



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 Lestrang, 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



# La surveillance à vues multiples des modifications dimensionnelles des panneaux en bois dues aux fluctuations climatiques au château de Linderhof

## Résumé

Chaque année, 500 000 visiteurs viennent visiter le château de Linderhof qui a été conçu par le roi Louis II de Bavière. Le climat intérieur de ce petit château est fortement affecté par le nombre élevé de visiteurs. Jusqu'à récemment, le seul moyen d'obtenir de l'air frais consistait à ouvrir les fenêtres. De ce fait, le mobilier historique d'origine était exposé à des taux d'humidité élevés qui fluctuaient fortement. En février 2017, un système de ventilation innovant a été installé pour résoudre ce problème.

L'objectif du projet de recherche était d'examiner comment le mobilier historique répond à la situation climatique passée et actuelle. Une méthode permettant d'étudier la réaction de diverses surfaces aux modifications du microclimat générées par le système de ventilation a été mise au point grâce à un système de surveillance à vues multiples (SVM). Il s'agit d'une combinaison de trois méthodes optiques non destructives différentes : le scan de lumière structurée, la microscopie 3D et la photographie accélérée qui ont été appliqués aux surfaces de différents objets. La surveillance a été effectuée en cycles quotidiens et saisonniers.

## Mots clés

Microclimat, surveillance, mobilier historique, système de ventilation, conservation préventive, scan de lumière structurée, microscope 3D, chronophotographie.

## Les conditions de conservation et climatiques antérieures au château de Linderhof

Le château de Linderhof a été fait construire au XIX<sup>e</sup> siècle (1870-1874) par le roi Louis II de Bavière. Il est situé au cœur des contreforts bavarois des Alpes (environ 950 mètres d'altitude), attirant, depuis plus de 125 ans, des centaines de milliers de visiteurs chaque année (Fig. 1), ce qui a influé de façon considérable sur le climat intérieur et a contribué à la dégradation des meubles d'origine, très vulnérables.

Depuis 2008, l'impact du climat intérieur sur l'ameublement historique a été examiné dans le cadre de deux projets de recherche en coopération étroite avec l'Institut Fraunhofer de physique de la construction (le projet national « Stabilité climatique dans les bâtiments historiques », 2008-2013, et le projet européen « Climate for culture », 2009-2014).

Il existe deux principaux problèmes climatiques à Linderhof. Le premier

### Dr. Kristina Holl

Bayerische Verwaltung der staatlichen Schlösser, Gärten und Seen (BSV)  
kristina.holl@mytum.de

### Max Rahrig

Kompetenzzentrum für Denkmalwissenschaften und Denkmaltechnologien – KDWT, Otto-Friedrich-Universität Bamberg  
max.rahrig@uni-bamberg.de

### Dr. Katrin Janis

Bayerische Verwaltung der staatlichen Schlösser, Gärten und Seen, Schloß Nymphenburg  
Katrin.janis@bsv.bayern.de

Fig. 1

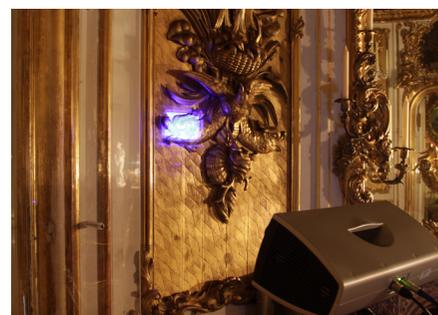
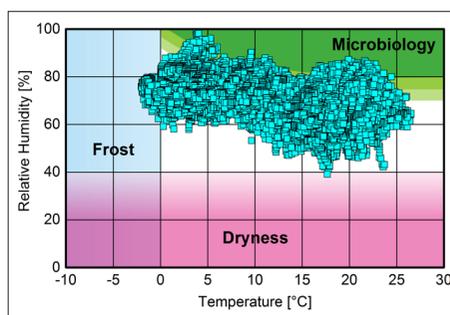
Château de Linderhof  
construit pour le roi  
Louis II de Bavière : vue  
extérieure de la façade sud.  
(© BSV)

