

Équipe Thalia BAJON BOUZID

Étude de faisabilité pour le transport de la Tapisserie de Bayeux

Préconisation pour le conditionnement, le déplacement à proximité et le transport transfrontalier vers Londres de la Tapisserie de Bayeux

THALIA BAJON BOUZID, RAPHAËLLE DÉJEAN, ELODIE APARICIO-BENTZ, S-MA-C-H

04/03/2022

Mandataire : Thalia Bajon-Bouزيد

Equipe: Thalia Bajon Bouزيد, Raphaëlle Déjean, Elodie Aparicio Bentz, S-MA-C-H

SOMMAIRE

Lexique	4
Introduction	5
RAPPEL DES PRECEDENTES CONCLUSIONS	7
Caractéristiques techniques.....	7
Etat de conservation	8
Solution préconisée POUR LA sortie de vitrine	8
NOUVEAU CONTEXTE, NOUVEAUX RISQUES	11
Risques liés aux chocs et vibrations	11
Risques liés aux transports internationaux	13
Risques inhérents au support de transfert.....	17
ADAPTATION DU SYSTEME POUR UN TRANSPORT TRANSFRONTALIER	24
Un transport à plat	24
Description du dispositif de transfert	24
Description du basculement du dispositif de transfert.....	26
Aménagements internes du support de transfert	28
CAISSERIE DE TRANSPORT	32
Les différentes caisses.....	32
Les phénomènes de fatigue	33
Les types d'amortissement de vibrations	33
Systèmes d'amortissement de vibrations existants.....	34
Systèmes d'amortissement de chocs existants.....	38
Caisserie de transport	40
CONCLUSION	48
BIBLIOGRAPHIE	50
ANNEXES	53

REMERCIEMENTS

Nous souhaitons remercier ici Julien Leane et Gabriel Robert de la société LPArt pour leur expertise et leur aide pour cette étude.

Nous remercions également Jocelyn Perillat pour toute la documentation communiquée sur le transport.

LEXIQUE

Adhérence : ensemble des forces qui s'exercent entre deux surfaces en contact et les empêchent de glisser l'une contre l'autre.

Adhésion : ensemble des phénomènes physico-chimiques qui se produisent lorsque l'on met en contact intime deux matériaux, dans le but de créer une résistance mécanique à la séparation. Une fois le contact établi, l'énergie nécessaire pour réaliser la séparation s'appelle énergie d'adhésion (énergie par unité de surface). Elle ne doit pas être confondue avec l'adhérence, qui est au contraire la force (par unité de surface) nécessaire pour réaliser cette même séparation.

Caisse interne : dispositif interne de la caisse permettant la manipulation du support de transfert.

Caisse externe : dispositif externe de la caisse permettant la manipulation de l'intégralité de la caisse et de ses aménagements antivibratoires et climatiques.

Choc : contrainte mécanique de courte durée, le plus souvent induite par une chute et/ou collision.

Cisaillement : contrainte mécanique appliquée de manière parallèle ou tangentielle à une face d'un matériau.

Contrainte : force exercée par unité de surface (en $N.mm^{-2}$ ou MPa).

Couplage : En mécanique newtonienne, le couplage est une interaction entre deux systèmes oscillants. Ces interactions affectent le comportement oscillatoire des deux objets.

Déformation : déplacement relatif par rapport à une longueur donnée (sans unité et peut-être exprimé en %).

Diagramme de Wöhler : appelé aussi courbe S-N (Stress vs Number of cycles, c'est-à-dire « contrainte en fonction du nombre de cycles »). Il permet d'estimer le degré d'endommagement lié à la fatigue des matériaux.

Dispositif de transfert : ensemble constitué du support de transfert et des équipements visant à le passer à l'horizontale et à le transporter.

Endommagement : apparition dans un matériau de dommages causés par l'usure ou une attaque physique ou chimique. Il conduit à une dégradation de ses capacités physiques pouvant conduire à la rupture.

Fatigue : phénomène d'endommagement local d'un matériau, sous l'effet d'une succession d'efforts variables (contrainte ou déformation) qui lorsque le matériau n'est pas fragile, ne provoquerait pas d'irréversibilité.

Résonance : Un objet entre en résonance à une fréquence spécifique (fréquence de résonance ou fréquence propre) et peut vibrer à une amplitude bien plus importante que celle de la vibration d'excitation (le mouvement pendant le transport par exemple). La fréquence propre est une propriété des matériaux et est influencée par la géométrie, l'assemblage et le vieillissement de ces matériaux.

Rupture de charge : Une rupture de charge est, dans le domaine des transports, une étape pendant laquelle des marchandises ou des passagers transportés par un premier véhicule sont transférés dans un second véhicule, immédiatement ou après une période de stockage ou de correspondance, autrement dit le temps de transbordement.

Support de transfert : ensemble des paravents portant la Tapisserie lors de son extraction de la vitrine

Transmissibilité : rapport entre l'onde d'entrée dans le matériau et l'onde de sortie.

Vibration : contrainte cyclique qui expose les objets du patrimoine à une succession de forces mécaniques, plus ou moins importantes (amplitude ou niveaux) pendant un temps plus ou moins long (temps et fréquence). Contrairement à un choc, qui est une contrainte mécanique appliquée en un temps court, une vibration se répète dans le temps.

INTRODUCTION

OBJET DE LA DEMANDE

Le présent document fait suite à deux études : la première¹ traitant de l'état de conservation de la Tapisserie de Bayeux, la seconde² des modalités techniques préalables à sa restauration et à son exposition.

Les objectifs de cette seconde étude étaient de fournir aux responsables scientifiques de la Tapisserie des éléments techniques et financiers comme outils de prise de décision.

Elle se composait de trois volets :

- L'extraction la broderie de son local actuel en minimisant les risques,
- L'élaboration d'un plan de travail et de l'aménagement d'un local pour permettre à l'équipe de restaurateurs retenue d'effectuer les interventions de conservation-restauration sur la Tapisserie sans risque pour l'œuvre,
- La préservation à long terme de cette œuvre exceptionnelle dans sa future vitrine.

L'étude qui suit constitue un complément du volet concernant l'extraction de la Tapisserie, et permet d'**exposer les modalités théoriques³ pour un déplacement vers le futur local de restauration, le stockage durant quelques semaines⁴, mais également dans la perspective d'un transport transfrontalier** de la Tapisserie de Bayeux entre le musée de la Tapisserie de Bayeux et un musée londonien.

Comme nous le verrons au cours de cette étude, si le transport devait se concrétiser, nous préconisons fortement des tests complémentaires pour évaluer la performance sur le terrain des solutions listées, pour assurer la sécurité de la Tapisserie.

CONTEXTE DE LA DEMANDE

Un projet d'échange culturel international avec le **prêt de la Tapisserie de Bayeux à un musée de Londres** a été réactivé⁵ dans le cadre plus global d'un souhait d'élargissement des conditions de prêts des œuvres annoncé en 2017⁶.

Plusieurs équipes d'experts conservateurs-restaurateurs⁷ se sont succédées pour établir des préconisations de conservation et de manipulation de la Tapisserie.

¹ *Étude Préalable-Constata d'état*, juin 2020 - Argenton-BajonBouزيد-Levoir-Mansouri-Marcelli-Panaget-Strouk.

² *Étude préalable-Préconisations de conservation pour l'exposition et la manipulation de la Tapisserie de Bayeux*, octobre 2021 - BajonBouزيد, Déjean, Aparicio Bentz, S-MA-C-H, Concilio Ergonomie.

³ Voir description détaillée dans la présente étude, « Limites de la réponse », p. 6.

⁴ Temps des travaux d'aménagement des locaux par exemple.

⁵ Conférence de presse avec Theresa May à Sandhurst pour le 35^e sommet Franco-Britannique le 18 janvier 2018.

⁶ Discours du président de la République Emmanuel Macron à la Pnyx Athènes le 7 septembre 2017.

⁷ Selon la description de l'E.C.C.O. Confédération Européenne des Organisations de Conservateurs-Restaurateurs <http://www.ecco-eu.org/>

Thalia Bajon-Bouzid, mandataire de notre équipe, a participé à ces différentes études⁸, ce qui a permis d'avoir une approche cohérente et riche en informations.

Nous avons choisi de réunir pour cette phase complémentaire les mêmes compétences que pour l'étude précédente :

- Trois conservatrices-restauratrices diplômées d'État : Thalia BAJON-BOUZID et Raphaëlle DEJEAN, toutes deux spécialistes des textiles de grands formats et Elodie APARICIO-BENTZ, consultante en conservation préventive.
- La société S-MA-C-H, constituée de Cécilia GAUVIN, ingénieure matériaux et docteur en mécanique et génie civile ; de Leïla SAUVAGE, conservatrice-restauratrice d'arts graphiques et doctorante en ingénierie aérospatiale et de Gilles TOURNILLON, restaurateur de support bois-ébéniste, spécialiste des vitrines climatiques.

LIMITES DE LA REPONSE

Les délais impartis pour la réalisation de cette étude sont très courts (soit un peu moins de 3 mois et demi entre le 15 décembre 2021 et le 04 mars 2022).

En raison de ces délais et du budget imparti, cette étude se limite à des préconisations théoriques mais ciblées sur les problématiques de la Tapisserie.

Il nous semble impératif d'alerter le lecteur sur le fait que les solutions qui sont exposées dans le cadre de cette étude n'ont pas été testées en laboratoire ni éprouvées par des mises en situation à l'aide notamment de prototypes.

NB : l'ensemble des dessins et schémas ne doivent pas être considérés comme des plans d'exécution mais sont uniquement des illustrations de nos propositions.

⁸ Thalia Bajon-Bouzid a participé aux deux précédentes études (en 2020 et 2021).

RAPPEL DES PRECEDENTES CONCLUSIONS

Cette partie est destinée à faire un rappel synthétique des éléments mis en évidence lors des deux dernières études.

CARACTERISTIQUES TECHNIQUES

Voici un résumé des éléments caractéristiques de l'œuvre.



Figure 1. <https://www.calvados-tourisme.com/offre/Tapisserie-de-bayeux/> (page consultée le 20/02/2022)

Dimensions

Longueur d'environ 70 m (entre 68 et 69 m)

Largeur d'environ 70 cm

Technique

Broderie de laine polychrome sur toile de lin écriue, doublure du XVIIIème siècle en lin

Présentation

Actuellement constituée de 3 parties (bande numérotée, toile de lin brodée ou partie historiée, galon à chevron) et d'un aménagement de présentation nommé dossieret, mis en place au dos en 1982-83.

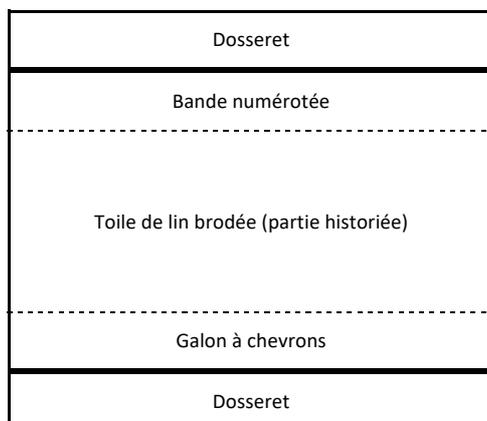


Figure 2. Schéma reprenant la composition de l'œuvre : bande numérotée en haut, toile de lin brodée au centre et galon en bas

ÉTAT DE CONSERVATION

Un constat détaillé⁹ de l'état de conservation de la Tapisserie a été réalisé en juin 2020.

Sa méthodologie est basée sur l'observation de l'intégralité de la Tapisserie et de la récolte de données objectives¹⁰ par le biais d'un *système d'information documentaire spatialisé* (SDIS). L'analyse des données est statistique.

A l'issue de cette étude de la Tapisserie, les conservatrices-restauratrices ont souligné le risque majeur d'aggravation des déchirures et de ruptures des fibres.

Les possibilités de manipulation de l'objet sont grandement impactées par ce constat de l'état de conservation de la broderie.

SOLUTION PRECONISEE POUR LA SORTIE DE VITRINE

En considérant les caractéristiques précitées, l'état de conservation de l'œuvre et les contraintes imposées par sa présentation actuelle, on mesure la difficulté d'une extraction de la Tapisserie de sa vitrine.

Lors de la précédente étude nous avons réuni toutes les compétences requises pour imaginer une solution¹¹, pour extraire la Tapisserie de sa vitrine, qui réduirait les risques au maximum, en termes de manipulations et de contraintes.

La solution s'appuie sur 3 types de connaissances :

- L'expérience des restaurateurs,
- Les données scientifiques appliquées au comportement mécanique des toiles
- Une phase de tests réalisés avec des prototypes des supports de transfert imaginés (échelle 1) et un fac-similé de la Tapisserie (équivalent à environ 1/3 de la dimension totale).

Avant toute chose, nous préconisons d'alléger le dossier¹² avant la sortie du local. Sa présence alourdit considérablement la Tapisserie en donnant une fausse impression de solidité. Il n'apporte par ailleurs aucun soutien structurel réel à la Tapisserie comme cela est décrit dans les études de 2020 et 2021¹³.

En partie haute, une bande de dossier d'environ 10 cm pourrait être conservée pour servir de zone de suspension sur le paravent.

⁹ Voir *Étude Préalable-Constat d'état*, juin 2020 - Argenton-BajonBouزيد-Levoir-Mansouri-Marcelli-Panaget-Strouk.

¹⁰ http://www.unicean.fr/recherche/mrsh/document_numerique/projets/sdis

¹¹ Voir *Étude préalable-Préconisations de conservation pour l'exposition et la manipulation de la Tapisserie de Bayeux*, octobre 2021 - BajonBouزيد, Déjean, Aparicio Bentz, S-MA-C-H, Concilio Ergonomie. Volet 1 "Extraction programmée" p. 20.

¹² Pour rappel, le dossier est constitué d'une toile forte en lin, de molleton de coton et de crin pour la rigidité.

¹³ Voir *Étude préalable-* octobre 2021 - Volet 1 "Extraction programmée" p. 16-17.

La solution consiste à transférer la Tapisserie sur un paravent, support du transfert¹⁴, dans l'axe et à la hauteur du rail de suspension actuel. A la fin du processus d'extraction, le paravent garni de la Tapisserie consiste en un bloc de L2500 x H1300 x P1400mm. Ce système de paravents est appelé le **support de transfert**¹⁵.



Figure 3 : Photographie illustrant le procédé d'extraction testé avec un fac-similé lors de la précédente étude.

Cette manœuvre réunit 73 personnes (restaurateurs, vigies et opérateurs formés) suivant une organisation précise et définie à l'avance décrite dans l'étude précédente¹⁶.

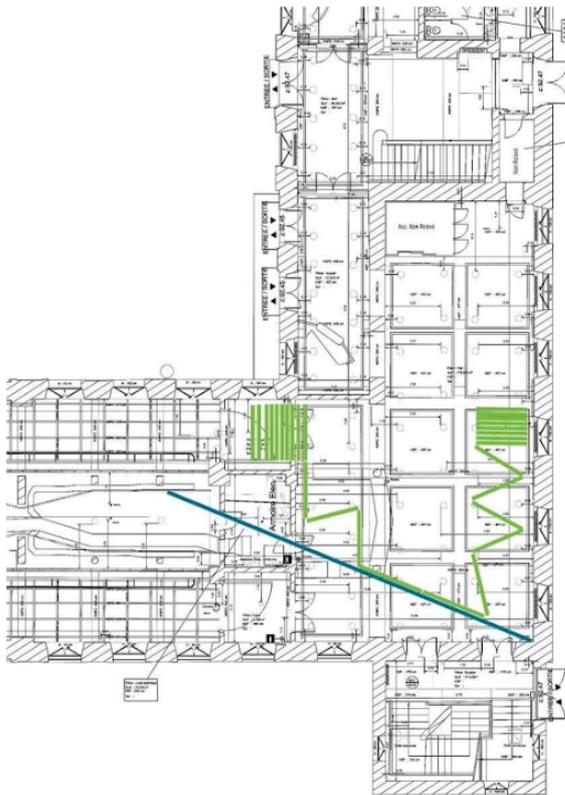


Figure 4. Plan schématisant la position des panneaux et du rail d'extraction¹⁷

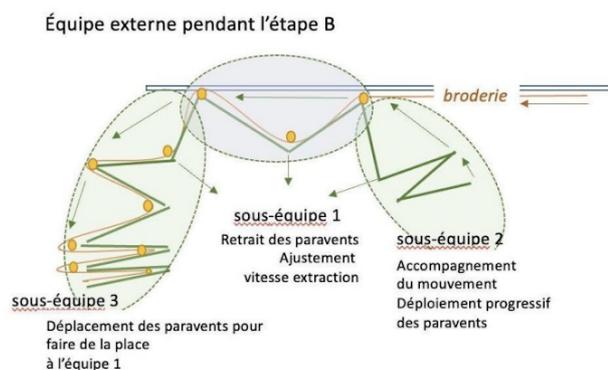


Figure 5. Schématisation du repli des paravents.¹⁸

¹⁴ Voir description détaillée dans la présente étude, « Risques inhérents au support de transfert », p. 17.

¹⁵ Voir définition dans la présente étude, « Lexique », p. 4.

¹⁶ Voir *Étude préalable*- octobre 2021 - Volet 1 "Extraction programmée" p. 37.

¹⁷ Idem p.35.

¹⁸ Idem p.39.

Le support de transfert a été prévu dans la perspective d'un déplacement au sein du musée ou sur une courte distance (10km maximum).

Cette solution ne permet pas de stabiliser suffisamment la Tapisserie pour un transport sur une plus grande distance¹⁹.

Un aménagement interne et des améliorations significatives doivent être réalisés avant d'envisager un transport transfrontalier.

¹⁹ Voir dans la présente étude, « Risques inhérents au support de transfert », p. 17.

NOUVEAU CONTEXTE, NOUVEAUX RISQUES

Lors d'un transport, tout objet patrimonial ancien est exposé à un nombre important de facteurs d'altération spécifiques au temps du transport : variations climatiques (température et humidité relative), contraintes mécaniques (chocs et vibrations), vol, vandalisme.

Si elle est transportée sur une longue distance (au-delà de deux heures de trajet), la Tapisserie de Bayeux encourt des risques supplémentaires en raison de ses dimensions, de son état structural et de sa fragilité mécanique.

RISQUES LIÉS AUX CHOCS ET VIBRATIONS

Les chocs sont des contraintes mécaniques, le plus souvent induites par une chute et/ou collision (voir Fig. 6). Une mise en caisse non maîtrisée, un impact contre un obstacle, une rupture de charge, un défaut sur une route (changement brusque de niveau, trou dans le revêtement, etc.) sont des exemples de sources de chocs couramment rencontrés dans les transports. Si l'énergie apportée par un choc dépasse un niveau d'énergie critique, propre à l'œuvre transportée, des altérations sont immédiatement visibles : fracture de la structure, déchirures, perte de matière, etc.

Les vibrations sont une contrainte cyclique qui expose les objets du patrimoine à une succession de forces mécaniques, plus ou moins importantes (amplitude ou niveaux) pendant un temps plus ou moins long (temps et fréquence). Contrairement à un choc, qui est une contrainte mécanique appliquée en un temps court, une vibration se répète dans le temps et peut conduire à des altérations importantes pour des forces relativement faibles, inférieures à la force de résistance du matériau (voir Fig. 6).

Ce phénomène est appelé **fatigue** et concerne la plupart des matériaux de patrimoine : bois, papier, cuir, textile, métal et toute couche picturale.

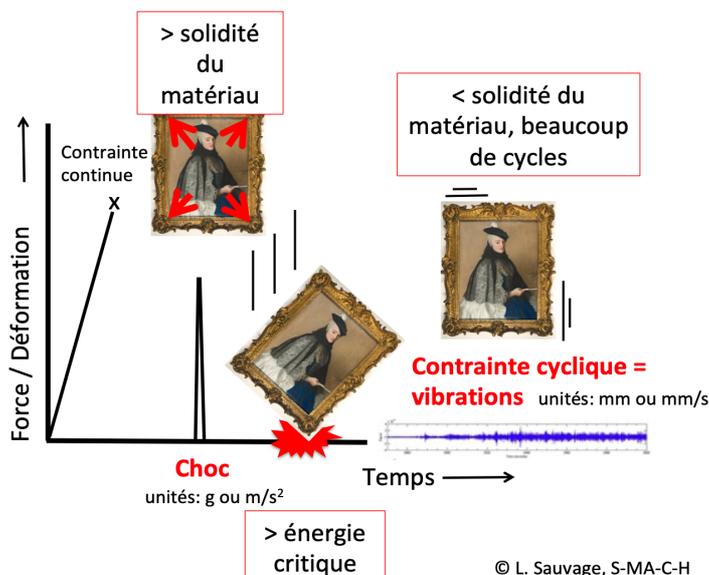


Figure 6. Représentation schématique des différentes contraintes mécaniques agissant sur les matériaux du patrimoine (exemple d'une peinture) : contrainte continue (tension), choc et vibrations.

Il est important de rappeler qu'avec le temps et sous contrainte mécanique, des micro-dégradations, souvent invisibles à l'œil nu, s'accumulent jusqu'à l'apparition de macro-dégradations. Celles-ci se manifestent sous la forme d'un affaiblissement des structures, de déchirures, de soulèvements, de perte de matière, etc.

Au cours d'un transport, toute manipulation est source de vibrations : manipulation manuelle ou mécaniquement assistée, passage de niveaux, mouvement de véhicule. Chaque étape doit ainsi être planifiée afin de les contrôler et de limiter leurs effets. Les acteurs du transport doivent impérativement avoir une expertise dans la manipulation d'œuvres de grandes dimensions et d'une très grande fragilité.

La recherche dans ce domaine a démontré que, pour limiter les risques d'altérations dues aux vibrations pour les œuvres du patrimoine, les solutions d'amortissement doivent répondre aux critères suivants : dans le domaine 1-100 Hz, lorsqu'il est en caisse, l'amortissement doit assurer que l'œuvre ne sera pas exposée à une amplitude de vibration supérieure à 2 mm/s²⁰.

Il est à noter que ces phénomènes d'altérations mécaniques sont accélérés par un climat (température et hygrométrie) non contrôlé et fluctuant.



Figure 7. Représentation schématique du principe de transmission des vibrations pendant un transport, depuis une source jusqu'à la Tapisserie. ©S-MA-C-H

Pour tout transport, une caisse protectrice doit être conçue sur mesure, pour protéger la Tapisserie pendant l'ensemble des étapes du transport (protection climatique et mécanique efficace, voir Fig. 7). Des solutions déjà existantes de protection contre les variations climatiques, le vol et le vandalisme peuvent être adaptées aux besoins de la Tapisserie. A l'heure actuelle, il n'existe aucun système d'amortissement des vibrations applicable directement à un transport de longue distance pour la Tapisserie de Bayeux. Cela nécessite une mission de conception préalable à tout transport et ne rentre pas dans la définition du présent marché.

Notre étude se limite ainsi à la définition de préconisations de transport, qui doivent impérativement être suivies par des **tests mécaniques**²¹ pour définir les gammes de protection mécaniques propres à la Tapisserie avant tout transport.

²⁰ Voir Wei, 2014 et 2018.

²¹ Les tests complémentaires sont listés dans la conclusion de cette étude, p 48.

RISQUES LIÉS AUX TRANSPORTS INTERNATIONAUX

Dans la meilleure des configurations, une œuvre est mise en caisse dans le musée. Cela permet de garantir la sécurité, de contrôler le climat et l'état sanitaire. Une délégation de douane est autorisée, pour certains membres du personnel du transporteur spécialisé. Ils assurent, à la clôture de la caisse, la conformité avec la déclaration en douane. A partir de cet instant la caisse transporteur ne doit plus être ouverte.

DANS LE CAS D'UN TRANSPORT AERIEN

Déroulé d'un transport aérien

L'acheminement jusqu'à l'aéroport se fait en camion ce qui équivaut au scénario exposé ci-dessus. Le transport de marchandise se fait de deux façons : dans les vols passagers si les dimensions des caisses sont inférieures à 110 cm de haut ou dans les zones de fret dans la limite de 300 cm de haut pour les avions cargo. Étant donné les dimensions probables de la caisse à transporter, c'est donc la solution du fret qui s'impose.

