



HAL
open science

Les courbures locales, limites en fatigue d'un tableau soumis à des vibration : l'usage des protections arrières.

Jean-Michel Génevaux

► **To cite this version:**

Jean-Michel Génevaux. Les courbures locales, limites en fatigue d'un tableau soumis à des vibration : l'usage des protections arrières.. Conservation restauration des biens culturels , 2007, 25, pp.37-44. hal-00333352

HAL Id: hal-00333352

<https://hal.science/hal-00333352>

Submitted on 23 Oct 2008

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

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

Les courbures locales, limites en fatigue d'un tableau soumis à des vibration : l'usage des protections arrières.

JM Génevaux

Enseignant-Chercheur,

Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine, av O Messian, 72000 Le Mans,

jmgenev@univ-lemans.fr

Résumé :

La courbure locale alternée d'une peinture soumise à des vibrations est la cause principale de contraintes dans les couches picturales et de cisaillements entre ces couches, pouvant mener à la formation d'écaillage. A partir d'une analyse du comportement de la peinture, la nécessité de déterminer des limites en fatigue de ce type de matériaux est mise en avant. La *fonction de réponse en fréquence* permet de passer de l'échelle globale du tableau à l'échelle locale de la peinture. Elle met en évidence les fréquences propres auxquelles est sensible le tableau, et les formes propres associées qui permettent d'évaluer les courbures locales. Il est montré expérimentalement que la pose de protections arrières peut diminuer de 80% les niveaux de sollicitation.

Mots clefs : conservation des tableaux, vibration, formes propres, courbure, protections arrières, fatigue, propagation de fissure.

1) Introduction et objectifs :

Pour limiter les détériorations d'un tableau, du fait de sollicitations de type mécanique subies lors de manipulations¹, les variations de courbure locale de la peinture doivent être quantifiées, et les limites admissibles définies.

Les mesures des amplitudes des mouvements ne sont un critère limitatif qu'en présence de contact de la peinture avec des structures proches². En cas de non contact, il est nécessaire de définir un critère local, donc en terme de déformation locale. Si de nombreuses études considèrent qu'en cas de choc, l'accélération maximale au point d'impact est un critère suffisant³, la sollicitation en un point de l'oeuvre dépend certes du niveau de l'excitation, mais aussi de la durée de celle-ci et du comportement vibratoire de l'ensemble du système (chassis + peinture⁴), sous l'hypothèse que ne soient pas dépassés les niveaux de déformations élastiques de la structure comme cela est présenté

1 Marcon 91a, Saunders 98, Caldicott 91

2 Green 91

3 Saunders 98

4 « Peinture » est pris pour un système composite formé de peinture, encollage, préparation couche picturale et éventuellement d'un vernis.

dans l'article de P.J.Marcon en 1991 : Shock, vibration and protective package design ».

L'objectif de cet article est de justifier les hypothèses du modèle mécanique qui sera utilisé et de montrer la nécessité de définir ces limites en terme de fatigue des matériaux⁵. Cette étude sera faite dans le cas d'une sollicitation dynamique due aux vibrations du tableau. Les mécanismes et modèles seront décrits dans un premier paragraphe, à l'échelle locale d'un élément de la peinture, petit volume représentatif de la structure de celui-ci. Les conditions de déformations et de contraintes dans ce petit volume⁶ seront reliées aux grandeurs du modèle mécanique associé : une plaque.

Les sollicitations locales dépendent du comportement de l'ensemble de la structure : le tableau. Aussi dans un second temps, les vibrations du modèle à l'échelle globale sont décrites. Ce paragraphe s'ouvre par la définition des concepts nécessaires à l'étude des vibrations, fréquences propres et mode propre d'une structure⁷. En absence de quantification des limites admissibles, et du niveau d'excitation réel, il est néanmoins intéressant d'analyser des moyens préventifs pour limiter les éventuels niveaux de vibration⁸. L'efficacité de certaines protections arrières est ici quantifiée.

2) Mécanismes et modèles à l'échelle locale de l'élément de peinture :

L'apparition de fissures dans le film peint et la préparation, le soulèvement d'écaillage ou la perte sont des mécanismes locaux d'endommagement de la peinture. C'est donc à cette échelle que les critères de limite de sollicitation doivent être définis.

2.1) Relation entre un élément de la peinture et le modèle de plaque :

Un volume représentatif de la peinture étudié comme modèle est composé (Fig. 1) :

- d'une épaisseur h formée par le support, l'encollage, la préparation, la couche picturale composée de plusieurs couches de peinture et une éventuelle couche de vernis,
- d'une petite surface dans les deux autres directions.

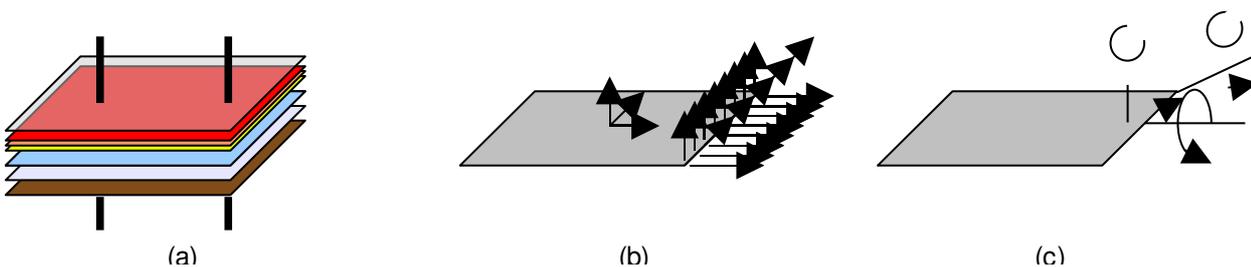


Figure 1 : (a) Volume représentatif de la peinture comportant différentes couches : support, encollage, préparation, couche picturale et vernis. (b) et (c) Modèle de plaque utilisant un feuillet en position moyenne dans l'épaisseur, subissant sur sa tranche des efforts linéiques⁹ (b) ou des moments linéiques (c)

5 Caldicott 91

6 Mecklenburg 1991

7 Marcon 91b

8 Marcon 91b, Green 91.

9 Linéique : se dit d'une grandeur rapportée à l'unité de longueur.

La surface considérée doit être la plus petite possible, mais suffisamment grande pour avoir un comportement moyen indépendant des inhomogénéités très locales induites par le geste de l'artiste. Nous choisirons une même longueur l du volume représentatif dans chacune des directions. La direction normale¹⁰ à la surface de la peinture est schématisée par deux aiguilles.

