre textile recyclée.....	31
<i>II. Protocole d'Analyse.....</i>	<i>32</i>
1) Imagerie.....	32
1.1 Microscope 3D.....	32
1.2 Microscope optique (VIS et UV).....	32
1.3 MEB (Microscope électronique à balayage).....	33
1.4 Prise de vue VIS/UV.....	33
2) Analyse physico-chimique.....	34
2.1 Test d'Oddy.....	34
2.2 Mesure de pH des matériaux.....	37
2.3 Test de dégorgement (solidité des couleurs).....	38
2.4 Vieillessement.....	39
3) Analyse mécanique.....	40
3.1 Test mécanique : reprise de forme et de fatigue des matériaux.....	40
3.2 Vibrations.....	41
TROISIEME PARTIE : RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	43

<i>I. Résultats des analyses</i>	43
1) Résultat des différentes observations.....	43
1.1 Microscopie 3D et microscope optique (VIS et UV).....	43
1.2 MEB.....	45
2) Analyses physico-chimiques.....	48
2.1 Test d'Oddy.....	48
2.2 Mesure de pH des matériaux.....	50
2.3 Tests de dégorgement.....	50
2.4 Vieillissement.....	51
3) Analyses mécaniques.....	52
3.1 Test mécanique : relaxation et fatigue.....	52
3.2 Vibration.....	60
<i>II. Discussion</i>	62
1) Analyse critique des solutions proposées.....	62
2) Perspectives d'avenir.....	64
Conclusion	66
BIBLIOGRAPHIE	67
ANNEXE	71

Avant-propos

Le projet MatCal, financé par la Fondation des Sciences du Patrimoine, est porté par le Musée du quai Branly - Jacques Chirac, en collaboration avec le laboratoire du département de la formation des restaurateurs de l'Institut national du patrimoine, avec le Muséum d'Histoire Naturelle de Paris comme partenaire.

L'objectif de ce projet est de répondre à la volonté des professionnels de la conservation du musée de réduire leur empreinte carbone. Cela passe par plusieurs axes : une réflexion sur les consignes climatiques pour diminuer la consommation d'énergie, la rationalisation des transports des collections et des personnes dans le cadre des prêts et des expositions itinérantes, ainsi que la recherche de nouveaux matériaux de calage, sujet de ce travail de mémoire. Dans la continuité des recherches récentes sur l'utilisation de matériaux biosourcés, les équipes du musée et du muséum ont acquis des matériaux naturels non transformés tels que des fibres de kapok, de noix de coco (Élancrin®), de palmier ("crin végétal") ou encore de la fibre textile recyclée. Certains de ces matériaux, sous leur forme naturelle, sont traditionnellement utilisés, notamment dans le secteur de la tapisserie d'ameublement.

Le stage s'est déroulé en deux phases. Une première partie s'est effectuée au musée du quai Branly - Jacques Chirac pour comprendre les problématiques liées à l'emballage et au conditionnement des objets. La seconde phase s'est déroulée au laboratoire du département des restaurateurs de l'INP, où les analyses physico-chimiques des matériaux ont été réalisées.

J'ai eu l'opportunité de présenter le projet MatCal lors de la journée d'étude "Atelierrr Éco-conditionnement", organisée par l'association Les Augures, le 23 mai au musée du quai Branly, lors d'un atelier sur l'éco-conditionnement et le choix des matériaux co-encadré avec Mme Florence Bertin, Responsable du département des collections au musée des Arts décoratifs de Paris et chargée de cours à l'École du Louvre, et M. Vincent Saporito, responsable du pôle de régie des collections du musée. Cette présentation a permis d'exposer les débuts de nos recherches et de rencontrer des professionnels pour discuter des défis liés à l'éco-conditionnement, ainsi que d'explorer l'intégration de ces nouveaux matériaux dans leurs pratiques professionnelles.



★ MUSÉE DU QUAI BRANLY
JACQUES CHIRAC



Institut national
du patrimoine



Liste des illustrations et tableaux

- Figure

Figure 1: Déménagement des pastels de La Tour en 1919, du front Nord à Arras. © Ministère de la Culture, Médiathèque de l'architecture et du patrimoine.....	P.14
Figure 2 : Exemple de caisse de transport vue lors du stage. Préparation d'un prêt d'objets du musée pour une exposition temporaire aux Etats-Unis. © Arnouil Julie/mqB-JC	P.16
Figure 3 : Conditionnement de marionnette de théâtre de Sumatra. © Arnouil Julie/mqB-JC.....	P.16
Figure 4 : Conditionnement d'une écorce peinte aborigène © Arnouil Julie/mqB-JC.....	P.17
Figure 5 : Photographie et image microscope 3D (x200) de la fibre de Kapok. © Arnouil Julie	P.26
Figure 6 : Photographie et image microscope 3D (x200) de l'élanclin. © Arnouil Julie.....	P.27
Figure 7 : Photographie et image microscope 3D (x200) de l'élanclin carboné. © Arnouil Julie.....	P.28
Figure 8 : Photographie et image microscope 3D (x200) de l'élanclin latex. © Arnouil Julie.....	P.29
Figure 9 : Photographie et image microscope 3D (x200) du Crin Végétal. © Arnouil Julie.....	P.29
Figure 10 : Photographie et image microscope 3D (x200) des balles de millet. © Arnouil Julie.....	P.30
Figure 11 : Photographie et image microscope 3D (x200) des balles de sarrasin. © Arnouil Julie.....	P.31
Figure 12 : Photographie et image microscope 3D (x50) de la fibre textile recyclée. © Arnouil Julie.....	P.31
Figure 13 : Photographie du microscope 3D Keyence. © Arnouil Julie.....	P.32
Figure 14 : Image au microscope de crin végétal x10: a) lumière visible b) UV A. © Arnouil Julie.....	P.32
Figure 15 : Mise en place des prises de vue des coupons de test d'Oddy. © Arnouil Julie.....	P.33
Figure 16 : Schéma prise de vue rasante et sous lumière UV des coupons des tests d'Oddy.....	P.34
Figure 17 : Test d'Oddy Green and Thickett 1995.....	P.35
Figure 18 : Schéma d'une éprouvette du test d'Oddy dit "3 en 1".....	P.36

Figure 19 : Prise de vue des échantillons d'Élancrin lors des mesures de pH par macro-extraction. © Arnouil Julie.....	P.38
Figure 20 : Schéma du test de dégorgement des matériaux.....	P.38
Figure 21 : Mise en place des échantillons dans l'enceinte de vieillissement. © Arnouil Julie.....	P.39
Figure 22 : Mise en place des prises de vue pour les tests d'usure et de reprise de forme.© Arnouil Julie.....	P.40
Figure 23 : Mise en place des tests de vibration. © Arnouil Julie.....	P.41
Figure 24 : Images au microscope 3D de l'elancrin latex.....	P.43
Figure 25 : Images au microscope 3D de l'elancrin carbone (x200) et du kapok (x300)	P.43
Figure 26 : Images au microscope optique des fibres textiles recyclées (x5) en UV A puis UVB	P.44
Figure 27 : Images au microscope optique de l'elancrin latex (x5) en UV A et du kapok en VIS et UV A (x10).....	P.44
Figure 28 : Images MEB des trois élancrets (x250).....	P.45
Figure 29 : Images MEB du crin végétal x200 et x300.....	P.45
Figure 30: Images MEB du kapok x250 et x1000.....	P.46
Figure 31 : Images MEB de la cosse de millet intérieur et extérieur.(x250 et x1800).....	P.46
Figure 32 : Images MEB de la cosse de sarrasin intérieur et extérieur.(x250 et x1800).....	P.47
Figure 33 : Images au MEB et au microscope 3D des coupons métalliques après test d'oddy de différents matériaux.....	P.48
Figure 34 : Coupons métalliques du test d'oddy sous différentes lumières.....	P.48
Figure 35 : Photographies des coupons des tests d'oddy du crin végétal et d'élancrin latex..	P.49
Figure 36 : Graphique évolution du pH des matériaux.....	P.51
Figure 37 : Image du coussin de kapok à des intervalles différents avant et après traitement des fausses couleurs.....	P.52
Figure 38 : Graphique des courbes de référence reprise de formes des 8 coussins.....	P.53
Figure 39 : Graphique des suivis de reprise de formes des 8 coussins à 1 seconde en comparaison avec la référence.....	P.54
Figure 40 : Graphique des suivis de reprise de formes des 8 coussins à 7 secondes en comparaison avec la référence.....	P.54
Figure 41 : Graphique des suivis de reprise de formes des 8 coussins à 15 secondes en comparaison avec la référence.....	P.55

Figure 42 : Graphique du test de fatigue du coussin de crin végétal sur 4 intervalles (en seconde) en comparaison avec la courbe de référence (coussin avant le poids).....	P.56
Figure 43 : Graphique du test de fatigue du coussin d'élancri sur 4 intervalles (en seconde) en comparaison avec la courbe de référence (coussin avant le poids).....	P.56
Figure 44 : Graphique du test de fatigue du coussin d'élancri carbone sur 4 intervalles (en seconde) en comparaison avec la courbe de référence (coussin avant le poids).....	P.57
Figure 45 : Graphique du test de fatigue du coussin d'élancri carbone et kapok sur 4 intervalles (en seconde) en comparaison avec la courbe de référence (coussin avant le poids).....	P.57
Figure 46 : Graphique du test de fatigue du coussin de fibre textile recyclée sur 4 intervalles (en seconde) en comparaison avec la courbe de référence (coussin avant le poids).....	P.58
Figure 47 : Graphique du test de fatigue du coussin de kapok sur 4 intervalles (en seconde) en comparaison avec la courbe de référence (coussin avant le poids).....	P.58
Figure 48 : Graphique du test de fatigue du coussin de millet sur 4 intervalles (en seconde) en comparaison avec la courbe de référence (coussin avant le poids).....	P.59
Figure 49 : Graphique du test de fatigue du coussin de sarrasin sur 4 intervalles (en seconde) en comparaison avec la courbe de référence (coussin avant le poids).....	P.59
Figure 50 : Spectre de l'accélération pour l'élancri, l'élancri carbone, la fibre textile et le kapok installés dans une caisse en bois.....	P.60
Figure 51 : Spectre de l'accélération pour le millet et le sarrasin installés dans une boîte container.....	P.61

- Tableaux

Tableau 1 : Tableau mesure pH par extraction à froid.....	P.50
Tableau 2 : Tableau des résultats obtenus des tests de dégorgement.....	P.51
Tableau 3 : Prix des matériaux et de leurs fournisseurs (Prix à la date du 24/08/2024).....	P.63
Tableau 4 : Résultats de la grille de notation conçue par A. Perrichon avec les huit matériaux testés.....	P.64

Glossaire et abréviations:

AFNOR : Association française de normalisation.

Conditionnement: art de conditionner les œuvres, c'est-à-dire de les préparer avant un transport afin d'éviter tout choc mécanique ou climatique ; cette action est différente de l'emballage. Le conditionnement concerne aussi la mise en réserve des collections dans les meilleures conditions.

CO₂eq: Le CO₂eq ou équivalent CO₂ est une unité qui mesure l'impact des différents gaz à effet de serre (GES) en les convertissant en une quantité équivalente de dioxyde de carbone (CO₂). Cela permet de comparer leur contribution au réchauffement climatique de manière standardisée, en tenant compte du potentiel de réchauffement global (PRG) de chaque gaz.(European Commission)

CV: Crin végétal

E: Élanclin

EC: Élanclin Carbone

ECK: Élanclin Carbone et Kapok

FTR: Fibre Textile Recyclée

INP: Institut national du patrimoine (département des restaurateur)

ISO: International Organization for Standardization (Organisation internationale de normalisation)

K: Kapok

mqB-JC: Musée du quai Branly - Jacques Chirac

M: Millet

MEB: Microscope électronique à balayage

S: Sarrasin

UV: ultra-violet

VIS: visible

Introduction

Dans le domaine de la conservation du patrimoine, la préservation des objets historiques et culturels revêt une importance capitale, tant pour les générations actuelles que futures. Toutefois, cette tâche complexe implique également la protection de ces artefacts contre les dommages physico-chimiques qui peuvent survenir lors de leur transport, de leur stockage ou de leur exposition. Les matériaux de calage jouent ainsi un rôle crucial, en assurant la stabilité et la sécurité des objets patrimoniaux.

Ces dernières années, avec une prise de conscience croissante des enjeux environnementaux, les musées revoient leurs pratiques traditionnelles en matière de préservation des biens culturels. Cela se traduit par une volonté de réduire leur consommation énergétique ainsi que leur empreinte carbone, par l'optimisation des transports des biens pour des prêts ou des expositions itinérantes mais aussi via l'utilisation de nouveaux matériaux de calage. L'intérêt pour l'utilisation de matériaux bio-sourcés s'est considérablement accru. Ces matériaux, souvent issus de ressources naturelles renouvelables telles que le papier recyclé, les fibres végétales ou les bioplastiques, offrent une alternative prometteuse aux matériaux pétro-sourcés utilisés depuis le cours du XX^e siècle. Au-delà de leur origine écologique, les matériaux bio-sourcés incarnent les valeurs d'éco-conception. Leur utilisation pourrait contribuer à réduire l'empreinte carbone associée aux opérations de conservation du patrimoine, en limitant la dépendance aux ressources non renouvelables et en favorisant la réutilisation et le recyclage des matériaux. Dans cette optique, l'adoption de matériaux de calage bio-sourcés représente une étape significative vers la mise en œuvre de pratiques plus respectueuses de l'environnement au sein des institutions culturelles.

L'objectif de ce mémoire est de faire une évaluation multimodale des matériaux de calage bio-sourcés pour les objets du patrimoine. Cette approche implique l'utilisation de différentes méthodes d'évaluation, telles que les analyses physico-chimiques, mécaniques et environnementales, afin de mieux comprendre les performances et les propriétés de ces matériaux dans divers contextes de conservation.

À travers cette étude, nous chercherons à évaluer comment les matériaux de calage bio-sourcés se comparent aux matériaux utilisés de nos jours en termes de capacité de protection des objets du patrimoine, tout en tenant compte de leur durabilité, de leur compatibilité avec les matériaux patrimoniaux et de leur impact environnemental.

En examinant ces aspects de manière approfondie, ce mémoire vise à contribuer à l'évolution des pratiques de conservation en proposant des solutions innovantes et durables pour la protection des trésors culturels et historiques qui font partie de notre héritage commun.

Ce mémoire est structuré en trois parties. La première partie examine les enjeux du conditionnement des objets patrimoniaux dans les musées, en abordant les pratiques traditionnelles, les défis liés à l'utilisation de matériaux non recyclables, et les innovations vers des solutions de conditionnement plus écologiques. Ensuite, les matériaux biosourcés utilisés dans notre recherche ainsi que la méthodologie des analyses seront présentés en détail. Enfin, les résultats obtenus et leurs implications pour l'avenir de la préservation du patrimoine seront discutés.

PREMIÈRE PARTIE : REPENSER LES MÉTHODES DE CONDITIONNEMENT DES OBJETS DU PATRIMOINE : ÉTAT DES LIEUX ET PROBLÉMATIQUE

Dans le contexte muséal d'aujourd'hui, la question du conditionnement des œuvres d'art et des objets culturels revêt une importance cruciale. Les méthodes de conservation et de protection des collections employées depuis le milieu du XXe siècle nécessitent une réévaluation face aux défis environnementaux, aux avancées technologiques, et aux exigences croissantes en matière de durabilité. Ainsi, le conditionnement ne se limite plus à une simple protection physique ; il englobe désormais une volonté de préservation à long terme, le respect des normes écologiques et de réduction de l'empreinte carbone. Face à ces nouveaux enjeux, il devient urgent de repenser et d'innover dans les méthodes de conditionnement afin de répondre aux exigences du présent tout en anticipant celles du futur.

L'objectif de cette partie est d'examiner les enjeux liés au conditionnement des objets du patrimoine dans les musées s'articulant en trois parties. Dans un premier temps, nous dresserons un état des lieux des pratiques traditionnelles de conditionnement, en mettant en lumière l'évolution historique de ces méthodes ainsi que l'importance du calage dans la conservation préventive. Ensuite, nous aborderons les problématiques liées à l'utilisation de matériaux non recyclables et à usage unique, en lien avec les exigences contemporaines de développement durable en contexte muséal. Enfin, nous explorerons les pistes d'innovation, notamment à travers la recherche de nouveaux matériaux et l'intégration de solutions biosourcées pour un conditionnement plus écologique.

I. État des lieux du conditionnement des objets du patrimoine

1) Le conditionnement des objets du patrimoine : Une perspective historique.

Les objets du patrimoine ont toujours nécessité un transport soigneux, depuis leur acquisition jusqu'à leur installation dans les musées, en passant par les nombreux déplacements pour les prêts et les expositions temporaires, ou encore pour leur dépôt en réserve. Ce besoin constant de mouvement a exigé que ces objets soient conditionnés de manière à assurer leur conservation optimale.

Au fil des siècles, les méthodes de conditionnement des objets patrimoniaux ont considérablement évolué, s'adaptant aux techniques et aux avancées technologiques de chaque époque. Parmi les premières méthodes de transport et de déménagement connues des quatre derniers siècles, on note l'utilisation de la paille d'avoine, préférée pour sa souplesse par comparaison à la paille de blé ou de seigle. La paille d'avoine brisée, ou "paille menue", était particulièrement prisée car, ayant déjà servi pour le calage, elle était moins dure et donc moins susceptible d'endommager les objets fragiles. Plus tard, les déménageurs ont introduit l'utilisation de la fibre de bois, appelée "frisure", pour caler les objets. Ces deux matériaux – la paille et les frisures – ont été largement utilisés comme "affouillement"¹ pour protéger les objets dans leur emballage, une méthode typique pour transporter la vaisselle, les objets courants et la verrerie. Pour les objets les plus fragiles, la paille de blé était parfois utilisée, mais avec précaution, en raison du risque de rayures si le blé était mal battu. Pour éviter cela, les objets étaient souvent enveloppés dans du papier de soie avant d'être emballés, selon une technique appelée le "paquetage". La technique du calage, quant à elle, comportait divers procédés en

¹ Le terme **affouillement** est un terme ancien et rare qui signifie l'action de remplir les vides autour d'un objet pour le caler, généralement avec des matériaux souples ou en vrac afin de les stabiliser pendant leur transport, assurant ainsi leur conservation et évitant les dommages.

fonction du poids de l'objet, de sa texture, du mode de transport prévu, et de sa destination. On distingue ainsi différents types de calage, comme le tampon², le paillon ou encore le calage "à la torche"³, chacun adapté aux spécificités des objets transportés. Ces méthodes démontrent une ingéniosité constante et une adaptation aux défis de la préservation des trésors patrimoniaux, garantissant leur protection au cours de leurs nombreux voyages (Foucauld, 1990).

Le transport d'œuvres d'art se professionnalise au XIXe siècle, avec la recrudescence des prêts et des expositions temporaires. La Première Guerre mondiale introduit toutefois de nouvelles contraintes qui s'ajoutent aux défis habituels. En plus de gérer la fragilité des objets, leur valeur économique, artistique, patrimoniale, et identitaire, ainsi que la diversité de leurs formes, poids et matières, il a fallu faire face à des défis spécifiques à la guerre. Parmi ceux-ci, l'urgence de l'évacuation, la grande quantité d'œuvres et de monuments à protéger, l'état souvent dégradé des biens, les pénuries de matériel, et la concurrence avec d'autres ressources nécessaires pour l'effort militaire étaient des obstacles majeurs. Lors du déménagement du Louvre pour la première guerre mondiale, les quantités restreintes de matériels et le manque de préparation ont beaucoup joué sur l'évacuation des œuvres. Sous la surveillance de Paul Jamot, peintre, critique d'art et conservateur de musée français, 770 œuvres ont été envoyées dans le sud de la France, précisément aux couvents des Jacobins à Toulouse mais seulement 240 tableaux ont été mis en caisses et les autres ont voyagés "*en vrac, simplement enveloppés dans du papier dans les voitures capitonnées de déménagement*" comme l'indique Jamot dans sa lettre⁴. Un an plus tard, à la suite de la visite du ministre de l'Instruction publique, Paul Jamot organise une réorganisation des œuvres et emballe les œuvres et châssis qui n'avaient pas pu être protégés lors du départ (Bertinet, 2015). La Première Guerre mondiale a donc représenté un tournant décisif dans ces pratiques, en raison du grand nombre d'œuvres déplacées, de la rapidité d'exécution requise, et de la mise en place de structures spécialisées pour gérer cette tâche dans un contexte de transformation des transports (Amice, 2022).

Les pastels de Quentin de La Tour constituent un exemple emblématique des premiers questionnements documentés sur l'emballage et le transport d'œuvres d'art fragiles. Ces œuvres, réalisées avec une technique extrêmement délicate, ont suscité des préoccupations quant à leur préservation dès leur création. Le premier transport attesté des pastels de La Tour a eu lieu en 1810, lorsqu'ils ont été mis aux enchères à Paris au nom de l'école gratuite de dessin de Saint-Quentin. Cette opération a été réalisée malgré la fragilité extrême des pastels, et après cet événement, leur transport a souvent été refusé en raison des risques trop élevés de dégradation. En 1878, à l'occasion de l'Exposition universelle, certains pastels ont été prêtés, mais uniquement ceux qui avaient été restaurés et consolidés. Contrairement au premier transport, effectué en roulage et en voiture, ce voyage s'est déroulé en train, avec des instructions strictes pour accorder des "soins exceptionnels et tout particuliers" (Jeffares, 2024).

Pendant la Première Guerre mondiale, en 1917, les pastels ont été évacués de Saint-Quentin à Maubeuge, dans le cadre d'une opération menée par la Kunstschutz, un groupe allemand mis en place pour protéger les œuvres d'art des régions occupées. Le déménagement, sous la supervision du lieutenant Detlev von Hadeln, a rencontré plusieurs défis. Initialement, les pastels ont été placés dans des caisses en bois, mais l'humidité du bois a rapidement été identifiée comme une menace pour les œuvres. En réponse, les pastels ont été emballés

² Boudins de fibre roulés sur du papier.

³ Fibre de bois tournée sur un faisceau de paille.

⁴ citation d'un brouillon de lettre de Jamot au ministre de l'Instruction publique cité par Arnaud Bertinet dans « Évacuer le musée, entre sauvegarde du patrimoine et histoire du goût, 1870-1940 » p.13.

individuellement dans du foin, chaque pastel étant déposé dans une boîte à couvercle et transporté à faible allure dans quatre véhicules.

En 1919, après la guerre, les pastels ont été déplacés au musée du Louvre par les autorités françaises, désireuses de surpasser les efforts allemands. Dirigée par Fernand Sabatté, cette opération de transport a été méticuleusement préparée. Des caisses spécialement conçues pour les pastels ont été fabriquées, et les œuvres ont été transportées dans des véhicules équipés de remorques légères. Les vibrations du moteur ont été atténuées par des sacs de terre pour compenser l'élasticité des ressorts, et un système de suspension intérieure par poulies a été installé pour éviter que les caisses ne touchent le plancher des véhicules, le tout étant calé par des sacs de paille pour prévenir tout balancement (Fig.1). Un rapport publié dans *L'Illustration* du 10 mai 1919 décrit la précision de ces précautions : "*Chaque caisse se trouvait ainsi isolée et noyée au milieu d'un véritable coffrage tout à la fois solide et élastique. Dans la voiture, on ne ressentait aucun choc, aucun cahot.*" Les pastels ont ainsi été transportés en toute sécurité, et Gaston Brière, conservateur adjoint au département des peintures et des dessins au Louvre, les a retrouvés en parfait état le 24 avril de la même année.

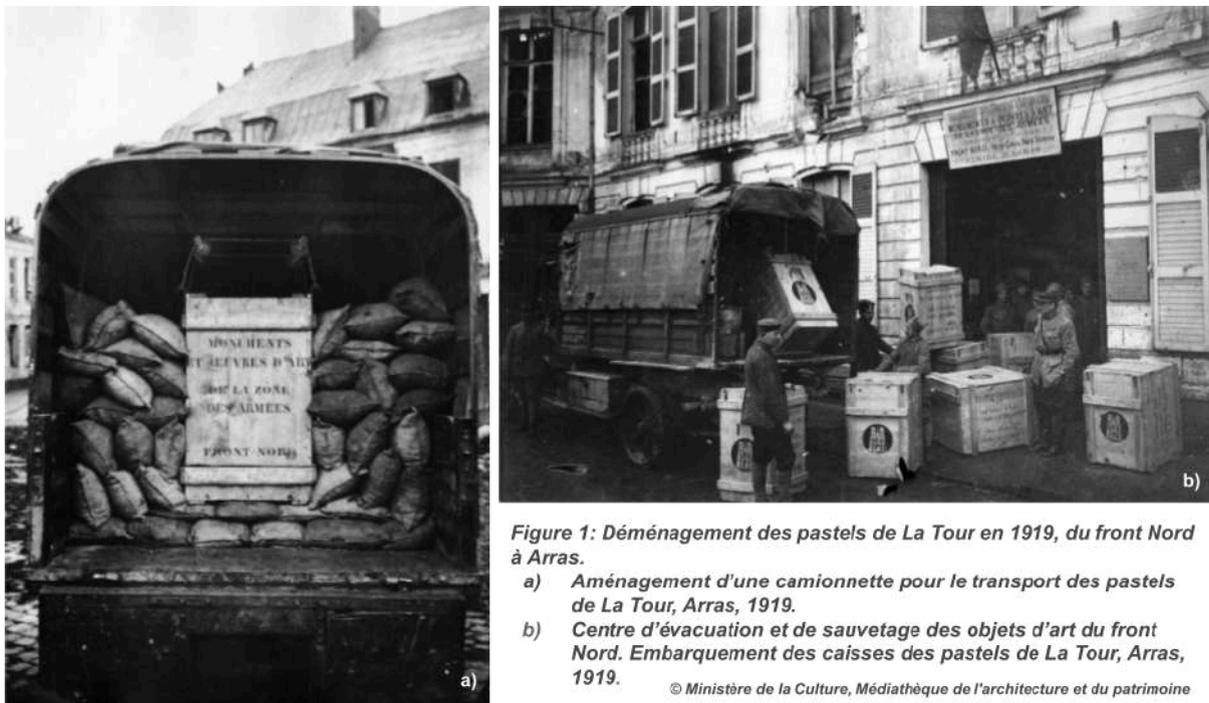


Figure 1: Déménagement des pastels de La Tour en 1919, du front Nord à Arras.

- a) Aménagement d'une camionnette pour le transport des pastels de La Tour, Arras, 1919.
- b) Centre d'évacuation et de sauvetage des objets d'art du front Nord. Embarquement des caisses des pastels de La Tour, Arras, 1919.

© Ministère de la Culture, Médiathèque de l'architecture et du patrimoine

Après ces événements, le déplacement des pastels a été de plus en plus restreint, jusqu'à une interdiction générale de transport de ces œuvres fragiles, excepté en cas de conflit ou de catastrophe naturelle. Pendant la Seconde Guerre mondiale, les pastels ont de nouveau été évacués. Initialement déplacés au château du Rocher à Mézangers en Mayenne, ils ont ensuite été transférés en 1944 au château de Sourches dans la Sarthe, avant de finalement revenir à Saint-Quentin le 3 septembre 1945. Il est important de noter que, bien que certains pastels aient été envoyés au château de Chambord, de nombreuses œuvres de Quentin de La Tour ont été jugées trop fragiles pour supporter de longs trajets, et ont donc été laissées en place pour éviter tout risque de dommage (Cabezas, 2009).

Depuis les années 1960, l'emballage et le transport des objets d'art ont rapidement évolué en s'inspirant des modèles utilisés dans les industries et le commerce. En effet, les techniques d'emballage et de transport des denrées périssables, des objets électroniques fragiles, et même des premiers instruments de l'ère spatiale, ont servi de référence. Bien que les professionnels

des musées, tels que les conservateurs, régisseurs, restaurateurs et scientifiques, aient initialement été sceptiques quant à l'introduction de ces nouvelles méthodes, celles-ci ont rapidement été adoptées pour assurer la pérennité des objets. Depuis les années 1990, l'emballage et le transport des œuvres sont standardisés par des normes nationales et internationales (AFNOR et ISO), telles que la norme NF EN 15946 pour les principes d'emballage et la norme NF EN 16648 pour les méthodes de transport (Stolow, 1987).

2) Le calage et son importance

Lors du transport ou de la manutention d'œuvres, deux principaux types de dégradation peuvent survenir. Le premier type est lié à l'environnement, comprenant des facteurs tels que l'humidité, la lumière, les polluants, ainsi que les infestations d'insectes et la prolifération de micro-organismes. Le second type de dégradation est d'origine humaine. Une manipulation négligente, un manque de précautions, un entreposage inapproprié ou des déplacements trop fréquents de l'objet peuvent causer des dommages irréversibles. À ces facteurs, il convient d'ajouter les effets liés aux modes de transport, notamment les vibrations auxquelles les œuvres sont exposées. Par conséquent, l'emballage et le transport doivent minimiser l'impact de ces facteurs en recréant au mieux l'environnement habituel de l'œuvre. Dans les cas les plus extrêmes, il est essentiel de maintenir des conditions qui, même imparfaites, nuisent le moins possible à l'œuvre (Stolow, 1987). Les plus grands risques pour une œuvre en transport proviennent des chocs et des vibrations, qui peuvent affaiblir ses matériaux et compromettre son intégrité. L'emballage atténue ces risques, mais les vibrations varient selon le mode de transport et s'accumulent avec le temps. Les chocs surviennent lors de freinages brusques ou de mauvais chargements, surtout durant les phases critiques de chargement et déchargement. Multiplier les types de transport et la durée du voyage accroît les risques en rendant plus difficile le contrôle des variations de température et d'humidité (Delmas, 2021).

Il existe deux principaux types d'emballage et de calage possible pour le transport. Le tamponnage désigne toutes les formes de protection et d'emballage qui ne nécessitent pas l'utilisation d'une caisse. Ce type d'emballage est adapté à la plupart des objets pouvant être manipulés manuellement. Il est souvent suffisant pour les trajets en camion en France et en Europe. Pour un tamponnage optimal, il est essentiel d'assurer un emballage en trois couches. La première couche, en contact direct avec l'objet, protège sa surface. La deuxième couche sert de coussin, réduisant les vibrations, amortissant les chocs, tout en modérant les variations de température et d'humidité. La dernière couche constitue l'enveloppe finale de l'objet, agissant comme une coque résistante aux chocs et facilitant sa manipulation.

La caisse quant à elle, est très souvent utilisée pour les transports internationaux par avion et/ou par bateau. Elle offre une excellente protection aux objets de valeur et sont prisées comme emballages muséaux. Il est possible d'en fabriquer de presque toutes les tailles avec des outils et du matériel d'atelier courants. De plus, une caisse de bois bien faite peut être utilisée à maintes reprises (Stolow, 1987).

Il existe différents types de caisses de transport pour répondre à des problématiques différentes comme le type, la forme, la texture et le nombre d'objets à conditionner. Le principe reste le même que le tamponnage. La caisse permet de regrouper les trois couches de protection et ainsi simplifie et rend plus rapide l'emballage (Fig. 2)

Dans ces caisses, différents types de calages sont possibles. Le premier, et le plus couramment utilisé pour transporter le plus grand nombre d'œuvres en utilisant le moins de caisses, est illustré dans la figure n° 2. La mousse de polyuréthane est modelée en fonction des formes et

des dimensions de l'objet à expédier. Il est parfois nécessaire d'utiliser plusieurs couches de mousse si l'objet est trop large ou s'il doit être conditionné à l'horizontale, découpé en guillotine. Ainsi, la mousse épouse les formes de l'objet, le maintenant en place pendant le transport et réduisant les impacts et chocs qu'il pourrait subir au cours du voyage (Schlichting 1994).



Figure 2 : Exemple de caisse de transport vue lors du stage. Préparation d'un prêt d'objets du musée pour une exposition temporaire aux Etats-Unis.
©Arnouil Julie/mqB-JC

En ce qui concerne le conditionnement des objets du patrimoine dans les réserves, les régisseurs essaient de créer des supports qui permettent une manipulation des œuvres la plus facile possible. De plus, ces supports doivent maintenir les objets lors de leur manipulation et éviter leur mouvement.



Figure 3 : Conditionnement de marionnette de théâtre de Sumatra.
© Arnouil Julie/mqB-JC

L'exemple du Musée du quai Branly (Fig. 3) montre la fabrication d'un support de présentation pour une marionnette de Sumatra. Celle-ci est posée sur une plaque en polypropylène alvéolaire, recouverte d'une fine couche de mousse Plastazote® (environ 0,5 cm d'épaisseur). Les deux plaques sont fixées entre elles. Enfin, l'objet est maintenu en place à l'aide de morceaux de mousse Plastazote collés avec des pistolets thermocollants. Une fois fixé, l'objet est installé, et si nécessaire, des sangles en coton sergé sont ajoutées pour maintenir des éléments trop mobiles, comme du tissu ou des plumes.

Pour d'autres objets plus sensibles, comme les écorces peintes aborigènes d'Australie présentées au musée, un autre support a été mis en place. En effet, les écorces sont des matériaux qui continuent de réagir aux fluctuations environnementales. Il a donc été nécessaire de créer un support qui accompagne le mouvement des écorces, ainsi qu'un système de mise en réserve permettant de les visualiser sans les manipuler excessivement. Toujours fixée sur une plaque en polypropylène alvéolaire, un coussin en intissé de polyéthylène Tyvek® rempli de billes de mousse de polystyrène (Fig. 4) a été ajouté pour offrir ce soutien adapté.



*Figure 4 : Conditionnement d'une écorce peinte aborigène.
©Armoil Julie/mqB-JC*

Pour assurer la sécurité des œuvres lors des manipulations et des transports, les pratiques de conditionnement et d'emballage utilisent des matériaux chimiquement neutres et principalement produits industriellement.

Le Tyvek®, un textile 100 % synthétique fabriqué à partir de fibres de polyéthylène, est résistant, respirant et entièrement recyclable. Très polyvalent, il est couramment utilisé en conservation pour enrouler des textiles et servir de pare-poussière dans les réserves. Il est important de placer le côté lisse du Tyvek en contact avec les objets. Ce matériau présente plusieurs avantages : il ne libère pas de fibres (charpie) et ne génère donc pas de poussière dans les réserves et contenants. Le Tyvek peut également être employé de différentes autres manières, comme en pellicules, feuilles, pochettes et enveloppes.

Le Bondina® est aussi un textile non tissé en polyester, prévu pour être mis en contact avec les pastels, les fusains, les textiles, les cuirs, les métaux, les tableaux (lorsque la peinture est épaisse) et divers objets.

Le Mélinex® ou le Mylar® est un matériau transparent en polyester, chimiquement neutre, résistant à l'humidité et durable. Sa transparence permet l'emballage des tableaux, mais il est couramment utilisé par les musées comme intercalaire, pour l'encapsulation lors des anoxies, et comme matériau pour les ouvertures pratiquées dans des cartons et des boîtes.

Le papier de soie est un matériau en fibre courte et souple, d'un faible grammage, ce qui le rend légèrement transparent. Il est utilisé pour envelopper des objets fragiles, comme des manuscrits et estampes ou bien comme matériau de remplissage ou de calage. En le chiffonnant, on peut matelasser des objets en trois dimensions.

Le film bulle (Bullpack®) est un terme générique désignant une variété de feuilles de calage alvéolaires transparentes, fabriquées en polyéthylène basse densité. Les bulles peuvent varier en taille, allant de 6 mm à 26mm de diamètre. Ces films à bulles sont principalement recommandés pour l'emballage d'objets fragiles ou légers sur de courtes périodes comme le tamponnage.

La mousse de polyuréthane (PU) est un matériau polymère plastique produit par réaction chimique, couramment utilisé pour le garnissage des caisses, le calage entre des œuvres, ou la protection d'objets variés. Il existe deux types de mousses de polyuréthane, soit les mousses à base d'éther et celles à base d'ester. En conservation préventive, notamment pour l'emballage, la mousse de polyuréthane à base d'ester est conseillée. Plus stable et plus solide que la version à base d'éther de même densité, elle est traitée au charbon, ce qui lui donne une couleur noire et la rend plus résistante aux ultraviolets (UV). Néanmoins, son utilisation doit être de courte durée, et les objets qu'elle protège doivent être emballés dans une couche barrière (Tyvek® ou papier de soie). En vieillissant, les mousses de polyuréthane deviennent cassantes, s'effritent et perdent ainsi leur capacité à absorber les chocs.

La mousse de polyéthylène (PE) est un polymère plastique disponible en différentes densités, largement utilisé pour le rembourrage des caisses d'œuvres lourdes, offrant une protection antivibratoire. Elle sert également à la découpe de mousse et comme écrin pour sécuriser des œuvres fragiles. Il existe deux types de mousses utilisées en conservation préventive : les mousses réticulées et non réticulées. Les mousses non réticulées, comme l'Ethafoam® et le Stratocell®, sont constituées de cellules fermées, chaque cellule étant isolée comme une bulle. Elles sont fabriquées à partir de polymères soufflés par un agent d'expansion. Les mousses réticulées, comme le Plastazote® et l'Evazote®, sont structurées en réseau par des liaisons chimiques, offrant une meilleure résistance aux UV et étant moins abrasives. Les mousses réticulées par irradiation sont les plus sûres pour la conservation, car ce procédé, contrairement à la réticulation chimique, ne laisse aucun résidu. En effet, les procédés de réticulation chimique peuvent laisser des résidus potentiellement nocifs, tels que des peroxydes, dans la mousse. En revanche, la réticulation par irradiation, souvent utilisée pour des mousses de moins de 1 cm, produit des matériaux sans résidus, parfaitement adaptés aux exigences de la conservation préventive.

Les mousses réticulées par irradiation sont les plus sûres pour la conservation, car ce procédé, contrairement à la réticulation chimique, ne laisse aucun résidu. En effet, les procédés de réticulation chimique peuvent laisser des résidus potentiellement nocifs, tels que des peroxydes, dans la mousse. En revanche, la réticulation par irradiation, souvent utilisée pour des mousses de moins de 1 cm, produit des matériaux sans résidus, parfaitement adaptés aux exigences de la conservation préventive.

Ces matériaux, appréciés pour leur praticité, leur polyvalence, leurs propriétés physiques et leur coût réduit, sont devenus incontournables dans de nombreux domaines, y compris la conservation préventive. Cependant, leur impact environnemental suscite de plus en plus de préoccupations. Leur production, souvent à base de dérivés pétroliers, ainsi que leur fin de vie difficile à gérer en raison de leur faible biodégradabilité, en font des choix de plus en plus contestés dans un contexte où la préservation de l'environnement est devenue une priorité. En réponse à ces préoccupations, les professionnels de la conservation préventive s'efforcent de trouver des alternatives plus respectueuses de l'environnement. Ils explorent des substituts qui intègrent des critères de soutenabilité, tels que la réduction de l'empreinte carbone, la biodégradabilité, et l'utilisation de ressources renouvelables.

