

Contribution de la mécanique à la conservation du patrimoine culturel

Bertrand Marcon, David Dureisseix, Delphine Jullien, Luca Uzielli

▶ **To cite this version:**

Bertrand Marcon, David Dureisseix, Delphine Jullien, Luca Uzielli. Contribution de la mécanique à la conservation du patrimoine culturel. 17e journée DOCTISS de l'École Doctorale I2S Université Montpellier 2, Apr 2009, Montpellier, France. pp.77-80. hal-01826298

HAL Id: hal-01826298
https://hal.science/hal-01826298

Submitted on 29 Jun 2018

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.

ResearchGate

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: https://www.researchgate.net/publication/259967863

Contribution de la mécanique à la conservation du patrimoine culturel

Conference Paper · January 2009

CITATIONS
0

READS
35

4 authors:



Bertrand Marcon
Arts et Métiers ParisTech, Cluny
45 PUBLICATIONS **41** CITATIONS
SEE PROFILE



David Dureisseix
Institut National des Sciences Appliquées de Lyon
184 PUBLICATIONS **1,092** CITATIONS
SEE PROFILE

Delphine Jullien
Université de Montpellier
42 PUBLICATIONS **176** CITATIONS
SEE PROFILE

Luca Uzielli
University of Florence
66 PUBLICATIONS **292** CITATIONS
SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:

Project
Cutting forces modelisation and burr height prediction during high speed end milling of Aluminum-Silicon alloys with diamond tools. View project

Project
Cultural Heritage Conservation and Preservation View project

All content following this page was uploaded by Delphine Jullien on 03 June 2014.

The user has requested enhancement of the downloaded file.

DOCTISS 2009

Contribution de la mécanique à la conservation du patrimoine culturel

Bertrand MARCON[1] (Doctorant 3e année)
David DUREISSEIX[2], Delphine JULLIEN-PIERRE[3] (Directeurs de thèse français)
Luca UZIELLI[4] (Directeurs de thèse italien)

Laboratoire de mécanique et génie civil (L.M.G.C.)
Université Montpellier 2
F-34095 MONTPELLIER cedex 5, France

Dipartamento di scienze e tecnologie ambientali forestali (D.I.S.T.A.F.)
Università di Firenze
I-50145 FIRENZE, Italia

[1]marcon@lmgc.univ-montp2.fr
[2]dureisse@lmgc.univ-montp2.fr, [3]jullien@lmgc.univ-montp2.fr
[4]luca.uzielli@unifi.it

Résumé – **La thématique de cette recherche est de proposer des études mettant en jeu une expertise de mécanicien afin de répondre aux attentes des conservateurs et des restaurateurs des objets du patrimoine culturel.**

Mots-clés – **bois ; conservation ; mécanique ; éléments finis**

I. INTRODUCTION

L'objet de la thèse est la mise en place d'une méthode d'analyse mécanique venant en appui à la restauration et la conservation d'objets du patrimoine. On se limitera, pour l'application de la méthode, à un petit nombre d'objets choisis, soit pour leur importance motivant une forte mobilisation de la communauté, soit pour leur représentativité vis-à-vis des problèmes rencontrés.

La question posée, spécifique à chaque objet, pourra par exemple concerner la conception d'un nouveau châssis cadre pour un tableau, ou bien l'incidence d'un changement d'ambiance sur le risque de décollement de la peinture. Ces deux grandes problématiques correspondant aux attentes de la part des restaurateurs de tableaux.

L'approche choisie s'appuiera sur le développement de modèles numériques à la fois du comportement du matériau bois et des structures étudiées. Elle combine le développement d'outils de simulation numérique et l'intégration de données expérimentales, sur originaux et sur maquettes de substitution, destinées à nourrir et valider les modèles.

La modélisation intègre, de manière relativement simplifiée mais suffisamment réaliste, les aspects multiphysiques du comportement hygromécanique du bois. Celle-ci devant prendre en compte les comportements élastique, visco-élastique, thermo- et hygro-dilatant ainsi que le comportement mécanosorptif avec la propriété d'orthotropie radiale du matériau bois. La modélisation doit également intégrer les termes de transport d'humidité et les équilibres hydriques.

