ALAIN ROCHE

# La conservation des peintures modernes et contemporaines

CNRS EDITIONS

# La conservation des peintures modernes et contemporaines

Alain Roche

# La conservation des peintures modernes et contemporaines

CNRS ÉDITIONS

15, rue Malebranche – 75005 Paris

© CNRS ÉDITIONS, Paris, 2016
ISBN : 978-2-271-08916-8

# Préface

La plupart des ouvrages scientifiques sur la conservation préventive sont d'un accès difficile aux restaurateurs ou aux autres professionnels en charge des collections patrimoniales ; mais lorsque l'auteur est lui-même, outre un ingénieur, un praticien expérimenté de la conservation-restauration, et plus encore lorsque son parcours à l'école des Beaux-Arts puis dans l'enseignement, lui donne accès à la compréhension des techniques de la création artistique et des exigences pédagogiques, les conditions sont réunies pour concevoir un manuel ouvert à tous. Chacun peut y puiser une information utile quel que soit son niveau de compréhension. Le mérite de ce troisième livre est aussi de comporter des outils de réflexion qui peuvent aider à envisager l'avenir pour la conservation des œuvres modernes et contemporaines et inciter les responsables d'institutions ou de collections privées, à prendre des mesures préventives, voire à modifier leur politique de diffusion des œuvres ou à mieux l'encadrer.

Les échanges entre musées mobilisent en effet de plus en plus les œuvres, en particulier celles qui sont le plus simples à transporter, c'est-à-dire les peintures. Des projets de dépôts ou de prêts à long terme tels que Le Louvre Abou Dhabi, ou encore les expériences originales comme les « Centre Pompidou » provisoires sont les prémices d'une tendance qui prendra de l'ampleur dans les années à venir et verra s'accentuer la mobilité des œuvres, non sans conséquence pour leur conservation. Le problème qui se pose en particulier en France où trop peu de musées intègrent les services de restaurateurs attachés dans la durée au suivi d'une collection, est la perte d'informations relatives à l'histoire matérielle permettant de rattacher la cause à son effet. Le restaurateur est sollicité au moment critique de la nécessité d'une intervention mais rarement associé à la réflexion préalable et à la décision du prêt. Le centre Pompidou est à cet égard une exception. L'évolution parfois lente mais inéluctable des phénomènes physiques (développement des craquelures, soulèvements, décohésion) qui aboutit au point de rupture qui rend visible la dégradation, n'est pas facilement identifiée dans un contexte où le seul repère est le constat contractuel obligatoire. Les sociétés de transport et les régisseurs mettent en place un certain nombre de protocoles efficaces à prévenir les accidents et à limiter les prises de risque. Il n'est cependant pas de leurs compétences d'analyser les causes intrinsèques aux dégradations des peintures. Le manuel d'Alain Roche nous alerte sur ce problème car il met en évidence la complexité d'une telle

analyse. Il ne suffit pas d'appliquer à toutes les œuvres les mêmes principes pour s'assurer de l'innocuité des changements climatiques ou des conditions de transport qui leur sont imposés. La nature même des matériaux, toile et couche picturale, la mise en œuvre, les aléas de l'histoire matérielle sont autant de paramètres qui conditionnent la vulnérabilité d'une peinture. Prendre en considération ces paramètres amène à s'interroger sur la notion de norme qui régit la plupart des guides de conservation préventive et sur leurs limites évidentes. Ce livre est une invitation à ne pas épouser tous les dogmes et à faire preuve d'initiative en s'interrogeant sur la spécificité de chaque œuvre avec des outils de réflexion issus de la vulgarisation scientifique certes, mais suffisants à remplir leur objectif.

Un autre intérêt qu'il faut souligner, est que ce livre contribue comme les précédents, à combler un manque dans le domaine de la recherche. En France, les restaurateurs ont un statut d'indépendant qui limite les possibilités d'accès aux laboratoires et de développement expérimental appliqué à la pratique. D'où l'absence de revues spécifiques aux restaurateurs telles qu'on les rencontre fréquemment à l'étranger. Les laboratoires nationaux, le C2RMF, le CICRP, le LRMH sont avant tout des laboratoires de chimie et d'analyse fondamentale. La dimension prescriptive en est souvent absente. La section réservée à la mécanique des supports y est restreinte, voire inexistante, et surtout ne repose pas sur l'expérience des praticiens. Tout le long de sa carrière de restaurateur, Alain Roche a rencontré les cas les plus divers et constitué à partir du réel, une base de données unique et précieuse. C'est cette collecte de données qui alimente sa réflexion théorique et oriente ses expérimentations. C'est une contribution originale et irremplaçable.

Il convient donc de saluer une démarche de transmission qui relève de la curiosité et de la générosité intellectuelle, deux qualités indispensables dans le contexte actuel où le métier n'a pas encore trouvé sa place véritable dans les institutions et attend d'être intégré comme le chaînon manquant à l'organigramme des laboratoires et des services de restauration.

*Véronique Sorano Stedman*
*Chef de service de la restauration des œuvres du MANM-CCI*
*Centre national d'Art et de Culture Georges Pompidou*

*A Etta*

# Remerciements

Je remercie mes chers lecteurs d'avoir consacré un peu de leur temps à la relecture de cet ouvrage. Leurs remarques et leurs commentaires ont contribué à améliorer la qualité de ce livre. Ces remerciements s'adressent à :

Susana Martin Rey, professeur Département Conservation et Restauration BBCC et directrice du fond d'art patrimonial à l'Université Polytechnique de Valence Espagne.

Véronique Sorano Stedman, chef de Service de la Restauration des Œuvres du MANM-CCI, Centre National d'Art et de Culture Georges Pompidou Paris (France) qui a eu aussi la gentillesse d'écrire la préface.

Antonio Iaccarino Idelson, Restaurateur chercheur/praticien à Equilibrarte srl, Conservazione e Restauro di Beni Culturali et Professeur à la Scuola di Alta Formazione in Conservazione e Restauro dei Beni Culturali à la Venaria Reale, Université de Turin, Italie.

Cependant si j'ai pu me consacrer à cet ouvrage et développer certaines idées, je le dois essentiellement au LARCROA qui a soutenu cette initiative financièrement et m'a permis d'utiliser ses équipements scientifiques.

# Avant-propos

L'état de conservation du patrimoine que nous allons hériter de cette seconde moitié du XX^e^ et de ce début du XXI^e^ siècle nous réserve de réelles surprises. Devant ce fait, il semble plus facile de philosopher, de débattre sur l'approche ou les approches de la conservation et la restauration que d'apporter des solutions concrètes. En effet, depuis l'année 1985[1] se sont organisés de nombreux colloques, ont été éditées d'abondantes publications sur cette nouvelle problématique : « Comment aborder la conservation et la restauration de l'art moderne et contemporain. » À la lecture des traités de conservation et de restauration d'art moderne et contemporain, il semble que nos moyens techniques n'aient pas évolué aussi rapidement qu'il aurait été nécessaire. Bien des cas de restauration ont débouché sur des impasses insolubles et créé un malaise au sein de la communauté des conservateurs et des restaurateurs. Pourtant, si l'on regarde du côté des technologies de pointe, il semble que ces vingt dernières années aient apporté des avancées considérables dans certains domaines comme : l'informatique, la communication, les énergies renouvelables, etc. et l'on peut se poser la question suivante : d'où vient le retard technique et technologique pris dans le domaine de la conservation du patrimoine culturel ?

En travaillant pour le Service de restauration des Musées de France dans les années 1980 et 1990, avec mes collègues d'atelier, nous avions cru que la recherche appliquée dans ce domaine avait un espoir de se développer et d'évoluer. Malheureusement nos efforts n'ont pas été perçus comme un progrès et n'ont jamais véritablement été encouragés. Puis, avec la mise en place des marchés publics et de la concurrence, le temps des illusions s'est effondré et les espoirs ont vite été étouffés à partir des années 2000. Dans les États où la conservation-restauration est confiée à des entrepreneurs indépendants mis en concurrence comme en France, en Italie, en Espagne pour ne citer que nos proches voisins, la situation n'est guère meilleure malgré la qualité des formations et les compétences des restaurateurs et des scientifiques.

Pour que la science de la restauration s'enrichisse, il faut que la recherche appliquée en conservation puisse se développer. Elle nécessite une bonne connaissance des mécanismes de dégradation des

1. Althöfer H., « Restaurierung moderner Malerei », p. 9, 1985.

œuvres prises dans leur intégralité. Comprendre ces mécanismes est fondamental pour au moins deux raisons. C'est le point de départ qui va nous permettre d'orienter le choix de mesures préventives de conservation des œuvres. Ce sera aussi la base de connaissance qui permettra de définir des protocoles expérimentaux en vue de mettre au point ou d'améliorer des traitements de restauration et de les faire évoluer.

En ce qui concerne la peinture d'art moderne et contemporain, nous devons davantage raisonner en termes de conservation que de restauration. Ce principe, je l'ai adopté dès 1985, en encourageant, dans un de mes tout-premiers articles[2] la conservation préventive et le développement de la recherche appliquée. J'ai vite compris[3] que la vulnérabilité de certaines peintures contemporaines était le résultat, non pas d'un choix conscient de l'artiste, mais plutôt d'une démarche plus intellectuelle que pragmatique. Une bonne partie des artistes sont attirés davantage par l'expérimentation que par une pratique confirmée.

Cette perte de savoir-faire produit des chefs-d'œuvre aux pieds fragiles, qui sont reconnus par le système socio-économico-politique. À partir de ce moment, faisant partie du patrimoine culturel universel on se doit de les protéger et de les conserver dans les meilleurs états de conservation possibles.

2. Roche A., « A propos de la restauration de l'art moderne et contemporain », p. 18, 19, 1985.

3. Roche A., « Notes sur les origines du vieillissement prématuré des peintures contemporaines », n° 7,8 p. 22, 24 (1987).

# Introduction

Le sujet de cet ouvrage ne prétend pas apporter une connaissance exhaustive du comportement de toutes les techniques picturales mais une vision analytique, permettant d'apporter une aide substantielle à tous les acteurs concernés par la conservation de ce type d'œuvres. En partant du principe que les traitements de conservation d'une œuvre sont directement liés à son état de dégradation, il est bien naturel de s'intéresser aux mécanismes responsables de cet état.

Ces mécanismes de dégradation ne sont que la conséquence d'un effet produit par une ou plusieurs causes qu'on appelle communément facteurs de dégradation. Ceux-ci regroupent plusieurs catégories :

- Les composantes climatiques : températures et humidité, traitement de l'air, présence du public.
- Le temps.
- Les agents physico-chimiques et chimiques : lumière, composants de l'air, pollution atmosphériques.
- Les agents biologiques : micro-organismes, insectes et rongeurs.
- Les catastrophes naturelles et les accidents.

Dans cet ouvrage on ne s'intéressera qu'aux composantes climatiques associées au temps comme facteurs de dégradation. Oui, le temps à son mot à dire dans le monde de la conservation. C'est une grandeur physique qui se mesure. Le temps se définit par des phénomènes périodiques que l'on ne peut pas arrêter, ralentir, dévier ou modifier. Le temps est bien différent de celui que propose Brandi, c'est le vecteur universel qui associé aux facteurs de dégradations climatiques, est responsable de la dégradation des œuvres, jusqu'à leur destruction. Nous mettrons de côté, les mécanismes de dégradation chimique qui sont bien connus de nos experts chimistes.

L'influence des variations de l'humidité et de la température a été étudiée avec beaucoup d'intérêt par un certain nombre de chercheurs dès les années soixante. À la fin de ces années S. Keck[1] 1969 propose une description des mécanismes de rupture des films de peinture et une classification du point de vue morphologique des craquelures élémentaires. S. Bucklow[2] a repris ce type de travail en 1997 pour dater les peintures en se basant sur la morphologie des craquelures.

1. Keck S., « Mechanical alteration of the paint film », 1969.

2. Bucklow S., « The description of craquelure patterns », « The description and classification of craquelure », 1997, 1999.

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. C'est à partir des travaux de G.L. Stout[3] 1974, G. Ronca[4] 1978 que l'on commence à définir et évaluer les contraintes dans les matériaux des peintures sur toile.

Au début des années quatre-vingt, on voit apparaître une série d'études abordant cette problématique par différentes approches expérimentales que l'on retrouve dans les travaux de G. Hedley[5], G.A. Berger[6], M. F. Mecklenburg[7]. Ces travaux ont été fondamentaux pour l'orientation des différentes recherches dans ce domaine de la conservation dans les années suivantes. En 1991 M.F. Mecklenburg et C.S. Tumosa publient deux ouvrages *Mechanical behavior of paintings subjected to change in temperature and relative humidity* et *An introduction into the mechanical behavior of paintings under rapid loading conditions*. Ces travaux sur le comportement mécanique ont servi et servent encore de référence aux différentes études entreprises par d'autres chercheurs.

S. Michalski[8] a largement contribué à l'avancement de ce type de travaux. G. Berger et W.H. Russell[9] en développant un cadre de mesures bi-axiales, ouvrent la voie vers les recherches expérimentales sur le comportement bi-axial des peintures. En 1996 C. Young[10] a également développé un cadre de mesures bi-axiales qui lui a servi de support pour un certain nombre d'études.

Actuellement A. Iaccarino et C. Serino ont réalisé avec l'Université de Viterbe un dispositif expérimental qui leur a permis d'étudier les tensions minima à appliquer sur une peinture.

3. Stout G.L., « Description of film cracks », p. 9-14, 1974.

4. Ronca G., « The prediction of stress relaxation and incipient instability in lining canvas », 1978.

5. Hedley G., « The stiffness of lining fabric : theoretical and practical considerations », 1981.

6. Berger G.A., Russell W.H., « The behavior of canvas as a structural support for painting », 1982.

7. Colville G.J., Kilpatrick W., Mecklenburg M.F., « A finite element analysis of multi-layered orthotropic membranes with application to oil painting on fabric », 1982.

8. Michalski S., « A control module for relative humidity in display cases », 1982.

9. Berger G.A., Russell W.H., « The new stress tests on canvas painting and some of their implication on the preservation of painting », 1984.

10. Young C., Hibberd R., « Biaxal tensile testing of painting on canvas », 1999.

De notre côté, nous avons commencé dès l'année 1989 à développer un modèle de châssis/cadre équipé de capteurs de forces permettant des mesures bi-axiales. C'est sur ce châssis/cadre extensiométrique, perfectionné en 1993 que nous avons pu réaliser une bonne partie de nos recherches. Dès 1991 nous avons pu mettre en évidence l'efficacité des châssis à tension auto-régulée lors d'une étude qui a été faite grâce à des crédits de recherche du Ministère de la Culture. Jusqu'en 2000 nous avons pu continuer à mener nos recherches grâce à des financements publics. Ensuite nos recherches ont été financées essentiellement par le LARCROA.

Ce livre s'articule en trois parties. La première partie regroupe les chapitres I à IV. Le chapitre I traite des propriétés des matériaux picturaux qui décrivent le comportement des peintures. Le climat est abordé dans le chapitre II. Les interactions climat/peinture et le développement des outils d'analyse permettant d'évaluer les risques de dégradations des œuvres font l'objet du chapitre III. Les mécanismes de dégradations mécaniques sont étudiés dans le chapitre IV. Ces quatre chapitres sont reliés par le fil conducteur « conservation des œuvres modernes et contemporaines ».

La seconde partie de l'ouvrage regroupe les chapitres V à VIII. On entre dans le domaine des applications. Dans le chapitre V on met en pratique les outils qui ont été développés dans la première partie. Le chapitre VI présente une méthodologie pour aborder la conservation des œuvres. Le chapitre VII analyse le comportement mécanique des différentes peintures en les caractérisant vis-à-vis des conditions de conservation. Enfin le chapitre VIII propose quelques solutions de conservations alternatives.

La dernière partie regroupe tous les diagrammes de sensibilité à l'humidité et à la température.

Ce livre propose deux niveaux de lecture. Dans les encadrés, nous avons développé des notions de physique et de mécanique sur lesquelles s'appuie notre argumentation. Par ailleurs, le développement de notre raisonnement est illustré par des exemples et des démonstrations pour faciliter l'emploi des outils que nous présentons.

Ce livre propose, aux responsables de collection, aux conservateurs, aux restaurateurs, aux collectionneurs, aux fondations d'art moderne et contemporain, des solutions pratiques pour améliorer les prises de décision concernant la conservation des peintures modernes et contemporaines.

# Partie I

# I

# Propriétés des matériaux

## I-1 Propriétés physiques

Pour aborder les propriétés physiques d'une peinture, nous allons la considérer comme un objet à deux dimensions. Il n'est pas difficile d'imaginer que l'épaisseur d'une peinture soit négligeable vis-à-vis des deux autres dimensions.

### *I-1-1 Gonflement, retrait linéaire*

Dans les matériaux hydrophiles de la peinture, l'eau contenue dans l'atmosphère environnante s'adsorbe en surface et diffuse à l'intérieur. Il s'établit, entre l'humidité de l'environnement et la teneur en eau du matériau, un équilibre. Autrement dit pour chaque valeur de l'humidité relative environnementale, la teneur en eau dans le matériau change.

Naturellement, l'augmentation de la teneur en eau dans le matériau provoque un accroissement des dimensions que l'on appelle le *gonflement linéaire*. Inversement la désorption d'eau du matériau est responsable d'une diminution des dimensions appelée *retrait linéaire*. On est donc obligé de caractériser chaque matériau hydrophile par un coefficient de gonflement linéaire $(\gamma)$. L'amplitude du gonflement ou du retrait d'un matériau dépend de ses affinités avec les molécules d'eau de l'humidité. Chaque constituant de la peinture aura donc un comportement différent vis-à-vis de l'eau.

Ces variations de dimensions au sein de la peinture entraînent des sollicitations complexes que l'on peut exprimer sous forme de contraintes. Par ailleurs, l'adsorption préférentielle de l'eau dans les parties amorphes d'un polymère provoque des modifications structurelles, qui, affaiblissant les interactions entre les chaînes, modifie l'ensemble des propriétés mécaniques.

*I-1-2 Dilatation, contraction linéaire*

Pour les matériaux hydrophobes, l'élévation de la température provoque également une augmentation des dimensions que l'on appelle *dilatation linéaire*. Inversement, une diminution de la température se manifeste par une *contraction linéaire*. Ce phénomène apparaît lorsqu'un apport d'énergie extérieure entraîne une augmentation du volume libre entre chaque macromolécule dans le cas d'un polymère ou mouvement micro-brownien à l'échelle moléculaire. Tous les matériaux sont donc caractérisés par un coefficient de dilatation thermique linéaire *($\alpha$)* qui permet de quantifier le phénomène[1]. Ces variations de dimensions au sein de la matière sont également à l'origine de sollicitations qui s'expriment sous forme de contraintes.

*I-1-3 Relations structures propriétés*

Les propriétés mécaniques des matériaux dépendent de la mobilité des molécules dans le solide. Bien que l'eau et la chaleur agissent de manière très différente, leur action est semblable. L'eau en s'introduisant dans le polymère facilite le déplacement des macromolécules en servant de « lubrifiant ». Par contre, l'apport d'énergie par la chaleur (réchauffement du corps) est responsable d'une agitation plus grande des molécules et d'une plus grande mobilité. Dans les deux cas on observe une variation de volume (gonflement, dilatation) et une perte de rigidité (augmentation de l'élasticité). En ce qui concerne les matériaux de la peinture, les effets de dilatation ou de contraction sont généralement moins importants que les effets provoqués par le gonflement ou le retrait. Les propriétés des peintures, sont donc fortement conditionnées par les facteurs climatiques humidité et température.

## I-2 Propriétés mécaniques

Du point de vue mécanique, une peinture se définit comme un matériau composite. C'est un solide à deux dimensions constitué de plusieurs matériaux en couches minces liées entre elles. Dans notre

1. Les coefficients de dilatation thermique ($\alpha$ volumique ou linéique s'expriment par les relations suivantes :

$$\alpha_v = \frac{1}{v}\left(\frac{\Delta v}{\Delta T}\right), \quad \alpha_l = \frac{1}{l}\left(\frac{\Delta l}{\Delta T}\right)$$

où $\Delta$v et $\Delta$T sont les variations de volume ($m^3$) et de température ($^oC$) à pression constante
où $\Delta$l et $\Delta$T sont les variations de longueur (m) et de température à force constante

domaine, l'étude des peintures va faire appel à la mécanique des milieux continus. Cette branche de la mécanique s'intéresse principalement aux déformations des solides et aux phénomènes associés aux changements de comportement du matériau.

Les propriétés mécaniques ou les lois de comportement des matériaux sont déterminées à partir d'essais mécaniques. Elles ont pour but d'établir une relation entre les forces, (les tensions ou les contraintes) qui agissent sur le solide et les déformations qu'il subit.

L'essai de traction est certainement l'essai le plus adapté aux matériaux 2D comme la peinture. Il consiste à tirer sur une éprouvette de peinture jusqu'à sa rupture. L'appareil d'essais enregistre l'allongement et la force sous forme d'une courbe et permet d'obtenir des informations telles que :

• La valeur du module d'élasticité longitudinale ou module de Young $E$ qui s'exprime en Méga Pascal (MPa).

• L'étendue du domaine élastique où toutes les déformations sont réversibles.

• La limite d'élasticité notée $R_e$ ou $\sigma_e$.

• Les domaines viscoélastique ou viscoplastique.

• La résistance à la rupture qui correspond à la force maximale, en Newton (N), que la peinture peut supporter avant rupture. Elle s'exprime par la contrainte à la rupture $\sigma_{rupt}$.

• La déformation à la rupture qui correspond à l'allongement maximal que peut supporter la peinture avant de se rompre. La déformation $\epsilon_{rupt}$ s'exprime en % et l'allongement *all.* en millimètre (mm).

Toutes ces propriétés sont indispensables pour aborder les mécanismes de dégradation mécanique.

### *I-2-1 Élasticité d'une peinture sur toile à humidité et température constantes*

L'essai de traction sur une éprouvette d'une peinture de référence (Annexe 5) nous donne un ensemble de données particulièrement intéressant. La courbe intégrale fig. 1, présente 3 parties distinctes.

*La première et deuxième partie* représentent le comportement mécanique du film de peinture et de sa préparation. Lorsque la machine exerce une traction, le feuil de peinture et sa préparation étant plus rigides que la toile, sont sollicités en premier et imposent leurs comportements.

L'élasticité de la peinture est donc exprimée par les parties 1 et 2 de la courbe, fig. 2.

Dans la partie 1 le début de la courbe est presque linéaire. La peinture se déforme proportionnellement à la force. Nous sommes dans le domaine élastique de la peinture. Si la traction s'arrête avant la craquelure, la déformation de la peinture est réversible. L'élasticité

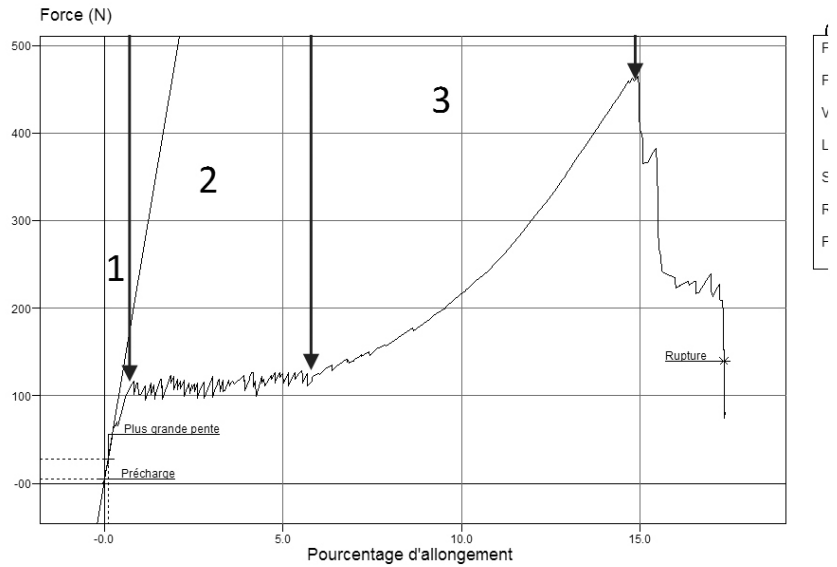



*Figure 1 : Courbe de traction de la peinture de référence. (Nexigen).*

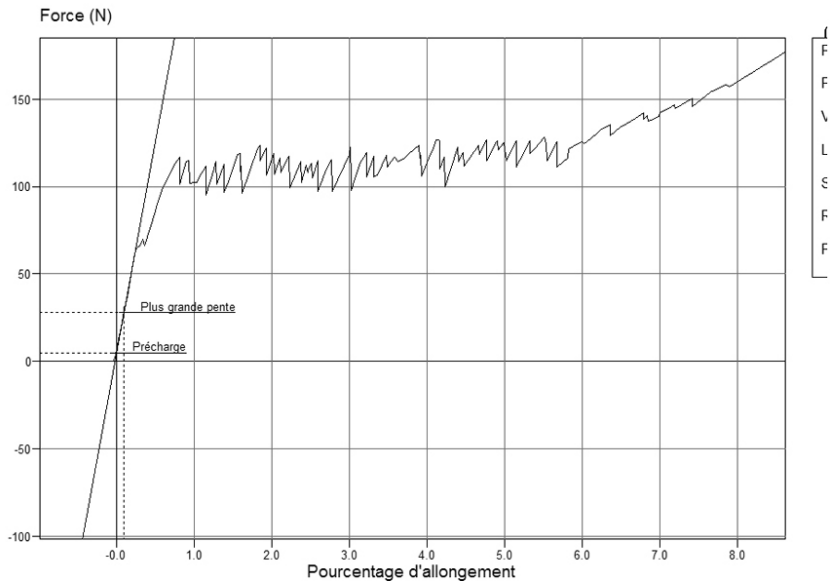



*Figure 2 : Courbe de traction : domaine de sollicitation de la peinture. (Nexigen).*

correspond à sa capacité de déformation réversible sous l'effet d'une force, d'une charge ou d'une contrainte. Le coefficient $E$ qui relie la contrainte à la déformation dans une relation linéaire s'appelle le module d'élasticité ou d'Young.

$$\sigma = E.\varepsilon \qquad (1)$$

L'élasticité d'une peinture est une propriété mécanique fondamentale.

Dans la partie 2 de la courbe, la peinture est soumise à des forces supérieures à sa résistance à la rupture. Elle se rompt pour laisser place à des craquelures, fig. 3. Ensuite chaque formation de craquelure se traduit sur la courbe par un pic suivi d'un creux. La force à la rupture de la peinture est égale à la moyenne des pics. La toile sur laquelle le film est déposé, ayant une résistance à la rupture plus élevée, se trouve à son tour sollicitée.

*La dernière partie de la courbe* représente le comportement de la toile. Le feuil de peinture s'étant fissuré, fracturé, craquelé sur toute la surface, sa cohésion devient quasiment inexistante et n'oppose plus de résistance. À ce moment, la toile se trouve à son tour pleinement sollicitée. Cette partie de la courbe n'est pas complètement linéaire en raison de la structure de la toile. Dans un premier temps, la partie concave de la courbe correspond à la déondulation des fils. Ensuite, elle devient linéaire et représente le comportement élastique des fils tendus, caractérisé par la pente ou le module d'Young de la toile étirée. La rupture de la toile se fait par défibrillation aux environs de 464,44 N.

Les parties 1, 2 et 3 de la courbe permettent de caractériser le comportement d'une peinture à 55 % HR et 20 °C. Les informations obtenues par cette courbe sont regroupées dans le tableau suivant.

Tableau 1

| *Vitesse de déplacement de la traverse* | *10 mm/min* |
|---|---|
| Force moyenne (N) de rupture du film de peinture | 120 N (4,8 N/mm) |
| Contrainte (MPa) de rupture préparation/film de peinture | 8 MPa (e = 0,6 mm) |
| Seuil d'élasticité (yield point) | 6,7 MPa |
| Module de Young de la peinture | 1450 MPa |
| % d'allongement à la rupture du film de peinture | 0,85 % |
| Force maximale de rupture de la toile | 464,44 N (18,7 N/mm) |
| Contrainte rupture de la toile à la force maximale | 18,7 MPa |
| % d'allongement rupture à la force maximale | 14,93 % |
| Module de Young de la toile | 218,75 MPa |



*Figure 3 : Éprouvette après l'essai de traction.*

L'expérience montre que la tension moyenne appliquée à une peinture durant son montage sur châssis est d'environ 0,2 N/mm$^2$ soit 20 deca-Newton par mètre[3] (20 daN/m). Elle provoque dans le film de peinture de l'éprouvette étudiée une contrainte de 1 MPa. Cette contrainte est située dans la zone élastique de la peinture.

*I-2-2 Rôle des toiles préparées dans le comportement des peintures*

Dans les techniques picturales, la peinture sur toile est utilisée de longue date et continue à être utilisée par les artistes. La toile est une structure de fils entrecroisés qui donne au support ses propriétés. Elle n'est pas utilisée seule, puisque, d'une part, elle est tendue sur un châssis et, d'autre part, elle est recouverte d'une couche d'apprêt que l'on appelle préparation. L'artiste enduit sa toile pour plusieurs raisons. Du point de vue physique, elle diminue la porosité et la rugosité de la toile. Du point de vue mécanique, elle augmente la rigidité. Enfin du point de vue optique et esthétique, l'aspect de surface et la couleur auront une influence sur le rendu final.

La toile enduite doit répondre à certains critères de qualité qui sont basés sur les propriétés mécaniques que nous allons avoir l'occasion de définir. Les toiles préparées et tendues sur le châssis par l'artiste constituent le socle, les fondations de la peinture. La qualité de leur mise en œuvre est la garantie de la durabilité et du vieillissement de ces peintures dans le temps.

Si l'on cherche à comprendre comment se comporte ce support, on commencera par examiner le comportement mécanique de chacun des composants du substrat[4] – fil, toile et toile enduite, sachant qu'il se trouve sollicité non seulement par la force de tension de la toile sur le châssis mais aussi par les variations de forces dues à la réactivité des matériaux vis-à-vis de son environnement. Dans tous les cas de figures on est ramené à des efforts dans le plan de la peinture, qui se concrétisent par des forces de traction ou de compression.

2. Capriotti C., Iaccarino Idelson A., « Tensionamento dei dipinti su tela, La ricerca del valore di tensionamento », p. 23, 2004.

3. daN/m

4. Conti W., Tassinari E., « Misura di creep su una tela di rifidero trattata con colla », « Analysis of creep curves on lining canas », 1971, 1972.

### *I-2-3 Déformation d'un fil extrait d'une toile*

Prenons un fil de toile que l'on a extrait. Il apparaît comme un cylindre curviligne constitué d'une série d'ondulations que l'on peut modéliser. En réalité, le fil est un assemblage de fibres torsadées et sa rigidité dépend de sa torsion. Les fibres formant la surface du fil sont, certes continues, mais plus courtes à l'intérieur de l'onde et plus longues à l'extérieur, fig. 4.

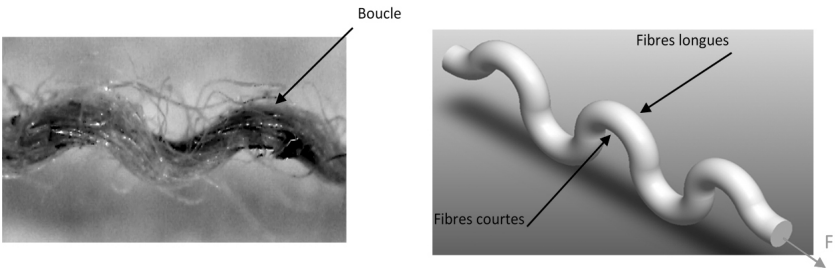



*Figure 4 : Modèle d'un fil de toile.*

En tendant une toile sur un châssis, chaque fil va être sollicité par une force de traction et se déformer. Sous l'action de la tension de la toile les fils se déplient. On voit apparaître des contraintes de traction au niveau des fibres qui s'allongent et des contraintes de compression au niveau des fibres qui rétrécissent. Ce sont ces contraintes qui sont responsables de la résistance du fil au dépliement, fig. 5.

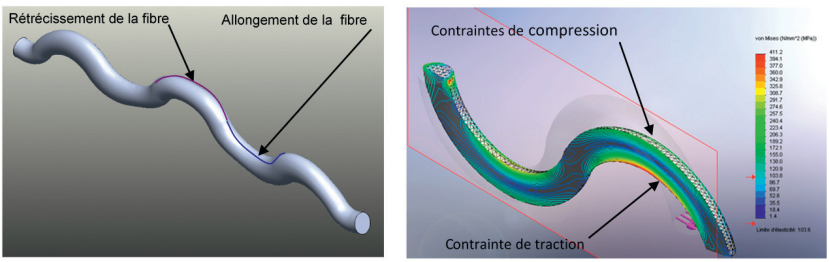



*Figure 5 : Analyse des contraintes dans un fil lors de son dépliement.*

### *I-2-4 Élasticité des toiles*

La toile est un assemblage de fils et quel que soit sa contexture, elle oppose une résistance à la déformation qui se compose de la résistance au dépliement des fils, auquel vont s'ajouter les forces de friction inter-fils. De par leurs fabrications les toiles ont un comportement mécanique que l'on appelle orthotrope. Autrement dit, leurs propriétés sont différentes dans les deux sens désignés chaîne et trame.

L'intersection des fils dans un textile d'armure toile constitue une maille. C'est l'élément unitaire de la toile/toile. Comme pour le fil, la maille peut être modélisée numériquement en créant des points de contact entre les fils comme dans une véritable toile. Ces points seront pris en charge dans le calcul pour simuler les forces de friction inter-fibres, fig. 6.

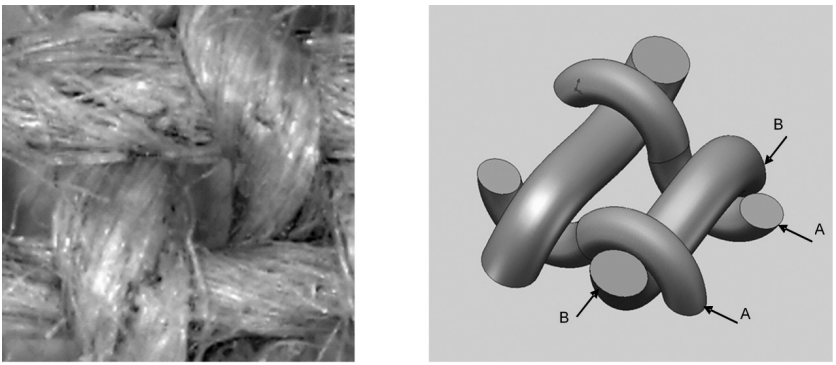



*Figure 6 : Modèle d'entrecroisement ou de maille d'une toile.*

Lorsque la toile est tendue sur un châssis, elle se déforme. Cette déformation est liée au dépliement de chaque fil impliqué dans une maille. N'étant plus seul, le mouvement des fils est limité et en s'appuyant les uns sur les autres ils vont créer des forces de frottement. La toile opposera une résistance provoquée par la résistance du fil au dépliement et les forces de friction. L'analyse par éléments finis de cette maille nous donne les tracés suivants, fig. 7.

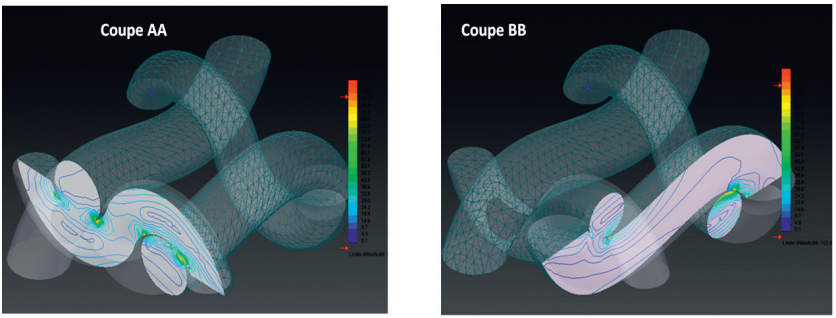



*Figure 7 : Distribution des contraintes dans une maille sollicitée en traction.*

Sur les coupes AA et BB du tracé de la maille sollicitée en traction, apparaissent des zones vertes qui se développent autour d'un point rouge nous indiquant les zones de *concentration de contraintes*. On

distingue les forces de résistance au dépliement des fils mais surtout ce sont les forces de frottement aux points de contact entre les fils qui prédominent. C'est l'ensemble de ces forces qui est responsable des propriétés mécaniques des toiles vierges[5].

*I-2-5 Déformabilité des toiles*

Lorsque l'on tend une toile sur un châssis, la tension moyenne que l'on applique est de l'ordre de 20 déca-Newton par mètre. Cette tension correspond à de petites forces par rapport à sa résistance à la rupture et notre analyse portera essentiellement sur l'étude des petites déformations.

La déformabilité des toiles dépend en grande partie de la morphologie des fibres. Dans les toiles de fibres naturelles, les fibres sont irrégulières, segmentées par de nombreux nœuds, non linéaires avec des diamètres inégaux, fig. 8. Dans les toiles de fibres synthétiques les filaments qui composent les fils sont fins, réguliers, rectilignes, fig. 9.

On comprend pourquoi les forces inter-fibres sont beaucoup plus importantes dans les toiles de fibres naturelles où les forces de frictions sont nettement plus nombreuses. Ce phénomène se traduit par des toiles de fibres naturelles moins déformables que les toiles de fibres synthétiques et s'explique par l'influence de la morphologie des fibres à l'échelle microscopique. L'analyse de ces résultats pourrait retenir notre attention sur le rôle que jouent les forces en jeux dans une toile, sur les allongements et les modules d'élasticité.

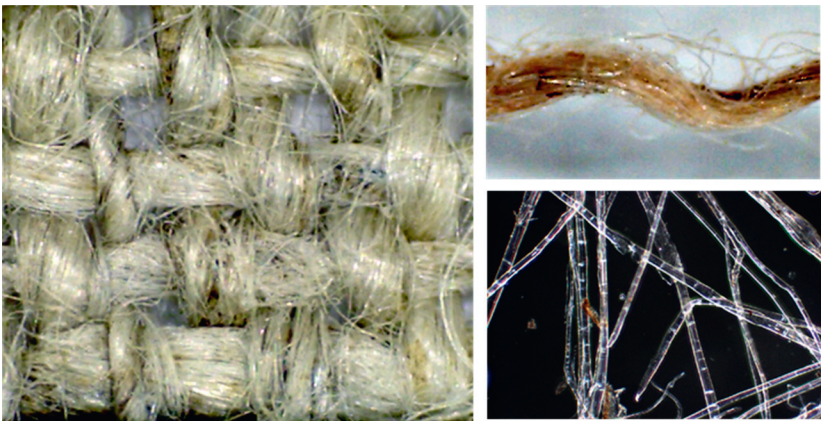


*Figure 8 : Structure des fibres de lin.*

5. Roche A., « Influenza dell'incollaggio e della preparazione di una tela sull' irrigidimento e sull' ortotropia », 6th Biennal International Congress CESMAR 7 Università degli Studi di Parma, Nov. 2012.

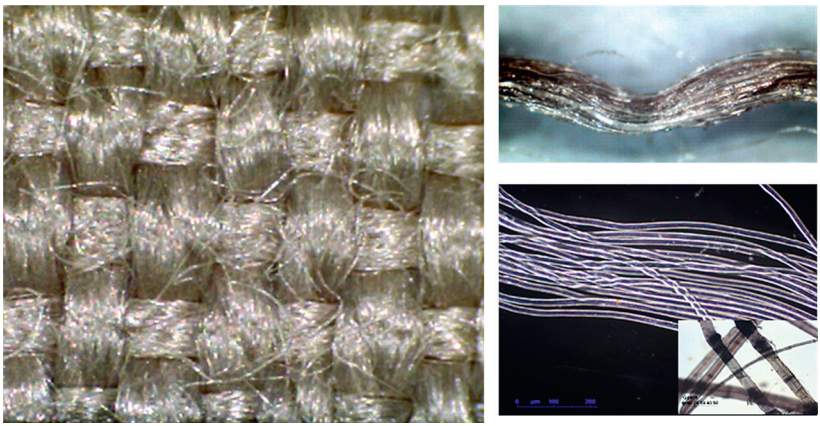


*Figure 9 : Structure des fibres de polyester.*

L'encollage d'une toile renforce les liens inter fils et limite le dépliement des fils. De ce fait l'encollage est responsable d'une augmentation de la cohésion de la toile, fig. 10.

Les conséquences immédiates qui en résultent sont une augmentation du module d'élasticité et une diminution de l'allongement. La toile encollée se distingue d'une toile vierge par une plus grande rigidité et une plus faible déformabilité, quel que soit le type de toile et de colle.

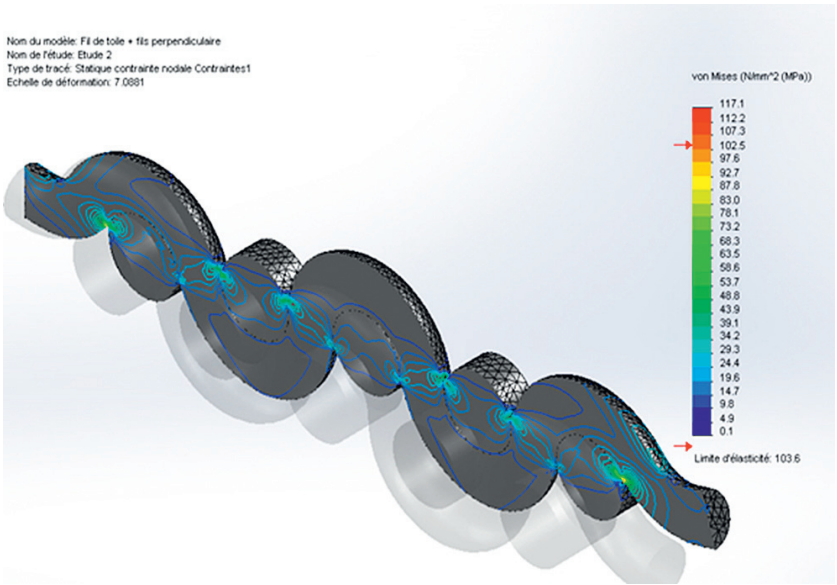



*Figure 10 : modèle d'un élément de toile encollée.*

*I-2-6 Enduction d'une toile*

Quel est donc le rôle de l'enduction d'une toile du point de vue mécanique ? Cette couche d'enduit, composée généralement d'une charge – carbonate ou sulfate de calcium, silice, etc.- et d'une colle naturelle ou synthétique, va s'introduire dans les reliefs de la toile, enrober les fils et les fibres de surface. Il se crée ainsi entre la toile et l'enduit des liens d'adhérence qui seront à l'origine de la résistance de la peinture une fois celle-ci achevée.

La toile après l'enduction se trouve transformée. Son comportement dépend de la nature des constituants et des forces d'adhésion qui la lient. Afin de comprendre le comportement d'une toile enduite, nous avons de nouveau eu recours à une modélisation et à une analyse par éléments finis. Nous avons modélisé ce système, en nous inspirant d'une micro-section. La toile est représentée par 4 fils et 3 entrecroisements et la préparation par un élément formant un bloc lié à la toile par des liaisons d'adhérence. Dans ce modèle, les points de contact entre les fils et les contacts d'adhésion entre les fils et la préparation sont pris en charge dans les calculs, fig. 11.

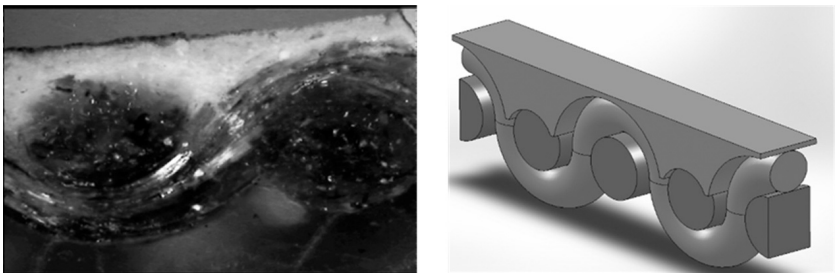


*Figure 11 : Modélisation d'une toile encollée et enduite à partir d'une micro section.*

Ces deux matériaux – toile et préparation – ont séparément des comportements mécaniques très différents. Une fois assemblé, c'est le comportement de l'assemblage qui nous intéresse. Sachant que c'est le matériau au module d'élasticité le plus élevé qui imposera son comportement au système, nous avons choisi d'étudier ce modèle avec une préparation à module élevé et une préparation à faible module[6].

6. Les toiles sont caractérisées comme tous matériaux par des grandeurs mécaniques : module d'élasticité $E$, le seuil d'élasticité (Re), la contrainte à la rupture $\sigma_{rupt}$. Les modules d'élasticité des enduits sont :
– E ≈ 1950 MPa à 60 % HR pour le carbonate de calcium et la colle animale.
– E ≈ 1 000 MPa à 60 % HR pour carbonate de calcium et Plextol® B 500.

Les efforts et les déplacements que nous avons appliqués au modèle simulent l'action qui se manifeste lorsqu'une force de traction agit sur la peinture. Cette force peut être provoquée par une tension ou une variation de température ou d'humidité. Ils donnent des résultats que l'on peut analyser à l'aide des tracés de contraintes.

*Préparation au module d'élasticité élevé :* en imposant son comportement au système, elle absorbe les contraintes dues aux forces qui se développent dans la toile enduite. Sa faible capacité à se déformer se traduit par une *concentration des contraintes* dans les parties les plus minces de la couche que l'on aperçoit sur le tracé par les lignes de contraintes allant du vert pour les plus faibles au rouge pour les plus fortes. La probabilité de rupture sera donc localisée sur les crêtes avec d'importants risques de formation de fissures et de craquelures mécaniques. La toile est peu sollicitée, fig. 12.

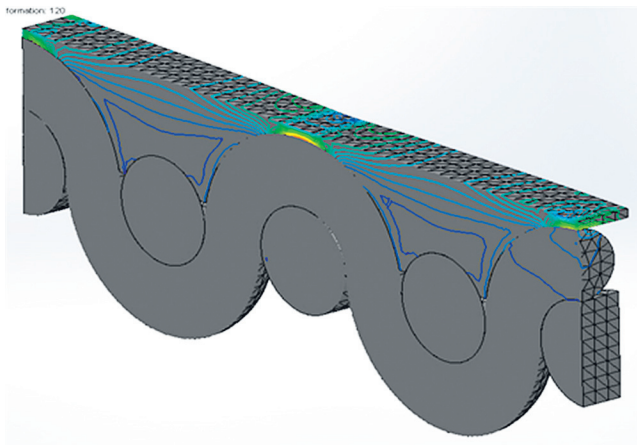



*Figure 12 : toile enduite d'une préparation au module élevé.*

*Préparation à faible module d'élasticité :* elle se déforme et suit l'allongement de la toile. C'est cette dernière qui supporte la plus grande partie des concentrations de contraintes qui se répartissent aux points de contact entre les fils et à l'interface entre la préparation et les fils de la toile. Ces zones de concentration de contraintes peuvent être responsables des pertes d'adhérence entre la toile et la préparation et de soulèvements de la matière picturale, fig. 13.

Dans les deux cas de figure, les sur-contraintes dues aux concentrations de contraintes dans une peinture vont être à l'origine de dégradations mécaniques.

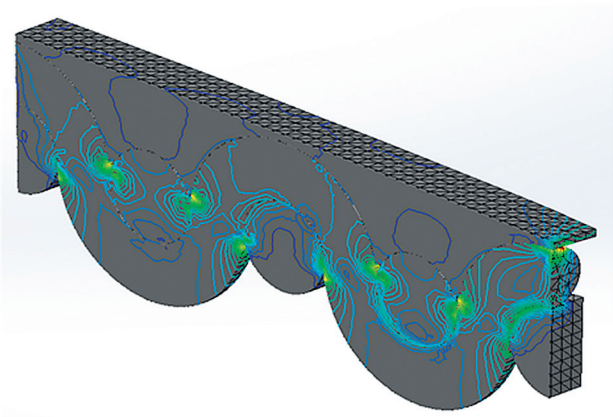


*Figure 13 : toile enduite d'une préparation au module faible.*

### *I-2-7 Caractéristiques des papiers et non tissés*

**Les papiers**

Les papiers comme les toiles sont des supports privilégiés dans le domaine de la création artistique. Le comportement du papier sec est lié comme la toile à sa structure. Le papier se présente comme un tapis de fibres cellulosiques obtenu manuellement ou par des procédés mécaniques, fig. 14, 15.

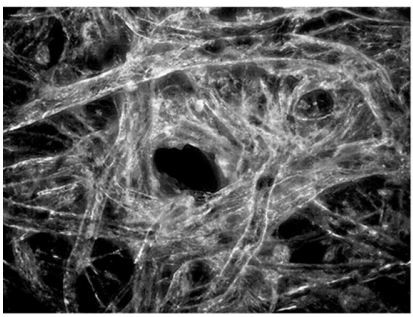


*Figure 14 : Arches 88 300.*

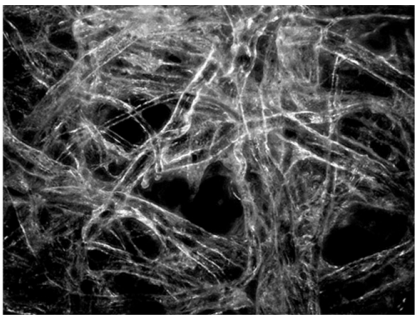


*Figure 15 : Velin cuve bfk rive 270.*

La plupart des papiers ont des propriétés mécaniques orthotropes. Lorsqu'on réalise un essai de traction[7] dans les sens – machine et travers – du papier, on obtient des courbes bien distinctes, fig. 16.

7. Ces essais sont réalisés dans des conditions normales : HR = 55 % et T = 20 °C.

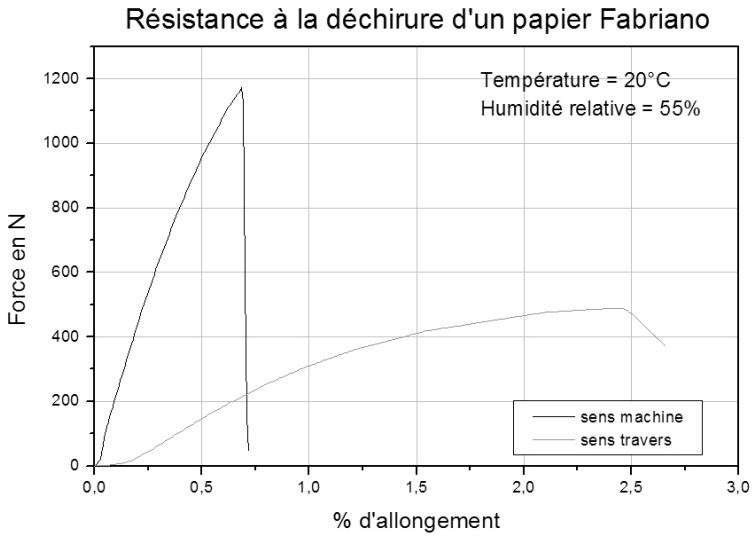



*Figure 16 : Courbes de traction d'un papier Fabriano.*

Dans cet exemple l'orthotropie[8] de ce papier Fabriano est bien marquée. La force de rupture du sens machine est 2,5 fois plus élevée qu'en sens travers et l'allongement à la rupture en sens machine est 3,4 fois moins important que dans l'autre sens. Autrement dit, le sens machine est plus résistant et moins déformable que le sens travers. Ces propriétés ne dépendent pas que de sa masse surfacique mais aussi de l'orientation des fibres, de leur distribution et de leurs qualités. Les résultats d'une étude[9] sur les propriétés mécaniques d'une série de papiers nous montrent la grande disparité des comportements des papiers testés. Les résultats sont regroupés dans le tableau ci-après.

On remarque qu'il n'y a pas de corrélation directe entre les masses surfaciques, les forces et les allongements à la rupture de l'ensemble de cette série papiers. La qualité, la longueur des fibres et le mode de fabrication sont donc les facteurs majeurs qui influencent les propriétés mécaniques des papiers.

Pour s'affranchir de la masse surfacique des papiers, la valeur de $R = \frac{F_{rupt}}{m_{surf}}$ (2) nous donne une valeur de la résistance réelle d'un assemblage de fibres *en N/g (par m²)*.

8. Se dit des matériaux qui présentent des propriétés mécaniques et physiques différentes dans deux directions perpendiculaires.

9. Étude non publiée faite par le LARCROA. Tous les essais ont été pratiqués dans les conditions normales de conservation HR = 55 % et T = 20 °C.

| Caractéristiques des papiers « arches rives » sens machine | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Nom | Composition | $m_s$ $g/m^2$ | Épais mm | $F_{rupt.}$ N | $\sigma_{rupt}$ MPa | $al._{rupt}$ % | $R = F_{rupt}/m_s$ $\frac{N}{g}$ par $m^2$ |
| Lavis fidélis arches | 25 % chiffon gélatiné | 220 | 0,34 | 402 | 47,2 | 5,09 | 1,82 |
| Vélin arches crème | Pur chiffon | 160 | 0,25 | 64,2 | 10,27 | 5,21 | 0,40 |
| Vélin arches blanc | Pur chiffon | 250 | 0,41 | 163 | 15,91 | 4,36 | 0,65 |
| Vélin pur fil johannot | Pur chiffon | 240 | 0,45 | 189 | 16,81 | 3,85 | 0,79 |
| Vélin cuve bfk rives | Pur chiffon | 270 | 0,38 | 177,22 | 18,65 | 4,82 | 0,65 |
| Arches 88 | Pur chiffon | 300 | 0,40 | 161,17 | 16,12 | 3,9 | 0,53 |
| Extra rugueux bfk rives | 75 % chiffon | 240 | 1,06 | 117,08 | 6,25 | 4,47 | 0,48 |
| Moulin du gué bfk rives gn | Pur chiffon | 270 | 1,05 | 175,58 | 6,98 | 3 | 0,65 |
| Ingres mbm arches blanc | 75 % chiffon gélatiné | 105 | 0,19 | 57,63 | 12,15 | 6,09 | 0,54 |
| Vergé arches crème | Pur chiffon | 120 | 0,16 | 58,98 | 14,75 | 5,6 | 0,49 |

Ramenées à une unité de masse, on peut comparer et regrouper la résistance des papiers en quatre catégories :

– Les papiers très résistants si R > 1,82 (N/g par $m^2$),
– Les papiers résistants si 0,8 < R < 1,82 (N/g par $m^2$),
– Les papiers moyennement résistants si 0,8 < R < 0,40 (N/g par $m^2$),
– Les papiers fragiles si R < 0,4 (N/g par $m^2$).

Les non tissés

Les non-tissés ont été introduits comme support pictural pour beaux-arts dans les années 1970. Ils sont enduits d'une préparation vinylique ou acrylique blanche et tendus sur un châssis. Les non tissés, à l'image des papiers, sont constitués d'une nappe de fibres synthétiques. Les méthodes de fabrication sont variées et ont une influence sur leur comportement mécanique. Les non-tissés retenus dans le domaine des beaux-arts sont à base de polyesters obtenus par voie fondue. Extrudés, les filaments étirés et refroidis sont déposés sur un tapis transporteur pour former un voile. Durant la formation du voile, les filaments adhèrent entre eux par fusion, on appelle ces textiles « spunbonded », fig. 17. La résistance de ces matériaux textiles est importante et leurs comportements sont orthotropes comme les papiers mécaniques, fig. 18.

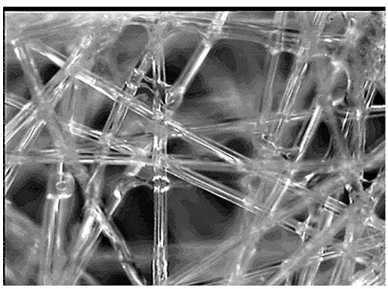


*Figure 17 : Filaments d'un non-tissé de polyester.*

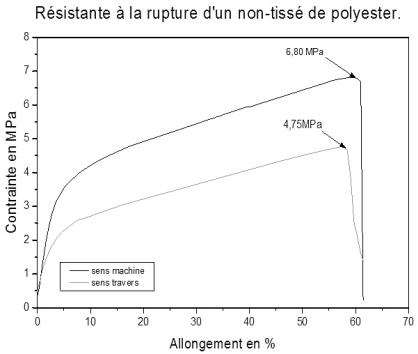



*Figure 18 : Courbes de traction d'un non-tissé de polyester.*

Les filaments de polyester par rapport aux fibres végétales ont, d'une part, un aspect plus régulier et plus uniforme et, d'autre part, ils sont hydrophobes.

Parallèlement à l'étude que nous avons faite sur les papiers Arches, une série de non-tissés de polyester Reemay® a été caractérisée par des essais de traction. Certains de ces produits textiles ont été utilisés comme support de peinture. Les résultats sont regroupés dans le tableau ci-après.

| Caractéristiques des non-tissés Reemay® sens machine | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Nom | Composition | $m_s$ $g/m^2$ | Épais mm | $F_{rupt.}$ N | $\sigma_{rupt}$ MPa | $al._{rupt}$ % | $R = F_{rupt}/m_s$ $\frac{N}{g}$ par $m^2$ |
| Reemay® 2040 | Polyester | 138 | 1,36 | 183,88 | 14,77 | 41,83 | 1,36 |
| Reemay® 2033 | Polyester | 100 | 0,43 | 136,85 | 12,73 | 48,28 | 1,37 |
| Reemay® 2024 | Polyester | 71 | 0,3 | 93,75 | 12,50 | 42,7 | 1,32 |
| Reemay® 2016 | Polyester | 46 | 0,25 | 52,94 | 8,47 | 37,24 | 1,15 |
| Reemay® 2011 | Polyester | 25 | 0,18 | 25,37 | 5,64 | 26,01 | 1,01 |
| Reemay® 2006 | Polyester | 20 | 0,18 | 19,79 | 4,40 | 30,51 | 0,99 |
| Reemay® 2055 | Polyester | 19 | 0,15 | 15,46 | 4,12 | 50,72 | 0,81 |
| Reemay® 2004 | Polyester | 14 | 0,13 | 16,72 | 5,14 | 54,34 | 1,19 |

Pour des grammages proches, le module d'élasticité d'un papier est plus élevé que celui des non-tissés. Les papiers sont plus rigides et se déforment moins.

À titre d'exemple citons :

– Ingres mbm arches blanc : E = 1 031 MPa et le Reemay® 2033 : E = 325 MPa

– Vergé arches crème : E = 1 100 MPa et le Reemay® 2040 : E = 383 MPa.

À masse surfacique comparable nous voyons que la résistance et l'allongement à la rupture des non-tissés sont supérieurs au papier. Ces deux matériaux ont des comportements mécaniques différents liés principalement à leur nature chimique et leur structure.

### *I-2-8 Influence des défauts dans les préparations et matières picturales*

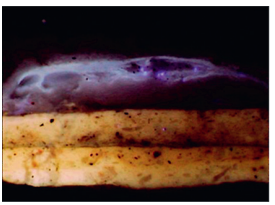
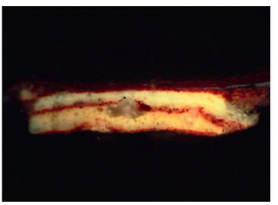
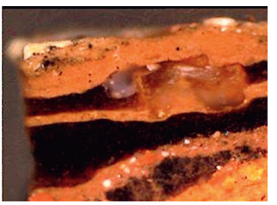
La théorie de la mécanique de la rupture développée depuis les années 1960 peut s'appliquer aux cas de l'endommagement d'une matière picturale. Elle a pour but d'étudier la formation et la propagation des fissures à l'échelle macroscopique. La naissance d'une fissure se situe toujours au voisinage d'un défaut.

Il existe principalement trois types de défauts :

• Les bulles d'air ou les vides provoqués lors de la mise en œuvre de la peinture, fig. 19,

• Les inclusions plus dures que le film de peinture lui-même, telles que des agglomérats de pigments ou charges, de gros cristaux de forme aciculaire, fig. 20,

• Des substances visqueuses, molles, résultats d'un mauvais séchage ou d'une incompatibilité de matériaux, fig. 21.

*Figures : La première micro-section montre des bulles, 19, la seconde une inclusion 20 et la dernière des matières molles, 21.*

Bien entendu pour que la fissure se produise il faut que les conditions d'endommagement soient atteintes. Rappelons que la matérialité d'une peinture réside dans l'équilibre des forces et des contraintes. La nature est faite de telle manière que l'intégrité de l'œuvre dépend de cet équilibre. À tout moment cet équilibre peut être rompu pour donner naissance à une rupture cohésive.

Au niveau des défauts, la *concentration des contraintes* est différente de la concentration nominale ou minimale qui s'exerce dans la partie du film sans défaut. Cette concentration s'évalue par le facteur de concentration de contrainte *Kt* qui dépend de la forme du défaut. Nous reviendrons plus en détail sur cette notion dans les chapitres suivants mais examinons ce qui se produit dans les cas les plus simples.

Sous l'effet d'une tension, la distribution des contraintes, *au niveau d'un vide*, est discontinue et les contraintes les plus élevées se situent à la limite du défaut. L'amplitude des contraintes répond à une loi hyperbolique, fig. 22.

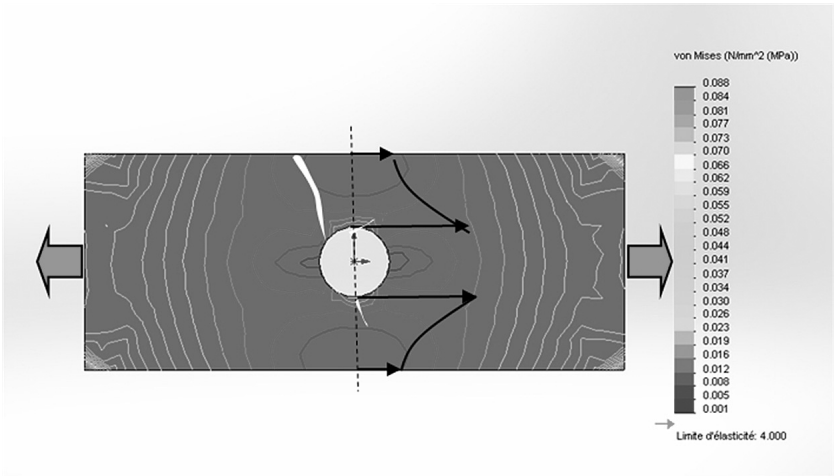



*Figure 22 : Distribution des contraintes autour d'un défaut constitué d'un vide.*

C'est au niveau des contraintes les plus élevées et en limite du défaut, que la formation de fissures est susceptible de se développer. Si par hasard une craquelure venait, en se propageant, se heurter au défaut, sa progression serait arrêtée. L'énergie de propagation de la fissure se dissiperait dans le vide.

Sous l'effet d'une tension, la distribution des contraintes, *au niveau d'un défaut mou,* est continue mais elles diminuent. Le défaut se déforme sous l'action des sollicitations venues de l'extérieur et limite le développement des contraintes, fig. 23.

Une fissure se propageant dans une couche picturale est stoppée par un défaut mou, limitant le préjudice.

Sous l'effet d'une tension, la distribution des contraintes, a*u niveau d'un défaut dur,* est continue mais elles augmentent. Le défaut en résistant à la déformation provoquée par les sollicitations extérieures amplifie les contraintes, fig. 24.

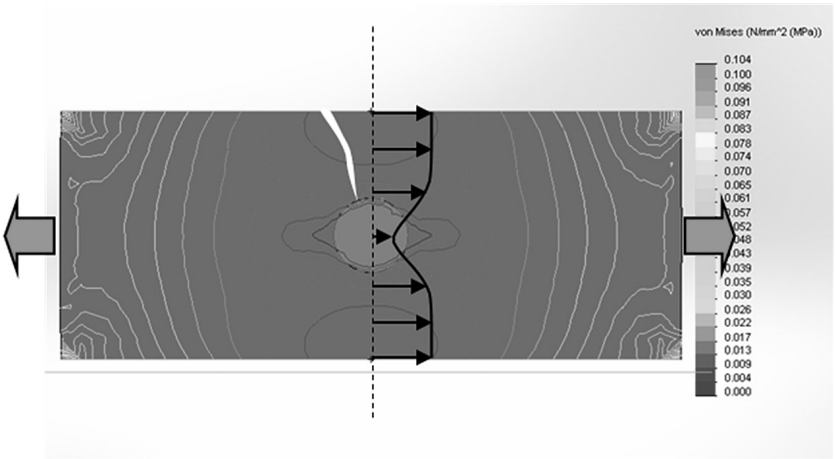



*Figure 23 : Distribution des contraintes autour d'un défaut constitué d'une particule molle.*

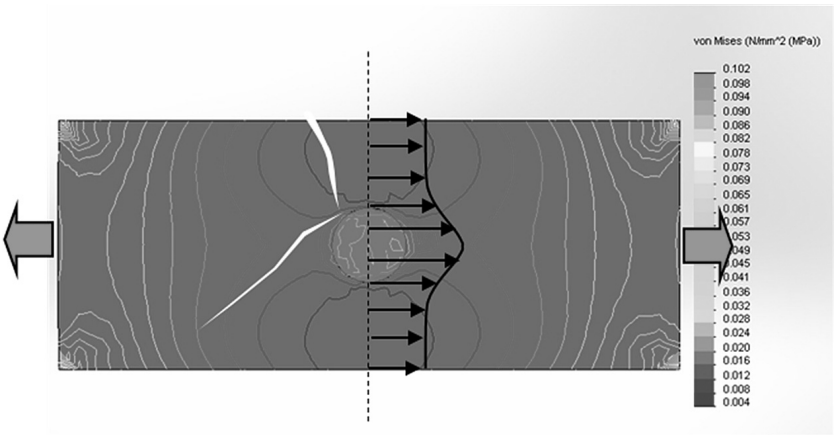



*Figure 24 : Distribution des contraintes autour d'un défaut constitué d'une particule dure.*

Une fissure se heurtant à un défaut dur sera déviée tout en continuant à se propager, fig. 25.

### *I-2-9 Influence de l'épaisseur de la matière picturale sur les contraintes*

En jouant avec la matière l'artiste crée des inégalités de surface. Dans une peinture l'épaisseur de la matière picturale n'est jamais uni-

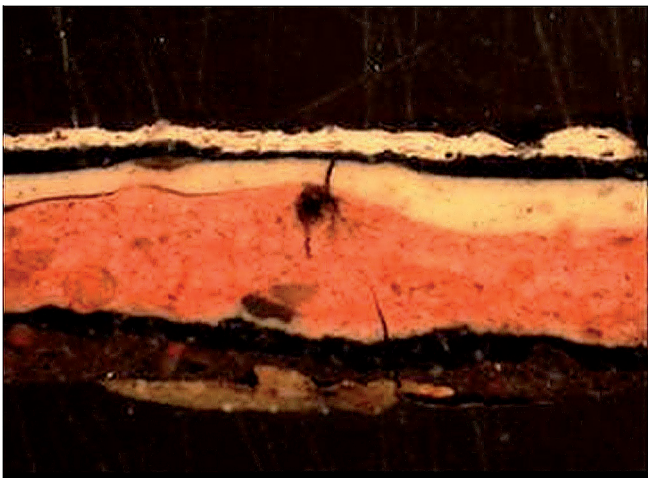


*Figure 25 : Micro section d'une peinture montrant la propagation d'une fissure.*

forme. Tant que les variations d'épaisseur sont négligeables par rapport à l'épaisseur moyenne de la matière picturale, elles n'auront pas d'incidence sur le vieillissement mécanique de la peinture. Elles commencent à être génératrices de concentration de contraintes à partir du moment où la surépaisseur ou « l'empâtement » est au moins trois fois supérieur à l'épaisseur moyenne. Une simulation a permis d'étudier le comportement d'une matière picturale d'épaisseur inégale[10].

Un empâtement a été modélisé en partant d'une peinture d'Olivier Debré « Longue traversée gris bleu à la tache verte » (1976, dim. 180/230 cm Musée des Beaux-Arts de Tours). Il reproduit la typologie des différents reliefs pouvant exister sur une peinture : fin, arrondi, creusé en v, allongé, écrêté, ponctuel et pointu. Une tension de 20 daN/m a été appliquée sur ce modèle de peinture et les contraintes ont été calculées par la méthode des éléments finis pour une humidité relative de 55 % et une température de 20 °C.

Le tracé obtenu, fig. 26, nous donne la distribution des contraintes de von Mises[11]. Les contraintes sont représentées par des plages de

10. Étude non publiée faite par LARCROA.

11. Le critère de von Mises est basé sur la théorie de Mises-Hencky, connue aussi sous le nom de la théorie de l'énergie de distorsion maximale. En utilisant les contraintes principales $\sigma_1$, $\sigma_2$, et $\sigma_3$, la contrainte de von Mises s'exprime comme suit : $\sigma_{\text{vonMises}} = \{[(\sigma_1 - \sigma_2)2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]/2\}^{(1/2)}$
La théorie prévoit qu'un matériau ductile commence à céder lorsque la contrainte de von Mises atteint un niveau égal à la contrainte limite. Dans la

couleurs ou chaque couleur correspond à une valeur de contrainte, (bleu contrainte mini, rouge contrainte maxi).

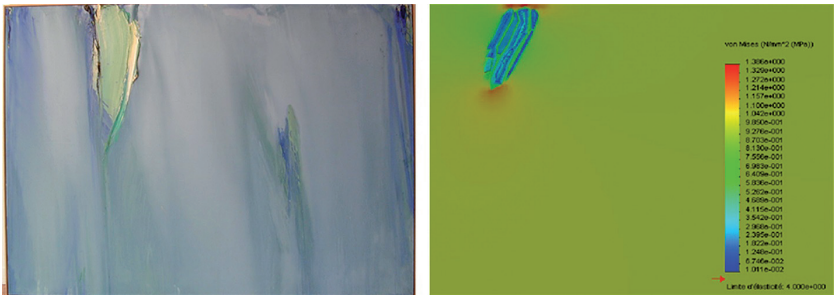


*Figure 26 : Modélisation d'un empâtement d'après une peinture d'Olivier Debré.*

Les tracés suivants, fig. 27 représentent un zoom sur une partie de l'empâtement, sans contrainte (a) et sous contraintes (b). On doit d'abord remarquer que les surfaces d'épaisseur égale ont des valeurs de contrainte pratiquement constantes, zones vertes. Les parties les plus épaisses de l'empâtement sont les moins sollicitées par la tension de la peinture, zones bleues.

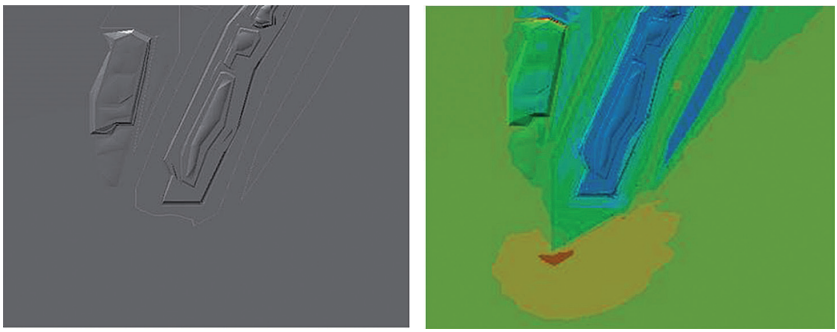


*Figure 27 : Distribution de contraintes autour d'un empâtement a-sans contrainte, b-sous contrainte*

Les concentrations de contraintes les plus importantes (zones rouges) sont localisées à la base de l'empâtement et aux angles. Les contraintes maximales ont des amplitudes de plus de 100 fois plus

plupart des cas, la limite d'élasticité est utilisée comme contrainte limite. Cependant, le logiciel nous permet d'utiliser la limite de rupture en traction ou de définir notre propre contrainte limite $\sigma v_{onMises} \geq \sigma_{limite.}$ La limite d'élasticité dépend de la température. La valeur spécifiée pour la limite d'élasticité doit tenir compte de la température du composant.

