Sollicitations mécaniques d'ordre dynamique des peintures sur toile : principes généraux

Luc Hurter | restaurateur de peintures

Mai 2015

Tout au long de leur existence, les œuvres d'art sous soumises à des séquences vibratoires dont la récurrence est variable, dépendant d'une part de leur milieu de conservation, d'autre part des manipulations dont elles peuvent faire l'objet. Il apparaît évident qu'une œuvre conservée dans une réserve située en rase campagne sera moins soumise aux phénomènes vibratoires qu'exposée dans un musée implanté au cœur d'une zone urbaine à forte activité humaine. C'est surtout durant les différents mouvements, lors de l'acheminement au sein du musée, des convoiements sur terre, sur mer ou dans les airs, que les œuvres d'art sont le plus soumises aux vibrations. Ces sollicitations n'ont cependant pas les mêmes effets sur les œuvres. S'il est possible de déterminer empiriquement si une peinture est structurellement fragile, il est bien plus difficile de prédire l'impact de ces épisodes vibratoires. Certains sont capables de créer des altérations dans un laps de temps relativement court, d'autres en revanche ne sont dangereux que de façon cumulative. L'apparition de ces dernières dépend en premier lieu des caractéristiques matérielles des œuvres et du spectre vibratoire de la source émettrice.

Avec le temps, des systèmes de protections du revers destiné à amoindrir l'impact de telles sollicitations ont été mis au point. Le recours à de tels moyens de préservation, aussi rudimentaires soient-ils, est une pratique ancienne. Paille, foin, tissus et autres étoffes ont jadis été employés pour ce faire, les propos des anciens conservateurs, restaurateurs et transporteurs peuvent en témoigner. Avec le temps, ces systèmes ont été perfectionnés, et les possibilités qui existent de nos jours sont nombreuses et variées. Pour autant, leur sélection repose presque uniquement sur des considérations spéculatives. A ce jour en effet, les études d'évaluation de l'efficacité des protections du revers sont assez rares[1], ce qui peut surprendre lorsqu'on constate que les œuvres n'ont jamais autant voyagé. Ceci s'explique très certainement par la difficulté de pouvoir préconiser des solutions généralisables, en raison des singularités matérielles de ces dernières.

---

[1] Genevaux J.M., Hamard G., Lamarins V., Prigent T., 2009.
Genevaux J.M., 2007.
Green Timothy, 1991 [C].

/ LES SOLLICITATIONS MECANIQUES D'ORDRE DYNAMIQUE
– PRINCIPES GENERAUX

Les facteurs de dégradation concourant à l'apparition d'altérations sur les œuvres d'art sont variés, et il est de coutume d'établir leur classification afin d'en mieux comprendre les effets. Cette organisation, qui n'est pas figée et peut s'envisager de plusieurs façons, peut être construite à partir d'un premier niveau distinguant ces facteurs selon qu'ils soient d'ordre physico-chimique[2], biologique, ou encore mécanique. Cette famille s'entrevoit à travers la mécanique classique[3], dont l'objet est l'étude des états d'équilibre, des déformations ou du mouvement de la matière de l'échelle mésoscopique[4] à l'échelle macroscopique[5]. Si l'on s'intéresse au niveau de classification inférieur[6], il est possible de distinguer deux sous-familles ; les sollicitations mécaniques d'ordre thermo-hygrométrique[7], et les sollicitations mécaniques d'ordre dynamique.

Comme l'indique l'adjectif qui lui est accolé, une sollicitation mécanique d'ordre dynamique implique l'existence d'un mouvement. En application de la seconde loi de Newton[8], le principe fondamental de la dynamique implique que l'objet excité subit une accélération[9] et que la force totale qui lui est imprimée est égale au produit de la masse de l'objet par cette accélération[10] :

$$\Sigma \overrightarrow{F_e} = m\vec{a}$$

- $\Sigma\overrightarrow{F_e}$ est la somme des forces extérieures appliquées à l'objet (en N)
- m est la masse de l'objet (en g)
- $\vec{a}$ est l'accélération du centre de gravité de l'objet (en m.s^{-2})

Sur terre, il est de coutume d'exprimer cette relation différemment, de façon à la rendre intelligible au plus grand nombre. Le poids[11] d'un d'objet à la surface terrestre est défini par la formule suivante :

$$\vec{P} = m\vec{g} \Leftrightarrow m = \frac{\vec{P}}{\vec{g}}$$

- $\vec{P}$ est le poids de l'objet (en N)
- m est la masse de l'objet (en g)
- $\vec{g}$ est l'accélération de pesanteur (en m.s^{-2})

Compte-tenu de la seconde loi de Newton, il est possible de dire qu'un objet soumis à une sollicitation mécanique dynamique subit une force $\overrightarrow{F_g}$ vérifiant la relation suivante :

---

[2] Comprenant les réactions chimiques (oxydo-réduction, acido-basique, etc.), photochimiques, etc.
[3] Ou mécanique newtonienne
[4] Echelle supérieure à l'échelle microscopique dont le volume élémentaire représentatif est compris entre 0,01 et 1mm.
[5] Lemaître Jean, Boucard Pierre-Alain, Hild François, 2007, p.IX.
[6] L'étude des propriétés mécaniques d'un système est traditionnellement découpée entre trois domaines : cinématique, statique et dynamique.
[7] Actions mécaniques générées sur l'objet par les fluctuations thermiques et hygrométriques de l'environnement dans des conditions statiques.
[8] L'altération du mouvement est proportionnelle à la force qui lui est imprimée ; et cette altération se fait en ligne droite dans la direction de la force.
[9] L'accélération est une grandeur physique utilisée en mécanique qui exprime la variation de la vitesse d'un mouvement en fonction du temps. Elle s'exprime en m.s^{-2}
[10] Hecht Eugene, 2009, p.156.
[11] Le poids P est la force gravitationnelle exercée par la terre sur un objet.

$$\overrightarrow{F_g} = \frac{\vec{P}}{\vec{g}}\vec{a} \Leftrightarrow \overrightarrow{F_g} = \vec{P}\frac{\vec{a}}{\vec{g}}$$

Si l'on considère le rapport $\frac{a}{g} = G$, il est possible de dire qu'un objet soumis à une sollicitation mécanique d'ordre dynamique subit une force égale à G fois le poids de celui-ci[12].

– CHOCS ET VIBRATIONS

Les sollicitations d'ordre dynamique qui s'appliquent aux objets d'art et qui sont susceptibles de générer des altérations sont de deux types ; les chocs et les vibrations. Les chocs sont des sollicitations mécaniques de courte durée à forte et brusque accélération, pouvant provenir de collisions ou de manipulations. Les vibrations sont des mouvements alternés de l'objet autour d'un point d'équilibre[13], dont les accélérations sont généralement basses. L'amortissement des chocs et des vibrations s'effectue par la déformation élastique de l'objet, par la dissipation énergétique des frottements qui sont occasionnés, par la déformation plastique de l'objet ou encore par sa rupture[14].