Un modèle basé sur une plaque qui est positionnée géométriquement au feuillet moyen de la peinture (au milieu de l'épaisseur) peut simuler le volume représentatif de celle-ci, si l'on prend soin de faire correspondre :

- les mouvements du volume représentatif aux mouvements de l'élément de plaque,
- les contraintes au sein de chaque couche, aux efforts¹¹ et moments¹² appliqués à l'élément de plaque.

D'autres auteurs utilisent un modèle de membrane¹³. Son comportement diffère du comportement d'une plaque par la négligence des moments linéiques et des efforts de cisaillement transverse. Les forces de rappels ne sont plus dues aux moments mais uniquement aux tensions dans la membrane¹⁴. Ceci est valide dans le cas de grands déplacements transverses. Un modèle de plaque est donc plus complet car ne nécessite pas cette hypothèse. Les couches picturales ont d'autant plus d'influence sur la rigidité locale, qu'elles sont éloignées du feuillet moyen.

2.1.1) Correspondance entre les mouvements :

Du fait des sollicitations, un déplacement différent peut être associé à chaque point du volume représentatif. Un point P situé dans une des couches, ne se déplace pas comme le point H , projection du point P sur le feuillet moyen.

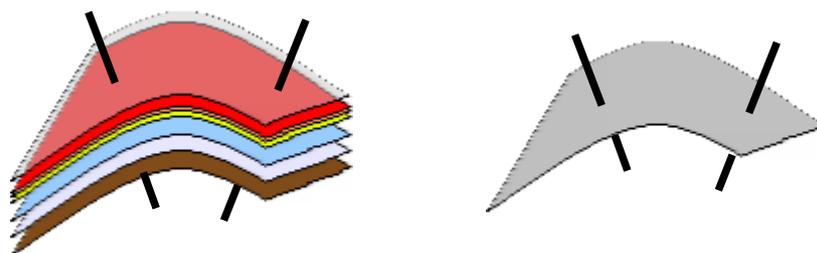


Figure 2 : Les mouvements de chaque couche du volume représentatif de la peinture sont associés au mouvement des normales au feuillet moyen, représentées ici par des aiguilles.

10 la direction « normale » est la directions perpendiculaire à la surface .

11 effort : force exercée dans l alignement ou dans des directions perpendiculaires au plan du matériau.

12 moment d une force : moment d'un levier, c est le produit d'un bras de levier par la force qui lui est appliquée perpendiculairement. En général, produit d'une force par une distance. Un moment peut être remplacé par deux forces égales mais de directions opposées exercées à des distances égales de l'axe de rotation : par exemple, lorsque l'on tourne une clef dans une serrure.

13 [Marcon 91b].

14 [Mecklenburg 1991].

Si l'épaisseur h est faible devant l , la première hypothèse est que cette différence de déplacement dans le plan est proportionnelle à la distance entre les points P et H . Ceci signifie que les aiguilles, initialement « normales » ou perpendiculaires au plan de la peinture, restent rectilignes et donc se déplacent et subissent une rotation. Une seconde hypothèse est que cette rotation est telle qu'elle reste perpendiculaire au feuillet moyen (Fig. 2).

2.1.2) Correspondance entre les contraintes et efforts-moments¹⁵ sur la plaque dans le cas de couches ne présentant pas de fissures :

Avec les deux hypothèses précédentes, le mouvement relatif de deux normales¹⁶ proches l'une de l'autre permet de calculer le mouvement de chacune des couches composant la peinture.

L'état au repos de la peinture (Fig. 3a) sera choisi comme référence et sera donc sans contraintes. A titre d'illustration, une rotation autour d'un seul axe est considérée. Une courbure locale de la peinture, implique une rotation par unité de longueur entre les deux normales. Cette rotation des normales implique un allongement de chacune des couches du volume représentatif. L'élasticité d'un matériau est entre-autre caractérisée par son module d'Young $E=s/e$, rapport de la contrainte s exercée sur celui-ci et de la déformation e qu'il subit. La contrainte $s = F/S$, rapport d'une force F et d'une surface S peut s'exprimer en Pascal= N/m^2 , la déformation $e=DI/l$, rapport d'un allongement DI et d'une longueur l est sans dimension. Le module d'Young s'exprime donc en Pascal. L'hypothèse que la normale reste rectiligne implique que la déformation de chacune des couches dépend linéairement de la distance de cette couche au feuillet moyen.

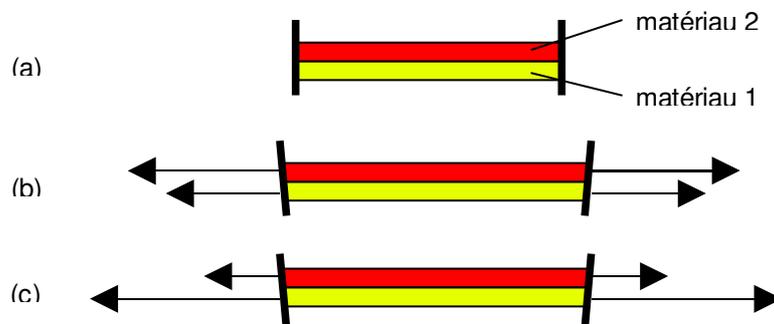


Figure 3 : (a) État repos. Pour les déformation représentées, (b) les contraintes (représentées par des flèches) sont proportionnelles à la distance de la couche au feuillet moyen car les modules d'Young sont les mêmes, (c) la contrainte dans la couche 2 peut être inférieure à celle dans la couche 1 si son module d'Young E_2 est plus faible que E_1 .