élevées que les contraintes minimales. Elles sont susceptibles de promouvoir des amorces de fissures qui risqueront de se développer en réseaux de craquelures.

La peinture à l'huile sèche progressivement par un processus chimique qui la transforme en un solide. La vitesse de durcissement d'un film dépend de son épaisseur, du type d'huile et la présence ou non de siccatif. Dans une peinture, les surépaisseurs et les empâtements seront plus lents à sécher. Ces phénomènes de concentration de contraintes ne peuvent donc apparaître et prendre toutes leurs intensités qu'à partir du moment où la matière picturale aura atteint un état vitreux.

Les risques de passer des conditions d'équilibre à celle de rupture, dépendent de l'état de contrainte dans lequel la peinture se situe par rapport à sa résistance.

### *I-2-10 Fluage des peintures*

Des artistes peintres comme Paul Rebeyrolle, Pierre Soulages, Jean Paul Riopelle, Eugène Leroy, fig. 28 et bien d'autres peintres ont travaillé la matière picturale non pas comme une peinture mais plutôt comme un bas-relief polychrome.



*Figure 28 : Détail de la face et du revers d'une peinture d'Eugène Leroy.*

Les effets esthétiques sont aussi surprenants que le comportement de ces peintures. Au bout d'un certain temps la matière picturale se durcit, de telle façon que la toile qui était supposée la maintenir ne joue plus qu'un rôle secondaire.

Soumises à leur propre poids, ces peintures empâtées ont une forte tendance à fluer, c'est-à-dire à s'écouler et se déformer dans le temps. Du point de vue mécanique, on appelle fluage la déformation que subit un matériau dans le temps, lorsqu'il est soumis à une charge constante. Dans le cas d'une peinture, c'est le propre poids de la matière picturale et de la toile qui joue le rôle de la charge constante.

Pour vérifier l'influence d'une charge sur le fluage d'une peinture à l'huile, nous avons soumis un échantillon de peinture de référence à des essais de fluage en traction en lui appliquant des charges de 6,2, 15, 22 et 45N pendant 10 heures, fig. 29.

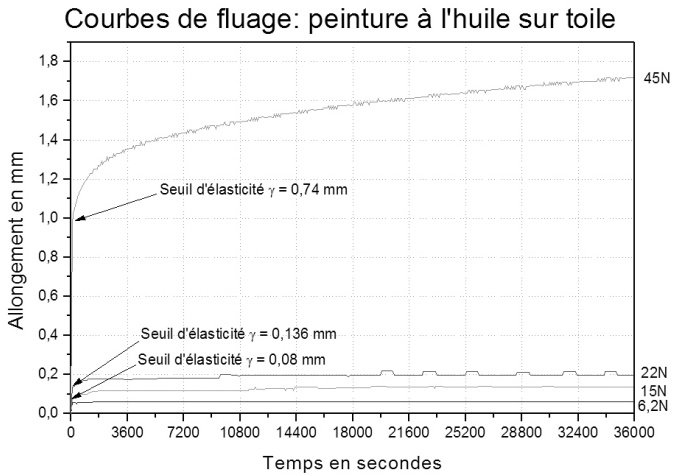



*Figure 29 : Fluage de la peinture de référence*

Sous une charge de 45 N ($\sigma$ = 9 MPa), la courbe présente un *seuil d'élasticité* à 0,74 mm (domaine élastique de la peinture), puis une *déformation différée* qui correspond au comportement *viscoélastique* de la peinture. Au bout de 10 heures la peinture continue de se déformer et on peut prévoir, pour une peinture épaisse, un écoulement de la matière ou une rupture du film de peinture à court terme.

Lorsque la charge est réduite à 22 N ($\sigma$ = 4,4 MPa), le *seuil d'élasticité* de la peinture est de 0,136 mm, puis une *déformation viscoélastique* de 0,183 mm en 20 min. Cette déformation se stabilise autour de 0,2 mm au bout de 10 heures. Un écoulement de la matière peut être envisagé à très long terme.

Pour une charge de 15 N ($\sigma$ = 3 MPa) *le seuil d'élasticité* de cette peinture est de 0,08 mm, la *déformation viscoélastique* au bout de 20 min est de 0,115 mm. Elle se stabilise au bout de 5 heures à une valeur de 0,135 mm. Une partie de la déformation de cette peinture est irréversible.

Enfin, sous une charge de 6,2 N ($\sigma$ = 1,24 MPa), la peinture ne subit qu'une déformation élastique inférieure à 0,056 mm sans *déformation viscoélastique*. Cette déformation élastique est réversible, quelle que soit la durée d'application de la force. Sous l'effet de cette charge, la peinture ne se déformera pas et ne se fissurera pas. Cette force correspond à la tension de 20 daN/m qu'on applique à une peinture lors de sa tension sur un châssis.

Constituées en majorité de matériaux hydrophobes, ces peintures sont très sensibles aux variations de température. Pour le vérifier nous avons fait une simulation sur un modèle d'empâtement numérique d'une peinture acrylique à différentes températures, lorsqu'elle est soumise à son propre poids, fig. 30.

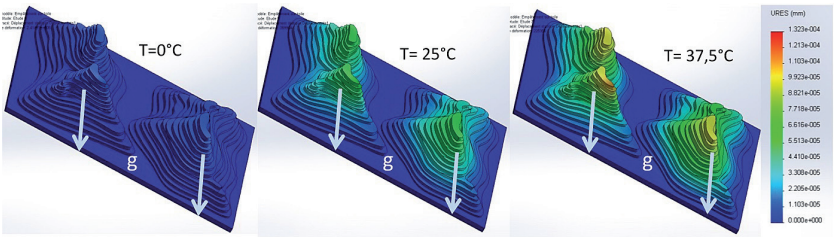



*Figure 30 : représentation de la déformation d'un empâtement d'une peinture acrylique sous l'effet de la chaleur.*

À T = 0 °C la température est en dessous de la température de transition vitreuse[12] (Tg). La matière picturale de cette peinture acrylique est dans un état vitreux. Dans ces conditions aucune déformation des empâtements n'est à prévoir.

À T = 25 °C la température est légèrement au-dessus de la Tg. La matière picturale se trouve dans un état viscoplastique. Dans ces conditions, la déformation maximale est de très faible amplitude, elle est de l'ordre de 0,0821 µm. Elle est négligeable.

À T = 37,5 °C la température est au-dessus de la Tg. La matière dans un état viscoplastique va se déformer pour atteindre une déformation maximale de 0,323 µm sous son propre poids.

En fait, lorsque la température est au-dessus de la Tg, la déformation croit de manière exponentielle en fonction de la chaleur, fig. 31.

On peut donc s'attendre à voir sur certaines peintures des empâtements s'écouler, si la température est trop élevée.

12. La température de transition vitreuse Tg est la température à laquelle un matériau change d'état. Il passe d'un état vitreux à un état viscoélastique ou viscoplastique selon le polymère.

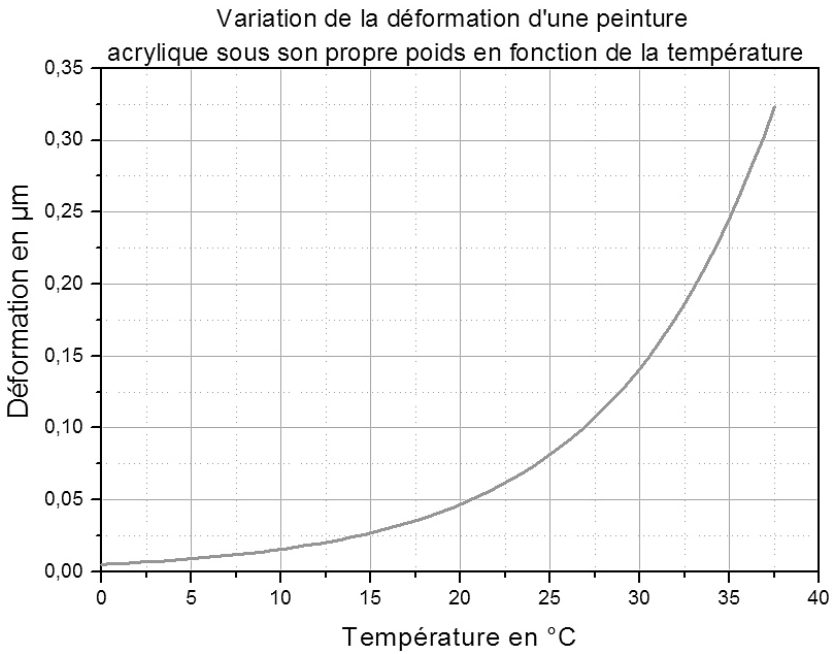



*Figure 31 : Courbe de l'évolution de la déformation d'un empâtement en fonction de la température.*

# II
# Climat

## II-1 Propriétés de l'air

Avant d'aborder le comportement mécanique des peintures vis-à-vis du climat, nous devons assimiler un certain nombre de notions pour admettre le rôle primordial que jouent l'humidité et la température dans les conditions de conservation.

### *II-1-1 Composition de l'air*

L'air pur est un mélange de gaz dont la composition moyenne est :

Azote : 78 %
Oxygène : 21 %
Argon : 0,9 %
Anhydride carbonique : 0,03 %
Hydrogène : 0,00005 %
Traces de néon, hélium, krypton, xénon
Vapeur d'eau : variable

Dans sa composition, un air sec contient deux types de gaz ; des gaz inertes comme l'azote, l'argon, l'hydrogène pour les plus importants et des gaz chimiquement réactifs comme l'oxygène et l'anhydride carbonique.

En réalité, l'air pur naturel contient toujours une certaine quantité de vapeur d'eau. C'est ce que l'on appelle un air pur humide. Dans les zones géographiques où cet air humide pur existe à l'état naturel, il contient toujours des pollens, des spores et de levures du fait de sa proximité avec une couverture végétale.

Aussitôt que l'on se rapproche des zones d'activité humaine, l'air devient impur. Cette situation fait suite à des rejets dans l'air, depuis des siècles, de toutes sortes de particules solides qui restent en suspen-

sion et des gaz. Tous ces éléments sont des contaminants qui contribuent à la pollution de l'air. La composition d'un air impur n'est pas constante, elle dépend du type d'activité humaine et/ou animale et de son environnement. Ces polluants, ajoutés à l'air qui nous environne, augmentent son agressivité vis-à-vis des biens culturels que l'on souhaite conserver.

La vapeur d'eau, à l'image de l'oxygène et l'anhydride carbonique, peut être considérée comme un gaz chimiquement réactif. L'air impur humide est par définition un paramètre de dégradation au même titre que le temps.

### *II-1-2 État gazeux, état vapeur*

Suivant l'usage généralement admis, on désigne par gaz tout corps existant dans cet état dans les conditions normales de température et de pression ($P_0$ = 1 atm, $T_0$ = 273,15 K ou 0 °C), et par vapeur, la phase gazeuse d'un corps solide ou liquide dans les mêmes conditions. Sous une pression donnée, un corps pur passe d'un état à un autre à une température établie et caractéristique.

On utilise alors, pour décrire l'état d'un gaz ou d'une vapeur, des grandeurs macroscopiques ayant un lien avec la nature microscopique du gaz, mais facilement mesurables. Les grandeurs que l'on retient en général sont :

– La pression P (ou p). Unité SI : le Pascal (Pa),
– La température[1] T (ou t ou θ). Unité SI : degré Kelvin (K),
– Le volume V (ou v). Unité SI le mètre cube ($m^3$),
– La quantité de matière n. Unité SI : la mole (mol.).

### *II-1-3 Pression atmosphérique*

L'air de l'atmosphère exerce une pression sur la surface de la terre, dite pression atmosphérique. La pression atmosphérique ou hydrostatique correspond au poids d'une colonne d'air s'exerçant sur une surface déterminée et s'étendant jusqu'au sommet de l'atmosphère.

La pression atmosphérique est au niveau de la mer et sous notre latitude de 1 atm soit $1{,}013.10^5$ Pa[2]. Pour ce qui est des zones urbaines à forte concentration culturelle, la valeur de la pression atmosphérique oscille entre 950 et 1 050 hPa.

La pression atmosphérique diminue avec l'altitude : elle est par exemple d'environ de 650 hPa dans le Musée national d'art de La

1. Dans cet ouvrage la température sera toujours exprimée en degré Celsius (°C), exemple 20 °C ≈ 293,15 K.

2. Le Pascal (Pa) : N/m.Unité de mesure légale. (1 hPa = 100 Pa). Le bar (bar) : 1 bar = $10^5$ Pa soit 100 000 Pa.

Paz (3 500 m), alors qu'au Musée d'art moderne de San Francisco elle est de 1 050 hPa.

*II-1-4 Pression de vapeur ou tension de vapeur de l'eau*

L'eau maintenue à une température de 20 °C dans un récipient ouvert va finir par disparaître. Ce phénomène est dû à son évaporation. Il se définit comme le passage de l'état liquide à l'état vapeur à une température inférieure au point d'ébullition. Autrement dit les molécules d'eau quittent le liquide pour se disperser dans l'environnement. Dans le cas où le récipient est fermé, les molécules de vapeur d'eau, qui se comportent comme un gaz, vont se heurter aux parois en provoquant une pression. Dans ce cas la pression augmente progressivement au fur et à mesure que le récipient se remplit de molécules à l'état gazeux. Quand la phase vapeur arrive à saturation, les molécules d'eau à l'état de vapeur retournent à l'état liquide. Dans ces conditions, la pression de la phase vapeur de l'eau est en équilibre avec la phase liquide, on dit que la *pression de vapeur est saturante.* Les proportions relatives de vapeur et de liquide ne varient plus. Autrement dit la vitesse d'évaporation = la vitesse de condensation.

*II-1-5 Air humide : mélange de gaz et de vapeur d'eau*

L'air est par nature hydrophile, en présence de vapeur d'eau il l'absorbe. L'air humide est donc un mélange d'air sec et de vapeur d'eau. On considère que le comportement de l'air humide peut être assimilé à celui des gaz parfaits. Dans ce cas, sa pression sera égale à la somme des pressions partielles de l'air sec et de la vapeur d'eau :

$$p_{ah} = p_{as} + p_{ve} \qquad (3)$$

Pour évaluer et contrôler la qualité de l'air, il est nécessaire de définir des grandeurs physiques qui caractérisent l'air. Ces notions vont être définies dans les paragraphes suivants.

## II-2 Caractérisation de l'air

L'air humide est parfaitement déterminé par sa température[3] et par la masse d'eau qu'il contient. La masse d'eau est définie par la

3. La température sèche est indiquée par un thermomètre ordinaire à l'abri du rayonnement solaire (quelquefois appelée température du bulbe sec). Elle est notée θs ou Ts. La température humide est indiquée par un thermomètre dont le bulbe, entouré d'une gaze mouillée, est balayé par de l'air en mouvement et protégé du rayonnement. À la surface du thermomètre à bulbe humide, l'eau en se vaporisant fait descendre la température. La température humide dépend de la température sèche de l'air et de l'humidité comprise dans cet air.

quantité de vapeur d'eau *(ve)* contenue dans un volume ou un poids d'air donné.

*II-2-1 Teneur en humidité* (x) *ou humidité absolue* (HA)

La teneur en humidité ou humidité absolue correspond à la quantité de vapeur d'eau contenue dans un volume donné d'air sec. Elle s'exprime en fonction des masses ou des pressions partielles selon :

La teneur en humidité *(x)* ou l'humidité absolue *(HA)*, est le rapport de la masse de vapeur d'eau et de la masse d'air sec :

$$HA = \frac{m_{ve}}{m_{as}} \quad (4) \qquad \begin{matrix} m_{ve} : masse\ de\ vapeur\ d'eau \\ m_{as} : masse\ d'air\ sec \end{matrix}$$

L'unité de l'humidité absolue est : kg de *ve*/kg d'air sec – ou – kg de *ve*/m$^3$ d'air sec[4].

Cette grandeur est indépendante de la température. Elle peut également s'exprimer en fonction des pressions de partielles

$$HA = 0{,}622(kg/kg) \times \frac{p_{ve}}{p_{atm} - p_{ve}}. \qquad (5)$$

Sans entrer dans le détail des calculs cette relation se déduit :

• des lois des gaz parfaits $pV = mR_pT$, $p_{ve}V = m_{ve}R_{p,ve}T$, $p_{as}V = m_{as}R_{p,as}T$

• du principe additif des pressions[5] dans un mélange $p_{ah} = p_{as} + p_{ve}$

• de la constante 0,6221 kg/kg qui s'obtient à partir des constantes particulières de l'air $\frac{R_{p,as}}{R_{p,ve}} = \frac{287{,}1}{461{,}5} = 0{,}6221\ kg/kg$

Dans un volume donné la valeur de l'humidité absolue *(HA)* reste constante quelle que soit la température de l'air, sous réserve que celle-ci reste supérieure à la température du point de rosée. Si dans ce volume on introduit de la vapeur d'eau sans modification de la température, l'humidité absolue augmente.

La connaissance seule de l'humidité absolue ne nous permet pas de connaître la capacité de l'air d'absorber de la vapeur d'eau contenue dans l'air humide.

4. Nota : Masse volumique de l'air sec $\rho_{\text{air sec}}$ = 1,29 kg/m$^3$ donc 1 kg d'air sec occupe 0,773 m$^3$.

5. Dans les études de climat qui concernent la conservation des œuvres d'art la pression de référence est la pression atmosphérique au niveau de la mer.

*II-2-2 La saturation* (S)

Pour chaque température, l'air sec est capable d'absorber une quantité maximum de vapeur d'eau. Cette quantité maximum de vapeur d'eau absorbée par l'air est appelée saturation *(S)*. Une vapeur est dite saturante lorsqu'en contact avec le liquide qui l'a formée elle retourne à l'état liquide. Les valeurs de saturation *(S)* de l'eau dans l'air en fonction des températures sont représentées par cette courbe, fig. 32.

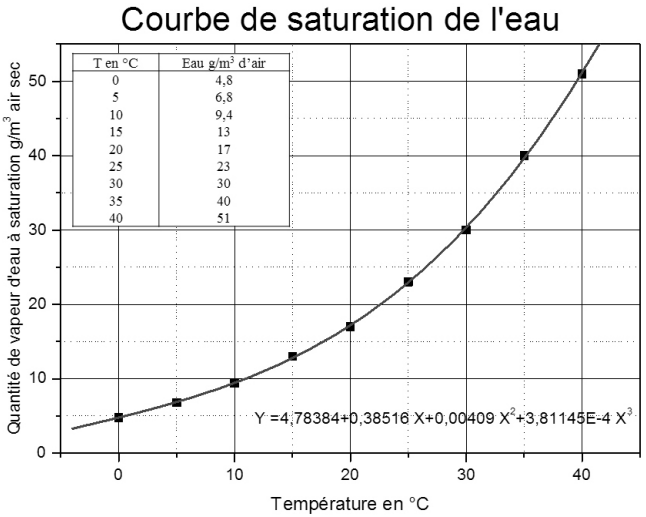



*Figure 32 : Courbe de saturation de l'eau.*

Cette courbe démontre que plus l'air est chaud, plus il a la capacité de contenir de la vapeur d'eau. Autrement dit, l'air chaud absorbe davantage de vapeur d'eau que l'air froid. Par exemple, 1 mètre cube d'air à 21 °C peut contenir 18,8 g de vapeurs d'eau. Le même mètre cube d'air à 0 °C ne contient plus que 4,8 g de vapeurs d'eau.

*II-2-3 Taux d'humidité relatif* ($\varphi$)*, Humidité Relative* (HR).

Pour une température donnée, le rapport entre la pression partielle de vapeur d'eau d'un mélange d'air humide et la pression partielle de vapeur d'eau à saturation[6], est appelé *taux d'humidité relatif* et s'exprime par :

$$\varphi = \frac{p_{ve}}{p_{ve,s}} \times 100 \qquad (6)$$

6. Notons que l'altitude n'altère pas la validité de $\varphi$ car $p_{ve}$ et $p_{ve,s}$ diminuent proportionnellement.

Ce taux d'humidité relatif *(φ)* est équivalent dans les conditions de pression atmosphérique normale, au rapport, entre la quantité de vapeur d'eau contenue dans de l'air humide *(HA)* et la quantité de vapeur d'eau à saturation *(S)*. Ce rapport est appelé *Humidité Relative (HR)* et s'exprime par

$$HR = \frac{HA}{S} \times 100 \qquad (7)$$

Comme la saturation dépend de la température, l'humidité relative *(HR)* varie avec la température. Le refroidissement ou le réchauffement d'une masse d'air humide représentent des changements d'état typiques faisant varier le taux d'humidité.

L'humidité absolue et l'humidité relative sont reliées par la relation suivante :

$$HA = 0{,}622 \times \frac{HR \times p_{vapsat}}{p_T - (HR \times p_{vapsat})} \qquad (8)$$

$$p_T = p_a + p_v \qquad (9)$$

*II-2-4 Température de rosée ou point de rosée.*

La vapeur d'eau contenue dans l'air ne peut passer de l'état de gaz à l'état liquide ou solide qu'à une certaine température sous une pression atmosphérique constante. Si la température de l'air décroît et que la vapeur d'eau atteint la saturation, l'excès de vapeur d'eau va se condenser sous forme de rosée, de brouillard, de pluie ou givre.

La température correspondant à un taux d'humidité de 100 % est appelée *température de rosée ou point de rosée*.

Dans un volume, l'humidité absolue reste constante tant que la température ne descend pas en dessous de la température de rosée. Dès que le point de rosée est atteint il y a condensation d'eau et les humidités absolue et relative de l'air ambiant diminuent.

Pour illustrer ce propos donnons deux exemples :

1- Lors d'un hiver rigoureux, un atelier d'artiste, chauffé, atteint dans la journée une température de 15 °C pour une humidité relative de 50 %. Dans ces conditions la température de rosée est de 4,67 °C. La nuit, le chauffage coupé, la température est capable de descendre à 4 °C. Il se produit alors dans l'atelier un phénomène de condensation.

2- Dans une salle d'exposition située en Martinique, la température est maintenue à 23 °C pour une humidité relative de 80 %. Dans ces conditions la température de rosée est de 19,37 °C. On introduit dans cette salle une caisse isotherme contenant une sculpture en bronze. La température intérieure de la caisse et de la sculpture est de 18 °C. À l'ouverture de celle-ci la sculpture de bronze se recouvrira d'un film d'eau.

Quand le point de rosée est en valeur négative, c'est le cas par exemple d'une température de 12 °C pour une HR = 43,6 % ou 9,9 °C pour une HR = 50 %, l'eau condensée formera du givre sur les surfaces.

*II-2-5 Méthodes de calcul des paramètres climatiques*

L'air humide étant un mélange de gaz-vapeur d'eau, l'étude de ses caractéristiques est appelée « Psychrométrie ».

Pour accéder aux paramètres climatiques nous disposons de plusieurs moyens. Nous avons un outil mathématique issu d'une série de lois concernant les gaz parfaits que l'on a entrevu précédemment. Il permet d'obtenir des résultats précis, au prix d'un travail fastidieux si l'on ne dispose pas d'un programme informatique de calcul. Il existe également de petits logiciels qui permettent d'obtenir des résultats précis rapidement. Cela sous-entend d'installer le logiciel et d'avoir son ordinateur sous la main. Simple et efficace, l'utilisation des tables de données climatiques, est facile, à condition qu'il ne soit pas nécessaire de faire des calculs d'interpolation pour obtenir des valeurs qui ne figurent pas dans les tableaux.

Enfin, un outil simple qui nous semble adapté pour accéder très rapidement aux principaux paramètres climatiques est le diagramme psychrométrique, fig. 33.

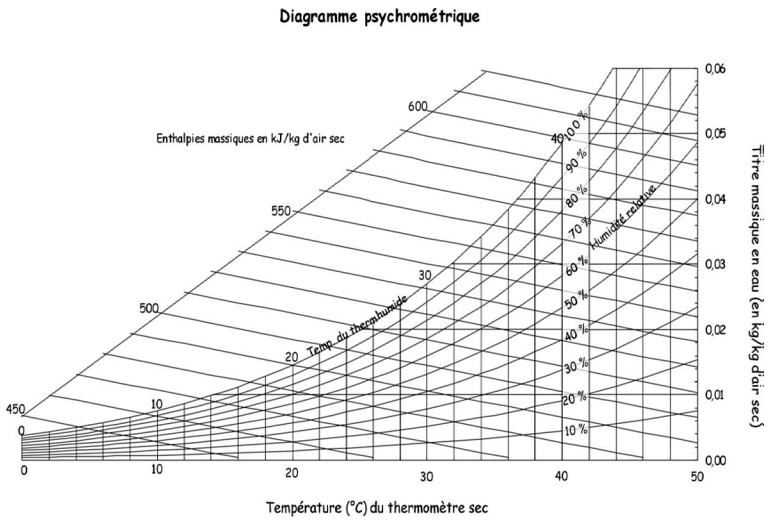



*Figure 33 : Diagramme psychrométrique.*

Ce diagramme est constitué d'un ensemble de courbes de référence obtenues à partir des relations que nous avons vues ci-dessus à une pression atmosphérique de 1 013 hPa. En abscisse nous avons

l'axe des températures, en ordonnée l'axe des humidités absolues. Les courbes représentent, chacune, une valeur isométrique de l'humidité relative.

Connaissant l'humidité relative et la température, on peut en déduire l'humidité absolue. En se fixant une humidité absolue et une température on peut obtenir une humidité relative. Enfin en faisant varier les paramètres, on peut calculer l'énergie nécessaire pour passer d'un état 1 à un état 2.

Prenons l'exemple d'une salle d'exposition vide, régulée à 50% HR et une température de 20 °C. Chaque matin avant l'ouverture, le personnel d'entretien ouvre une fenêtre pour l'aérer et la température descend à 18 °C. Quelle est l'humidité relative si on considère que l'humidité absolue reste constante ?

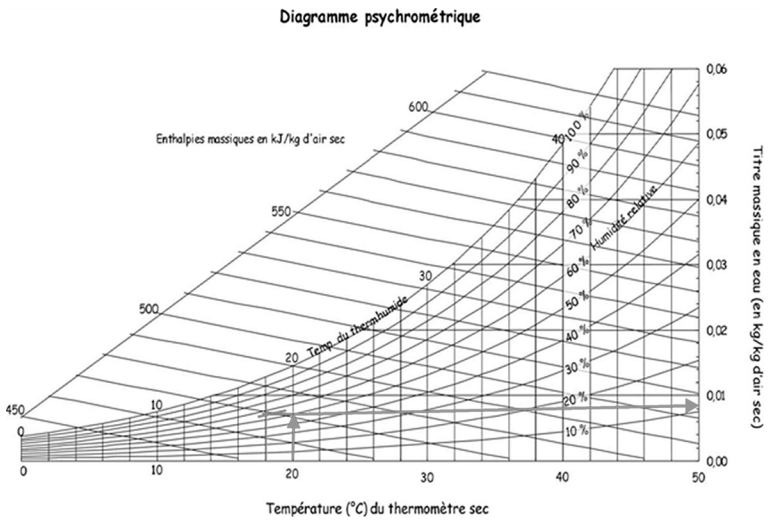



*Figure 34: Utilisation d'un diagramme psychrométrique*

Fig. 34, en partant de 20 °C, la flèche coupe la courbe de *HR* = 50%. Au point d'intersection, la projection sur l'axe des y, nous donne une valeur de *HA* = 0,00724 $kg_{(ve)}/kg_{air\ sec}$.

Si on part du principe que *HA* est constante, la projection de cette valeur va croiser la température de 18 °C au niveau de la courbe de *HR* = 57%. Par conséquent le simple fait d'ouvrir une fenêtre dans une pièce modifie l'humidité relative.

L'utilisation de ce diagramme est simple et pratique. La précision des résultats obtenus nous est largement suffisante.

### *II-2-6 Équilibre hydrique entre air humide et matériaux hydrophiles*

Une bonne partie des matériaux constitutifs des peintures d'art moderne et contemporain sont à base de matériaux hydrophiles. Les toiles de fibres naturelles (lin, chanvre, jute, coton), le bois des châssis ou des panneaux, les papiers, les cartons et bien d'autres matériaux entrant dans la sphère de l'artiste sont des composés hydrophiles de mêmes que certains liants et colles.

Il va s'établir un équilibre entre la vapeur d'eau contenue dans l'air des lieux de conservation et les matériaux hydrophiles des œuvres. Étant donné que l'air sec se comporte lui-même comme un matériau hydrophile, cet équilibre sera constamment remis en question lorsque les conditions climatiques changent. À l'équilibre les échanges de molécules d'eau entre matériaux hydrophiles et air sec sont incessants.

Les matériaux hydrophiles sont caractérisés par leur -*Teneur en Humidité à l'Equilibre, (T.H.E)*[7]. Autrement dit, la sensibilité à l'eau des matériaux hydrophiles est définie par le pourcentage d'eau qu'ils sont capables d'extraire de l'air humide. Ce dernier sert en quelque sorte de réservoir. Cette capacité d'absorber ou désorber de l'eau est déterminée par l'isotherme d'absorption d'eau.

Nous avons ici trois isothermes d'absorption en eau des matériaux les plus utilisés dans le domaine de la peinture d'art moderne et contemporaine. Il s'agit d'isothermes d'absorption du papier[8], de la cellulose[9] et de la gélatine, fig. 35.

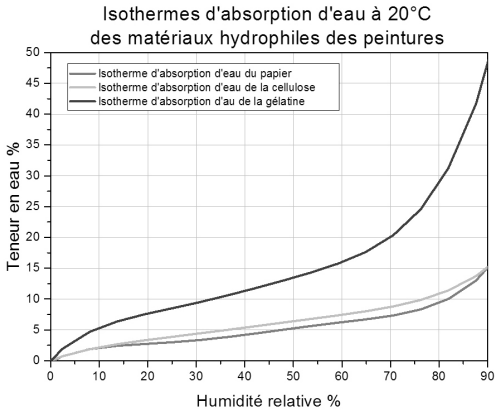



*Figure 35 : Isothermes d'absorption.*

7. THE s'exprime en % ou en g/kg de matériau anhydre.
8. AT Ahlen 1969.
9. M. Chêne, N. Drisch, *La cellulose*, Paris, PUF, coll. « Que sais-je ? », 1967.

Ces courbes sont de véritables outils permettant d'évaluer les quantités d'eau absorbées par les constituants hydrophiles d'une peinture en fonction de l'humidité relative.

À titre d'exemple et pour illustrer le fonctionnement des échanges hydriques entre une œuvre et son environnement, nous avons choisi une peinture à la colle sur papier de 1m/1,20 m, exposée dans une salle de 360 $m^3$. Cette peinture est constituée d'un papier Canson de masse surfacique de 125 $g/m^2$, d'un encollage à la colle animale de 4,16 $g/m^2$ et d'une peinture à la colle composée de 8,41 $g/m^2$ (pigments) + 16,83 $g/m^2$ (colle). Toutes ces masses surfaciques sont obtenues dans les conditions standard, c'est-à-dire HR=50% et T=20 °C. Seuls le papier et la colle animale ou gélatine sont hydrophiles, mais leurs capacités d'absorption en eau sont différentes.

Le matin avant l'ouverture du musée, l'humidité relative est de 65% et la température de 18 °C. Dans l'après-midi la température augmente pour atteindre 22,5 °C. En utilisant le diagramme psychrométrique, on trouve que la valeur de l'humidité relative *(HR)* dans la salle est égale à 50%. Que s'est-il passé au niveau des échanges hydriques entre le papier, la colle animale et l'humidité de la salle ?

Considérons les différents états de l'environnement. Un état initial *(T = 20 °C, HR=50%),* un état 2 ou l'humidité dans la salle est de *T = 18 °C, HR = 65%* et enfin un état 3 quand on passe à *50% HR* pour une température de 22,5 °C.

À 50% d'humidité relative on obtient grâce aux isothermes d'absorption d'eau, les teneurs en eau suivantes :

– pour le papier $T^{50\,\%}_{eau\ papier} = 5{,}16\,\%$

– pour la gélatine $T^{50\,\%}_{eau\ gélatine} = 13{,}48\,\%$

À 65% de HR on obtient par le même moyen les valeurs de teneurs en eau suivantes :

– pour le papier $T^{65\,\%}_{eau\ papier} = 6{,}77\,\%$

– pour la gélatine $T^{65\,\%}_{eau\ gélatine} = 17{,}6\,\%$

La masse de matière hydrophile est proportionnelle à leur surface :

– pour le papier $M^{50\,\%}_{papier} = 125\ g/m^2 \times 1{,}2\ m^2 = 150\ g$

– pour la colle

$M^{50\,\%}_{gélatine} = \left(4{,}16\ g/m^2 + 16{,}83\ g/m^2\right) \times 1{,}2\ m^2 = 25{,}19\ g$

Entre 50% et 65%, l'absorption ou la désorption d'eau de chaque matériau est :

– pour le papier

$M^{65\,\%-50\,\%}_{eau\ papier} = 150\ g \times (6{,}77\,\% - 5{,}16\,\%) = 2{,}41\ g\ d'eau$ soit 1,6%

– pour la colle $M^{65\,\%-50\,\%}_{eau\ gélatine} = 25{,}19\ g \times (17{,}60\,\% - 13{,}48\,\%) = 1{,}03\ g$ soit 4,08 %.

Dans une salle d'exposition qui présente de larges baies vitrées exposées au sud, ce cycle de variations de températures et d'humidités est tout à fait probable. Cette répétition de variations d'humidité entraîne, dans la colle mais aussi dans le papier, des mécanismes d'absorption/désorption qui se traduisent par des phénomènes de gonflement/retrait. Notons aussi que la colle absorbe environ 4 % de sa masse d'eau et le papier 1,6 %. Autrement dit la colle est capable d'absorber 2,5 fois plus d'eau que le papier. Sans anticiper sur les chapitres suivants nous pouvons imaginer les conséquences qu'entraîne à plus ou moins long terme cette propriété.

Pour maintenir cette salle, dont le volume est de 360 $m^3$ dans des conditions souhaitables de 60% HR à 20 °C, il faudra lui apporter une certaine quantité de vapeur d'eau.

En utilisant le diagramme psychrométrique on obtient :

– à 50% d'humidité relative et 22,5 °C l'humidité absolue est : $HA^{50\,\%}_{22,5\ ^oC} = 0{,}00845\ kg/kg_{air}$

– à 60% d'humidité relative et 20 °C : $HA^{60\,\%}_{20\ ^oC} = 0{,}00870\ kg/kg_{air}$

L'apport de vapeur d'eau nécessaire si la pièce est vide.

$$Q_{vap\ eau} = 0{,}00870 - 0{,}00845 = 0{,}00025\ kg/kg_{air}\ soit\ 0{,}116\ kg$$

L'absorption d'eau entre 50% et 60% des matériaux hydrophiles :

– pour le papier :

$m^{60\,\%-50\,\%}_{eau\ papier} = 150\ g \times (6{,}5\,\% - 5{,}16\,\%) = 0{,}00167\ kg\ d'eau$

– pour la colle : $m^{60\,\%-50\,\%}_{eau\ gélatine} = 25{,}19\,g \times (16\,\% - 13{,}48\,\%) = 0{,}00063\,kg.$

Soit un total de : $m_{eau\ absorbée} = 0{,}00063 + 0{,}00167 = 0{,}00230\ kg$ pour une peinture.

Si le nombre de peintures est de 50 :

$m_{eau\ absorbée} = 0{,}00230 \times 50 = 0{,}115\ kg$

Si la salle est vide, la quantité d'eau nécessaire pour conserver une humidité de 60 % à 20 °C est de 0,116 kg d'eau sous forme de vapeur. Si la salle contient une cinquantaine de peintures à la colle sur papier, il faudra doubler la quantité d'eau pour conserver l'humidité recommandée. ***Il ne faut donc jamais sous-estimer le rôle du contenu dans l'évaluation des facteurs de conservation des œuvres.***

La régulation climatique d'une salle d'exposition n'est jamais aisée car de nombreux facteurs de perturbation interviennent constamment. La présence du public n'est pas le facteur le plus simple à gérer car il a un impact direct sur le climat, le nombre des visiteurs et leur fréquence sont aléatoires. Il agit à la fois sur la température et sur l'humidité.

Du point de vue de la chaleur, nous savons qu'un individu de taille moyenne, au repos, émet une chaleur sous forme d'une puissance thermique égale environ 100 W.

En partant de la formule :

$$E_{thermique} = m_{air} \times (t_{finale} - t_{initiale}) \qquad (10)$$

L'énergie thermique d'un homme au repos pendant 10 minutes.

$$P = \frac{E_{therm}}{s} \quad (11) \qquad P = 100\ W,\ t = 10\ min\ soit\ 600\ s$$

est donc de $\underline{E = 60\ kj}$

La masse d'air de la salle de 360 m$^3$ est de $m_{air} = 465\ kg$

La capacité massique de l'air humide: $c_{air} = 1{,}012\ kJ/kg.°C$

La température de la pièce est 20 °C.

Pour 1 personne la température augmente de:

$$t_{finale} = \frac{E_{therm}}{m_{air} \times c_{air\ hum}} + t_{initiale} \Rightarrow t_{finale} = 20{,}12\ °C \text{ soit } 0{,}12\ °C$$

Si le nombre de personnes est 10, la température finale atteint: $t_{finale} = 21{,}2\ °C$

En appliquant la relation des échanges thermiques, la présence d'une personne devant une peinture pendant 10 minutes peut faire augmenter la température de 0,12 °C.

Si la présence d'une personne est négligeable, ce n'est plus le cas pour dix personnes. L'augmentation de la température de 1,2 °C est responsable d'une chute d'humidité relative de 3 %.

Simultanément, les personnes produisent de la vapeur d'eau via la respiration et la transpiration. Elle est évaluée pour le même individu à 110 g/h. Supposons que pour voir cinquante chefs-d'œuvre de la peinture moderne et contemporaine dans une même salle le visiteur reste 1 heure.

En partant des conditions standards de conservation : $HR$ = 50 % et $T$ = 20 °C, $HA = 36\ g/kg_{air}$

La quantité de vapeur d'eau contenue dans la salle de 360 m$^3$ : $Q_{vap.eau} = 36\ g/kg_{air} \times 465\ kg_{air} = 3\ 422\ g_{vap.d'eau}$

Si on ajoute les 110 g produits par le spectateur, $3\ 422 + 110 = 3\ 532\ g \Rightarrow HA = 7{,}59\ g/kg_{air}$, l'humidité relative augmente de moins de 1 % soit environ 51 %.

Si le groupe est constitué de 10 personnes l'humidité absolue devient

$$3\ 422 + 1\ 100 = 4\ 522\ g \Rightarrow HA = 9{,}72\ g/kg_{air}$$

Ce qui correspond à une humidité relative de plus de 67 % à 20 °C

Si on tient compte de l'augmentation de la température due à la présence du groupe (1,2 °C) l'humidité relative est de 62 %.

Cette élévation de 12 % de l'humidité relative a pour effet d'augmenter la teneur en eau dans la peinture de 0,963 %, ce qui a des conséquences sur sa conservation.

Cette démonstration numérique tend à prouver que le contrôle de l'humidité relative et de la température est difficile à gérer dans les lieux publics, où les aménagements ne sont pas toujours adaptés et ou le flux des visiteurs est irrégulier et discontinu. Face à ces variations de l'humidité relative et de la température, les matériaux des peintures réagissent, bien avant que les centrales de traitement de l'air *(CTA)* aient eu le temps de réguler l'air. Par conséquent, il serait salutaire de prendre conscience que les œuvres se trouvent constamment sollicitées, quels que soient les dispositifs existants.

Pour minimiser ces variations climatiques, il serait nécessaire de prendre quelques dispositions élémentaires d'aménagements des salles et surtout d'imposer une régulation du flux des visiteurs dans les lieux d'exposition publics et privés.

## II-3 Le climat dans les lieux de conservation des peintures d'art moderne et contemporain

À Paris, à Bruxelles comme à Berlin et partout ailleurs on se soucie beaucoup dans les musées d'art moderne et contemporain de l'environnement climatique, fig. 36.







*Figure 36 : Avis et avertissements.*

En fait, toutes les études publiées[10] sur ce sujet conduisent à retenir, comme valeurs représentant les meilleures conditions de

10. Plenderleith H.J. and Philippot P., « Climatologie et conservation dans les musées », Thomson G., « The museum environment », 1978.

conservation, 55 % ± 5 % de HR pour une température de 20 °C ± 2 °C. Néanmoins, depuis une trentaine d'années dans les pays occidentaux, les consignes des valeurs climatiques ont beaucoup évolué. Dès les années 1990, suite à une poussée de conscience vis-à-vis des économies d'énergie propre à l'ère écologique, les musées et les institutions abritant des collections ont cherché à faire des compromis dans la gestion du climat de leur établissement[11]. Malheureusement, les scientifiques dans ce domaine n'ont pas réussi à s'accorder pour trouver les valeurs d'humidité et de température universelles faisant foi dans la gestion de tous les musées.

Le guide de l'ICC propose plusieurs niveaux de qualité de l'air pour les musées. Le niveau « AA » conserve les mêmes impératifs que précédemment 55 % ± 5 % HR et 20 °C ± 2 °C, alors que le niveau « A » propose des conditions beaucoup moins rigoureuses 50 % ± 10 % HR et un réglage saisonnier de la température pouvant aller de 15 °C à 25 °C. En 2004, le Smithsonian Institute[12] proposait un climat fixé à 45 % ± 8 % HR avec une température de 21 °C ± 2 °C. Par rapport aux consignes et recommandations antérieures, les plages d'humidité et de température se sont élargies en vue d'économiser de l'énergie et de diminuer les coûts de fonctionnement. En appliquant ses consignes à ses propres immeubles, le Smithsonian Institute a fait une économie en énergie de 17 % sur le coût de fonctionnement du conditionnement d'air.

En France et en Europe, dans les établissements conditionnés abritant des collections, les consignes climatiques respectent dans la plupart des cas les recommandations européennes, qui sont alignées sur les valeurs du guide de l'ICC niveau « AA » – 55 % ± 5 % et 20 °C ± 2 °C[13]. Ces recommandations établies par des spécialistes des musées ont été élaborées en respectant le confort du public et des employés et la capacité des *centrales de traitement de l'air* (CTA) à maintenir ces consignes. Ces conditions de conservation couvrent sans discernement la conservation de tous les types d'objets entrant dans une collection, ce qui n'est pas le cas des réserves et des magasins d'archives.

En examinant le comportement des salles d'exposition à l'intérieur d'un musée, d'une fondation, d'une galerie, il est rare de trouver une parfaite homogénéité de l'humidité et de la température à l'intérieur d'une même salle et entre les différentes salles d'exposition.

11. Michalski S., « Humidity : a discussion of correct/uncorrect values », 1993.

12. Erhart D. and Mecklenburg M.F, « Applying science to the question of museum climate », 2007, Mecklenburg M., « Determining the Acceptable Ranges of Relative Humidity and Temperature in Museum and Galleries ».

13. Fiches Direction des Musées de France Climat 1998.

*II-3-1 Cas d'un bâtiment des années 1980 avec une extension contemporaine*

Le LaM est situé à Villeneuve d'Ascq. C'est un bâtiment de Roland Simounet (1983) qui abrite une magnifique collection d'art moderne et contemporain. En 2010 une extension a été construite par Manuelle Gautrand pour y exposer les œuvres d'art brut de la donation l'Aracine. Les bâtiments sont implantés dans un parc de verdure. Le musée est climatisé comme en témoigne la présence des bouches de soufflage et de reprise d'air dans les salles. Les relevés d'humidité et de température ont été notés à partir des enregistreurs installés dans chaque salle, fig. 37. L'occupation des salles est d'environ de 6 à 10 visiteurs en flux continu.

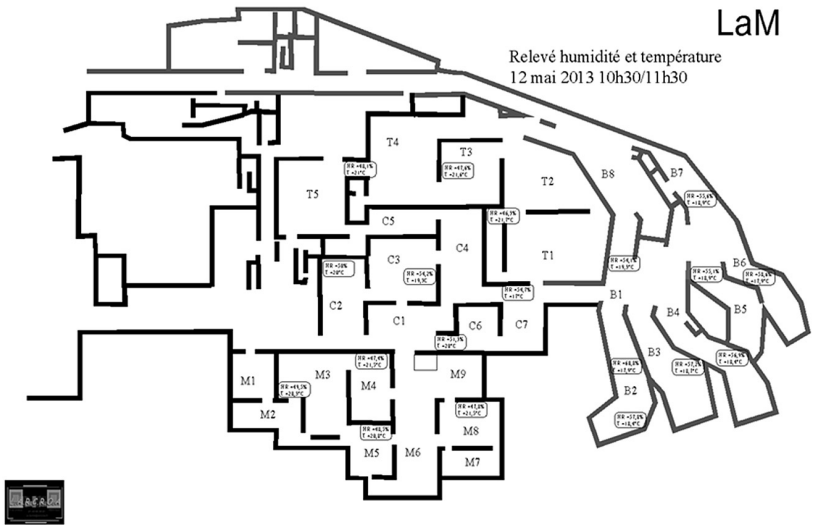



*Figure 37 : Plan du LaM : valeurs de températures et humidités.*

Les relevés de HR et de T sont regroupés dans le tableau suivant :

| | HR % | | | T °C | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Mini | Max | Moyenne | Mini | Max | Moyenne |
| Salles M | 47 | 49,5 | 48,3 | 20,3 | 21,5 | 21,02 |
| Salles C | 50 | 54,7 | 52,55 | 19 | 20 | 19,57 |
| Salles T | 46,3 | 48,1 | 47,33 | 21 | 21,7 | 21,43 |
| Salles B | 54,1 | 60,8 | 57,01 | 17,9 | 19,3 | 18,49 |

Dans l'ensemble des salles M où sont regroupés les peintures d'art moderne, l'humidité relative varie de 47,4 % à 49,5 % et la température de 20,3 °C à 21,5 °C. Dans les salles de C1 à C7 où sont rassemblées les œuvres d'art contemporain, l'humidité relative varie de 50 % à 54,7 % et la température de 19 °C à 20 °C, enfin dans les salles T, réservées aux expositions temporaires l'humidité varie de 46,3 % à 48,1 % et la température de 21 °C à 21,7 °C.

Dans ces trois groupes de salles appartenant au bâtiment de Simounet on peut remarquer que :

- Les écarts d'humidité et de température sont faibles.
- L'humidité est plus élevée à proximité des murs de la façade sud.
- Le groupe des salles C, délimité au nord par les salles T et au sud par les salles M ont des humidités plus élevées et des températures plus faibles.

Dans le groupe des salles B où est regroupé l'art brut, l'humidité relative varie de 54,1 % à 60,8 % et la température de 17,9 °C à 19,3 °C. Les écarts d'humidité et de températures sont importants. C'est dans ce groupe de salles que le climat est le moins stable malgré une moyenne respectant les recommandations de conservation.

L'analyse climatique des salles de ce musée met en évidence la difficulté d'obtenir un climat parfaitement homogène. Elle est liée à la situation géographique des salles au sein du musée et au type de bâtiment. La présence de ce faible flux de visiteurs n'a pas d'impact sur le climat.

### *II-3-2 Cas de réhabilitation et de modernisation d'un ancien bâtiment.*

Le musée Magritte est installé depuis 2009 dans l'hôtel néo-classique Altenloch situé au cœur de Bruxelles. Le bâtiment a fait l'objet d'une totale réhabilitation. La collection est présentée sur trois étages. Les salles sont distribuées autour d'un patio permettant l'accès aux étages, soit par ascenseur, soit par des escaliers. Le musée est climatisé, les salles sont séparées par des cloisons ouvertes laissant à chaque niveau un espace dégagé. Les mesures sont faites avec un thermo-hygromètre[14] portable à différents points des salles, fig. 38.

14. M0297 Extech instrument de Flir compagny.

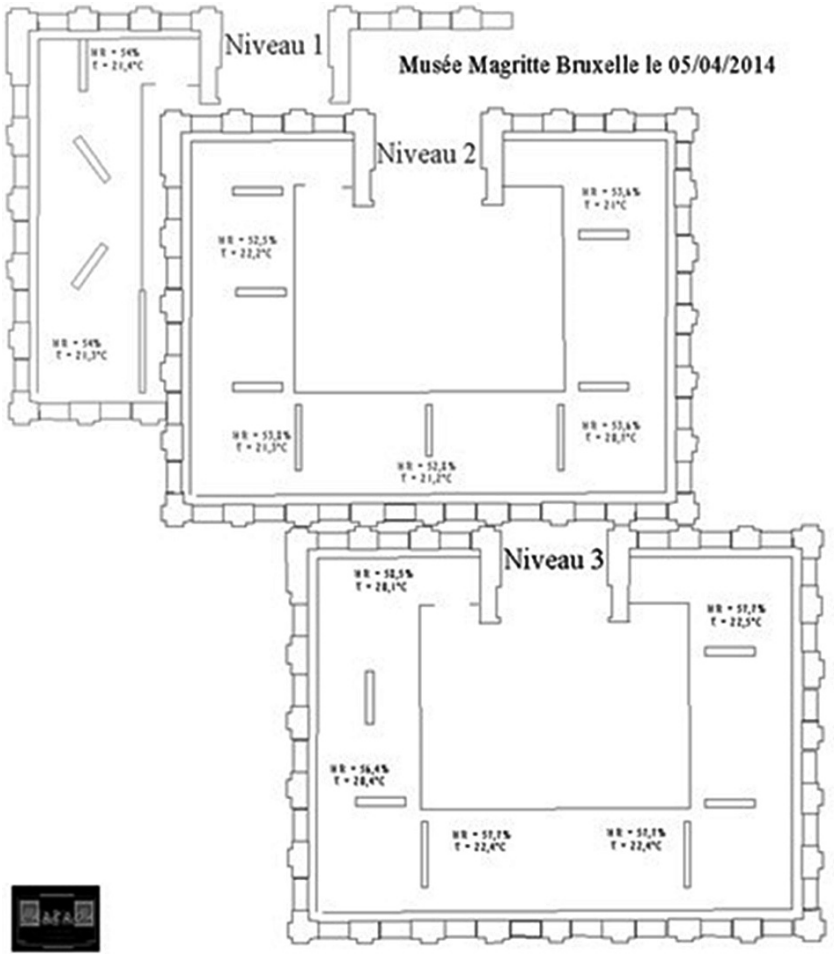



*Figure 38 : Plan du musée de Magritte Bruxelles : les valeurs de températures et humidités.*

Les relevés de HR et de T sont regroupés dans le tableau suivant.

| | HR % | | | T °C | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Mini | Max | Moyenne | Mini | Max | Moyenne |
| Niveau 1 | 54 | 54 | 54 | 21,3 | 21,4 | 21,35 |
| Niveau 2 | 52,5 | 53,8 | 53,26 | 20,7 | 22,2 | 21,28 |
| Niveau 3 | 56,4 | 58,1 | 57,52 | 20,1 | 22,1 | 21,56 |

Malgré un flux de plusieurs dizaines de visiteurs par salle, le climat répond bien aux normes climatiques imposées aux établissements abritant des collections d'œuvres d'art. Dans l'ensemble les variations d'humidité et de températures sont très faibles, les niveaux 2 et 3 sont légèrement moins stables que le niveau 1. On a un exemple d'une bonne maîtrise du climat dans ce musée et les œuvres de Magritte présentent un excellent état de conservation.

*II-3-3 Cas d'une exposition temporaire installée au Musée Marmottan*

Une très belle exposition d'une centaine d'œuvres impressionnistes a été présentée au Musée Marmottan en mars/avril 2014. Ce musée a été créé en 1934 dans une demeure du second empire. Ce bâtiment qui a conservé son décor original a été progressivement transformé en espace muséal. L'exposition est installée au rez-de-chaussée. Son parcours est limité par des cloisons où les œuvres sont accrochées. Les mesures d'hygrométrie et de température sont faites avec un thermo-hygromètre portable à différents points des salles, fig. 39. Le nombre de visiteurs était important, une centaine de personnes par espace délimité par les cloisons.

Le système de régulation du climat était constitué à première vue de deux bouches de soufflage situées dans l'espace 1 et de trois déshumidificateurs. Au moment où les mesures ont été prises, les déshumidificateurs étaient à l'arrêt. Une simulation isohygrométrique est représentée sur le plan pour illustrer la distribution du flux hydrique qui compose le climat de cet ensemble de salles.

À l'entrée de l'exposition, nous avons une humidité de 48,9 % HR et une température de 23,2 °C. En progressant dans l'espace 1, le climat se dégrade, l'humidité diminue et la température augmente. Arrivé au fond de l'espace 1 et dans l'espace 2, l'air a perdu 10 % d'humidité et a gagné plus de 2 °C. Dans l'espace 3, une porte ouverte sur l'extérieur a apporté un peu d'humidité sans toutefois faire descendre la température.

Ce type de climat évolutif est assez fréquent dans les espaces d'exposition cloisonné. Il est lié à un manque de brassage et de renouvellement d'air traité. Dans ce cas précis les variations climatiques sont conditionnées par le déplacement des visiteurs.

Si on se réfère aux conditions optimales de conservation recommandées par la direction des musées de France (55 % ± 5 % HR et 20 ± 2 °C), seules les salles C et B du LaM et les trois niveaux du Musées Magritte les respectent. Les salles M et T du LaM sont un peu en dessous des recommandations, alors que dans les salles d'expositions temporaires du Musée Marmottan l'hygrométrie est beaucoup trop faible et la température trop élevée.

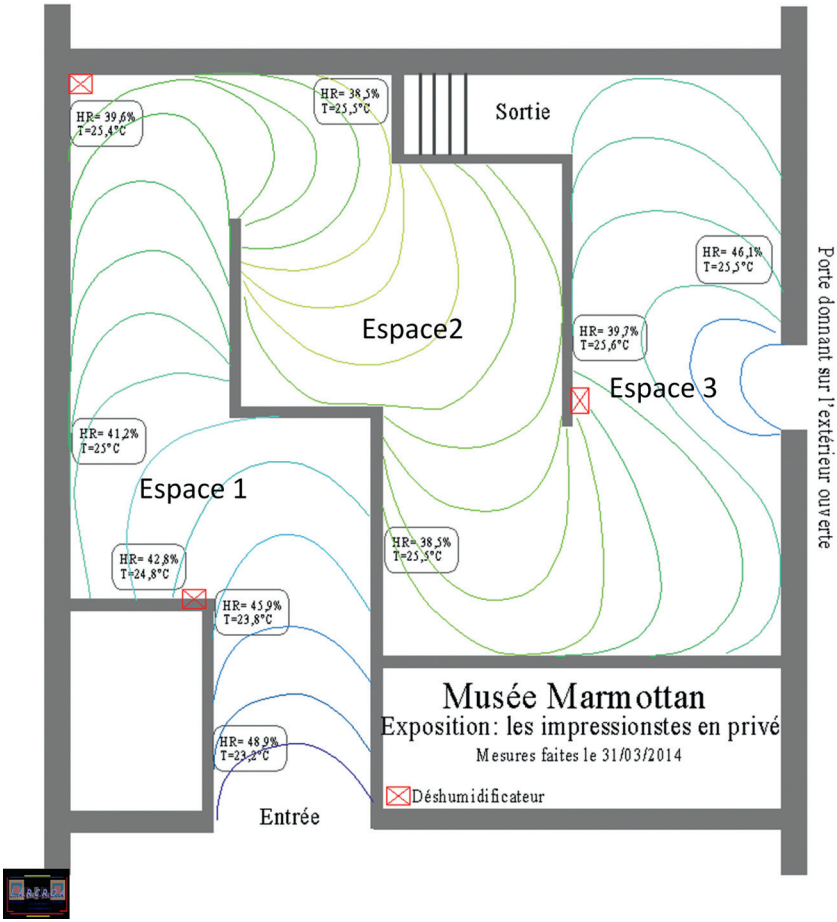



*Figure 39 : Plan de la salle d'exposition du musée Marmottan : valeurs de températures et humidités.*

Ces trois études nous donnent une image instantanée de la situation climatique des salles à un moment donné. Maintenant examinons plusieurs cas de l'évolution du climat pendant le temps d'une exposition ou d'une saison.

### *II-3-4 Prêt d'une œuvre pour une exposition dans une salle de musée*

Nous avons vu que l'air est sensible à différents facteurs et que la gestion du climat est très difficile, quel que soit le perfectionnement des équipements de traitement de l'air. Le suivi climatique de cette

salle pour une exposition temporaire nous amène à nous poser plusieurs questions, fig. 40.

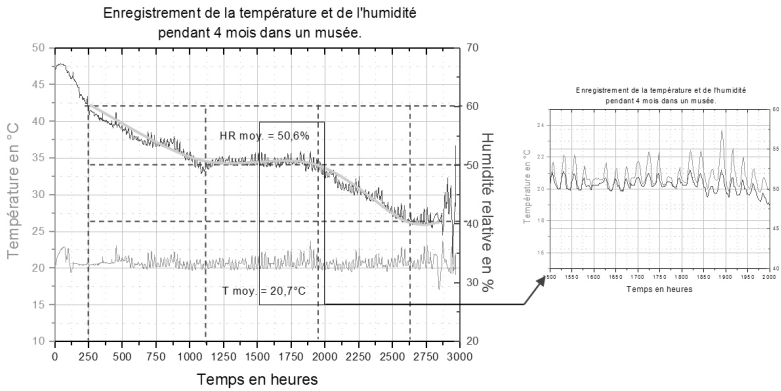



*Figure 40 : Graphique d'enregistrement de l'humidité et température.*

Bien que les valeurs moyennes de température – 20,7 °C – et d'humidité – 50,6 % – soient comprises dans les valeurs préconisées, elles ne sont pas significatives. L'analyse doit être plus poussée et prendre en compte les fluctuations quotidiennes et mensuelles.

### Températures

Pendant la période d'exposition d'octobre à février, les fluctuations de température sont régulières et correspondent bien à des cycles diurnes – caractérisés par la présence du public- et nocturnes. La température moyenne de cette période est de 21 ± 0,7 °C. On trouve des zones plus perturbées avec des écarts allant jusqu'à 3,65 °C.

### Humidité

La période d'exposition est marquée par deux phénomènes :

1- Faibles variations quotidiennes de l'humidité environ ± 0,6 %. Ces écarts sont bien maîtrisés durant toute cette période.

2- La courbe moyenne fait apparaître 3 zones :

• entre 250 et 1 125 heures l'humidité chute progressivement de 66,8 % à 50,6 %,

• entre 1 125 et 1 950 heures l'humidité est stable, elle oscille autour de 50 % ± 0,6 %,

• entre 1 950 et 2 650 heures l'humidité décroît régulièrement de 50,3 % à 40,6 %.

Globalement, l'humidité a diminué durant ces trois mois et demi de 26,2 %, soit une perte considérable de la teneur en eau dans les peintures.

Si on analyse le détail des courbes de température et d'humidité entre 1 500 et 2 000 heures, tous les maxima et les minima de T et de HR sont en phase. Cependant, la théorie démontre, que, pour une humidité absolue constante, une augmentation de la température provoque une diminution de l'humidité relative et inversement. Comme on ne peut pas contredire la théorie, on est bien obligé d'admettre que les élévations simultanées de HR et de température sont dues à un apport de vapeur d'eau et de chaleur issues du public.

En partant des conditions moyennes de 50 % HR et 20 °C, pour atteindre les valeurs de HR = 52,3 % et T = 23,6 °C que l'on a relevées à 1 890 heures, l'apport d'eau est de 2,27 g/kg air[15]. Cette vapeur d'eau provenant vraisemblablement du public, est en partie absorbée par l'air et en partie par les peintures. Ce sont les peintures les plus sensibles à l'humidité, qui souffriront le plus de ces conditions.

En fait, ce qui semble le plus nuisible à l'état de conservation de l'œuvre durant ce prêt c'est l'importante chute de plus de 26 % d'humidité qui s'est produite sur les trois mois et demi dans la salle d'exposition. Dans ces conditions, si on avait à faire à une peinture sur bois, la teneur en eau du bois perdrait environ 4,6 % d'eau. Cette perte serait responsable d'un retrait important du bois, qui pourrait se manifester par un gauchissement du panneau et une accumulation de contraintes dans la peinture, suivie dans le pire des cas de craquelures et pertes d'adhérence de la matière picturale.

15. Le calcul, a été effectué à l'aide d'un diagramme psychrométrique.

III

# Interactions du climat sur les peintures

## III-1 Sensibilité des peintures à l'humidité et à la température

Toutes les recherches sur le comportement mécanique des peintures s'accordent pour montrer que les peintures constituées de matériaux hydrophiles et hydrophobes sont sensibles aux variations d'humidité et de température. Même les peintures à l'huile qui a priori ne sont pas hydrophiles le deviennent avec le temps. Les phénomènes d'hydrolyse en sont les principaux responsables. Par ailleurs, certaines peintures à l'huile beaux-arts, contiennent des additifs qui les rendent sensibles à l'humidité[1]. Les émulsions acryliques sont également sujettes au gonflement en présence d'eau[2].Pour certains matériaux, cette sensibilité à l'humidité augmente avec le temps.

Les effets de l'humidité relative interviennent surtout sur les matériaux hydrophiles de la peinture et, plus spécifiquement, dans les parties amorphes des polymères semi-cristallins. Un changement d'humidité entraîne des variations dimensionnelles, (gonflement ou retrait) proportionnelles au coefficient de gonflement linéaire $\gamma$ tout en modifiant les propriétés mécaniques des matériaux. Le comportement des peintures est donc tributaire du coefficient de gonflement, du module d'élasticité. Un changement d'humidité entraînera automatiquement des variations de contrainte ou des variations dimensionnelles car ces deux grandeurs sont reliées entre elles par l'expression :

$$\sigma(HR) = E(HR).\varepsilon(HR) \qquad (12)$$

1. Silvester G. *et al.*, « A cause of water sensibility in modern oil paint films-Formation of magnesium sulphate », 2014.

2. Dillon C.E. *et al.*, « Acrylic emulsion paint films : The effect of solution pH, conductivity, and ionic strength on swelling and surfactant removal », 2014.

Les effets de la température sur le comportement mécanique des matériaux sont semblables à ceux de l'humidité relative toute proportion gardée. Une variation de température $\Delta T$ entraîne une variation dimensionnelle (dilatation ou contraction), proportionnelle au coefficient de dilatation thermique linéaire $\alpha$. En l'introduisant dans l'équation d'état de l'élasticité, nous pouvons en évaluer l'impact à l'aide de l'expression suivante :

$$\sigma(T) = E(T).\varepsilon(T) \qquad (13)$$

Donc, l'amplitude des variations dimensionnelles d'un polymère dépend directement des coefficients de gonflement ou de dilatation (linéaire). Si le solide est libre de tout mouvement, les variations dimensionnelles pourront s'exercer librement. Si, par contre, le solide est solidaire d'un système : tension d'une peinture sur un cadre indéformable (châssis ordinaire) – adhésion de deux couches de peinture –, les variations dimensionnelles ne pouvant plus s'exprimer, des contraintes vont apparaître.

Pour évaluer la réactivité d'une peinture à l'humidité ou à la température, il est intéressant d'étudier les peintures tendues sur châssis fixe, d'une part parce qu'elles représentent la grande majorité des cas et d'autre part on peut mesurer les tensions et variations de tension.

Le châssis est un des éléments structurels de la peinture. Son rôle, faut-il le rappeler, est, du point de vue mécanique, aussi important que les autres constituants de la peinture. Malgré l'utilisation du bois dans sa fabrication, il peut être considéré comme un cadre fixe et indéformable dans le plan du tableau. La toile est traditionnellement tendue sur un châssis à l'aide d'une pince de tapissier et elle est fixée sur le pourtour des montants avec des semences ou des agrafes. La tension exercée doit être régulière. À température et humidité constante, la tension reste constante. Nous allons développer dans cet encadré l'aspect théorique de la tension d'une peinture.

Prenons un petit élément de peinture et simulons une tension sur un châssis, fig. 41.

Lors de la tension *(t)*, la peinture s'allonge d'une valeur *(d)*. A est un point fixe sur le montant du châssis. La longueur *($l_0$)* est la longueur initiale de la peinture avant la tension et *(l)* est la longueur après sa tension. On peut donc écrire l'expression de la déformation relative :

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \times 100 \qquad (14)$$

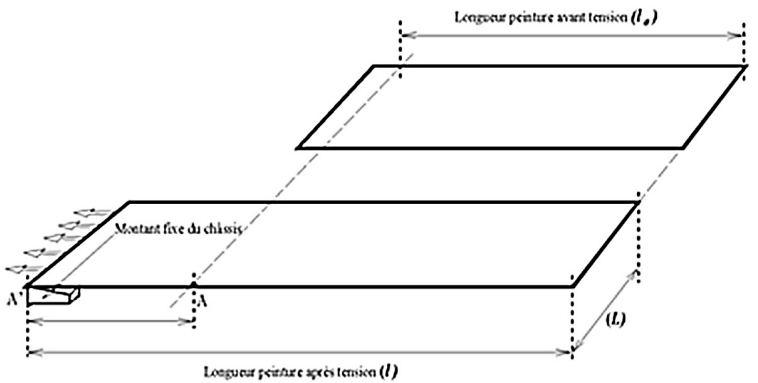



*Figure 41 : Tension d'une peinture*

Comme *(l)* et *($l_0$)* sont fixes, alors la déformation relative *($\epsilon$)* est constante. En reprenant les équations (12) et (13), la contrainte peut donc s'écrire :

$$\sigma(HR,T) = E(HR,T).\varepsilon^{cte} \qquad (15)$$

et elle est directement proportionnelle à $E$ qui dépend de l'humidité relative et/ou de la température.

La tension *(t)* d'une peinture s'exprime par le rapport entre la force totale appliquée aux bandes de tension et leur longueur : $t = \frac{F}{L}$ (16) *[t : tension en N/m, F : force en N, L : longueur en m]*

La contrainte *($\sigma$)* s'exprime également par le rapport entre la force et la surface de la section de la peinture, autrement dit, le produit de son épaisseur moyenne *(e)* par la longueur *(L)* ou s'exerce la force :

$\sigma = \frac{F}{S}$ *ou* $S = e \times L$ (17) *[$\sigma$ : contrainte MPa, e : épaisseur m ou mm]*

En combinant ces relations on obtient l'expression de la tension en fonction de l'humidité et/ou de la température sous cette forme :

$$t(HR,T) = E(HR,T).e(HR,T).\varepsilon^{cte} \qquad (18)$$

Dans cette relation nous avons introduit l'épaisseur de la peinture qui est elle-même une fonction de l'humidité et de la température. Imaginons que cette peinture soit sujette à une variation d'humidité de $\Delta HR$ *=30 %,* les calculs montrent que le changement d'épaisseur en fonction de l'humidité est très faible. On peut donc considérer dans une première approximation que la valeur de la variation de l'épaisseur est négligeable, et fixer le produit $e.\epsilon^{cte}$ constant. L'expression de la tension devient :

$$t(HR,T) = E(HR,T).Cte \qquad (19)$$

Mais aussi en combinant les expressions (16) et (17) on obtient :

$$t(HR,T) = \sigma(HR,T) \times e \qquad (20)$$

Les expressions présentées dans l'encadré nous indiquent que la tension d'une peinture soumise à une variation d'humidité ou de température varie proportionnellement au module d'élasticité *(équat.19)* ou à la contrainte *(équat.20)*. Chaque type de peinture aura donc son propre comportement mécanique vis-à-vis de l'humidité et de la température.

Du point de vue mécanique, ces notions de sensibilité aux variations d'humidité et de température des peintures ont déjà été évoquées dans plusieurs publications. Notre objectif est d'élargir et d'exploiter ces notions en vue de les utiliser comme ***un outil au service de la conservation des peintures modernes et contemporaines sous forme de « diagramme de sensibilité »***.

Comment pouvons-nous construire un diagramme de sensibilité à l'humidité ou à la température ? Nous avons à notre disposition deux méthodes : une approche expérimentale et une approche théorique basée sur la loi d'additivité.

*III-1-1 Construction expérimentale d'un diagramme de sensibilité*

Si à l'aide d'un dispositif expérimental, on mesure l'évolution de la tension d'une peinture versus l'humidité relative ou la température, on obtient une courbe que l'on appelle « *diagramme de sensibilité humidité/température* ». La procédure consiste à mesurer la réponse d'un type de peinture vis-à-vis d'une variation d'humidité ou de température, en faisant le suivi des tensions lorsqu'elle est soumise à une variation progressive de l'un de ces deux facteurs climatiques. Pour cela, il a fallu mettre au point un dispositif expérimental, fig. 42, se rapprochant au plus près des conditions réelles d'une peinture tendue sur châssis. Il est constitué :

• D'un cadre extensiométrique conçu spécialement pour étudier le comportement mécanique bi-axial des peintures et de leurs éléments constitutifs, dans différentes conditions expérimentales. Cet appareil de mesure (annexe A2) est composé :

– D'un cadre en aluminium de 60/60 cm,
– De 8 capteurs de force équipant les angles.
– D'un système informatique d'acquisition et de traitement des données.

• D'une éprouvette ou corps d'étude (peintures de techniques différentes, toiles, textiles, papiers, etc.) conçue et réalisée pour être tendue sur le cadre métallique.

• D'une enceinte climatique équipée d'un système de régulation de l'humidité et de température, permettant la programmation des variations climatiques et, notamment, une montée progressive en humidité. Cette enceinte a été fabriquée pour accueillir le cadre extensiométrique.

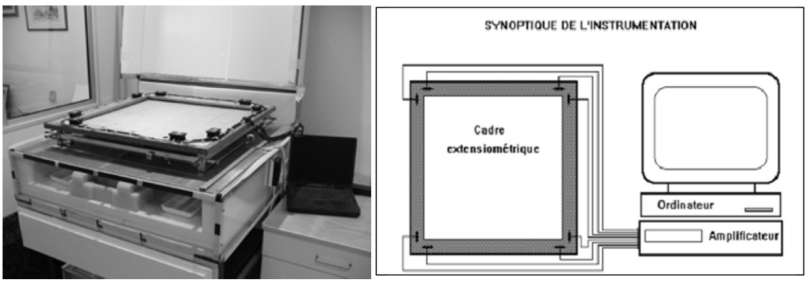



*Figure 42 : Cadre extensiométrique*

L'éprouvette reproduisant une technique picturale est tendue sur le cadre extensiométrique à l'aide d'une pince à tendre, comme sur un châssis standard, en répartissant correctement les tensions. Aux conditions du laboratoire (55 % HR et 20 °C), les valeurs de tension en daN/m, affichées sur l'écran de l'ordinateur peuvent être réglées à la valeur désirée en intervenant sur des molettes qui agissent en écartant ou refermant les angles du bâti. Ensuite, la peinture tendue sur le cadre est introduite dans l'enceinte climatique. Elle est programmée pour avoir à température constante une augmentation d'humidité de 10 % à 90 % HR ou pour une humidité constante une élévation de la température de 10 °C à 60 °C. Les tensions en daN/m, les températures et les valeurs d'humidité relatives sont enregistrées.

Cette procédure expérimentale permet d'obtenir une courbe, *t(HR,T)* appelée « *diagramme de sensibilité à l'humidité/température* ». Il est obtenu à partir de points expérimentaux mesurés par le cadre extensiométrique que l'on positionne sur un graphe orthonormé ou l'on trouve en abscisse (axe des x) *l'humidité relative* en % ou la *température* en *°C* et en ordonnée (axe des y) *la tension* en *daN/m*, (annexe A3).

Prenons comme exemple les points expérimentaux d'une peinture à l'huile sur papier sens travers, fig. 43.