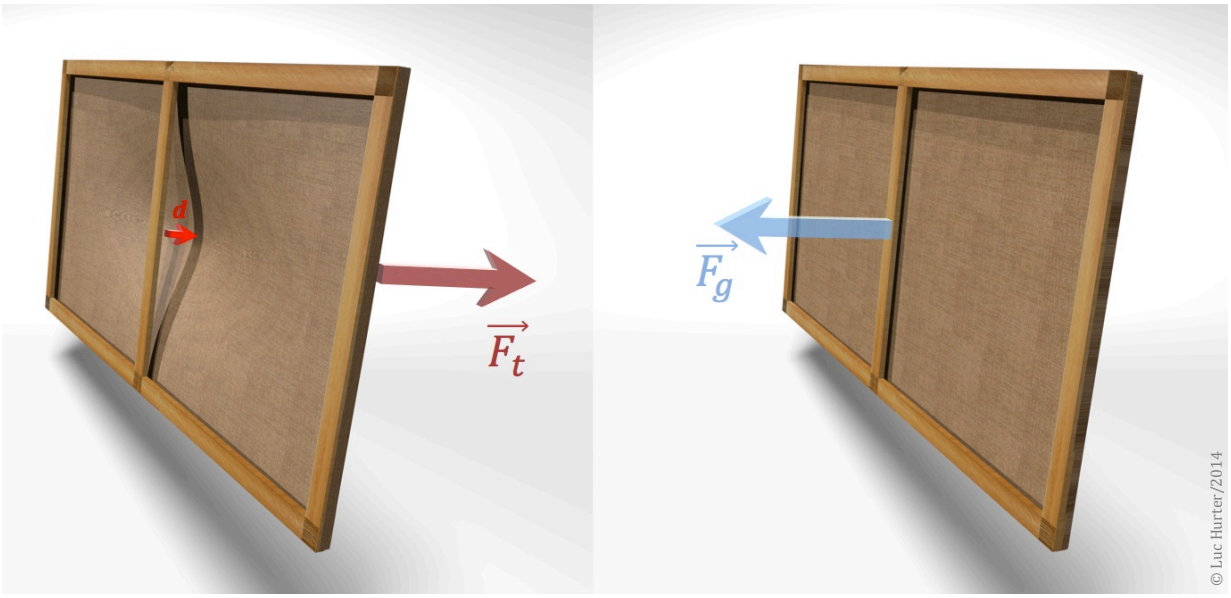


Fig. I – Une force $\overrightarrow{F_g}$ s'exerce sur le tableau. En réaction, une force opposée $\overrightarrow{F_t}$ s'exerce de façon décalée sur la toile qui se déforme et s'éloigne du plan matérialisé par son châssis (ici, la distance d est égale au rayon de la courbure occasionnée).

Dans le cas des peintures sur toile, bien que tous les éléments constitutifs soient affectés, c'est bien évidemment la toile et la couche picturale[15] qui constituent l'ensemble le plus sensible. Lorsqu'une peinture sur toile subit un choc ou est sujette à un épisode vibratoire l'ensemble toile/couche picturale sort périodiquement du plan matérialisé par le châssis[16]

---

[12] Mecklenburg Marion F., Tumosa Charles S., 1991 [A], p.144.
[13] Lemaître Jean, Boucard Pierre-Alain, Hild François, 2007, p.207.
[14] Lemaître Jean, Boucard Pierre-Alain, Hild François, 2007, p.209.
[15] Encollage, préparation et couches colorées.
[16] Mecklenburg Marion F., Tumosa Charles S., 1991 [A], p.137.

Les figures 1 et 2 illustrent les deux principaux types simplifiés de déformations que connaît un tableau lorsqu'il est soumis à un choc ou à des vibrations.

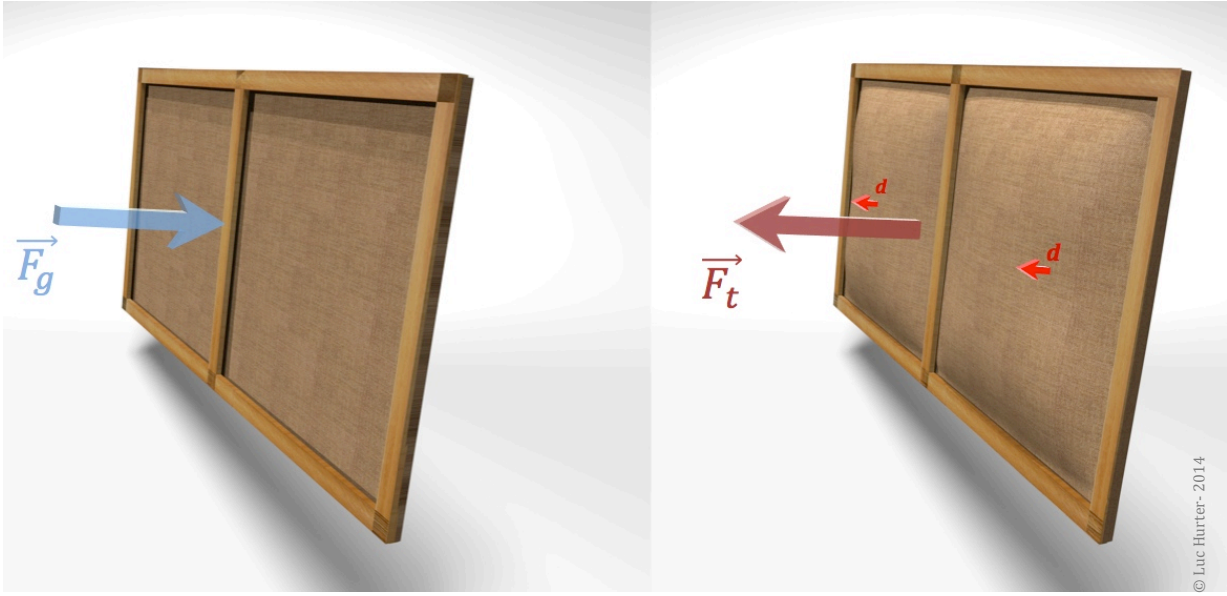


Fig. 2 – Une force $\overrightarrow{F_g}$ s'exerce sur le tableau. En réaction, une force opposée $\overrightarrow{F_t}$ s'exerce de façon décalée sur la toile qui se déforme et s'éloigne du plan matérialisé par son châssis. Dans ce cas, la toile vient battre contre la traverse centrale de son châssis.

Ces déformations sont les plus courantes et les plus simples. En fonction du point d'impact (lors d'un choc) ou de la fréquence de vibration (cf. après), elles auront des formes bien spécifiques et souvent plus complexes.

L'amplitude et l'amortissement de la sollicitation dépendent de la valeur de la force qui est imprimée au tableau, et de ses propriétés intrinsèques : force d'inertie due à la masse de l'objet ; déformation élastique et plastique, frottements internes dus à la nature et au degré de vieillissement des matériaux constitutifs, au mode d'exécution de l'artiste, etc. L'intégrité structurelle du tableau est strictement dépendante de ces données.

/ LES PHÉNOMÈNES VIBRATOIRES DES PEINTURES SUR TOILE
– INTRODUCTION PREALABLE

Une vibration est un mouvement dynamique alterné et répétitif, que l'on qualifie d'oscillant, à intervalles de temps consécutifs, que l'on définit comme étant périodique, autour d'une position d'équilibre stable[17]. La période T d'un système oscillant est le temps qu'il faut pour que celui-ci accomplisse un cycle. Dans le cas d'un tableau, la position d'équilibre correspond au plan matérialisé par le châssis et la toile au repos, un cycle, à la déformation de la toile à partir de cette position jusqu'à son élongation maximale. La fréquence caractérisant une

[17] Hecht Eugene, 2009, p.425 et 426.

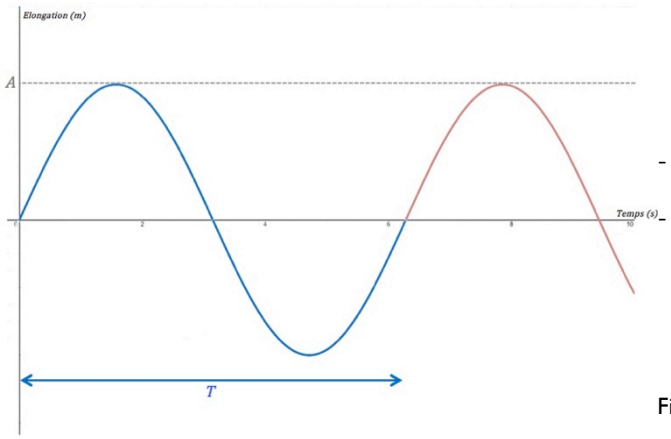
oscillation, est le nombre de cycles effectués par unité de temps[18], et qui s'exprime par la relation suivante :

$$f = \frac{1}{T}$$

- f est la fréquence (en Hz)
- T est la période (en s)

La seconde caractéristique d'un mouvement oscillant est l'amplitude que décrivent les cycles. Dans le cas d'une peinture sur toile, il s'agira de la distance maximale séparant la toile de sa position d'origine (dans la figure 1, il s'agit de la distance d).

Il est alors possible de tracer une courbe du déplacement d en fonction du temps :



- T est la période d'un cycle (en bleu)
- A est l'amplitude maximale de déplacement

Fig. 3 – Courbe du déplacement en fonction du temps

La vibration présentée jusqu'ici est un mouvement simple, libre et non-amorti relativement théorique. Dans la réalité, de nombreux paramètres entrent en considération et conditionnent le comportement vibratoire d'un système. Une vibration peut en effet être libre, résultant d'une action à un instant donné[19], forcée lorsqu'elle provient d'une excitation qui est elle-même périodique[20], ou encore amortie, lorsque les forces de frottements, d'amortissement visqueux, etc., s'y opposent.

