

Alain Roche

La conservation
des peintures modernes
et contemporaines

CNRS ÉDITIONS

15, rue Malebranche – 75005 Paris

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 | <i>Méthodes de calcul des paramètres climatiques.....</i> | 49 |
| II-2-6 | <i>Équilibre hydrique entre air humide et matériaux hydrophiles.....</i> | 51 |
| II-3 | <i>Le climat dans les lieux de conservation des peintures d'art moderne et contemporain.....</i> | 55 |
| II-3-1 | <i>Cas d'un bâtiment des années 1980 avec une extension contemporaine.....</i> | 57 |
| II-3-2 | <i>Cas de réhabilitation et de modernisation d'un ancien bâtiment.....</i> | 58 |
| II-3-3 | <i>Cas d'une exposition temporaire installée au Musée Marmottant.....</i> | 60 |
| II-3-4 | <i>Prêt d'une œuvre pour une exposition dans une salle de musée.....</i> | 61 |
| III | <i>Interactions du climat sur les peintures.....</i> | 65 |
| III-1 | <i>Sensibilité des peintures à l'humidité et à la température ...</i> | 65 |
| III-1-1 | <i>Construction expérimentale d'un diagramme de sensibilité.....</i> | 68 |
| III-1-2 | <i>Construction théorique d'un diagramme de sensibilité.....</i> | 71 |
| III-1-3 | <i>Validation des diagrammes théoriques.....</i> | 77 |
| III-1-4 | <i>Interprétation et utilisation d'un diagramme de sensibilité.....</i> | 77 |
| III-2 | <i>Variations minimales de tensions $V_{\text{mini}t}$.....</i> | 83 |
| III-2-1 | <i>Fatigue mécanique des matériaux.....</i> | 84 |
| III-2-2 | <i>Méthode de détermination de la limite d'endurance d'un film de peinture σ_{Dp}.....</i> | 85 |
| III-2-3 | <i>Relation entre facteur de concentration de contrainte K_t et contrainte à la rupture σ_{rupt}.....</i> | 87 |
| III-2-4 | <i>Recherche d'une forme simplifiée de la limite d'endurance des films de peinture.....</i> | 91 |
| III-2-5 | <i>Détermination de la variation minimale de tensions $V_{\text{mini}t}$ à partir de la contrainte à la rupture de la peinture.....</i> | 93 |
| III-2-6 | <i>Classement des peintures en fonction de leur contrainte à la rupture.....</i> | 93 |
| IV | <i>Dégradation des peintures.....</i> | 97 |
| IV-1 | <i>Durée de vie des matériaux.....</i> | 97 |
| IV-2 | <i>Facteurs de dégradation mécanique des peintures.....</i> | 98 |
| IV-2-1 | <i>Les variations d'humidités ou de températures.....</i> | 98 |
| IV-2-2 | <i>Les vibrations.....</i> | 99 |
| IV-2-3 | <i>Le temps, la durée d'exposition.....</i> | 103 |
| V-3 | <i>Propagation d'une craquelure dans le cas d'une étude expérimentale.....</i> | 105 |
| IV-3-1 | <i>Dispositif expérimental.....</i> | 105 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------|-----|
| <i>IV-3-2 Interprétation des résultats</i> | 106 |
| <i>IV-3-3 Sensibilité à l'humidité d'une peinture dégradée.</i> | 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 <i>Étude du climat</i> | 132 |
| VI-7-2 <i>Évaluation des risques de dégradations mécaniques</i> | 132 |
| VI-7-3 <i>Évaluation des risques de contaminations biologiques</i> | 136 |
| VI-7-4 <i>Préconisations</i> | 136 |
| VII- Comportement des matériaux et diagrammes de sensibilité . | 141 |
| VII-1 Le papier comme support graphique et pictural..... | 142 |
| VII-1-1 <i>Dessins, aquarelles, gravures, estampe</i> | 142 |
| VII-1-2 <i>Détrempe : gouache, colle, caséine</i> | 144 |
| VII-1-3 <i>Peinture à l'huile</i> | 148 |
| VII-1-4 <i>Peintures sur papier marouflées</i> | 151 |
| VII-1-5 <i>Peintures acryliques et vinyliques</i> | 154 |
| VII-2 La toile comme support pictural | 156 |
| VII-2-1 <i>Comportement des toiles de fibres cellulosiques à l'humidité</i> | 156 |
| VII-2-2 <i>Détrempe : gouache, colle, caséine</i> | 157 |
| VII-2-3 <i>Peintures à l'huile</i> | 160 |
| VII-2-4 <i>Peintures vinyliques et acryliques</i> | 165 |
| VII-2-5 <i>Peintures à la cire et à l'encaustique</i> | 168 |
| VII-3 Vers de nouvelles perspectives..... | 173 |
| VIII- Solutions alternatives..... | 177 |
| VIII-1 Dos protecteurs | 177 |
| VIII-1-1 <i>Mise à l'épreuve de deux types de dos protecteurs</i> | 178 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| VIII-1-2 <i>Évaluation de l'efficacité d'un dos protecteur de polycarbonate</i> | 182 |
| VIII-2 Châssis à tension auto-réglée | 183 |
| VIII-2-1 <i>Principe</i> | 184 |
| VIII-2-2 <i>Conditions pour que la tension soit constante</i> | 184 |
| VIII-2-3 <i>Systèmes élastiques</i> | 185 |
| VIII-2-4 <i>Comparaison du comportement des deux types de châssis avec un châssis standard</i> | 187 |
| VIII-2-5 <i>Analyses et interprétation des résultats</i> | 188 |
| VIII-2-6 <i>Étude de cas</i> | 191 |
| VIII-2-7 <i>Retour d'expérience</i> | 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 |

