



La conservation  
préventive  
dans les demeures  
historiques et les  
châteaux-musées

Méthodologies  
d'évaluation  
et applications

SilvanaEditoriale

**La conservation préventive  
dans les demeures historiques  
et les châteaux-musées.**

Méthodologies d'évaluation  
et applications

Colloque de l'Établissement public  
du château, du musée et du domaine national  
de Versailles (EPV),  
de l'Association des résidences  
royales européennes (ARRE)  
et du Centre de recherche  
du château de Versailles (CRCV)

en collaboration avec le Comité international pour  
les demeures historiques-musées (ICOM-DEM HIST)  
au musée national des châteaux de Versailles  
et de Trianon

Du 29 novembre au 1<sup>er</sup> décembre 2017

**Actes du colloque**

**Sous la direction scientifique de**  
Danilo Forleo  
*Chargé de la conservation préventive  
et responsable du programme EPICO,  
Musée national des châteaux de Versailles  
et de Trianon*

**Coordination éditoriale**  
Nadia Francaviglia  
*Attachée de recherche pour le programme EPICO,  
Centre de recherche du château de Versailles*

**Traductions**  
Clarisse Le Mercier, Camila Mora

Cet ouvrage rassemble les présentations des intervenants du colloque international organisé dans le cadre du programme de recherche EPICO (European Protocol In Preventive Conservation) par :  
L'Établissement public du château, du musée et du domaine national de Versailles  
Catherine Pégard, *présidente*  
Laurent Salomé, *directeur du musée national des châteaux de Versailles et de Trianon*  
Thierry Gausseron, *administrateur général*  
L'Association des résidences royales européennes  
Le Centre de recherche du château de Versailles

Avec la participation de :  
Ministère de la Culture  
ICOM-DEMIST (Comité international pour les demeures historiques-musées)

#### Comité scientifique

Lorenzo Appolonia, *président, Groupe italien de l'Institut international pour la conservation- IGIIC*  
Florence Bertin, *responsable du service conservation préventive et restauration, Musée des Arts décoratifs - MAD*  
Michel Dubus, *coordinateur du groupe ICOM-CC sur la conservation préventive, Centre de recherche et de restauration des musées de France - C2RMF*  
Danilo Forleo, *chargé de la conservation préventive et responsable du programme EPICO, musée national des châteaux de Versailles et de Trianon*  
Nadia Francaviglia, *attachée de recherche pour le programme EPICO, Centre de recherche du château de Versailles*  
Agnieszka Laudy, *adjointe au chef du département de l'Architecture, Musée du palais du roi Jean III, Wilanów*  
Bertrand Lavedrine, *directeur, Centre de recherche sur la conservation des collections - CNRS*  
Béatrice Sarrazin, *conservateur général, musée national des châteaux de Versailles et de Trianon*  
Sarah Staniforth, *ancienne présidente, Institut International pour la Conservation - IIC*

#### Comité d'organisation

Elena Alliaudi, *coordinatrice, Association des résidences royales européennes*  
Hélène Legrand, *assistante coordination, Association des résidences royales européennes*  
Matilde-Maria Cassandro-Malphettes, *secrétaire général, Centre de recherche du château de Versailles*  
Bernard Ancer, *chargé des affaires générales, Centre de recherche du château de Versailles*  
Olivia Lombardi, *assistante de direction, Centre de recherche du château de Versailles*  
Serena Gavazzi, *chef du service mécénat, Établissement public du château du musée et du domaine national de Versailles*  
Noémie Wansart, *collaboratrice scientifique, musée national des châteaux de Versailles et de Trianon*

#### Remerciements

Lorenzo Appolonia, Lionel Arzac, Jean-Vincent Bacquart, Wojciech Bagiński, Jérémie Benoît, Marie-Alice Beziaud, Céline Boissiere, Anne Carasso, Élisabeth Caude, Gabrielle Chadie, Thibault Creste, Stefania De Blasi, Elisabetta Brignoli, Hélène Dalifard, Gaël de Guichen, Ariane de Lestrangle, Festese Devarayar, Françoise Feige, Christophe Fouin, Éric Gall, Thomas Garnier, Roberta Genta, Denis Guillemard, Michelle-Agnoko Gunn, l'équipe du Grand Café d'Orléans, Pierre-Xavier Hans, Nicole Jamieson, Thierry Lamouroux, Marie Leimbacher, Nadège Marzanato, Béatrice Messaoudi, Stefan Michalski, Christian Milet, Marya Nawrocka-Teodorczyk, Marco Nervo, Lucie Nicolas-Vullierme, Clotilde Nouailhat, Agnieszka Pawlak, Amaury Percheron, Arnaud Prêtre, Gérard Robaut, Bertrand Rondot, Valériane Rozé, Béatrice Sarrazin, Béatrix Saule, Didier Saulnier, Emma Scheinmaenn, Violaine Solari, Emilie Sonck, Pauline Tronca, Rémi Watiez, Thierry Webley, Sébastien Zimmerman



Avec le mécénat de



# Utiliser la science pour évaluer et prédire la réponse des objets dans les environnements des demeures historiques

## Résumé

L'évaluation des conditions de conservation des objets est essentielle dans l'environnement de demeures historiques. Bien que des conditions environnementales idéales ne soient pas possibles sans une modification radicale et souvent non envisageable de la structure du bâtiment, les techniques scientifiques peuvent venir en soutien de l'évaluation de conservation. Alors que des techniques d'inspection périodiques sont appliquées aux meubles, aux ivoires et aux peintures, il peut être très difficile d'attribuer les altérations observées à des événements environnementaux particuliers. Cette situation peut être surmontée grâce à des techniques de suivi continu où les effets de fluctuations environnementales deviennent évidents à l'aide de mesures à haute fréquence.

Le coût élevé ou l'expertise requise signifient que ces techniques ne sont disponibles que dans certains cas.

Cependant, les résultats de ces études permettent de développer des fonctions de dommages, grâce auxquelles on pourrait aussi mieux évaluer d'autres environnements. Cette recherche a développé de nouvelles fonctions de dommages et vérifié celles déjà publiées. English Heritage collecte des données sur toutes les altérations observées (ainsi que l'analyse instrumentale) sur ses collections. Cette démarche, bien que toujours en cours de développement, s'est avérée extrêmement efficace pour évaluer des environnements complexes et développer des évaluations des risques basées sur des données factuelles.

