

VIBRATIONS ET CONSERVATION

Sandie Le Conte, Loïc Forma, Henri Boutin, Marguerite Jossic,
Nicolas Wilkie-Chancellor

Résumé

Des différentes nuisances que peut subir un objet du patrimoine, les vibrations sont les dernières à avoir été considérées par les responsables de collection et *a fortiori* par les scientifiques. Pourtant la soumission ponctuelle ou répétée à des sollicitations vibratoires de faibles amplitudes provoque un effet de fatigue pouvant conduire à la rupture. Aujourd'hui, la communauté patrimoniale ne peut que constater les dommages à l'échelle macroscopique provoqués par les vibrations basses fréquences ([20-500 Hz]) sur les collections publiques en attendant l'arrivée de nouvelles solutions techniques.

La présente communication proposera une méthode d'évaluation des propriétés absorbantes des chocs et vibrations des matériaux de calage usuels et en donnera les résultats en fonction de la fréquence de la vibration à « neutraliser ». Une ouverture sera également proposée en présentant des matériaux biosourcés pouvant être utilisés de manière alternative aux mousses pétrosourcées. Parallèlement à ces travaux, une recherche de solution alternative sera présentée : une preuve de concept de l'application du contrôle actif pour diminuer l'amplitude de vibration en contexte muséal.

Abstract Of the various disturbances that a heritage object may suffer, vibrations have been the last to be considered by collection managers and all the more so by scientists. Yet occasional or repeated exposure to low-amplitude vibratory forces induces fatigue that can eventually lead to breakage. Today, the heritage community can only observe the macroscopic damage caused by low-frequency vibrations ([20–500 Hz]) on public collections while awaiting new technical solutions. This paper will present a method for assessing the shock- and vibration-absorbing properties of common support materials, with results provided according to the frequency of the vibration to be “neutralised”. It will also introduce bio-sourced materials as a potential alternative to petrochemical-based foams. In parallel with this work, an alternative solution will be presented—a proof of concept for applying active control to reduce the amplitude of vibrations in a museum context.

Resumen Entre los diferentes problemas que pueden afectar un objeto patrimonial, las vibraciones son las que fueron consideradas más recientemente por los responsables de colección y a fortiori por los científicos. Sin embargo, someterlo puntualmente o de manera repetitiva a sollicitaciones vibratorias de débil amplitud provoca un efecto de fatiga que pueden conducir a la ruptura. Hoy la comunidad patrimonial puede solo constatar los daños a escala macroscópica provocadas por vibraciones de baja frecuencia (20-500 Hz) sobre colecciones públicas, esperando que lleguen nuevas soluciones técnicas. La presente comunicación propone un método de evaluación de las propiedades absorbentes de los materiales de embalaje usuales y dará resultados en función de la frecuencia de la vibración a « neutralizar ». Una pista será propuesta sobre materiales biológicos que pueden ser usados como alternativa a espumas derivadas del petróleo. Paralelamente a esta investigación, presentaremos una solución alternativa: la demostración conceptual de la aplicación del control activo para disminuir la amplitud de la vibración en contexto de museo.

Mots-clés vibrations, matériaux de calage, transport d'œuvres d'art

Des différentes nuisances que peut subir un objet du patrimoine, les vibrations sont les dernières à avoir été considérées par les responsables de collection et *a fortiori* par les scientifiques. Pourtant, la soumission ponctuelle ou répétée à des sollicitations vibratoires de faibles amplitudes provoque un effet de fatigue pouvant conduire à la rupture. Aujourd'hui, la communauté patrimoniale ne peut que constater les dommages à l'échelle macroscopique provoqués par les vibrations basses fréquences (20-500 Hz) sur les collections publiques, en attendant l'arrivée de nouvelles solutions techniques.