A priori, il existe une certaine corrélation entre les points de l'expérience. On pourrait tracer la courbe à la main mais l'analyse statistique appelée « *régression polynomiale*[3] » nous donnera non seulement la meilleure courbe possible mais aussi la *fonction polynomiale* qui la décrit.

3. La régression polynomiale est une analyse statistique qui cherche à relier deux variables par un polynôme de degré n.

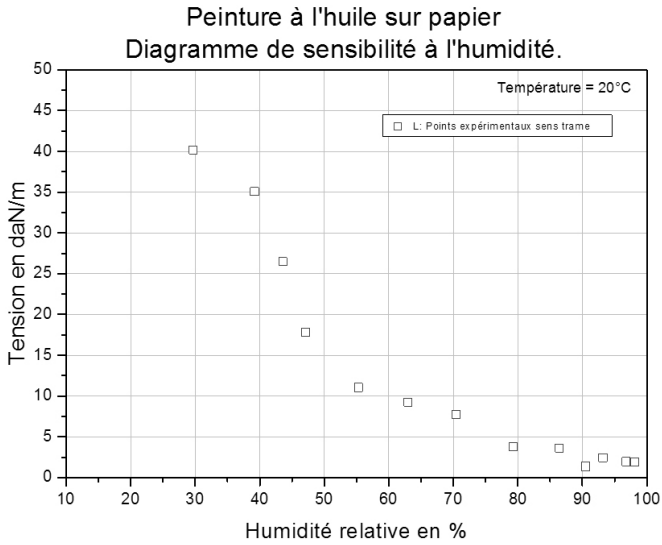



*Figure 43 : Construction expérimentale d'un diagramme de sensibilité.*

D'une manière générale, les mesures expérimentales donnent une série de points, $N_i\ (X_i, Y_i)$ qui présentent une certaine dispersion autour d'une droite ou d'une courbe de type $Y = f(X)$, en raison des imprécisions dues à l'expérimentation. L'objectif est d'obtenir à partir de cette série de points un polynôme qui décrit une loi empirique facile à utiliser.

Le polynôme de régression est une fonction dont le graphe approche, au mieux, chacun des points expérimentaux. La procédure de régression polynomiale consiste à utiliser un polynôme $R(X)$ de degré quelconque p tel que :

$$R(X) = a_0 + a_1 X + ..... + a_p X^p = R(x_i) = \sum_{p=0}^{n} a_p x_i^p \qquad (21)$$

Le but est de minimiser la différence de valeurs *(E)* prise par $R$ aux points $x_i$ pour les valeurs expérimentales $y_i$ en utilisant la méthode des moindres carrés.

$$E = \sum_{i=1}^{N} \left[ y_i - \sum_{p=0}^{n} a_p x_i^p \right]^2 \qquad (22)$$

Pour minimiser *E,* il suffit de trouver pour chaque $a_p$ la valeur qui annule sa dérivée. Cela donne un système de n équations à n inconnues que l'on doit résoudre pour obtenir les points de la courbe polynomiale. Par exemple, à partir des points expérimentaux de la fig. 43, on est en mesure d'obtenir plusieurs courbes de régression polynomiale selon l'ordre choisi.

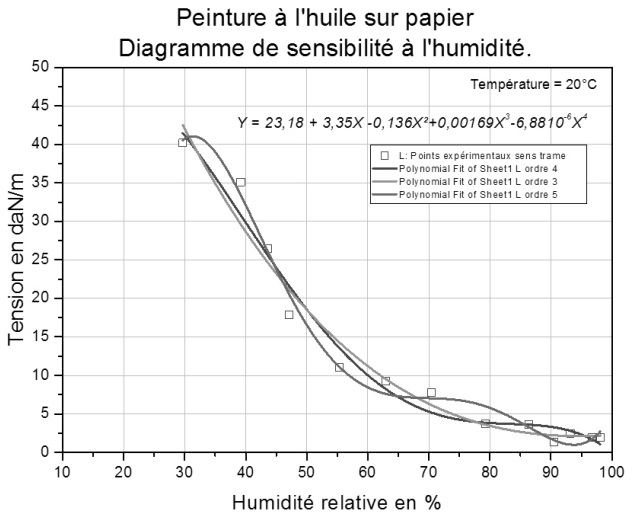



*Figure 44 : Détermination du degré du polynôme de la fonction.*

La fig. 44 montre comment on ajuste la courbe selon l'ordre de la fonction polynomiale. Néanmoins, il faut savoir trouver un compromis entre un modèle trop rudimentaire et mal ajusté et un modèle ajustant bien les données, mais au prix d'un nombre excessif de termes. On recommande[4] de partir d'un ordre volontairement trop élevé (ex.5e ordre). Une première étape consiste alors à retirer un par un et dans l'ordre décroissant les termes des ordres supérieurs (en général non significatifs) jusqu'à ce que l'on rencontre un terme significatif. Dans le cas de cette courbe, nous avons retenu la fonction polynomiale d'ordre 4.

La validité de la courbe et de sa fonction polynomiale est limitée par les valeurs extrêmes obtenues expérimentalement. Une extrapolation obtenue au-delà de ces valeurs donne des valeurs erronées.

### *III-1-2 Construction théorique d'un diagramme de sensibilité*

En appliquant la loi d'additivité, nous avons pu construire une série de courbes. Nous savons que les courbes obtenues sont représentatives, si leurs structures ne sont pas trop complexes.

4. User's Manual Origin version 9 version numérique.

L'étude de la mécanique repose sur six principes fondamentaux établis expérimentalement :

– l'additivité des forces,
– Le principe de transmissibilité,
– Les trois lois de Newton,
– La loi de la gravitation universelle de Newton.

À l'échelle d'un tout petit élément de peinture, les forces tangentielles s'exercent au milieu de l'épaisseur des couches de chaque constituant F1, F2, F3, fig. 45.

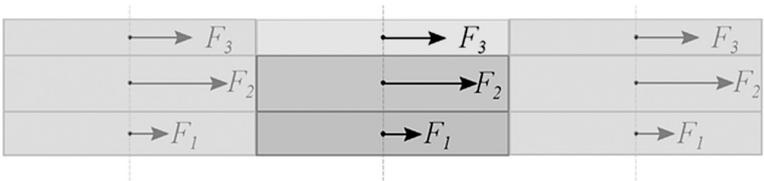



*Figure 45 : Distribution des forces internes dans une peinture composée de 3 couches.*

Elles ont toutes la même direction, toutefois à cette échelle les lieux géométriques d'application des forces se différencient.

À l'échelle réelle d'une peinture, considérée comme un solide 2D, on peut négliger l'épaisseur de chaque constituant pour prendre en compte l'épaisseur totale, fig. 46.

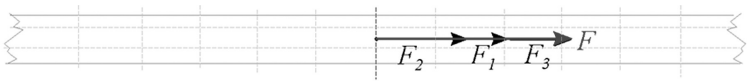



*Figure 46 : Distribution des forces internes dans une peinture 2D.*

Dans ce cas les lieux géométriques se confondent et les forces internes s'alignent. Le principe d'additivité peut donc s'appliquer aux forces mais aussi aux tensions puisqu'il existe une relation directe entre la force et la tension (equation.16)

Nous avons pu ainsi construire des modèles simples en partant des données que nous avons obtenues expérimentalement ou des données extraites de publications. Le principe de construction consiste, selon la loi d'additivité, à additionner les valeurs de tension des composants de la peinture et de son support.

À titre d'exemple, nous allons créer un diagramme de sensibilité à l'humidité d'une peinture acrylique sur papier. Notre peinture est constituée : d'un liant acrylique – Plextol® B500, de pigments et

charges à une Concentration Volumétrique Pigmentaires (CVP) de 25 % et d'un support papier Canson 125 g/m$^2$.

Pour construire le diagramme, nous nous sommes servis de la variation du module d'élasticité $E_{plextol}$ du Plextol® B500[5] et de la variation de tension du papier Canson 125 g/m$^2$ en fonction de l'humidité[6]. Le module d'élasticité de la peinture $E_{p,}$ c'est-à-dire le mélange des pigments au liant, a été obtenu en utilisant l'équation de E. Guth et O. Gold[7].

La construction de ce diagramme va se dérouler en 5 étapes.
1- Calcul des modules d'élasticité du liant acrylique pigmenté (CVP = 25 %)

| Liant acrylique (Plextol B500) | |
|---|---|
| HR % | E(X)Mpa |
| 10 | 14,06 |
| 20 | 13,74 |
| 30 | 13,5 |
| 40 | 13,27 |
| 50 | 13 |
| 60 | 12,76 |
| 70 | 12,53 |
| 80 | 12,3 |
| 90 | 12,03 |
| 100 | 11,78 |

L'équation de E. Guth, et O. Gold

$$E = E_0(1 + 2{,}5CVP + 14{,}1.CVP^2) \quad (23)$$

| E(X)pigm 25 % |
|---|
| 35,24 |
| 34,44 |
| 33,83 |
| 33,26 |
| 32,58 |
| 31,98 |
| 31,40 |
| 30,83 |
| 30,15 |
| 29,52 |

5. Étude sur le Plextol® B 500, LARCROA 2000, non publiée.

6. Étude « comportement mécanique des papiers », LARCROA 2001, non publiée.

7. Guth E., « Theory of filler reinforcement », 1945. Guth E., Gold O., « On the hydrodynamical theory of viscosity of suspensions », 1938.

2- Calcul des tensions dans le film de peinture à partir des modules.

| Peinture acrylique | |
|---|---|
| HR % | E(X) pigm 25% |
| 10 | 35,24 |
| 20 | 34,44 |
| 30 | 33,83 |
| 40 | 33,26 |
| 50 | 32,58 |
| 60 | 31,98 |
| 70 | 31,40 |
| 80 | 30,83 |
| 90 | 30,15 |
| 100 | 29,52 |

$t = E.e.\varepsilon^{cte}$ (24)

Température = 20 °C
$\varepsilon$ = 2 %
e = 2 mm

| Peinture acrylique | |
|---|---|
| HR % | Tension film daN/m |
| 10 | 11,25 |
| 20 | 10,99 |
| 30 | 10,80 |
| 40 | 10,62 |
| 50 | 10,40 |
| 60 | 10,21 |
| 70 | 10,02 |
| 80 | 9,84 |
| 90 | 9,62 |
| 100 | 9,42 |

3- Le papier Canson 125 g/m$^2$ à un comportement orthotrope. Afin de simplifier la construction de la courbe nous prendrons la tension moyenne des sens travers et machine.

| HR % | Papier Canson 125 g/m$^2$ | | |
|---|---|---|---|
| | $t_{trv}$daN/m | $t_{mac}$daN/m | $t_{moy}$daN/m |
| 10 | 35,00 | 40,00 | 37,50 |
| 20 | 31,32 | 38,92 | 35,12 |
| 30 | 24,76 | 27,27 | 26,02 |
| 40 | 19,32 | 19,56 | 19,44 |
| 50 | 12,86 | 12,62 | 12,74 |
| 60 | 10,68 | 10,21 | 10,45 |
| 70 | 8,64 | 8,34 | 8,49 |
| 80 | 6,38 | 6,21 | 6,30 |
| 90 | 3,36 | 3,69 | 3,53 |
| 100 | 3,39 | 3,37 | 3,38 |

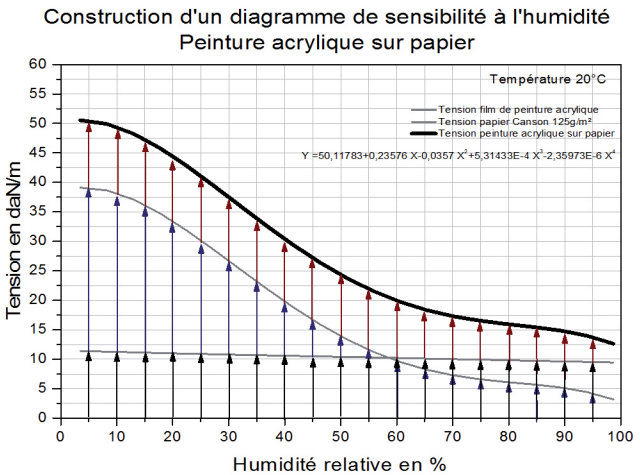
4- Application de la loi d'additivité

| HR | $t_{peint.\ acryl.}$ daN/m |
|---|---|
| 10 | 11,25 |
| 20 | 10,99 |
| 30 | 10,80 |
| 40 | 10,62 |
| 50 | 10,40 |
| 60 | 10,21 |
| 70 | 10,02 |
| 80 | 9,84 |
| 90 | 9,62 |
| 100 | 9,42 |

| HR | $t_{moy.\ papier}$ daN/m |
|---|---|
| 10 | 37,50 |
| 20 | 35,12 |
| 30 | 36,02 |
| 40 | 19,44 |
| 50 | 12,74 |
| 60 | 10,45 |
| 70 | 8,49 |
| 80 | 6,30 |
| 90 | 3,53 |
| 100 | 3,38 |

| HR | $t_{peint.\ acryl/papier}$ daN/m |
|---|---|
| 10 | 48,75 |
| 20 | 46,11 |
| 30 | 36,82 |
| 40 | 30,06 |
| 50 | 23,14 |
| 60 | 20,65 |
| 70 | 18,51 |
| 80 | 16,14 |
| 90 | 13,15 |
| 100 | 12,80 |

5- Construction du diagramme




Qu'elles soient expérimentales ou théoriques, ces courbes donnent accès à une fonction polynomiale qui permet de traiter certains problèmes par le calcul.

Cette méthode de construction théorique des diagrammes de sensibilité à l'humidité permet aussi d'intervenir sur plusieurs paramètres :

• la CVP qui régit d'une part l'opacité de la peinture et sa consistance.

• l'épaisseur de la peinture appliquée.

On obtient ainsi un faisceau de courbes qui peuvent se rapprocher le plus possible des cas étudiés et élargir les champs d'investigation, fig. 47,48.

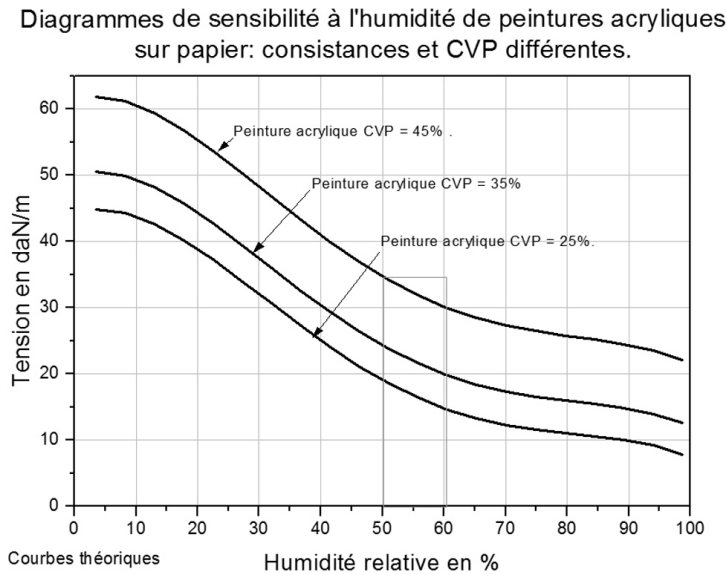



*Figure 47 : Diagrammes de sensibilité de peintures de CVP différentes.*

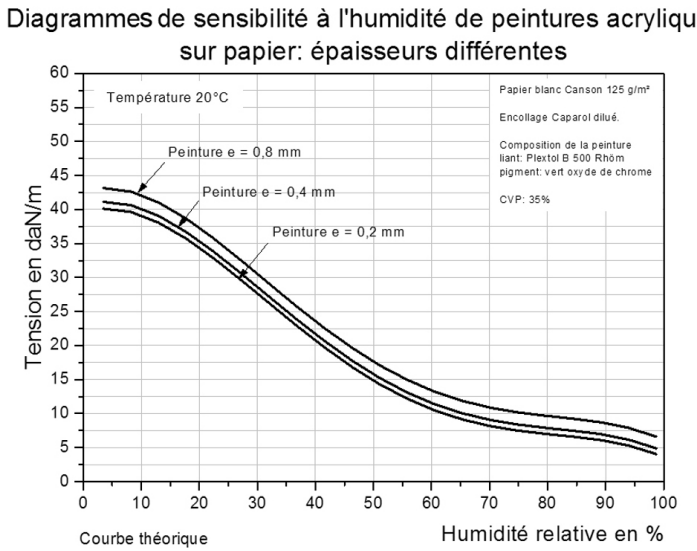



*Figure 48 : Diagrammes de sensibilité de peintures d'épaisseurs différentes.*

*III-1-3 Validation des diagrammes théoriques*

L'allure des courbes théoriques et expérimentales diverge un peu. Dans l'exemple suivant, nous avons recréé le comportement théorique d'une peinture à l'huile sur toile en partant des données expérimentales du modèle de peinture de référence soumis à l'essai, fig. 49.

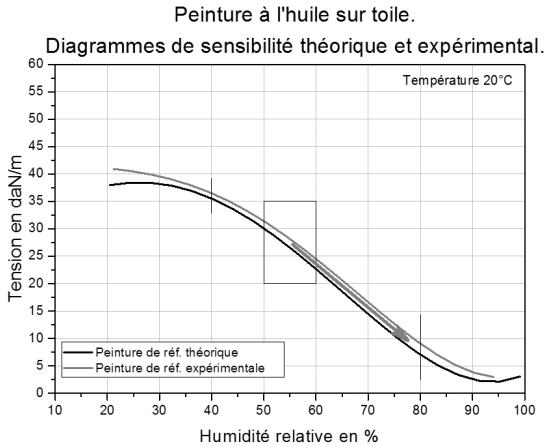



*Figure 49 : Diagrammes théorique et expérimental d'une même peinture.*

La superposition des courbes met en évidence un léger décalage de tension et une présence plus marquée de la toile dans la courbe théorique. Ceci dit, entre 40 % et 80 % HR les courbes sont pratiquement parallèles et les pentes des deux courbes entre 55 % et 75 % sont quasiment égales. Cette similitude permet de valider leurs équivalences dans notre domaine d'exploitation.

Ce sont ces « diagrammes de sensibilité à l'humidité/température » qui serviront **de références graphiques** pour l'évaluation des tensions ou des conditions climatiques de toutes les peintures dans le contexte d'une mission de conservation préventive.

*III-1-4 Interprétation et utilisation d'un diagramme de sensibilité*

**Un diagramme de sensibilité est donc un outil d'évaluation** au même titre que le diagramme psychrométrique qui nous a servi à obtenir des valeurs de *(HA)* en fonction de *(T)* et de *(HR)*. **Il permet d'évaluer la réactivité d'une peinture à l'humidité ou à la température**.

La forme des courbes, qui caractérise chaque peinture, dépend de la nature et de la structure des matériaux qui la composent. Chaque point d'inflexion correspond à un changement de comportement mécanique généré par l'un des constituants inclus dans la peinture. Pour des modèles simples ne dépassant pas deux à trois composants, il est

aisé d'attribuer la participation de chaque élément à différents degrés d'humidité ou de température. En contrepartie, pour des techniques plus complexes, l'interprétation n'est pas toujours aisée, d'autant plus que les proportions de matériaux hydrophiles et hydrophobes sont des facteurs importants qui régissent la conduite des peintures vis-à-vis de l'humidité et de la température. Notons qu'en fonction de ces deux facteurs, la participation de chaque matériau dans une peinture se manifestera à partir du moment où il pourra imposer son comportement aux autres matériaux.

Prenons comme exemple cette peinture à la détrempe sur toile. La courbe présente quatre parties et trois points d'inflexion, fig. 50.

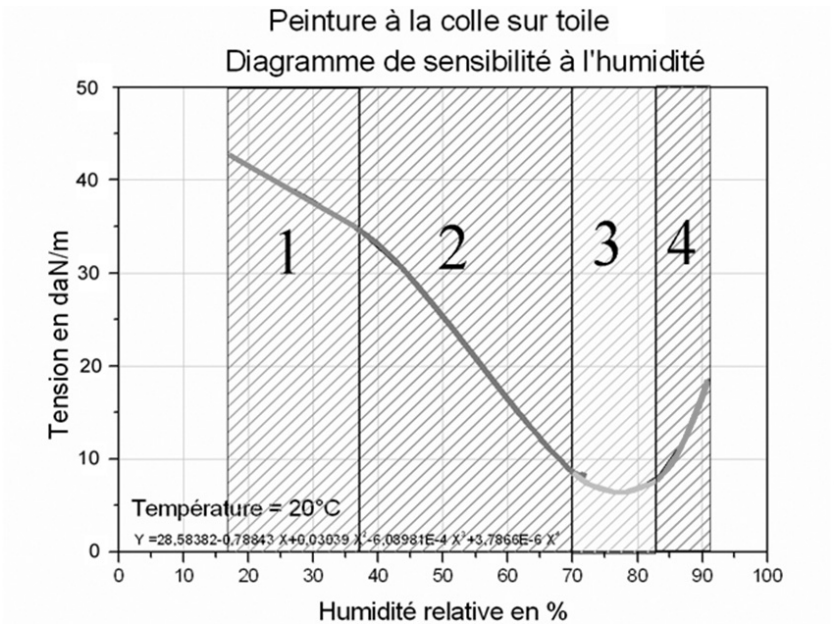



*Figure 50 : Diagramme de sensibilité de deux peintures.*

Dans la partie 1 (de 18 % à 36 % HR), c'est la colle animale de la peinture qui impose son comportement. Dans ces conditions de température et d'humidité, son module d'élasticité est plus important que celui de la toile. La tension dans la peinture décroît régulièrement et modérément au fur et à mesure que l'humidité augmente.

Dans la partie 2 (de 36 % à 70 % HR), c'est toujours la colle qui impose son comportement mais la diminution de son module, due à ses propriétés hydrophiles, entraîne une brusque chute de tension dans la peinture.

Dans la partie 3 (de 70 % à 84 % HR), le module de la colle s'affaiblit encore et la courbe atteint un minimum qui correspond au moment où les modules de la colle et de la toile ont des valeurs semblables. Après ce point qui se trouve vers 75 % HR, les tensions ont tendance à augmenter.

Dans la partie 4 (de 84 % à 91 %HR), c'est la toile qui impose son comportement. Les fibres en gonflant sont responsables de l'augmentation du module de la toile et par conséquent de l'élévation des tensions dans la peinture.

Ces diagrammes permettent d'estimer rapidement la réactivité de la peinture à l'humidité ou à la température, en comparant par exemple les diagrammes de sensibilité à l'humidité d'une peinture à la détrempe sur papier et une peinture à l'huile sur toile, fig. 51. La peinture à la colle se détend rapidement sous l'effet d'une variation d'humidité de 23 % à 50 %, alors que la peinture à l'huile se détend progressivement entre 35 % et 85 %. Ces deux courbes présentent une partie linéaire qui se différencie par leurs pentes.

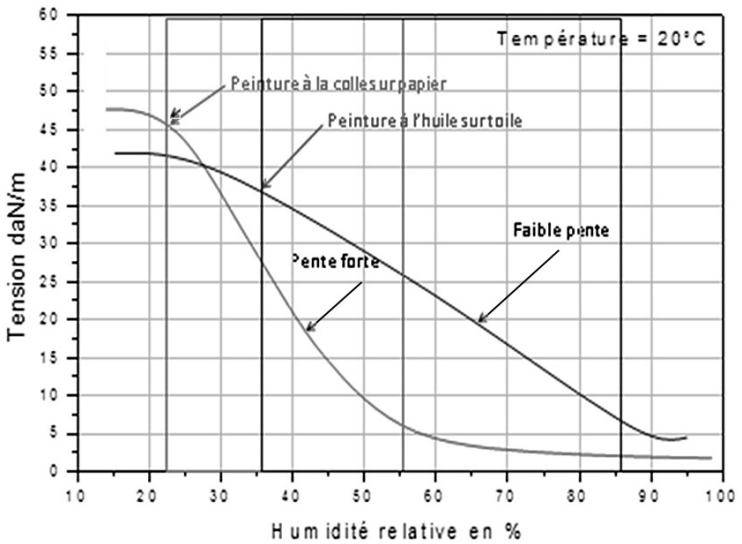



*Figure 51 : Diagrammes de sensibilité de deux peintures.*

**Les pentes et les fonctions polynomiales des courbes sont des outils de calcul, alors que le diagramme est un outil graphique qui permet une première approche rapide.**

La sensibilité d'une peinture à la température peut être également illustrée par le comportement d'une peinture à la cire/résine sur toile, fig. 52.

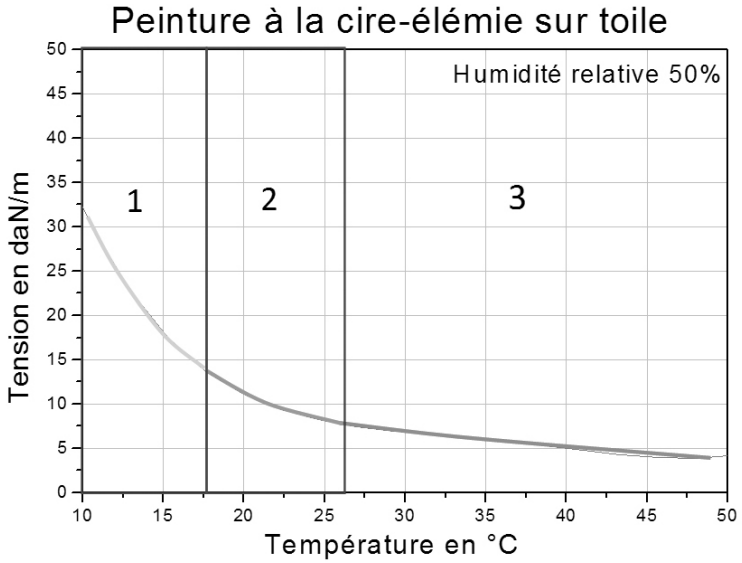



*Figure 52 : Diagramme de sensibilité à la température d'une peinture à la cire.*

La chute rapide de la tension entre 10 °C et 17,5 °C est liée à la diminution du module d'élasticité de la cire/résine. Entre 17,5 °C et 26 °C, la diminution de la tension est plus faible. Elle se stabilise dans la partie 3. Le comportement de la cire /résine de la matière picturale s'impose fortement entre 10 °C et 26 °C.

Les toiles et les papiers, comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, ont des comportements mécaniques orthotropes. Par conséquent, chaque peinture sera dotée de 2 courbes de sensibilité ; en sens trame et chaîne pour les peintures sur toile, en sens travers et machines pour les peintures sur papier et non tissé. Un diagramme est donc représenté par une paire de courbes.

Un climat instable se traduit inévitablement par des variations d'humidité et de températures. Chaque écart d'humidité ou de température provoque une variation de tension *Vt*. Autrement dit, la *Vt* correspond à la différence des tensions de la peinture, générées par des variations d'humidités relatives ou de températures que l'on peut exprimer par :

$$Vt = t_2(HR_2,T_2) - (t_1(HR_1,T_1)) \qquad (25)$$

Pour mesurer la variation de tension entre deux valeurs d'humidité relative, on positionne les valeurs de *HR* sur chaque courbe et on

obtient au maximum quatre valeurs de tension $t$. La valeur la plus élevée va correspondre au sens le plus réactif de la peinture. Cette valeur peut être capitale pour caractériser la sensibilité de la peinture. Néanmoins, si les valeurs de tension dans les deux sens sont proches ou si les courbes se croisent dans la zone de climat étudié, il est possible dans une première approximation de moyenner les deux valeurs ou de prendre les mesures sur la courbe moyenne. Enfin un dernier moyen d'obtenir le résultat est d'utiliser la fonction polynomiale de la courbe moyenne. Toutes ces méthodes graphiques ou de calcul convergent vers une valeur où l'erreur est faible.

Prenons à titre d'exemple une peinture à l'huile sur toile soumise à un écart d'humidité : 40 % à 50 % HR. Les courbes se croisent à 50 %, fig. 53.

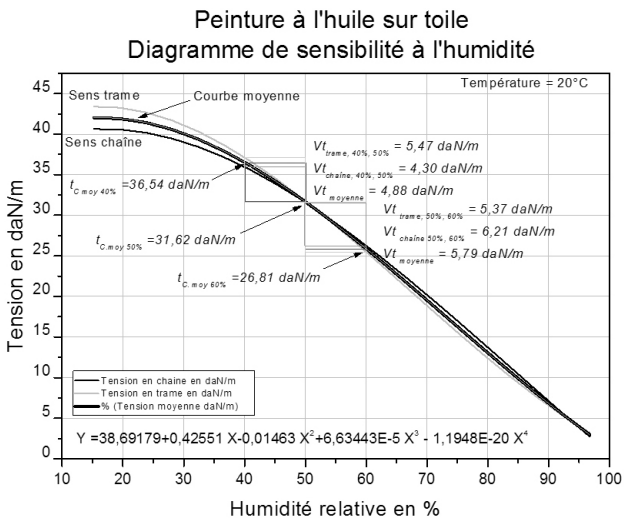



*Figure 53 : Diagramme de sensibilité à l'humidité d'une peinture à l'huile.*

Pour l'écart d'humidité 40 % à 50 % les variations de tension *Vt* mesurées sur le graphique sont en trame $Vt_{trame}$*=5,47 daN/m* et en chaîne $Vt_{chaîne}$*= 4,30 daN/m.* La moyenne de ces deux valeurs que l'on obtient graphiquement est $Vt_{moy}$*=4,88 daN/m.* La valeur $Vt_{trame}$ est la plus élevée, ce qui nous indique que la peinture est plus réactive dans ce sens en présence d'humidité. Notons qu'après l'intersection des courbes, entre 50 et 60 % HR, c'est la chaîne qui est légèrement plus réactive. Si on pense qu'elle est la valeur la plus représentative, elle sera choisie et intégrée dans les calculs, sinon on peut se servir de la variation moyenne entre la trame et la chaîne.

Nous avons à notre disposition plusieurs méthodes pour obtenir la variation de tension entre deux valeurs d'humidité relative :

1- La moyenne des variations de tension en chaîne et trame obtenues graphiquement : *4,88 daN/m,*

2- La valeur de *Vt* obtenue graphiquement sur la courbe moyenne : *4,92 daN/m,*

3- La valeur de *Vt* obtenue à partir de la fonction polynomiale de la courbe moyenne : *4,86* daN/m.

Les erreurs des valeurs obtenues graphiquement sont comprises entre 0,4 et 1,2 % par rapport à la valeur obtenue mathématiquement.

Pour que ce choix ne soit pas arbitraire, il est indispensable d'avoir de bonnes connaissances au niveau du comportement mécanique des peintures. En revanche, l'utilisation de ces diagrammes devient indispensable pour traiter le regroupement de plusieurs types de peintures dans une même salle. Elle permet de trouver facilement des solutions satisfaisantes.

Dans le cas d'une peinture acrylique sur toile de lin tendue sur châssis, un climat instable est bien à l'origine d'une succession de variations de tension *Vt* d'environ 1 daN/m, fig. 54.

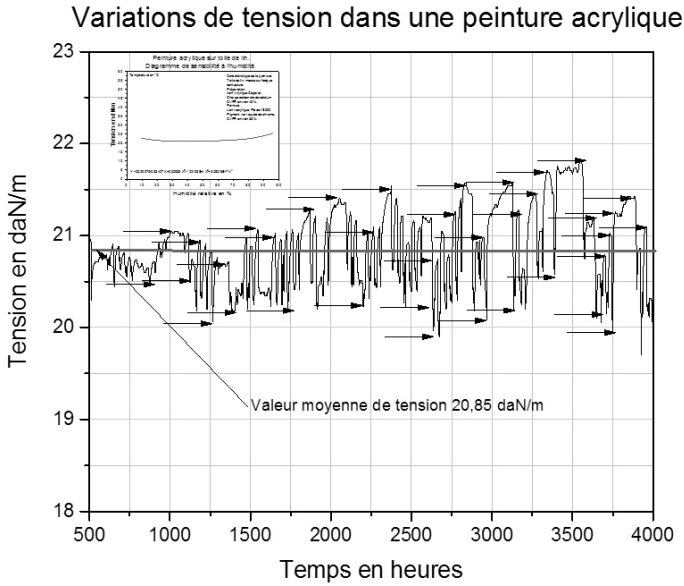



*Figure 54 : Suivi des variations de tension dans une peinture.*

L'ensemble de ces variations de tension va contribuer à l'affaiblissement de la peinture par *fatigue mécanique*.

### III-2 Variations minimales de tensions $V_{mini}t$

**Pour éviter toute fatigue mécanique dans une peinture, il faudrait que les variations climatiques soient nulles, autrement dit que la température et l'humidité soient parfaitement constantes**. Ne rêvons pas, ces conditions idéales n'existent pas dans le domaine de la conservation des œuvres d'art.

Les films des peintures sont caractérisés, comme nous l'avons vu, par une *résistance à la rupture*, mais aussi par une *résistance à l'endurance*. Ces deux notions, résistance à la rupture et résistance à l'endurance, sont en quelque sorte les piliers, du point de vue mécanique, de la conservation préventive des peintures modernes et contemporaines. Elles vont constituer de nouveaux outils qui nous serviront à élaborer une méthodologie.

**Si une peinture a une limite d'endurance, cela veut dire qu'en dessous de cette valeur sa résistance à la rupture n'est pas mise en cause**. Autrement dit, il serait intéressant de trouver pour chaque type de peinture une valeur de variation minimale de tension *($V_{mini}t$)* qui n'entraîne pas de fatigue mécanique au sein de la peinture et la préserve de toutes dégradations mécaniques.

Pour déterminer la $V_{mini}t$, nous avons dû chercher une expression de la *limite d'endurance* de la peinture en fonction de la contrainte à la rupture. L'accès direct à la limite d'endurance d'une peinture nécessite des essais de fatigue-endurance qui sont longs et peu adaptés à ces matériaux. En raison des difficultés d'interprétation des résultats, liées aux conditions d'essais et aux hétérogénéités microstructurales des matériaux, de nombreux chercheurs ont tenté de relier la limite d'endurance à des caractéristiques mécaniques plus simples à acquérir expérimentalement comme la contrainte à la rupture. Malheureusement, toutes les propositions d'évaluation qui ont été faites dans les domaines de l'industrie, ne s'appliquent qu'aux métaux, aux alliages et aux plastiques et ne peuvent pas être appliquées aux peintures.

De notre côté, pour aboutir à une relation simple et satisfaisante de la limite d'endurance d'une peinture, nous avons tenu compte, dans sa structure, à l'échelle microscopique, de la présence de défauts. L'impact de ces défauts, de formes, de dimensions différentes ont une importance considérable dans la résistance d'une peinture. Cet impact a été introduit dans l'expression de la limite d'endurance d'une peinture sous la forme d'un *facteur de concentration de contraintes*.

Dans le cas d'une peinture contenant des défauts de formes et de dimensions différentes, nous avons montré que les valeurs maximales du facteur de concentration de contraintes sont limitées. En vue de la simplification de l'expression de la limite d'endurance d'une peinture, nous avons cherché une valeur constante de ce facteur qui permet d'obtenir une bonne approximation de la limite d'endurance et qui ne dépendrait que de la contrainte à la rupture.

Pour comprendre l'intérêt d'une telle démarche, nous allons présenter les différentes étapes de notre approche.

*III-2-1 Fatigue mécanique des matériaux*

En mécanique statique, la résistance des matériaux est définie par ce que l'on appelle la contrainte à la rupture $\sigma_{\text{rupt}}$. C'est la contrainte maximale que peut supporter un matériau avant de se rompre, lorsqu'il est soumis à un essai de simple traction, comme nous l'avons vu précédemment.

En fatigue dynamique, le même matériau peut se rompre sous l'effet d'une variation cyclique de contraintes bien inférieure à la contrainte de rupture.

En dessous d'une certaine valeur de variations cycliques de contraintes, le matériau peut résister sans se rompre, c'est sa *limite d'endurance notée σD.*

Le phénomène de fatigue mécanique peut être représenté par une fonction sinusoïdale, fig. 55, qui se définit par :

– Une contrainte maximum (chute de HR)

– Une contrainte minimum (élévation de HR)

– Variation de contraintes ou amplitude : $\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{mini}$ (26)

– Contrainte moyenne : $\sigma_{moyen} = \dfrac{\sigma_{max} + \sigma_{mini}}{2}$ (27)

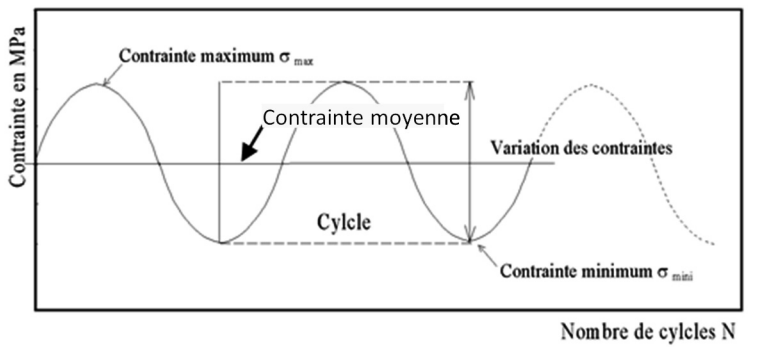



*Figure 55 : Fatigue mécanique : fonction sinusoïdale.*

Ces variations de contrainte, qu'elles soient provoquées par une machine d'essais ou par des variations climatiques (humidité ou températures), sont équivalentes à des variations de tension.

La limite d'endurance se détermine expérimentalement sur une machine d'essais. On soumet le matériau à des cycles de contraintes ou de tensions jusqu'à la rupture. On diminue progressivement les variations

de contrainte jusqu'au moment où elles n'entraînent plus de rupture du matériau. A partir des valeurs obtenues, on trace le diagramme de fatigue, fig. 56.

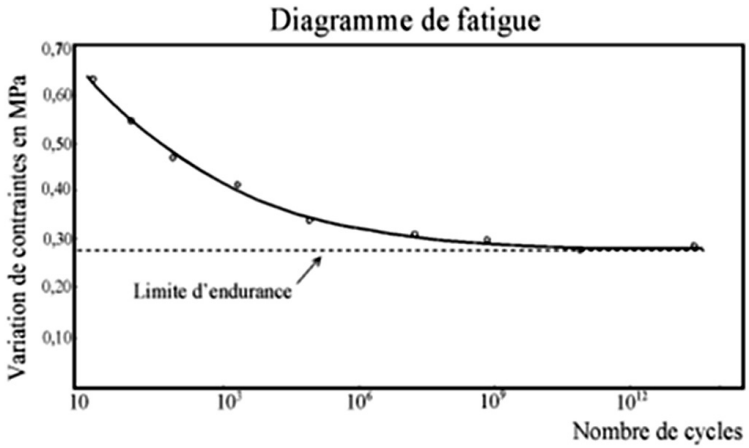



*Figure 56 : Diagramme de fatigue ou courbe de Wöhler, courbe SN*

Lorsque la courbe devient tangeante à l'asymptote horizontal, la valeur minimale définit la **limite d'endurance** $\sigma$D.

### *III-2-2 Méthode de détermination de la limite d'endurance d'un film de peinture* $\sigma$Dp

Ce critère de résistance à la fatigue $\sigma D$ a été étudié essentiellement pour des matériaux utilisés dans des domaines industriels divers. Pour l'ingénieur concepteur, c'est un outil indispensable qui lui permet de dimensionner des pièces mécaniques en fonction de leur usage et d'anticiper sur la durée de vie de la machine, de l'appareil ou de la structure dans laquelle elle est intégrée.

À notre connaissance, il n'y a pas eu beaucoup d'études approfondies sur les limites d'endurance des films de peintures pour au moins deux raisons :

• Dans le domaine des peintures industrielles et du bâtiment ce critère de résistance n'est pas prioritaire,

• La conservation du patrimoine peint n'a jamais ressenti la nécessité d'utiliser ces théories pour en évaluer leur durée de vie.

Néanmoins, il y a des analogies frappantes entre l'usage industriel d'une pièce mécanique et une peinture. Chacun de ces objets est soumis à des charges variables, répétées et fluctuantes et manifestent

au bout d'un certain temps des endommagements tels que les fissurations et les ruptures. Pour la peinture la charge n'est autre que les variations de tension qu'elle subit lors des variations climatiques et dans certains cas les vibrations.

Nous avons déterminé expérimentalement la limite d'endurance d'une peinture à partir d'un dispositif expérimental constitué : d'éprouvettes d'une même peinture à l'huile sur toile placée entre les mors d'une machine d'essai Lloyd LRX 250. Cette machine, pilotée par ordinateur, a un programme de cyclage en traction qui permet d'appliquer des variations de tension ou de contraintes et un nombre de cycles à exercer sur l'éprouvette jusqu'à rupture.

Pour construire un diagramme de fatigue, on a soumis chaque éprouvette de peinture à une série de variations de contrainte jusqu'à la rupture du film. En diminuant progressivement les variations de contrainte, le nombre de cycles augmente. À partir du moment où la variation de contraintes n'entraîne plus la rupture du matériau, le nombre de cycles est infini.

Le diagramme de fatigue est tracé en partant des valeurs expérimentales obtenues. Lorsque la courbe devient tangente à l'asymptote horizontale, la projection sur l'axe des variations de contrainte nous donne la limite d'endurance des peintures notée $\sigma Dp$, fig. 57.

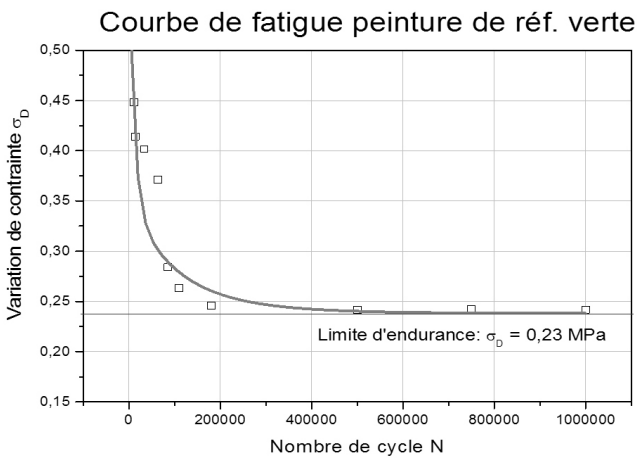



*Figure 57 : Diagramme de fatigue de la peinture de référence ou courbe SN*

**La limite d'endurance correspond à la variation de contraintes maximales que peut supporter cette peinture pendant un nombre de cycles infini sans se rompre.** Elle est de 0,23 MPa dans le cas de cette peinture.

*III-2-3 Relation entre facteur de concentration de contrainte* Kt *et contrainte à la rupture* $\sigma_{\text{rupt.}}$

Quand on traite des propriétés mécaniques des peintures, on est obligé de tenir compte de leur structure à l'échelle microscopique. Une peinture est un matériau composite constitué d'une matrice polymérique – le liant et de particules rigides – les pigments et les charges. Les particules, selon leur nature chimique et leur processus de fabrication, ont des formes différentes. Nous avons l'habitude de les classer en :

- Aciculaire quelconque ou agglomérat de particules aciculaires,
- Aciculaire ou prisme triangulaire avec un angle aigu,
- Parallélépipédique quelconque avec angles aigus,
- Parallélépipédique régulier ou rectangle si deux des dimensions sont du même ordre,
- Cylindrique/sphérique si les formes sont arrondies et les dimensions du même ordre

La taille des particules joue également un rôle. Si elles sont très inférieures à l'épaisseur de la couche, on peut considérer qu'elles n'ont pas d'incidence directe sur la résistance du film. Par contre, si les particules, les agglomérats de particules ou toutes impuretés ont des dimensions égales ou supérieures au tiers de l'épaisseur de la couche, dans ce cas elles constituent des défauts susceptibles de créer des concentrations de contraintes et d'affaiblir la résistance du film de peinture. Les gros cristaux, les agglomérats de pigments ou les inclusions de toute nature sont inhérents soit à la fabrication, soit à une contamination extérieure, fig. 58, 59, 60.

Dans une peinture, le film de polymère naturel ou synthétique est la partie la plus fragile. Les contraintes à la rupture varient de 5 à 15 MPa. Les particules, pigments ou charges minérales, sont, par contre, extrêmement durs, rigides et solides. Pour nous donner une idée de la différence, le module d'élasticité *(E)* d'un film de peinture peut être compris entre 140 et 3 000 MPa, alors que le module d'élasticité *(E)* des particules solides est de l'ordre de 200 000 MPa.

Lors d'une tension, la grosse particule et le film de polymère ne réagissent pas de la même manière. Le film souple et élastique a tendance à se déformer alors que la particule résiste. Cette hétérogénéité des propriétés mécaniques crée une discontinuité dans un champ de contraintes de la peinture et provoque au niveau de chaque défaut une variation des contraintes, qui est caractérisée par le *facteur de concentration de contraintes Kt*.

Pour évaluer et démontrer l'importance de ce phénomène dans la rupture d'un film de peinture, nous avons mené une étude[8] sur 7 liants

8. Étude LARCROA, présentée au Séminaire organisé par CESMAR7 Piazzola sul Brenta Italie, Janv 2015.

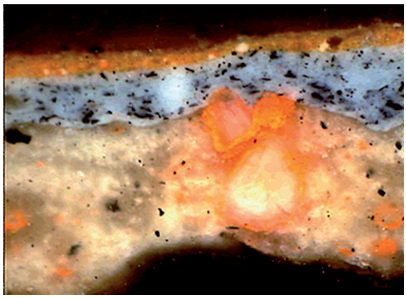


*Figure 58 : Micro-section avec une inclusion et deux gros cristaux.*

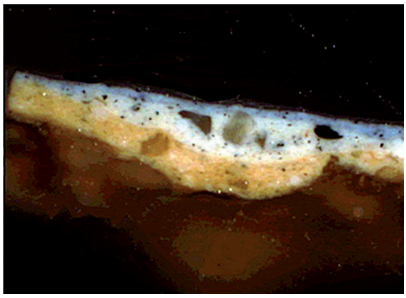


*Figure 59 : Micro-section avec un agglomérat.*

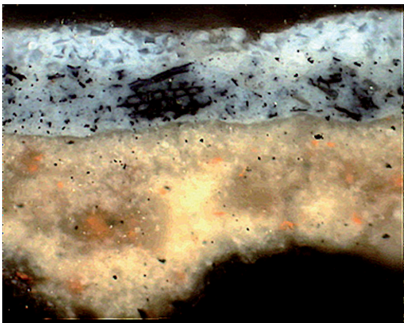


*Figure 60 : Impureté dans une des couches de la peinture.*

de nature chimique différente avec les 5 formes de particules définies au préalable, en utilisant la méthode d'Analyse par Eléments Finis (FEA)[9]. Les modèles numériques sur lesquels s'appuie l'étude sont une micro-section telle qu'on l'observe sous microscope et 5 défauts aux formes préétablies. Le maillage des 35 modèles numériques ont fait l'objet de nombreux essais pour parvenir à une définition du maillage volumique optimale pour l'ensemble des modèles. Les déplacements sont limités par des appuis plans pour simuler un essai de traction et les

9. La méthode d'analyse par éléments finis *(FEA*) est une technique numérique d'analyse fiable. Elle nécessite la création d'un modèle géométrique numérique. Ensuite, le programme subdivise le modèle en petites entités, appelé le maillage. Le programme d'analyse par éléments finis considère le modèle comme un réseau d'éléments interconnectés. Grâce à ses solveurs rapides, SolidWorks Simulation permet de résoudre des problèmes complexes. Solidworks Dassault systèmes.

forces sont appliquées sur la section libre. Avant l'Analyse par Éléments Finis nous avons dû caractériser les peintures par des essais de traction sur un appareil (LRX 250 LLYOD Instruments) selon la norme ISO 237 18 2007. Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau suivant.

| Peintures | Module $E$ MPa | Seuil élast $\sigma_{elast}$ MPa | Cont. rupt $\sigma_{rupt}$ MPa |
|---|---|---|---|
| Alkyd Uréthanne | 560 | 2,58 | 6,35 |
| Dulux Valentine | 416 | 7,15 | 11,63 |
| Astrad Alkyd | 196 | 2,08 | 6,33 |
| Liquitex | 559 | 3,27 | 6,27 |
| Acrylique Lascaux | 790 | 3,84 | 7,56 |
| Gouache Lascaux | 3 146 | 3,94 | 5,02 |
| Flashe vinylique | 1 142 | 3,14 | 6,08 |

*Analyse par éléments finis de l'impact des défauts sur la distribution des contraintes dans une peinture*

Dans le cadre de la simulation numérique, cette micro-section est sollicitée en traction par des chargements équivalents à des tensions[10] de 6,6–7,65–10-15–20–30-35 daN/m. Nous nous sommes efforcés dans cette étude de reproduire et simuler au mieux les actions que subit une peinture dans sa réalité quotidienne, fig. 61. Les caractéristiques mécaniques de chaque peinture, obtenues par les essais de traction, ont été utilisées pour paramétrer les micro-sections, alors que les défauts ont été paramétrés avec un même matériau de type céramique.

Pour un modèle maillé avec un ensemble de déplacements imposés et de chargements, le programme d'analyse statique linéaire suit la séquence de calcul suivante :

- Le programme construit et résout le système d'équations linéaires d'équilibre par éléments finis pour calculer les déplacements à chaque nœud,
- Le programme utilise ensuite les déplacements résultants pour calculer les composantes de déformation,
- Le programme utilise les déformations résultantes et la loi d'élasticité de Young pour calculer les contraintes.

10. Ces valeurs de tensions sont corrélées à des humidités et températures de : 85 %-35 °C, 80 %-30 °C, 70 %-27 °C, 60 %-23 °C, 50 %-20 °C, 30 %-10 °C, 20 %-5 °C. Cela signifie que $E$ est égal pour chaque couple de valeurs *HR-T*.

Suite au calcul, les contraintes peuvent être visualisées à l'aide de tracés en trois dimensions. Dans ces tracés les courbes isométriques de contraintes sont représentées par des couleurs différentes en fonction de leur intensité et font apparaître les contraintes minimum et maximum, fig. 62.

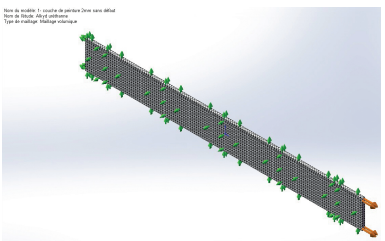


*Figure 61 : Numérisation et chargement d'une micro-section.*

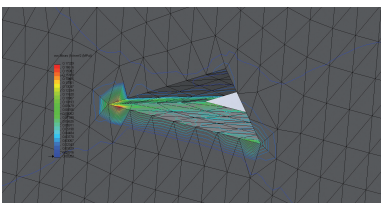


*Figure 62 : détail d'un tracé.*

Le facteur de concentration $Kt$ est le rapport entre la contrainte maximale et la contrainte nominale[11] ou autrement dit la contrainte minimale et s'exprime par la relation suivante :

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{mini}} \qquad (28)$$

Les résultats de l'étude ont montré que le facteur de concentration des contraintes dépend de la forme, de la taille, de l'orientation et du nombre de défauts

| forme | taille | orientation | quantité |
|---|---|---|---|
| $15 < Kt < 112$ | $67 < Kt < 140$ | $63 < Kt < 96$ | $86 < Kt < 113$ |

Dans ce contexte, le calcul par la méthode *FEA* donne à chaque valeur de tension, une contrainte maximale dans chaque film polymérique. Elle s'exerce au niveau d'un ou de plusieurs défauts. Cette contrainte maximale dépend de la forme, de la taille, de l'orientation et de la quantité du défaut, alors que la contrainte nominale ou minimum est indépendante et constante. Autrement dit, le facteur

11. La contrainte nominale est la contrainte qui s'exerce dans un film de polymère sans défaut dans les mêmes conditions expérimentales. Elle correspond à la contrainte minimum enregistrée dans un essai. Elle est indépendante de la forme du défaut.

de concentration de contraintes *Kt* est directement proportionnel à la contrainte maximale.

On doit donc considérer que la résistance en fatigue d'un film de peinture contenant des défauts est **dépendante du facteur de concentration de contraintes *Kt***. Il est d'autant plus important que les cycles de variations de tension qui sont imposés au film peuvent avoir des amplitudes variées. Rappelons que la *limite d'endurance* est la variation maximale de contraintes que peut supporter un film de peinture sans se rompre, quel que soit le nombre de cycles de tensions qui lui a été imposé.

**Si on admet que la limite d'endurance d'une peinture est liée à la fois à la contrainte à la rupture du film de polymère et au facteur de concentration de contraintes, on peut écrire que le rapport entre la $\sigma_{rupt}$ et *Kt* est équivalent à la limite d'endurance d'un film de peinture**[12] :

$$\sigma Dp = \frac{\sigma_{rupt}}{Kt} \qquad (29)$$

*III-2-4 Recherche d'une forme simplifiée de la limite d'endurance des films de peinture*

En intégrant *Kt* dans l'expression de la limite d'endurance d'un film de peinture, nous avons introduit un paramètre qui tient compte de la présence de défauts. D'après l'étude que nous avons menée, les valeurs maximales de *Kt* varient, selon la forme, la taille, l'orientation et la quantité, entre 96 et 140.

Comme le calcul de la valeur de *Kt* est complexe, nous nous sommes orientés vers la recherche d'une **valeur constante de *Kt***. Pour atteindre notre objectif, nous avons vérifié, à partir de plusieurs valeurs de *Kt,* que les variations de contrainte étaient, dans certaines conditions climatiques, inférieures à la limite d'endurance du film de peinture. **La valeur de *Kt* qui répondait au mieux à ces critères a été retenue.**

Une étude a été menée dans ce but, ou nous avons calculé par la méthode FEA, pour *Kt = 100* et *Kt = 140,* les valeurs de variations de contrainte sur 63 modèles numériques de micro-section avec défauts, lorsqu'ils sont soumis à des variations climatiques correspondant à :

- 55 ± 5 %, (60 à 50 %) ou 20 ± 2 °C, (18 à 22 °C)
- 45 ± 15 % (60 à 30 %) ou 20 ± 5 °C (15 à 25 °C)

12. La limite d'endurance d'une peinture *σDp* est une limite spécifique aux peintures et son approche et son mode de calcul sont différents de la *σD.*

La première des deux situations illustre les conditions de conservation qui sont recommandées par les musées et qui correspondent au niveau AA de l'ICC. Quant à la seconde, elle correspond à de mauvaises conditions de conservation que l'on peut rencontrer dans certaines situations.

Pour éviter les dégradations mécaniques des peintures, nous savons que :

$$\sigma Dp > \Delta\sigma_{peint} \qquad (30)$$

Cela sous-entend que la limite d'endurance d'un film de peinture doit être supérieure aux variations de contrainte provoquées dans le film dans les conditions standard de conservation.

$$\sigma Dp > \Delta\sigma_{peint}(60\,\%/50\,\%) \qquad (31)$$

Pour les deux valeurs de *Kt* étudiées, nous avons :

• 100 % des cas étudiés qui vérifient $\sigma Dp > \Delta\sigma_{peint}(60\,\%/50\,\%)$ pour *Kt* = 100

• 80 % des cas étudiés qui vérifient $\sigma Dp > \Delta\sigma_{peint}(60\,\%/50\,\%)$ pour Kt = 140

En fait, dans les conditions standards de conservation des peintures *(HR = 55 % ± 5 %),* la limite d'endurance d'un film de peinture calculée avec le facteur de concentration de contraintes égal à 140 est plus restrictive (80 %) qu'une limite d'endurance calculée avec un *Kt = 100*. Par conséquent, la valeur de *Kt = 140* ne convient pas pour une utilisation rationnelle, dans le sens où elle ne répond pas exactement aux principes de conservation standard.

Par contre, dans le cas ou *Kt = 100* **la limite d'endurance de la peinture vérifie à 100 % les conditions requises pour une bonne conservation dans les conditions recommandées**.

De plus, *Kt =100* correspond au rapport entre la contrainte à la rupture et la limite d'endurance que nous avons déterminé lors de l'essai de fatigue d'une peinture à l'huile.

En validant la valeur 100 pour le facteur de concentration de contraintes, la limite d'endurance d'une peinture s'exprime par la relation suivante :

$$\sigma Dp = \frac{\sigma_{rupt}}{100} \qquad (32)$$

Suite à cette approche, nous proposons donc, cette expression.

**L'expression (32) va nous permettre d'évaluer une valeur de la limite d'endurance d'une peinture suffisamment précise pour constituer un outil supplémentaire dans le domaine de la conservation préventive.**

*III-2-5 Détermination de la variation minimale de tensions* $V_{mini}t$ *à partir de la contrainte à la rupture de la peinture*

Dans le domaine de la conservation d'œuvres peintes, nous sommes plus sensibles aux **notions de tension et variations de tension.** La tension d'une peinture se vérifie en appuyant sur sa surface et en évaluant intuitivement la déformation en fonction de la force appliquée. Une peinture détendue « flotte » ou fait une « poche », une peinture surtendue résonne sous les tapotements de l'expert. Toutes ces approches empiriques nous donnent la possibilité d'appréhender la tension. Du point de vue théorique, la tension est une grandeur mécanique. C'est une force qui s'exerce sur une longueur. Pour tendre une peinture, on applique tout le long d'un côté une force. La tension s'exprime en N/m ou en daN/m.

Pour obtenir la variation minimale de tension nous allons combiner plusieurs expressions déjà connues.

Nous avons vu que la tension *(t)* peut s'exprimer en fonction de la contrainte et de l'épaisseur du film *(e)*:

$$t = \sigma \times e \qquad (20)$$

La variation de tensions prendra la forme suivante : $Vt = \Delta\sigma \times e$(33)

Si on considère que la variation de contraintes est égale à la limite d'endurance de la peinture :

$$\Delta\sigma = \sigma Dp \qquad (34)$$

La variation minimale de tensions pourra s'écrire :

$$V_{mini}t = \sigma Dp \times e \qquad (35)$$

Et en associant l'expression (35) à $\sigma Dp = \frac{\sigma_{rupt}}{100}$ (32)

On obtient la relation recherchée, c'est-à-dire : $V_{mini}t = \frac{\sigma_{rupt} \times e}{100}$ (36)

Remarque : la contrainte s'exprime en *MPa* ou *N/mm²* et l'épaisseur en *mm*. Pour obtenir une $V_{mini}t$ en *daN/m,* il faut multiplier le résultat par 100, autrement dit $V_{mini}t$ *(daN/m)*= $\sigma_{rupt} \times e$.

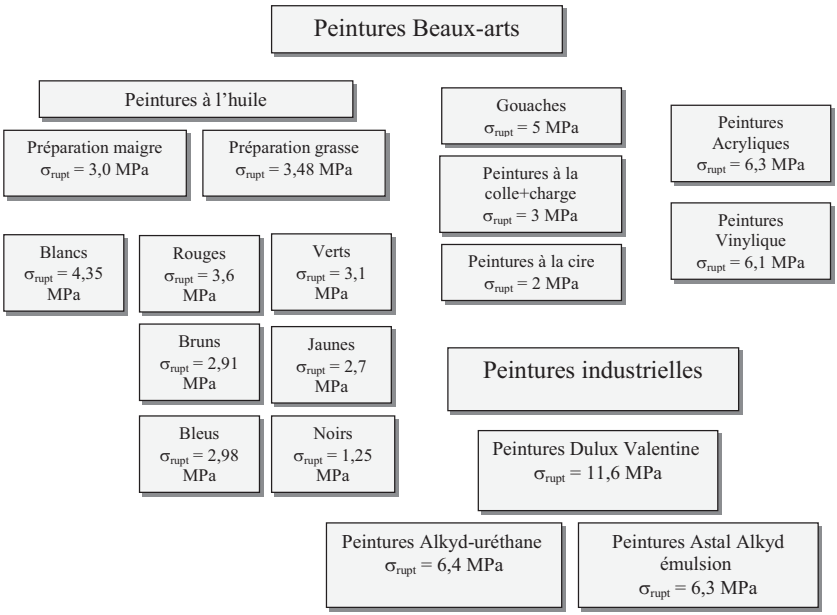
**L'expression (36) va permet le calcul de la variation minimum de tensions ($V_{mini}$ *t)* connaissant la contrainte à la rupture ($\sigma_{rupt}$*)* et l'épaisseur du film *(e)*, (annexe A3).**

*III-2-6 Classement des peintures en fonction de leur contrainte à la rupture*

La résistance à la rupture d'une peinture dépend de la nature du liant et des pigments. Les affinités entre liant/pigments, mais aussi,

comme nous l'avons vu précédemment, la forme, la taille et le positionnement des pigments ont une forte influence sur la cohésion de la peinture. Ce fait est illustré par la présence sur certaines peintures de zones colorées plus craquelées que d'autres.

Nous avons regroupé dans ce tableau, qui s'organise en deux groupes : les peinture Beaux-Arts dites artisanales et commerciales et peintures industrielles, les valeurs moyennes de contraintes à la rupture ($\sigma_{rupt}$) de plusieurs catégories de peinture, (annexe A1).




À partir de ce tableau, nous proposons un classement en fonction de la résistance à la rupture des peintures les plus fréquemment rencontrées dans les collections d'art moderne et contemporain.

Fragiles ($\leq$ 2 Mpa) : les peintures à l'huile de couleur noire et les peintures à la cire.

Peu résistantes (2 à 3 Mpa) : Les peintures à l'huile vertes, jaunes, bleues et les peintures à la colle

Résistantes (3 à 5 Mpa) : La céruse à l'huile, les peintures à l'huile blanches, rouges, brunes (marrons et ocres) et les gouaches.

Très résistantes (5 à 8 Mpa) : Les peintures acryliques (Liquitex Lascaux), vinylique (Flash), les peintures industrielles Astral Alkyde émulsion, Alkyde uréthane

Extra résistante : (> 8 Mpa) : Dulux Valentine.

Quant aux épaisseurs *(e)* des préparations et des couches de couleurs, une évaluation a été faite sur des centaines de micro-sections[13] :

- L'épaisseur des préparations maigres varie de 150 à 300 μm,
- L'épaisseur des préparations grasses varie de 50 à 100 μ,
- L'épaisseur des lavis, des glacis varie de 5 à 15 μm,
- L'épaisseur des peintures à pâte fine varie de 50 à 100 μm,
- Les peintures d'épaisseurs moyennes – appelées demi-pâte varie de 200 à 400 μm,
- Les peintures de matière picturale épaisse – appelées pleine pâte appliquée en une plusieurs couche e $>$ 600 μm,
- L'épaisseur de certains empâtements peut avoir plusieurs mm.

On s'accorde à dire que la tension moyenne d'une peinture sur châssis provoque des contraintes comprises entre 0,5 et 0,6 MPa à 55 % et 20 °C. Dans ces conditions de tension, les films de peinture se trouvent en dessous de leur contrainte à la rupture et pour la plupart d'entre eux, dans la zone d'élasticité où les déformations sont réversibles.

Dans un climat instable les variations de tension vont osciller toujours autour de la valeur de la tension initiale de la peinture. Si la tension de la peinture est trop élevée, *la variation moyenne de tensions* sera trop importante et les contraintes engendrées dans la peinture provoqueront à court et moyen terme des dégradations mécaniques dues à une fatigue mécanique.

C'est pour cette raison qu'il est fondamental dans la conservation des peintures d'art moderne et contemporain de maîtriser les paramètres climatiques de manière à ce que la variation minimum de tensions $V_{mini}t$ soit toujours respectée.

13. Depuis 1997 nous faisons dans le cadre du LARCROA des observations au microscope optique de stratigraphies de peintures.

IV

# Dégradation des peintures

L'artiste joue avec la matière aussi bien qu'avec les couleurs. La surface et son aspect s'intègrent aux formes et aux couleurs. La matière devient harmonie dans certaines œuvres modernes et contemporaines et l'aspect de surface a pris une telle importance qu'il est impensable qu'il soit altéré. Combien d'œuvres issues des courants de l'abstraction picturale ont perdu une partie de leur splendeur durant leur courte vie à cause de dégradations mécaniques prématurées qui auraient pu être évitées.

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.** Dans ce chapitre nous allons étudier les processus de dégradation mécanique des peintures, autrement dit expliquer les mécanismes d'apparition des craquelures et des réseaux d'une peinture soumise à des sollicitations climatiques. Ce phénomène est lent et s'étale sur plusieurs années.

## IV-1 Durée de vie des matériaux

Cette notion concerne tous les matériaux sans exception. Elle se justifie vis-à-vis des œuvres d'art à partir du moment où l'œuvre se réduit à un assemblage de matériaux et que chacun d'entre eux assure soit une fonction structurelle, soit une fonction esthétique.

Bien que cette vision soit très simplificatrice, elle permet au scientifique d'aborder les problèmes qu'il se pose avec plus d'objectivité. **Ainsi nous pouvons définir cette notion comme étant la période pendant laquelle les matériaux constitutifs de l'œuvre sont capables d'assurer les fonctions pour lesquelles ils sont prévus.**

Dans le domaine des arts, nous pouvons considérer que certains constituants, en se dégradant, ne jouent plus leur rôle, c'est le cas d'une toile de fibres naturelles oxydées ou le cas d'un film de peinture qui se

fissure. La durée de vie de l'œuvre est donc limitée. À l'inverse des produits industriels, que l'on remplace lorsqu'ils sont hors usage, notre devoir est de prolonger la vie des œuvres par différents moyens de conservation.

## IV-2 Facteurs de dégradation mécanique des peintures

L'environnement climatique est le facteur principal de la dégradation des œuvres car il agit continuellement. Son impact sur la conservation des œuvres dépend de son agressivité.

À cela s'ajoutent des facteurs ponctuels issus du milieu dans lequel les œuvres sont conservées, les transports et les manutentions. Bien qu'occasionnels, leurs impacts peuvent être très nocifs en terme de conservation.

Nous écartons de ce paragraphe tout ce qui est catastrophes naturelles et notamment les tremblements de terre et les causes accidentelles de manipulations, dégâts des eaux, incendie.

### *IV-2-1 Les variations d'humidité et de température*

Suivons l'évolution des tensions d'une peinture à l'huile sur toile, présentée dans une salle d'exposition durant 5 mois. Le climat n'est pas très stable et à chaque variation d'humidité la peinture réagit immédiatement. Aux humidités les plus élevées les contraintes se relaxeront alors qu'aux humidités les plus basses les contraintes s'élèveront pour atteindre un maximum, fig. 63.

Par rapport aux conditions climatiques idéales de conservation de cette peinture ($V_{mini}t$ = 3,6 *daN/m*, *58 %<HR< 63 %*), l'analyse de la courbe nous donne :

- les valeurs de tension supérieures à 26,8 daN/m représentent 62 %,
- les valeurs de tension comprises entre 23,2 et 26,8 daN/m sont à hauteur de 14 %,
- les valeurs inférieures à 23,2 daN/m ne dépassent pas 24 %.

Autrement dit, la peinture a subi pendant les 5 mois d'exposition, 62 % de sur-contraintes.

L'accumulation de sur-contraintes sur plusieurs mois ou plusieurs années, même si elles sont inférieures à la résistance statique à la rupture, provoque une fatigue mécanique de la matière, qui se manifeste, au bout d'un certain nombre de cycles, par une rupture de celle-ci. Généralement, c'est au niveau d'un défaut dans la matière que la rupture s'amorce.

Les risques de passer des conditions d'équilibre à celle de rupture, dépendent de l'état de contrainte initiale dans lequel la peinture se

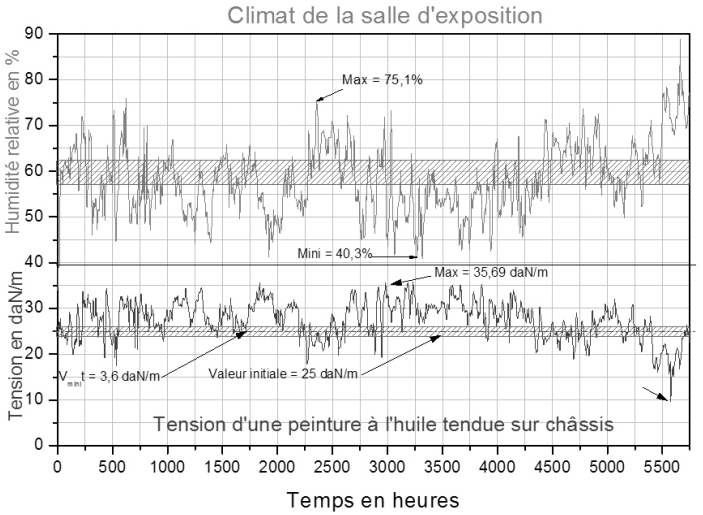



*Figure 63 : Analyse d'une courbe de variations de tension provoquées par les variations d'humidité relative.*

situe par rapport à sa résistance. Ainsi, plus une peinture est tendue, plus les contraintes dans les différentes couches se rapprochent des contraintes à la rupture. Cette proximité, aux limites de la résistance des matériaux, la rend plus fragile et sensible aussi bien aux variations d'humidité et de température, qu'aux chocs mécaniques. Les surtensions d'un tableau peuvent donc provenir des conditions climatiques, mais aussi d'interventions extérieures.

### *IV-2-2 Les vibrations*

Dans notre société industrieuse les sources de vibrations sont nombreuses.

A l'intérieur des bâtiments elles sont générées par l'activité des occupants, par les équipements techniques de chauffage, ventilation, climatisation (CVC), par le déplacement d'objets lourds, par des travaux internes au bâtiment.

À l'extérieur des bâtiments, dans les grandes villes, elles peuvent être provoquées par la circulation urbaine, le passage du métro. Dans les zones rurales, c'est la proximité des réseaux de circulation routière et ferroviaire qui peut être responsable de vibrations. Le vent et les intempéries sont aussi à l'origine de vibrations. En général, ces vibrations n'ont pas d'impact sur la conservation des œuvres.

D'autres sources de vibrations ont lieu lors des transports des œuvres que ce soit en camion ou en avion. Les vibrations émises par

ces moyens de transport sont dites aléatoires et peuvent avoir un impact sur la conservation des œuvres. Voyons deux cas de figure.

Une œuvre est chargée dans un camion pour traverser Paris. L'œuvre est emballée dans une double enveloppe de Tyvek® et de Bullpack®. Elle est posée à la verticale et arrimée dans la caisse du camion qui a été instrumentée par un accéléromètre MRS 165 pour enregistrer les vibrations, fig. 64. La circulation est relativement fluide mais régulée par une série de feux rouges. À chaque démarrage du camion, on enregistre une forte augmentation des vibrations de la caisse qui fait résonnance avec le moteur. Le graphe des vibrations permet de dire que le camion s'est arrêté 17 fois en 23 minutes de déplacement. Les vibrations se propagent dans les trois dimensions. Vu que la peinture est à la verticale, les vibrations en Y et Z sont les plus dangereuses pour sa conservation.

