

# CeROArt

Conservation, exposition, Restauration d'Objets d'Art

12 | 2020 (numéro ouvert)

Flux 2020-2021

Articles

---

## Apports des essais mécaniques : Évaluation de la vulnérabilité et des risques de dégradation des peintures.

ALAIN ROCHE

<https://doi.org/10.4000/ceroart.7003>

---

### Résumés

Français English

La conservation des œuvres peintes sur toile est intimement liée à la connaissance de leurs propriétés physico-mécaniques. Pour développer des outils d'évaluation tels que « le degré de vulnérabilité et les risques de dégradation mécanique des peintures », l'usage d'essais mécaniques est inévitable. Ce travail regroupe une série d'études qui met en évidence l'importance de cette approche systémique.

The conservation of paintings on canvas is closely associated with the understanding of their physico-mechanical properties. Using mechanical testing is essential when developing tools to assess the level of vulnerability and risks of mechanical degradation in paintings. This paper addresses a series of studies highlighting the need of a systemic approach to decision-making for structural treatments.

---

### Entrées d'index

Ce site utilise des cookies et collecte des informations personnelles vous concernant. Pour plus de précisions, nous vous invitons à consulter notre **politique de confidentialité** (mise à jour le 25 juin 2018).

En poursuivant votre navigation, vous acceptez l'utilisation des cookies.

**Fermer**

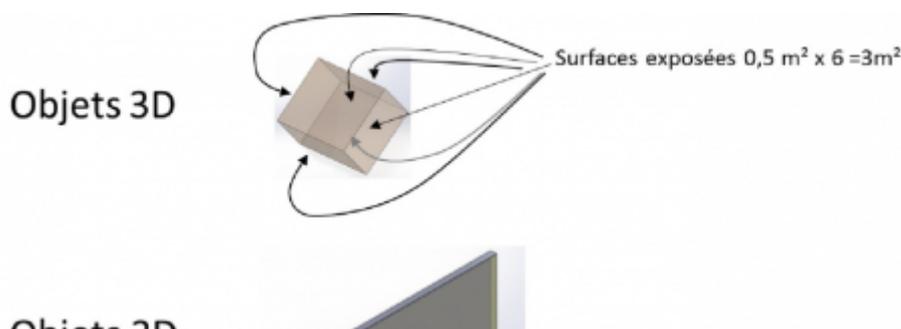
# Introduction

- 1 De nombreux travaux démontrent que l'environnement climatique est un facteur majeur de dégradation mécanique des peintures.<sup>1</sup> Il est omniprésent et accompagne inévitablement les œuvres, quels que soient les lieux et les circonstances. Le ressenti des variations de la température et de l'humidité n'est pas une illusion, mais une réalité.<sup>2</sup> À chaque moment de la journée, les objets d'art sont soumis à ces fluctuations environnementales.
- 2 Du point de vue pragmatique, un responsable de la conservation d'une collection de peintures aurait besoin d'outils d'évaluation du degré de vulnérabilité et des risques potentiels de dégradation mécanique pour établir une *fiche de vulnérabilité* de chacune des œuvres.
- 3 *Le degré de vulnérabilité* au climat d'un tableau peut être défini comme son aptitude à subir des dommages plus ou moins importants en cas de variations climatiques. Il associe deux critères :
  - La fragilité qui est représentée par la contrainte à la rupture du film de peinture
  - La sensibilité à l'humidité ou la température qui est décrite par un diagramme.
- 4 De ce fait, le degré de vulnérabilité permettra de classer les peintures.
- 5 *L'évaluation des risques de dégradation mécanique* s'appuie essentiellement sur les relations qui existent entre les propriétés physico-mécaniques de la peinture vis-à-vis de l'environnement et sa limite d'endurance en fatigue mécanique qui délimite une zone de tolérance à la rupture des peintures soumises à des variations de tension.
- 6 Dans les deux cas de figure, ces deux outils font appel aux propriétés physiques et mécaniques des peintures qui ne peuvent être obtenues que par des essais mécaniques.

## Les peintures comme objet d'étude

- 7 Dans une collection, les peintures se présentent comme des objets à deux dimensions si on néglige l'épaisseur vis-à-vis des deux autres dimensions. Par rapport aux objets 3D, les surfaces des objets 2D sont plus exposées. Par exemple, un objet de forme cubique ayant une arête de 0,71m a une surface exposée de 3 m<sup>2</sup> alors qu'une peinture de 1,5 m sur 2 m a une surface exposée 6 m<sup>2</sup> en considérant le recto et le verso (Figure 1).

Fig.1: Surfaces exposées d'un objet 3D et 2D



Ce site utilise des cookies et collecte des informations personnelles vous concernant. Pour plus de précisions, nous vous invitons à consulter notre **politique de confidentialité** (mise à jour le 25 juin 2018).

En poursuivant votre navigation, vous acceptez l'utilisation des cookies.

**Fermer**

- 8 Par conséquent, les objets 2D, tels que les peintures, dessins, gravures, sont plus exposés aux conditions environnementales
- 9 Les propriétés physiques et mécaniques des matériaux sont liées à leur nature chimique. Les peintures, constituées de matériaux hydrophiles et hydrophobes, sont sensibles à l'humidité et la température. La réactivité et la fragilité des peintures peuvent être évaluées en s'appuyant sur leurs propriétés physico-mécaniques en fonction de l'humidité et de la température.

## Les équipements

- 10 Les laboratoires de mécanique sont équipés d'appareils et de machines spécifiques conçus pour évaluer certaines propriétés physico-mécaniques des matériaux. Il existe une série d'essais et de tests qui permet de caractériser les propriétés mécaniques.
- 11 Ce domaine de la recherche est compliqué, car les essais encadrés par des normes internationales ne sont pas adaptés aux études du comportement des peintures. Dans ce cas, les essais doivent s'adapter à leur matérialité, les protocoles expérimentaux doivent prendre en compte la spécificité des différentes techniques picturales. Pour s'approcher au mieux des conditions réelles de conservation, de nouveaux dispositifs expérimentaux ont été développés dans le cadre du LARCROA, en modifiant des équipements.
- 12 L'interprétation des résultats est obtenue en s'appuyant sur des outils mathématiques ou des méthodes analytiques. Elle reflète une certaine réalité qu'il faut malgré tout tempérer vu la disparité et la singularité de chaque peinture. Peu utilisée dans le domaine de la conservation de l'art, la caractérisation physique et mécanique des œuvres d'art se heurte en France à un manque d'intérêt de la part des scientifiques de la conservation.
- 13 Ce document présente les principaux essais qui ont été développés, depuis plus de vingt ans, pour l'étude des peintures au sein du LARCROA. Notre souci est d'obtenir des résultats exploitables dans le domaine de conservation des œuvres d'art. Chaque essai est décrit simplement. Il est complété par la liste des grandeurs physico-mécaniques obtenues. Des exemples illustrent leurs potentialités.

## Essais de traction

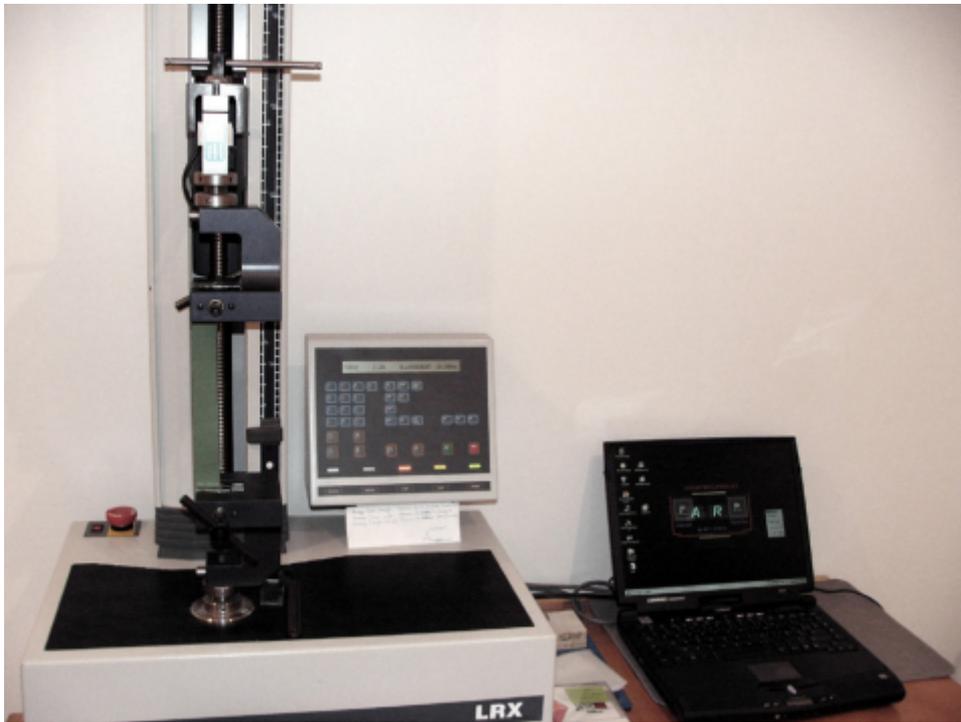
- 14 L'essai de traction s'effectue sur une Machine Universelle de Tests (UTM) (Figure 2). Il permet de mesurer le degré de résistance à la rupture d'un matériau. L'échantillon est fixé entre les deux attaches aux extrémités sur l'axe vertical de la machine à colonne. Les essais sont réalisés dans des conditions climatiques stables (21°C, 50 % HR). La traverse mobile se déplace à une vitesse constante paramétrée.