Les vibrations

À l'origine de la vibration, il y a une source qui applique une force mécanique à d'autres éléments qui se mettent à vibrer. Une fois la vibration créée, celle-ci se transmet via un milieu de propagation, solide ou fluide (mur, sol, air...). La vibration se propage alors jusqu'à atteindre un objet dans son contexte d'exposition ou de transport, également appelé système (fig. 1).

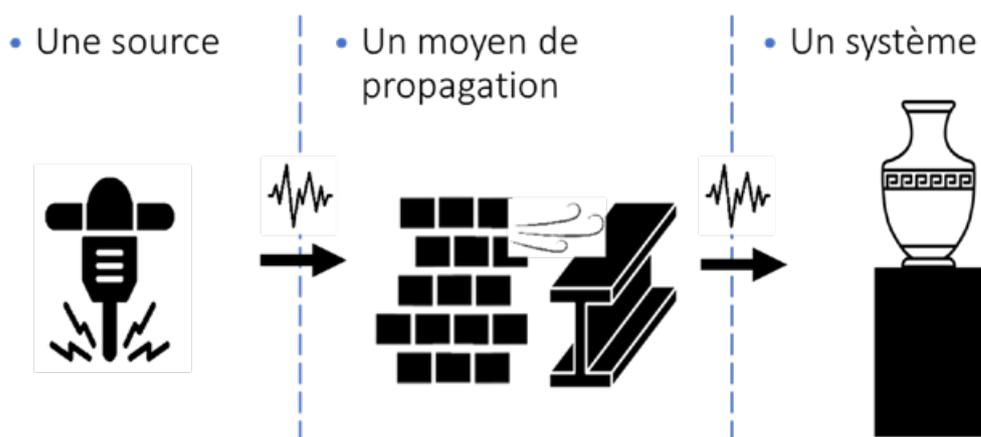


Figure 1 Schéma représentant le chemin emprunté par une vibration, de sa création par une source à sa propagation jusqu'au système.

D'un point de vue physique, la vibration est un déplacement autour d'un point d'équilibre en fonction du temps. Un mécanisme simple rendant compte de ce phénomène est celui du système de pendule. Une bille est attachée à un fil, ce dernier étant fixé à son autre extrémité. La bille est libre d'osciller en se déplaçant. Le premier paramètre décrivant le comportement oscillatoire est l'amplitude du mouvement (exprimée en mètres, ou millimètres), c'est-à-dire la distance entre la position extrême du mouvement et le point d'équilibre. Le second est le temps que met la bille pour faire un aller-retour en partant d'une position extrême. Cette durée qui est appelée « période » (symbole T , exprimée en secondes), est inversement proportionnelle à la fréquence (symbole $f=1/T$, exprimée en Hertz), grandeur plus communément utilisée représentant donc le nombre d'aller-retours, d'oscillations, par seconde.

Bien évidemment, les vibrations d'objets de la vie courante ont des comportements plus complexes que celui du système présenté. Pourtant, leurs vibrations peuvent être considérées comme la superposition d'un très grand nombre, voire d'une infinité de vibration de système simple, chacune avec une amplitude et une fréquence propre. C'est l'opérateur mathématique *transformée de Fourier* (Flandrin *et al.*, 2019) qui permet cette décomposition.

Vibrations et fatigue

Le caractère dangereux des vibrations est lié au principe de rupture de fatigue. Un objet en mouvement subit une répétition de contraintes qui peuvent entraîner des micro-fractures. L'objet se fragilise et finit par rompre alors que sa charge est nettement inférieure à celle nécessaire pour le casser lorsqu'aucun mouvement n'est appliqué. Cet effet est visible sur la figure 2, mettant en avant des fissures causées par des vibrations générées par des travaux à proximité de l'espace patrimonial. Cependant, aucune norme n'existe concernant la prévention vis-à-vis des vibrations.



Figure 2 Schéma d'une peinture murale romaine représentant la mort d'Iracus : représentation schématique mettant en avant les fissures apparues durant les travaux, d'après Thickett, 2002, fig. 4, p. 93.