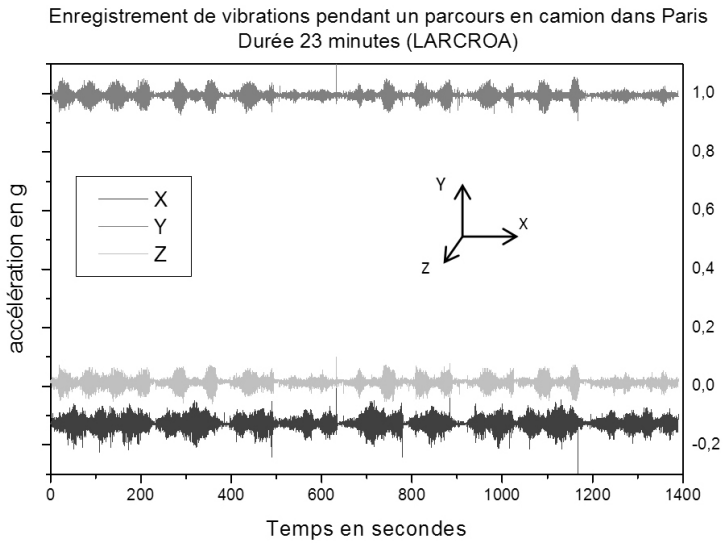



*Figure 64 : Enregistrement des vibrations provoquées lors d'un transport d'une œuvre dans un camion.*

Le déplacement d'une œuvre en avion est d'une autre nature. L'œuvre, emballée dans une caisse en bois « musée standard » est également arrimée à la verticale et l'accéléromètre est placé sur la caisse. L'amplitude des vibrations est beaucoup moins régulière, fig. 65. Les vibrations ne sont pas homogènes dans les trois dimensions. La première phase correspond au décollage de l'avion. Pendant cette phase, les vibrations sont fortes, elles sont dues à la poussée des réacteurs et du roulement au sol. Ensuite, durant la phase de vol les vibrations s'atténuent et deviennent régulières bien qu'elles se fassent

sentir davantage en Z. À l'atterrissage, une vague très importante de vibrations se propage dans tous les sens. Elle est due au contact de l'avion sur le sol et au roulement à très grande vitesse. C'est pendant cette phase que les risques de dégradation sont les plus élevés au niveau d'une œuvre d'art.

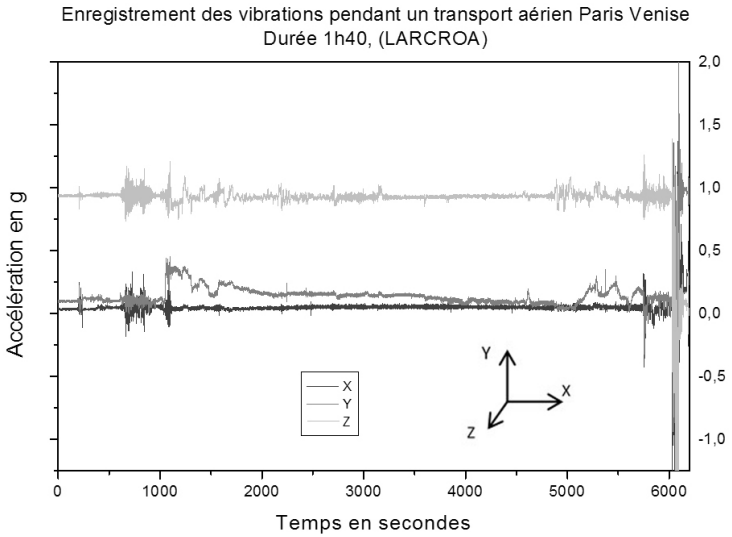



*Figure 65 : Enregistrement des vibrations provoquées lors d'un transport d'une œuvre dans un avion.*

Les peintures, comme toutes les membranes souples, répondent à la théorie vibratoire des systèmes continus. Elles ont tendance à vibrer à certaines fréquences, appelées fréquences de résonance naturelle. Il y a résonnance quand deux ondes de même fréquence se rencontrent.

À chaque fréquence naturelle correspond une déformation appelée mode propre, que la peinture tend à prendre, lorsqu'elle atteint cette fréquence.

Lorsqu'une peinture est excitée par un chargement dynamique tel que les vibrations d'un camion ou d'un avion, elles peuvent entrer en résonance et produire des déformations importantes sur les peintures.

Une peinture rectangulaire tendue et fixée sur les 4 côtés d'un châssis, se déforme selon plusieurs modes propres qui sont décrits pour chaque fréquence de résonance par un diagramme d'ondes stationnaires. Ici, nous avons simulé les déformations induites par les différents modes, fig. 66.

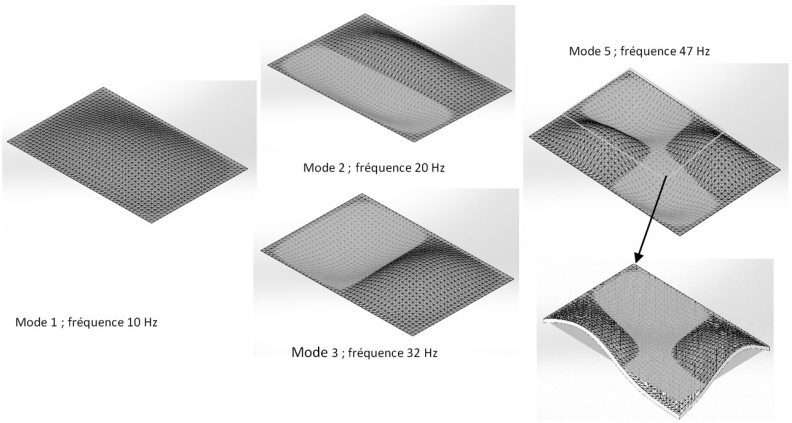



*Figure 66 : Déformation d'une membrane induite par les différents modes.*

Ce sont des déformations de type sinusoïdal qui sont responsables des variations de contrainte dans une peinture en vibration. Cela nous ramène à un problème de fatigue mécanique où les contraintes sont produites, non plus par des variations de climat mais par une série de flexions de la peinture. Des contraintes de traction et de compression s'alternent au rythme de la fréquence, fig. 67.

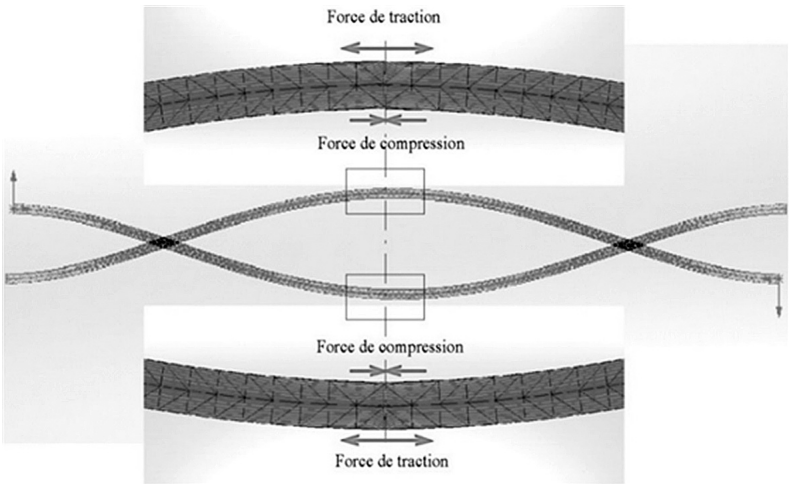



*Figure 67 : Contraintes induites dans la membrane durant les vibrations.*

La tension des peintures modifie leurs caractéristiques modales. Par exemple, plus la tension de la peinture est élevée, plus la fréquence de résonance augmente. **Tant que les variations de contrainte dans le film de peinture sont inférieures à la limite d'endurance, les vibrations ne portent pas de préjudice du point de vue de son intégrité mécanique.**

Prenons l'exemple d'une peinture à l'huile sur toile tendue sur un châssis standard. Ses dimensions sont de 1,80/1,20 m et son épaisseur est de 2 mm. Cette peinture est transportée en camion dans Paris (voir exemple ci-dessus). Les vibrations enregistrées sont transmises intégralement à la peinture.

Les variations d'accélérations maximales enregistrées dans les trois directions (X, Y, Z) sont de 0,11 g[1]. En partant de ces données, le calcul (annexe A4) donne une amplitude maximale de *0.215* mm. Les déformations de la peinture s'apparentent à une série de flexions. En prenant un petit élément de la membrane de peinture dans sa partie la plus fléchie, on peut calculer, la déformée d'une poutre en flexion, la force de flexion et la contrainte maximale, connaissant les paramètres géométriques et mécaniques de l'élément de peinture. La variation de contraintes qu'entraînent ces vibrations est de $\Delta\sigma = 0{,}005\ MPa$ (annexe A4).

Cette variation de contraintes de type sinusoïdal est plus faible que la limite d'endurance de cette peinture $\sigma Dp = 0{,}0233\ MPa$, ce qui signifie qu'a aucun moment, les vibrations de ce type ne peuvent être responsables d'une fatigue mécanique.

Dans le cas du transport en avion, les vibrations importantes se manifestent seulement à l'atterrissage. Les accélérations sont d'environ 2 g et après calcul la $\Delta\sigma = 0{,}09\ MPa$ (annexe A4). Dans ce cas, la variation de contraintes a augmenté, elle devient supérieure à la limite d'endurance de la peinture.

### *IV-2-3 Le temps, la durée d'exposition*

Les effets du temps ont aussi une responsabilité dans les mécanismes de fissuration. Les matériaux organiques qui composent la plus grande partie des peintures sont des polymères sensibles à leurs propres milieux naturels. La lumière, la présence d'oxygène dans l'air et l'eau sont les principaux vecteurs des processus de dégradation chimique. Les réactions de dégradation par photo-oxydation, oxydation, thermolyse, hydrolyse et leur combinaison, aboutissent la plupart du temps à des ruptures de chaînes polymériques et se traduisent par une perte des propriétés initiales. Les peintures sont des objets 2D et

1. g est l'accélération. Elle est égale à 9,81 m/s.

exposent aux facteurs de dégradation d'importantes surfaces. La vitesse de dégradation dépend donc des conditions de conservation, de la qualité des matériaux de mise en œuvre et de leur compatibilité. Il est difficile de la prévoir, mais en général la résistance à la rupture des peintures décroît assez rapidement au début de leur vie matérielle puis se stabilise[2], fig. 68.

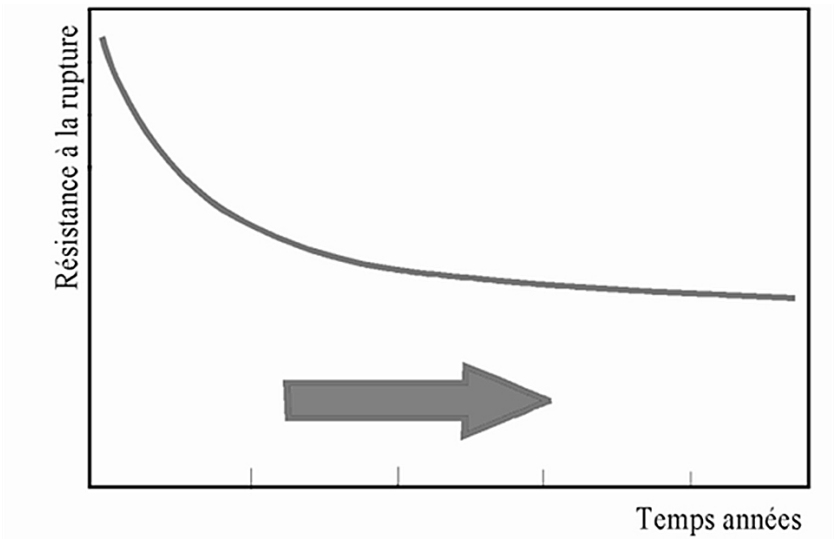



*Figure 68 Courbe théorique de la résistance à la rupture d'un matériau polymérique.*

Tandis que la résistance à la rupture du film de peinture décroît, les variations de tension ou de contraintes continuent à s'exercer, comme nous l'avons vu précédemment. Au cours du temps les probabilités de ruptures de la matière picturale augmentent jusqu'au moment où les contraintes dans le film deviennent supérieures à la contrainte de rupture du film de peinture. Les conditions de rupture cohésive du film étant atteintes, une ou plusieurs fissures se formeront, fig. 69.

La probabilité, pour que les courbes d'évolution des contraintes à la rupture et des contraintes dans la peinture se superposent, se situe autour de 130 ans selon certaines estimations. Néanmoins, suivant les conditions de conservation et la qualité de l'œuvre, cette estimation peut être beaucoup plus brève.

2. Verdu Jacques, « Vieillissement physiques des plastiques », *Techniques de l'ingénieur*, 1984.

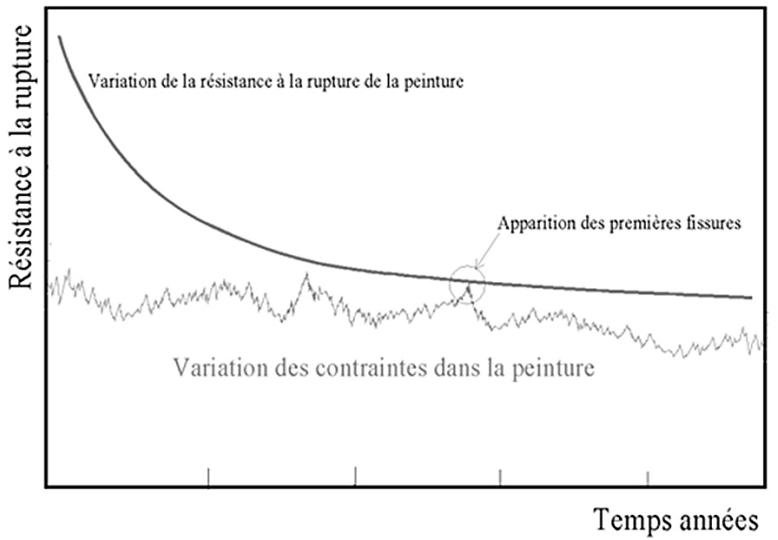



*Figure 69 : Mécanisme de rupture cohésive d'une peinture.*

## V-3 Propagation d'une craquelure dans le cas d'une étude expérimentale

Les craquelures se propagent en profondeur mais aussi en surface. Lorsque le processus de rupture cohésive est engagé, la fissure de la matière picturale s'étend en suivant les zones de fragilité de la matière où se concentrent les contraintes les plus élevées. La rupture cohésive se poursuit peu à peu en libérant de l'énergie, c'est une dégradation mécanique de la matière picturale irréversible.

**En termes de conservation de l'œuvre, cela signifie que le processus d'altération qui se développe nécessitera de prendre au plus vite des mesures conservatives pour le circonscrire.**

### *IV-3-1 Dispositif expérimental*

Pour suivre la propagation d'une fissure dans le temps, nous avons conçu un dispositif expérimental, permettant de créer des variations de tension sur un échantillon de peinture à l'huile sur toile[3]. C'est avec un appareil d'essais que nous avons provoqué des variations de tension d'environ *17,25 daN/m* pendant 85 000 cycles sur une durée de 162,54 heures. Après avoir créé une amorce de fissure de 7 mm sur l'éprouvette, pour engager le processus dans les meilleures conditions,

3. Peinture de référence, voir annexe.

la progression de la craquelure a été enregistrée par une série de photographies numériques prises pendant l'essai. Sur chaque photo numérisée, la longueur de la craquelure a été mesurée avec précision à l'aide un logiciel de traitement d'images Cyberview®, fig. 70.

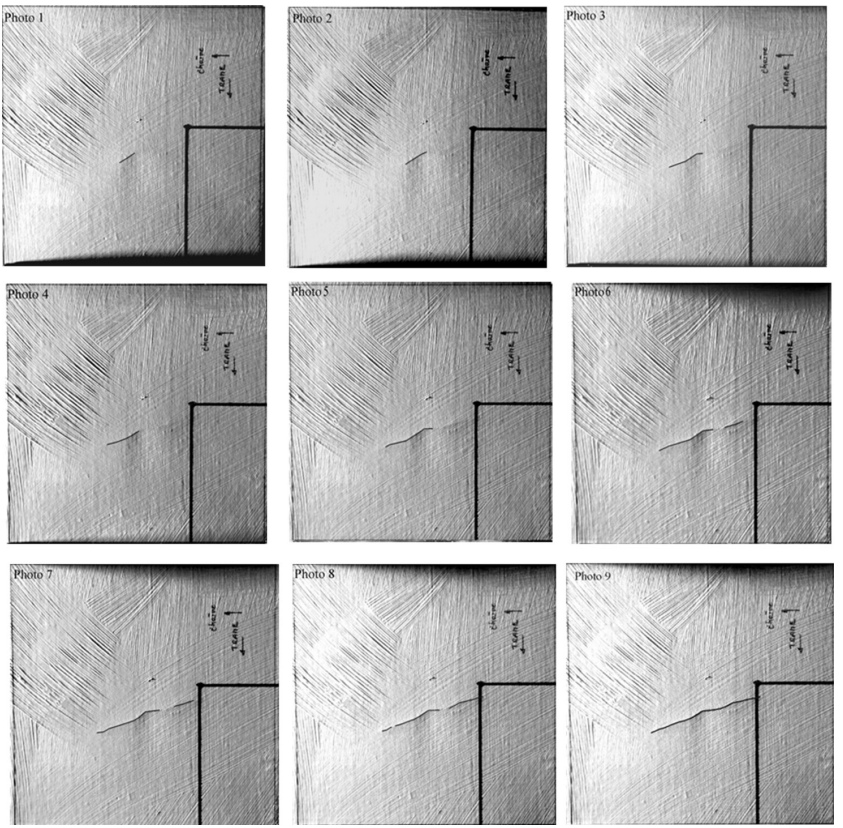



*Figure 70 : Ensemble des photos pris au cours du développement de la craquelure.*

*IV-3-2 Interprétation des résultats*

Les résultats sont regroupés dans le tableau ci-après.

La progression de la craquelure en fonction du nombre de cycles est représentée par le graphe de la fig. 71.

Cette courbe, n'étant pas linéaire, signifie que le processus de propagation d'une craquelure est lié, au cours du temps, à des états de comportement différents de la matière picturale.

| N° de la photo | Nombre de cycle | Lg. de la craquelure mm |
|---|---|---|
| 1 | 2 753 cycles | 7,18 |
| 2 | 14 039 cycles | 7,30 |
| 3 | 19 689 cycles | 8,13 |
| 4 | 29 841 cycles | 11,50 |
| 5 | 39 536 cycles | 17,23 |
| 6 | 46 344 cycles | 24,34 |
| 7 | 56 960 cycles | 30,93 |
| 8 | 67 303 cycles | 36,93 |
| 9 | 81 325 cycles | 47,70 |

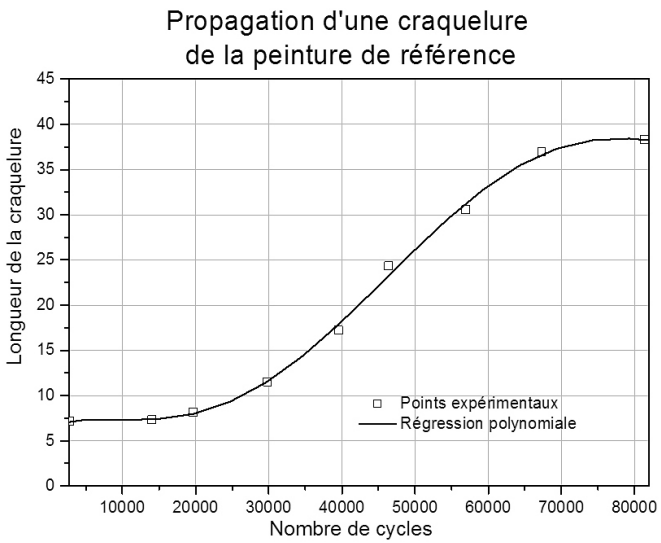



*Figure 71 : Évolution de la longueur de la craquelure avec le nombre de cycles.*

La courbe obtenue présente 3 zones :

1- Entre 0 et 19 689 cycles, la craquelure évolue très lentement. La matière picturale a une bonne cohésion et résiste bien aux variations de tension qui s'exercent sur elle. Nous sommes dans une période où les effets de la dégradation mécanique évoluent lentement. La propagation de la fissure est rectiligne, photos 1 et 2.

2- Entre 19 689 et 56 960 la progression de la craquelure s'accélère. La matière sous l'action répétée des variations de tension subit une

fatigue mécanique. Bien que les valeurs des contraintes dynamiques soient inférieures à la contrainte de rupture statique, la propagation de la fissure progresse plus vite. Nous sommes dans une période critique où les effets de la dégradation mécanique évoluent très rapidement et deviennent très difficiles à circonscrire. La propagation de la craquelure n'est plus rectiligne et continue, elle progresse en formant de petits fragments qui se créent au niveau de défauts, photos 3, 4, 5, 6, 7.

3- Après 56 960 cycles les contraintes diminuent et la progression de la craquelure se ralentit. Les fragments de craquelure se rejoignent, alors qu'ailleurs d'autres amorces de craquelures se créent, nous sommes dans le cas de l'interruption de la fissure[4] et d'amorces de nouvelles fissures.

Les craquelures peuvent apparaître simultanément en plusieurs endroits de la surface de la peinture. Elles se développent indépendamment les unes des autres, se ramifient, se raccordent et finissent par créer un réseau de craquelures. Parallèlement à leur propagation en longueur, elles s'élargissent avec le temps. Les craquelures les plus fines sont les plus récentes et les plus actives. Les craquelures les plus larges sont les plus anciennes et les moins actives. La morphologie des craquelures et des réseaux de craquelures d'une peinture sont liés à la nature de ses constituants et de sa technique, fig. 72.



*Figure 72 : Réseau de craquelures*

4. Elber W., « Fatigue crack closure under cyclic tension », 1970.

Souvent, la présence de ce type d'altération n'apparaît pas clairement. La craquelure peut être sous-jacente, le réseau se fait discret, sa progression est très lente et demande souvent plusieurs années avant d'être perceptible. La matière paraît intacte, alors qu'un examen attentif nous révèle que le processus de fissuration a débuté.

*IV-3-3 Sensibilité à l'humidité d'une peinture dégradée*

Sans attendre qu'une peinture atteigne un degré de dégradation très avancé, on peut avoir la curiosité de connaître le comportement d'une peinture craquelée.

Reprenons l'exemple de la peinture à l'huile que nous avons précédemment étudiée et faisons lui subir un craquellement artificiel afin d'obtenir une densité[5] de craquelures de 5 mm /cm$^2$. Ensuite nous la soumettons aux mêmes essais que précédemment, fig. 73.

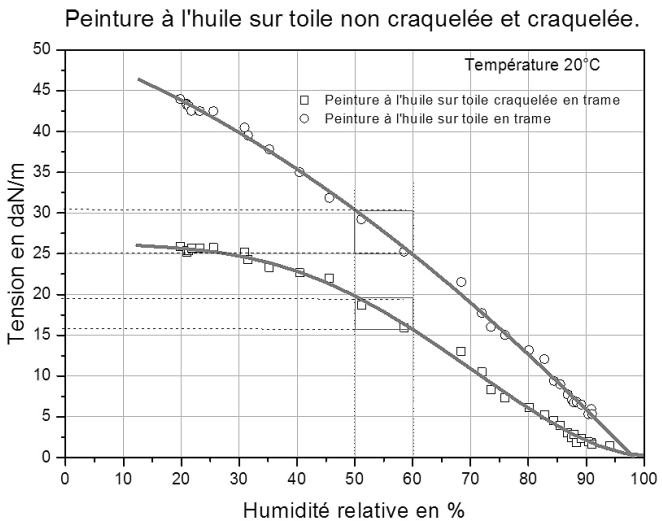



*Figure 73 : Sensibilité à l'humidité d'une peinture à l'huile sur toile craquelée.*

Son comportement vis-à-vis de l'humidité a changé. À 60 % d'humidité relative la tension initiale est passée de *25 daN/m* pour la peinture non dégradée à *16 daN/m* pour la peinture craquelée. À chaque craquelure, la matière picturale a libéré des contraintes

5. La densité de craquelures d'une surface significative est le rapport de la longueur en mm des craquelures sur la surface (voir Alain Roche, *Comportement mécanique des peintures Dégradation prévention*, Paris, CNRS Éditions, 2003).

et la tension a diminué. Ce phénomène irréversible est un signal d'alarme dû à un problème de conservation de la peinture. Dans les conditions de conservation des musées 55 % ± 5 % HR les variations de tension de la peinture non dégradée sont d'environ *5 daN/m*, alors que pour la peinture dégradée elles sont de *4 daN/m*. En respectant la $V_{mini}t$ calculée, la zone de tolérance d'humidité s'est étendue de 48 % à 60 % HR au lieu de 51 à 60 % HR et elle s'est déplacée vers des plages d'humidité plus sèches.

Cet exemple d'analyse des conséquences de la dégradation mécanique d'une peinture, qu'elle soit à l'huile sur toile ou d'une autre technique, illustre le changement de comportement d'une même peinture dans des états différents : non dégradé, dégradé. Il est donc indispensable que tous les responsables de collection ; conservateurs, chargés de collections, régisseurs, restaurateurs, collectionneurs, restent très vigilants vis-à-vis de leurs collections et soient prêts à intervenir à la moindre alerte.

**N'oublions jamais que si l'on n'anticipe pas sur le vieillissement des peintures modernes et contemporaines, le temps les marquera d'un réseau de craquelures qui témoignera d'un véritable affaiblissement irréversible de leur cohésion et d'une dévalorisation esthétique.**

# Partie II

V

# Utilisation d'un diagramme de sensibilité

Dans le contexte de la conservation préventive des œuvres peintes d'art moderne ou contemporain, on peut être confronté à deux types de situation.

1- On connaît les caractéristiques climatiques du lieu d'exposition, suite à des enregistrements et l'on désire connaître l'impact de ce climat sur la conservation des peintures. Quelle est la méthode permettant d'évaluer les variations de tension dans une peinture ?

2- On connaît la sensibilité des peintures aux variations d'humidité et de température et l'on souhaite leur trouver les conditions climatiques les mieux adaptées à leur conservation. Comment peut-on prédire les meilleures conditions de conservation des peintures ?

Pour répondre à ces interrogations, nous allons avoir recours aux diagrammes de sensibilité des peintures et aux limites d'endurance définies par la variation minimum de tension $V_{mini}t$

## V-1 Méthode d'évaluation des tensions dans une peinture

Prenons l'exemple d'une peinture à l'huile sur toile de grand format qui se trouve placée dans une salle d'exposition aménagée dans une ancienne chapelle désaffectée. À 60 % de HR, la tension de cette peinture est de 25 daN/m.

La peinture est représentée par la courbe de *t(HR)* en sens trame, fig. 74. Elle présente trois parties. Entre 10 % et 30 % d'HR, la tension décroît faiblement, alors qu'à partir de 40 % jusqu'à 85 % HR la chute de tension est plus accentuée et quasiment linéaire. La réactivité de la toile se manifeste faiblement entre 85 % et 90 % d'HR par des valeurs de tension qui augmentent légèrement. Le comportement de ce type de peinture est relativement simple car ce sont les 59 % de matériaux hydrophiles qui s'expriment dans cette courbe.

Le climat de ce lieu d'exposition est instable comme nous le montrent les enregistrements de d'HR. La courbe du diagramme de sensibilité à l'humidité de cette peinture est définie par la fonction polynomiale :

$$Y = 38,6918 + 0,42551X - 0,01463X^2 + 6,6344E^{-5}X^3 - 1,19481E^{-20}X^4 \qquad (37)$$

où Y est la valeur de la tension et elle s'exprime en daN/m et X est l'humidité relative en %, autrement dit l'expression peut s'écrire :

$$t(HR) = 38,6918 + 0,42551HR - 0,01463HR^2 + 6,6344E^{-5}HR^3 - 1,19481E^{-20}HR^4 \qquad (38)$$

L'expression *(38)* permet de calculer les valeurs de tension $t$ pour chaque valeur de *HR*. Autrement dit, pour chaque valeur d'humidité relative, le diagramme de sensibilité nous permet d'obtenir une valeur de tension.

En introduisant dans notre modèle[1] dynamique (*fonction polynomiale du diagramme*), les valeurs d'humidité de la salle d'exposition, on transforme les graphes de variation d'humidité ou de température en une représentation des sollicitations mécaniques dans la peinture. Par ce biais il est donc possible de prédire les variations de tension dans une peinture, fig. 74.

Pendant les 1 000 heures d'enregistrement, les tensions oscillent autour d'une valeur moyenne de 24 daN/m, avec des sur-tensions de 35 daN/m et des sous-tensions de 18 daN/m dans la peinture. Autrement dit, des variations de tension *(Vt)* de 16 daN/m se produisent en moins de 10 heures.

Nous pouvons compléter l'exploitation de ce graphe, fig. 75 en traçant les limites de la variation minimale de tensions de $V_{mini}t$ = 3,6 daN/m et de la variation de tension $Vt$ =6,5 daN/m de cette peinture entre 50 % et 60 % HR. Pour cela nous allons tracer :

1- la droite de régression linéaire de l'ensemble des variations de tension,

2- de part et d'autre de cette droite, les limites de la variation minimale de tension et des variations de tension à 55 % ± 5 % HR.

L'interprétation de ce graphe est très rapide, puisque toutes les valeurs de tensions qui sont comprises dans la zone $V_{mini}t$, soit 20 % des valeurs n'entraînent pas de fatigue et de dégradations mécaniques.

1. Un modèle est une représentation mathématique d'un système physique telle que l'action de l'humidité sur une peinture. Un modèle est statique si les paramètres d'entrée sont constants et dynamique si les sollicitations sont variables dans le temps.

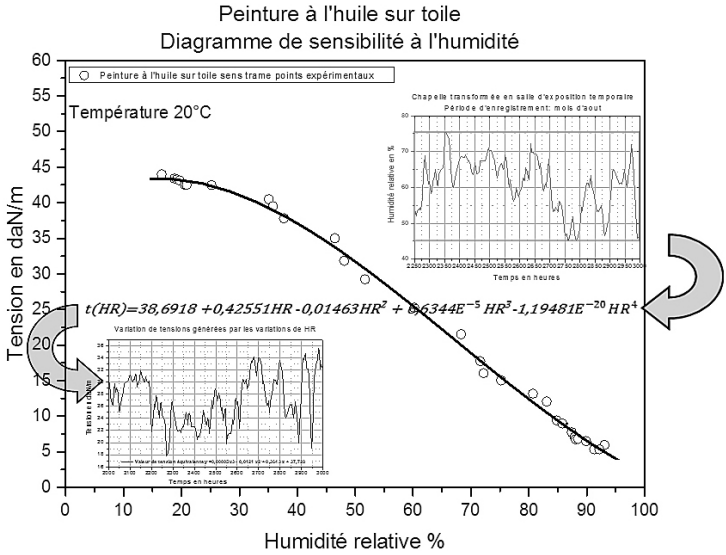



*Figure 74 : Transformation des variations de HR en tensions*

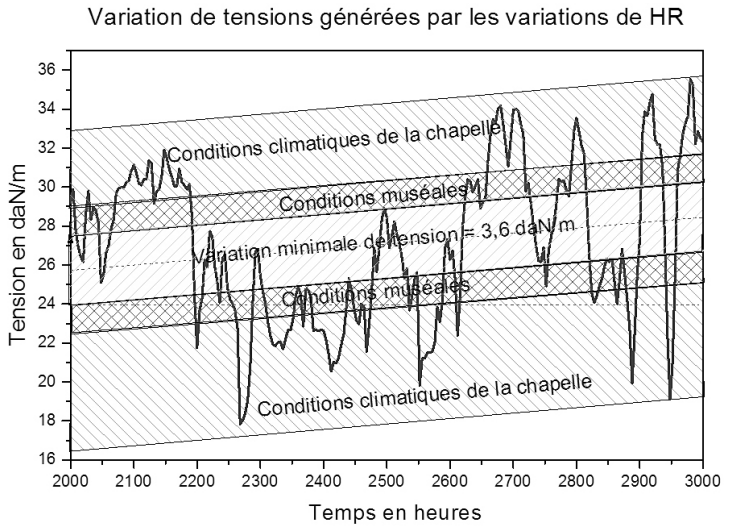



*Figure 75 : Exploitation du graphe des tensions.*

Ce n'est pas le cas de la zone qui coïncide avec les conditions climatiques recommandées pour les musées, car avec environ 22 % des valeurs de contrainte répondant aux critères de conservation, les risques de dégradation bien que mineurs existent. Par contre, la zone

correspondant au climat réel de la chapelle, avec plus 58 % des valeurs en dehors de la $V_{mini}t$ fait courir d'énormes risques de dégradations mécaniques aux œuvres qui y sont présentées.

**L'utilisation de ces outils – diagrammes de sensibilité, fonction polynomiale et la $V_{mini}t$ – permet d'anticiper sur le vieillissement mécanique d'une peinture, mais aussi d'intervenir afin de prendre des mesures préventives.**

## V-2 Prévision des conditions climatiques de conservation des peintures

**Désormais on peut s'appuyer sur une valeur de référence qui nous permet de conclure qu'une variation de tension dans une peinture *(Vt)* supérieure à la variation minimum de tension *($V_{mini.}t$)*, est dangereuse à court, moyen et long terme.**

Cet outil d'évaluation des risques de dégradation permet également de calculer et de prévoir les valeurs d'humidité et de température les plus adaptées à leur conservation. Si les conditions de conservation ne sont pas respectées, la fatigue mécanique subie par la peinture peut être responsable de fissurations, de craquelures, de soulèvements et des pertes de matière, fig. 76.



*Figure 76 : Exemple d'un détail d'une peinture Foujita, 1928.*

Pour éviter ce scénario catastrophique, il faut trouver, à l'aide de nos outils, un compromis entre une $Vt$ proche $V_{mini.}t$ et des paramètres climatiques gérables par la CTA ou tous autres systèmes de climatisation.

À titre d'exemple, nous allons calculer et chercher graphiquement, les conditions de conservation, de deux types de peinture – peinture à la détrempe sur papier et peinture à l'huile sur toile – qui respectent le mieux l'intégrité des œuvres.

Nous indiquons dans les encadrés suivants la démarche à suivre.

*Peinture à la détrempe sur papier*

Sachant que la contrainte à la rupture du film de peinture à la colle est de l'ordre de $\sigma_{\text{rupt}}$ = 3MPa et son épaisseur moyenne est de 0.8 mm. En appliquant la relation (36) la $V_{mini.}t$ est égale à :

$$V_{mini}t = \frac{3N.mm^{-2} \times 0{,}8\ mm}{100} = 2{,}4daN/m \qquad (39)$$

Sur le diagramme de sensibilité à l'humidité de la peinture, fig. 77, nous pouvons faire glisser cette $V_{mini}t$ = 2,4 daN/m le long de la courbe moyenne et enregistrer les valeurs d'hygrométrie pour chaque position à la manière d'un curseur, en maintenant la $V_{mini}t$ constante et en ajustant l'hygrométrie.

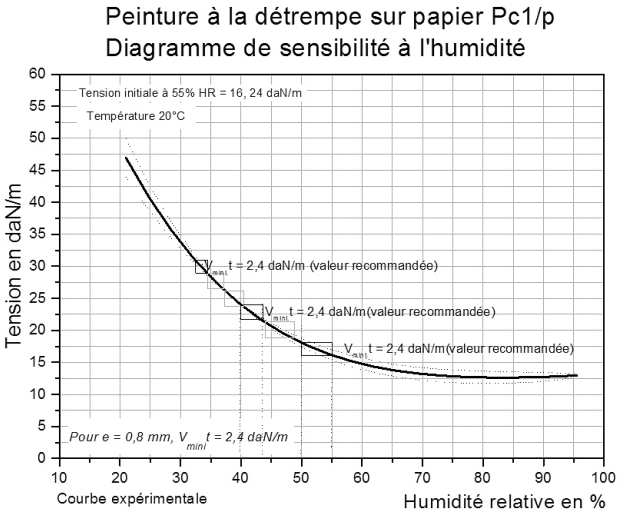



*Figure 77 : Recherche des meilleures conditions de conservation sur une courbe de sensibilité à l'humidité d'une peinture à la colle.*

Nous avons une infinité de possibilités. Dans la portion de la courbe comprise entre 30 % et 50 %, les écarts d'humidité seront d'environ 4 % pour une $V_{mini}t$ de 2,4 daN/m. En deçà de 30 % et au-delà de 50 %, la pente

de la courbe change et les écarts auront tendance à diminuer ou augmenter.

À titre d'exemple nous avons retenu seulement deux propositions de plage d'humidité relative respectant la limite d'endurance de la peinture, (rectangles noirs).

Elles se situent :

– entre 55 et 60 % HR soit une variation ΔHR = 5 %

– entre 40 et 44 % soit une variation ΔHR = 4 %.

Le choix de l'une des deux propositions va dépendre de différents critères :

• La possibilité aux équipements de traitement de l'air de gérer ces consignes, malgré les faibles marges de variation,

• L'inertie du bâtiment et son état sanitaire,

• Un choix visant à trouver la solution la plus économe en termes d'énergie,

• La présence dans la même salle d'autres œuvres de techniques différentes,

• La fréquence, le flux et le nombre de visiteurs.

*Peinture à l'huile sur toile*

En appliquant la même démarche, nous pouvons calculer la $V_{mini.}t$ = *4,8 daN/m* sachant que la contrainte à la rupture du film de peinture à l'huile est de l'ordre de $\sigma_{\text{rupt}}$ =3,00 MPa et son épaisseur moyenne est de 1,6 mm. En glissant cette $V_{mini.}t$ = 4,8 daN/m, sur le long de la courbe du diagramme, on enregistre les valeurs d'hygrométrie pour chaque position, fig. 78.

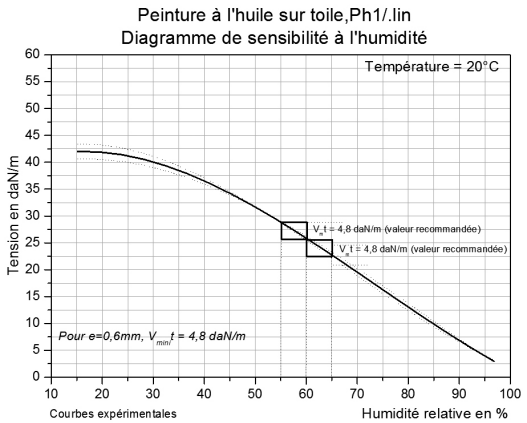



*Figure 78 : Recherche des meilleures conditions de conservation sur une courbe de sensibilité à l'humidité d'une peinture à l'huile.*

Entre 45 % et 75 % d'humidité, la relation entre tension et HR est linéaire par conséquent la variation d'humidité relative respectant une $V_{mini}$ *t=4,8 daN/m* est de 5 % HR. On retiendra par exemple deux positions : entre 55 et 60 % HR et entre 60 % et 65 % HR.

Nous voyons donc l'intérêt d'utiliser ces diagrammes de sensibilité à l'humidité, car ils permettent rapidement de trouver les conditions idéales de conservation.

Contrairement à d'autres démarches, en utilisant cette méthode, la recherche des conditions climatiques de conservation se base uniquement sur des données rationnelles. **L'œuvre redevient le sujet principal de la conservation.** Néanmoins, comme les possibilités sont multiples, il sera toujours possible de faire jouer d'autres critères par la suite et, notamment, des paramètres humains et énergétiques.

VI

# Principes de conservation des peintures

Nous avons tous vu, en parcourant les musées et les expositions, des peintures d'une cinquantaine d'années présenter des signes de dégradation avancée. En faisant un tour des ateliers d'état ou privés, on peut être consterné par l'état de conservation de certaines œuvres modernes et contemporaines qui attendent d'être restaurées. La conservation de ce type d'œuvres est donc, pour nous tous, une préoccupation. Anticiper et éviter les dégradations mécaniques irréversibles des œuvres fragiles, telles que les peintures, est un engagement que l'on doit affronter pour pouvoir communiquer aux futures générations un patrimoine bien conservé.

Les peintures sont des objets fragiles et leur durée de vie est limitée, comme tous les matériaux, dans le temps. Nos traditions occidentales souhaitent rendre ces œuvres pérennes car elles font partie de notre patrimoine culturel. La durée de vie limitée et la pérennité, voilà un premier paradoxe qui a été et est encore, à l'origine de nombreux débats et de réflexions, nous n'y reviendrons pas.

Dans le domaine pratique, l'approche de la conservation préventive d'une collection de peintures doit résulter d'une méthode facile à mettre en œuvre. Dans ce but, notre objectif est de fixer quelques règles de base sur lesquels la conservation préventive des peintures modernes et contemporaines pourrait s'appuyer.

Pour être envisageables, il faut que ces principes soient simples et issus du bon sens. Pour être efficaces, il faut qu'ils intègrent toutes les connaissances acquises à ce jour et notamment savoir utiliser les outils que nous avons développés. Les responsables de la conservation et les conservateurs restaurateurs auront alors à leur disposition des moyens qui les aideront à assurer leurs missions.

## VI-1 La documentation technique et technologique

Toutes les œuvres devraient faire l'objet d'un suivi technique qui regroupe une documentation. Au cours de la vie matérielle de l'œuvre cette documentation technique permet de faire à tout moment un bilan sanitaire de l'œuvre. Avant toute décision, il est donc indispensable de prendre connaissance :

*Des constats d'état :* Il n'existe pas à notre connaissance de fiche de constat d'état type reconnue par toutes les institutions publiques et privées. Il serait intéressant d'imposer un format uniforme qui pourrait se trouver sous forme papier ou numérique. En tout état de cause, la fiche de constat d'état doit comporter au moins deux parties, en dehors du descriptif :

Dans la partie « constitution de la peinture », la nature du support, de la préparation et de la peinture doit être décrite avec précision. C'est à partir de ces renseignements que l'on sera en mesure de choisir le **diagramme de sensibilité** qui conviendra le mieux et qui nous permettra d'accéder à son comportement mécanique.

Dans la partie « altérations », le degré et le type de dégradation nous donneront des informations sur la fragilité de l'œuvre.

*Dossier de restauration :* Si l'œuvre a été restaurée, il est utile de s'instruire de ce document. Il est rédigé sans formalisme précis mais il doit contenir des informations sur les altérations, et les traitements utilisés en restauration. Ce document nous informe aussi sur la réactivité et la fragilité de la peinture. Le nombre d'interventions de restauration sur l'œuvre est aussi un témoignage de sa vulnérabilité.

*Dossier scientifique :* Malheureusement très peu d'œuvres font l'objet d'analyses scientifiques. Les méthodes analytiques les plus utilisées sont :

- les spectrométries : IRTF, de fluorescence X, de Raman,
- les microscopies : à balayage électronique et optique,
- l'imagerie scientifique : la radiographie X et la réflectographie NIR, l'imagerie multi- spectrale.

D'autres moyens permettent d'accéder à des informations plus pointues telles que la diffraction X, la chromatographie en phase gazeuse, etc.

Quand ils existent, ces dossiers contiennent des données essentielles sur :

- la nature chimique des composants de l'œuvre – toiles, colles, liants, charges, pigments, vernis, etc.
- la morphologie de la matière picturale – stratigraphie, granulométrie, etc.

L'exploitation de ces informations permet de connaître la technologie de la peinture et de comprendre certains mécanismes de dégradation.

*Des fiches techniques des matériaux.* Dans le cas où la peinture est fabriquée par l'artiste avec des produits commercialisés, les fiches

techniques peuvent être fournies par le revendeur. Par exemple, certains artistes ont utilisé des liants ; vinyliques comme le Caparol®, le Rhodopas®, acryliques comme les Plextols® ou cellulosiques comme les Tyloses®. On doit consulter ces fiches techniques avec beaucoup d'intérêt, car elles comportent des informations précieuses et notamment des propriétés mécaniques.

*Qualité des matériaux.* On a pu constater que des problèmes récurrents de dégradations étaient souvent liés à la qualité des produits vendus par les fabriquants[1] et l'incompatibilité des matériaux entre eux. De nombreuses recherches et études sont annuellement publiées sur de tels sujets et les « préventistes » se doivent d'en prendre connaissance pour affiner leur diagnostic.

*Mise en œuvre :* La mise en œuvre des peintures est fondamentale pour la bonne conservation de celles-ci. Depuis les époques les plus anciennes, elle a beaucoup évolué. Dans les traités de peintures de Cennino Cennini au XV^e^ siècle, de Turquet de Mayerne au XVII^e^ et de J.-F.-L. Mérimée au début du XIX^e^ siècle, les auteurs décrivent des techniques picturales basées sur un savoir-faire et une procédure bien établis qui ont trouvé leur fondement dans la pratique et l'expérience. Le respect de ces techniques par les artistes nous a permis de collecter des œuvres qui, en traversant le temps, sont arrivées jusqu'à nous dans des états de conservation satisfaisants pour beaucoup d'entre elles.

Avec la commercialisation et le développement de l'industrie des couleurs, les techniques picturales se sont transformées. Les artistes, délivrés des contraintes de fabrication de leurs produits, se sont libérés et sont devenus plus spontanés. Les procédures de mise en œuvre sont remises en question. On assiste à un véritable changement où la technique passe au second plan, et, au début du XX^e^ siècle, à une révolution avec l'expérimentation des techniques nouvelles par des artistes de renommée mondiale. Ce mouvement de l'expérimentation, délaissant quasiment les techniques traditionnelles, produit des peintures qui nous réserveront de sérieuses surprises. Là encore, tous les renseignements fournis par les artistes pourraient contribuer à l'amélioration de la conservation de leurs œuvres.

## VI-2 Classement des peintures en fonction de leur comportement mécanique et de leur fragilité

Dans le paragraphe III-2-6, les peintures ont été classées en fonction de leur contrainte à la rupture. À vrai dire, cette caractéristique n'est

1. M.C. Corbeil, Jane Siroi, « A note on a Modern Lead White, also known as « Synthetic Plumbonacrite », *Studies in Conservation*, Vol. 52, 2007, p. 281-288.

pas suffisante pour évaluer la fragilité d'une œuvre, car elle ne prend pas en compte un certain nombre de mécanismes de dégradation.

Il est donc nécessaire pour les classer de définir la notion de fragilité. Une œuvre est dite fragile, à partir du moment où elle court **des risques de dégradation, alors qu'elle est conservée dans des conditions normales de conservation,** c'est-à-dire :

• que les variations climatiques respectent les consignes recommandées,

• que les œuvres sont manipulées en suivant les préconisations d'usage,

• que les œuvres voyagent dans des caisses ou des conditionnements adaptés et normalisés.

Les dégradations dues à des accidents d'origine humaine ou matérielle sont bien entendu écartées de cette définition.

L'analyse de l'ensemble des informations contenues dans la documentation technique et technologique et le rapprochement avec une observation directe ou des documents visuels permettent d'évaluer la fragilité de l'œuvre. Celle-ci dépend :

• des critères de résistance tels que : la contrainte à la rupture, la variation minimale de tension (annexe A3), la sensibilité à l'humidité et à la température,

• des indices de fragilité suivants : la mise en œuvre, la compatibilité des matériaux, l'état de conservation, la réactivité chimique.

Cette liste de critères et d'indices n'est pas exhaustive. Pour représenter ou pour classer le niveau de fragilité d'une peinture, on peut se référer au diagramme suivant, fig. 79.

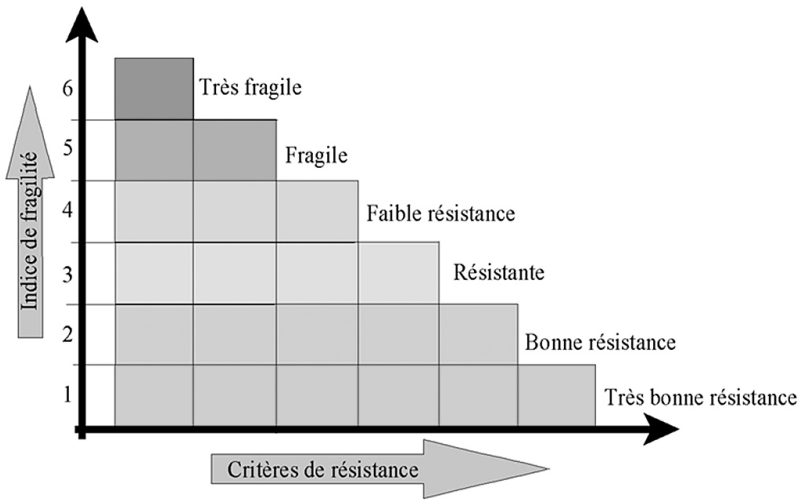



*Figure 79 : représentation de la fragilité d'une œuvre.*

Pour illustrer ce propos prenons deux exemples de peintures.

La peinture 1 est peinte par Riopelle en 1954, c'est une huile sur toile de format moyen.

La peinture 2 est une œuvre peinte par Marc Chagall en 1927, c'est également une huile sur toile de format moyen.

| | Critères de résistance | Indice de fragilité. |
|---|---|---|
| Peinture 1<br>Riopelle | Contrainte à la rupture : 2 MPa<br>pour e =1,4 mm (couche épaisse)<br>$\sigma DP$ = 0,02 MPa.<br>$V_{mini}t$ = 2,8 daN/m<br>Sensibilité à l'humidité moyenne<br>Forte sensibilité à la température | Toile de lin/préparation à la céruse mauvaise qualité<br>Peinture commerciale BA qualité moyenne.<br>Additifs lors de la mise en œuvre.<br>Nombreux empâtements restés mous, problèmes de séchage.<br>Réseaux de craquelures autour des empâtements, soulèvements. |
| Peinture 2<br>Chagall | Contrainte à la rupture : 3 MPa<br>pour e=0,8 mm (couche moyenne)<br>$\sigma$DP=0,03 MPa.<br>$V_{mini}t$ = 2,4 daN/m<br>Sensibilité à l'humidité moyenne<br>Faible sensibilité à la température. | Toile de lin/ préparation à la céruse.<br>Peinture commerciale qualité BA<br>Travail en jus, en glacis et en demi-pâte.<br>Vernis de protection.<br>Pas d'altération mécanique. |

La peinture de Riopelle qui est caractérisée par au moins 6 indices de fragilité associés à de faibles critères de résistance donne un niveau de classement « très fragile ».

La peinture de Marc Chagall qui associe de bons critères de résistance avec peu d'indices de fragilité donne un niveau de classement « bonne résistance ».

Ces deux peintures peuvent figurer sur le diagramme de fragilité, fig. 80.

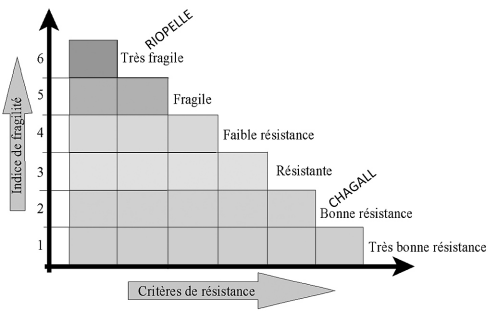



*Figure 80 : Positions relatives des deux peintures sur le diagramme.*

C'est à partir de ce classement que des décisions concernant des mesures de conservation préventive seront mises en place, en urgence, à court et à moyen terme selon les cas.

## VI-3 Les mouvements des œuvres modernes et contemporaines

Les établissements publics et privés abritant des collections d'art moderne et contemporain sont confrontés sans cesse à une politique de prêt d'œuvres. Elle s'est développée cette dernière décennie sous différentes formes comme le montrent les deux exemples suivants.

Le Centre Pompidou a créé le concept du « Centre Pompidou Mobile », dont l'objectif est le rayonnement de la culture dans l'hexagone et à l'extérieur de l'hexagone[2]. Il s'agit de présenter un certain nombre d'œuvres sous une tente spécialement conçue à cet effet.

Le musée Picasso a organisé pendant sa rénovation entre 2008 et 2014 des expositions internationales « clefs en main », intitulées « Masterpieces from the Musée National Picasso ». Pour ne citer que les destinations les plus importantes, l'Australie, l'Espagne, le Japon, la Finlande, la Fédération de Russie, les États Unis et la Chine ont bénéficié de ces expositions.

Malgré toutes les procédures qui ont été mises en place pendant ces périodes de mouvement, à chaque déplacement, les responsables de collection prennent des risques. Ces risques sont, pourrait-on dire, proportionnels à la fragilité de l'œuvre.

Lorsque les œuvres sont considérées comme – très fragiles ou fragiles – il faut se dire que tous mouvements tels que les manutentions, les transports, les changements de lieux lui sont préjudiciables. Malgré toutes les précautions qui peuvent être prises durant ces opérations, on peut éviter les accidents graves, mais en aucun cas on ne peut éviter les contrecoups climatiques, les vibrations, les mouvements des toiles. Il semble donc évident, que ces œuvres doivent être déplacées le moins possible. Ce principe est appliqué dans certains cas pour les peintures italiennes des XV^e^ et XVI^e^ siècles et certaines peintures icônes comme la Joconde. En ce qui concerne l'art moderne et contemporain, les mêmes dispositions n'ont jamais été prises. Pourtant, certaines de ces œuvres, de constitution plus fragile que les œuvres anciennes, devraient bénéficier des mêmes soins. Il serait préférable, même si les enjeux économiques sont importants, que ce soit le public qui se déplace vers l'œuvre et non l'inverse.

2. Exposition à Dhahran en Arabie Saoudite.

## VI-4 Évaluation des risques de contamination biologique

Certains matériaux des œuvres peintes constituent un substrat nutritif idéal pour le développement des micro-organismes omniprésents dans l'air et sur les surfaces. Pour que les micro-organismes se développent, il leur faut également des conditions d'humidité, de température et de pH adéquates. La formation de moisissures et leur croissance sont directement influencées par la valeur de l'activité en l'eau *(aw)*. L'activité en l'eau est équivalente à l'humidité relative, elle n'est pas exprimée non pas en pourcentage (0 à 100 %) mais en *aw*. (0 à 1).

La phase de germination nécessite un apport d'eau plus important pour certaines espèces que pour d'autres. Elle commence à partir d'une activité en eau de 0,6-0,65, soit l'équivalent d'une humidité relative de 60-65 %. Le processus de développement peut se poursuivre à des taux d'HR inférieurs à 60 % (*aw* de 0,6). Chaque espèce fongique est caractérisée par une valeur d'activité en l'eau *(aw)* minimale pour la germination et la croissance. Autrement dit, ce n'est qu'à partir d'une certaine valeur d'humidité relative que la probabilité de développement de la charge fongique devient importante. Le tableau suivant regroupe les valeurs d'*aw* de certains micro-organismes :

Tableau : Moisissures retrouvées en milieu intérieur selon le niveau d'activité de l'eau. Source : Maheux (1998) et Husman (1996)

| Niveaux peu élevés<br>$aw \leq 0{,}80$ | Niveaux intermédiaires<br>$0{,}80 > aw < 0{,}90$ | Niveaux élevés<br>$aw \geq 0{,}90$ |
|---|---|---|
| Aspergillus glaucus<br>Aspergillus penicillioides<br>Aspergillus repens<br>Aspergillus restrictus<br>Aspergillus versicolor<br>Eurotium sp<br>Penicillium brevicompactum<br>Penicillium chrysogenum<br>Wallemia sebi | Alternaria alternata<br>Aspergillus flavus<br>Cladosporium cladosporioides<br>Ulocladium consortiale | Alternaria alternata<br>Aspergillus fumigatus<br>Fusarium sp<br>Mucor plumbeus<br>Stachybotrys chartarum<br>Levures (Rhodotorula) |

La température idéale pour le développement des micro-organismes se situe entre 18 et 23 °C. Les substrats ayant des pH compris entre 4 et 7 se prêtent très bien à la germination et au développement des micro-organismes.

On peut aussi évaluer les risques de contamination microbiologique en corrélant les valeurs de (*HR)* et (*T)* du climat enregistré et en analysant la situation par rapport au seuil d'apparition de *l'aspergillus versicolor* qui sert de référence dans le domaine du patrimoine culturel, fig. 81.

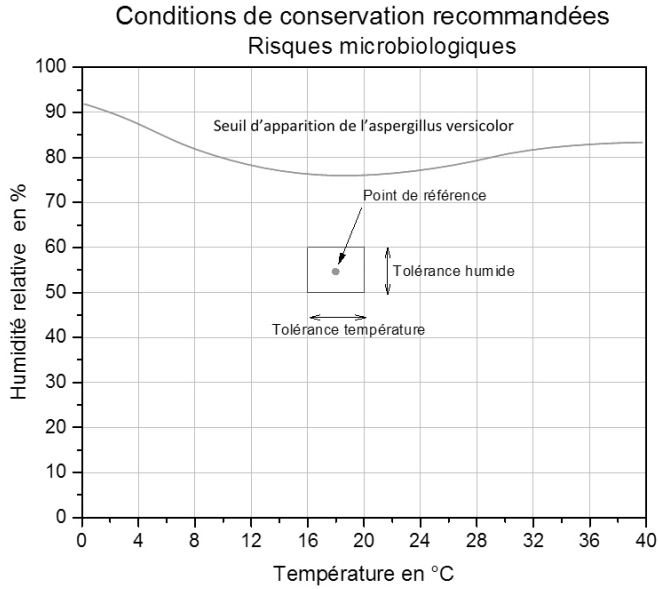



*Figure 81 : Diagramme des risques de bio contamination.*

Les matériaux constitutifs des œuvres peintes les plus sensibles aux développements de microorganismes sont : les colles animales, les colles cellulosiques, les papiers et les fibres textiles naturelles. Cela n'exclut pas l'apparition de moisissures sur des surfaces de peintures vinyliques ou acryliques.

## VI-5 Gestion de l'humidité dans une salle d'exposition et évaluation des risques de dégradations mécaniques

Revenons sur l'étude que nous avions menée sur les peintures à l'huile sur toile et à la détrempe sur papier, § IV-2. Nous avons vu que les conditions optimales de ces deux peintures sont obtenues pour une humidité comprise entre 55 % et 60 % et une température de 20 °C. Dans ces conditions climatiques, les $V_{mini}\ t$ de 2,4 daN/m et 4,8 daN/m sont respectées.

Sur les diagrammes de sensibilité, fig. 82, 83, nous pouvons également positionner les recommandations climatiques des guides ICC niveau AA et A, du Smithsonian Institute et des musées pour évaluer les variations de tension.

Les valeurs obtenues sont regroupées dans le tableau ci-après.

Dans chaque cas, la valeur de variations de tension est supérieure à la variation minimale de tension.

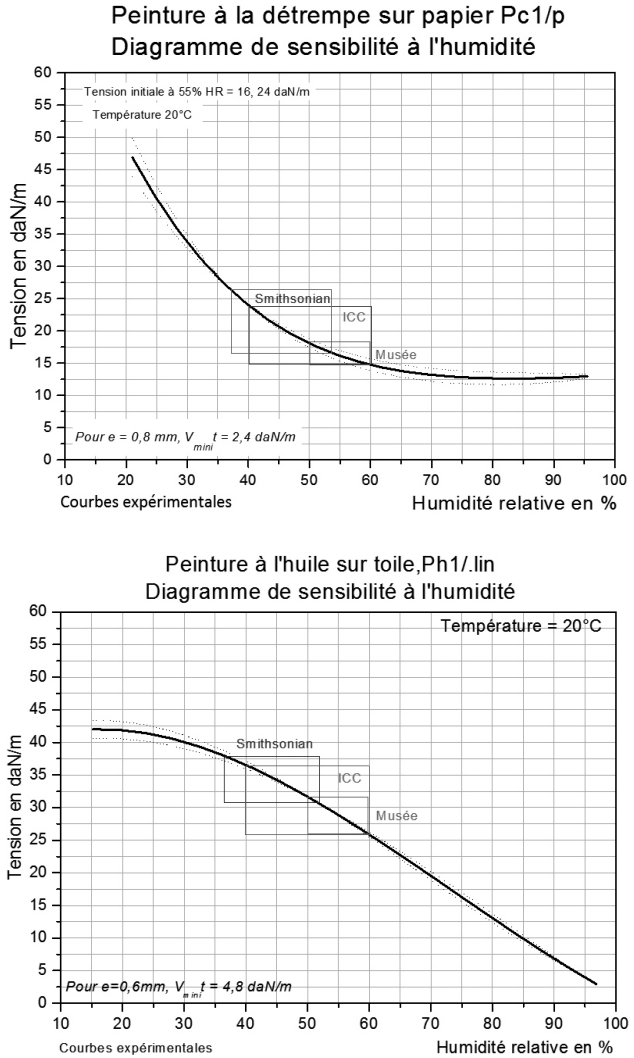



*Figure 82, 83 : Positionnement des recommandations climatiques et évaluation des variations de contrainte.*

Tableau 3

| | Peinture à la détrempe sur papier $V_{mini}t$ = 2,4 daN/m | Peinture à l'huile sur toile $V_{mini}t$ = 4,8 daN/m |
|---|---|---|
| ICC (40 % – 60 %) | Vt = 9 daN/m | Vt = 11 daN/m |
| Smithsonian (37 % – 53 %) | Vt = 10 daN/m | Vt = 7,2 daN/m |
| Musées (50 % – 60 %) | Vt = 3,5 daN/m | Vt = 6 daN/m. |

Supposons que ces peintures soient exposées dans une même salle et que les recommandations, d'ICC niveau A ou celles du Smithsonian Institute, soient imposées pour des raisons d'économie d'énergie. Le niveau des variations de tension dans chaque peinture dépasse très largement les $V_{mini}t$. **On peut donc prévoir au regard de ces résultats que de sérieux problèmes de conservation surviendront très rapidement sur l'ensemble des peintures.**

Sur les peintures à la détrempe sur papier où les écarts entre $Vt$ et $V_{mini}t$ sont les plus importants des dégradations mécaniques prématurées, telles que des fissures, craquelures, pertes d'adhérence et soulèvements, apparaîtront très rapidement.

Sur les peintures à l'huile, les écarts de tensions par rapport à la $V_{mini}$ $t$ sont un peu moins importants, malgré cela les dégradations mécaniques se manifesteront prématurément.

**Dans ces deux cas de figure, les risques de dégradations mécaniques sont majeurs et importants.** Il est donc absolument impératif, pour ce type de peintures, de prendre toutes les mesures nécessaires pour éviter de telles conditions climatiques de conservations.

Les recommandations climatiques de l'ICC niveau AA, appliquées dans la plupart des musées d'art moderne et contemporain bien équipés (50 %-60 %), sont responsables des variations de tension relativement proche de la variation minimum de tensions. **Par conséquent les risques de dégradations mécaniques des peintures à la détrempe sur papier et des peintures à l'huile sur toile sont beaucoup moins importants mais ne sont pas totalement neutralisés.**

On peut résumer **les risques de dégradations mécaniques** encourus dans le tableau suivant :

| | Peinture à la colle sur papier $V_{mini}t$ = 2,4 daN/m | Peinture à l'huile sur toile $V_{mini}t$ = 4,8 daN/m |
|---|---|---|
| ICC (40 %-60 %) Niveau A | RISQUES MAJEURS | RISQUES IMPORTANTS |
| Smithsonian (37 %-53 %) | RISQUES MAJEURS | RISQUES IMPORTANTS |
| Musées ICC niveau AA (50 %-60 %) | RISQUES MINEURS | RISQUES MINEURS |
| Cond. Optimum (55 %-60 %) | RISQUE NUL | RISQUE NUL |

## VI-6 En résumé

1- Consulter la documentation technique et technologique de chaque peinture : c'est un travail préalable à toutes interventions de conservation préventive. Les informations tirées de leurs histoires matérielles, de leurs constitutions, de leurs états de conservation et de leurs degrés de fragilité permettent de prendre connaissance des œuvres.

2- Déterminer la variation minimale de tension pour chaque peinture. À partir des valeurs de contraintes à la rupture des peintures, regroupées en annexe, le calcul de la $V_{mini}t$ devient possible dans la majorité des cas.

3- Évaluer la fragilité des œuvres. Suite au travail de dépouillement des informations et du calcul des $V_{mini}t$, il est utile de les regrouper par catégorie et de classer les œuvres en fonction de leur fragilité. Dans le cadre d'une collection, cette approche permet de calculer le pourcentage d'œuvres fragiles.

4- Rechercher des meilleures conditions climatiques de conservation de chaque peinture. L'utilisation de l'un des diagrammes de sensibilité des peintures, figurant à la fin de cet ouvrage, permet en le combinant avec la $V_{mini}t$, de trouver les écarts de température et d'humidité les plus adaptés à la conservation des différents types de peinture.

5- Évaluer les risques de dégradations mécaniques. À partir de l'enregistrement des conditions climatiques du lieu d'exposition et du diagramme de sensibilité de chaque peinture, on est en mesure de calculer, par l'intermédiaire de la fonction polynomiale, les variations réelles de tension. En comparant les $Vt$ et la $V_{mini}t$ de chaque peinture on est capable d'évaluer la probabilité de dégradations mécaniques de chaque peinture et de faire une véritable estimation des risques de dégradation d'une collection.

6- Évaluer les risques de contamination biologique. Seule l'étude des enregistrements climatiques est nécessaire pour l'évaluation de ces risques. La corrélation température/humidité permet d'étudier la distribution des points obtenus et de calculer le pourcentage de valeurs qui répond aux critères de conditions de conservation standard et le pourcentage de valeurs qui se trouve au-dessus du seuil d'apparition de *l'aspergillus versicolor*. Selon leurs constitutions, certaines œuvres sont plus sensibles au développement des micro-organismes que d'autres.

7- Gestion du climat. Si la $V_{mini}t$ permet d'évaluer les écarts de température et d'humidité les plus adaptés aux œuvres, les équipements et les installations de traitement d'air ainsi que les caractéristiques du bâtiment ne répondent pas toujours aux exigences absolues. Cependant, une étude approfondie des besoins et des capacités des systèmes de climatisation peut aboutir à des compromis parfaitement gérables.

8- Interventions alternatives. Si aucune solution concernant les modalités de conservation des œuvres ne parait satisfaisante, on peut

avoir recours à des interventions alternatives. Quand elles sont appliquées directement sur l'œuvre, il s'agit de traitement préventif comme :

• la pose au revers d'une peinture d'une protection tampon. Elle est en mesure de réduire les chocs hydriques et thermiques.

• la tension de la peinture sur un châssis à tension autorégulée. Il permet de maintenir la tension constante, quelle que soit la variation de température ou d'humidité. Il existe plusieurs modèles dont certains systèmes permettent de conserver le châssis d'origine.

Autrement on doit intervenir ponctuellement sur l'environnement de l'œuvre par l'intermédiaire de cadre climatique, de vitrines climatisées ou tout autre équipement adapté.

## VI-7 Exemple à suivre

La démarche adoptée par la fondation Clément en vue d'une exposition est un exemple intéressant. La Fondation Clément située à Le François en Martinique est abritée dans l'habitation Clément, site patrimonial classé Monument Historique et ouvert au public depuis 1986. Elle soutient la création artistique contemporaine avec l'organisation d'expositions. En vue de monter une exposition « Aimé Césaire, Lam et Picasso » dans la « Cuverie », de décembre à février, les responsables nous ont demandé un audit climatique, complété par une évaluation des risques de dégradations mécaniques et de contaminations biologiques pour les œuvres.

### *VI-7-1 Étude du climat*

Dans ce contexte, la fondation Clément nous a fourni les relevés climatiques des quatre enregistreurs placés dans la salle la « Cuverie ». Les valeurs statistiques de ces données – minima (mini), maxima (maxi), moyennes, écarts maximum et écarts type (ET) – sont regroupées dans le tableau ci-dessous.

| | E1 | E2 | E3 | E4 |
|---|---|---|---|---|
| Moyenne HR % | 58,74 | 61,28 | 54,34 | 54,55 |
| ET – HR % | 4,98 | 4,31 | 9,53 | 7,57 |
| HR max % | 72,50 | 75,50 | 75,50 | 79,50 |
| HR mini % | 49,50 | 53,50 | 55,50 | 44,50 |
| Ecart maximum HR % | 23,00 | 22,00 | 43,50 | 35,00 |
| Moyenne T °C | 23,03 | 22,94 | 25,19 | 25,02 |
| ET – T °C | 1,64 | 2,01 | 3,03 | 2,62 |
| T max °C | 27,50 | 27,50 | 35 | 33,50 |
| T mini °C | 20,00 | 20,00 | 21 | 21,50 |
| Ecart maximum T °C | 7,50 | 7,50 | 14 | 12 |

L'analyse de ces données a traduit, d'une part, une absence d'homogénéité climatique dans la salle d'exposition de la « cuverie » et, d'autre part, une instabilité du climat qui s'exprime par des variations quotidiennes de température et d'humidité, fig. 84.

Les pics d'humidité relative apparaissent régulièrement entre 5 h et 10 h du matin alors que les minima se manifestent entre 18 h et 22 h. Les variations sont quotidiennes et de grandes amplitudes.

L'étude des enregistrements de chaque capteur nous a permis d'évaluer la qualité climatique de la « cuverie » au cours de la période de mesures et de conclure que **le climat de cette salle est instable et ne respecte pas les prescriptions conseillées pour la conservation des peintures.**

*VI-7-2 Évaluation des risques de dégradations mécaniques*

L'exposition est composée d'œuvres variées. Par rapport aux surfaces, les œuvres peintes (gouache, détrempe ou tempéra sur papier ou sur papier marouflé sur toile, huiles sur toile ou sur papier marouflé sur toile et huile sur panneaux de bois) représentent 70 %, alors que les œuvres graphiques, dessins (mine de plomb et encre), gravures, pastels, affiches, photos, livres, documents imprimés et manuscrits ne représentent que 30 %. En termes de nombre, les œuvres peintes représentent 20 %, les œuvres graphiques et documents 80 %.

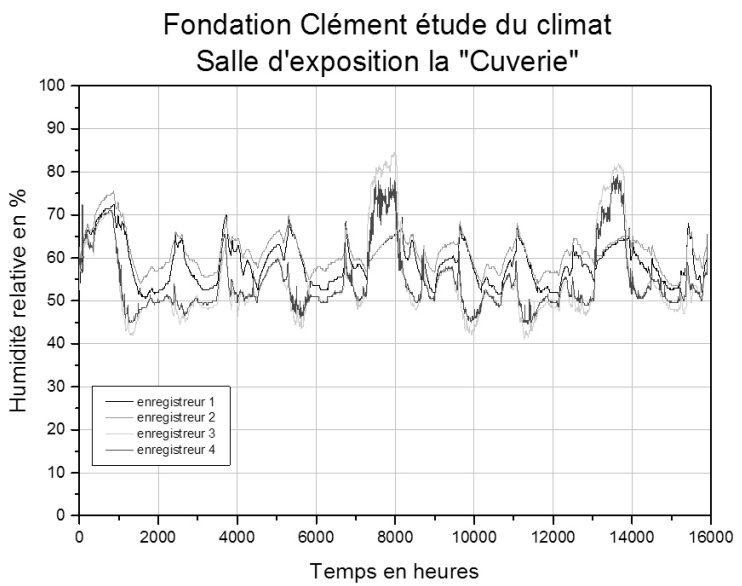



*Figure 84 : Courbes d'humidité relative des quatre enregistreurs.*

Les risques de dégradations mécaniques des peintures sont évalués en adoptant la méthode appliquée précédemment. La première étape est donc d'évaluer les critères de conservation des différentes techniques proposées dans l'exposition.

### Critères de conservation des gouaches ou détrempes sur papier et papier entoilé

Pour évaluer ces critères, on prend les diagrammes de sensibilité des détrempes sur papier de type Pc1/p et papier entoilé Pc3/p/l. Comme les gouaches ont une contrainte à la rupture de *5 MPa*, la variation minimale de tension ($V_{mini}t$) admise correspondant à la limite d'endurance d'une peinture soumise à une fatigue mécanique est *2,5 daN/m* pour épaisseur d'environ 0,5 mm. C'est avec cette valeur que nous allons déterminer les plages d'humidité relative admissibles pour chaque peinture en partant des diagrammes de sensibilité à l'humidité selon les deux types de support, papier et papier marouflé, fig. 85, 86.

Dans le cas d'un climat tropical où les températures extérieures sont de l'ordre de 30 °C, il est recommandé dans les lieux climatisés, de réguler la température à une valeur d'environ 23 °C. Cette recommandation est liée au confort du public et du personnel travaillant dans ces lieux mais aussi dans le but de faire des économies d'énergie en appliquant ces dispositions. Bien que cette valeur de 23 °C soit éloignée des recommandations établies dans les pays au climat tempéré, (20 °C), nous la retiendrons, à condition que la variation de température ne dépasse pas 2 °C et que cette variation soit très progressive (1/10 °C par heure). À la lueur de cette remarque, nous fixerons dans nos critères de conservation climatique une température de 23 °C ± 1 °C.

