

RÔLE DU CHÂSSIS À TENSION AUTO-RÉGULÉE DANS LA CONSERVATION DES PEINTURES SUR TOILE CONTEMPORAINES

*Alain ROCHE, ingénieur, conservateur-restaurateur
LARCROA, PARIS*

Introduction

Trop souvent, les peintures modernes ou contemporaines sont défigurées par la présence de craquelures mécaniques prématurées ou de réseaux de craquelures. Ces craquelures compromettent non seulement l'esthétique de la peinture mais également sa conservation.

La présence de fissures ou de craquelures d'un film de peinture est avant tout un symptôme de dégradation par perte de cohésion. La vitesse de propagation est lente dans les premières années et évolue ensuite beaucoup plus rapidement. C'est pendant cette lente progression des fissures qu'il faut intervenir pour ralentir ou limiter l'évolution du réseau de craquelures avant que celui-ci ne devienne trop présent.

Les peintures sur toile, de par leur constitution, sont sensibles à l'humidité et à la température. L'influence des variations de l'humidité et de la température a été étudiée avec beaucoup d'intérêt par un certain nombre de chercheurs à partir de la fin des années soixante [1]. C'est à la fin des années soixante-dix que l'aspect théorique des recherches sur les mécanismes de dégradation mécanique des peintures, soumises à des variations climatiques, se développe [2, 3, 4]. Au début des années quatre vingt, on voit apparaître une série d'études abordant cette problématique par diverses approches expérimentales [5, 6, 7, 8]. Ces travaux ont été fondamentaux pour l'orientation des différentes recherches dans ce domaine de la conservation. Dans les années suivantes, le développe-

ment des cadres de mesures biaxiales [9, 10] ouvre la voie aux recherches expérimentales sur le comportement biaxial des peintures. Dès l'année 1989, j'ai développé un modèle de cadre de mesure qui a été perfectionné en 1993. C'est sur ce type de cadre extensiométrique que j'ai pu réaliser une bonne partie de mes recherches [11]. En 1991, j'ai pu mettre en évidence l'efficacité des châssis à tension auto-régulée lors d'une étude [12] qui a été réalisée grâce à des crédits de recherche du ministère de la Culture.

Pour aborder le comportement mécanique des peintures sur toile avec le plus d'objectivité possible, tous les essais ont été menés sur une même peinture de référence. C'est une peinture à l'huile fabriquée il y a un peu plus de seize ans. La technique de cette peinture est décrite dans l'annexe. Les résultats ont été comparés entre eux et interprétés avec le maximum de rigueur.

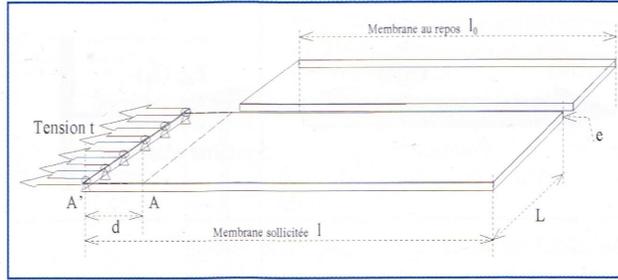
Élasticité d'une peinture

L'essai de traction fait sur la peinture de référence [13] nous donne une courbe comportant 3 parties distinctes. Une première partie représente le comportement mécanique du film de peinture et de sa préparation. L'élasticité de la peinture est donc exprimée dans cette partie de la courbe par la relation suivante :

$$\sigma = E \times \varepsilon \quad (1)$$

où σ est la contrainte, E est le module d'élasticité et ε la déformation.

Fig.1. Tension d'une membrane.



Dans la seconde partie de la courbe, la peinture, soumise à une force supérieure à sa résistance, se rompt pour laisser place à une série de craquelures. Enfin la troisième partie de la courbe représente le comportement de la toile. Dans le cadre de cette étude, seule la partie élastique nous intéresse, car la mise en tension d'une peinture provoque des contraintes qui se limitent généralement à ce domaine. M. Mecklenburg [8] a montré que les effets de l'humidité relative et de la température interviennent sur les matériaux de la peinture entraînant des changements de valeur des modules d'élasticité et des variations dimensionnelles. La relation (1) devient :

$$\sigma(HR, T) = E(HR, T) \times \varepsilon(HR, T) \quad (2)$$

(où (HR, T) indique que les valeurs σ , E et ε sont fonction de l'humidité relative HR et de la température T).