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 G. Keck¹ 1969 propose une description des mécanismes de rupture des films de peinture et une classification du point de vue morphologique des craquelures élémentaires. S. Bucklow² 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 S.T. Stout³ 1974, G. Ronca⁴ 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. Hedley⁵, G.A. Berger⁶, M. F. Mecklenburg⁷. 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. Michalski⁸ a largement contribué à l'avancement de ce type de travaux. G. Berger et W.H. Russell⁹ 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. Young¹⁰ 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. G. Ronca, « 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., « Biaxial 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 (γ). 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 structurales, 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 (α) qui permet de quantifier le phénomène¹. 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 (α 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 Δv et ΔT sont les variations de volume (m^3) et de température ($^{\circ}\text{C}$) à pression constante

où Δl et ΔT 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 σ_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 σ_{rupt} .
- La déformation à la rupture qui correspond à l'allongement maximal que peut supporter la peinture avant de se rompre. La déformation ϵ_{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

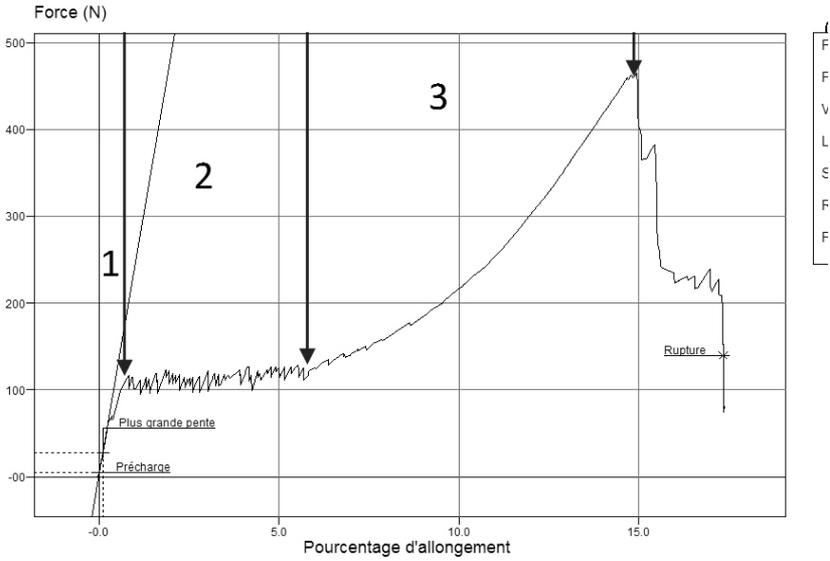


Figure 1 : Courbe de traction de la peinture de référence. (Nexigen).

