Conservation préventive du support en bois de La Joconde

Joseph Gril

▶ **To cite this version:**

Joseph Gril. Conservation préventive du support en bois de La Joconde. Journée " Qualité, traitement et restauration du bois ", Académie des arts traditionnels de Casablanca, Jun 2015, Casablanca, Maroc. hal-01295474

HAL Id: hal-01295474
https://hal.science/hal-01295474

Submitted on 31 Mar 2016

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.

Gril J. (2015) Journée « Qualité, traitement et restauration du bois »
Académie des arts traditionnels de Casablanca, MR, 3.06.15, K. Laych (ed)

Conservation préventive du support en bois de La Joconde

Joseph Gril, Directeur de recherche au CNRS
Laboratoire de Mécanique et Génie Civil
CNRS, Université Montpellier , France

Résumé

La réponse mécanique du support en bois de la Joconde à l'action du châssis-cadre a été simulée au moyen d'une modélisation par éléments finis, et comparée à des observations par technique d'imagerie optique. Le risque de propagation de la fente existante, estimée par le calcul du taux de restitution de l'énergie élastique, a été trouvé négligeable.

Mots-clés

Bois, patrimoine, mécanique, panneau peint, rupture

1. Introduction

L'application des sciences du bois à la conservation des objets du patrimoine, tels que les peintures sur bois, est illustrée par une étude sur le support en bois de la Joconde, publiée en partie dans un ouvrage [4] qui a initié une collaboration entre équipes françaises et italiennes. Bien que sujet à quelques incidents durant ses 500 années d'histoire, ce fameux tableau est resté relativement intact. Le panneau sur lequel il est peint, constitué d'une planche de peuplier unique insérée dans un châssis-cadre peu contraignant, est endommagé par une fente ancienne et apparemment stabilisée (Fig. 1). Il a servi de cas d'école pour l'étude des panneaux peints et a ainsi représenté le point de départ d'un projet de plus grande envergure sur ce type d'objet. L'analyse mécanique du tableau a démarré en 2004 pour répondre à deux questions posées par le musée du Louvre: (i) évaluation du risque de dégradation, en particulier du fait de la fente existante; (ii) optimisation des conditions de conservation en relation avec la régulation de l'humidité et la conception du châssis-cadre. Dans cette présentation, nous allons expliquer l'approche choisie pour aborder ces questions, plus particulièrement (i). Le travail réalisé est encore préliminaire, et pourrait être amélioré dans une large mesure sur la base des données accumulées depuis, toutefois les conclusions obtenues sont suffisamment fondées pour être publiées.

2. Le modèle numérique

2.1 Données disponibles

L'approche choisie est basée sur le développement d'un modèle mécanique, nourri et validé par des données expérimentales. Ces données, obtenues manuellement lors des campagnes d'observation ou automatiquement durant les périodes intermédiaires, concernent la structure du bois, la géométrie du panneau, les actions hygromécaniques et les réactions des traverses.
La Fig. 2 montre un schéma de l'ensemble de la structure. Le panneau de bois, support de la couche picturale, est fait d'une pièce de peuplier épaisse d'environ 13 mm, de fil relativement droit. Il s'agit d'une planche sur dosse positionnée de 5 à 10 cm de la moelle, de sorte que le long d'une section horizontale l'orientation des cernes est tangentielle dans la partie centrale et quasiment radiale aux bords. Le tuilage résultant naturellement de l'anisotropie du retrait et de l'asymétrie des échanges d'humidité sur les faces avant et arrière, est partiellement empêché par un châssis-cadre constitué d'une structure rectangulaire en chêne renforcée par des traverses en érable. Le châssis est recouvert par un cadre visible qui n'agit pas directement sur le panneau mais confère une rigidité supplémentaire à l'ensemble.