II. ETUDE DE CAS ET CONSERVATION DES OEUVRES

II.1.Exposition dans un musée : Monna Lisa di Gioconda

II.1.1.Descriptif de l'œuvre



A titre d'exemple le tableau de Leonardo da Vinci, la *Monna Lisa di Gioconda*, illustre très bien cette problématique. Il s'agit d'un panneau de peuplier enchâssé entre un châssis-cadre, et un cadre extérieur. Son étude demande donc de prendre en compte l'interaction entre le panneau et les cadres. Ce panneau (peint entre 1503 et 1506) possède une histoire de 400 ans, lors de laquelle les sollicitations auxquelles il a été soumis ne sont pas connues exactement ; l'état actuel de ce panneau doit donc être identifié et non déduit de l'histoire passée.

Notons au passage que l'utilisation de panneaux de bois comme support de peinture s'inscrit entre le 14è et le 16è siècle. Durant cette période, le tableau a enregistré de nombreuses variations de condition de stockage, tantôt remisé, exposé tel quel et de nos jours mis dans une enceinte régulée en hygrométrie et température.

Il présente également une assez longue fissure sur la partie supérieure qui aujourd'hui semble stable et qui d'ailleurs a fait l'objet d'un acte de conservation à l'aide de « papillons » au revers afin d'éviter l'ouverture de cette dernière. Tous ces points font que le tableau de la Joconde est un sujet d'étude qui balaye un large spectre des spécificités des panneaux peints sur bois du patrimoine.

II.1.2.Risque de propagation de fissure

Cette analyse est menée conformément à l'approche énergétique de Griffith [5]. Elle repose sur le fait que lorsque l'on exerce des actions mécaniques sur une structure, celle-ci se déforme et emmagasine de l'énergie de déformation E_d. Une propagation de fissure consommerait une partie de cette énergie E_f et a pour conséquence la création d'une surface de décohésion *da*.

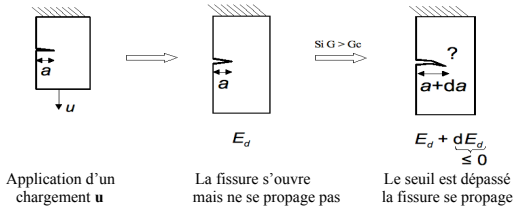


Figure 1 : Principe de la propagation de fissure selon Griffith

Une propagation de fissure de surface da consomme une énergie proportionnelle à *da* : **Ef = G.da** où *G* est appelé coefficient de restitution d'énergie. Si *G* atteint une valeur suffisante G_c, dite critique, alors le scénario de propagation se produit. La littérature donne pour le peuplier :

$$\mathbf{G_c \approx [0.1 , 1.0]\ kJ/m^2}$$

Tout le problème réside dans l'obtention de la valeur de *G* car de façon générale il est impossible de réaliser des essais mécaniques sur les panneaux peints du patrimoine. C'est pourquoi il est nécessaire de passer par des essais virtuels, sur un modèle numérique, comme la mise à plat du panneau de la Joconde dans son châssis-cadre.

Le calcul du paramètre *G* passe d'abord par l'obtention de la valeur de l'énergie de référence Eref en appliquant le chargement de dépose du panneau dans le châssis-cadre, et soumis à son poids propre. Puis une série de calculs sont réalisés en incrémentant la longueur de la fissure (initialement de 116.9 mm). À chaque incrément de propagation de fissure on obtient l'énergie contenue dans la structure modifiée.

Le coefficient de restitution d'énergie est alors calculé comme suit :

$$G = \frac{\Delta E}{da} = \frac{(E_{ref} - E_f)}{L_f \cdot e}$$

avec E_{ref} : énergie de référence
E_f : énergie après incrément de propagation
da : surface de décohésion da = L_f.e
L_f : longueur de l'incrément de propagation
e : épaisseur du panneau, hauteur fissure

Les résultats obtenus sur le modèle Joconde 3D ont été comparés à ceux précédemment obtenus sur le modèle Joconde 2D [4].

- modèle 2D : E_{ref} = 19.70 mJ
  $G_{2D} \approx 0.0070\ kJ/m^2$ << $G_c \approx 0{,}1\ kJ/m^2$
- modèle 3D : E_{ref} = 22.26 mJ
  $G_{3D} \approx 0{,}0045\ kJ/m^2$ << $G_c \approx 0{,}1\ kJ/m^2$

Le résultat 2D correspond au modèle de l'analyse réalisée en 2004 où il avait été déterminé qu'un changement d'ambiance brutal de 10% d'humidité interne ne mettrait pas en danger l'oeuvre dans le sens où cela n'induirait pas de propagation de la fissure [4].