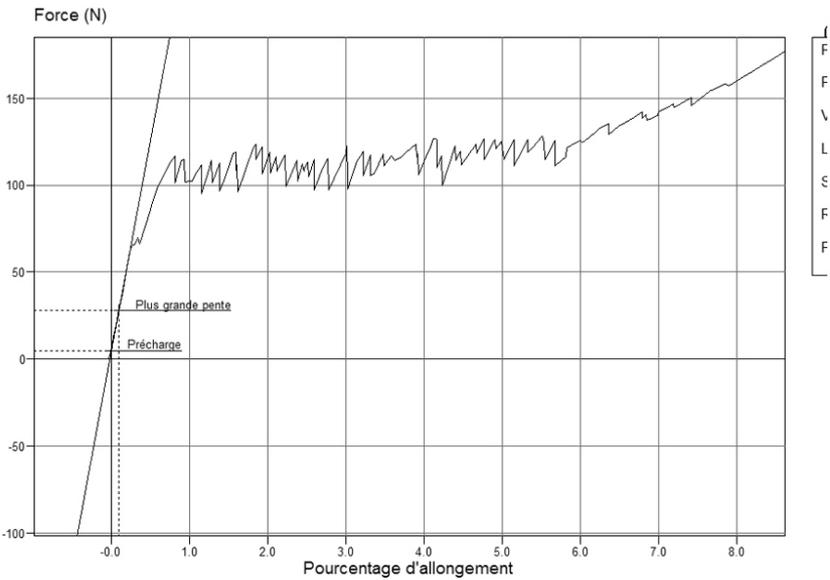


Figure 2 : Courbe de traction : domaine de sollicitation de la peinture. (Nexigen).

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.

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

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 feuillet 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 $0,2 \text{ N/mm}^2$ soit 20 deca-Newton par mètre³ (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.

1-2-2 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 substrat⁴ – 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.

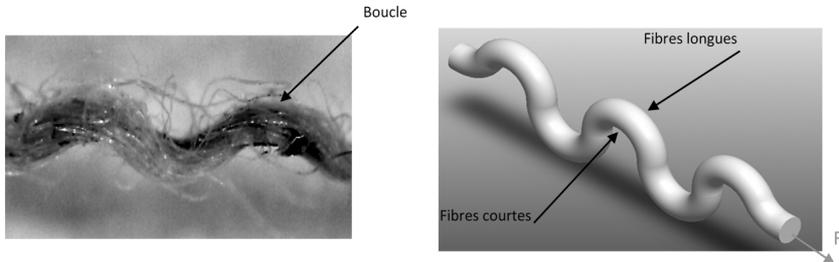


Figure 4 : Modèle d'un fil de toile.

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.

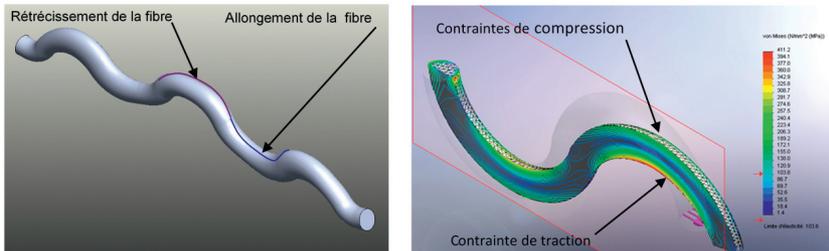


Figure 5 : Analyse des contraintes dans un fil lors de son dépliement.

I-2-4 Élasticité des toiles

La toile est un assemblage de fils et quel que soit sa texture, 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.

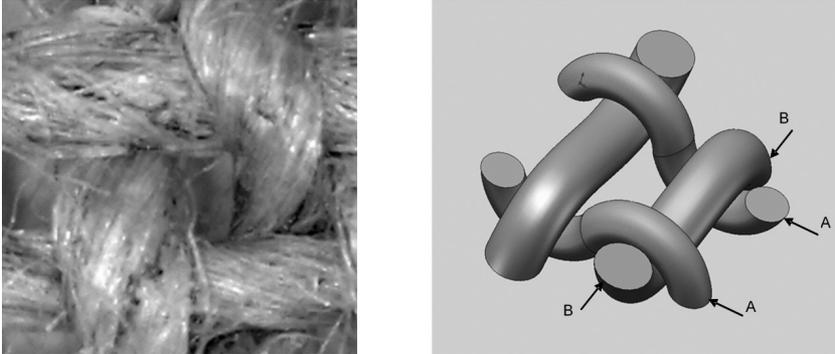


Figure 6 : Modèle d'entrecroisement ou de maille d'une toile.

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.

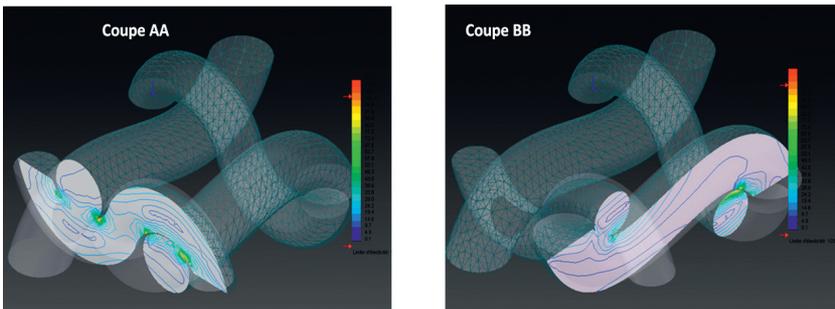


Figure 7 : Distribution des contraintes dans une maille sollicitée en traction.