Le **fret aérien** n'est pas disponible au départ de la France mais peut se faire depuis le Luxembourg, la Belgique ou les Pays-Bas. Il faut donc acheminer la caisse à plusieurs centaines de kilomètres de Bayeux.

Les zones de fret sont des zones d'exportation sous le contrôle des douanes et les intervenants habilités à y pénétrer sont très peu nombreux. On confie donc à des sociétés de supervision, la responsabilité de cette logistique spécifique. Les superviseurs ont en charge le transport des caisses, leur palettisation, leur stockage le cas échéant et le chargement nocturne dans l'avion-cargo. Mise à part pour la dernière opération (pas d'accès au tarmac), un convoyeur (idéalement un conservateur-restaurateur) supervise les opérations avec le superviseur délégué.

Les caisses contenant des œuvres sont banalisées pour des raisons de sécurité et le traitement (manipulation) qui leur est réservé n'est pas différencié de celui des marchandises courantes (colis postaux, marchandises périssables ou vivantes, matériel électronique, etc...).

A l'arrivée de l'avion, le déchargement est réalisé sur le tarmac par un nouveau superviseur. La caisse est chargée dans un camion pour parcourir les derniers kilomètres jusqu'au lieu d'exposition/dépôt.

Les risques

Les écueils pour le transport aérien sont très nombreux, avec de **très nombreuses ruptures de charge** (6 chargements et déchargements), **des manipulations par des personnes non formées/sensibilisées** aux œuvres, une perte de contrôle du climat sur le tarmac, un **allongement de la durée du transport routier et des vibrations de la caisse**.

Les risques encourus pour la Tapisserie, exposés ici, sont trop importants. Le transport aérien ne nous semble pas adapté.

DANS LE CAS D'UN TRANSPORT TERRESTRE (CAMION+TRAIN)

Déroulé d'un transport terrestre

Une équipe constituée de **2 chauffeurs, accompagnés d'un convoyeur du musée** voyagent dans le même véhicule et se relaient dans le cas d'un arrêt (technique, approvisionnement carburant et alimentaire, etc...). En aucun cas le camion chargé n'est laissé sans surveillance. Dans le cas d'une étape nocturne, le camion est placé pour la nuit dans un local sécurisé (alarme, télésurveillance et rondes) et climatisé, sélectionné avant transport.

La qualité du camion est garantie par le **transporteur spécialisé**. Il doit fournir, pour assurer un bon acheminement, un camion muni d'un système de sécurité contre les vols, d'une climatisation en parfait état de marche (contrôle des données dans la cabine) et de suspensions hydrauliques ou pneumatiques de qualité pour atténuer les vibrations.

Dans le cadre d'un transport routier entre la France et la Grande Bretagne, le camion et les chauffeurs seront les mêmes de bout en bout. La solution idéale pour parcourir ce trajet serait d'utiliser le **Shuttle**²².

A l'arrivée dans le lieu de dépôt ou d'exposition, on décharge dans un lieu fermé. L'œuvre est acheminée dans la salle d'exposition pour a minima 24h d'acclimatation aux conditions climatiques.

Les risques

Les paragraphes suivants sont destinés à établir une liste détaillée des risques spécifiques à la Tapisserie de Bayeux pour un transport de longue distance en camion (les manipulations liées à l'extraction et la mise en caisse ne rentrent pas dans le cadre de cette analyse de risques)²³.

Un transport longue distance en camion se divise en plusieurs étapes principales :

1. Transfert de la zone de stockage (Tapisserie conditionnée en caisse de transport) vers le véhicule de transport (camion) ;
2. Transport jusqu'au Shuttle de Calais ;
3. Transfert du camion sur le véhicule ferroviaire ;
4. Transport ferroviaire jusqu'à Folkestone ;
5. Transfert du camion du véhicule ferroviaire à la route ;
6. Transport jusqu'à la destination finale ;
7. Transfert de la caisse vers la zone finale de stockage.

²² Le Shuttle est un service de feroutage exploité par la société Eurotunnel, dans le tunnel sous la Manche. Ce service, qui fonctionne entre les terminaux de Calais / Coquelles (France) et Folkestone (Angleterre), consiste en des navettes transportant des camions.

²³ Ces risques sont présentés plus loin dans la présente étude, « Risques inhérents au support de transfert », p. 17.

Les étapes en bleu représentent des moments de manipulation manuelle ou mécaniquement assistée d'une zone à une autre.

La manipulation se fait lorsque la Tapisserie est déjà conditionnée dans sa caisse de transport.

Les principaux facteurs de risques sont :

- **Encombrement et masse** de la caisse de transport : une manipulation manuelle, selon les dimensions de la caisse, peut s'avérer difficile, surtout dans des lieux exigus (couloirs, passage de portes). Les risques de chutes accidentelles sont alors très importants et peuvent entraîner des dommages irréversibles. Une assistance mécanisée, adaptée à la configuration des espaces à traverser, peut être envisagée pour diminuer ce risque de chute mais elle peut être source de vibrations. Des systèmes d'amortissement pneumatiques et/ou hydrauliques adaptés à la caisse doivent donc être définis et testés au préalable.
- **Rupture de charge** (passage de porte, escaliers/monte-charge, couloirs, chargement/déchargement de camion) : chaque changement d'espace constitue un risque d'altération mécanique (chute partielle ou totale, choc, vibrations), lié à une erreur de manipulation ou mauvais amortissement des changements de sol (passage abrupt d'un niveau de sol à un autre, passage non amorti sur une zone pavée). Plus le nombre de transferts d'une zone à une autre est important, plus ces risques se multiplient.

Lors de ces étapes, il est conseillé de faire appel à une équipe formée aux risques spécifiques de la Tapisserie, d'utiliser des outils d'amortissement des chocs et vibrations et de diminuer le nombre de transferts d'une zone à une autre.

Les étapes en vert représentent des moments de transport en véhicule routier (camion)

Lors de ces étapes, la caisse de transport est sécurisée au sein du véhicule, qui reste fermé durant la totalité du transport.

L'équipe chargée de ces étapes doit être expérimentée et capable de contrôler l'environnement de la Tapisserie, sous la direction du convoyeur.

Au-delà des risques afférents directement à la route et à ce type de transport (accidents de la circulation, incendie du véhicule, perte totale du bien transporté), les risques les plus importants sont les suivants :

- **Variations climatiques** : la fragilité mécanique et les propriétés hygroscopiques de la Tapisserie en font un objet particulièrement sensible aux variations climatiques²⁴. Il est important qu'elle soit donc transportée dans une caisse super-isothermique et que le véhicule lui-même soit muni d'une gestion du climat (température et relative humidité), afin d'offrir un environnement stable tout au long du transport.

Toute variation climatique au cours du transfert entraînera une réponse mécanique de la Tapisserie, possiblement irréversible.

- **Contraintes mécaniques vibratoires**²⁵ : lorsqu'il se déplace sur un sol, le véhicule génère des vibrations sur l'ensemble de la caisse. Les vibrations sont des contraintes cycliques de faible amplitude mais qui se répètent sur un temps long. A l'heure actuelle, il n'existe aucun système d'amortissement actif de vibrations qui puisse éliminer toute vibration pendant la manipulation et le transport de la Tapisserie. Plus le transport est long, plus le temps d'accumulation des micro-altérations augmente et plus le risque d'apparition d'altérations visibles et irréversibles croît.

Il est impératif que le transporteur prenne ces données en compte et propose des solutions d'amortissement passif des vibrations, à partir de systèmes déjà présents sur le marché. Ces solutions, mises en place au niveau de la caisse de transport et du camion, doivent diminuer l'amplitude des vibrations atteignant la Tapisserie tout en évitant tout effet de couplage²⁶ ou de résonance²⁷ pendant le transport.

Les étapes en orange sont des moments de transport ferroviaire, sous tunnel (Shuttle Calais-Folkestone)

Pendant cette étape, la caisse reste en place sur la remorque du camion. Le camion lui-même est chargé sur une navette ferroviaire qui circule dans le Shuttle. Pendant tout le transport Shuttle, la climatisation au sein de la remorque doit être activée et le contrôle du climat doit être permanent. Le système d'amortissement (passif) doit pouvoir atténuer les vibrations et chocs générés par le chargement sur la navette, le mouvement de la navette ferroviaire et la descente de la navette. Après sécurisation du camion, les chauffeurs et le convoyeur prennent place dans le wagon passagers. Ils retournent dans le camion à l'arrivée de la navette à destination.

²⁴ Nous savons d'après le monitoring réalisé dans le cadre de l'étude précédente que la Tapisserie atteint 0,05% en déformation verticale maximale et 0,02% en déformation horizontale maximale pour une variation climatique maximale de 3% en humidité relative et 0.4° C. Voir Étude préalable-Préconisations de conservation pour l'exposition et la manipulation de la Tapisserie de Bayeux, octobre 2021 - BajonBouزيد, Déjean, Aparicio Bentz, S-MA-C-H, Concilio Ergonomie. Volet 3 "Future présentation" p. 106.

²⁵ Voir dans la présente étude, « Risques liés aux chocs et vibrations » p.11-12.

²⁶ Voir définition dans la présente étude, « Lexique », p. 4.

²⁷ Idem

MODE DE TRANSPORT PRECONISE

Comme on le voit, les **transports terrestres sont très bien organisés et éprouvés**. Ils permettent de manipuler au minimum la caisse. Les ruptures de charge sont les moins nombreuses, le kilométrage entre la France et le Royaume-Uni est réduit à son minimum. C'est pourquoi il nous semble que ce mode de transport doit être privilégié pour le déplacement transfrontalier de la Tapisserie de Bayeux.

RISQUES INHERENTS AU SUPPORT DE TRANSFERT

Les fibres constitutives de la Tapisserie sont particulièrement fragilisées notamment par les tractions exercées par la gravité mais également par des contraintes horizontales. Ces zones sensibles seront inévitablement de nouveau sollicitées au moment de sa sortie de vitrine et son conditionnement, par les mouvements et torsions nécessaires mais maîtrisés. Bien qu'optimisées, les manipulations qui seront menées lors de sa future extraction ne seront pas, en effet, sans impact sur son état de conservation.

La fragilité de la Tapisserie sera toujours critique une fois qu'elle sera conditionnée dans le support de transfert.

DESCRIPTION DU SUPPORT DE TRANSFERT

Le support de transfert est un **système de paravent** permettant une disposition de la Tapisserie en accordéon²⁸ (Fig.8). Il se compose de 28 paravents, en bois²⁹ pour les bâtis, et de plaques de polycarbonate alvéolaire pour les panneaux. **La Tapisserie est disposée à la verticale**, suspendue à un câble en acier tendu en partie haute des paravents à l'aide de séries de petites pinces³⁰ placées au niveau de la bande de dossier conservée. Des tubes de mousse (PE)³¹ seront placés dans les replis externes et internes de la Tapisserie aux extrémités des panneaux pour éviter la formation de pli et apporter une certaine souplesse au système, en faisant office de matériaux tampon.

²⁸ Voir *Étude préalable* - octobre 2021 - Volet 1 "Extraction" p. 32.

²⁹ Le prototype avait été réalisé avec du sapin, mais pour un mobilier se stockage (moyen à long terme), une autre essence de bois ou un traitement de surface est à envisager.

³⁰ Idem p.33.

³¹ Tubes de polyéthylène (PE) employés comme isolants thermiques : petits pour plis internes (diamètre extérieur 3,5 cm), grands pour plis externes (diamètre extérieur 8 cm)
<https://www.plomberie-pro.com/Catalogue/chauffage/chaufferie/isolant-pour-tube/tube-isolant-prefendu-climaflex-13-mm-en-1m/d119116a.htm> (page consultée le 20/02/2022).

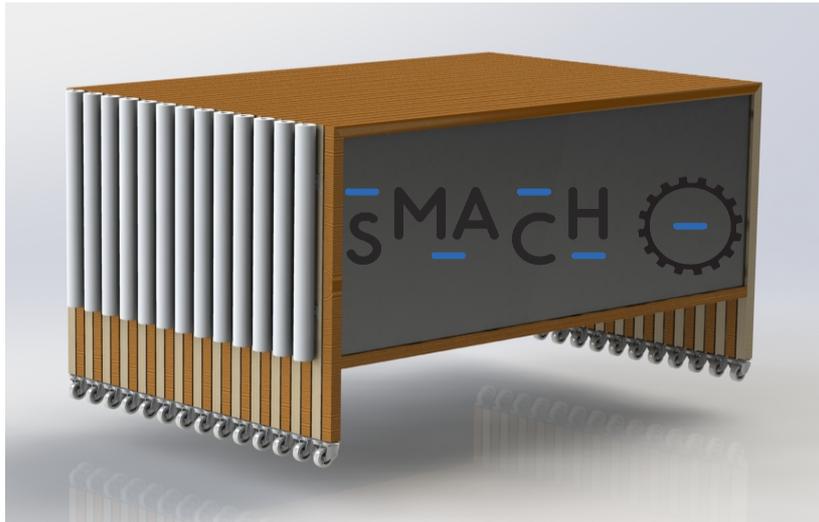


Figure 8. Support de transfert une fois fermé.
Dessin technique S-MA-C-H, conception du système collaboration ETC-S-MA-C-H-Concilio

Les pinces employées lors des simulations (Fig.9) décrites dans le rapport de l'étude 2021³² ont montré de bonnes performances à la traction notamment. En revanche, le système de crochets dont elles sont équipées, ne permet pas de sécuriser l'accroche lors de mouvements.

Des mousquetons de très petite taille (Fig.10) pallient ce problème tout en facilitant le geste de mise en place sur le câble puis de retrait lors de l'installation de la Tapisserie sur le plan de travail. Ces mousquetons ont une structure en acier galvanisé, couplée de loquets à ressorts pour une connexion simple et rapide (ouverture et fermeture).

Des pinces compatibles avec ces mousquetons ont été testées (Fig.10) mais elles complexifiaient la mise en place. Le temps d'installation du système de suspension de la Tapisserie pour son transfert est un critère important à prendre en compte pour la sélection des différents éléments. Ces pinces n'ont pas été retenues, les recherches pour des pinces plus adaptées se poursuivent.



Figure 9. Pinces métalliques employées lors des simulations d'extraction (Etude 2021).



Figure 10. Exemple de pinces testées, et de mousquetons sélectionnés. Ces mousquetons ont un diamètre de 4 mm, une longueur totale de 40 mm et une ouverture de 5 mm

³² Voir Étude préalable, octobre 2021 - Volet 1 "Extraction" p. 33.

LES RISQUES INHERENTS A SON USAGE

Malgré un scénario d'extraction très abouti et un design optimisé du support de transfert, un certain nombre de contraintes vont s'exercer sur la Tapisserie lors de son installation sur cette structure.

Les tensions horizontales

Des contraintes peuvent apparaître lors du positionnement de la Tapisserie sur le support, au moment du transfert ou de la disposition des tubes en mousse (PE) dans les replis (Fig. 11).

Par ailleurs, si les panneaux ne sont pas fortement solidarifiés, même le plus léger va-et-vient pourrait engendrer un mouvement qui exercerait des tensions horizontales supplémentaires sur la toile et les broderies.



Figure 11. Représentation des risques mécaniques liés au conditionnement sur le support de transfert : mouvements des panneaux, va-et-vient horizontaux et verticaux.

Les tensions verticales

Elles sont principalement engendrées par la suspension de la Tapisserie. Sa technique de fabrication est une autre source de contraintes (poids des broderies de laine ancrées dans une toile de lin aujourd'hui trop fragile). La doublure ancienne ne permet aucun soutien et aucune répartition de ces tensions.

Ces tensions verticales pourraient être accentuées (dans les deux sens verticaux) lors du déplacement de la Tapisserie, en particulier par des effets de vibrations.

Là encore, les panneaux devront être fortement solidarifiés, pour limiter les vibrations et les mouvements qui exerceraient des tensions verticales supplémentaires sur la toile et les broderies.

Le risque de cisaillement

D'autres tensions ou torsions de type cisaillements pourraient également apparaître lors du déplacement de l'ensemble des panneaux s'ils ne sont fortement pas solidarisés.

Pour minimiser ces premiers types de risques, nous préconisons une mise en œuvre du conditionnement sur le support de transfert par une équipe formée et encadrée par des conservateurs-restaurateurs de textiles.

Par ailleurs, nous conseillons la conception d'un dispositif pour rendre solidaires tous les panneaux entre eux.

Les frottements

Il convient de prévoir une protection des deux faces pour éviter tout frottement et faciliter les manipulations sans préhension directe de la Tapisserie.

La Tapisserie extraite de son local actuel sera **protégée à l'arrière** (côté de la doublure du XVIIIème siècle) par un matériau de remplacement (voir Fig.12) une fois le dossier allégé.

Une **toile de coton**³³ semble le matériau le plus adapté, en raison des qualités suivantes :

- Légèreté
- Souplesse
- Légèrement agrippant pour permettre une bonne accroche à la doublure ancienne et donc à la broderie

Elle servira également de support de manipulation lors de la mise en place de la Tapisserie sur le plan de travail.

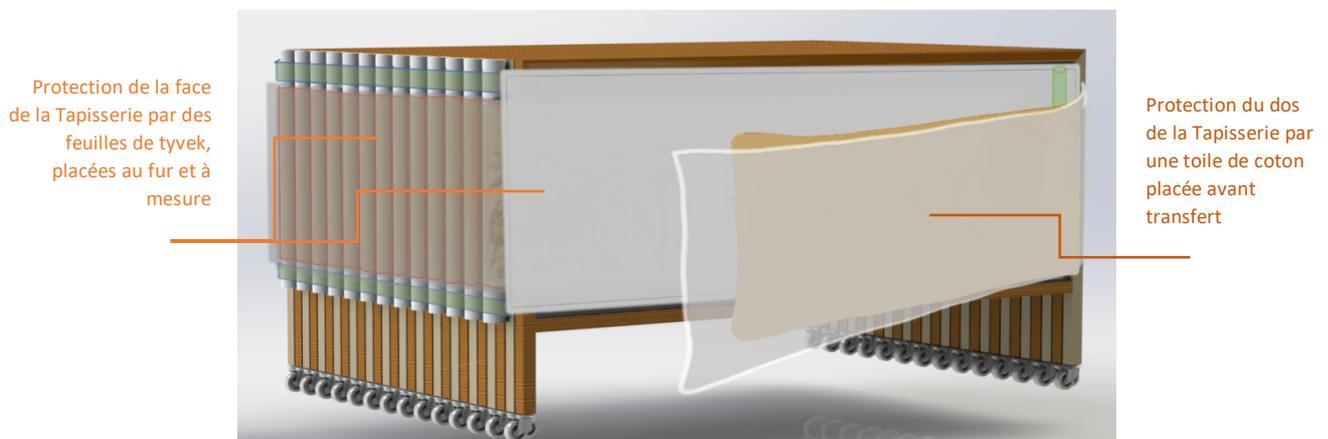


Figure 12 : Représentation de la Tapisserie suspendue dans le support de transfert. La face de la Tapisserie est recouverte de feuilles de Tyvek® avant fermeture des panneaux du paravent.

Une fois les panneaux rabattus les uns contre les autres, la Tapisserie est disposée face contre face, il est donc indispensable d'isoler les parties brodées les unes des autres pour éviter tout frottement.

³³ Gamme des toiles écruées lavées, chez Rauch : Crétonne N° 2534 ; à défaut Calicot N°2928 <https://www.rauch-sa.fr/confection/> (page consultée le 20/02/2022).

Des feuilles de Tyvek®³⁴ (voir Fig.12) seront disposées sur chacun des panneaux au fur et à mesure de l'installation de la Tapisserie dans les paravents afin d'assurer cette séparation.

Le Tyvek® est couramment employé pour le conditionnement des œuvres d'art. Il possède des caractéristiques mécaniques indispensables : légèreté et solidité.

Il possède une **face lisse, qui sera placée sur la face** et permettra d'éviter une adhérence malencontreuse de la broderie sur elle-même.

La Tapisserie doit être protégée en surface par des matériaux stables, compatibles avec l'œuvre et dont les propriétés répondent aux besoins différents des deux faces. Nous recommandons une toile de coton pour le dos et du Tyvek® pour la face.

Les plis et les embus

La surface de la Tapisserie est couverte de plis et d'embus comme l'a montré le constat d'état de 2020³⁵. Certains de ces plis sont dus à la technique de broderie, d'autres sont liés à des contraintes subies par la toile de support des broderies (ex. galon dans la partie inférieure, reprises inadaptées, empiècements contraignants...). Les manipulations et le maintien dans le paravent pourraient accentuer ces dégradations.

Une interface de Tyvek® (voir Fig.13), côté lisse placé en contact des broderies, doit permettre à la Tapisserie d'avoir un tombé naturel sans contrainte et ainsi éviter de nouveaux plis en cas d'adhésion malencontreuse de la broderie sur elle-même.

Les tubes de mousse (PE)³⁶ placés dans les replis externes et internes de la Tapisserie, aux extrémités des panneaux doivent éviter la formation de plis verticaux (voir Fig.13) mais leur mise en place doit être maîtrisée pour ne pas entraîner des nouvelles déformations et de nouveaux plis sur le reste de la broderie.

³⁴ Voir Fiche technique en Annexe 4, p.62. Le Tyvek® est fabriqué à 100 % de fibres de polyéthylène haute densité disposées et compressées aléatoirement pour former un tissé solide.

³⁵ Voir *Étude Préable-Constata d'état*, juin 2020, p.35.

³⁶ Tubes de polyéthylène (PE) employés comme isolants thermiques : petits pour plis internes (diamètre extérieur 3,5 cm), grands pour plis externes (diamètre extérieur 8 cm).

<https://www.plomberie-pro.com/Catalogue/chauffage/chaufferie/isolant-pour-tube/tube-isolant-prefendu-climaflex-13-mm-en-1m/d119116a.htm> (page consultée le 20/02/2022).

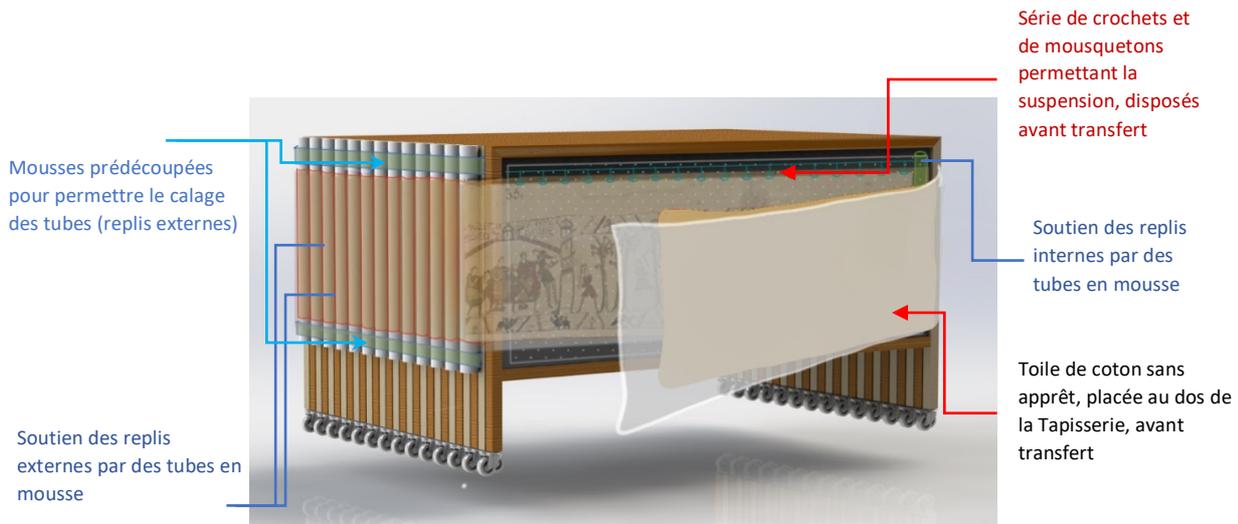


Figure 13. Représentation de la Tapisserie suspendue dans le support de transfert. Une toile de coton est placée à l'arrière de l'œuvre, une feuille de Tyvek sur la face et des tubes de mousse dans les replis.