II. Conditionnement et développement durable : Un défi pour la préservation du patrimoine

1) Musées écoresponsables : stratégies et pratiques de développement durable

Face à la prise de conscience croissante des impacts du dérèglement climatique et de l'activité humaine sur l'environnement, les musées du monde entier intègrent des principes de développement durable dans leurs pratiques. Cette notion, introduite en 1987 par Mme Gro Harlem Brundtland, définit un développement qui répond aux besoins présents sans compromettre ceux des générations futures. Depuis son officialisation lors du Sommet de la Terre en 1992, le développement durable repose sur trois piliers : l'efficacité économique, l'équité sociale et la durabilité environnementale⁵. La notion de développement durable en contexte muséal apparaît avec la publication de Gary Thomson *The Museum Environment* (1986) dans laquelle on peut y voir apparaître en dernier chapitre, une ébauche de recherche autour de l'utilisation d'énergie renouvelable pour la climatisation des réserves et des musées. Dans les années 1990, le développement durable commence à occuper une place croissante dans les réflexions des musées. En 1992, le centre d'information muséologique UNESCO-ICOM partage une liste d'ouvrages ayant comme thème principal l'environnement. Les publications proviennent de musées d'histoire naturelle, de jardins botaniques mais on y retrouve des écrits sur la biodiversité et la pollution (Aubert, 2011). La 25e conférence de l'ICOM (International Council of Museums) en 2019 à Kyoto marque un tournant décisif dans la volonté de renouveler les pratiques des professionnelles du monde muséales afin de réduire leur empreinte carbone. C'est dans ce contexte que les musées prennent conscience du nouveau rôle qui les attend. Ils n'ont plus comme unique mission de conserver et de mettre en valeurs les collections, mais ils doivent servir d'exemple en matière de conservation de l'environnement en ayant des pratiques plus écoresponsables. De nombreux musées préparent des plans d'actions visant à réduire leur empreinte carbone. Cela passe par la mise en place de bilan carbone et d'une politique de responsabilité sociétale, sociale et environnementale des organisations (RSO). Le premier point de réflexion s'est concentré sur la réhabilitation énergétique des anciens bâtiments et la fondation d'une charte plus responsable dans la construction des nouveaux. Par exemple, le musée du quai Branly, conçu par Jean Nouvel, illustre cet engagement avec un chantier respectueux de l'environnement et un espace botanique favorisant la biodiversité. Entre 2018 et 2021, ce musée a entrepris des travaux pour optimiser ses systèmes de chauffage et de climatisation, réduisant ainsi sa consommation énergétique de 29% entre 2017 et 2022.⁶

Dans la suite de ce mouvement de renouveau de leurs pratiques, les musées s'orientent vers une éco-conception des expositions temporaires. La plupart du temps les mobiliers de scénographies sont créés pour l'exposition et donc sont à usage unique. Ainsi de part la complexité et la multiplicité des matériaux utilisés, il est très difficile de recycler ces matériaux en plus de produire. Par exemple, on retrouve dans les mobiliers scénographiques des cimaises à base de bois, très souvent des bois reconstitués tels que le MDF (*Medium Density Fiberboard*), appelé "médium". Le bois utilisé, soit sous forme brute ou d'aggloméré, présente un faible impact carbone, ce qui le rend intéressant du point de vue du changement climatique. Les panneaux de médium, fabriqués à partir de chutes de copeaux et de colles peu émissives, génèrent environ 35,7 kg CO₂eq/tonne. Cependant, l'utilisation du bois soulève également des préoccupations en matière de développement durable, telles que la déforestation, la pollution causée par les colles, et la consommation d'eau. Actuellement, les musées s'efforcent de

⁵ INSEE.

⁶ Rapport d'activité du musée en 2023.

réutiliser les mobiliers des anciennes expositions pour de nouvelles, en les transformant, en prolongeant leur durée d'utilisation ou en réduisant leur nombre annuel afin de diminuer la production de mobilier scénographique à usage unique (*The Shift Project*, 2021)⁷.

Dans le cadre de la réflexion sur les expositions temporaires, le transport des œuvres est également remis en question en raison de sa contribution à la production de CO₂ et à l'empreinte carbone des institutions. On sait que le transport aérien est beaucoup plus polluant que le transport routier, 3 à 4% des émissions mondiales, ainsi que d'autres gaz comme les oxydes d'azotes regroupés sous le terme de NOx (monoxyde d'azote (NO), dioxyde d'azote (NO₂), protoxyde d'azote (N₂O), tétraoxyde de diazote (N₂O₄) et trioxyde d'azote (N₂O₃)). (Delmas, 2021). Cependant, pour les transports internationaux, le fret aérien reste le seul moyen rapide et économique pour les voyages transocéaniques. Il est donc essentiel pour les musées de rationaliser le prêt d'œuvres lorsque le transport aérien est nécessaire et de privilégier autant que possible le transport routier. Les entreprises André Chenue et LP Art, spécialistes reconnus du transport d'œuvres d'art, s'engagent à réduire leur empreinte carbone en renouvelant leurs flottes de véhicules par des véhicules électriques avec les dernières technologies thermiques, et en utilisant des carburants XTL (X to Liquid), un biocarburant. Pour le fret aérien, elles proposent à leurs clients de travailler avec des collaborateurs aériens qui utilisent de carburants d'aviation durable (SAF), issus de l'hydrotraitement d'huiles de cuisson usagées et de graisses animales. Ce carburant permet de réduire les émissions de CO₂ jusqu'à 90 %.⁸

Pour conclure cette réflexion sur l'empreinte carbone des musées, il est important de s'intéresser au conditionnement des œuvres. Les systèmes d'emballage utilisés pour protéger les œuvres varient en fonction de la nature des objets, des exigences des musées et des pratiques des transporteurs. Une grande partie de ces emballages est fabriquée à partir de produits dérivés du pétrole, ce qui les rend polluants dès leur production et jusqu'à leur élimination. De plus, ces matériaux sont rarement recyclés en Europe et sont souvent envoyés en Asie pour le traitement, lorsqu'un recyclage est possible. Il est également à noter que les caisses en bois utilisées pour transporter les œuvres ne sont pas toujours en bois massif, mais en contreplaqué, aggloméré avec des colles contenant des solvants nocifs. Ces observations soulèvent des questions cruciales sur l'utilisation de matériaux non recyclables dans une perspective durable. Les musées, en tant qu'institutions culturelles responsables, doivent repenser leurs choix de matériaux et d'emballages pour minimiser leur impact environnemental. Cela implique de privilégier des matériaux recyclables ou biodégradables, et de collaborer avec des fournisseurs qui partagent ces préoccupations écologiques.

2) Problématiques des matériaux non recyclables dans une perspective durable

Alors que les pratiques actuelles reposent encore largement sur des matériaux non recyclables ou non réutilisables, souvent à base de plastique, leur utilisation soulève des questions cruciales en matière de durabilité. Ces matériaux reposent sur l'exploitation de ressources fossiles non renouvelables, contribuant ainsi à leur épuisement. Leur extraction et transformation génèrent également une quantité importante de gaz à effet de serre (GES), aggravant le dérèglement climatique. Les matières plastiques, bien qu'appréciées pour leur durabilité, mettent un temps considérable à se dégrader. Cette caractéristique, qui les rend si utiles, alimente également l'augmentation du volume mondial de déchets plastiques. Si leur traitement pour être recyclé n'est pas respecté comme abandonné dans la nature, ils polluent les

⁷ <https://theshiftproject.org/article/decarboner-culture-rapport-2021/>

⁸ Table ronde *Transport & éco-conditionnement des œuvres*, Atelier des Augures Lab scénographie du 23 mai 2024. Musée du quai Branly - Jacques Chirac.

écosystèmes en s'accumulant, posant un sérieux problème environnemental. De plus, étant un danger pour l'environnement, ces matériaux présentent un danger pour la santé des vivants. Certains monomères utilisés dans les polymères courants, comme le styrène, sont toxiques et cancérigènes. Les polymères eux-mêmes peuvent contenir des additifs dangereux, tels que les phtalates présents dans des plastiques comme le polychlorure de vinyle (PVC), reconnu comme perturbateurs endocriniens pouvant entraîner des problèmes de santé graves. Ces matériaux plastiques sont donc extrêmement peu soutenables d'un point de vue environnemental et soulèvent des préoccupations sanitaires (Kohler, 2023).

De plus, la stabilité de ces plastiques en conservation préventive n'est pas toujours garantie. Bien que certains plastiques se dégradent en plusieurs dizaines d'années, d'autres perdent rapidement leurs propriétés physiques, se fragilisent et deviennent moins efficaces. La mousse PU, produite soit à base d'éther ou d'ester se dégrade très rapidement. La mousse à base d'éther est moins stable, jaunie en un an si exposée à l'air, et devient tachée et fragile en quelques années. Celle à base d'ester, plus stable, se dégrade en quelques décennies, libérant de l'acide adipique qui peut corroder les métaux. Ces mousses sont très prisées pour leurs qualités mécaniques. Cependant, elles doivent être utilisées uniquement pour des applications à court terme et ne doivent pas entrer en contact direct avec les objets; un intercalaire est nécessaire pour éviter ce contact (Tétreault, 2017). La fragilité des mousses polyuréthanes en fait des matériaux à usage unique, contribuant ainsi à une importante production de déchets sans possibilité de réutilisation. Bien que le recyclage du polyuréthane soit techniquement possible, le processus est complexe à mettre en œuvre et la faible qualité des produits issus du recyclage limite l'intérêt économique de cette démarche. Au-delà de leur recyclabilité, c'est l'impossibilité de les réutiliser qui pose un problème environnemental majeur et restreint la durabilité de leur utilisation (Ougier, 2020). Les mousses en polyéthylène quant à elles, qu'elles soient réticulées ou non, sont plus résistantes aux UV et moins solubles, ce qui leur permet d'être réutilisées ou réemployées. De plus elles sont recyclables⁹. Mais elles restent des produits prétrouvés. Il en va de même pour les plastiques. Bien qu'ils soient des matériaux récents et largement utilisés dans notre quotidien, on observe déjà des signes de dégradation. Les plastiques comme le PVC (polychlorure de vinyle), souvent utilisés comme housse de protection pour le mobilier, sont très susceptibles de se dégrader et de causer des dommages aux objets qu'ils sont censés protéger. Le phénomène de déshydrochloruration est fréquemment observé lors de la dégradation du PVC. Cette dégradation entraîne la production d'acide chlorhydrique, qui, avec le temps, tend à détériorer le plastique et à migrer, provoquant ainsi le jaunissement, la déformation, la perte de flexibilité et la fragilisation du matériau, ainsi que l'apparition de taches sur les objets en contact avec celui-ci (Royaux, 2017).

Les pratiques actuelles en matière de conservation dans les musées reposent encore largement sur l'utilisation de matériaux plastiques non recyclables et non réutilisables, qui posent de sérieux problèmes environnementaux et sanitaires. Leur production à partir de ressources fossiles non renouvelables, ainsi que leur faible biodégradabilité, contribuent à l'épuisement des ressources naturelles et à la pollution des écosystèmes. La fragilité de ces matériaux en conservation préventive, couplée à leur tendance à se dégrader rapidement, limite leur durabilité et leur réutilisation, tout en augmentant la quantité de déchets produits. Ces enjeux mettent en lumière la nécessité urgente de trouver des alternatives plus durables et respectueuses de l'environnement. C'est dans cette perspective que se tourne désormais la recherche vers des matériaux de calage, comme les matériaux biosourcés, offrant des solutions de substitution plus soutenables et moins nocives pour la planète.

⁹ Haude, Mary Elizabeth, Robin O'Hern, Sarah Nunberg. 2011. *Plastics are Forever: Wraps, Tools, Films, and Containers Used in Conservation*. AICNews 36(5): 1, 3-5.

III. Vers une innovation dans les matériaux de conditionnement

1) Etat de la recherche des nouveaux matériaux dans le contexte muséal

L'utilisation de nouveaux matériaux dans le domaine du patrimoine est un sujet assez récurrent ces dernières années. Cela suit le mouvement des musées qui tentent de réduire leurs impacts CO₂ en revoyant leur consommation énergétique, le transport de l'œuvre en réduisant les prêts et les expositions temporaires mais aussi en revoyant leur utilisation des matériaux pour la conservation. Les sujets de mémoire à l'école du Louvre autour de ces questions de renouveau des méthodes et des matériaux, et de la gestion écologique des musées ont fortement augmenté ces dernières années.¹⁰

Anaïs Perrichon, étudiante en 2021 à l'école du Louvre, propose dans son mémoire¹¹ une grille d'évaluation des nouveaux matériaux dits biosourcés. Cette grille d'évaluation se compose de trois critères de notation: des critères conservatoires, pratiques et environnementaux. Les premiers critères consistent à faire une évaluation physico-chimique des matériaux (pH, polluants, dégagement de colorants, ...). Les seconds critères prennent en compte l'aspect pratique du matériau afin de savoir si celui s'utilise sans outils ou non, nécessite une connaissance et une pratique particulière, si le matériau est facile d'accès. Enfin les derniers critères, nouveau à l'évaluation de matériaux dans le domaine de la conservation préventive, sont les critères environnementaux. Dans ces critères, il est pris en compte la distance de production et de provenance du matériau, sa consommation en eau, en énergie grise, la production d'émissions de dioxyde de carbone ou encore la gestion des sols et les conditions de travail. Dans son mémoire, six matériaux sont testés pour remplir la grille d'évaluation. Cinq intissés biosourcés (lin ou cellulose de bois) et un substitut de mousse polyester composé de chanvre et de mycélium: l'embélium®. Son travail montre que la création d'outils d'accompagnement avec ces nouveaux matériaux est essentielle pour une bonne utilisation et le bon choix de matériaux mais aussi une bonne pratique éco-responsable. Cette grille d'évaluation des matériaux est nécessaire et permettra de faire le meilleur choix en ce qui concerne les matériaux de conditionnement mais aussi des matériaux dans le contexte muséal.

En 2023, Marine Kohler examine dans son mémoire¹² une gamme de nouveaux matériaux biosourcés utilisés en conservation préventive ou dans l'emballage alimentaire. Onze matériaux ont été soumis à des tests chimiques, incluant des tests d'Oddy, des mesures de pH et des analyses colorimétriques avant et après vieillissement, afin d'évaluer leur compatibilité avec les objets du patrimoine. Chaque matériau est présenté avec des informations détaillées sur son fournisseur, sa matière première, sa praticité et sa mise en œuvre. Le processus de synthèse et de fabrication, ainsi que leurs propriétés et usages actuels, sont brièvement décrits avant d'évaluer leur potentiel en conservation préventive. Les coûts de ces matériaux biosourcés ont également été pris en compte pour les comparer aux matériaux traditionnels qu'ils visent à remplacer. La conclusion de ce mémoire montre que certains matériaux ne sont pas du tout envisageables en conservation préventive en raison de performances conservatoires non optimales. Cependant, il ne faut pas les écarter définitivement du domaine de la conservation ;

¹⁰ Présentation de Florence Bertin à la 3ème *Rencontres du MAD* le 2 octobre 2023.

¹¹ PERRICHON Anaïs, *Vers l'intégration de matériaux durables en conservation : évaluations et recherches de substituts*, Mémoire de stage de deuxième année de second cycle en régie des œuvres et conservation préventive sous la direction de Mme Hélène Vassal et Mme Florence Bertin, 2021.

¹² KOHLER Marine, *Etude de matériaux biosourcés pour une utilisation en conservation préventive*, Mémoire d'étude de première année de second cycle en muséologie sous la direction de Mme Florence Bertin, 2023.

par exemple, les matériaux ayant présenté une légère corrosion lors du test d'Oddy peuvent être utilisés de manière temporaire (environ 6 mois selon les critères de notation de Joseph Bamberger¹³). À la fin de ce mémoire, une liste d'autres matériaux à tester est proposée, ainsi que d'autres types de tests à effectuer, tels que des tests mécaniques (vibration, compression, etc.) ou des tests chimiques supplémentaires, comme le test de Beilstein pour détecter la présence de chlore.

D'autres projets de recherche et initiatives sont en cours pour trouver des solutions plus éco-responsables dans l'emballage des œuvres d'art. Parmi eux, le projet MOUSSAILLON se distingue par son objectif de développer une mousse répondant aux exigences des institutions en termes de protection physique et chimique des œuvres, tout en ayant un impact environnemental réduit, tant au niveau de sa production que de son recyclage. Ce projet porté par la Fondation des Sciences du Patrimoine, le Laboratoire de Physicochimie des Polymères et des Interfaces (LPPI - EA2528), le Centre de Recherche sur la Conservation (CRCC - UAR 3224), le Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France (C2RMF) et la Bibliothèque nationale de France (BnF) se concentre sur la mise au point d'un polymère composite capable de produire une mousse adaptée à la conservation et au transport des œuvres d'art, en minimisant l'utilisation de matériaux nocifs pour l'environnement et en réduisant son empreinte carbone.¹⁴

Le projet "ÇA VA CARTONNER !", porté par l'entreprise de transport André Chenue et le C2RMF, vise à éco-concevoir un emballage en carton pour les œuvres d'art. Ce projet a pour objectif de développer une alternative en carton éco-conçue pour le stockage et le transport des œuvres, tout en répondant aux exigences de leur conservation. Grâce à son poids réduit, le carton présente une empreinte environnementale bien inférieure à celle des contreplaqués en bois ou des matériaux époxy actuellement utilisés pour le transport des œuvres. Le projet ambitionne également de transformer les pratiques d'emballage des œuvres d'art en introduisant des innovations d'usage. Une fois cette alternative en carton mise au point, l'objectif sera de former et d'informer les professionnels de la conservation-restauration, en les incitant à adopter des choix plus sobres en matière de matériaux et de solutions de protection.¹⁵ Les Augures propose un registre collaboratif recensant tous les projets en cours autour des recherches sur l'éco-conditionnement.¹⁶

Les entreprises Rokbox®, Turtle®, et Hasenkamp® ont développé des modèles de caisses réutilisables qui s'inscrivent explicitement dans une démarche d'innovation durable. Le premier avantage de ces caisses est leur légèreté, comparée aux caisses en contreplaqué de bois actuellement utilisées, ce qui permet de réduire proportionnellement les émissions de gaz carbonique lors du transport. Le deuxième avantage environnemental réside dans la composition matérielle des caisses, comme le modèle Rokbox 83, dont aucun composant n'est destiné à l'enfouissement en fin de cycle, étant soit biodégradable, soit entièrement recyclable. De plus, le design des boîtes permet de se passer de mousses ou d'autres matériaux de calage actuellement utilisés. Actuellement, le modèle de ces boîtes est limité aux tableaux et aux objets en deux dimensions. (Ougier, 2020).

¹³ Bamberger, J.A., Howe, E.G. and Wheeler, G. (1999) "A Variant Oddy Test Procedure for Evaluating Materials Used in Storage and Display Cases", *Studies in Conservation*, 44(2), pp. 86–90.

¹⁴ <https://www.sciences-patrimoine.org/these-moussailon-2023/>

¹⁵ <https://www.culture.gouv.fr/Thematiques/transition-ecologique/les-musees-font-leur-transition-ecologique>

¹⁶ https://www.canva.com/design/DAGE2U69fZg/Y2HN2N8iqZDnWXWfZnbwug/view?utm_content=DAGE2U69fZg&utm_campaign=designshare&utm_medium=link&utm_source=editor#1

En complément de ces nombreux projets de recherche, des outils d'aide à la décision ont été mis en place pour aider les professionnels à choisir les meilleures alternatives ou à adopter les meilleures pratiques en matière de transport et d'emballage. Parmi ces outils, on retrouve des plateformes comme STiCH¹⁷ (Sustainability Tools in Cultural Heritage), qui propose un calculateur carbone basé sur l'évaluation du cycle de vie (ACV), ainsi qu'une bibliothèque d'études de cas et de fiches d'information. On peut également citer la Gallery Climate Coalition¹⁸, une communauté internationale d'organisations artistiques dédiée à la réduction de l'impact environnemental du secteur. Leur objectif principal est de réduire les émissions de CO₂eq de 50 % d'ici 2030 et de promouvoir le zéro déchet. La GCC partage les meilleures pratiques, fournit un leadership sur les enjeux environnementaux et mobilise ses membres pour des changements systémiques. Ces ressources ont été développées pour aider les professionnels du patrimoine culturel à faire des choix durables et éclairés, afin de réduire l'impact environnemental de leur travail.

2) Les matériaux biosourcés : une solution plus écologique pour le conditionnement ?

Les matériaux biosourcés proviennent principalement de matières organiques renouvelables (biomasse) d'origine microbienne, végétale, fongique ou animale. Cette catégorie inclut également certains plastiques fabriqués à partir de polymères d'origine renouvelable ou presque, comme les plastiques à base de canne à sucre, qui ont une structure similaire à celle des plastiques pétro-sourcés et possèdent des propriétés physico-chimiques et mécaniques comparables à ceux du pétrole. Cependant, un produit biosourcé n'est pas nécessairement biodégradable ni issu de l'agriculture biologique. Par exemple, les plastiques à base d'acide polylactique (PLA) fabriqués à partir d'amidon de maïs sont compostables et peuvent être issus de l'agriculture biologique, tandis que les plastiques en polyéthylène téréphtalate (PET) fabriqués à partir de monoéthylène glycol biosourcé ne sont pas biodégradables (Bourgeois, 2011).

Aujourd'hui, les matériaux biosourcés sont principalement utilisés dans le bâtiment et la production de biocarburants. Cependant, leur usage se développe également dans les domaines de l'emballage, avec les bioplastiques, ainsi que dans la décoration et le mobilier. Ces matériaux incluent une grande variété de substances, telles que le bois, le chanvre, la paille, la ouate de cellulose, les textiles recyclés, les balles de céréales, le liège, le lin, les champignons transformés en myco-matériaux, et parfois même des déchets ou des coproduits comme les cosses de céréales ou la fibre de coco.

Ces matériaux présentent des avantages, notamment la possibilité de se passer des produits pétro-sourcés qui exploitent des ressources fossiles limitées et presque épuisées. Les cultures végétales utilisées pour ces matériaux contribuent à la réduction des émissions de GES grâce à leur capacité à absorber le CO₂ atmosphérique. D'un point de vue environnemental et en fin de vie, ces matériaux sont souvent intéressants car ils sont biodégradables, se décomposant rapidement sous l'action bactérienne, qu'elle soit naturelle ou induite, ce qui permet leur disparition de l'environnement. Toutefois, cela dépend des conditions environnementales ainsi que de la structure et de la fabrication du matériau. Certains de ces matériaux sont également compostables ou recyclables.

¹⁷ <https://stich.culturalheritage.org/>

¹⁸ <https://galleryclimatecoalition.org/>

Sur le plan économique, ces matériaux contribuent à la bioéconomie, car ils sont souvent issus de ressources locales et renouvelables. Certains, comme le bois, le chanvre, la paille ou le lin, peuvent être utilisés avec peu ou pas de transformation, tandis que d'autres nécessitent des processus plus complexes, comme la mousse Embélium®, l'Algifoam®¹⁹ ou le papier Tarantula. Cependant, bien que ces matériaux puissent limiter l'utilisation de ressources non renouvelables et stocker du carbone par photosynthèse, leur bénéfice environnemental n'est pas garanti. Il est crucial d'évaluer leur performance sur l'ensemble du cycle de vie pour éviter des impacts négatifs, tels qu'une consommation énergétique accrue lors des transformations. La durabilité est renforcée lorsque le produit répond aux exigences des écolabels.

Pour ces matériaux, l'appellation "biosourcés" est régie par des normes internationales. En Europe, la qualification de biosourcé est définie par la norme européenne NF EN 16575 : 2014, sans préciser de pourcentage minimum de biomasse nécessaire. Des labels, comme le label OK Biobased mis en place par TÜV AUSTRIA et AIB Vinçotte ou la certification DIN-Geprüft de DIN CERTCO, attestent de la qualité biosourcée des matériaux. Ces labels permettent d'indiquer le contenu biosourcé d'un produit certifié selon différents niveaux, garantissant le contenu biosourcé total ou partiel d'un matériau. Cependant, ils n'indiquent en rien ses performances environnementales ni sa fin de vie (Bourgeois, 2011).

À travers une analyse historique des méthodes de transport et de conservation, il est apparu que le conditionnement des œuvres d'art a toujours été un enjeu crucial, exigeant une adaptation constante face aux avancées technologiques et aux contraintes environnementales. Les pratiques traditionnelles de calage et d'emballage, bien que robustes et ingénieuses, doivent aujourd'hui être réévaluées pour répondre aux nouvelles exigences de durabilité et de respect des normes écologiques. Fort de cet état des lieux, la suite de ce mémoire se concentrera sur la présentation de notre corpus d'étude et des analyses physico-chimique et mécanique de ces derniers afin de connaître les performances de ces nouvelles solutions et d'évaluer leur potentiel en tant qu'alternatives aux matériaux traditionnels.

¹⁹ Algifoam® est un matériau à base de biopolymères d'origine marine, l'alginate. Sous forme de billes, le matériau est obtenu grâce à l'ajout d'un liant, puis moulé, compressé et séché pour former des plaques, des blocs ou d'autres formes.

DEUXIEME PARTIE : MATERIEL D'ETUDE ET METHODOLOGIE

I. Matériaux de calage biosourcés

1) Les fibres végétales

Une fibre végétale est une extension cellulaire morte composée principalement de cellulose, d'hémicellulose, de lignine et de pectine. Elle peut se présenter isolée ou en faisceaux avec d'autres fibres. Les fibres végétales proviennent de différentes parties de la plante : les graines (poils séminaux), la tige ou le tronc (fibres libériennes), les fruits (enveloppe) ou les feuilles. Le bois, en raison de sa composition et de sa structure spécifiques, est traité séparément. En Europe, les fibres végétales proviennent principalement des tiges des plantes, souvent désignées par le terme « paille », qui fait référence à une ou plusieurs tiges entières. (ADEME, 2011)

1.1 Kapok



Figure 5 : Photographie et image microscope 3D (x200) de la fibre de Kapok. © Arnouil Julie

Le kapok (Fig. 5), également connu sous le nom de "coton de Java", est une fibre végétale issue du fruit de l'arbre de la famille des *Bombacaceae* : le *Ceiba pentrada*. Originaire des régions tropicales d'Amérique du Sud, d'Afrique et d'Asie, le kapok est récolté pour sa fibre soyeuse et légère qui est encapsulée dans les fruits du kapokier. C'est un arbre qui peut mesurer jusqu'à 70 mètres de hauteur et la production de sa fibre commence à partir de 5 ans de croissance. La récolte se fait entre le mois d'avril et juin. Le fruit dont provient la fibre de kapok se présente sous la forme d'une capsule pendante ligneuse, elliptique-ovoïde d'environ 20 cm de long. A l'intérieur de cette capsule, se trouve une sorte de duvet soyeux avec des graines brunes. La capsule s'ouvre à maturité, et une fibre blanchâtre/jaunâtre, très légère (densité de 0,35gr/cm), en sort. (Chan et al, 2022)

D'un point de vue physico-chimique, la fibre de kapok se distingue par sa légèreté et sa flottabilité, ainsi que par ses propriétés hydrofuges et isolantes. Elle est constituée principalement de cellulose, avec des propriétés semblables à celles du coton, mais elle est beaucoup plus légère et moins dense. La fibre est douce, très légère, hypoallergénique, imperméable et imputrescible. Il est aussi inflammable. Elle reste aussi une fibre difficile à filer (Sangalang, 2021). C'est une fibre cylindrique, creuse et lisse composée principalement de

cellulose (50 %), d'hémicellulose (25-45 %), de lignine (15-22 %) et de cire (2-3 %) (Benesteau, 2015).

L'utilisation traditionnelle du kapok remonte à des siècles, où il était utilisé pour remplir des matelas, des oreillers et dans la fabrication de textiles au Cambodge. Sa légèreté et sa capacité d'isolation thermique en font un matériau idéal pour les articles de literie. De nos jours, le kapok est également utilisé dans la fabrication de gilets de sauvetage en raison de sa flottabilité exceptionnelle, ainsi que dans la production de rembourrage pour meubles écologiques. Il a été utilisé au cours du XXe siècle en taxidermie, comme matériau de rembourrage (Benesteau, 2015). En raison de sa nature biodégradable et renouvelable, le kapok est de plus en plus utilisé comme alternative écologique aux matériaux synthétiques dans diverses applications textiles et industrielles. Contrairement au coton, l'utilisation de sa fibre ne nécessite pas d'eau dans son processus de fabrication et de transformation, ce qui réduit son impact environnemental.

1.2 Élanclin



Figure 6 : Photographie et image microscope 3D (x200) de l'élanclin. © Arnouil Julie

Dans nos matériaux tests, nous avons testé l'élanclin sous trois formes différentes : naturel, traité à la cire de carbone et sous forme de plaque latexée.

La fibre de coco, aussi appelée élanclin® (ou célanclin) ou coir, est obtenue à partir de l'enveloppe extérieure de la noix de coco. Cette fibre se caractérise par sa dureté, son élasticité, sa résistance à la déchirure et sa durabilité. Elle est utilisée comme isolant, aussi bien phonique que thermique, et possède des propriétés hygroscopiques. La fibre peut mesurer jusqu'à 35 cm de long avec un diamètre allant de 12 à 25 microns (Fig. 6). Pour 10 kg de fibres, il faut environ 1000 noix. Le fruit est récolté tous les 45 jours (FAO, 2024)²⁰. On distingue trois types de fibres de coco : Bristle, Omat et Mattress. L'Inde et le Sri Lanka sont les principaux producteurs de cette fibre (Génie végétal, 2024). La fibre brune est la plus couramment utilisée, elle est obtenue avec des noix de coco mûres. Cette fibre contient plus de lignine (35-54%) et moins de cellulose (23-43%) (Benesteau, 2015)²¹.

Les fibres de coco sont extraites après avoir séparé la coque du fruit. Les bourres, ou écales, sont retirées manuellement. La méthode traditionnelle d'extraction consiste à immerger les coques de coco dans de l'eau douce pendant plusieurs mois, permettant à l'action bactérienne

²⁰ <https://www.fao.org/economic/futurefibres/fibres/coir/fr/>

²¹ <http://www.genie-vegetal.eu/page/137/la-fibre-de-coco--un-dechet-naturel-valorise.htm>

de décomposer la substance gommeuse qui lie les fibres. Après ce trempage, les coques sont peignées mécaniquement pour en séparer les fibres, qui sont ensuite mélangées, homogénéisées et nettoyées dans un tambour rotatif. Les fibres obtenues, plus souples, sont ensuite filées. Une fois séparées et nettoyées, les fibres sont naturellement séchées au soleil.

La production de la fibre de coco est principalement présente en Inde et au Sri Lanka mais aussi en Amérique du Sud, au Brésil notamment. C'est une production industrielle artisanale, avec différents types et tailles de producteurs. Cette fibre est utilisée dans trois grands secteurs qui sont l'industrie, l'horticulture ou le contrôle de l'érosion. Les fibres de coco sont utilisées pour le rembourrage de matelas, de sièges automobiles, la sparterie²², les cordages et l'enrobage de tubes de drainage. C'est un matériau complètement biodégradable. En plus de sa forme brute, nous avons utilisé de l'elancrin sous deux autres formes: la première est l'elancrin traité à la cire de carbone (Fig. 7). C'est un traitement qui rend le matériau plus résistant aux attaques d'insectes. Aucune information plus spécifique sur ce traitement de la part de notre fournisseur a été fournie et nous n'avons trouvé aucune information de notre côté sur ce traitement pour l'elancrin comme pour d'autres domaines.



Figure 7 : Photographie et image microscope 3D (x200) de l'elancrin carboné. © Arnouil Julie

Puis, nous avons pu utiliser l'elancrin sous forme de plaque latexée (Fig. 8). Ce sont des plaques de fibres de cocos caoutchoutées qui se composent de 100% de fibres de coco naturelles et sont vaporisées de latex naturel pour devenir des tapis. Ces plaques sont principalement utilisées, comme l'elancrin naturel, par les artisans tapissiers pour la restauration du mobilier, en tant que rembourrage de meubles.

²² Ouvrage, tel que corde, natte, tapis, panier, etc., tressé soit en alfa ou en spart, soit en crin végétal. (Larousse)



Figure 8 : Photographie et image microscope 3D (x200) de l'élanocrin latex. © Arnouil Julie

1.3 Crin végétal

Le crin végétal (Fig. 9) est issu de fibres de diverses plantes comme l'agave, la zostère, la tillandsia, le palmier nain. On lui donne le nom de crin de part sa ressemblance au crin animal (Ossut, 2021). Ici, le crin provient des feuilles d'un palmier nain *Chamaerops Humilis*, originaire d'Afrique du Nord et d'Espagne ou encore du pourtour Méditerranéen. Il est extrait de l'alpha ou de certaines feuilles de palmier. Les feuilles sont coupées et allongées par des peignes en métal, ce qui permet de supprimer les fibres fermes des parties souples de la feuille. Les fibres humides sont triées par épaisseur, filées en nattes et séchées au soleil. Les fibres de palmier se caractérisent par leur haute élasticité. Elles sont fortement hygroscopiques et doivent être protégées par conséquent des fortes hygrométries (Bouaziz, 2020). Les fibres, de couleur verte et avec une légère odeur de foin, sont un matériau bon marché, mais présentent deux inconvénients majeurs : elles manquent de fermeté et se tassent facilement. Elles sont couramment utilisées dans la literie, l'ébénisterie et la bourrellerie²³. Bien que moins chères que le crin animal, ces fibres ont l'avantage de ne pas s'infecter. Leur fabrication est pratiquement un monopole africain (Celerier, 1934).



Figure 9 : Photographie et image microscope 3D (x200) du Crin Végétal. © Arnouil Julie

²³ Travaille de la bourre et du cuir pour la réalisation de pièces d'attelage pour le travail des chevaux.

2) Balles de Céréales (Millet et Sarrasin)

Le second type de matériaux que nous avons pu tester sont les balles de millet et les cosses de sarrasin. Ces deux types de matériaux sont les enveloppes protectrices des graines. Ces matériaux sont considérés comme des coproduits issus de l'agriculture. La graine est utilisée pour produire des farines et d'autres produits alimentaires mais la cosse (l'enveloppe) n'est pas utilisée dans ce domaine.

Les deux sont issus de la production agricole biologique européenne. La transformation des grains de céréales en produits destinés à l'alimentation humaine ou animale, ainsi qu'à d'autres usages industriels, génère une quantité significative de biodéchets. Très utilisés dans le rembourrage de coussins à des fins thérapeutiques, ces matériaux sont aussi utilisés dans le domaine de l'isolation phonique et thermique ou encore en jardinage comme paillage.

2.1 Millet commun

La graine de millet commun (*Panicum miliaceum L.*) (Fig. 10) est une céréale cultivée originellement en Asie, en Amérique du Nord et en Afrique, puis en Europe à partir du Moyen-Âge pour l'alimentation humaine et animale. C'est une graine qui a un cycle court de production : semée en mai, elle se récolte en septembre. Cela permet d'allonger la rotation avec une culture d'été peu exigeante au niveau du type de sol, à bon rapport économique, peu coûteuse et peu consommatrice d'intrants et plutôt tolérante à la sécheresse. Il en produit 60000 tonnes par an en France et produit sur 20 000 hectares. La culture de cette graine est principalement faite dans le Centre Val de Loire. (Intercéreales, 2024)²⁴



Figure 10 : Photographie et image microscope 3D (x200) des balles de millet. © Arnouil Julie

2.2 Sarrasin (Cosses de sarrasin)

La cosse de graines de sarrasin (*Fagopyrum esculentum L.*) (Fig. 11) est un coproduit du traitement des graines, notamment pour la production de farine. Cette graine de forme triangulaire est originaire de Sibérie et de Mandchourie, où elle poussait à l'état sauvage le long du fleuve Amour en Chine. À partir du XIV^e siècle, sa culture s'est répandue en Allemagne, puis dans le reste de l'Europe, devenant un aliment de base pour de nombreux peuples européens. Le sarrasin s'adapte bien aux climats tempérés et aux sols peu fertiles. En France, il est principalement cultivé en Bretagne et en Auvergne, bien que sa culture soit désormais secondaire. Cette plante présente un intérêt particulier car elle ne nécessite ni engrais ni

²⁴ <https://www.intercereales.com/le-millet>



Figure 11 : Photographie et image microscope 3D (x200) des balles de sarrasin. © Arnouil Julie

protection phytosanitaire, demandant ainsi très peu d'entretien durant sa croissance. En France, le sarrasin est récolté entre septembre et octobre, sur environ 30 000 hectares, dont une partie se trouve en Bretagne. Aujourd'hui, la Chine, la Russie et l'Ukraine en sont les principaux producteurs mondiaux (Schilperoord, 2017).

3) Fibre textile recyclée

Le dernier matériau testé est un mélange de fibres textiles recyclées, également appelé ouate expansive (Fig. 12). Bien que les matériaux utilisés pour fabriquer des fibres soient très divers, celles-ci sont généralement classées en fibres naturelles et fibres artificielles. Les fibres naturelles proviennent des poils et de la laine des animaux, ainsi que des fibres des plantes cultivées comme le coton et le chanvre. Celles dites synthétiques sont entièrement fabriquées chimiquement à base de charbon ou du pétrole. Le terme synthétique désigne le processus de fabrication et non la composition chimique. On retrouve dans la catégorie de fibre synthétique le nylon, le polyester, l'acrylique, l'élasthane, le polypropylène et les microfibres (en polyester principalement). Ici, le matériau que nous avons testé est complètement éco-conçu car il est composé de quatre types de fibres naturelles recyclées: laine, lin, chanvre et coton. Les textiles sont recyclés mécaniquement à l'aide de divers procédés tels que l'effilochage et le défilage.