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 vierges⁵.

1-2-5 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., « Infulenza dell'incollaggio e della preparazione di una tela sull'irrigidimento e sull' ortotropia », 6th Biennial International Congress CESMAR 7 Università degli Studi di Parma, Nov. 2012.

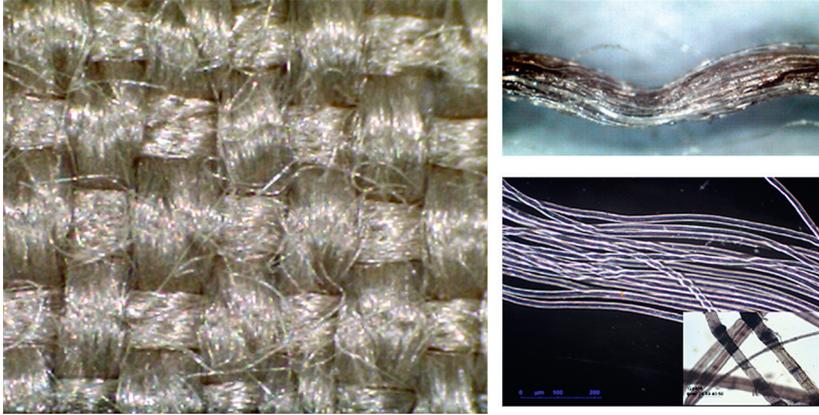


Figure 9 : Structure des fibres de polyester.

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.

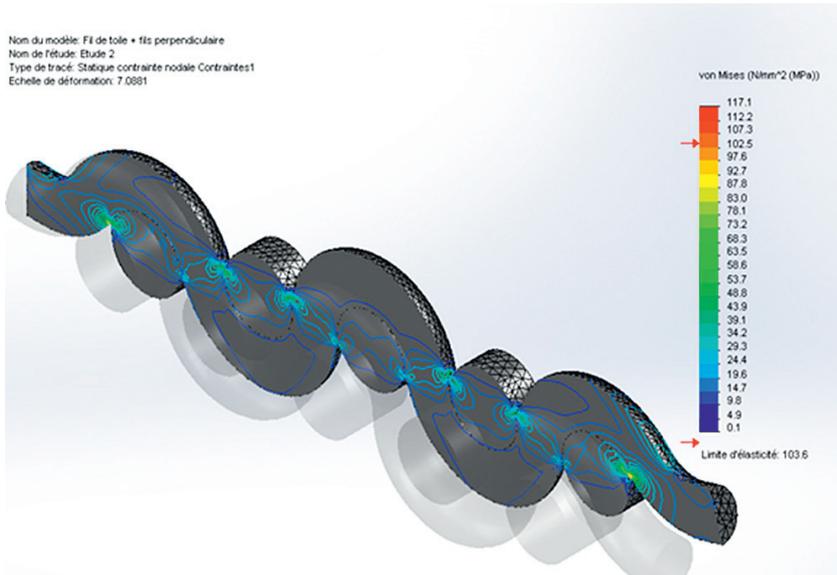


Figure 10 : modèle d'un élément de toile encollée.

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.

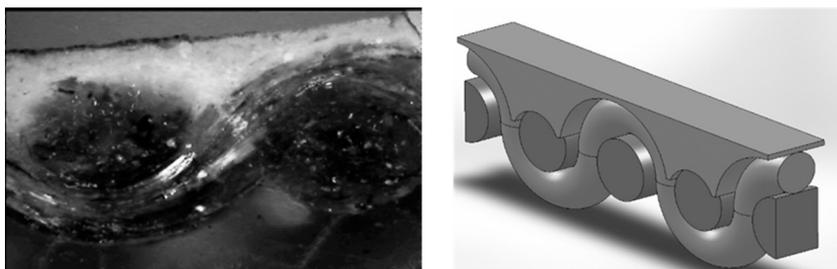


Figure 11 : Modélisation d'une toile encollée et enduite à partir d'une micro section.

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 module⁶.