15 Effort-moment : cf Notes 3 et 4.

16 Normale : cf Note 9

Si les deux couches sont de même module d'Young, cela implique que les contraintes exercées sur chaque couche, représentées par des flèches (Fig. 3b), sont elles aussi proportionnelles à la distance au feuillet moyen. Par contre, si la couche supérieure 2 possède un module d'Young E_2 inférieur à celui E_1 de la couche 1, alors la contrainte s_2 peut être plus faible que la contrainte s_1 même si sa déformation e_2 est plus grande que e_1 (Fig. 3c). Les contraintes dans chacune des couches, dépendent donc de leur distance au feuillet moyen, mais aussi de leur propre module d'Young.

Pour chacune des couches i ,

- le produit de sa contrainte s_i par l'épaisseur h_i de cette couche supposée petite devant l , fournit une force linéique $F_i = s_i h_i$ (en N/m),
- le produit $M_i = F_i d_i$ est le moment de cet effort linéique par rapport au feuillet moyen, si d_i représente la distance de la couche i au feuillet moyen (« bras de levier » de cette force F_i).

La somme de ces forces linéiques sur l'ensemble des couches, fournit l'effort linéique N global représenté sur le feuillet moyen du modèle (Fig. 1b), la somme des moments linéiques, fournit le moment linéique M global représenté sur le feuillet moyen (Fig. 1c).

Les efforts linéiques et les moments linéiques sur le modèle de plaque sont en fait dans les trois directions de l'espace, comme représentés par les Figures 1b et 1c. Les contraintes dans chaque couche sont plus sensibles à l'accroissement de moments linéiques qu'à l'accroissement d'efforts linéiques. Pour limiter les contraintes, c'est donc la courbure locale de la peinture qui est la plus préjudiciable.

2.1.3) Couche présentant des fissures :

Si une peinture présente localement des fissures dans l'une des couches (Fig. 4a, matériau 2), la contrainte dans la couche 2 ne peut pas se propager d'un morceau à l'autre via la fissure. La contrainte doit donc transiter par la couche 1. Cela implique que la couche 1 exerce sur la couche 2 des contraintes, dites de cisaillement (Fig. 4b), qui sont d'autant plus grandes que l'on est proche de la fissure et qui diminuent pour s'annuler vers le centre de chaque morceau de matériau. Au droit de la fissure, du fait de la variation spatiale rapide de ces efforts, un phénomène de concentration de contraintes est présent¹⁷. Si leur valeur est supérieure à une contrainte limite, la décohésion peut y apparaître. Ceci entraînera la propagation de la fissure entre les deux couches (Fig. 4c), d'où la formation d'une écaille. Le phénomène peut se propager jusqu'au détachement complet de l'écaille.

L'application de résine ou consolidant au droit des fissures, par son ajout de matière, permet non seulement de remettre en contact une partie de l'écaille avec son support, mais aussi d'adoucir les variations brusques d'épaisseur et donc de diminuer les concentrations de contraintes, tout comme de transmettre les contraintes directement entre deux morceaux successifs de la couche 2. Ceci a un effet préventif élevé pour éviter des endommagements futurs.

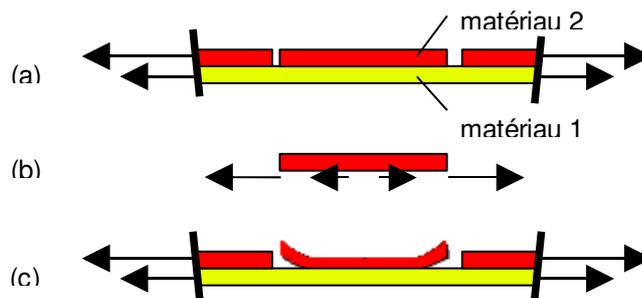


Figure 4 : (a) Les contraintes dans la couche 2 ne peuvent passer par les fissures. (b) L'élongation de la couche 2 est due à des contraintes tangentielles exercées par la couche 1 sur la couche 2. (c) La fissure peut se propager entre les deux couches et former une écaille.

La quantification des critères de propagation de fissure à travers et entre les couches de peinture, reste à faire. Les seuils admissibles sont plus petits en cas de sollicitation dynamique (vibrations) qu'en statique (chargement constant). C'est donc sur l'étude du comportement dynamique d'un tableau que les études doivent être faites.

3) Mécanismes et modèles à l'échelle du tableau :

L'analyse précédente implique de pouvoir déterminer les courbures locales de la peinture, dues aux vibrations appliquées au tableau.

Pour ce faire, les concepts de *fréquences de résonance*, de *forme propre* associée à chaque résonance et de *fonction de réponse en fréquence (FRF)*, sont abordées en complexifiant progressivement la structure étudiée : un pendule à une masse (1 degré de liberté), à deux masses (2 degrés de liberté), la peinture de tableau fixé à son châssis (une infinité de degrés de liberté).

3.1) Système à un degré de liberté :

Une masse est suspendue par une tige de longueur constante, à un support qui peut être mis en translation tel que représenté par la Figure 5 a. Le mouvement de la masse par rapport au support est mesuré par la distance x_1 .