Enfin, pour éviter tout enfoncement de la Tapisserie à l'intérieur des panneaux (les montant en bois débordent légèrement des plaques de polycarbonate, formant une déclivité au centre), ces derniers sont recouverts d'une **mousse de Plastazote**³⁷ (voir Fig.14) permettant de rattraper le niveau des montants. On évite ainsi que des déformations, des usures voire des déchirures ne se produisent au contact de la broderie avec les arêtes des montants.



Figure 14 : Habillage des panneaux de polycarbonate par des plaques de mousse de plastazote® (Réalisé en amont de l'extraction).

Un ensemble de matériaux de protection/tamponnage (tubes dans les replis, Tyvek® d'interface...) doit permettre d'éviter la formation ou l'accentuation de plis ou de déformations dans la Tapisserie, à condition que leur mise en place soit maîtrisée.

³⁷ Voir fiche technique en annexe.

Les écrasements

La disposition en accordéon engendre des risques d'écrasement de l'œuvre notamment au moment de la fermeture des panneaux du paravent, au niveau des montants de la structure du côté des replis externes. Il existe également un risque d'écrasement à l'emplacement des replis internes.

Pour éviter ces phénomènes, nous prévoyons de placer des **taquets séparateurs (cales)** entre les panneaux du paravent (voir Fig. 21). Ces cales, en bois, disposées dans les angles des panneaux, seront les points de contact des panneaux entre eux lors du repli de la structure, assurant un espace libre pour la Tapisserie.

Des taquets séparateurs entre les panneaux du support de transfert assureront, une fois l'ensemble refermé, que des espaces soient conservés pour accueillir la Tapisserie sans exercer la moindre pression.

ADAPTATION DU SYSTEME POUR UN TRANSPORT TRANSFRONTALIER

UN TRANSPORT A PLAT

Comme nous l'avons plusieurs fois rappelé, la Tapisserie de Bayeux est un objet extrêmement fragile malgré les apparences. La toile de lin qui porte les broderies de laine colorées et assure la cohésion de l'ensemble est très faible, elle présente déjà de nombreuses altérations mécaniques.

Si la solution d'extraction envisagée tolère que la broderie reste à la verticale le temps de rejoindre un lieu de restauration à proximité du musée, le support de transfert n'a pas été conçu pour un transport de longue distance ou un stockage de quelques semaines, avec tous les risques que nous avons précédemment évoqués.

Il n'est donc pas possible de laisser la Tapisserie suspendue sur ce support pour une telle opération, alors qu'elle est uniquement maintenue par couture dans sa partie supérieure. Les chocs et vibrations, les tensions qu'elle pourrait subir, si elle est à la verticale, pourraient occasionner des dommages irréversibles.

Nous devons prévoir que la Tapisserie puisse **voyager à plat**, dans le support de transfert. Cette position diminue fortement les tensions exercées sur la broderie, de plus, à l'horizontale, elle reposera sur une surface plane.

Il faut donc concevoir un système pour **solidariser l'ensemble, le sécuriser, le basculer sur un côté et le conditionner pour un long transport.**

Un basculement du support de transfert dans la position horizontale³⁸ s'impose pour notamment réduire les tensions et les mouvements de la Tapisserie lors d'un transport.

DESCRIPTION DU DISPOSITIF DE TRANSFERT

A cette étape de la description, la Tapisserie est sortie de sa vitrine, maintenue sur le support de transfert avec sur sa face et son revers, des interfaces isolantes.

Ce que nous appelons **dispositif de transfert** est l'ensemble constitué du support de transfert et des équipements visant à le passer à l'horizontale et à le transporter.

SOLIDARISER L'ENSEMBLE

Le support de transfert devra être **solidarisé pour limiter tout mouvement vibratoire** de la Tapisserie pendant son transport. Les panneaux ne devront plus bouger.

³⁸ Voir dans la présente étude, « Description du basculement du dispositif de transfert » p. 27.

Pour cela, les roues seront bloquées par des freins qui pourront aussi être filmés³⁹ avec du film étirable de type industriel, puis l'ensemble sera maintenu par des **bâtis de ceinturage** en profil aluminium de 40x40 mm (voir Fig. 15 et 16).

Les profils aluminium ont été choisis pour leur polyvalence et leur facilité d'installation. Leurs modularités leur permettent d'installer des accessoires et des systèmes de guidage linéaire. L'aluminium est un métal très résistant à la corrosion et moins dense que l'acier (donc moins lourd). Ces profils devront être équipés de poignées pour accompagner la manipulation au cours du basculement entre la position verticale à la position horizontale du dispositif⁴⁰.

PERMETTRE LE PASSAGE A L'HORIZONTALE

Un système constitué de **deux bases semi-circulaires** (voir Fig. 15 et 16), placé en dessous et compatible avec les profils aluminium, a été conçu afin d'accompagner le basculement du dispositif.

Les deux éléments semi-circulaires seront installés en partie inférieure du dispositif de transfert. Ils seront directement fixés sur les bâtis de ceinturage par encastrement et vissage dans les profils aluminium qui les constituent. Ces éléments apporteront par ailleurs un lestage de la partie inférieure de la caisse. Cela facilitera l'opération de rotation en abaissant le centre de gravité du dispositif et simplifiera la manipulation générale.

Le système de basculement semi-circulaire et les poignées se démontent lorsque le dispositif est à l'horizontale, avant la mise en caisse par le transporteur.

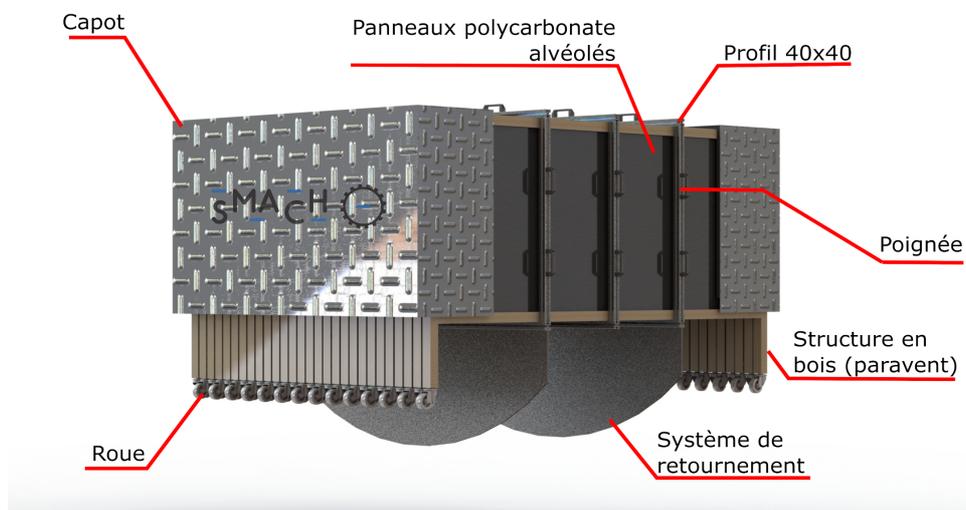


Figure 15. Dispositif de transfert à la verticale avec annotation des différentes parties

³⁹ Les roues seront bloquées par des freins et l'ensemble emballé afin de stopper tout risque de mouvement et donc de vibration au sein de la caisse de transport.

⁴⁰ Voir dans la présente étude, « Description du basculement du dispositif de transfert » p.27.

SECURISER LA TAPISSERIE

Des **capots latéraux** viendront se glisser sur les bords du support de transfert afin d'apporter une protection rigide supplémentaire à la Tapisserie au niveau des replis externes (voir Fig. 15 et 16). Ces capots sont en tôles d'aluminium de 1.5 mm d'épaisseur et capitonnés de mousse de 200 mm d'épaisseur recouvert de Tyvek® pour éviter toute abrasion.

Les cales en mousses⁴¹ (voir Fig. 22 à 26) disposées dans les parties supérieure et inférieure des tubes, (au-dessus et sous la Tapisserie) empêcheront le contact direct avec la broderie au niveau des replis externes, par une mise à distance de quelques centimètres.

Les capots devront être vissés au support de transfert au niveau des montants verticaux en bois afin d'assurer une bonne stabilité de l'ensemble et pour réduire toute possibilité de mouvement au sein de la caisse de transport.

Le dispositif mesurera 2685 x 1420 x 1750 mm avec les roues et sans le système de retournement⁴², pour un poids estimé à un maximum de 750 kilos.

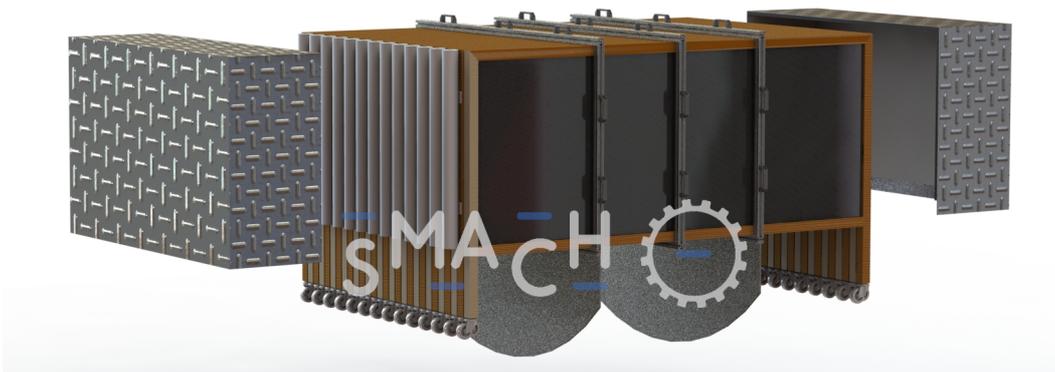


Figure 16 : dispositif de transfert en vue éclatée

DESCRIPTION DU BASCULEMENT DU DISPOSITIF DE TRANSFERT

SOLIDARISATION

Après la solidarisation complète du support de transfert (paravent et bâtis de ceinturage comme décrits précédemment) et l'ajout des capots, **cet ensemble formera le dispositif de transfert.**

La solidarisation de tous les éléments est nécessaire pour éviter tout phénomène de résonance qui pourrait faire vibrer la Tapisserie pendant les manipulations et le transport.

Avant la pose des bâtis de ceinturage un film de protection de type Tyvek® pourra être mis en place⁴³.

⁴¹ Voir fiche technique en Annexe 5 p. 63 : Cales en éthafoam® (mousse polyéthylène).

⁴² Voir fig. 15 pour la nomenclature, il s'agit de l'élément semi-circulaire. Il sera assez lourd (~60 kg) et donc exclu du calcul de la masse car il ne rentrera pas dans la caisse du transporteur.

⁴³ Voir dans la présente étude, « Caisserie de transport » p. 33.

BASCULEMENT

Le basculement sera facilité par deux bases semi-circulaires (voir Fig. 15 et 16) qui seront l'élément essentiel de ce système et permettront un changement de position manuel. Cette solution a l'avantage de minimiser les moyens matériels et humains, limitant ainsi les moyens logistiques à l'essentiel. Hormis leur intérêt pour accompagner le mouvement, ces éléments apporteront un lestage de la partie inférieure de la caisse. Cela facilitera l'**opération de rotation** en abaissant le centre de gravité du dispositif et simplifiera la manipulation générale.

Le basculement devra être assuré par un minimum **de huit à dix personnes**. Le dispositif tel qu'il est prévu, offre un nombre de poignées relativement important pour une meilleure préhension du dispositif et le déroulement sans gêne pour tous les opérateurs.

L'ensemble du dispositif sera alors accompagné manuellement, basculé sur un côté pour être couché sur un de ses flancs (Fig. 17 et 18).

Le système de basculement et les poignées seront retirés une fois que le dispositif de transfert sera en position horizontale.

NB. : Il sera indispensable de transporter le système de basculement et les poignées avec l'œuvre, à Londres, afin que les équipes puissent repositionner le support de transfert à la verticale.

Des calages adaptés pourront être préalablement intercalés avant que le dispositif ne rentre en contact avec le sol. Cela permettra de sécuriser la manipulation et évitera tout risque d'écrasement des doigts au moment où l'ensemble viendra reposer au sol. Le calage préalable facilitera aussi la reprise de la charge avec un élévateur.

CAISSE INTERNE

Une fois en position horizontale, le dispositif de transfert peut être habillé de mousse de polyéthylène et de contreplaqué pour former la **caisse interne**. Une étude supplémentaire, avec simulation sur le terrain, permettra d'établir le meilleur protocole d'assemblage de la caisse interne autour du dispositif de transfert : poser le dispositif directement sur fond de caisse puis assembler les parois autour, lever et déposer dans caisse déjà partiellement assemblée.



Figure 17 et Figure 18 : Vue du dispositif de transfert à l'horizontale, sans le système de basculement, prêt à être mis dans la caisse du transporteur

Dans ce scénario, les roulettes des paravents resteraient en place pour l'opération inverse de remise à la verticale. Elles seront bloquées par des freins, voire emballées afin de stopper tout risque de mouvement et donc de vibration au sein de la caisse de transport.

AMENAGEMENTS INTERNES DU SUPPORT DE TRANSFERT

OBJECTIFS

Les matériaux choisis pour le conditionnement devront soulager **les tensions au moment du changement d'axe et durant le transport.**

En position initiale, la Tapisserie sera maintenue à la verticale, dans le support de transfert fermé. Dans la perspective de son déplacement puis de son changement de position, et enfin de son transport, nous prévoyons la mise en place d'un ensemble de mesures à l'aide d'interfaces appropriées (voir Fig.19) et de systèmes garantissant la sécurité de la Tapisserie. Ces mesures permettront en effet de réduire au maximum les mouvements de la Tapisserie.

RISQUES DE DECROCHEMENT DE LA TAPISSERIE

L'ancien système de pinces et crochets a été pensé pour un déplacement vertical, le long des câbles durant l'extraction puis au moment de la disposition sur le support de transfert. La petite taille des crochets et le propre poids de la Tapisserie laissaient penser qu'il n'y avait pas de risque de décrochement au cours de ces manipulations. Les crochets facilitaient même le passage d'un câble à l'autre.

Pour le basculement à l'horizontale et le transport, il en est autrement. Il nous semble en effet plus sûr de prévoir un système qui se ferme et s'ouvre facilement comme avec le système de pinces et **mousquetons** décrit précédemment⁴⁴ pour **éviter que la Tapisserie ne se décroche du câble.**

RISQUES DE GLISSEMENTS

Si la Tapisserie était simplement suspendue et libre à l'intérieur des panneaux rabattus (sans maintien), le moindre mouvement du support de transfert pourrait engendrer des contraintes, des plis et des déformations ainsi que des ruptures de la toile et/ou des parties brodées, y compris à la verticale. Lors du basculement et du transport, il est évident que sans maintien l'œuvre subira des dommages.

⁴⁴ Voir dans la présente étude, « Description du support de transfert » p. 17

Nous prévoyons pour pallier ce risque et **l'empêcher de « flotter »** entre les panneaux, des tamponnages et des calages (voir Fig.19) :

- La toile de coton, prévue en amont de l'extraction, au revers de la broderie, permettra une légère accroche dans le même temps, à l'habillage présent sur les panneaux et à la doublure du XVIII^{ème} siècle.
- Une nappe de ouate de polyester (voir Fig.19) sera placée entre les deux feuilles de Tyvek[®] de protection de la face de la Tapisserie⁴⁵. Elle permettra dans le même temps de maintenir une légère pression sur l'ensemble des épaisseurs à l'intérieur des panneaux pour éviter que la Tapisserie ne bouge, et servira de tamponnage, grâce à sa souplesse, pour ne pas écraser les broderies, ainsi que les plis et embus déjà présents sur la Tapisserie.
- Les feuilles de Tyvek[®] précédemment évoquées, possèdent une face lisse placée sur la face de la Tapisserie pour la protéger des risques de contacts et des frottements. Les légers reliefs présents sur l'autre face des Tyvek[®] s'accrocheront à la nappe de ouate de polyester ce qui la maintiendra en place.

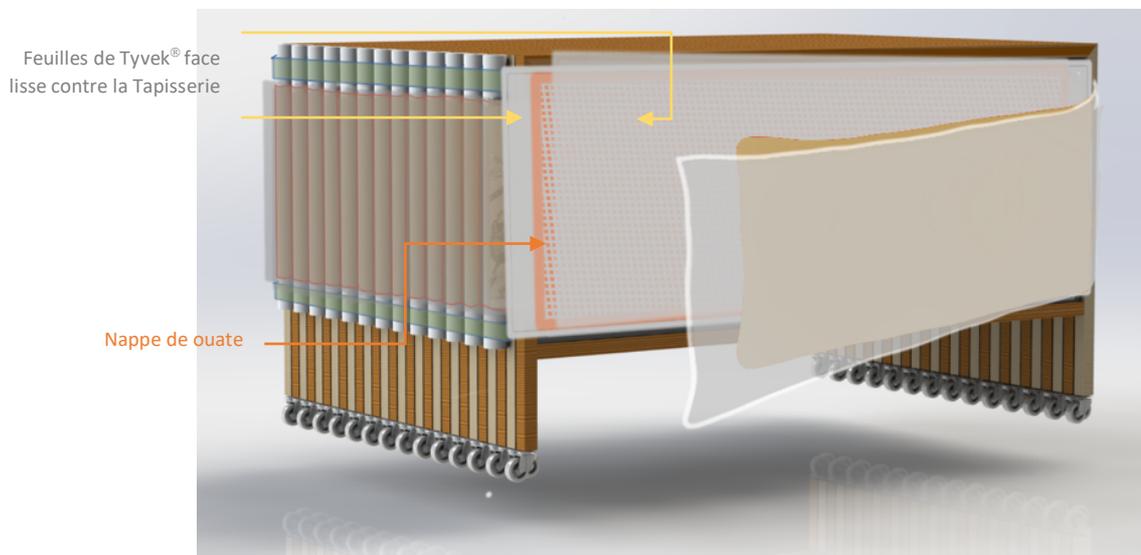


Figure 19 : Schéma représentant le support de transfert et les différentes interfaces de protection et de tamponnage

RISQUES D'ECRASEMENT

Comme nous l'avons proposé dans les aménagements du paravent, nous prévoyons de placer des **taquets séparateurs** (cales) entre les feuilles (panneaux) du paravent. Ces éléments, s'ils sont déjà indispensables pour le support de transfert en position verticale, le seront d'autant plus dans la perspective du changement de position nécessaire au transport du paravent.

On comprend que cet aménagement isole les panneaux du paravent les uns des autres. Il permet en effet aux parties qui se trouveront en bas du dispositif pendant le transport, de ne pas supporter le poids de l'intégralité du paravent qui reposera sur elles.

⁴⁵ Voir dans la présente étude, « Les frottements » p.20.



Figure 20 : Emplacement des taquets/cales séparateurs et des tubes en mousse (PE) pour éviter tout risque d'écrasement.

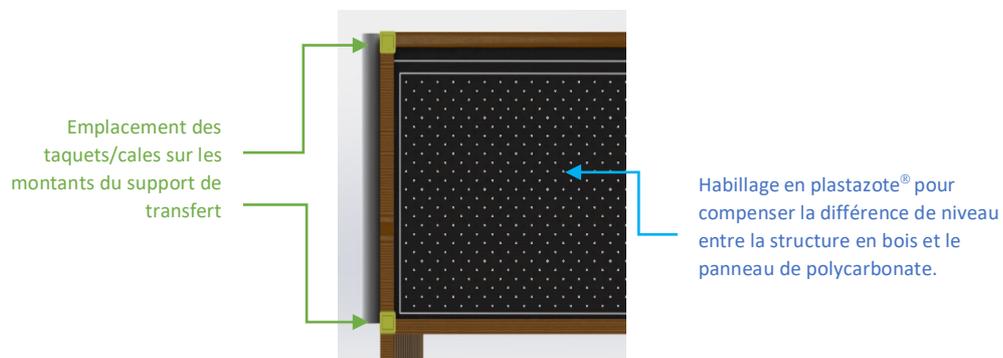
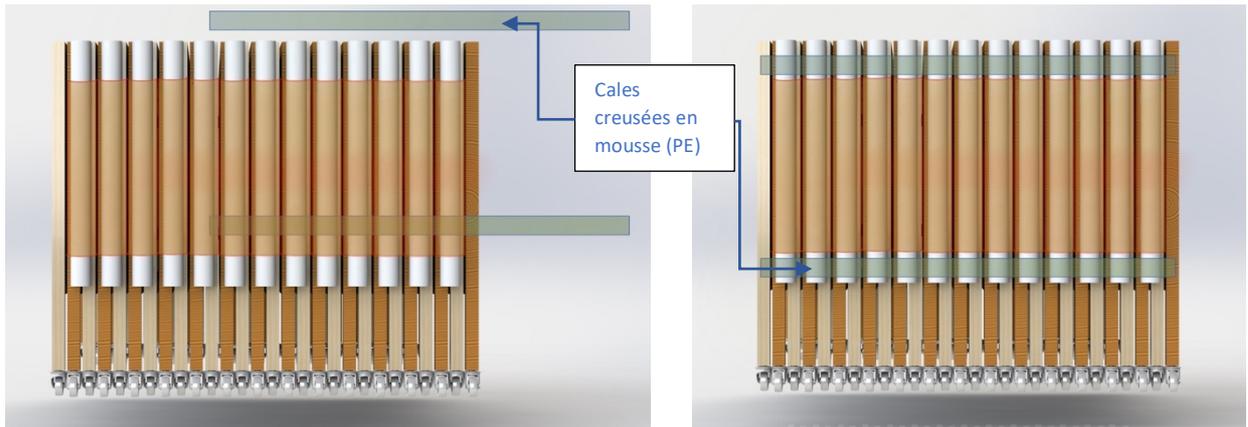


Figure 21 : Emplacement des taquets/cales pour éviter l'écrasement de la Tapisserie entre deux panneaux.

Les risques d'écrasement des plis et des embus sont évoqués dans le paragraphe précédent.

Concernant les **replis externes**, maintenus en forme par les tubes en mousse testés lors des simulations⁴⁶, ils se retrouveront superposés une fois le dispositif placé à l'horizontale. Nous prévoyons la mise en place de **cales creusées en forme, en éthafom**[®] (voir Fig. 22 à 25) afin de permettre une mise à distance pour éviter le contact des replis avec les parois de la caisse interne, et un espacement des tubes, les uns par rapport aux autres durant le maintien en position horizontale.

⁴⁶ Voir Étude préalable-Préconisations de conservation pour l'exposition et la manipulation de la Tapisserie de Bayeux, octobre 2021 - BajonBouزيد, Déjean, Aparicio Bentz, S-MA-C-H, Concilio Ergonomie.



Figures 22 et 23 : Schémas représentant la mise en place de cales creusées en mousse (PE), au-dessus et sous la Tapisserie, maintenant les tubes écartés.

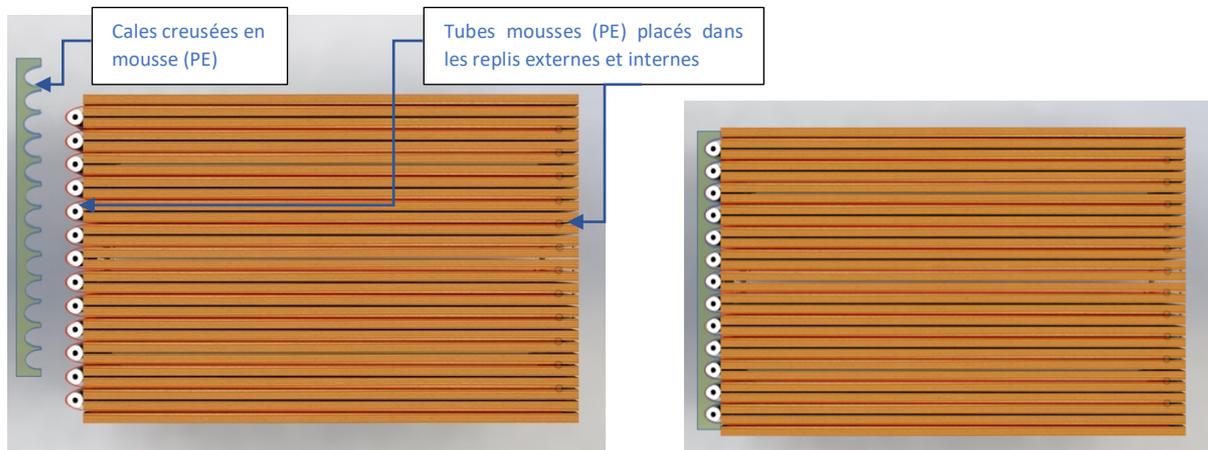


Figure 24 et Figure 25 : Schémas, vue du dessus, emplacement des tubes de mousses (PE) présents dans les replis externes et internes, et mise en place des cales creusées.