Le nombre de degrés de liberté[21] du système étudié est également déterminant. Celui d'un système à n degrés de liberté tel que peut l'être une peinture sur toile est relativement complexe. Il apparaît donc nécessaire dans un premier temps de considérer des systèmes plus simples pour présenter les principes généraux essentiels.

---

[18] *Ibidem.*

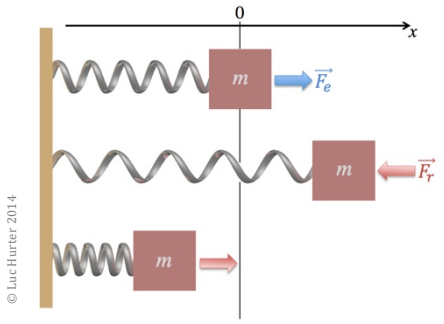
[19] C'est à dire qu'aucune force nouvelle force d'excitation n'agit sur le système après son excitation initiale (manipulation, choc, etc.).

[20] Vibrations générées par tout type de moyen de transport par exemple.

[21] Un degré de liberté est une possibilité de mouvement. Dans l'espace (O,x,y,z), un objet se déplaçant librement, peut le faire selon 6 transformations : 3 translations selon x, y, et z ; 3 rotations selon x, y, et z.

Un système oscillant à un degré de liberté signifie que ce système ne peut évoluer que selon une possibilité de mouvement. L'exemple le plus couramment utilisé pour illustrer le propos est le suivant[22] :

Un objet de masse m est accroché à un ressort de raideur k qui est lui même fixé à un support. Une seule possibilité de mouvement est offerte à l'objet, en translation selon l'axe des x. Si une force $\overrightarrow{F_e}$ s'applique sur l'objet, le ressort se déforme proportionnellement selon la loi de Hooke[23]. Au moment où l'objet est lâché, une force de rappel $\overrightarrow{F_r}$ opposée à la force appliquée tend à ramener ce dernier à sa position d'équilibre[24]. L'objet se met alors à osciller tant que les forces d'amortissement $\overrightarrow{F_a}$ le lui permettent. La fréquence à laquelle le système ressort/objet oscille est appelée fréquence propre est définie par la relation suivante[25] :



$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}}$$

- f est la fréquence (en Hz)
- k est la raideur du ressort (en N.m^{-1})
- m est la masse du système (en kg)

Fig. 4 –Système vibrant à un degré de liberté (masse+ressort)

Concrètement, cela signifie que tout système élastique ayant au moins un degré de liberté oscillera à une fréquence qui lui est propre lorsqu'il est excité, dépendant de sa masse et de sa raideur et à une amplitude maximale proportionnelle à la force initialement appliquée.

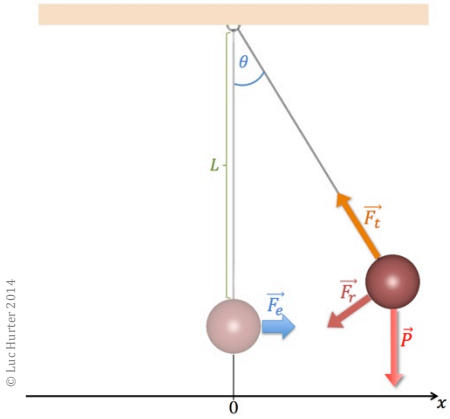
Ce principe est transposable à tout autre système ayant au moins une possibilité de mouvement, tel celui proposé par J.M Genevaux dans son article paru en 2007 « Les courbures locales, limites en fatigue d'un tableau soumis à des vibrations : l'usage des protections arrières »[26].

Une sphère de masse m est fixée à une tige de longueur L qui est elle-même fixée à un support. La fixation autorise simplement une rotation selon l'axe z. Le mouvement de la sphère est projeté sur l'axe des x. Si le système sphère/tige subit une force $\overrightarrow{F_e}$, il s'écarte de sa position d'équilibre. Au moment du relâchement, le poids $\vec{P}$ de l'ensemble tend à la ramener vers sa position d'équilibre. L'objet se met alors à osciller tant que les forces d'amortissement $\overrightarrow{F_a}$ le lui permettent[27]. La fréquence à laquelle le système sphère/tige oscille est appelée fréquence propre est définie par la relation :

---

[22] Marcon Paul J., 1991 [B], p.110 et 116.
[23] Un système élastique de raideur k soumis à une force F s'étire ou se contracte sur une distance s, proportionnellement à cette force, $F = ks$.
[24] Hecht Eugene, 2009, p.452.
[25] Démonstration complète dans :
Hecht Eugene, 2009, p.453
Lemaître Jean, Boucard Pierre-Alain, Hild François, 2007, p.208.
[26] *c.f.* Bibliographie.
[27] Démonstration complète dans :
Hecht Eugene, 2009, p.457.

Concrètement, cela signifie que tout système pendulaire à un degré de liberté oscillera à une fréquence qui lui est propre lorsqu'il est excité, dépendant uniquement de la longueur du lien



$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{L}}$$

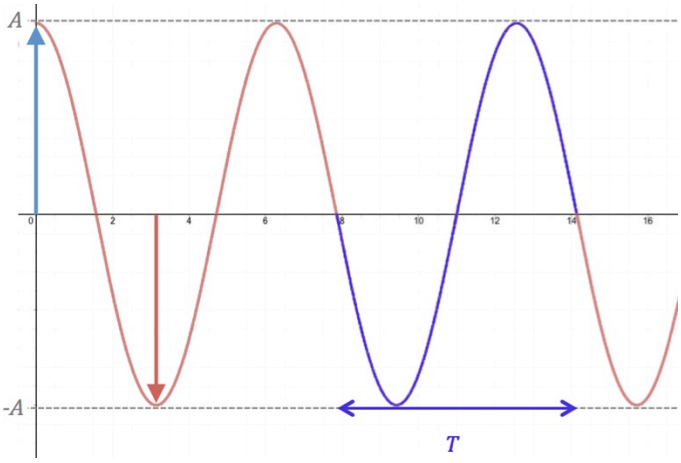
- f est la fréquence (en Hz)
- g est l'accélération de la pesanteur (en m.s^{-2})
- L est longueur de la tige (en m)

- $\vec{F_t}$ est la force exercée par la tige sur la sphère
- $\vec{F_r}$ est la composante du poids tangente à la trajectoire. à tout instant F_r= -mg sinθ

Fig. 4 – Système vibrant à un degré de liberté (sphère+tige)

qui le relie à son support, et à une amplitude maximale dépendant la force initialement appliquée.

La courbe représentant le déplacement de la sphère projeté sur l'axe des *x* ou du ressort en fonction du temps en négligeant les forces d'amortissement et d'inertie de la masse en mouvement, pourrait avoir l'allure suivante :



- T est la période propre du système
- La flèche bleue correspond à l'action de la force appliquée $\vec{F_e}$
- La flèche rouge correspond à l'action de la force de rappel $\vec{F_r}$

Fig. 5 – Oscillation libre non-amortie d'un système à un degré de liberté

OSCILLATIONS FORCEES – PRINCIPE DE RESONNANCE

Si l'on place maintenant un système à un degré de liberté dans un environnement générant lui même des vibrations, ce dernier subit donc une force excitatrice périodique[28]. Le comportement vibratoire du système dépend strictement de la fréquence de cette force périodique :

* Si la fréquence de la force appliquée est inférieure à la fréquence propre du système, les forces d'inertie de la masse en mouvement et d'amortissement sont trop faibles au regard de la force de rappel élastique (ou de rappel gravitationnel)[29]. Cette dernière est égale et

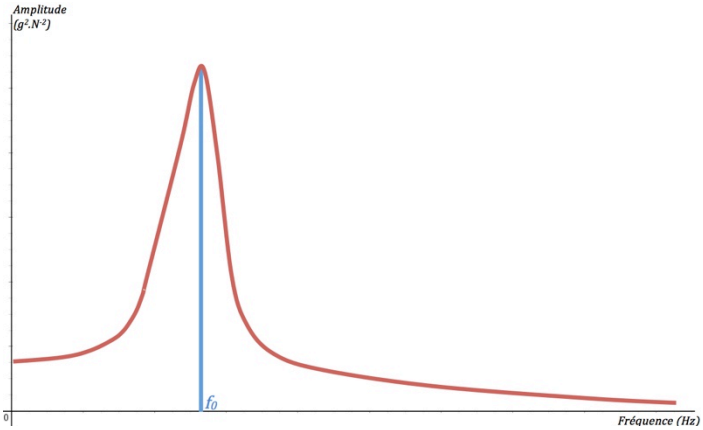
[28] Lemaître Jean, Boucard Pierre-Alain, Hild François, 2007, p.220.
[29] Hecht Eugene, 2009, p.460, 461.

opposée à la force appliquée[30]. Il y un rapport de un à un entre cette force et la quantité de déplacement du système[31].