Comportement d'une peinture sur un cadre fixe

On assimile la tension d'une peinture à la tension d'une membrane sur un cadre fixe [14], (fig. 1).

Pour une tension (t) la membrane s'allonge d'une valeur (d). A' est un point fixe sur le bord du cadre. La longueur (l_0) est la longueur initiale, (l) est la longueur après tension. On peut donc écrire :

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100 \quad (3)$$

Comme (l) et (l_0) sont fixes, la déformation relative (ε) est donc constante. La contrainte peut s'écrire :

$$\sigma(HR, T) = E(HR, T) \cdot \varepsilon^{cte} \quad (4)$$

elle est directement proportionnelle à $E(HR, T)$.

¹ Notons que la tension est également directement proportionnelle à la contrainte : $t = \sigma \cdot e^{cte}$

Dans le cadre d'une étude sur les châssis à tension autorégulée, la tension en fonction de l'humidité s'exprime par :

$$t(HR, T) = E(HR, T) \cdot \varepsilon^{cte} \cdot e^{cte} \quad (5)$$

où t est la tension, E est le module d'élasticité et ε^{cte} la déformation initiale (imposée par la mise en tension) constante.

L'épaisseur (e) de la peinture est considérée elle aussi comme constante. Cette expression montre que la tension¹ d'une peinture soumise à une variation d'humidité ou de température, est directement proportionnelle au module d'élasticité.

Propagation des craquelures dans une peinture

C'est cette dépendance des tensions ou des contraintes vis-à-vis de l'humidité et de la température qui est en grande partie responsable à plus ou moins long terme de la rupture de la matière picturale par fatigue mécanique. Il a été montré dans une étude expérimentale avec la peinture de référence [14] que la progression des craquelures dans une peinture ne suit pas une progression linéaire mais plutôt polynomiale (fig. 2).

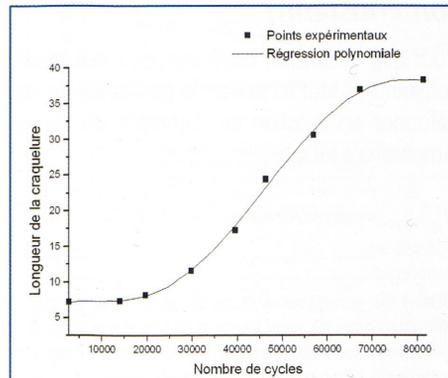


Fig. 2. Évolution de la longueur d'une craquelure avec le nombre de cycles.

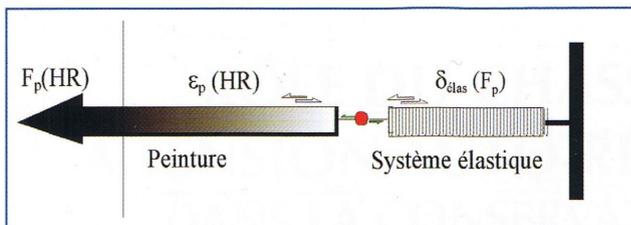


Fig. 3. Schématisation d'un système élastique

La variation dimensionnelle $\varepsilon(HR, T)$ d'une peinture soumise à une variation d'humidités ou de températures s'exprime par :

$$\varepsilon(HR, T) = \frac{1}{E(HR, T)} \cdot \frac{t_{peinture}^{cte}}{e^{cte}} \quad (7)$$

Pour que la tension dans la peinture soit constante, il faut que le système de liaison entre la toile et le châssis soit élastique et puisse suivre les mouvements de la peinture (fig. 3).

La déformation élastique du système est caractérisée par :

$$\varepsilon(HR, T) = \delta_{système\ élastique} \quad (8)$$

Si nous remplaçons, dans l'équation (6), $\varepsilon(HR, T)$ par la déformation du système élastique :

$$t_{peinture}^{cte} = E(HR, T) \cdot e^{cte} \cdot \delta_{système\ élastique} \quad (9)$$

la tension dans la peinture est constante.

Partie expérimentale

La peinture de référence est tendue avec une tension de 25 dN/m sur un cadre extensiométrique rigide à une humidité ambiante de 60 %HR. Ensuite elle est conditionnée en chambre humide de 10 à 90 % HR par paliers de 10 %. La courbe 1 de la figure 4 est obtenue à partir de la moyenne des valeurs de tensions² en trame et en chaîne exercées par la peinture sur le cadre extensiométrique. À partir de ces valeurs expérimentales, l'équation (7) permet de calculer $\varepsilon(HR)$ de la peinture de référence, courbe 2 (fig. 4).