**Fig.2 : Machine Universelle de Tests (UTM)**

Ce site utilise des cookies et collecte des informations personnelles vous concernant. Pour plus de précisions, nous vous invitons à consulter notre **politique de confidentialité** (mise à jour le 25 juin 2018).

En poursuivant votre navigation, vous acceptez l'utilisation des cookies.

**Fermer**



LLOYD LRX 2500

Crédit © LARCROA

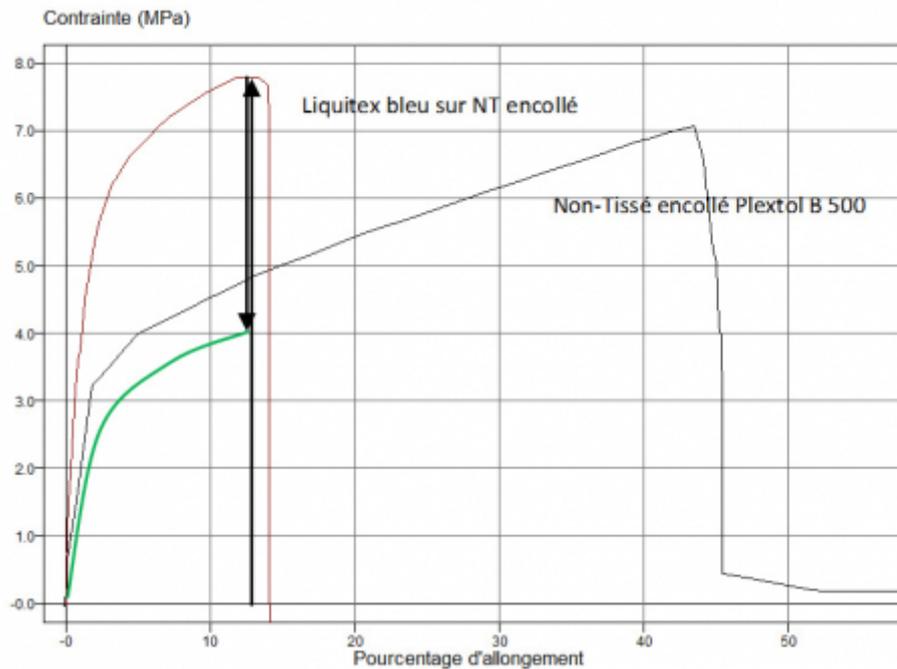
- 15 Pour avoir des résultats significatifs, les essais sont effectués sur 5 éprouvettes d'un même lot de peinture. La force de traction s'applique sur l'éprouvette jusqu'à sa rupture suivant un processus de mise en charge à vitesse de déformation constante.
- 16 L'essai de traction permet d'obtenir les grandeurs mécaniques suivantes :
- Force maximale (N)
  - Contrainte à la force maximale de la peinture et de son support (MPa)
  - Contrainte de rupture du film peinture (MPa)
  - Seuil d'élasticité (MPa)
  - % d'allongement à la force maximale
  - Module d'élasticité de Young à l'origine ou à un % d'allongement déterminé (MPa)
- 17 En règle générale, les courbes présentent plusieurs parties. Leur interprétation met en évidence les différents comportements de la peinture :
- Domaines - élastique, viscoélastique ou viscoplastique du film de peinture
  - Vitesse de propagation des craquelures
  - Comportement de la toile ou du support
  - Types de rupture de la peinture - film ductile, film cassant
  - Types de rupture du support – nette, avec effilochage
- 18 Une peinture se présente comme une succession de couches solidaires formant un stratifié. Chaque matériau est doté d'un module d'élasticité et c'est celui qui possède le module le plus élevé qui imposera son comportement. Ce principe est recevable et plusieurs cas de figure de rupture sont possibles.

Ce site utilise des cookies et collecte des informations personnelles vous concernant. Pour plus de précisions, nous vous invitons à consulter notre **politique de confidentialité** (mise à jour le 25 juin 2018).

En poursuivant votre navigation, vous acceptez l'utilisation des cookies.

**Fermer**

**Fig. 3 : Courbe de traction d'une peinture Liquitex® sur non-tissé encollé de Plextol® B 500, d'un non-tissé encollé de Plextol® B 500 et la courbe théorique du Liquitex®**



Logiciel NEXYGEN (version 3). Procédure de rupture en traction (40/060)

Crédit © LARCROA

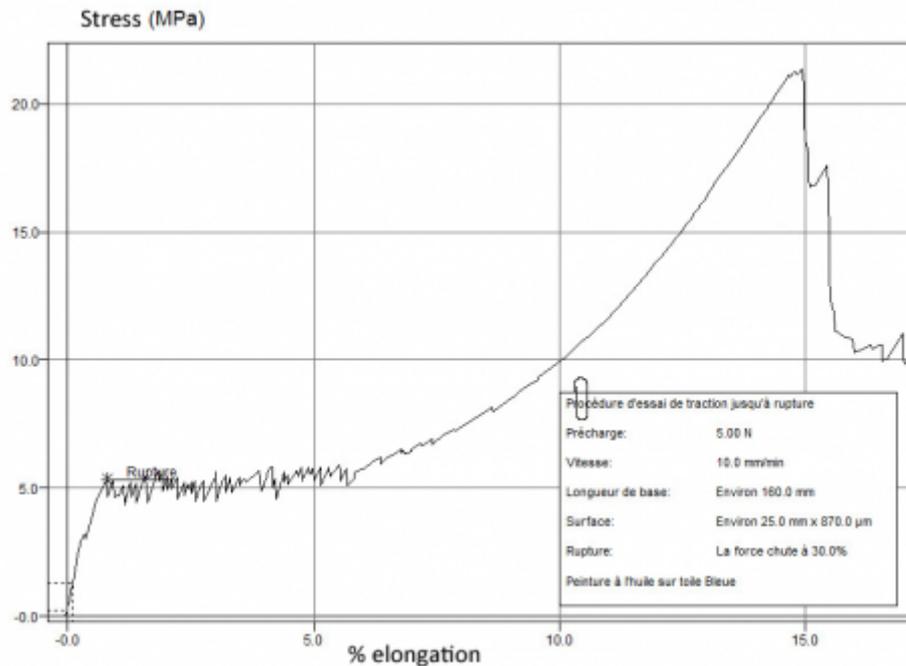
- 21 Le graphe de la figure 3 présente les courbes de traction d'une peinture acrylique Liquitex® sur un non-tissé de polyester imprégné de Plextol® B 500 et d'un non-tissé de polyester encollé de la même résine acrylique. Le module d'élasticité de la peinture sur non-tissé est plus élevé et la force de rupture du non-tissé seul est plus faible. En appliquant la loi d'additivité [4], la résistance du film de peinture peut être calculée en soustrayant à la contrainte de rupture de la peinture sur non-tissé la valeur de la contrainte du non-tissé pour la même déformation. Dans ce cas, la courbe verte représente la courbe théorique du film de Liquitex®. Sa contrainte à la rupture est d'environ 4 MPa.
- 22 3e cas : La matière picturale a un module d'élasticité plus élevé que le support. C'est le cas des détrempe, peinture à la caséine sur toile et des peintures anciennes à l'huile ayant perdu leur élasticité. Au début de l'essai de traction, c'est le film de peinture qui imposera son comportement jusqu'à la rupture de la matière picturale. Ensuite c'est le support qui sera sollicité jusqu'à sa rupture. Dans cet exemple<sup>3</sup> la rupture de la couche picturale de cette peinture à l'huile sur toile est facilement mise en évidence sur la courbe (Figure 4).

**Fig. 4 : Courbe de traction d'une peinture à l'huile**

Ce site utilise des cookies et collecte des informations personnelles vous concernant. Pour plus de précisions, nous vous invitons à consulter notre **politique de confidentialité** (mise à jour le 25 juin 2018).

En poursuivant votre navigation, vous acceptez l'utilisation des cookies.

**Fermer**



Logiciel Nexygen (version 3). Procédure de rupture en traction (40/0640)

Crédit © LARCROA

23 La courbe de traction présente 3 zones :

- Le film de peinture, doté d'un module d'élasticité élevé, impose son comportement. Ce début de courbe est presque linéaire, on est dans le domaine élastique de la peinture.
- De 1,6 % à 6 % d'allongement, une série de pics apparaît autour de 5 MPa. Ils témoignent de la formation de craquelures. La contrainte à la rupture de la peinture est donnée par la valeur moyenne des pics enregistrés.
- Ensuite la courbe devient lisse. C'est la toile qui prend le relais en s'étirant. L'augmentation des contraintes progresse entre 6 et 15 % d'allongement régulièrement jusqu'à la rupture de celle-ci.