* Si la fréquence de la force appliquée est supérieure à la fréquence propre du système, la force d'inertie de la masse en mouvement est supérieure à la force de rappel élastique (ou de rappel gravitationnel) ce qui détermine la réponse du système[32]. La force appliquée est presque entièrement consacrée à surmonter cette inertie. La quantité de mouvement est faible au regard de cette dernière.

* Si la fréquence de la force est égale ou proche de la fréquence propre du système, les forces de rappel élastique (ou de rappel gravitationnel) et d'inertie s'équilibrent l'une et l'autre. A chaque cycle, le système emmagasine une petite quantité d'énergie[33], l'amplitude des oscillations croit de plus en plus pour atteindre un maximum qui perdure tant que la force périodique extérieure est appliquée. Il s'agit du phénomène de résonnance.

A partir de ces principes, il est possible d'établir une courbe représentative de l'amplitude de vibration forcée d'un système en fonction de la fréquence d'excitation. Pour un système à un degré de liberté, cette courbe se présente sous la forme suivante :



L'amplitude s'accroît lorsque la fréquence de vibration du système s'approche de sa fréquence propre.

Fig. 6 – Spectre de réponse en fréquence d'un système oscillant à un degré de liberté en fonction de la fréquence de la force d'excitation.

– PEINTURE SUR TOILE, SYSTEME A N DEGRES DE LIBERTE

SYSTEME A DEUX DEGRES DE LIBERTES

Si l'on complexifie les systèmes présentés précédemment en leur rajoutant un degré de liberté, l'ensemble obtenu adoptera un comportement vibratoire différent.

On considère à nouveau le système précédent une sphère et une lige de longueur L_1 et on y attache une seconde sphère et une tige de longueur L_2, la fixation autorise une rotation selon l'axe z. Il s'agit d'un deuxième degré de liberté. Si le système est excité par une force périodique, il se met à osciller en étant soumis à des accélérations successives :

[30] Marcon Paul J., 1991 [B], p.110.
[31] *Ibidem.*
[32] *Ibidem.*
[33] Hecht Eugene, 2009, p.461.

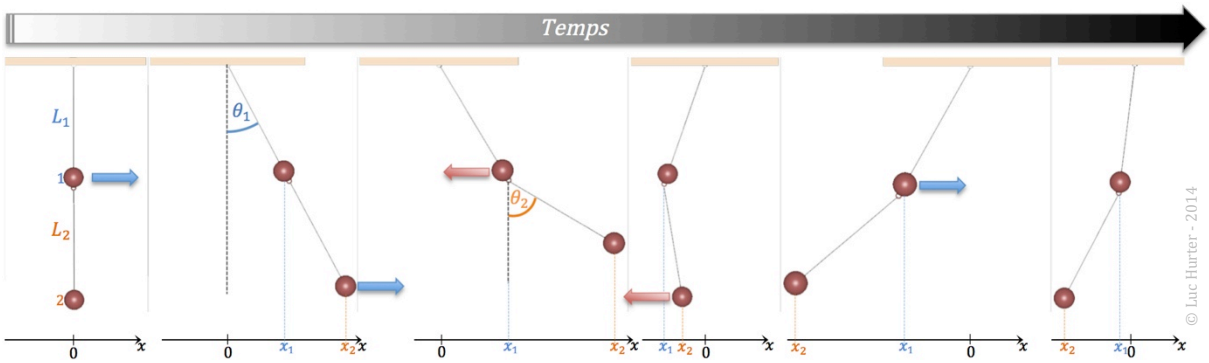
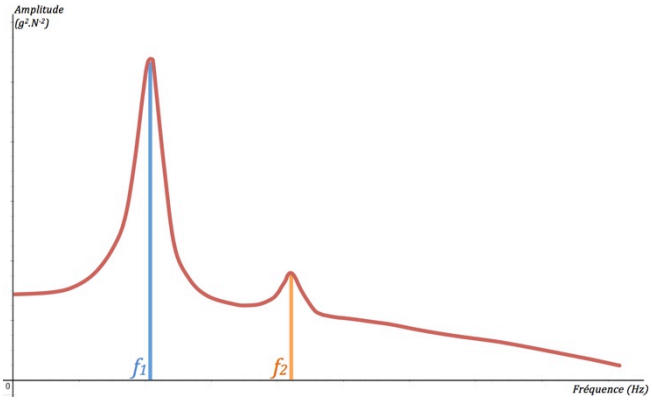


Fig. 7 – Oscillations d'un système à deux degrés de liberté.

Les projections x^1 et x^2 des sphères montrent que leur amplitude d'oscillation est différente. Elles sont chacune définies par une fréquence propre de résonnance liées à la longueur de la tige. Le système complet est donc caractérisé par ces deux fréquences de résonnance[34].

La courbe représentative de l'amplitude en fonction de la fréquence de la force d'excitation aura donc l'aspect suivant :



Il existe deux fréquences propres auxquelles le système peut entrer en résonnance.

Plus la fréquence est haute et plus la courbure du système est prononcée[35].

Fig. 8 – Spectre de réponse en fréquence d'un système oscillant à deux degrés de liberté en fonction de la fréquence de la force d'excitation.

Tout système vibrant à deux degrés de liberté est caractérisé par deux fréquences propres.

PEINTURE SUR TOILE – SYSTEME A N DEGRES DE LIBERTE

Une peinture sur toile est un système continu qui peut être considéré comme étant constitué d'une infinité de tige/sphère et masse/ressort[36]. C'est un système à n degrés de liberté.

---

[34] Genevaux J.M., 2007, p.8, 9.
[35] Genevaux J.M., 2007, p.9.
[36] *Ibidem.*
Lemaître Jean, Boucard Pierre-Alain, Hild François, 2007, p.226.

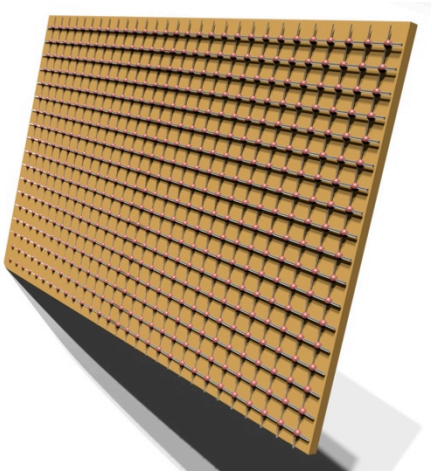


Fig. 9 – Une peinture est un système continu à *n* degrés de liberté.

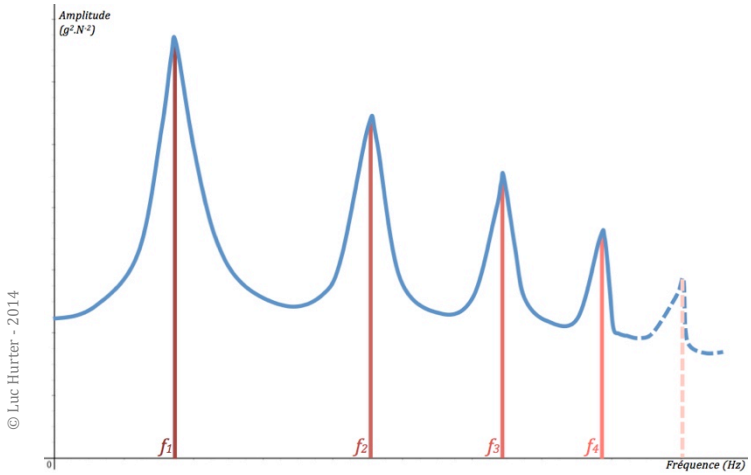


Fig. 10 – Spectre de réponse en fréquence d'un système oscillant à *n* degrés de liberté en fonction de la fréquence de la force d'excitation.