Les variations dimensionnelles de la peinture pendant ce conditionnement de 10 à 90 % HR sont de très faibles amplitudes, de 0,0123 % à 0,0925 %. Cette croissance n'est pas linéaire, elle est exponentielle. Jusqu'à 65 % d'humidité relative la peinture réagit peu du point de vue dimensionnel.

Au début de la courbe la craquelure évolue lentement. À maturité la peinture a une bonne cohésion et résiste bien à la fatigue mécanique qui s'exerce sur elle. Ensuite la progression de la craquelure s'accélère rapidement. Les propriétés cohésives de la matière diminuent sous l'action des sollicitations et la propagation de la fissure s'accélère. Enfin le processus de craquellement se ralentit sous l'effet de la relaxation de la peinture. Parallèlement à leur propagation en longueur les fissures s'élargissent avec le temps.

L'étude faite en 1993 [12] montrait que la tension d'une peinture sur un châssis à tension autorégulée permettait de diminuer considérablement la densité de craquelures.

La régulation des tensions se fait par l'intermédiaire d'un système élastique qui doit réagir dès que la peinture est sollicitée par l'environnement. Le principe de ce type de châssis est basé sur sa capacité de se déformer dans le plan du tableau sous l'action des tensions de la peinture. Ce dispositif implique que la peinture impose son comportement quelles que soient les circonstances climatiques. Dans ces conditions la possibilité que l'on donne à la peinture de se déformer, limite l'amplitude des contraintes internes et diminue considérablement la fatigue mécanique.

Conditions pour que la tension soit constante

Pour que la tension dans les peintures reste constante, il faut lui laisser la possibilité de se déformer en fonction de l'humidité ou de la température tel que :

$$t_{peinture}^{cte} = E(HR, T) \cdot e^{cte} \cdot \varepsilon(HR, T) \quad (6)$$

² Dans les enregistrements de la tension sur le cadre extensiométrique, nous obtenons des valeurs légèrement différentes dans les sens trame et chaîne de la peinture. Pour simplifier la présentation des résultats, nous avons fait la moyenne des valeurs en trame et en chaîne. Cette démarche n'entraîne pas d'erreur conséquente qui aurait une incidence sur l'interprétation des résultats.

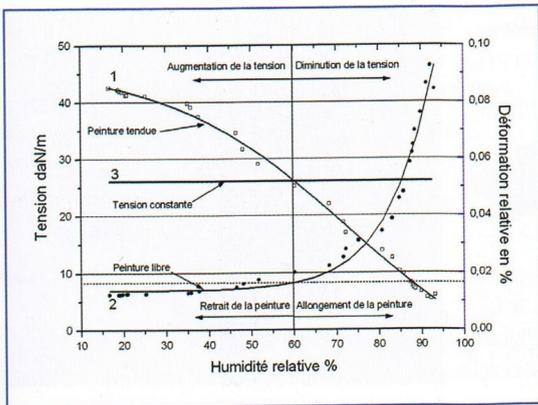


Fig.4 . Courbe 1, courbe expérimentale de la peinture tendue sur le cadre extensiométrique, courbe 2, obtenue à partir de l'équation (7).

selon δ_{lame} et oppose une certaine tension :

$$t_{lame} = \delta_{lame} \left(\frac{e^3}{4l^3} \right) E \quad (11)$$

la tension dans la peinture ($t_{peinture}$) exprimée par l'éq. (9) s'équilibre avec la lame ressort.

En théorie, un système élastique qui suit parfaitement bien les déformations de la peinture donne une tension constante. La courbe 3 de la figure 4 représente la tension constante théorique de la peinture obtenue à partir de l'équation (9). Cette tension constante est un état idéal pour la conservation des peintures à l'huile sur toile quelque soit le taux d'humidité dans l'air ou la température.

Dispositif élastique : lame métallique

Dans la partie expérimentale, une lame métallique dimensionnée correctement fait office de système élastique (fig. 5).

Du point de vue théorique la lame peut-être assimilée à une poutre encastrée à une extrémité et soumise à une force à l'autre extrémité.