D'après les diagrammes de sensibilité, les plages admissibles des variations d'humidité relative de ces deux techniques de détrempe sont :

- Les gouaches ou détrempes sur papier doivent être conservées entre 52,5 % < HR < 60 %.
- Les gouaches ou détrempes sur papier entoilé doivent être conservées entre 57 % < HR < 60 %.

### Critères de conservation des peintures à l'huile sur papier marouflé et sur toile

En partant comme précédemment des diagrammes de sensibilité des peintures à l'huile sur papier entoilé et sur toile, fig. 87, 88, on peut déterminer pour une valeur de $V_{mini}t$ = *3,2 daN/m* les plages d'humidité relative.

D'après les diagrammes de sensibilité, les plages admissibles des variations d'humidité relative de ces deux techniques de peinture à l'huile sont :

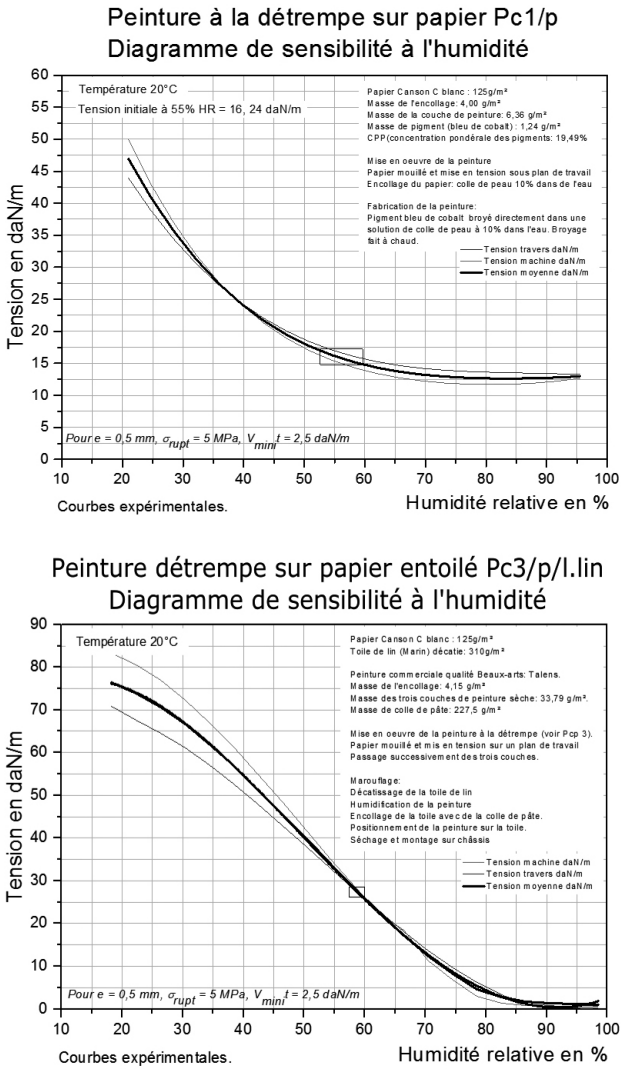



*Figure 85, 86 : Détermination des conditions climatiques des détrempes sur papier et papier marouflé.*

• Les peintures à l'huile sur papier entoilé doivent être conservées entre 55 % < HR < 60 %,

• Les peintures à l'huile sur toile doivent être conservées entre 55 % < HR < 60 %

En partant de l'ensemble des critères de conservation des différentes peintures déterminé à l'aide des diagrammes de sensibilité à

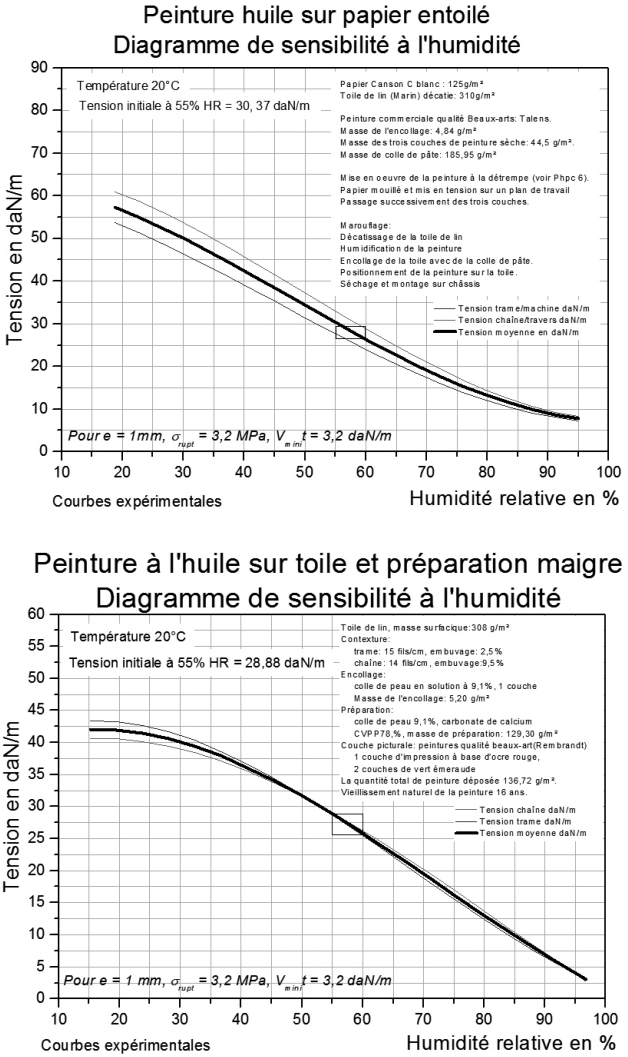



*Figure 87, 88 : Détermination des conditions climatiques des peintures à l'huile sur papier marouflé et sur toile.*

l'humidité, nous préconisons une plage de HR qui doit convenir à l'ensemble des quatre types de peintures qui vont coexister lors de l'exposition.

| Température T = 23 ± 1 °C ;<br>Humidité relative HR = 58,5 % ± 1,5 % |
|---|

**Critères de conservation des œuvres graphiques et des documents papier**

En ce qui concerne ces œuvres, la direction du livre recommande les conditions climatiques suivantes : température 18 °C ± 2 °C, humidité relative 50 % ± 5 %. Ces recommandations sont différentes de celles que l'on souhaite imposer aux peintures. Comme ces œuvres sont de plus petites tailles, elles peuvent être présentées dans des vitrines qui les isoleront du climat général de la grande salle de la « cuverie ».

On cherchera donc à créer dans chaque vitrine un climat adapté aux œuvres graphiques ou documents papier sans chercher à réguler la température. La température dans les vitrines s'équilibrera avec la température ambiante de la salle de « cuverie » et **sera fixée par défaut à 23 °C.**

Cette température est élevée pour un document graphique et risque de provoquer une déshydratation du papier si l'humidité est maintenue à 50 %. Pour respecter la teneur en eau dans le papier qui est de 6,3 % à 18 °C et 50 % HR, on doit maintenir une humidité relative dans la vitrine à 52 %. Les nouvelles conditions climatiques de conservation préconisées dans les vitrines pour les œuvres graphiques et documents papier sont de :

**Température T = 23 ± 1 °C ;**
**Humidité relative HR = 52 % ± 5 %**

*VI-7-3 Évaluation des risques de contaminations biologiques*

Pour évaluer la qualité climatique de la salle du point de vue de la contamination biologique, l'étude des corrélations entre température et humidité permet de calculer les pourcentages de couples de valeurs HR/T répondant aux critères de conservation, délimités par le rectangle.

Les risques de contamination microbiologique sont évalués à partir de la courbe du seuil d'apparition de *l'aspergillus Versicolor* qui est la référence des développements d'un certain nombre de microorganismes. Dans le graphe de la fig. 89, une partie des points de corrélation HR/T sont situés au-dessus du seuil de contamination microbiologique.

L'analyse des résultats des enregistrements des capteurs 3 et 4 nous signale, dans ce local d'exposition, la présence de zones de stagnation de strates d'air humide et chaud tout à fait propice au développement de micro-organismes. Les points de corrélation se situent au-dessus du seuil d'apparition de l'*aspergillus Versicolor*.

**On peut en conclure qu'actuellement les risques de biocontamination sont très élevés dans cette partie de la « cuverie ».**

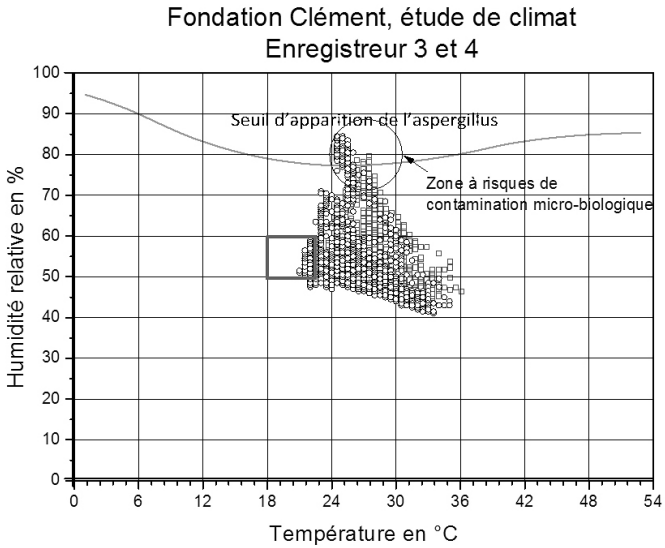



*Figure 89 : Corrélation humidité, température, localisation de la zone de tolérance et du seuil de contamination.*

*VI-7-4 Préconisations*

Dans la salle de la « cuverie », les variations moyennes de température et d'humidité enregistrées par les quatre capteurs pendant la période d'acquisition sont :

**Température T = 24,04 ± 3,45 °C ;**
**Humidité relative = 62,35 % ± 13,35 %**

Le climat est beaucoup trop instable, il ne correspond pas aux valeurs prescrites. Son instabilité est telle que les risques de dégradations mécaniques et microbiologiques pour les peintures et les documents graphiques sont très élevés. De ce fait, nous avons déconseillé toutes tentatives d'exposition de ces œuvres dans cette salle telle qu'elle est.

D'après les évaluations faites précédemment, nous avons préconisé pour les peintures les valeurs suivantes :

**Température T = 23 ± 1 °C ;**
**Humidité relative = 58,5 % ± 1,5 %**

et pour les documents graphiques :

**Température T = 23 ± 1 °C ;**
**Humidité relative = 52 % ± 5 %**

Pour organiser cette exposition, en respectant les préconisations ci-dessus, la fondation Clément a dû faire appel à un bureau d'étude en génie climatique pour mettre en place une installation capable de répondre aux exigences que nous avons soumises, fig. 90.





*Figure 90 : Travaux de remise aux normes climatiques de la salle de la cuverie, doc Fondation Clément. Accord de la Fondation Clément pour la publication des photos.*

Dans le cadre de l'organisation d'une exposition, un cahier des charges existe sous la forme d'un document à remplir appelé « Standard facility report ». Ce document a été élaboré et adopté en 1998 par l'association des musées américains. Depuis sa création, il a fait l'objet de mises à jour.

Ce document regroupe toutes les informations utiles à l'installation d'une exposition. Il se présente comme un questionnaire auquel l'institution publique ou privée doit répondre. Il est divisé en 10 sections qui traitent des différents aspects de la protection des œuvres. C'est dans ce rapport que figure la description du système de traitement de l'air, fig. 91.

À la suite des travaux qui ont été faits à la « cuverie », l'exposition a eu lieu comme prévu, sans qu'aucun problème de conservation des œuvres ne se soit manifesté.

AMBIANCE

Chauffage et conditionnement d'air

1.1 Votre système de contrôle d'ambiance fonctionne-t-il 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7, y compris lorsque le musée est fermé ?
**Oui**

Y a-t-il un dispositif de secours du système de contrôle d'ambiance ?
**Oui. Un groupe de froid principal + un groupe de froid de secours + un groupe électrogène**

Dans l'affirmative, combien de temps peut-il fonctionner ? **48 heures**

1.2 Indiquez le type et la localisation de vos systèmes de contrôle d'ambiance /
(Marquez d'une croix "x" tous les éléments qui conviennent) :

| | ENTREPOT DES ŒUVRES POUR EXPOSITION TEMPORAIRE | SALLE D'EXPOSITION TEMPORAIRE | ENTIERETE DU BATIMENT |
|---|---|---|---|
| Système central de contrôle de la température fonctionnant 24 h. sur 24 | **OUI** | **OUI** | |
| Système central du contrôle d'humidité fonctionnant 24 h. sur 24 | **OUI** | **OUI** | |
| Système central de filtrage de l'air fonctionnant 24 h. sur 24 | **OUI** | **OUI** | |
| Simple conditionnement d'air (unités de fenêtre) | | | |

1.3 Décrivez le système de refroidissement :

**Deux armoires de climatisation CLIMAVENETA d'une puissance frigorifique de 25,3 kw chacune, équipées d'un compresseur variable pour adapter rapidement leurs puissance frigorifique. Elles sont équipées d'une double vanne trois voies qui peut réduire la surface de l'évaporateur et qui renvoie les gaz chauds après l'évaporateur pour contrôler la température de soufflage et améliorer la déshumidification. Ces vannes sont contrôlées automatiquement par des capteurs de température et d'humidité situés à la reprise de l'air.**

**Une CTA, équipée de 2 groupes multi V inverter de 31 KW chacun de 2 x 31KW, introduit l'air neuf (18m3 par personne par heure dans la salle). La CTA fonctionne en vitesse réduite à 1400 m3h soit 1 fois le volume de la salle en permanence, puis à l'aide du capteur de $CO^2$, augmentera le débit de l'air neuf selon les besoins. Elle pourra à pleine vitesse débiter 2700m3h soit le volume pour 150 personnes. La puissance frigorifique de la CTA sera régulée par l'hygrométrie contrôlée à la reprise des armoires de recyclage. La température de soufflage sera contrôlée par des résistances électriques pour que l'air soufflé ne soit pas trop froid et surtout bien déshumidifié**

**En raison de l'étanchéité de la salle, un extracteur d'air d'une puissance de 500 à 2500 m3h a été ajouté afin d'éviter une trop forte surpression, le débit cet extracteur est réglé automatiquement à 60% du débit de la CTA.**

**La diffusion de l'air neuf déshumidifié fourni par la CTA, qui peut varier de 1400 à 2700m3h, se fait par deux gaines micro perforées de chaque côté de la salle qui garantissent une température et une hygrométrie homogène dans toute la salle. Un enregistreur de température et**

*Figure 91 : Extrait du « Standard facility report » de la cuverie.*

VII

# Comportement des matériaux et diagrammes de sensibilité

Malgré l'évolution des techniques artistiques en 2D, la peinture de chevalet est la plus prospère au XX$^{e}$ siècle et reste encore très florissante actuellement. Pour s'en convaincre, il suffit de musarder dans un musée d'art moderne et contemporain ou de parcourir les salons et biennales d'art contemporain.

Bien que les techniques et les matériaux aient évolué, les principes restent semblables. L'artiste guidé par son expressivité et sa spontanéité se dirigera plus facilement vers des techniques qui sont à sa portée, en exploitant plus résolument les propriétés des matériaux qu'il trouve dans le commerce. Par conséquent, on ne doit pas s'étonner, qu'au XXI$^{e}$ siècle, parallèlement à l'utilisation des techniques les plus sophistiquées, telles que la CAO, l'infographie, la vidéo acoustique, les artistes continuent d'utiliser comme support des matériaux aussi traditionnels que les papiers, les toiles, libres ou tendues sur châssis, et comme couleurs, les peintures à l'huile, à la colle, les gouaches, les tempéra, les peintures à la cire et à l'encaustique, les acryliques et les peintures et vernis industriels.

Actuellement, l'évaluation des conditions de conservation des peintures se fait de manière empirique. Elle est basée sur des notions de réactivité des matériaux aux conditions climatiques beaucoup trop générales sans liens directes avec la réalité et sans distinction des techniques. La détermination des conditions optimales de conservation des peintures n'est pas possible sans le recours à l'utilisation des diagrammes de sensibilité à l'humidité/ température et au calcul de sa $V_{mini}t$. C'est pour cette raison que nous avons consacré cette partie de l'ouvrage à la présentation et à l'exploitation des diagrammes de sensibilité d'un certain nombre de peintures que nous avons expérimentées. Elles entrent dans le registre des techniques picturales utilisées par les artistes.

Rappelons que tous nos diagrammes ont été obtenus selon les protocoles décrits dans les paragraphes III-1-1 et III-1-2. Nos modèles

d'éprouvettes sont tous issus de techniques actuelles utilisées par les artistes peintres. Nous nous sommes référés à notre expérience personnelle et renseignés auprès d'artistes confirmés. Pendant la fabrication de nos éprouvettes, nous avons eu soin de les caractériser par des pesées pour quantifier les différents composants. Les données principales figurent dans un cartouche du diagramme et en annexe A5.

Nous avons traité principalement des techniques sur des supports papier, supports textiles de fibres naturelles et synthétiques. Elles représentent la majorité des œuvres modernes et contemporaines que l'on trouve dans les musées, les galeries et sur le marché de l'art.

## VII-1 Le papier comme support graphique et pictural

Le papier est un matériau que les artistes aiment bien utiliser comme support d'expression. Tous les grands artistes du XX^e^ siècle et ce début du XXI^e^ siècle ont su l'exploiter, pour dessiner, esquisser, ébaucher et peindre.

Malgré sa relative fragilité, il est capable d'assurer ses fonctions structurelles dans les limites de ses capacités mécaniques. Comme nous en avons eu un aperçu § I-2-6, les qualités de papier sont variées et l'artiste averti saura choisir les meilleurs papier adaptés à la technique picturale utilisée.

### *VII-1-1 Dessins, aquarelles, gravures, estampes*

Dans ces techniques, c'est le papier qui incontestablement va imposer son comportement. La présence des média colorés ne va pas modifier de manière significative le comportement du papier. Néanmoins, les variétés de papier sont vastes et leurs comportements peuvent être très différents. Rappelons seulement quelques notions concernant leurs propriétés.

La résistance du papier dépend de la qualité des fibres mais également de son grammage. Constitué principalement de cellulose, le papier est par nature un matériau hydrophile. Mouillé, le papier se détend et s'allonge, en séchant il se rétracte. Durant la fabrication mécanique, les fibres de la pâte à papier diluées s'orientent sur la « table de formation » avant de se figer à partir d'une certaine teneur en eau dans le feuil en formation. Ce procédé de fabrication rend le papier orthotrope, c'est-à-dire que les sens machine et travers auront des comportements différents. Notons que les papiers de fabrication artisanale faits sur des formes ne présentent pas tout à fait les mêmes caractéristiques.

Le papier est un support réactif et sa réactivité à l'humidité est un facteur qui doit être intégré dans les dispositifs de conservation. Si le

papier n'est pas tendu comme c'est souvent le cas, sa réactivité à l'humidité se manifeste par des variations dimensionnelles qui agissent sur la fatigue mécanique.

Cette sensibilité varie d'un papier à l'autre. Elle dépend de sa masse surfacique, de l'origine de ses fibres et aussi des traitements de finition. En principe, les papiers dessin de qualité beaux-arts sont en cellulose pure et répondent à la norme ISO 9706.

Prenons le comportement à l'humidité de deux papiers à dessin ; Canson XL blanc (160 g/m$^2$), Canson C blanc (125 g/m$^2$), fig. 92.

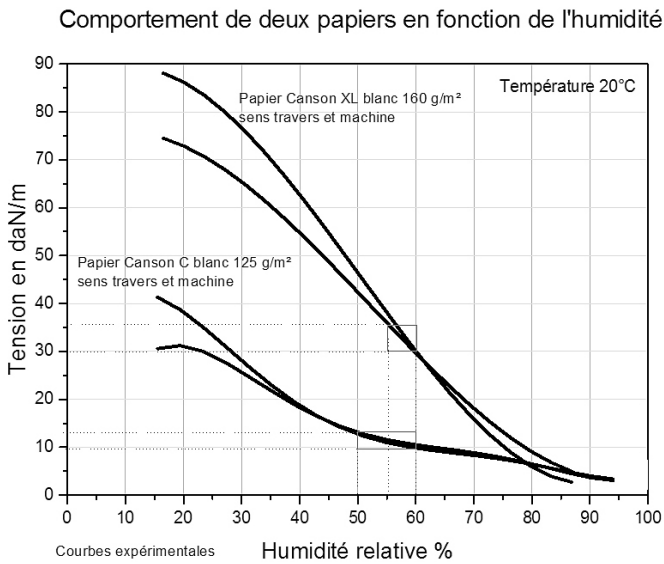



*Figure 92 : Comportement à l'humidité de deux papiers.*

Les diagrammes de sensibilité à l'humidité relative de ces deux papiers soulignent bien leur différence de comportement à laquelle on s'attendait. Le papier de 160 g/m$^2$ présente une réactivité à l'humidité beaucoup plus importante que le papier de 125 g/m$^2$. À forte humidité, les valeurs minimum de tension des deux papiers convergent vers 5 daN/m.

Dans les conditions de conservation conventionnelle des musées 50/60 %HR, le papier de 160 g/m$^2$ a une variation de tensions d'environ 16 daN/m, alors que pour le papier 125 g/m$^2$, elle n'est que de 3,02 daN/m. Dans ces conditions le papier Canson XL blanc subira une fatigue mécanique beaucoup plus importante que le Canson C, si l'amplitude et la fréquence des variations d'humidité relative sont élevées. Pour réduire les dégradations mécaniques des papiers épais, il est recommandé de les conserver dans les conditions de 57,5 % HR ± 2,5 % pour une température de 20 °C.

*VII-1-2 Détrempes : gouache, colle, caséine*

La peinture à détrempe regroupe : les gouaches, les peintures à la colle et à la caséine. Elles ont souvent été utilisées par les artistes pour créer des œuvres de chevalet et de grand format. Elles sont utilisées sur papier, sur toile ou papier marouflé sur toile.

Les gouaches sont à base de gomme arabique ou de dextrine plastifiées par de la glycérine. Elles ont été utilisées largement par les artistes pour des projets majeurs. Certains d'entre eux comme Poliakoff l'ont exploitée avec beaucoup de talent.

Les peintures à la colle sont à base de colle animale. Elles ont un aspect mat et elles sèchent rapidement. Cette technique qui servait avant tout pour faire des décors temporaires a été utilisée par des peintres tels qu'Edouard Vuillard, Picasso, Otto Dix.

Les peintures à la caséine sont à base d'un caséinate de sodium, de calcium ou d'ammonium selon le mode de fabrication. Cette technique est également issue des décors peints. Balthus l'a magnifiée dans certaines de ses œuvres.

Les liants de ces peintures se diluent dans l'eau et forment des solutions colloïdales qui sont mélangées aux pigments. Après séchage ces peintures restent plus ou moins solubles à l'eau.

Les peintures à la détrempe sont classées dans la catégorie des œuvres sensibles à l'humidité. Pour avoir un aspect mat les détrempes ont une CVP de l'ordre de 50 %. Après séchage, le film qui se forme est relativement rigide. La souplesse des films est due à la présence d'une eau liée aux molécules de gomme arabique ou de la colle animale et d'un plastifiant. En vieillissant l'eau et le plastifiant ont tendance à disparaître et les détrempes deviennent cassantes, pulvérulentes[1].

Ces trois techniques à l'eau peuvent s'utiliser en lavis, en demi-pâte et en pâte épaisse avec ou sans empâtement sur des feuilles de papier.

La préparation du support papier

Pour avoir une surface parfaitement plane et tendue, le papier nécessite une mise en tension. Dans la pratique, le papier est mouillé pour qu'il se détende et les bords sont maintenus sur un fond rigide en bois par une bande de papier kraft gommé. En séchant, il va se tendre. Le support est prêt à recevoir un encollage supplémentaire pour rendre le papier plus « nerveux » et isoler les fibres de cellulose de la couche picturale. L'encollage couché sur le papier dans le cas de notre étude est à base de colle de peau en solution à 5 % dans l'eau.

1. Roche A., Desserne L., « The consolidation of flaking gouache on japanese paper », *Restaurator,* 2002, 23, p. 256,269.

Pour évaluer la sensibilité à l'humidité relative de ce type de peinture, nous avons repris et complété l'étude qui avait été réalisée en 2001[2].

Fabrication des éprouvettes

La série des trois peintures est obtenue en broyant des pigments bleus de cobalt dans une solution de colle de peau à 10 % dans l'eau. Elles ont donné, en variant les proportions de pigments, des peintures de consistances différentes : peinture fluide Pc1/p, peinture onctueuse Pc2/p, peinture pâteuse Pc3/p. Elles ont été passées sur un papier Canson C (125 g/m$^2$) tendu et encollé de colle animale.

Les caractéristiques de chaque peinture sont regroupées dans le tableau ci-après.

Pour établir les diagrammes de sensibilité à l'eau des détrempes à la colle, nous avons suivi la procédure suivante :

– Tension sur le cadre extensiométrique,
– Conditionnement entre 10 et 90 % HR,
– Enregistrement et suivi des variations de tension pendant la montée progressive de l'humidité.

Par souci de simplification, nous présentons les courbes moyennes des sens machine et travers des trois peintures sur papier, fig. 93. L'ensemble des courbes est présenté dans la partie III de l'ouvrage.

La peinture à la colle Pc1/p contenant 99 % de matière hydrophile est particulièrement sensible au climat sec. Effectivement, les tensions chutent brutalement entre 20 % et 35 % HR, promettant des variations très importantes dans cette zone. La sensibilité maximum de cette peinture se situe entre 20 et 30 % HR. Ce comportement est très proche de la réactivité du papier à l'humidité.

La tension de la peinture Pc2/p moins riche en matières hydrophiles, décroît lentement entre 20 et 30 %. Ensuite elle diminue régulièrement entre 30 % et 65 % pour se stabiliser. La colle impose son comportement aux faibles humidités.

La tension, de la peinture Pc3/p plus chargée en pigments, diminue lentement de 20 à 30 % d'humidité. Ensuite elle décroît régulièrement de 40 % à 60 % pour se stabiliser vers 70 %. La colle et les pigments s'imposent à faible humidité.

Dans les conditions standard de conservation 50 %/60 %HR la *Vt* de Pc1/p (2,8 daN/m) est supérieure à sa $V_{mini}t$ =1,2 daN/m, les risques de dégradation mécaniques sont élevés. Pour conserver une peinture à la détrempe sur papier de ce type, il faut que l'humidité soit régulée entre 50 % et 54 %. En dessous de cette valeur minimale, elle sera trop

2. Roche A. « Comportement mécanique des peintures à la colle et à l'huile sur papier », *Techné*, n° 13-14, 2001.

| | Papier Canson C | Encollage colle animale | Composition de la couche (bleu cobalt*) | Masse de colle g/m$^2$ | CPP** % | Mat phile/ phobe | Epais mm | $V_{mini}t$ *** daN/m |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Pc1/p | 125 g/m$^2$ | 4 g/m$^2$ | $M_{peint}$=6,36 g/m$^2$<br>$M_{pig}$=1,24 g/m$^2$<br>$M_{colle}$=5,12 g/m$^2$<br>$\sigma r_{upt}$ = 3MPa | 9,12 | 19,49 | 99/1 | 0,4 | 1,2 |
| Pc2/p | 125 g/m$^2$ | 4,16 g/m$^2$ | $M_{peint}$=25,24 g/m$^2$<br>$M_{pig}$=8,41 g/m$^2$<br>$M_{colle}$=16,83 g/m$^2$<br>$\sigma r_{upt}$ = 3MPa | 20,99 | 33,33 | 94/6 | 1,60 | 4,80 |
| Pc3/p | 125 g/m$^2$ | 4,15 g/m$^2$ | $M_{peint}$=33,79 g/m$^2$<br>$M_{pig}$=21,14 g/m$^2$<br>$M_{colle}$=12,65 g/m$^2$<br>$\sigma r_{upt}$ = 3MPa | 16,8 | 62,56 | 87/13 | 2,00 | 6,00 |

* Pigment en poudre Lefranc Bourgeois. ** Concentration pondérale de pigments. *** La $V_{mini}t$ a été calculée selon l'expression (31) voir annexe.

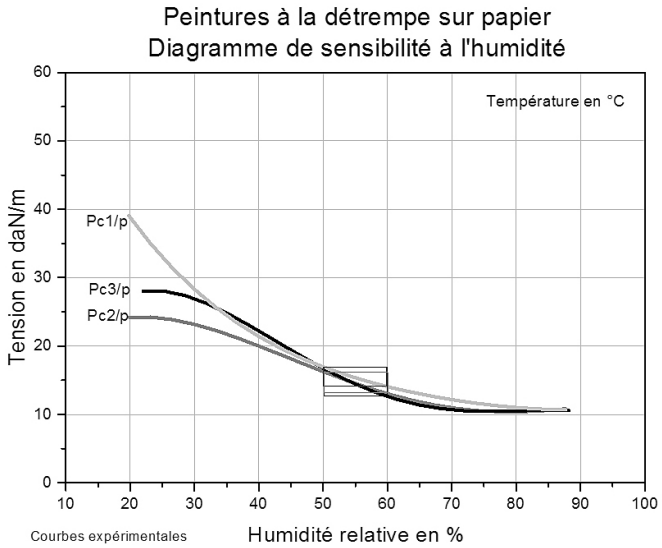



*Figure 93 : Comportement à l'humidité de trois peintures à la détrempe.*

contrainte et des risques de dégradations mécaniques sont à prévoir, au-delà de la valeur maximale elle peut se détendre.

Par contre, pour les autres peintures à la détrempe de type Pc2/p et Pc3/p, les valeurs respectives de *Vt,* 3,2 daN/m et 4,3 daN/m, sont inférieures aux $V_{mini}t$. Elles sont moins réactives en milieu sec. La présence des 6 % et 13 % de pigments en est responsable.

Entre 35 % et 65 % de HR, la pente de la courbe de Pc3/p étant plus élevée que celle de Pc2/p, on peut en conclure que la peinture Pc3/p est plus réactive que la peinture Pc2/p.

Les réactivités à l'humidité de ces trois peintures à la colle sont regroupées dans le tableau suivant.

| | Type de peinture | $V_{mini}t$ daN/m | Conditions optimales de conservation | Observations |
|---|---|---|---|---|
| Pc1/p | Peinture à la colle sur papier couche fine ou lavis- | 1,2 | 50 % < HR < 54 % | Hors conditions standard |
| Pc2/p | Peinture à la colle sur papier couche moyenne | 4,8 | 45 % < HR < 60 % | Conditions standard |
| Pc3/p | Peinture à la colle sur papier couche épaisse | 6 | 46 % < HR < 60 % | Conditions standard |

Si les peintures avaient été à la gouache, à partir de la contrainte à la rupture et de l'épaisseur, on aurait pu déterminer la $V_{mini}t$ et évaluer les conditions optimales de conservation. Cette méthode nous apporte un large éventail de possibilités.

*VII-1-3 Peinture à l'huile*

L'utilisation de la peinture à l'huile sur papier est une pratique courante chez les artistes peintres. Ce support a été utilisé avec ou sans encollage. Le rôle de l'encollage est d'isoler de l'huile des fibres de cellulose qui a tendance à les dégrader.

Nous avons étudié une série de peintures à l'huile sur papier non encollé et une série de peintures à l'huile sur papier encollé.

**Peinture à l'huile sur papier non encollé**

Une première couche de peinture à l'huile ocre rouge diluée dans du white spirit est passée sur trois feuilles de papier Canson C non encollé. Après son séchage, une couche de peinture à l'huile verte est passée sur deux des trois feuilles. Enfin, une troisième couche de peinture terre ombre brûlée est passée sur l'une des feuilles ayant reçu deux couches de peinture. C'est ainsi qu'a été obtenue la série de trois peintures à l'huile sur papier non encollé.

Les caractéristiques des peintures à l'huile sur papier non encollé sont regroupées dans les tableaux suivants :

| | Papier Canson C | 1re couche Ocre rouge* | 2e couche Vert émeraude* | 3e couche Terre d'ombre brulée* | Mat phile/ phobe | Épais. mm | $V_{mini}t$** daN/m |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ph1/p | 125 g/m$^2$ | 25 g/m$^2$ | | | 83/17 | 0,8 | 2,56 |
| Ph2/p | 125 g/m$^2$ | 25 g/m$^2$ | 10 g/m$^2$ | | 78/22 | 1,4 | 4,48 |
| Ph3/p | 125 g/m$^2$ | 25 g/m$^2$ | 10 g/m$^2$ | 12 g/m$^2$ | 72/28 | 2,0 | 6,40 |

* Peintures beaux-arts Talens en tube. ** La $V_{mini}t$ a été calculée selon l'expression (31), voir annexe.

Dans ces peintures, la quantité de matériaux hydrophiles prédomine. Elle diminue, lorsque le nombre de couches augmente. Les diagrammes de sensibilité de ces trois peintures sont représentés par leurs moyennes pour des raisons de simplification, fig. 94, les diagrammes complets sont présentés dans la troisième partie de livre.

Chaque peinture étudiée se distingue par le nombre de couches. Dans Ph1/p, composée d'une couche fine de peinture, c'est le papier qui impose son comportement. La tension décroît assez fortement de 30 % à 55 %. Avec l'application d'une deuxième et troisième couche de

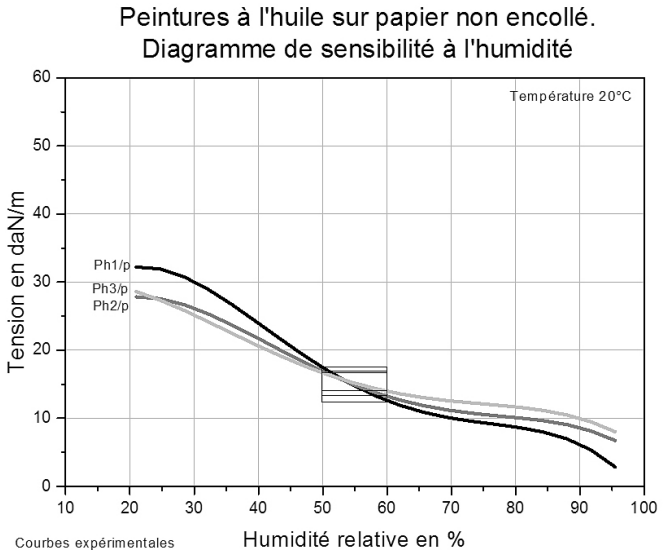



*Figure 94 : Comportement à l'humidité de trois peintures à l'huile sur papier non encollé.*

couleurs à l'huile, les peintures Ph2/p et Ph3/p deviennent moins sensibles à l'humidité.

Dans les conditions normales de conservation, 50 %/60 % HR, les variations de tension (*Vt)* des peintures sur papier sont pour Ph1/p de 4,7 daN/m pour Ph2/p de 3,8 daN/m et pour Ph3/p de 2,5 daN/m. Pour la peinture Ph1/p, la *Vt* est supérieure à la $V_{mini}t$ (2,56 daN/m) et les risques de dégradations mécaniques sont réels. Pour les deux autres peintures les *Vt* sont inférieures. Les peintures Ph2/p et Ph3/p sont capables de supporter les conditions de conservation recommandées standard.

Pour protéger les fibres cellulosiques du papier de l'agression de l'acidité de l'huile, il est recommandé de passer sur le papier une couche de colle animale. Cette pratique est traditionnelle et elle continue de se pratiquer encore de nos jours.

**Peinture à l'huile sur papier encollé**

Après l'encollage du papier d'une colle de peau à 5 % dans l'eau, la procédure de fabrication des éprouvettes est la même que précédemment. Les caractéristiques des peintures sont regroupées dans le tableau suivant.

Les diagrammes de sensibilité de ces trois peintures sont représentés par leurs moyennes, fig. 95.

| | Papier Canson C | Encollage colle de peau | 1re couche Ocre rouge* | 2e couche Vert émeraude* | 3e couche Terre d'ombre brulée* | Mat. phile/ phobe | Epaismm | $V_{mini}t$** daN/m |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Phc 4/p | 125 g/m$^2$ | 6,10 g/m$^2$ | 15 g/m$^2$ | | | 90/10 | 0,9 | 2,79 |
| Phc 5/p | 125 g/m$^2$ | 5,57 g/m$^2$ | 15 g/m$^2$ | 8 g/m$^2$ | | 85/15 | 1,4 | 4,48 |
| Phc 6/p | 125 g/m$^2$ | 4,84 g/m$^2$ | 15 g/m$^2$ | 8 g/m$^2$ | 21,5 g/m$^2$ | 74/26 | 2,4 | 7,64 |

* Peinture beaux-arts Talens. ** Les $V_{mini}t$ a été calculée selon l'expression (36) annexe A3.

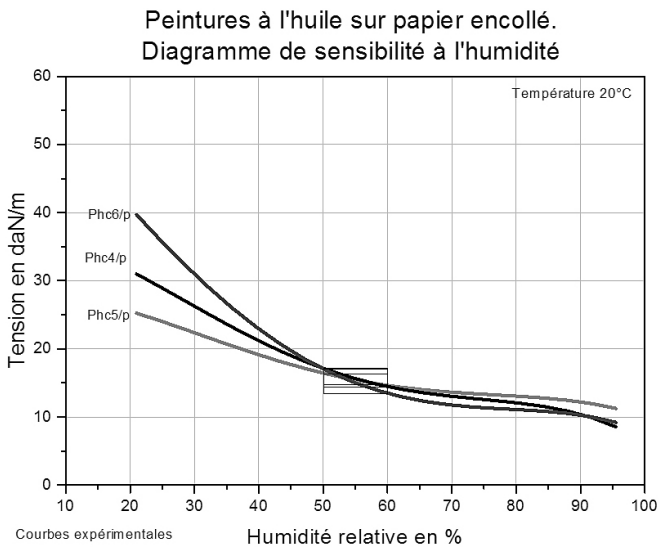



*Figure 95 : Comportement à l'humidité de trois peintures à l'huile sur papier encollé.*

L'encollage du papier par une couche de colle animale est responsable d'une augmentation des proportions en matériau hydrophile et d'une modification du comportement mécanique des peintures.

Dans les conditions de conservation standard (50 %/60 %HR), les variations de tension sont pour Phc4/p $Vt$ = 2,7 daN/m, Phc5/p $Vt$ = 1,75 daN/m et Phc6/p $Vt$ = 3,54 daN/m. Dans ces conditions, la $Vt$ de Phpc6/p est légèrement supérieure la $V_{mini}t$ = 2,79 daN/m. En ce qui concerne les peintures Phc5/p et Phc4/p, les $Vt$ sont inférieures à la $V_{mini}t$.

On a pu constater que le rapport de matières hydrophiles/hydrophobes joue un rôle important dans la sensibilité des peintures à l'humidité. Il faut aussi noter que la présence de certains pigments réactifs ou siccatifs en forte concentration peut également modifier la sensibilité à l'eau de la peinture. C'est le cas de la peinture Phc6/p qui est très sensible aux faibles taux d'humidité.

En résumé, les conditions optimales de conservation pour les peintures à l'huile sur papier et sur papier encollé sont regroupées dans le tableau suivant :

| | Type de peinture | $V_{mini}t$ daN/m | Conditions optimales de conservation | Observations |
|---|---|---|---|---|
| Ph1/p | Peinture à l'huile sur papier 1 couche type ébauche | 2,56 | 50 % < HR < 55 % | Hors Conditions standard |
| Ph2/p | Peinture à l'huile sur papier 2 couches | 4,48 | 48 % < HR < 60 % | Conditions standard |
| Ph3/p | Peinture à l'huile sur papier 3 couches | 6,40 | 41 % < HR < 66 % | Conditions standard |
| Phc4/p | Peinture à l'huile sur papier encollé 1 couche type esquisse | 2,79 | 50 % < HR < 60 % | Conditions standard |
| Phc5/p | Peinture à l'huile sur papier encollé 2 couches | 4,48 | 40 % < HR < 60 % | Conditions standard |
| Phc6/p | Peinture à l'huile sur papier encollé 3 couches | 7,64 | 45 % < HR < 65 % | Conditions standard |

On rappellera que les peintures les moins réactives à l'humidité sont plus sensibles à la température.

### *VII-1-4 Peintures sur papier marouflées*

Très souvent, les peintures sur papier sont marouflées sur toile par l'artiste lui-même ou par un spécialiste. L'objectif de cette opération est de renforcer le dessin ou la peinture. Le marouflage consiste à contrecoller le papier ou la peinture sur une toile de fibres naturelles à l'aide d'un adhésif. Dans les techniques traditionnelles le collage se faisait avec une colle de pâte ou d'amidon. Actuellement on trouve de nombreuses variantes du marouflage. Les adhésifs utilisés sont le plus souvent à base de colles cellulosiques, amylacées, vinyliques ou acry-

liques et les supports de marouflage peuvent être des toiles ou des non tissé de polyester, des panneaux d'isorel, de contreplaqué.

**Techniques de marouflage des papiers sur toile**

La toile de renfort est traditionnellement une toile de lin, de chanvre ou de coton. Elle est tendue sur un bâti pour être décatie. Le papier est humidifié sur un plan de travail pour qu'il se détende. On encolle la toile décatie avec l'un des adhésifs suivants : colle de pâte, colle amidon, colle cellulosique, mélange de colle vinylique et cellulosique ou amidon. Ensuite, on positionne la peinture humidifiée sur la toile encollée. Après le séchage, la toile est découpée du bâti pour être ensuite retendue sur un châssis standard.

Pour maroufler nos peintures, nous avons adopté l'utilisation de la colle de pâte[3]. Les peintures à la détrempe Pc3/p et à l'huile Phc6/p ont été marouflées de la même manière, sur une toile de lin moyenne décatie, à l'aide d'une colle de pâte. Nous avons eu soin de croiser les sens papier et toile pour avoir une combinaison chaîne/travers et trame/machine.

**Peintures à la détrempe (Pc3/p/t.lin) sur papier marouflées sur toile de lin**

Le diagramme de sensibilité à l'humidité de la peinture à la détrempe sur papier marouflé est le suivant, fig. 96.

Le comportement de ce type de peinture est plus complexe. Il cumule le comportement d'une peinture à la colle sur papier et d'une toile de fibres naturelles. Cette opération de renfort augmente fortement la quantité de matériaux hydrophiles et par conséquent sa réactivité. Elle se manifeste par une pente plus élevée des courbes due au comportement combiné de la colle et du papier. Aux très fortes humidités on observe une légère élévation des tensions provoquée par la toile.

Dans les conditions standard de conservation 50 %/60 %HR, la *Vt* est d'environ 14,5 daN/m. Cette valeur est bien au-dessus de la $V_{mini}t$ = 6 daN/m et les risques de dégradations mécaniques sont élevés. Pour les limiter, elle doit être conservée entre 55 % et 60 % HR.

Une fois marouflée, les conditions de conservation de la peinture Pc3/p ont bien changé. On en conclut que son renfort la rend plus résistante aux chocs, mais plus sensible à l'humidité. Elle devient donc plus vulnérable à long terme aux variations climatiques.

**Peinture à l'huile (Phc6/p/t.lin) sur papier marouflée sur toile de lin**

Ci-dessous nous avons le diagramme de sensibilité à l'humidité d'une peinture à l'huile sur papier entoilé, fig. 97.

3. Recette Monsieur Yves Lepavec : composition pondérale de la colle de pâte : Farine de blé 3 kg, farine de seigle 1,5 kg, colle de peau 0,75 kg, eau 8 kg, térébenthine de Venise 0,54 kg et 0,66 kg d'antifongique.

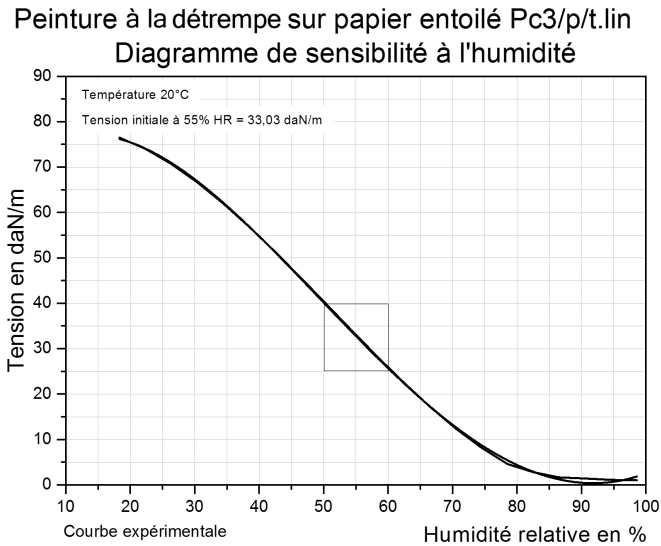



*Figure 96 : Comportement à l'humidité d'une détrempe sur papier marouflée sur toile.*

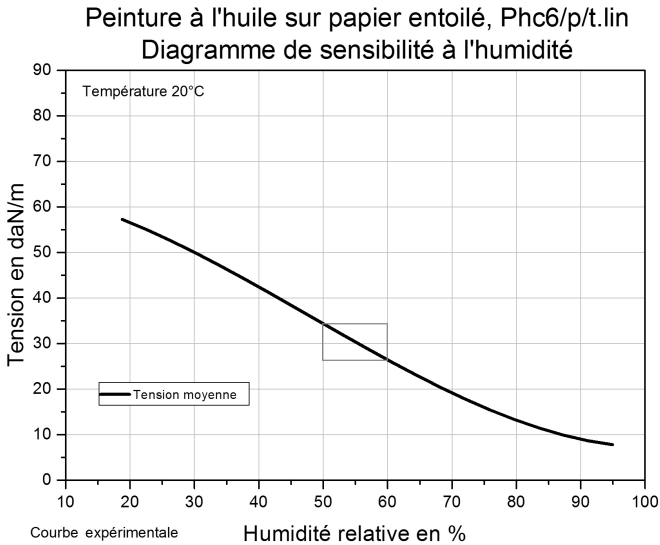



*Figure 97 : Comportement à l'humidité d'une peinture à l'huile sur papier marouflée sur toile.*

Dans les conditions standard la *Vt* est de 7,85 daN/m. Cette valeur est très proche de la $V_{minit}$=7,64 daN/m. Autrement dit, cette peinture supportera sans risque ces conditions.

Les conditions de conservation de ces deux peintures sont regroupées dans le tableau suivant :

| | Type de peinture | $V_{mini}t$ daN/m | Conditions optimales de conservation | Observations |
|---|---|---|---|---|
| Pc3/p/t.lin | Peinture à la détrempe sur papier marouflé | 6 | 55 % < HR < 60 % | Hors conditions standard |
| Phc6/p/t.lin | Peinture à l'huile sur papier marouflé | 7,64 | 50 % < HR < 60 % | Conditions standard |

*VII-1-5 Peintures acryliques et vinyliques*

Les peintures acryliques et vinyliques se sont développées dans les années 1950. Elles sont entrées dans le domaine des peintures Beaux-arts dans les années 1970. Elles s'utilisent comme les peintures à l'huile sur différents supports. Elles ont l'avantage de se diluer à l'eau et de sécher plus vite.

Les peintures acryliques et vinyliques de qualité beaux-arts et décoration sont variées. Elles ont fait l'objet d'un certain nombre d'études sur leur vieillissement chimique mais leurs comportements à l'humidité et à la température ont rarement été explorés. Nous ne prétendons pas couvrir l'ensemble des produits, mais en tout état de cause leurs formulations sont relativement proches les unes des autres et présentent, pour une catégorie de produits, des caractéristiques semblables. Ces techniques ne sont pas étrangères au peintre Martial Raysse par exemple et à bien d'autres artistes.

À l'aide de l'approche théorique nous avons pu construire les diagrammes de sensibilité à l'humidité des peintures acryliques et vinyliques sur un support papier en partant des formulations suivantes.

Peinture acrylique (Liquitex®, acrylique Lascaux®)

- Encollage liant Caparol® dilué,
- Peinture ; liant Plextol B 500® et vert oxyde de chrome

Peinture vinylique (Flashe®)

- Encollage ; liant Caparol ® dilué,
- Peinture ; liant Caparol® et bleu de Prusse.

En appliquant le principe d'additivité aux propriétés mécaniques des différents composants nous obtenons les diagrammes de sensibilité des deux peintures acryliques et vinyliques sur papier, fig. 98.

Dans les conditions standards de conservation 50/60 % HR, les variations de tension des peintures acryliques sont de 4,20 daN/m et pour les peintures vinyliques elle est de 4,33 daN/m.

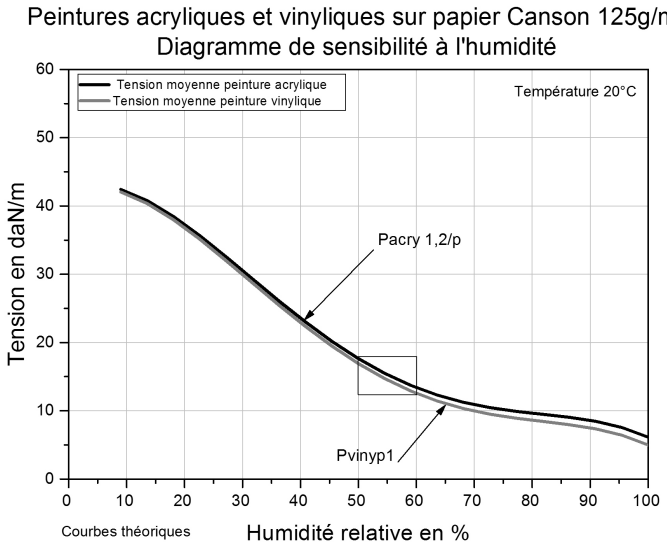



*Figure 98 : Comportement à l'humidité des peintures acryliques et vinyliques sur papier.*

Connaissant les contraintes à la rupture des peintures Liquitex®, acrylique Lascaux® et Flash, pour un film de peinture d'épaisseur e = 0,6 mm, les variations minimum de tension sont :

• pour une peinture acrylique type Liquitex® $V_{mini}t$ =3,76 daN/m,

• pour une peinture acrylique Lascaux® et Flashe® $V_{mini}t$ =4,5 daN/m,

• pour une peinture vinylique type Flashe® $V_{mini}t$=3,6 daN/m.

Seule, l'acrylique Lascaux® supporte les conditions standard de conservation, sans risque de dégradation, ce qui n'est pas tout à fait le cas pour les deux autres peintures.

Les conditions de conservation de ces peintures sont regroupées dans le tableau suivant :

| | Type de peinture | $V_{mini}t$ daN/m | Conditions optimales de conservation | Observations |
|---|---|---|---|---|
| Pacry1/p | Acrylique Liquitex®/ papier | 3,76 | 50 % < HR < 59 % | Hors conditions standard |
| Pacry2/p | Acrylique Lascaux®/ papier | 4,5 | 50 % < HR < 61 % | Conditions standard |
| Pviny1/p | Vinylique Flashe®/ papier | 3,6 | 50 % < HR < 58 % | Hors conditions standard |

## VII-2 La toile comme support pictural

La toile tendue sur châssis est le support le plus utilisé par les peintres. Il représente plus de 70 % des supports utilisés par les artistes peintres. La toile de fibres naturelles est majoritaire dans le domaine des beaux-arts. Depuis les années 1980, l'usage des toiles de polyester s'est développé.

### *VII-2-1 Comportement des toiles de fibres cellulosiques à l'humidité*

Pour aborder le comportement de ce type de peinture, nous allons examiner le comportement d'une toile tendue non décatie, soumise à une variation d'humidité de 10 % à 90 % HR comme nous l'avons déjà fait pour le papier, fig. 99.

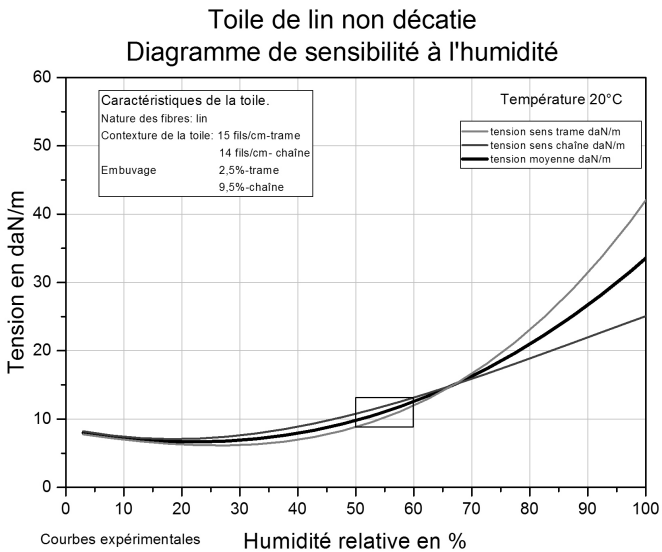



*Figure 99 : Comportement à l'humidité d'une toile non décatie.*

Contrairement au papier, la réactivité de la toile est relativement faible aux humidités allant de 10 à 50 %. Au-delà de 60 % sa tension augmente progressivement et d'une manière plus accentuée pour la trame. C'est à forte humidité qu'elle se trouve le plus tendue. Son comportement est l'inverse de celui du papier. Dans les conditions standard de conservation, la *Vt* totale (trame et chaîne) est de 4,3 daN/m.

La même toile après un décatissage artisanal a un comportement mécanique devenu plus homogène. Sa réactivité aux fortes humidités a diminué, fig. 100.

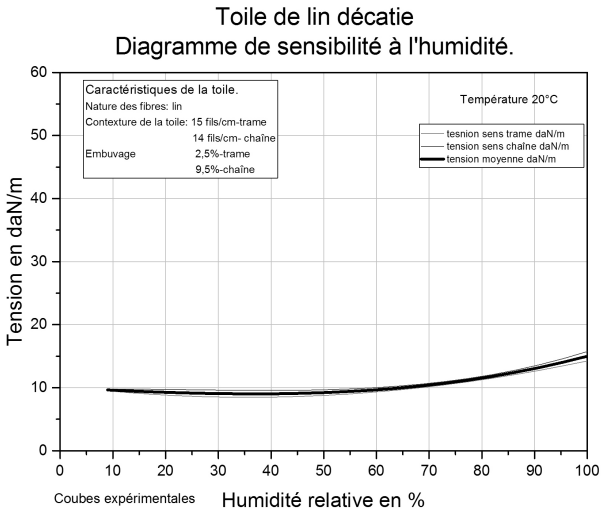



*Figure 100 : Comportement à l'humidité d'une toile décatie.*

*VII-2-2 Détrempes : gouache, colle, caséine*

Les grands maîtres de la peinture moderne et contemporaine ont pratiquement tous utilisé cette technique sur toile pour esquisser une idée ou pour réaliser un projet. Nous pouvons citer certaines des œuvres de Vuillard et de Bonnard et les peintures de Robert et Sonia Delaunay produites fin du XIX$^{e}$-début XX$^{e}$ siècle. Nous avons aussi de grands décors peints à la colle comme par exemples les rideaux de scènes de Picasso tels que les rideaux de *Mercure* ou de *Parade*, fig. 101.



*Figure 101 : Rideau de scène du ballet « Parade »,*
*Peinture à la colle sur toile. Collection Centre Pompidou, Paris.*
*Musée national d'art moderne – Picasso Pablo © Succession Picasso.*

Fabrication des éprouvettes

La mise en œuvre de ces peintures se déroule en trois étapes. La toile de lin non décatie est tendue sur trois bâtis de 100/100 cm. Elles sont encollées avec une colle animale à 7 % dans l'eau. Trois peintures bleues de concentration pigmentaire pondérale différente sont fabriquées en broyant directement le pigment bleu de cobalt dans une colle à 10 % dans l'eau, chauffée au bain marie. Une couche de chaque peinture bleue est appliquée sur chaque toile. Après leur séchage complet, elles sont montées tour à tour sur le cadre extensiométrique avant d'être conditionnées dans l'enceinte climatique entre 10 et 95 % HR pour obtenir les courbes de *t(HR)*.

Les proportions des composants des trois peintures ont été calculées de manière à obtenir une peinture fluide, une peinture onctueuse et une peinture pâteuse. Les caractéristiques de chacune des peintures Pc1/t, Pc2/t, Pc3/t sont regroupées dans le tableau ci-après.

Les diagrammes de sensibilité de ces trois peintures sont représentés par leurs moyennes, fig. 102.

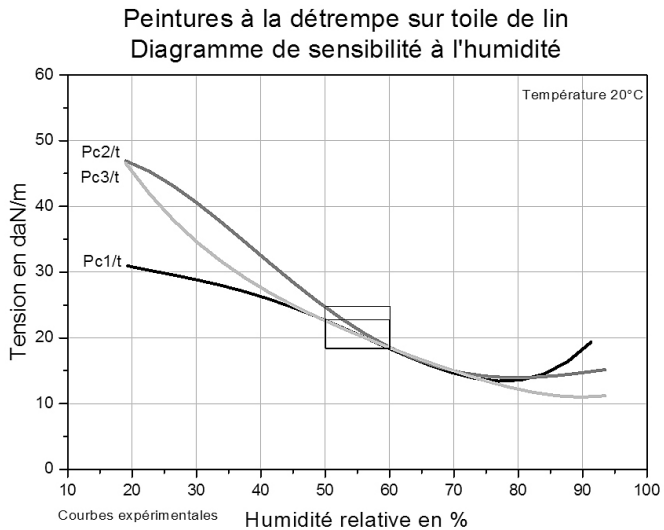



*Figure 102 : Diagrammes de sensibilité des peintures à la détrempe sur toile non décatie.*

Ce sont des peintures à forte proportion de matériaux hydrophiles. La toile a un comportement très différent du papier. L'addition des comportements de la colle et de la toile est évidente dans les courbes obtenues expérimentalement. À faible humidité, c'est la colle animale qui impose son comportement sur la toile dans le cas des trois peintures. Au-dessus de 70 %, la toile se tend sous l'effet de l'humidité pour

| | Toile de lin | Encollage colle de peau | Composition de la couche. Pig bleu cobalt | Masse de colle g/m$^2$ | CPP % | Mat phile/ phobe | Épais. mm | $V_{mini}t$ daN/m |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Pc1/t. | 365g/m$^2$ | 17,28 g/m$^2$ | $M_{peint}$=19,43 g/m$^2$<br>$M_{pig}$=3,85 g/m$^2$<br>$M_{colle}$=15,58 g/m$^2$<br>$\sigma_{rupt}$ = 3MPa | 32,86 | 19,59 | 99/1 | 0,6 | 1,8 |
| Pc2/t. | 365g/m$^2$ | 17,28g/m$^2$ | $M_{peint}$=29,52 g/m$^2$<br>$M_{pig}$=9,84 g/m$^2$<br>$M_{colle}$=19,68 g/m$^2$<br>$\sigma_{rupt}$ = 3MPa | 36,96 | 33,33 | 97,6/2,4 | 0,90 | 2,7 |
| Pc3/t. | 365g/m$^2$ | 17,28g/m$^2$ | $M_{peint}$=48,47 g/m$^2$<br>$M_{pig}$=30,33 g/m$^2$<br>$M_{colle}$=18,14 g/m$^2$<br>$\sigma_{rupt}$ = 3MPa | 35,32 | 62,6 | 93/7 | 1,5 | 4,5 |

Pc1/t et Pc2/t, alors qu'en raison de la forte concentration pigmentaire la toile de Pc3/t ne peut pas se retendre.

En calculant les variations minimum de tension $V_{mini}t$ des films de détrempe d'épaisseurs de 0,6, 0,9 et 1,5 mm, nous obtenons respectivement les valeurs pour : Pc1/t de 1,8 daN/m, Pc2/t de 2,7 daN/m et Pc3/t de 4,5 daN/m. Dans les conditions standards de conservation, les variations de tension $V\,t$ des peintures sont pour Pc1/t de 4,18 daN/m, Pc2/t de 6,15 daN/m et pour Pc3/t de 2,04 daN/m. Les $Vt$ des peintures Pc1/t et Pc2/t sont supérieures à leur $V_{mini}t$, alors que la $Vt$ de Pc3/t est inférieure.

En respectant les valeurs de $V_{mini}\ t$, les meilleures conditions de conservation sont pour ces trois peintures regroupées dans le tableau suivant :

| | Type de peinture | $V_{mini}t$ | Conditions optimales de conservation | Observations |
|---|---|---|---|---|
| Pc1/t | Peinture à la détrempe sur toile, couche fine | 1,8 | 50 % < HR < 54 % | Hors conditions standard |
| Pc2/t | Peinture à la détrempe sur toile, couche moyenne | 2,70 | 55 % < HR < 60 % | Hors conditions standard |
| Pc3/t | Peinture à la détrempe sur toile, couche épaisse | 4,5 | 50 % < HR < 61 % | Conditions standard |

*VII-2-3 Peintures à l'huile*

Cette technique a été probablement la plus utilisée dans le domaine picturale du XVII^e^ siècle à nos jours et elle reste encore d'actualité. En flânant dans les musées d'art moderne, on ne sera pas surpris de constater que la peinture à l'huile sur toile (présumée de fibres naturelles) représente environ 70 % des œuvres picturales.

Dès la fin du XIX^e^ siècle, les toiles sont commercialisées et vendues préparées et tendues sur des châssis standard. On trouve alors deux types de toile préparée :

– Préparation maigre : carbonate de calcium/colle animale sur toile encollée de colle animale,

– Préparation grasse : céruse /huile sur toile encollée de colle animale.

Après les années 1960 d'autres variétés de support sont apparues : les préparations vinyliques sur des toiles et non-tissés de polyester encollés d'un apprêt vinylique ou acrylique.

C'est sur l'ensemble de ces supports que la plus grande partie des artistes peintres des XX^e^ et XXI^e^ siècles se sont exprimés.

**Comportement à l'humidité de trois toiles de lin préparées**

Les diagrammes de sensibilité à l'humidité de trois toiles préparées, fig. 103, nous montrent bien leur différente réactivité. Une toile de lin encollée à la colle et enduite d'une préparation maigre est plus sensible à l'humidité qu'une toile encollée à la colle et enduite d'une préparation à la céruse. Par contre, la toile encollée et préparée avec une résine vinylique est beaucoup moins sensible à l'humidité.

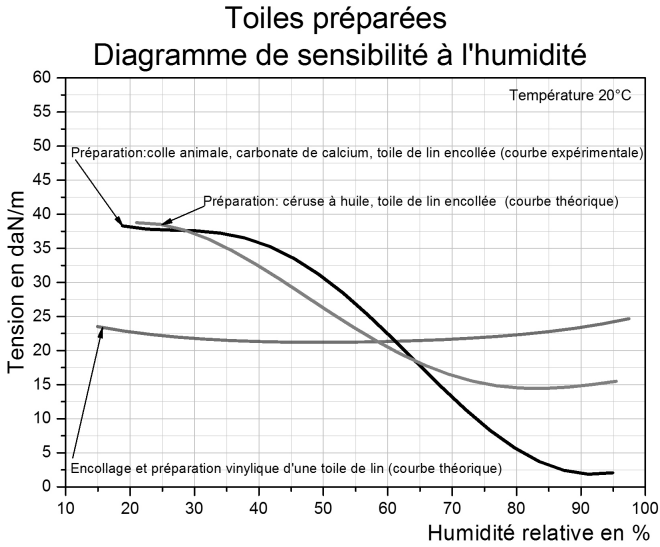



*Figure 103 : Comportement à l'humidité de toiles préparées.*

Dans les conditions normales de conservation, la variation de tensions de la préparation maigre est de 8,3 daN/m, celle de la préparation grasse est de 5,8 daN/m. Ces trois types de préparations sur toile de lin sont bien caractérisés par l'allure des courbes et par leurs fonctions polynomiales.

Si on ajoute sur ces supports, des couches de peinture à l'huile, les tensions produites par des films de peinture secs depuis 8 à 10 ans sont très faibles vis-à-vis des tensions occasionnées par la toile et par la colle animale contenue dans l'encollage et la préparation maigre. Elles sont de l'ordre de 0,1 % à 0,5 % de la tension totale. Autrement dit, pour une peinture d'épaisseur moyenne, elles modifient assez peu la sensibilité à l'humidité du support, sauf aux fortes humidités. Néanmoins, une couche de matière picturale très épaisse peut diminuer la vitesse de

réactivité à l'eau de la peinture, en isolant partiellement les matériaux hydrophiles.

**Peinture à l'huile sur toile de lin et préparation maigre**

Reprenons le diagramme de sensibilité d'une peinture à l'huile sur préparation maigre, sujet qui a été déjà développé dans le § V-2 Prévisions climatiques de conservation des peintures. Par rapport à la préparation maigre sur toile de fibres naturelles, la courbe de cette peinture se différencie par l'absence de réactivité de la toile à forte humidité, fig. 104.

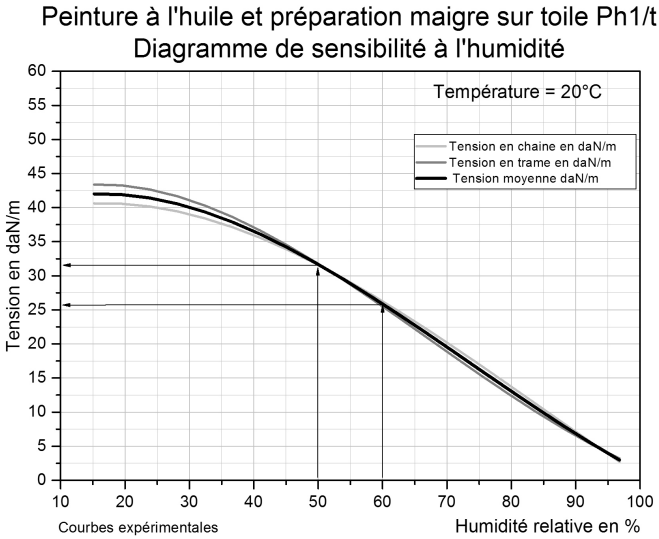



*Figure 104 : Diagrammes de sensibilité d'une peinture à l'huile sur préparation maigre.*

À l'aide du diagramme de sensibilité nous avons défini les variations de tension dans les conditions standard de conservation. Les valeurs de *Vt* varient peu entre le sens trame et le sens chaîne. Quant à la valeur moyenne *Vt* = 6,46 daN/m, elle est légèrement supérieure à $V_{mini}t$ = 4,8 daN/m. Par conséquent, les conditions de conservation recommandées pour les musées ne sont pas parfaitement adaptées pour ce genre de peinture. Une humidité comprise entre 55 % et 60 % pour une température de 20°C serait plus satisfaisante.

**Peinture à l'huile sur toile de lin enduite d'une préparation grasse**

Cette technique a été fréquemment pratiquée par les artistes en raison d'une importante commercialisation des toiles enduites d'une

préparation grasse, par les principaux fabricants de produits beaux-arts dès la fin du XIX$^{e}$ siècle. Leurs fabrications sont restées artisanales, fig. 105.



*Figure 105 : Enduction d'une préparation à la céruse Lefranc bourgeois 1981.*

Pour étudier ce type de technique, nous avons pris comme modèle théorique une peinture constituée d'une toile décatie encollée à la colle animale, d'une préparation à la céruse et de deux couches de couleur à l'huile, blanc de zinc et noir d'ivoire. Le diagramme a été construit en appliquant le principe d'additivité des propriétés mécaniques des constituants, fig. 106.

Nous avons calculé les $V_{mini}t$ de chaque film en fonction des épaisseurs suivantes :

– céruse épaisseur e = 0,6 mm → $V_{mini}t$ = 2,1 daN/m,
– blanc de zinc épaisseur e = 0,8 mm → $V_{mini}t$ = 4 daN/m,
– noir d'ivoire épaisseur e = 4 mm → $V_{mini}t$ = 5 daN/m.

Dans les conditions standard de conservation (50 %/60 %), la variation de tension est $Vt$ = 5,80 daN/m. Nous voyons que cette valeur est trop élevée, surtout par rapport à la $V_{mini}t$ de la préparation à la céruse. Les risques d'altérations mécaniques sont majeurs et se situeront au niveau de cette couche. Si on veut définir correctement la plage d'humidité, on se basera sur la valeur de la $V_{mini}t$ la plus faible (2,1 daN/m). Dans ce cas, les conditions de conservation sont de ± 2 % HR sur la portion linéaire de la courbe comprise entre 40 % et 60 %. On peut se fixer par exemple comme écarts d'humidité relative 56 % ± 2 %. Cette condition respecte la $V_{mini}t$.

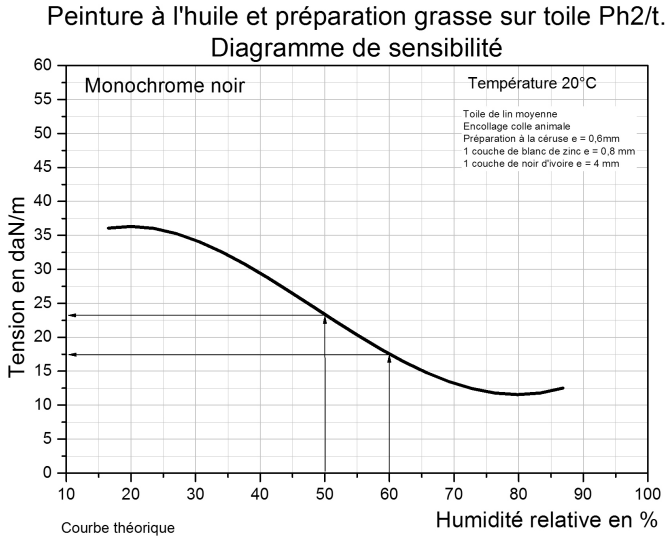



*Figure 106 : Diagramme de sensibilité d'une peinture à l'huile sur préparation grasse.*

**Peintures à l'huile sur toile en fonction de la température**

Les tensions d'une peinture à l'huile sur préparation maigre varient également, si elle est sollicitée par des variations de température. Le diagramme de sensibilité à la température présente plusieurs parties caractérisées par l'inflexion de la courbe, fig. 107.

De 10 °C à 20 °C, la tension diminue pour atteindre un minimum à 20 °C. Ensuite, la tension s'accroît jusqu'à un maximum de 42,5 °C. À faible température, la chute de tension est liée à la diminution des modules d'élasticité des matériaux colle animale et huile. La toile et les pigments n'interviennent pas beaucoup dans cet état de fait. Ensuite, lorsque la température augmente, la teneur en eau dans la colle diminue et provoque une augmentation du module d'élasticité de la colle, responsable de l'accroissement de la tension.

Si on se place dans les conditions standard de conservation 20 °C ± 2 °C, les variations de tension sont inférieures à 1 daN/m. Aucun risque de dégradation n'est à prévoir. En respectant la $V_{mini}t$, l'échelle des températures peut s'étaler de 14,5 °C à 27 °C.