Elle est donc caractérisée par une infinité de fréquences propres de plus en plus élevées. Elle est susceptible d'entrer en résonnance lorsqu'elle est soumise à une force excitatrice périodique dont la(les) fréquence(s) s'approche(nt) d'une(des) fréquence(s) propre(s) de cette dernière.

A chacune de ces fréquences s'associe une forme propre[37], ou déformée modale qui décrit le mouvement relatif des degrés de liberté[38]. Chacune de ces formes est composée de zones où aucun mouvement ne se produit, que l'on appelle lignes nodales, et des zones d'oscillations, appelées ventres[39]. C'est précisément dans ces zones que les plus grandes contraintes s'exercent, proportionnellement à l'ampleur des courbures. Plus la fréquence propre est élevée et plus les courbures de la forme qui lui est associée sont prononcées[40].

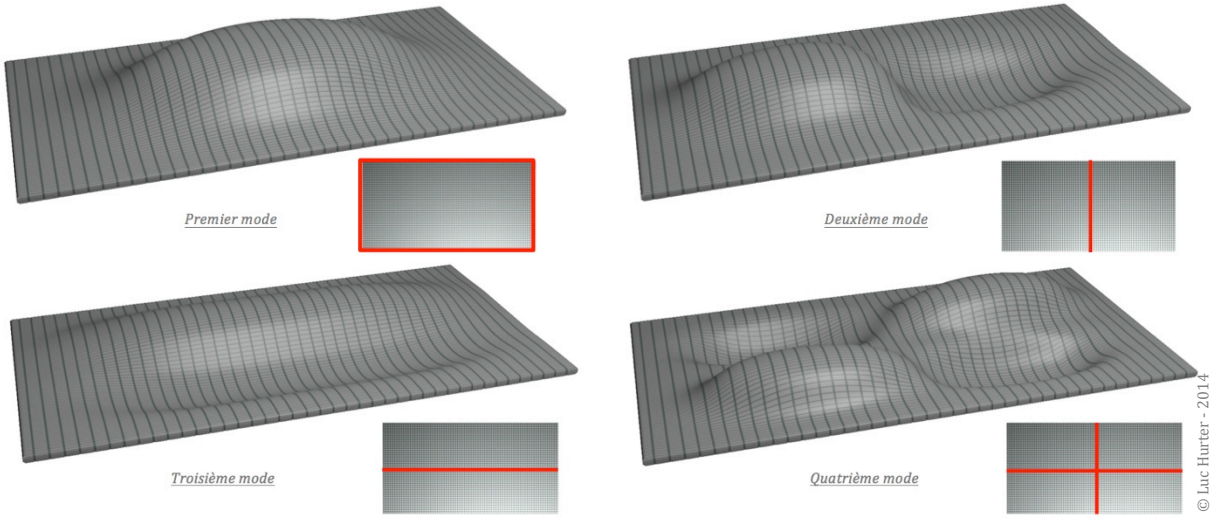


Fig. 11 – Les quatre première formes propres d'une peinture. Les lignes nodales apparaissent en rouge.

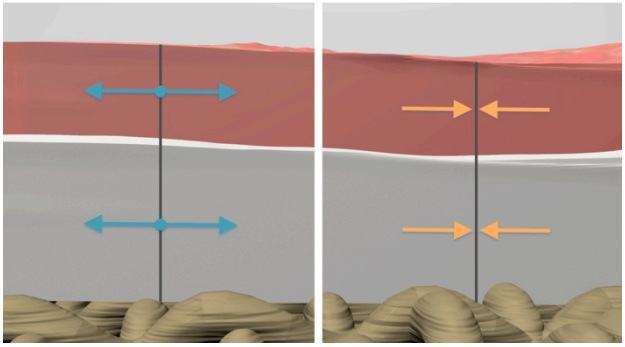
[37] Genevaux J.M., 2007, p.11.
Marcon Paul J., 1991 [B], p.111 et 117.
[38] Genevaux J.M., 2007, P ;10.
[39] Marcon Paul. J., 1991[B], p.111.
[40] Genevaux J.M., 2007, p.11.

Pour la plupart des peintures sur toile dont la tension est jugée comme étant « normale », le spectre sur lequel sont comprises les fréquences de résonnance générant les déformations les plus importantes s'étend de 1 à 50 Hz[41].

/IMPACT DES SOLLICITATIONS MECANIQUES DYNAMIQUES

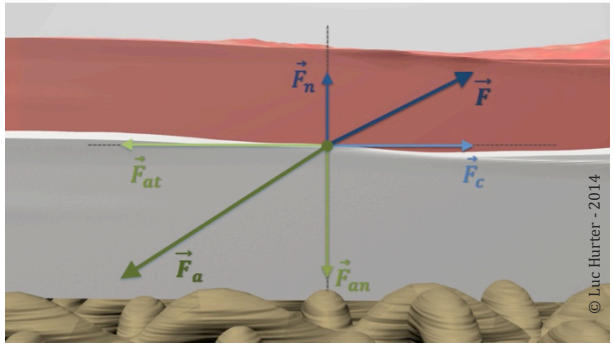
- RAPPEL SUR LES PROPRIETES MECANIQUES D'UN PEINTURE

Dans la plupart des cas, une couche picturale est constituée d'un ensemble de strates[42] superposées les unes aux autres sur un support. La continuité d'une strate est assurée par les forces de cohésion[43] s'exerçant entre ses matériaux constitutifs. La solidarisation d'une strate sur une autre, ou sur le support, est quant à elle assurée par des forces d'adhésion[44]. Ces forces d'adhésion sont elles mêmes composées de forces tangentielles s'appliquant parallèlement au plan du tableau, et de forces normales s'appliquant perpendiculairement au plan du tableau.



Forces de traction — Forces de compression

Fig.12 – Forces s'opposant à la cohésion des strates



Adhésion($\vec{F_a}$= $\vec{F_{an}}$+$\vec{F_{at}}$)<->Clivage $\vec{F_n}$+ Cisaillement $\vec{F_c}$

Fig. 13 – Forces s'opposant à l'adhésion des strates entre elles.

A ces forces de cohésion et d'adhésion viennent s'opposer des contraintes[45] de clivage[46], et de cisaillement ou traction/compression[47] générées par l'hétérogénéité de la couche picturale. Cette hétérogénéité tient à la composition des strates – nature des éléments constitutifs[48], à leur fabrication[49] – ainsi qu'à leur application – présence de corps étrangers[50], apparition de bulles, mélanges, etc. –. L'intégrité structurelle d'une couche picturale repose sur la stabilité de l'équilibre existant entre les forces de cohésion et de traction/compression, et entre les forces d'adhésion et les contraintes de clivage/cisaillement[51].

---

41 Marcon Paul J., 1991 [B], p.111.

42 Encollage, préparation, couches colorées, glacis, et vernis sont autant de strates (ou feuils) susceptibles de constituer une couche picturale.

43 Principalement des forces intermoléculaires – forces de van der Waals, liaisons hydrogènes –, plus rarement, liaisons covalentes et liaisons ioniques.

44 Forces d'adhésion mécanique dans le cas des strates et supports poreux, forces d'adhésion spécifique dans le cas des strates et supports non poreux.

45 Une contrainte σ est une force F rapportée à une surface S : $\sigma = \frac{F}{S}$ avec σ en N.m^{-2} ou MPa, F en N et S en m^2. Elle permet de mieux comprendre l'effet d'une action mécanique au sein d'un matériau.