Les **replis internes** se logeront dans les espaces existants entre les panneaux de polycarbonate et leur encadrement par la structure (voir emplacement du **tube en mousse** (PE) Fig.20).

CAISSERIE DE TRANSPORT

Pour la Tapisserie, une caisse devra être spécialement conçue, selon les concepts généraux énoncés ci-dessous. Par souci de clarté, une caisse type est décrite pour présenter les concepts et déterminer les éléments techniques (voir Fig. 26). Ces éléments techniques peuvent être disposés de façon légèrement différente, selon les solutions proposées par les transporteurs. Le principe général de protection reste le même.

LES DIFFERENTES CAISSES

La caisse de transport externe est une coque rigide, protégeant des chocs les plus importants. Des poignées sont en général présentes sur les parois de cette caisse externe pour faciliter la manipulation. Les parois internes de la caisse peuvent être couvertes d'une ou plusieurs couches isothermes, séparées d'un vide d'air, pour protéger l'œuvre des variations climatiques.

A l'intérieur de cette caisse de transport, une ou plusieurs caisses peuvent être présentes. Ces **caisses internes** ont pour rôle de protéger l'œuvre des contraintes mécaniques telles que les chocs et vibrations. Les systèmes d'amortissement sont en général placés au plus proche de l'œuvre à transporter. Le type, le nombre d'amortisseurs et leur placement dépendent des propriétés de l'œuvre à transporter (montage sur le support de transfert, dimensions, masse, répartition de la masse, fréquences propres, courbe de fatigue) et du design des caisses de transport (orientation de l'œuvre au sein de la caisse, orientation de la caisse, géométrie et matériaux de la caisse). L'œuvre elle-même peut être protégée par un emballage semi-rigide ou rigide (**caisse ou paquet interne**), mais cela n'est pas automatique.

Exemple de triple caisse (Hasenkamp, Allemagne)



https://kortmann.nl/wp-content/uploads/2020/06/Packing_catalogue_EN_2020.pdf

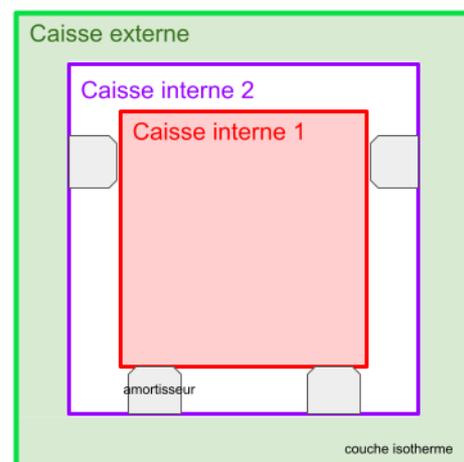


Figure 26 : Exemple de triple caisse isotherme disponible chez un transporteur spécialisé, Hasenkamp/Kortmann (gauche). Les différents éléments de la caisse sont explicités dans la coupe transversale schématique (droite)

LES PHENOMENES DE FATIGUE

Les altérations induites par les chocs et vibrations sur les objets du patrimoine sont depuis longtemps observées par les conservateurs-restaurateurs et autres personnes en charge des transports de collection. Toutefois, les **phénomènes de fatigue dus aux vibrations** ne sont pas encore assez bien compris dans le domaine du patrimoine et les études permettant de prédire l'accumulation de micro-altérations sur des matériaux anciens restent rares⁴⁷. En l'absence de données scientifiques applicables aux œuvres d'art, une approche au cas par cas est adoptée la plupart du temps.

Afin de protéger efficacement une œuvre d'art contre les vibrations et chocs générés pendant le transport, les données suivantes sont nécessaires :

- dimensions,
- masse,
- état de conservation,
- fréquence propre,
- courbe de fatigue (de type diagramme Wohler).

Ces données sont indispensables pour développer ou sélectionner une solution d'amortissement efficace et adaptée aux besoins de l'œuvre⁴⁸. Dans le cadre de cette étude, nous avons eu accès à un constat d'état détaillé et nous avons pu **estimer** les dimensions et masse de la Tapisserie seule et dans un dispositif de transfert⁴⁹.

La masse exacte de la Tapisserie, après retrait du dossier et installation du nouveau doublage, devra être mesurée précisément pour affiner le choix d'amortissement.

La fréquence propre et la courbe de fatigue ne sont pas connues et nécessitent une étude mécanique dédiée.

En l'absence d'étude mécanique vibratoire, notre équipe ne peut pas fournir une solution d'amortissement propre à la Tapisserie.

Nous pouvons néanmoins fournir un aperçu des systèmes d'amortissement de vibrations couramment utilisés dans le transport d'œuvres d'art.

LES TYPES D'AMORTISSEMENT DE VIBRATIONS

Il existe à l'heure actuelle deux types d'amortissement : actif et passif.

- Le **principe du contrôle actif** est d'ajouter un signal de commande pour annuler une vibration environnante, à l'aide d'un système électrique. Suivant le principe des casques anti-bruit, un système est capable de capter et d'analyser l'environnement vibratoire et de calculer le profil vibratoire qui permettra d'annuler les vibrations entrantes. Il repose sur la capacité de deux ondes (vibrations) en opposition de phase à se compenser. Le contrôle actif des vibrations est déjà utilisé dans l'industrie mais il n'est pas encore applicable pour le transport des œuvres d'art (connaissance mécanique des œuvres, limites de la technologie embarquée, budget). Il a

⁴⁷ Mecklenburg, Tumosa, 1991; Sauvage, Wei, Martinez, 2018; Wei, Sauvage, Wolk, 2014.

⁴⁸ Pour un exemple du type de mesures mécaniques nécessaire, voir Wei, Dondorp, 2020.

⁴⁹ Voir dans la présente étude, « Sécuriser la Tapisserie » p. 26

été employé pour le contrôle des instruments de musique en jeu, afin de modifier le timbre ou la puissance d'instruments⁵⁰.

- Les **solutions d'amortissement passif** sont les plus courantes dans le domaine du transport d'œuvres d'art⁵¹. Ils ne comportent pas de composants électroniques et ne permettent pas de répondre en temps réel à des changements d'environnement vibratoire. Ils sont conçus pour amortir des vibrations dans une gamme prédéfinie. Pour le transport d'œuvres d'art, ces systèmes fonctionnent généralement avec des doubles voire triples caisses (voir Fig. 26).

SYSTEMES D'AMORTISSEMENT DE VIBRATIONS EXISTANTS

Nous présentons ci-dessous une liste indicative des **amortisseurs passifs** actuellement disponibles sur le marché.

Supports antivibratoires élastomères

De type Paulstradyn® (Hutchinson Paulstra, France) ou Série SSTN (Sebert, Allemagne)



Figure 27 : Exemple de support antivibratoire Paulstradyn®.
Source : <https://www.paulstraindustry.com/fr/gammes/supports-antivibratoires-elastomere/paulstradyn-support-antivibratoire> (page consultée le 17/02/2022)



Figure 28 : Exemple de support antivibratoire type SSTN.
Source : sebert.org/en/products-solutions/elastomer-mounts-isolators (page consultée le 17/02/2022)

Développés pour l'isolation industrielle vibro-acoustique d'équipements industriels, ces amortisseurs ont une structure en métal galvanisé, couplée à un habillage en élastomère de haute performance, capable d'amortir une gamme de vibrations données, dans une, deux ou trois directions (voir Fig. 27 et 28).

Un exemple de leur utilisation dans des caisses de transport est donné en Fig. 29 et 30.

⁵⁰ Boutin, 2011.

⁵¹ Les recherches s'orientent principalement sur les peintures sur toile. Voir Costain, 1991 ; Genevaux, 2007 ; Green, 1991a et 1991c ; Guerin, 2017 ; Lauchli, 2014 ; Marcon, 1991a et 1994 ; Mecklenburg, 1991 ; Staniforth, 1984.

Les atouts de ces amortisseurs pour la Tapisserie sont les suivants :

- **Capacité à soutenir des charges mécaniques importantes.** Si leur nombre est multiplié dans la caisse de transport, ils peuvent supporter la masse du dispositif de transfert. Leur positionnement au sein de la caisse dépend de la répartition de la masse de l'œuvre au sein de la caisse et des connexions possibles avec les parois en contact.
- **Amortissement efficace dans le domaine de fréquence actif pendant le transport (10-100 Hz).** Paulstra indique une atténuation supérieure à 90% à 25 Hz. La fréquence propre de ces systèmes se situe entre 3 et 7 Hz (variation selon les modèles et direction), ce qui signifie qu'ils peuvent entrer en résonance au moment des manipulations manuelles (<10 Hz). Il est conseillé donc de les utiliser pour les périodes de manipulation assistée mécaniquement et de transport routier. Les manipulations manuelles seront limitées aux étapes préalables à la mise en caisse (extraction, installation dans le support de transfert, solidarisation du dispositif de transfert et basculement), avant installation du système d'amortissement. Si ce système d'amortissement est sélectionné, il n'y aura pas d'effet de résonance à prévoir.
- **Montage simple,** par vissage dans une structure rigide (caisse de transport).

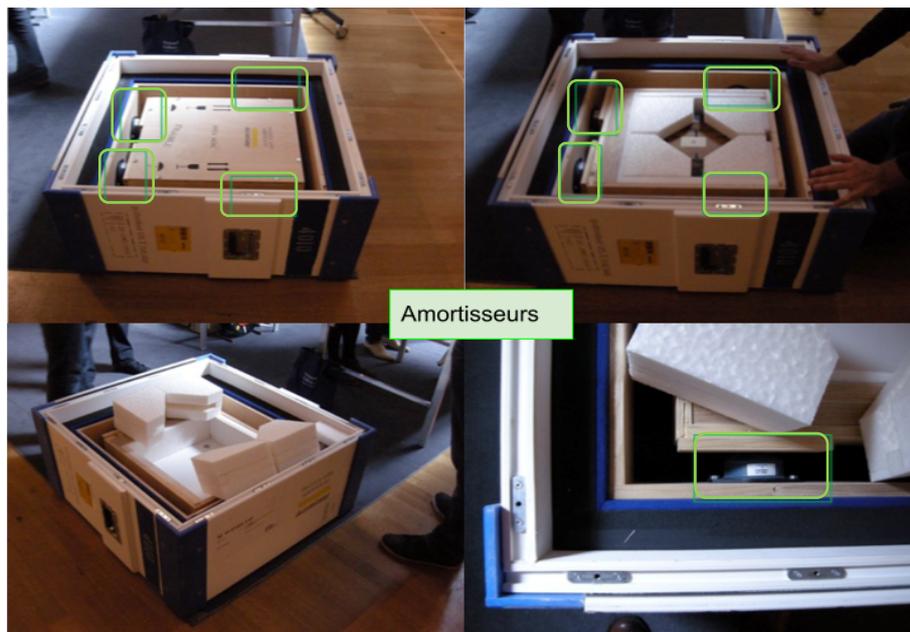


Figure 29 : Caisse de transport triple, développée par Hassenkamp, pour une peinture sur panneau de bois sensible aux vibrations. Les amortisseurs (Paulstradyn) sont placés entre la caisse interne et secondaire, ils sont indiqués en vert sur les images ©L.Sauvage, S-MA-C-H



Figure 30 : Caisse “Vario-System” développée par la société de transport Hasenkamp. Cette caisse est réutilisable et s’adapte à différents formats grâce aux coins ajustables. L’amortissement des vibrations est garanti par des amortisseurs élastomères, places entre la caisse externe et le châssis rigide en aluminium (détail à gauche).

Plots en caoutchouc ou “silent bloc”

De type Radiaflex®

Dotés d’une armature en métal, ces plots en caoutchouc ont une forme cylindrique (voir Fig.31). Ils sont vissés dans la partie de la caisse à isoler et exploitent les **propriétés élastiques** du caoutchouc dans différentes directions (cisaillement et compression). Leur dimensionnement dépend de la masse et des dimensions de l’œuvre à protéger.

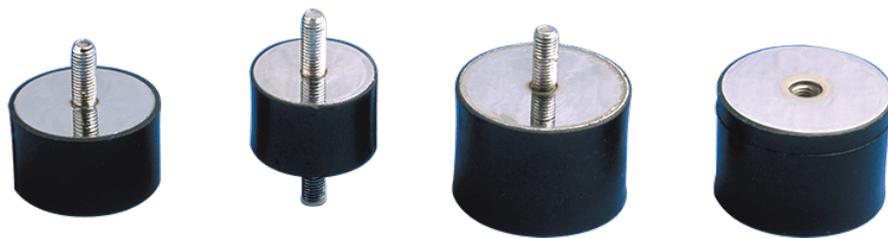


Figure 31 : Exemple de plots en caoutchouc Radiaflex®.
Source : <https://www.paulstra-industry.com/fr/gammes/supports-antivibratoires-elastomere/radiaflex-plot-et-support-cylindrique-en-elastomere> (page consultée le 17/02/2022)

Ressorts industriels

De type “ Wire Rope Isolators”

Importés également du domaine industriel, ce type de ressorts permet d'isoler une structure dans une gamme de fréquence et d'amplitude précise. Les ressorts sont utilisés pour les caisses de transport mais aussi pour l'isolation de vitrines et supports d'exposition⁵².

Le principe de fonctionnement de ces ressorts est détaillé en Fig.32. Ce type de ressorts appartient à la famille des **amortisseurs passifs non linéaires**, utilisés pour la protection contre les vibrations et les chocs. Ils font appel au principe d'amortissement de Coulomb, qui est constant et au cours duquel l'énergie entrante (vibrations et chocs induits par le transport) est absorbée par frottement de glissement des fils de métal. Ce contact par frottement entraîne une diminution de l'énergie vibratoire au niveau de l'œuvre d'art et donc un amortissement⁵³.

Certains transporteurs, comme la compagnie *Hizkia van Kralingen* (Pays-Bas), ont développé un nouveau système de caissons climatiques (voir Fig.33) et caisses de transport réutilisables, pour les objets de type peinture et panneaux, incorporant des ressorts industriels (voir Fig.34 et 35).⁵⁴ Les ressorts sont placés aux angles de l'œuvre, en partie inférieure et sur les côtés.

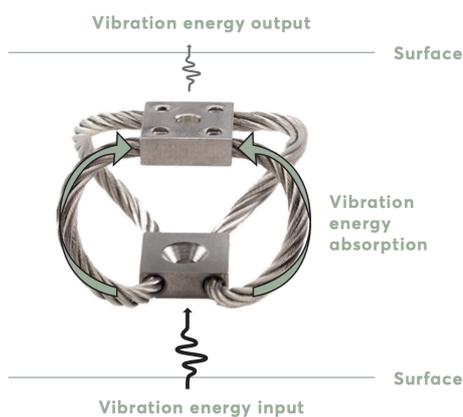


Figure 32 : Principe de fonctionnement d'un ressort amortisseur



Figure 33: Exemple d'un caisson climatique amorti par ressorts. Source : Hizkia van Kralingen

⁵² Voir Wei, 2011.

⁵³ Hussain, 2018.

⁵⁴ Pour plus d'information, voir https://turtlebox.com/media/fluxfile_files/Literature_Review_T_AoLi0Vy.pdf (page consultée le 17/02/2022)



Figure 34 : Détail d'un élément de calage d'une peinture, doté de ressorts amortisseurs. Source : https://turtlebox.com/media/fluxfile_files/Literature_Review_T_AoLi0Vy.pdf (page consultée le 17/02/2022)



Figure 35 : Installation des éléments de calage autour d'une peinture sur toile (Évolution, P. Mondriaan, Kunstmuseum, La Haye). Source : <https://hizkia.com/en/news/a-revolution-in-art-transport/> (page consultée le 17/02/2022)

Amortisseurs à coussin d'air

Encore peu employés dans le domaine du transport d'œuvres d'art, mais avantageusement employés dans l'industrie comme solution peu onéreuse d'amortissement, les coussins d'air sont très efficaces contre les vibrations. **L'air est en effet un très bon amortisseur de vibrations basse fréquence** rencontrées pendant le transport, mais l'utilisation des coussins d'air nécessite un contrôle précis de la pression à l'intérieur et un dimensionnement adapté aux propriétés et sensibilités de l'œuvre à transporter.

SYSTEMES D'AMORTISSEMENT DE CHOCS EXISTANTS

Lorsqu'une caisse heurte un obstacle ou tombe, elle accélère rapidement avant d'entrer en contact avec l'obstacle et/ou le sol. A cet instant, **le matériau amortisseur doit être capable d'absorber l'énergie créée** par cette accélération pour limiter que l'impact n'atteigne l'œuvre. Le choix du matériau amortisseur se fait en fonction des dimensions et de la masse totale de l'objet en caisse. Il s'agit en général de matériaux élastiques capables de se compresser au moment du choc pour ralentir la chute avant impact. Pour une protection optimale, le matériau choisi doit donc être en légère compression au moment où la caisse est chargée, pour pouvoir décompresser et compresser davantage si besoin.

Voici une liste indicative des amortisseurs de chocs employés couramment dans le transport des œuvres d'art.

Donuts ou plots anti-chocs

Issus de l'industrie du transport commercial, ces plots sont traditionnellement placés sous des palettes. Il existe plusieurs types de plots anti-chocs, donc les Skid-Mates™, des coussins d'air en polyéthylène (voir Fig.36). Il existe aussi des plots en polyuréthane, de la gamme Sorbothane. Chaque couleur correspond à une gamme de masses pour lesquelles les plots offrent un amortissement efficace. Ces plots sont en général vissés sous les pieds de la caisse externe (voir Fig.37).



Figure 36 : exemple de Skid-Mates™.
Source : <https://www.peli.com/eu/fr/discover/skid-mate/> (page consultée le 17/02/2022)



Figure 37: Utilisation de plots sous une caisse externe de transport.
Source : [HTTPS://WWW.ERNESTPACKAGING.COM/SOLUTIONS/PALLET-GUY/](https://www.ernestpackaging.com/solutions/pallet-guy/) (page consultée le 17/02/2022)

Mousses

NB. : Il est à noter que les mousses de tout type sont inefficaces comme amortisseurs de vibrations pour un transport. Les mousses peuvent être utilisées pour éliminer certains chocs uniquement et doivent être dimensionnées.

Si une mousse est trop molle, l'objet va s'enfoncer et toucher directement la surface, empêchant toute possibilité d'amortissement. Si une mousse est trop dure, tous les chocs seront transmis à l'objet. En pratique, il est courant de charger une mousse d'un tiers ou de moitié de son épaisseur, afin de lui laisser la possibilité de se compresser davantage mais aussi de décompresser si besoin. Il est toutefois plus efficace d'utiliser les dimensions et masse de l'objet dans sa caisse et de se référer aux courbes d'amortissement dynamiques qui accompagnent la fiche technique de la mousse sélectionnée.

Les mousses à cellules fermées sont en général de meilleurs amortisseurs de chocs, car les cellules agissent comme de petits coussins d'air indépendamment les uns des autres. Les mousses en polyéthylène sont couramment employées et leur densité et épaisseur dépend des dimensions et masse de l'objet à transporter ainsi que du dessin de la caisse. Les mousses sont faciles à découper au format désiré et ne nécessitent pas de vissage ni de collage, puisqu'elles peuvent être maintenues mécaniquement, en légère compression, entre deux structures.

CAISSERIE DE TRANSPORT

PRINCIPES DES SOLUTIONS RETENUES

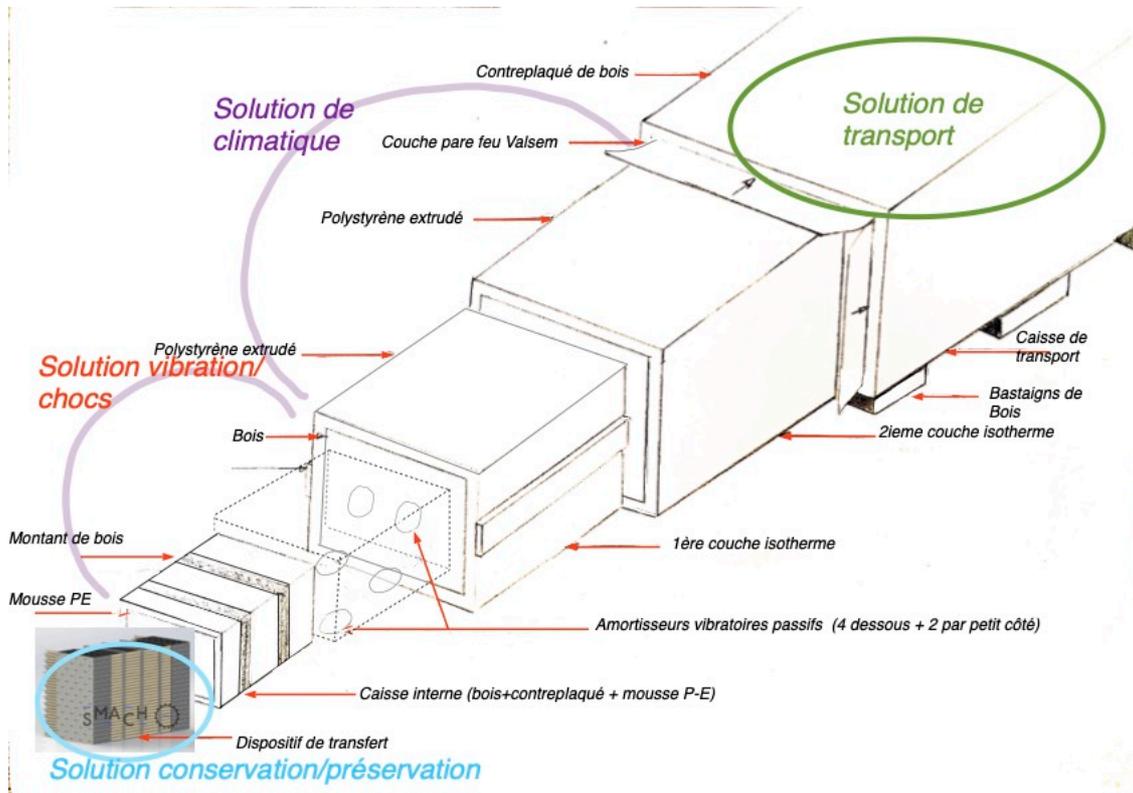


Figure 38 : Schématisation de la caisserie de transport.

NB. : Ce schéma n'est pas destiné à être mis en œuvre sans étude mécanique préalable. Il s'agit uniquement d'une ébauche du système que nous proposons.

La société LPart, à travers son responsable commercial Julien Leaune et le chef du service emballage Gabriel Robert, a été notre interlocuteur pour formaliser la solution suivante.

Dans un premier temps, nous avons réalisé un aller-voir afin de s'assurer que le circuit et les passages des portes dans le musée pouvaient permettre la sortie du support de transfert précédemment imaginé, puis une mise en caisse adaptée⁵⁵.

⁵⁵ Voir le compte rendu de l'aller-voir au musée de la Tapisserie de Bayeux, Annexe 1 p. 54.

Chaque risque encouru par la Tapisserie appelle une solution adaptée qui constituera une couche de l'ensemble de la caisserie envisagée.