Si le support oscille dans la direction parallèle à la mesure x_1 , pour l'observateur accroché au repère du support, ce mouvement de va-et-vient régulier, est équivalent à une force oscillante parallèle à x_1 notée $F(t) = F_0 \sin(2 \pi f t)$, avec F_0 le module de cet effort (en N), f la fréquence d'oscillation (en Hertz) et t le temps (en s) (Fig. 6a). La masse oscille en conséquence à la même fréquence, et le mouvement peut être mis sous la forme, $x_1(t) = X_1 \sin(2 \pi f t - \phi)$, avec X_1 , l'amplitude des oscillations et ϕ le retard entre le déplacement et l'excitation (Fig. 6b). L'accélération subie par la masse peut alors se déduire par calcul $a_1(t) = (-X_1 (2 \pi f)^2) \sin(2 \pi f t - \phi) = A_1 \sin(2 \pi f t - \phi)$, et être mesurée expérimentalement à l'aide d'un accéléromètre (Fig. 6c).

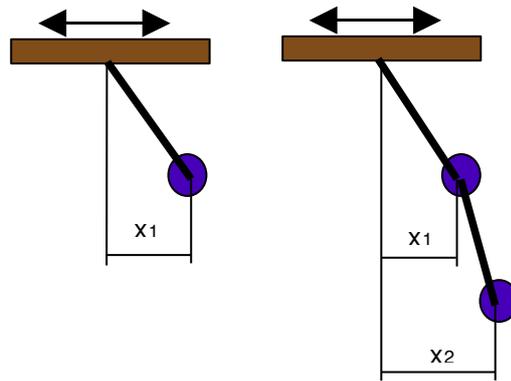


Figure 5 : Exemples de système discret (a) Pendule à 1 degré de liberté ; (b) Pendule à 2 degrés de liberté.

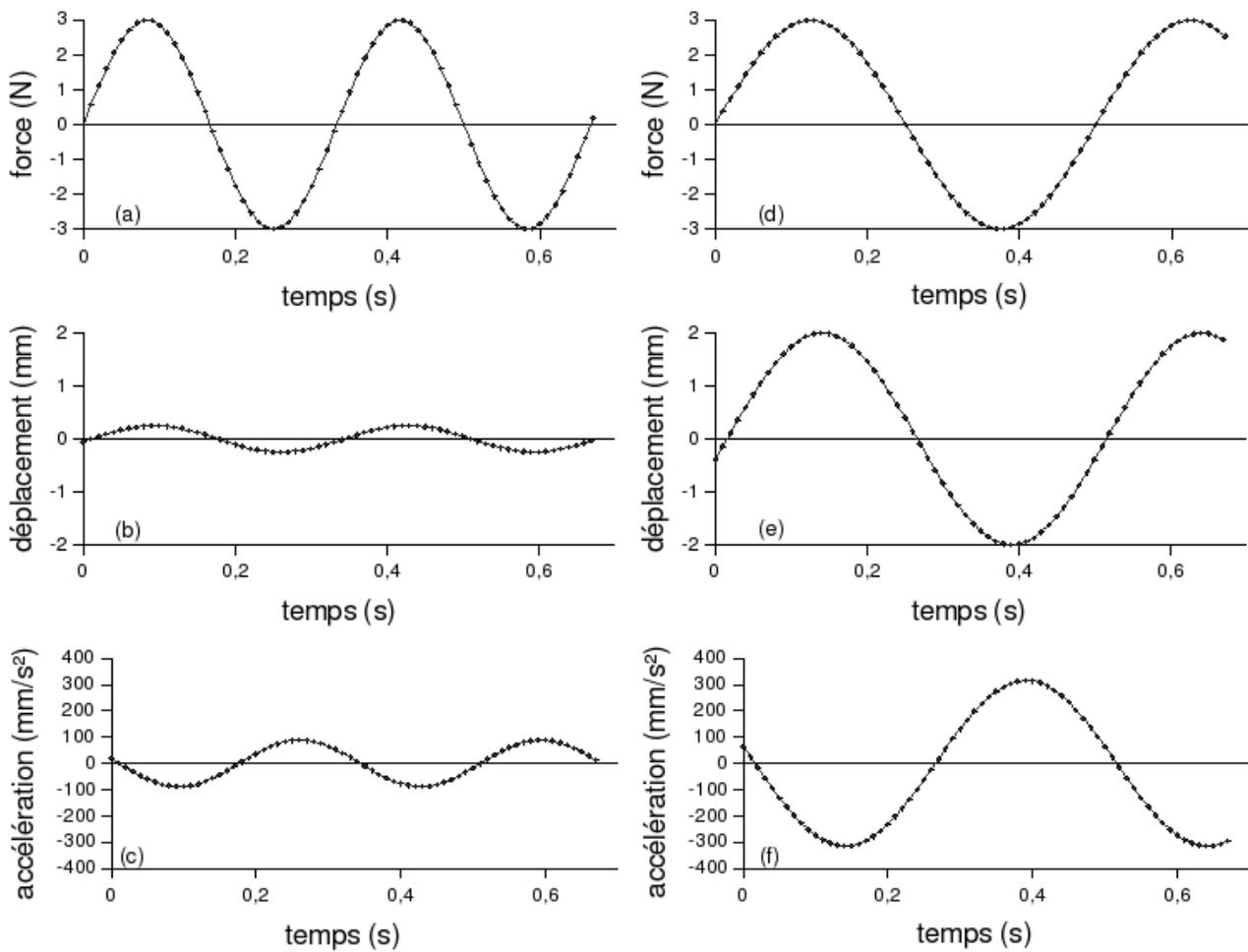


Figure 6 : Exemples d'excitation et réponses d'un système à un degré de liberté : (a) Force à la fréquence de 3 Hz ; (b) Déplacement $x_1(t)$ dû à l'excitation à 3 Hz ; (c) Accélération $a_1(t)$ due à l'excitation à 3 Hz ; (d) Force à la fréquence de 2 Hz ; (e) Déplacement $x_1(t)$ dû à l'excitation à 2 Hz ; (f) Accélération $a_1(t)$ due à l'excitation à 2 Hz.