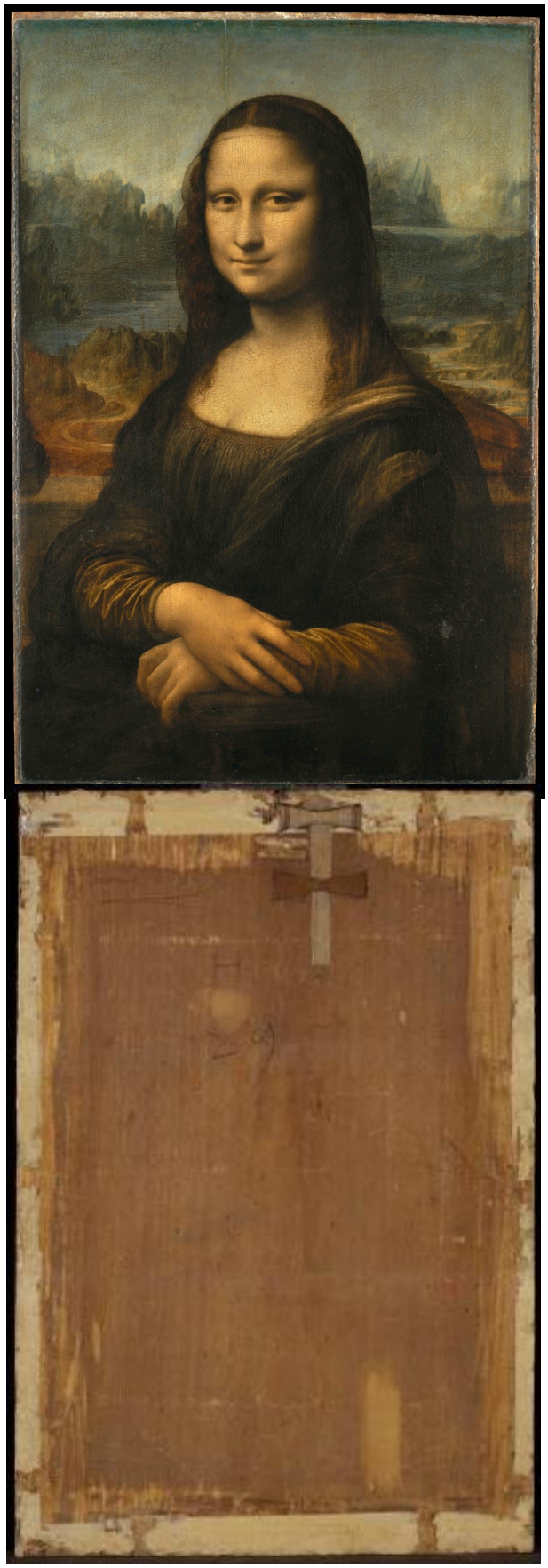

Figure 1: Face avant et arrière de la Joconde

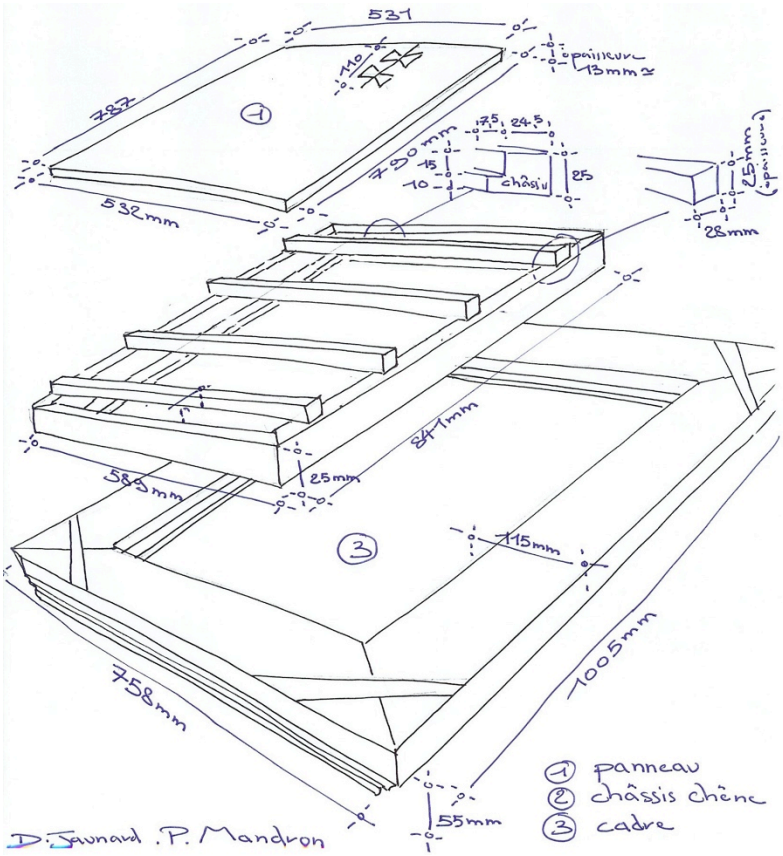

Figure 2: Schéma des différents éléments du système : panneau, châssis-cadre et cadre

Dans une telle situation, du fait des fluctuations d'humidité et de l'accumulation de contractions résiduelles sur la face arrière du panneau [1] on s'attend à observer une double courbure tournée vers la face avant. L'apparition précoce d'une fente, d'environ 10 cm de long et partant du bord supérieur gauche - vu de la face gauche - (Figure 3), a modifié cette tendance, aboutissant à une forme complexe avec un bombé de 11mm dans la partie droite du panneau (Fig. 4). Des informations plus détaillées sur la structure du panneau, notamment une analyse de l'orientation des cernes et de la fente basée sur la diffraction aux rayons X et les images optiques, sont fournies dans [5].