24 Les grandeurs mécaniques du film de peinture et du support sont évaluées par l'analyse de cette courbe.

## Essais de fluage

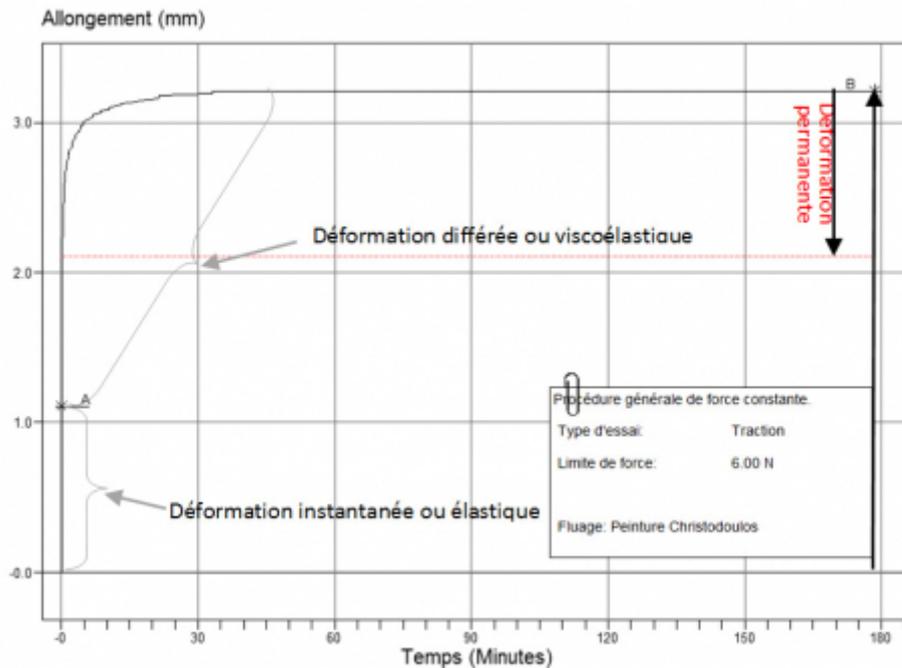
25 Le fluage est le phénomène physique. L'essai de fluage consiste à mesurer la déformation d'un matériau soumis à une charge constante en fonction du temps pendant une durée suffisante. Il s'effectue en traction sur une Machine Universelle de Tests (UTM). L'échantillon est fixé entre les deux attaches de la machine de traction. La traverse mobile se déplace jusqu'à la valeur de la charge (N) paramétrée. La durée de l'essai est définie au préalable (Figure 5).

Fig. 5 : Courbe de fluage d'une peinture sur toile de coton

Ce site utilise des cookies et collecte des informations personnelles vous concernant. Pour plus de précisions, nous vous invitons à consulter notre **politique de confidentialité** (mise à jour le 25 juin 2018).

En poursuivant votre navigation, vous acceptez l'utilisation des cookies.

**Fermer**



Logiciel Nexygen (version 3). Procédure de fluage (40/0642)

Crédit © LARCROA

26 L'essai de fluage permet de déterminer les grandeurs mécaniques suivantes :

- Déformation élastique (réversible) et le seuil d'élasticité.
- Déformation différée (viscoélastique).
- Déformation permanente.

27 Les propriétés élastiques, viscoélastiques ou viscoplastiques de la peinture sont clairement explicitées. Cet essai peut se faire à humidité et température constante ou humidité ou température variables.

## Essais de relaxation

28 La relaxation est un phénomène physique. L'essai de relaxation consiste à mesurer la diminution des contraintes d'un matériau lorsqu'il est soumis à une déformation constante en fonction du temps.

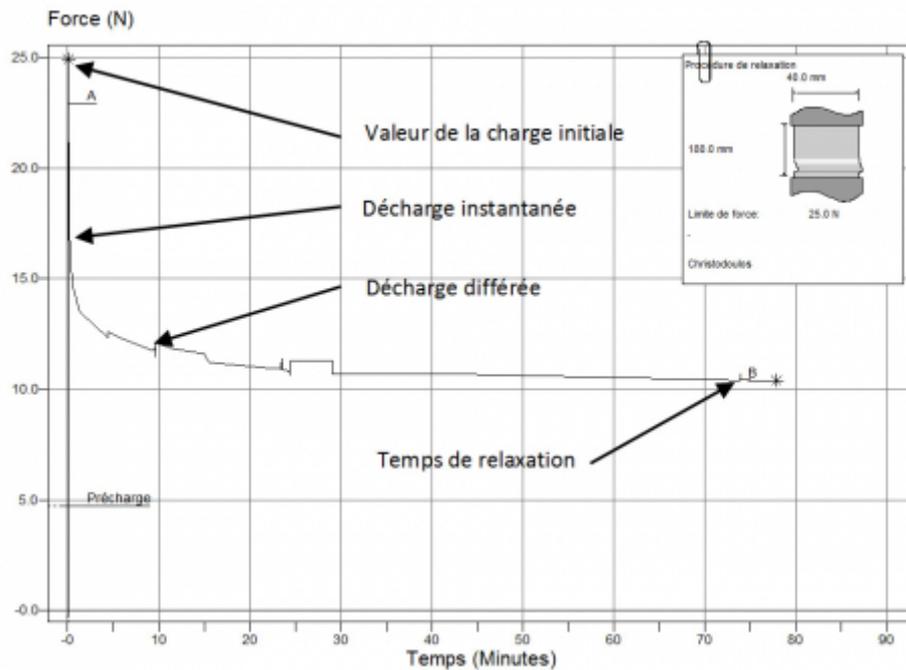
29 L'essai de relaxation s'effectue en traction sur une Machine Universelle de Tests (UTM). L'échantillon est fixé entre les deux attaches de la machine de traction. La traverse mobile se déplace jusqu'à la valeur de la déformation prédéfinie. La durée de l'essai est fixée au préalable (Figure 6).

Fig. 6 : Courbe de relaxation d'une peinture sur toile de coton

Ce site utilise des cookies et collecte des informations personnelles vous concernant. Pour plus de précisions, nous vous invitons à consulter notre **politique de confidentialité** (mise à jour le 25 juin 2018).

En poursuivant votre navigation, vous acceptez l'utilisation des cookies.

**Fermer**



Logiciel Nexygen (version 3). Procédure de relaxation (40/0644)

Crédit © LARCROA

- 30 L'essai de relaxation permet d'évaluer les valeurs suivantes :
- Chute instantanée de la charge
  - Chute différée de la charge.
  - Temps de relaxation.
- 31 À température et humidité constante, l'essai de relaxation permet d'obtenir le taux de relaxation c'est-à-dire la perte de charge en fonction du temps.

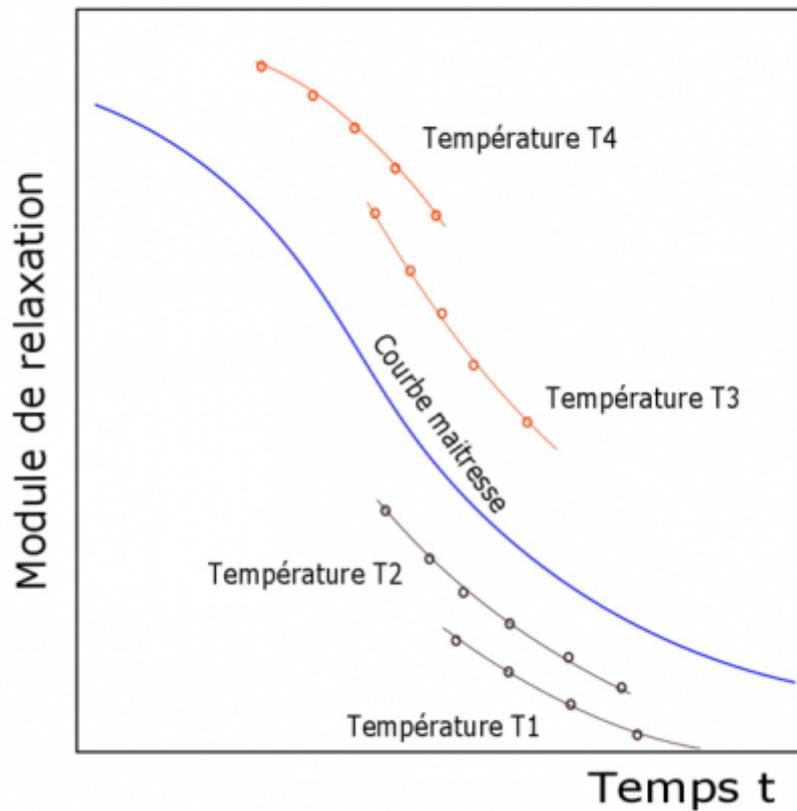
## Équivalence temps-température, relation température-humidité, propriétés des matériaux hydrophiles et hydrophobes

- 32 Pour évaluer l'impact du temps, de la température et de l'humidité sur le comportement des peintures, l'analyse des résultats va s'appuyer sur le principe d'équivalence temps/température, la relation température/humidité et les propriétés hydrophiles et hydrophobes des matériaux.
- 33 *Le principe d'équivalence temps/température* [6] : La variation du module de relaxation obtenue à vitesse de sollicitation constante et températures variables, présente le même profil qu'à température constante et vitesses de sollicitation variables. Dans ce cas l'équivalence temps-température permet de superposer la réponse du matériau en fonction de la température sur une courbe de référence par translation. Les quatre courbes de relaxation d'un même matériau à des températures telles que  $T_1 > T_2 > T_3 > T_4$  sont translattées pour former une courbe maîtresse (Figure 7).

Ce site utilise des cookies et collecte des informations personnelles vous concernant. Pour plus de précisions, nous vous invitons à consulter notre **politique de confidentialité** (mise à jour le 25 juin 2018).

En poursuivant votre navigation, vous acceptez l'utilisation des cookies.