## Mots clés

Émission acoustique, corrélation d'images numériques, fluctuations d'HR.

**L**a récente norme environnementale du CEN se base sur l'évaluation de la conservation pour déterminer la stabilité d'un objet ou son instabilité [BSI, 2010]. Des techniques scientifiques peuvent fournir un support à l'évaluation de conservation et, dans certains cas, des instruments sensibles et portables peuvent détecter les dommages avant qu'ils ne soient visibles à l'œil nu.

L'attribution de la cause des altérations est très courante dans la conservation, à la fois pour améliorer les environnements, quand c'est nécessaire, et durant l'audit. Les analyses scientifiques peuvent aider à différencier dans certaines situations de nombreux phénomènes de détérioration qui semblent être visuellement similaires. Puisque l'équipement d'analyse

## David Thickett

Directeur de recherche, English Heritage, Rangers House, Chesterfield Walk, Londres  
david.thickett@english-heritage.org.uk, www.english-heritage.org.uk

## Vladimir Vilde

History of Art Department, University College London  
Vladimir.vilde.15@ucl.ac.uk

## Paul Lankester

English Heritage, Rangers House, Chesterfield Walk, Londres  
paul.lankester@english-heritage.org.uk  
www.english-heritage.org.uk

## Emma Richardson

History of Art Department, University College London  
e.richardson@ucl.ac.uk

devient plus portable et moins onéreux, les situations dans lesquelles il peut être utilisé sont désormais plus nombreuses. De plus, plusieurs équipements non invasifs sont maintenant disponibles. Les problèmes éthiques liés à l'analyse sont ainsi réduits, comme la plupart des prélèvements d'échantillons qui permettent de détecter et de comprendre les détériorations, compensant ainsi une perte future plus importante. Les techniques non invasives permettent également de répliquer les analyses pour caractériser les surfaces généralement hétérogènes rencontrées et des mesures multiples au même endroit à différents moments, à partir desquelles des taux de détérioration peuvent être dérivés [Thickett *et al.*, 2017].

La démarche scientifique a été utilisée pour développer des systèmes ancrés sur des critères décrivant visuellement la croissance et la culture des moisissures ainsi que des méthodes moléculaires pour identifier les espèces présentes et le risque. Elle commence aussi à être utilisée plus largement pour suivre la détérioration chimique. L'identification de produits corrosifs indique souvent la source de la corrosion. La quantification de sels solubles dans la pierre et la céramique, combinée aux modèles thermodynamiques, permet de comprendre quelles sont les plages de température moins dommageables et les intervalles d'humidité relative (HR) pour minimiser les risques d'altérations futures. L'état de la conservation du papier, du cuir et des émaux peut désormais être déterminé. Cependant, nous nous focaliserons dans cet article sur la détérioration physique, principalement causée par les fluctuations de HR, car nous n'entendons pas faire ici un article de synthèse : les exemples qui seront présentés ne serviront qu'à explorer certains aspects et non pas à faire une étude exhaustive du sujet qui nous intéresse.

Tous les cas d'altérations potentielles dues aux conditions environnementales dans les collections de English Heritage sont étudiés. Le moteur premier à cet égard est notre approche aux normes basées sur le comportement antérieur des collections, la science de la conservation et la capacité de contrôle sur les salles [Thickett *et al.*, 2012]. Par conséquent, la connaissance des comportements nuisibles est essentielle. Un minimum de données sont prises en compte : la date à laquelle l'altération a été observée, la date estimée à laquelle l'altération n'a pas été observée, deux images collectées (un plan large de l'objet et un plan serré de l'altération), ainsi qu'une année de données environnementales de la salle où se trouve l'objet. Des moniteurs (écrans) supplémentaires sont souvent installés pour déterminer la relation entre le capteur placé dans la salle et l'environnement de l'objet. Une analyse environnementale plus poussée est fréquemment entreprise afin de fournir un diagnostic. L'altération peut être étudiée plus en détail analytiquement, avec des produits corrosifs, des sels ou des espèces de moisissures identifiées.

L'exactitude des données de l'audit est souvent remise en question. Des méthodes sont disponibles pour évaluer et améliorer le biais entre les

<b>Matériel/lieu</b>	<b>Audit complet : pourcentage d'objets instables</b>	<b>Moyenne de 5% d'audit</b>	<b>Écart type</b>
Fer archéologique, toutes les collections exposées de l'EH English Heritage	2.56	2.53	0.83
Peintures, toutes les collections exposées l'EH English Heritage	2.24	2.29	1.12
Meubles dorés, toutes les collections exposées de l'EH English Heritage	1.98	1.94	0.98
Vaste gamme d'objets d'art et décoratifs à Audley End House	1.70	1.81	1.26
Vaste gamme d'objets d'art et décoratifs à Apsley House	2.87	2.98	1.34

évaluateurs [Taylor, 2017]. L'autre grande source d'erreur est l'échantillonnage, étant donné que les tailles des collections et les ressources empêchent souvent les audits complets.

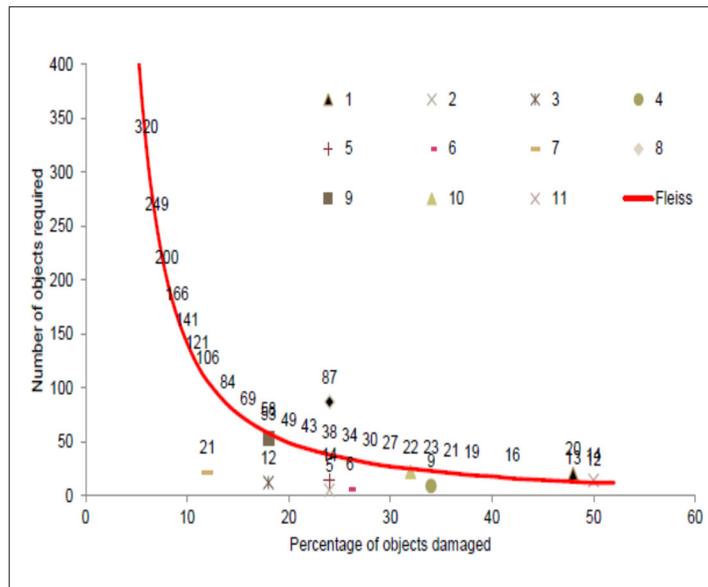
Les données de cinq audits complets existants ont été rééchantillonnées numériquement pour évaluer cette erreur. La méthode d'échantillonnage est celle utilisée dans la méthodologie d'audit d'English Heritage [Xavier-Rowe, 2011]. Les résultats ont été évalués en termes de pourcentage d'objets instables (catégorie 3 and 4) et comparés à la valeur de l'ensemble d'audits complets. Le rééchantillonnage numérique a été entrepris 100 fois pour un échantillon de 5 %. La distribution de données a été testée pour la normalité en utilisant le test Shapiro-Wilk avec une valeur alpha de 0.05, et s'est avérée être normalement distribuée [Shapiro et Wilk, 1965]. L'écart type a été ainsi calculé. Les résultats sont montrés dans le Tab. 1.