Risques	Solution	Description de la solution
Risque climatique	Caisse super isotherme	<ul style="list-style-type: none"> - Caisnes et contre-caisnes alternant des couches de polystyrène extrudé, mousse plastazote® et vide d'air isolant la caisse interne du climat extérieur. - Maintien d'un climat contrôlé depuis le musée de Bayeux jusqu'à l'arrivée dans le lieu d'exposition, pendant le transport. - Mesure du climat (température et humidité relative) au sein de la caisse, à l'aide de capteurs connectés communiquant avec le convoyeur.
Risque vibratoire	Systèmes antivibratoires passifs	<ul style="list-style-type: none"> - Système antivibratoire dans la caisse répondant à l'impératif suivant : dans le domaine 1-100Hz, lorsqu'il est en caisse, l'amortissement doit assurer que le support de transfert ne sera pas exposé à une amplitude supérieure à 2 mm/s. Le système d'amortissement peut être installé sur la paroi interne de la caisse ou à l'extérieur. - Système de suspension hydraulique sur le camion de transport. - Mesure des vibrations à l'aide d'accéléromètres connectés, installés sur le dispositif de transfert, communiquant avec le convoyeur.
Risque de chocs mécaniques	Mousses ou isolants caoutchoucs ou coussins d'air	<ul style="list-style-type: none"> - Système anti-choc à l'extérieur de la caisse externe, sous forme de plots (à coussin d'air ou caoutchouc). - Mousses à cellules fermées placées sur la face interne de la caisse externe. - Mesure des vibrations à l'aide d'accéléromètres connectés, installés sur le dispositif de transfert, communiquant avec le convoyeur. - Contrôle du dépassement de seuils à l'aide de détecteurs de chocs à usage unique, placés à l'extérieur de la caisse (type ShockWatch®).

Tableau 1 : Récapitulatif des différents risques et les solutions proposées

L'efficacité des solutions serait contrôlée par des capteurs/enregistreurs pour la température, l'humidité relative, les chocs et les vibrations.

DESCRIPTION DE L'ENSEMBLE DE LA CAISSERIE

La dimension finale estimée de la caisserie (dispositif de transfert à l'horizontale) serait de :
(2685 + 600) x (1750+600+150) x (1420+600) = **3285 x 2500 x 2020 mm**

La caisserie de transport est constituée de 4 couches différentes (« solutions ») (voir les éléments constitutifs Fig. 38) :

- La solution de conservation/préservation correspondant à l'œuvre placée dans le dispositif de transfert (support de transfert et équipement pour le basculement du paravent)
- La solution vibrations/chocs constituée de la caisse interne (décrite à la suite) et des dispositifs anti-vibratoires
- La solution climatique : les dispositifs permettant l'inertie du climat interne
- La solution de transport c'est-à-dire la caisse externe, la caisse de transport.

Description de la caisse interne

Une fois couché, le dispositif de transfert sera installé dans une caisse interne constituée de contreplaqué de 15 mm complété de barres de sapin de 20 mm. Le dispositif de transfert sera maintenu à l'intérieur de cette caisse par de la mousse de polyéthylène (PE) ayant une densité de 65 g/cm³. Un bloc de mousse du même type sera ajouté entre les pieds du paravent pour les maintenir sans pression.

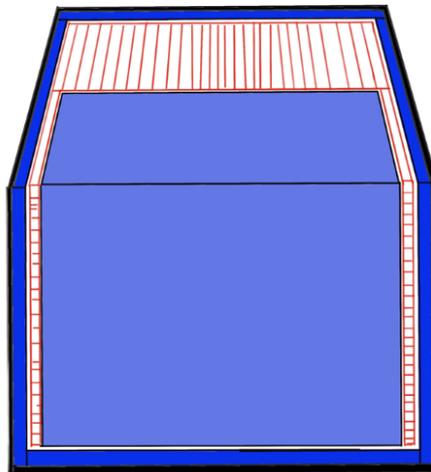


Figure 39 : Caisse interne vue de face et coupée afin de voir le paravent couché (dispositif de transfert en rouge) et stabilisé par la mousse PE (en bleue)

Description du dispositif anti-vibratoire

Les dispositifs anti vibratoires seront présents dans la caisse sous la forme de plots antivibratoires. Ils seront localisés sous la caisse interne (4 plots) et sur les parois latérales (2 par côté).

Ces dispositifs internes sont combinés aux précautions supplémentaires de suspension du camion.

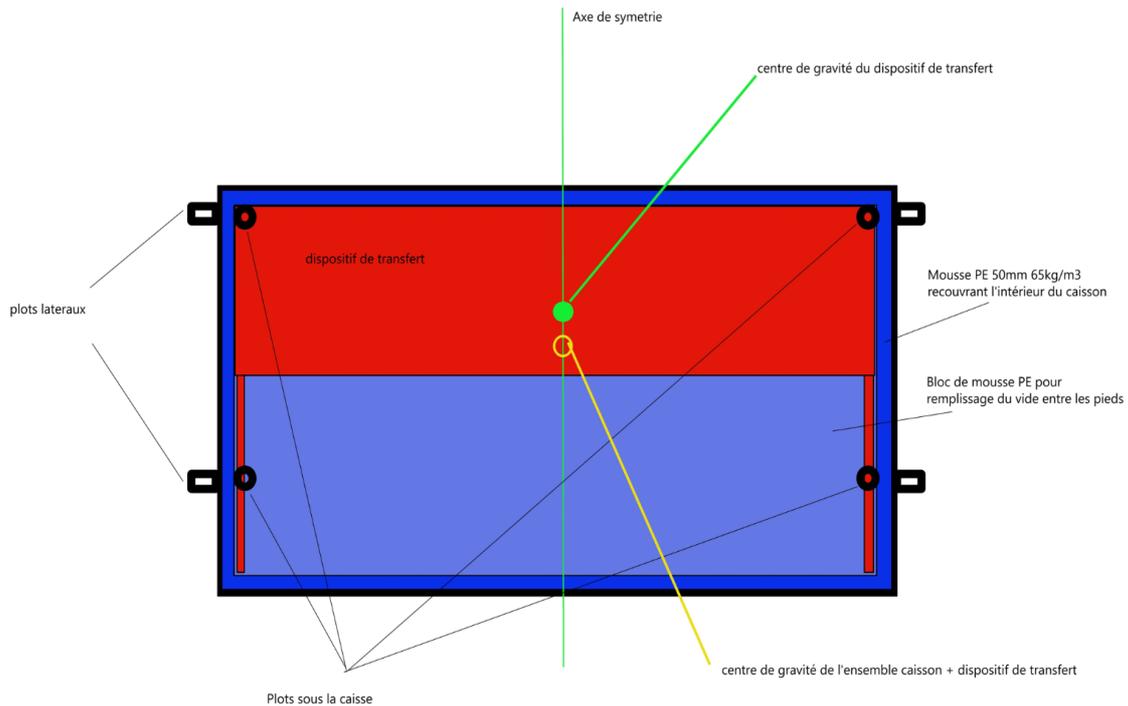


Figure 40 : Schéma de la caisse interne vue de dessus /LPart

Description du dispositif permettant l'inertie du climat interne

Le dispositif permettant d'isoler l'œuvre qui se trouve au cœur de la caisse est constitué de la multiplication de couches de polystyrène extrudé 50 mm (2 couches), d'un vide d'air et d'une couche de Valsem® (isolant pare-feu)⁵⁶.



Figure 41 : exemple de caisse à suspension LPart et de son système d'isolation super isotherme /crédit LPart

⁵⁶ Voir la fiche technique du Valsem® en Annexe 7, p.65.

Description de la caisse de transport

La caisse de transport (externe) est munie de bastaings qui permettent le passage des fourches des équipements de transport.

Elle est renforcée en périphérie par des montants de bois brut. La surface est intégralement peinte pour augmenter son étanchéité thermique et hydrique (voir Fig. 42).

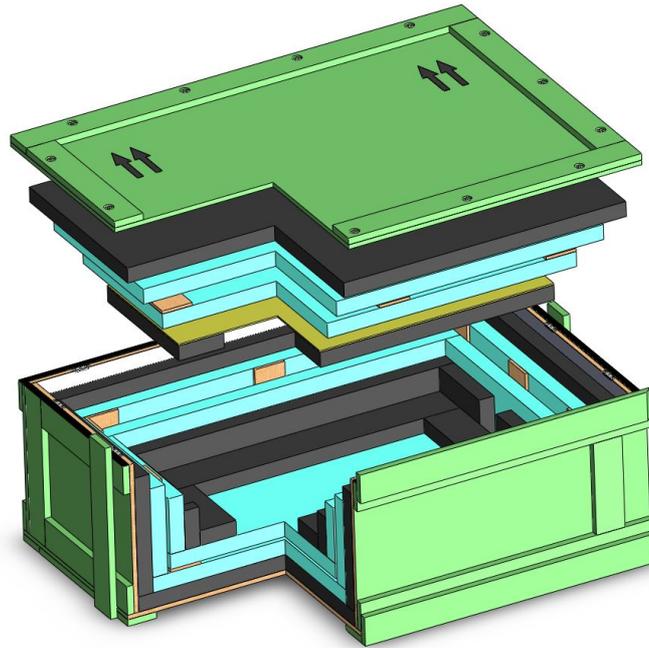


Figure 42 : schéma de caisse super-isotherme peinte

CHOIX DES SYSTEMES ANTIVIBRATOIRES PLACES AU SEIN DE LA CAISSE

Tests vibratoires

Nous avons retenu 2 solutions techniques d'amortissement passif des vibrations, proposées par la société Hutchinson Paulstra:

- Paulstradyn®, modèle 533713 (voir Fig. 27).
- Radiaflex®, modèle 521711 (voir Fig. 31).

La fiche technique et **la réponse aux vibrations sinusoïdales** de chaque amortisseur sont présentées en annexe 3⁵⁷ dont les spécificités principales sont résumées dans le Tableau 2⁵⁸.

⁵⁷ Voir les fiches techniques en Annexe 3, p. 60

⁵⁸ Voir page suivante

Pour chaque amortisseur, la société a fourni le résultat de tests vibratoires sous la forme d'un document intitulé "Réponse aux vibrations sinusoïdales". Cette réponse est caractéristique de l'amortisseur et **permet de juger de ses performances**.

Pendant le test, l'amortisseur est soumis à une excitation sinusoïdale uniaxiale d'amplitude constante (1,20 g) et de fréquence variable (10 à 100 Hz). Ce domaine de fréquence a été choisi car il correspond aux fréquences majoritaires rencontrées pendant un transport routier.

Des capteurs permettent de mesurer la réponse de l'amortisseur à cet environnement vibratoire, sous la forme d'accélération sortie (g) et déplacement sortie (mm).

L'objectif est de **sélectionner un amortisseur capable d'absorber la plupart des vibrations** provenant de l'extérieur de la caisse et donc de réduire le déplacement de l'objet dans la caisse (assimilable au déplacement de sortie indiqué par Paulstra).

Sur la courbe de transmissibilité, il est possible de voir si les vibrations entrantes sont réduites à la sortie, par l'amortisseur.

Comparaison des systèmes

Les résultats des tests menés par Hutchinson Paulstra sur les deux amortisseurs montrent qu'ils sont tous les deux capables d'amortir efficacement les vibrations dans la gamme 10-100 Hz.

Il est à noter qu'il s'agit ici de la performance individuelle de chaque amortisseur.

Dans la limite des données disponibles pour cette étude, en concertation avec Hutchinson Paulstra et LP Art, nous pensons qu'il est nécessaire de placer 4 amortisseurs sous la caisse interne et 2 amortisseurs de chaque côté de la caisse interne.

La performance couplée, au sein des différentes couches de matériaux, devra être validée par des tests mécaniques supplémentaires pour s'assurer de la protection optimale de la Tapisserie.

Dans le cadre d'une étude complémentaire, d'autres amortisseurs qui seraient jugés plus performants dans ce domaine de fréquence pourront être testés.

Ci-dessous, nous proposons une brève comparaison des deux systèmes :

- **Paulstradyn®, modèle 533713**

Cet amortisseur a une structure en métal galvanisé, couplée à un habillage en élastomère de haute performance, capable d'amortir une gamme de vibrations données, dans une, deux ou trois directions. L'amortisseur doit être vissé et monte en légère compression, dans sa direction axiale, entre deux structures rigides (ici, contreplaqué ou autre bois).

- **Radiaflex®, modèle 521711**

Doté d'une armature en métal, ce plot en caoutchouc a une forme cylindrique. Il exploite les propriétés élastiques du caoutchouc dans différentes directions (cisaillement et compression). Il n'est pas indiqué par le fournisseur si cet amortisseur doit aussi être monté en légère compression.

	Fréquence propre (Hz)	Surtension à la résonance	Dimensions hors tout (mm)	Matériaux	Installation
Paulstradyn® 533713	8,31	20,0	214 (H) x 154 (L) x 40 (P)	métal galvanisé, élastomère	vissage sur structure rigide
Radiaflex®, modèle 521711	5,61 Hz	12,5	70 (diamètre) x ca. 130	métal galvanisé, caoutchouc	vissage sur structure rigide

Tableau 2 : récapitulatif des spécificités des deux amortisseurs sélectionnés

Comparaison de leur réponse au test vibratoire

Sur ces courbes, nous sommes particulièrement intéressés par la réponse (accélération et déplacement sortie) dans le domaine 10-100 Hz, qui correspond à une gamme de fréquence de vibrations induites par un transport routier.

Lorsque l'on analyse **la courbe d'accélération** de sortie (g) pour les deux amortisseurs, il semble que Radiaflex® soit plus performant, avec une réduction significative de l'accélération des 10 Hz.

Dans le domaine du déplacement, il semble que l'amortisseur Radiaflex® soit aussi légèrement plus performant que Paulstradyn®.

Pour Radiaflex®, le déplacement de sortie (+/-) est compris entre 0 et 1 mm, pour toute la gamme de fréquence.

Pour Paulstradyn®, ce déplacement de sortie (+/-) est compris dans une gamme plus importante, entre une valeur légèrement au-dessus de 0 et proche de 6 mm.

Bien que Radiaflex® présente des capacités d'amortissement supérieures en général, Paulstradyn® est capable d'amortir la plupart des vibrations au-delà de 20Hz. Entre 20 et 100 Hz, les valeurs sont similaires à Radiaflex® (<1 mm).

Ces données deviennent pertinentes lorsqu'on les combine avec les fréquences vibratoires rencontrées au cours d'un transport⁵⁹.

Les manipulations manuelles induisent généralement des vibrations entre 3 et 20 Hz, alors que les manipulations motorisées (typiquement, un transport routier) génèrent des vibrations de fréquence entre 20 et 100 Hz.

Dans le cas de la Tapisserie, les amortisseurs entreront en jeu après la mise en caisse, la plupart des mouvements seront motorisés, donc dans la gamme 20-100 Hz principalement. Dans cette gamme, nous pouvons voir que les deux amortisseurs permettent d'atténuer considérablement les vibrations entrantes, avec une performance légèrement supérieure du Radiaflex®.

⁵⁹ Voir dans la présente étude, « Les phénomènes de fatigue », p.34.

Ces mesures sur les amortisseurs individuels, avec un signal de fréquence simple (sinusoïde d'amplitude constante, 10-100 Hz), indiquent que ces deux amortisseurs fonctionnent efficacement.

Ils seront par conséquent sélectionnés pour effectuer des tests mécaniques complémentaires, pour examiner leur performance réelle et vérifier si Radiaflex® répond en effet mieux aux besoins de la Tapisserie que Paulstradyn®.

Ces tests seront réalisés en situation ou en laboratoire, pour vérifier leur performance dans le dimensionnement proposé (4 + 4 amortisseurs, entre deux couches de contreplaqué) et dans l'environnement vibratoire d'un transport routier (signal plus aléatoire et complexe).

Outre leurs performances mécaniques, leur coût d'achat et facilité d'installation par les opérateurs peuvent influencer la décision finale. Une étude de marché et la mise en concurrence de plusieurs compagnies de transport permettrait également d'élargir la gamme des possibilités techniques et financières, en France et en Europe.

CONCLUSION

Cette étude fait la **synthèse des solutions techniques théoriques** qui permettraient d'acheminer la Tapisserie de Bayeux jusqu'en Angleterre avec le moins de risques possibles.

Au préalable du transport nous proposons une solution pour le **basculement à l'horizontale du support de transfert** puis le déroulé des modalités techniques préalables à son départ. Ces conclusions ont été réalisées et analysées par nos équipes et les équipes du transporteur spécialisé. La faisabilité de cette étape est acquise.

Un **transport terrestre** nous paraît être la seule solution envisageable car il garantit un temps de trajet limité, un kilométrage parcouru minimal et un nombre réduit de ruptures de charges.

Les modalités théoriques concernant ces solutions sont posées et se limitent aux données actuellement disponibles.

Afin de réduire les risques identifiés dans cette étude, **une phase de tests pratiques est à prévoir**. Nous préconisons la réalisation d'une étude mécanique déterminant les propriétés mécaniques de la Tapisserie encore non mesurées et **confirmant la performance sur le terrain des solutions listées**. Cela est une nécessité pour assurer la sécurité de la Tapisserie.

Les mesures suivantes sont notamment indispensables pour **définir le profil vibratoire de la Tapisserie** de Bayeux :

- Masse de la Tapisserie au moment de l'extraction, après retrait du dossier et doublage temporaire
- Masse des matériaux de conditionnement ajoutés sur le dispositif de transfert (plusieurs matériaux peuvent être envisagés)
- Fréquence propre de la Tapisserie installée sur le dispositif de transfert (cela peut être fait par simulation sur des reconstitutions, pour obtenir une estimation proche)
- Courbe de fatigue de la Tapisserie, par simulation sur reconstitution ou simulation numérique (cela requiert des données de fatigue et des tests en laboratoire de longue durée).

En outre, les différentes solutions d'amortissement devront être testées, par des simulations sur le terrain, pour s'assurer de leur bon fonctionnement mais aussi de leur facilité d'implémentation dans le contexte précis de ce transport.

La collaboration avec les conservateurs-restaurateurs de textile, un expert⁶⁰ en mécanique vibratoire et un transporteur spécialisé sont indispensables pour garantir le bon déroulement du transport, le moment venu.

Les tests à envisager sont les suivants :

- Test de résonance de chaque solution d'amortissement (individuelle et en situation) pour s'assurer qu'aucun phénomène de résonance ne pourra survenir pendant le transport
- Simulation de transport (sur route ou en laboratoire), avec mesure des vibrations, chocs et climat, pour contrôler le niveau de protection des caisses de transport sélectionnées et, si nécessaire, aider au choix entre deux options.

Cette étude complémentaire pourra **optimiser certaines options techniques non explorées** : transport avec ou sans pieds du paravent pour homogénéiser la répartition de la masse, à réaliser en deux

⁶⁰ Ingénieur ou conseil spécialiste du domaine

matériaux (bois ou aluminium par exemple), avec une comparaison des propriétés physiques et mécaniques, et des coûts.

Elle permettra de **définir les éléments pratiques et techniques nécessaires à la réalisation du transport** : mise en plan technique des différentes caisses avec description de leur assemblage et jointure, et positionnement précis des dispositifs antivibratoires. Ces solutions devront être testées grandeur nature, à l'aide de prototypes, en prenant en compte les deux options retenues.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie indicative sur le thème des transports d'œuvres d'art de grand format

Rémillard, F. « Risques tous azimuts : biens culturels en transit » in CRBC *La conservation préventive*, 3^{ème} colloque de l'ARAFU, Paris 1992

Richard M., Mercklenburg M. F., Merrill R. M., "Art in transit, handbook for packing and transporting paintings", National Gallery of Art, Washington.

Guide LPart, "Comment évaluer les contraintes du transport ? », Le transport.

Guide LPart, « Caisse ou tamponnage ? », L'emballage.

Guide Lpart, « Où entreposer en toute sécurité ? », Le magasinage.

Guide LPart, « Quelles sont les formalités à remplir ? », Beaux-arts et douane.

Guide LPart, « Comment assister le convoyeur et superviser les départs et arrivées ? », assistance aéroport.

Zine N., Poulizac M., « Conservation préventive : manutention et transport des grands formats » mémoire INP juin 2015.

« Handling, transportation, storage and display », reCollections Carind for Collections Across Australia, Heritage Collection Council.

Notes de l'institut canadien de conservation (ICC) 20/3, « Cinq étapes pour sécuriser les expéditions.

Marcon P., Bulletin technique de l'ICC, « Emballage et transport efficaces des objets d'art – bulletin technique 34.

« Conservation des biens culturels et du patrimoine », Recueil de normes, éditions AFNOR.

Beaujard-Vallet S., La lettre de l'OCIM – « Mesures préventives autour d'un déplacement spectaculaire », mars-avril 2007.

Bibliographie indicative sur le thème des chocs et vibrations

Arnold, R., and W. (revised 2018) Baker. 1993. "Basic Handling of Paintings - Canadian Conservation Institute Notes 10/13." In *Canadian Conservation Institute Notes*, edited by Canadian Conservation Institute Government of Canada.

Boutin, H., 2011. *Méthodes de contrôle actif d'instruments de musique*. Thèse de doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie, Paris.

Caldicott, P.J. 1991. "Vibration and shock in transit situations." In *Art in Transit - Studies in the Transport of Paintings*, edited by M.F. Mecklenburg, SE-1-SE-24. London: National Gallery of Art

Costain, C. 1991. "Scientific rationale for studies on packing and transportation of paintings." In *Art in Transit - Studies in the Transport of Paintings*, edited by M.F. Mecklenburg, 19-24. London: National Gallery of Art.

- Genevaux, J-M. 2007. "Les courbures locales, limites en fatigue d' un tableau soumis a des vibrations: l' usage des protections arrieres", *Conservation restauration des biens culturels*, Paris: ARAAFU, pp. 37-44
- Green, T. 1991a. "A cushioned transit frame for paintings." In *Art in Transit - Studies in the Transport of Paintings*, edited by M.F. Mecklenburg, 37-48. London: National Gallery of Art.
- . 1991b. "Performance criteria for packing." In *Art in Transit - Studies in the Transport of Paintings*, edited by M.F. Mecklenburg, 49-57. London: National Gallery of Art.
- . 1991c. "Vibration control: paintings on canvas supports." In *Art in transit - Studies in the transport of paintings*, edited by M.F. Mecklenburg, 59-67. London: National Gallery of Art.
- Guerin, C. 2017. "Les caisses de transport: évolutions et perspectives" In *Actes du 6eme colloque international de l'ARAFU*, 179-191. Paris
- Hackney, S., and T. Green. 1991. "Packing case designs." In *Art in transit - Studies in the Transport of Paintings*, edited by M.F. Mecklenburg, 69-77. London: National Gallery of Art.
- Hussein, A., and P. Balaji. 2018. "Stiffness characteristics of a polycal wire rope isolator", *IOP conference series: Materials Science and Engineering*, 402.
- ICOM. 1974. 'Icom guidelines for loans', *ICOM News*, 27: 78-79.
- Institute, Canadian Conservation. 2016. 'Agents of deterioration', Accessed 10-06-2020. <http://canada.pch.gc.ca/eng/1444330943476>.
- Lasyk, L., M. Lukomski, L. Bratasz, and R. Kozlowski. 2008. "Vibration as a hazard during the transportation of canvas paintings." In *Conservation and access, Contributions to the London Congress, 15-19 September 2008*, edited by D. Saunders, J.H. Townsend and S. Woodcock, 64-68. London: The International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works
- Lauchli, M., et al., 2014. " Packing systems for paintings: Damping capacity in relation to transport-induced shock and vibration" In *ICOM-CC, 17th Triennial Conference Melbourne, 15-19 September 2014: preprints*, edited by J. Bridgland, 1307. Melbourne, Australia.
- Marcon, P.J. 1991a. "Shock, vibration, and protective package design." In *Art in Transit - Studies in the Transport of Paintings*, edited by P.J. Marcon, 107-20. London: National Gallery of Art.
- . 1991b. "Shock, vibration, and the shipping environment." In *Art in Transit - Studies in the Transport of Paintings*, edited by P.J. Marcon, 121-32. London: National Gallery of Art.
- Marcon, P.J., and T.J.K. Strang. 1994. *Cushion design using the CCI cushion design calculator and PadCAD* (Canadian Conservation Institute: Ottawa).
- Mecklenburg, M.F. 1991. "Art in Transit - Studies in the Transport of Paintings." In, edited by J. Gruver. London: National Gallery of Art.
- Mecklenburg, M.F., and C.S. Tumosa. 1991. "An introduction into the mechanical behavior of paintings under rapid loading conditions." In *Art in Transit - Studies in the Transport of Paintings*, edited by M.F. Mecklenburg, 137-71. London: National Gallery of Art.
- Merrill, R. 1991. 'The problems of packing and shipping. The Rationale for Scientific Studies.' in J. Gruver (ed.), *Art in Transit - Studies in the Transport of Paintings* (National Gallery of Art: Washington).