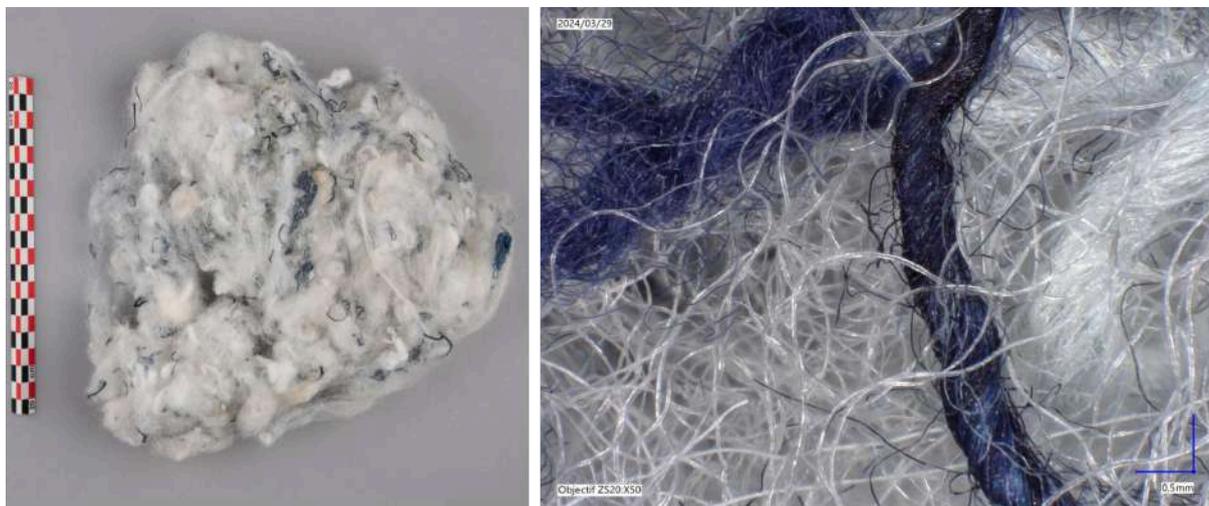


Figure 12 : Photographie et image microscope 3D (x50) de la fibre textile recyclée. © Arnouil Julie

Lors du défilage, les articles textiles sont déstructurés, passant de l'état de tissu à celui de matière fibreuse. Ce procédé est entièrement automatisé et breveté par Filatures du Parc, compagnie française (Brevet n° EP1995362). Les articles sont découpés, déliés, puis pré-démaillés et démaillés de manière à préserver les fibres et éviter de les casser, afin de garantir une certaine qualité des fibres recyclées. À cette étape, on obtient des fibres et de la bourre qui peuvent être utilisées comme matière première secondaire pour la filature. Le procédé d'effilochage est également entièrement automatisé. Il consiste en une série de cylindres rotatifs garnis de milliers d'aiguilles ou picots. À mesure que la matière avance dans l'effilocheuse, la densité des aiguilles augmente pour affiner la matière textile en fibres. L'effilochage casse les fibres, les réduisant à une taille moyenne et affectant leurs propriétés mécaniques. Ces fibres sont ensuite mélangées avec d'autres fibres plus longues, puis filées et tissées ou tricotées à nouveau. (Crutel et Pretet, 2018)

II. Protocole d'Analyse

1) Imagerie

1.1 Microscope 3D



Figure 13 : Photographie du microscope 3D Keyence.
© Arnouil Julie

Les matériaux ont été observés au microscope 3D VHX-7000 de la marque Keyence (Fig. 13), afin de comprendre leur structure et la composition des fibres de textile recyclées. Les coupons métalliques utilisés pour les tests d'Oddy (cf. P.34) ont aussi été observés au microscope à la fin du test afin de constater les attaques de surface (corrosion) ou la présence de patine (oxydation), ce qui a permis de visualiser les zones à regarder au MEB par la suite. Cette observation a été faite au musée avec un microscope digital de marque HIROX (KH-8700).

1.2 Microscope optique (VIS et UV)

Le microscope optique a été utilisé pour visualiser les matériaux à différentes échelles mais aussi sous différentes lumières: visible et UV (Fig. 14). Pour cela, le modèle Eclipse ME 600 de la marque Nikon a été utilisé au sein de l'INP.

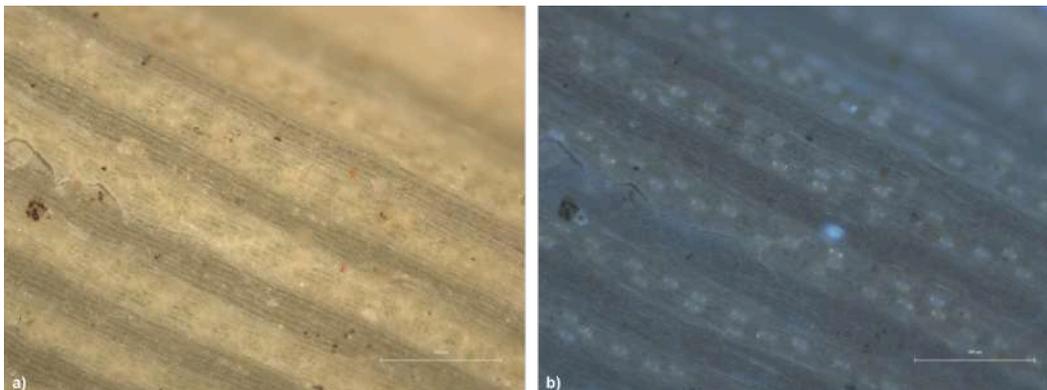


Figure 14 : Image au microscope de crin végétal x10: a) lumière visible b) UV A.
© Arnouil Julie

1.3 MEB (Microscope électronique à balayage)

Le microscope électronique à balayage (MEB) a été utilisé pour observer les matériaux et les coupons des tests d'Oddy. Le faisceau d'électrons du MEB balaye la surface de l'échantillon, générant des électrons rétrodiffusés qui révèlent la topographie et la composition de l'objet étudié. Lorsque ces électrons interagissent avec les atomes de l'échantillon, des rayons X caractéristiques sont émis et captés par le détecteur EDS. L'analyse de ces rayons X permet d'identifier et de quantifier les éléments présents. Cette combinaison d'imagerie à haute résolution et d'analyse chimique détaillée fournit des informations précieuses sur la structure de surface et la composition des matériaux étudiés (Regert et Guerra, 2016). Les analyses et images au MEB ont été réalisées au musée avec un équipement de paillasse, le modèle TM3000 d'Hitachi. Les données et les spectres ont été traités avec le logiciel Oxford Instruments AZtec, et les images obtenues des matériaux et des coupons sont en électrons rétrodiffusés. Les données ont été normalisées et sont exprimées en pourcentage massique pour les matériaux et en pourcentage d'oxyde pour les coupons. Le MEB a permis d'observer la structure de la surface, et couplé à l'EDS, d'analyser la composition chimique des matériaux et des coupons métalliques des tests d'Oddy.

1.4 Prise de vue VIS/UV

L'évaluation du test d'Oddy est entièrement visuelle. Des critères d'évaluations sont mis en place selon le niveau d'oxydation et de corrosion en comparaison avec les coupons témoins. Un protocole de prise de vue des coupons a été établi par le MMA (Metropolitan Museum of Art, New York), qui permet d'améliorer la vision de la corrosion et de l'oxydation présente sur les coupons test (Buscarino, 2021). L'utilisation de deux sources de lumière différentes est nécessaire pour photographier les coupons. La première est diffuse, produite par une light box installée sur le côté du support à coupons et qui se reflète grâce à un réflecteur blanc déposé de

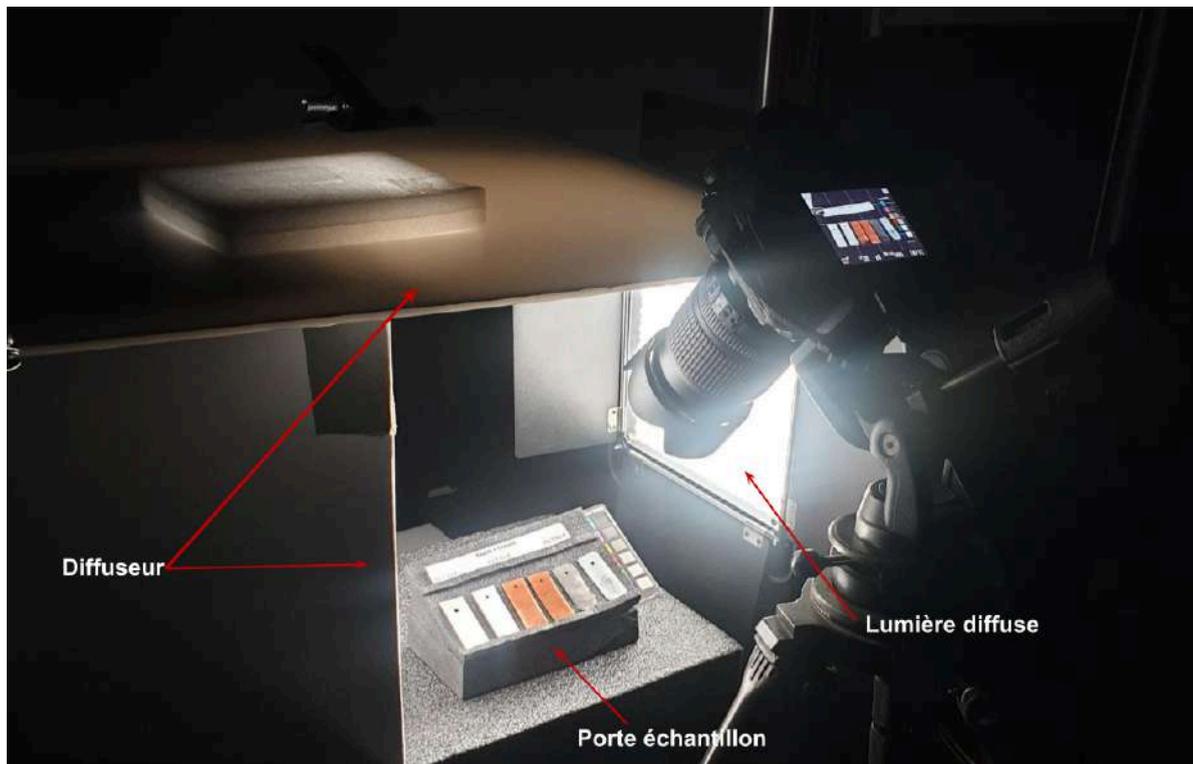


Figure 15 : Mise en place des prises de vue des coupons de test d'Oddy.

© Arnouil Julie

l'autre côté (Fig.15). Celle-ci permet de donner une représentation correcte des couleurs dans la photographie. La deuxième source de lumière est rasante, grâce à une lumière installée à l'arrière du support des coupons (Fig. 16). Cet éclairage permet de représenter la texture de la surface des coupons sur la photographie.

De plus, les coupons ont été photographiés sous lumière UV grâce à deux lampes UV placées à 45° de chaque côté (Fig. 16). Les images sont corrigées au niveau des couleurs grâce à la charte de couleurs à côté des coupons. Les matériaux ont aussi été photographiés de manière standardisée en lumière visible et en UV afin de documenter ce mémoire et de voir leur réaction sous différents éclairages. Pour effectuer ces prises de vue, un appareil Nikon D850 a été utilisé combiné à un objectif fixe de 60 mm.

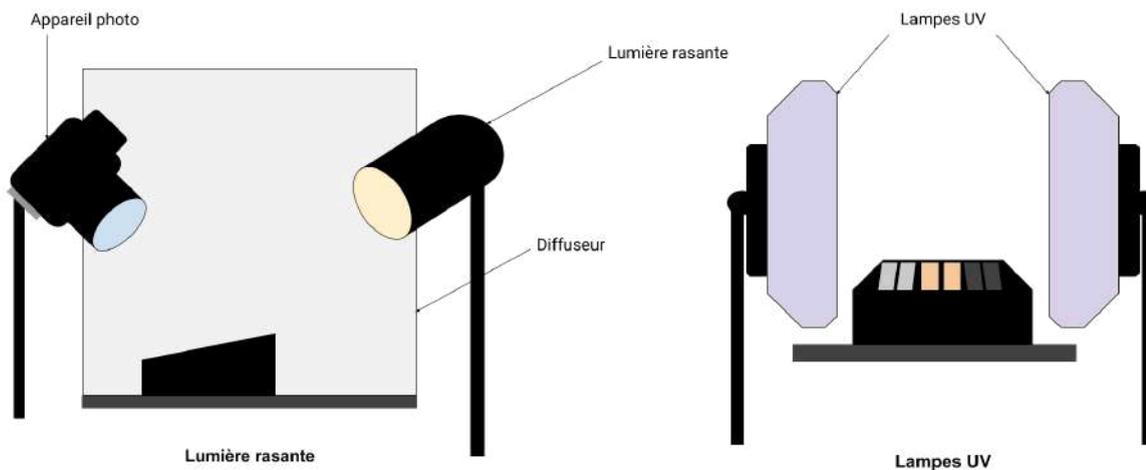


Figure 16 : Schéma prise de vue rasante et sous lumière UV des coupons des tests d'Oddy.

2) Analyse physico-chimique

2.1 Test d'Oddy

La première étape d'analyse effectuée sur les matériaux est la mise en place de test d'Oddy. Celui-ci est effectué au sein du musée du quai Branly - Jacques Chirac avec Fabrice Sauvagnagues, chargé de la conservation préventive.

a. Principe

Le principe de ce test est d'évaluer la présence de polluants dans les matériaux utilisés dans les musées et institutions du patrimoine, en ce qui nous concerne ici les matériaux biosourcés qui pourraient être utilisés dans le conditionnement d'objets du patrimoine. Ce test a été créé en 1973 par W. A. Oddy, scientifique au British Museum, pour contrôler la sécurité des matériaux utilisés au sein du musée, allant des matériaux de conditionnement jusqu'aux matériaux de construction qui constituent l'édifice (Thickett et al., 2004). Ce test permet de mettre en évidence la présence de polluants volatils qui peuvent venir endommager voir même détruire les objets s'ils sont en contact ou même trop près. Instauré dans beaucoup de musées, chaque institution applique son propre protocole du test d'Oddy. Mais le principe de base de ce test et le protocole restent les mêmes.

Le test consiste à accélérer le processus de dégradation des matériaux avec une température, une humidité et une durée précise permettant de révéler la présence de polluants.

Pour évaluer la présence de polluants, des coupons métalliques de cuivre, d'argent et de plomb sont utilisés comme révélateur. Ce choix de ces métaux s'appuie sur leur réactivité chimique aux polluants. Les plaquettes vont soit s'oxyder, soit se corroder ou bien les deux s'il y a une présence de polluants. L'évaluation de ce test est complètement visuelle. Des tests de quantification de la corrosion et de l'oxydation des plaquettes de métal ont été mis en place par certains chercheurs (Beiner et al., 2015; Diaz et Cano, 2022).

Ce test est mis en place avant l'introduction d'un produit dans le musée et proche des objets du patrimoine. Une première base de données de référence a été partagée par le British Museum, puis suivie par le laboratoire R athgen de Berlin. Aujourd'hui, l'American Institute for Conservation (AIC) a mis en ligne sur leur plateforme collaborative AIC Wiki une base de donn ees²⁵ recensement de tous les tests fait par des musées nord-américains en plus de leur protocoles.

Le protocole instaur e par W. A. Oddy consiste en l'utilisation de coupons métalliques en cuivre, plomb et argent (AnalaR pure à 99,5%) de 0,1 mm d'épaisseur et de dimension 10x15 mm. Les coupons sont légèrement abras es des deux côtés avec une brosse en fibres de verre pour assurer une surface lisse. Un trou est ensuite perc e près du bord de chaque coupon, dans lequel un monofilament en nylon y sera ins er e et fix e en place. Les coupons sont ensuite d egraiss es dans de l'acétone, puis s ech es.

Dans une éprouvette de 50 mL équipée d'un joint en verre iod e, 2 g du m at eriel à tester sont plac es, sans contact direct avec les coupons. Un tube de 0,5 mL rempli d'eau distillée, bouch e avec du coton, est ins er e dans l'éprouvette principale, et le filament en nylon est fix e à l'intérieur du tube avec un collier thermo-rétractable. Une éprouvette témoin peut être mise en place, suivant le même protocole mais sans m at eriel à tester pour chacun des métaux (Fig. 17).

Le tout est ensuite plac e dans une étuve à 60  C, idéalement inclin e pour éviter la condensation sur les coupons. Après 28 jours, les coupons sont retir es du test et compar es au témoin. Il est également conseill e de réaliser les éprouvettes en deux fois pour assurer la reproductibilité des mesures.

b. Méthode

Pour notre test, nous avons utilis e la méthode dite du "3 en 1" mise en place en 2003 par le British Museum, qui consiste à installer les trois coupons métalliques dans la même éprouvette. Cela réduit le temps de préparation et de mise en place ainsi que le nombre d'éprouvette. Pour le protocole, nous avons choisi de suivre celui de Thierry Jacot, enseignant en conservation

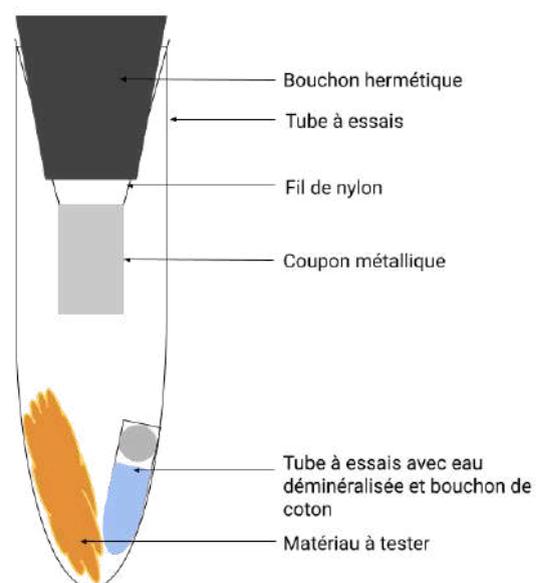


Figure 17 : Test d'Oddy Green and Thickett 1995.

²⁵ [Oddy Tests: Materials Databases - Wiki \(conservation-wiki.com\)](https://www.conservation-wiki.com/Oddy-Tests-Materials-Databases)

préventive à la Haute École ARC de Neuchâtel (Jacot, 2016). Nous avons testé chacun des matériaux, même si nous avons les fiches techniques des produits qui indiquent l'absence de polluants. Les tests ont été faits en deux fois à la suite d'une livraison tardive de certains produits. A chaque test, une éprouvette témoin sans matériaux a été produite.

Matériel nécessaire:

- Flacon Duran® -VWR à large col, à vis de laboratoire (9)
- Fil de cuivre
- Coupons métalliques (Cu, Ag et Pb)
- Eau déminéralisée
- Acétone
- Coton
- Tube à essai de 0,5 mL

Les coupons métalliques de 5 cm sur 2 cm ont été polis sur les deux faces dans deux sens différents afin d'éliminer toutes impuretés et de rendre les coupons les plus lisses possible, pour éviter une déformation physique qui peut entraîner des problèmes au stade d'évaluation de la corrosion. Puis un trou est effectué dans chacun des coupons, afin d'y installer par la suite un fil de cuivre qui servira de support au coupon dans le flacon de laboratoire. Chaque coupon est plongé dans un bain d'acétone pendant une heure puis est ensuite séché. Les flacons sont nettoyés avec de l'eau déminéralisée et séchés en amont. Le fil de cuivre qui sert de support et remplace le fil de nylon dans le protocole original est dégraissé à l'acétone. L'utilisation d'un fil de cuivre au lieu d'un fil de nylon n'a pas d'impact sur les résultats. Le fil est ensuite préparé pour former un support qui accueillera les coupons métalliques (Fig. 18). Les coupons sont installés dans l'ordre suivant : argent, cuivre et plomb. Le support est installé dans le flacon en premier puis le matériau à tester. Celui-ci ne doit pas être en contact avec les coupons. Enfin, un tube à essai rempli d'eau déminéralisée et fermé par un bouchon en coton est déposé au fond du flacon. Celui-ci aussi ne doit pas être en contact avec le matériau.

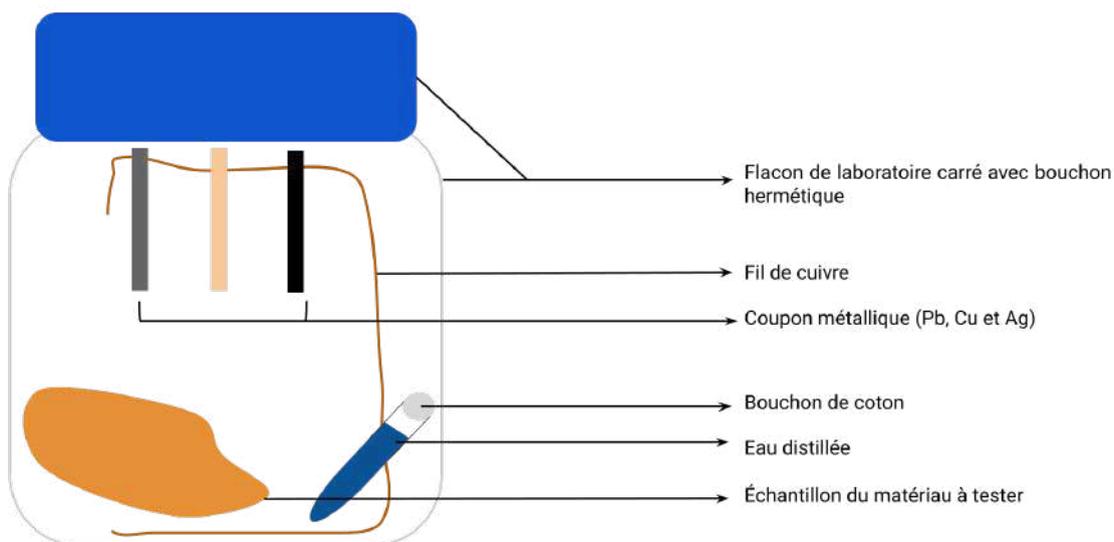


Figure 18 : Schéma d'une éprouvette du test d'Oddy dit "3 en 1".

Les éprouvettes sont placées dans une étuve à 60 °C pendant 28 jours. Après cette période, les éprouvettes sont sorties de l'étuve et une fois refroidies, elles sont ouvertes pour récupérer les coupons métalliques. Il est conseillé de profiter de l'ouverture des flacons pour identifier

d'éventuelles odeurs particulières, comme celle de l'acide acétique. Les coupons sont mis côte à côte avec les coupons de l'éprouvette test, et comparés. Un protocole de prise de vue standardisé et normé est mis en place afin de garantir la meilleure évaluation de l'oxydation et de la corrosion des coupons. Les critères d'évaluation sont définis lors de l'observation. Ils s'appuient sur le degré de corrosion (attaque de structure) et le degré d'oxydation (patine de surface) des coupons métalliques (Volfovsky, 2001).

2.2 Mesure de pH des matériaux

Le pH constitue un paramètre important en conservation car il renseigne sur l'histoire de l'objet et son état.

a. Principe

Pour les matériaux de conditionnement, le pH renseigne sur la compatibilité avec les objets dont il est possible qu'il soit en contact et ainsi évalué s'il peut être responsable d'une dégradation ou non. Il indique la stabilité du matériau et aussi la vitesse de dégradation d'un matériau. Le pH est une mesure de l'acidité ou de l'alcalinité d'une substance. On parle plutôt de la concentration d'hydrogène présente dans la solution. Le pH est exprimé entre 0 et 14, 0 étant acide, 7 neutre et 14 basique. Pour nos échantillons, trois méthodes de mesures pH ont été testées. Une mesure par macro-extraction et deux mesures de contact (gel d'agarose et papier pH). La méthode par macro-extraction à froid sera la seule présentée dans ce mémoire car elle est la plus fiable, les deux autres méthodes ayant des résultats moins reproductibles. La méthode de mesure par macro-extraction est la méthode la plus utilisée et la plus précise pour connaître le pH de ces matériaux (Season, 2007). C'est une méthode normée et utilisée dans le domaine du textile (AFNOR NF EN 3071, 2006).

Trois échantillons ont été prélevés pour chaque matériau à tester, puis trois mesures ont été effectuées sur chacun d'eux afin de calculer une moyenne, assurant ainsi la fiabilité des résultats (Dadillon et al., 2021).

b. Méthode

Matériels :

- Bêchers
- Balance de précision²⁶
- Pipette
- pH mètre
- Eau déminéralisée

La méthode de mesure est simple et facile à appliquer. Tout d'abord, prélever 2 g ($\pm 0,05$ g) de matière à tester pour 100 mL d'eau déminéralisée. Agiter à la main au début pour que tout l'échantillon soit mouillé puis agiter pendant 2 h (± 5 min) avec un agitateur magnétique. Pour la mesure de pH, le modèle MP220 de pH mètre de paillasse de la marque Mettler Toledo a été utilisé. Avant chaque mesure, la sonde du pH mètre a été nettoyée et un étalonnage en deux points a été effectué (un à 4,01 et un à 7). Après les deux heures d'agitation, la matière est retirée, la solution seule est mesurée (Fig. 19).

²⁶ Mettler Toledo XA 105 (d= 0.01mg)



Figure 19 : Prise de vue des échantillons d'Elancrin lors des mesures de pH par macro-extraction
© Arnouil Julie

2.3 Test de dégorge ment (solidité des couleurs)

Les matériaux ont subi un test de dégorge ment, qui reprend le principe du test de solidité des couleurs dans le domaine du textile (ICC, 2018)²⁷. Pour ce faire, différentes procédures et méthodes ont été utilisées. La première suit le protocole d'essai de solidités instauré par Jean Tétréault dans une note de l'Institut canadien de conservation (ICC) et utilisé par Anaïs Perrichon dans son mémoire (Perrichon, 2021).

Cet essai consiste à placer un matériau humidifié sur une plaque de verre, de l'humidifier de quelques gouttes puis de déposer par dessus un papier buvard, afin que le papier soit humecté par contact. Une deuxième plaque de verre sur laquelle est posée un poids est déposée sur le matériau et le papier, afin de les comprimer et d'assurer un bon contact. (Fig. 20)

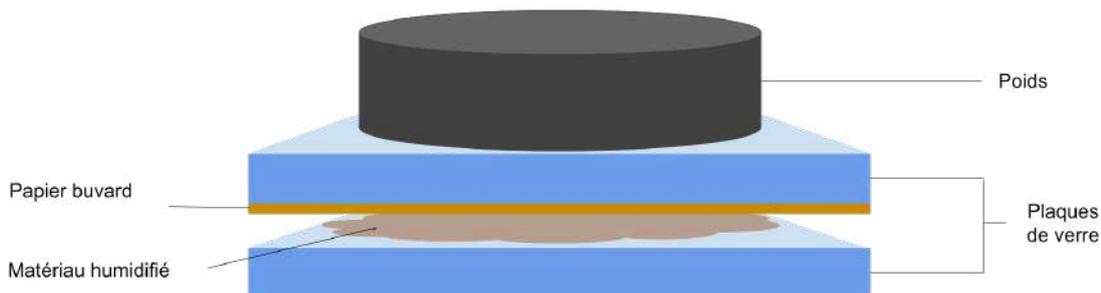


Figure 20 : Schéma du test de dégorge ment des matériaux.

Avec cette méthode, deux procédures de lecture de résultats ont été effectuées. La première a été d'évaluer au bout de 30 minutes le résultat tandis que la seconde a été composée de différents paliers d'observation (30 secondes, 2, 5, 15 et 30 minutes) afin de mieux voir dans le temps l'évolution du dégorge ment.

²⁷ ICC (2018) *Produits utilisés en conservation préventive* – Bulletin technique 32.

Un deuxième test, qui s'appuie sur le même essai de solidité après le lavage des textiles, a été réalisé. La mise en place est la même que la précédente sauf que cette fois-ci, le matériau est entièrement mouillé. On place le matériau dans un bécher et on ajoute 25 mL d'eau déminéralisée. On le mélange manuellement pendant quelques secondes afin que le matériau soit bien imbibé. Puis on le retire sans essorer et le dépose dans une coupelle plate. On dépose un papier buvard maintenu par une plaque de verre et un poids. On observe le résultat après 10 minutes.

2.4 Vieillessement

Pour connaître la réaction de nos matériaux dans le temps, il a été nécessaire de produire des tests de vieillissement. Les tests s'appuient sur le protocole de vieillissement réalisé par Anaïs Perrichon réalisé pour son mémoire de fin d'année en 2021 à l'École du Louvre (Perrichon, 2021). Le vieillissement de nos matériaux a été réalisé dans une enceinte de la marque Binder, modèle KMF-240 (Fig. 21), paramétrée selon la norme ISO 105-B02. Comme A. Perrichon, nous avons décidé de réaliser des cycles de vieillissement afin de comparer les résultats obtenus et avoir un suivi de nos vieillissements. Contrairement au protocole de base, nous avons réalisé 3 cycles au lieu de 4 et nous avons décidé de doubler chaque cycle au lieu de réaliser le même nombre d'heures entre les cycles. Le choix de modifier le temps des cycles est lié à l'organisation du stage, et plus particulièrement à la disponibilité de l'enceinte. Ainsi nous avons un premier cycle de 120 h, puis un second de 240 h puis un dernier de 480 h. Seulement des mesures de pH sont effectuées car il a été convenu que la mesure colorimétrique des matériaux n'avait aucune utilité dans nos recherches. Pour ces tests, 6 matériaux sur les 8 ont été sélectionnés selon les résultats des tests d'oddy et de pH. Au total 54 échantillons ont été réalisés (3 échantillons par matériau pour les mesures de pH pour chaque cycle) disposés dans des béchers. Aucune variation de température ou d'humidité relative n'est effectuée entre les cycles. L'humidité relative est paramétrée à 40 % et la température à 32 °C. A la fin de chaque cycle, le pH des matériaux sera mesuré selon le même protocole de mesure utilisé auparavant.



Figure 21 : Mise en place des échantillons dans l'enceinte de vieillissement.

© Arnouil Julie

3) Analyse mécanique

Pour les tests mécaniques il a été décidé, à la suite d'échanges avec les régisseurs des collections du musée²⁸ et les techniciens de conservation rencontrés lors de ce stage, qu'il était préférable de conditionner les matériaux sous forme de coussins. Cette méthode permet d'éviter le contact direct des matériaux avec les objets et de prévenir leur dispersion et leur perte. Pour cela, j'ai confectionné et cousu des coussins en Tyvek, un matériau disponible et couramment utilisé dans les musées. Bien que le jersey tubulaire de coton et la toile à patron en coton aient été envisagés, ces matériaux laissaient apparaître les différentes fibres végétales à travers leur tissage. Il a donc été convenu que le Tyvek était le meilleur choix pour la confection des coussins tests. Afin d'obtenir le maximum d'informations, les coussins ont été pesés avant et après leur remplissage (Annexe 1).

3.1 Test mécanique : reprise de forme et de fatigue des matériaux

Pour évaluer la capacité de reprise de forme des matériaux conditionnés sous forme de coussin, ainsi que leur usure, une méthode de photographie calibrée a été mise en place. Les coussins de 20 cm de côté ont été disposés dans une lightbox de la marque Godox et photographiés avec un Nikon D850 équipé d'un objectif fixe de 60 mm (Fig. 22). Les lampes LED fournies dans la lightbox ont été placées de manière rasante. Les coussins ont été photographiés avant, pendant et après l'application d'un poids de 1 kg. Un intervallo-mètre réglé sur 0,5 seconde a été utilisé sur l'appareil photo afin de suivre la reprise de forme du coussin après le retrait du poids, permettant un suivi sur 15 secondes.

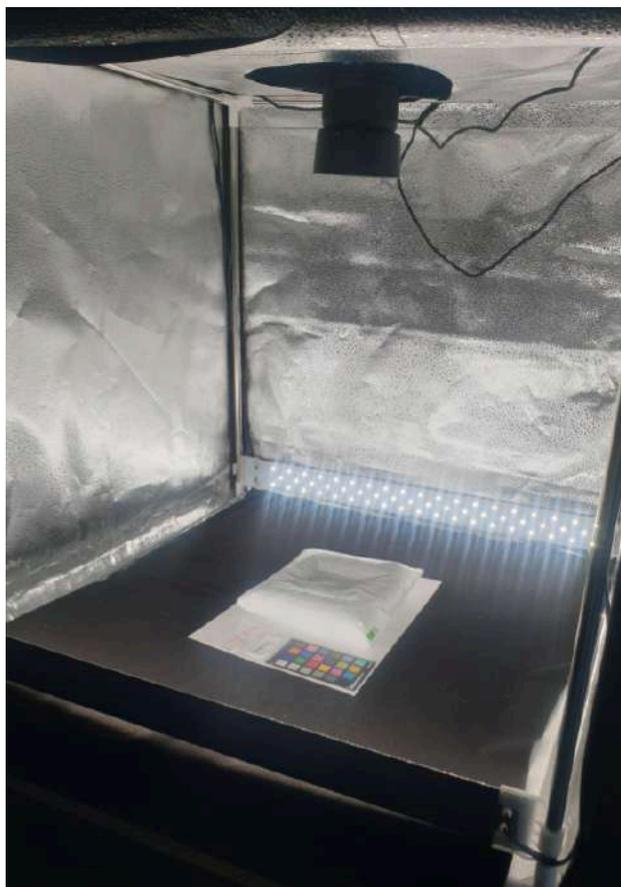


Figure 22 : Mise en place des prises de vue pour les tests d'usure et de reprise de forme.
© Arnoull Julie

²⁸ musée du quai Branly - Jacques Chirac

Pour mesurer la fatigue des coussins, le même protocole a été suivi, avec 15 séries de photographies réalisées pour chaque coussin. L'évaluation de la reprise de forme et de l'usure des coussins a été effectuée grâce à un traitement d'image et une analyse des nuances de gris, correspondant à l'enfoncement du coussin, via le logiciel ImageJ®. Les données sont ensuite récupérées et traitées sur Excel. Cette méthode d'analyse et d'évaluation est mise en place lors de ce stage. Tous les matériaux ont été testés, sauf l'elancrin latexé, en raison des résultats obtenus avec le test d'Oddy. Un coussin composite, mélangeant kapok et d'elancrin carbone, a été réalisé pour évaluer le résultat du mélange de ces deux matériaux différents.

3.2 Vibrations

Afin de tester la capacité d'absorption des chocs des matériaux de calage, des tests de vibration ont été effectués. Cette fois-ci, seuls 6 des 8 matériaux²⁹ ont été testés, en se basant sur les résultats des tests d'Oddy. Pour ce faire, de nouveaux coussins en Tyvek (2 par matériau), plus larges que les premiers (40 cm x 46 cm), ont été confectionnés et installés dans une boîte de transport (Fig. 23)³⁰.

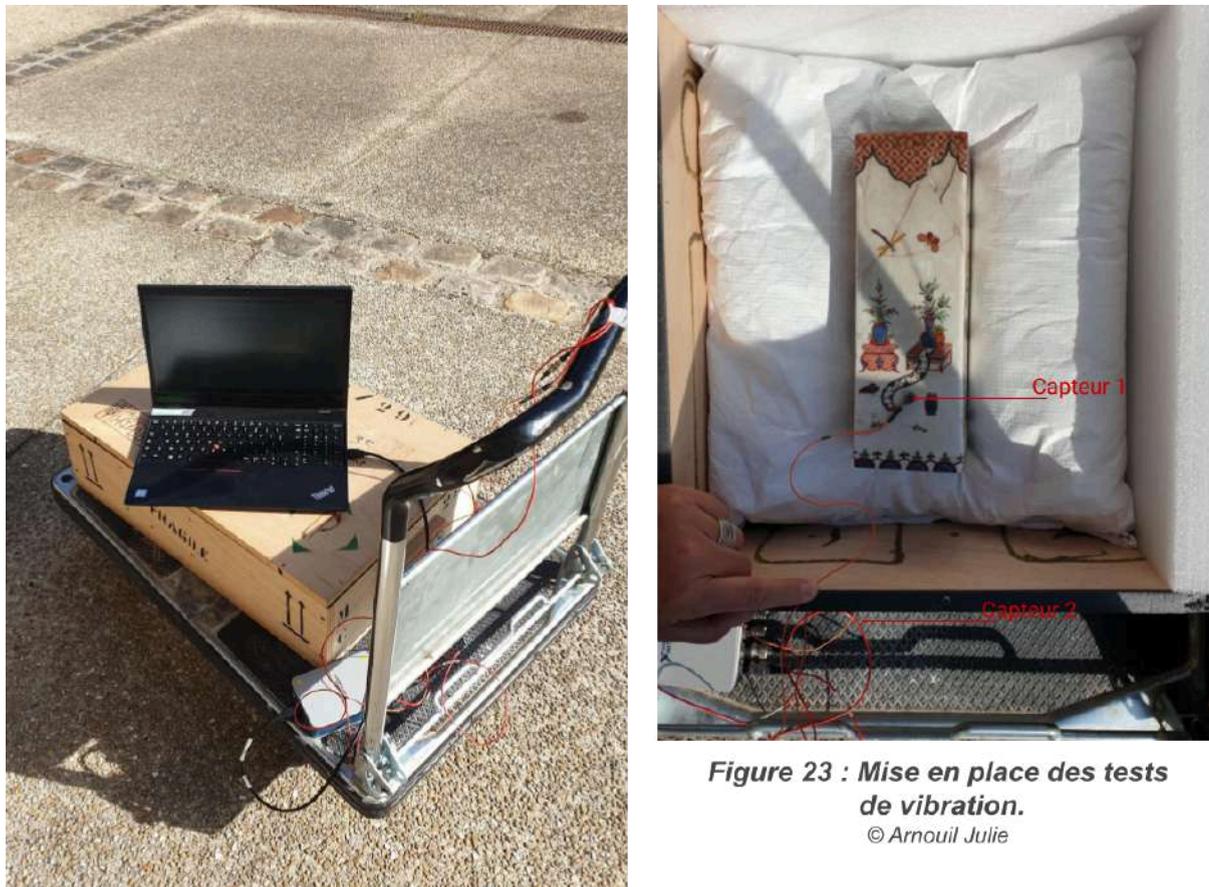


Figure 23 : Mise en place des tests de vibration.

© Arnouil Julie

Nous avons initialement prévu de réaliser ce test dans les mêmes conditions de transport habituelles des œuvres, c'est-à-dire en camion, mais une panne technique nous a obligés à revoir nos plans. Ainsi, nous avons installé la caisse à tester sur un chariot (Fig. 23). Pour une

²⁹ Le crin végétal et l'elancrin latexé n'ont pas été testé du fait de leur mauvaise évaluation au test d'Oddy.

³⁰ Pour le millet et le sarrasin, étant donné la quantité de matériaux restante, j'ai été contrainte de faire des coussins plus petits. Les tests ont été faits dans un bac en polypropylène.

simulation optimale, un vase et un moulage nous ont été prêtés par la régie de l'INP en guise d'objet test.