Sources de vibration en contexte muséal

Les premières sources de vibrations qui viennent à l'esprit sont les transports d'œuvre. En effet, que ces déplacements soient internes à l'espace muséal (des réserves vers les salles d'exposition, vers des ateliers de restauration, etc.) ou externes, pour des prêts d'œuvres à l'occasion d'expositions temporaires, l'objet est déplacé, ce qui entraîne des vibrations. À titre d'exemple, un transport d'œuvre a pu être instrumenté. Il s'agit d'un transport externe, en caisse transportée dans un camion à suspension hydraulique. Les capteurs n'ont pas pu être posés sur l'œuvre, mais sur la caisse. Un capteur de référence a, quant à lui, été collé sur le sol du camion. La figure 3 représente, dans le domaine fréquentiel, les deux signaux captés sur le sol du camion et sur le sommet de la caisse.

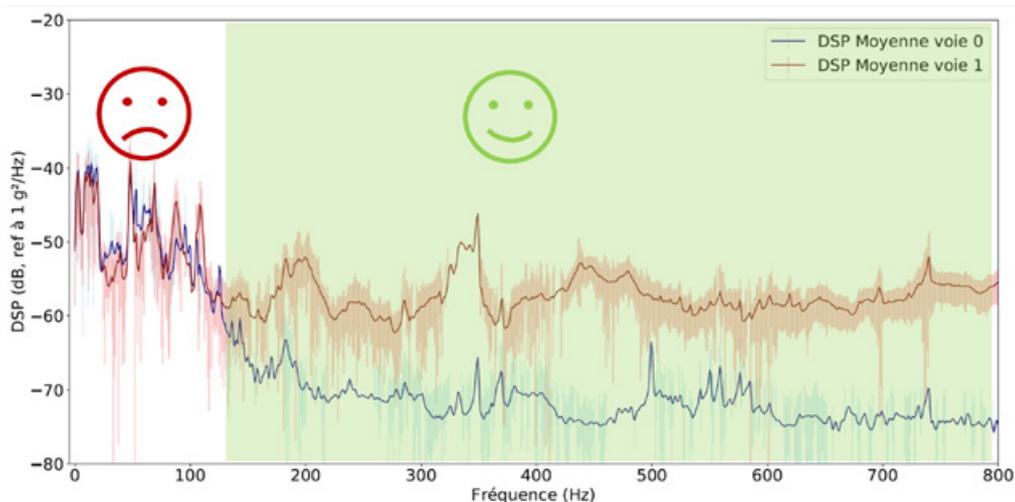


Figure 3 Représentation fréquentielle des accélérations mesurées sur la caisse (bleu) et sur le sol du camion (rouge) dans la direction verticale.

La figure 3 montre que le niveau de vibration de la caisse, après 150 Hz, est bien inférieur à celui du sol du camion. En revanche, entre quelques hertz et 150, la caisse vibre de la même façon que le sol. Cette expérience ne peut pas nous indiquer le niveau de vibration de l'objet mais nous indique que les basses fréquences ne sont pas filtrées par la caisse.

Une autre source de vibrations présente en contexte muséal est le pas des visiteurs, qui peut entraîner la vibration des supports. Une illustration est la mesure réalisée au musée de l'Homme sur la harpe des bustes. Les accéléromètres ont été collés sous un socle de buste et ont enregistré le niveau de vibration en l'absence de public (signal appelé bruit de fond) et en présence de visiteurs. Ces signaux sont représentés sur la figure 4.