Comme on peut le voir, à un intervalle de confiance de 95 % (2 écarts-types), les données provenant des audits des collections avec un matériau unique ont une distribution plus étroite. L'audit d'une collection mixte augmente les erreurs d'échantillonnage. Cela est très probablement dû à l'augmentation de la variation des objets.

Une des utilisations des données de l'audit pourrait être d'essayer de relier la réponse des objets à leur environnement dans les salles évaluées. Le nombre d'objets requis pour fournir des résultats statistiquement significatifs est important pour cette approche. Les salles d'exposition ouvertes au public auront des environnements plus agressifs, étant donné qu'elles sont plus difficiles à contrôler que les magasins généralement fermés. Malheureusement, le nombre d'objets présents limite la taille potentielle de l'échantillonnage. La plupart des pièces historiques ont des environnements soit légèrement soit très différents les uns des autres. Le nombre d'objets d'un type particulier est souvent limité dans une salle. Le domaine de l'épidémiologie a développé des statistiques pour déterminer le nombre

*Tab. 1*  
Résultats d'échantillonnage numérique d'audits complets à 5 %, 100 fois.

Fig. 1  
 Nombre d'objets  
 requis pour une  
 comparaison  
 statistiquement  
 robuste de deux  
 groupes d'objets.



d'objets requis pour obtenir une étude significative à différents taux d'altération dans les deux groupes [Fleiss *et al.*, 2003]. Les résultats de ce travail (utilisant une valeur alpha et p de 0.05, ce qui veut dire essentiellement qu'il y a une chance de 1 sur 20 pour que les deux groupes de comparaison ne représentent pas l'entière population dont ils sont extraits) sont illustrés dans la Fig. 1. En partant du principe qu'un groupe est dans des conditions non dommageables, la différence du taux de dommage, exprimé en pourcentage d'objets endommagés, forme l'axe des x (si le second groupe a été endommagé par les conditions, la différence est plus faible). Comme on peut le voir, le nombre d'objets requis pour chaque groupe augmente considérablement lorsque le taux de dégâts (différence) diminue. La base de données des altérations donne un nombre d'objets endommagés d'un type particulier dans une salle, lorsqu'il est combiné à un décompte de tout objet de ce type, la différence dans le taux de dommage peut être évaluée. Un petit ensemble de résultats est représenté dans la Fig. 1. Les numéros sont aussi indiqués sur la Fig. 1 pour faciliter la compréhension.

Comme on peut le voir, plus de la moitié des instances montrées n'avaient pas assez d'objets présents au niveau des altérations mesurées pour fournir des informations statistiquement robustes. Une sélection minutieuse des études utilisant une telle approche est requise pour les salles et les collections. Un des avantages d'utiliser des techniques d'analyse sensibles est que les différences de conditions qui peuvent être détectées peuvent être plus petites que dans le cas d'un examen visuel. Cela réduit le nombre d'objets requis pour des statistiques robustes. Ce nombre peut être fréquemment limitatif comme indiqué.

### Mesures périodiques

Une gamme de techniques d'inspection a été appliquée aux collections.

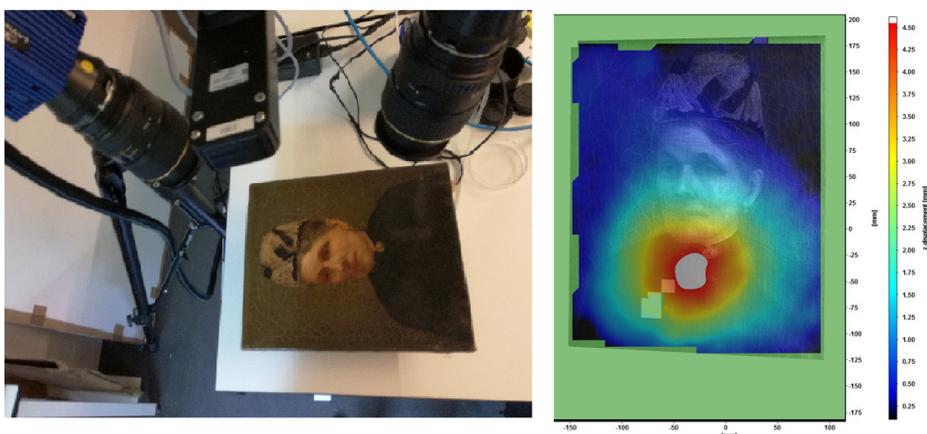


Fig. 2  
Configuration CIN en observant une peinture sur toile (à gauche), cartographie de déplacement hors plan (à droite).

Celles-ci comprennent généralement des photographies et des mesures de fissures, visuellement, à l'aide de jauges ou d'un microscope de mesure. La photogrammétrie, la numérisation laser 3D, interférométrie de speckle électronique et la corrélation d'images numériques ont également été appliquées dans quelques cas [Dulieu-Barton *et al.*, 2005]. Les mesures sont parfois appliquées périodiquement. La plupart des cas rapportés ont été obtenus à partir de deux séries de mesures, avec une tentative de connecter les changements aux environnements expérimentés.