**Fermer**



John D.Ferry, *Op. cit.*, p.283

Crédit © LARCROA

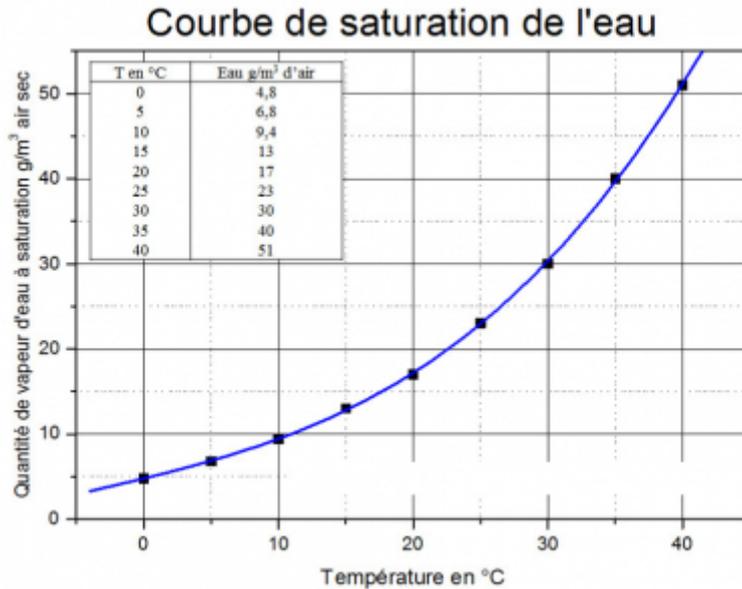
- 34 Ce principe montre que des grandeurs, telles que les modules d'élasticité et par conséquent les contraintes à la rupture, dépendent de la vitesse de sollicitation et de la température. Autrement dit sous l'effet d'une sollicitation très rapide, le module d'élasticité d'un matériau correspond au module d'élasticité à basse température et inversement.
- 35 *Relation température humidité* : La pression de vapeur d'eau saturante ( $S$ ) est une fonction croissante de la température. Ce phénomène est illustré par la courbe de saturation en vapeur d'eau de l'air à différentes températures (Figure 8).

**Fig. 8 : Courbe de saturation de l'eau**

Ce site utilise des cookies et collecte des informations personnelles vous concernant. Pour plus de précisions, nous vous invitons à consulter notre **politique de confidentialité** (mise à jour le 25 juin 2018).

En poursuivant votre navigation, vous acceptez l'utilisation des cookies.

**Fermer**



Teneur en eau et humidité absolue. Roche. A, *Op.cit.*, 2016, p.47.

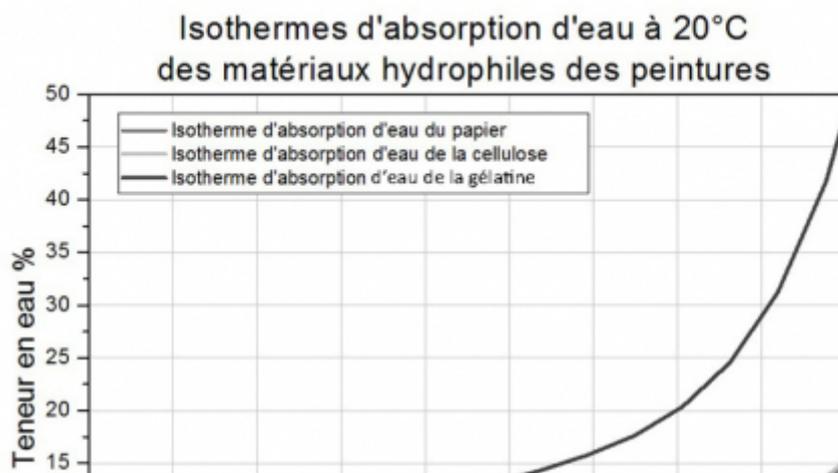
Crédit © LARCROA

- 36 Pour une même quantité absolue de vapeur d'eau dans l'air (HA), l'air chaud aura une humidité relative plus basse que dans de l'air froid. L'humidité relative (HR) s'exprime par la relation suivante :

$$HR = \frac{HA}{S} \times 100$$

- 37 Les matériaux hydrophiles absorbent une partie de l'humidité de l'air. À l'équilibre, les échanges de molécules d'eau entre les matériaux hydrophiles et l'air sont constants. Les matériaux hydrophiles sont caractérisés par leur –Teneur en Humidité à l'Équilibre (T.H.E.). Cette capacité d'absorber et désorber l'eau est déterminée par l'isotherme d'absorption (Figure 9).

**Fig. 9 : Isothermes d'absorption d'eau – papier, cellulose, gélatine**



Ce site utilise des cookies et collecte des informations personnelles vous concernant. Pour plus de précisions, nous vous invitons à consulter notre **politique de confidentialité** (mise à jour le 25 juin 2018).

En poursuivant votre navigation, vous acceptez l'utilisation des cookies.

**Fermer**

- 38 *Propriétés des matériaux hydrophiles et hydrophobes* : Les peintures sont composées de matériaux hydrophiles (toiles, papiers, bois, colles...) et hydrophobes (huile fraîche, résines acryliques, vinyliques, fibres de polyester...). La tendance hydrophile ou hydrophobe de la peinture dépend du rapport de quantité entre ces matériaux. Les propriétés physico-mécaniques des matériaux changent en fonction de la température et de l'humidité selon leur affinité.
- 39 Les matériaux hydrophiles sont sensibles à l'eau. Une forte humidité provoquera un gonflement du matériau et inversement. Les matériaux hydrophobes sont sensibles aux températures. Une élévation de température entraînera une dilatation du matériau et réciproquement. Autrement dit à chaque variation d'humidité ou de température les matériaux subissent des variations de contraintes internes.
- 40 La température de transition vitreuse ( $T_g$ ) d'un matériau viscoélastique, en variant avec l'humidité, prouve qu'il existe une relation température/humidité. Par association, l'équivalence temps/température pourrait s'appliquer à une relation temps/humidité.

## Évaluation de la sensibilité à l'humidité et à la température d'une peinture

- 41 Deux méthodes ont été utilisées pour vérifier l'influence des variations climatiques sur les peintures et pour en évaluer l'importance. Pour illustrer ce propos, la peinture à l'huile sur toile de coton (encollage et préparation vinylique) - « Croisé RBV » datant de 2018 a servi de modèle pour tester les 2 méthodes.
- 42 Le premier dispositif sur UTM (Figure 10) est constitué :
- Une enceinte climatique en PMMA/polystyrène
  - Un générateur d'humidité programmable. Il permet la production d'un air à humidité contrôlée ou des cycles d'humidité à l'intérieur de l'enceinte.
  - La régulation de la température est obtenue par pulsion d'air chaud et contrôlée par des régulateurs électroniques
  - Les données climatiques sont enregistrées par un datalogger thermo hygrométrique placé à l'intérieur de l'enceinte
  - Un ordinateur pour piloter l'UTM et enregistrer les données.

Fig. 10 : 1<sup>er</sup> dispositif expérimental avec une éprouvette de peinture « Croisé RBV »



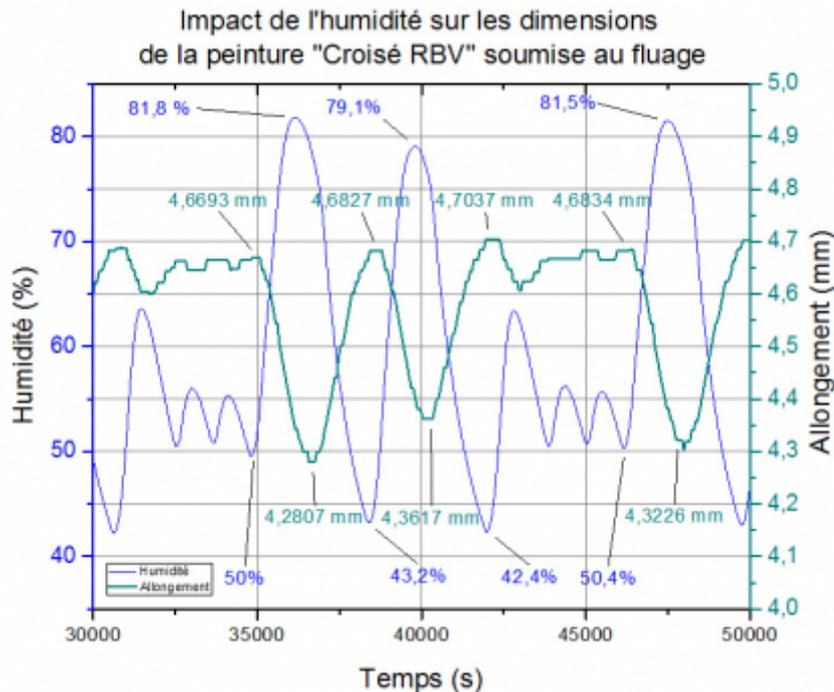
Ce site utilise des cookies et collecte des informations personnelles vous concernant. Pour plus de précisions, nous vous invitons à consulter notre **politique de confidentialité** (mise à jour le 25 juin 2018).

En poursuivant votre navigation, vous acceptez l'utilisation des cookies.

**Fermer**

43 Cet équipement expérimental permet de réaliser des essais de fluage monoaxial (charge constante) soumis à des cycles d'humidité. L'éprouvette de peinture, maintenue entre les deux attaches de la machine, va jouer le rôle d'une peinture libre. Les cycles d'humidité relative programmés vont provoquer des variations dimensionnelles enregistrées par l'appareil. L'enregistrement des données de la peinture « Croisé RBV » donne le graphe suivant (Figure 11).

**Fig.11 : Enregistrement par le 1<sup>er</sup> dispositif des variations hygrométriques et dimensionnelles de « Croisé RBV »**



Traitement des données avec le logiciel Origin (vers.VE)

Crédit © LARCROA

44 Les variations dimensionnelles - allongements et retraits de l'échantillon - sont synchronisées avec les cycles d'humidité. Par exemple pour un écart d'humidité de plus de 38 %, la variation dimensionnelle de la peinture est d'environ 0,22 %. Autrement dit, une peinture de 1 m de côté aura une variation dimensionnelle de plus de 2 mm. Cette variation est loin d'être négligeable et elle démontre la sensibilité de cette peinture à l'humidité.