46 Les forces de clivages sont normales. Elles s'appliquent perpendiculairement au plan du tableau.

47 Dans le cas des peintures, les forces de cisaillement s'appliquent à l'interface de deux strates (ou d'une strate et de son support, plus rarement au sein d'une strate), et de force de traction/compression lorsqu'une s'applique dans l'épaisseur de la strate. Ces forces de cisaillement et de traction/compression s'appliquent parallèlement au plan du tableau. I

48 Type de liant, de pigments, présence de charges, d'adjuvants, etc.

49 Enrobage, granulométrie des pigments, etc.

50 Poils de pinceau, poussières, etc.

51 Roche Alain, 2003, p.115.

Cette distribution des différentes forces qui s'exercent entre les matériaux constitutifs de ces strates régit leur comportement lors des sollicitations mécaniques. Chacune de ces dernières est définie par un module d'élasticité[52], une limite d'élasticité[53] et une limite de rupture[54] strictement dépendants de la température et de l'humidité relative du milieu[55]. Le comportement mécanique de l'ensemble de la peinture est complexe puisqu'elle est par nature hétérogène.

– ALTERATION DE LA COUCHE PICTURALE : ILLUSTRATION PAR L'EXEMPLE SOLLICITATION MECANIQUE DYNAMIQUE D'UNE PEINTURE NON-ALTEREE

Lors d'une sollicitation mécanique dynamique, le tableau tout entier subit une série plus ou moins longue de déformations successives. L'ensemble toile/couche picturale[56] est le plus sensible à ces sollicitations car la toile est plus souple que le châssis et elle se déforme donc

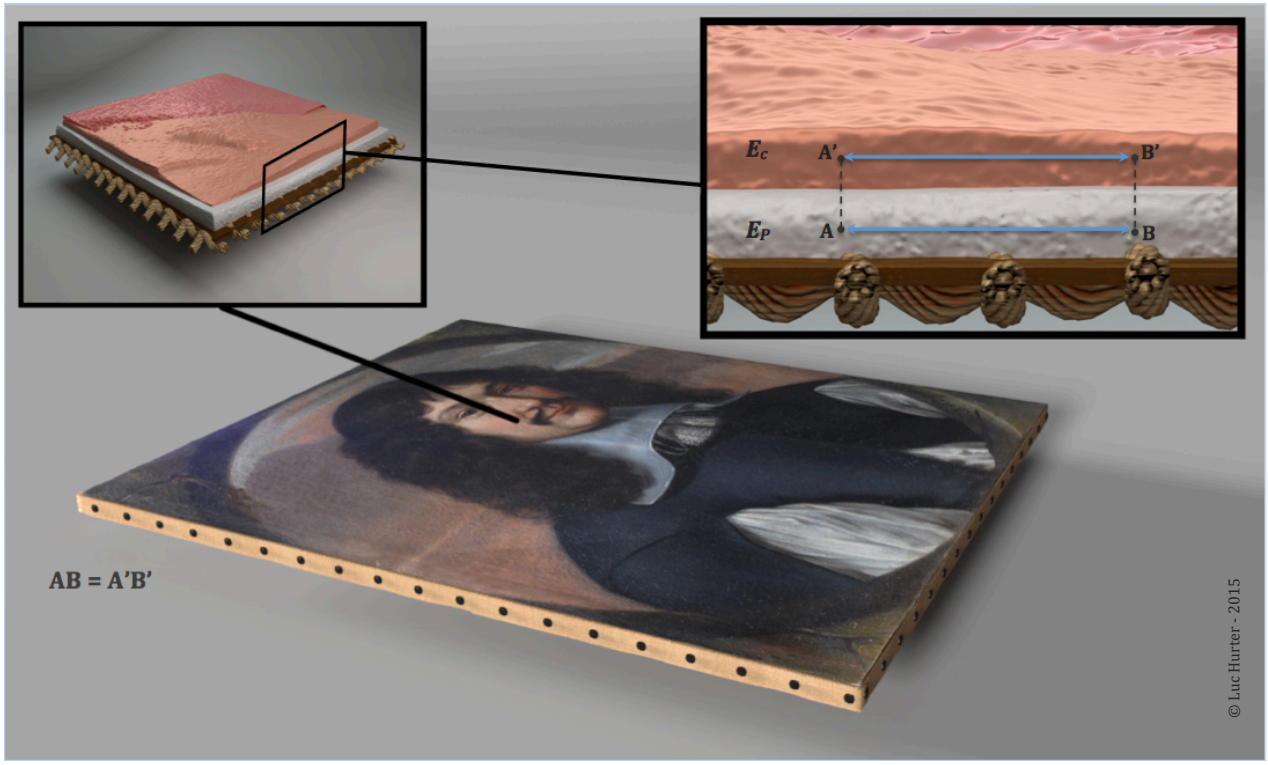


Fig. 14 – La Tour Eiffel non excitée. A' projection du point A et B' du point B.

---

[52] Le module d'élasticité E est la constante qui relie la contrainte σ de traction ou de compression à la déformation ε d'un matériau dans le domaine élastique : $E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$ avec σ et E en N.m^{-2} ou MPa.

[53] La limite d'élasticité d'un matériau est la contrainte à partir la déformation d'un matériau devient irréversible. On parle alors de déformation plastique. Pour un matériau dit *fragile*, la limite d'élasticité est la limite de rupture.

[54] La limite à la rupture est la valeur de la contrainte à laquelle le matériau se rompt.

[55] Le comportement d'un polymère lors des sollicitations mécaniques est strictement lié à la température et à l'humidité relative du milieu. Plus la température ou l'humidité diminuent, et plus ce polymère adopte un comportement vitreux, c'est à dire que sa raideur (lié au module d'élasticité) augmente, sa déformation plastique tend à disparaître, et sa limite de rupture diminue. Plus elles augmentent, et plus la raideur diminue, plus le seuil de plasticité diminue, et plus la limite de rupture augmente.
Mecklenburg Marion F., Tumosa Charles S.,[A] 1991, p.139.
Mecklenburg Marion F., Tumosa Charles S., [B] 1991, pp.179 à 182.
Michalski Stefan, *op. cit.*, p.224.

[56] Le terme comprend ici l'encollage, la couche préparatoire et les couches colorées.

davantage, et parce que les différentes strates qui composent la couche picturale ont des propriétés mécaniques différentes les unes des autres, ce qui accentue sa fragilisation.

Lorsque l'ensemble toile/couche picturale subit une accélération, il se déforme d'autant plus que cette dernière est élevée. Cette déformation, qui résulte de combinaisons d'efforts et de moments, n'est pas homogène et produit des zones ponctuelles de courbures plus ou moins prononcées de forces[57] qui génèrent une multitude de contraintes au sein de chacune de ces strates. Le phénomène est complexe lorsqu'on l'envisage dans son ensemble, mais il est possible de faire une présentation des mécanismes qui se développent à une échelle locale, en s'appuyant sur la stratigraphie de La Tour Eiffel.

La couche picturale de cette dernière est composée d'une préparation et de quelques superpositions de couches colorées. Afin de clarifier encore le propos, la zone choisie se situe dans une zone où il n'y a pas de superpositions. Si l'on considère deux points A et B au niveau de la préparation, leur projection dans la couche colorée produit les deux points A' et B' tel que AB = A'B'. (cf. Fig. 133)

Lorsque le tableau subit une accélération, ces éléments constitutifs se déforment, des courbures se produisent localement.

Si l'on observe à nouveau la zone choisie avant déformation, et que l'on envisage cette observation autour d'un seul axe, il est possible de constater que les strates ne se déforment pas de la même façon. A ce stade, la distance séparant les points A et B et celle séparant A'B' a évolué, dans cet exemple AB < A'B' (si la courbure était inversée, AB > A'B') ce qui signifie que l'allongement des strates est différent (cf. Fig.134)[58]. L'intégrité de chacune d'entre-elles dépend de leur propriétés mécaniques propres (élasticité, limite de rupture), et l'intégrité de l'ensemble de la relative homogénéité mécanique de ces strates entre-elles.