6. Les toiles sont caractérisées comme tous matériaux par des grandeurs mécaniques : module d'élasticité E , le seuil d'élasticité (R_e), la contrainte à la rupture σ_{rupt} . Les modules d'élasticité des enduits sont :

- $E \approx 1950 \text{ MPa}$ à 60 % HR pour le carbonate de calcium et la colle animale.
- $E \approx 1\,000 \text{ MPa}$ 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.

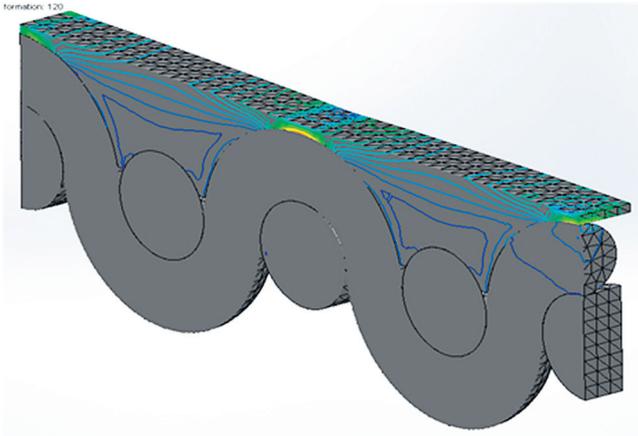


Figure 12 : toile enduite d'une préparation au module élevé.

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.

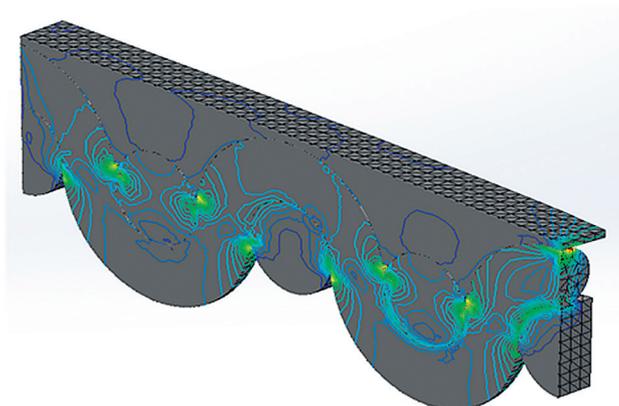


Figure 13: toile enduite d'une préparation au module faible.

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.

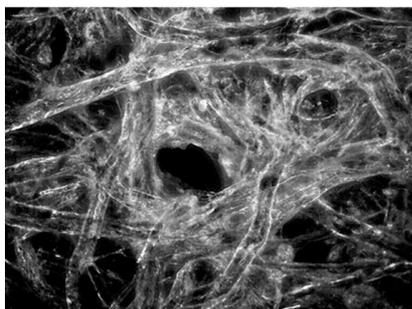


Figure 14: Arches 88 300.

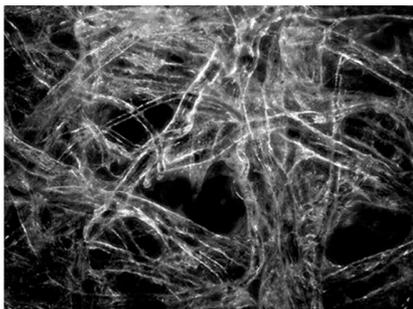


Figure 15: Velin cuve bfk
rive 270.

La plupart des papiers ont des propriétés mécaniques orthotropes. Lorsqu'on réalise un essai de traction⁷ 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.

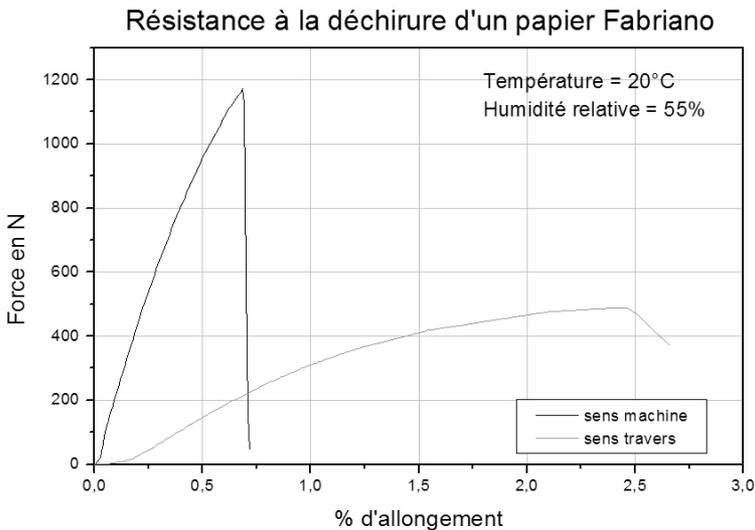


Figure 16 : Courbes de traction d'un papier Fabriano.