La mauvaise gestion de la température sur ce type de peinture a peu de conséquences sur leur conservation. Les conditions de conservation de ces peintures sont les suivantes :

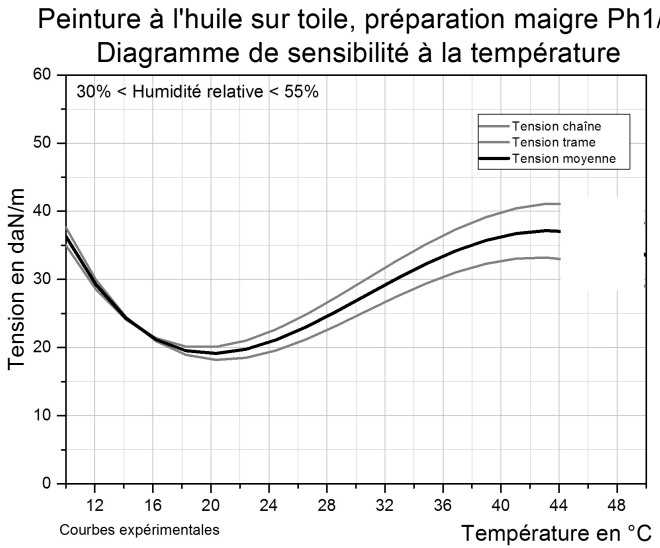



*Figure 107 : Diagrammes de sensibilité à la chaleur d'une peinture à l'huile sur préparation maigre.*

| | Type de peinture | $V_{mini}t$ | Conditions optimales de conservation | Observations |
|---|---|---|---|---|
| Ph1/t | Peinture à l'huile sur toile et préparation maigre | 4,8 | 55 % < HR < 60 %<br>14,5 °C < T < 27 °C | Hors conditions standard |
| Ph2/t | Peinture à l'huile sur toile et préparation grasse | 2,10 | 54 % < HR < 58 % | Hors conditions standard |

*VII-2-4 Peintures acryliques et vinyliques*

Pour étudier ces peintures, nous nous sommes basés sur les deux modèles théoriques que nous avons déjà exploités dans le cas des peintures[4] sur papier. Ils s'apparentent, rappelons-le, aux peintures commerciales – Flashe® de Lefranc Bourgeois, acrylique de Liquitex®

4. Peinture vinylique (Flashe®) : encollage ; liant Caparol® dilué, préparation : liant Caparol® et carbonate de calcium, peinture : liant Caparol® bleu de Prusse.
Peinture acrylique (Liquitex®, acrylique Lascaux®) : encollage liant Caparol® dilué, préparation, liant Caparol® et carbonate de calcium, peinture ; liant Plextol B 500® et vert oxyde de chrome

et de Lascaux®. N'oublions pas que dans la pratique des techniques, les toiles de lin (décatie) ou de polyester doivent être encollées et préparées. Dans ces deux modèles théoriques, elles ont été encollées avec un liant Caparol® dilué et enduites d'une préparation composée de liant Caparol® et carbonate de calcium.

**Sensibilité des peintures acryliques et vinyliques sur toile de lin à l'humidité**

L'humidité variant de 10 % à 95 %, les diagrammes de sensibilité à l'humidité de ces deux peintures sont les suivants, fig. 108.

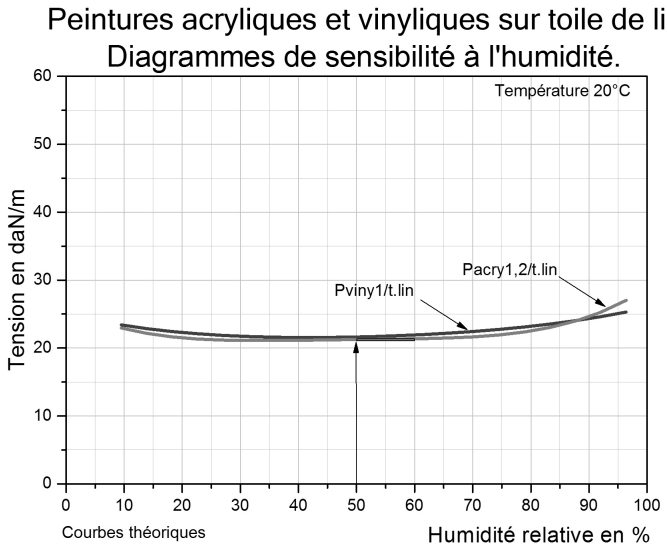



*Figure 108 : Diagrammes de sensibilité des peintures vinyliques et acryliques sur toile de polyester.*

Les deux peintures ont des comportements proches. Entre 10 % et 70 %, les tensions varient peu. Au-dessus de 70 %, la toile de lin décatie a tendance à se tendre et se manifeste surtout dans la peinture acrylique. En fait, ces résines vinyliques et acryliques de nature hydrophobes agissent en inhibant la réactivité de la toile.

En respectant les $V_{mini}t$ de ces peintures[5], 3,6 daN/m < $V_{mini}t$ < 4,5 daN/m, l'écart d'humidité relative est de 10 % à 94 % de HR pour la peinture vinylique et de 10 % à 90 % HR pour la peinture acrylique. On peut donc considérer que les variations de l'humidité ont très peu d'impact sur les dégradations mécaniques de ces peintures.

5. Liquitex® $V_{mini}t$ = 3,76 daN/m, acrylique Lascaux® $V_{mini}t$ = 4,5 daN/m, Flashe® $V_{mini}t$ = 3,6 daN/m. pour des peintures de 0,6 mm d'épaisseur.

**Sensibilité à la température des peintures acryliques et vinyliques sur toile de polyester**

Dans le cas où les peintures vinyliques et acryliques sont sur un support de toile de polyester, leur sensibilité prédominante à la température nous incite à en examiner leur comportement, fig. 109.

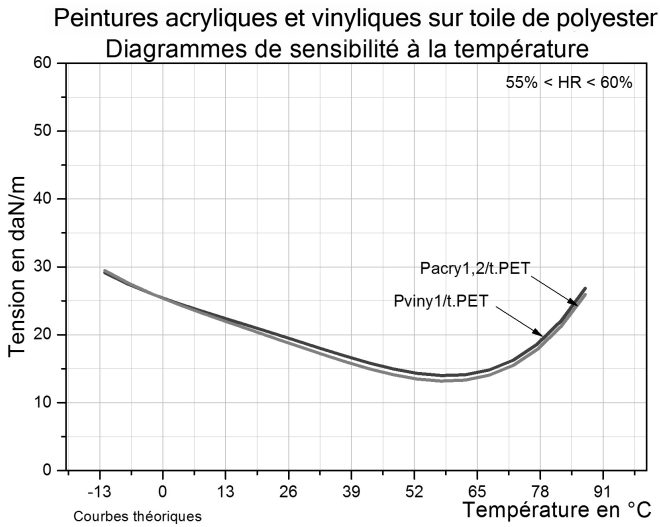



*Figure 109 : Diagrammes de sensibilité des peintures vinyliques et acryliques sur toile de polyester.*

En se basant sur les conditions standard de température 20 °C±2 °C, la variation de tension est de 0,94 daN/m pour la peinture vinylique et de 0,9 daN/m pour la peinture acrylique. Dans ces conditions de conservation, aucun risque de dégradation mécanique n'est à craindre, puisque nous sommes bien en dessous des $V_{mini}t$.

En respectant les $V_{mini}t$ respectives, les écarts de températures peuvent être pour la peinture vinylique de 10 °C à 24 °C et pour l'acrylique de 10 °C à 23 °C. Pour résumer, nous avons les conditions suivantes regroupées dans le tableau suivant :

| | Type de peinture | $V_{mini}t$ daN/m | Conditions optimales de conservation | Observations |
|---|---|---|---|---|
| Pacry1/ t.lin | Acrylique/ toile de lin décatie (Liquitex®) | 3,76 | 10 < HR < 90 | Conditions standard |
| Pacry2/ t.lin | Acrylique/ toile de lin décatie (Lascaux®) | 4,5 | 10 < HR < 95 | Conditions standard |
| Pviny1/ t.lin | Vinylique/toile de lin décatie (Flashe®) | 3,6 | 10 < HR < 95 | Conditions standard |

| | Type de peinture | $V_{mini}t$ daN/m | Conditions optimales de conservation | Observations |
|---|---|---|---|---|
| Pacry1/ t.PET | Acrylique/ toile de polyester (Liquitex®) | 3,76 | $10 < T < 23$ | Conditions standard |
| Pacry2/ t.PET | Acrylique/ toile de polyester (Lascaux®) | 4,5 | $10 < T < 23$ | Conditions standard |
| Pviny1/ t.PET | Vinylique/toile de polyester (Flashe®) | 3,6 | $10 < T < 24$ | Conditions standard |

En examinant les diagrammes de sensibilité des peintures acryliques et vinyliques sur toile et papier, on peut conclure que les peintures acryliques et les vinyliques sur toile ont une **meilleure stabilité mécanique.**

*VII-2-5 Peintures à la cire et à l'encaustique*

La technique de la peinture à la cire et à l'encaustique remonte à la nuit des temps et comprend des procédés variés que l'on retrouve dès l'Antiquité. Pline en distingue trois : deux manières de peindre à l'aide de cautérium[6] sur des supports recouverts de cire et sur ivoire et une manière de peindre à l'aide d'un pinceau, après avoir fondu la cire au feu.

Il n'y a pas moins d'une trentaine d'artistes de renommée internationale cités dans les publications qui aient utilisé la technique de la peinture à la cire ou à l'encaustique. Parmi les principaux citons : Sonia Delaunay[7], Jasper John[8], Ross Bleckner, Chris Burden, Mimmo Paladino, Hélène Lothe, Alain Balzac, Brice Marden[9], Manuel Camargo, Michel Nedjar, Philippe Cognée, Jean Baptiste Bernadet[10]. Cette

6. Cautérium ou cautère sont des spatules de fer que l'on chauffe pour faire fondre la cire et la manier. Ils prolongent l'action du pinceau. Selon leur forme, on les appelle des cestrum ou des vericulum.

7. Sonia Delaunay a appris la technique à la cire auprès du peintre mexicain Zaraqua.

8. Devenu très connu grâce à la peinture « Flag » peinte à l'encaustique en 1958. Jasper John préparait sa toile en la doublant de feuilles de magazines et de journaux, la rendant ainsi rigide. Ensuite, il la recouvrait d'une peinture à l'encaustique créant une surface dure et opaque.

9. Brice Marden, peintre américain, exploite une peinture à la cire/huile/ pigments et térébenthine sur toile dans les œuvres monumentales telles que Thira (MNAM) 1979/1980, Mur de la collection Yvon Lambert à Avignon de 1973, et Miranda de 1972.

10. J.B. Bernadet, né en 1978, vit à Bruxelles.

liste est loin d'être exhaustive mais donne une idée de l'importance de cette technique dans le domaine de la peinture.

Les principaux constituants de ces peintures sont : la cire, des résines, des essences et des huiles dans lesquels sont mélangés les pigments. Les propriétés des peintures résultant de cette technique dépendent de la composition chimique des matériaux utilisés, de leurs propriétés physiques et de leur mise en œuvre.

### Les matériaux

La diversité des techniques employées pour la peinture à la cire et à l'encaustique rend impossible une étude exhaustive des différents procédés. L'étude expérimentale, qui a permis la réalisation des diagrammes de sensibilité à l'humidité et à la température de ces peintures, se base donc sur une sélection des cinq techniques suivantes détaillées dans l'annexe A6 :

1-Cire d'abeille pure, blanchie + pigments.

2-Cire d'abeille pure, blanchie + résine élémi + pigments.

3-Cire d'abeille pure, blanchie + résine élémi + essence d'aspic + pigments.

4-Cire d'abeille pure, blanchie + huile + pigments.

5-Cire d'abeille pure, blanchie + résine élémi + huile + essence d'aspic + pigments.

### Fabrication des éprouvettes

**Pour l'étude du comportement mécanique des peintures à la cire et à l'encaustique[11] toutes les éprouvettes ont été élaborées selon le même processus :**

Toile de coton,

Encollage : colle de peau à 7 %,

Préparation : couche de cire d'abeille pure, blanchie + charge,

1re couche de peinture : cire pigment ocre jaune,

2e couche de peinture : cire pigment vert oxyde chrome.

Les éprouvettes sont conçues à partir d'une toile de coton tendue sur un bâti de travail de 90,5/90,5 cm et encollée à chaud d'une couche de colle de peau à 7 % dans l'eau appliquée au pinceau. La toile est démontée de son bâti et agrafée sur un plan de travail avec un Melinex® intercalaire, pour être ensuite enduite d'une couche de préparation de cire d'abeille blanchie pure et de carbonate de calcium. La cire est chauffée au bain-marie, appliquée à chaud au pinceau, puis cautérisée au fer. Chaque éprouvette est constituée par la superposition de deux couches de peintures issue d'une même recette, mais à base de pigments différents, ocre jaune puis vert oxyde de chrome.

11. Roche A., Doucet S., « Propriétés mécaniques des peintures à la cire et à l'encaustique », 2006.

Les peintures à base de cire d'abeille pure, de cire + élémi, et de cire + huile ont été appliquées à chaud, au pinceau, puis cautérisées au fer afin de répartir la peinture sur la surface. Notons qu'il est difficile d'obtenir un résultat homogène. En revanche, les peintures à base de cire + élémi + essence d'aspic et de cire + élémi + huile + essence d'aspic sont assez fluides pour permettre une application au pinceau. Dans ce cas, il est nécessaire d'attendre le séchage de la première couche d'ocre jaune avant de pouvoir appliquer la peinture vert oxyde de chrome.

Les diagrammes de sensibilité à l'humidité

En suivant la procédure expérimentale, on obtient les diagrammes de sensibilité suivants, fig. 110.

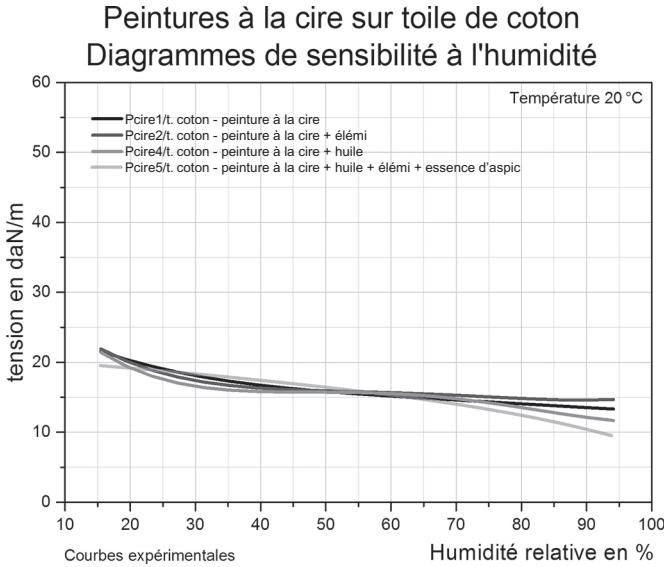



*Figure 110 : Diagrammes de sensibilité à l'humidité des peintures à la cire sur toile de coton.*

Interprétation des diagrammes

Peinture à la cire sur toile-Pcire1/t.coton : malgré une quantité de matière hydrophile non négligeable due à l'encollage (4,53 %), c'est la peinture à la cire qui impose son comportement. La variation de tension dans les conditions standards de conservation est de 0,62 daN/m. Elle est inférieure à la $V_{mini}t$ = 2,38 daN/m.

Peinture à la cire/élémi sur toile-Pcire2/t.coton : la quantité d'encollage plus réduite (3,52 %) est probablement responsable de la diminution de la sensibilité à l'eau de cette peinture. La variation de tension, dans les conditions standards de conservation, est de 0,16 daN/m. Elle est également inférieure à la $V_{mini}t$ = 1,48 daN/m.

Peinture à la cire/huile sur toile-Pcire4/t.coton : dans cette peinture où la quantité de colle est encore relativement importante (6,68 %) on perçoit son influence par la présence d'un point d'inflexion situé vers 70 %. La variation de tension aux conditions standard de conservation est nulle, car entre 35 % et 65 % la tension est constante. *($V_{mini}t$* = 0,8 daN/m)

Peinture à la cire/élémi/huile/essence sur toile-Pcire5/t.coton : cette peinture qui contient 6,37 % de colle reste relativement sensible à l'humidité. Sa variation de tension entre 50 % et 60 % est de 1,23 daN/m. Elle est légèrement supérieure à $V_{mini}t$ =1,14 daN/m, calculée à partir de la contrainte à rupture (1,42 MPa) pour une peinture d'une épaisseur de 0,8 mm.

Les diagrammes de sensibilité à la température

Ils sont regroupés dans le graphe suivant, fig. 111.

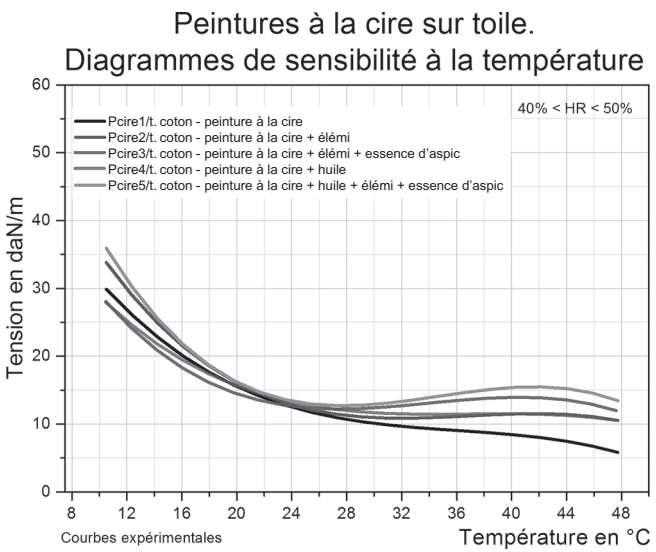



*Figure 111 : Diagramme de sensibilité des peintures à la cire sur toile de coton.*

Interprétation des diagrammes

Peinture à la cire sur toile-Pcire1/t.coton : soumise aux conditions standard de conservation c'est-à-dire 20 °C ± 2 °C, la *Vt* =3,70 daN/m. Elle est plus élevée que la $V_{mini}t$ = 2,38 daN/m. Pour conserver la $V_{mini}t$ il faut que les températures soient comprises entre 18,5 °C et 20,8 °C.

Peinture à la cire/élémi sur toile-Pcire2/t.coton : dans les conditions standard de conservation la *Vt* =4,27 daN/m pour la fourchette des

températures admises. Elle est supérieure à la $V_{mini}t$ = 1,48 daN/m. Il faut pour la respecter que 18,5 °C < T < 20,5 °C.

Peinture à la cire/élémi/essence sur toile-Pcire3/t.coton : exposée aux variations de températures admises la variation de tension dans la peinture est de $Vt$ = 2,75 daN/m. Elle est supérieure à la $V_{mini}t$. Pour minimiser les risques, les températures doivent être comprises entre 18,5 °C et 20,6 °C.

Peinture à la cire/huile sur toile-Pcire4/t.coton : dans les mêmes conditions, cette peinture, par rapport aux températures à une $Vt$ = 3,09 daN/m. Elle est supérieure à la $V_{mini}t$ = 0,8 daN/m. Pour la respecter il faut que la température reste 18,5 °C < T < 21 °C.

Peinture à la cire/élémi/huile/essence sur toile-Pcire5/t.coton : dans les mêmes conditions de conservation la $Vt$ = 4,14 daN/m. Elle est très supérieure à la $V_{mini}t$ = 1,14 daN/m. Si on doit conserver cette peinture sans prendre de risque, les variations de température admises sont de 19 °C ± 0,5°C.

Les conditions de conservation des peintures à la cire et à l'encaustique sont regroupées dans le tableau suivant :

| | Type de peinture | $V_{mini}t$ daN/m | Conditions optimales de conservation | Observations |
|---|---|---|---|---|
| Pcire1/ t.coton | Cire/pigments | 2,38 | 30 % < HR < 75 % 18,5 °C < T < 20,8 °C | Conditions standard en HR Hors conditions standard en T |
| Pcire2/ t.coton | Cire/élémi/ pigments | 1,48 | 30 % < HR < 75 % 18,5 °C < T < 20,5 °C | Conditions standard en HR Hors conditions standard en T |
| Pcire3/ t.coton | Cire/élémi/ ess.aspic/ pigments | 1,48 | 18,5 °C < T < 20,6 °C | Conditions standard en HR Hors conditions standard en T |
| Pcire4/ t.coton | Cire/huile/ pigments. | 0,8 | 30 % < HR < 75 % 18,5 °C < T < 21 °C | Conditions standard en HR Hors conditions standard en T |
| Pcire5/ t.coton | Cire/élémi/ huile/ess; aspic/ pigments | 1,14 | 30 % < HR < 75 % 18,5 °C < T < 19,5 °C | Conditions standard en HR Hors conditions standard en T |

Les résultats montrent que les peintures à la cire supportent bien les variations d'humidité relative. En revanche, ces peintures sont sensibles aux variations de température. Les écarts recommandés pour

la conservation de ces peintures sont inférieurs à 20 °C ± 2 °C et la régulation de la température devra faire l'objet de soins particuliers.

## VII-3 Vers de nouvelles perspectives

On a abordé dans cette partie de l'ouvrage un bon nombre de techniques utilisées par les artistes de ces cents dernières années. Sur un total de 31 techniques présentées, un peu plus de la moitié, 51,4 %, sont capables de résister, sans risque de dégradations mécaniques, aux recommandations climatiques recommandées par l'ICOM pour les musées. Les autres, 48,4 %, étant des techniques plus sensibles, sont susceptibles de se dégrader dans les mêmes conditions de conservation.

Une petite enquête[12], que nous avons menée sur 10 salles d'un musée d'art moderne où l'accrochage a été récemment revu, nous a révélé la répartition suivante des techniques :

– 67 % des œuvres sont des huiles/toile,
– 10 % sont des œuvres graphiques sur papier,
– 8,2 % sont des huiles sur carton,
– 9,2 % sont des gouaches et détrempes sur papier,
– 5,6 % sont des techniques mixtes sur différents supports.

Le responsable d'une collection contenant des œuvres aux techniques picturales aussi variées que celles que nous avons observées, est confronté à une problématique complexe. En termes de conservation, curieusement seuls 23 %[13] des œuvres supportent bien les conditions climatiques de conservation recommandées dans les musées. Les autres sont susceptibles de se dégrader plus ou moins rapidement, allant des risques mineurs à des risques majeurs, comme nous l'avons vu précédemment. Le résultat de cette enquête, bien que ponctuels, est très significatif.

Habituellement, quand les conservateurs de musées, les commissaires d'exposition, les historiens de l'art et les collectionneurs, organisent une exposition, ils alimentent la réflexion et enrichissent incontestablement l'histoire de l'art mais ils prennent également des risques qu'ils n'ont peut-être pas pu évaluer au niveau de la conservation des œuvres.

Actuellement, où l'itinérance des œuvres, des expositions et même des collections est le « maître mot », les responsables devraient être

12. Enquête personnelle faite en 2014 au Musée Nationale d'Art Moderne, Paris.

13. Par rapport aux sensibilités à l'humidité et à la température que nous avons établies.

plus attentifs aux interrogations qui se posent sur la conservation. Il n'y a qu'à tendre l'oreille, ou participer à des journées d'étude comme celle qui a eu lieu à Marseille en 2015 « Circulation des collections : risquer pour exister ? » pour regarder la réalité en face.

Cette attitude vis-à-vis des œuvres nous amène à considérer un second paradoxe que l'on pourrait énoncer de la manière suivante : l'œuvre d'art en tant que vecteur culturel immatériel est constituée d'une entité matérielle. L'immatérialité du vecteur culturel et sa fonction sont-ils compatibles avec la matérialité des œuvres ? Là est la question. Cette réflexion est à mettre en parallèle avec le premier paradoxe, la durée de vie des œuvres est-elle compatible avec la pérennité ?

Toutes ces questions se sont déjà posées et ont fait l'objet de nombreux débats, de polémiques, et d'impasses. À vrai dire, elles pourraient nous inciter plutôt à imaginer un nouveau type de présentation des œuvres où la « matérialité » deviendrait le pôle d'attraction. Ne pourrait-on pas envisager un musée du futur où seule la conservation des œuvres serait prise en compte ? Revu sous cette forme, le rapport de l'œuvre à la muséologie serait totalement bouleversé. Cette configuration d'exposition pourrait avoir un caractère pédagogique et ludique. On pourrait s'inspirer, pour démontrer le bien-fondé de ce parti, de la muséologie scientifique et expérimentale qui traite des matériaux. Quel serait le profil du musée ?

Les œuvres pourraient être regroupées par affinité climatique dans des salles closes où les conditions de conservation seraient totalement adaptées et maîtrisées. L'accès entre chaque salle se ferait par l'intermédiaire d'un sas. Pour se conditionner correctement, le public y séjournerait un certain moment avant de pénétrer dans la salle suivante. D'ailleurs, cette idée n'est pas nouvelle puisqu'à Padoue, en Italie, pour entrer dans la chapelle des Scrovegni, le passage dans un sas est obligatoire.

Il faut interdire les groupes importants pour supprimer l'afflux massif de visiteurs devant des œuvres et éviter ainsi les brutales variations d'humidité et de température (§ II-2-6). Il faut également limiter le nombre de personnes dans chaque salle et organiser un circuit qui permette une circulation fluide du public. La limitation du nombre de visiteurs et la régularisation des flux a pour avantage d'améliorer la protection des œuvres et d'apporter un plus grand confort du point de vue de la visibilité des œuvres pour le public.

Certaines œuvres de petites dimensions tels que les documents graphiques et les photos pourraient être exposés dans des vitrines conditionnées ou climatisées. Les sculptures qui en général ont moins d'exigences climatiques pourraient être présentées indifféremment dans les salles. Visualisons un petit pré projet, fig. 112.

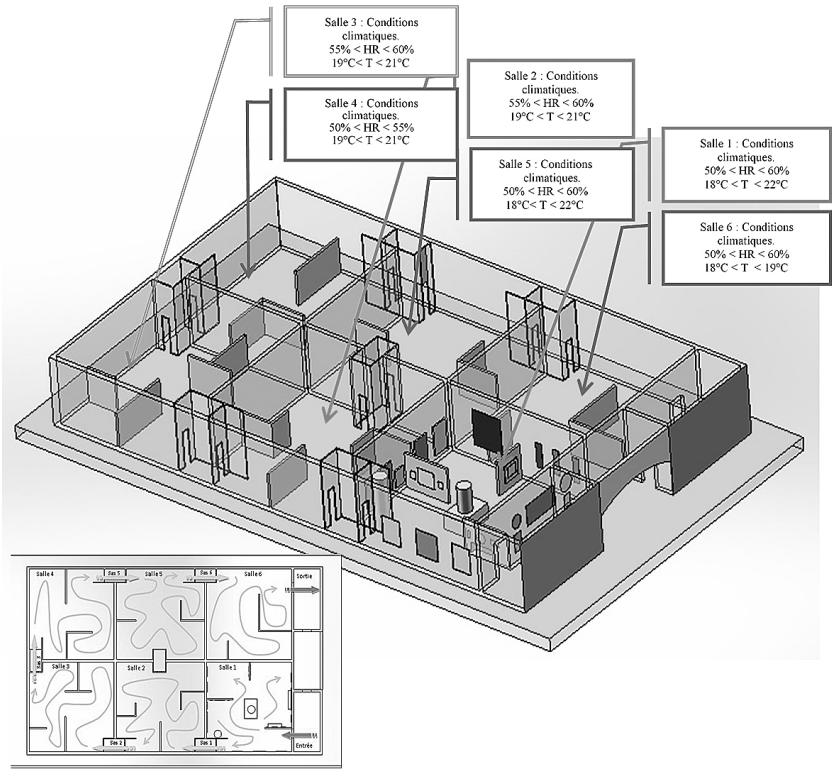



*Figure 112 : Préfiguration du musée idéal pour la conservation des œuvres.*

L'accès des salles du musée se ferait par l'intermédiaire d'un hall d'accueil qui desservirait à gauche un sas de conditionnement avant de pénétrer dans la première salle. Dans la salle 1, les conditions climatiques seraient réglées selon les recommandations des musées ($55 \pm 5$ %HR et $20 \pm 2$ °C). On pourrait y exposer toutes les œuvres qui supportent ces conditions. Pour entrer dans la salle 2, on passerait par un sas de conditionnement dans lequel on demeurerait un certain temps. Les conditions climatiques de cette nouvelle salle seraient modulées par rapport à la première ($57{,}5 \pm 2{,}5$ %HR et $20 \pm 1$ °C). La salle 3 présenterait les mêmes conditions climatiques. La salle 4 serait régulée de manière à avoir le climat suivant $52{,}5 \pm 5$ %HR et $20 \pm 1$ °C. Enfin le climat des salles 4 et 5 répondrait aux conditions normatives. La visite s'achèverait dans le hall d'accueil. Bien entendu, le choix des conditions climatiques dépend de la nature des œuvres à exposer et de la composition de la collection.

Dans tous les cas de figure, l'accès de chaque salle doit se faire par le biais d'un sas de conditionnement. La diversité des climats modulables

permettra d'exposer n'importe quel type de peintures. Dans les différentes salles on pourra également y introduire des sculptures et des vitrines conditionnées. Cependant, il faudra éviter de surcharger les salles en œuvres pour deux raisons. L'apport de matériaux hygroscopiques modifie le comportement hydrique de la salle, de ce fait la gestion du climat est plus complexe et les visites sont moins confortables.

Pour faciliter le brassage de l'air nécessaire à une bonne gestion du climat, il faudra que les aménagements des salles soient simples. Les cimaises ne devront pas se refermer sur elles-mêmes, et il serait recommandé de les rehausser de manière à laisser l'air passer en dessous. La distribution des espaces doit faciliter le flux des visiteurs tout en l'orientant vers le sas et la sortie de la salle.

Même si ce type de projet peut sembler utopique, il ne faut pas oublier que la stabilité climatique est le moyen le plus sûr d'obtenir une bonne conservation des œuvres modernes et contemporaines et de maîtriser les risques de dégradations des peintures.

Cependant, ces établissements ne sont pas à l'abri de problèmes techniques, de dérives de consignes, de pannes des centrales de traitement de l'air, du vieillissement des installations, d'un manque de vigilance des services techniques ou de maintenance. Le moindre de ces dysfonctionnements est responsable d'une instabilité du climat. En revanche, pour satisfaire les prêts d'expositions, les dépôts d'œuvres dans des musées ou établissements publics, l'acheminement aux réserves et aux ateliers externalisés, les œuvres sont amenées à se déplacer fréquemment. Pendant cette période, elles échappent à tout contrôle climatique et physique.

Actuellement, avec les moyens d'interconnexions existants, nous pouvons équiper les œuvres de mini-thermo hygromètres électroniques enregistreurs et émetteur[14]. Ce système de connexion permet de récupérer à n'importe quel moment les données climatiques de l'environnement des œuvres. En les analysant grâce aux outils développés dans ce livre – diagrammes de sensibilité, fonctions polynomiales, $V_{mini}t$ –, on est capable d'évaluer en temps réel les risques de dégradations mécaniques des œuvres. Le contrôle des vibrations et des chocs peut se faire également par l'intermédiaire de mini-accéléromètres programmables.

Aujourd'hui nous sommes en mesure de rattraper le retard technique et technologique que nous avons pris dans le domaine de la conservation du patrimoine culturel, si on nous en donne les moyens.

14. Système RFID-NFC.

VIII

# Solutions alternatives

Si on ne peut pas s'affranchir complètement des contraintes climatiques pour diverses raisons, il existe des solutions alternatives. Certaines d'entre elles sont présentées dans ce chapitre en faisant la part des avantages et des inconvénients. Ces solutions sont ponctuelles, puisqu'elles consistent à intervenir sur l'œuvre elle-même. Toute intervention sur une œuvre doit être exécutée par un spécialiste de la restauration, qui respectera le code déontologique de la profession. Cette démarche en conservation préventive est différente de celle qui consiste à stabiliser l'environnement climatique d'un ensemble d'œuvres. Cette préoccupation de préserver l'intégrité des œuvres peintes est bien antérieure à la mise en place des principes de la conservation préventive qui a vu le jour dans les années 1970.

Il existe donc des moyens assez simples capables de jouer un rôle de protection contre les effets climatiques instables. Nous pouvons les classer en deux catégories :

– Les systèmes qui réduisent les variations de l'humidité et la température : dos protecteurs, cadres caissons, vitrines,
– Les systèmes qui agissent sur la tension des peintures.

## VIII-1 Dos protecteurs

Par définition un dos protecteur est utilisé pour son rôle de protection physique. Ils sont apparus à la fin du XV^e^ siècle en Vénétie et au XVI^e^ siècle en Flandres en tant que panneaux de bois encastrés dans le châssis au revers de la peinture. Apparemment, les toiles tendues sur le châssis ou doublage aveugle sont plus tardifs.

Qu'il s'agisse d'une plaque rigide ou d'un textile fixé au dos de la peinture, ces dos protecteurs la protègent avant tout des impacts et des chocs sur le revers et la face et réduisent les vibrations de la toile. De ce point de vue, leur efficacité a été vivement reconnue. On prétend

même que ces protections sont en mesure de ralentir le vieillissement des toiles de fibres naturelles[1].

La question de la régulation climatique des dos aux revers des peintures s'est posée à partir des années 1970. Elle a été à l'origine de multiples propositions, à la fois dans le choix des matériaux et dans la conception du dos. C'est ainsi que deux tendances se sont affrontées : les partisans des dos hermétiques et les adeptes des dos ouverts.

L'usage des dos protecteurs a été l'occasion pour les peintres et les restaurateurs d'expérimenter au cours du temps un certain nombre de matériaux rigides et textiles[2]. À partir des années 1980 de nouveaux matériaux sont apparus[3] et ont commencé à faire l'objet d'études plus approfondies. Une enquête a été menée dans le cadre universitaire[4] sur un échantillon de restaurateurs français pour évaluer les matériaux les plus utilisés dans la conception des dos protecteurs. Entre la plaque cannelée de polycarbonate, la toile de polyester, le sailcloth, le nontissé de polyester et le carton plume appelé aussi carton mousse, il en ressort que c'est la plaque de polycarbonate et la toile de polyester qui sont les plus utilisées. Ces résultats s'accordent avec l'expérience que nous avons eue dans le cadre des ateliers de restaurations des Musées de France. L'usage du carton mousse est moins fréquent et se limite à des protections temporaires.

### *VIII-1-1 Mise à l'épreuve de deux types de dos protecteurs*

#### Dispositif

Au sein de notre laboratoire, nous avons ressenti la nécessité de tester l'efficacité des dos protecteurs. En tant que restaurateur des musées de France, nous avions acquis une excellente expérience de l'utilisation de ces dos protecteurs. Dans cet esprit nous avons sélectionné deux types de dos protecteurs rigides : plaque de polycarbonate cannelée et carton plume.

Nous avons posé au dos d'une peinture à l'huile sur toile tendue sur châssis, signée Marien titrée Angelo, datée 1971, aux dimensions de 44,5/26 cm, une protection en carton mousse standard[5] avec une âme de polyéthylène de 5 mm. Elle est vissée sur les montants du châssis.

1. Hackney S., « The Causes of Deterioration of Paintings and their Supports and Preventive Conservation without Lining », 1989.

2. Achternkamp P., « Der Rückseitenschutz von Gemälden : Historische und zeitgenössiche Praxis », 1991.

3. Nicolaus K., « Manuel de restauration des tableaux », 1999.

4. Thomas Biney, « La protection climatique en question », 2004.

5. Réf. Stouls FDFCORO503.

Un enregistreur thermo hygrométrique Testo 174 est introduit entre la protection et la toile, fig. 113.

Au dos d'une seconde peinture à l'huile sur toile signée Emilio Torres, titrée Don Quichotte, datée 1969 aux dimensions de 55,5/47 cm, nous avons vissé une plaque de polycarbonate[6] alvéolaire transparent double paroi traité UV d'une épaisseur de 5 mm. Un enregistreur Testo 174 est également glissé entre la protection et la toile, fig. 114. Ces deux opérations ont été faites dans les règles de l'art, selon les prescriptions en vigueur dans les ateliers de restauration des musées.

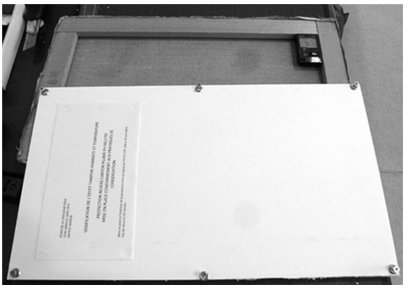


*Figure 113 : Montage d'une protection de carton mousse au dos d'une peinture à l'huile avec un enregistreur.*

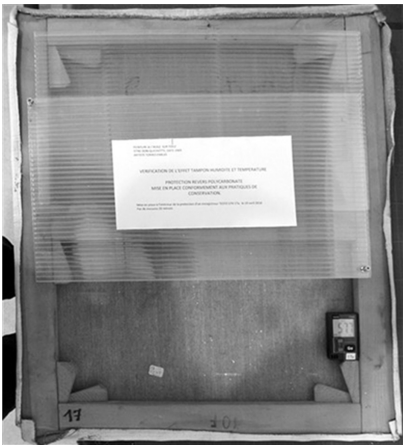


*Figure 114 : Montage d'une protection de polycarbonate au dos d'une peinture à l'huile avec un enregistreur*

Un thermo hygromètre Testo 174 a enregistré le climat de la pièce où les peintures étaient entreposées[7]. Les enregistreurs calibrés ont été paramétrés pour faire une mesure de température et d'hygrométrie toutes les 20 minutes.

L'étude a débuté le 19 avril pour se terminer le 8 septembre 2014, soit une période d'enregistrement de 6 mois.

**Résultats**

Les enregistrements des températures et humidités relatives des deux dos protecteurs et du climat extérieur sont présentés sous forme

6. Lexan Makrolon®. Densité 1,2 résistance au feu M2.

7. Ces données climatiques nous serviront dans l'étude des châssis à tension auto-régulée.

de courbes. Le graphe de la fig. 115 présente les variations de température à l'extérieur et entre les dos protecteurs.

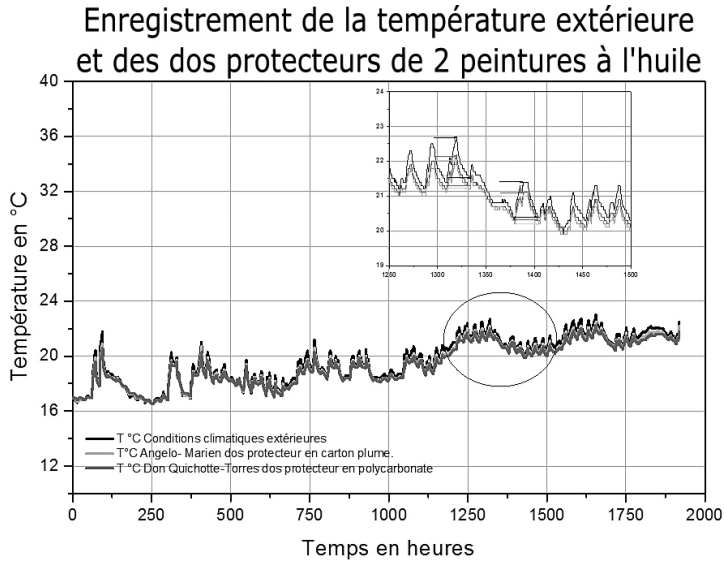



*Figure 115 : Enregistrement de la température extérieure et des 2 dos protecteurs.*

À première vue, les 3 courbes se superposent. Cependant, leur analyse sur 250 h (1 250 h, 1 500 h) d'enregistrement a permis de calculer en partant des températures extérieures le taux d'amortissement[8] des variations de température. Il est d'environ 20 % à 25 % pour les deux types de protection. On pourrait conclure que leur isolation thermique est médiocre, mais en réalité une importante partie du transfert de chaleur se faisant par la face peinte justifie ces résultats.

Le graphe de la fig. 116 représente cette fois-ci les variations d'humidité à l'extérieur et entre les 2 dos protecteurs. Le même mode de calcul a été appliqué pour calculer le taux d'amortissement de l'humidité par les deux dos protecteurs pendant cette même période.

L'amortissement des variations d'humidité varie selon le type de protection. Il est d'environ 16,5 % pour la protection du revers constituée d'un carton mousse et de 90 % à 95 % pour la protection de polycarbonate.

Autrement dit, on peut considérer que la régulation de l'humidité relative par une protection de carton mousse est mauvaise. En

8. $T_{amortissement} = 100 - \left(\frac{\Delta\theta_{protection}}{\Delta\theta_{extérieur}} \times 100\right)$

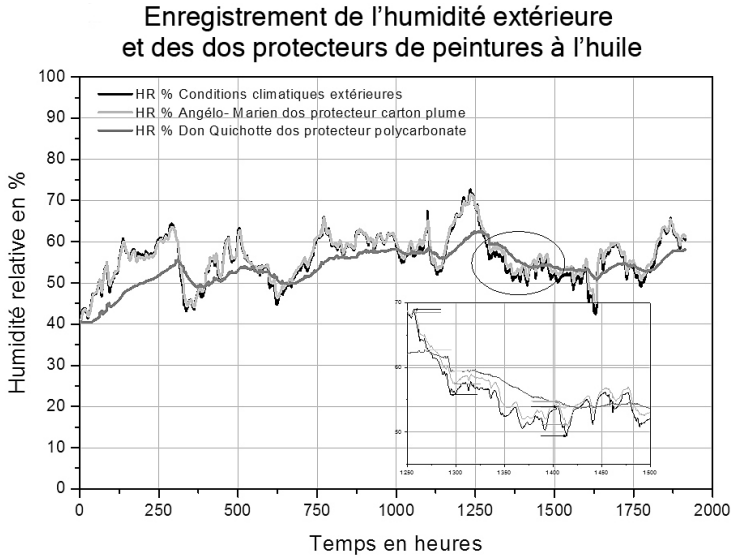



*Figure 116 : Enregistrement de l'humidité extérieure et des 2 dos protecteurs.*

revanche, dans le cas du dos protecteur de polycarbonate, la teneur en eau de la lame d'air emprisonnée entre la toile et la protection, varie de manière à maintenir une humidité relative plus stable et permet d'amortir les chocs hydriques. Cette variation est régie par des phénomènes d'absorption et de désorption d'eau au niveau des matériaux hydrophiles.

La protection de polycarbonate est opérante, seulement au niveau des échanges hydriques. La protection de carton mousse est inefficace aussi bien en terme d'amortissement de la température que de l'humidité.

La différence de comportement entre ces deux protections est très importante. Du point de vue climatique, le dos protecteur en polycarbonate est sans contestation[9] beaucoup plus efficace que le dos protecteur en carton mousse.

9. Les enregistrements ont été menés sur deux périodes, avril/septembre 2014 et du 26 sept2014/15 janvier 2015. Pendant ces deux périodes le comportement des protections est le même.

*VIII-1-2 Évaluation de l'efficacité d'un dos protecteur de polycarbonate*

Pour évaluer l'efficacité des dos protecteurs nous nous sommes servi des outils que nous avons développés, la $V_{mini}t$ et les diagrammes de sensibilité. Puisque les deux peintures sont à l'huile sur des préparations maigres, la fonction polynomiale est la suivante ;

$$Y = 38{,}69 + 0{,}425X - 0{,}01463X^2 + 6{,}6344E^{-5}X_3 - 1{,}948E^{-20}X^4 \qquad (39)$$

Nous avons calculé les variations de tension dans le cas où l'œuvre n'a pas de protection au revers et le cas où l'œuvre est protégée au revers par un dos de polycarbonate, fig. 117.

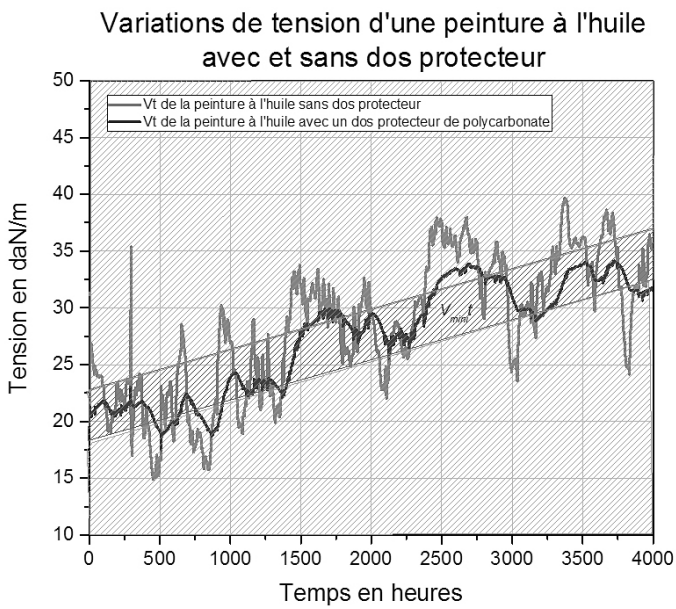



*Figure 117 : Variations de tension d'une peinture non protégée et protégée.*

Dans ce graphe la valeur de $V_{mini}t$ = 4,8 daN/m est délimitée par la zone plus foncée. Les variations de tension de la peinture sans dos dépassent largement cette valeur. La peinture est en danger. Une fois la peinture protégée par un revers de polycarbonate, les variations de tension de la peinture sont réduites de telle sorte qu'elles sont pratiquement toutes circonscrites entre les valeurs de la $V_{mini}t$.

Sans protection, la peinture conditionnée dans un climat instable est fortement sollicitée et les risques de dégradation mécaniques sont importants. Cette même peinture, lorsqu'elle est protégée par un dos de polycarbonate cannelé est préservée des chocs mécaniques et les variations de tension sont amorties. Comme cette protection n'offre pas une bonne isolation thermique, son efficacité est limitée. Les variations de tension, même si elles sont circonscrites, existent et les risques de dégradations mécaniques ne sont pas totalement écartés.

La pose d'une protection de polycarbonate ne nécessite aucune intervention de traitement ou de collage sur l'œuvre, mais le montage doit être effectué par un restaurateur spécialisé. Cet exemple d'intervention alternative montre qu'il existe des solutions simples fig. 118.

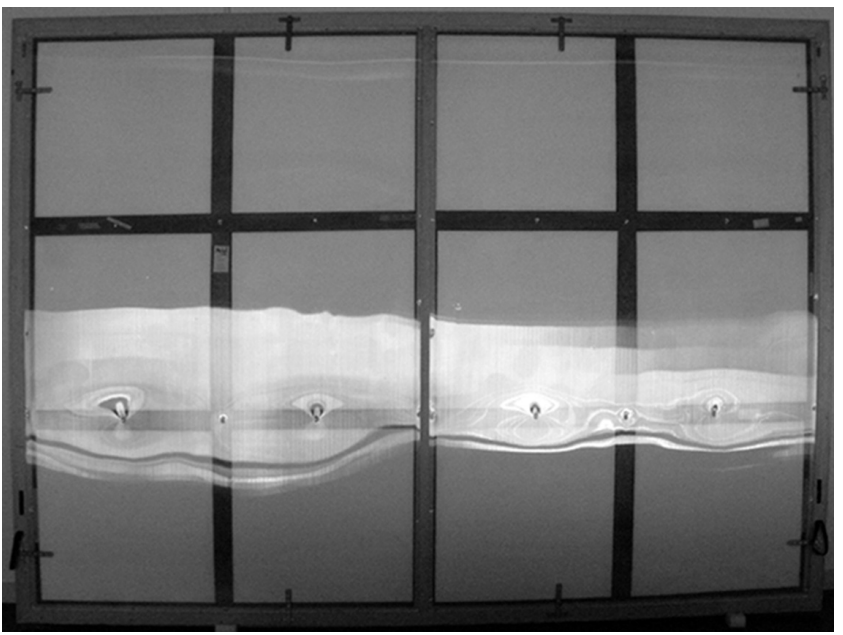


*Figure 118 : Dos protecteur de polycarbonate au revers d'une peinture de Miro*

## VIII-2 Châssis à tension auto-régulée

Une autre proposition d'intervention alternative consiste à tendre les peintures sur toile sur des châssis à tension auto-régulée. Nous allons voir que cette solution permet de limiter efficacement les variations de tension et par conséquent les risques de dégradations mécaniques.

*VIII-2-1 Principe*

L'étude des interactions entre la peinture et le châssis fait intervenir des équations déjà développées. 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. Les châssis capables de réguler les tensions et de les maintenir à un seuil inférieur à la variation minimale de tension de la couche picturale, s'appellent des châssis à tension auto-régulée. 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 c'est la peinture qui impose son comportement, quelles que soient les circonstances climatiques. Dans ces conditions, cette variation de déformation limite l'amplitude des contraintes internes et les maintient à une valeur peu différente de la tension initiale. Ces châssis ont pour but de limiter le développement des craquelures et du réseau de craquelures.

D'une manière générale, les dispositifs de régulation de tension se composent d'un châssis et un système élastique qui relie la peinture au châssis. Lorsque l'humidité a une valeur constante, il s'établit un équilibre entre la tension de la peinture et la force exercée par le système élastique. Si l'HR vient à chuter, la peinture va avoir tendance à se rétracter et le système élastique va suivre la déformation en maintenant la tension préalable. Maintenant si l'humidité s'élève brutalement, la peinture va se relâcher et le système élastique réagira en se contractant tout en maintenant la même tension dans la peinture.

*VIII-2-2 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 :

$$t^{cte}_{peinture} = E(HR,T) \times e^{cte} \times \varepsilon(HR,T) \qquad (40)$$

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

$$\varepsilon(HR,T) = \frac{l_{(0)} - l_{(HR,T)}}{l_{(0)}} = \frac{\Delta l_{peinture}}{l} \quad (41)$$

La déformation élastique du système est caractérisée par :

$$\Delta l_{système\ élastique} = \Delta l_{peinture} \quad (42)$$

Si nous remplaçons dans l'équation (40), $\epsilon$ *(HR, T)* par la déformation du système élastique :

$$t^{cte}_{peinture} = E(HR,T) \times e^{cte} \times \frac{\Delta_{système\ élastique}}{l} (43)$$

la tension dans la peinture est constante.

Le système peut être représenté par le schéma suivant, fig. 119.

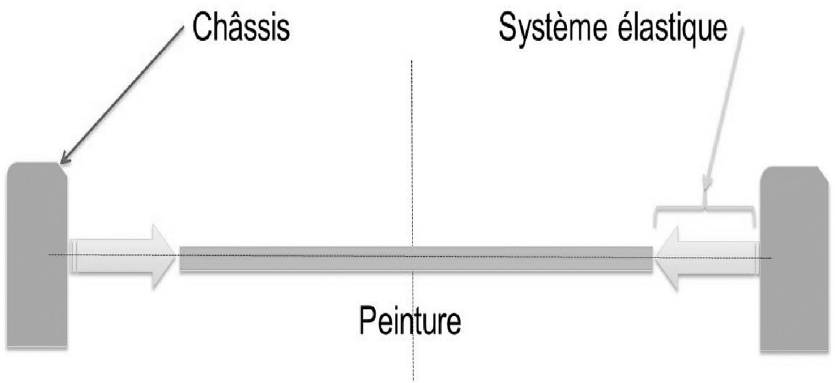


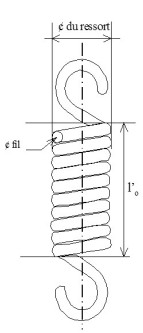

*Figure 119 : Représentation schématique d'un système de régulation des tensions.*

*VIII-2-3 Systèmes élastiques*

Il existe actuellement deux types de système élastique fiable qui équipent les châssis : les ressorts à spirales et les ressorts à lame.

*Châssis à ressorts à spirales*

Le système d'autorégulation du châssis est assuré par des ressorts à spirales de traction, fig. 120.



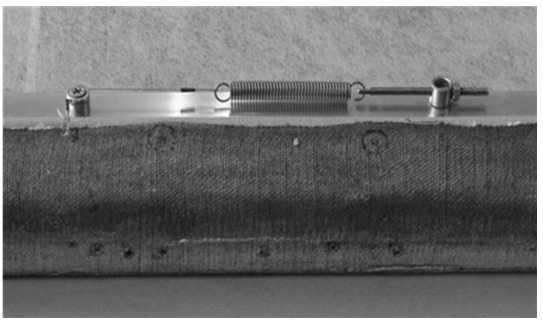



*Figure 120 : Ressort à spirales : système EQUILIBRARTE*[10]

10. Brevet n° 0001333872.

*Élasticité d'un ressort à spirales ($E_{essort}$)*

La force des ressorts à spirales s'exprime par la relation suivante : $F_r = n(L)[F_0 + (K \times \Delta l_{ress})]$ (44)

*n(L)* est le nombre de ressorts à spirales – il dépend de la longueur *(L)* où s'exercent la force et des propriétés du ressort. $F_0$ est la force minimum pour décoller les spires. Soumis à une force, le ressort se déforme d'une valeur qui s'exprime comme un allongement *($\Delta l_{res}$)*. La raideur $K$ du ressort caractérise la résistance à la déformation du ressort. La force est proportionnelle à la raideur du ressort et à sa déformation.

*Forces et déformations mises en jeux dans ce système*

À l'équilibre, les forces entre la peinture et le ressort sont égales $F_{peinture}(HR,T) = F_r$ (45)

La variation dimensionnelle du système élastique (ressort) s'exprime par la relation suivante :

$$\Delta_{système\ élastique} = \Delta l_{ressort} \qquad (46)$$

Par conséquent, la force des ressorts est :

$$F_r = n(L)[F_0 + (K \times \Delta_{syst.\ élast})] \qquad (47)$$

La force dans la peinture s'exprime en fonction du système élastique par l'expression suivante :

$$F_p(HR,T) = E(HR,T) \times \frac{\Delta_{syst\ élast}}{l} \times e \times L \qquad (48)$$

*Châssis à ressorts à lame* métallique

Le système régulation des tensions du châssis est assuré par un ensemble de ressorts à lame métallique, fig. 121.

*L : longueur de la lame*
*l : largeur de la lame*
*e : épaisseur de la lame*
*$E_{lame}$ : module d'élasticité de la lame.*
*$F_l$ : Force pour déformer la lame*
*$\delta_{lame}$ : déformée de la lame*

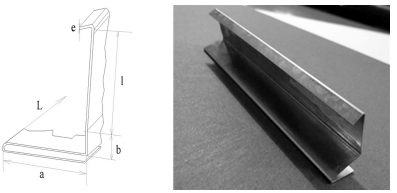



*Figure 121 : Ressort à lame système STAR[11].*

*Élasticité d'un ressort à lame ($E_{lame}$)*

11. Système breveté : n° 90 12 175 INPI.

La lame peut être assimilée à une poutre encastrée à une extrémité et soumise à une force $(F_l)$ à l'autre extrémité. Dans ces conditions la déformée $(\Delta_{lame})$ de l'extrémité libre de la lame est :

$$\Delta_{lame} = \frac{F_l \times l^3}{3E_r I_y} \qquad (49)$$

Le moment quadratique $(I)$ d'une section rectangulaire est donné par l'expression :

$$I = \frac{L \times e^3}{12} \qquad (50)$$

La déformée devient :

$$\Delta_{lame} = \frac{4F_l \times l^3}{E_{lame} \times L \times e^3} \qquad (51)$$

Le déplacement du point commun qui relie la peinture à la lame s'exprime par la relation :

$$\Delta_{syst.élast.} = \Delta_{lame} \qquad (52)$$

*Forces et déformations mises en jeux dans ce système*

Considérons que la peinture impose son comportement au ressort à lame. Comme dans le cas précédent, la déformée de la lame dépend de la force imposée. La peinture agit sur la lame qui se déforme en opposant une certaine force.

$$F_l = E_{lame} \times \Delta_{syst.\ élast} \times \left(\frac{e_r^3}{4l^3}\right) \times L \qquad (53)$$

La force dans la peinture $(F_p)$ en fonction du système élastique est toujours exprimée par l'équation (48).

*VIII-2-4 Comparaison du comportement des deux types de châssis avec un châssis standard*

Une même peinture à l'huile sur toile a été tendue sur le cadre extensiométrique (§III-1-1), transformé :

- en châssis standard,
- en châssis à tension auto-régulée à ressorts à spirales (Equilibrarte),
- en châssis à tension auto-régulée à lame (STAR).

Nous avons mesuré dans les trois cas de la configuration du cadre les variations de tension de la peinture soumise à un changement progressif d'humidité relative, fig. 122.

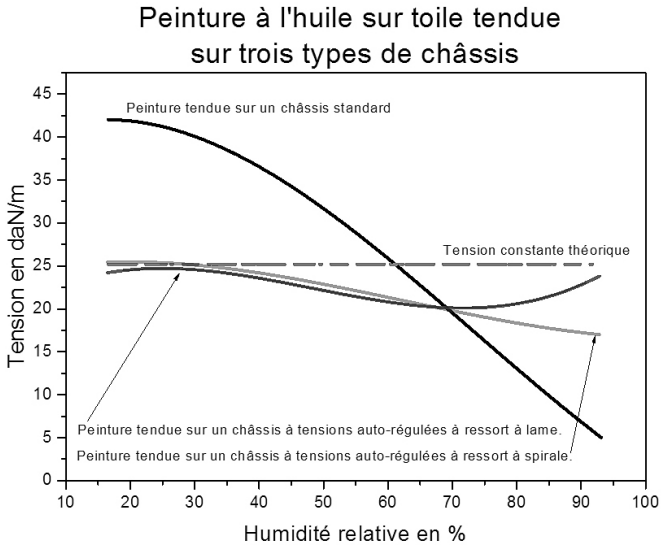



*Figure 122 : Variations de tension d'une peinture à l'huile tendue sur 3 types de châssis.*

### *VIII-2-5 Analyses et interprétation des résultats*

#### Châssis standard

Les tensions de la peinture à l'huile sur toile tendue sur un châssis fixe (châssis à renfort d'angle, à clefs) varient dans des conditions extrêmes de 42 daN/m à 16,6 % HR à 6 daN/m à 93 %. Par rapport à une tension moyenne de 25,1 daN/m – tension normale appliquée pour tendre une toile ou peinture sur châssis à 55 % – la tension varie de ± 18 daN/m. À faible humidité, les surtensions atteignent 17,2 daN/m, alors qu'à forte humidité la peinture se détend, elle se trouve à peine tendue, elle flotte (effet drapeau) et elle est beaucoup plus sensible au fluage.

En se plaçant dans des conditions de conservation standard, la peinture à l'huile subit une variation de tension d'environ $Vt$ = 6,25 daN/m, elle est un peu plus élevée que la $V_{mini}t$ = 4,8 daN/m. Cependant ces variations de tension qui peuvent, dans le meilleur des cas, 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, comme nous l'avons montré.

#### Châssis à tension auto-régulée

Tendue sur un châssis équipé d'un des deux dispositifs d'auto-régulation (ressort à spirales ou ressort à lames), les variations de

tensions de cette même peinture sont considérablement réduites. Dans les conditions de conservation dites « normales » entre 50 et 60 % HR, la *Vt* = 1,4 daN/m. **La diminution de ces variations de tension d'un facteur d'environ 4,4 par rapport au châssis fixe**. La valeur de *Vt* est si faible qu'elle devient négligeable. De plus la variation de tension qui est comprise pour les deux modèles entre 22,1daN/m et 21 daN/m, a une valeur toujours inférieure à la tension initiale, alors que ce n'est pas le cas avec le châssis fixe. Ces deux caractéristiques diminuent fortement les risques de rupture du film de peinture. **L'étude démontre que pour des conditions standard de conservation, ces deux types de châssis à tension auto-régulée sont très efficaces.**

Entre 17 et 70 % HR le comportement des deux systèmes est pratiquement le même. La tension décroît légèrement et régulièrement. Seul un petit décalage de 0,625 daN/m sépare les courbes jusqu'à 60 % HR. Par rapport aux tensions constantes attendues par la théorie, les tensions des deux modèles d'autorégulation décroissent. Cependant, le plus grand intérêt que présentent ces deux dispositifs est d'empêcher, aux très faibles humidités, que les tensions ne dépassent la tension initiale. **Ces deux systèmes suppriment ainsi toute surtension dans la peinture.**

À 70 % HR les trois courbes se croisent en un point d'intersection situé à une tension de 19,8 daN/m.

Après 70 % HR les deux dispositifs d'autorégulation ont des comportements différents. Au-delà de cette humidité la peinture est dans un état de relaxation. Son module diminue rapidement et la peinture a tendance à se détendre. C'est à ce moment que le rôle des ressorts s'inverse. Avant ce point, ils s'opposent aux tensions de la peinture en se déformant. Après ce point en se raidissant, ils « tirent » sur la peinture de façon à lui assurer une certaine tension. Dans la conception des deux dispositifs, nous voyons que la lame ressort est plus efficace, puisque la tension atteint un minimum de 19,8 daN/m à 70 % HR et ne s'éloigne que de 5,3 daN/m de la tension constante idéale. Après ce point la lame ressort réagit pour retendre la peinture et atteindre une valeur inférieure de 0,43 daN/m par rapport à la valeur de la tension constante théorique. En ce qui concerne le ressort à spirales, la tension continue de décroître jusqu'à 16,5 daN/m, c'est-à-dire un écart maximum avec la tension constante idéale de 8,62 daN/m.

Pour évaluer l'efficacité des châssis à tension autorégulée, nous avons soumis les trois cas de configurations de la peinture à l'huile aux mêmes données climatiques enregistrées lors de l'étude des dos protecteurs §VIII-1-1 et §VIII-1-2. Pour analyser les résultats, nous avons utilisé les mêmes outils que précédemment afin d'avoir des éléments de comparaison. fig. 123.

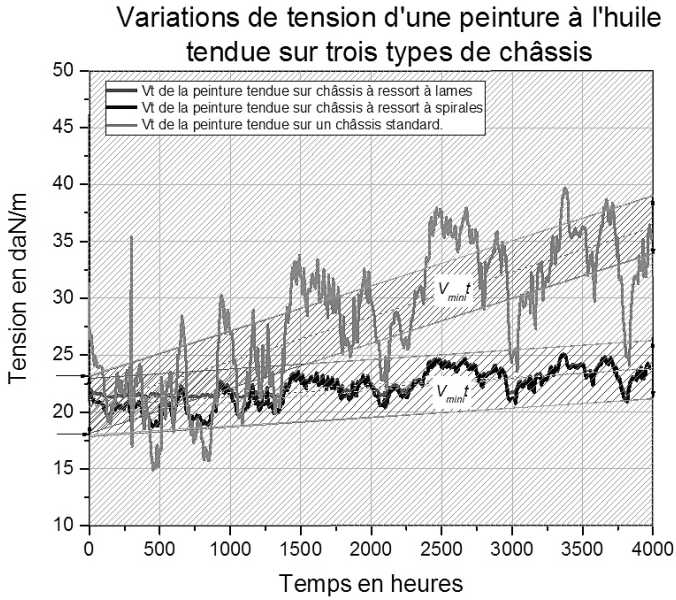



*Figure 123 :* Vt *d'une peinture à l'huile sur 3 types de châssis soumise à un climat instable*

La peinture tendue sur le châssis standard a des variations de tension bien supérieures à la $V_{mini}t$. Par ailleurs, nous constatons que les variations de tension des peintures à l'huile tendues sur les deux châssis à tension auto-régulée sont parfaitement circonscrites dans les limites de la variation minimale de tension. **Il n'est pas difficile de conclure que les châssis à tension auto-régulée jouent pleinement leur rôle.**

Par contre, le remplacement du châssis d'origine par un châssis à tension auto-régulée ou l'adaptation d'un système de régulation sur le châssis d'origine est une véritable opération de restauration qui se déroule en cinq étapes :

- Démontage de la peinture de son châssis d'origine,
- Pose de bandes de tension,
- Montage du châssis à tension auto-régulée ou transformation du châssis d'origine en châssis à tension auto-régulée,
- Tension de la peinture sur le nouveau châssis,
- Finitions.

Ces interventions ne peuvent être menées que par un restaurateur spécialiste. Le coût d'un dos protecteur est inférieur au coût d'un châssis à tension auto-régulée, car, nous l'avons bien compris, cette dernière opération est plus complexe.

Si on doit choisir l'une de ces deux solutions alternatives, on est tenté de choisir la solution la moins onéreuse pour des raisons budgétaires. Néanmoins, si l'on compare l'efficacité de ces deux solutions, il est incontestable que les châssis à tension auto-régulée sont beaucoup plus efficaces pour plusieurs raisons, fig. 124.

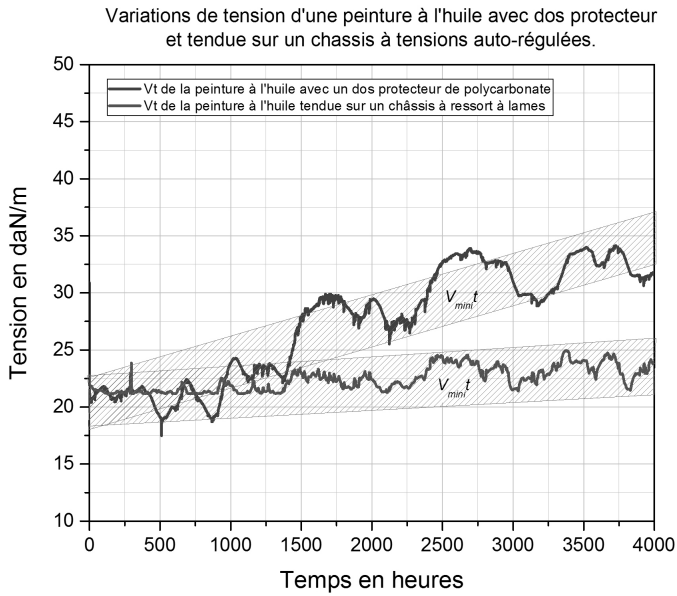



*Figure 124 :* Vt *d'une peinture à l'huile avec dos protecteur et tendue sur châssis à tension auto-régulée soumise à un climat instable.*

Si on compare les courbes des peintures à dos protecteur et sur châssis à tension auto-régulée, nous voyons qu'en dehors de l'amortissement des variations de tension, les peintures ont des comportements très différents. La peinture à dos protecteur est malgré sa protection très influencée par le climat extérieur, comme en témoigne la croissance progressive de la tension lorsque les valeurs de l'humidité diminuent. Dans le cas de la peinture tendue sur un châssis à tension auto-régulée, la variation des tensions est totalement indépendante du climat externe. **Cette propriété des châssis à tension auto-régulée est très importante au niveau de la conservation des peintures.**

*VIII-2-6 Étude de cas*

Nous avons l'exemple d'une œuvre de grand format (2,2/6 m) d'Olivier Debré « Ocre pâle de Loire » peint en 1983 et appartenant au FNAC. C'est une authentique peinture à l'huile sur toile tendue sur

châssis. Lors d'un constat d'état en 2002, il s'est vérifié qu'un fin réseau de craquelures à peine perceptible était en train de se développer en surface, fig. 125.

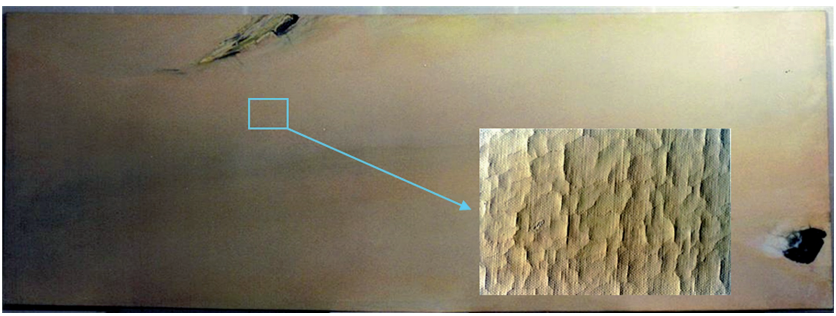


*Figure 125 : Ocre pâle de Loire (FNAC) état de conservation en 2002.*

Ce réseau de craquelures mécaniques, que l'on pourrait qualifier de prématuré, s'était développé sur environ 40 % de la surface sur le côté dextre. Bien que relativement discret, il commençait à altérer l'esthétique de l'œuvre qui repose essentiellement sur la fluidité de la matière et des fondus de nuances des ocres. L'homogénéité de ces couches, en dehors de leur éclatement en empâtements localisés dans deux zones, est une des raisons premières de la beauté de cette œuvre.

Même si plusieurs éléments attestent que l'œuvre fut démontée de son châssis pour être roulée sur un cylindre durant ses déplacements, la morphologie de ce réseau témoigne qu'il résulte des surtensions survenues dans la peinture lors de variations climatiques.

Le châssis en bois était constitué d'un assemblage de deux châssis maintenus par des tasseaux vissés sur les montants et les traverses. Les montants avaient été renforcés intérieurement par des tasseaux pour augmenter l'épaisseur des tranches. La structure du châssis ainsi conçue n'avait pas une rigidité suffisante pour les besoins de la conservation. Sous le poids de la peinture, le châssis s'était affaissé dans le milieu, en provoquant un cintrage de la peinture.

Alerté par la présence de ce réseau à peine visible qui s'était formé seulement après 19 ans d'existence, nous avons proposé de changer le châssis d'origine qui ne jouait plus son rôle par un châssis à tension auto-régulée italien « *Equilibrarte* ». Cette proposition de type de châssis était justifiée par les risques de propagation des craquelures au cours des prochaines années. Cette opération que l'on pourrait qualifier de préventive est en réalité fondamentale pour la conservation de l'œuvre. En effet, une mise en tension mal adaptée de ce tableau aurait pu avoir comme conséquence la naissance de nouveaux désordres.

Ces traitements ont nécessité une très bonne expérience de la restauration des peintures surtout lorsque l'on est confronté à la résorption de déformations sur d'œuvres de très grand format. Le traitement a été fait en chambre humide contrôlée.

En 2004, le FNAC met en dépôt « Ocre pâle de Loire » dans la Grande Galerie de la Mairie de Tours. Cette galerie donne accès à la salle des fêtes et à la salle de mariage, fig. 126.



*Figure 126 : Grande Galerie de la Mairie de Tours.*

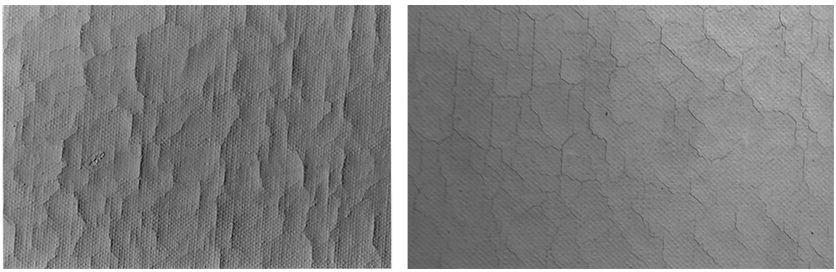
C'est un lieu de passage très fréquenté lors des réceptions et des cérémonies de mariages. La Grande Galerie n'est pas climatisée. L'œuvre est accrochée au mur face à l'escalier en pendant d'une autre œuvre d'Olivier Debré la « Grande Loire » 1972, dépôt de l'Université François Rabelais.

Sans avoir d'éléments historiques de la situation climatique de cette Grande Galerie, on peut imaginer qu'en période de réception ou de

cérémonie de mariage, l'afflux d'invités perturbe considérablement le climat. L'instabilité du climat de cette Grande Galerie, vue l'inertie probable du bâtiment, est due principalement au flux des visiteurs ou invités lors des réceptions dont la fréquence nous est inconnue. Au regard des mesures que l'on peut faire dans ce genre de situation, d'importants écarts d'humidité et de température sont certainement inhérents à ce lieu.

Un *aller voir* a été programmé afin de faire un bilan sanitaire de l'œuvre « Ocre pâle de Loire » *de visu* après 11 ans d'exposition dans cette galerie. Le but de cette visite était de vérifier si le réseau de craquelures de la peinture s'était étendu pendant les onze années d'exposition dans le climat instable de la galerie.

Les deux photos du réseau de craquelures de 2002 et 2015, n'ont pas pu être prises dans les mêmes conditions et avec le même appareil. En 2002, la prise de vue est une macro photo en lumière rasante sur support argentique. Ainsi, le relief du réseau ressort davantage. En 2015, la peinture accrochée à sa cimaise est éclairée par une lumière uniforme. La photo est prise avec un appareil numérique à la volée. Le réseau de craquelures est moins marqué du fait que la lumière n'est pas rasante, fig. 127, 128.



*Figures 127, 128 : Réseaux de craquelures en 2002 et 2015*

Apparemment, la morphologie du réseau de craquelures n'a pas évolué d'une manière significative. On peut reconnaître dans les deux cas les motifs hexagonaux qui caractérisent ce réseau de craquelures mécaniques modelé par des variations climatiques et noté {135}.

