

Séance publique du 9 janvier 2012

La Joconde, sa conservation préventive, le rôle essentiel joué par des chercheurs montpelliérains

**par Joseph GRIL
conférencier invité**

MOTS-CLÉS

Bois - Patrimoine - Mécanique - Panneau peint - Rupture.

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 "release rate", a été trouvé négligeable.

I – 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 pour 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: évaluation du risque de dégradation, en particulier du fait de la fente existante; 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 la première. 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.

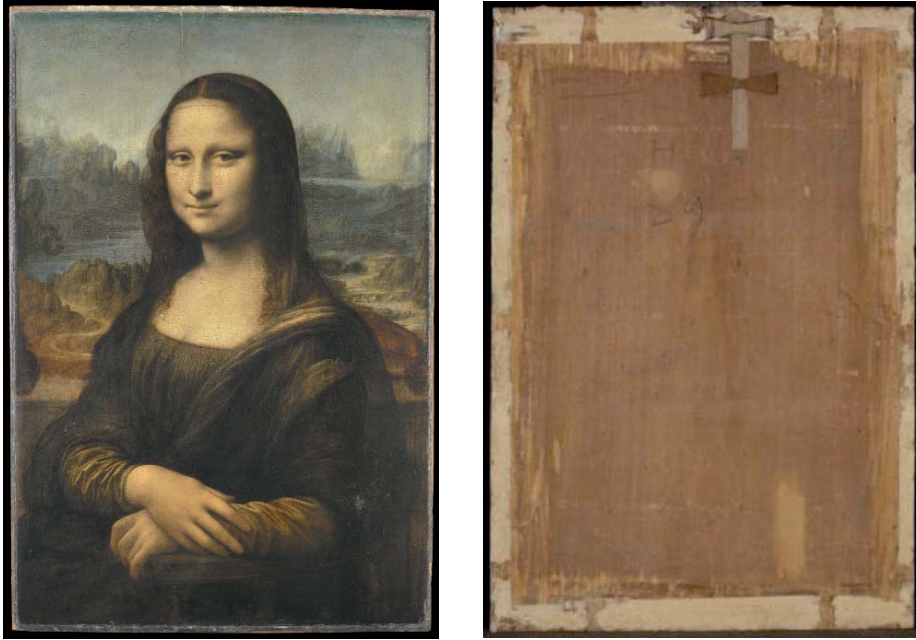


Figure 1 - Face avant et arrière de la Joconde.

II – Le modèle numérique

II.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 figure 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 des échanges d'humidité asymétriques, 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.

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

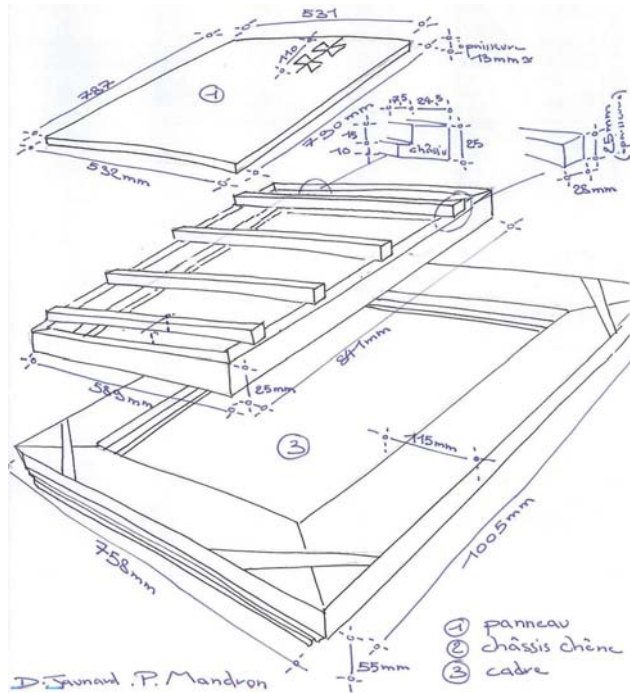


Figure 2 - Schéma des différents éléments du système : panneau, châssis-cadre et cadre.

gauche - (Fig. 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 les rayons X et les images optiques, sont fournies dans l'ouvrage de E. Ravaud (5).