### Développement de corrélations d'images numériques *in situ* (CIN)

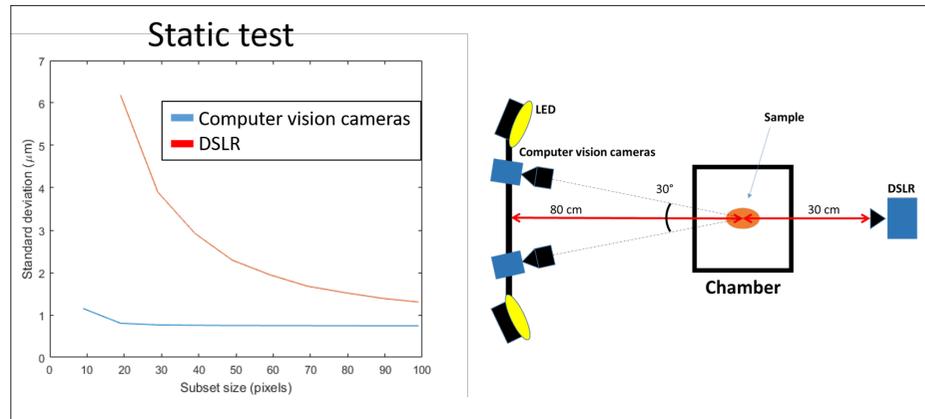
Afin de déployer des CIN *in situ*, il faut prendre en compte certains aspects qui diffèrent entre un laboratoire et le contexte d'un bâtiment historique. La CIN est une technique d'imagerie qui peut être très sensible, qui peut mesurer un mouvement de sous-pixel. Cette technique est basée sur la comparaison d'images dans le temps, en extrayant une cartographie de déplacement sur l'image qui peut mettre en évidence des déformations et des défauts. Dans la plupart des cas, des caméras de vision par ordinateur sont utilisées, celles-ci ont un capteur plus grand, de plus grande qualité et qui produit moins de bruit que les caméras commerciales. Toutefois, leur prix et la manipulation spécifique requise par ces appareils limitent leur accessibilité. De plus, comme les déplacements du micromètre sont mesurés, l'expérience doit être faite dans un environnement très stable avec des vibrations faibles. Ce qui n'est généralement pas la situation que nous rencontrons dans les bâtiments historiques.

La caractéristique principale qui peut compliquer la mesure CIN des œuvres d'art est le motif de l'image. Il est nécessaire d'avoir des caractéristiques aléatoires sur la surface observée. Dans l'industrie, le motif est généralement appliqué sur le matériau testé. Cela ne peut pas être fait sur un grand nombre d'œuvres d'art, puisque nous ne souhaitons pas avoir d'interaction avec l'objet et ne comptons que sur l'imagerie à long terme.

La restriction sur l'application des motifs n'est pas limitée au patrimoine culturel. Les études portant sur les dommages subis sous l'eau

Fig. 3

Comparaison entre la configuration de la vision par ordinateur et un seul DSLR.

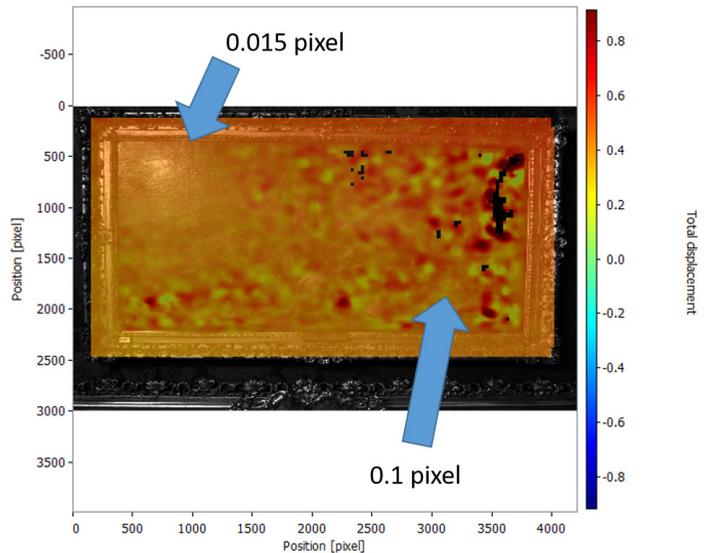


(où le motif peut se dissoudre) se basent sur le pattern naturel du matériel. La même approche peut être appliquée sur de nombreuses œuvres d'art où les détails esthétiques, les fissures ou les coups de pinceau peuvent former des motifs aléatoires. Mais cela exclut les objets qui ont des surfaces sans motifs ou avec des couleurs unies. En plus, certaines œuvres d'art ont les deux, comme un portrait peut avoir beaucoup de détails sur le personnage et un fond sombre et uni. Ces limitations nécessitent une évaluation approfondie du motif avant qu'une mesure ne soit envisagée.

Les tests initiaux appliquant un petit déplacement à l'arrière d'un portrait ont permis de localiser et mesurer le déplacement (Fig. 2, à droite). Le fond plutôt uni n'a pas posé de problème puisque sa surface était inégale, limitant les points morts seulement à la réflexion de la lumière et changeant le motif. Mais cette expérience particulière, bien qu'elle soit capable de mesurer le déplacement sans appliquer aucun motif, résulte d'un mouvement important de la peinture par rapport à la sensibilité de l'instrument.

D'autres tests montrent que la modification de l'HR et l'absorption d'humidité peuvent être aussi détectées sur une peinture. Toutefois, ces observations ont été effectuées dans un environnement contrôlé. La question demeure de savoir dans quelle mesure les données peuvent être fiables et comment les changements environnementaux, tels que l'intensité lumineuse, ont un impact sur les résultats. En déplaçant la peinture lors du test précédent, la réflexion de la lumière sur le vernis a modifié le motif observé par la caméra en créant des points morts. On peut facilement s'attendre à de telles erreurs sur une mesure *in situ* à côté de vibrations.

Avant de déployer une caméra sur le site, il est crucial de faire en sorte que l'instrument soit accessible à l'institution patrimoniale et adapté à des expériences autonomes. Pour ce faire, nous comparons les résultats d'un échantillon standard avec un speckle aléatoire entre une configuration de vision par ordinateur complète et une seule caméra commerciale, comme le montre la Fig. 3.