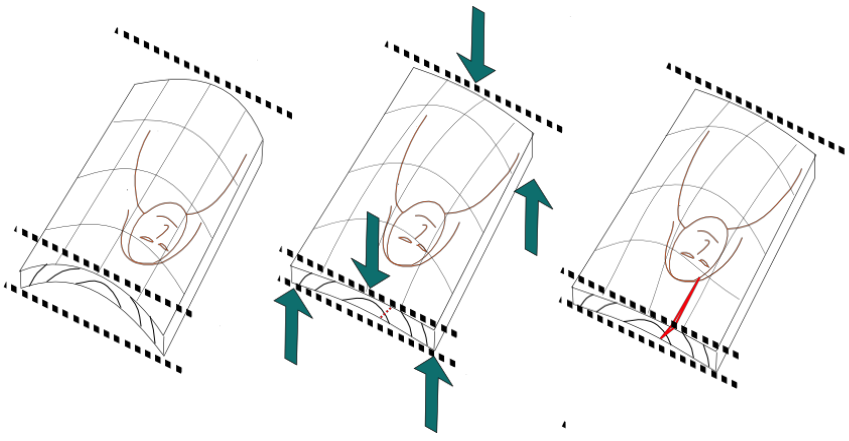

Figure 3: Apparition d'une fente radiale dans le support bois, du fait de la restriction imposée par le châssis-cadre

En octobre 2004, lors d'une session durant laquelle le tableau était sorti de son coffre, la forme 3D du panneau, bloqué ou non dans le châssis cadre, a été enregistrée à l'aide d'une méthode de moiré [6]. La précision de la mesure était suffisante pour observer le champ de déplacement et de courbure résultant du dévissage des traverses [7]. A des instants proches, les forces appliquées par la traverse supérieure et inférieure ont été enregistrées (Figure 4), tandis qu'un monitorage de la flèche centrale et du climat était mis en place par le biais d'une traverse instrumentée installée au revers du châssis-cadre. A plusieurs

moments le panneau a été pesé. La précision n'était pas suffisante pour apporter une information sur les cinétiques de sorption mais la mesure a permis d'estimer une densité moyenne du bois d'environ 0,45 g/cm^3, une valeur typique pour le peuplier [8]. Les fluctuations d'humidité et température ont servi d'entrée pour une simulation hygromécanique à l'aide d'une version a 1D ou 2D du code Transpore [9], dans les deux situations extrêmes de courbure libre ou bloquée [10]. L'analyse des craquelures de la couche picturale on mis en évidence divers schémas de fissuration, dépendent de la zone du panneau et des mouvements sous-jacents du support en bois, mais avec aussi l'influence de la nature de la peinture (Fig. 5).

2.2 Formulation mécanique

Utilisant une partie de information disponible, un modèle numérique a été développé [11]. Le panneau est représenté par un parallélépipède de 787mm de haut, 531mm de largeur et 13 mm d'épaisseur. La fente est placée à 211 mm de l'arête gauche (vu de face), est longue de 117 mm, et est perpendiculaire au plan du panneau. La Figure 6 montre un maillage éléments finis du panneau assimilé à une plaque fine. Une déformation initiale est introduite à partir de la forme mesurée par Moiré d'ombre au dos du panneau. Le fil du bois est supposé droit et orienté verticalement. Pour évaluer l'orientation des cernes, la moelle a été placée à 50 mm de l'axe médian de l'arrière du panneau. L'amincissement de la zone des papillons, insérés pour prévenir une propagation de la fente, n'a pas été pris en compte. Le bois est supposé être un solide élastique orthotrope cylindrique avec les valeurs suivantes de constantes élastiques : modules d'Young (GPa) E_L = 10,06, E_R = 1,19, E_T = 0,58; coefficients de Poisson (%) ν_{LT} = 47,0, ν_{LR} = 35,6, ν_{RT} = 70,3; modules de cisaillement (GPa) G_{TL} = 0,64, G_{RL} = 0,86, G_{RT} = 0,20. Dans le modèle numérique, l'anisotropie transverse a été approchée en introduisant un comportement isotrope transverse dépendant de la position x (voir Fig. 6), calculée selon la direction du plan tangent.

Au revers, le panneau est soumis à des forces exercées par les traverses supérieure et inférieure dans les 4 zones désignées par (1)–(2)–(7)–(8) dans la Fig. 2 et par les flèches verticales sur la Fig. 3. Les réactions (a) and (b) du châssis-cadre sont exercées du côté de la face peinte, au niveau des arêtes supérieure et inférieure. Les restaurateurs ont attiré l'attention sur l'existence d'un point de contact additionnel (c), localisé plus précisément au niveau de l'arête gauche à 235 mm du haut. En l'absence d'observation directe, la localisation de (a) and (b) est assez problématique, et se trouve être d'ailleurs un paramètre très sensible pour la simulation. Nous les avons choisies à 365 mm et 185 mm de l'arête gauche, respectivement. L'écriture des conditions d'équilibre fournit la valeur de ces 3 réactions aux points de contact.