Fig. 2

Diagramme de dispersion  
d'HR et T des données  
horaires enregistrées dans  
la chambre à coucher entre  
le 1<sup>er</sup> février 2008 et le  
1<sup>er</sup> juin 2011.  
(© Fraunhofer IBP)

Fig. 3

Examen d'un panneau  
de bois doré dans la  
salle à manger à l'aide  
d'un scanner à lumière  
structurée. (© BSV)



se produit surtout dans la partie nord du château, où l'humidité relative est beaucoup trop élevée (Fig. 2). L'analyse statistique de la température (T) et de l'humidité relative (HR) dans la chambre à coucher, mesurées toutes les heures pendant trois ans, a révélé une moyenne annuelle de 71 % HR, atteignant un niveau maximal de 96,8 % HR. Pour minimiser les risques de formation de moisissures et d'autres effets néfastes sur le mobilier ancien, tels que le gonflement des surfaces, une valeur moyenne de 60 % de HR est recommandée. Deuxièmement, les fluctuations à court terme sont extrêmes. En été, dès que le premier groupe de visiteurs entre dans le château, on ouvre les fenêtres pour contrer l'humidité de l'atmosphère. Tout au long de la journée, la T et l'HR à l'intérieur du château augmentent de manière continue mais, après l'heure de fermeture, elles diminuent à nouveau. Au cours d'une seule journée, les fluctuations peuvent dépasser 20 % d'HR [Bichlmair *et al.*, 2013].

Des évaluations sur l'état de conservation des meubles historiques ont également été menées [Holl, 2013 ; Holl, 2016]. Des dommages liés au climat, tels que des fissures dans le bois, l'écaillage des couches de dorure et de peinture ainsi que la présence de moisissures, ont été constatés, en particulier sur les meubles en bois peint et doré.

### Stratégie d'aération innovante au château de Linderhof

Un système de ventilation a été installé pour la protection à long terme du

château. Le système de contrôle est basé sur la norme européenne 15757 « Conservation des biens culturels - Spécifications pour T et HR afin de limiter les dommages mécaniques induits par le climat dans les matériaux organiques hygroscopiques » [DIN EN 15757, 2010-2012]. Sur la base de cette norme, l'Institut Fraunhofer de physique de la construction a élaboré le cahier des charges du climat intérieur du château [Bichlmair *et al.*, 2013]. Le but du cahier des charges était double : premièrement, la HR dans la chambre à coucher devrait être réduite au même niveau que les pièces adjacentes (la HR dans la salle des miroirs adjacente était en moyenne de 62 % de HR sur trois ans). Un niveau d'HR de 62 % a été spécifié, permettant des fluctuations de  $\pm 6$  % en moyenne par mois. Le deuxième objectif était de limiter les fluctuations à court terme afin que la plupart du temps une fluctuation mensuelle moyenne de  $\pm 8$  % HR ne soit pas dépassée. La T doit suivre le cycle saisonnier avec peu d'interférences. La limite supérieure est de 20 °C et, à basses températures, la différence entre la T intérieure et celle de l'air fourni par le système de ventilation ne doit pas dépasser 6 Kelvin. Cependant, l'objectif principal est de contrôler l'humidité relative, pas la T, et le critère clé du contrôle de l'entrée d'air ne doit pas dépasser 40 % d'humidité relative. Le débit volumétrique est réglable par un convertisseur de fréquence et peut varier en fonction du nombre de visiteurs [Bichlmair *et al.*, 2013]. En plus de l'installation du système de ventilation, un projet de recherche a été mené pour mener une évaluation scientifique et de conservation du système. Le projet « Wissenschaftliche Begleitung einer Maßnahme zum präventiven Schutz vor Umwelteinflüssen in Schloss Linderhof » a été financé par le DBU (Fondation fédérale allemande de l'environnement) de 2013 à 2018.