Dans cet exemple l'orthotropie⁸ 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 de sa masse surfacique mais aussi de l'orientation des fibres, de leur distribution et de leurs qualités. Les résultats d'une étude⁹ 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.} % | $R = \frac{F_{rupt.}}{N} \frac{m_s}{g}$ 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.

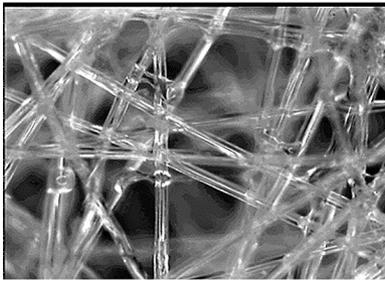


Figure 17: Filaments d'un non-tissé de polyester.

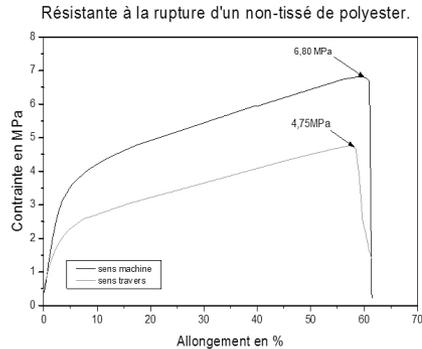


Figure 18: Courbes de traction d'un non-tissé de polyester.

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 | σ_{rupt} MPa | al. _{rupt} % | $R = \frac{F_{rupt}/m_s}{N}$ par m ² g |
| 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.

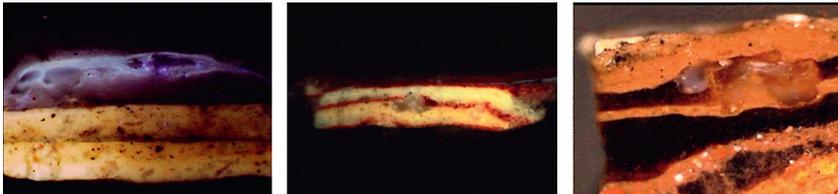
À masse surfacique comparable nous voyons que la résistance et l'allongement à la rupture des non-tissés sont supérieurs au papier. Ces deux matériaux ont des comportements mécaniques différents liés principalement à leur nature chimique et leur structure.

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.

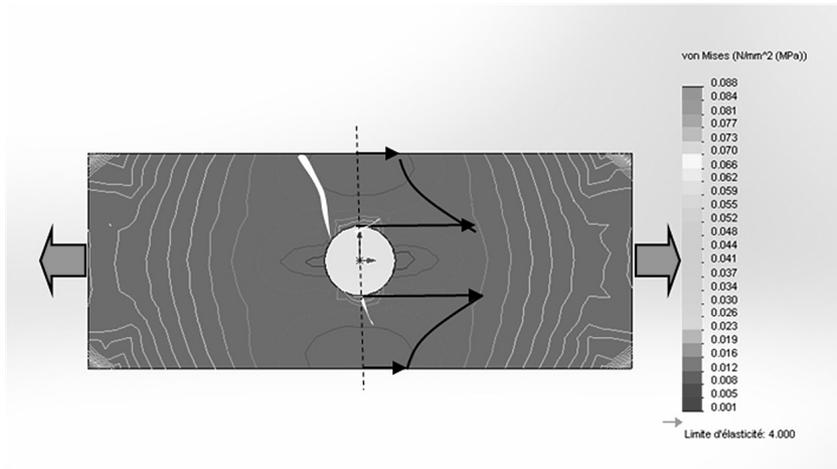


Figure 22 : Distribution des contraintes autour d'un défaut constitué d'un vide.

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, *au 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.