Les nouvelles simulations avec le modèle 3D, plus précises, sont encore plus encourageantes car elles donnent une estimation de G environ deux fois plus petites que celles du modèle 2D. Du point de vue de l'oeuvre, la fissure peut être considérée comme « stable » car le risque que celle-ci se propage est faible.

II.2.Exposition dans une église : Couronnement du Christ

II.2.1.Descriptif de l'œuvre



Une œuvre placée dans le chœur de l'Eglise St Didier en Avignon a fait l'objet d'un suivi durant de nombreux mois. Ce tableau représentant la dépose de la couronne d'épines sur la tête du Christ, peint en 1563, est composé de quatre planches horizontales pour donner un panneau haut de 143 cm et large de 178 cm. Après analyse d'échantillons de bois prélevés au revers il s'avère que l'essence composant le tableau est le peuplier. Les planches sont maintenues solidaires à l'aide de traverses verticales (cerisier ou merisier) montées en queues d'aronde.

II.2.2.Suivi In-Situ

Nous disposons de plus d'une année de relevés en hygrométrie et en température dans l'église, au niveau du tableau. Un dispositif au revers de la planche supérieure permet de connaître l'évolution de la déformation de cette planche en fonction des fluctuations climatiques dans l'église [3]. Ci-dessous sont représentées les diverses évolutions de décembre à août 2007.

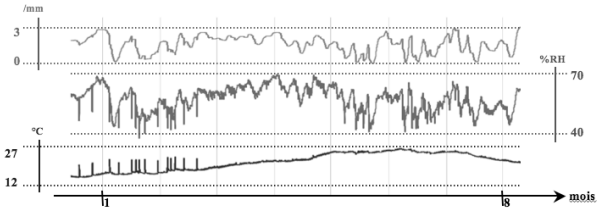


Figure 2 : Evolution de l'ambiance d'exposition du tableau durant 8 mois en parallèles de la variation de flèche de la planche supérieure

Le relevé durant quasiment une année montre que le panneau suit très nettement les fluctuations climatiques de l'environnement dans lequel il est exposé. On constate donc l'importance d'une bonne connaissance des effets du climat sur la problématique de conservation d'une œuvre.

II.2.3.Prédiction numérique du comportement

J. Colmars [2] propose un modèle, issu des travaux de P. Périé [8], permettant à partir des données hydriques de trouver les variations de flèches de la planche. Pour cela on se sert d'une simulation 1D prenant en compte la mécanique ainsi que les transferts hydriques dans le sens radial d'une planche.

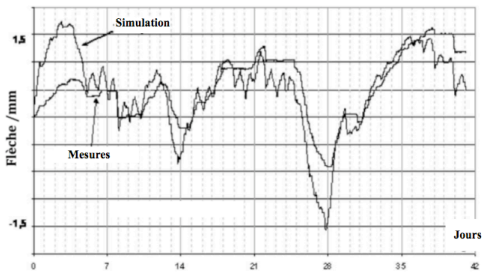


Figure 3 : Comparaison entre mesures in-situ et valeurs simulées

Avec des ajustements et certaines hypothèses sur le débit des planches et la perméabilité à l'humidité de la couche picturale on arrive à bien approcher le comportement de la planche par simulation.

Une deuxième partie de l'étude sur ce panneau concerne l'influence des variations météorologiques à l'extérieur du bâtiment sur l'ambiance à l'intérieur de ce dernier. Pour cela des relevés des ambiences extérieure et intérieure sont faits en parallèles (température et humidité relative). L'ensemble de cette étude une fois finalisée permettra de montrer l'importance de bien caractériser l'ensemble des facteurs influençant les conditions de conservation d'une œuvre peinte sur panneau de bois.

Une étude sur l'ensemble d'une œuvre et de son environnement, comme réalisée ici, vise à aider les conservateurs dans leur décision d'accorder ou non un prêt d'œuvre pour une exposition dans un autre lieu. On pourrait en effet prévoir le comportement du tableau de façon numérique pour anticiper un éventuel danger dû au changement de ses conditions de stockage ou d'exposition.

III. Expertise sur un acte de restauration

Les actes de restaurations pratiqués sur des œuvres sont issus à grande majorité de Florence où se situe un centre de formation et de restauration appelé *Opificio delle Pietre Dure*.