- Richard, M. 1991. "Foam cushioning materials: techniques for their proper use." In *Art in Transit - Studies in the Transport of Paintings*, edited by M.F. Mecklenburg, 269-78. London: National Gallery of Art.
- Saunders, D. 1998. 'Monitoring shock and vibration during the transportation of paintings', *National Gallery Technical Bulletin*, 19: 64-73.
- Saunders, D., C. Leback Sitwell, and S. Staniforth. 1991. "Soft packing - the soft option?" In *Art in Transit - Studies in the Transport of Paintings*, edited by M.F. Mecklenburg, 311-21. London: National Gallery of Art.
- Sauvage, L. W. (Bill) Wei, M. Martinez, 2018. "When Conservation Meets Engineering: Predicting the Damaging Effects of Vibrations on Pastel Paintings", *Studies in Conservation*, 63:sup1, pp. 418-420, DOI: <https://doi.org/10.1080/00393630.2018.1504444>.
- Schijve, J. 2009. *Fatigue of Structures and Materials* (Springer Science).
- Shelley, M. 1987. The care and handling of art objects: practices in the Metropolitan Museum of Art (Metropolitan Museum of Art: New York, United States).
- Smyth, A.W., P. Brewick, R. Greenbaum, M. Chatzis, A. Serotta, and I. Stünkel. 2016. 'Vibration mitigation and monitoring: a case study of construction in a museum', *Journal of American Institute of Conservation*, 55: 32-55.
- Staniforth, S. 1984. "The testing of packing cases for the transport of paintings." In *ICOM-CC 14th Triennial Meeting Preprints, Copenhagen, 10-14 September 1984*, edited by D. Froment, B4.12.1-B4.12.6. Copenhagen: ICOM - JP Getty Trust.
- Stolow, N. 1967. ""Standards for the care of works of art in transit"." In *London Conference on Museum Climatology*, edited by G. Thomson, 271-84. London: The International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works.
- . 1981. Procedures and conservation standards for museum collections in transit and on exhibition (UNESCO: Switzerland).
- . 1987. Conservation and exhibitions: packing, transport, storage, and environmental considerations (Butterworths: London and Boston).
- Thickett, D. 2002. "Vibration damage levels for museum objects." In *ICOM-CC 13th Triennial Meeting, Rio de Janeiro, 22-27 September 2002*, 90-95. Rio de Janeiro: ICOM-CC; James&James.
- Wei, W., E. Dondorp. 2020. "Testing to determine allowable vibration limits at a Natural-History Museum in the Netherlands", *APT Bulletin: The Journal of Preservation Technology*, 51:4, pp. 19-25.
- Wei, W., N. Krumperman, and N. Delissen. 2011. "Design of a vibration damping system for sculpture pedestals: an integral object-based approach." In *ICOM-CC, 16th Triennial Conference Lisbon, 19-23 September 2011: preprints*, edited by J. Bridgland, 10. Lisbon, Portugal.
- Wei, B. et al., 2018. "Protecting museum collections from vibrations due to construction: vibration statistics, limits, flexibility and cooperation", *Studies in Conservation*, 63:sup 1, pp. 293-300, <https://doi.org/10.1080/00393630.2018.1504438>.
- Wei, B, L. Sauvage, J. Wölk, 2014. « Baseline limits for allowable vibrations for objects », *ICOM-CC 17th Triennial Conference Preprints Melbourne, 15-19 September 2014*, ed. J. Bridgland, art. 1516, Paris, ICOM, 7 pages.

ANNEXES

Annexe 1 : Compte-rendu aller-voir Bayeux

Annexe 2 : Liste des matériaux du dispositif de transfert

Annexe 3 : Fiches techniques des systèmes Paulstra / Paulstradyn© ; fiche technique générale de la gamme Paulstra et fiche de réponse aux vibrations sinusoïdales (envoyée par Paulstra)

Annexe 4 : Fiche technique Tyvek® DuPont™

Annexe 5 : Fiche technique Plastazote®

Annexe 6 : Fiche technique Ethafoam®

Annexe 7 : Fiche technique pare-feu Valsem®

Annexe 1 : Compte rendu de l'aller-voir au musée de la Tapisserie de Bayeux

Le vendredi 28 janvier 2022

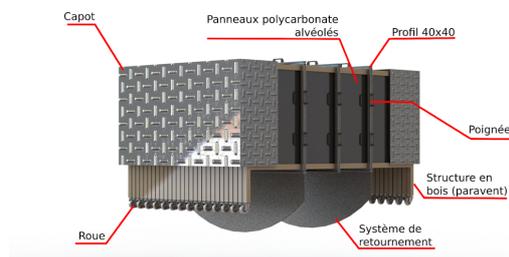
Présents :

Serge Elbaz chef d'équipe Lpart

Clémentine Berthelot et Martin Bostal, musée de la Tapisserie De Bayeux

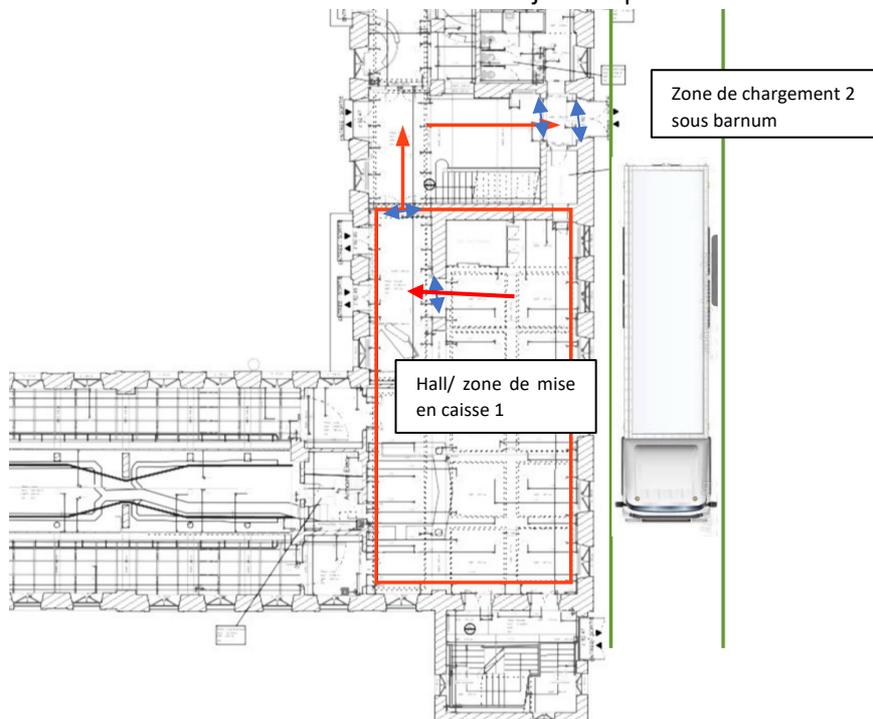
Elodie Aparicio-Bentz, Groupement T. Bouzid

Rappel : Dimensions du système debout sur ses pieds, Tapisserie verticale sans le système de retournement (qui sera retiré avant le transport) : 2,685 x 1,42 x 1,75m (largeur x hauteur x épaisseur)



Dimensions du système après retournement : 2,685 x 1,75 x 1,42 m (largeur x hauteur x épaisseur)

Une seule solution s'offre à nous avec le trajet indiqué avec les flèches rouges :



Le déplacement vers l'extérieur se fait avec 4 passages (flèches bleues sur le plan) de portes comme suit :



Passage 1

Dégagement



Passage 2

Passage 3



Passage 4/accès vers l'extérieur

Après un premier projet de déplacement et des prises de mesures des passages nous avons conclu que la sortie de la caisse devra se faire au moins en 2 temps :

Zone du hall

Ce large espace accueille aujourd'hui le public en nombre. Il est déjà désigné dans notre précédente étude pour être le lieu de la mise sur le paravent (support de transfert).

On pourra donc réaliser aisément la suite des opérations :

Conditionnement dans le support de retournement avec l'aide des opérateurs Lpart (4 ou 6 personnes)
Retournement du support de transfert ce qui donne les dimensions suivantes : 2,685 x 1,750 x 1,420 m (largeur x hauteur x épaisseur).

Le retournement devra se faire sur un plateau muni de chevrons qui sont les zones de préhension de la caisse nécessaire à son portage.

Habillage du support de transfert dans une première caisse réalisée avec des panneaux de bois. Toutes les parois seront habillées de mousse éthafoam® de 5 cm de forte densité (65kg/cm).

Acheminement à la zone extérieur par les passages cités précédemment.

Zone extérieure

La sortie de la caisse est imposée par les dimensions finales des aménagements super isothermes. Il sera donc nécessaire de mettre en place un barnum pour mettre l'espace extérieur à l'abri de la pluie et isolé du froid. Il est possible de chauffer un tel espace pendant la durée de la manœuvre.

- Mise en place de la caisse 1 dans une caisse super isotherme constituée de polystyrène extrudé (3 ou 5cm), vide d'air, puis éthafoam® et mise en peinture finale + Valsem®

Les premiers calculs d'augmentation de la caisse nous amènent à considérer une augmentation de 50 cm au total sur les côtés et 50 en hauteur. Ce qui implique finalement la nécessité d'un transport avec un camion de 50m³ dont la capacité intérieure est plus compatible avec la caisserie envisagée.

Les conclusions actuelles ne prennent pas en compte de système antivibratoire qui sont actuellement étudiées par l'atelier caisserie de la société de transport.

Annexe 2 : Liste des matériaux du dispositif de transfert

Le dispositif de transfert a été imaginé dans les matériaux suivants : bois massif choisi pour avoir un bon rapport masse-rigidité.

Pièce	Unité	Matériau	Caractéristique
Poteaux horizontaux et verticaux	28x4	Bois, pin	340 kg/m ³
Panneaux polycarbonate alvéolées	28	Polycarbonate	1190 kg/m ³
Fil métallique	28	Acier	7300 kg/m ³
Roues	56	Divers : zinc, nylon, polyuréthane	0.65 kg/unité
Charnières	54	Acier	7300 kg/m ³
Tube de mousse	13	Polyurethane flexible	16 kg/m ³
Profil Alu 40x40	4x3	Aluminium	2700 kg/m ³
Poignées	21	ABS	1020 kg/m ³
Capots	2	Aluminium	2700 kg/m ³
Système de retournement	2	Acier	7300 kg/m ³
Mousse interne dans les capots	2	Polyuréthane	1225 kg/m ³

Annexe 3 : Fiche technique des systèmes Paulstra / Paulstradyn®



FT0821
ANTI-VIBRATOIRE



MADE IN FRANCE

FRÉQUENCES PROPRES :
EN AXIAL : 7 Hz
EN RADIAL : 3 à 5,5 Hz



SUSPENSIONS CAOUTCHOUC SUPPORTS PAULSTRADYN SE110

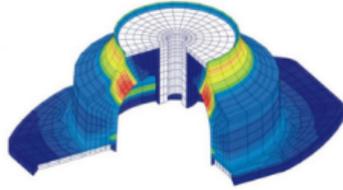


1. Avantages

- Atténuation vibratoire supérieure à 90 % à 1 500 tr/mn (25 Hz).
- Gamme performante et homogène.
- Caractéristiques stabilisées.
- Facilité de montage.
- Anticorrosion : tenue au brouillard salin* : 500 heures.
*Après montage suivant recommandations catalogue
- Esthétique.

Formule SILTECH®

- Faible rigidification dynamique
- Fluage réduit



MODÉLISATION PAR ÉLÉMENTS FINIS

2. Applications

Découplage antivibratoire pour équipements fixes :

- Machines tournantes telles que moto-ventilateurs, climatiseurs, moto-pompes, motocompresseurs, groupes électrogènes.
- Canalisations, plafonds, transformateurs, armoires électriques..

3. Exemples d'Utilisation

Hauteurs Identiques













Nos experts à votre écoute !

10 rue Ferdinand - 42 000 SAINT-ÉTIENNE - contact@solutions-elastomeres.com - 04 77 47 51 92 - 04 77 47 02 54

1

FT08923
ANTI-VIBRATOIRE



MADE IN FRANCE



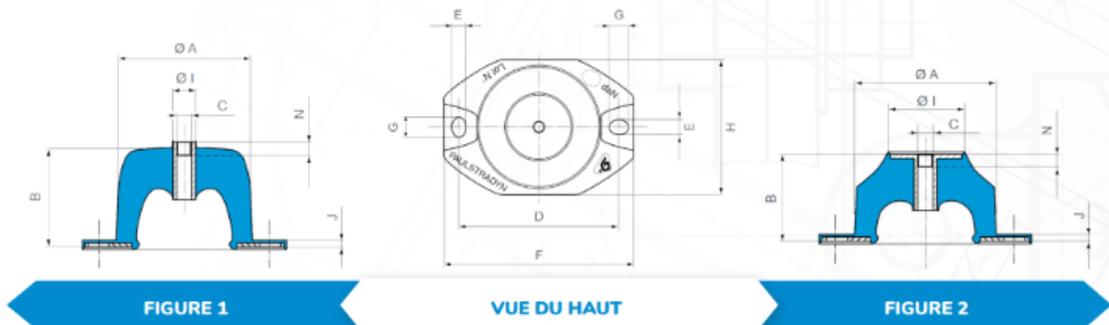
FRÉQUENCES PROPRES :
EN AXIAL : 7 Hz
EN RADIAL : 3 à 5,5 Hz

SUSPENSIONS CAOUTCHOUC

SUPPORTS PAULSTRADYN SE110



4. Caractéristiques Dimensionnelles



CARACTERISTIQUES DIMENSIONNELLES & TECHNIQUES

Désignation	Référence	Charge Nominale CN (daN)	Figure	Dimensions (mm)										
				ØA	B*	C	D	E	F	G	H	ØI	J	N
4 7 12	533701 533702 533703	4 7 12	1	40	40	M6	52	6,2	64	6,2	44	12	2,5	6
20 30 50	533704 533705 533706	20 30 50	2	60	40	M6	76	6,2	90	8,2	64	32	2,5	6
70 100 130	533707 533708 533709	70 100 130	2	80	40	M8	100	8,2	122	12,2	84	48	2,5	12
160 200 260	533710 533711 533712	160 200 260	2	100	40	M10	124	10,2	152	16,2	104	68	3	10
325 400 500	533713 533714 533715	325 400 500	2	150	40	M12	182	12,2	214	20,2	154	116	4,5	10
640 820 1050 1350	533716 533717 533718 533719	640 820 1050 1350	2	200	40	M16	240	14,2	280	24,2	204	159	5,5	20

B* : Hauteur au repos 40mm, sous charge 32mm (voir fiche technique sur le site internet).
CN : Charge statique nominale en compression dans la direction axiale du support.

Les fréquences propres indiquées, sont valables pour les charges maxi des plages d'utilisation.



Nos experts à votre écoute !

10 rue Ferdinand - 42 000 SAINT-ÉTIENNE - contact@solutions-elastomeres.com - 04 77 47 51 92 - 04 77 47 02 54

F70621
ANTI-VIBRATOIRE



MADE IN FRANCE



FRÉQUENCES PROPRES :
EN AXIAL : 7 Hz
EN RADIAL : 3 à 5,5 Hz

SUSPENSIONS CAOUTCHOUC

SUPPORTS PAULSTRADYN SE110



5. Caractéristiques Techniques

Les caractéristiques d'atténuation vibratoire et de hauteur sous charge nominale, sont des valeurs stabilisées après un mois sous charge à 20 °C.

Caractéristiques communes

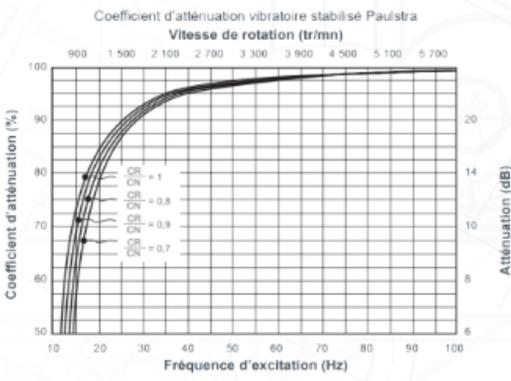
- Fréquence propre en axial 7 Hz, sous charge nominale.
- Fréquence propre en radial 3 à 5,5 Hz.

Atténuation vibratoire

- Course maximale : - En axial : 12 mm. - En radial : ± 10 mm.

Coefficient d'atténuation vibratoire stabilisé Paulstra

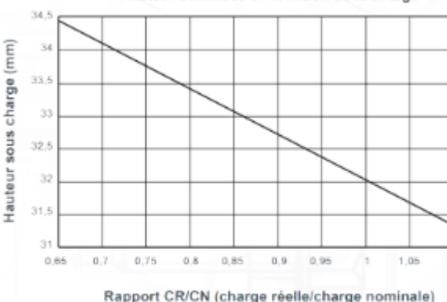
Vitesse de rotation (tr/min)



Fréquence d'excitation (Hz)

Hauteur sous charge

Hauteur stabilisée en fonction de la charge



Rapport CR/CN (charge réelle/charge nominale)

Tenue en température Température d'utilisation : - 20 °C à + 70 °C.

Autres caractéristiques*

- Bon comportement dynamique en haute fréquence.
- Tenue en fatigue et aux chocs.
- Fluage réduit.

* Des caractéristiques techniques détaillées peuvent être communiquées sur demande. Veuillez nous consulter.



Nos experts à votre écoute !

10 rue Ferdinand - 42 000 SAINT-ÉTIENNE - contact@solutions-elastomeres.com - 04 77 47 51 92 - 04 77 47 02 54

3

FT0523
ANTI-VIBRATOIRE



MADE IN FRANCE

FRÉQUENCES PROPRES :
 EN AXIAL : 7 Hz
 EN RADIAL : 3 à 5,5 Hz



SUSPENSIONS CAOUTCHOUC

SUPPORTS PAULSTRADYN SE10



5. Caractéristiques Techniques

Montage classique

1. Embase machine suspendue
dimension > Ø M*
(voir tableau "Caractéristiques de montage" ci-après).
2. Structure fixe (sol)
dimension > longueur F* du support
3. Vis Ø C**
4. Vis HM Ø K avec rondelle impérative entre tête de vis et PAULSTRADYN***.
5. Vis Ø K avec rondelle impérative entre écrou et PAULSTRADYN***.

* Pour répartition des charges et tenue à la corrosion.
 ** Visserie qualité 6,6 minimum

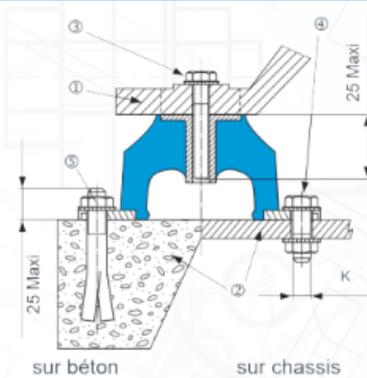


Fig. 1

Couple de serrage recommandé

Nota : ne pas peindre les supports après montage.

Diamètres M (mm)	M6	M8	M10	M12
Coupe N.m	2	5	12	20

Autre Montage

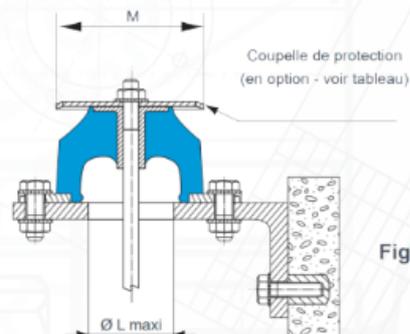


Fig. 2

Caractéristiques de montage et références coupelles de protection

Référence	Dimensions (mm)			Référence Coupelle (Option)
	K Fig. 1	L maxi Fig. 2	M mini Fig. 2	
533701, 533702, 533703	M5	27	14	342919
533704, 533705, 533706	M5	40	34	342356
533707, 533708, 533709	M6	46	50	342733
533710, 533711, 533712	M8	47	70	342734
533713, 533714, 533715	M10	99	118	342353
533716, 533717, 533718 533719	M12	127	162	342354



Nos experts à votre écoute !

10 rue Ferdinand - 42 000 SAINT-ÉTIENNE - contact@solutions-elastomeres.com - 04 77 47 51 92 - 04 77 47 02 54



Réponse aux vibrations sinusoidales

Réf. : P2022-034-AM
 Date: 15/02/2022
 Auteur: Antoine Migeon

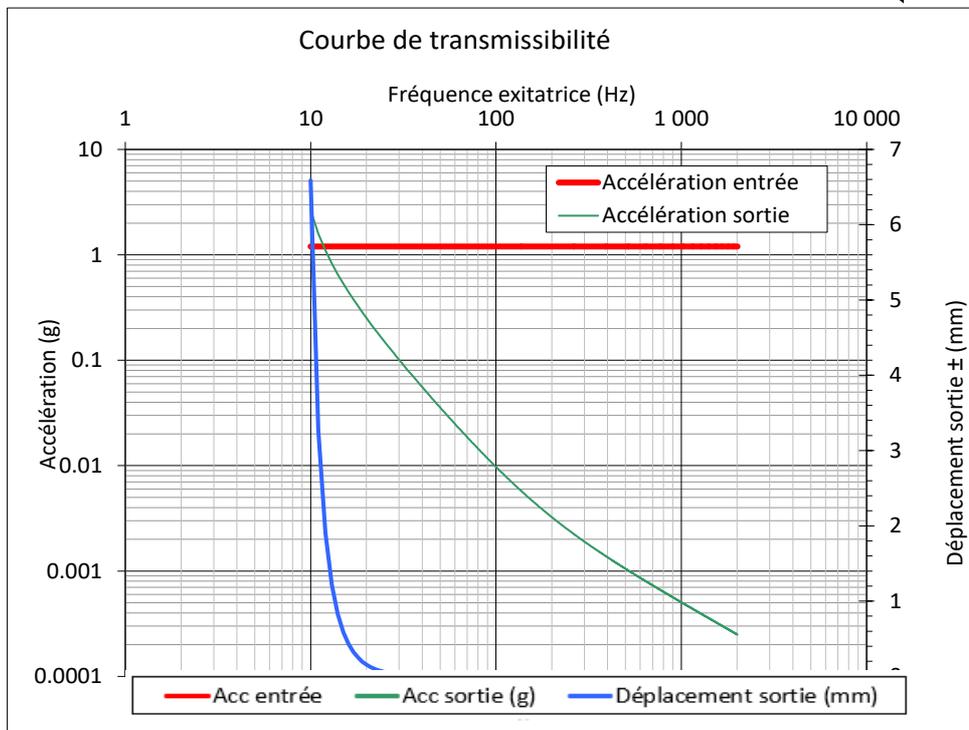
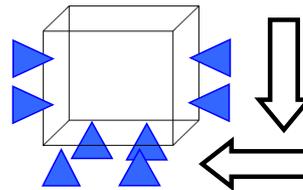
Client: LP ART
Application: Caisse de transport
Direction excitation: Vertical & horizontal

Fréquence propre (Hz) : 8.31
 Surtension à la résonance: 20.0
 Réf suspensions : PAULSTRADYN 533713

Poids total (kg): 1000
 Nbre suspensions: 4+4

Spectre:

Fréquences (Hz)		Amplitudes
Borne inf.	Borne sup.	
10	100	1.20E+00 (g)



Déplacement suspension maximum ± : 6.6 mm

La présente préconisation est établie en fonction des informations portées à notre connaissance, avec les simplifications nécessaires à une préconisation rapide. Elle ne saurait donc engager la responsabilité de Paulstra. Ce document est la propriété de Paulstra et ne peut être utilisé sous quelque forme et à quelque fin que ce soit sans son accord exprès.