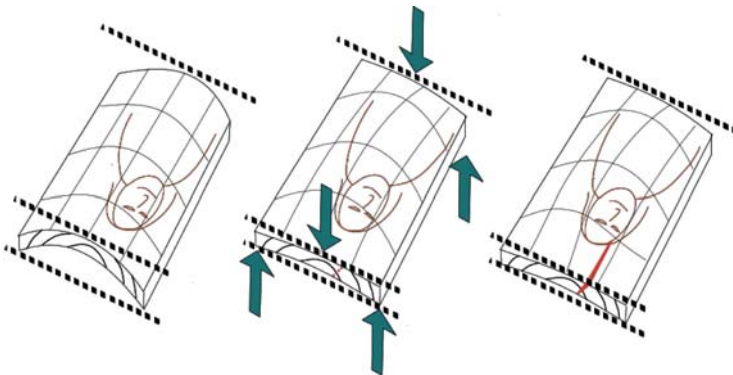


Figure 3 - Apparition d'une fente radiale dans le support bois, du fait de la restriction imposée par le châssis-cadre.

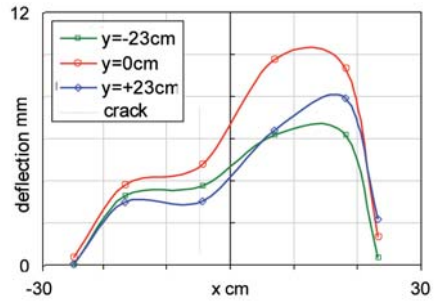
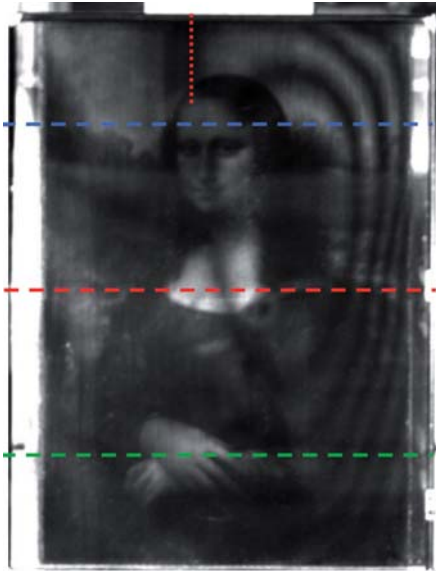


Figure 4 - Topographie du panneau: (a) moiré d'ombre; (b) profils (lignes) comparés aux mesures manuelles (points).

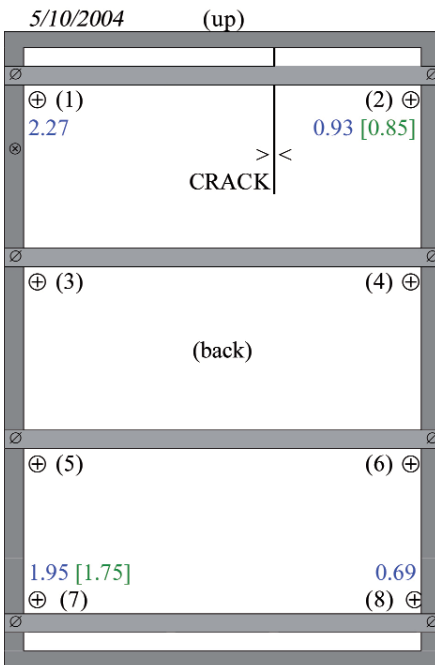


Figure 5 - Position et valeur des réactions des traverses sur le panneau.

- ⊕ Points of force measurement
- ⊘ Screw for crossbar fixation on the frame
- in blue: crossbar lifted at measuring point
- [in green]: crossbar also lifted at opposite point

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 (Fig. 4), tandis qu'un monitoring 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 à 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 ont mis en évidence divers schémas de fissuration dépendant 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).

II.2 – Formulation mécanique

Utilisant une partie de l'information disponible, un modèle numérique a été développé (11). Le panneau est représenté par un parallélépipède de 787 mm de haut, 531 mm 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 par 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 50mm 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 prise 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 (%) $\nu_{LT} = 47.0$, $\nu_{LR} = 35.6$, $\nu_{RT} = 70.3$; 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) dans la Fig. 2 et par les flèches verticales sur la Fig. 3. Les réactions (a) et (b) du châssis-cadre (Fig. 6) 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) et (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.