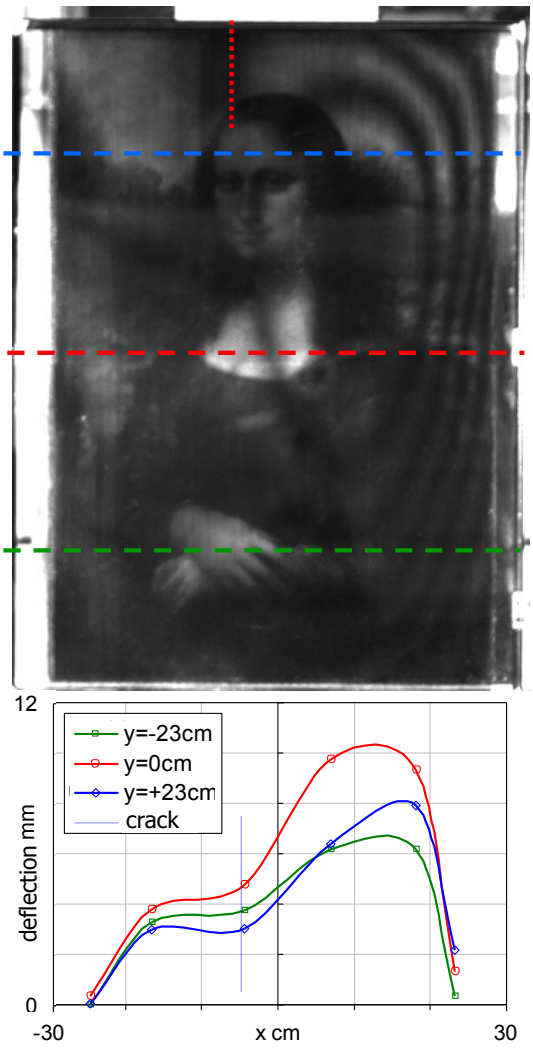

Figure 4: Topographie du paneau: (a) moiré d'ombre; (b) profils (lignes) comparés aux mesures manuelles (points); de [7]

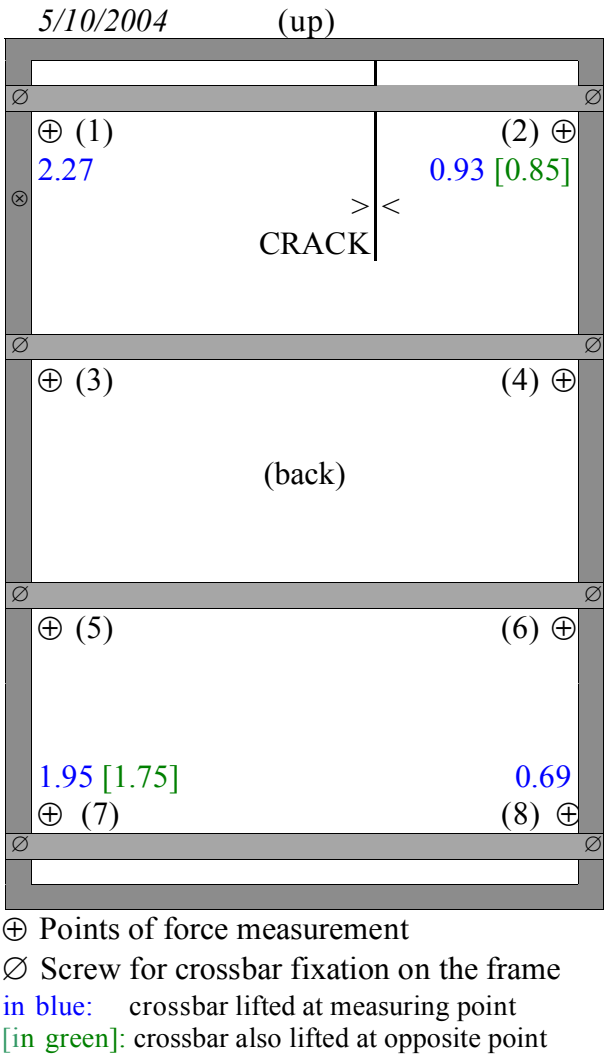

Figure 5: Position et valeur des réactions des traverses sur le panneau; de [8]

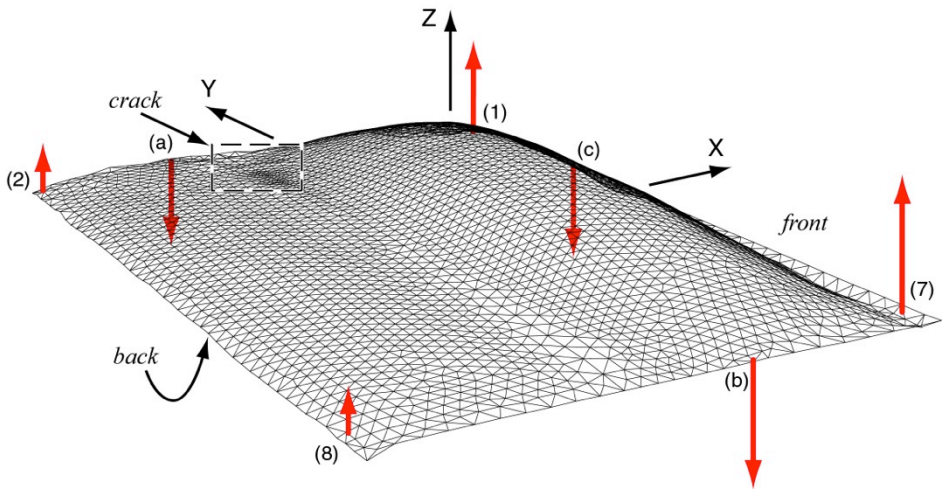

Figure 6: Maillage par éléments finis du panneau et conditions aux limites imposées.