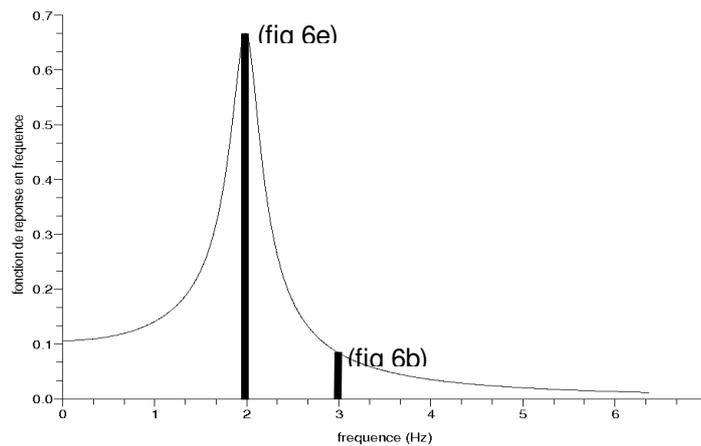


Figure 7 : Exemples de fonction de réponses en fréquence d'un système à un degré de liberté : la réponse à une fréquence d'excitation à 3 Hz est plus faible qu'à la fréquence de résonance de ce système située à 2 Hz .

Pour un niveau d'effort F_0 constant, l'amplitude du mouvement de la masse dépend de la fréquence. Il existe une fréquence particulière, appelée *fréquence de résonance*, à laquelle l'amplitude des mouvements (et donc des accélérations) est la plus grande (voir Fig. 6d, 6e et 6f). Il est donc intéressant de caractériser le système étudié en fonction de la fréquence.

Si le système est linéaire (pour le cas du pendule, il faut que les amplitudes de déplacement soient faibles devant la longueur de la tige), une caractéristique du système est le rapport du déplacement divisé par la force, appelé *fonction de réponse en fréquence* : $\underline{H}(f) = \underline{X}(f)/\underline{F}(f)$, où le soulignement indique que la grandeur est complexe, avec $\underline{F}(f)$ le contenu en fréquence de la force d'excitation et $\underline{X}(f)$ le contenu en fréquences du déplacement. La fonction $\underline{H}(f)$, dont l'amplitude est représentée Figure 7, présente un maximum : c'est à cette fréquence que la sensibilité du système est la plus grande. Si une excitation est présente à proximité de cette fréquence, les oscillations seront de plus grandes amplitudes.

3.2) Système à plusieurs degrés de liberté :

Pour un système à deux degrés de liberté $x_1(t)$ et $x_2(t)$, la *fonction de réponse en fréquence* devra être définie pour chaque degré de liberté en fonction du point de mesure du déplacement : $\underline{H}_1(f) = \underline{X}_1(f)/\underline{F}(f)$ et $\underline{H}_2(f) = \underline{X}_2(f)/\underline{F}(f)$. Chacune de ces fonctions possède deux fréquences de résonances f_{r1} et f_{r2} , et présentera donc deux pics (Fig. 8a). A chaque pic, les amplitudes de mouvement sont maximales et les rapports $\underline{X}_1(f_{r1})/\underline{X}_2(f_{r1})$ et $\underline{X}_1(f_{r2})/\underline{X}_2(f_{r2})$ sont réels et permettent de dessiner la forme que prend la structure à ces fréquences particulières (Fig. 8b) et (Fig. 8c). Si l'on assimile la courbure de chaque forme propre¹⁸ au désalignement relatif des deux masselottes, la courbure augmente avec la fréquence.

La peinture d'un tableau est un système continu. Pour décrire son mouvement, il faudrait décrire le

¹⁸ . La forme propre décrit le mouvement relatif des degrés de liberté. Il est exprimé par l'ensemble de la courbe spécifique au système.

mouvement de chacun de ses points. Le nombre de ces points étant infini, le système comporte une infinité de degrés de liberté, donc une infinité de fréquences de résonances. A chaque fréquence de résonance correspond une *forme propre*. Cette peinture pourrait être symbolisée par une infinité de masselottes (Fig. 9a). Une peinture test a été soumise à un effort appliqué sur son châssis et l'accélération a été mesurée en différents points de la peinture (Fig. 9b). Il est alors possible de mesurer la *fonction de réponse en fréquence* entre chaque point de mesure et le point d'excitation. Un exemple de *fonction de réponse en fréquence* (Fig. 10) montre l'existence de nombreux pics de résonance. Pour le tableau test utilisé, ces pics de résonance ne sont présents que pour des fréquences inférieures à 200 Hz.