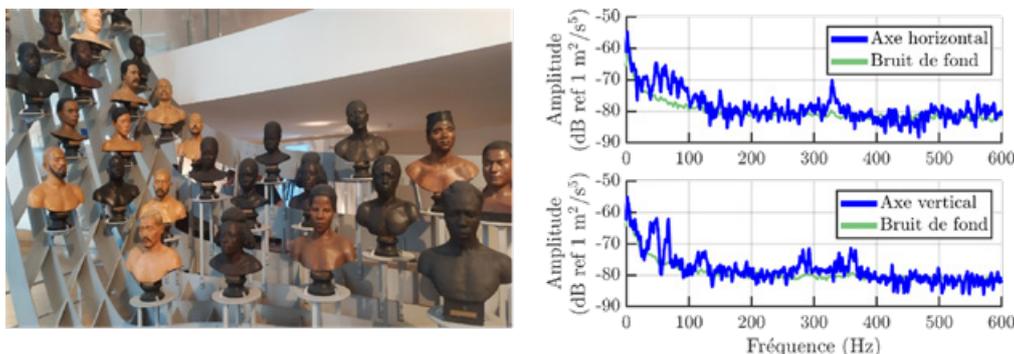


Figure 4 Représentation fréquentielle des signaux captés sur le socle d'un buste en l'absence (vert) et en présence de visiteurs (bleu).

Le graphique de la figure 4 montre un niveau plus élevé des vibrations, qu'elles soient verticales ou horizontales, en basses fréquences, à savoir entre quelques hertz et 200 Hz.

Nous pouvons également citer les vibrations générées lors de la fermeture / ouverture de la vitrine. La figure 5 illustre ce cas de figure en présentant une mesure réalisée au musée du quai Branly – Jacques Chirac. Là encore, les capteurs sont positionnés sous le support d'œuvre. Cette vibration s'apparente à un choc puisqu'elle est très brève dans le temps.

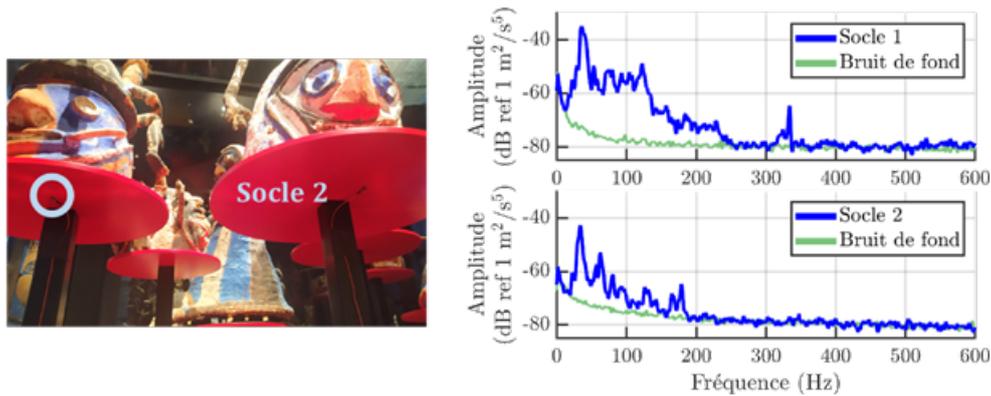


Figure 5 Représentation fréquentielle de vibrations générées par l'ouverture et la fermeture d'une vitrine.

Une nouvelle fois, ce sont les basses fréquences (jusqu'à 200 Hz) qui sont très présentes dans les vibrations de type impulsif.

Les autres sources de vibrations connues sont les travaux de génie civil à proximité ou dans les espaces muséaux, et plus récemment, les événements sonorisés dans les espaces patrimoniaux. Les mesures démontrent encore une fois la prédominance des vibrations basses fréquences.

Compte tenu de l'impact néfaste des vibrations à basses fréquences sur les objets, on se propose d'évaluer les propriétés absorbantes des matériaux de conditionnement, classiquement utilisés, dans cette bande de fréquence.