Le graphique montre une erreur aléatoire par rapport à la résolution de la cartographie de déplacement. Alors que ces données ne sont pas suffisantes pour donner la précision absolue du système, il est crucial d'évaluer comment les caméras voient les motifs au fil du temps. Cela va fluctuer, créant un déplacement virtuel. Même si les caméras de vision par ordinateur font beaucoup moins de bruit malgré leur éloignement, le DSLR (Digital Single Lens Reflex) a un niveau d'erreur très raisonnable jusqu'à  $6\mu\text{m}$ , ce qui est prometteur.

Fig. 4  
Erreur aléatoire mesurée d'une peinture.

Dans cette optique, nous pouvons commencer à surveiller la vraie peinture sur le site, en commençant par évaluer son motif et l'impact de l'environnement sur celui-ci. Dans le meilleur des cas, l'objet doit se déplacer d'une distance bien définie, ce qui sera comparé au déplacement mesuré par le CIN. En pratique, il n'est pas possible de déplacer la peinture ou la caméra sur le site avec une précision micrométrique. Par conséquent, nous avons commencé à considérer l'erreur aléatoire, comme l'illustre la Fig. 4. Plusieurs peintures de la collection Wellington à Apsley House (English Heritage) ont été prises en compte. Dans l'ensemble, les paysages ont mieux fonctionné puisqu'ils comprennent plus de détails sur le premier plan et l'arrière-plan. Les portraits étaient plus compliqués puisqu'ils avaient souvent un fond uni et des zones homogènes au premier plan (tissu, partie du visage, etc.). La mesure d'erreur aléatoire a donné de bons résultats pour une grande partie des peintures observées. Cela démontre la faisabilité potentielle d'une surveillance à long terme de la peinture, si les changements dus à l'HR sont suffisamment importants pour être détectés. Toutefois, la réflexion de la lumière a fortement influencé la mesure du bruit, comme le montre la Fig. 5.

La réflexion sur le vernis dans le coin supérieur gauche a amélioré le motif à travers la couche de peinture, donnant des caractéristiques plus définies dans cette zone. Cependant, la lumière ambiante peut affecter ce motif, en déplaçant l'erreur, ce qui peut être considéré par la caméra comme un vrai

Technique	Appliquée à	Résultats	Référence
Jauge de déformation	Bois	Nécessite une surface très plate, dépendance de la température	
Transducteur différentiel de tension linéaire	Fissures dans les meubles et peintures sur bois		Knight et Thickett, 2007
Fibre de Bragg	Peintures sur bois, tapisseries	La rigidité de la fibre peut affecter la réponse de l'objet	Dulieu-Barton <i>et al.</i> , 2005
Kit déformétrique	Peintures sur bois	A besoin d'espace derrière le panneau	Uzielli <i>et al.</i> , 2012
Masse	Meubles, sculptures, ivoires		Thickett <i>et al.</i> , 2006
Teneur en humidité	Meubles		Thickett, non publié

Tab. 2  
Techniques de mesure en continu.

mouvement. Cela peut être résolu en contrôlant soigneusement l'éclairage. Nous devons donc continuer cette recherche pour évaluer comment cette erreur peut être prise en compte durant l'analyse des données.

### Traçage indirect

Pour les dommages physiques, qui sont généralement associés aux fluctuations de l'HR, des mesures périodiques ont l'inconvénient majeur de ne pas affecter les altérations à une fluctuation particulière, ou à une combinaison de fluctuations et de conditions antérieures, à moins qu'un événement assez extrême ne se produise. Les intervalles de mesure sont souvent longs et l'environnement dans les bâtiments historiques change fréquemment. Des mesures continues peuvent permettre de relier les réponses à des épisodes particuliers ou d'en explorer la situation. Le terme « traçage » a été utilisé par certains chercheurs. Une sélection de méthodes est montrée dans le Tab. 2. Certaines de ces méthodes ont été appliquées à la surveillance à long terme *in situ*, d'autres ont le potentiel d'une telle application, mais les auteurs n'ont pas vu d'exemples rapportés.

À l'exception de la masse et de la teneur en humidité, toutes les méthodes listées dans le Tab. 2 exigent une fixation ferme à la surface de l'objet, ce qui peut poser problème. Toutes les méthodes sont indirectes, étant donné qu'elles mesurent une propriété d'intérêt, telle que la longueur, mais pas les altérations. L'interprétation des données est nécessaire pour déduire un événement dommageable, ce qui nécessite une compréhension approfondie des propriétés mécaniques des objets qui sont mesurés. Cela est problématique, puisque les tests mécaniques, qui sont destructifs, nécessitent des tailles d'échantillons significatives et la majorité des données sont seulement disponibles pour des matériaux modernes et non vieillis.

### Traçage direct

Une méthode plus directe est l'émission acoustique. Des petits capteurs détectent les vibrations à hautes fréquences quand des matériaux rigides subissent une micro-fissuration lors de la déformation [Strojecki *et al.*, 2014].