Un relevé des altérations avait été dessiné en 2002. Le réseau de craquelures s'étend sur environ 40 % à dextre de l'œuvre selon une oblique.Actuellement, la photo témoin de 2015, fig. 129, prouve que le réseau de craquelures ne s'est pas étendu d'une manière visible.

*VIII-2-7 Retour d'expérience*

La peinture est peinte en 1983. On peut supposer qu'à cette date aucune craquelure n'existait. En 2002, même en ignorant les conditions



*Figure 129 : Réseaux de craquelures en 2015.*

climatiques, on a pu évaluer qu'environ 40 % de la surface s'était craquelée. Pendant ces dix-neuf premières années, la vitesse de propagation du réseau de craquelures peut être estimé à 0,27 $m^2$/an.

Dans les conditions climatiques actuelles de la Galerie, si aucune intervention n'avait été menée sur la peinture en 2002, le réseau de craquelures se serait probablement propagé sur environ 67 % de la surface en 2015 et sur la totalité en 2032. L'œuvre aurait subi un dommage irrémédiable.

Grâce au montage de la peinture « Ocre pâle de Loire » sur un châssis à tension auto-régulée en 2002, nous avons évité le pire. Nous constatons en 2015 que l'évolution du réseau de craquelures a été stoppée malgré les mauvaises conditions de conservation, ce qui était l'objectif de départ.

Cette expérience est d'autant plus importante que nous avons pu vérifier l'efficacité de ce type de châssis d'une manière objective. Dans notre activité professionnelle nous n'avons presque jamais l'occasion d'avoir un retour d'expérience si nous ne le provoquons pas. **Pourtant, un contrôle, une vérification programmés pourraient nous aider à progresser et à avancer tout en nous encourageant à promouvoir de nouveaux traitements, et des techniques innovantes**.

# Conclusion générale

La vie matérielle d'une œuvre peinte est une réalité qui n'est pas seulement jalonnée d'évènements historiques spectaculaires et répertoriés. C'est aussi une transformation lente et continue de la matière qui à notre échelle du temps ne marque pas toujours notre attention ni nos mémoires.

Une fissure de la matière picturale se forme de préférence au niveau d'un défaut. Elle restera incognito durant des mois, peut-être des années avant de se faire remarquer. Devenue visible, sous forme d'une craquelure, elle devient la preuve irréfutable que la matière s'altère. C'est le symptôme même de la dégradation mécanique des peintures.

Quand on sait que cette craquelure va se propager en surface pour former un réseau, quand on est conscient que sa vitesse de propagation va augmenter au fil du temps, la moindre découverte de craquelures doit interpeler tous les responsables de la conservation des œuvres modernes et contemporaines, pour agir au plus vite.

Si le temps est le vecteur de l'évolution des matériaux, les conditions de conservation non maîtrisées en sont les accélérateurs. Nous avons démontré que toute matière a une limite d'endurance, c'est-à-dire une ligne blanche qu'il ne faut pas franchir. Dès qu'elle est franchie, c'est la fissure puis la craquelure, qui nous rappellent à l'ordre, en nous lançant un signal d'alarme. C'est à ce moment qu'il faut intervenir. Il ne faut pas attendre que le réseau de craquelures se développe, que les soulèvements de la matière apparaissent, que la matière picturale se détache de la peinture pour disparaître. Mais quelles décisions prendre, quelles solutions adopter ?

Gaël de Guichen parle dans sa définition de la conservation « d'augmenter l'espérance de vie » d'un bien culturel. D'une manière plus pragmatique, la norme EN 15898 propose des « mesures et actions visant à limiter dans le futur une dégradation, une détérioration » d'un bien culturel.

**Roland May[1] parle du manque de porosité entre les scientifiques de la conservation et les responsables de la conservation. Il souhaite que**

1. May R., « Regard sur la conservation préventive en France », 2011.

**ce socle bipode évaluation/appui scientifique se consolide pour un meilleur avenir, pour une meilleure préservation des biens culturels.**

Ce livre s'inscrit dans cet esprit. Il répond à ce cadre de la conservation du patrimoine, bien qu'il se limite aux peintures d'art moderne et contemporain. Il a pour but de diffuser des connaissances, des principes, des concepts mais aussi d'innover. Qu'est-ce qu'il nous apporte ?

• Une connaissance plus approfondie de certaines notions de physique et de mécanique des peintures,

• Une approche plus large du comportement des peintures en diversifiant l'étude de matériaux comme supports ou matières picturales,

• Une introduction au climat, non pas en tant que phénomène purement physique, mais surtout comme acteur dans la vie matérielle des œuvres,

• Un regard objectif vis-à-vis des lieux de conservation et des difficultés de créer des conditions climatiques de conservation favorables,

• Une méthodologie qui se construit à partir des principes de conservation qui ont été développés ici même,

• Une évaluation de la fragilité des œuvres en se basant sur des critères objectifs,

• Des solutions alternatives simples qui sont complémentaires.

Mais ce n'est pas tout, car l'implication de la recherche scientifique au service de la conservation est de mettre au point des outils spécialisés pour chaque domaine d'application.

Dans cette optique, nous avons développé un premier outil « **la variation minimale de tension *($V_{mini}t$)* ».** Cette nouvelle caractéristique mécanique de chaque peinture est directement liée à la limite d'endurance des peintures. L'expression de cette grandeur a été simplifiée de manière à être facilement utilisée tout en donnant des résultats fiables.

Le second outil que nous avons développé, c'est « le diagramme de sensibilité des peintures à l'humidité et à la température et la fonction polynomiale de la courbe ». Ces courbes obtenues expérimentalement et théoriquement caractérisent une trentaine de techniques différentes. Bien qu'elles couvrent la majeure partie des techniques picturales des XX$^{e}$ et XXI$^{e}$ siècles, d'autres courbes pourraient être développées à l'avenir.

Ces deux outils s'utilisent ensemble pour :

• Évaluer l'impact du climat sur la conservation des œuvres, c'est-à-dire être capable d'analyser les risques de dégradation mécanique des œuvres au cours du temps en connaissant le profil climatique des lieux d'exposition ou pendant des transferts,

• Trouver, pour un ensemble de peintures de techniques différentes, les meilleures conditions climatiques de conservation possibles,

• Chercher les solutions les plus économiques de gestion du climat tout en respectant les conditions de conservation des œuvres.

Nous souhaitons que l'usage de cet ouvrage serve à améliorer l'approche de la conservation des peintures modernes et contemporaines. Il s'adresse avant tout à des spécialistes, mais il est accessible à tout public ayant un lien avec la conservation des œuvres d'art.

Pour contribuer à cette approche rationnelle de la conservation préventive des œuvres peintes, nous avons réalisé expérimentalement et construit théoriquement une série de diagrammes de sensibilité à l'humidité et à la température pour un certain nombre de techniques picturales. Ils sont présentés dans la partie III avec un module de calcul dans le cartouche supérieur à gauche.

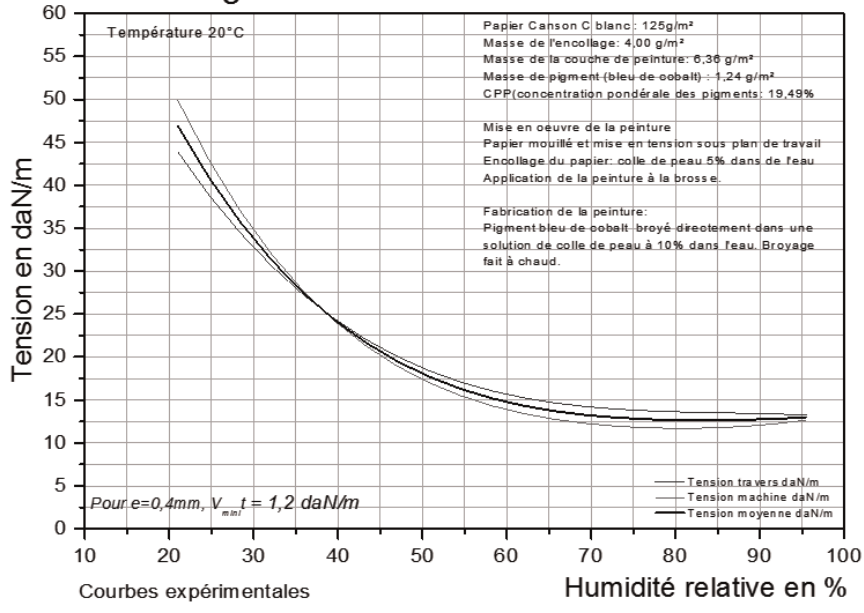
# Partie III

# Diagrammes de sensibilité à l'humidité et à la température

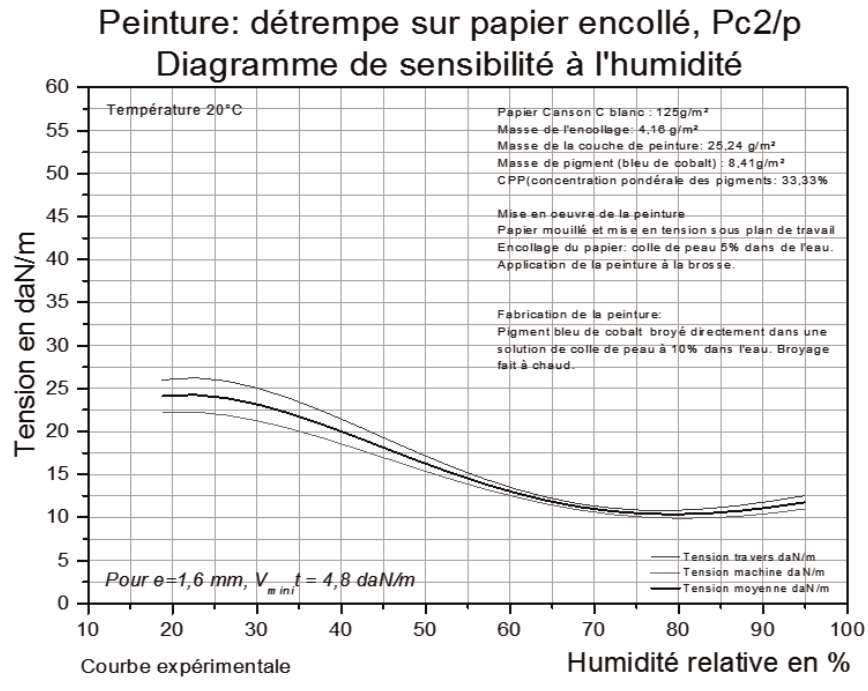
| Peinture détrempe papier Pc1/p. | HR | HR | Vt |
|---|---|---|---|
| Humidité relative en % | 55 | 55 | |
| Tension en daN/m | 16,14 | 16,14 | 0,00 |



## Peinture: détrempe sur papier encollé, Pc1/p
## Diagramme de sensibilité à l'humidité



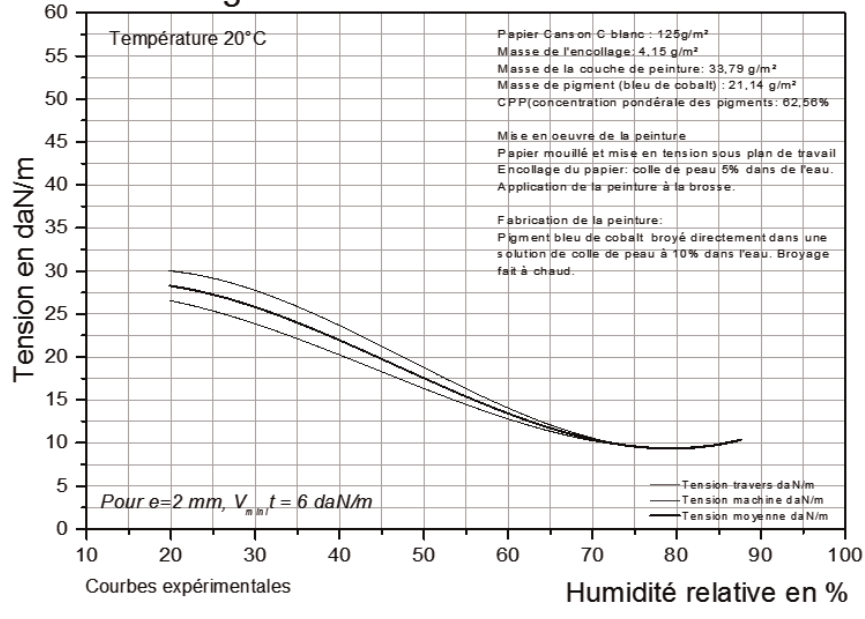
| Peinture détrempe papier Pc2/p | HR | HR | Vt |
|---|---|---|---|
| Humidité relative en % | 55 | 55 | |
| Tension en daN/m | 14,54 | 14,54 | 0,00 |



| Peinture détrempe papier, Pc3/p | HR | HR | Vt |
|---|---|---|---|
| Humidité relative en % | 55 | 55 | |
| Tension en daN/m | 15,39 | 15,39 | 0,00 |

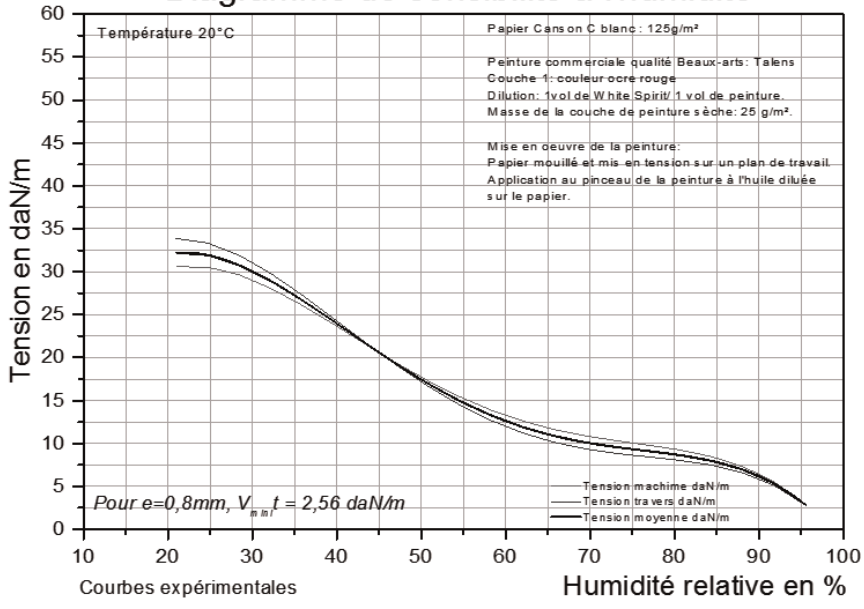


## Peinture: détrempe sur papier encollé, Pc3/p
## Diagramme de sensibilité à l'humidité



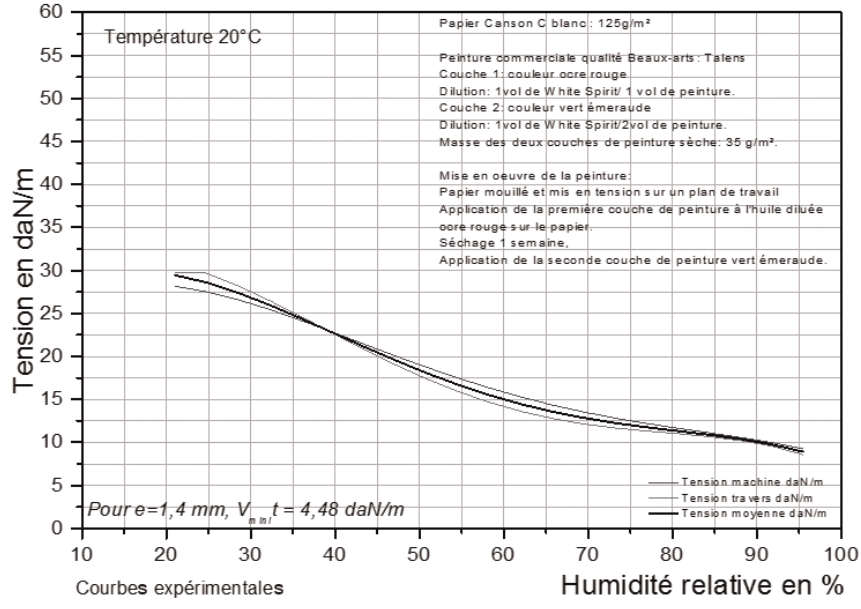
| Peinture à l'huile/papier n. encollé Ph1/p. | HR | HR | Vt |
|---|---|---|---|
| Humidité relative en % | 55 | 55 | |
| Tension en daN/m | 15,41 | 15,41 | 0,00 |

## Peinture: huile sur papier non encollé, Ph1/p
## Diagramme de sensibilité à l'humidité



| Peinture à l'huile/papier n. encollé Ph2/p.nc | HR | HR | Vt |
|---|---|---|---|
| Humidité relative en % | 55 | 55 | |
| Tension en daN/m | 16,56 | 16,56 | 0,00 |

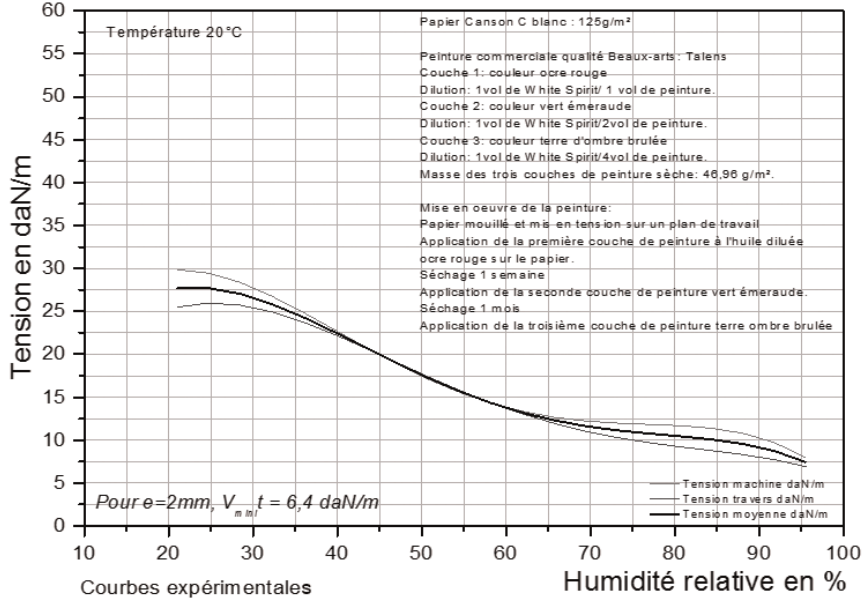
## Peinture: huile sur papier non encollé, Ph2/p.
## Diagramme de sensibilité à l'humidité



| Peinture huile/papier n.encollé Ph3/p | HR | HR | Vt |
|---|---|---|---|
| Humidité relative en % | 55 | 55 | |
| Tension en daN/m | 15,86 | 15,86 | 0,00 |

Laboratoire d'analyse et de recherche pour la conservation et la restauration des œuvres d'art

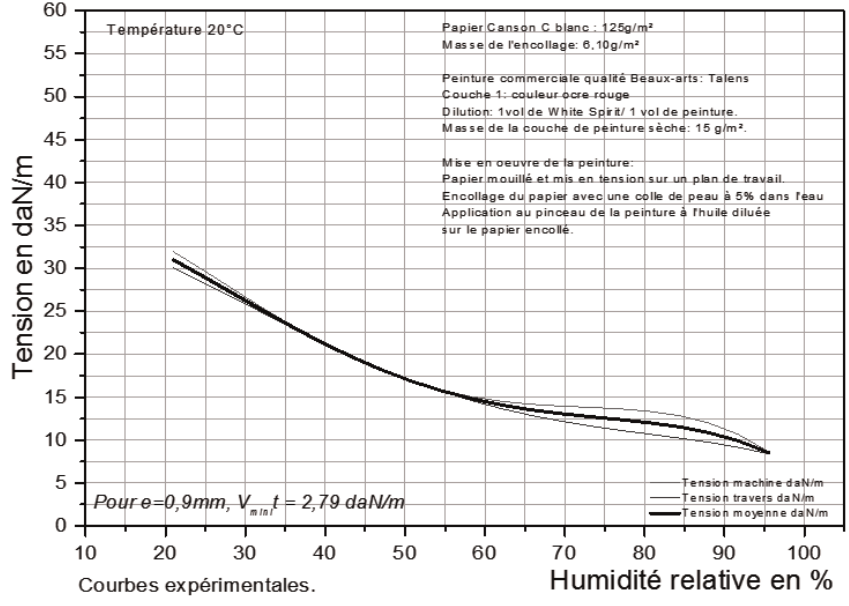
## Peinture: huile sur papier non encollé, Ph3/p
## Diagramme de sensibilité à l'humidité




Courbes expérimentales

| Peinture à l'huile/papier encollé Phc4/p | HR | HR | Vt |
|---|---|---|---|
| Humidité relative en % | 55 | 55 | |
| Tension en daN/m | 15,63 | 15,63 | 0,00 |

## Peinture: huile sur papier encollé, Phc4/p
## Diagramme de sensibilité à l'humidité

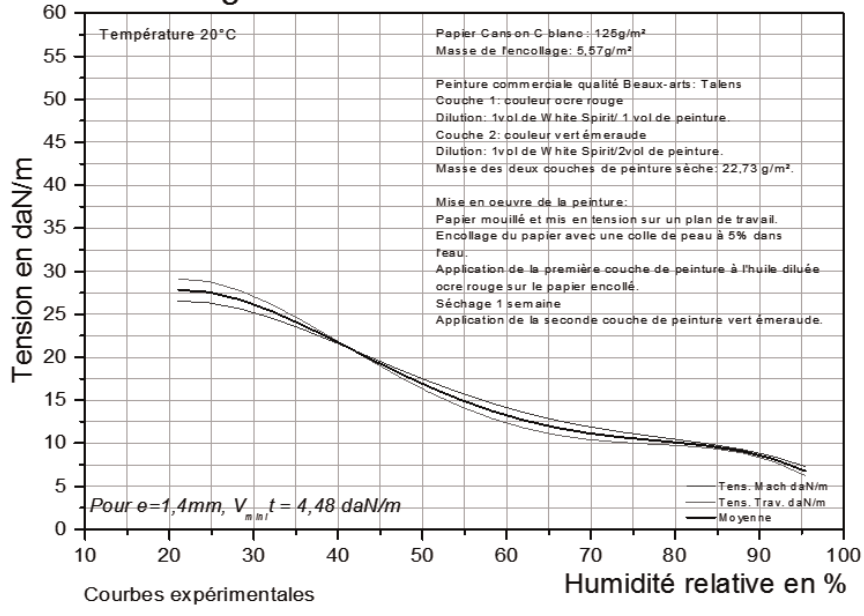



Courbes expérimentales.

| Peinture à l'huile/papier encollé Phc5/p | HR | HR | Vt |
|---|---|---|---|
| Humidité relative en % | 55 | 55 | |
| Tension en daN/m | 14,89 | 14,89 | 0,00 |



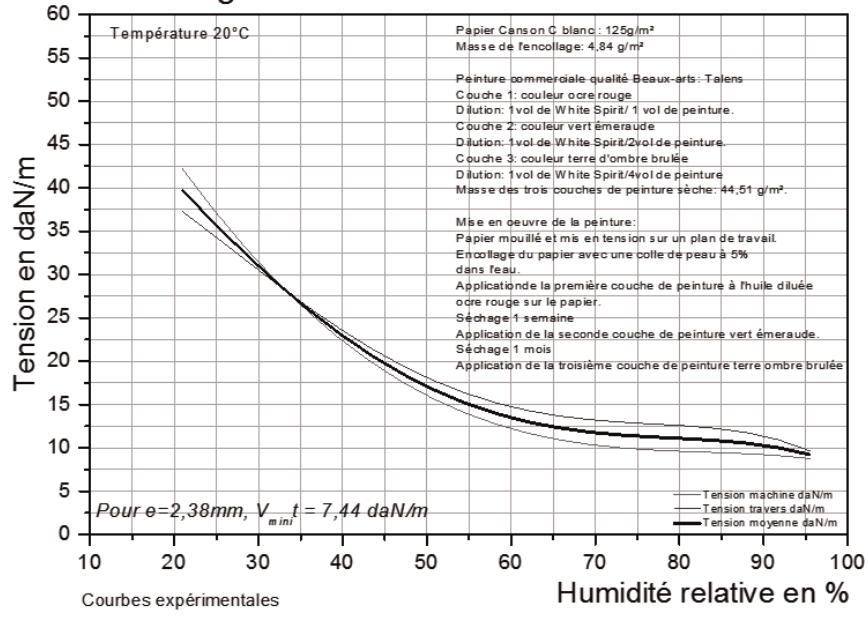
## Peinture: huile sur papier encollé, Phc5/p
## Diagramme de sensibilité à l'humidité




Courbes expérimentales

| Peinture à l'huile/papier encollé Phc6/p | HR | HR | Vt |
|---|---|---|---|
| Humidité relative en % | 55 | 55 | |
| Tension en daN/m | 15,00 | 15,00 | 0,00 |

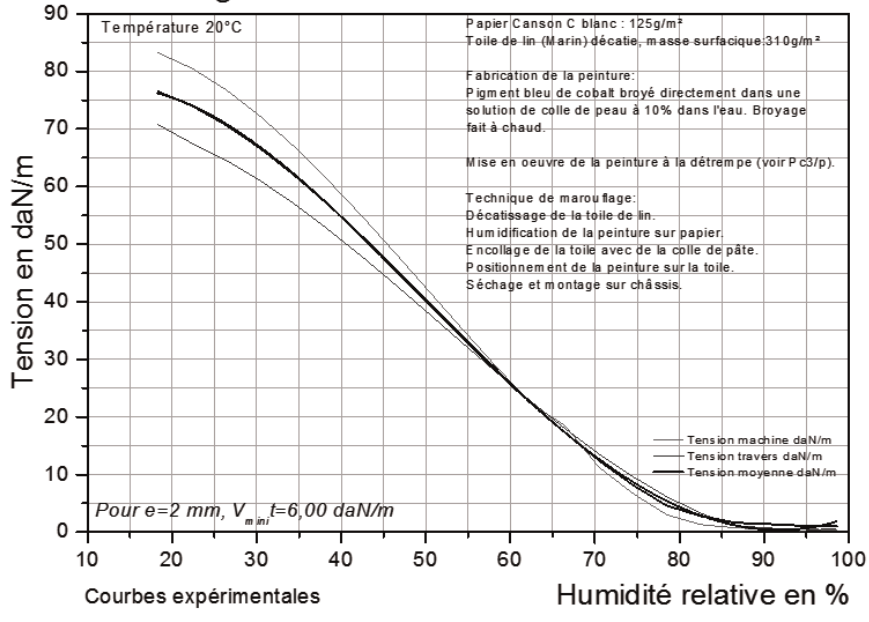
## Peinture: huile sur papier encollé, Phc6/p
## Diagramme de sensibilité à l'humidité




Courbes expérimentales

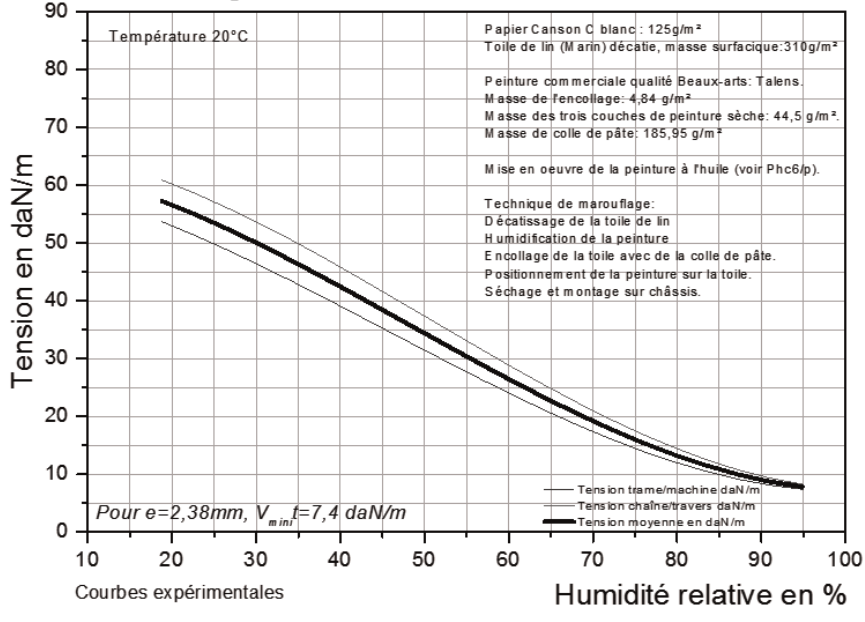
| Peinture détrempe /papier entoilé Pc3/p/t. | HR | HR | Vt |
|---|---|---|---|
| Humidité relative en % | 55 | 55 | |
| Tension en daN/m | 33,03 | 33,03 | 0,00 |

## Peinture: détrempe sur papier entoilé, Pc3/p/t.lin
## Diagramme de sensibilité à l'humidité



| Peinture à l'huile/papier entoilé Phc6/p/t. | HR | HR | Vt |
|---|---|---|---|
| Humidité relative en % | 55 | 55 | |
| Tension en daN/m | 30,37 | 30,37 | 0,00 |

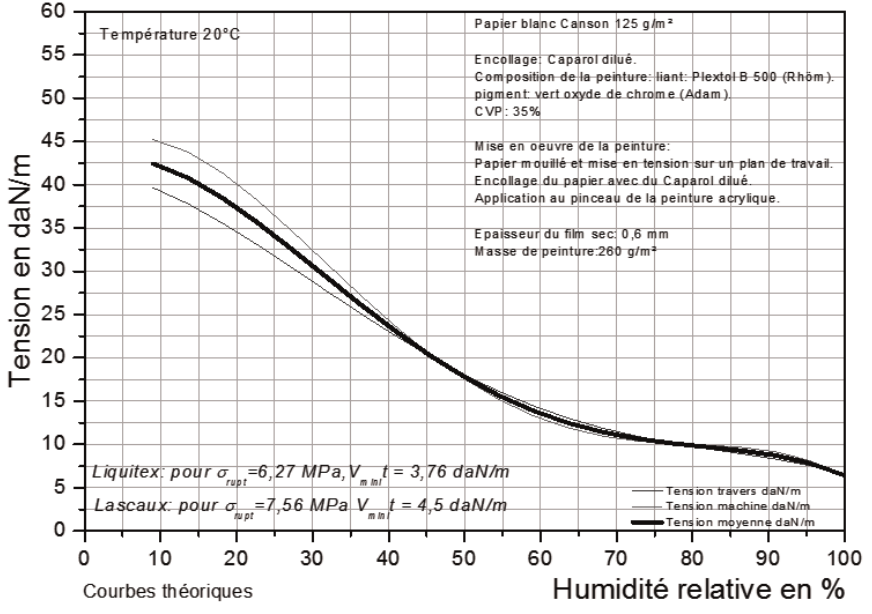
## Peinture: huile sur papier entoilé, Phc6/p/t.lin
## Diagramme de sensibilité à l'humidité




Courbes expérimentales

| Peinture acrylique/papier Pacry1,2/p | HR | HR | Vt |
|---|---|---|---|
| Humidité relative en % | 55 | 55 | |
| Tension en daN/m | 15,45 | 15,45 | 0,00 |

## Peinture: acrylique sur papier encollé, Pacry1,2/p
## Diagramme de sensibilité à l'humidité

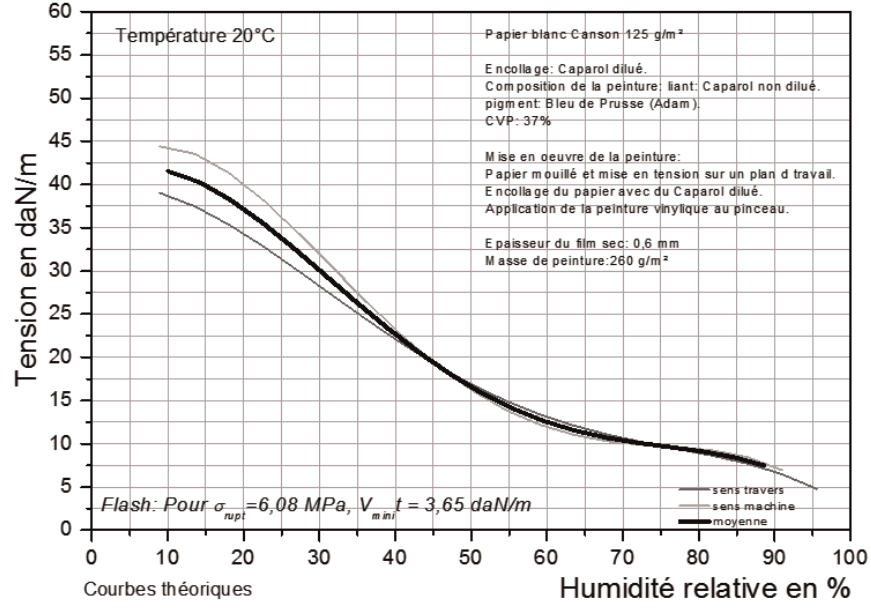



Courbes théoriques

| Peinture vinylique/papier Pviny1/p | HR | HR | Vt |
|---|---|---|---|
| Humidité relative en % | 55 | 55 | |
| Tension en daN/m | 14,10 | 14,10 | 0,00 |



## Peinture: vinylique sur papier encollé, Pviny1/p
## Diagramme de sensibilité à l'humidité



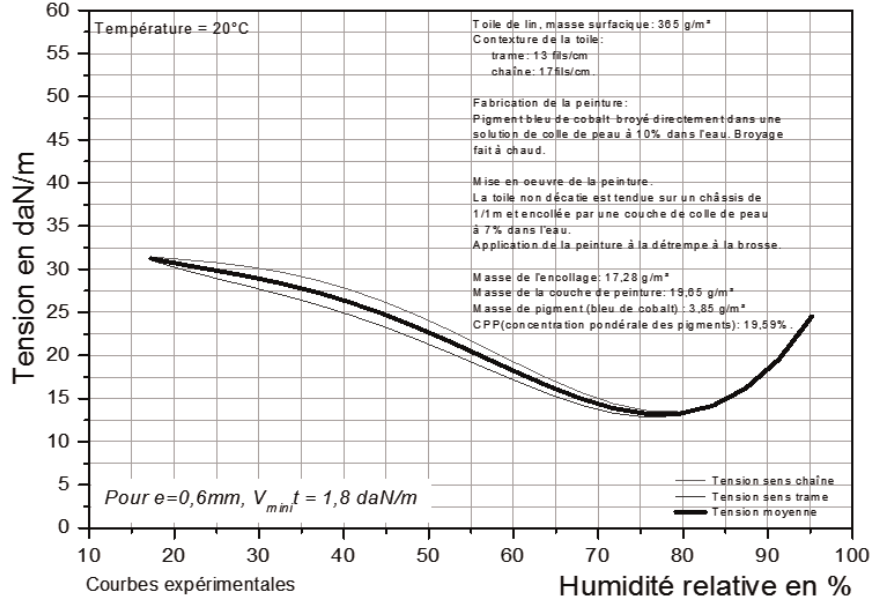

Courbes théoriques

| Peinture à détrempe/toile Pc1/t. | HR | HR | Vt |
|---|---|---|---|
| Humidité relative en % | 55 | 55 | |
| Tension en daN/m | 20,48 | 20,48 | 0,00 |



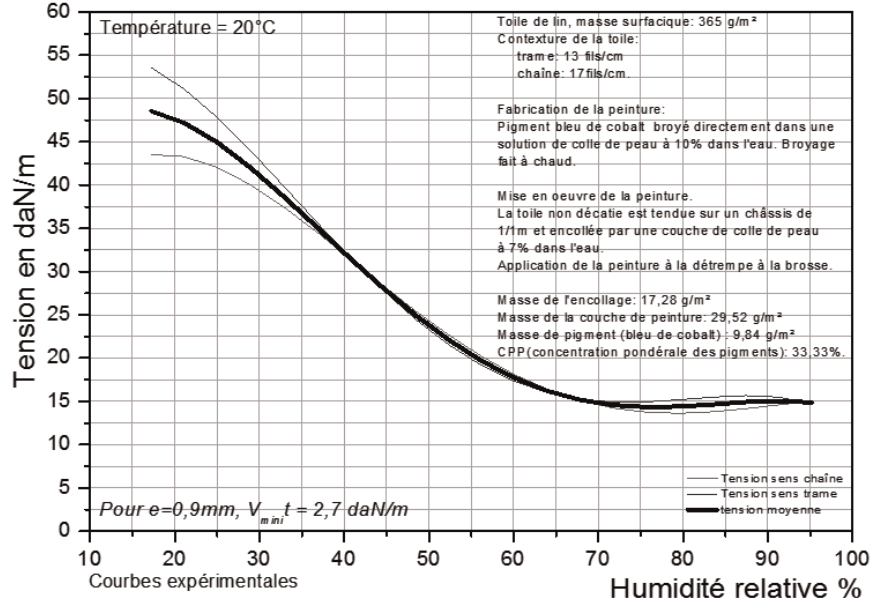


## Peinture: détrempe/toile de lin encollée non décatie, Pc1/t.lin
## Diagramme de sensibilité à l'humidité



| Peinture détrempe/toile Pc2/t | HR | HR | Vt |
|---|---|---|---|
| Humidité relative en % | 55 | 55 | |
| Tension en daN/m | 19,65 | 19,65 | 0,00 |

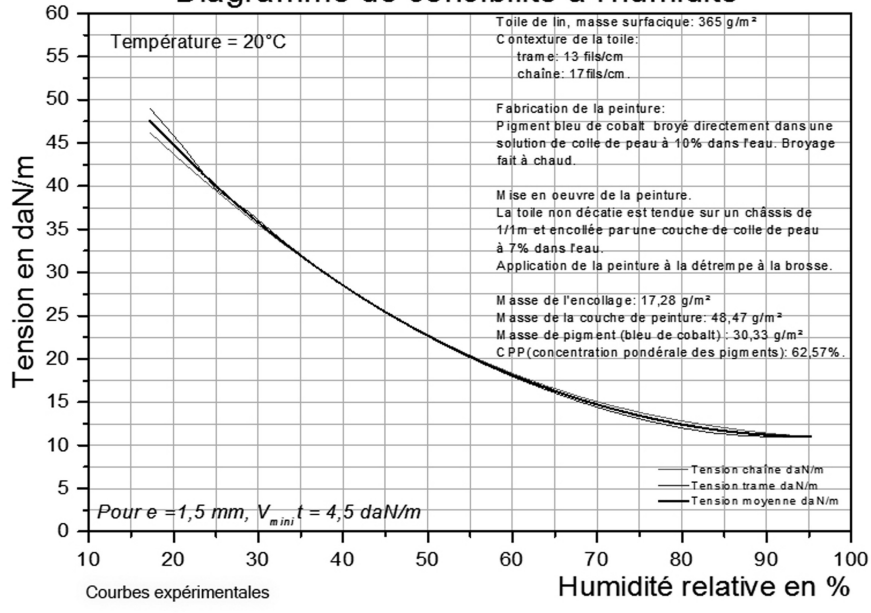
## Peinture: détrempe/toile de lin encollé, non décatie, Pc2/t.lin
## Diagramme de sensibilité à l'humidité



| Peinture détrempe/toile Pc3/t | HR | HR | Vt |
|---|---|---|---|
| Humidité relative en % | 55 | 55 | |
| Tension en daN/m | 20,24 | 20,24 | 0,00 |

Laboratoire d'analyse et de recherche
pour la conservation et la restauration des œuvres d'art

## Peinture: détrempe/toile encollée, non décatie, Pc3/t.lin
### Diagramme de sensibilité à l'humidité



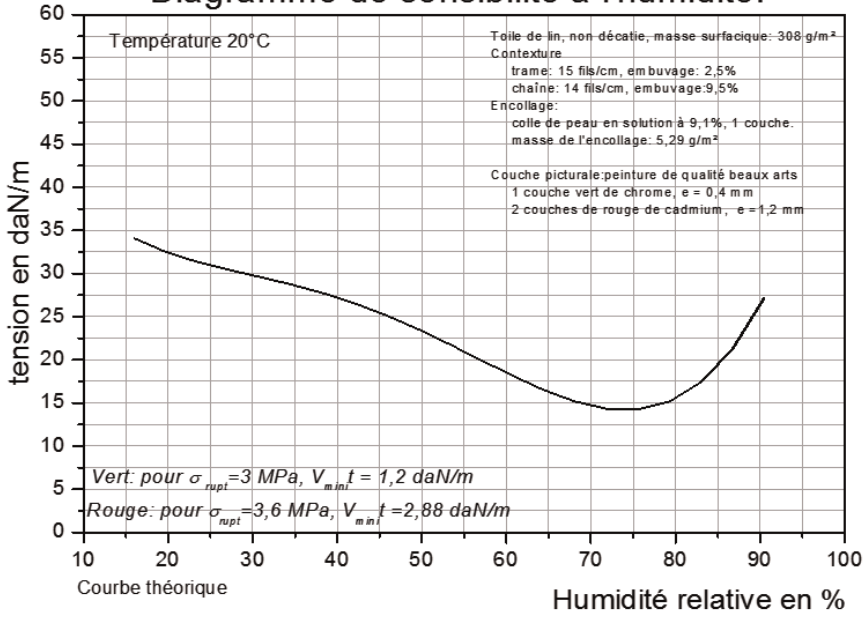

Courbes expérimentales

| Peinture huile/toile n.décatie ss prépa Phsp/tnd | HR | HR | Vt |
|---|---|---|---|
| Humidité relative en % | 55 | 55 | |
| Tension en daN/m | 21,43 | 21,43 | 0,00 |





## Peinture:huile/toile non décatie encollée, Ph/t.nd.enc
## Diagramme de sensibilité à l'humidité.

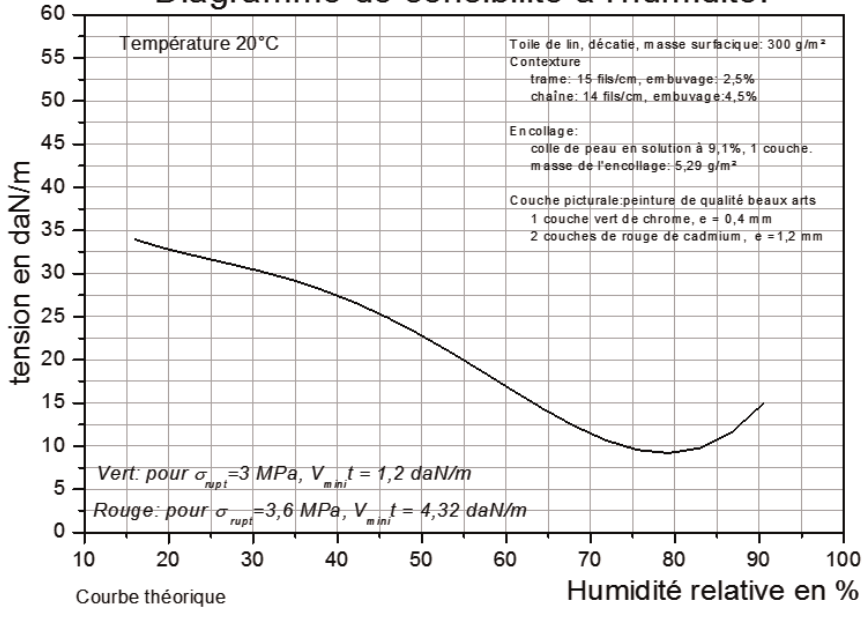



Courbe théorique

| Peinture huile/toile décatie ss prépa Phsp/td | HR | HR | Vt |
|---|---|---|---|
| Humidité relative en % | 55 | 55 | |
| Tension en daN/m | 19,94 | 19,94 | 0,00 |



## Peinture: huile/toile décatie encollée, Ph/t.d.enc
## Diagramme de sensibilité à l'humidité.

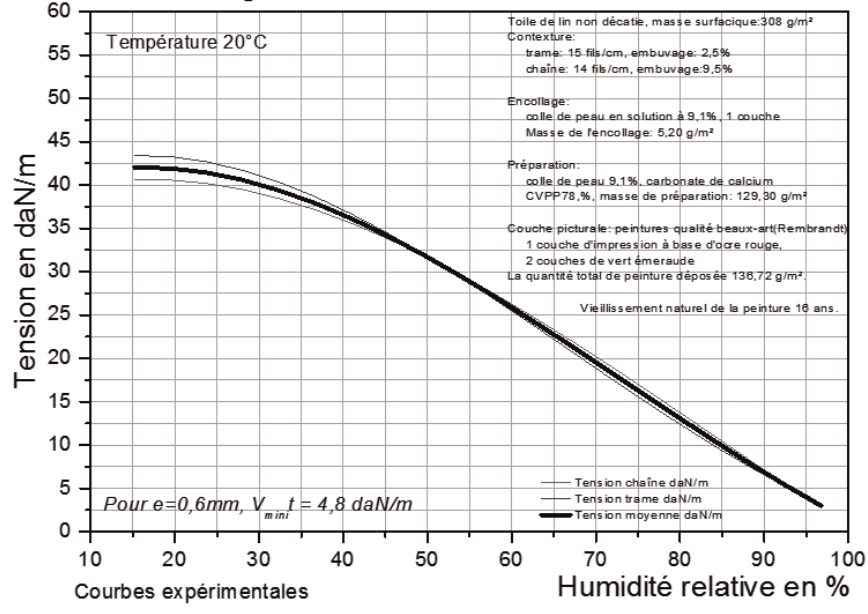



Courbe théorique

| Peinture huile/toile prépa maigre/toile n décatie, Ph1/t. nd | HR | HR | Vt |
|---|---|---|---|
| Humidité relative en % | 55 | 55 | |
| Tension en daN/m | 28,88 | 28,88 | 0,00 |

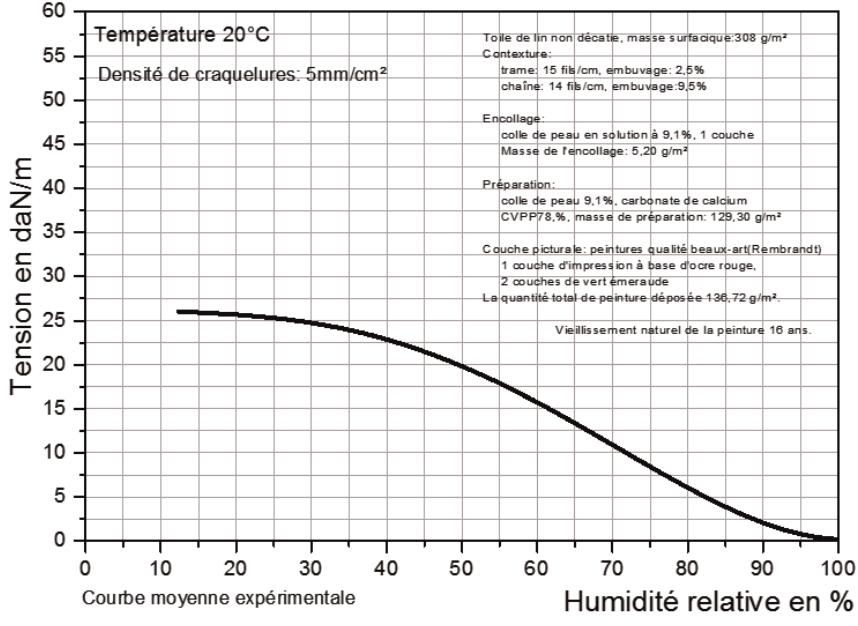


## Peinture huile/toile lin n décatie -préparation maigre, Ph1/t.nd
## Diagramme de sensibilité à l'humidité



| Peinture huile/toile craquelée, Ph1/t. nd | HR | HR | Vt |
|---|---|---|---|
| Humidité relative en % | 55 | 55 | |
| Tension en daN/m | 16,07 | 16,07 | 0,00 |

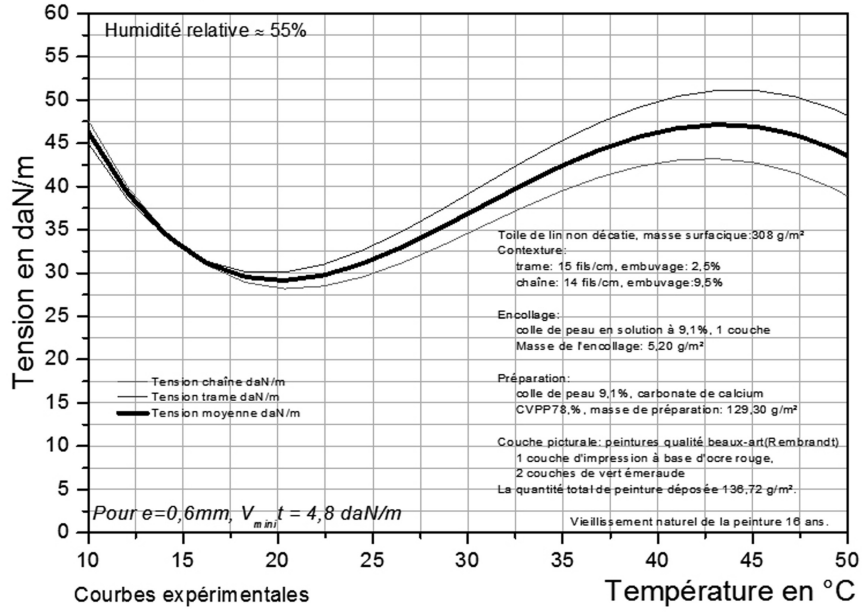
## Peinture: huile/toile, craquelée type Ph1/t.nd
## Diagramme de sensibilité à l'humidité



| Peinture huile/toile prépa maigre/toile n décatie, Ph1/t. n | T | T | Vt |
|---|---|---|---|
| Température en °C | 20 | 20 | |
| Tension en daN/m | 29,19 | 29,19 | 0,00 |

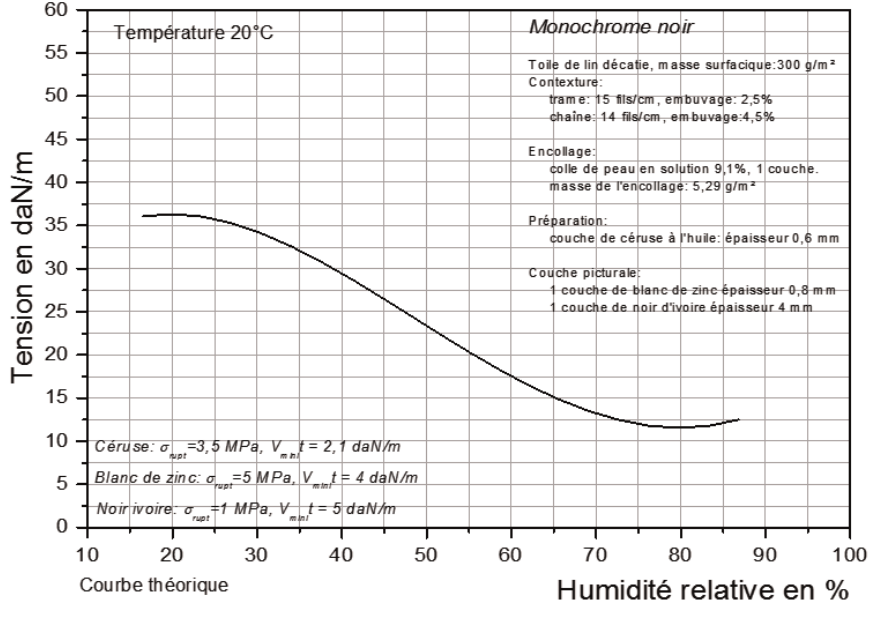


## Peinture:huile/toile n. décatie - préparation maigre,Ph1/t.lin
## Diagramme de sensibilité à la température



| Peinture huile/toile décatie/prépa céruse Ph2/t.d | HR | HR | Vt |
|---|---|---|---|
| Humidité relative en % | 55 | 55 | |
| Tension en daN/m | 20,34 | 20,34 | 0,00 |

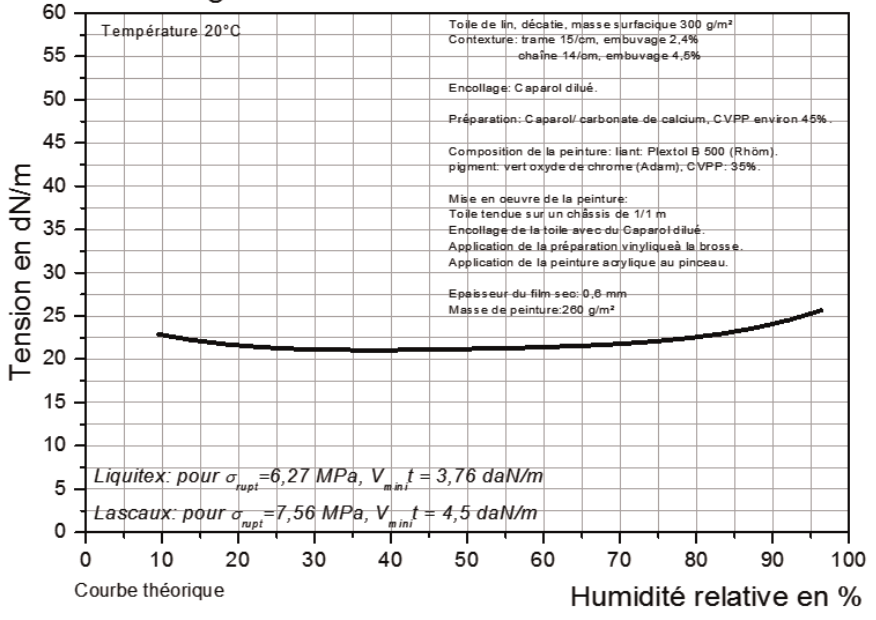
## Peinture: huile/toile encollée, décatie préparation céruse,Ph2/t.lind
### Diagramme de sensibilité à l'humidité



| Peinture acrylique/toile de lin, Pacry1,2/t.lin | HR | HR | Vt |
|---|---|---|---|
| Humidité relative en % | 55 | 55 | |
| Tension en daN/m | 21,29 | 21,29 | 0,00 |

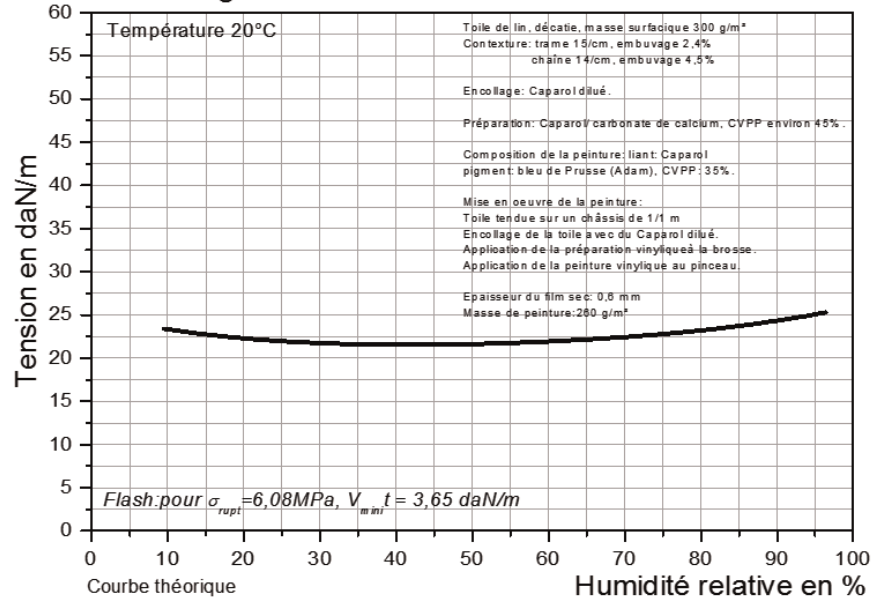


## Peinture: acrylique/toile lin encollée, décatie, préparée, Pacry1,2/t.lin
## Diagramme de sensibilité à l'humidité.



| Peinture vinylique/toile de lin, Pviny1/t.lin | HR | HR | Vt |
|---|---|---|---|
| Humidité relative en % | 55 | 55 | |
| Tension en daN/m | 21,74 | 21,74 | 0,00 |

Peinture: vinylique/toile décatie, encollée, préparée, Pviny1/t.lin
Diagramme de sensibilité à l'humidité.

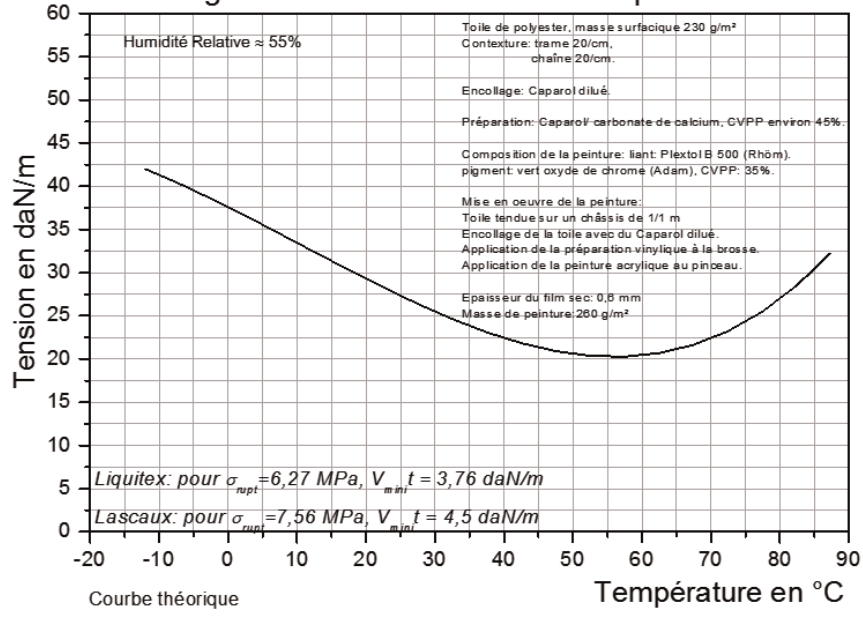


| Peinture acrylique/toile de polyester,Pacry1,2/t.PET | T | T | Vt |
|---|---|---|---|
| Température en °C | 20 | 20 | |
| Tension en daN/m | 29,29 | 29,29 | 0,00 |



## Peinture: acrylique/toile de polyester, encollée, préparée, Pacry1,2/t.PET.

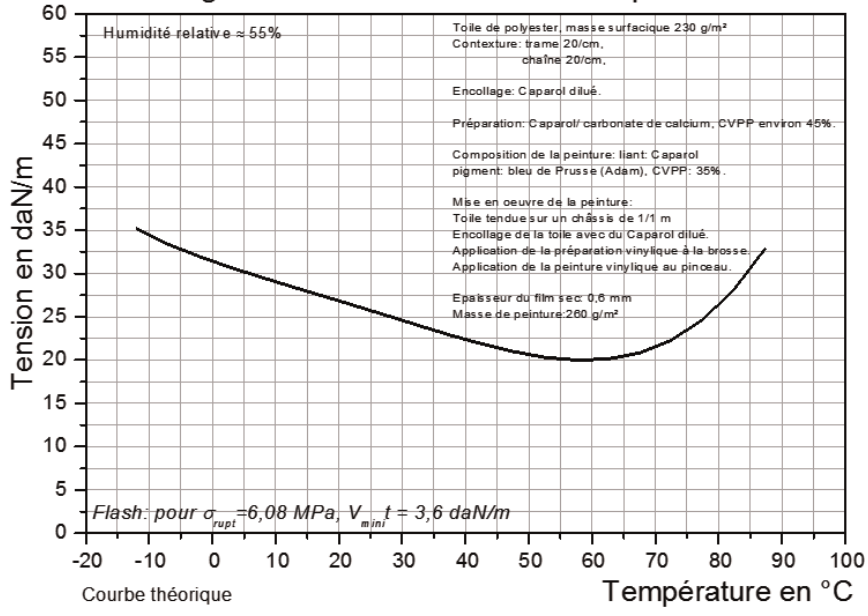
### Diagramme de sensibilité à la température



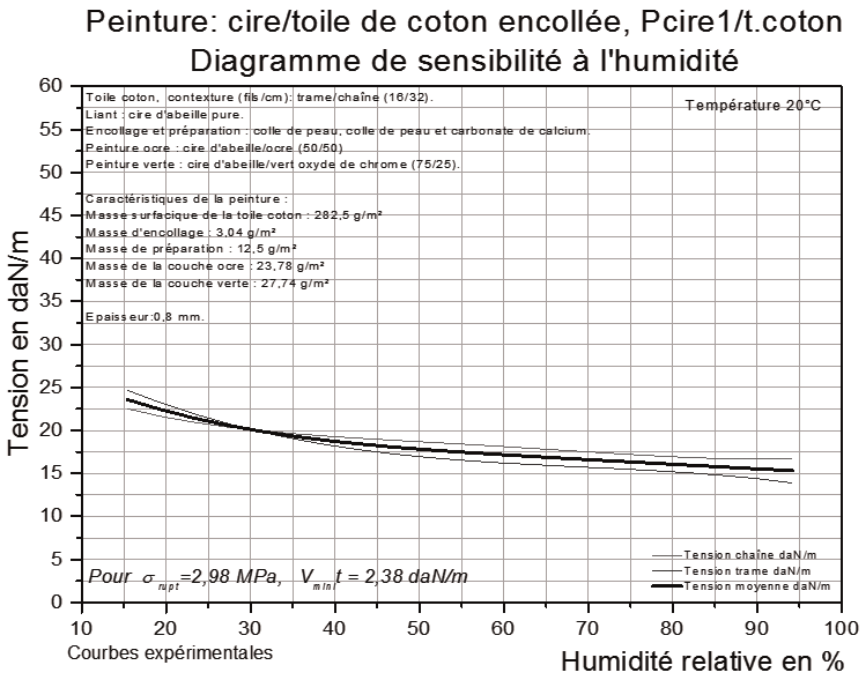

Courbe théorique

| Peinture vinylique/toile de polyester, Pviny1/t.PET | T | T | Vt |
|---|---|---|---|
| Température en °C | 20 | 20 | |
| Tension en daN/m | 26,85 | 26,85 | 0,00 |

Peinture: vinylique/toile polyester, encollée, préparée, Pviny1/tPET.
Diagramme de sensibilité à la température



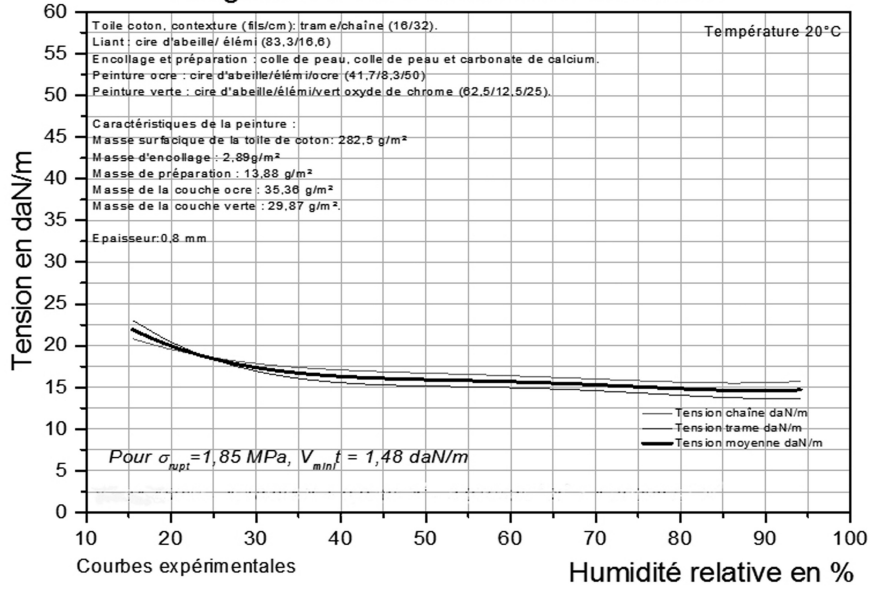
| Peinture cire/toile coton, Pcire1/t.coton | HR | HR | Vt |
|---|---|---|---|
| Humidité relative en % | 55 | 55 | |
| Tension en daN/m | 17,49 | 17,49 | 0,00 |



| Peinture cire/toile coton, Pcire2/t.coton | HR | HR | Vt |
|---|---|---|---|
| Humidité relative en % | 55 | 55 | |
| Tension en daN/m | 15,81 | 15,81 | 0,00 |

Peinture: cire/toile de coton encollée, préparée, Pcire2/t.coton

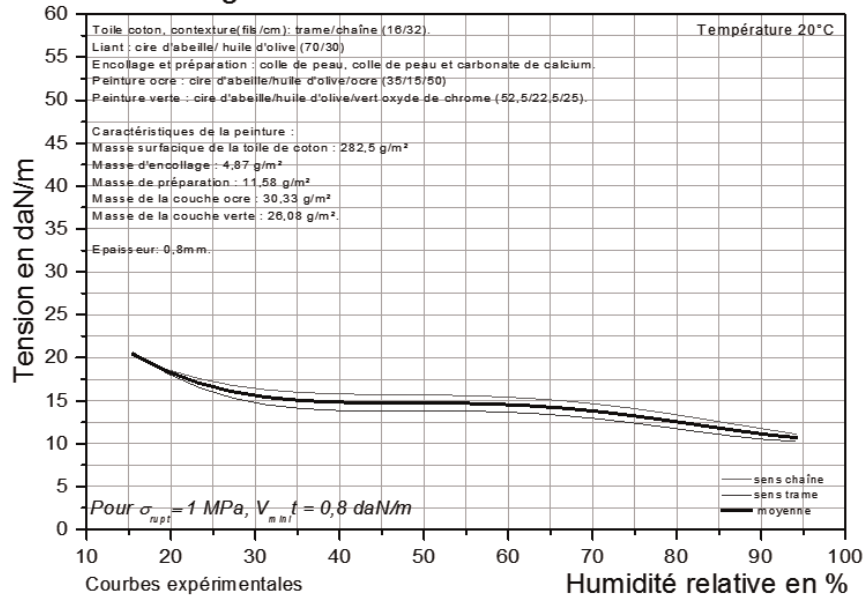
Diagramme de sensibilité à l'humidité



| Peinture cire/toile coton, Pcire4/t.coton | HR | HR | Vt |
|---|---|---|---|
| Humidité relative en % | 55 | 55 | |
| Tension en daN/m | 14,69 | 14,69 | 0,00 |



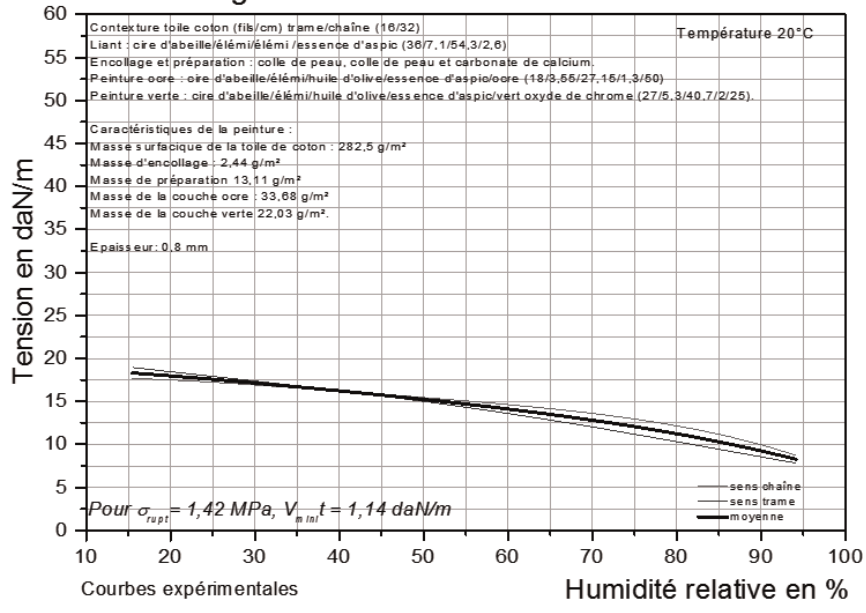
## Peinture: cire/toile de coton, encollée, préparée, Pcire4/t.coton
## Diagramme de sensibilité à l'humidité



| Peinture cire/toile coton, Pcire5/t.coton | HR | HR | Vt |
|---|---|---|---|
| Humiditérelative en % | 55 | 55 | |
| Tension en daN/m | 14,70 | 14,70 | 0,00 |



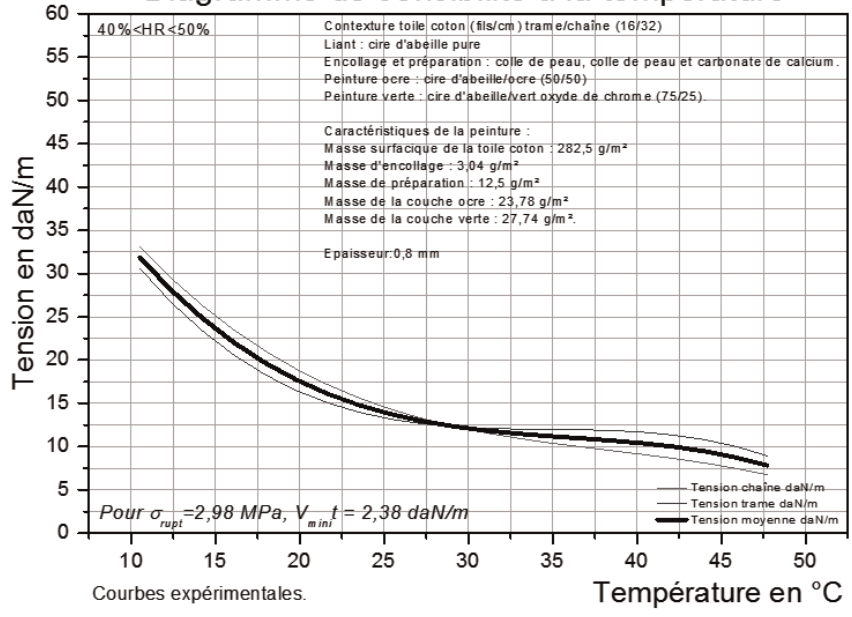
## Peinture: cire/toile de coton, encollée, préparée, Pcire5/t.coton
### Diagramme de sensibilité à l'humidité



| Peinture cire/toile coton, Pcire1/t.coton | T | T | Vt |
|---|---|---|---|
| Température en °C | 20 | 20 | |
| Tension en daN/m | 17,52 | 17,52 | 0,00 |



## Peinture: cire/toile de coton, encollée, préparée, Pcire1/t.coton
### Diagramme de sensibilité à la température

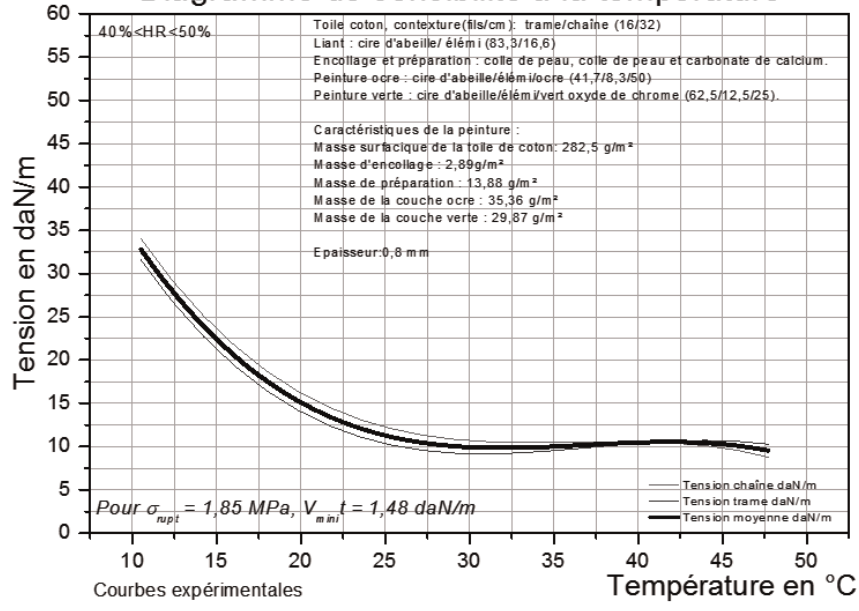



Courbes expérimentales.

| Peinture cire/toile coton, Pcire2/t.coton | T | T | Vt |
|---|---|---|---|
| Température en °C | 20 | 20 | |
| Tension en daN/m | 15,10 | 15,10 | 0,00 |

Peinture: cire/toile de coton, encollée, préparée, Pcire2/t.coton

Diagramme de sensibilité à la température

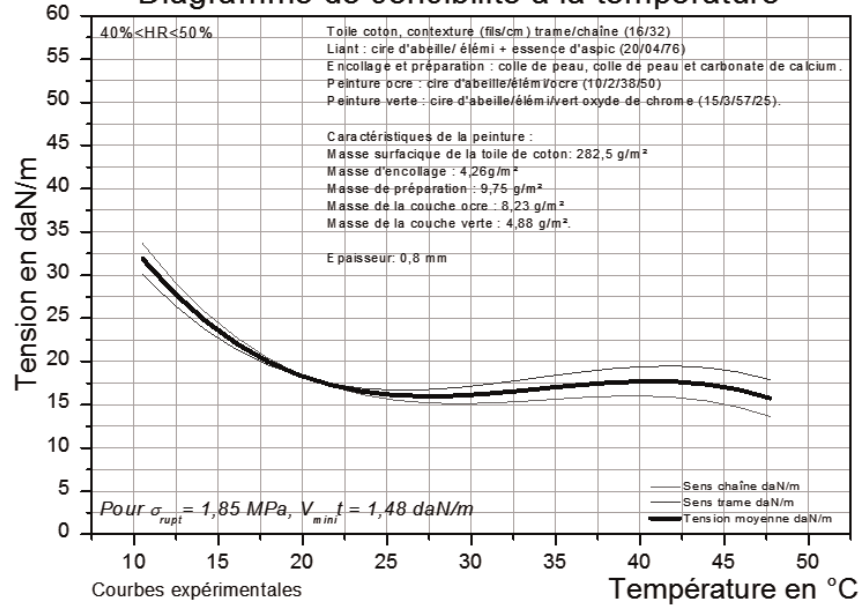



Courbes expérimentales

| Peinture cire/toile coton, Pcire3/t.coton | T | T | Vt |
|---|---|---|---|
| Humidité relative en % | 20 | 20 | |
| Tension en daN/m | 18,25 | 18,25 | 0,00 |



## Peinture: cire/toilede coton, encollée,préparée, Pcire3/t.coton
### Diagramme de sensibilité à la température

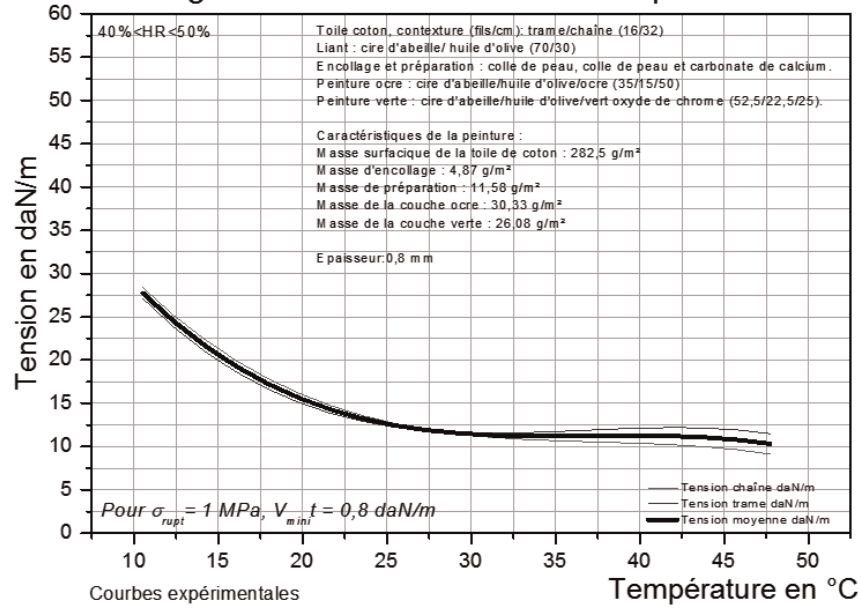



Courbes expérimentales

| Peinture cire/toile coton, Pcire4/t.coton | T | T | Vt |
|---|---|---|---|
| Température en °C | 20 | 20 | |
| Tension en daN/m | 15,46 | 15,46 | 0,00 |

Peinture: cire/toile de coton, encollée, préparée, Pcire4/t.coton

Diagramme de sensibilité à la température

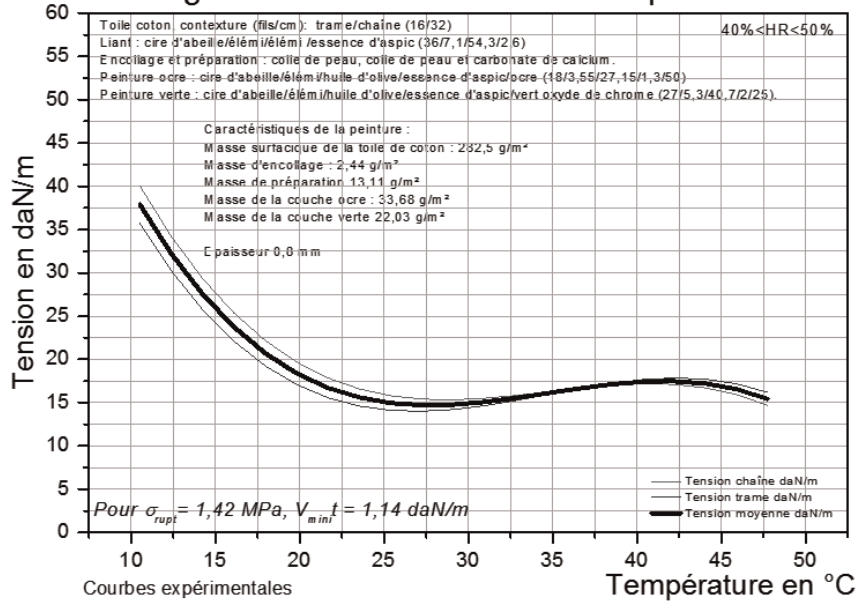



Courbes expérimentales

| Peinture cire/toile coton, Pcire5/t.coton | T | T | Vt |
|---|---|---|---|
| Température en °C | 20 | 20 | |
| Tension en daN/m | 18,17 | 18,17 | 0,00 |



## Peinture: cire/toile de coton, encollée, préparée, Pcire5/t.coton
### Diagramme de sensibilité à la température




Courbes expérimentales

# Annexes

# A1

# Valeurs de contraintes à la rupture de différents filmogènes

| Nom | $\sigma_{rupture}$ MPa | Réf : M. Meck[1]. LARCROA[2] |
|---|---|---|
| **Préparations : gesso, carbonate de calcium /colle animale** | | |
| Gesso #8A | 3,5 | M. Meck |
| Gesso #8B | 2,9 | M. Meck |
| Carbonate de calcium | 2,8 | LARCROA |
| Carbonate de calcium | 2,9 | LARCROA |
| *Moyenne des contraintes de rupture des préparations colle animale* | *3,02* | |
| | | |
| **Blanc de céruse/l'huile** | | |
| Carbonate de plomb basique/ huile de lin | 3,9 | M. Meck |
| Carbonate de plomb basique/ huile de lin raffinée | 4,5 | M. Meck |
| Carbonate de plomb basique/ huile d'œillet pressé à froid | 2,8 | M. Meck |

1. « The structure of paintings and the Mechanical properties of cultural materials » Marion F. Mecklenburg valeurs de contraintes à la rupture ont été évaluées à partir des courbes. Smithsonian Institution. Formation permanente inp 2012.