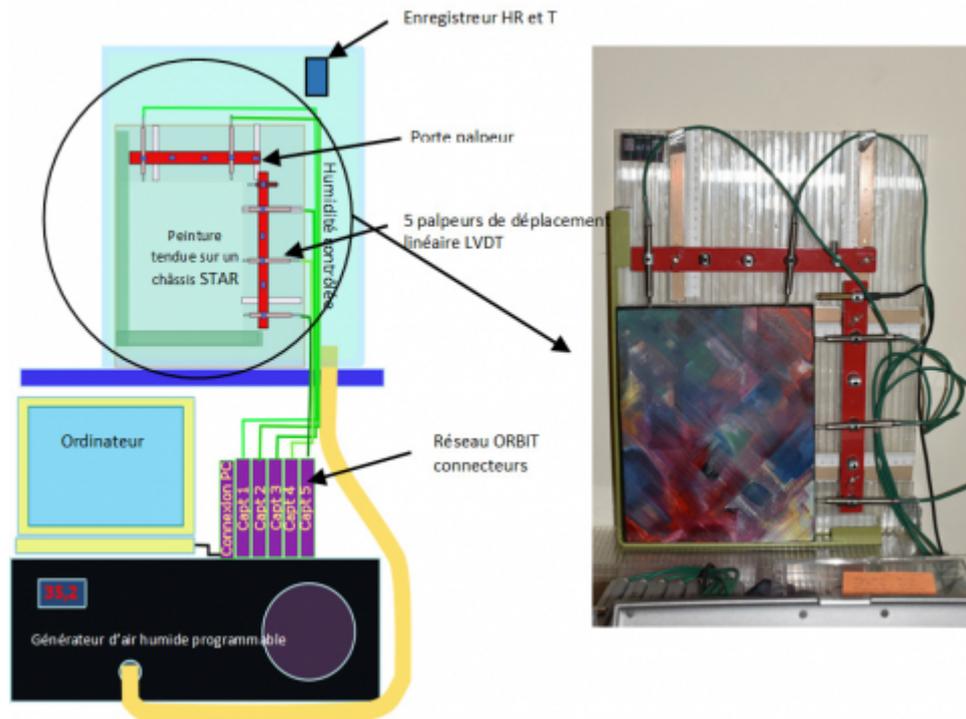
45 Le deuxième dispositif expérimental, appelé *cadre métrologique*, est constitué :

- De la peinture à tester, montée sur un châssis équipé du Système de Tension Auto-Régulée (STAR).
- D'un cadre métallique réglable sur lequel sont fixés 5 palpeurs de déplacement LVDT<sup>4</sup> reliés à un ordinateur via le réseau ORBIT<sup>5</sup>. La précision des palpeurs de déplacement est de  $\pm 0,5\mu\text{m}$ .
- D'une petite enceinte climatique reliée au générateur d'humidité programmable pour produire des cycles d'air sec et humide. Un datalogger de T et HR enregistre les données climatiques.

Ce site utilise des cookies et collecte des informations personnelles vous concernant. Pour plus de précisions, nous vous invitons à consulter notre **politique de confidentialité** (mise à jour le 25 juin 2018).

En poursuivant votre navigation, vous acceptez l'utilisation des cookies.

**Fermer**

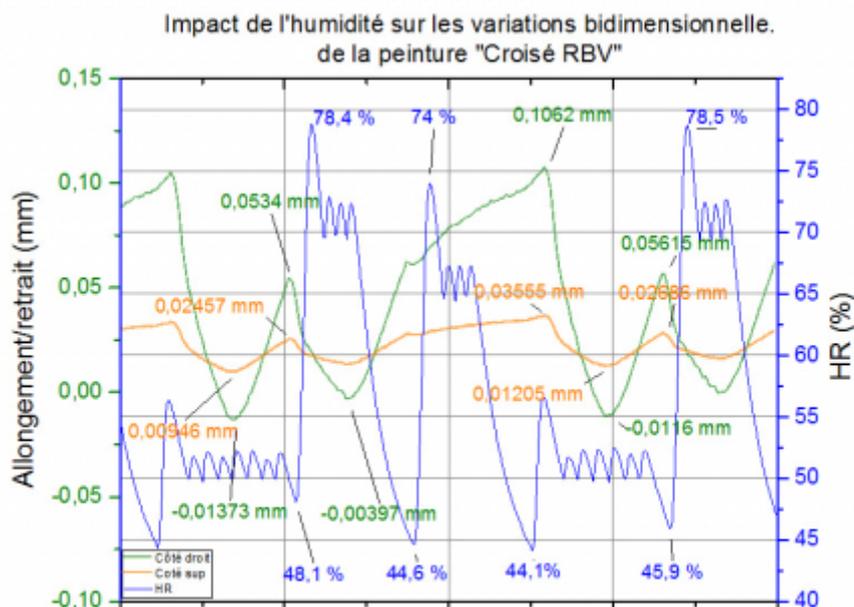


Dispositif expérimental développé par LARCROA

Crédit © LARCROA

- 47 La peinture « Croisé RBV », tendue sur le châssis à tension autorégulée, a été testée. Cette méthode expérimentale permet de déterminer les variations biaxiales d'allongements/retraits de la peinture. Elle prend en compte les forces de frottement liées à la tension de la peinture sur le châssis. Les données enregistrées se présentent sous la forme d'un graphe (Figure 13).

**Fig. 13 : Enregistrement par le 2<sup>e</sup> dispositif des variations hygrométriques et dimensionnelles de la peinture « Croisé RBV »**



Ce site utilise des cookies et collecte des informations personnelles vous concernant. Pour plus de précisions, nous vous invitons à consulter notre **politique de confidentialité** (mise à jour le 25 juin 2018).

En poursuivant votre navigation, vous acceptez l'utilisation des cookies.

**Fermer**

- 49 Ces 2 essais montrent que les variations hygrométriques ont une incidence importante sur le comportement des peintures.

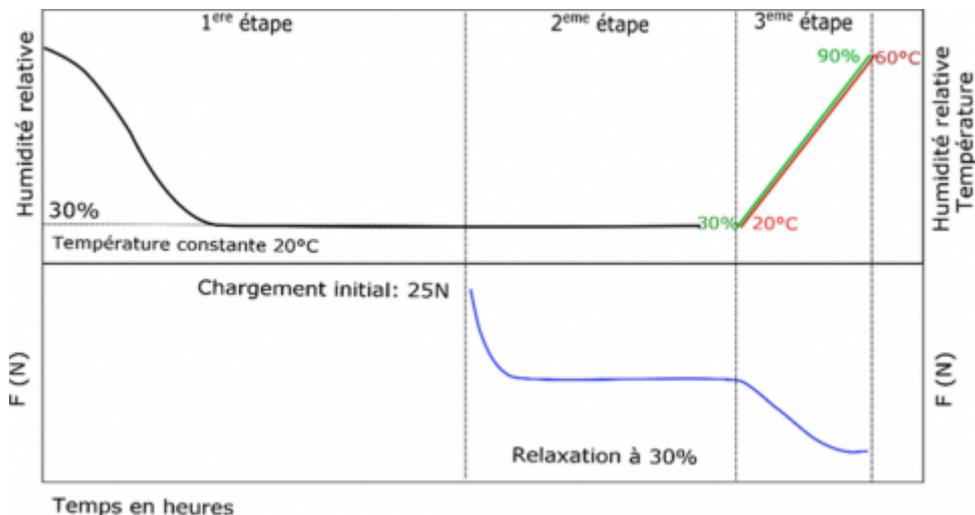
## Diagramme de sensibilité à l'humidité et à la température

- 50 La construction d'un diagramme de sensibilité est faite à l'aide du premier dispositif expérimental. Le diagramme est obtenu en suivant le protocole que nous avons mis au point. Il comprend 3 étapes (Figure 14) :

- Quand l'humidité est stabilisée à 30 % HR, l'essai de relaxation est initié. Une charge de 25N est appliquée à l'éprouvette.
- Les contraintes dans l'échantillon se relaxent pour atteindre une valeur constante.
- Modification des conditions climatiques. : *Humidité* : le générateur est programmé pour augmenter progressivement l'humidité de 30 % à 90 %. La température est maintenue constante à environ 20°C. *Température* : un régulateur de température déclenche ou arrête le fonctionnement d'un ventilateur d'air chaud intégré dans l'enceinte. Consigné à 60°C la température atteindra graduellement cette température alors que l'humidité est maintenue à 30 % HR. Les variations de force exercées par l'échantillon sont enregistrées pendant les changements d'humidité ou de température toutes les 10 secondes.

- 51 Ensuite, les données climatiques et mécaniques enregistrées sont récupérées et traitées sur les logiciels Excel<sup>6</sup> et Origine<sup>7</sup> pour produire un diagramme de sensibilité à l'humidité ou à la température.