L'expérience consistait à placer un capteur sur l'objet, disposé à l'intérieur de la caisse entre deux coussins du même matériau. Un second capteur a été placé à l'extérieur de la caisse, sur le chariot. Les deux accéléromètres ont été fixés sur des surfaces horizontales parallèles afin de mesurer les vibrations dans la direction verticale. Ainsi, la fonction de transfert entre les capteurs permet d'illustrer la capacité absorbante des matériaux. La chaîne de mesure est composée de deux accéléromètres (Dytran 3225F1), reliés à une carte d'acquisition NI9234, elle-même connectée à un ordinateur portable. Le tout est piloté à l'aide du logiciel Matlab®.

Le même parcours a été réalisé pour chaque caisse, consistant en une séquence de 3 minutes effectuée dans la cour de l'INP sur différents types de sol. Les signaux temporels ont été enregistrés à une fréquence d'échantillonnage de 4096 Hz sur une durée de 180 secondes.

Les Décompositions Spectrales de Puissance (DSP) ont été calculées en utilisant la méthode de Welch³¹. A chaque acquisition, les signaux temporels (à l'intérieur et à l'extérieur de la caisse) ainsi que leurs DSP sont affichés.

³¹ La méthode de Welch est une technique utilisée pour estimer la densité spectrale de puissance d'un signal, permettant d'analyser les fréquences dominantes dans des données vibratoires, même en présence de bruit.

TROISIEME PARTIE : RESULTATS ET DISCUSSIONS

I. Résultats des analyses

1) Résultat des différentes observations

La visualisation des matériaux grâce à différents outils d'imagerie a été nécessaire avant tout type d'analyse physico-chimique afin de mieux comprendre leur composition et leur formation, ainsi que pour détecter la présence éventuelle de sels ou d'autres substances sur les matériaux. Ces outils ont également été utilisés pour visualiser les coupons d'Oddy après test.

1.1 Microscopie 3D et microscope optique (VIS et UV)

L'utilisation du microscope a été la première étape de ce projet. Avant toute chose, les matériaux ont été observés à différentes échelles et sous diverses sources lumineuses. Grâce au microscope 3D, une première évaluation des matériaux a permis de déterminer et de comprendre leur composition et leur mise en forme. Pour la plaque d'élanclin latexé, il a été constaté que le latex enrobe la fibre de manière plus ou moins épaisse, et cet enrobage est réparti de façon inégale sur les fibres (Fig. 24). De plus, une coupe du matériau et un montage 2D de l'échantillon ont permis d'examiner la structure de cette plaque, révélant que les fibres sont disposées de manière aléatoire, sans orientation spécifique.



Figure 24 : Images au microscope 3D de l'elancrin latex. © Arnouil Julie

Pour les fibres végétales, la visualisation au microscope 3D a fourni des informations sur leur constitution et a également permis de mesurer les différentes fibres et matériaux. Il a été possible de détecter la présence de cristaux ou de sels sur l'élanclin traité à la cire de carbone. L'observation par lumière transmise, a permis de constater la translucidité du kapok. (Fig. 25)



Figure 25 : Images au microscope 3D de l'elancrin carbone (x200) et du kapok (x300).

© Arnouil Julie

Dans un second temps, les visualisations ont été poursuivies avec le microscope optique, utilisant deux sources lumineuses différentes. Cette fois-ci, les matériaux ont été examinés en

détail, c'est-à-dire que l'observation s'est concentrée sur une fibre ou une cosse de céréales afin de maximiser le niveau de détail. L'échantillon de la fibre textile étudiée a été légèrement plus consistant pour pouvoir distinguer les quatre fibres différentes. Les matériaux ont d'abord été observés sous lumière visible, puis sous UV A et B. Les images obtenues sous ces trois sources lumineuses ont servi à comparer et à examiner les réactions des matériaux. Cette observation a permis de distinguer les quatre différentes fibres textiles, chacune réagissant différemment sous UV A et B (Fig. 26). Certaines fibres blanches en lumière visible apparaissent rouges, tandis que d'autres deviennent transparentes ou noires.

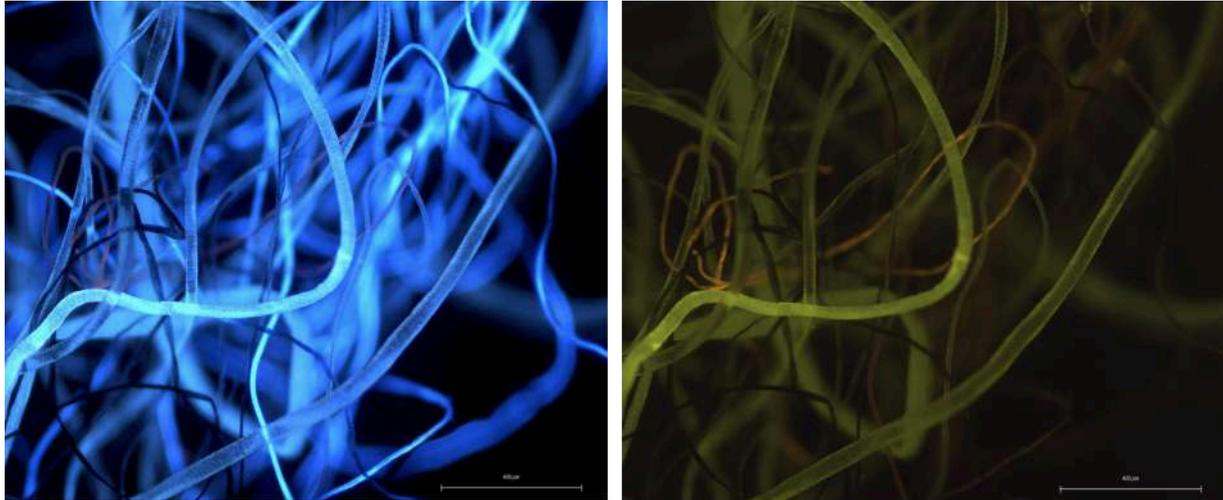


Figure 26 : Images au microscope optique des fibres textiles recyclées (x5) en UV A puis UV B.
© Arnouil Julie

Il a également été observé que le latex de l'élanrcin latexé présente une fluorescence différente sous UV A (Fig. 27). Enfin, il a été constaté que la fibre de kapok est transparente, mais devient plus opaque lorsqu'elle est pliée (Fig. 27).

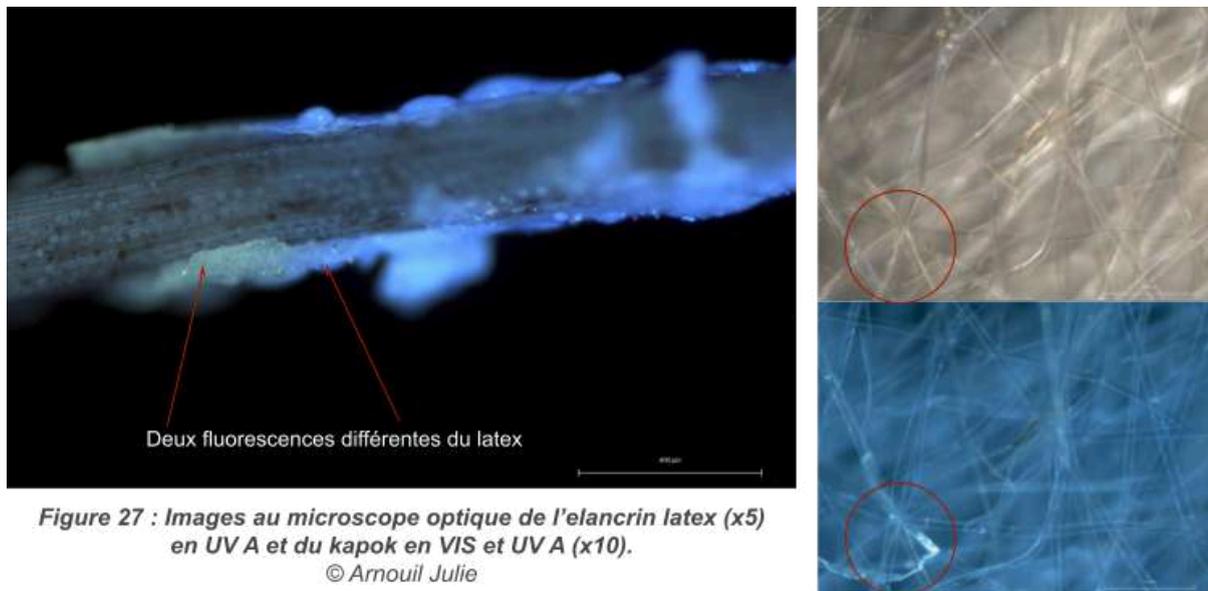


Figure 27 : Images au microscope optique de l'elancrin latex (x5) en UV A et du kapok en VIS et UV A (x10).
© Arnouil Julie

Ainsi, ces observations au microscope ont été essentielles avant toute analyse physico-chimique et ont également servi à documenter ce mémoire. Elles ont été complétées par des images effectuées au MEB et des analyses de la composition chimique des matériaux grâce au couplage avec la spectroscopie à dispersion d'énergie (EDS). Les résultats de ces tests seront discutés plus en détail dans ce mémoire.

1.2 MEB

Le MEB a été utilisé sur les matériaux ainsi que sur les coupons d'Oddy après tests. Pour les matériaux, il a permis d'obtenir des images microscopiques de meilleure qualité et beaucoup plus détaillées que celles réalisées avec un microscope optique. Il a été possible de voir et comprendre la structure et la morphologie des fibres. Les deux fibres végétales, l'élanclin et le crin végétal ont des structures complètement différentes. L'élanclin est une fibre pleine et ronde. On n'observe sur la coupe de la fibre aucun lumen³². La surface de l'élanclin carbone et de l'élanclin latexé est marquée par des stomates³³ ronds et réguliers, non présents sur l'élanclin naturel sans traitement. (Fig. 28).

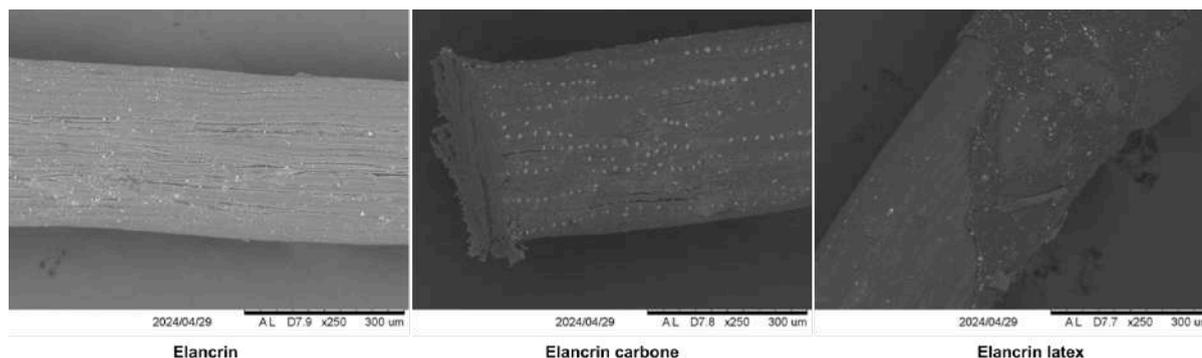


Figure 28 : Images MEB des trois élanclins (x250). © Arnouil Julie

Le crin végétal (Fig. 29) est quant à lui une fibre plate, composée de fibres plus fines elles-mêmes composées de fibres plus fines. La surface est plate et ne présente aucun stomate.

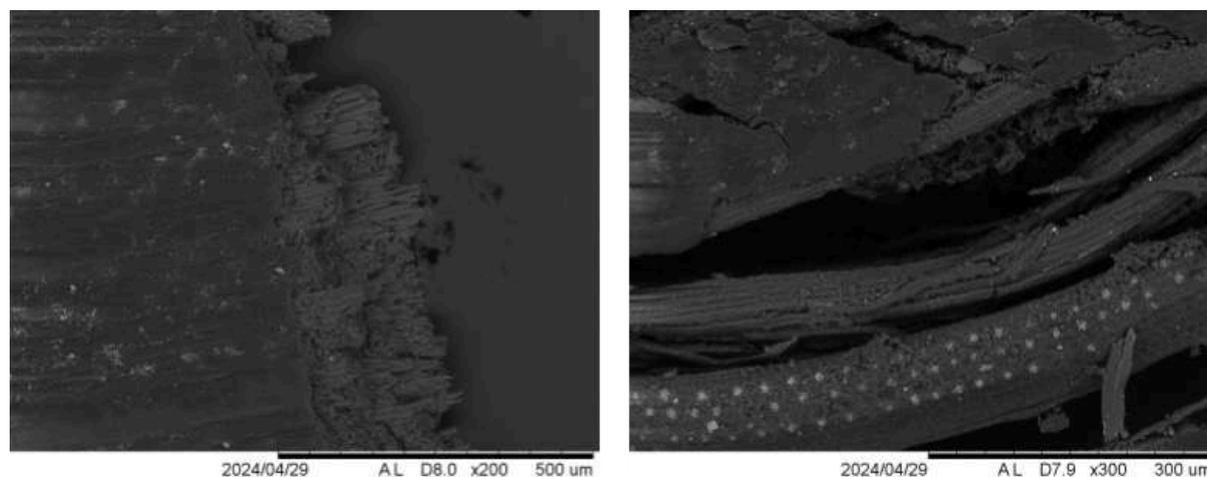


Figure 29 : Images MEB du crin végétal x200 et x300. © Arnouil Julie

Le kapok (Fig. 30) est une fibre transparente avec une surface lisse. Il est possible de constater de possible torsion ou pliure. Au MEB, la fibre de kapok possède le même aspect que la soie, une fibre lisse avec de possibles torsions.

³² Partie centrale et creuse de la fibre.

³³ Pores à la surface qui permettent les échanges gazeux entre la plante et l'atmosphère, ce qui les rend essentiels à la vie des plantes terrestres.

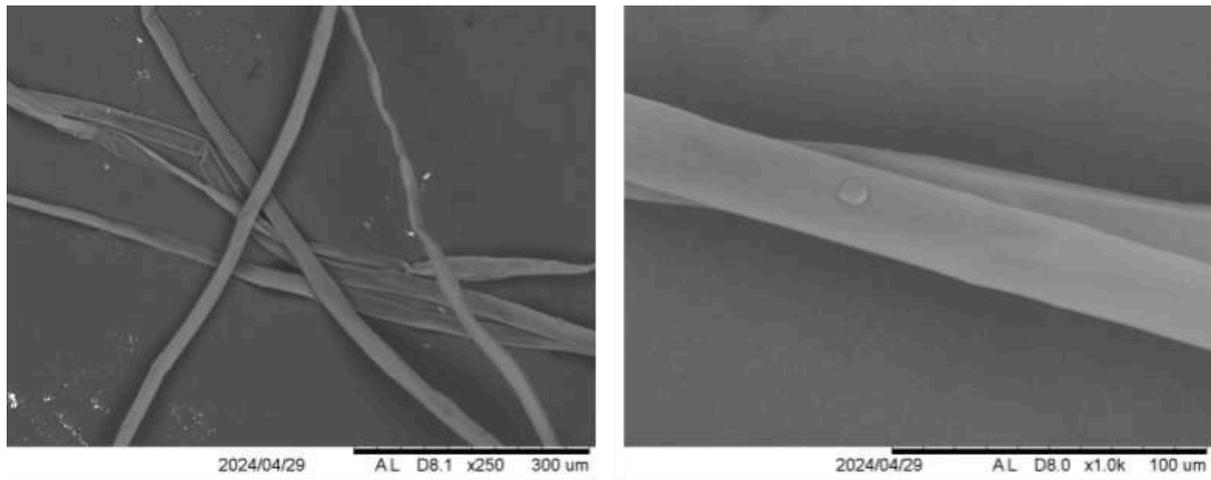


Figure 30: Images MEB du kapok x250 et x1000. © Arnouil Julie

Les deux cosses de céréales ont toutes deux des surfaces bien différentes. La surface extérieure de la cosse de millet présente des motifs ondulés ou sinusoïdaux réguliers. Ces motifs semblent correspondre aux impressions laissées par les structures cellulaires sous-jacentes. On observe également quelques particules isolées à la surface, qui pourraient être des dépôts ou des impuretés. De fines fissures traversent la surface, bien que celles-ci soient moins prononcées que dans l'image observée à un grossissement de x250. Les motifs ondulés suggèrent une organisation spécifique des cellules ou des fibres à la surface de la cosse, pouvant indiquer la présence d'une cuticule ou de parois cellulaires particulièrement structurées. La surface intérieure présente des motifs linéaires parallèles. Ces motifs pourraient correspondre à des structures fibrillaires ou cellulaires. On observe également des fissures et des craquelures dispersées sur la surface, certaines plus profondes et marquées que d'autres. (Fig. 31)

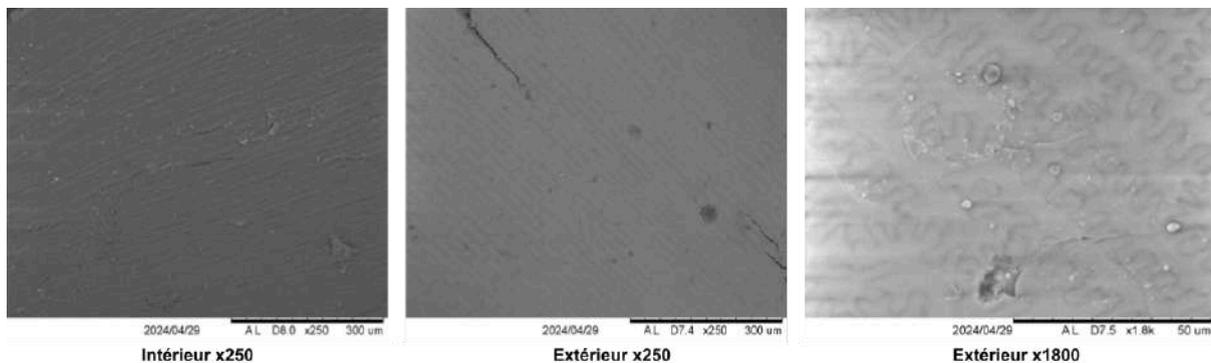


Figure 31 : Images MEB de la cosse de millet intérieur et extérieur. © Arnouil Julie

La surface intérieure de la cosse de sarrasin observée présente deux zones distinctes. La partie supérieure de l'image est caractérisée par une structure complexe et entrelacée, rappelant un réseau ou un maillage irrégulier. Cette structure semble correspondre à des fibres ou à des éléments cellulaires partiellement dégradés ou exposés, créant ainsi une texture tridimensionnelle et poreuse. En contraste, la partie inférieure de l'image montre une texture plus homogène, avec des motifs polygonaux ou réticulés plus réguliers. Contrairement à la surface extérieure de la cosse de millet, celle du sarrasin présente des motifs linéaires. À un grossissement de x1800, on peut observer des impuretés ou des incrustations circulaires (Fig. 32).

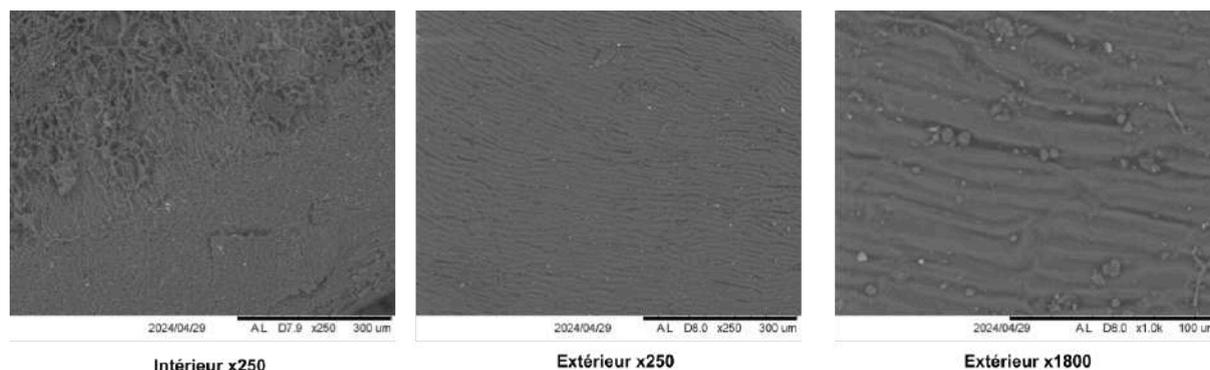


Figure 32 : Images MEB de la cosse de sarrasin intérieur et extérieur. © Arnouil Julie

Couplé à l'EDS (spectrométrie à dispersion d'énergie), le MEB a permis de faire des analyses de la composition chimique des matériaux. Cela nous a montré que le latex des plaques d'élanocrin, bien qu'il soit naturel, contient du soufre et a été vulcanisé³⁴ pour obtenir cette forme. Pour l'élanocrin, les analyses montrent une présence alcaline avec le sodium à une moyenne de 20 % (voir tableau en Annexe 2). Pour le reste des matériaux, l'utilisation de l'EDS ne nous a pas donné plus d'informations : étant des matériaux organiques, ils sont principalement composés d'oxygène, de carbone et d'hydrogène.

Les coupons utilisés pour les tests d'Oddy ont également été analysés au microscope électronique à balayage afin d'identifier plus précisément les produits de corrosion émis par les matériaux. Les zones d'analyse ont d'abord été sélectionnées à l'aide d'un microscope 3D, permettant d'identifier et de cibler les zones corrodées ou présentant des traces d'oxydation pour une analyse approfondie au MEB. La figure n°33 en illustre un exemple. Pour les coupons en plomb, les images obtenues au MEB ont permis de mieux observer la formation de la couche de corrosion et sa structure. Concernant les coupons en cuivre et en argent, les images MEB ont révélé des informations invisibles à l'œil nu, comme le piquetage du coupon en cuivre recouvert de kapok. Ce piquetage circulaire, indétectable à l'œil nu ou sous microscope, est devenu visible sous les faisceaux d'ions, mettant en évidence la dégradation de ce coupon. Le MEB a également permis de rendre visible le piquetage des coupons en argent, résultant de leur ternissement, et de mettre en évidence les premiers signes de corrosion ou de contamination entre coupons comme sur celui de l'argent de la fibre textile (Fig. 33) Nous avons initialement prévu d'utiliser le MEB pour identifier les agents de corrosion et d'oxydation. Cependant, ce dernier ne s'est pas révélé pertinent pour tous les coupons métalliques car il permet d'identifier les éléments chimiques sans révéler la structure moléculaire. Par exemple, pour le plomb, de nombreux produits de corrosion contiennent les mêmes atomes de plomb, carbone, oxygène et hydrogène, qui sont organisés en structures différentes. Ainsi, une analyse élémentaire déterminant leur présence ne suffit pas à identifier la nature des produits de corrosion. Néanmoins, en combinant une observation visuelle, précisée grâce au microscope optique, avec l'analyse élémentaire fournie par le MEB-EDS des matériaux, il a été possible d'identifier certains produits de corrosion, ou du moins d'en éliminer certains. De plus, cette approche a permis de détecter des contaminations potentielles entre les coupons, étant donné qu'ils ont été conservés dans le même espace³⁵. En annexe, se trouve le tableau des résultats des analyses MEB-EDS les coupons (Annexe 3).

³⁴ Processus consistant à ajouter et à chauffer le latex avec du soufre pour améliorer son élasticité et sa résistance.

³⁵ Sauf pour le coupon de plomb de l'élanocrin latex, à cause de son état très dégradé. Il a été conservé dans un sachet à glissière, isolé des autres.

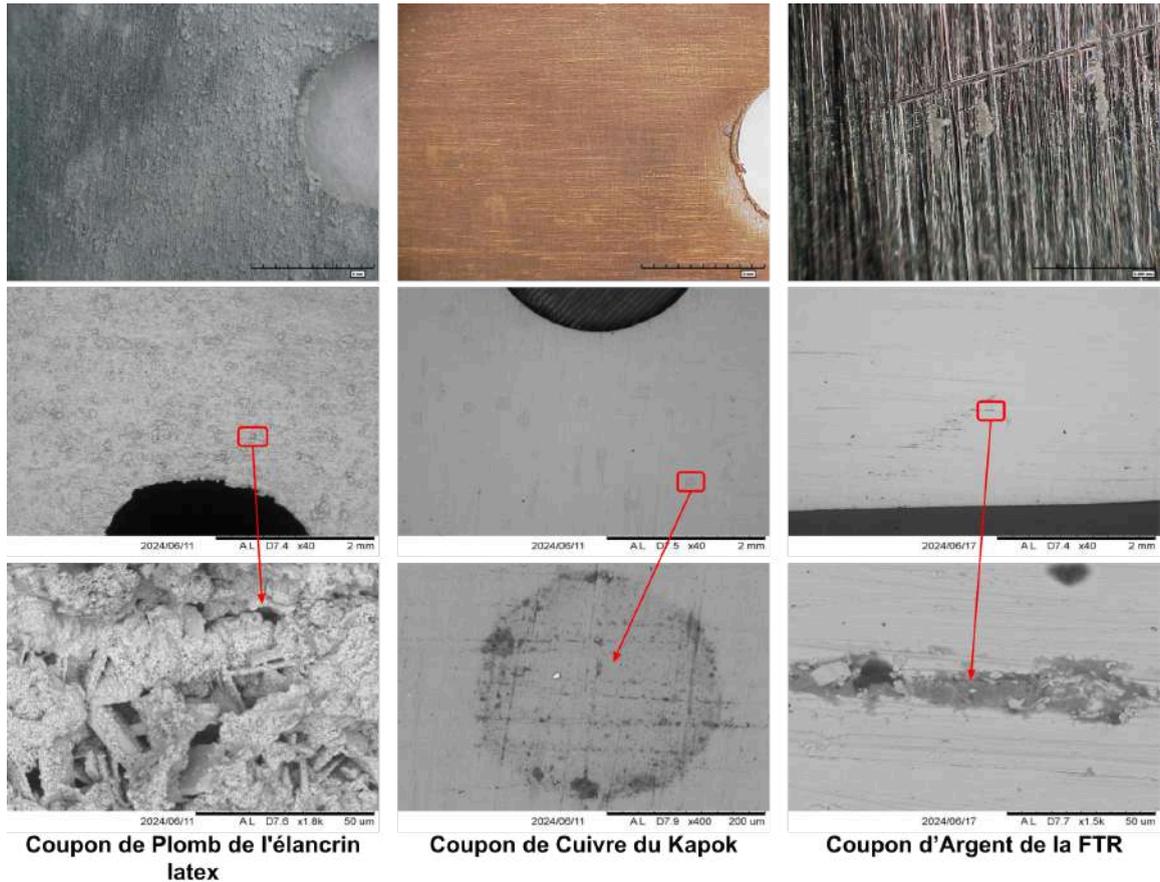


Figure 33 : Images au MEB et au microscope 3D des coupons métalliques après test d'oddy de différents matériaux. © Arnouil Julie

2) Analyses physico-chimiques

2.1 Test d'Oddy

Les tests d'Oddy ont été réalisés en deux parties, suite à une réception tardive des autres matériaux. Après leur passage en étuve pendant 28 jours, les coupons ont été analysés visuellement et photographiés de manière standardisée et reproductible. La mise en place d'un protocole de prise de vue standardisé des coupons a permis une meilleure évaluation de leur corrosion et de leur oxydation. La prise de vue des coupons sous lumière UV a révélé la fine pellicule de corrosion présente sur certains coupons et le ternissement des coupons d'argent, souvent difficile à voir à l'œil nu (Fig. 34).

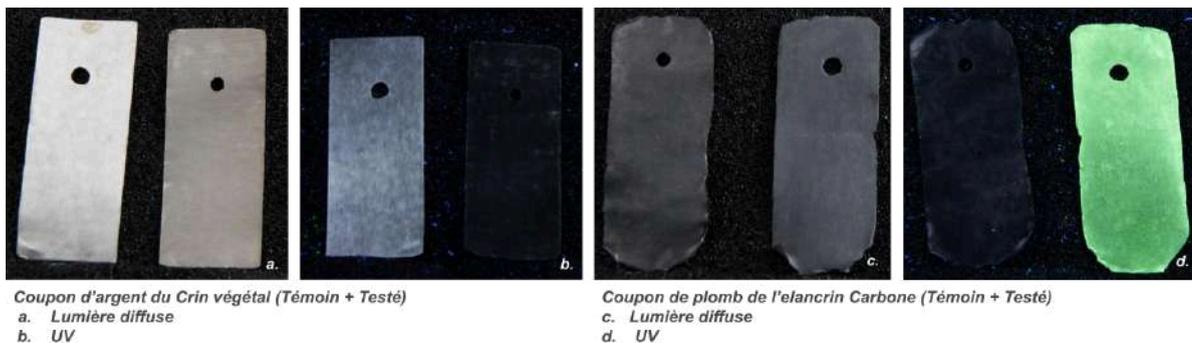


Figure 34 : Coupons métalliques du test d'oddy sous différentes lumières. © Arnouil Julie

Pour noter et évaluer les coupons, nous avons suivi les critères d'évaluation donnés par David Thickett et Lorna Green établis en 1995 (Thickett et Green, 1995). Les matériaux sont classés selon leur niveau de corrosion et d'oxydation et notés selon quatre grades différents (aucune, légère, moyenne, prononcée). Les coupons tests sont comparés avec des coupons témoins qui ont subi les tests d'Oddy sans les matériaux. Pour ce faire, le tableau conçu par Thierry Jacot a été utilisé pour regrouper nos résultats (Annexe 4).

Il ressort de ces tests que le crin végétal et l'élancrien latexé produisent des polluants trop agressifs, pouvant endommager chimiquement les objets. Le coupon de plomb couplé à l'élancrien latexé, sensible aux acides acétiques, est le plus corrodé de tous les coupons de plomb. Avec ce même matériau, le coupon de cuivre est, quant à lui, très oxydé à cause de la forte présence de soufre (Fig. 35).



Figure 35 : Photographies des coupons des tests d'oddy du crin végétal et d'élancrien latexé.
© Arnouil Julie

Les autres matériaux présentent de meilleurs résultats, même si les coupons sont légèrement oxydés et présentent une faible corrosion. La fibre textile recyclée et l'élancrien sont les matériaux qui réussissent le mieux ce test, et qui pourraient de ce fait être utilisés de façon permanente. Leurs trois coupons métalliques n'ont subi aucune ou une très légère oxydation (pour le cuivre et le plomb). Malgré des résultats mitigés, il a été décidé d'attribuer une utilisation permanente à l'élancrien carbone. Le coupon de cuivre est légèrement oxydé, et une très fine pellicule de corrosion est présente sur le coupon de plomb, mais cela ne permet pas de

considérer le matériau comme trop à risque pour en limiter l'utilisation à une période temporaire (Annexe 5).

Le millet, le sarrasin et le kapok sont, quant à eux, conseillés pour une utilisation temporaire. Leurs trois coupons de plomb présentent des traces d'oxydation et une corrosion plus ou moins prononcée (plus sur celui du kapok). Le coupon de cuivre du millet s'est terni légèrement. Les images des coupons selon le protocole de prise de vue mis en place ont été placées dans l'Annexe (Annexe 5).

2.2 Mesure de pH des matériaux

Le pH de chaque matériau a été mesuré selon un protocole d'extraction à froid utilisé dans le domaine textile (cf. *Partie II, chapitre II, 2*). Les matériaux sont en grande partie neutres, avec des pH compris entre 6,18 et 7,83. L'élancrien avec un pH basique de 10,13 et le crin végétal avec un pH acide de 5,71 se distingue des autres matériaux. Une question s'est posée sur le pH de l'élancrien, car il est dit dans la littérature (Benesteau, 2015) que cette fibre a un pH neutre. Une deuxième série de mesures a été lancée pour ce matériau mais les résultats n'ont pas changé, avec une moyenne de pH à 9,94, ce qui reste encore basique. Grâce aux analyses effectuées au MEB, le résultat d'un pH basique de l'élancrien est causé par la présence d'alcalin sur le matériau. Enfin avec cette mesure de pH, nous avons pu nous rendre compte de l'hydrophobie du kapok. Il a été compliqué de l'immerger dans l'eau déminéralisée. Il est ainsi préférable de prendre les résultats de pH du kapok avec précaution étant donné que le matériau n'a pas pu être complètement mis en contact avec l'eau. Les résultats de ces mesures de pH sont représentés dans le tableau ci-dessous (Tab. 1) et une version plus détaillée est présentée en Annexe (Annexe 6).

Macroextraction à froid (norme)	1	2	3	Moyenne	Ecart-type
Elancrien	10,14	10,19	10,05	10,13	0,1
Elancrien 2	10,02	9,83	9,96	9,94	0,1
Elancrien + carbone	7,10	7,05	7,07	7,07	0,0
Elancrien latexé	7,89	7,85	7,76	7,83	0,1
Crin végétal	5,82	5,73	5,58	5,71	0,1
Kapok	6,00	6,29	6,26	6,18	0,2
Cosse de sarrasin	6,52	6,48	6,43	6,48	0,0
Balle de millet	6,26	6,29	6,33	6,29	0,0
Fibre Textile recyclée	6,31	6,55	6,49	6,45	0,1

Tableau 1 : Tableau mesure pH par extraction à froid.

2.3 Tests de dégorgeement

Les matériaux ont été testés afin de déterminer s'il y avait une possible perte de couleur et un dégorgeement. Après les différents tests, le kapok, l'élancrien latex et la fibre textile recyclée n'ont présenté aucun dégorgeement. En revanche, l'élancrien carbone, le crin végétal et l'élancrien ont dégorgé beaucoup et assez rapidement. Les deux balles de céréales ont également dégorgé, mais plus légèrement que les autres matériaux. On peut apercevoir des traces très légers pour le millet, tandis que pour le sarrasin, les traces sont un peu plus prononcées mais restent légères (Annexe 7). Les résultats obtenus ont été inscrits dans le tableau ci-présent (Tab. 2).

	Elancrin	Elancrin Latex	Elancrin Carbone	Crin Végétal	Kapok	Fibre Textile Recyclé	Millet	Sarrasin
30s	L	NP	M	L	NP	NP	NP	S
2 min	L	NP	M	L	NP	NP	S	S
5 min	L	NP	M	M	NP	NP	S	L
15 min	L	NP	P	M	NP	NP	S	L
30 min	M	NP	P	P	NP	NP	S	M
Détrampage	P	NP	P	P	NP	NP	S	L

Légende	
L	Léger
M	Moyen
P	Prononcé
NP	Non Présent
S	Spot

Tableau 2 : Tableau des résultats obtenus des tests de dégorgeant

2.4 Vieillessement

Le vieillissement a été réalisé en trois cycles (120 h, 240 h et 480 h). Sur les 480 heures de vieillissement, le changement de pH reste très léger. L'élanrcrin, très basique avant le test, a subi une légère baisse de pH, tandis que pour les autres matériaux, leur pH a légèrement augmenté. Quant à l'élanrcrin carbone, il est resté neutre sur les trois cycles de vieillissement. Cependant, on constate avec le graphique que les changements restent minimales (Fig. 36). Chaque point du graphique correspond à des valeurs moyennes de trois mesures de pH pour chacun des matériaux à chaque cycle de vieillissement (Annexe 8).

Une modification des paramètres de vieillissement, comme une variation des températures, une humidité plus élevée ou un environnement plus sec, et peut-être un temps de vieillissement plus long, permettrait d'observer des changements de pH plus significatifs. Au fil des cycles, une décoloration des deux élanrcrins a été observée et les solutions sont devenues de moins en moins colorées au fur et à mesure des tests. On peut conclure de ce test de vieillissement que les matériaux restent relativement stables dans une plage de conditions donnée. Toutefois, pour des applications nécessitant une stabilité chimique et colorimétrique à long terme, il serait prudent de poursuivre les tests dans des conditions plus variées et sur des périodes plus longues. Cela permettrait de mieux comprendre leur comportement et d'assurer leur adéquation à des environnements plus exigeants.

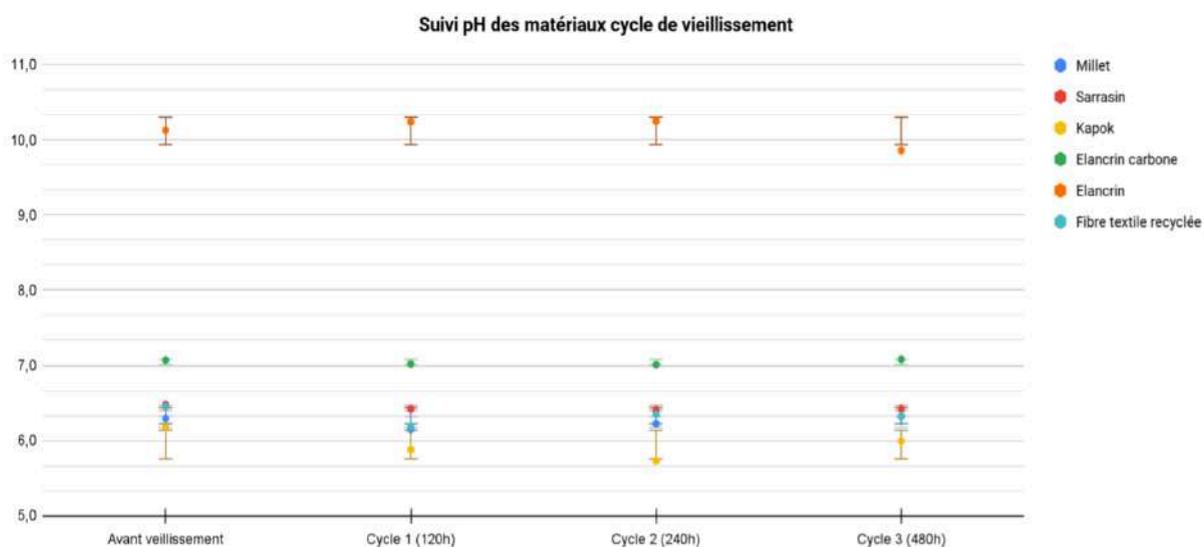


Figure 36 : Graphique évolution du pH des matériaux.

3) Analyses mécaniques

3.1 Test mécanique : relaxation et fatigue

3.1.1 Relaxation

Pour évaluer la reprise de forme de nos matériaux, un système de photographie calibrée a été mis en place. Une série de 17 images a été effectuée pour chaque coussin : une image avant l'ajout du poids, une seconde après l'ajout du poids puis une image par seconde après le retrait du poids pendant 15 secondes. Après la prise de vue des coussins, les images ont été traitées sous ImageJ® une première fois pour leur donner un traitement de fausse couleur pour mieux observer la reprise de forme (Fig. 37). Un montage GIF de chaque série a été effectué avec les images pour suivre le mouvement de reprise de forme.