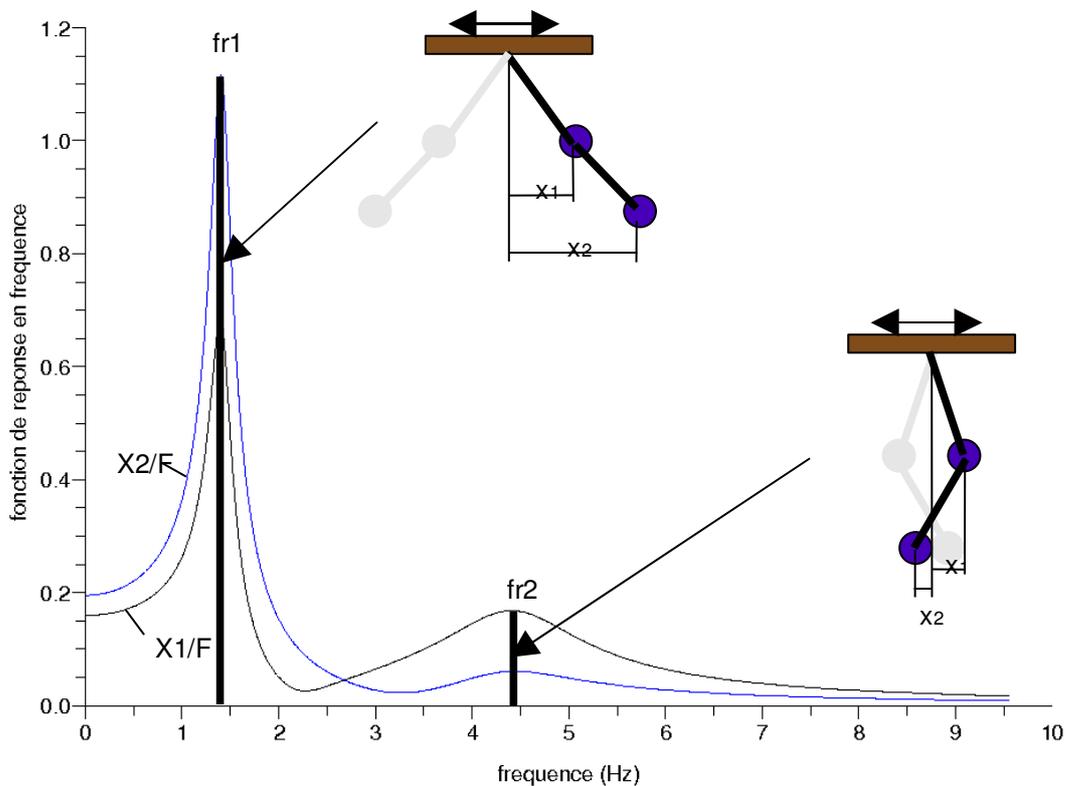


Figure 8 : Exemple de fonction de réponses en fréquence d'un système à deux degrés de liberté : à chaque fréquences de résonance $fr1$ et $fr2$, correspond une forme propre de la structure.

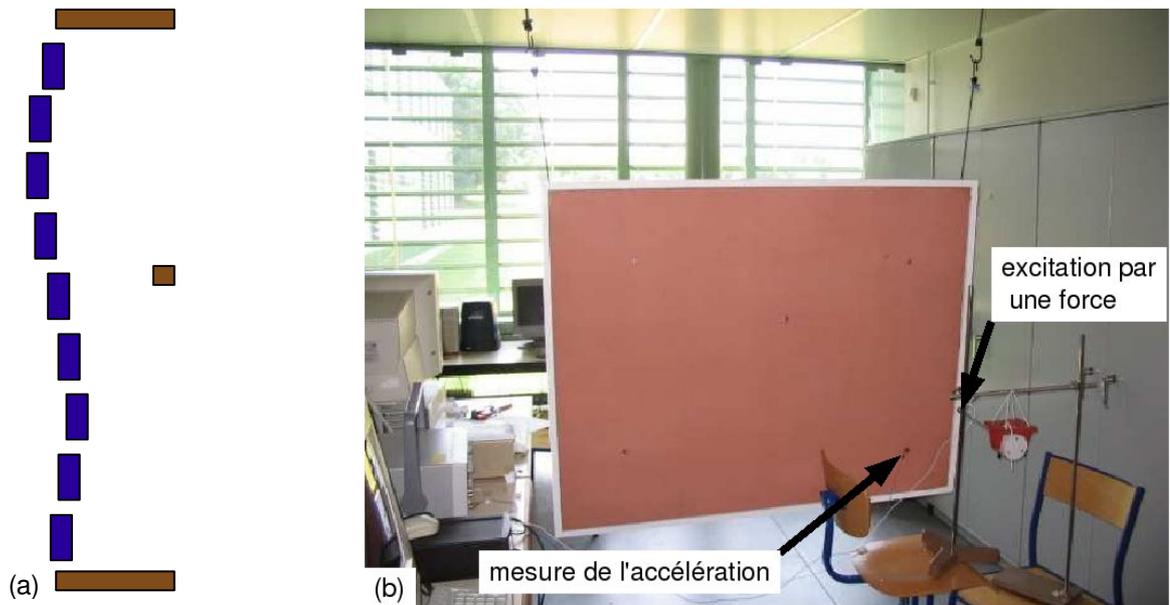


Figure 9 : a) Coupe dans le plan vertical d'un tableau : la peinture est modélisée par une infinité de masselottes. b) Mesure d'une fonction de réponses en fréquence d'un tableau : l'excitation est faite sur le châssis et la mesure de l'accélération en un point de la peinture.

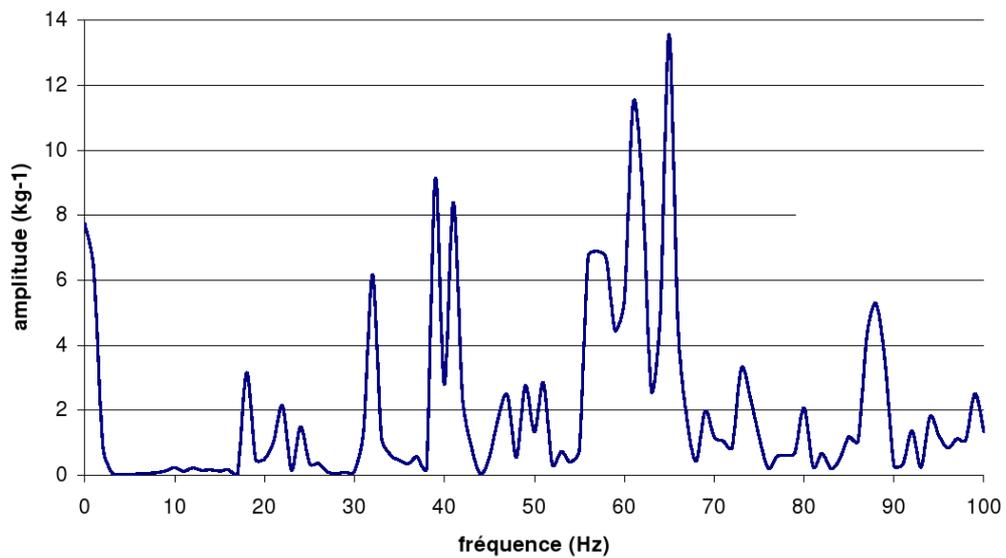


Figure 10: Fonction de réponse en fréquence accélération/force, pour le tableau test. Chaque pic correspond à une fréquence de sensibilité du tableau.