Fig.14: Protocole d'essai en 3 étapes



Représentation graphique des 3 étapes du protocole d'essai

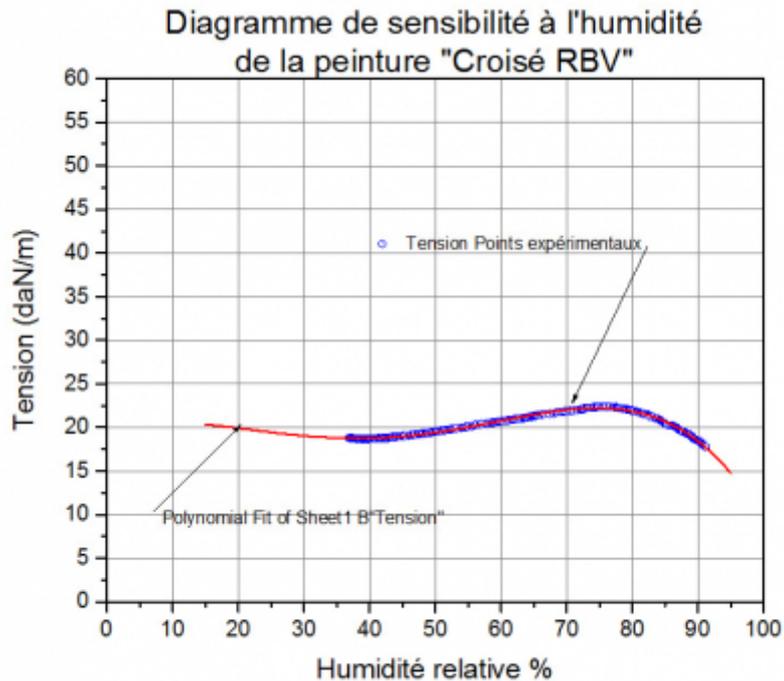
Crédit © LARCROA

Ce site utilise des cookies et collecte des informations personnelles vous concernant. Pour plus de précisions, nous vous invitons à consulter notre **politique de confidentialité** (mise à jour le 25 juin 2018).

En poursuivant votre navigation, vous acceptez l'utilisation des cookies.

**Fermer**

Fig. 15 : construction d'un diagramme de sensibilité



Traitement des données avec le logiciel Origin 2015 (vers.VE).

Crédit © LARCROA

- 53 Le diagramme de sensibilité est une courbe décrite mathématiquement par une fonction polynomiale du 4<sup>e</sup> degré.

$$t(HR, T) = a + b(HR, T) + c(HR, T)^2 + d(HR, T)^3 + d(HR, T)^4$$

- 54 Ce diagramme représente la sensibilité de la peinture à l'humidité ou à la température.

## Fatigue mécanique et endurance du film de peinture $V_{mini}t$

- 55 La fatigue mécanique peut être la conséquence des variations de contraintes provoquées par des cycles d'humidité. Elle se traduit par l'alternance de

- contraintes maximum (chute d'HR)
- contraintes minimum (élévation d'HR)

- 56 La variation de contrainte s'exprime par la différence entre la contrainte maximum et minimum, qui oscille autour d'une contrainte moyenne.

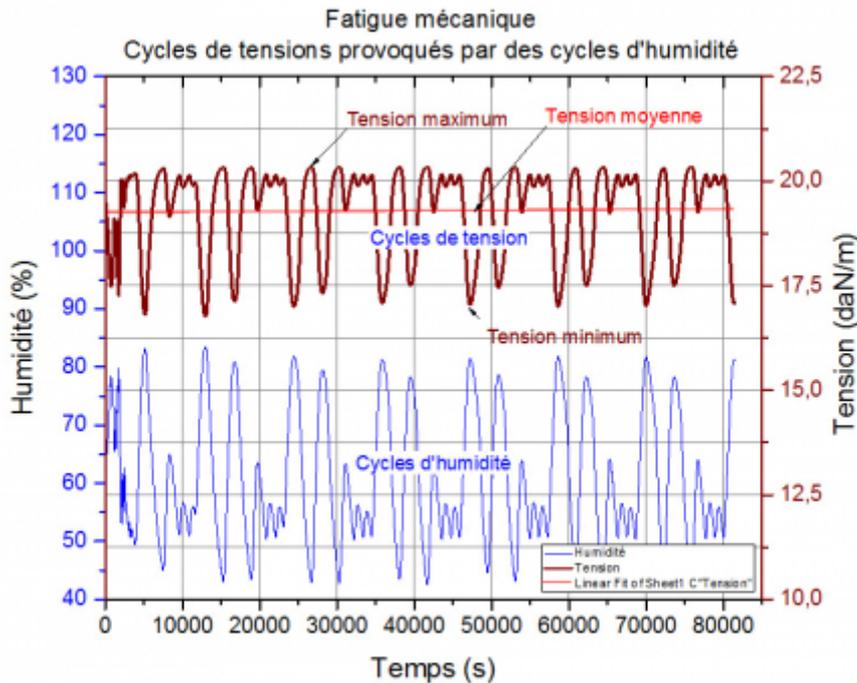
- 57 Dans une peinture sur toile tendue sur châssis les variations de contraintes provoquées par des cycles climatiques, sont équivalentes à des variations de tension (Figure 16).

Fig. 16 : Courbe des variations de tension induites par des cycles d'humidité

Ce site utilise des cookies et collecte des informations personnelles vous concernant. Pour plus de précisions, nous vous invitons à consulter notre **politique de confidentialité** (mise à jour le 25 juin 2018).

En poursuivant votre navigation, vous acceptez l'utilisation des cookies.

**Fermer**



Traitement des données avec le logiciel Origin 2015 (vers.VE).

Crédit © LARCROA

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

59 En résistance des matériaux, différentes théories ont vu le jour pour déterminer en fatigue mécanique, la limite d'endurance ( $\sigma D$ ) des matériaux. Les métaux et certains plastiques ont fait l'objet de nombreuses recherches dans ce domaine. Concernant la limite d'endurance des couches de peinture, à notre connaissance aucune étude sur ce sujet n'a été publiée. Nos recherches sont basées principalement sur les travaux de Griffith A, Irwin G. et Wöhler A qui ont apporté des solutions à des problèmes structurels.

60 Toutefois les peintures d'art sur toile tendue sur châssis subissent continuellement des variations de tension provoquées par l'instabilité climatique et les vibrations. L'évaluation de la limite d'endurance d'un film de peinture est une caractéristique mécanique essentielle pour estimer ou évaluer les risques de dégradation mécanique des peintures artistiques.

61 Les propriétés mécaniques d'une peinture, constituée d'une matrice polymérique, de particules ou défauts rigides sont liées à leur structure à l'échelle microscopique. Lors d'une variation de tension, le film de polymère et les particules ou défauts ne réagissent pas de la même manière. Cette hétérogénéité liants/particules ou défauts crée des zones de concentrations de contraintes qui sont caractérisées par le *facteur de concentration de contraintes*  $Kt$ . Si on admet que la limite d'endurance d'une peinture  $\sigma Dp$  est liée à la fois à la contrainte à la rupture du film de polymère et au facteur de concentration de contraintes, on peut l'exprimer comme rapport entre la  $\sigma_{rupt}$  et  $Kt$ .

$$\sigma Dp = \frac{\sigma_{rupt}}{Kt}$$

62 La méthode d'analyse numérique par éléments finis (FEA)<sup>8</sup> a servi à démontrer que

Ce site utilise des cookies et collecte des informations personnelles vous concernant. Pour plus de précisions, nous vous invitons à consulter notre **politique de confidentialité** (mise à jour le 25 juin 2018).

En poursuivant votre navigation, vous acceptez l'utilisation des cookies.

**Fermer**

64 Dans le domaine de la peinture, la limite d'endurance se définit aussi par la variation minimum de tensions  $V_{mini}t$ .

$$V_{mini}t = \sigma Dp \times e$$

65 ou  $e$  est l'épaisseur du film de peinture. Plus la  $V_{mini}t$  est élevée plus la peinture pourra résister à des cycles de variations d'humidité ou de température.

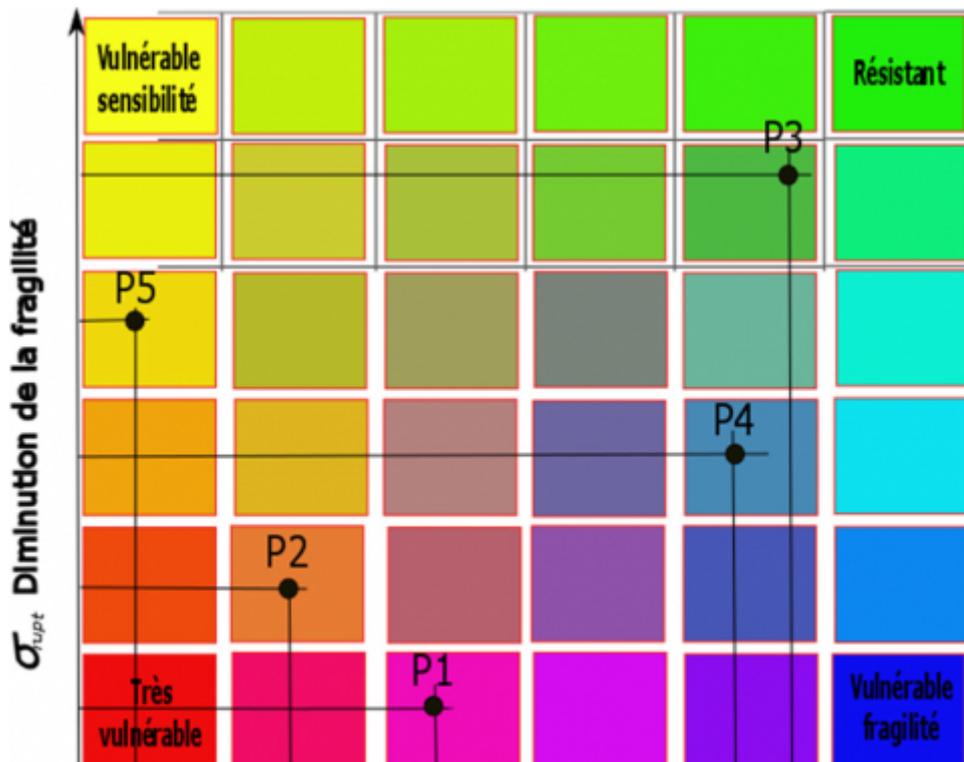
## Degré de vulnérabilité d'une peinture

66 Le degré de vulnérabilité d'une peinture est une notion qui implique 2 propriétés physico-mécaniques ;

- *La fragilité* : Elle est définie par la contrainte à la rupture du film de peinture, c'est-à-dire sa résistance en traction. Plus elle est faible plus sa fragilité est élevée.
- *La sensibilité* : Elle est déterminée par la variation minimum de tension  $V_{mini}t$ , c'est-à-dire sa capacité à supporter des cycles de variations de tension induits par des fluctuations climatiques. Plus la  $V_{mini}t$  est petite plus sa sensibilité à HR ou T est importante.