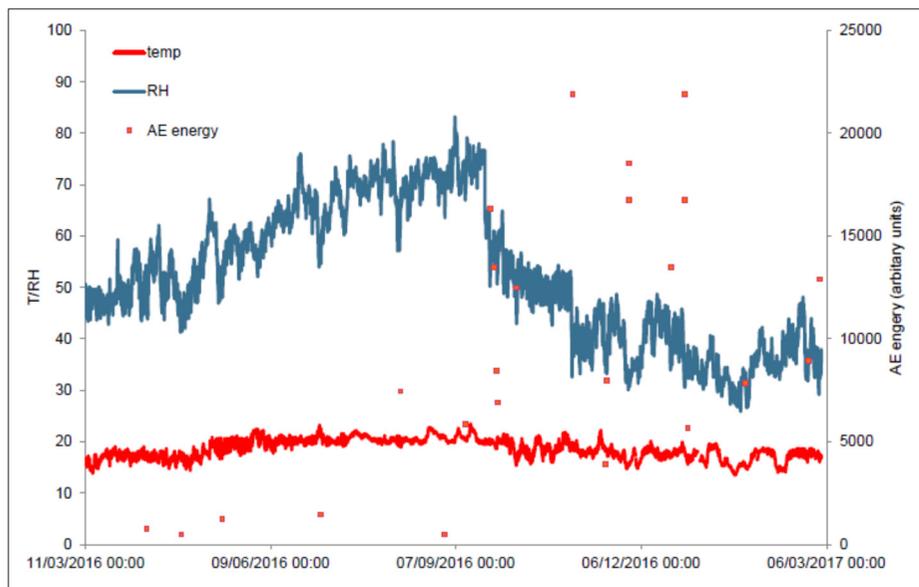


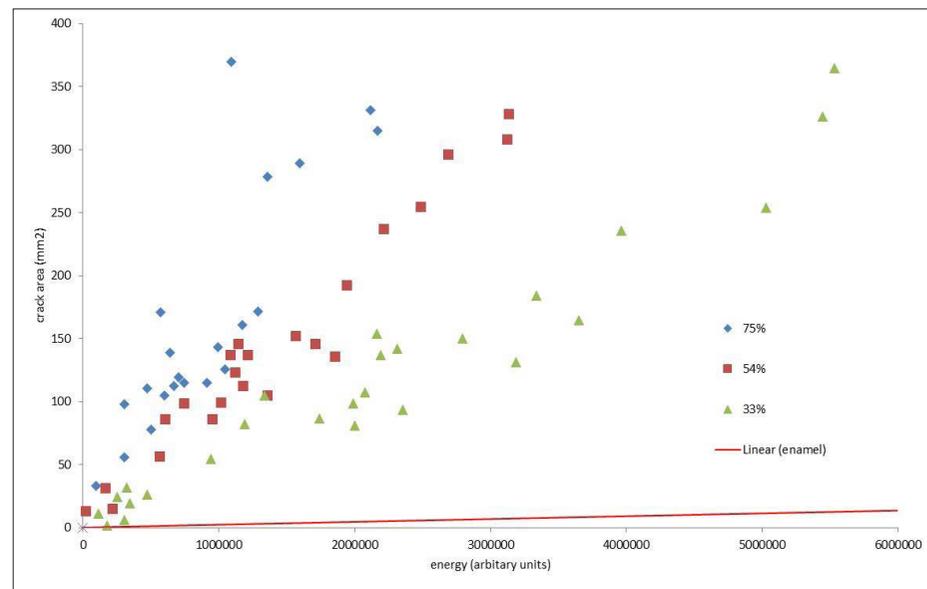
Fig. 5  
Émission acoustique et  
climat mesurés à partir et  
autour du coffre en acajou.

Les capteurs peuvent être poussés contre l'objet sans fixation. L'échelle des altérations détectées est très nettement inférieure à ce que l'on peut voir à l'aide de l'inspection visuelle. Cette technique a été utilisée pour des émaux, de la pierre, des métaux et du bois dans le patrimoine culturel. Le bois est l'un des matériaux les plus difficiles à mesurer, avec une atténuation rapide du signal, les effets de l'humidité et de grandes différences de réponse dues aux directions de croissance [Kawamoto et Williams, 2002]. Les signaux du bois sont relativement faibles et les bruits de fond sont une limitation majeure dans un lieu. Cela détermine la limite de détection pratique. Le bruit provient de deux sources : l'une électromagnétique et l'autre d'activité physique [Diodati *et al.*, 2001].

Les capteurs différentiels sont les moins sensibles au bruit électromagnétique parmi ceux disponibles. Il y a un bruit de fond général, qui est normalement éliminé en configurant une valeur seuil au-dessous de laquelle les signaux ne sont pas enregistrés. De plus, il y a des événements de bruits périodiques d'une ampleur similaire à ceux de la micro-fissuration dans le bois. Certains sont en corrélation avec le choc du mouvement que les visiteurs induisent dans les objets, soit directement soit à travers la vibration, notamment des parquets. L'utilisation de deux capteurs en mode anti-corrélation évite d'enregistrer de tels événements. Les deux capteurs sont placés assez loin l'un de l'autre (généralement à plus de 6 cm) afin de ne pas répondre au même événement dans le bois. Les événements ne sont enregistrés que s'ils sont sur un seul capteur, en supposant qu'un événement enregistré sur les deux capteurs soit du bruit. L'application la plus courante consiste à surveiller l'extension des fissures en plaçant un capteur sur l'extrémité de la fissure.

Une commode du XVIII<sup>e</sup> siècle en bois de pin et plaquage en noyer a été placée sous surveillance au château de Walmer. Un système d'acoustique

Fig. 6  
Étalonnage de l'énergie  
d'émission acoustique  
générée par la croissance  
des fissures à différentes  
valeurs d'HR.



physique PAC 125 a été utilisé avec deux capteurs WD en mode anti-corrélation. L'utilisation de préamplificateurs a permis de placer l'équipement à une certaine distance (5 m) de la commode pour ne pas perturber visuellement l'intérieur historique. La fourniture de prises électriques est également souvent très limitée dans les bâtiments historiques. En même temps, la surveillance de chocs a été entreprise avec des enregistreurs triaxiaux MSR 145.

Les résultats de la surveillance sur une année sont présentés dans la Fig. 5. Tout événement coïncidant (dans un délai d'une seconde) à un choc supérieur à 0,1 g n'a pas été pris en compte.

Il y a un certain nombre d'événements d'émissions acoustiques tout au long de l'année. Les plus intenses, les événements avec l'énergie intégrée la plus élevée, apparaissent aux périodes les plus sèches. Une discussion poussée des résultats dépasse la portée de cet article et sera approfondie avec un corpus de surveillance similaire dans une publication future. La très haute résolution temporelle permet l'analyse de la corrélation avec les données environnementales.

Les événements d'émission acoustique sont enregistrés sur une fraction de seconde et peuvent être corrélés à des événements de choc pour éliminer cette source de bruit.

Une série de calibrages a été réalisée avec des bandes de noyer de 1 mm équilibrées à 75, 54 et 33 % d'HR.

Ceux-ci ont été pré-entaillés (1 mm x 2 mm) et écartés dans un testeur de traction Instron.

L'augmentation de la zone de fissure sur l'extension de la longueur de la fissure a été corrélée à la quantité d'émission acoustique mesurée. Chaque calibrage a été réalisé avec 5 échantillons. Les calibrages sont montrés dans la Fig. 6 avec un calibrage pour les émaux.