4) Criticité des vibrations :

4.1) Démarche de quantification des risques :

La section 2 a montré que le critère de sollicitation d'un tableau doit se mesurer en terme de courbure locale de la peinture. La section 3 a montré qu'un tableau possède des fréquences sensibles, dites de résonance, auxquelles les amplitudes de vibrations sont plus grandes pour un niveau d'effort d'excitation F_0 donné. A chaque fréquence de résonance est associée une *forme propre*, dont les courbures sont d'autant plus fortes que la fréquence est élevée.

Si l'on veut évaluer le niveau de courbure induit par des vibrations de la peinture, il est nécessaire de mesurer les formes propres de la peinture ou de les calculer à l'aide d'un modèle de plaque présenté dans la section 2.

Lorsque les caractéristiques de l'excitation sont bien connues (fréquences et amplitude). Il suffit de vérifier pour l'oeuvre considérée, que ces fréquences ne correspondent pas aux fréquences de résonance du tableau. Si c'est le cas, les amplitudes des vibrations et donc des courbures resteront faibles. Si par contre, la fréquence d'excitation est proche d'un pic de résonance, la *fonction de réponse en fréquence* permet de quantifier le niveau vibratoire de la peinture, et la forme propre associée à cette fréquence permet de localiser sur la peinture les zones où les courbures seront les plus fortes. Le niveau de ces courbures sera alors à comparer avec les critères de limites admissibles de ceux-ci.

Si les excitations se font sur toute une gamme de fréquences comportant les fréquences propres de la structure sollicitée, pour chaque fréquence, et donc chaque forme propre, les niveaux de courbure doivent être quantifiés en tout point de la peinture, et de la même façon comparés aux critères limites en fatigue.

La mesure de l'accélération maximale lors d'un choc n'est pas suffisante pour caractériser le niveau de sollicitation en un point de la peinture. En effet, une sollicitation par choc est équivalente à une sollicitation sur une bande de fréquence entre 0 Hz et une fréquence maximale. Cette fréquence maximale est d'autant plus élevée que le temps d'impact est court. L'intensité du choc est mesurée classiquement en terme d'accélération (m/s^2 ou g)¹⁹. Complétée par le temps d'impact, l'énergie apportée pour chaque fréquence peut être quantifiée. La *fonction de réponse en fréquence* permet alors de calculer les niveaux de sollicitations. Les plus grands apparaissent aux résonances. Les formes propres permettent alors de les localiser géométriquement sur le tableau.

Si pour certains types de couches picturales des critères de limite en fatigue ont été mesurés²⁰, la confrontation des formes propres expérimentales d'un tableau²¹ à celles donnée par un modèle n'ont pas encore été menées à notre connaissance. A l'heure actuelle, minimiser l'amplitude de la *fonction de réponse en fréquence* peut être une première étape pour minimiser les risques encourus par la peinture.

Cette minimisation peut être faite :

- en diminuant le niveau d'excitation du tableau : bien que les oeuvres soient manipulées avec

19 Saunders 98].

20 [Mecklenburg 1991],

21 [Palasset 05]

précaution, les grilles ou compactus de rangement des oeuvres dans les réserves pourront être équipés de système d'accrochage de tableau amortissant les vibrations dans la gamme de fréquence où ceux-ci sont sensibles, les MRT²² seront équipés de systèmes amortisseurs dimensionnés en fonction de l'oeuvre à transporter. On modifie ainsi les fonctions de réponses en fréquences de l'ensemble « tableau+support ».

- en modifiant leur *fonction de réponse en fréquence* à l'aide de protections-arrières.

4.2) Effet des protections arrières sur les niveaux vibratoires :

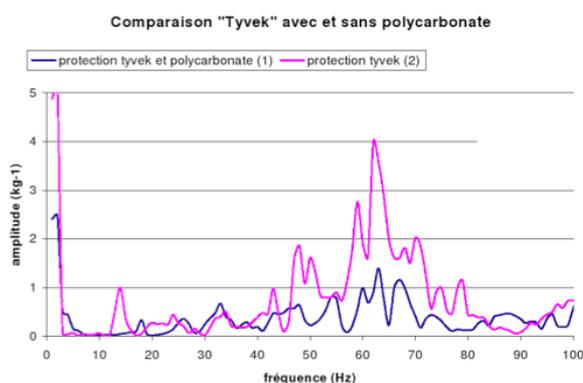
Dans l'hypothèse où les fréquences d'excitation à venir sont inconnues, il est nécessaire de minimiser la *fonction de réponse en fréquence* en moyenne sur une gamme de fréquence. La valeur moyenne $L_{loc}(x,y)$ de cette fonction entre une fréquence minimale et maximale est donnée en un point du tableau de coordonnées (x,y) par la surface en dessous de la courbe présentée Figure 10. La moyenne sur l'ensemble des points du tableau sera noté L_{moy} . Ces deux grandeurs peuvent se calculer par,

$$L_{loc}(x, y) = \frac{1}{f_{max} - f_{min}} \int_{f_{min}}^{f_{max}} H(x, y, f) df,$$

$$L_{moy} = \frac{1}{S} \int_S L_{moy}(x, y) dx dy,$$

où S représente la surface du tableau.

Les protections arrières diminuent les niveaux vibratoires de toile.



type de protection	L crête	L moyenne
sans	13,5	1,91
polycarbonate + tyvek	1,5	0,40
tyvek	4,0	0,74

Figure 11: Fonction de réponse en fréquence accélération/force, pour le tableau test dans trois configurations de protection arrière.