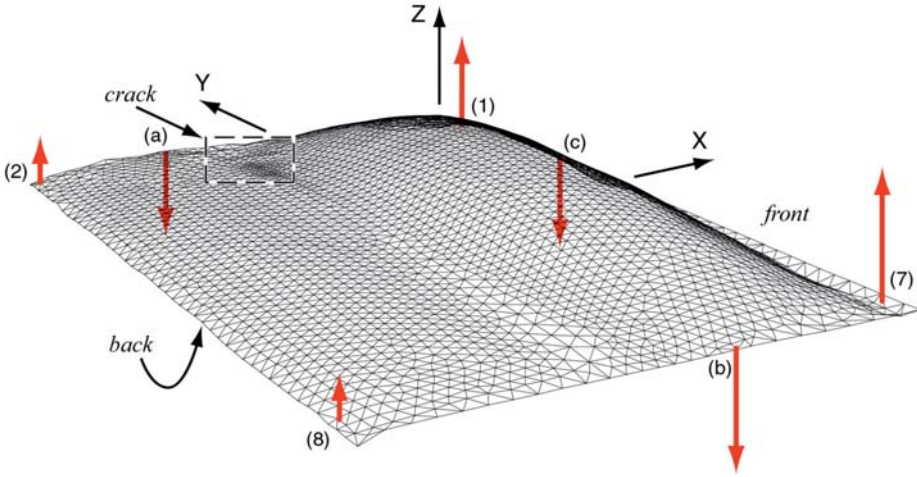


Figure 6 - Maillage par éléments finis du panneau et conditions aux limites imposée.

III – Résultats et discussion

III.1 – Déformation du panneau induit par le châssis-cadre

La figure 7c montre le déplacement des points du maillage résultant de l'application des efforts montrés sur la figure 3. Cette simulation est comparée à deux observations par Moiré d'ombre (Fig. 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 où 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.

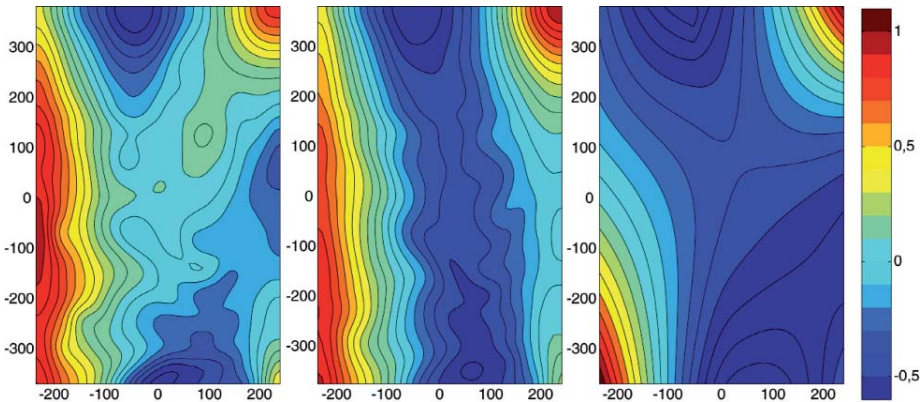


Figure 7 - Champ de déplacement hors plan induit par le châssis-cadre: (a, b) 2 mesures par Moiré d'ombre ; (c) simulation.

Il serait possible d'améliorer ces résultats par une meilleure évaluation de la rigidité locale du panneau, soit en tenant compte des variations d'épaisseur ou d'orientation des cernes, ou 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 une correspondance intéressante avec les motifs de craquelures dans la couche picturale (Fig. 9) ⁽¹²⁾.

III.2 – Evaluation du risque de propagation de la fente

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 un 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 inférieur 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

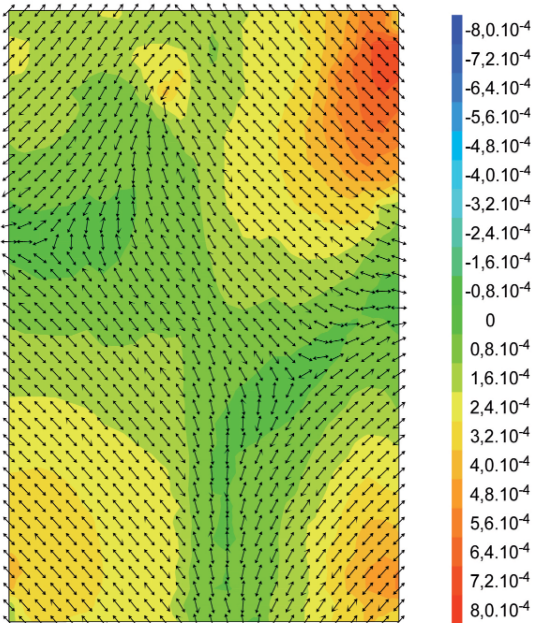


Figure 8 - Déformations principale sur la face avant (action du blocage du châssis cadre).