3. Résultats et discussion

3.1 Déformation du panneau induit par le châssis-cadre

La Fig. 7c montre le déplacement des points du maillage résultant de l'application des efforts montrés sur la Fig. 3. Cette simulation est comparé à 2 observations par Moiré d'ombre (Figure 7a,b). Afin de faciliter la comparaison, les déplacements sont calculés à partir du plan médian passant par les arêtes supérieure et inférieure. Un accord satisfaisant est obtenu, tant qualitatif que quantitatif. Cela est remarquable dans la mesure ou aucun ajustement n'a été fait sur la valeur des constantes élastiques. Les différences observées peuvent être expliquées en partie par la sensibilité aux conditions de mesures.

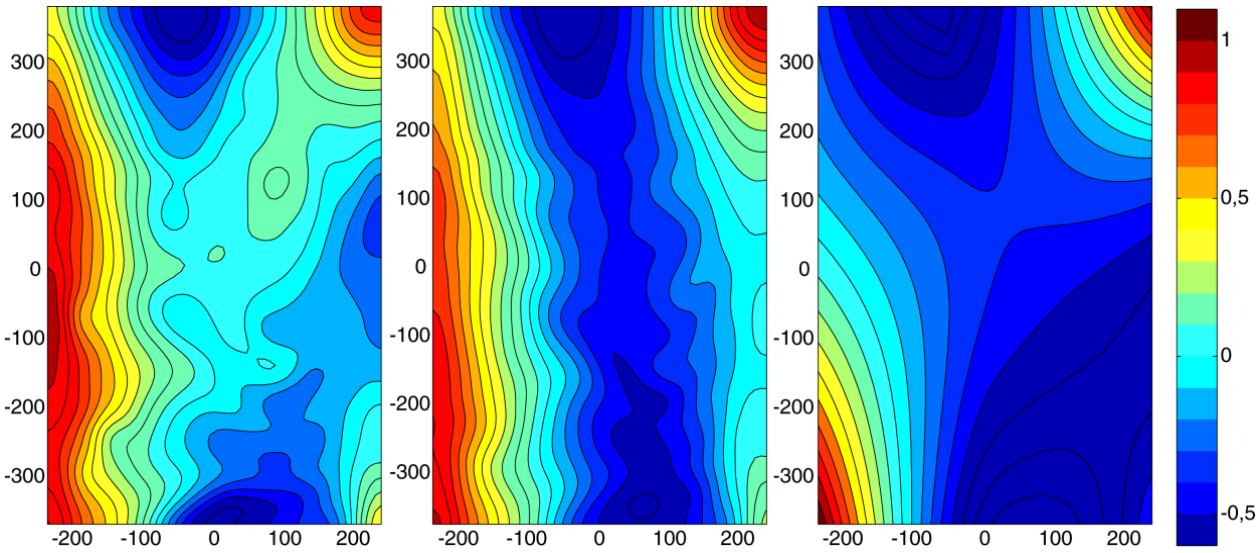

Figure 7: Champ de déplacement hors plan induit par le châssis-cadre: (a, b) 2 mesures par Moiré d'ombre ; (c) simulation

Il serait possible d'améliorer ces résultats par une meilleure évaluation de la rigidité locale du panneau, soit en tenant compte plus précisément des variations d'épaisseur ou d'orientation des cernes, soit en ajustant les constantes élastiques. Toutefois, le point le plus sensible de cette simulation restera probablement la localisation des contacts sur les arêtes.
L'approche présentée ici suppose que la couche picturale a un effet négligeable sur la rigidité du panneau, et de ce fait réagit passivement aux déformations imposées par le support. La déformation générée par l'action du châssis-cadre, évaluée au niveau de la surface peinte (Fig. 8) [11], met en évidence un correspondance intéressante avec les motifs de craquelures dans la couche picturale (Fig. 9) [12].

3.2 Evaluation du risque de propagation de la fentes

Ce problème va être envisagé dans le cadre de la théorie de Griffith, développée à l'origine pour le verre [13]. Même si elle ne s'applique pas parfaitement au bois du fait de sa nature composite et viscoélastique, cette approche peut fournir de bon ordre de grandeur. Une petite extension de la fente, sous un chargement constant, entrainerait la restitution d'une partie de l'énergie élastique emmagasinée dans la structure. D'après Griffith, la fente ne peut se propager si le taux de restitution d'énergie G, rapport entre la diminution d'énergie élastique et l'augmentation de surface rompue, est inférieure à une valeur critique G_c représentant donc l'énergie nécessaire à cette propagation par unité de surface.
L'énergie surfacique critique G_c est en principe une propriété intrinsèque du matériau mais dépend du mode de rupture (mode I = ouverture; mode II = cisaillement dans la direction de la fissure; mode III = cisaillement hors plan ou « déchirement »). De plus, avec un matériau anisotrope comme le bois il faut tenir compte du plan de la fissure et de la direction de sa propagation. Dans le cas présent, la fissure se produit dans le plan radial, et de toute évidence une éventuelle propagation aurait lieu dans la direction des fibres. D'un autre côté, le mode de rupture n'est pas connu a priori, même si pour un panneau fin le mode III est attendu.