La déformée de la lame³ s'écrit :

$$\delta_{lame} = \frac{F l^3}{3 EI_y} = 4 \frac{F}{L} \cdot \frac{l^3}{E e^3} \quad (10)$$

La peinture agit sur la lame qui se déforme

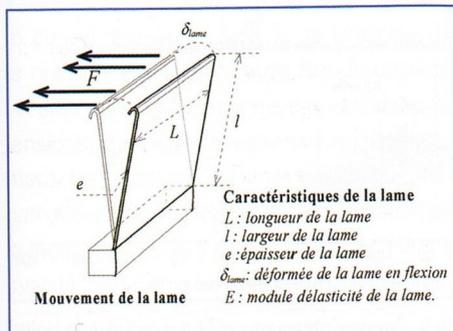


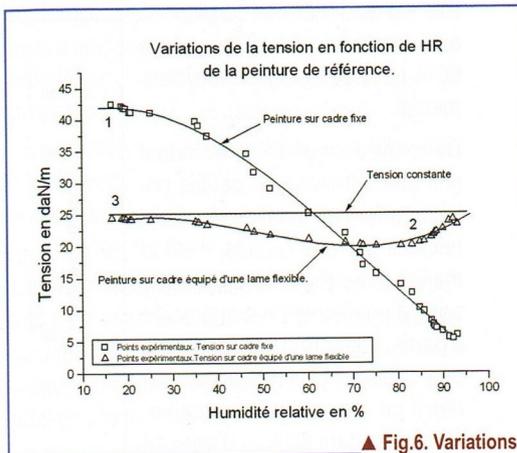
Fig.5. Système élastique.

Les points expérimentaux obtenus avec le cadre extensiométrique équipé d'une lame flexible donnent la courbe 2 (fig. 6).

La courbe correspond à la variation de tension dans la peinture de référence tendue sur un châssis réglé par une lame flexible en fonction de l'humidité. Cette courbe s'écarte de la tension théorique constante à partir de 40% HR pour atteindre un minimum vers 70% HR.

Analyse par éléments finis (FEA) des tensions dans la peinture de référence

La construction par Conception Assistée par Ordinateur (CAO)⁴ de deux modèles, l'un rigide, l'autre élastique (fig. 7, 8), se rapprochant au mieux des modèles expérimentaux étudiés au



▲ Fig.6. Variations des tensions de la peinture de référence sur le cadre fixe, et sur cadre équipé d'une lame flexible.

$$I_y = \frac{L \cdot e^3}{12} \quad 4 \text{ (Solidworks®)}$$

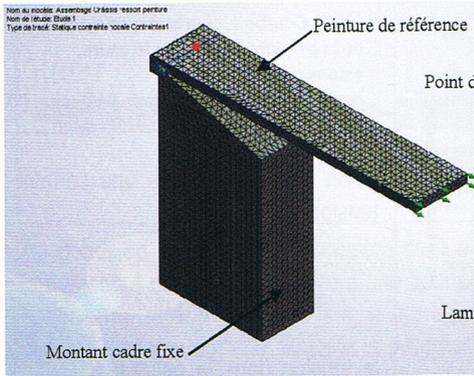


Fig. 7. FEA Système rigide.

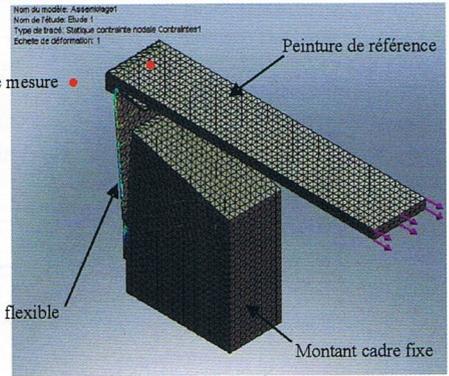


Fig. 8. FEA Système élastique.

préalable, a pour but de vérifier et de comparer les résultats des deux méthodes d'analyse.

Les caractéristiques de la peinture de référence ont été intégrées dans l'analyse par éléments finis⁵ pour simuler les comportements en fonction de l'humidité de cette peinture montée sur un système rigide et un système élastique.

Dans le système rigide la partie cadre est bloquée par un déplacement fixe et nul. Cette condition est liée au concept du châssis indéformable dans le plan du tableau.

Dans le système élastique la partie cadre est bloquée par un déplacement fixe et nul tout en laissant la lame mobile.