Mesure de propriétés absorbantes des matériaux de conditionnement

La méthode utilisée consiste à reproduire en laboratoire un support d'œuvre sur lequel différents matériaux de conditionnement sont positionnés et le tout est excité en vibration grâce à l'action d'un pot vibrant. Le pot vibrant est piloté via un ordinateur, ce qui permet de contrôler le type de vibration que l'on envoie au support, en amplitude et en bande de fréquence. Puis deux accéléromètres sont positionnés : l'un sous le support et l'autre sur un simulacre d'objet. Le principe de la mesure est donc de mesurer le niveau de vibration du support, celui de l'objet et de faire le rapport des deux. Le dispositif expérimental est représenté sur la figure 6.



Figure 6 Dispositif expérimental simulant la mise en vibration d'un support et mesurant le niveau de vibration du support et de l'objet.

Ce système physique se modélise assez simplement par un système dit « masse-ressort » et le rapport de l'accélération de l'objet sur celle du support se représente par la courbe théorique donnée en figure 7.

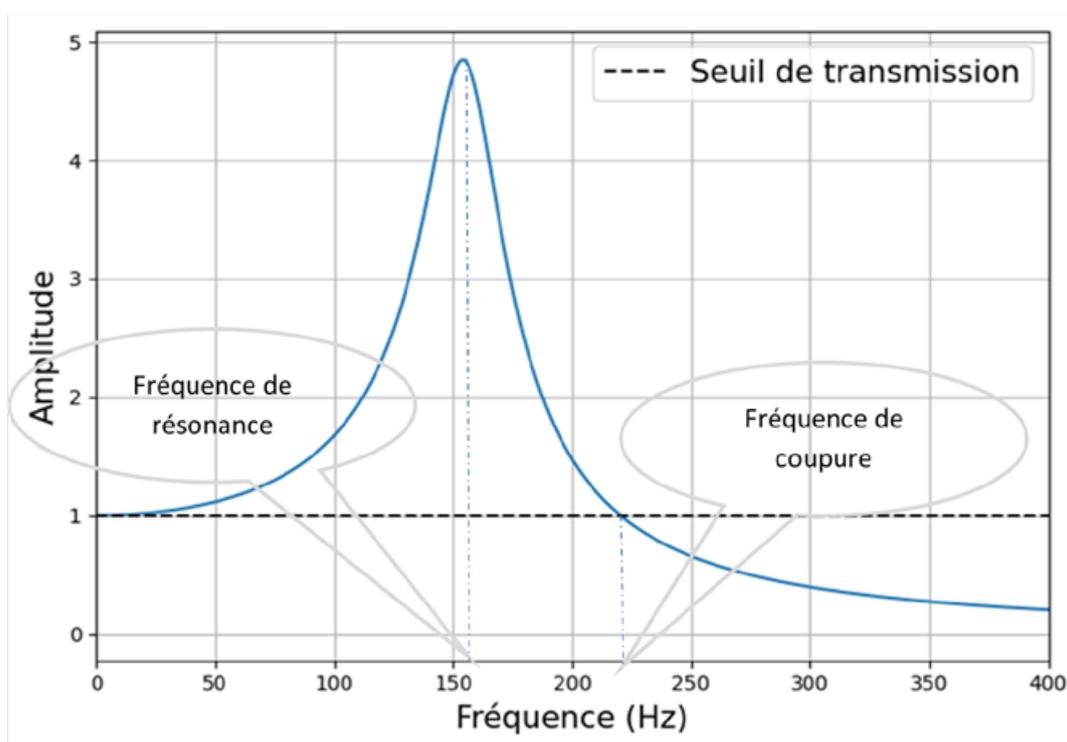


Figure 7 Simulation du rapport de l'accélération de l'objet sur l'accélération du support. Ce rapport s'appelle transmissibilité.

Lorsque la transmissibilité est supérieure à la valeur 1, cela signifie que le niveau de vibration de l'objet est supérieur à celui du support. Le maximum de la courbe est atteint pour une fréquence caractéristique, appelée « fréquence de résonance » du système, qui est proportionnelle au rapport de la masse de l'objet sur l'élasticité du matériau de conditionnement. Enfin, la fréquence au-delà de laquelle la transmissibilité est inférieure à la valeur 1 est appelée « fréquence de coupure ». Elle est proportionnelle au rapport de l'élasticité de la mousse sur l'épaisseur de la mousse et sur la charge statique de l'objet. La charge statique est la masse surfacique de l'objet.