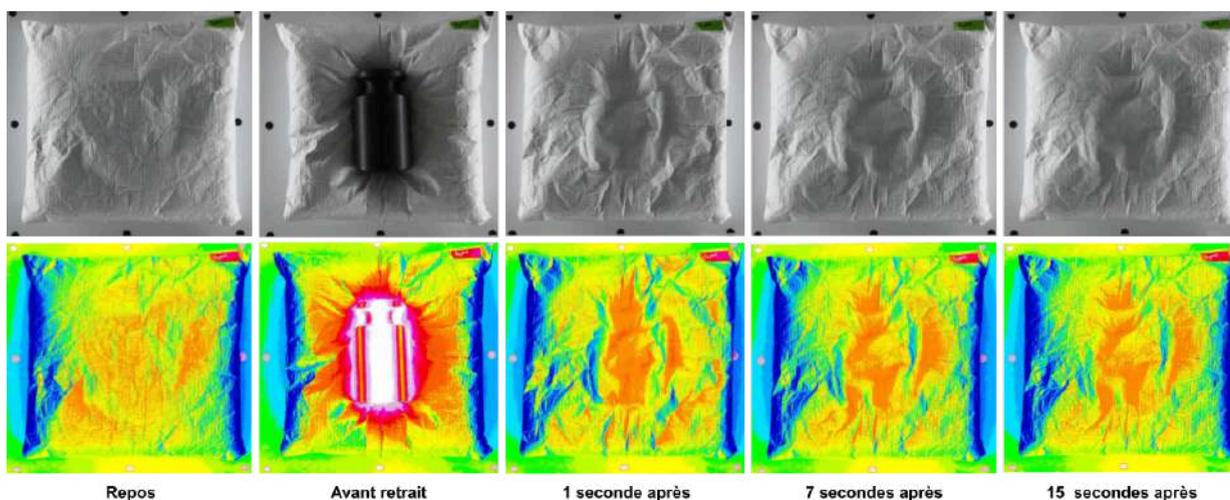


Figure 37 : Images du coussin de kapok à des intervalles différents avant et après traitement des fausses couleurs.
© Arnouil Julie

Après ce traitement, les données de nuances de gris qui nous servent d'échelle d'enfoncement du coussin ont été récupérées pour chaque image et transformées en graphique (Fig 38 à 41). Pour récupérer ces données, une zone de sélection a été tracée sur l'image restreints par des repères (points noirs sur image de la figure n° 37). Sur la zone sélectionnée de l'image, nous avons lancé une analyse « Plot Profil » dans ImageJ. Cette analyse génère un graphique bidimensionnel montrant les intensités des pixels le long d'une ligne tracée dans l'image. Dans ce graphique, l'axe des x représente la distance le long de la ligne tracée, tandis que l'axe des y indique l'intensité des pixels le long de cette ligne.

Pour la sélection effectuée sur nos coussins, le tracé montre la moyenne des intensités des pixels le long de chaque colonne de la sélection. Concrètement, l'axe des x représente la distance horizontale à travers la sélection, et l'axe des y affiche l'intensité moyenne verticale des pixels pour chaque position horizontale. Ces graphiques nous permettent de donner une valeur à la reprise de forme et à la fatigue de nos coussins que nous verrons par la suite. Plus la courbe obtenue se rapproche de la courbe de référence, mieux le coussin retrouve sa forme.

Les graphiques ont permis d'observer que la fibre textile recyclée, le kapok ainsi que le mélange d'élanocrin carbone et de kapok récupèrent leur forme de manière rapide et presque totale. En revanche, le crin végétal, l'élanocrin carbone et l'élanocrin présentent une reprise de forme rapide, mais partielle. En comparant le graphique de référence au dernier graphique, on remarque que les courbes de ces matériaux ne reprennent pas totalement leur forme initiale.

Une faible, voire aucune reprise de forme n'a été observée pour les coussins de millet et de sarrasin.

De cette expérience, on peut conclure que les coussins fabriqués à partir de fibre textile, de kapok, et du mélange d'élanocrin carbone et de kapok, grâce à leur rapide reprise de forme, permettent de soutenir un objet susceptible de se déplacer ou de changer au fil du temps, garantissant ainsi un soutien adapté à l'évolution de l'objet. C'est le cas, par exemple, pour les écorces peintes du musée, où le coussin s'ajuste non seulement aux formes mais aussi au poids de l'objet. Il en va de même pour les fibres végétales (crin végétal et les deux types d'élanocrin), même si leur reprise de forme est moins optimale. Quant aux coussins remplis de cosses de céréales, ils peuvent être utilisés pour des objets lourds, offrant un maintien qui s'adapte à la forme de l'objet. Bien qu'il n'y ait pas de reprise de forme après le retrait du poids, ces coussins peuvent facilement être remodelés en les secouant pour leur permettre de retrouver leur forme initiale. Les annexes contiennent les graphiques correspondant à chaque coussin, mesurés à quatre intervalles différents, ainsi que des images détaillées de chaque coussin (Annexe 9).

Pour les légendes des graphiques suivants, les abréviations suivantes ont été utilisées:

CV = Crin végétal	FTR = Fibre Textile Recyclée
ECK = Élanocrin Carbone + Kapok	K = Kapok
EC = Élanocrin Carbone	M = Millet
E = Élanocrin	S = Sarrasin

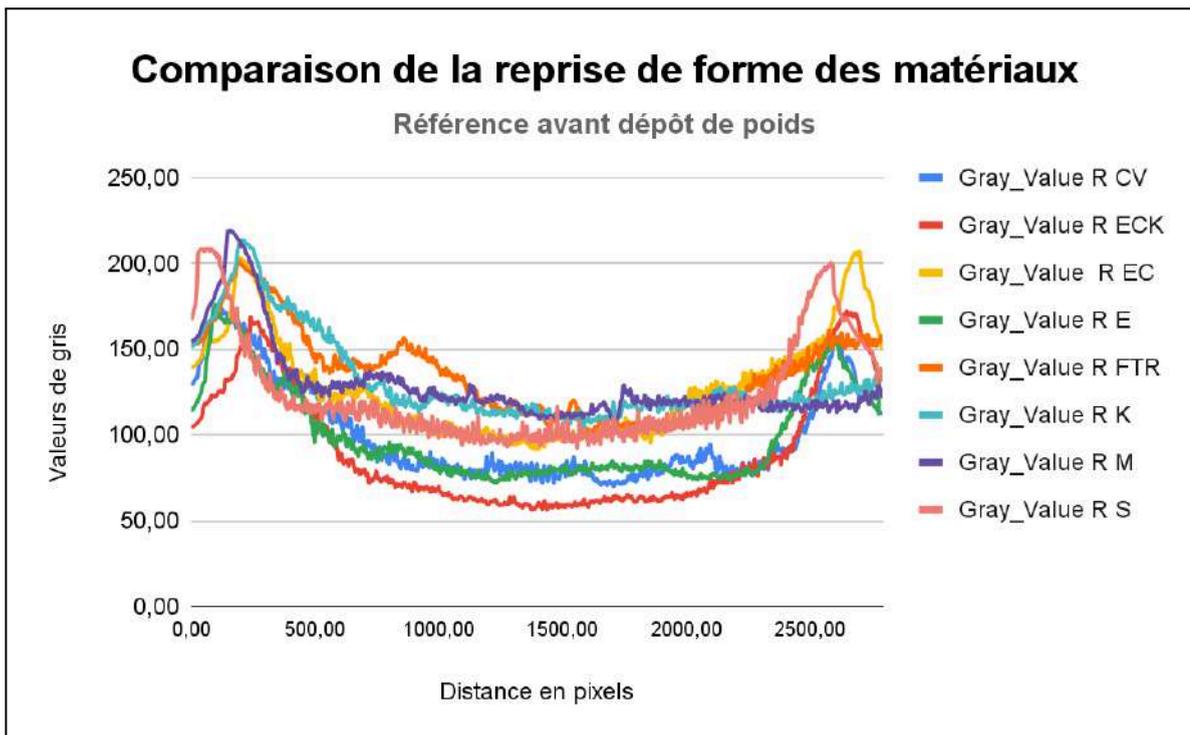


Figure 38 : Graphique des courbes de référence reprise de formes des 8 coussins.

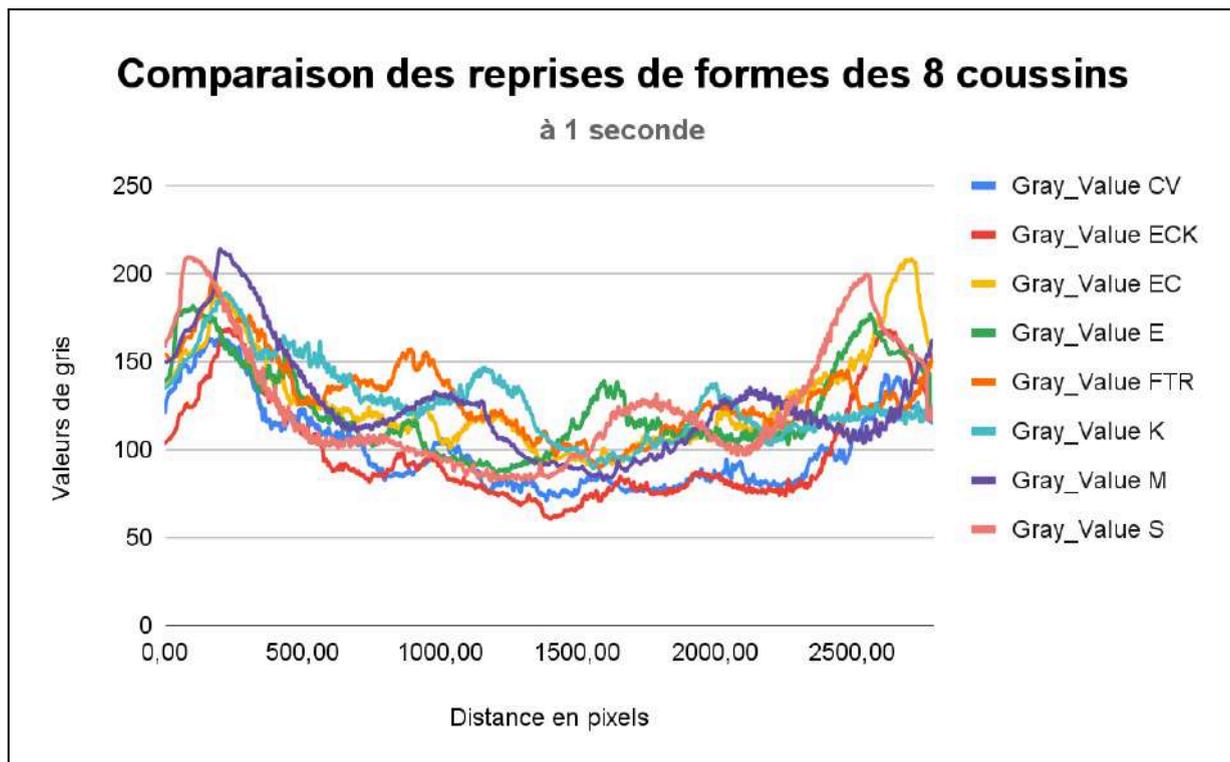


Figure 39 : Graphique des suivis de reprise de formes des 8 coussins à 1 seconde en comparaison avec la référence.

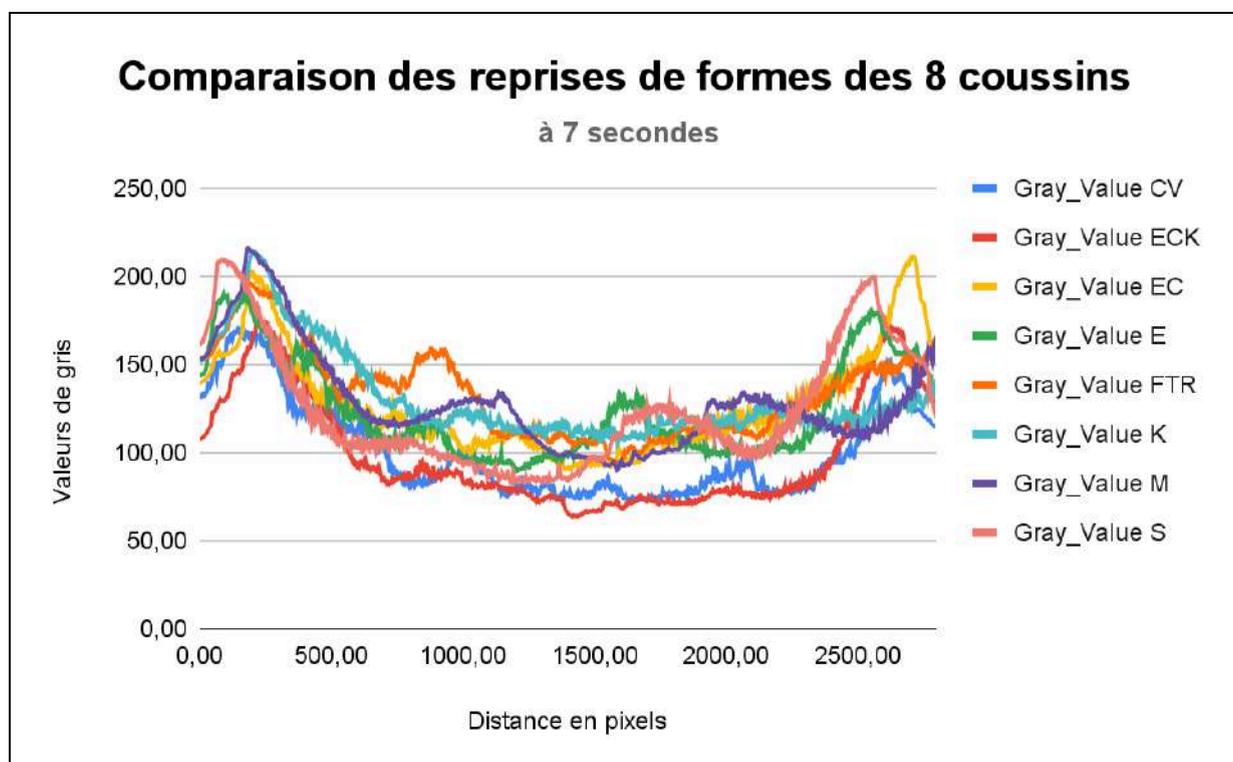


Figure 40 : Graphique des suivis de reprise de formes des 8 coussins à 7 secondes en comparaison avec la référence.

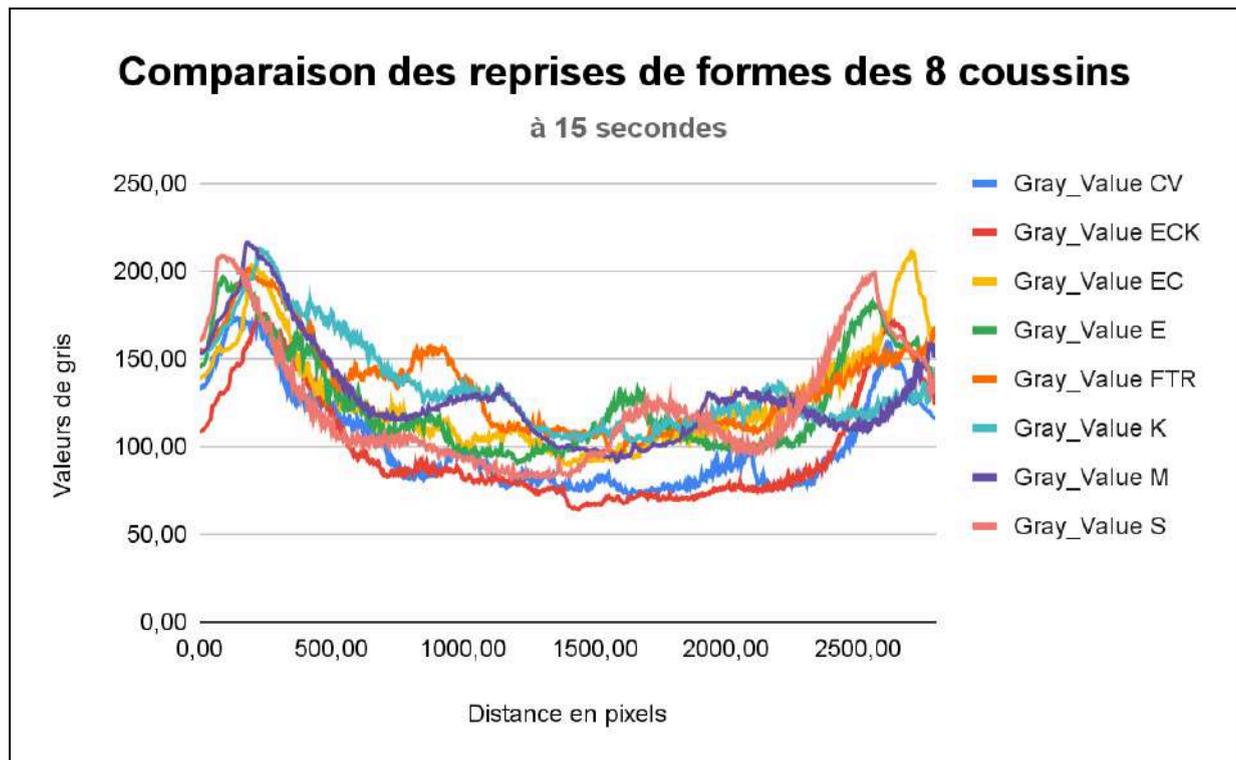


Figure 41 : Graphique des suivis de reprise de formes des 8 coussins à 15 secondes en comparaison avec la référence.

3.1.2 Fatigue

En suivant un protocole similaire à celui utilisé pour le test de relaxation des coussins, nous avons effectué une évaluation de la fatigue de ces derniers. Pour ce faire, la même procédure expérimentale a été répétée 15 fois pour chaque coussin. Les images et les données recueillies ont ensuite été traitées de manière identique à celles du test de relaxation. Les résultats obtenus ont été analysés et visualisés à l'aide de graphiques générés sur Excel, afin d'évaluer la fatigue des coussins au cours des différents cycles de test. Celles-ci sont illustrées par les figures suivantes (n° 42 à 49), représentant les huit graphiques de chaque coussin montrant l'évolution de cette fatigue sur quatre intervalles (séries 1, 5, 10, et 15). Ces graphiques comparent la déformation des coussins à une courbe de référence (en rouge), qui représente l'état initial du coussin avant l'application du poids. Pour comprendre la signification des courbes, il faut considérer que l'axe des ordonnées (Y) représente les valeurs de gris de l'image, corrélées à la densité du matériau, tandis que l'axe des abscisses (X) indique la distance en pixels, correspondant à une moyenne des pixels par ligne verticale de l'imag.

Ainsi, la courbe montre un profil avec des pics et des creux, qui indiquent les zones où le coussin est le plus enfoncé.

Pour le crin végétal, la déformation observée est irrégulière, avec des variations significatives par rapport à la courbe de référence, indiquant une usure progressive et non uniforme du matériau. Au fil des séries, les courbes deviennent plus lisses et basses, suggérant une perte de densité et de fermeté.

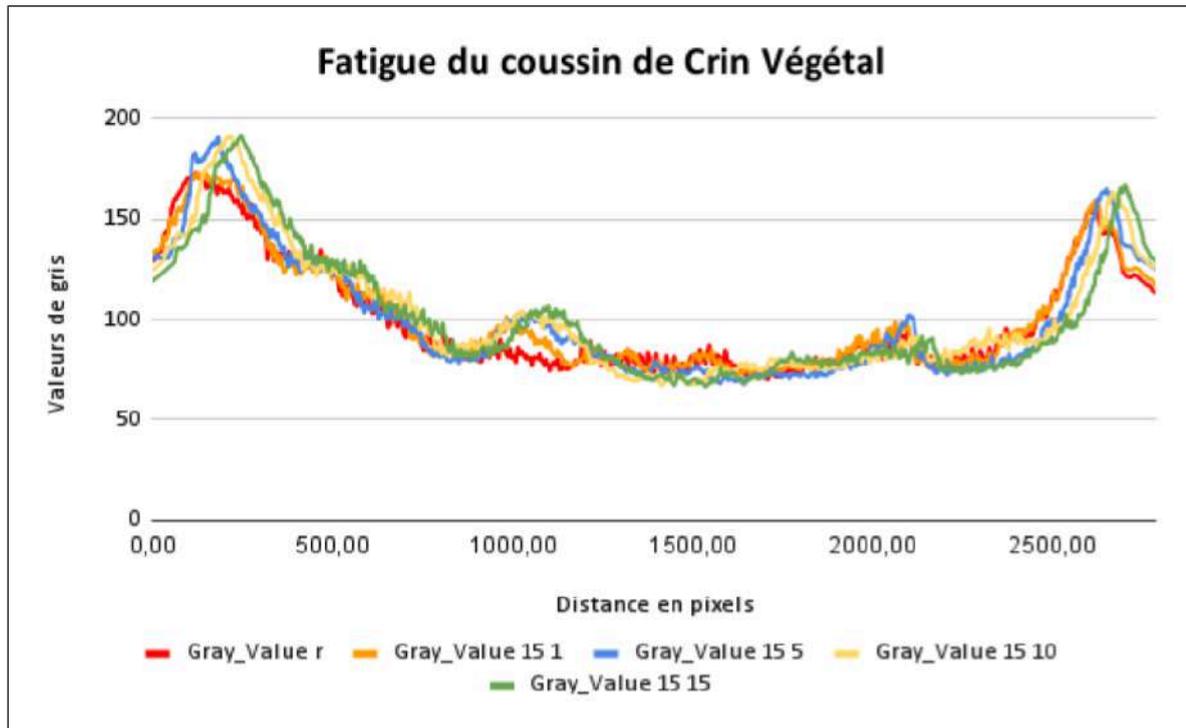


Figure 42 : Graphique du test de fatigue du coussin de crin végétal sur 4 intervalles (en seconde) en comparaison avec la courbe de référence (coussin avant le poids).

En ce qui concerne l'élanclin, les courbes sont relativement stables, bien qu'une légère diminution de la densité soit notée au fil des séries. Cela indique que ce matériau résiste bien, avec une courbe restant proche de la référence et une variation modérée, témoignant ainsi d'une bonne durabilité.

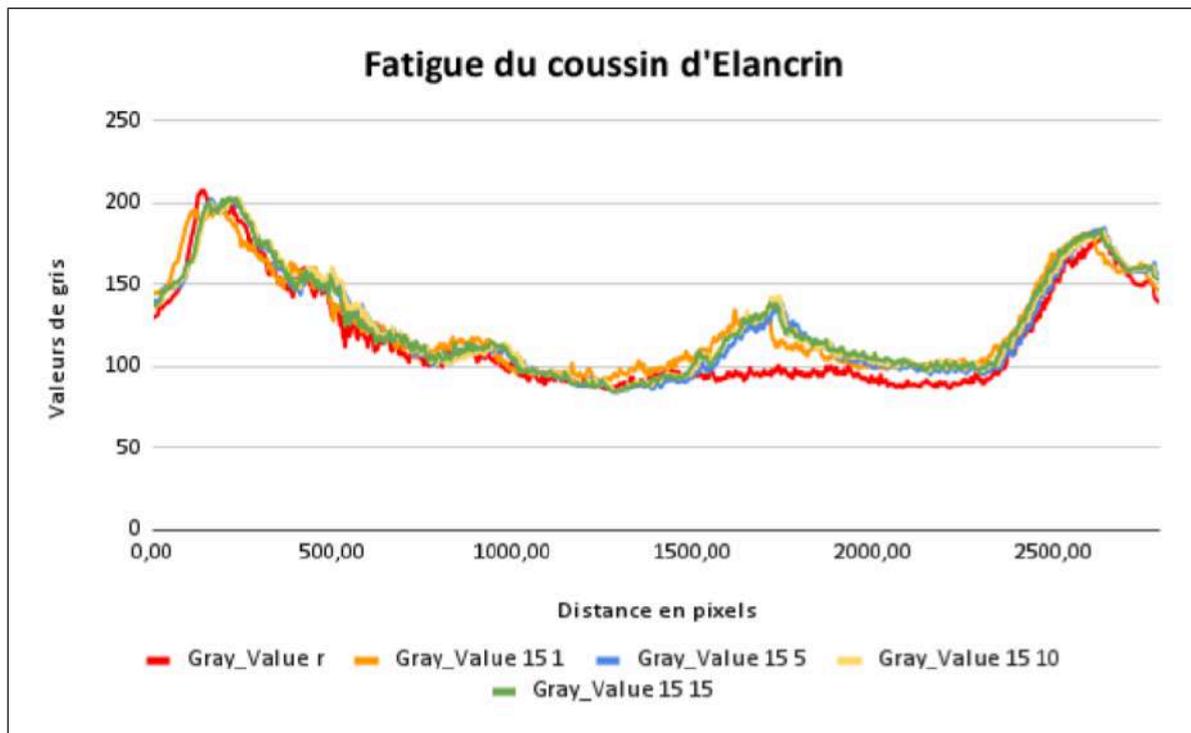


Figure 43 : Graphique du test de fatigue du coussin d'élanclin sur 4 intervalles (en seconde) en comparaison avec la courbe de référence (coussin avant le poids).

Pour l'élancriin carbone, les courbes sont très proches de la courbe de référence, démontrant une excellente résistance à la fatigue. Ce matériau semble être le plus stable parmi ceux testés, avec une usure minimale.

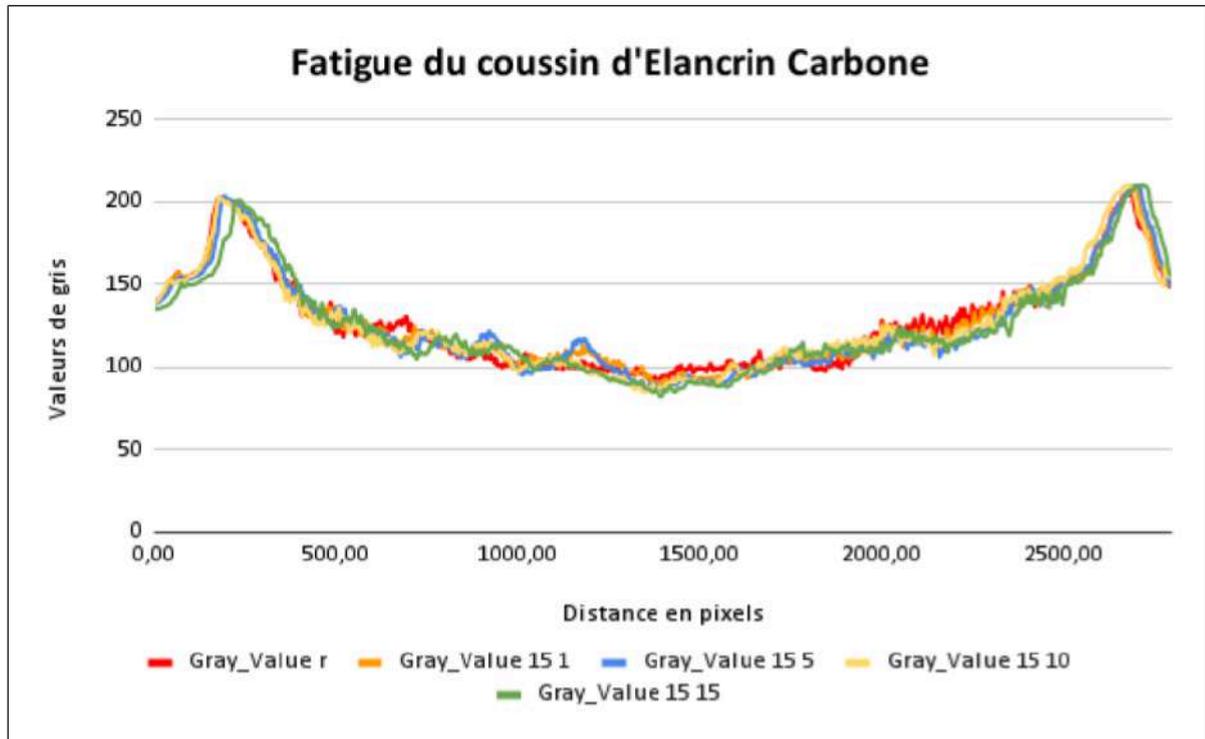


Figure 44 : Graphique du test de fatigue du coussin d'élancriin carbone sur 4 intervalles (en seconde) en comparaison avec la courbe de référence (coussin avant le poids).

L'élancriin carbone + kapok montre également des courbes proches de la référence, mais avec un peu plus de variation que l'élancriin carbone seul. Ce mélange pourrait donc légèrement réduire la durabilité par rapport à l'élancriin carbone pur.

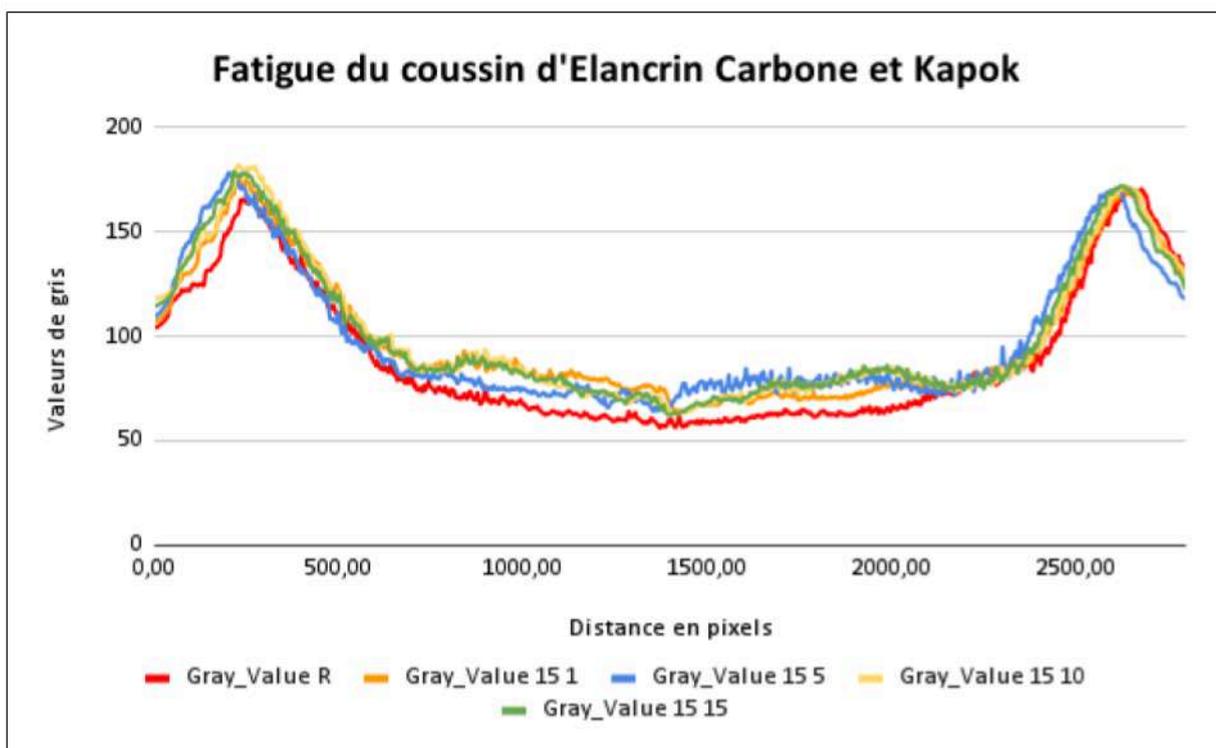


Figure 45 : Graphique du test de fatigue du coussin d'élancriin carbone et kapok sur 4 intervalles (en seconde) en comparaison avec la courbe de référence (coussin avant le poids).

La fibre textile recyclée présente des courbes qui s'éloignent davantage de la courbe de référence, surtout à partir de la série 10, ce qui indique une fatigue plus rapide. Ce matériau semble moins résistant aux charges répétées, avec une dégradation plus prononcée.

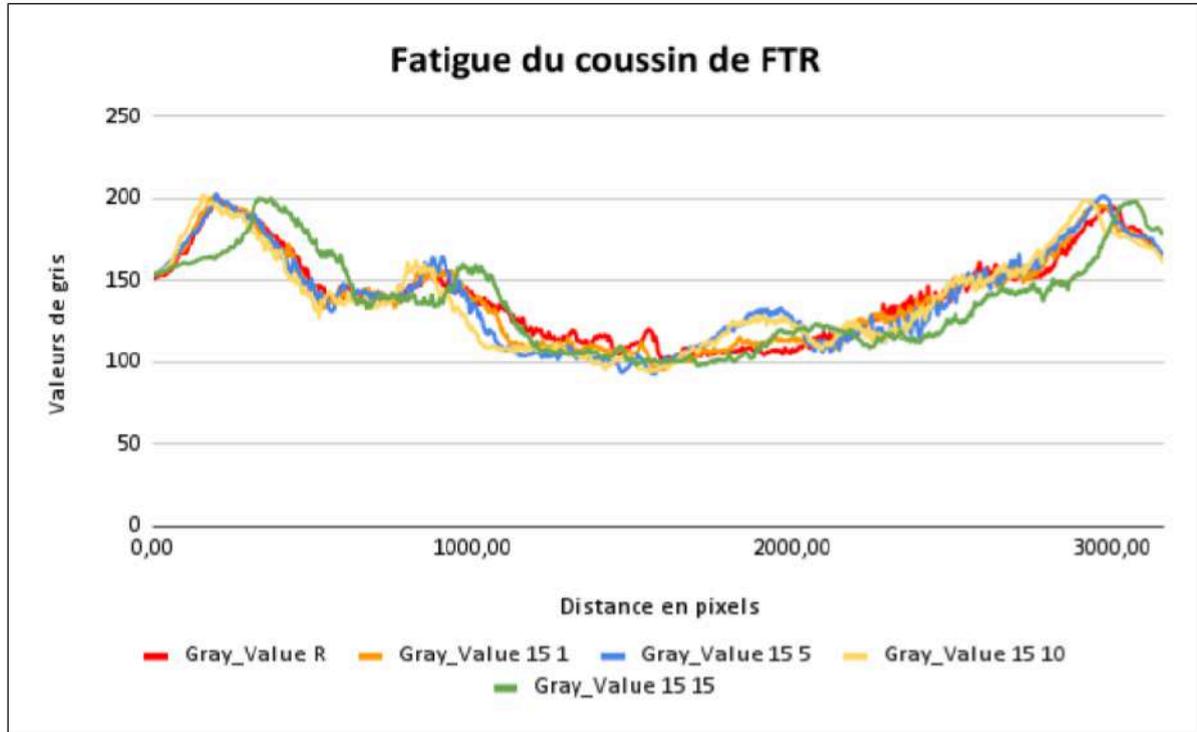


Figure 46 : Graphique du test de fatigue du coussin de fibre textile recyclée sur 4 intervalles (en seconde) en comparaison avec la courbe de référence (coussin avant le poids).

Pour le kapok, les courbes montrent une usure progressive avec une déviation lente de la courbe de référence. Bien qu'il conserve une certaine fermeté, les variations deviennent plus marquées au fil des séries, signalant une diminution de la durabilité.

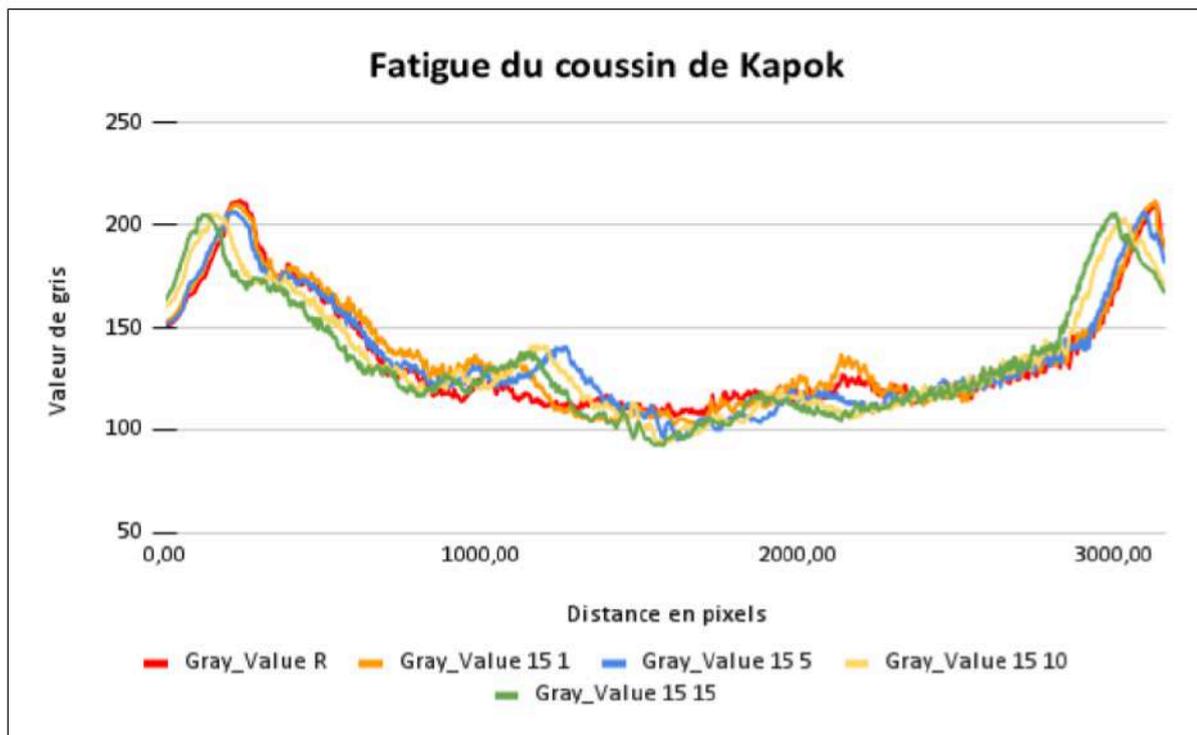


Figure 47 : Graphique du test de fatigue du coussin de kapok sur 4 intervalles (en seconde) en comparaison avec la courbe de référence (coussin avant le poids).

Le millet se distingue par une fatigue significative, avec des courbes s'affaissant nettement par rapport à la référence. Ce matériau semble perdre rapidement de sa densité et de sa fermeté, surtout après les premières séries de tests.