L'acte de restauration étudié ici vise à réduire les mouvements hors plan du panneau pour que le panneau se déforme moins en tuilage. La technique développée et largement acceptée par la profession consiste en l'application d'un châssis à ressort au revers des panneaux [1].

III.1.Descriptif de la technique

La limitation des mouvements hors plan d'un panneau vise à réduire les risques d'endommagement de la couche picturale ainsi que la prévention d'une éventuelle augmentation du tuilage permanent des planches. La conception de ce châssis est représentée sur le schéma suivant.

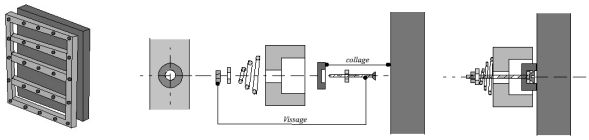


Figure 4 : Description de la conception du châssis à ressort

La problématique principale restant à résoudre sortant de l'approche métier est le dimensionnement de trouver les bonnes caractéristiques des ressorts. C'est-à-dire leur rigidité et la pré-charge qui leur est appliquée lors de l'installation du châssis. Ces paramètres ne peuvent pas être déterminés de façon systématique. Il est indispensable de les adapter au cas par cas selon les caractéristiques individuelles des tableaux. Dans le cadre de cette thèse on propose donc de concevoir un modèle numérique permettant le dimensionnement du châssis ainsi que des ressorts.

III.2.Descriptif du modèle associé [7]

Pour répondre à l'attente des restaurateurs et à leurs besoins, nous avons choisi de réaliser un modèle numérique simple qui rend compte de la physique réelle. En optant pour un modèle simple nous espérons pouvoir leur fournir un modèle utilisable dans le cadre de leur pratique. Un modèle numérique de type 1D remplit, à priori, parfaitement ce rôle. Néanmoins, nous n'excluons pas d'enrichir la description numérique si le besoin s'en fait sentir.

Le modèle numérique est donc basé sur une formulation éléments finis de poutre et de barres. Les mouvements du panneau sont prédits avec comme hypothèse que la face du tableau (peinte) est parfaitement imperméable à la vapeur d'eau, ce qui correspond à une situation idéale, différente de la réalité. Cette situation doit simuler les déformations transitoires dues à la présence et à l'évolution d'un gradient non symétrique d'humidité interne dans le bois.

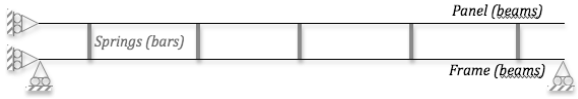


Figure 5 : Modèle éléments finis simple d'un panneau relié à un châssis par des ressorts

Le modèle prend en compte les conditions de contact unilatérales, la rigidité des ressorts ainsi que leur pré-charge. Lorsque le contact entre le châssis et le panneau est réalisé, la force de contact est égale à la pré-charge. A l'opposé, la force exercée par les ressorts est plus importante que la précharge initiale et tend à reformer le contact entre les deux structures. Nous faisons l'hypothèse d'une linéarité entre la force des ressorts et leur distance de compression.

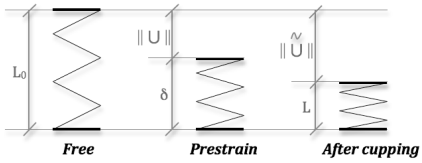


Figure 6 : Définition de la force dans les ressorts

$$F = (\|U\| + \delta - L).k \qquad v = (\delta - L)$$

L_0 : longueur à vide du ressort /mm
δ : pré-charge en compression /mm
v : compression due au tuilage du panneau /mm
k : rigidité du ressort /N.mm^{-1}

Le profil de la distribution de l'humidité interne est supposé linéaire dans l'épaisseur.