Calcul vibratoire sinus_1
 tranche_Acc_Vert_Horiz_LPART_PAULSTRADYN

PAULSTRADYN[®]

PAULSTRADYN[®] INOX

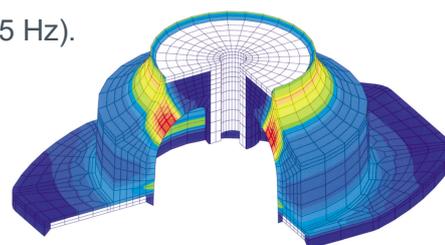
Fréquence propre : (1)
- En axial : 7Hz
- En radial : 3 à 5,5 Hz



AVANTAGES

- Atténuation vibratoire supérieure à 90 % à 1 500 tr/mn (25 Hz).
- Gamme performante et homogène.
- Caractéristiques stabilisées.
- Facilité de montage.
- Anticorrosion : tenue au brouillard salin* : 500 heures.
- Esthétique.

*Après montage suivant recommandations catalogue.



Modélisation par éléments finis

Formule SILTECH[®]

- Faible rigidification dynamique
- Fluage réduit

APPLICATIONS

Découplage antivibratoire pour équipements fixes :

- machines tournantes telles que moto-ventilateurs, climatiseurs, moto-pompes, motocompresseurs, groupes électrogènes;
- canalisations, plafonds, transformateurs, armoires électriques...

1) les fréquences propres indiquées, sont valables pour les charges maxi des plages d'utilisation citées dans le paragraphe : CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES.

CARACTÉRISTIQUES DIMENSIONNELLES

Fig. 1

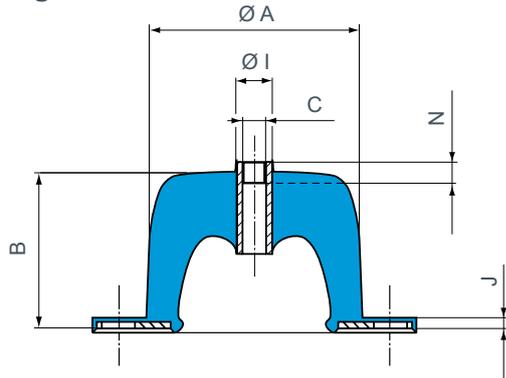
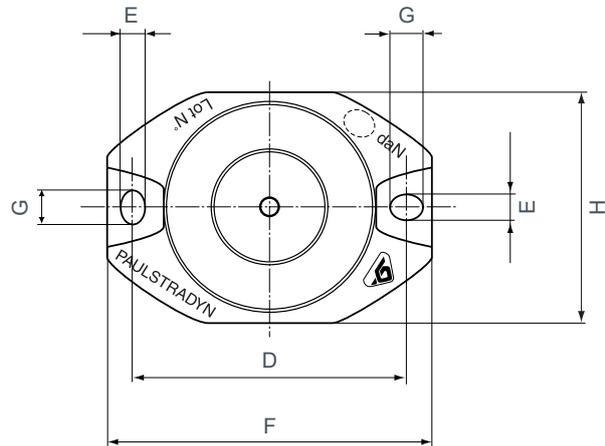
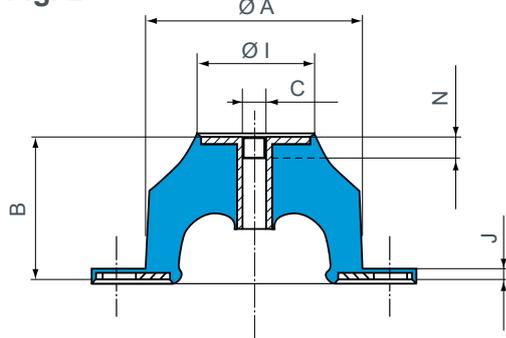


Fig. 2



Désignation	Réf.	Charge maximale (daN)	Fig.	Dimensions (mm)										
				Ø A	B*	C	D	E	F	G	H	Ø I	J	N
Paulstradyn® 4 7 12	533701 533702 533703	4 7 12	1	40	40	M6	52	6,2	64	6,2	44	12	2,5	6
Paulstradyn® 20 30 50	533704 533705 533706	20 30 50	2	60	40	M6	76	6,2	90	8,2	64	31	2,5	6
Paulstradyn® Inox 316L	53370611	50	2	60	40	M6	76	6,2	90	8,2	64	31	2,5	6
Paulstradyn® 70 100 130	533707 533708 533709	70 100 130	2	80	40	M8	100	8,2	122	12,2	84	48	2,5	12
Paulstradyn® 160 200 260	533710 533711 533712	160 200 260	2	100	40	M10	124	10,2	152	16,2	104	68	3	10
Paulstradyn® 325 400 500	533713 533714 533715	325 400 500	2	150	40	M12	182	12,2	214	20,2	154	116	4,5	10
Paulstradyn® 640 820 1050 1350	533716 533717 533718 533719	640 820 1050 1350	2	200	40	M16	240	14,2	280	24,2	204	159	5,5	20

* Hauteur, au repos 40 mm, sous charge 32 mm (voir chapitre caractéristiques techniques).
Charge statique en compression dans la direction axiale du support.

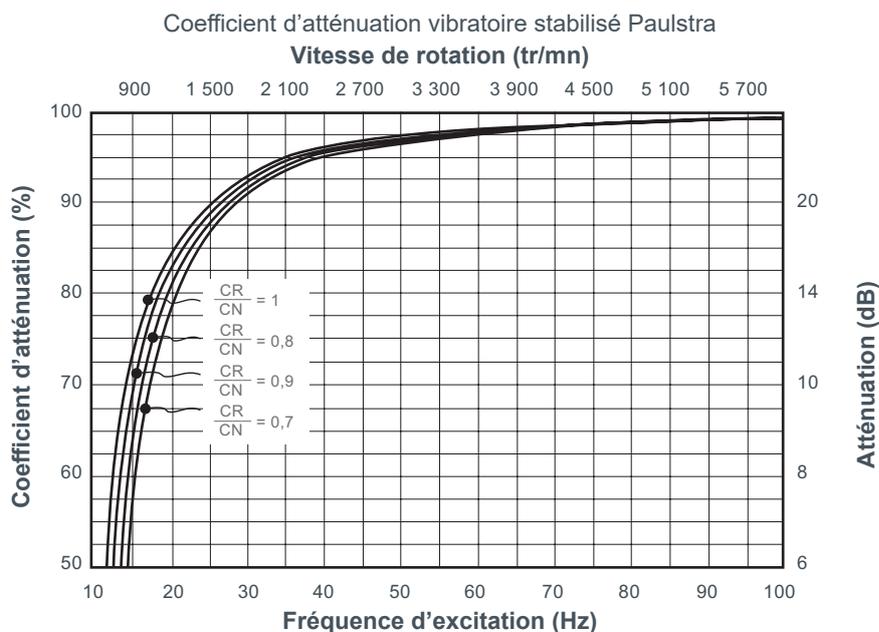
CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

Les caractéristiques d'atténuation vibratoire et de hauteur sous charge nominale, sont des valeurs stabilisées après un mois sous charge à 20°C.

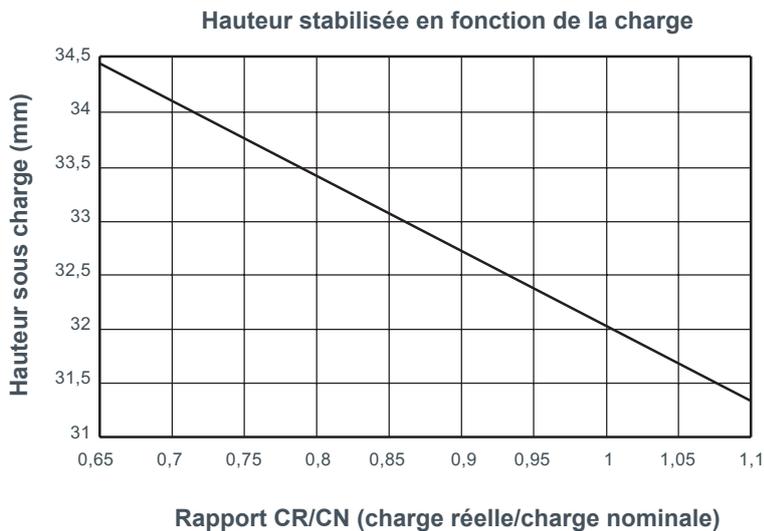
- Caractéristiques générales**
- Fréquence propre en axial 7 Hz, sous charge nominale.
 - Fréquence propre en radial 3 à 5,5 Hz.
 - Course maximale :
 - En axial : 12 mm.
 - En radial : ± 10 mm.

Atténuation vibratoire

$$\frac{CR}{CN} = \text{Rapport} \frac{\text{charge réelle}}{\text{charge nominale}}$$



Hauteur sous charge



Tenue en température

Température d'utilisation : -20° C à + 70° C

Autres caractéristiques*

- Bon comportement dynamique en haute fréquence.
- Tenue en fatigue et aux chocs.
- Fluage réduit.

* Des caractéristiques techniques détaillées peuvent être communiquées sur demande. Veuillez nous consulter.

MONTAGE

Montage classique

- ① Embase machine suspendue dimension $> \varnothing M^*$ (voir tableau "Caractéristiques de montage" ci-après).
- ② Structure fixe (sol) dimension $>$ longueur F^* du support
* pour répartition des charges et tenue à la corrosion.
- ③ Vis $\varnothing C^{**}$
- ④ Vis HM $\varnothing K$ avec rondelle impérative entre tête de vis et PAULSTRADYN^{®**}.
- ⑤ Vis $\varnothing K$ avec rondelle impérative entre écrou et PAULSTRADYN^{®**}.

** Visserie qualité 6,6 minimum.

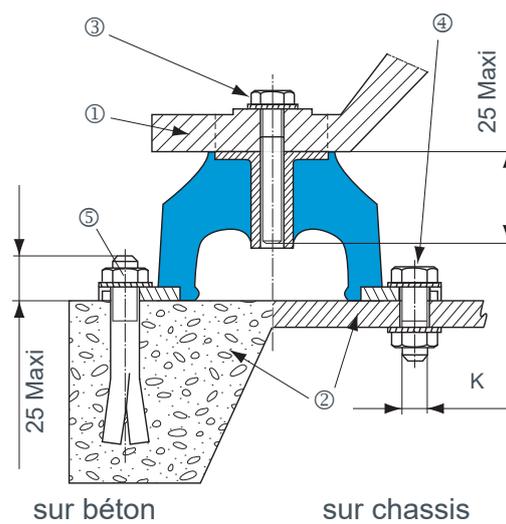


Fig. 1

Couple de serrage recommandé

Diamètre K (mm)	M6	M8	M10	M12
Couple N.m	2	5	12	20

Nota : ne pas peindre les supports après montage.

Autre Montage

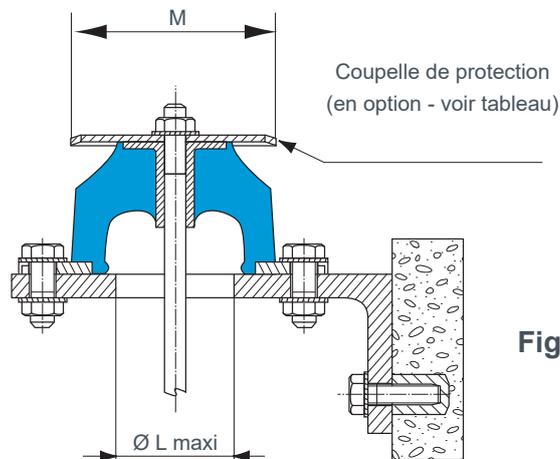


Fig. 2

Caractéristiques de montage et références coupelles de protection

Références Paulstradyn [®]	Dimensions (mm)			Référence coupelle (en option)
	K Fig. 1	L maxi Fig. 2	M mini Fig. 2	
533701, 533702, 533703,	M5	27	14	342919
533704, 533705, 533706	M5	40	34	342356
533707, 533708, 533709	M6	46	50	342733
533710, 533711, 533712	M8	47	70	342734
533713, 533714, 533715	M10	99	118	342353
533716, 533717, 533718	M12	127	162	342354
533719				



Réponse aux vibrations sinusoïdales

Réf. : P2022-045-AM
 Date: 02/03/2022
 Auteur: Antoine Migeon

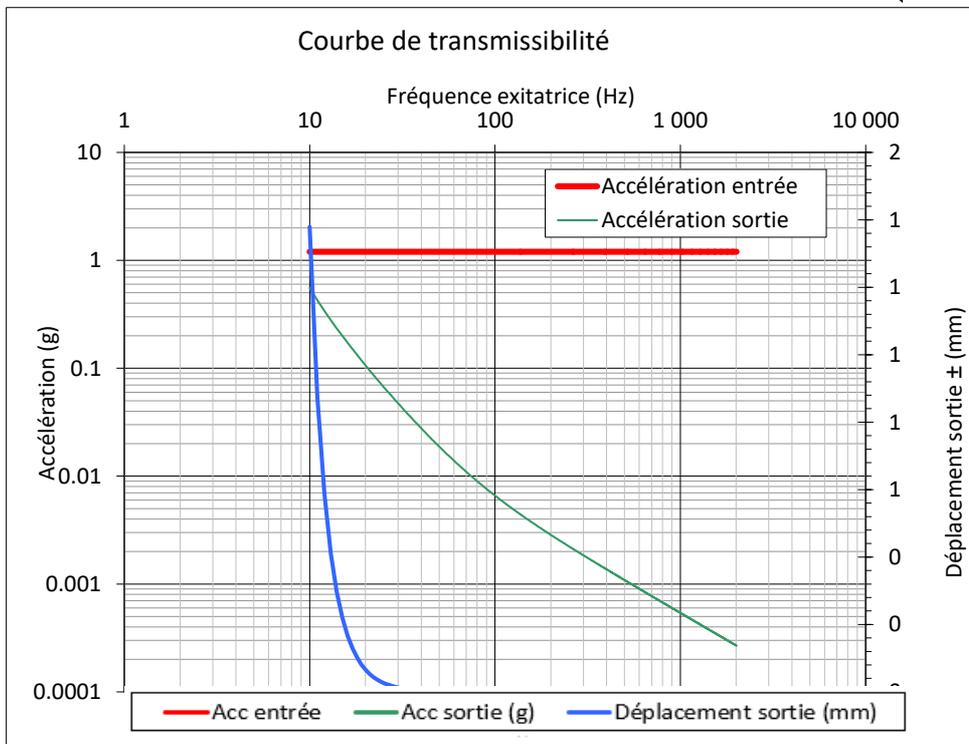
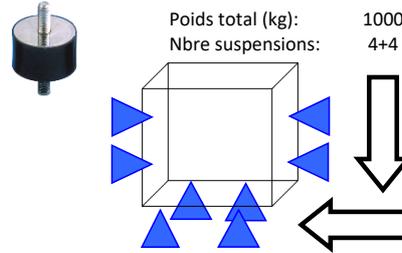
Client: LP ART
 Application: Caisse de transport
 Direction excitation: Vertical & horizontal

Fréquence propre (Hz) : 5.61
 Surtension à la résonance: 12.5
 Réf suspensions : RADIAFLEX 521711

Poids total (kg): 1000
 Nbre suspensions: 4+4

Spectre:

Fréquences (Hz)		Amplitudes	
Borne inf.	Borne sup.		
10	100	1.20E+00	(g)



Déplacement suspension maximum ± : 1.4 mm

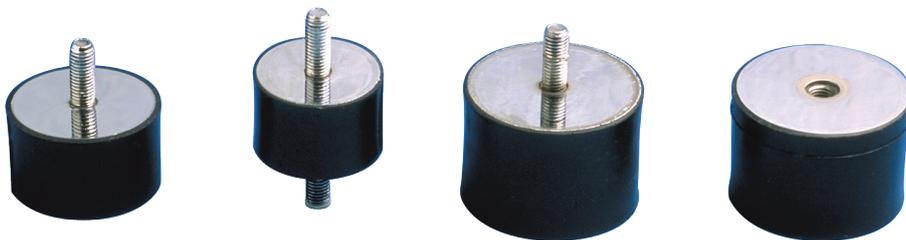
La présente préconisation est établie en fonction des informations portées à notre connaissance, avec les simplifications nécessaires à une préconisation rapide. Elle ne saurait donc engager la responsabilité de Paulstra. Ce document est la propriété de Paulstra et ne peut être utilisé sous quelque forme et à quelque fin que ce soit sans son accord exprès.

61 rue Marius Aulfan 92 Levallois-Perret tel +33 1 40 89 53 31 Calcul vibratoire sinus_1 tranche_Acc_Vert_Horiz_LPART_RADIAFLEX.xlsx - 02/03/2022

Calcul vibratoire sinus_1
 tranche_Acc_Vert_Horiz_LPART_RADIAFLEX

RADIAFLEX[®]

RADIAFLEX[®] INOX



DESCRIPTION

- Armatures : plaques cylindriques.
- Caoutchouc naturel adhérent, forme cylindrique.
- Fixation par vis, par écrous ou mixte.

FONCTIONNEMENT

La conception du plot RADIAFLEX[®] lui confère les propriétés fondamentales suivantes:

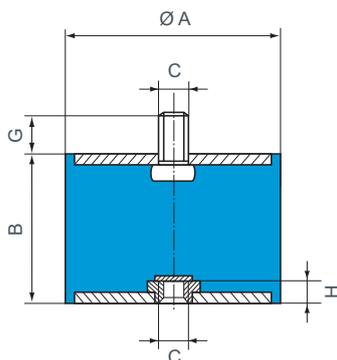
- une élasticité radiale plus importante que son élasticité axiale;
- travail du caoutchouc :
 - en compression (axial);
 - en cisaillement (radial);
 - ou en compression-cisaillement suivant le montage.

Avantages

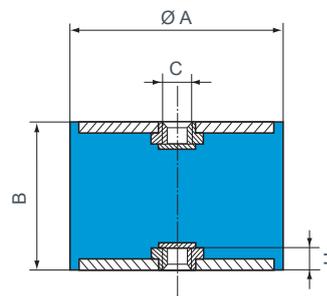
- Simplicité de montage.
- Produit simple et économique.
- Gamme étendue.

CARACTÉRISTIQUES DIMENSIONNELLES & TECHNIQUES

Fixation mixte



Fixation 2 trous taraudés



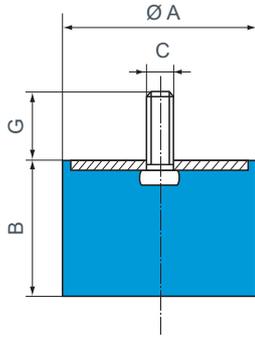
Ø A (mm)	B (mm)	C	G (mm)	H (mm)	Compression		Cisaillement*		Réf.
					Charge Maxi (daN)	Flèche (mm)	Charge Maxi (daN)	Flèche (mm)	
16	10	M4	13	6	20	1,5	2,5	1,5	520051
	10		2	1,5		1,5			
	10		2	3		2,5			
	15	M5	12	3	20	1,5	2,5	1,5	520010
15	20				3	2,5	2	520011	
20	15				4	2,5	4	520012	
25	15				5	2	5	520013	
20	15	M6	16,5	4	35	2,5	5	2,5	520015
	20				30	4,5	5	5	520016
	25				30	5,5	4,5	4,5	520017
	30				25	7	4,5	4,5	520018
25	25	M6	18	6	40	3,5	9	5	520062
	25				60	2,5	8	8,5	520052
25,5	20	M6	18	4	50	3,5	8	4	520055
	25				50	3,5	8	4	520055
	30				50	7,5	8	6	520057
	40	M8	20	6	50	3,5	8	4	520021
25	50				5	8	4,5	520022	
30	50				7,5	8	6	520023	
40	50				10	6	6	520024	
30	15	M8	25	6	90	3	11	2,5	520025
	22				80	4,5	11	4	520026
	30				70	7,5	11	6	520027
	40				60	9	11	7,5	520028
40	30	M8	20	6	150	4,5	20	5,5	520056
	40				120	10	20	7,5	520058
	20				160	4	20	3	520029
	28				150	5	20	5,5	520030
40	35	M10	25	8	120	7,5	20	6,5	520031
	40				120	10	20	7,5	520032
	40				120	10	20	7,5	520032
	45				120	11	20	9	520033
50	45	M10	15	8	190	11	25	9	520036/15
	20				300	3	35	9,8	520047
	30				190	5	34	9,8	520048
	35				250	8	25	7	520035
	40				170	7	34	8,5	520063
	45				190	11	25	9	520036
60	36	M10	25	8	300	8	30	7	520038
	45				250	10	30	9	520039
70	35	M10	25	9	450	7,5	35	6,5	520040
	50				350	10	35	11	520041
	50				300	14	35	15	520042
	70				300	14	35	15	520042
75	40	M12	35	8	450	7	80	8,5	520070
	45				400	7	80	9	520071
75	55	M12	30	10	380	10	80	12	520072
	55				380	10	80	12	520072
80	40	M12	28	10	600	8	40	7	520059
	40				600	8	40	7	520044
	70				500	17	40	15	520045
100	40	M16	47	14	1 100	6	60	7	520100
	55				900	12	60	10	520101
	80				750	19	60	17	520102
	100				600	18	60	20	520103

Ø A (mm)	B (mm)	C	H (mm)	Compression		Cisaillement*		Réf.		
				Charge Maxi (daN)	Flèche (mm)	Charge Maxi (daN)	Flèche (mm)			
16	10	M4	2,5	20	1,5	2,5	1,5	520550		
	15			20	3	2,5	2	520551		
	10	M5	3	20	1,5	2,5	1,5	520500		
	15			20	3	2,5	2	520501		
20	15			4	2,5	4	520502			
20	15	M6	4	35	2,5	5	2,5	520505		
	20			30	4,5	5	3,5	520506		
	25			30	5,5	4,5	4,5	520507		
	30			25	7	4,5	4,5	520508		
25,5	20	M6	4	50	3	8	4	520554		
	30			50	7,5	8	6	520555		
	22	M8	6	50	3	8	4	520511		
	25			50	4,5	8	4,5	520512		
30	50			7,5	8	6	520513			
30	22	M8	6	80	4	11	4	520516		
	30			70	7,5	11	6	520517		
	40			60	9	11	7,5	520518		
	40			150	4,5	20	5,5	520552		
40	30	M8	6	120	10	20	7,5	520553		
	40			120	10	20	7,5	520553		
	28			M10	8	150	4,5	20	5,5	520520
	35					120	7	20	6,5	520521
50	40	M10	8	120	10	20	7,5	520522		
	45			120	11	20	9	520523		
	35			M10	8	250	7	25	7	520525
	45					190	10	25	9	520526
50	30	M10	10	190	5	34	6	520524		
	40			170	7	34	8,5	520527		
	50			160	9	34	11	520533		
60	36	M10	8	300	7	30	7	520528		
	45			250	9	30	9	520529		
70	35	M10	9	450	7	35	6,5	520530		
	50			350	9	35	11	520531		
	70			300	14	35	15	520532		
75	40	M12	13	450	7	80	8,5	520558		
	55			380	10	80	12	520557		
80	40	M12	10	600	7	40	7,5	520556		
	40			600	7	40	7	520534		
100	40	M14	12	500	17	40	15	520535		
	70			450	19	40	17	520536		
	60			M16	14	600	4	60	7	520541
	55					900	12	60	10	520542
100	60	M16	14	1 100	8	180	10	520545		
	75			600	10	140	12	520546		
	80			750	19	60	17	520543		
	100			600	18	60	20	520547		

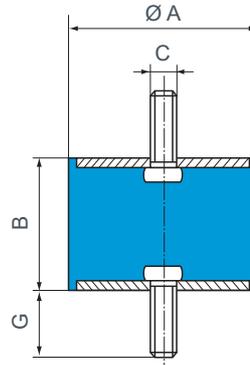
Les plots de Ø 16 et à trous taraudés sont munis d'écrous RAPID.
Couple de serrage correspondant à 1,8 N.m.

Les plots de Ø 16 et à trous taraudés sont munis d'écrous RAPID.
Couple de serrage correspondant à 1,8 N.m.