67 À partir de ces deux propriétés, une représentation graphique du degré de vulnérabilité d'une peinture peut-être construite. En repérant la valeur de contrainte à la rupture  $\sigma_{rupt}$  et la variation minimale de tension  $V_{mini}t$ , sur le graphe, sa position permettra d'évaluer le degré de vulnérabilité de la peinture (Figure 17).

Fig. 17 : Représentation des degrés de vulnérabilité de cinq peintures



Ce site utilise des cookies et collecte des informations personnelles vous concernant. Pour plus de précisions, nous vous invitons à consulter notre **politique de confidentialité** (mise à jour le 25 juin 2018).

En poursuivant votre navigation, vous acceptez l'utilisation des cookies.

**Fermer**

- P5 : très sensible au climat et moyennement fragile – vulnérable
- P4 : moyennement fragile et peu sensible au climat- peu vulnérable
- P3 : peu fragile et peu sensible au climat - résistante

69 Un classement par degré de vulnérabilité des peintures permet aux responsables de collection de prendre des mesures adaptées au cas par cas. Lors d'un prêt, d'une exposition ou toute autre opération impliquant des œuvres, des mesures de conservation plus strictes pourraient être appliquées selon les cas. Dans cet exemple des mesures de conservation plus strictes devraient être appliquées aux peintures P1, P2, P5 plutôt qu'aux peintures P3 et P4.

## Évaluation des risques de dégradation mécaniques des peintures

70 L'utilisation de la fonction polynomiale issue de la modélisation mathématique du comportement des peintures permet de transformer les données climatiques, humidité et température, en données mécaniques, telle que la tension. La limite d'endurance en fatigue mécanique, représentée par la variation minimale de tension, va déterminer la zone de tolérance de la peinture à l'intérieur de laquelle aucun risque de dégradation mécanique n'est possible.

71 Ainsi en partant de ces données, un module de calcul permet d'évaluer les risques encourus par une peinture lorsqu'elle est soumise pendant un transport ou une exposition à un environnement plus ou moins stable. Les résultats de l'analyse des données par le calcul sont regroupés dans les différentes fenêtres du tableau de bord (Figure 18).

Fig. 18 : Tableau de bord du module de calcul « indicateur de risques »



Tableau de bord du module de calcul sur Excel

Crédit © LARCROA

72 Les risques peuvent être pondérés en fonction du temps – durée d'une exposition, temps de transport, etc. Cet outil d'évaluation des risques prend en compte les

Ce site utilise des cookies et collecte des informations personnelles vous concernant. Pour plus de précisions, nous vous invitons à consulter notre **politique de confidentialité** (mise à jour le 25 juin 2018).

En poursuivant votre navigation, vous acceptez l'utilisation des cookies.

**Fermer**

- 74 Ces résultats ont ouvert des horizons vers la création de nouvelles solutions. Ces Outils d'Évaluation (OE) sont complémentaires aux Outils d'Aide à la Décision (OAD). Les OE ne sont pas élaborés, comme la plupart des OAD d'algorithmes, mais ils reposent sur des modules de calcul qui intègrent les propriétés physiques et mécaniques des peintures. Ces outils opérationnels donnent aux responsables de collections de multiples possibilités d'organisation de leurs collections en tenant compte du contenu et de l'environnement.
- 75 Il lui est possible d'envisager aussi une programmation plus sécurisée des prêts pour exposition ou pour des événements, d'être attentif aux œuvres classées vulnérables et de les soumettre à des contrôles plus fréquents.

---

## Bibliographie

BRATASZ, L., AKOGLU, K.G., KEKICHEFF, P., *Fracture saturation in paintings makes them less vulnerable to environmental variations in museums*, Heritage Science, 2020.

BICHLMAIR, S., HOLL, K., and Kilian, R., 'The moving fluctuation range – a new analytical method for evaluation of climate fluctuations in historic buildings', *Climate for collections standards and uncertainties*, Munich, 2012, p. 439–450.

DEGALLAIX, S., ILSCHNER, B., *Traité des matériaux 2 - Caractérisation expérimentale des matériaux - Propriétés physiques, thermiques et mécaniques* - Éditions polytechniques et Universitaires Romandes, 2002.

FERRY, J.D., *Viscoelastic properties of polymers*, 3e édition - John Wiley & Sons, 1980  
DOI : 10.1149/1.2428174

HARTING, D.D., HAGAN, S., MICHALSKI, S., CHOQUETTE, M., *CCI Lining projet: testing of lined model painting from fractions of a second to decades*, ICOM CC, Lisbon 201, Online 19/11/2020, <https://www.icom-cc-publications-online.org/PublicationDetail.aspx?cid=d312b221-3b1f-4895-b26e-9c0c137ae318>

LIGTERINK, F.J., DI PIETRO, G., "Canvas paintings on cold walls: relative humidity differences near the stretcher", *Museum microclimates: contributions to the Copenhagen conference, 19-23 November 2007*, Copenhagen, 2007, p. 27-38.

MECKLENBURG, M.F., *Micro Climates and Moisture Induced Damage to Paintings*. Smithsonian Museum Conservation Institute Washington, D.C. Copenhagen, November. 19-23, 2007, p. 19-25.

MICHALSKI, S., PEDERSOLI, J.L. *Méthode ABC pour appliquer la gestion des risques à la préservation des biens culturels*- Canadian Conservation Institute (CCI) International Centre for the Study of Preservation and Restoration of Cultural Property, 2016.

ROCHE, A. "Limite d'endurance d'un film de peinture". *Physical Issues in the Conservation of Paintings: Monitoring, Documenting and Mitigating*. ICOM-CC Paintings, Preventive Conservation and Documentation Working Groups, Paris, 2016.

ROCHE, A., *La conservation des peintures modernes et contemporaines*, CNRS Éditions, 2016.

---

## Notes

<sup>1</sup> MECKLENBURG, M.F., *Micro Climates and Moisture Induced Damage to Paintings*. Smithsonian Museum Conservation Institute Washington, D.C., Copenhagen, November. 19-23, 2007, p.19-25 ; BRATASZ, L., AKOGLU, K.G., KÉKICHEFF, P., *Fracture saturation in paintings makes them less vulnerable to environmental variations in museums*, Heritage Science, 2020; LIGTERINK F.J., DI PIETRO, G., : *Canvas paintings on cold walls: relative humidity differences near the stretcher*, Copenhagen 2007, p. 27-38.

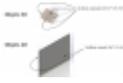
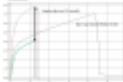
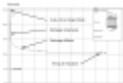
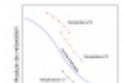
<sup>2</sup> BICHLMAIR S., HOLL K. AND KILIAN R. "The moving fluctuation range – a new

Ce site utilise des cookies et collecte des informations personnelles vous concernant. Pour plus de précisions, nous vous invitons à consulter notre **politique de confidentialité** (mise à jour le 25 juin 2018).

En poursuivant votre navigation, vous acceptez l'utilisation des cookies.

**Fermer**

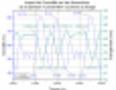
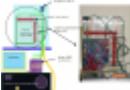
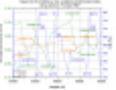
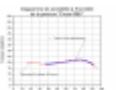
## Table des illustrations