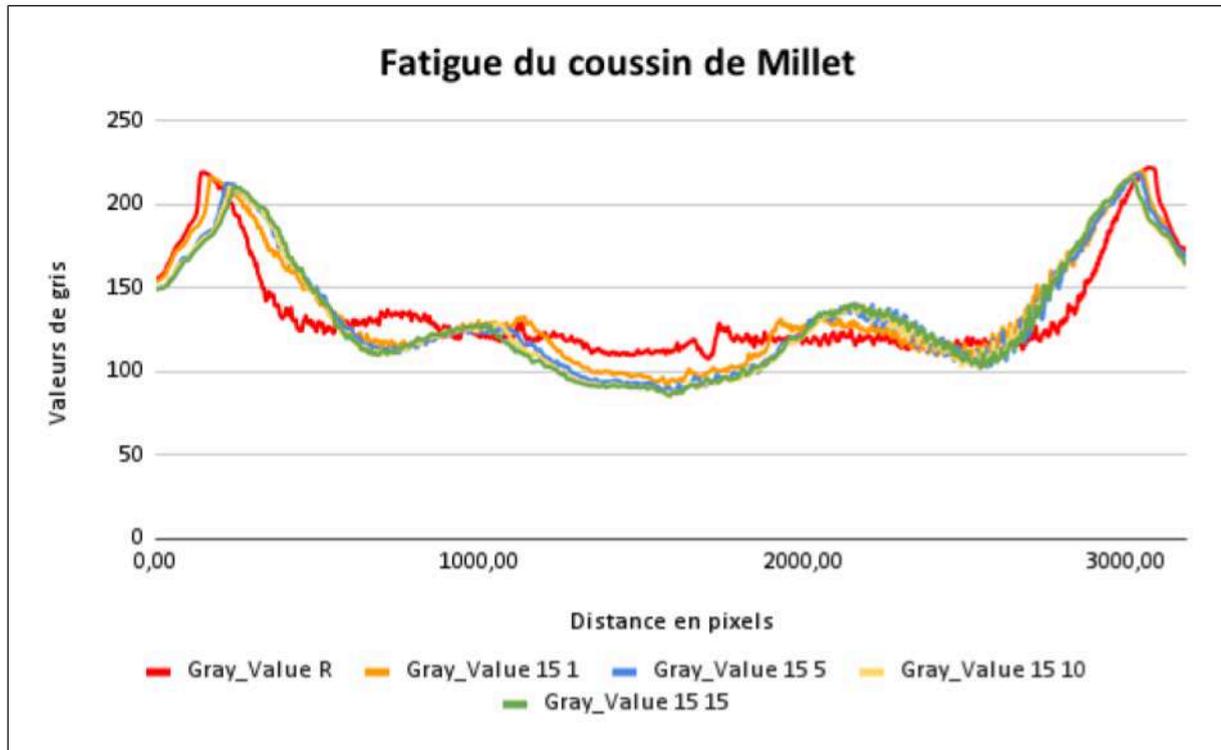


Figure 48 : Graphique du test de fatigue du coussin de millet sur 4 intervalles (en seconde) en comparaison avec la courbe de référence (coussin avant le poids).

Enfin, le sarrasin présente des courbes plus lisses et proches de la référence, même après 15 séries, ce qui montre une bonne résistance à la fatigue. Ce matériau offre une durabilité notable, bien que légèrement inférieure à celle de l'élanocrin carbone.

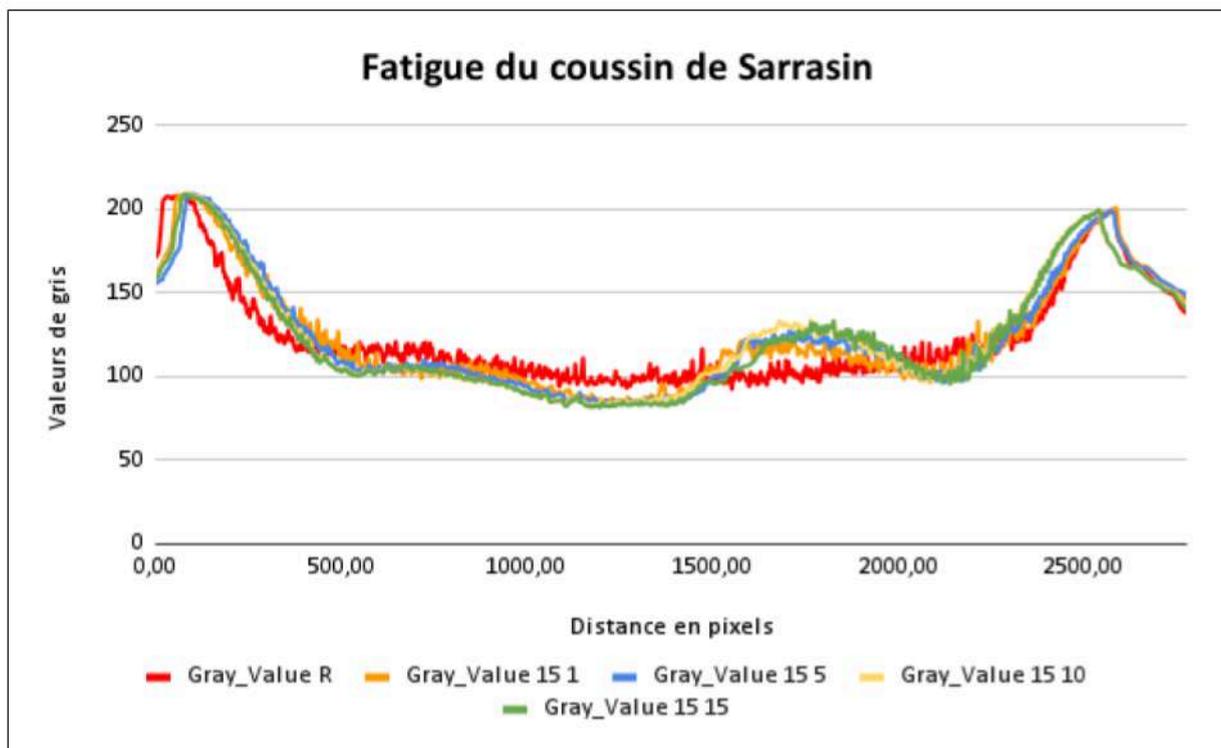


Figure 49 : Graphique du test de fatigue du coussin de sarrasin sur 4 intervalles (en seconde) en comparaison avec la courbe de référence (coussin avant le poids).

En conclusion, l'élancriin carbone se distingue comme le matériau le plus résistant à la fatigue, avec des courbes très proches de la référence tout au long des séries. Le sarrasin et l'élancriin montrent également une bonne résistance, bien que légèrement inférieure à celle de l'élancriin carbone. À l'inverse, la fibre textile recyclée et le millet apparaissent comme les matériaux les plus sensibles à la fatigue, avec des courbes montrant une dégradation rapide. Les matériaux composites tels que l'élancriin carbone + kapok offrent une durabilité intermédiaire, sans pour autant surpasser l'élancriin carbone pur. Le crin végétal et le kapok montrent une déformation irrégulière, ce qui pourrait les rendre moins fiables pour des applications nécessitant une durabilité élevée.

3.2 Vibration

En raison d'un manque de matériaux à la fin du stage, il n'a pas été possible de fabriquer des coussins identiques pour le millet et le sarrasin. Des coussins plus petits ont été réalisés, mais le protocole reste le même pour les tests. Afin de comparer nos résultats avec les méthodes d'emballage traditionnelles, de la mousse PU creusée a été installée dans les boîtes pour y déposer l'objet à tester. Les deux élancriins, le kapok et la fibre textile ont été testés dans une caisse en bois (voir résultats avec la figure 50). Tandis que les deux cosses de céréales ont été testées dans une boîte container (voir résultats avec la figure 51).

Pour bien comprendre les graphiques qui suivent, il est important de savoir comment ils ont été obtenus. Le graphique montre le rapport entre le signal mesuré sur l'objet et le signal mesuré sur le chariot de transport (signal mesurant les vibrations sans aucune atténuation), ce qui permet de mesurer l'efficacité de nos matériaux de calage en tant que filtre. Plus le signal est faible en dB (décibels), plus le filtre est efficace. Le filtre est considéré comme efficace lorsque le graphique se situe en dessous de 0 dB. En revanche, lorsque ce rapport est au dessus de 0 dB cela signifie que le niveau de vibration est supérieur sur l'objet que sur le chariot, effet bien sur rejeté) On observe la réponse du filtre en fonction de la fréquence, exprimée ici en Hertz (Hz).

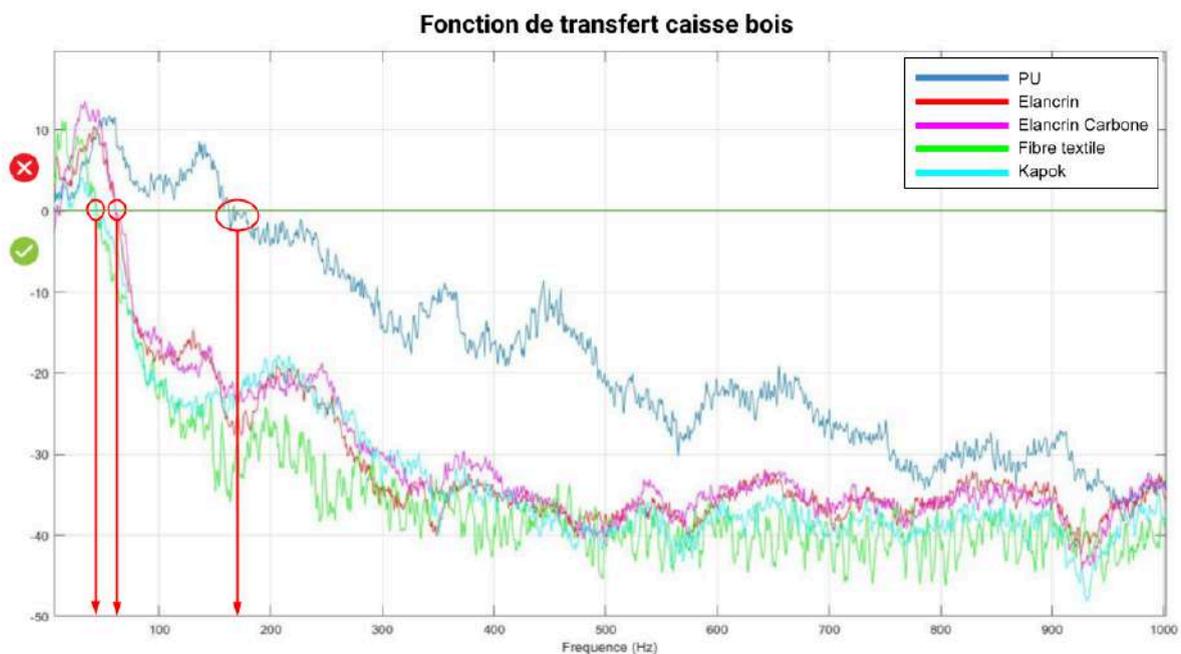


Figure 50 : Spectre de l'accélération pour l'élancriin, l'élancriin carbone, la fibre textile et le kapok installés dans une caisse en bois.

Pour la caisse en bois (caisse d'un transporteur couramment utilisée) et les matériaux qui ont été testés, les résultats sont plutôt concluants. Les coussins absorbent mieux les vibrations que la mousse PU. La mousse atténue les vibrations à partir de 180 Hz, alors que nos matériaux à partir de 50 et 80 Hz (Fig. 50). La fibre textile est plus efficace que les trois autres matériaux. Elle absorbe les vibrations à 50 Hz, puis montre une stabilisation autour de 200 Hz jusqu'à la fin, alors que les autres matériaux se stabilisent autour de 300 Hz.

Pour la petite boîte et les deux cosses de céréales, on observe que les coussins et la mousse PU ont le même pouvoir absorbant (Fig. 51). Ils sont tous les trois efficaces aux alentours de 50 Hz. Cependant, le coussin de sarrasin se distingue des deux autres matériaux. Si la courbe du millet et de la mousse PU se stabilise à environ 400 Hz, celle du sarrasin ne se stabilise qu'à partir de 650 Hz. À partir de 650 Hz, les trois courbes se rejoignent.

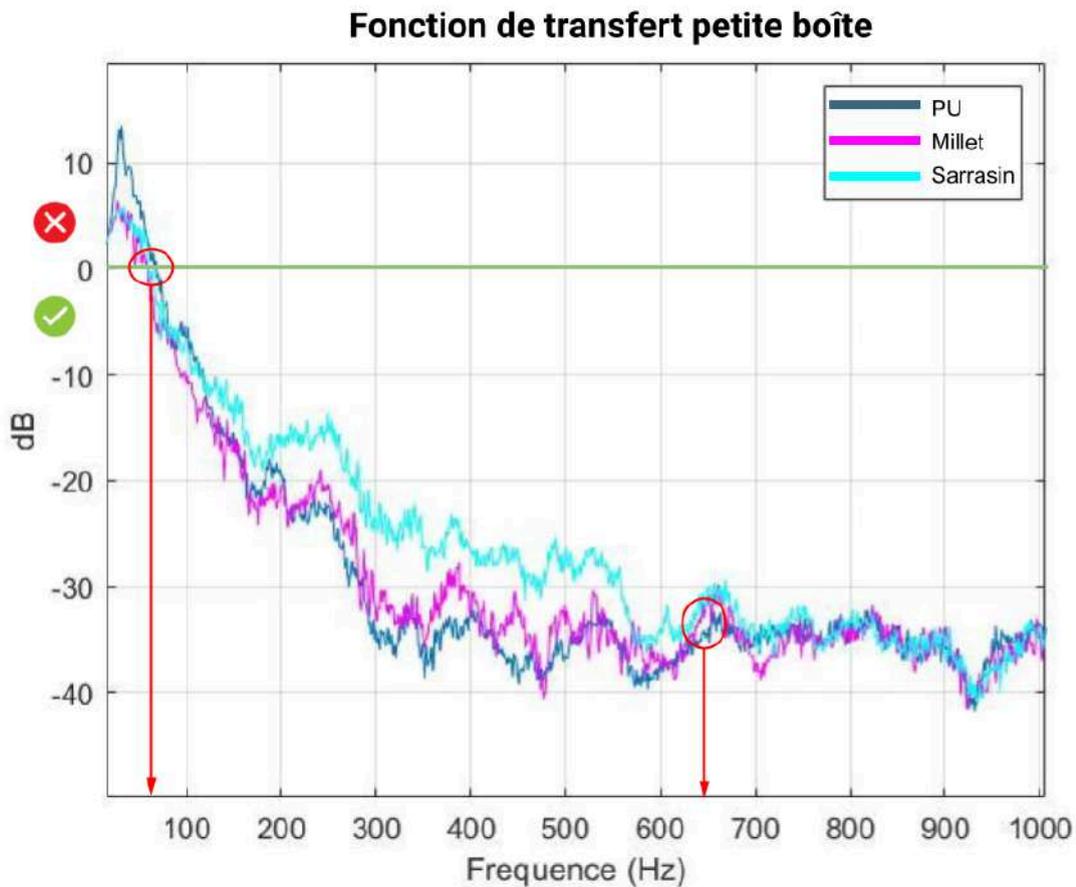


Figure 51 : Spectre de l'accélération pour le millet et le sarrasin installés dans une boîte container.

En conclusion, ces matériaux sont plus efficaces que la mousse PU utilisée comme écran de transport des objets. Ils sont en effet plus performants sur une plus large gamme de fréquences.

II. Discussion

1) Analyse critique des solutions proposées

Avec cette analyse quasi complète de ces nouveaux matériaux, il est possible de se poser la question suivante : peut-on se passer des matériaux actuels en conservation préventive et dans le transport ? La réponse n'est pas encore tout à fait claire, mais l'utilisation de matériaux biosourcés ouvre une voie prometteuse vers un possible changement et un travail plus éco-responsable. Nous avons constaté que ces matériaux présentent des avantages en matière de fin de vie. Étant des matériaux végétaux et naturels de plus non transformés ou très peu, ils sont principalement biodégradables, recyclables ou réutilisables. Même la plaque d'élanclin latex, malgré sa couche de latex naturel vulcanisé, reste biodégradable. Cependant, sa découpe pour former des écrans est complexe en raison de la combinaison du latex et des fibres de coco. Les autres matériaux montrent un potentiel de recyclabilité et de réutilisation, ce qui pourrait contribuer à réduire la production de carbone.

Sur le plan chimique, ils sont majoritairement neutres. Sur les huit matériaux testés, seulement deux ont présenté un pH non neutre : l'élanclin avec un pH basique, et le crin avec un pH acide. En test d'Oddy, sur les huit matériaux, seul le crin végétal et la plaque d'élanclin latex ont obtenu des résultats très peu satisfaisants. Les deux élanclins ainsi que la fibre textile ont eu les meilleurs résultats avec des coupons métalliques très peu voir pas oxydés ou corrodés, permettant une utilisation permanente sans causer de dégradation. Le millet, le sarrasin et le kapok ont quant à eux obtenu des résultats qui permettent d'envisager une utilisation temporaire.

Cependant, il est important de réfléchir à l'utilisation pratique de ces matériaux. Est ce que le fait qu'un matériau n'ait pas un pH neutre ou des résultats en test d'Oddy pas complètement satisfaisants doit écarter son utilisation ? La réponse est non. Par exemple, l'élanclin, avec son pH basique, possède des propriétés mécaniques intéressantes. Il pourrait donc être utilisé pour le transport et l'emballage d'objets peu sensibles au pH basique, notamment pour des trajets courts, par exemple entre des musées en Île-de-France ou en France. Tout comme le kapok, qui d'après les tests d'Oddy a vu son coupon de plomb légèrement corrodé montrant un dégagement d'acide acétique pouvant compromettre la conservation de certains métaux, coquillages, coraux, matériaux calcaires, certaines céramiques ainsi que le papier. Mais il peut être utilisé pour d'autres objets qui ne sont pas sensibles à ce polluant, et peut toujours être utilisé pour des courts transports. La disposition dans une enveloppe en Tyvek® pourrait lui permettre d'être utilisé comme coussin, tout en réduisant l'impact de ses polluants. L'utilisation de ces nouveaux matériaux doit donc être raisonnée, et les facteurs physico-chimiques sélectivement pris en compte. Comme cité précédemment, si leur capacité mécanique paraît utile et parfaite pour la situation en tenant compte de la durée, de l'usage et du contexte, il est préférable dans une volonté de production responsable de choisir un de ces matériaux biosourcés.

Néanmoins, leur utilisation reste limitée par des obstacles économiques, pratiques et de disponibilité. D'un point de vue économique, le coût de ces matériaux peut être plus élevé que celui des matériaux pétro-sourcés actuellement utilisés. Tandis que les grandes institutions peuvent assumer cette dépense, les petites structures ne disposent pas toujours des ressources nécessaires pour effectuer un changement de matériaux (Tab. 3).

Matériaux biosourcés	Fournisseur	Prix
<i>Élancrin</i>	Artapisserie	10,99€/ kg ou 92,90€ les 10kg
<i>Kapok</i>	Artapisserie	16,99€/ kg ou 169€ les 10kg
<i>Élancrin carbone</i>	Artapisserie	10,99€/ kg ou 91,90€ les 10kg
<i>Crin végétal</i>	Artapisserie	6,90€/ kg ou 64,90€ les 10kg
<i>Millet</i>	Les p'tites ailes	7,50€/ 500g soit 15€ les 1kg
<i>Sarrasin</i>	Les p'tites ailes	7€/ 500g soit 14€ les 1kg
<i>Fibre textile recyclée</i>	CENPAC	115€ le sac de 2m3
<i>Élancrin latex</i>	Artapisserie	- 23,99€ la plaque de 80kg/m3 (100x60x2cm) - 46,90€ 80kg/m3 (100x60x4cm)
Matériaux pétrosourcés	Fournisseur	Prix
<i>Mousse de polyéthylène Plastazote®</i>	Promuseum	- 135,60€ 100x66x2cm 45kg/m3 (lot de 3) soit 45,2€ la plaque - 256,80€ 100x66x4,5cm 45kg/m3 (lot de 3) soit 85,6€ la plaque
<i>Mousse de polyéthylène Ethafoam®</i>	Promuseum	230,40€ 60x90x5cm 37kg/m3 (lot de 5) soit 46,08€ la plaque
<i>Papier de soie (rouleau)</i>	Promuseum	592,80€ (130x50cm)
<i>Tyvek® (rouleau)</i>	Promuseum	254,40€ (1524mm x 25m)

Tableau 3 : Prix des matériaux et de leurs fournisseurs (Prix à la date du 24/08/2024).

D'un point de vue pratique, ces matériaux exigent un entreposage spécifique pour prévenir les infestations, car, en raison de leur nature végétale, ils sont particulièrement vulnérables aux insectes, sauf l'élancrin carbone qui est traité contre. Ils sont également sensibles à l'humidité, à l'exception du kapok qui est imputrescible et hydrophobe. En raison de leur nature organique, ils peuvent dégager des colorants ou moisir. Contrairement aux plaques de mousse, ces matériaux libèrent des résidus et des débris : le kapok produit des particules volatiles, les crins libèrent des débris, et les cosses de céréales sont petites et électrostatiques, ce qui les rend susceptibles de se disperser facilement. Ces matériaux nécessitent également la fabrication de housses de coussin, comme c'est le cas pour les billes en polystyrène. Cela ajoute du temps de travail et nécessite un savoir-faire spécifique pour l'emballage ou le conditionnement, notamment pour la confection de housses en Tyvek® ou d'autres textiles compatibles avec les objets patrimoniaux.

Du point de vue de la disponibilité, certains matériaux sont proposés par des entreprises ou sociétés en dehors du domaine muséal. Par exemple, les élancrins, le crin végétal et le kapok sont commandés sur des sites destinés aux professionnels des métiers de l'ameublement, tandis que les deux cosses de céréales proviennent d'une petite entreprise éco-responsable proposant des solutions zéro déchet pour le quotidien des ménages. Ces deux matériaux sont utilisés pour le rembourrage de coussins thérapeutiques. La fibre textile recyclée, quant à elle, est proposée par plusieurs entreprises d'emballage comme RAJA ou CENPAC. On constate ainsi que la disponibilité des matériaux n'est pas égale.

De plus, certains revendeurs n'ont pas fourni de fiches techniques complètes, incluant la description du protocole de fabrication ou de traitement de ces matériaux. Par exemple, pour l'élancrin, bien que sa mesure de pH soit censée être neutre, nos tests ont révélé un pH basique, probablement dû à la présence d'un agent alcalin. La source de cet agent reste inconnue, car rien n'était indiqué dans les fiches fournies, et le fournisseur n'a jamais répondu à mes questions. De même, aucune information n'a été donnée concernant le traitement à la cire de

carbone de la version carbonisée de l'élancrien. Seule la fibre textile était accompagnée d'une fiche technique complète, incluant les labels, les procédures de fabrication et la composition. Il est donc crucial que les fournisseurs soient transparents sur la nature de leurs matériaux pour qu'ils puissent être utilisés en toute confiance.

Avec les informations et les résultats obtenus concernant nos matériaux, la grille d'évaluation conçue par Anaïs Perrichon a été remplie afin d'attribuer une note en fonction de trois critères d'évaluation : conservatoires, pratiques et environnementaux. Selon cette grille, les matériaux obtenant une moyenne totale au-dessus de 60 % sont jugés positifs, car ils répondent bien aux exigences des trois critères. En revanche, les matériaux dont la moyenne se situe entre 40 % et 60 % se trouvent dans une plage de performance moyenne. Bien qu'ils présentent un équilibre acceptable, ils peuvent nécessiter des améliorations pour optimiser certains aspects. Enfin, les matériaux ayant une moyenne inférieure à 40 % sont considérés comme moins avantageux, présentant des faiblesses significatives dans les critères d'évaluation. Ces matériaux sont généralement moins recommandables pour les projets ou applications envisagés. Nos matériaux ont obtenu les notes suivantes indiquées dans le tableau n° 4 . La grille de notation plus détaillé pour chaque matériaux se trouve en Annexe.(Annexe 10)

	Kapok	Élancrien	Élancrien Latex	Élancrien Carbone	Crin Végétal	Millet	Sarrasin	FTR
Conservatoires	83,0%	57,0%	71,0%	78,0%	48,0%	61,0%	61,0%	82,0%
Pratiques	69,0%	69,0%	31,0%	69,0%	56,0%	56,0%	56,0%	63,0%
Environnementaux	55,0%	55,0%	32,0%	52,0%	58,0%	68,0%	68,0%	76,0%
Total	69,0%	60,3%	44,7%	66,3%	54,0%	61,7%	61,7%	73,7%

Tableau 4 : Résultats de la grille de notation conçue par A. Perrichon avec les huit matériaux testés.

2) Perspectives d'avenir

Même si les résultats de ces tests sont concluants, la question se pose. Comment les musées et les professionnels du transport peuvent-ils intégrer ces matériaux dans leurs pratiques de conservation? Il a été démontré ci-dessus qu'il existe de nombreux obstacles à l'intégration de ces nouveaux matériaux. Au cours de ce stage, j'ai pu rencontrer de nombreux professionnels des musées, régisseurs, conservateurs, restaurateurs mais aussi des transporteurs. Tous ont pris conscience de la nécessité de se détacher des matériaux pétro-sourcés pour des matériaux plus éco-responsables, mais aussi de revoir leurs pratiques en matière de conditionnement des œuvres. A travers ces échanges, j'ai pu constater une volonté de la part de ces professionnels d'être plus informés autour des recherches de nouvelles pratiques et d'alternatives. L'association les Augures Lab Scénographie a initié un projet collaboratif baptisé *l'Écothèque*³⁶. Ce projet est né du constat que les pratiques scénographiques et la formation dans ce domaine sont encore insuffisamment engagées sur le plan écologique. Malgré de nombreuses initiatives visant à promouvoir la circularité des matériaux, les concepteurs et les institutions peinent à accéder à des solutions adaptées à leurs besoins. Sur le site de *l'Écothèque* on retrouve une liste de matériaux alternatifs aux matériaux pétro-sourcés, une boîte à outils recensant des calculateurs d'empreintes carbonées, des conférences et des recherches, des chartes et des guides afin de mieux conseiller les professionnels. En plus du partage de connaissance, il est nécessaire de former les professionnels des musées sur l'utilisation de ces matériaux lors de stage de formation continue comme proposé à l'INP ou des ateliers collaboratifs autour de cette réflexion d'éco-conditionnement, exemple de la

³⁶ <https://www.ecotheque.fr/>

journée d'étude proposé par les Augures Lab. Il est nécessaire de connaître le ressenti des différents acteurs de la conservation-restauration quant à l'utilisation de ces matériaux. Certains matériaux seront sûrement privilégiés par rapport à d'autres en raison de leur praticité. Il serait également pertinent de mettre en situation ces matériaux sur une durée d'une année, en suivant leur performance sur différentes problématiques, types d'objets et utilisation.

À cette perspective, il est possible d'ajouter l'étude d'autres matériaux biosourcés, comme la paille et le foin, qui ont été utilisés au cours des deux derniers siècles pour le déménagement et le conditionnement (cf. Partie I). De plus, avec l'introduction de ces nouveaux matériaux, il est nécessaire de compléter nos recherches par des tests supplémentaires et d'approfondir nos analyses. Par exemple, il serait pertinent de mesurer la présence ou l'absence de COV dans nos matériaux. Le test de Beilstein, pour la détection du chlore, ou l'utilisation de bandes AD-strip®³⁷ pour la détection de l'acide acétique, peuvent être réalisés pour compléter le test d'Oddy. Par manque de temps, nous n'avons pas pu tester la capacité d'abrasion des matériaux et déterminer s'ils peuvent être utilisés sans enveloppes protectrices. En effet, des matériaux tels que l'élanocrin pourraient être utilisés comme fond de caisse et matériau de calage, à l'instar de la frisure de bois utilisée pour le conditionnement et le transport (Stolow, 1987).

Il serait également intéressant d'approfondir l'étude du vieillissement de nos matériaux. Pour cette étude, nous avons suivi des protocoles déjà utilisés pour d'autres matériaux biosourcés, avec des caractéristiques de vieillissement spécifiques. Cependant, n'ayant pas constaté de changements significatifs, il serait envisageable de varier les paramètres de vieillissement en augmentant la température, en modifiant l'humidité relative, ou en utilisant une enceinte de vieillissement avec un éclairage UV à Xenon. De plus, il serait pertinent de faire vieillir nos matériaux en conditionnement dans du Tyvek® ou dans un autre textile biosourcé compatible avec la conservation des biens culturels, afin d'observer leur état après vieillissement. Cela permettrait également de tester mécaniquement les matériaux pour vérifier s'ils conservent leurs propriétés après vieillissement. Les protocoles de tests mécaniques pourraient être repris ou améliorés, notamment par l'utilisation de machines de fluage ou de compression, qui sont standardisées et dont les tests sont normés.

Enfin, pour compléter ces tests physico-chimiques et mécaniques, il serait pertinent d'effectuer une analyse de cycle de vie (ACV) pour chacun des matériaux. Ce test normé (ISO 14040 et 14044) permet de réaliser une évaluation de l'impact environnemental d'un système (produit, service, entreprise, ou procédé) sur l'ensemble de son cycle de vie. Cela inclut l'extraction des matières premières, la fabrication, l'usage, l'entretien, le transport et le traitement en fin de vie.

³⁷ Languettes papiers enduites de colorants qui détectent la présence d'acide acétique. Produits utilisés très souvent dans le contrôle des films en acétate de cellulose pour identifier les premiers signes de dégradation, souvent appelée "syndrome du vinaigre".

Conclusion

Au travers de ce mémoire, il a été possible de constater la nécessité pour les institutions muséales et les professionnels de la conservation-restauration de repenser leurs pratiques dans le domaine du conditionnement. Ce changement passe notamment par l'adoption de matériaux biosourcés en remplacement des matériaux d'emballage traditionnels, majoritairement dérivés de ressources pétrolières. L'étude menée a permis d'explorer en profondeur les potentialités de ces nouveaux matériaux dans le cadre de la conservation préventive et du transport des œuvres d'art.

D'un point de vue physico-chimique et mécanique, certains matériaux biosourcés ont montré des performances prometteuses pour des applications spécifiques, bien que certains d'entre eux présentent des limitations, telles qu'un pH non neutre ou des résultats imparfaits aux tests d'Oddy. Ainsi, leur utilisation doit être soigneusement réfléchie, en tenant compte des exigences particulières de chaque projet et des conditions de transport. De plus, les contraintes économiques, comme leur coût plus élevé, et les défis pratiques, tels que leur stockage et leur manipulation, restent des obstacles importants, particulièrement pour les petites institutions qui peuvent avoir des ressources limitées.

Néanmoins, ces matériaux offrent des avantages environnementaux significatifs, notamment en termes de biodégradabilité, de recyclabilité, et de réduction de l'empreinte carbone. Toutefois, leur adoption à grande échelle demeure complexe, en raison de défis économiques, pratiques et de disponibilité. Pour répondre à ces défis, il est essentiel de poursuivre les recherches, d'évaluer de manière plus approfondie leurs performances à travers des tests supplémentaires, et de réaliser des analyses de cycle de vie pour mesurer leur impact environnemental sur l'ensemble de leur durée de vie.

La question de remplacer totalement les matériaux pétro-sourcés par des alternatives biosourcées reste ouverte. Bien que des progrès significatifs aient été réalisés, les obstacles subsistent. Malgré cela, la tendance est claire : il existe une volonté croissante au sein des institutions et des professionnels du secteur d'intégrer des pratiques plus respectueuses de l'environnement. Des initiatives telles que l'*Écothèque* illustrent cet engagement vers une approche plus écologique dans la conservation et le transport des œuvres d'art.

En conclusion, bien que ces nouveaux matériaux ne soient pas encore en mesure de remplacer complètement les options pétro-sourcées, ils représentent une alternative prometteuse pour un avenir plus durable. L'intégration réussie de ces matériaux nécessitera non seulement des ajustements techniques, mais aussi une volonté collective de transformer les pratiques actuelles. Cela passe par une sensibilisation accrue, une collaboration interdisciplinaire, et un effort continu pour surmonter les obstacles existants. Ainsi, ces matériaux pourront non seulement répondre aux exigences de la conservation, mais aussi contribuer à une gestion plus durable et responsable des ressources dans le secteur culturel.

BIBLIOGRAPHIE

ADEME (2011), Evaluation de la disponibilité et de l'accessibilité de fibres végétales à usages matériaux en France.

Amice S. *Des caisses, des œuvres et des hommes. Une histoire logistique de l'art durant la Grande Guerre*. Perspective- la revue de l'INHA: actualités de la recherche en histoire de l'art, 2022, 1, pp.121-132. 10.4000/perspective.26990. hal-03700992

Aubert, S. (2011). Le développement durable dans la construction d'un Centre de Conservation et d'Étude. *La Lettre de l'OCIM*, 133, 18–23. <https://doi.org/10.4000/ocim.655>

Bamberger, J. A., Howe, E. G., & Wheeler, G. (1999). A variant Oddy test procedure for evaluating materials used in storage and display cases. *Studies in Conservation*, 44(2), 86–90. <https://doi.org/10.1179/sic.1999.44.2.86>

Beiner, G. G., Lavi, M., Seri, H., Rossin, A., Lev, O., Gun, J., & Rabinovich, R. (2015). Oddy Tests: Adding the Analytical Dimension. *Collection Forum*, 29(1–2), 22–36. <https://doi.org/10.14351/0831-4985-29.1.22>

Benesteau, G. (2015). Étude et identification des matériaux de rembourrage des spécimens naturalisés anciens: Le cas des collections du Musée d'histoire naturelle de Neuchâtel.

Bertinet, A. (2015). Évacuer le musée, entre sauvegarde du patrimoine et histoire du goût, 1870-1940. In J.-P.

Bouaziz, M. (2020). Valorisation des Fibres de Palmier pour des Applications Textiles et Para-textiles. Thèse de doctorat, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir.

Bouvet, S et Rottier, V (2024). « Bibliothèque nationale de France : concilier stratégie éco responsable et conservation patrimoniale », *Culture et Recherches*, 146, pp.54-56.

Bourgeois, M. (2011). Fibres agrosourcées. Bois et papiers. <https://doi.org/10.51257/a-v1-n2520>

Buscarino, I. C et al. (2021) *Oddy Test Protocol at the Metropolitan Museum of Art (The Met)*

Cabezas, H. (2009). Le transport des pastels de Maurice-Quentin de La Tour conservé à Saint Quentin: Une épopée de 250 ans. *Support Tracé* 9, 2–16.

Célerier, J. (1934). Le crin végétal en Afrique du Nord. In: *Annales de Géographie*, t. 43, n°242, 1934, pp. 223-224 ; https://www.persee.fr/doc/geo_0003-4010_1934_num_43_242_10538

Chan, E. W. C., Yeong, S. W., Wong, C. W., Soo, O. Y. M., Phua, A. C. Y., & Ng, Y. K. (2022). *Ceiba pentandra* (L.) Gaertn.: An overview of its botany, uses, reproductive biology,

pharmacological properties, and industrial potentials. *Journal of Applied Biology & Biotechnology*. <https://doi.org/10.7324/JABB.2023.110101>

Chanas, C et al.(2024). « Les musées de France, acteurs de la transition écologique » *Culture et Recherches*, 146, pp.57-60.

Crutel, S., & Pretet, E. (2018). Recyclage dans le secteur textile. *Textiles industriels*. <https://doi.org/10.51257/a-v1-n4603>

Dadillon, B., Marandas, L., & Thomas, L. (2021). Rapport de Projet d'étude expérimentale. *Comparaison de différentes méthodes de prises de pH sur des textile*, INP

Delmas, S., (2021)Pour des transports d'œuvres plus respectueux de l'environnement, L'art de muséer, consulté le 01/08/2024, <https://formation-exposition-musee.fr/l-art-de-muser/2210-pour-des-transports-d-oeuvres-plus-r-espectueux-de-l-environnement>

Díaz, I., Alvarez-Martin, A., Grau-Bové, J., Norrehed, S., Salvadori, B., Kraševc, I., Duran-Romero, D., & Cano, E. (2024). Review and interlaboratory comparison of the Oddy test methodology. *Heritage Science*, 12(1), 95. <https://doi.org/10.1186/s40494-024-01174-9>

Díaz, I., & Cano, E. (2022). Quantitative Oddy test by the incorporation of the methodology of the ISO 11844 standard: A proof of concept. *Journal of Cultural Heritage*, 57, 97–106. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2022.08.001>

Foucauld, R. de. (1990). *Il était une fois le déménagement*. Saurat.

Goffard, C. (2009). Eviter l'erreur: Le choix de matériaux stables pour le stockage et l'exposition des collections muséales. *CeROArt. Conservation, exposition, Restauration d'Objets d'Art*, 3, Article 3. <https://doi.org/10.4000/ceroart.1150>

Green, L. R., & Thickett, D. (1995). Testing Materials for Use in the Storage and Display of Antiquities: A Revised Methodology. *Studies in Conservation*, 40(3), 145. <https://doi.org/10.2307/1506472>

Jacot, T (2016) *Le test de vieillissement Accéléré – Test d'Oddy (notice)*. Haute École ARC Neuchâtel.

Jeffares,N. (2024) *Maurice-Quentin de La Tour : la vie et l'œuvre* <http://www.pastellists.com/Articles/LaTourFr.pdf>

Kohler M., *Etude de matériaux biosourcés pour une utilisation en conservation préventive*, Mémoire d'étude de première année de second cycle en muséologie sous la direction de Mme Florence Bertin, 2023.

Marcon, P., (2020), Emballage et transport efficaces des objets d'art, Bulletin Technique 34, Institut Canadien de Conservation, 2020

Ossut, C. (2020). Le siège et sa garniture (Nouvelle éd). Éditions Vial.

Ossut, C. (2021). Tapisserie d'ameublement: Sièges, literie, rideaux et tentures (Réédition). Éditions Vial.

Ougier, Q. *La conservation préventive dans le cadre du développement durable : Un état des lieux des pratiques et initiatives dans les musées français*. Mémoire d'étude de première année de second cycle en muséologie sous la direction de Mme Florence Bertin, 2020.

Palmade-Le Dantec, N. (2023). « Changer matériaux et pratiques pour le conditionnement des œuvres» *Patrimoine*, 18, Les éditions de l'Épure.

Perrichon A., Vers l'intégration de matériaux durables en conservation : évaluations et recherches de substituts, Mémoire de stage de deuxième année de second cycle en régie des œuvres et conservation préventive sous la direction de Mme Hélène Vassal et Mme Florence Bertin, 2021.