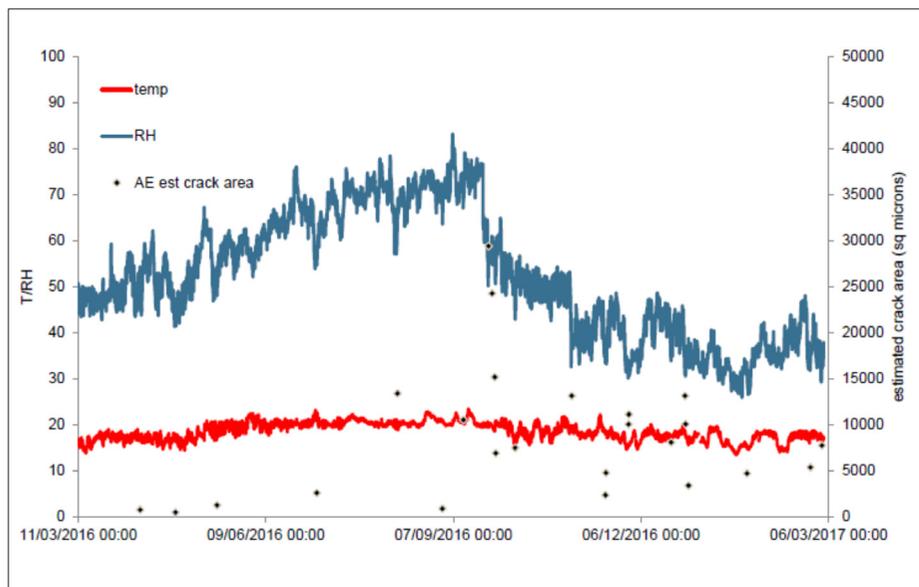


Fig. 7  
Données d'émission  
acoustique de la Fig. 5,  
recalibrées pour compenser  
l'HR.

Il y a une différence importante de réponse de l'émission acoustique à la même extension de fissure à différentes valeurs d'HR en raison des différentes teneurs d'humidité du bois de noyer. Toutes les réponses du bois sont très nettement inférieures à l'émail. Seule est montrée la partie d'extension basse de la réponse de l'émail. Le calibrage, en utilisant la détermination optique de la longueur de la fissure, a une faible sensibilité (intervalle de mesure de 0,2 mm), ce qui veut dire que la courbe de calibrage est principalement supérieure au niveau d'émission acoustique détectée sur des objets.

Ces calibrages ont été appliqués aux signaux générés dans les 24 heures suivant à HR >63 %, 44-64 % et <44 % pour produire la Fig. 7.

Avec différentes réponses acoustiques du bois à divers taux d'HR pris en compte, la distribution de la quantité de fissurations change et la chute de 75 à 50 % apparaît maintenant comme étant la plus dommageable. Il y a un inconvénient avec cette approche : elle donne des résultats plus facilement accessibles et compréhensibles, mais elle repose sur des calibrages avec du bois moderne, et devient donc une méthode moins directe. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour déterminer si la réponse acoustique est la même pour le bois récent ou ancien.

### Fonctions de dommages

À quelques exceptions près, le coût élevé ou l'expertise requise signifient que ces techniques ne pourront pas toujours être utilisées.

Cependant, les résultats de ces études sont idéaux pour développer des fonctions de dommages afin de mieux évaluer d'autres données environnementales.

Les environnements dans les bâtiments historiques sont généralement complexes. Il est souvent difficile de traduire les résultats d'expériences

Fonction	Notes	Référence
HERIe	Analyse par éléments finis	HERIe
BS EN 15757	Méthode mathématique basée sur l'expérience	BSI, 2010
Variété de méthodes développées dans les fonctions de dommages		Lankester, 2013
Analyse des données à différentes périodes de fluctuation		Pretzel, 2014
Moisissure sur bois	Quatre fonctions publiées basées sur des expériences de laboratoire	Thickett <i>et al.</i> , 2014

Tab. 3  
Fonctions de dommages.

en laboratoire pour ces environnements, ce qui a mené à une situation où nous avons une bonne compréhension des limites de sécurité (où il n'y a absolument aucun risque pour les objets), mais presque aucune compréhension du niveau de risque lorsque nous dépassons ces limites.

Ces limites de sécurité sont impossibles à maintenir dans la grande majorité des bâtiments historiques. Une approche prometteuse pour déterminer le risque est l'utilisation de fonctions de dommages numériques. La réponse d'un grand groupe d'objets est mesurée et mathématiquement corrélée avec les conditions de HR. Cette fonction mathématique peut donc être utilisée pour évaluer d'autres données environnementales d'HR pour donner une indication du risque. Cette approche a déjà été élaborée dans une certaine mesure à plusieurs reprises dans le Tab. 3.

Cette approche est également utile pour les processus tels que la corrosion qui dépend à la fois des concentrations de gaz polluants et de HR, et parfois de la température [Thickett, à paraître].

La base de données des altérations observées a été très utile pour tester et calibrer ces fonctions de dommages. Des travaux ont été entrepris pour étudier et comparer les épidémies de moisissures, indiquant une meilleure corrélation de deux des quatre fonctions de dommages publiées aux phénomènes observés sur les biens de English Heritage [Thickett *et al.*, 2014]. Des travaux sont prévus dans un avenir proche pour étudier des cas d'altérations physiques. Cette approche, bien que toujours en développement, s'est avérée extrêmement efficace pour évaluer des environnements complexes et développer une évaluation des risques.

### Conclusion

Les méthodes scientifiques peuvent aider à déterminer la réponse de l'objet dans certains cas. Il existe des restrictions importantes quant à leur utilisation sur des objets historiques, mais il y a de nombreux exemples où

elles ont été surmontées. Un avantage majeur est la sensibilité accrue, qui s'est avérée particulièrement importante pour la comparaison statistique à la réponse aux environnements.

La corrélation d'images numériques peut être utilisée avec des caméras plus conventionnelles, ce qui la rend accessible aux institutions patrimoniales, et une surveillance à long terme, car elle peut facilement être alimentée par batterie.

Le motif naturel de la peinture sur toile fonctionne dans de nombreux cas, mais toutes les peintures ne peuvent pas être observées, en particulier celles qui manquent d'éléments caractéristiques.

Même si le mouvement peut être surveillé, la sensibilité de la technique dépendra de la peinture, en raison de la qualité du motif. Les fluctuations d'HR ambiante peuvent être trop faibles pour être détectées par certains, tout en étant facilement mesurables pour d'autres.