	<b>Titre</b>	Fig.1: Surfaces exposées d'un objet 3D et 2D
	<b>Légende</b>	Représentation en 3D et 2D d'objets
	<b>Crédits</b>	Crédit © LARCROA
	<b>URL</b>	<a href="http://journals.openedition.org/ceroart/docannexe/image/7003/img-1.jpg">http://journals.openedition.org/ceroart/docannexe/image/7003/img-1.jpg</a>
	<b>Fichier</b>	image/jpeg, 88k
	<b>Titre</b>	Fig.2 : Machine Universelle de Tests (UTM)
	<b>Légende</b>	LLYORD LRX 2500
	<b>Crédits</b>	Crédit © LARCROA
	<b>URL</b>	<a href="http://journals.openedition.org/ceroart/docannexe/image/7003/img-2.jpg">http://journals.openedition.org/ceroart/docannexe/image/7003/img-2.jpg</a>
	<b>Fichier</b>	image/jpeg, 174k
	<b>Titre</b>	Fig. 3 : Courbe de traction d'une peinture Liquitex® sur non-tissé encollé de Plextol® B 500, d'un non-tissé encollé de Plextol® B 500 et la courbe théorique du Liquitex®
	<b>Légende</b>	Logiciel NEXYGEN (version 3). Procédure de rupture en traction (40/060)
	<b>Crédits</b>	Crédit © LARCROA
	<b>URL</b>	<a href="http://journals.openedition.org/ceroart/docannexe/image/7003/img-3.jpg">http://journals.openedition.org/ceroart/docannexe/image/7003/img-3.jpg</a>
	<b>Fichier</b>	image/jpeg, 97k
	<b>Titre</b>	Fig. 4 : Courbe de traction d'une peinture à l'huile
	<b>Légende</b>	Logiciel Nexygen (version 3). Procédure de rupture en traction (40/0640)
	<b>Crédits</b>	Crédit © LARCROA
	<b>URL</b>	<a href="http://journals.openedition.org/ceroart/docannexe/image/7003/img-4.jpg">http://journals.openedition.org/ceroart/docannexe/image/7003/img-4.jpg</a>
	<b>Fichier</b>	image/jpeg, 89k
	<b>Titre</b>	Fig. 5 : Courbe de fluage d'une peinture sur toile de coton
	<b>Légende</b>	Logiciel Nexygen (version 3). Procédure de fluage (40/0642)
	<b>Crédits</b>	Crédit © LARCROA
	<b>URL</b>	<a href="http://journals.openedition.org/ceroart/docannexe/image/7003/img-5.jpg">http://journals.openedition.org/ceroart/docannexe/image/7003/img-5.jpg</a>
	<b>Fichier</b>	image/jpeg, 110k
	<b>Titre</b>	Fig. 6 : Courbe de relaxation d'une peinture sur toile de coton
	<b>Légende</b>	Logiciel Nexygen (version 3). Procédure de relaxation (40/0644)
	<b>Crédits</b>	Crédit © LARCROA
	<b>URL</b>	<a href="http://journals.openedition.org/ceroart/docannexe/image/7003/img-6.jpg">http://journals.openedition.org/ceroart/docannexe/image/7003/img-6.jpg</a>
	<b>Fichier</b>	image/jpeg, 125k
	<b>Titre</b>	Fig. 7 : Courbes de relaxation d'un même matériau à 4 températures. Translation des courbes pour obtenir une courbe maitresse en fonction du temps
	<b>Légende</b>	John D.Ferry, <i>Op. cit.</i> , p.283
	<b>URL</b>	<a href="http://journals.openedition.org/ceroart/docannexe/image/7003/img-7.jpg">http://journals.openedition.org/ceroart/docannexe/image/7003/img-7.jpg</a>
	<b>Fichier</b>	image/jpeg, 69k
	<b>Titre</b>	Fig. 8 : Courbe de saturation de l'eau
	<b>Légende</b>	Teneur en eau et humidité absolue. Roche. A, <i>Op.cit.</i> , 2016, p.47.
	<b>Crédits</b>	Crédit © LARCROA

Ce site utilise des cookies et collecte des informations personnelles vous concernant. Pour plus de précisions, nous vous invitons à consulter notre **politique de confidentialité** (mise à jour le 25 juin 2018).

En poursuivant votre navigation, vous acceptez l'utilisation des cookies.

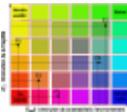
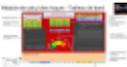
**Fermer**

	10.jpg
<b>Fichier</b>	image/jpeg, 126k
<b>Titre</b>	Fig. 10 : 1 <sup>er</sup> dispositif expérimental avec une éprouvette de peinture « Croisé RBV »
 <b>Légende</b>	LLOYD LRX 2500 et enceinte climatique
<b>Crédits</b>	Crédit © LARCROA
<b>URL</b>	<a href="http://journals.openedition.org/ceroart/docannexe/image/7003/img-11.jpg">http://journals.openedition.org/ceroart/docannexe/image/7003/img-11.jpg</a>
<b>Fichier</b>	image/jpeg, 100k
<b>Titre</b>	Fig.11 : Enregistrement par le 1 <sup>er</sup> dispositif des variations hygrométriques et dimensionnelles de « Croisé RBV »
 <b>Légende</b>	Traitement des données avec le logiciel Origin (vers.VE)
<b>Crédits</b>	Crédit © LARCROA
<b>URL</b>	<a href="http://journals.openedition.org/ceroart/docannexe/image/7003/img-12.jpg">http://journals.openedition.org/ceroart/docannexe/image/7003/img-12.jpg</a>
<b>Fichier</b>	image/jpeg, 202k
<b>Titre</b>	Fig. 12 : 2 <sup>e</sup> dispositif, cadre métrologique et peinture à l'huile sur toile de coton, « Croisé RBV »
 <b>Légende</b>	Dispositif expérimental développé par LARCROA
<b>Crédits</b>	Crédit © LARCROA
<b>URL</b>	<a href="http://journals.openedition.org/ceroart/docannexe/image/7003/img-13.jpg">http://journals.openedition.org/ceroart/docannexe/image/7003/img-13.jpg</a>
<b>Fichier</b>	image/jpeg, 199k
<b>Titre</b>	Fig. 13 : Enregistrement par le 2 <sup>e</sup> dispositif des variations hygrométriques et dimensionnelles de la peinture « Croisé RBV »
 <b>Légende</b>	Traitement des données avec le logiciel Origin (vers.VE)
<b>Crédits</b>	Crédit © LARCROA
<b>URL</b>	<a href="http://journals.openedition.org/ceroart/docannexe/image/7003/img-14.jpg">http://journals.openedition.org/ceroart/docannexe/image/7003/img-14.jpg</a>
<b>Fichier</b>	image/jpeg, 223k
<b>Titre</b>	Fig.14: Protocole d'essai en 3 étapes
 <b>Légende</b>	Représentation graphique des 3 étapes du protocole d'essai
<b>Crédits</b>	Crédit © LARCROA
<b>URL</b>	<a href="http://journals.openedition.org/ceroart/docannexe/image/7003/img-15.jpg">http://journals.openedition.org/ceroart/docannexe/image/7003/img-15.jpg</a>
<b>Fichier</b>	image/jpeg, 89k
<b>Titre</b>	Fig. 15 : construction d'un diagramme de sensibilité
 <b>Légende</b>	Traitement des données avec le logiciel Origin 2015 (vers.VE).
<b>Crédits</b>	Crédit © LARCROA
<b>URL</b>	<a href="http://journals.openedition.org/ceroart/docannexe/image/7003/img-16.jpg">http://journals.openedition.org/ceroart/docannexe/image/7003/img-16.jpg</a>
<b>Fichier</b>	image/jpeg, 140k
<b>URL</b>	<a href="http://journals.openedition.org/ceroart/docannexe/image/7003/img-17.png">http://journals.openedition.org/ceroart/docannexe/image/7003/img-17.png</a>
<b>Fichier</b>	image/png, 7,4k
<b>Titre</b>	Fig. 16 : Courbe des variations de tension induites par des cycles d'humidité
 <b>Légende</b>	Traitement des données avec le logiciel Origin 2015 (vers.VE)

Ce site utilise des cookies et collecte des informations personnelles vous concernant. Pour plus de précisions, nous vous invitons à consulter notre **politique de confidentialité** (mise à jour le 25 juin 2018).

En poursuivant votre navigation, vous acceptez l'utilisation des cookies.

**Fermer**

	<b>Fichier</b>	image/jpeg, 12k
	<b>URL</b>	<a href="http://journals.openedition.org/ceroart/docannexe/image/7003/img-21.png">http://journals.openedition.org/ceroart/docannexe/image/7003/img-21.png</a>
$V_{\text{mij}}t = \sigma D p \times e$	<b>Fichier</b>	image/png, 2,4k
	<b>Titre</b>	Fig. 17 : Représentation des degrés de vulnérabilité de cinq peintures
	<b>Légende</b>	Représentation graphique du degré de vulnérabilité
	<b>Crédits</b>	Crédit © LARCROA
	<b>URL</b>	<a href="http://journals.openedition.org/ceroart/docannexe/image/7003/img-22.jpg">http://journals.openedition.org/ceroart/docannexe/image/7003/img-22.jpg</a>
	<b>Fichier</b>	image/jpeg, 142k
	<b>Titre</b>	Fig. 18 : Tableau de bord du module de calcul « indicateur de risques »
	<b>Légende</b>	Tableau de bord du module de calcul sur Excel
	<b>Crédits</b>	Crédit © LARCROA
	<b>URL</b>	<a href="http://journals.openedition.org/ceroart/docannexe/image/7003/img-23.jpg">http://journals.openedition.org/ceroart/docannexe/image/7003/img-23.jpg</a>
	<b>Fichier</b>	image/jpeg, 72k

## Pour citer cet article

### Référence électronique

Alain Roche, « Apports des essais mécaniques : Évaluation de la vulnérabilité et des risques de dégradation des peintures. », *CeROArt* [En ligne], 12 | 2020, mis en ligne le 15 janvier 2021, consulté le 19 avril 2021. URL : <http://journals.openedition.org/ceroart/7003> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/ceroart.7003>

## Auteur

### Alain Roche

Alain Roche est diplômé de l'Institut Français de Restauration des Œuvres d'Art (IFROA/INP) et ingénieur au Conservatoire National des Arts et Métiers (CNAM). Pensionnaire à la villa Médicis à Rome. Conservateur restaurateur pour le C2RMF et les MH. Enseignant INP Université Paris 1. Fondateur du LARCROA en 1995. Auteur de trente-cinq articles et publication de trois livres dont le dernier, publié en juin 2016 aux éditions du CNRS. Nommé « Chevalier des arts et des lettres ».

### Articles du même auteur

#### Contribution Of Mechanical Tests: Assessing Vulnerability And Risks Of Degradation In Paintings [Texte intégral]

Paru dans *CeROArt*, 12 | 2020

## Droits d'auteur



CeROArt – Conservation, exposition, restauration d'objets d'arts est mis à disposition selon les termes de la licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International.

Ce site utilise des cookies et collecte des informations personnelles vous concernant. Pour plus de précisions, nous vous invitons à consulter notre **politique de confidentialité** (mise à jour le 25 juin 2018).

En poursuivant votre navigation, vous acceptez l'utilisation des cookies.

**Fermer**