Ainsi, avec ce protocole expérimental, il est intéressant de relever les fréquences de coupure, c'est à dire les fréquences à partir desquelles les matériaux de conditionnement absorbent les vibrations (puisque le niveau de vibration de l'objet sera inférieur à celui du support).

Les matériaux habituellement utilisés ont été évalués. Ils nous ont été transmis par les services de régie de nos partenaires (fig. 8).

Les informations adossées aux types de matériaux sont celles disponibles dans les catalogues de matériel. Aucune mention n'est faite de leur élasticité.

			Type de mousse	Épaisseur	Propriétés et usages																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Type of foam</th> <th>Thickness</th> <th>Properties and use</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">Polyurethane</td> <td>2 cm</td> <td rowspan="2">Chemically unstable Transportation: efficient against vibrations</td> </tr> <tr> <td>5 cm</td> </tr> <tr> <td rowspan="3">Ethafoam</td> <td>1 cm</td> <td rowspan="3">Chemically stable Storage Transportation of heavy objects</td> </tr> <tr> <td>2 cm</td> </tr> <tr> <td>3 cm</td> </tr> <tr> <td rowspan="4">Plastazote</td> <td>0,5 cm</td> <td rowspan="4">Chemically stable Storage (shelves, drawers...)</td> </tr> <tr> <td>1 cm</td> </tr> <tr> <td>2 cm</td> </tr> <tr> <td>4 cm</td> </tr> </tbody> </table>	Type of foam	Thickness	Properties and use	Polyurethane	2 cm	Chemically unstable Transportation: efficient against vibrations	5 cm	Ethafoam	1 cm	Chemically stable Storage Transportation of heavy objects	2 cm	3 cm	Plastazote	0,5 cm	Chemically stable Storage (shelves, drawers...)	1 cm	2 cm	4 cm	Polyuréthane	2 cm	Chimiquement instable
	Type of foam	Thickness	Properties and use																		
	Polyurethane	2 cm	Chemically unstable Transportation: efficient against vibrations																		
		5 cm																			
	Ethafoam	1 cm	Chemically stable Storage Transportation of heavy objects																		
		2 cm																			
		3 cm																			
	Plastazote	0,5 cm	Chemically stable Storage (shelves, drawers...)																		
		1 cm																			
2 cm																					
4 cm																					
		5 cm	Transport: efficace vis-à-vis des vibrations																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Type of foam</th> <th>Thickness</th> <th>Properties and use</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">Polyurethane</td> <td>2 cm</td> <td rowspan="2">Chemically unstable Transportation: efficient against vibrations</td> </tr> <tr> <td>5 cm</td> </tr> <tr> <td rowspan="3">Ethafoam</td> <td>1 cm</td> <td rowspan="3">Chemically stable Storage Transportation of heavy objects</td> </tr> <tr> <td>2 cm</td> </tr> <tr> <td>3 cm</td> </tr> <tr> <td rowspan="4">Plastazote</td> <td>0,5 cm</td> <td rowspan="4">Chemically stable Storage (shelves, drawers...)</td> </tr> <tr> <td>1 cm</td> </tr> <tr> <td>2 cm</td> </tr> <tr> <td>4 cm</td> </tr> </tbody> </table>	Type of foam	Thickness	Properties and use	Polyurethane	2 cm	Chemically unstable Transportation: efficient against vibrations	5 cm	Ethafoam	1 cm	Chemically stable Storage Transportation of heavy objects	2 cm	3 cm	Plastazote	0,5 cm	Chemically stable Storage (shelves, drawers...)	1 cm	2 cm	4 cm	Ethafoam	1 cm	Chimiquement stable
	Type of foam	Thickness	Properties and use																		
	Polyurethane	2 cm	Chemically unstable Transportation: efficient against vibrations																		
		5 cm																			
	Ethafoam	1 cm	Chemically stable Storage Transportation of heavy objects																		
		2 cm																			
3 cm																					
Plastazote	0,5 cm	Chemically stable Storage (shelves, drawers...)																			
	1 cm																				
	2 cm																				
	4 cm																				
		2 cm	Stockage																		
		3 cm	Transport d'objets lourds																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Type of foam</th> <th>Thickness</th> <th>Properties and use</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">Polyurethane</td> <td>2 cm</td> <td rowspan="2">Chemically unstable Transportation: efficient against vibrations</td> </tr> <tr> <td>5 cm</td> </tr> <tr> <td rowspan="3">Ethafoam</td> <td>1 cm</td> <td rowspan="3">Chemically stable Storage Transportation of heavy objects</td> </tr> <tr> <td>2 cm</td> </tr> <tr> <td>3 cm</td> </tr> <tr> <td rowspan="4">Plastazote</td> <td>0,5 cm</td> <td rowspan="4">Chemically stable Storage (shelves, drawers...)</td> </tr> <tr> <td>1 cm</td> </tr> <tr> <td>2 cm</td> </tr> <tr> <td>4 cm</td> </tr> </tbody> </table>	Type of foam	Thickness	Properties and use	Polyurethane	2 cm	Chemically unstable Transportation: efficient against vibrations	5 cm	Ethafoam	1 cm	Chemically stable Storage Transportation of heavy objects	2 cm	3 cm	Plastazote	0,5 cm	Chemically stable Storage (shelves, drawers...)	1 cm	2 cm	4 cm	Plastazote	0,5 cm	Chimiquement stable
	Type of foam	Thickness	Properties and use																		
	Polyurethane	2 cm	Chemically unstable Transportation: efficient against vibrations																		
		5 cm																			
Ethafoam	1 cm	Chemically stable Storage Transportation of heavy objects																			
	2 cm																				
	3 cm																				
Plastazote	0,5 cm	Chemically stable Storage (shelves, drawers...)																			
	1 cm																				
	2 cm																				
	4 cm																				
		1 cm	Stockage (tiroirs, étagères...)																		
		2 cm																			
		4 cm																			