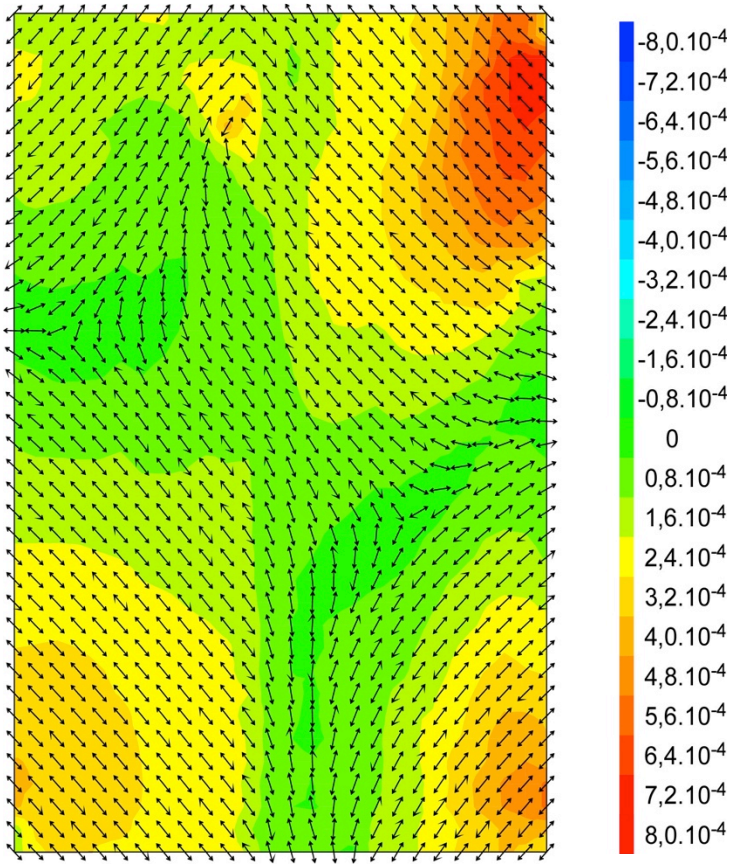

Figure 8: Déformations principale sur la face avant (action du blocage du châssis cadre)

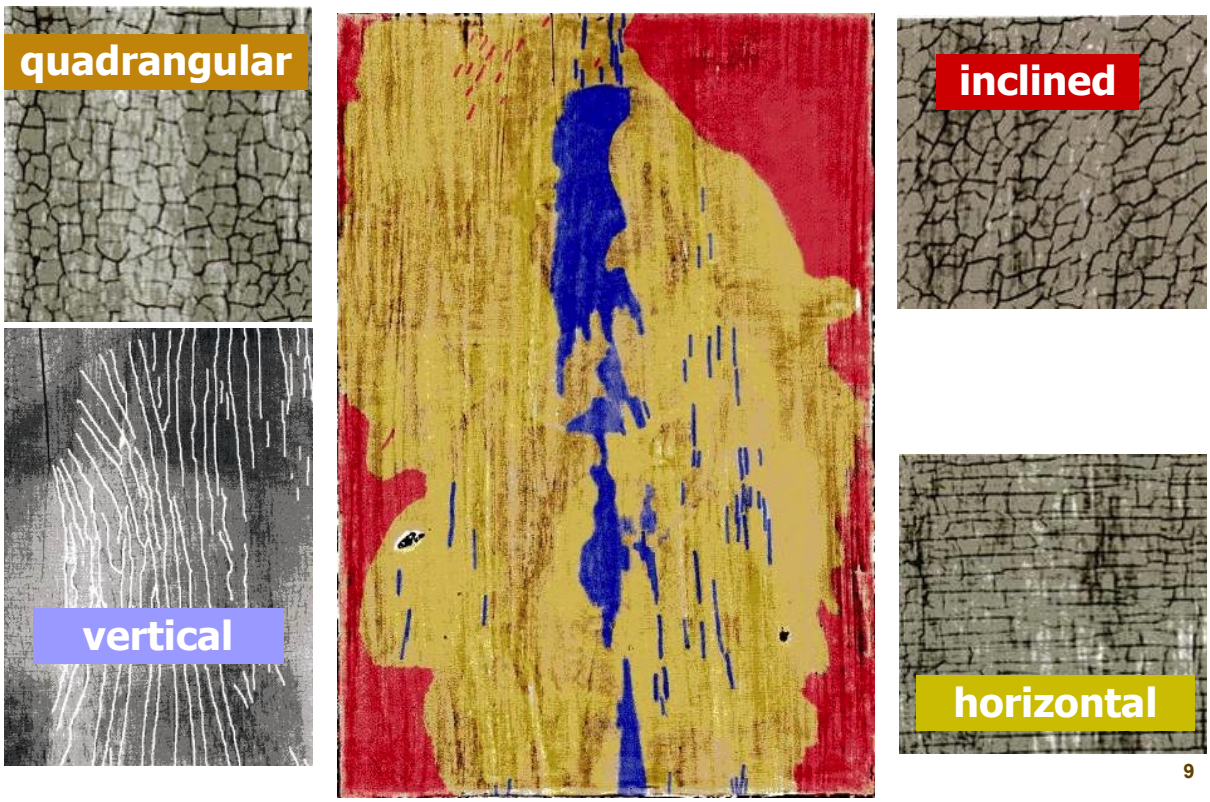

Figure 9: Typologie des craquelures de la couche picturale de la Joconde, d'après [12].