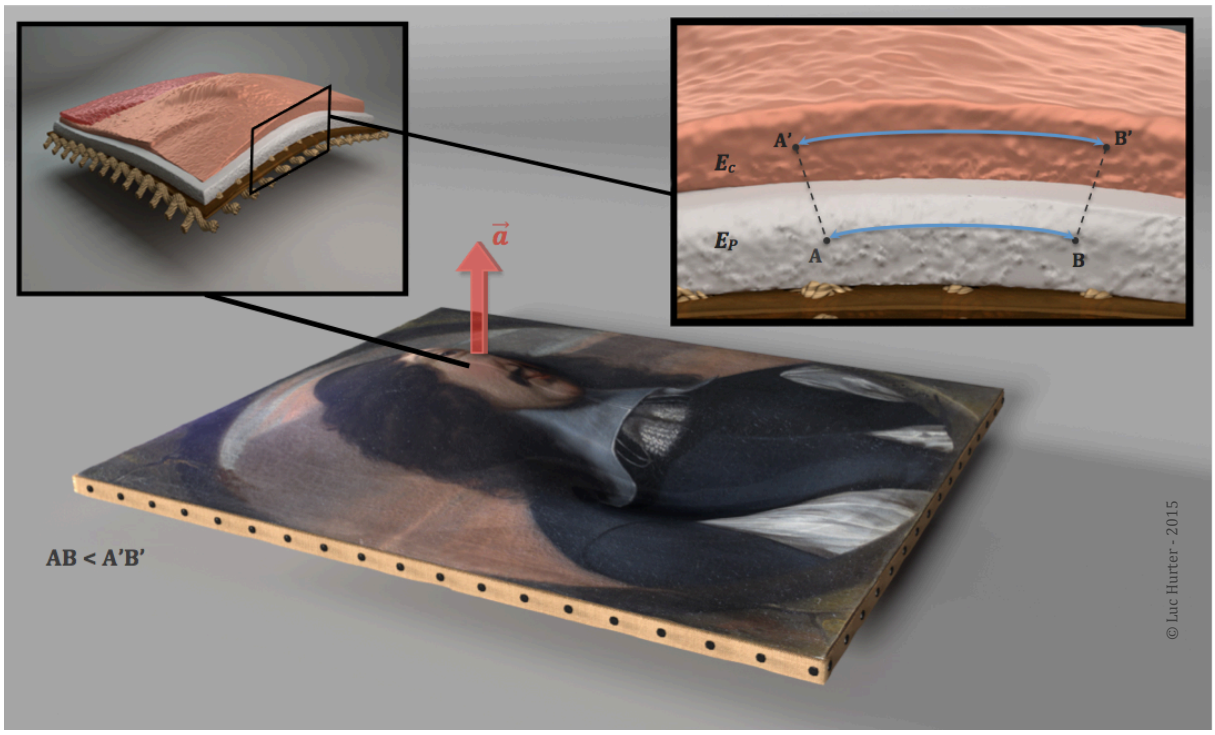


Fig. 15 – La Tour Eiffel subit une accélération $\vec{a}$. Les points projetés A' et B' s'écartent davantage que les points A et B.

[57] Le moment d'une force est une mesure de la torsion produite par la force autour d'un axe (Appelé souvent pivot) en un point. Il a les dimensions d'une force multipliée par une distance ; il s'exprime donc en N.m.
Hecht Eugene, 2009, p.205.

[58] Genevaux J.M, 2007, p. 38-40.

Considérant dans un premier temps E_p le module d'élasticité de la préparation, et E_c celui de la couche colorée, deux possibilités existent : $E_p \cong E_c$ ou $E_p \neq E_c$

* $E_p \cong E_c$ – Dans ce cas, les contraintes qui s'exercent dans chacune des strates sont uniformes et croissent proportionnellement lorsque l'on s'éloigne du centre de courbure (dans l'exemple ci-dessus que l'on approche de la surface)[59]. Si ces contraintes sont inférieures aux limites d'élasticité des strates, la déformation n'a pas de conséquence directe et l'intégrité de la couche picturale est préservée[60]. Si ces forces sont supérieures aux limites d'élasticité des strates, les forces assurant leur cohésion s'amenuisent, ce qui entraîne des déformations irréversibles dans le meilleur des cas, l'apparition de zones de rupture agissant comme soupapes de contraintes[61] au cas ou celles-ci sont trop importantes.

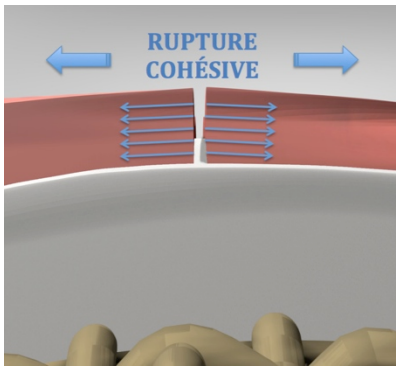


Fig. 16 – Les contraintes s'exerçant dans la couche colorée sont trop importantes et/ou la limite de rupture est inférieure à celui de la préparation.

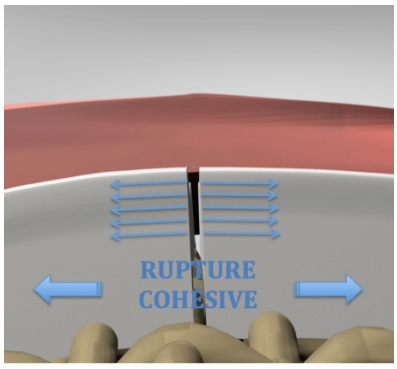
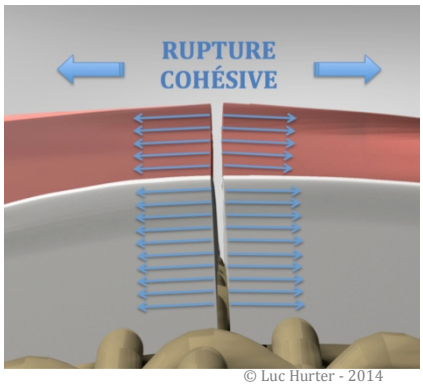


Fig. 17 – La limite de rupture de la préparation est inférieure à celle de la couche colorée. Une rupture apparaît malgré un module d'élasticité voisin de celui de la préparation.



© Luc Hurter - 2014

Fig. 18 – Les contraintes sont supérieures aux limites de rupture de l'ensemble de la couche picturale. La craquelure s'étend jusqu'à la toile.

* $E_p \neq E_c$ – Dans ce cas, les contraintes qui s'exercent dans chacune des strates sont différentes. La strate qui a le module d'élasticité le plus bas qui est plus souple est la moins contrainte. Celle qui a le module d'élasticité le plus haut qui est la plus rigide est davantage contrainte. Les contraintes normales de clivage et tangentielles de cisaillement s'exerçant à l'interface de ces strates sont accentuées[62]. Si elles sont supérieures aux forces assurant l'adhésion entre ces dernières, des déformations irréversibles se produisent, suivies de ruptures adhésives si les contraintes augmentent encore[63].

Parallèlement ou distinctement, si les contraintes sont supérieures aux forces de cohésion de ces strates (de façon préférentielle sur la strate ayant le *E* le plus élevé), des ruptures cohésives apparaissent.

---

[59] *Ibidem.*
Berger Gustav A., Russell William H., 2000, p.303.
[60] Roche Alain, 2003, p. 135.
[61] Berger Gustav A., Russell William H., *Op. cit.,* 2000, p.292-293.
[62] Roche Alain, 2003, p.119.
[63] Roche Alain, *Op. cit.,* 2003, p.115 et 150.

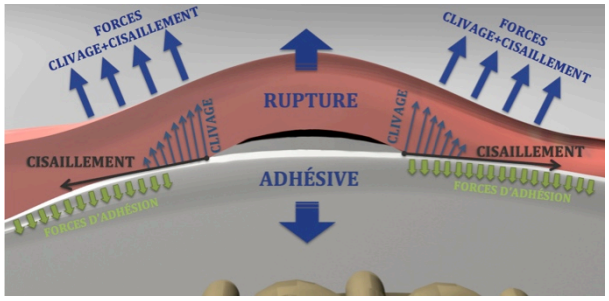


Fig. 19 – Le cisaillement occasionné par la différence des modules d'élasticité de la préparation et de la couche colorée, et le clivage sont supérieurs aux forces d'adhésion. Une rupture adhésive se produit à l'interface de ces couches créant une cloque.