Figure 8 Tableau des matériaux testés.

La figure 9 montre à gauche la validation du modèle masse-ressort, en présentant des courbes expérimentales de transmissibilité en présence de mousses (de différentes épaisseurs) comparée à celle de transmissibilité en l'absence de mousse. À droite, la fréquence de coupure est représentée en fonction de la charge statique de l'objet.

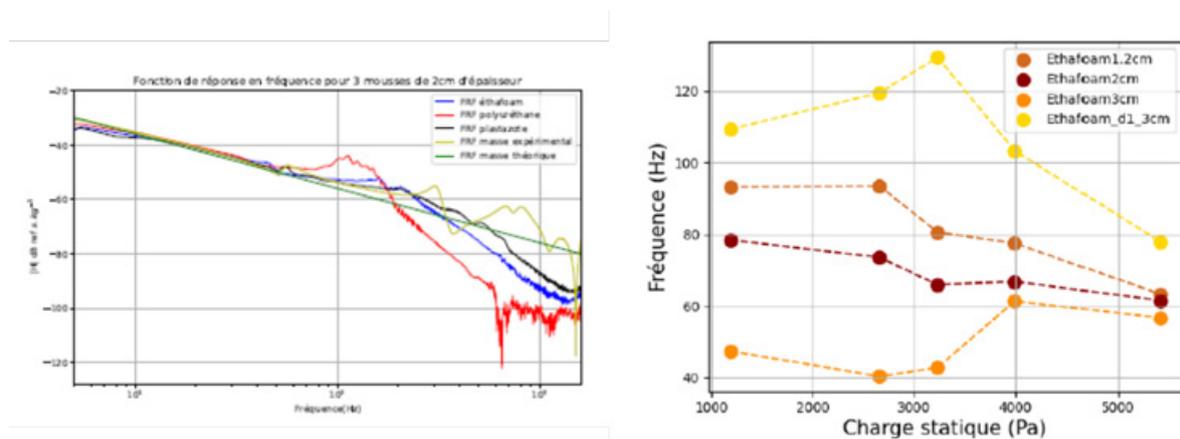


Figure 9 Mesures expérimentales de la transmissibilité de différentes mousses (à gauche); mesure des fréquences de coupure (à droite).