Les émissions acoustiques se sont montrées particulièrement utiles, et les limites de détection dues aux niveaux de bruit ont été évaluées.

Le développement de résultats de fonctions de dommage est un domaine avec un potentiel futur très important qui pourra mener à de grandes améliorations dans l'évaluation des données environnementales.

### Références bibliographiques

- BSI, 2010. BS EN 15757:2010. *Conservation of Cultural Property. Specifications for temperature and relative humidity to limit climate induced mechanical damage in organic hygroscopic materials*. Londres : BSI.
- DIODATI P., PIAZZA S., DEL SOLE S., MASCIOVECCHIO L., 2001. « Daily and annual electromagnetic noise variation and acoustic emission revealed on the Gran Sasso Mountain ». *Earth and Planetary Science Letters*, 184, p. 719-724.
- DULIEU-BARTON J. M., DOKOS L., EASTOP D., LENNARD F., CHAMBERS A. R., SAHIM M., 2005. « Deformation and strain measurement techniques for the inspection of damage in works of art ». *Reviews in Conservation* 6, p. 63-73.
- FLEISS J. L., LEVIN B., PAIK M. C., 2003. *Statistical Methods for Rates and Proportions*, 3<sup>e</sup> édit. New Jersey : Wiley.
- HERIE, disponible au <http://herie.mnk.pl/> (consulté le 29 juin 2018).
- KAWAMOTO S. et WILLIAMS R. S., 2002. *Acoustic emission and acousto-ultrasonic techniques for wood and wood based composites. A review*. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-134. Madison, WI : U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 16 p.
- KNIGHT B. et THICKETT D., 2007. « Determination of response rates of wooden objects to fluctuating relative humidity in historic properties », in PADFIELD T. et BORCHERSEN K. (dir.), *Museum Microclimates*. Hvidovre : LP Nielsen Bogtryk, p. 85-88.
- LANKESTER P., 2013. *The Impact of Climate Change on Historic Interiors*, PhD University of East Anglia.
- PRETZEL B., 2014. « [Un]Reasonable – Broadening acceptable climate parameters for furniture on open Display », in : Bridgland J. (dir.), *ICOM-CC 17th Triennial Conference Preprints*, Melbourne, 15-19 septembre 2014, art. 1507, 10 p. Paris : International Council of Museums.
- SHAPIRO S. S. et WILK M. B., 1965. « An analysis of variance test for normality (complete samples) ». *Biometrika* 52 (3-4), p. 591-611.
- STROJECKI M., ŁUKOMSKI M., KRZEMIEN L., SOBczyk J., BRATASZ Ł., 2014. « Acoustic emission monitoring of an eighteenth-century wardrobe to support a strategy for indoor climate management ». *Studies in Conservation* 59 (4), p. 225-232.
- TAYLOR J., 2017. « Improving Reliability in Collection Condition Surveys by Utilizing Training and Decision Guides ». *Journal of the American Institute for Conservation* 56 (2), p. 126-141.
- THICKETT D., DAVID F., LUXFORD N., 2006. « Air Exchange Rate ; A dominant parameter for showcases ». *The Conservator*, p. 19-34.
- THICKETT D., LUXFORD N., LANKESTER P., 2012. « Environmental Management Challenges and Strategies in Historic Houses ». In : *The Artifact, its Context and their Narrative*, Postprints of ICOM-CC-DEMIST Conference. Los Angeles : ICOM, p. 1-11.
- THICKETT D., LANKESTER P., PEREIRA PARDO L., 2014. « Testing damage functions for mould growth », in BRIDGLAND J. (dir.), *ICOM-CC 17th Triennial Conference Preprints*, Melbourne, 15-19 septembre 2014, art. 2103, 9 p. Paris : International Council of Museums.
- THICKETT D., CHEUNG C. S., LIANG H., TWYDLE J., GR MAEV R., GAVRILOV D., 2017. « Using non-invasive non-destructive techniques to monitor cultural heritage objects ». *Insight* 59 (5), p. 15.
- THICKETT D., 2018. « The frontiers of preventive conservation ». Pré-publication de la conférence de l'IIC, in *Studies in Conservation*, 63 (suppl. 1), 2018, p. 262-267.
- UZIPELLIA L., COCCHIA L., MAZZANTIA P., TOGNIA M., JULLIEN D. B., DIONISI-VICIAC P., 2012. « The deformometric kit : A method and an apparatus for monitoring the deformation of wooden panels ». *Journal of Cultural Heritage* 13 (3), p. 91-101.
- XAVIER-ROWE A. et FRY C., 2011. « Heritage collections at risk », in BRIDGLAND J. (dir.), *ICOM-CC 16th Triennial Pré-publication de la conférence*, Lisbonne, 15-19 Septembre 2011, art. 2103, 11 p. Paris : International Council of Museums.



Silvana Editoriale

*Direction éditoriale*  
Dario Cimorelli

*Directeur artistique*  
Giacomo Merli

*Coordination d'édition*  
Sergio Di Stefano

*Rédaction*  
Carole Aghion

*Mise en page*  
Letizia Abbate

*Organisation*  
Antonio Micelli

*Secrétaire de rédaction*  
Ondina Granato

*Iconographie*  
Alessandra Olivari, Silvia Sala

*Bureau de presse*  
Lidia Masolini, [press@silvanaeditoriale.it](mailto:press@silvanaeditoriale.it)

Droits de reproduction et de traduction  
réservés pour tous les pays  
© 2019 Silvana Editoriale S.p.A.,  
Cinisello Balsamo, Milano  
© 2019 Musée national des châteaux  
de Versailles et de Trianon

Aux termes de la loi sur le droit d'auteur  
et du code civil, la reproduction, totale  
ou partielle, de cet ouvrage sous quelque  
forme que ce soit, originale ou dérivée,  
et avec quelque procédé d'impression que  
ce soit (électronique, numérique, mécanique  
au moyen de photocopies, de microfilms,  
de films ou autres), est interdite, sauf  
autorisation écrite de l'éditeur.

*En couverture*

© EPV Thomas Garnier

Silvana Editoriale S.p.A.  
via dei Laboratori, 78  
20092 Cinisello Balsamo, Milano  
tel. 02 453 951 01  
fax 02 453 951 51  
[www.silvanaeditoriale.it](http://www.silvanaeditoriale.it)