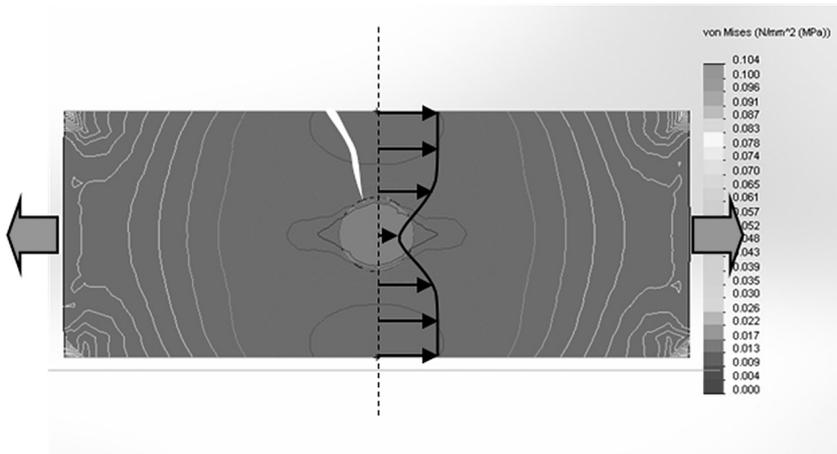


Figure 23 : Distribution des contraintes autour d'un défaut constitué d'une particule molle.

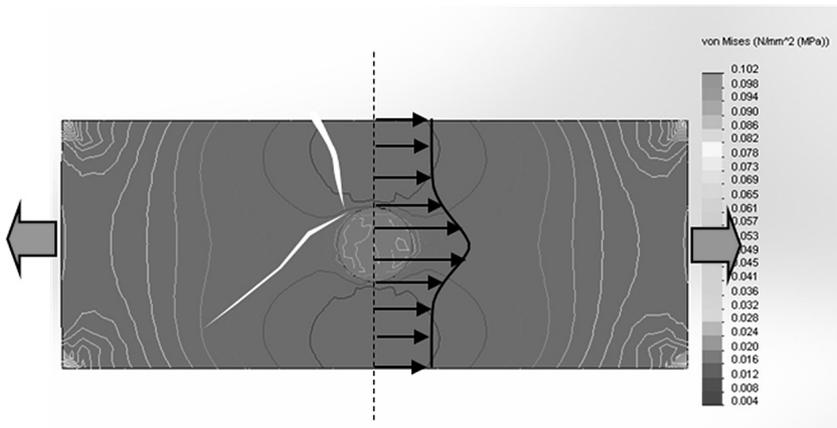


Figure 24 : Distribution des contraintes autour d'un défaut constitué d'une particule dure.

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 inégale¹⁰.

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 Mises¹¹. 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 σ_1 , σ_2 , et σ_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).

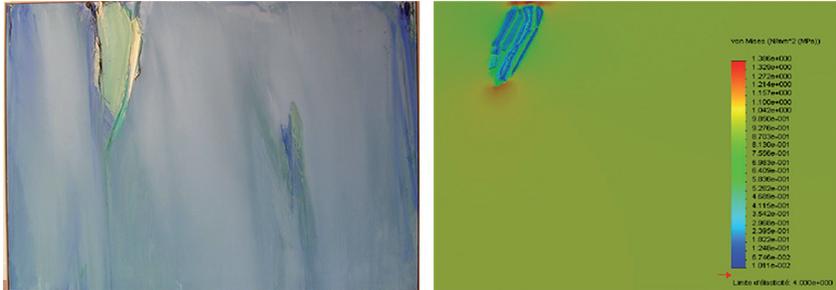


Figure 26 : Modélisation d'un empatement d'après une peinture d'Olivier Debré.

Les tracés suivants, fig. 27 représentent un zoom sur une partie de l'empatement, 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'empatement sont les moins sollicitées par la tension de la peinture, zones bleues.

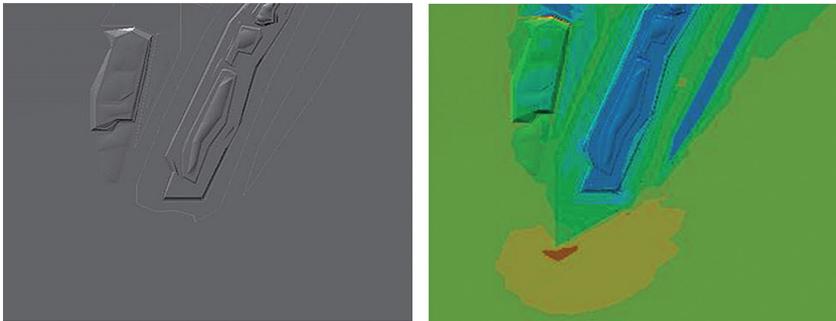


Figure 27 : Distribution de contraintes autour d'un empatement a-sans contrainte, b-sous contrainte

Les concentrations de contraintes les plus importantes (zones rouges) sont localisées à la base de l'empatement 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 $\sigma_{\text{onMises}} \geq \sigma_{\text{limite}}$. 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.