Le zoom de la figure 10a suggère que la fissure est effectivement sujette à rupture en mode III sous le chargement extérieur, ce que confirment les courbes de la discontinuité en déplacement de la figure 5b. Au niveau de l'arête supérieure, le calcul prédit une montée d'environ 0,15 mm de la lèvre gauche de la fissure par rapport à la droite. Une petite ouverture en mode I de l'ordre de 0,01mm a lieu sur l'arête supérieure du fait de la forme initiale non plane du panneau. On peut estimer le taux de restitution d'énergie G en calculant l'effet d'une petite augmentation de la longueur de la fente. Une valeur de 8.7 J/m² a été obtenue, ce qui est considérablement plus faible (de plus de deux ordres de grandeur) que les valeurs critiques habituellement trouvées dans le bois. En d'autres termes, cette simulation démontre que dans des conditions normales la fissure ne peut pas se propager.

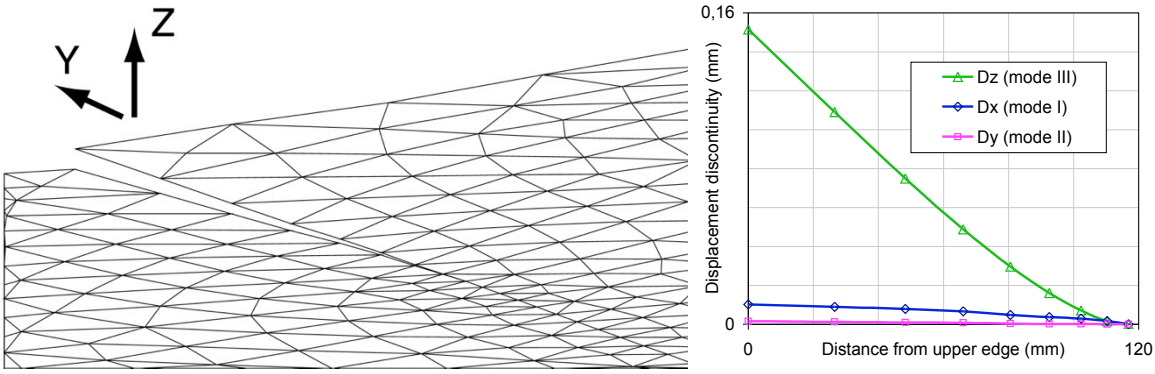

Figure 10: Effets du vissage des traverses sur le panneau au voisinage des lèvres de la fissure. (a) Vue rapprochée du maillage déformé au voisinage de la fissure ; (b) discontinuité du déplacement le long de la fissure.

3.3 L'effet additionnel de variations hygrothermiques

Des variations hygrothermiques induisent des variations de la courbure du panneau par superposition de plusieurs phénomènes. Les transferts de masse et chaleur, de même que le comportement viscoélastique et mécanosorptif doivent être pris en compte dans le modèle pour évaluer correctement le comportement du panneau. A ce stade, une analyse simplifiée est utilisée pour évaluer l'ordre de grandeur des fluctuations des forces appliquées. D'après les simulations détaillées dans [10], le couple par unité de longueur (m) généré par une restriction totale de la courbure du panneau est susceptible de fluctuer, dans les cas extrêmes, dans une fourchette de ±20Nm/m. Considérant qu'au-delà d'une certaine hauteur h depuis l'arête supérieure ou inférieure le panneau est entièrement bloqué par la traverse correspondante sur sa largeur L, une fluctuation ΔF de la force appliquée aux extrémités de chaque traverse peut être obtenue comme suit. Considérons une poutrelle coupée dans une direction transverse et correspondant à la zone « bloquée » par la traverse, de largeur h, et longueur L égale à la largeur du panneau. Sous l'effet du couple $m \times h$ agissant sur la poutrelle toute entière, celle-ci devrait se courber avec un flèche $f_1 = (m.h.L^2)/(8.E.I)$, où E est le module élastique du bois dans la direction axiale de la poutrelle et I son second moment d'inertie. Par ailleurs, une force ΔF appliquée aux extrémités de la poutrelle, avec une réaction au centre, produirait par flexion 3 points une flèche $f_2 = (\Delta F.L^3)/(12.E.I)$. En posant $f_1 = f_2$, on obtient la force nécessaire pour bloquer l'action du couple généré par la poutrelle: $\Delta F = 3.m.h/(2.L)$. En prenant $L = 0.5$m et $h = 0.05 \sim 0.25$m, on obtient $\Delta F = 3 \sim 15$N, valeurs à comparer aux mesures de 7 ~ 23N obtenues en octobre 2004.