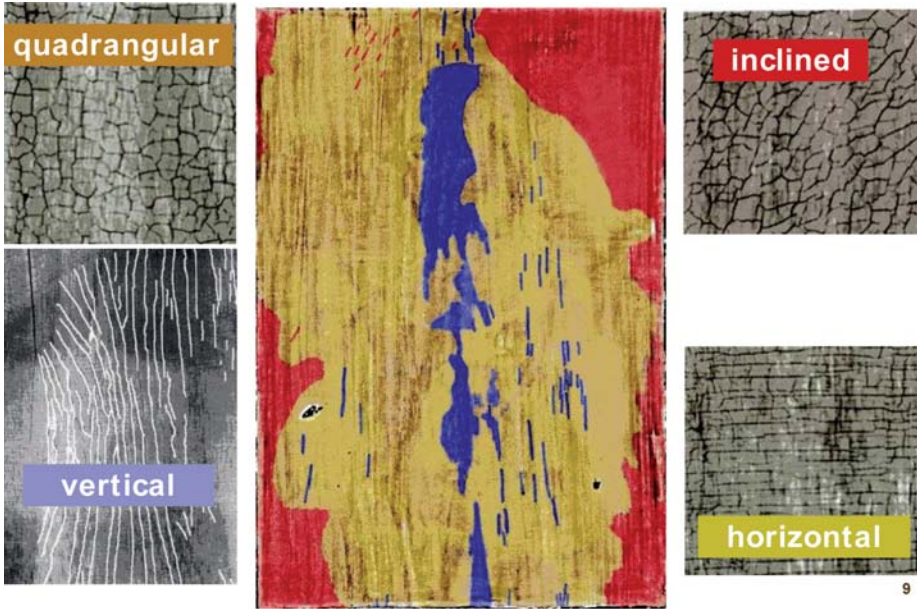


Figure 9 - Typologie des craquelures de la couche picturale de la Joconde, d'après (12).

“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 plane, 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.

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 lèvres gauche de la fissure par

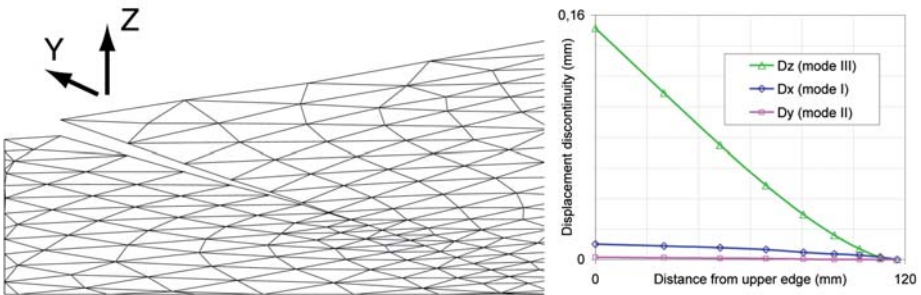


Figure 10 - Effets du vissage des traverses sur le panneau au voisinage des lèvres de la fissure. (a) Vue rapprochée du maillage déformé au voisinage de la fissure ; (b) discontinuité du déplacement le long de la fissure.

rapport à la droite. Une petite ouverture en mode I de l'ordre de 0,01 mm 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/m^2 a été obtenue, ce qui est plus faible de presque deux ordres de grandeur que les valeurs critiques habituellement trouvées dans le bois. En d'autres termes, cette simulation suggère que dans des conditions normales la fissure ne devrait pas se propager.

III.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, 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 $\pm 20 \text{ Nm/m}$. 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 une flèche $f_1 = (m \cdot h \cdot L^2)/(8 \cdot E \cdot I)$, 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 $f_2 = (\Delta F \cdot L^3)/(12 \cdot E \cdot I)$. En posant $f_1 = f_2$, on obtient la force nécessaire pour bloquer l'action du couple généré par la poutrelle: $\Delta F = 3 \cdot m \cdot h / (2 \cdot L)$. En prenant $L = 0.5 \text{ m}$ et $h = 0.05 \sim 0.25 \text{ m}$, on obtient $\Delta F = 3 \sim 15 \text{ N}$, valeurs à comparer aux mesures de $7 \sim 23 \text{ N}$ 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 hygro-métriques 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 données 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 et 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 C2RMF pour l'accès permis à ses collaborateurs à l'œuvre de la Joconde, ainsi que tous les partenaires de cette étude et tout particulièrement le professeur Luca Uzielli de l'Université de Florence.

BIBLIOGRAPHIE

- (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 Triennial Meeting of ICOM-CC*, Lyon, France, 29.8-3.9.99 (1999), pp. 276-281.
- (4) MOHEN, J.P.; MENU, M.; MOTTIN, B. *Au Cœur 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.; BRÉMAND, F.; LAGARDE, A. (1994). *3D shape reconstruction by phase shifting shadow moiré*, *Applied Optics* 33, 11 (1994) pp 2163-2169.
- (7) BRÉMAND, F.; DOUMALIN, P.; DUPRÉ, 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) PERRÉ, 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) PERRÉ, P.; RÉMOND, 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