Dans les deux cas, une force est appliquée perpendiculaire à la section de la peinture. Elle est de 1N et elle correspond à la tension initiale appliquée à 60 % HR dans le modèle expérimental.

Dans une analyse FEA, le modèle doit être subdivisé en petites entités de formes simples interconnectées par des nœuds, c'est le maillage. La réponse en chaque point d'un élément est interpolée à partir de leur réaction au niveau des nœuds. Chaque nœud est décrit par un nombre de paramètres dépendant du type d'analyse et de l'élément utilisé. En 3D, la

réponse d'un nœud est décrite par trois translations et trois rotations, appelées les degrés de liberté du nœud.

À chaque nœud des systèmes que nous avons définis, nous pouvons avoir une valeur, de son déplacement en mm, de la déformation relative et de la contrainte en MPa. Pour établir des courbes semblables aux courbes expérimentales, nous avons choisi comme point de mesure un nœud représentatif, se situant à la surface de la membrane de la peinture et dans la zone la plus sollicitée. Les valeurs des tensions des deux courbes sont obtenues à partir des contraintes⁶ pour les deux systèmes (fig. 9).

Les résultats de la simulation par FEA du système rigide et élastique sont en bon accord avec les résultats expérimentaux. Le décalage des tensions, d'environ 7 daN/m, s'explique

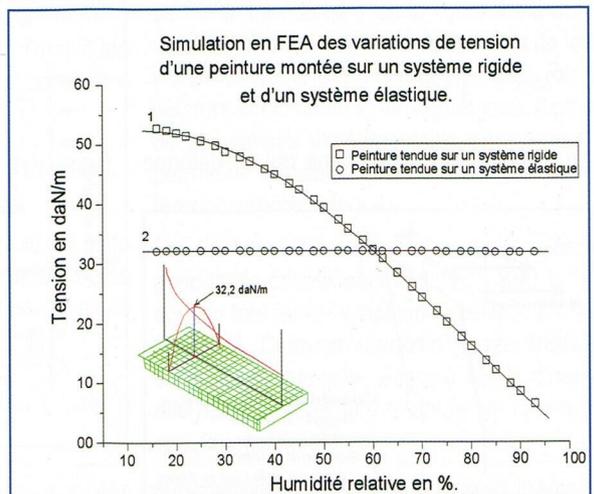


Fig. 9. Courbes obtenues par FEA d'un système rigide et élastique.

⁵ Cosmosworks®

⁶ $t = \sigma \cdot e$

par la position des points de mesure. En FEA le point de mesure est positionné sur la surface de la membrane au milieu de la peinture, dans la zone où les contraintes et les tensions sont les plus élevées. Dans le dispositif expérimental, la tension est le résultat de la moyenne d'un ensemble de points situé sur son bord.

Interprétation des résultats

La comparaison des tensions qui s'exercent dans une peinture tendue sur un système rigide : courbe 1 (fig. 6, 9) et sur un système élastique : courbe 2 (fig. 6, 9), démontre que la régulation des tensions est bien effective. La présence d'un système élastique absorbe les surtensions et les sous-tensions de la peinture.

Système rigide ou châssis fixe

La tension initiale de la peinture de référence sur un cadre rigide⁷ est de 25,10 daN/m à 60 % HR. Elles varient dans les conditions extrêmes (16,6% HR à 93% HR) de 42,5 daNm à 5,80 daN/m. L'écart maximum est de 36,70 daN/m. A faible humidité les surtensions atteignent 17,40 daN/m alors qu'à forte humidité la peinture se détend et elle flotte (effet drapeau). Dans ces conditions, elle est beaucoup plus sensible au fluage. Ces résultats sont confirmés par l'analyse FEA.

En se plaçant dans des conditions de conservation standard, les écarts de 10% HR entre 50 % HR et 60 % HR sont une réalité. Dans ces conditions une peinture à l'huile tendue sur un cadre fixe subit une variation moyenne de tension $V_{mt} = \pm 3,12$ daN/m. La valeur maximum de tension est de 28,22 daN/m ce qui représente 5,88 % de la valeur de la résistance à la rupture de film de peinture (480,00 daN/m). Néanmoins ces variations de tensions, qui peuvent s'exercer quotidiennement, font subir à la peinture une fatigue mécanique qui se matérialise par la fissuration de la matière picturale à plus ou moins long terme avec la formation d'un réseau de craquelures.