22 MRT : ce sont cadres de protection des oeuvres destinés à la Manipulation, à la mise en Réserve ou au Transport.

Un tableau test a été successivement équipé par différents types de protections arrières²³. La valeur expérimentale de L_{moy} a été approchée (Fig. 11 et Fig. 12) par des mesures en 5 points du tableau. Pour celui-ci, des diminutions de L_{moy} peuvent atteindre 80% de la sensibilité aux vibrations du tableau sans protection arrière.

Les raisons de cette grande efficacité peuvent être recherchées dans :

- un ajout de rigidité par la présence d'une surface fermée derrière la peinture, et donc d'un volume d'air enfermé entre protection arrière et peinture,
- un ajout d'amortissement par les inévitables fuites d'air entre la protection arrière et le cadre,
- un ajout d'amortissement visqueux lorsque le volume d'air est de faible épaisseur et que l'air est chassé par les vibrations de la peinture.

5) Conclusion :

Les tableaux sont soumis à des vibrations lors de leurs manipulations (accrochages-déaccrochages), stockages dans les réserves et lors de leur transport. Du fait de la nature des différentes couches de la peinture, les contraintes dans celles-ci dépendent des matériaux, des états de fissuration, mais aussi des courbures locales engendrées par les vibrations du tableau.

Il est donc nécessaire de déterminer les fonctions de réponse en fréquence du tableau, et pour chacune des fréquences propres de mesurer ou calculer les formes propres associées. Les courbures locales deviennent alors accessibles : les zones du tableau les plus sollicitées peuvent ainsi être déterminées.

A titre préventif, la pose de protections arrières peut fortement diminuer les niveaux de sollicitation de la peinture. Pour que la quantification complète de la démarche de préservation puisse être faite, l'étude des critères de limites en fatigue des différentes couches et de leur surface de contact doit être menée, ainsi qu'une confrontation des formes propres obtenues expérimentalement sur une oeuvre, et celles obtenues par un modèle du tableau utilisant la théorie des plaques.

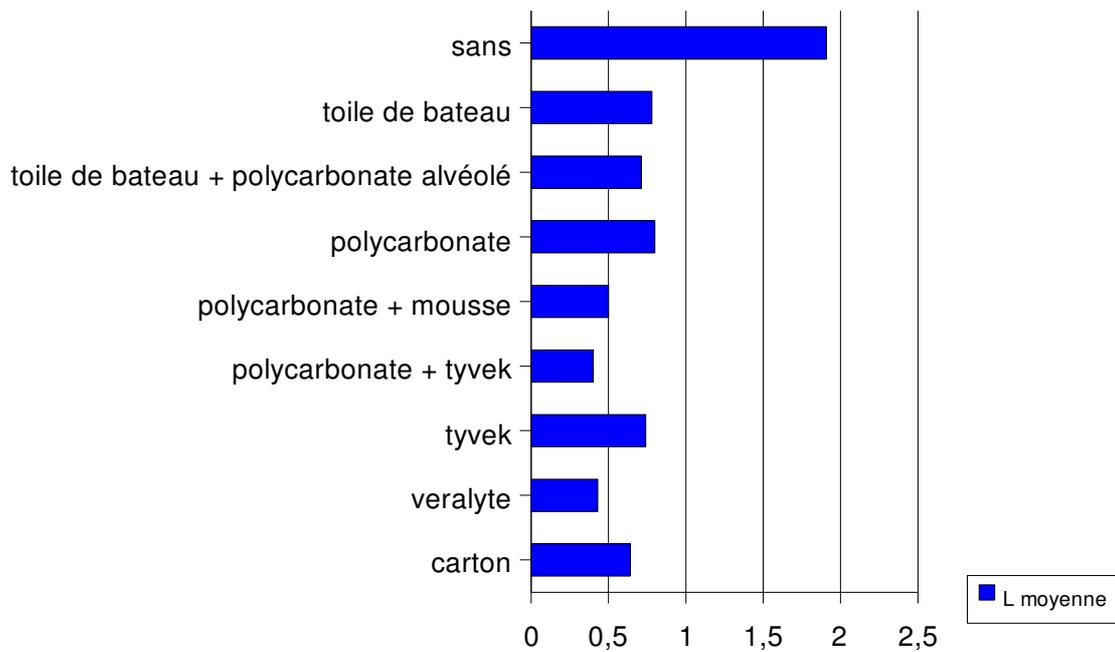


Figure 12: Sensibilité d'un tableau test en fonction du type de protection arrière. Les faibles valeurs de L_{moy} indiquent la plus grande efficacité de la protection.

Bibliographie

- Caldicott P.J., « Vibration and shock in transit situation : a practical evaluation using random vibration techniques », actes colloque « Art in transit » 9-11/11/91 London 1991
- Green T., « Vibration control : paintings on canvas support », actes colloque « Art in transit », pp59-67 9-11/11/1991 London, 1991
- Marcon P.J. « Shock, vibration and the shipping environment », actes colloque « art in transit », pp 121-132, 9-11/11/1991 London, 1991
- Marcon P.J., « Shock, vibration and protective package desing », actes colloque « Art in transit » pp 107-119, 9-11/11/1991 London, 1991
- Mecklenburg M.F., Tumosa C.S., « An introduction into mechanical behavior of paintings under rapid loading conditions », actes colloque « Art in transit » , pp137-170, 9-11/11/1991 London, 1991
- Palasset P., Blanchard B., Legay T. « Etude des vibrations induites sur les oeuvres d'art par les systèmes de rangement », rapport de fin d'étude » Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieur du Mans, 2005
- Saunders D., « Monitoring shock and vibration during transportation of painting », National Gallery Technical Bulletin, pp64-73, 1998