Cette estimation, évidemment très grossière puisqu'elle ne tient pas compte des effets des contraintes longitudinales, suggère toutefois que les variations hygrométriques sont susceptibles de faire fluctuer de manière significative les efforts exercés par les traverses, tout en ne modifiant pas leur ordre de grandeur. En termes de risque additionnel pour la propagation de la fissure, il n'y a probablement pas lieu de s'inquiéter, surtout si dans l'avenir le niveau des fluctuations est fortement réduit. Il faut toutefois demeurer extrêmement circonspect étant donné les multiples hypothèses simplificatrices faites dans ce calcul. En particulier l'analyse ne rend pas compte d'effets locaux au voisinage de la pointe de fissure. Le rôle du papillon restant a par ailleurs été entièrement négligé ; or, il joue un rôle ambigu puisque d'un côté il évite une ouverture importante de la fissure mais de l'autre, l'évidement correspondant peut contribuer à affaiblir le panneau. La contribution de la couche picturale à la rigidité devrait aussi être considérée. En tout état de cause, l'analyse doit être poursuivie et affinée pour tirer partie de toutes les informations disponibles, et la plus grande prudence s'impose en termes de conclusions pratiques.

Conclusion etr(‘ perspectives

La campagne d’observation et d’expérimentation engagée en octobre 2004 a comblé des lacunes importantes dans notre connaissance du support en bois. Les informations recueillies ont permis d’obtenir des données essentielles sur la structure et la forme du panneau, les sollicitations qu’il subit et ses déformations en réaction aux variations hygrothermiques. En outre des dispositifs d’enregistrement continu d’efforts et de flèches ont été installés, permettant un suivi amélioré de l’œuvre.
Les informations rassemblées ont permis d’engager une démarche de modélisation mécanique qu’il reste encore à développer, à la fois pour accompagner le suivi et approfondir notre connaissance de l’histoire du panneau. Si la fissure ne semble pas présenter de danger au vu de l’analyse 2-D, cela reste à confirmer par une analyse 3-D, intégrant en outre le comportement hygromécanique et viscoélastique du bois. L’étude prédictive, conduite après validation du modèle, pourra conduire à proposer des modifications du châssis-cadre. Dans cette démarche, seront prises en compte les données liées au comportement de la couche picturale vis à vis du support.

Remerciements

L’auteur remercie le Louvre et le C2RMF pour l’accès permis à l’œuvre de la Joconde à lui-même et ses collaborateurs, ainsi que tous les partenaires de cette étude et tout particulièrement le professeur Luca Uzielli de l’université de Florence.

References

[1] BUCK, R.D.: *Some Applications of Rheology to the Treatment of Panel Paintings*. Studies in Conservation 17, 1 (1972), p.11
[2] MECKLENBURG, M.; TUMOSA, C.; ERHARDT, *Structural response of painted wood surfaces to changes in ambient relative humidity*, in: Painted wood: History and Conservation, ed. V. Dorge et C. Howlett, Getty Institute of Conservation (1998).
[3] BREWER, A. Effect of batten reinforcements on paintings on wood panel. In: *Proc of the 12th Triennal Meeting of ICOM-CC*, Lyon, France, 29.8-3.9.99 (1999), pp. 276-281.
[4] MOHEN, J.P.; MENU, M.; MOTTIN, B. *Au Coeur de La Joconde*, Gallimard, Paris, (2006) (English and German translations)
[5] RAVAUD, E. *Un panneau de peuplier. Le support de bois de La Joconde*, in: [4] (2006).
[6] MAUVOISIN, G.; BREMAND, F.; LAGARDE, A. (1994). *3D shape reconstruction by phase shifting shadow moiré, Applied Optics* 33, 11 (1994) pp 2163-2169.
[7] BREMAND, F.; DOUMALIN, P.; DUPRE, J.-C.; HESSER, F., VALLE V. *Un panneau de peuplier. Des mesures du relief sans contact*, in: [4] (2006).
[8] UZIELLI, L.; DIONISI VICI, P.; GRIL, J. *Un panneau de peuplier. Caractérisation physico-mécanique du panneau*, in: [4] (2006).
[9] PERRE, P.; PASSARD, J. *A physical and mechanical model able to predict the stress field in wood over a wide range of drying conditions*. Drying Technology Journal 22 (2004): 27–44.
[10] PERRE, P.; REMOND, R.; GRIL, J. *Un panneau de peuplier. Une simulation de l’effet des variations de l’ambiance*, in: [4] (2006).
[11] DUREISSEIX, D.; GRIL, J.; ARNOULD, O. *Un panneau de peuplier. Une modélisation de l’action du châssis-cadre*, in: [4] (2006).
[12] RAVAUD, E. *Un panneau de peuplier. Un complexe réseau de craquelures*, in: [4] (2006).
[13] GRIFFITH, A.A. The Phenomena of Rupture and Flow in Solids, Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, 221 (1921), pp. 163-198