⁷ Châssis à renfort d'angle, châssis à assemblages cloués, collés ou chevillés, châssis à clefs.

Système élastique ou châssis à tension auto régulée

Tendue sur un dispositif élastique, les variations de tension de cette même peinture sont considérablement réduites. Dans les mêmes conditions de conservation standard, la variation moyenne de tension de $\pm 0,10$ daN/m a diminué d'un facteur 30 par rapport au cadre fixe. Sans être totalement négligeable, cette valeur réduit considérablement les risques de rupture du film de peinture. L'étude démontre que dans ces conditions de conservation les châssis à tension auto régulée sont très efficaces.

Entre 17% HR et 70% HR le comportement du modèle expérimental s'écarte du modèle théorique et du modèle élastique analysé en FEA. Par rapport aux tensions constantes attendues par la théorie, les tensions du modèle expérimental d'autorégulation divergent légèrement. La courbe 2, figure 6 présente 3 parties. De 17% HR à 40% HR les tensions sont quasiment constantes. De 40% HR à 70% HR elles diminuent progressivement pour atteindre une valeur minimum de 20,00 daN/m à 72% HR. Durant la relaxation de la peinture le système élastique doit accompagner la diminution des tensions en se raidissant. Au-delà de 72% HR, le module de la peinture est devenu si faible qu'il permet à la toile de se tendre sous l'effet de l'humidité. Le rôle du système élastique s'inverse. La toile « tire » en provoquant une remontée des tensions. Le décalage qui apparaît entre les valeurs théoriques de tension constante et celles du système élastique est probablement dû à plusieurs facteurs :

- montage expérimental et sensibilité des capteurs ;
- effets de frottement de la peinture sur le système élastique.

Cet écart enregistré ne pénalise pas ce dispositif car il maintient les tensions en dessous de la tension initiale de 25,1 daN/m, même aux faibles humidités, supprimant ainsi toutes surtensions dans la peinture.

Conclusion

L'étude menée sur le comportement des peintures montées sur un système élastique, a démontré l'efficacité de ce principe. L'interaction

directe de la peinture avec le système élastique est préférable, car la transmission des efforts ne subit aucune transformation.

Ainsi l'utilisation des châssis à tension auto-régulée doit s'intégrer dans une politique générale de conservation préventive. Chaque tableau est dans un état de conservation qui lui est propre et chaque peinture est un cas particulier. La pertinence du diagnostic doit nous permettre de définir une programmation qui respecte un ordre de priorité tel que :

1 - *Les peintures qui présentent des réseaux de craquelures en cours de développement.* Certaines œuvres contemporaines sont particulièrement sensibles au développement de craquelures mécaniques prématurées. Souvent le réseau de craquelures est sous-jacent et à peine visible. Le montage de ces peintures sur un châssis à tension auto-régulée limitera rapidement la progression des craquelures. Elles doivent faire l'objet de ce traitement si toutefois la technique le permet.

2 - *Les œuvres sensibles au fluage.* L'apparition de certaines poches de fluage peut-être précoce sur certaines peintures. Ces déformations sont absorbées par le châssis à tension auto-régulée et la peinture conservera sa planéité.

3 - *Peintures conservées dans de mauvaises conditions de conservation.* C'est le cas de certaines peintures situées dans des lieux où la maîtrise du climat est impossible comme les lieux de cultes et les bâtiments publics.

Le changement du châssis d'origine par un châssis à tension auto-régulée doit faire, au montage, l'objet des précautions suivantes :

- application d'une tension juste suffisante [15] pour que l'œuvre soit plane (15 à 25 daN/m) ;
- réglage la tension de la peinture dans les conditions standard d'humidité et de température (55% HR et 20 °C). ♦

ANNEXE

Caractéristiques de la peinture de référence :

- *toile de lin, densité linéique 15 fils/cm trame 14 fils/cm chaîne ;*
- *embuvage : 2,5% chaîne, 9,5% trame ; masse surfacique : 308,13 g/m² ;*
- *encollage : colle de lapin en plaquette à 9,1% dans l'eau. Nombre de couche appliquée à la brosse 1 ;*
- *préparation : mélange de colle protéinique et carbonate de calcium ; extrait sec 78,5% ; nombre de couches appliquées : 5 ; quantité de colle déposée : 129,3 g/m² ;*
- *peinture : une couche d'impression à base d'ocre rouge, suivie de deux couches de vert ; qualité peintures beaux arts, Lefranc Bourgeois ; la quantité totale de peinture : 136,72 g/m² ;*
- *l'éprouvette a seize ans et a été conservée dans des conditions normales de conservation.*