Fixation 1 tige filetée



Fixation 2 tiges filetées

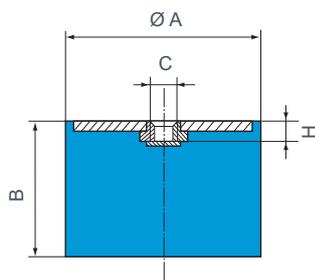


Ø A (mm)	B (mm)	C	G (mm)	Compression		Réf.	
				Charge Maxi (daN)	Flèche (mm)		
12,5	10	M5	10	12	2	511110	
	13,5			11	2,5	511128	
	15			10	3	511115	
	20			8	3,5	511125	
16	10	M4	10	20	2	511150	
	15			3	511151		
	10	M5	12	20	2	511292	
	15			20	2	51129212	
	15			20	3	511294	
	20			15	4	511296	
25	15	5	511298				
20	5	M6	10	77	0,6	511206	
	8,5			40	1,5	51120011	
	8,5	M6	16,5	40	1,5	511200	
	15			35	4	511215	
	20			30	5	511220	
	25			30	5,5	511225	
30	25	7	511230				
25,5	10	M6	18	80	2	511158	
	10			80	2	51115811	
	15			60	3,5	511155	
	20			50	5	511159	
	30			50	8	511160	
	5	M8	20	82	0,6	51126550	
	10			80	2	511265	
	15	60	3,5	511270			
	15	M8	12	60	3,5	51127013	
	19			55	4,5	511251	
22	50			5,5	511275		
25	50			6	511280		
30	50	8	511285				
40	50	10	511290				
30	15	M8	25	90	3,5	511308	
	22			80	6	511310	
	30			70	8	511312	
	30			70	8	51131221	
	40			60	9	511314	
40	20	M8	20	160	5	511411	
	30			120	7	511157	
	40			120	10	511161	
	40			120	10	511161	
40	20	M10	25	160	5	511450	
	25			150	6	511401	
	35			120	8	511452	
	40			120	10	511454	
	45			120	11	511456	
	45			120	11	511456	
50	25	M10	25	300	6	511525	
	35			250	9	511535	
	45			190	11	511545	
	35			25	250	8	511581
	35			25	250	8	511581
60	22	M10	25	350	3	513601	
	25			400	6	511625	
	36			300	9	511635	
	45			250	11	511645	
	35			450	9	511735	
	50			350	12	511750	
70	300	14	511770				
75	25	M12	37	600	4,5	511751	
80	25	M14	45	1 100	6	513801	
	30			950	8	511830	
	40			600	10	511840	
	70			35	500	17	511870
	80			35	450	19	511880

Ø A (mm)	B (mm)	C	G (mm)	Compression		Cisaillement*		Réf.	
				Charge Maxi (daN)	Flèche (mm)	Charge Maxi (daN)	Flèche (mm)		
12,5	10	M5	10	12	2	1,5	1,5	521293	
	15			3	2,5	2	521128		
	20			8	3,5	4	521295		
16	10	M4	10	20	1,5	2,5	1,5	521650	
	15			3	2	521651			
	10	M5	12	20	1,5	2,5	1,5	521292	
	15			20	3	2,5	2	521294	
	15			15	4	2,5	4	521296	
	25			15	5	2	5	521298	
25	15	5	5	2	5	52129811			
20	8,5	M6	16,5	40	0,6	5	1	521178	
	15			35	3	5	2,5	521249	
	20			30	4,5	5	3,5	521297	
	20			30	4,5	5	3,5	52129721	
	25			30	5,5	4,5	4,5	521299	
	30			30	5,5	4,5	4,5	52129911	
25	25	M6	18	40	3,5	9	3,5	521319	
25,5	10	M6	18	80	1,5	8	1,5	521178	
	15			60	2,5	8	2,5	521249	
	20			50	2	8	4	521652	
	30			50	7,5	6	6	521653	
	30			50	7,5	6	6	52165311	
	10	M8	20	80	0,7	8	0,7	521340	
	15			60	2,5	8	2,5	521341	
	22			50	4	8	4	521251	
	25			50	5,5	8	4,5	521342	
	30			50	7,5	8	6	521343	
40	50	10	6,5	6	521344				
40	50	10	6,5	6	52134411				
30	15	M8	25	90	3	11	2,5	521308	
	22			80	5	4	4	521310	
	22			80	5	4	4	52131021	
	30			70	8	6	6	521312	
	40			70	8	6	6	52131221	
40	60	9	7,5	7,5	521314				
40	30	M8	20	150	6	20	5,5	521181	
	40			120	10	7,5	7,5	521657	
	20			160	4	3	521450		
	28			150	6	5,5	521401		
28	150	6	5,5	52140111					
35	120	8	6,5	521452					
40	120	10	7,5	521454					
45	120	10	7,5	52145411					
45	120	11	9	521456					
50	20	M10	25	300	3	35	3,5	521583	
	25			300	6	25	4,5	521580	
	25			300	6	25	4,5	52158021	
	30			25	190	5	34	6	521584
	35			25	250	8	25	7	521581
	35			25	250	8	25	8,5	52158111
	40			28	170	7	34	9	521585
	45			25	190	11	25	9	521582
	45			25	190	11	25	9	52158211
	45			M10	15	190	11	25	9
60	25	M10	25	400	5	30	4,5	521601	
	36			300	8	30	7	521603	
	45			250	11	30	9	521641	
70	35	M10	25	450	8	35	6,5	521705	
	50			350	11	35	11	521710	
	70			300	14	35	15	521711	
75	25	M12	37	600	4,5	80	5	521712	
	40			450	7	80	8,5	521713	
	55			380	10	80	12	521714	
80	40	M12	28	600	9	40	7	521658	
	30			45	950	7	40	5	521803
	30			35	950	7	40	5	521840
	40			35	600	9	40	7	521841
	70			35	500	17	40	15	521842
	80			35	450	19	40	17	521843
100	40	M16	47	1 100	8	60	7	521908	
	55			900	12	60	10	521909	
	80			750	19	60	17	521910	

Pour connaître la disponibilité de nos pièces, veuillez nous consulter.
*Les caractéristiques en cisaillement sont mesurées sous compression charge maximale.

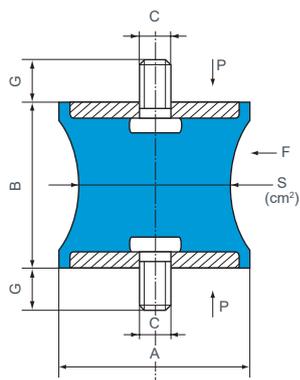
Fixation 1 trou taraudé



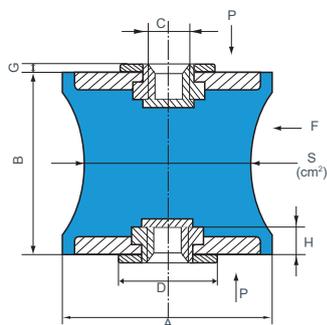
Ø A (mm)	B (mm)	C	H (mm)	Compression		Réf.
				Charge Maxi (daN)	Flèche (mm)	
16	10 15	M4	2,5	20 20	2 3	511152 511153
20	15	M6	4	35	4	511154
25,5	15	M6	4	60	3,5	511164 511162 511163
	20			5,5		
	30			8		
30	22	M8	6	80	6	511156 511178
	28			7		
40	28	M8	15	110	5	511179
	40			7,5		
50	20	M10	10	343	3,4	511168 511180
	30			5		
	40			7		
60	25	M10	8	400	6	511182 511183
	45			11		
75	25	M12	12	600	4,5	511184 511185
	40			7		

Les plots de Ø 16 et à trous taraudés sont munis d'écrous RAPID.
Couple de serrage correspondant à 1,8 N.m.

Plots Diabolo



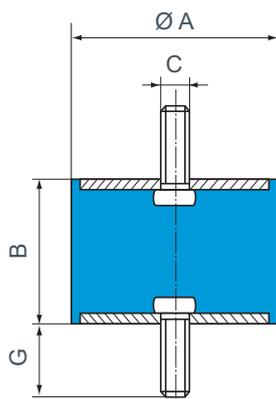
Ø A (mm)	B (mm)	C	G (mm)	S (cm²)	Compression (P)		Cisaillement* (F)		Réf.
					Charge maxi (daN)	Flèche (mm)	Charge Max (daN)	Flèche (mm)	
12,5	14	M5	10	0,3	3	1,4	0,5	1,2	521300
20	19	M6	16,5	1,6	12	2,5	3	5	521201
40	28	M10	25	3,1	30	5	2,5	4,5	521403
57	44	M8	20	5	40	5	7	5	521571
57	44	M8	20	9,5	75	5	12	6	521572
60	60	M10	25	19,5	150	8	30	10	521602
80	70	M14	35	38,5	300	9,5	55	9,5	521801
95	76	M16	45	50	400	9,5	70	8	521951



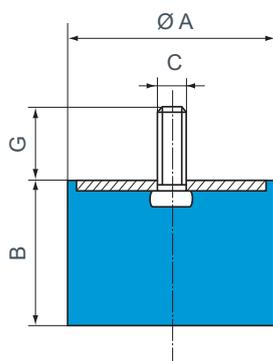
Ø A (mm)	B (mm)	C	S (cm²)	H (mm)	G (mm)	D (mm)	Compression (P)		Cisaillement* (F)		Réf.
							Charge maxi (daN)	Flèche (mm)	Charge Max (daN)	Flèche (mm)	
80	60	M14	38,5	15,5	3	30	250	5	70	8	521802

* Les caractéristiques en cisaillement sont mesurées sous charge axiale.

RADIAFLEX INOX 430

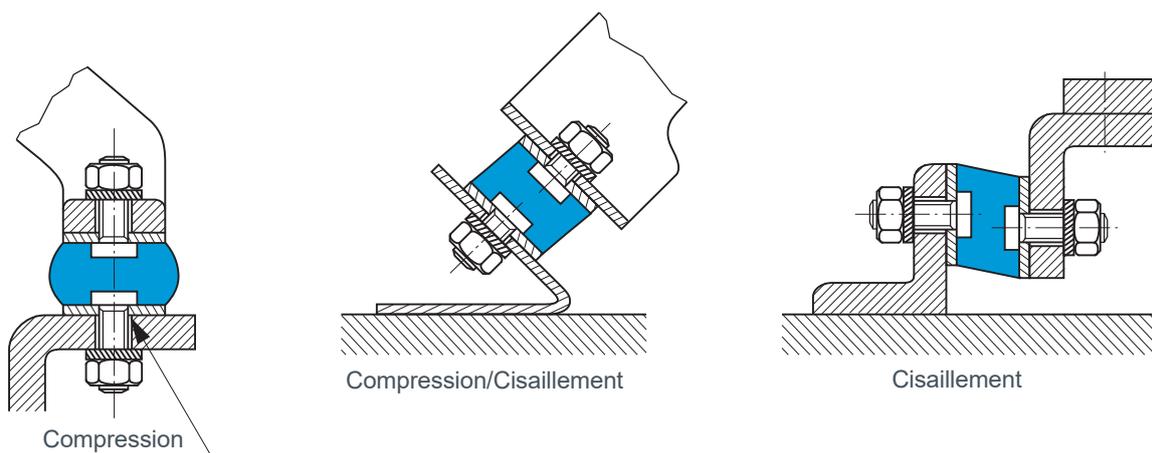


Ø A (mm)	B (mm)	C	G (mm)	Charge Max (daN)	Référence
16	25	M5	15	15	52129811
20	20	M6	16,5	30	52129721
20	25	M6	16,5	30	52129911
25,5	30	M6	18	50	52165311
25,5	40	M8	20	50	52134411
30	22	M8	25	80	52131021
30	30	M8	25	70	52131221
40	28	M10	25	150	52140111
40	40	M10	25	120	52145411
50	25	M10	25	300	52158021
50	35	M10	25	250	52158111
50	45	M10	25	190	52158211



Ø A (mm)	B (mm)	C	G (mm)	Charge Max (daN)	Référence
16	10	M5	12	20	51129212
25	10	M6	18	80	51115811
30	30	M8	25	70	51129212

MONTAGES



Sur les trous de fixation prévoir un chanfrein d'entrée d'une hauteur égale au pas de la tige filetée.

Annexe 4 : Fiche technique Tyvek®, DuPont™



Tyvek.

DuPont™ Tyvek® Datasheet 1442R (Effective : April 2014)

Specification properties of DuPont™ Tyvek®

Property	Unit	Nominal	Low	High	Test Method
Basis Weight	g/m ²	43.0	41.0	45.0	DIN EN ISO 536 (96) 1)
Delamination	N/2.54cm	0.25	0.10	0.40	ASTM D2724-07 2)

Corona and Antistat treated on both sides

Miscellaneous properties of DuPont™ Tyvek®

Property	Unit	Typical value	Test Method
Thickness	µm	145	DIN EN ISO 534 (05) 3)
Tensile (MD)	N/2.54cm	44	DIN EN ISO 1924-2 (08) 4)
Tensile (XD)	N/2.54cm	38	DIN EN ISO 1924-2 (08) 4)
Tongue Tear (MD)	N	11.2	ISO 4674-A2 (97) 5)
Tongue Tear (XD)	N	11.0	ISO 4674-A2 (97) 5)
Mullenburst	kPa	365	ISO 2758 (01)

1) Sample size 100 cm²

2) Modified for : result interpretation – length of delamination = 116mm, width, speed = 127mm/min. & clamp distance = 60mm

3) Surface 2cm², pressure 100kPa

4) Modified for: speed = 100mm/min. width = 25.4mm & gauge length = 127mm

5) Modified for sample size, speed and expression of results

Notes : Specification properties are controlled to a nominal value and released within specifications. Miscellaneous properties represent typical values based on roll averages, except for thickness (individual), with samples taken uniformly across the sheet. Thickness (individual) typical values are based on a population of pooled individual data points from multiple rolls. Miscellaneous properties are not controlled in the process, and therefore, are subject to slight changes from "normal" process drift. Customers must conduct their own tests to ensure suitability for the intended application. These properties are representative for uncoated Tyvek® as sold by DuPont. Product safety information is available upon request. This information may be subject to revision as new knowledge and experience becomes available. Since we cannot anticipate all variations in actual end-use conditions, DuPont makes no warranties and assumes no liabilities in connection with any use of this information. Nothing in this publication is to be considered as a license to operate under or a recommendation to infringe any patent rights.

The DuPont Oval Logo, DuPont™, The miracles of science™, and Tyvek® are registered trademarks or trademarks of DuPont or its affiliates.

Annexe 5 : Fiche technique Plastazote®



FICHE TECHNIQUE

Mousse de polyéthylène Plastazote®

- Idéal pour l'emballage et la protection des oeuvres d'art
- Inerte, légère et dense
- Conforme à la norme NF Z40 012

La mousse de Plastazote® est une mousse de polyéthylène basse densité, à cellules fermées, chimiquement neutre et donc particulièrement adaptée à la conservation et la présentation des collections.

Elle se coupe facilement au cutter simple ou à lame chauffante. Idéale pour la protection de fond de tiroir, pour le calage et la protection d'oeuvres lors de transports, pour la conservation des textiles.

Disponible en feuille de différentes épaisseurs (2,5, 5, 10, 20, 30 et 45 mm) ainsi qu'en rouleau ép. 5 mm. Coloris blanc ou noir.

Caractéristiques :

densité 45 kg/m³ suivant normes ISO 845 1988 - BS 4443
Pt1 : 2 1988 - DIN 53420 1978.

Résistante au déchirement :
1030 N/m selon norme ISO 8067 1991.

Résistante à la rupture : 600 kPa selon norme ISO 1798 1083.

Surface lisse, non abrasive.

Allongement à la rupture : 150 %.

Gamme de température d'utilisation recommandée : -70/+110°C.

Autres formats ou épaisseurs : NOUS CONSULTER.

Existe également avec dos adhésivé.

Réf.	Désignation	Dim.	Ép. en mm	Cdt
C4454030	Plastazote**	100 x 200 cm	2,5	La feuille
C4454012	Plastazote*	100 x 200 cm	5	La feuille
C4454011	Plastazote*	100 x 66 cm	10	Lot de 3 feuilles
C4454013	Plastazote*	100 x 66 cm	20	Lot de 3 feuilles
C4454014	Plastazote*	100 x 66 cm	30	Lot de 3 feuilles
C4454015	Plastazote*	100 x 66 cm	45	Lot de 3 feuilles
C4454090	Plastazote*	L 1 m x 20 m	5	Rouleau

*Précisez le coloris choisi à la commande : noir ou blanc

** coloris noir uniquement



Z.A. les Marceaux | Allée Jean Chaptal | 78710 Rosny-sur-Seine | Téléphone 01 30 33 99 30
Email commercial@promuseum.fr | Site Internet www.promuseum.eu

1 / 1
Révision : juillet 2020

Mandataire : Thalia Bajon-Bouzid

Equipe: Thalia Bajon Bouzid, Raphaëlle Déjean, Elodie Aparicio Bentz, S-MA-C-H

Annexe 6b : Fiche technique de l'Ethafoam®

PROMUSEUM
MATÉRIELS ET MATÉRIAUX POUR LA CONSERVATION ET LA RESTAURATION

FICHE TECHNIQUE

Mousse de polyéthylène Ethafoam®

- Conforme à la norme NF Z40 012

Ethafoam® est une mousse de polyéthylène neutre et stable, destinée à la protection et au calage des objets d'art.

Elle est moins lisse, moins souple et plus économique que la mousse Plastazote, mais leurs applications sont sensiblement identiques.

Elle se coupe facilement au cutter simple mais le thermocutter est idéal pour avoir des coupes nettes. Disponible en 3 épaisseurs : 10, 50 et 100 mm.

Coloris : blanc.

Caractéristiques : densité : 37 kg/m³.

Dimensions : 600 x 900 mm.

Conforme à la norme NF Z40 012.



Réf.	Désignation	Dimensions	Ep.en mm	Cdt
C4454501	Ethafoam	60 x 90 cm	10	5
C4454502	Ethafoam	60 x 90 cm	50	5
C4454503	Ethafoam	60 x 90 cm	100	P



Z.A. les Marceaux | Allée Jean Chaptal | 78710 Rosny-sur-Seine | Téléphone 01 30 33 99 30
Email commercial@promuseum.fr | Site Internet www.promuseum.eu

1 / 1
Révision : juillet 2020

Annexe 7 : Fiche technique pare-feu Valsem®



FICHE PRODUIT
VALSEM S28
 H 00.310 CLASSE 1
 MIL B 131 H TYPE 1 CLASS 1

EXEMPLES D'UTILISATION

- EMBALLAGE EXPORT
- STOCKAGE LONGUE DUREE
- EMBALLAGE INDUSTRIEL

DESCRIPTION GENERALE

- MATERIAU SOUPLE ET THERMOSOUDABLE
- HAUTE BARRIERE: P(H2O) ≤ 0,30 g/m²/24h
- HAUTE RESISTANCE MECANIQUE



COMPOSITION

Support: Polyester
 Liaison: Adhésif
 Aluminium
 Liaison: Extrusion
 Couche interne: Polyéthylène

DENSITE: 126 g/m²
 EPAISSEUR: 110 µm

(Valeurs statistiques moyennes)

CONDITIONNEMENT

- ROULEAUX

Larg.	Long.	Poids
1 m	200 m	31 kg
1,25 m	200 m	39 kg
1,5 m	100 m	23 kg

Rouleaux emballés individuellement dans carton

- HOUSSES, GAINES & SACS
 Toutes formes et dimensions sur mesure

PERMEABILITE

- Suivant test norme H00 310: 0,155 g/m²/24h
- Suivant test sachet 0,02 g/m²/24h
- Suivant test TL 8135-0003 Valeur <0,05 g/m²/24h

Se reporter à la note technique

DECHIRURE

Résistance à la propagation de la déchirure selon la Norme **NF T 54 108**

Sens machine: 42 N
 Sens transversal: 57 N

CONDITIONS DE SOUDURE

Pression: 2 daN/cm²

	1 Barreau chauffant	2 Barreaux chauffants
A l'état de livraison	180°C 2sec	140°C 2sec
Après vieillissement	190°C 2sec	150°C 2sec

Sur le complexe sont imprimées les conditions de soudures après vieillissement, avec 1 barreau chauffant

CARACTERISTIQUES D'EMPLOI

- Plage de température: -40°C à +110°C
- Exposition aux UV: Ce complexe doit être tenu à l'abri de l'action des UV. Les emballages doivent être placés en caisses pleines ou protégés par tout moyen approprié
- Tenu des soudures: Ne jamais faire travailler les soudures à l'arrachement. Pratiquer une légère dépression dans l'emballage.



RECAPITULATIF DES RESULTATS D'ESSAIS

Réf. Complexe: VALSEM S28		PV N°: 807 0229		Etabli le: 15-07-1998 Par: www.LNE.fr		
N° de l'essai	Caractéristiques physiques	Conditions requises Norme NF H00 310				Performances du complexe présenté
		Classe I	Classe II	Classe III	Classe IV	
1	RESISTANCE DE LA SOUDURE SUR: Matériau soudé à l'état de livraison et essayé à (en mm): a) 23°C b) 38°C c) 70°C Matériau soudé puis vieilli (12 jours à 70°C) et essayé à (en mm): a) 23°C b) 38°C c) 70°C Matériau vieilli (12 jours à 70°C) puis soudé et essayé à (en mm): a) 23°C b) 38°C c) 70°C	Conditions de soudure: Nombre de mâchoires chauffantes: 1 Température: 170°C Temps: 3s Pression: 2daN/cm ² ni séparation, ni délamination des éléments soudés 6,0 (max) 6,0 (max) 6,0 (max) 6,0 (max) 6,0 (max) 6,0 (max) 6,0 (max) 6,0 (max) ni séparation, ni délamination des éléments soudés 6,0 (max) 6,0 (max) 6,0 (max) 6,0 (max) 6,0 (max) 6,0 (max) 6,0 (max) 6,0 (max) ni séparation, ni délamination des éléments soudés 6,0 (max) 6,0 (max) 6,0 (max) 6,0 (max) 6,0 (max) 6,0 (max) 6,0 (max) 6,0 (max)				0mm 0mm 0mm 0mm 0mm 0mm 0mm 0mm 0mm
2	ETANCHEITE DE LA SOUDURE: -double soudure -simple soudure	Pas de fuite Sans objet	Pas de fuite Sans objet	Pas de fuite Sans objet	Pas de fuite Sans objet	Conforme
3	COEFFICIENT DE TRANSMISSION DE LA VAPEUR D'EAU (en g/m ² /24h): -après froissement à 23°C sur matériau à l'état de livraison -après froissement sur matériau vieilli (72h à 70°C et 85% d'humidité relative) -après froissement à -30°C sur matériau à l'état de livraison	0,30 (max) 0,30 (max) 0,45 (max)	0,30 (max) 0,30 (max) 0,45 (max)	0,30 (max) 0,30 (max) 0,45 (max)	0,30 (max) 0,30 (max) 0,45 (max)	Tests Sachets 0,02 0,11 0,08
4	RESISTANCE A LA RUPTURE PAR TRACTION Méthode GRAB, en N/25mm: (sens de moindre résistance) -sur matériau à l'état de livraison -sur matériau vieilli (72h à 70°C et 85% d'humidité relative)	225 (min) 225 (min)	112,5 (min) 112,5 (min)	225 (min) 225 (min)	350 (min) 350 (min)	311 318
5	RESISTANCE A LA PERFORATION DYNAMIQUE (en N) face de moindre résistance	68	27	45	100	82
6	TENUE AU VIEILLISSEMENT	Délamination limitée				Conforme
7	EFFET D'AUTO-COLLAGE	Pas d'auto-collage, ni délamination, ni rupture				Conforme
8	EFFET DE TUILE (auto-enroulement)	Ne doit pas s'enrouler plus de 5%				Conforme
9	TENUE AUX HUILES	Pas de fuite, ni gonflement, ni délamination				Conforme
10	CORROSION PAR CONTACT	aucune	aucune	aucune	aucune	Aucune
11	RESISTANCE A L'EAU	Délamination limitée				Conforme
12	TENUE A L'EAU DU MARQUAGE	Les marques doivent rester nettes et visibles				Conforme

• FP S28 / Rev. 0.1 / 17-06-2010 • p.2/2 • www.valsem.com • contact@valsem.com • ©Valsem Industries SAS 2010 •