Le graphique de gauche de la figure 9 montre en vert foncé la représentation fréquentielle de l'objet en l'absence de mousse. Les autres couleurs codent différentes mousses indiquées en légende. Force est de constater que la courbe rouge est au-dessus de la verte aux alentours de 100 Hz et passe dessous vers 200 Hz. Ceci signifie que dans le cas d'une masse de 1 kg posée sur de la mousse de polyuréthane, la mousse amplifie les vibrations plutôt que de les atténuer.

Elle ne commence à être efficace qu'à partir de 200 Hz. Ce même constat est fait pour les autres matériaux, à des fréquences légèrement différentes.

Le graphique de droite montre l'évolution de la fréquence de coupure (qui est assez haute au regard des signaux de vibrations enregistrés dans différents contextes (figures 3, 4, 5) en fonction de la charge statique. Cette fréquence descend difficilement.

Conclusion

Après avoir dressé un constat des différentes sources de vibrations présentes en contexte muséal, certaines d'entre elles ont donné lieu à des mesures. Leur point commun est que toutes ces sources émettent des vibrations dont les fréquences sont basses (comprises entre quelques hertz et 400 Hz). À partir de ce constat, les matériaux de conditionnement classiques ont été évalués du point de vue de l'atténuation des vibrations. Il apparaît que dans le domaine d'intérêt, à savoir les basses fréquences, ces matériaux sont transparents aux vibrations voire, dans certains cas spécifiques, amplifient même les vibrations de la source.

Les perspectives de ce travail sont donc vers la caractérisation de « nouveaux matériaux » de conditionnement ou de nouvelles mises en forme de matériaux classiques, comme les coussins, et le travail de recherche sur une solution adaptative, s'appuyant sur le principe du contrôle actif (Forma, 2023).

Remerciements

Ce travail a bénéficié d'une aide de l'État gérée par l'Agence nationale de la recherche au titre du programme d'investissements d'avenir intégré à France 2030, portant la référence ANR-17-EURE-0021- l'École universitaire de recherche Paris Seine Humanités, Création, Patrimoine – Fondation des sciences du patrimoine.

Références bibliographiques

Flandrin P., Jaffard S., Morel J.-M. (2019), « L'analyse de Fourier, pilier du numérique », *Pour la science*, n° 495, p. 54-62

Forma L. (2023), *Système de contrôle actif de vibrations pour la conservation des objets du patrimoine*, thèse de doctorat en Génie électrique et électronique, CY Cergy Paris Université.

Thickett D. (2002), « Vibration damage levels for museum objects », dans ICOM-CC (éd.), *The 13th triennial meeting Rio de Janeiro preprints*, Vol. I, London, James & James, p. 90-95.

Les auteurs

Sandie Le Conte Institut national du patrimoine, 124 rue Henri Barbusse, 93300 Aubervilliers.

Loïc Forma SATIE CY Cergy Paris Université, 5 mail Gay Lussac, 95000 Neuville.

Henri Boutin STMS-Sorbonne Université, IRCAM) 1 place Igor Stravinsky, 75004 Paris.

Marguerite Jossic ECR, Musée de la musique, CRC UAR3224, 221 av. Jean Jaurès, 75019 Paris.

Nicolas Wilkie-Chancellor SATIE, CY Cergy Paris Université, 5 mail Gay Lussac, 95000 Neuville.