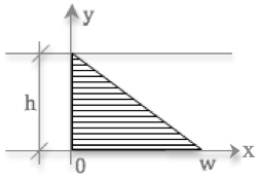


Figure 7 : Gradient d'humidité dans l'épaisseur

Cependant un profil plus complexe issu des travaux de Kollmann [6] peut être considéré comme alternative. Cette hypothèse sur la variation d'humidité en fonction de l'épaisseur peut conduire à une surestimation des déformations. Le modèle de comportement en retrait/gonflement est choisi linéaire.

$$\varepsilon_T = \alpha_T w\left(1 - \frac{y}{h}\right) \qquad \sigma_T = E_T \varepsilon_T$$

w : hulidité interne /%RH
ε_T et σ_T: champ de contrainte et de déformation /Pa
α_T : paramètre de retrait /%
h : épaisseur de la planche /mm

Le moment intérieur *Mz* (dans le modèle de poutre) engendré par le gradient d'humidité dans l'épaisseur peut s'exprimer comme :

$$Mz = b\int_0^h \sigma_T\left(\frac{h}{2} - y\right)dy \qquad Mz = \frac{1}{12}bh^2 E_T \alpha_T w$$

Les paramètres du modèle sont choisis afin d'être facilement manipulables par les restaurateurs (distance de compression des ressorts, nombre de ressorts, dimensions du panneau, les caractéristiques mécaniques des matériaux composant le panneau et le châssis).

III.3.Validation par l'expérience du modèle numérique

La résolution numérique nécessite d'être validé expérimentalement ; c'est pourquoi une réplique d'une portion de tableau a été réalisée, sur laquelle est fixé un châssis à ressorts. Cette réplique a l'avantage d'être parfaitement connue en terme de dimensions ainsi que du point de vue du matériau la constituant.

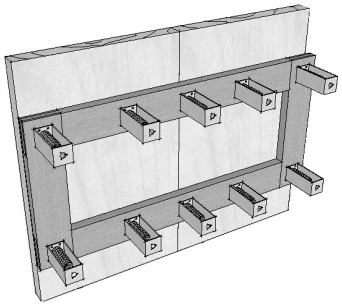


Figure 8 : Réplique de validation du modèle de châssis-ressort

En exposant la réplique à différents environnements et en relevant ses mouvements via un système de capteurs nous pourrons évaluer les performances du modèle numérique. Il faudra éventuellement améliorer le modèle en enrichissant les caractéristiques matériaux par exemple.

Une réplique aux mêmes dimensions et faite dans le même bois de peuplier sert de témoin. Cette dernière n'est pas équipée de châssis et subit les mêmes chargements hydriques et thermiques que la réplique à châssis. Cette étude, initiée lors du séjour à Florence au D.I.S.T.A.F., est en cours de finalisation.

IV. Conclusion

Cette communication présente un éventail de ce que peut proposer la mécanique pour répondre aux questions diverses des conservateurs et des restaurateurs de panneaux peints appartenant au patrimoine culturel. Ce travail est réalisé en étroite collaboration avec ces derniers.

Un travail important reste à réaliser concernant le transfert de compétence afin que les différentes études présentées ici puisse accompagner les artisans de la conservation et de la restauration dans leur pratique.

V. References

[1] M. Ciatti, C. Castelli, and A. Santacesaria, *Dipinti su tavola, la tecnica e la conservazione dei supporti*. Edifir Florence, Italie, pp. 188-192, 1999.

[2] J. Colmars, *Rapport MR2*, Montpellier, France, 2008.

[3] P. Dionisi Vici, *Sviluppo di un apparato per la misurazione di forze e deformazioni indotte nei dipinti su tavola da variazioni climatiche : la traversa strumentata*, Thèse de doctorat, DISTAF, Florence, Italie, 1999.

[4] D. Dureisseix, J. Gril, O. Arnould, *Au coeur de la Joconde. Léonard de Vinci décodé*, Chap. II.6, Editions Gallimard, Paris, France, 2007.

[5] A. A. Griffith, *The theory of rupture, Selected papers on Foundations of Linear Elastic Fracture Mechanics* (A99-25742 pp. 06--39), Bethel, CT/Bellingham, WA, Society for Experimental Mechanics/Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SEM Classic Papers). Vol. CP 1; SPIE Milestone Series. Vol. MS 137, pp. 96--104, 1997.

[6] F. Kollmann, W. Côté, *Principles of Wood Science and Technology*. Springer Verlag: pp. 185--186, 1968.

[7] B. Marcon, D. Dureisseix, *et al.* , *Experimental and numerical mechanical study of a framing technique for cupping control of painted panels combining crossbars and springs*, COST IE0601 Wood in Culture Heritage, Braga, Portugal, 2007.

[8] P. Perré, I. W. Turner, *A 3-D version of TransPore: a comprehensive heat and mass transfer computational model for simulating the drying of porous media*, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 42 pp. 4501--4521, 1999.

View publication stats