BIBLIOGRAPHIE

- [1] KECK S. « Mechanical alteration of the paint film », *Studies in conservation*, 14, 1969, p. 9-30.
- [2] HEDLEY G. « Some empirical determination of the strain distribution in stretched canvas. » *Comité de Conservation de l'ICOM, 5^e réunion triennale, Venice, 1975, (11,4), p. 1-17.*
- [3] STOUT G.L. *Stout: A trial of laminal disruption, J.A.I.C., vol 17, 1977, p. 17-26.*
- [4] RONCA G. « The prediction of stress relaxation and incipient instability in lining canvas. » - *Comité de Conservation de l'ICOM, 5^e Réunion triennale, Zagreb, 1978, (2,11), p. 1-9.*
- [5] HEDLEY G. « The stiffness of lining fabric: theoretical and practical considerations » - *Comité de Conservation de l'ICOM, 6^e Réunion triennale, Ottawa, 1981, p. 2-13.*
- [6] BERGER G.A. RUSSEL, W.H. « The behaviour of canvas as a structural support for painting: Preliminary report »- *Science and technology in the service of conservation, IIC, Londres, 1982, p.1 39,145.*

- [7] COLVILLE J., KILPATRICK W., MECKLENBURG M. F. « A finite element analysis of multi-layered orthotropic membranes with application to oil painting on fabric », *Science and Technology in the service of Conservation, IIC*, Londres, 1982, p.1 46-150.
- [8] MECKLENBURG M.F. TUMOSA C.S. « Mechanical behavior of paintings subjected to changes in temperature and relative humidity », *Art in Transit, International Conference on the Packing and Transportation of Paintings*, Londres, 1991, p. 173-215.
- [9] BERGER G.A, RUSSEL W.H. « Changes in resistance of the canvas to deformation and cracking (modulus of elasticity "E") as caused by sizing and lining » , *Comité de Conservation de l'ICOM, 9^e Réunion triennale*, Dresde, 1990, p. 107-112.
- [10] YOUNG C. « Biaxial properties of sized cotton -duck », *Comité de conservation de l'ICOM, 11^e réunion triennale*, Edimbourg, 1996, p. 322-331.
- [11] ROCHE A. « Étude du comportement mécanique des dessins de grands formats doublés sur des matériaux non-tissés »- *Comité de Conservation de l'ICOM, 11^e Réunion Triennale*, Edinburgh, 1996, Vol.2, p. 545-551.
- [12] ROCHE A. « Influence du type de châssis sur le vieillissement mécanique d'une peinture sur toile » , *Studies in Conservation*, 38, 1993, p. 17-24.
- [13] ROCHE.A « Comportamento meccanico dei dipinti su tela. Valutazione della stabilità meccanica alle variazioni di umidità e temperatura » - *Atti del convegno a cura del CESMAR 7*. Thiene 2004, p. 61, 72.
- [14] ROCHE.A « Per una nuova lettura del concetto di adesione e decoesione: aspetti fisico-chimici e meccanici »- *Atti del congresso a cura del CESMAR 7*. Milano 2006, p. 61, 72.
- [15] CAPRIOTTI G., IACCARINO A. *Tensionamento dei dipinti su tela- Quaderno del laboratorio di restauro della provincia di Viterbo*. Nardini editore, p. 57, 90.

ABSTRACT

Paintings on canvas are complex objects which degrade by interaction with their environment. How many modern or contemporary paintings have been disfigured by premature mechanical craquelures. These phenomena attracted the attention of several researches in the 1980's. We are agreed that these craquelures are the result of excessive tension on the painting. It was on these bases that several auto regulated stretchers were developed.

The object of this study is to show the efficiency of these stretchers based on experimental data.

- *The experimental data comes from tests made with an extensimetric stretcher in a climatic chamber. The characterization of the paint reference is established by traction test according to norms, the elasticity is studied in its conception.*
- *The numerical analysis based on the laws of elasticity and equilibrium permit one to establish a general relationship between the painting and elasticity.*
- *A model of the auto-regulated system between the painting and elasticity associated with a method of calculation by fine elements permits one to visualize under each condition the development of deformations and the constraints.*