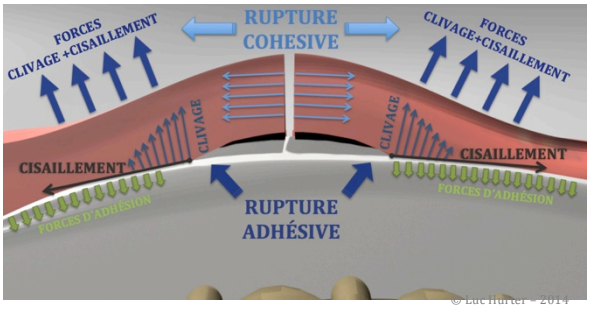


Fig. 20 – Si les contraintes générées dans les strates sont supérieures à leurs forces de cohésion, une rupture cohésive se produit en plus. Le résultat est une zone de rupture en voie de soulèvement.

Les moments de force qui s'appliquent à la toile/couche picturale accentuent davantage les contraintes originelles que les forces linéiques. Les courbures locales de la peinture sont donc particulièrement préjudiciables pour son intégrité structurelle[64].

SENSIBILITE DYNAMIQUE DES MATERIAUX ET FATIGUE MECANIQUE

Par expérience, il est relativement facile pour la plupart d'évaluer l'impact d'une sollicitation mécanique lorsqu'elle est de grande ampleur. Lorsqu'un tableau chute au sol, est l'objet du manipulation brutale, d'un acte de vandalisme ou encore d'une action de restauration mal maitrisée, les différents efforts qu'il subit sont susceptibles d'y faire apparaître instantanément des zones d'altérations mécaniques irréversibles (déformations plastiques, rupture, soulèvement) plus ou moins localisées, dont l'ampleur est proportionnelle à l'intensité du choc reçu. Ces ruptures peuvent en outre apparaître dans un rayon plus ou moins large autour du point d'impact, et/ou être dues aux forces d'inertie et d'amortissement du choc.

Plusieurs auteurs se sont attachés à calculer les valeurs limites des matériaux traditionnellement utilisés en peinture[65]. Les altérations apparaissent le plus souvent lorsque l'accélération subit par le tableau est supérieure ou égale à 30 G. Ces niveaux, qui peuvent être atteints lors de certains chocs, le sont rarement lors des épisodes vibratoires. Même lorsqu'une peinture sur toile entre en résonnance, les accélérations maximales qu'il subit sont de l'ordre de 10 G[66]. Dans la plupart des cas, et si l'on excepte les couches picturales à comportement fragile comme celle de La Tour Eiffel, les niveaux de contraintes générées au sein des strates sont insuffisants pour provoquer des altérations instantanées[67].

Pour autant, les sollicitations répétées que constituent les vibrations ne sont pas sans conséquences sur l'évolution des propriétés mécaniques des matériaux constitutifs des matériaux et donc sur l'intégrité structurelle du tableau. Cette répétition provoque l'accumulation d'endommagements – incubation, amorçage et propagation de microfissures –

[64] Genevaux J.M., 2007, p.5.
[65] Mecklenburg Marion M., Tumosa Charles S., 1991 [A], p.137-171.
Marcon Paul J., 1991 [C], p.107-113.
[66] Mecklenburg Marion M., Tumosa Charles S., 1991 [A], p.147.
[67] Marcon Paul J., 1991 [B], p.111.

à l'échelle microscopique[68] et mésoscopique[69], il s'agit du phénomène de fatigue. Plus les cycles sont répétés et plus endommagements se propagent[70], jusqu'à l'apparition de ruptures à l'échelle macroscopique[71]. L'impact des vibrations est donc cumulatif, plus une œuvre y est exposée et moins elle est capable de les supporter.

Les vibrations peuvent enfin être à l'origine d'usures, de lustrages ou encore de rayures lorsque la couche picturale d'une œuvre vient frotter contre son emballage pendant un transport.

SOLLICITATION MECANIQUE DYNAMIQUE D'UNE PEINTURE ALTEREE

Les phénomènes exposés ci-dessus se développent également lorsqu'une couche picturale présente déjà des altérations d'ordre mécanique, craquelures, soulèvements, etc.

Lorsqu'une strate de peinture présente des ruptures cohésives, les zones situées à l'aplomb de ces zones sont plus réactives. Les contraintes de clivage et de cisaillement s'y concentrent en raison des variations de mouvement rapides provoquées les accélérations successives imposées au tableau. Si elles sont supérieures aux forces assurant l'adhésion des strates entre-elles, une fissure se propage au niveau de l'interface, un soulèvement apparaît. La propagation de l'altération se poursuit à chaque nouvelle sollicitation (dynamique et/ou thermo-hygrométrique) jusqu'à la perte de matière.

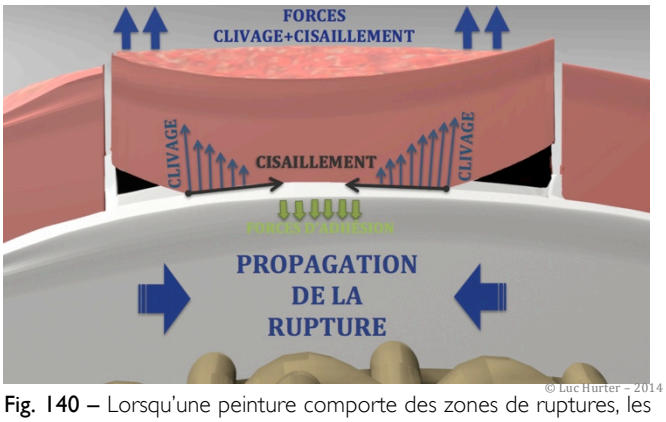


Fig. 140 – Lorsqu'une peinture comporte des zones de ruptures, les sollicitations dynamiques les propagent en accentuant les contraintes existant aux interfaces des différentes strates.

De surcroît, les matériaux constitutifs d'un tableau présentant des altérations mécaniques adhésives et/ou cohésives sont dans la plupart des cas fragilisés par le phénomène de fatigue. Cette conjonction des altérations accélère inexorablement la dégradation générale de l'œuvre si elle n'est pas protégée.

---

[68] Roche Alain, 2003, p.126.
[69] Lemaître Jean, Boucard Pierre-Alain, Hild François, 2007, p.177.
Mecklenburg Marion M., Tumosa Charles S., 1991 [A], p.147.
[70] Lemaître Jean, Boucard Pierre-Alain, Hild François, 2007, p.239.
[71] Michalski Stefan F., 1991, p.238-239.

Des réserves jusqu'aux salles d'exposition, dans les couloirs du musée, sur la route ou dans les airs, les œuvres sont exposées à quantités de sollicitations dynamiques. Pour autant, certaines sont peu dommageables, d'autres participent à l'apparition des altérations. Les trois paramètres pris en compte pour jauger de la dangerosité d'un épisode vibratoire sont son spectre d'émission, le niveau d'amplitude d'accélération des cycles, et la durée d'exposition. La combinaison de cette dernière et des fréquences d'émission permettent de calculer la quantité de cycles subis par une peinture[72]. Ces paramètres ont été pris en compte lors de différentes études pour pouvoir établir une échelle de risque des différentes sources. Les niveaux d'accélérations maximales des vibrations sont souvent atteints lors des manipulations des œuvres (emballage, accrochage, etc.) mais sur un laps de temps relativement court[73]. Les accélérations des vibrations générées par les transports sont souvent inférieures, mais sur les spectres de fréquences qui sont plus larges et sur des durées d'exposition bien plus longues[74]. Les transports routiers sont parmi les plus dommageables pour les œuvres car les vibrations qu'ils génèrent se situent une bande de fréquences comprenant les fréquences de résonnance de la plupart des tableaux, et à des niveaux d'accélération élevés[75]. Même si les transports en avion, bateau ou train sont plus longs, les vibrations qu'ils produisent sont moins dommageables pour les œuvres[76].

---

[72] Lasyk Lukasz, Lukomski Michal, Bratasz Lukasz, Koslowski Roman, 2008, p.67.
[73] Lasyk Lukasz, Lukomski Michal, Bratasz Lukasz, Koslowski Roman, 2008, p.65.
[74] *Ibidem.*
[75] Environ 1 G sur un spectre compris entre 1 et 100 Hz .
Stolow Nathan, 1981, p.45.
Marcon Paul J., 1991 [C], p.124 et 128.
[76] *Avion :* 0,1 G de1 à 20 Hz, 0,1G ≤a≤1G entre 20 et 3000 Hz. *Bateau :* 0,15 G de 1 à 200 Hz. *Train :* 0,1 G entre 1 et 1000 Hz. *Ibidem.*