Piribauer, B., & Bartl, A. (2019). Textile recycling processes, state of the art and current developments: A mini review. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 37(2), 112–119. <https://doi.org/10.1177/0734242X18819277>

Rémillard, F., (2011). *L'emballage et le transport des objets*, Conservation préventive dans les musées. Manuel d'accompagnement, pages 47 à 54.
<https://www.ccq.gouv.qc.ca/index-id%3D199.html#c587>

Regert, M., & Guerra, M. F. (Eds.). (2016). Stratégies analytiques. In *Physico-chimie des matériaux archéologiques et culturels* (pp. 103–142). Editions des archives contemporaines.
<https://doi.org/10.17184/eac.4063>

Royaux, A. (2017.). Compréhension des mécanismes de perte de plastifiant et d'exsudation des PVC plastifiés. Thèse de doctorat, Université de Cergy Pontoise.

Sangalang, R. H. (2021). Kapok Fiber- Structure, Characteristics and Applications: A Review. *Oriental Journal Of Chemistry*, 37(3), 513–523. <https://doi.org/10.13005/ojc/370301>

Schilperoord, P. (2017). Plantes cultivées en Suisse—Le sarrasin. 28 p.
<https://doi.org/10.22014/97839524176-E8>

Schlichting, C. (with Canadian Conservation Institute). (1994). Working with polyethylene foam and fluted plastic sheet. Canadian Conservation Institute.

Segelstein, A. (2020). Les matériaux de la conservation préventive. *La Lettre de l'OCIM*, 192, 22–27. <https://doi.org/10.4000/ocim.4168>

Stolow, N. (1987b). Traditional and newer packing techniques. In *Conservation and Exhibitions (Packnig, transport, storage and environmental considerations)* (Butterworths, pp. 70–101).

Tétreault, J., (2017) *Produits utilisés en conservation préventive*, Bulletin technique 32, Institut Canadien de Conservation.

Thomson, G. (1986). *The museum environment* (2nd ed). Butterworth-Heinemann.

Thickett, D., Lee, L. R., & Lee, L. R. (with British Museum). (2004). *Selection of materials for the storage or display of museum objects* (New and completely rev. ed). British Museum.

Tse, S. (2007). Lignes directrices pour la mesure du pH en conservation. Institut canadien de conservation.

Volfovsky, C. 2001: Volfovsky, C. dir. *La conservation des métaux*. Paris , CNRS, Editions, 2001, p.282-285.

ANNEXE

Annexe 1: Détails des coussins pour les tests mécaniques.

Matériaux	Petit (Relaxation et fatigue)			Grand (Vibration)		
	Poids Tyvek®	Poids Matériaux	Poids total	Poids Tyvek®	Poids Matériaux	Poids total
Élancrin	3g	26g	29g	18g	281g	299g
Élancrin carbone	4g	25g	29g	18g	211g	229g
Élancrin carbone + kapok	4g	16g(E) + 8g(K)	30g			
Crin végétal	4g	29g	33g			
Kapok	4,21g	17g	21,21g	18g	182g	200g
Millet	4g	89g	93g	4g	89g	93g
Sarrasin	4g	144g	148g	4g	144g	148g
Fibre textile recyclée	4g	26g	30g	18g	250g	268g

Annexe 2 : Résultats MEB-EDS des matériaux.

Kapok (% atomique)																
Statistique	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Ni	Cu	Sr	Zr
Moyenne	56,45	0,85	4,55	8,2	3,75	0,3	1,41	6,73	2,89	1,89	0,51	2,87	1,01	5,19	1,16	2,24
Écart type	1,49	0,4	0,58	4,21	1,96	0,43	1,12	5,54	2,01	1,23	0,73	1,14	1,43	3,24	0,75	1,33

Élancrin latex (%atomique)								
Statistique	O	Na	Al	Si	P	S	K	Ca
Moyenne	57,79	1,09	1	9,2	0,09	4,09	3,79	22,94
Écart type	6,15	1,23	1,11	13,16	0,18	4,26	6,09	19,98

Sarrasin (%atomique) Intérieur											
Statistique	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Cu	Zn
Moyenne	53,87	3,01	1,66	9,4	10,05	0,36	0,54	14,29	3,19	1,35	2,28
Écart type	3,93	4,71	1,89	1,84	3,37	0,7	1,35	8,98	2,88	1,66	3,92

Sarrasin (%atomique) Extérieur											
Statistique	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Cu	Zn
Moyenne	52,14	0,63	8,31	5,64	7,12	1,98	0,72	19,53	3,15	0,17	0,62
Écart type	6,82	1,23	5,19	3,58	9,5	1,34	0,81	10,51	1,68	0,26	0,8

Millet (%atomique) Intérieur											
Statistique	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Cu	Zn
Moyenne	53,87	3,01	1,66	9,4	10,05	0,36	0,54	14,29	3,19	1,35	2,28
Écart type	3,93	4,71	1,89	1,84	3,37	0,7	1,35	8,98	2,88	1,66	3,92

Millet (%atomique) Extérieur					
Statistique	O	Si	P	S	K
Moyenne	66,63	32,89	0,23	0,06	0,2
Écart type	0,07	0,09	0,36	0,05	0,07

Élancrin (%atomique)									
Statistique	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca
Moyenne	50,72	20,27	3,76	1,94	10,69	0,47	0,45	3,39	8,33
Écart type	6,05	8,24	2	0,82	8,45	0,8	0,61	2,09	4,15

Crin Végétal (%atomique)							
Statistique	O	Mg	Al	Si	S	K	Ca
Moyenne	61,83	1,64	3,62	23,93	0,32	5,44	3,21
Écart type	4,72	1,81	3,72	9,13	0,56	6,43	4,09

Élancrin Carbone (%atomique)											
Statistique	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Fe	Zn
Moyenne	60,43	6,64	0,93	1,33	20,72	0,19	1,74	2,96	3,42	1,03	0,6
Écart type	5	5	0,7	1	9,93	0,24	1,45	2,4	5,3	0,79	0,72

FTR (%atomique) Laine				
Statistique	O	Na	S	Ca
Moyenne	70,61	2,79	21,31	5,29
Écart type	5,4	1,44	5,56	11,66

Annexe 3 : Résultats MEB-EDS des coupons métalliques du test d'oddy.

Argent (% oxydes)							
	Al	Si	P	S	K	Ag	Pb
Témoin	0,04	0,36	0	0	0,44	99,13	0,03
écart-type	0,06	0,01	0	0	0,18	0,21	0,04
Crin végétal	2,9	0,5	0,01	0,14	0,25	93,12	3,07
écart-type	7,01	0,19	0,02	0,12	0,1	16,21	9,35
Elancrin	1,12	0,63	0,02	0,24	0,28	97,26	0,45
écart-type	1,23	0,49	0,04	0,26	0,17	1,38	0,64
Elancrin Latex	0,87	5,31	0,03	1,83	0,27	91,64	0,05
écart-type	0,42	10,79	0,03	1,35	0,11	12,06	0,12
Elancrin Carbone	3,86	12,95	0,01	0,16	0,21	82,65	0,16
écart-type	3,69	29,15	0,02	0,19	0,1	31,16	0,1
Kapok	0,25	0,53	0,02	0,06	0,37	75,12	23,65
écart-type	0,22	0,31	0,05	0,1	0,54	29,33	29,23

	Al	Si	P	S	K	Ag	Pb
Témoin 2	0,07	0,6	0,04	6,58	0,25	92,21	0,26
écart-type	0,05	0,17	0,07	10,67	0,17	10,96	0,3
FTR	0,53	0,71	0,03	0,13	0,21	76,97	21,43
écart-type	0,52	0,46	0,08	0,14	0,12	19,55	19,71
Millet	3,31	0,52	0	0,06	0,21	73,03	22,86
écart-type	4,61	0,22	0	0,09	0,17	29,68	26,34
Sarrasin	5,4	0,43	0,01	0,07	0,19	93,67	0,23
écart-type	3,56	0,06	0,02	0,08	0,05	3,74	0,29

Cuivre (% d'oxydes)									
Statistique	Na	Al	Si	P	S	K	Cu	Zn	Pb
Témoin	0,66	0,06	0,24	0	0	0,06	98,98	0	0
écart-type	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Crin végétal	0,38	14,47	0,8	0,01	0,5	0,18	79,05	4,46	0,15
écart-type	0,9	14,59	0,66	0,03	0,69	0,3	16,43	1,88	0,25
Elancrin	0	0,52	2,22	0,04	0,29	0,27	92,85	1,77	2,04
écart-type	0	0,37	3,83	0,05	0,38	0,46	7,67	1,16	2,96
Elancrin Latex	0,32	0,64	0,64	0,02	0,78	0,06	77,38	0,94	19,22
écart-type	0,38	0,48	0,24	0,03	1,13	0,06	22,12	1,64	22,86
Elancrin Carbone	0,15	0,36	0,71	0,03	1,32	0,01	95,58	1,39	0,44
écart-type	0,3	0,53	0,37	0,04	1,96	0,02	2,9	1,44	0,48
Kapok	0,54	0,1	3,14	0,03	0,37	0,19	93,2	1,4	1,02
écart-type	0,57	0,09	8,7	0,05	0,39	0,29	8,47	1,54	1,41

Statistique	Na	Al	Si	P	S	K	Cu	Zn	Pb
Témoin	0,7	0,14	0,94	0	0,44	0,03	96,22	1,15	0,37
écart-type	0,82	0,1	0,56	0,01	0,43	0,04	1,85	1,82	0,38
FTR	0,64	15,04	1,38	0,04	1,99	1,37	64,53	2,03	12,98
écart-type	0,64	17,57	1,86	0,05	2,12	3,48	30,76	2,15	22,81
Millet	5,76	4,14	0,41	0,04	3,17	0,26	78,59	6,82	0,82
écart-type	11,07	3,95	0,16	0,06	6,26	0,37	18,55	4,31	0,81
Sarrasin	0,2	2,05	0,34	0,03	0,32	0,19	94,68	2,13	0,06
écart-type	0,32	1,86	0,05	0,04	0,69	0,47	3,85	2,15	0,09

Plomb (% d'oxydes)					
Statistique	Si	P	S	K	Pb
Témoin	0,39	0	0	0,18	99,43
écart-type	0	0	0	0	0
Crin végétal	10,88	0,01	0	0,13	88,98
écart-type	29,34	0,02	0	0,28	29,29
Elancrin	30,42	0,06	0,56	0,98	67,98
écart-type	40,74	0,16	1,59	2,57	39,72
Elancrin Latex	0,3	0,02	0	10,84	88,85
écart-type	0,07	0,03	0	22,09	22,09
Elancrin Carbone	0,77	0,02	0	0,21	99
écart-type	0,39	0,06	0	0,12	0,47
Kapok	10,53	0	0	0,09	89,38
écart-type	15,38	0	0	0,07	15,4

Statistique	Si	P	S	K	Pb
Témoin	0,61	0,03	0	0,44	98,92
écart-type	0,13	0,06	0	0,39	0,48
FTR	0,55	0,01	0	0,05	99,39
écart-type	0,14	0,02	0	0,07	0,19
Millet	0,5	0	0	0,07	99,43
écart-type	0,15	0	0	0,09	0,19
Sarrasin	14,95	0	0	0,06	84,99
écart-type	32,67	0	0	0,06	32,64

Annexe 4: Tableau détaillé des résultats test d'oddy.

Nom de l'échantillon: Elancrin				
Date du test: 12/03/2024				
Date de retrait: 09/04/2024				
Coupons	Oxydation	Corrosion	Total	Classe
Argent	0	0	0	I
Cuivre	2	0	2	I
Plomb	1	0	1	I
Utilisation permanente. Pas d'odeur à l'ouverture du flacon, matériau avec une légère perte de couleur				

Nom de l'échantillon: Elancrin Latex				
Date du test: 12/03/2024				
Date de retrait: 09/04/2024				
Coupons	Oxydation	Corrosion	Total	Classe
Argent	1	0	1	I
Cuivre	3	0	3	II
Plomb	1	4	5	III
Utilisation inadaptée. Coupon de plomb très fortement dégradé et corrodé. Très forte odeur à l'ouverture.				

Nom de l'échantillon: Elancrin + Carbone				
Date du test: 12/03/2024				
Date de retrait: 09/04/2024				
Coupons	Oxydation	Corrosion	Total	Classe
Argent	0	0	0	I
Cuivre	2	0	2	I
Plomb	0	2	2	I
Utilisation permanente/temporaire. Pas d'odeur à l'ouverture, matériau avec une légère perte de couleur.				

Nom de l'échantillon: Crin végétal				
Date du test: 12/03/2024				
Date de retrait: 09/04/2024				
Coupons	Oxydation	Corrosion	Total	Classe
Argent	1	0	1	I
Cuivre	1	0	1	I
Plomb	2	3	5	III
Utilisation inadaptée. Forte odeur à l'ouverture du flacon, pique au nez.				

Nom de l'échantillon: Kapok				
Date du test: 12/03/2024				
Date de retrait: 09/04/2024				
Coupons	Oxydation	Corrosion	Total	Classe
Argent	1	0	1	I
Cuivre	2	0	2	I
Plomb	0	2	2	I
Utilisation temporaire. Coupons de plomb avec des traces de corrosion très présentes.				

Nom de l'échantillon: Cosse de Sarrasin				
Date du test: 23/04/2024				
Date de retrait: 21/05/2024				
Coupons	Oxydation	Corrosion	Total	Classe
Argent	0	0	0	I
Cuivre	1	0	1	I
Plomb	1	2	3	II
Utilisation temporaire. Matériau électrostatique. Pas d'odeur à l'ouverture, pas de moisissures. Très légère pellicule fine de corrosion sur le plomb, cuivre légèrement oxydé.				

Nom de l'échantillon: Balle de millet				
Date du test: 23/04/2024				
Date de retrait: 21/05/2024				
Coupons	Oxydation	Corrosion	Total	Classe
Argent	0	0	0	I
Cuivre	1	0	1	I
Plomb	1	2	3	II
Utilisation temporaire. Matériau électrostatique, compliqué d'avoir 2g et colle aux parois du flacon. Pas d'odeur et pas de moisissures. Très légère couche de corrosion sur le plomb, cuivre terne, impression d'une pellicule.				

Nom de l'échantillon: Fibre de textile recyclé				
Date du test: 23/04/2024				
Date de retrait: 21/05/2024				
Coupons	Oxydation	Corrosion	Total	Classe
Argent	0	0	0	I
Cuivre	1	0	1	I
Plomb	1	0	1	I
Utilisation permanente. Mélange de 4 fibres textiles différentes (lin, chanvre, coton et laine). Aucun des coupons n'est abîmé malgré la présence de laine (pas de corrosion), légère oxydation du cuivre et du plomb, ternissement de l'argent.				

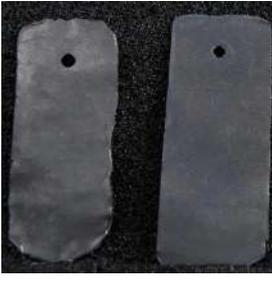
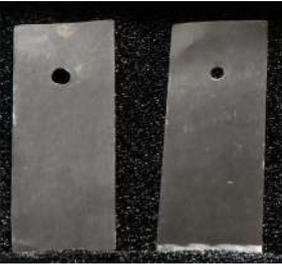
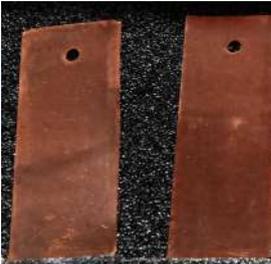
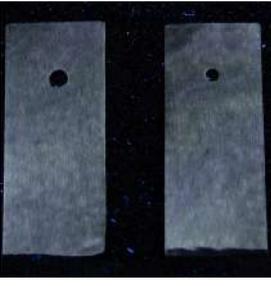
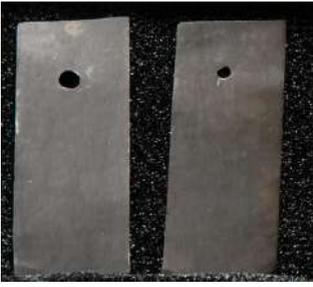
Critère et échelles de notation

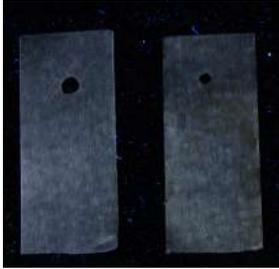
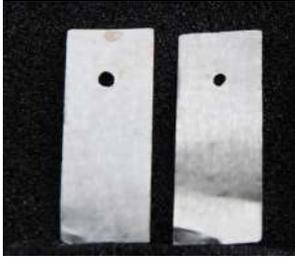
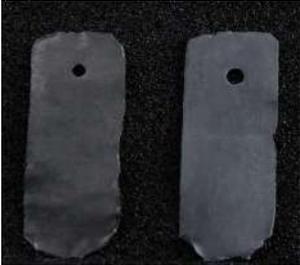
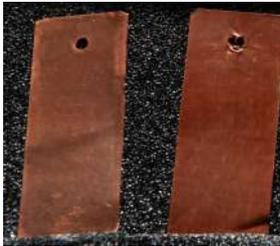
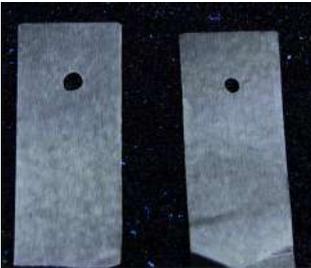
Echelle de notation (Procédure Neuchâtel)			
Oxydation		Corrosion	
0	Aucune	0	Aucune
1	Légère	2	Légère
2	Moyenne	3	Moyenne
3	Prononcée	4	Prononcée

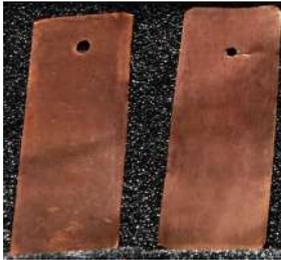
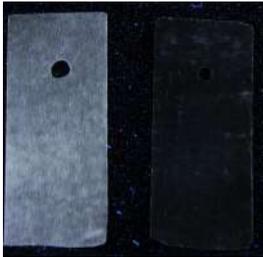
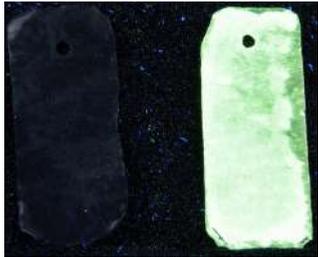
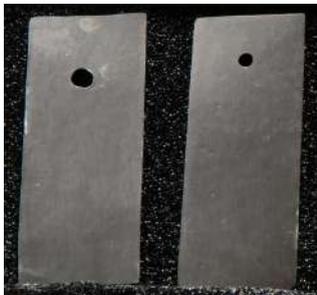
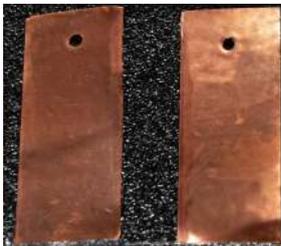
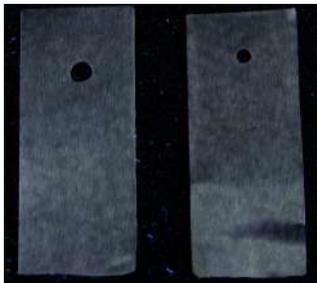
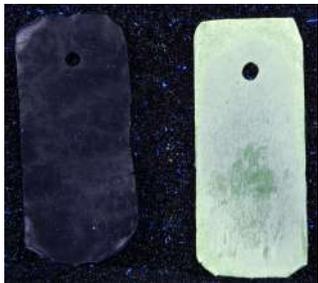
Echelle de notation (Thickett & Green)		Echelle de notation (Bamberger)	
0	Permanente (P)	Permanente	Corrosion non visible
1	Permanente/ temporaire (P/T)	Temporaire	Ternissure ou pellicule de corrosion/ décoloration (- de 6 mois)
2	Temporaire (T)	Inadapté	Corrosion clairement visible
3	Temporaire/ Inadaptée (T/I)		
4	Inadapté (I)		

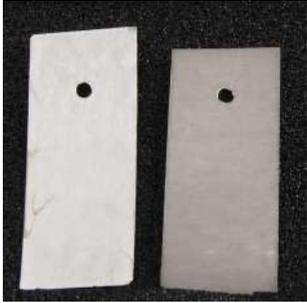
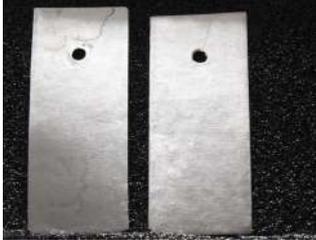
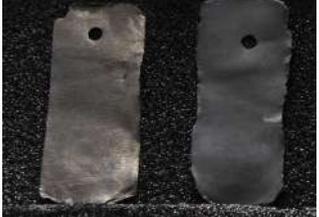
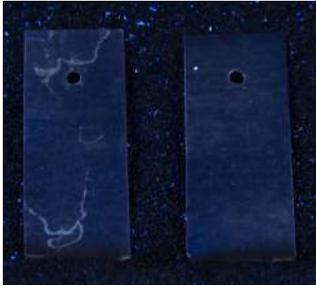
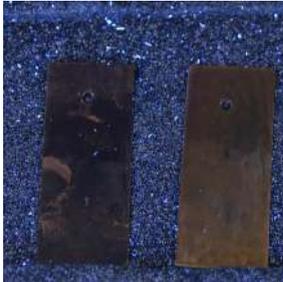
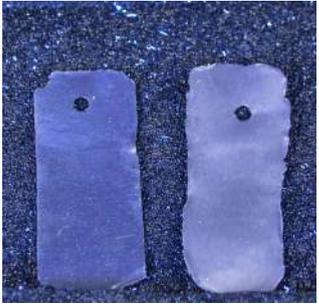
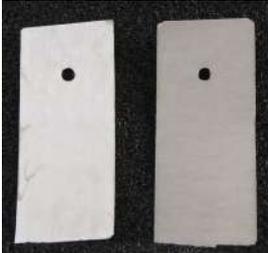
Total	Classe	Utilisation
0 à 2	I	Permanente
3 à 4	II	Temporaire
5 à 7	III	Proscrite
	IV	Impossible de se prononcer

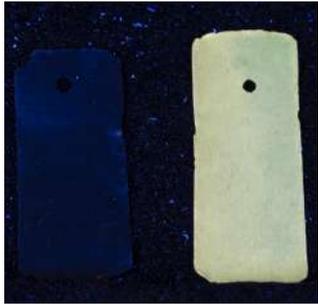
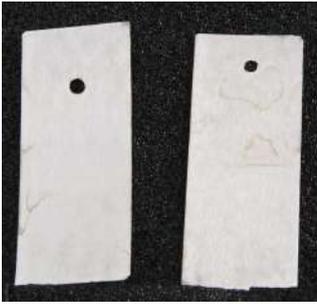
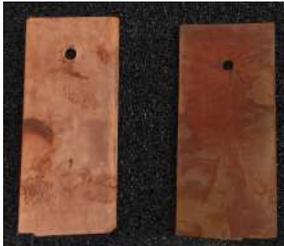
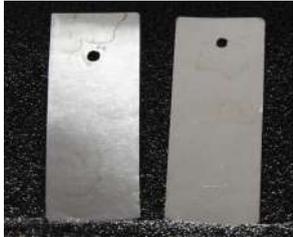
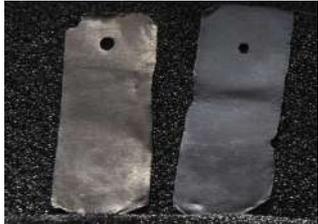
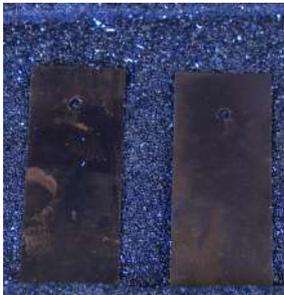
Annexe 5: Coupons métalliques de tests d'oddy sous différentes sources lumineuses.

		<i>Témoin</i>	<i>Argent</i>	<i>Témoin</i>	<i>Cuivre</i>	<i>Témoin</i>	<i>Plomb</i>
<i>Elancrin</i>	<i>Lumière diffuse</i>						
	<i>Rasante</i>						
	<i>UV</i>						
<i>Elancrin Latex</i>	<i>Lumière diffuse</i>						
	<i>Rasante</i>						

	<i>UV</i>			
<i>Elancrin Carbone</i>	<i>Lumière diffuse</i>			
	<i>Rasante</i>			
	<i>UV</i>			
<i>Crin Végétal</i>	<i>Lumière diffuse</i>			

	<i>Rasante</i>			
	<i>UV</i>			
<i>Kapok</i>	<i>Lumière diffuse</i>			
	<i>Rasante</i>			
	<i>UV</i>			

FTR	Lumière diffuse			
	Rasante			
	UV			
Balle de Millet	Lumière diffuse			
	Rasante			

	<i>UV</i>			
<i>Cosse de Sarrasin</i>	<i>Lumière diffuse</i>			
	<i>Rasante</i>			
	<i>UV</i>			

Annexe 6: Tableau détaillé des mesures pH.

Macroextraction à froid (norme)	1	2	3	Moyenne	Min	Max	Amplitude	Ecart type
Elancrin	10,14	10,19	10,05	10,13	10,05	10,19	0,14	0,1
Température (°C)	22,6	21,7	21,4	21,90	21,4	22,6	1,2	0,6
Elancrin 2	10,02	9,83	9,96	9,94	9,83	10,02	0,19	0,1
Température (°C)	22,2	19,9	19,8	20,63	19,8	22,2	2,4	1,4
Elancrin + carbone	7,10	7,05	7,07	7,07	7,05	7,10	0,05	0,0
Température (°C)	22,9	22,7	22,5	22,70	22,5	22,9	0,4	0,2
Elancrin latexé	7,89	7,85	7,76	7,83	7,76	7,89	0,13	0,1
Température (°C)	23,5	23,2	23,2	23,30	23,2	23,5	0,3	0,2
Crin végétal	5,82	5,73	5,58	5,71	5,58	5,82	0,24	0,1
Température (°C)	23	22,7	22,3	22,67	22,3	23	0,7	0,4
Kapok	6,00	6,29	6,26	6,18	6,00	6,29	0,29	0,2
Température (°C)	24,3	23,2	23,4	23,63	23,2	24,3	1,1	0,6
Cosse de sarrasin	6,52	6,48	6,43	6,48	6,43	6,52	0,09	0,0
Température (°C)	21,9	21,9	21,6	21,80	21,6	21,9	0,3	0,2
Balle de millet	6,26	6,29	6,33	6,29	6,26	6,33	0,07	0,0
Température (°C)	22,3	22,1	21,7	22,03	21,7	22,3	0,6	0,3
Fibre textile recyclée	6,31	6,55	6,49	6,45	6,31	6,55	0,24	0,1
Température (°C)	22,4	22,2	22,3	22,30	22,2	22,4	0,2	0,1

Annexe 7: Résultats des dégorgements des matériaux.

Matériaux	30 min	Détrempage
Elancrin		
Elancrin carbone		

<p>Elancrin latex</p>		
<p>Crin végétal</p>		
<p>Kapok</p>		

<p>Cosse de Sarrasin</p>		
<p>Balle de millet</p>		
<p>Fibre textile recyclée</p>		

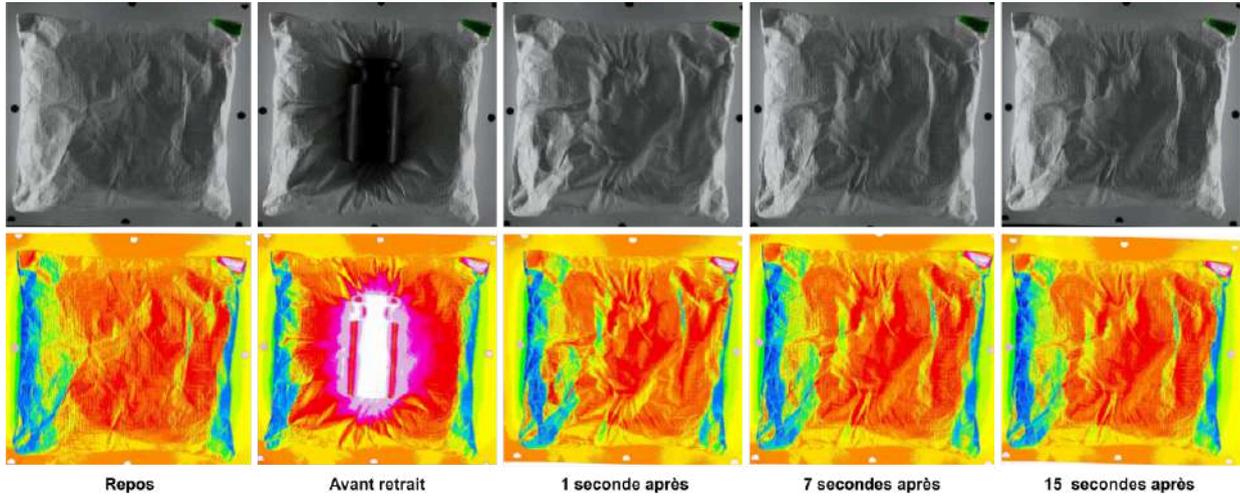
Annexe 8: Tableau détaillé des mesures de pH pour le test de vieillissement.

	Avant vieillissement			Moyenne	écart-type	Cycle 1			Moyenne	écart-type
	pH 1	pH 2	pH 3			pH 1	pH 2	pH 3		
Balle de millet	6,26	6,29	6,33	6,29	0,04	6,32	5,79	6,34	6,15	0,31
Température (°C)	22,3	22,1	21,7	22,03	0,31	22,6	22,0	21,3	22,0	0,65
Cosse de sarrasin	6,52	6,48	6,43	6,48	0,05	6,33	6,46	6,46	6,42	0,08
Température (°C)	21,9	21,9	21,6	21,80	0,17	21,6	21,5	21,4	21,5	0,10
Kapok	6,00	6,29	6,26	6,18	0,16	6,46	5,66	5,51	5,88	0,51
Température (°C)	24,3	23,2	23,4	23,63	0,59	21,8	22,5	22,3	22,2	0,36
Elancrin Carbone	7,10	7,05	7,07	7,07	0,03	7,01	7,02	7,02	7,02	0,01
Température (°C)	22,9	22,7	22,5	22,70	0,20	21,7	23,1	22,7	22,5	0,72
Elancrin	10,14	10,19	10,05	10,13	0,07	10,16	10,44	10,11	10,24	0,18
Température (°C)	22,6	21,7	21,4	21,90	0,62	23,7	23,3	23,2	23,4	0,26
Fibre textile recyclée	6,31	6,55	6,49	6,45	0,12	6,22	6,16	6,18	6,19	0,03
Température (°C)	22,4	22,2	22,3	22,30	0,10	25,4	24,0	23,3	24,2	1,07

	Cycle 2			Moyenne	écart-type	Cycle 3			Moyenne	écart-type
	pH 1	pH 2	pH 3			pH 1	pH 2	pH 3		
Balle de millet	6,27	6,14	6,26	6,22	0,07	6,3	6,32	6,34	6,32	0,02
Température (°C)	22,2	22,5	22,2	22,30	0,17	22	21,9	21,7	21,87	0,15
Cosse de sarrasin	6,36	6,43	6,43	6,41	0,04	6,4	6,44	6,41	6,42	0,02
Température (°C)	22,7	22,1	22,1	22,30	0,35	22,1	22,1	22,3	22,17	0,12
Kapok	5,73	5,86	5,61	5,73	0,13	5,77	6,12	6	5,96	0,18
Température (°C)	25,1	24	23,8	24,30	0,70	23,9	24,7	24,1	24,23	0,42
Elancrin Carbone	6,94	6,94	7,16	7,01	0,13	7,02	7,09	7,13	7,08	0,06
Température (°C)	25,1	24,6	23,4	24,37	0,87	24	23,9	23,4	23,77	0,32
Elancrin	10,11	10,7	9,95	10,25	0,40	9,93	9,99	9,67	9,86	0,17
Température (°C)	23,8	23,4	23,2	23,47	0,31	23,8	23,3	23,6	23,57	0,25
Fibre textile recyclée	6,26	6,40	6,38	6,35	0,08	6,26	6,47	6,26	6,33	0,12
Température (°C)	22,4	22,2	21,5	22,03	0,47	23	23,1	22,8	22,97	0,15

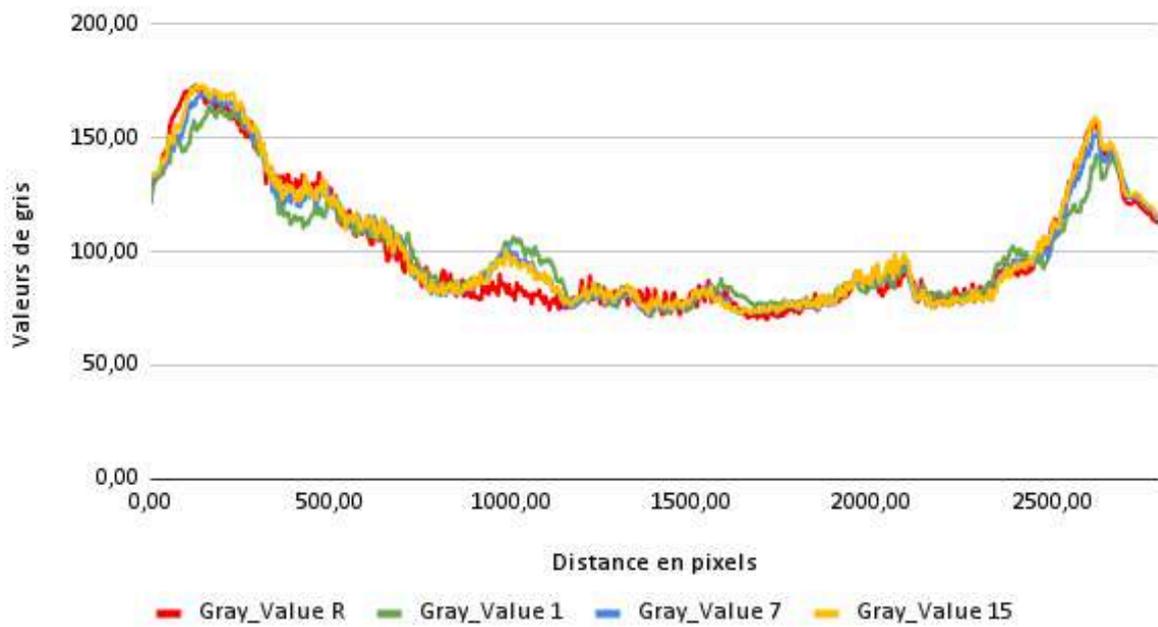
Annexe 9: Graphiques des tests de relaxation et images des coussins.

- Crin végétal

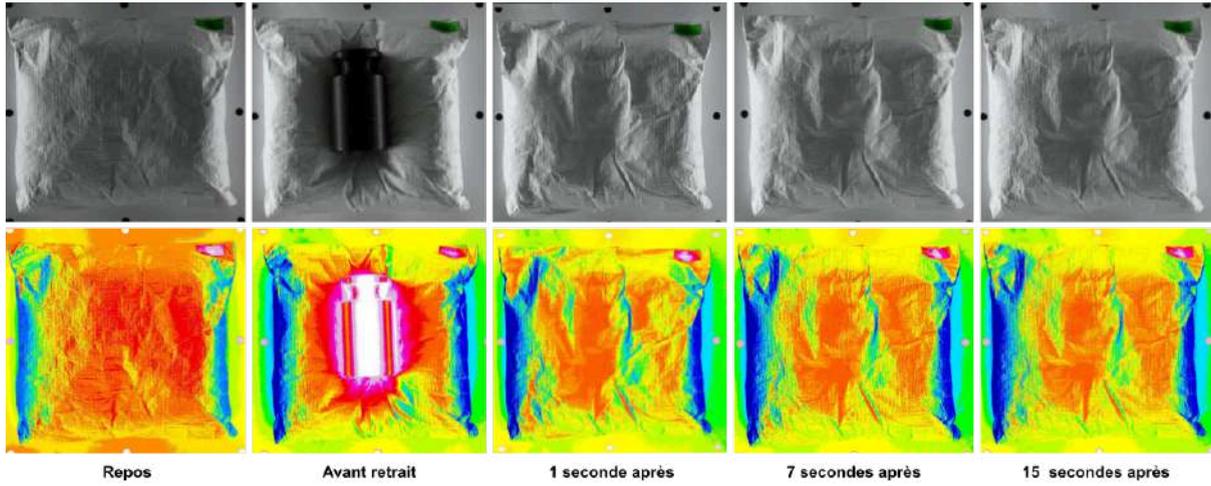


Images du coussin de crin végétal à des intervalles différentes avant et après traitement fausses couleurs.