2. Études LARCROA.

| Nom | $\sigma_{rupture}$ MPa | Réf: M. Meck[1]. LARCROA[2] |
|---|---|---|
| Carbonate de plomb basique/ huile de noix | 3 | M. Meck |
| Carbonate de plomb basique/ huile de noix pressée à froid | 3,5 | M. Meck |
| Carbonate de plomb basique/poppy oil | 2,2 | M. Meck |
| Céruse / huile de lin cuite | 4,5 | LARCROA |
| *Moyenne des contraintes de rupture des préparations céruse* | *3,48* | |
| | | |
| **Différents blancs/l'huile** | | |
| Oxyde de zinc/huile de lin pressée à froid | 5 | M. Meck |
| Oxyde de zinc/huile de lin/litharge | 4 | M. Meck |
| Blanc de titane Winsor and Newton | 3,8 | M. Meck |
| Blanc de zinc/huile de lin purifiée | 4,6 | LARCROA |
| *Moyenne des contraintes de rupture des blancs* | *4,35* | |
| | | |
| **Oxydes de fer/huile.** | | |
| Rouge oxyde de fer Winsor and Newton | 2,2 | M. Meck |
| Oxyde de fer (ocre rouge)/huile de lin pressée à froid | 0.3 | M. Meck |
| Oxyde de fer (ocre rouge)/huile de lin/ litharge | 1,9 | M. Meck |
| Ocre jaune Winsor and Newton | 2,4 | M. Meck |
| *Moyenne des contraintes de rupture des oxydes de fer* | *2,12* | |
| | | |
| **Terres d'ombre et terres de Sienne/ huile** | | |
| Terre d'Ombre brulée Winsor and Newton | 3,5 | M. Meck |
| Terre d'Ombre naturelle Winsor and Newton | 2,5 | M. Meck |

| Nom | $\sigma_{rupture}$ MPa | Réf: M. Meck[1]. LARCROA[2] |
|---|---|---|
| Terre d'Ombre naturelle/huile de lin/ litharge | 4,1 | M. Meck |
| Terre d'ombre brulée Winsor and Newton | 2,5 | M. Meck |
| Terre d'ombre naturelle Winsor and Newton | 1,9 | M. Meck |
| Terre de Sienne brulée Winsor and Newton | 1,8 | M. Meck |
| Terre de Sienne Winsor and Newton | 2,7 | M. Meck |
| *Moyenne des contraintes de rupture des terres de Sienne* | *2,91* | |
| | | |
| **Bleus à l'huile** | | |
| Azurite/huile de lin/litharge | 3,5 | M. Meck |
| Lapis/huile de lin pressée à froid | 1,3 | M. Meck |
| Bleu de Prusse. Huile de lin/litharge | 2,8 | M. Meck |
| Ultramarine Winsor and Newton | 2 | M. Meck |
| Bleu de cobalt Alkyd Winsor and Newton | 5,5 | M. Meck |
| *Moyenne des contraintes de rupture des bleus* | *3,03* | |
| | | |
| **Verts à l'huile** | | |
| Verdegris/huile de lin de lin /litharge | 2,9 | M. Meck |
| Vert de chrome/huile de lin/litharge | 1,5 | M. Meck |
| Malachite/huile de lin/litharge | 5 | M. Meck |
| Peinture de réf verte. | 3 | LARCROA |
| *Moyenne des contraintes de rupture des verts* | *3,1* | |
| | | |
| **Rouges à l'huile.** | | |
| Alizarin madder Winsor and Newton | 0,5 | M. Meck |
| Rouge vénitien Winsor and Newton | 2,7 | M. Meck |

| Nom | $\sigma_{rupture}$ MPa | Réf : M. Meck[1]. LARCROA[2] |
|---|---|---|
| Vermillon Winsor and Newton | 5,2 | M. Meck |
| Rouge de cadmium/huile de lin/litharge | 3,2 | M. Meck |
| Réalgar/huile de lin pressée à froid | 4 | M. Meck |
| Alizarin Crimson Alkyd Winsor and Newton | 5,8 | M. Meck |
| *Moyenne des contraintes de rupture des rouges* | *3,56* | |
| | | |
| Jaunes à l'huile | | |
| Jaune de Naples Winsor and Newton | 2,3 | M. Meck |
| Jaune de cadmium Alkyd Winsor and Newton | 6,2 | M. Meck |
| Jaune de cobalt/huile de lin/litharge | 1,5 | M. Meck |
| Jaune de chrome/huile de lin/litharge | 0,7 | M. Meck |
| *Moyenne des contraintes de rupture des jaunes* | *2,67* | |
| | | |
| Noirs à l'huile | | |
| Noir d'ivoire/huile de lin/litharge | 1 | M. Meck |
| Noire d'ivoire Winsor and Newton | 1,5 | M. Meck |
| *Moyenne des contraintes de rupture des noirs* | *1,25* | |
| | | |
| Peintures acryliques | | |
| Bleu de cobalt Liquitex | 7,5 | M. Meck |
| Blanc de titane Liquitex | 4,67 | M. Meck |
| Bleu outremer Liquitex | 6,27 | LARCROA |
| Rouge oxyde acrylique Lascaux | 7,56 | LARCROA |
| Terre d'Ombre brulée Speedball acrylique émulsion | 5,5 | M. Meck |
| *Moyenne des contraintes de rupture des acryliques* | *6,3* | |

| Nom | $\sigma_{rupture}$ MPa | Réf: M. Meck[1]. LARCROA[2] |
|---|---|---|
| | | |
| **Peintures vinyliques** | | |
| Vermillon – Flashe vinylique | 6,08 | LARCROA |
| | | |
| **Détrempe-gouache** | | |
| Gouache Lascaux-bleu de Prusse | 5,02 | LARCROA |
| | | |
| **Peintures industrielles.** | | |
| Astral-Alkyd Uréthanne- roux | 6,35 | LARCROA |
| Dulux Valentine-rouge madras | 11,63 | LARCROA |
| Astral-Alkyd-vert mélisse | 6,33 | LARCROA |
| | | |
| **Peintures cire** | | |
| Cire abeille blanche pure 100 % | 2,68 | LARCROA |
| Cire abeille blc pure 75 %+pigm.vert oxyde chrome 25 % | 2,98 | LARCROA |
| Cire abeille blc pure 83,4 + Elémi 16,6 % | 1,8 | LARCROA |
| Cire abeille blc pure 62,5 + Elémi 12,5 + pigm 25 % | 1,85 | LARCROA |
| Cire abeille blc pure 70 % + huile d'olive 30 % | | LARCROA |
| Cire abeille blc pure 52,5 + huile d'olive 22,5 % + pigm 25 % | 1 | LARCROA |
| *Moyenne des contraintes de rupture des peintures cire* | *2,06* | |

# A2

# Cadre extensiométrique

La conception du cadre extensiométrique est fruit d'une collaboration entre M. Lepape (Bureau Véritas) et Alain Roche (LARCROA) en 1993.

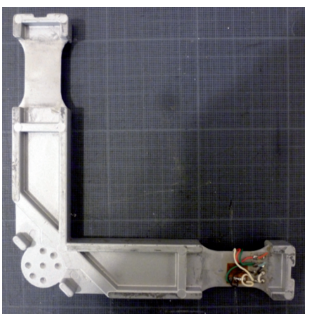
1- Cadre métallique.

Les montants sont en profilés aluminium Extruda 050 (AlMgSiO) protégés de la corrosion par une couche d'alumine obtenue par électrolyse (aluminium anodisé) dans lequel s'encastre et coulisse un profilé en bois Western Hemlock (Tsuga Mertensiana, variété d'épicéa américain) imprégné d'un produit hydrofuge et anti xylophage.

Les montants sont reliés entre eux par quatre équerres d'aluminium. Un système d'écartement des montants à chaque angle permet le réglage de la tension des membranes tendues.

2- Les capteurs

Les capteurs sont réalisés à partir des équerres qui relient les montants du cadre de chaque angle. Elles ont été usinées pour servir de corps d'épreuve.



Le corps d'épreuve est équipé de 2 jauges (jauges rosette en T, grilles indépendantes, 350 Ω) montées en pont de Wheatstone. Elles sont soumises principalement à des déformations de compression. Cependant si le téton d'appui n'est pas rigoureusement dans l'axe de la ligne neutre il y a des effets de flexion. Pour éliminer les effets de flexion les jauges sont collées de part et d'autre du corps d'épreuve. Chaque équerre est transformée en deux capteurs.

3- Amplificateur :

Le coffret MEIRI 2680 propose le conditionnement et l'amplification des signaux tels que : force, température et déplacement etc. Il contient huit cartes électroniques auxquelles sont associées 8 voies reliées aux 8 capteurs de force.

4- Connexion

Sur la face arrière du coffret se situent les connecteurs d'entrée et de sortie. Ce sont des connecteurs WAGO

Toutes les cartes électroniques possèdent :

– Un réglage du gain de la tension en sortie.
– Un réglage d'échelle (affichage de la valeur physique).
– Un réglage du zéro.
– Un cran de calibration étalon.

La sortie est de 10 volts pour l'étendue de la mesure. L'affichage est réglable à volonté en fonction des échelles et des unités physiques désirées.

5- Système informatique.

La carte d'acquisition de données CIO AJ 16 Jr est composée :

– Adresse de base : 300 HEX(768 décimales).
– DMA Channel select : 1&3
– 1/10 MHz JUMPER
– 8/16 Sélecteur de canal.
– Gain/Echelle programmable

# A3

# Calcul des variations minimales de tension des diagrammes de sensibilité

| | ***Calcul des*** $V_{mini}t(daN/m) = \frac{\sigma_{rupt} \times e}{100} \times \frac{1000}{10}$ | | | |
|---|---|---|---|---|
| | *Peintures* | *épais. e mm* | $\sigma_{rupt}$ *MPa* | $V_{mini}t$ *daN/m* |
| | Peintures à la détrempe sur papier | | | |
| 1 | Pc1/p-HR | 0,4 | 3 | 1,2 |
| 2 | Pc2/p-HR | 1,6 | 3 | 4,8 |
| 3 | Pc3/p-HR | 2 | 3 | 6 |
| | Peintures à l'huile sur papier. | | | |
| 4 | Ph1/p-HR | 0,8 | 3,2 | 2,56 |
| 5 | Ph2/p-HR | 1,4 | 3,2 | 4,48 |
| 6 | Ph3/p-HR | 2 | 3,2 | 6,4 |
| 7 | Phc4/p-HR | 0,9 | 3,2 | 2,79 |
| 8 | Phc5/p-HR | 1,4 | 3,2 | 4,48 |
| 9 | Phc6/p-HR | 2,38 | 3,2 | 7,64 |
| | Peintures sur papier marouflé sur toile de lin | | | |
| 10 | Pc3/p/t.lin-HR | 2 | 3,2 | 6 |
| 11 | Phc6/p/t.lin-HR | 2,38 | 3,2 | 7,64 |
| | Peintures acryliques et vinyliques sur papier. | | | |
| 12 | Pacry1,2/p-HR | 0,6/0,6 | 6,27/7,56 | 3,76/4,5 |
| 14 | Pviny1/p-HR | 0,6 | 6,08 | 3,65 |

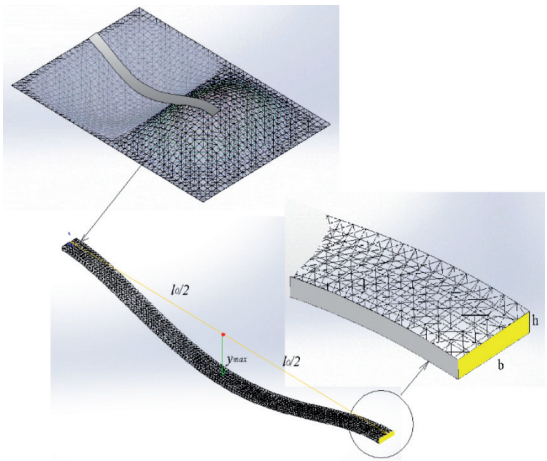
| | ***Calcul des*** $V_{mini}t(daN/m) = \frac{\sigma_{rupt} \times e}{100} \times \frac{1000}{10}$ | | | |
|---|---|---|---|---|
| | *Peintures* | *épais. e mm* | $\sigma_{rupt}$ *MPa* | $V_{mini}t$ *daN/m* |
| | Peintures à la détrempe sur toile de lin | | | |
| 15 | Pc1/t.lin-HR | 0,6 | 3 | 1,8 |
| 16 | Pc2/t.lin-HR | 0,9 | 3 | 2,7 |
| 17 | Pc3/t.lin-HR | 1,5 | 3 | 4,5 |
| | Peintures à l'huile sur toile. | | | |
| 18 | Ph./t.nd.enc C1.verte/C2.rouge-HR | 0,4/0,8 | 3/3,6 | 1,2/2,88 |
| 19 | Ph/t.d.enc C1.verte/C2.rouge-HR | 0,4/0,8 | 3/3,6 | 1,2/2,88 |
| 20/21 | Ph1/t.nd (maigre)- HR/T | 2 | 2,4 | 4,8 |
| 22 | Ph2/t.lin (gras)- HR | 0,6/0,8/4 | 3,5/5/1 | 2,1/4/5 |
| | Peintures acryliques et vinyliques sur toile | | | |
| 23 | Pacry1,2/t.lin-HR | 0,6/0,6 | 6,27/7,56 | 3,76/4,5 |
| 24 | Pviny1/t.lin-HR | 0,6 | 6,08 | 3,65 |
| 25 | Pacry1,2/t.PET-T | 0,6/0,6 | 6,27/7,56 | 3,76/4,5 |
| 26 | Pviny1/t/PET-T | 0,6 | 6,08 | 3,6 |
| | Peintures à la cire sur toile de coton. | | | |
| 27/31 | Pcire1/t.coton-HR/T | 0,8 | 2,98 | 2,38 |
| 28/32 | Pcire2/t.coton-HR/T | 0,8 | 1,85 | 1,48 |
| 33 | Pcire3/t.coton-T | 0,8 | 1,85 | 1,48 |
| 29/34 | Pcire4/t.coton-HR/T | 0,8 | 1,00 | 0,8 |
| 30/35 | Pcire5/t.coton-HR/T | 0,8 | 1,42 | 1,14 |

# A4

# Calcul de la contrainte dans une peinture sollicitée par des vibrations

Dimensions de la peinture 1,80/1,20 m épaisseur 2 mm.

On peut considérer que la peinture se comporte comme une multitude de poutres en flexion juxtaposées. En extrayant une bande de peinture dont on connaît les paramètres géométriques, b = 10 mm, h = 2 mm, $l_0$ = 1 800 mm et mécanique $E_{55\,\%}$ = 1 574 MPa.




On peut calculer :

a)-Le moment d'inertie $I_x = \dfrac{bh^3}{12} = \dfrac{10 \times 2^3}{12} \Rightarrow I = 6{,}6.$

b)-La variation de contraintes pour le transport en camion, accélération maximale a = 0,11 g, fréquence 20 Hz

La déflection $y(l_0/2)$ de l'élément de peinture correspond à l'amplitude maximale due à la vibration. À partir de l'accélération maximale enregistrée pendant le transport on peut la calculer en utilisant la relation suivante : $d = \dfrac{a}{4\pi f^2}$

où f = 20 Hz (1/T = 1/s), accélération a (g) = 9,81 m/s$^2$

$d = \dfrac{0{,}11 \times 9{,}81}{4\pi 20^2} = 2,1510^{-4}$ m = 0,215 mm

La déformée maximale d'une poutre est obtenue à partir de la relation suivante : $y(\frac{l_0}{2}) = -\dfrac{Fl_0^3}{48EI}$ autrement dit $F = -\dfrac{y(\frac{l_0}{2})}{l_0^3} \times 48EI$

La valeur de $F = -\dfrac{0,215}{1800^3} \times 48 \times 1547 \times 6{,}6 = -1,84\ 10^{-5}\ N$

Le moment de flexion maximum

$M_{\max} = \dfrac{Fl_0}{2} = \dfrac{-1,84\ 10^{-5} N \times 1800\ mm}{2} = -0,0166\ N.mm$

La contrainte est donnée par $\sigma = \dfrac{M}{I_x} \times \dfrac{h}{2}$

La contrainte est : $\sigma = \dfrac{-0,0166}{6{,}6} \times 1 = \pm 2,5\ 10^{-3}\ N/mm^2$.

La variation de contrainte : $\Delta\sigma$= 0,005 N/mm$^2$ ou MPa

c)-La variation de contraintes pour le transport en avion, accélération maximale a = 2 g, fréquence 20 Hz

La déflection *y(l₀/2)* de l'élément de peinture

$d = \dfrac{2 \times 9{,}81}{4\pi 20^2} = 3{,}90.10^{-3}\ m = 3{,}90\ mm$

La déformée maximale d'une poutre est obtenue à partir de la relation suivante : autrement dit

$F = -\dfrac{3{,}90}{1800^3} \times 48 \times 1574 \times 6{,}6 = -3{,}34\ 10^{-4}\ N$

Le moment de flexion

$M_{\max} = \dfrac{Fl_0}{2} = \dfrac{-3{,}34\ 10^{-4}\ N \times 1800\ mm}{2} = -0{,}3\ N.mm$

La contrainte est : $\sigma = \dfrac{-0{,}3}{6{,}6} \times 1 = \pm 0{,}045\ N/mm^2$.

Variation de la contrainte : $\Delta\sigma$ = 0,09 *N/mm² ou MPa*

# A5

# Caractéristiques de la peinture de référence

a- Support :
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/m$^2$.
Toile décatie.

b- Encollage
Colle de lapin en plaque à 9 % dans l'eau. Couche appliquée à la brosse : 1.
Quantité de colle déposée : 5,20 g/m$^2$

c- 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/m$^2$

d- Peinture
Une couche d'impression à base d'ocre rouge, suivie de deux couches de vert. Les peintures sont des peintures beaux-arts. La quantité de peinture déposée en trois couches est de 136,72 g/m$^2$.

e-Propriétés mécaniques.
Contrainte à la rupture : préparation maigre 3 MPa, couche d'oxyde de fer 2 MPa, couche verte 3 *MPa*.
Pour épaisseur e = 0,6 mm $V_{mini}t$ = 4,8 daN/m
L'éprouvette a seize ans (vieillissement naturel dans des conditions normales de conservation).

# A6

# Recettes des peintures à la cire

1- Liant : cire d'abeille pure
Encollage et préparation : colle de peau, colle de peau et carbonate de calcium.
Peinture ocre : cire d'abeille/ocre (50/50)
Peinture verte : cire d'abeille/vert oxyde de chrome (75/25).
Contexture toile coton (fils/cm) trame/chaîne (16/32)
Caractéristiques de la peinture :
Masse surfacique de la toile coton : 282,5 g/m$^2$
Masse d'encollage : 3,04 g/m$^2$
Masse de préparation : 12,5 g/m$^2$
Masse de la couche ocre : 23,78 g/m$^2$
Masse de la couche verte : 27,74 g/m$^2$
Contrainte à la rupture : 2,98 MPa.

2- Liant : cire d'abeille/ élémi (83,3/16,7)
Encollage et préparation : colle de peau, colle de peau et carbonate de calcium.
Peinture ocre : cire d'abeille/élémi/ocre (41,7/8,3/50)
Peinture verte : cire d'abeille/élémi/vert oxyde de chrome (62,5/12,5/25).
Contexture toile coton (fils/cm) trame/chaîne (16/32)
Caractéristiques de la peinture :
Masse surfacique de la toile de coton : 282,5 g/m$^2$
Masse d'encollage : 2,89 g/m$^2$
Masse de préparation : 13,88 g/m$^2$
Masse de la couche ocre : 35,36 g/m$^2$
Masse de la couche verte : 29,87 g/m$^2$
Contrainte à la rupture : 1,85 MPa

3- Liant : cire d'abeille/ élémi + essence d'aspic (20/04/76)
Encollage et préparation : colle de peau, colle de peau et carbonate de calcium.
Peinture ocre : cire d'abeille/élémi/ocre (10/2/38/50)
Peinture verte : cire d'abeille/élémi/vert oxyde de chrome (15/3/57/25).

Contexture toile coton (fils/cm) trame/chaîne (16/32)
Caractéristiques de la peinture :
Masse surfacique de la toile de coton : 282,5 g/m$^2$
Masse d'encollage : 4,26 g/m$^2$
Masse de préparation : 9,75 g/m$^2$
Masse de la couche ocre : 8,23 g/m$^2$
Masse de la couche verte : 4,88 g/m$^2$
Contrainte à la rupture : 1,85 MPa

4- Liant : cire d'abeille/ huile (70/30)
Encollage et préparation : colle de peau, colle de peau et carbonate de calcium.
Peinture ocre : cire d'abeille/huile/ocre (35/15/50)
Peinture verte : cire d'abeille/huile/vert oxyde de chrome (52,5/22,5/25).
Contexture toile coton (fils/cm) trame/chaîne (16/32)
Caractéristiques de la peinture :
Masse surfacique de la toile de coton : 282,5 g/m$^2$
Masse d'encollage : 4,87 g/m$^2$
Masse de préparation : 11,58 g/m$^2$
Masse de la couche ocre : 30,33 g/m$^2$
Masse de la couche verte : 26,08 g/m$^2$
Contrainte à la rupture : 1,00 MPa

5- Liant : cire d'abeille/élémi/huile /essence d'aspic (36/7,1/54,3/2,6)
Encollage et préparation : colle de peau, colle de peau et carbonate de calcium.
Peinture ocre : cire d'abeille/élémi/huile/essence d'aspic/ocre (18/3,55/27,15/1,3/50)
Peinture verte : cire d'abeille/élémi/huile/essence d'aspic/vert oxyde de chrome (27/5,3/40,7/2/25).
Contexture toile coton (fils/cm) trame/chaîne (16/32)
Caractéristiques de la peinture :
Masse surfacique de la toile de coton : 282,5 g/m$^2$
Masse d'encollage : 2,44 g/m$^2$
Masse de préparation 13,11 g/m$^2$
Masse de la couche ocre : 33,68 g/m$^2$
Masse de la couche verte 22,03 g/m$^2$
Contrainte à la rupture : 1,42 MPa

# Liste des équations


$\sigma = E.\varepsilon$ (1) ..... 21

$R = \frac{F_{rupt}}{m_{surf}}$ (2) ..... 30

$p_{ah} = p_{as} + p_{ve}$ (3) ..... 45

$HA = \frac{m_{ve}}{m_{as}}$ (4) ..... 46

$HA = 0{,}622(kg/kg) \times \frac{p_{ve}}{p_{atm} - p_{ve}}.$ (5) ..... 46

$\varphi = \frac{p_{ve}}{p_{ve,s}} \times 100$ (6) ..... 47

$HR = \frac{HA}{S} \times 100$ (7) ..... 48

$HA = 0{,}622 \times \frac{HR \times p_{vapsat}}{p_T - (HR \times p_{vapsat})}$ (8) ..... 48

$p_T = p_a + p_v$ (9) ..... 48

$E_{thermique} = m_{air} \times (t_{finale} - t_{initiale})$ (10) ..... 54

$P = \frac{E_{therm}}{s}$ (11) ..... 54

$\sigma(HR) = E(HR).\varepsilon(HR)$ (12) ..... 65

$\sigma(T) = E(T).\varepsilon(T)$ (13) ..... 66

$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \times 100$ (14) ..... 66

$\sigma(HR,T) = E(HR,T).\varepsilon^{cte}$ (15) ..... 67

$t = \frac{F}{L}$ (16) ..... 67

$\sigma = \frac{F}{S}$ *ou* $S = e \times L$ (17) ..... 67

$t(HR,T) = E(HR,T).e(HR,T).\varepsilon^{cte}$ (18) ..... 67

$t(HR,T) = E(HR,T).Cte$ (19) ..... 67

$t(HR,T) = \sigma(HR,T) \times e$ (20) ..... 68

$R(X) = a_0 + a_1X + ..... + a_pX^p = R(x_i) = \sum_{p=0}^{n} a_p x_i^p$ (21) ..... 70

$E = \sum_{i=1}^{N} \left[ y_i - \sum_{p=0}^{n} a_p x_i^p \right]^2$ (22) ..... 70

$E = E_0(1 + 2{,}5CVP + 14{,}1.CVP^2)$ (23) ..... 73

$t = E.e.\varepsilon^{cte}$ (24) ..... 74

$Vt = t_2(HR_2,T_2) - (t_1(HR_1,T_1))$ (25) ..... 80

$\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{mini}$ (26) ..... 84

$\sigma_{moyen} = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{mini}}{2}$ (27) ..... 84

$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{mini}}$ (28) ..... 90

$\sigma Dp = \frac{\sigma_{rupt}}{Kt}$ (29) ..... 91

$\sigma Dp > \Delta\sigma_{peint}$ (30) ..... 92

$\sigma Dp > \Delta\sigma_{peint}(60\,\%/50\,\%)$ (31) ..... 92

$\sigma Dp = \frac{\sigma_{rupt}}{100}$ (32) ..... 92

$t = \sigma \times e$ (20) ..... 93

$\Delta\sigma = \sigma Dp$ (34) ..... 93

$V_{mini}t = \sigma Dp \times e$ (35) ..... 93

$V_{mini}t = \frac{\sigma_{rupt} \times e}{100}$ (36) ..... 93

$Y = 38,6918 + 0,42551X - 0,01463X^2 + 6,6344E^{-5}X^3 - 1,19481E^{-20}X^4$ (37) ..... 114

$t(HR) = 38,6918 + 0,42551HR - 0,01463HR^2 + 6,6344E^{-5}HR^3 - 1,19481E^{-20}HR^4$ (38) ..... 114

$V_{mini}t = \frac{3N.mm^{-2} \times 0{,}8\ mm}{100} = 2{,}4daN/m$ (39) ..... 117

$t^{cte}_{peinture} = E(HR,T) \times e^{cte} \times \varepsilon(HR,T)$ (40) ..... 184

$\varepsilon(HR,T) = \frac{l_{(0)} - l_{(HR,T)}}{l_{(0)}} = \frac{\Delta l_{peinture}}{l}$ (41) ..... 184

$\Delta l_{système\ élastique} = \Delta l_{peinture}$ (42) ..... 184

$t^{cte}_{peinture} = E(HR,T) \times e^{cte} \times \frac{\Delta_{système\ élastique}}{l}$ (43) ..... 184

$F_r = n(L)[F_0 + (K \times \Delta l_{ress})]$ (44) ..... 186

$F_{peinture}(HR,T) = F_r$ (45) ..... 186

$\Delta_{système\ élastique} = \Delta l_{ressort}$ (46) ..... 186

$F_r = n(L)[F_0 + (K \times \Delta_{syst.\ élast})]$ (47) ..... 186

$F_p(HR,T) = E(HR,T) \times \frac{\Delta_{syst\ élast}}{l} \times e \times L$ (48) ..... 186

$\Delta_{lame} = \frac{F_l \times l^3}{3E_r I_y}$ (49) ..... 187

$I = \frac{L \times e^3}{12}$ (50) ..... 187

$\Delta_{lame} = \frac{4F_l \times l^3}{E_{lame} \times L \times e^3}$ (51) ..... 187

$\Delta_{syst.élast.} = \Delta_{lame}$ (52) ..... 187

$F_l = E_{lame} \times \Delta_{syst.\ élast} \times \left(\frac{e_r^3}{4l^3}\right) \times L$ (53) ..... 187

# Bibliographie

## Publications citées dans le texte


Achternkamp P., « Der Rückseitenschutz von Gemälden : Historische und zeitgenössiche Praxis », *Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung*, 5, 1991, p. 17-4.

Ahlen A.T, 1969.

Althöfer H., « Restaurierung moderner Malerei », München, 1985.

Berger G.A., Russell W.H., « The behavior of canvas as a structural support for painting, preliminary repport », *Science and technology in the service of conservation*, IIC, p. 139, 145, London, 1982.

Berger G.A, Russell W.H., « The new stress tests on canvas paintings and some of their implication on the preservation of paintings », Comité de Conservation de l'ICOM, 7e Réunion Triennale, Copenhague, (2, 7), 1-9. 1984.

Biney T., « La protection climatique en question », Mémoire de Maîtrise des Sciences et Techniques en conservation restauration des Biens Culturels, Sept. 2004.

Bucklow S., « The description of craquelure patterns », *Studies in Conservation*, Vol. 42, p. 129-140, 1997.

Bucklow S., « The description and classification of craquelure », *Studies in Conservation*, Vol. 44, p. 223-244, 1999.

Capriotti G., Iaccarino Idelson A., « Tensionamento dei dipinti su tela, La ricerca del valore di tensionamento », Nardini Editore, 2004.

Chêne M., Drisch N., *La cellulose*, Paris, PUF, coll. « Que sais-je ? », 1967.

Colville G.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, 146-150, 1982.

Conti W. Tassinari E., « Misura di creep su una tela di rifodero trattata con collab », SI, San Donato, 1971.

Conti W., Tassinari E., « Analysis of creep curves on lining canvas », ICOM 3th triennial meeting Madrid, 1972.

Corbeil M.C, Siroi J., « A note on a Modern Lead White, also known as Synthetic Plumbonacrite », *Studies in Conservation*, Vol., 52, p. 281-288, 2007.

Dillon C.E., Lagalante A.F., Wolbers R.C., « Acrylique emulsion paint films : The effet of solution pH, conductivity, and ionic strength on swelling and surfactant removal », *Studies in Conservation*, Vol. 59, no1, p. 52-62, 2014.

Ehhardt, D. Tumosa C. Mecklenburg M., « Applying science to the question of museum climate », Museum Microclimates, T. Padfield & K.Borchrsen sds National Museum of Denmark, 2007.

Elber W., « Fatigue crack closure under cyclic tension », *Engineering Fracture Mechanics*, 2, p. 445-476, 1970.

Guth E., « Theory of filler reinforcement », *J. Appl. Phys*., 16 : 20, 1945.

Guth E., Gold O., « On the hydrodynamical theory of viscosity of suspensions », *Phys. Rev*., 53 :322, 1938.

Hackney S., « The Causes of Deterioration of Paintings and their Supports and Preventive Conservation without Lining », Corso di aggiornamenti-ICCROM, p. 33, p, 51- 1989.

Hedley G., « The stiffness of lining fabric : theoretical and practical considerations », Comité de Conservation de l'ICOM, 6 Réunion Triennale, Ottawa, p. 2-13, 1981.

Keck S. « Mechanical alteration of the paint film », *Studies in Conservation*, Vol. 14, p. 9-30, 1969.

May R., « Regard sur la conservation préventive en France », *Lettre de l'OCIM*, Décembre 2011.

Mecklenburg M., « Determining the Acceptable Ranges of Relative Humidity and Temperature in Museum and Galleries », Smithsonian Museum conservation Institute, 2007.

Michalski S., « A control module for relative humidity in display cases », *Studies in conservation*, Vol. 27, p. 28-31, 1982.

Michalski S., « Humidity : a discussion of correct/uncorrect values », 10Th Ttriennal Meeting ICOM CC, p. 624-629, 1993.

Nicolaus K., « Manuel de restauration des tableaux », Könemann, 1999, p. 72-77, p. 113-116.

Plenderleith H.J. Philippot P., « Climatologie et conservation dans les musées », *Museum*, XIII, 4, 1960.

Roche A., « À propos de la restauration de l'art moderne et contemporain », *Conservation Restauration,* n°2, p. 18-19,1985.

Roche A., « Notes sur les origines du vieillissement prématuré des peintures contemporaines », *Conservation Restauration*, n° 7-8, p. 22-24, 1987.

Roche A., « Influenza del'incollaggio e della preparazione di una tela sull' irrigidimento e sull'ortotropia », 6th Biennal International Congress CESMAR 7 Università degli Studi de Parma, 2012.

Roche A., Desserne L. « The consolidation of flaking gouache on japanese paper », *Restaurator*, 23, p. 256-269, 2002.

Roche A., « Comportement mécanique des peintures à la colle et à l'huile sur papier », *Techné*, n° 13-14, 2001.

Roche A., Doucet S., « Propriétés mécaniques des peintures à la cire et à l'encaustique », p. 20, 24, *Techné*, n°23, 2006.

Ronca G., « The prediction of stress relaxation and incipient instability in lining canvas », Comité de Conservation de l'ICOM, 5e Réunion Triennale, Zagreb, 2,11, p. 1-9. 1978.

Silvester G., Burnstock A., Megens L., Learner T., Chiari G., Jan van den Berg K., « A cause of water sensibility in moderne oil paint films- Formation of magnesium sulphate », *Studies in Conservation*, 2014, Vol. 59 n°1, p. 38-51.

Thomson G., « The museum environment », London, Butterworths, 1978.
Young C. Hibberd R., « Biaxal tensile testing of painting on canvas », *Studies in conservation*, Vol. 44, p. 129-144, 1999.

## Publications « climat, musées, conservation préventive »

Casanovas L.E., Seruya A.I., « Climate control in a 16th century building in a south of Portugal », *ICOM Committee for conservation*, Vol. 1, p. 27-30, 1999.
Cassar M., Blades N., Oreszczyn T., « Air pollution level in air-conditioned and naturally ventiled museums : a pilot study », *ICOM Committee for conservation*, Vol. 1, p. 31-37, 1999.
Colson I., Boyer F., « De l'intérêt de l'étude climatique d'un bâtiment pour la conservation des collections », *Situ*, *revue du patrimoine*, nº 19, 2012, p. 2-20.
Drummond M., Almada M., « Pratical climate control at the Museu Miniero, Belo Horizonte, Brazil : a cheap and simple solution », *ICOM Committee for conservation*, Vol. 1, p. 42-45. 1999.
Eremin K., Tate J., « The Museum of Scotland : Environnement during object installation », *ICOM Committee for conservation*, Vol. 1, p. 46-51, 1999,
Erhardt D. and Mecklenburg M.F, « Relative humidity re-examined », *Studies in conservation*, Vol. 39, p. 32-38, 1994.
Erhardt D., Tumosa C.S., Mecklenburg M.F., « Applying science to the question of museum climate », in T. Padfield & K.borchersen (eds), *Museum Microclimates*, National Museums of Denmark, 2007, p. 11-18.
Hughes J., Pearson C., Daniel V., Cole I., « Monitoring of environmental conditions in a severe climat : How this can assist in development of conservation strategies for historic building and artefacts in Antarctica », *ICOM Committee for conservation*, Vol. 1, 1999, p. 57, 64.
Michalski S., « Museum climate Global climate doing the right thing for both », *Reflection on Conservation- ICC*, 2011.
Padfield T., « On the usefulness of water absordent materials in museum walls », *ICOM Committee for conservation*, Vol. 1, p. 70-76, 1999.
Thickett D., Fletcher P., Calver A., Lambarth S., « The effect of air tightness on RH buffering and control », in T. Padfield & K.borchersen (eds), *Museum Microclimates,* National Museums of Denmark, p 245-251. 2007.
Yamauchi S., Ohya T., Sakayori E., Koubayasi S., Takeuchi Y., Hanada T., Miura S., « Humidity control for display cases in museum using a solid-state water removal device », *ICOM Committee for conservation*, Vol. 1, p. 119-122, 1999.

## Publication « Châssis à tension auto-régulée et comportement mécanique des peintures »

Ciappi O., Ciatti M., « La conservazione dei dipinti su tela : esperienze e innovazioni per dipinti di grandi dimensioni », *OPD Restauro*, nº 8, p. 159-164, 1996.

Del Zotto F., « Self-expansion stretcher for two-sided painting : floating auto-adapting suspension system », Comité pour la conservation de l'ICOM, Vol. 1, p 338-345, 2002.

Lahoda T., Lehmann Banke P., Henriksen KM., « An alternative adjustable aluminium spring stretcher for a large painting », *Comité pour la conservation de l'ICOM*, Vol. 1, p. 360-362, 2002.

Ligterink F. Di Pietro G., « The effect of the wooden stretcher on the RH response of backboard protected canvas painting », *ICOM Committee for conservation*, Vol. 1, p. 70-76, 1999.

Mecklenburg M., « The structure of paintings and the Mechanical properties of cultural materials », Smithsonian Institution, Formation permanente inp 2012.

Roche A., « Comportement mécanique des peintures à la colle et à l'huile sur papier : condition de conservation », *Techné*, p. 56-62 (2001).

Roche A., « Comportamento meccanica dei dipinti su tela. Valutazione della stabilità meccanica alle variazioni di umidità e temperatura », *Actes du congrès de Thiene CESMAR* 7, p. 61, 72, Italie 2004 (italien).

Roche A., « Comportement mécanique des peintures sur toile : Évaluation de la stabilité mécanique aux variations d'humidité et de température », *Actes de la 1re conférence internationale sur la conservation des peintures,* Université polytechnique de Valence p. 189, 212, Espagne, 2005 (français).

## Ouvrages généraux

Avy J., « La peinture à l'encaustique, la technique des anciens pour les peintres d'aujourd'hui », coll. « Garance », Fleurus, Paris, 1992.

Bergeaud C., Hulot J.F., Roche A., « La dégradation des peintures sur toile ; méthode d'examen des altérations », École Nationale du Patrimoine, Paris, 1997.

Carpentier P, « Notes sur la peinture à la cire cautérisée ou procédé encaustique d'après les laborieuses recherches de Paillot de Montabert », H. Loones, Paris, 1875.

Cennino Cennini, « Livre de l'art ou traité de la peinture », vers 1370, Edition de Nobele Libraire-éditeur, Paris.

Delcroix G., Havel M. : « Phénomènes physiques et peinture artistique », Edition EREC, Puteaux, 1988.

De Turquet de Mayenne, « Pictoria, sculptoria et quae sulbalternarum artium », 1620. Réédition. Vibert J. G., « La science de la peinture », Paris, 1902.

Horsin Déon S., *De la conservation et de la restauration des tableaux,* Paris 1851- réédition Gutenberg Reprint.

Iselt P, Arndt U. CauchepinJ.L., « Manuel de l'humidification de l'air » PYC Edition Livres 1997.

Majault C., « Mémoire sur la peinture à l'encaustique et sur la peinture à la cire », Minkoff Reprint, Genève, 1772.

Mérimée J.F.L., *De la peinture à l'huile*, Paris 1830 – Réédition.

Roche. A., *Comportement mécanique des peintures sur toile : Dégradation et prévention*, Paris, CNRS Éditions, 2003.
Rostain E., « Rentoilage et transposition des tableaux », Edition Erec, Puteaux, 1981.
Verdu J., « Vieillissement des plastiques », Afnor technique, 1984.

# Index


A
activité de l'eau : 127
agents biologiques : 11
agents physico-chimiques et chimiques : 11
air humide : 43, 45-49, 51, 136
Analyse par Eléments Finis : 88

B
brassage de l'air : 176

C
cadre extensiométrique : 13, 68-69, 145, 158, 187, 249
châssis à tension auto-régulée : 179, 183, 187, 190-192, 195
châssis standard : 69, 103, 160, 187, 190
coefficient de dilatation thermique linéaire ($\alpha$) : 18
coefficient de gonflement linéaire : 17
comportement biaxial des peintures : 12
comportement mécanique : 12-13, 19, 22-23, 32, 43, 65-66, 68, 73, 77, 82, 123, 150, 156, 169, 265
concentration de contraintes : 24, 83
conditions de conservation : 13, 43, 56, 92, 104, 110, 113, 116-118, 141, 143, 149-150, 152, 154-155, 160, 162-164, 167, 172-174, 188-189, 195, 197
conservation du patrimoine : 9, 85, 198
conservation et la restauration : 9
contamination biologique : 127, 136
contraction linéaire : 18
craquelure : 11, 19, 21, 35, 105-109, 194, 197, 263
craquelures mécaniques : 28, 192, 194
critères de qualité : 22

D
décatissage artisanal : 156
défaut : 34-36, 87, 90, 98, 135, 197
déformation à la rupture : 19
des mécanismes de dégradation : 9
détrempe : 78-79, 117, 128-129, 132, 134, 144-145, 147, 151-154, 158, 160, 203, 217, 251-252
diagramme de sensibilité humidité/température : 68
diagramme psychrométrique : 49, 77
diagrammes de sensibilité : 75, 77, 79, 113, 116, 119, 128, 130, 133-135, 141, 143, 145, 148-149, 154, 158, 161, 166, 168-171, 176, 182, 199
dilatation linéaire : 18
domaine élastique : 19
domaines viscoélastique ou viscoplastique : 19
dos de polycarbonate : 182-183
dos protecteur : 177-178, 181-182, 190-191
droite de régression linéaire : 114
durée de vie de l'œuvre : 98

E
effets du temps : 103
empâtement : 37-38, 41-42, 95, 144
encollage : 26, 144, 148-150, 161, 165, 170, 257-258
enduction d'une toile : 27
essai de traction : 19, 22, 29, 88
essais de fatigue-endurance : 83
essais mécaniques : 19
état de dégradation : 11
état viscoplastique : 41
état vitreux : 39, 41

F
facteur de concentration de contraintes Kt : 87, 91
fissure : 34-37, 98, 105, 107-108, 197
fluage : 39, 188
flux des visiteurs : 55, 176, 194
fonction polynomiale : 71, 75, 81, 114, 116, 131, 182, 198
fonctions structurelles : 142
forces de friction : 23-25
fréquences : 101

G
gonflement linéaire : 17
gouaches : 133-134, 141, 144, 173

H
humidité absolue : 46, 48, 50, 63
humidité relative *(HR)* : 48
hydrophiles : 51-52, 65, 78, 145, 151
hydrophobes : 32, 41, 65, 78, 151, 166

I
Interventions alternatives : 131
isolation thermique : 180, 183
isothermes d'absorption : 51
itinérance : 173

L
la teneur en eau : 55, 62-63, 135, 164, 181
les ressort à spirales : 185
limite d'élasticité : 19
limite d'endurance : 83-86, 91-93, 103, 118, 133, 197-198
loi d'additivité : 68, 71-72

M
marouflage : 151-152
matériau composite : 18, 87
matériaux hydrophiles : 17, 51, 65, 78, 113, 148, 152, 158, 162, 181
matériaux hydrophobes : 18
mécanique des milieux continus : 19
mesures bi axiales : 12-13
module d'élasticité : 26
module d'élasticité longitudinale : 19

N
non-tissés : 32-34

O
objet à deux dimensions : 17
orthotropes : 29, 32, 80
orthotropie : 30

P
papier : 29-30, 34, 51, 53, 69, 72-73, 79-80, 117, 122, 128-130, 132-135, 142-145, 147-156, 158, 165, 168, 173, 203, 207, 213, 215, 251, 264, 266
papiers : 29-32, 34, 51, 68, 73, 80, 128, 141-143, 152
peinture à l'huile : 39, 69, 77, 79, 82, 86, 92, 98, 103, 105, 109, 113, 117-118, 148, 152-153, 160-162, 164-165, 178-179, 187-191
peinture à la cire : 79-80, 168-170
Peinture acrylique : 154, 165, 258
Peinture vinylique : 154, 165, 258
peintures à la caséine : 144
peintures à la colle : 53, 144-145, 147, 264, 266
point de rosée : 46, 48-49
préparation grasse : 161-165
préparation maigre : 161-162, 164-165
pression atmosphérique : 44, 46, 48-49
Pression de vapeur : 45
propagation de la craquelure : 108
propriétés physiques : 17, 169

Q
qualité de l'air : 45, 56

R
régulation climatique : 53, 178
réseau de craquelures : 108, 110, 184, 188, 192, 194-195, 197
résistance à l'endurance : 83
résistance à la rupture : 19, 21, 25, 83, 93-94, 104
résistance au dépliement : 23, 25

ressorts à lame : 185-186
retrait linéaire : 17
rigidité : 18, 22-23, 26, 192
risques de dégradations mécaniques : 116, 128-132, 137, 147, 149, 173, 176, 183
rupture cohésive : 34, 105

S
sas : 174-176
saturation *(S)* : 47-48
sur-contraintes : 28, 98
surtensions : 99, 188, 192
système élastique : 184-187

T
techniques picturales : 11, 22, 123, 141, 173, 198-199
température de rosée : 48
teneur en eau : 17
teneur en humidité : 46
Teneur en Humidité à l'Equilibre, T.H.E : 51
tension : 13, 22-23, 25, 28, 35, 37-38, 66, 68-69, 72-73, 77-78, 80, 82, 87, 90, 93, 95, 98, 103, 105, 107-109, 113-114, 119, 128-131, 133, 143-145, 148-150, 156, 161, 163-164, 167, 170-171, 177, 184, 187-192, 198, 264
tension de vapeur : 45
tensions constantes : 189
traitement de l'air : 11, 55-56, 61, 118, 176
transition vitreuse : 41

V
vapeur d'eau : 43-49, 51, 54, 63
variation de volume : 18
variation minimale de tension : 83, 190
variations de l'humidité : 11, 55, 166, 177
vibrations : 86, 99-103, 126, 176-177

# Table des illustrations

Figure 1 : Courbe de traction de la peinture de référence. (Nexigen). 20
Figure 2 : Courbe de traction : domaine de sollicitation de la peinture. (Nexigen). 20
Figure 3 : Éprouvette après l'essai de traction. 22
Figure 4 : Modèle d'un fil de toile. 23
Figure 5 : Analyse des contraintes dans un fil lors de son dépliement. 23
Figure 6 : Modèle d'entrecroisement ou de maille d'une toile. 24
Figure 7 : Distribution des contraintes dans une maille sollicitée en traction. 24
Figure 8 : Structure des fibres de lin. 25
Figure 9 : Structure des fibres de polyester. 26
Figure 10 : Modèle d'un élément de toile encollée. 26
Figure 11 : Modélisation d'une toile encollée et enduite à partir d'une micro section. 27
Figure 12 : Toile enduite d'une préparation au module élevé. 28
Figure 13 : Toile enduite d'une préparation au module faible. 29
Figure 14 : Arches 88 300. 29
Figure 15 : Velin cuve bfk rive 270. 29
Figure 16 : Courbes de traction d'un papier Fabriano. 30
Figure 17 : Filaments d'un non-tissé de polyester. 32
Figure 18 : Courbes de traction d'un non-tissé de polyester. 32
Figures : La première micro-section montre des bulles, 19, la seconde une inclusion 20 et la dernière des matières molles, 21. 34
Figure 22 : Distribution des contraintes autour d'un défaut constitué d'un vide. 35
Figure 23 : Distribution des contraintes autour d'un défaut constitué d'une particule molle. 36
Figure 24 : Distribution des contraintes autour d'un défaut constitué d'une particule dure. 36
Figure 25 : Micro section d'une peinture montrant la propagation d'une fissure. 37
Figure 26 : Modélisation d'un empâtement d'après une peinture d'Olivier Debré. 38
Figure 27 : Distribution de contraintes autour d'un empâtement a- sans contrainte, b-sous contrainte 38
Figure 28 : Détail de la face et du revers d'une peinture d'Eugène Leroy. 39

Figure 29 : Fluage de la peinture de référence ..... 40
Figure 30 : Représentation de la déformation d'un empâtement d'une peinture acrylique sous l'effet de la chaleur. ..... 41
Figure 31 : Courbe de l'évolution de la déformation d'un empâtement en fonction de la température. ..... 42
Figure 32 : Courbe de saturation de l'eau. ..... 47
Figure 33 : Diagramme psychrométrique. ..... 49
Figure 34: Utilisation d'un diagramme psychrométrique ..... 50
Figure 35 : Isothermes d'absorption. ..... 51
Figure 36 : Avis et avertissements. ..... 55
Figure 37 : Plan du LaM : valeurs de températures et humidités. ..... 57
Figure 38 : Plan du musée de Magritte Bruxelles : les valeurs de températures et humidités. ..... 59
Figure 39 : Plan de la salle d'exposition du musée Marmottant : valeurs de températures et humidités. ..... 61
Figure 40 : Graphique d'enregistrement de l'humidité et température. ..... 62
Figure 41 : Tension d'une peinture ..... 67
Figure 42 : Cadre extensiométrique ..... 69
Figure 43 : Construction expérimentale d'un diagramme de sensibilité. ..... 70
Figure 44 : Détermination du degré du polynôme de la fonction. ..... 71
Figure 45 : Distribution des forces internes dans une peinture composée de 3 couches. ..... 72
Figure 46 : Distribution des forces internes dans une peinture 2D. ..... 72
Figure 47 : Diagrammes de sensibilité de peintures de CVP différentes. ..... 76
Figure 48 : Diagrammes de sensibilité de peintures d'épaisseurs différentes. ..... 76
Figure 49 : Diagrammes théorique et expérimental d'une même peinture. ..... 77
Figure 50 : Diagrammes de sensibilité de deux peintures. ..... 78
Figure 51 : Diagrammes de sensibilité de deux peintures. ..... 79
Figure 52 : Diagramme de sensibilité à la température d'une peinture à la cire. ..... 80
Figure 53 : Diagramme de sensibilité à l'humidité d'une peinture à l'huile. ..... 81
Figure 54 : Suivi des variations de tension dans une peinture. ..... 82
Figure 55 : Fatigue mécanique : fonction sinusoïdale. ..... 84
Figure 56 : Diagramme de fatigue ou courbe de Wöhler, courbe SN. 85
Figure 57 : Diagramme de fatigue de la peinture de référence ou courbe SN ..... 86
Figure 58 : Micro-section avec une inclusion et deux gros cristaux ..... 88
Figure 59 : Micro-section avec un agglomérat. ..... 88

Figure 60 : Impureté dans une des couches de la peinture. ..... 88
Figure 61 : Numérisation et chargement d'une micro-section. ..... 90
Figure 62 : Détail d'un tracé ..... 90
Figure 63 : Analyse d'une courbe de variations de tension provoquées par les variations d'humidité relative. ..... 99
Figure 64 : Enregistrement des vibrations provoquées lors d'un transport d'une œuvre dans un camion. ..... 100
Figure 65 : Enregistrement des vibrations provoquées lors d'un transport d'une œuvre dans un avion. ..... 101
Figure 66 : Déformation d'une membrane induite par les différents modes. ..... 102
Figure 67 : Contraintes induites dans la membrane durant les vibrations. ..... 102
Figure 68 Courbe théorique de la résistance à la rupture d'un matériau polymérique. ..... 104
Figure 69 : Mécanisme de rupture cohésive d'une peinture ..... 105
Figure 70 : Ensemble des photos pris au cours du développement de la craquelure. ..... 106
Figure 71 : Évolution de la longueur de la craquelure avec le nombre de cycles. ..... 107
Figure 72 : Réseau de craquelures ..... 108
Figure 73 : Sensibilité à l'humidité d'une peinture à l'huile sur toile craquelée. ..... 109
Figure 74 : Transformation des variations de HR en tensions ..... 115
Figure 75 : Exploitation du graphe des tensions ..... 115
Figure 76 : Exemple d'un détail d'une peinture Foujita, 1928. ..... 116
Figure 77 : Recherche des meilleures conditions de conservation sur une courbe de sensibilité à l'humidité d'une peinture à la colle ..... 117
Figure 78 : Recherche des meilleures conditions de conservation sur une courbe de sensibilité à l'humidité d'une peinture à l'huile. 118
Figure 79 : Représentation de la fragilité d'une œuvre. ..... 124
Figure 80 : Positions relatives des deux peintures sur le diagramme. 125
Figure 81 : Diagramme des risques de bio contamination. ..... 128
Figure 82, 83 : Positionnement des recommandations climatiques et évaluation des variations de contrainte. ..... 129
Figure 84 : Courbes d'humidité relative des quatre enregistreurs. ..... 133
Figure 85, 86 : Détermination des conditions climatiques des détrempes sur papier et papier marouflé. ..... 134
Figure 87, 88 : Détermination des conditions climatiques des peintures à l'huile sur papier marouflé et sur toile. ..... 135
Figure 89 : Corrélation humidité, température, localisation de la zone de tolérance et du seuil de contamination. ..... 138
Figure 90 : Travaux de remise aux normes climatiques de la salle de la cuverie, doc Fondation Clément. Accord de la Fondation Clément pour la publication des photos. ..... 139

Figure 91 : Extrait du « Standard facility report » de la cuverie. ..... 140
Figure 92 : Comportement à l'humidité de deux papiers. ..... 143
Figure 93 : Comportement à l'humidité de trois peintures à la détrempe. ..... 147
Figure 94 : Comportement à l'humidité de trois peintures à l'huile sur papier non encollé. ..... 149
Figure 95 : Comportement à l'humidité de trois peintures à l'huile sur papier encollé. ..... 150
Figure 96 : Comportement à l'humidité d'une détrempe sur papier marouflé sur toile. ..... 153
Figure 97 : Comportement à l'humidité d'une peinture à l'huile sur papier marouflé sur toile. ..... 153
Figure 98 : Comportement à l'humidité des peintures acryliques et vinyliques sur papier. ..... 155
Figure 99 : Comportement à l'humidité d'une toile non décatie. ..... 156
Figure 100 : Comportement à l'humidité d'une toile décatie. ..... 157
Figure 101 : Rideau de scène du ballet « Parade », Peinture à la colle sur toile. Collection Centre Pompidou, Paris. Musée national d'art moderne – Picasso Pablo © Succession Picasso. ..... 157
Figure 102 : Diagrammes de sensibilité des peintures à la détrempe sur toile non décatie. ..... 158
Figure 103 : Comportement à l'humidité de toiles préparées. ..... 161
Figure 104 : Diagramme de sensibilité d'une peinture à l'huile sur préparation maigre. ..... 162
Figure 105 : Enduction d'une préparation à la céruse Lefranc bourgeois 1981 ..... 163
Figure 106 : Diagramme de sensibilité d'une peinture à l'huile sur préparation grasse. ..... 164
Figure 107 : Diagramme de sensibilité à la chaleur d'une peinture à l'huile sur préparation maigre. ..... 165
Figure 108 : Diagrammes de sensibilité des peintures vinyliques et acryliques sur toile de polyester. ..... 166
Figure 109 : Diagrammes de sensibilité des peintures vinyliques et acryliques sur toile de polyester. ..... 167
Figure 110 : Diagrammes de sensibilité à l'humidité des peintures à la cire sur toile de coton. ..... 170
Figure 111 : Diagrammes de sensibilité des peintures à la cire sur toile de coton. ..... 171
Figure 112 : Préfiguration du musée idéal pour la conservation des œuvres. ..... 175
Figure 113 : Montage d'une protection de carton mousse au dos d'une peinture à l'huile avec un enregistreur. ..... 179
Figure 114 : Montage d'une protection de polycarbonate au dos d'une peinture à l'huile avec un enregistreur ..... 179
Figure 115 : Enregistrement de la température extérieure et des 2 dos protecteurs. ..... 180

Figure 116 : Enregistrement de l'humidité extérieure et des 2 dos protecteurs. ..... 181
Figure 117 : Variations de tension d'une peinture non protégée et protégée. ..... 182
Figure 118 : Dos protecteur de polycarbonate au revers d'une peinture de Miro ..... 183
Figure 119 : Représentation schématique d'un système de régulation des tensions. ..... 185
Figure 120 : Ressort à spirales : système EQUILIBRARTE ..... 185
Figure 121 : Ressort à lame système STAR. ..... 186
Figure 122 : Variations de tension d'une peinture à l'huile tendue sur 3 types de châssis. ..... 188
Figure 123 : *Vt* d'une peinture à l'huile sur 3 types de châssis soumise à un climat instable ..... 190
Figure 124 : *Vt* d'une peinture à l'huile avec dos protecteur et tendue sur châssis à tension auto-régulée soumise à un climat instable. 191
Figure 125 : Ocre pâle de Loire (FNAC) état de conservation en 2002. 192
Figure 126 : Grande Galerie de la Mairie de Tours. ..... 193
Figures 127, 128 : Réseaux de craquelures en 2002 et 2015 ..... 194
Figure 129 : Réseaux de craquelures en 2015. ..... 195

# Table des matières

**Préface** ..... 5
**Remerciements** ..... 7
**Avant-propos** ..... 9
**Introduction** ..... 11

PARTIE I

I- Propriétés des matériaux ..... 17
I-1 Propriétés physiques ..... 17
*I-1-1 Gonflement, retrait linéaire* ..... 17
*I-1-2 Dilatation, contraction linéaire.* ..... 18
*I-1-3 Relations structures propriétés* ..... 18
I-2 Propriétés mécaniques ..... 18
*I-2-1 Élasticité d'une peinture sur toile à humidité et température constantes* ..... 19
*I-2-2 Rôle des toiles préparées dans le comportement des peintures* ..... 22
*I-2-3 Déformation d'un fil extrait d'une toile* ..... 23
*I-2-4 Élasticité des toiles* ..... 23
*I-2-5 Déformabilité des toiles* ..... 25
*I-2-6 Enduction d'une toile* ..... 27
*I-2-7 Caractéristiques des papiers et non tissés* ..... 29
*I-2-8 Influence des défauts dans les préparations et matières picturales* ..... 34
*I-2-9 Influence de l'épaisseur de la matière picturale sur les contraintes* ..... 36
*I-2-10 Fluage des peintures* ..... 39

II- Climat ..... 43
II-1 Propriétés de l'air ..... 43
*II-1-1 Composition de l'air* ..... 43
*II-1-2 État gazeux, état vapeur* ..... 44
*II-1-3 Pression atmosphérique* ..... 44
*II-1-4 Pression de vapeur ou tension de vapeur de l'eau* 45
*II-1-5 Air humide : mélange de gaz et de vapeur d'eau* ..... 45
II-2 Caractérisation de l'air ..... 45
*II-2-1 Teneur en humidité* (x) *ou humidité absolue* (HA) 46
*II-2-2 La saturation* (S) ..... 47
*II-2-4 Température de rosée ou point de rosée.* ..... 48

*II-2-5 Méthodes de calcul des paramètres climatiques* ..... 49
*II-2-6 Équilibre hydrique entre air humide et matériaux hydrophiles* ..... 51
II-3 Le climat dans les lieux de conservation des peintures d'art moderne et contemporain ..... 55
*II-3-1 Cas d'un bâtiment des années 1980 avec une extension contemporaine* ..... 57
*II-3-2 Cas de réhabilitation et de modernisation d'un ancien bâtiment.* ..... 58
*II-3-3 Cas d'une exposition temporaire installée au Musée Marmottant* ..... 60
*II-3-4 Prêt d'une œuvre pour une exposition dans une salle de musée* ..... 61

III- Interactions du climat sur les peintures ..... 65
III-1 Sensibilité des peintures à l'humidité et à la température ..... 65
*III-1-1 Construction expérimentale d'un diagramme de sensibilité* ..... 68
*III-1-2 Construction théorique d'un diagramme de sensibilité* ..... 71
*III-1-3 Validation des diagrammes théoriques* ..... 77
*III-1-4 Interprétation et utilisation d'un diagramme de sensibilité* ..... 77
III-2 Variations minimales de tensions $V_{mini}t$ ..... 83
*III-2-1 Fatigue mécanique des matériaux* ..... 84
*III-2-2 Méthode de détermination de la limite d'endurance d'un film de peinture* $\sigma$Dp ..... 85
*III-2-3 Relation entre facteur de concentration de contrainte* Kt *et contrainte à la rupture* $\sigma_{rupt.}$ ..... 87
*III-2-4 Recherche d'une forme simplifiée de la limite d'endurance des films de peinture* ..... 91
*III-2-5 Détermination de la variation minimale de tensions* $V_{mini}t$ *à partir de la contrainte à la rupture de la peinture* ..... 93
*III-2-6 Classement des peintures en fonction de leur contrainte à la rupture* ..... 93

IV- Dégradation des peintures ..... 97
IV-1 Durée de vie des matériaux ..... 97
IV-2 Facteurs de dégradation mécanique des peintures ..... 98
*IV-2-1 Les variations d'humidités ou de températures* ..... 98
*IV-2-2 Les vibrations* ..... 99
*IV-2-3 Le temps, la durée d'exposition* ..... 103
V-3 Propagation d'une craquelure dans le cas d'une étude expérimentale ..... 105
*IV-3-1 Dispositif expérimental* ..... 105

*IV-3-2 Interprétation des résultats* ..... 106
*IV-3-3 Sensibilité à l'humidité d'une peinture dégradée*. 109

## PARTIE II

V- Utilisation d'un diagramme de sensibilité ..... 113
V-1 Méthode d'évaluation des tensions dans une peinture ..... 113
IV-2 Prévision des conditions climatiques de conservation des peintures ..... 116

VI- Principes de conservation des peintures ..... 121
VI-1 La documentation technique et technologique ..... 122
VI-2 Classement des peintures en fonction de leur comportement mécanique et de leur fragilité ..... 123
VI-3 Les mouvements des œuvres modernes et contemporaines 126
VI-4 Évaluation des risques de contamination biologique ..... 127
VI-5 Gestion de l'humidité dans une salle d'exposition et évaluation des risques de dégradations mécaniques ..... 128
IV-6 En résumé ..... 130
VI-7 Exemple à suivre ..... 131
*VI-7-1 Étude du climat* ..... 132
*VI-7-2 Évaluation des risques de dégradations mécaniques* ..... 132
*VI-7-3 Évaluation des risques de contaminations biologiques* ..... 136
*VI-7-4 Préconisations* ..... 136

VII- Comportement des matériaux et diagrammes de sensibilité . 141
VII-1 Le papier comme support graphique et pictural ..... 142
*VII-1-1 Dessins, aquarelles, gravures, estampe* ..... 142
*VII-1-2 Détrempes : gouache, colle, caséine* ..... 144
*VII-1-3 Peinture à l'huile* ..... 148
*VII-1-4 Peintures sur papier marouflées* ..... 151
*VII-1-5 Peintures acryliques et vinyliques* ..... 154
VII-2 La toile comme support pictural ..... 156
*VII-2-1 Comportement des toiles de fibres cellulosiques à l'humidité* ..... 156
*VII-2-2 Détrempes : gouache, colle, caséine* ..... 157
*VII-2-3 Peintures à l'huile* ..... 160
*VII-2-4 Peintures vinyliques et acryliques* ..... 165
*VII-2-5 Peintures à la cire et à l'encaustique* ..... 168
VII-3 Vers de nouvelles perspectives ..... 173

VIII- Solutions alternatives ..... 177
VIII-1 Dos protecteurs ..... 177
*VIII-1-1 Mise à l'épreuve de deux types de dos protecteurs* 178

*VIII-1-2 Évaluation de l'efficacité d'un dos protecteur de polycarbonate* ... 182
VIII-2 Châssis à tension auto-régulée ... 183
*VIII-2-1 Principe* ... 184
*VIII-2-2 Conditions pour que la tension soit constante* ... 184
*VIII-2-3 Systèmes élastiques* ... 185
*VIII-2-4 Comparaison du comportement des deux types de châssis avec un châssis standard* ... 187
*VIII-2-5 Analyses et interprétation des résultats* ... 188
*VIII-2-6 Étude de cas* ... 191
*VIII-2-7 Retour d'expérience* ... 194

Conclusion générale ... 197

PARTIE III
DIAGRAMMES DE SENSIBILITÉ À L'HUMIDITÉ
ET À LA TEMPÉRATURE

Peintures à la détrempe sur papier ... 203
Peintures à l'huile sur papier ... 207
Peintures sur papier marouflées sur toile ... 213
Peintures acryliques et vinyliques sur papier ... 215
Peintures à la détrempe sur toile de lin ... 217
Peintures à l'huile sur toile de lin ... 221
Peintures acryliques et vinyliques sur toile ... 227
Peintures à la cire sur toile de coton ... 231

ANNEXES

A1- Valeurs de contraintes à la rupture de différents filmogènes 243
A2- Cadre extensiométrique ... 249
A3- Calcul des variations minimales de tension des diagrammes de sensibilité ... 251
A4- Calcul de la contrainte dans une peinture sollicitée par des vibrations ... 253
A5- Caractéristiques de la peinture de référence ... 255
A6- Recettes des peintures à la cire ... 257

Liste des équations ... 259
Bibliographie ... 263
Index ... 269
Table des illustrations ... 273