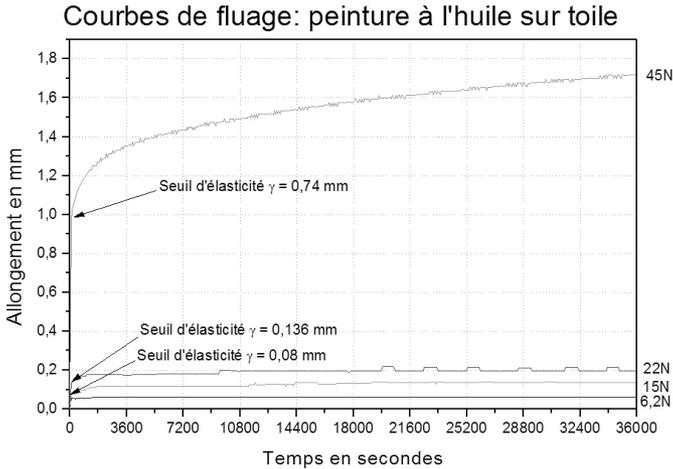


Figure 29 : Fluage de la peinture de référence

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.

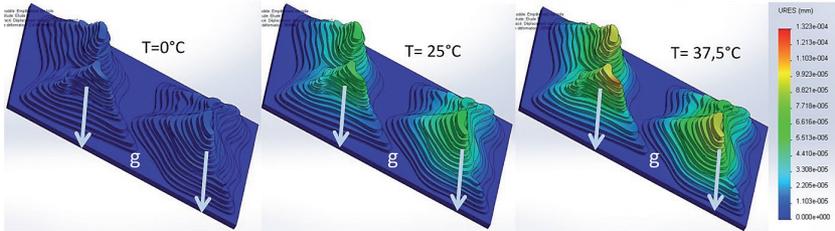


Figure 30 : représentation de la déformation d'un empâtement d'une peinture acrylique sous l'effet de la chaleur.

À $T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ la température est en dessous de la température de transition vitreuse¹² (T_g). La matière picturale de cette peinture acrylique est dans un état vitreux. Dans ces conditions aucune déformation des empâtements n'est à prévoir.

À $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ la température est légèrement au-dessus de la T_g . 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 $0,0821\text{ }\mu\text{m}$. Elle est négligeable.

À $T = 37,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ la température est au-dessus de la T_g . La matière dans un état viscoplastique va se déformer pour atteindre une déformation maximale de $0,323\text{ }\mu\text{m}$ sous son propre poids.

En fait, lorsque la température est au-dessus de la T_g , la déformation croît 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 T_g 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.

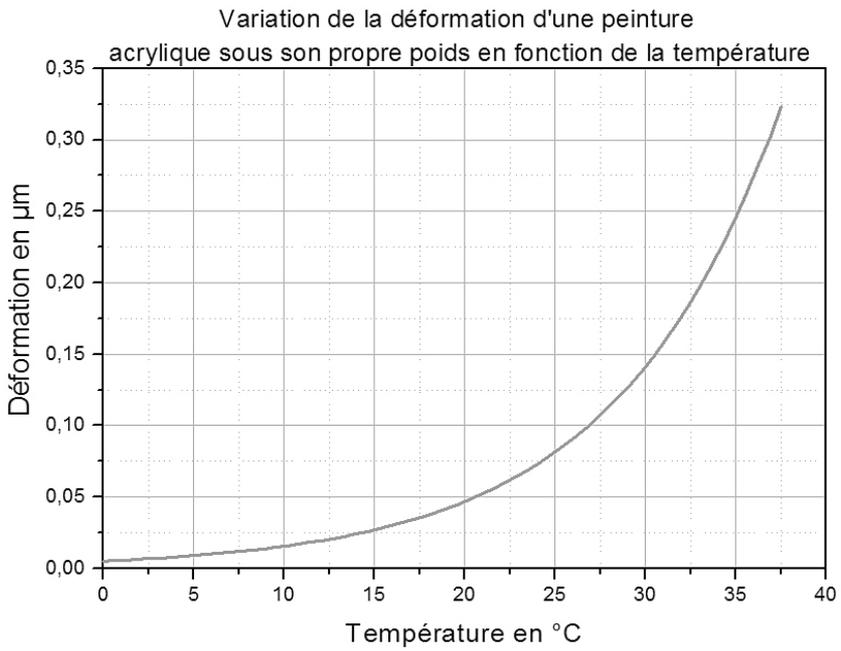


Figure 31 : Courbe de l'évolution de la déformation d'un empâtement en fonction de la température.