Relaxation coussin Crin Végétal

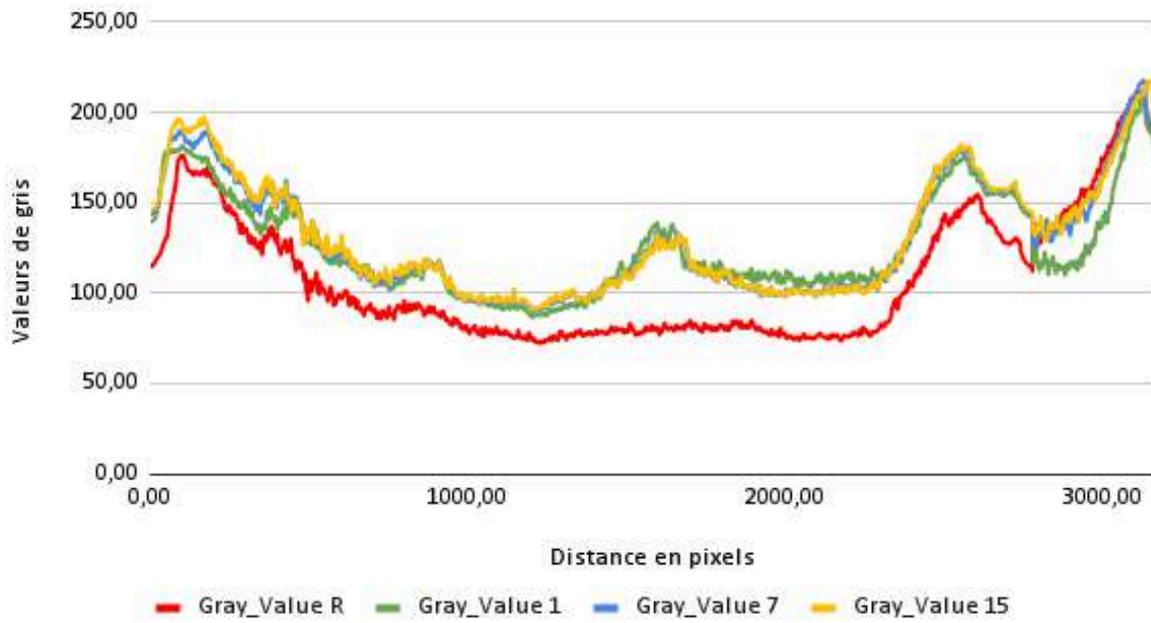


- *Elancrin*

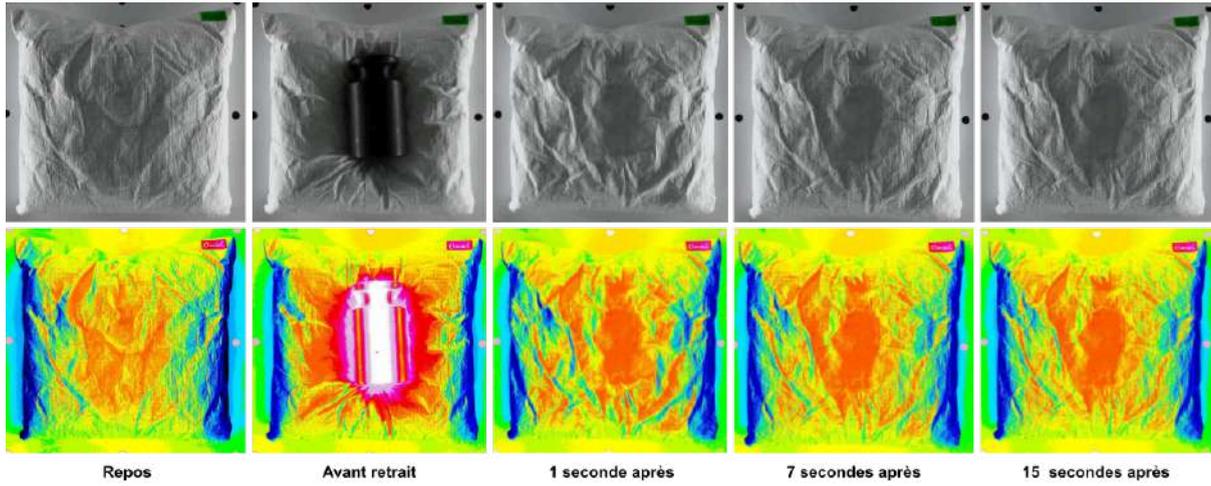


Images du coussin d'elancrin à des intervalles différentes avant et après traitement fausses couleurs.

Relaxation coussin Elancrin

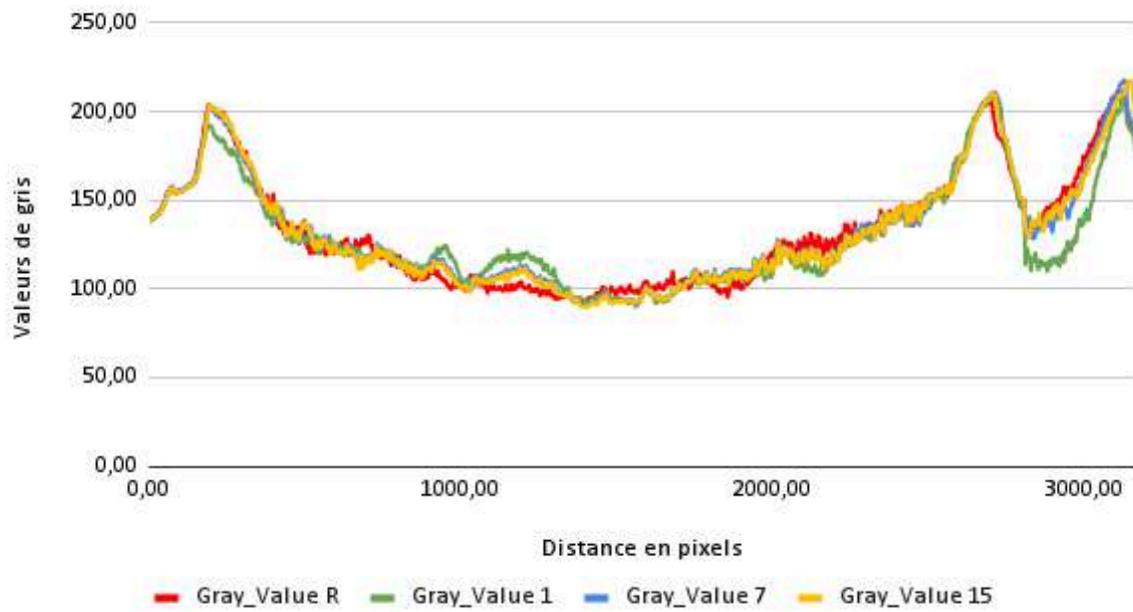


- *Elancrin Carbone*

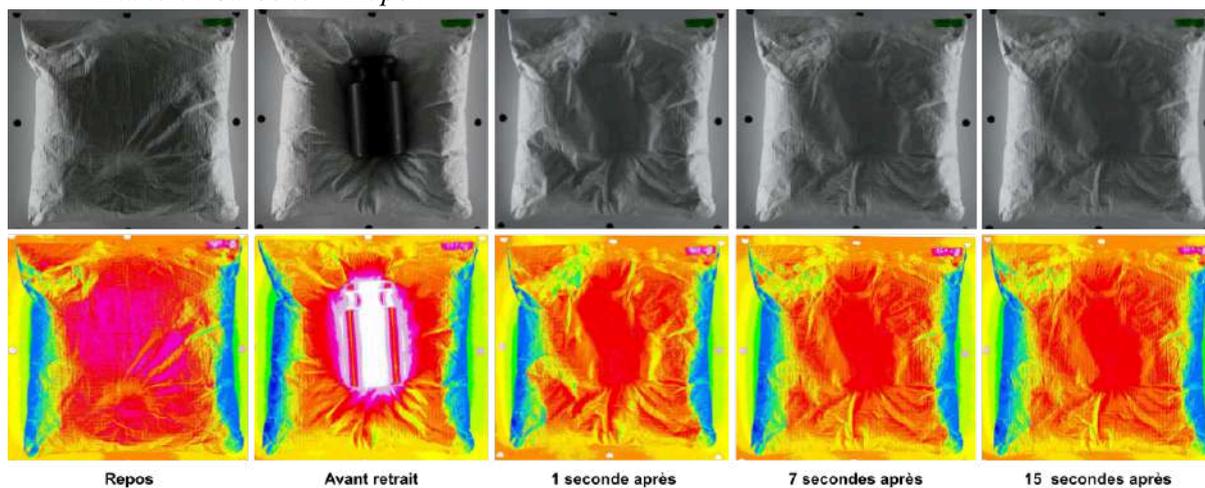


Images du coussin d'elancrin carbone à des intervalles différentes avant et après traitement fausses couleurs.

Relaxation coussin Elancrin Carbone

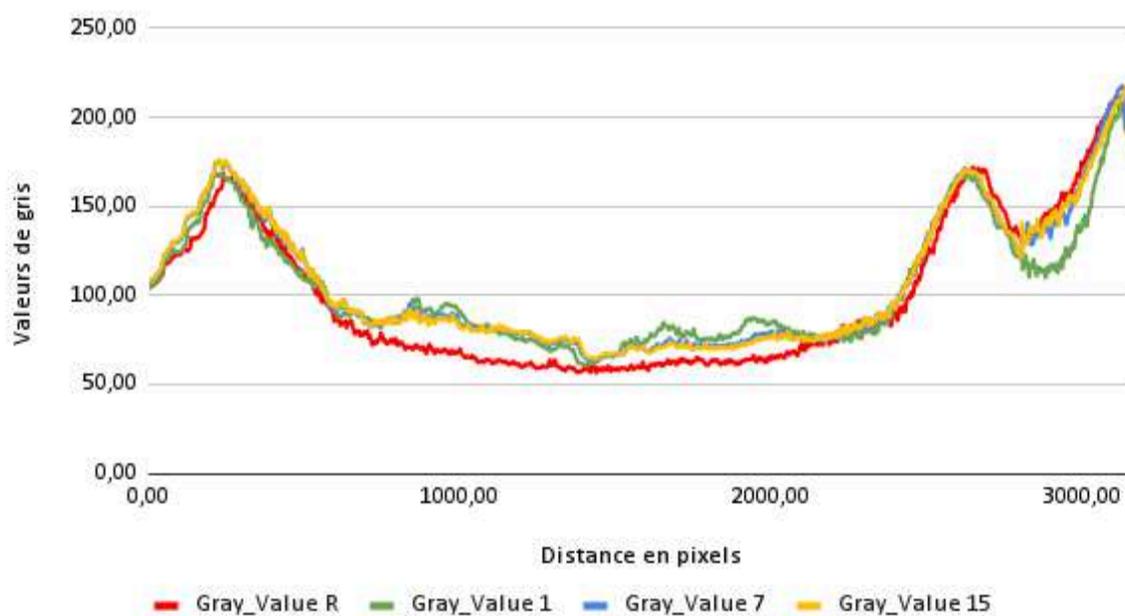


- *Elancrin Carbone + Kapok*

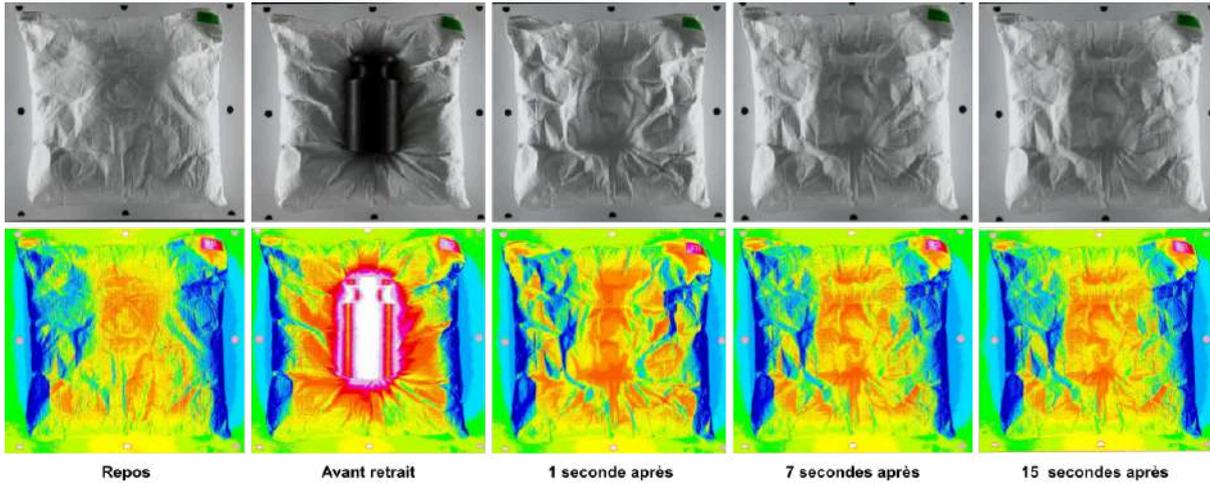


Images du coussin d'elancrin carbone et kapok à des intervalles différentes avant et après traitement fausses couleurs.

Relaxation coussin Elancrin carbone + Kapok

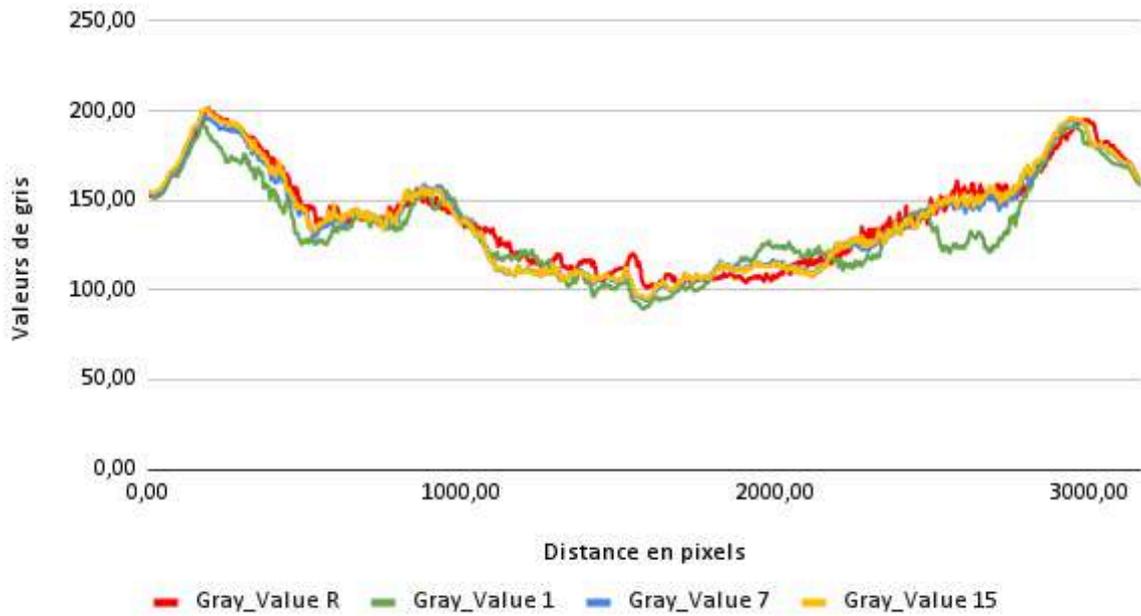


- *Fibre textile recyclée*

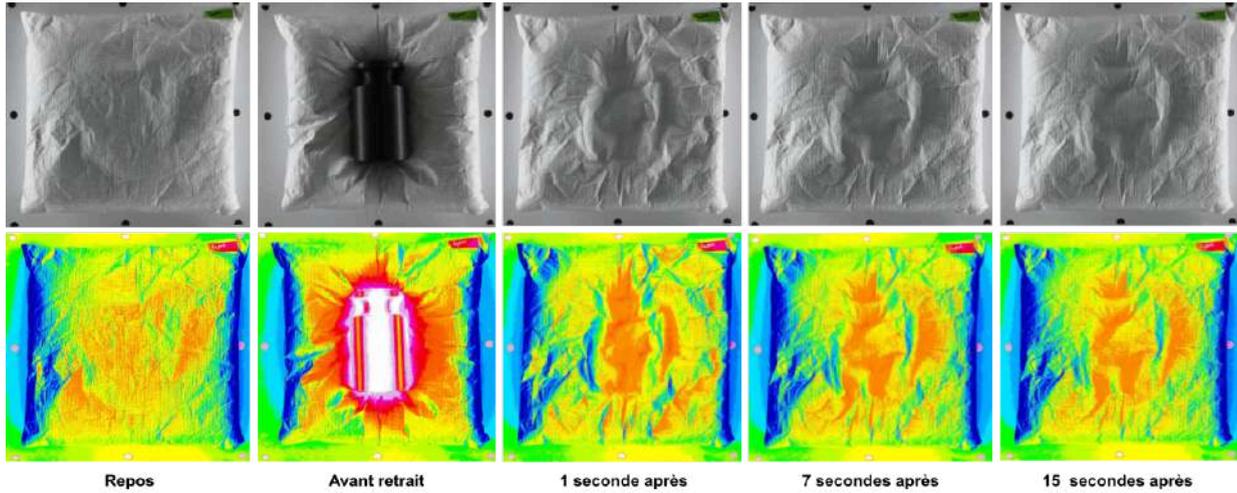


Images du coussin de fibre textile recyclée à des intervalles différents avant et après traitement fausses couleurs.

Relaxation coussin FTR

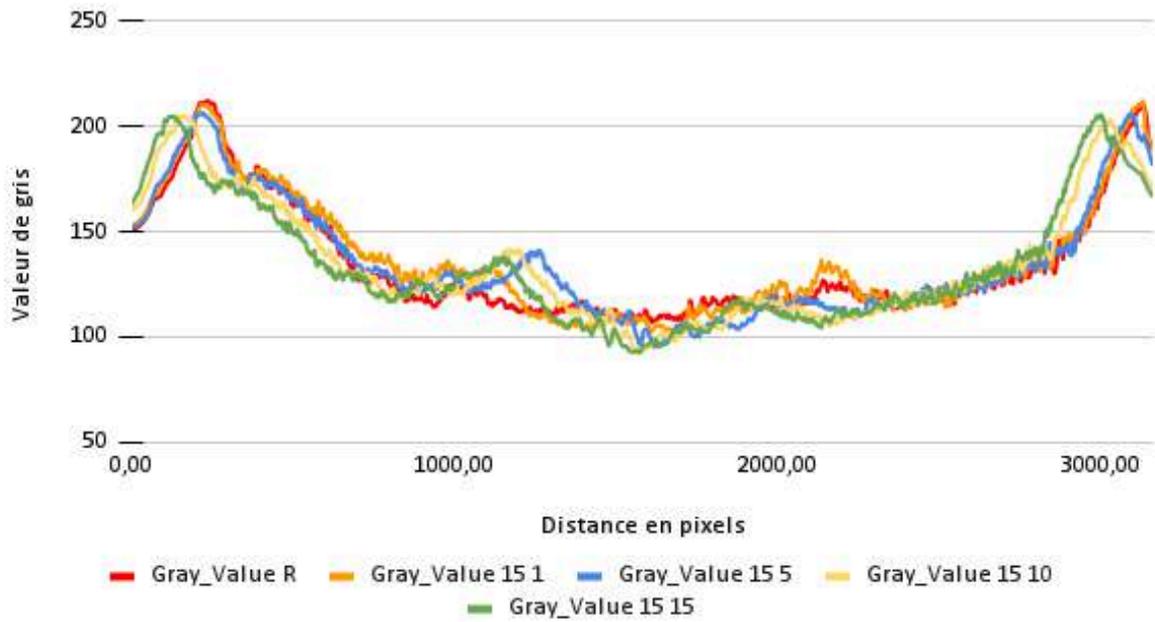


- *Kapok*

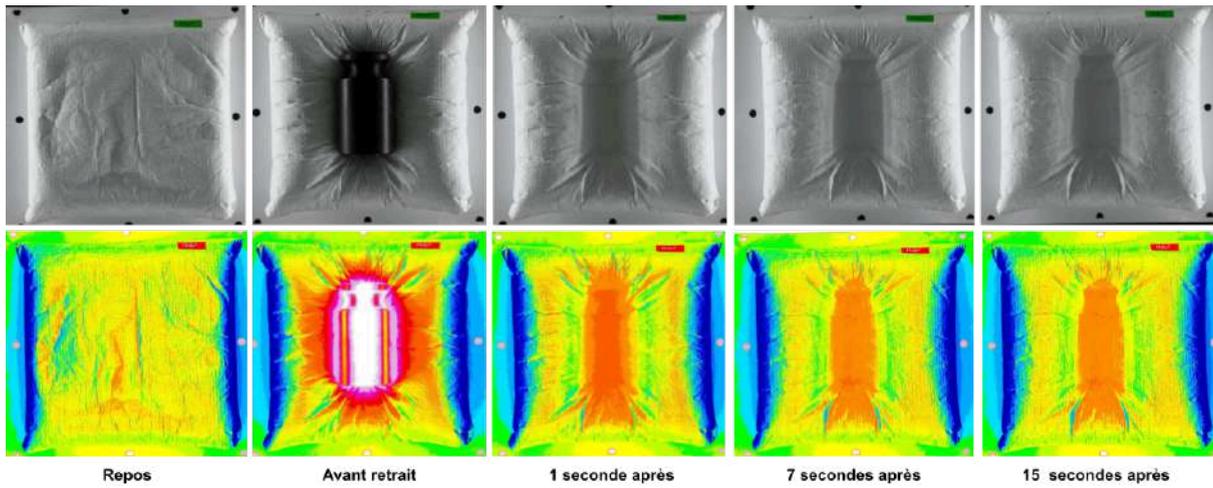


Images du coussin de kapok à des intervalles différentes avant et après traitement fausses couleurs.

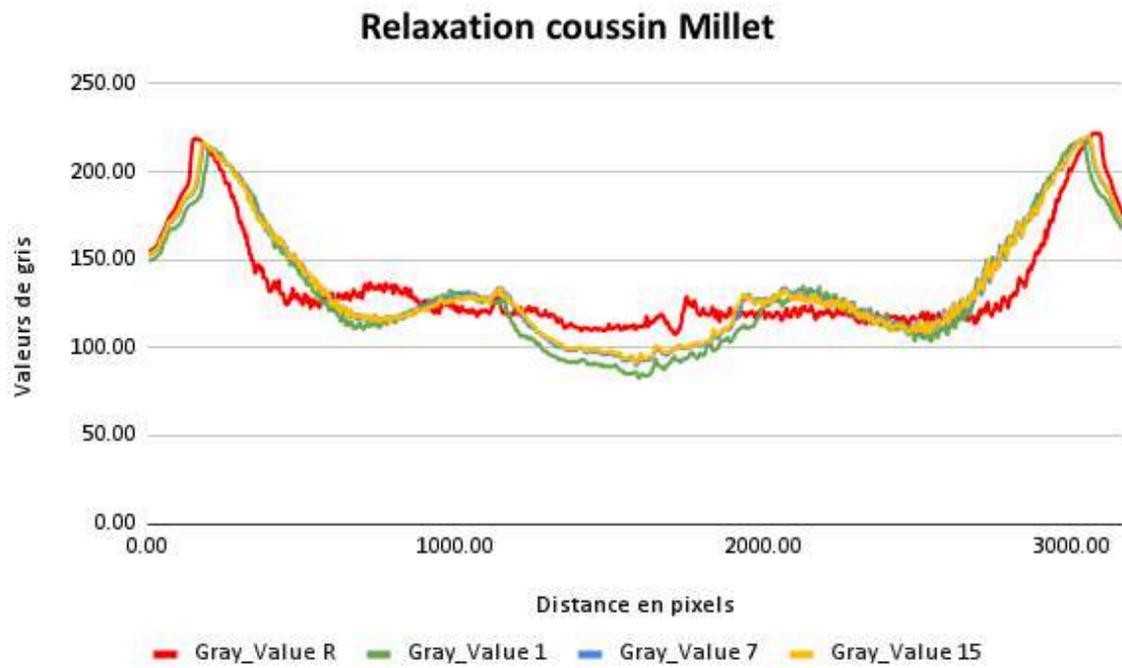
Fatigue du coussin de Kapok



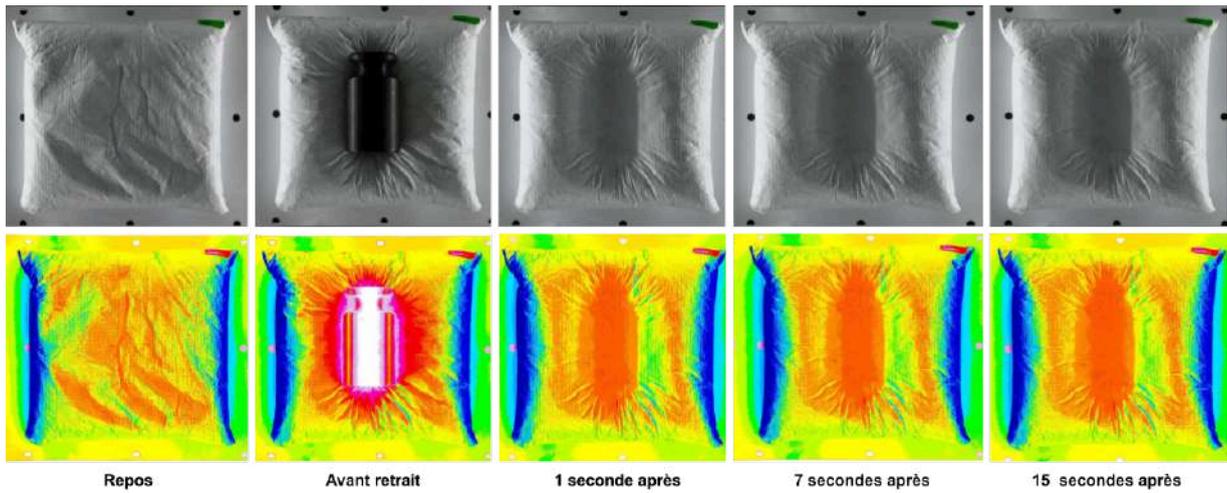
- Millet



Images du coussin de millet à des intervalles différentes avant et après traitement fausses couleurs.

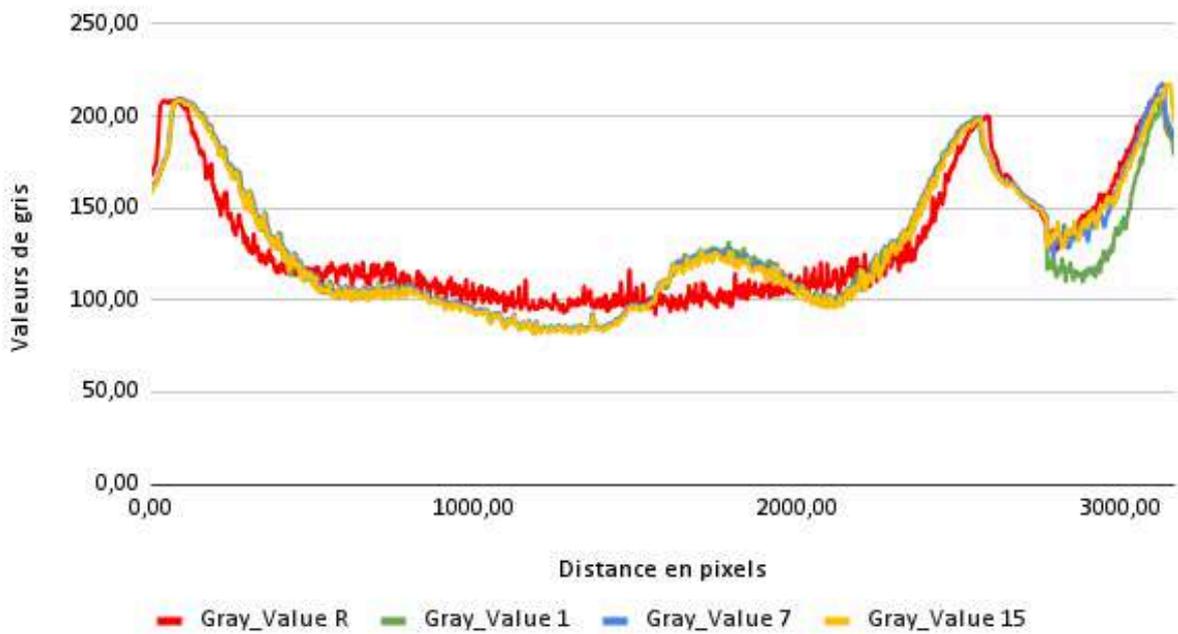


- Sarrasin



Images du coussin de sarrasin à des intervalles différentes avant et après traitement fausses couleurs.

Relaxation coussin Sarrasin



Annexe 10 : Grille de notation d'Anaïs Perrichon des matériaux.

Matériau		Kapok	Élanclin	Élanclin Latex	Élanclin Carbone	Crin Végétal	Millet	Sarrasin	FTR	
CRITERES CONSERVATOIRES										
Caractéristiques intrinsèques au matériau		Points	Réponse du matériau							
C1			Stabilité physico-chimique							
	Conserve ses propriétés sur plusieurs années d'utilisation	3								
	Se dégrade après de nombreuses utilisations (+10x)	2	3	3	3	3	3	3	3	
	Altération de ses propriétés au bout de quelques utilisations	1								
	Perd ses propriétés après une utilisation	0								
C2			Neutralité							
	pH sans danger pour l'objet quelque soit la durée d'utilisation	3								
	pH dangereux pour l'objet au bout de plusieurs mois	2	3	2	3	3	2	3	3	
	pH dangereux pour l'objet pendant quelques heures	1								
	pH dangereux pour l'objet au bout de quelques heures	0								
C3			Capacités thermiques							
	Isothermie adaptée à l'usage prévu	1							1	
	Isothermie non adaptée à l'usage prévu	0								
C4			Absorption de l'humidité							
	Hygroscopie adaptée à l'usage prévu	1							1	
	Hygroscopie non adaptée à l'usage prévu	0								
C5			Étanchéité							
	Étanche à l'eau et à la poussière	2								
	Étanche à l'eau ou à la poussière	1	2	1	2	2	1	2	1	
	Perméable à l'eau et à la poussière	0								
C6			Résistance aux développements de moisissures							
	Naturellement impustrescible	3								
	Traité fongicide	2	3	1	3	3	1	1	3	
	Putrescible	1								
	Favorise le développement de moisissures	0								
C7			Résistance aux infestations							
	Sans risques d'infestations	3								
	Traité insecticide	2	3	1	2	3	1	1	3	
	Sensible aux infestations	1								
	Attire les insectes	0								
C8			Electrostativité							
	Sans danger quelque soit la distance avec l'objet	1	1	1	1	1	1	0	0	
	Dommageable quelque soit la distance avec l'objet	0							1	
C9			Occultant							
	A plus de 90%	1								
	A moins de 90%	0								
C10			Transparence							
	Transparent, permet de voir clairement l'objet recouvert	1								
	Opaque, ne permet pas de distinguer l'objet recouvert	0								
C11			Densité							
	Densité adaptée à l'usage prévu	1	1	1	1	1	1	1	1	
	Densité non adaptée à l'usage prévu	0								
C12			Inflammable (norme NF P.92507)							
	M1 Non inflammable	3								
	M2 Difficilement inflammable	2	0	0	0	0	0	0	0	
	M3 Moyennement inflammable	1								
	M4 Facilement inflammable	0								
Caractéristiques du matériau au contact de l'objet		Points	Réponse du matériau							
C13			Innocuité							
	Compatible avec l'objet	3								
	Compromet l'intégrité de l'objet au bout de plusieurs années d'utilisation	2	2	3	1	2	1	2	3	
	Compromet l'intégrité de l'objet au bout de plusieurs mois d'utilisation	1								
	Contact direct nocif pour l'objet	0								
C14			Surface en contact avec l'objet							
	Adaptée à la nature de l'objet	1								
	Non adaptée à la nature de l'objet	0								
C15			Protection aux rayons lumineux							
	Efficace sur une durée limitée	1								
	Sans protection	0								
C16			Migration de couleurs							
	Pas de migration	1	1	0	1	0	0	1	1	
	Possible sous conditions de conservation spécifiques	0								
C17			Migration d'adhésif							
	Pas de migration	1								
	Possible sous conditions de conservation spécifiques	0								
C18			Migration de plastifiant							
	Pas de migration	1								
	Possible sous conditions de conservation spécifiques	0								
TOTAL		31	19	13	17	18	11	14	14	21
		100%	83%	57%	71%	78%	48%	61%	61%	82%

Matériau		Kapok	Élan crin	Élan crin Latex	Élan crin Carbone	Crin Végétal	Millet	Sarrasin	FTR
CRITERES ENVIRONNEMENTAUX									
Production & Distribution		Points	Réponse du matériau						
E1	Disponibilité de la matière première								
	Renouvelable	3							
	Recyclé	2	2	2	1	2	3	3	3
	Hybride	1							
	Non renouvelable	0							
E2	Lieux de culture/extraction								
	Local	3							
	National	2	0	0	0	0	1	1	2
	Européen	1							
	International/Non documenté	0							
E3	Gestion de l'exploitation des terres								
	Agriculture biologique	1	0	0	0	0	1	1	/
	Accapement des terres /Industrie pétrolière / Non documenté	0							
E4	Ressources en eau sollicitées								
	Moins de 2000 litres d'eau par kg	1	1	0	0	0	0	0	1
	Plus de 2000 litres d'eau par kg /Non documenté	0							
E5	Utilisation de produits chimiques de synthèse (Intrant, fertilisants, ...)								
	Agriculture biologique durable	1	0	1	0	0	1	1	/
	Pertube la biomasse/Non documenté	0							
E6	Emissions de CO2								
	Moins de 700kgCO2/tonne	1	0	0	0	0	0	0	0
	Plus de 700kgCo2/tonne / Non documenté	0							
E7	Energies grises consommées								
	Moins de 100kWh/m3	1	0	0	0	0	0	0	0
	Plus de 100kWh/m3 / Non documenté	0							
E8	Lieux de mises en forme								
	Local	3							
	National	2	0	0	0	0	1	1	2
	Européen	1							
	International/Non documenté	0							
E9	Conditions de travail des salariés								
	Conditions connues, documentées et respectueuses des salariés	1	0	0	0	0	0	0	0
	Non respect des normes ou conventions garantissant les droits du travail / Non documenté	0							
E10	Total de la distance parcourue								
	< 500km	3							
	entre 500 et 1500 km	2	1	1	1	1	2	2	2
	entre 1500 et 2000 km	1							
	> 2000 km / Non documenté	0							
	Utilisation de produits chimiques de synthèse (Intrant, fertilisants, ...)	Points	Réponse du matériau						
E11	Toxicité de la composition (santé de l'utilisateur)								
	Ne présente aucun danger sur une durée illimitée	2	2	2	2	2	2	2	2
	Ne présente aucun danger sur une durée limitée	1							
	Besoin de protection spécifique quelque soit la durée d'utilisation	0							
E12	Réutilisation								
	Infinie	3							
	Nombreuse	2	3	3	1	3	2	2	3
	Occasionnelle	1							
	Impossible	0							
E13	Réemploi								
	Possible au sein du musée	2							
	Possible dans une autre institution	1	2	2	0	2	2	2	2
	Impossible	0							
	Fin de vie	Points	Réponse du matériau						
E14	Gestion du déchet								
	Biodégradable	3							
	Totalement recyclable	2	3	3	3	3	3	3	2
	Partiellement recyclable	1							
	Pas recyclable / Non documenté	0							
E15	Conditions de recyclabilité / biodégradabilité								
	Facilement accessible, sans contraintes particulières	3							
	Sous conditions spécifiques, gestion à prévoir	2	3	3	2	3	3	3	3
	Sous conditions spécifiques, coûteux ou énergivore	1							
	Impossible / Non documenté	0							
	TOTAL	31	17	17	10	16	18	21	22
		100%	55%	55%	32%	52%	58%	68%	76%

Matériau			Kapok	Élanclin	Élanclin Latex	Élanclin Carbone	Crin Végétal	Millet	Sarrasin	FTR
CRITERES PRATIQUES										
Acquisition		Points	Réponse du matériau							
P1	Accessibilité									
	En boutique	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	En ligne	0								
P2	Disponibilité									
	En stock disponible	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	Sur commande	0								
P3	Mode de conditionnement									
	Sur commande	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	Grande quantité	0								
P4	Disponibilité de la forme du matériaux									
	Grande variété de choix	3								
	Offre limitée mais suffisante	2	2	2	1	2	1	1	1	2
	Peu de variété	1								
	Typologie de matériaux disponible trop réduite	0								
P5	Coût (à l'appréciation de l'utilisateur)									
	Moins cher	2								
	Relatif	1	2	2	0	2	2	1	1	1
	Plus cher	0								
Mise en pratique		Points	Réponse du matériau							
P6	Mise en oeuvre									
	Aucun outillage requis	2								
	Outillage de base nécessaire	1	2	2	0	2	1	1	2	2
	Besoin d'un outillage/ d'une compétence spécifique	0								
P7	Manipulation									
	Sans formation requise	3								
	Quelques jours de pratiques nécessaires	2	3	3	2	3	3	3	3	3
	Besoin d'une formation spécifique	1								
	Besoin d'un équipement et d'une formation spécifique	0								
P8	Stockage									
	Pas de conditions particulières	3								
	Conditions de conservations standards	2	1	1	1	1	1	1	1	2
	Conditions de conservations restrictives/spécifiques	1								
	Locaux spécifiques	0								
TOTAL		16	11	11	5	11	9	8	9	10
		100%	69%	69%	31%	69%	56%	56%	56%	63%

MASTER 2 Archéologie, sciences pour l'archéologie
Parcours **ARCHÉOMÉTRIE**

Évaluation multimodale des matériaux biosourcés pour le conditionnement d'objet du patrimoine.

ARNOUIL Julie

Résumé : Dans le domaine de la conservation du patrimoine, protéger les objets historiques et culturels est crucial pour les générations présentes et futures. Face à une conscience environnementale croissante, les musées révisent leurs pratiques pour réduire leur empreinte carbone et leur consommation énergétique, notamment en se tournant vers des matériaux bio-sourcés issus de ressources renouvelables pour remplacer les matériaux non écologiques. Alignés avec les principes d'éco-conception et de durabilité, ces matériaux offrent une alternative écologique prometteuse. Leur utilisation pourrait réduire l'empreinte carbone des opérations de conservation tout en favorisant la réutilisation et le recyclage, s'inscrivant dans une démarche plus large de modernisation au sein des institutions culturelles. Ce travail se concentre sur l'évaluation de matériaux bio-sourcés non transformés, tels que l'elancrin® (fibre de coco) et le kapok, ainsi que des co-produits comme les cosses de céréales et des matériaux recyclés comme la fibre textile. Testés chimiquement et mécaniquement, ces matériaux ont été analysés pour évaluer leur compatibilité chimique avec les objets du patrimoine et leur capacité à assurer un maintien et un support adéquats lors du transport. L'étude vise à déterminer leur efficacité en termes de protection, de durabilité et d'impact environnemental, tout en contribuant à l'évolution des pratiques de conservation vers des solutions plus durables.

Mots-clés : Conditionnement, transport, matériaux biosourcés, MEB, test d'Oddy, conservation préventive.

Abstract: In the field of heritage conservation, protecting historical and cultural objects is crucial for present and future generations. In response to a growing environmental awareness, museums are revising their practices to reduce their carbon footprint and energy consumption, turning to bio-sourced materials from renewable resources to replace non-ecological materials. Aligned with the principles of eco-design and sustainability, these materials offer a promising ecological alternative. Their use could reduce the carbon footprint of conservation operations while promoting reuse and recycling, fitting into a broader modernization approach within cultural institutions. This work focuses on the evaluation of unprocessed bio-sourced materials, such as coir and kapok, as well as co-products like cereal husks and recycled materials such as textile fibers. Chemically and mechanically tested, these materials have been analyzed to assess their chemical compatibility with heritage objects and their ability to provide adequate support during transport. The study aims to determine their effectiveness in terms of protection, durability and environmental impact, while contributing to the evolution of conservation practices towards more sustainable solutions.

Key words: Packaging, transport, biobased products, SEM, Oddy test, preventive conservation.

Université Bordeaux Montaigne

Domaine universitaire F-33607 PESSAC Cedex

tél : +33 (0)5 57 12 44 44

www.u-bordeaux-montaigne.fr