### **Développement d'une méthode à vues multiples pour surveiller les changements de microclimat sur des panneaux en bois**

Les fluctuations climatiques peuvent avoir un impact différent sur les œuvres d'art en fonction de la propriété du matériau et de l'épaisseur. Une œuvre d'art telle qu'une peinture sur bois se compose généralement de différents matériaux et couches (par exemple, un apprêt, plusieurs couches de couleur, une couche de finition) et chacun réagit différemment pour ce qui concerne le gonflement et le retrait. Le comportement divergent de chaque couche peut causer des contraintes à l'intérieur du matériau composite. Les fluctuations à court terme et à long terme ont un impact sur les œuvres d'art : les fluctuations à court terme, qui se produisent approximativement tous les jours, affectent davantage la surface, en particulier lorsque des dommages sont déjà présents. Les fluctuations qui se produisent sur une période plus longue affecteront également les couches intérieures et le support. Par conséquent, en fonction de la fréquence et de l'amplitude, les fluctuations climatiques peuvent causer divers dommages, tels que la déformation ou la fissuration du support ou le relâchement de la surface. Ainsi, il est complexe de savoir quelles fluctuations climatiques sont réellement dommageables pour les collections.

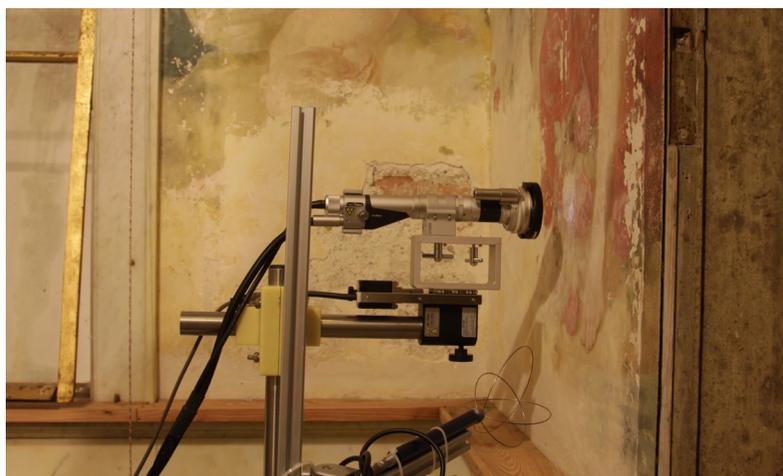


Fig. 4

À gauche, images accélérées avec un appareil photo SLR dans la salle des tapisseries orientales.

À droite, microscopie 3D des peintures murales dans la salle de bains. (© BSV)

Fig. 5

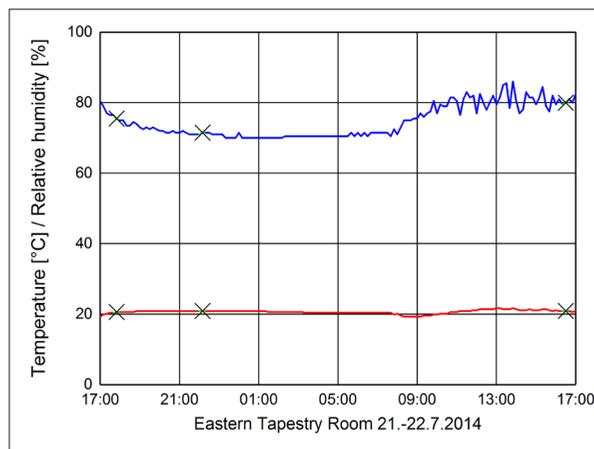
À gauche, visualisation du mouvement induit par le climat en faisant correspondre les images individuelles et en marquant les contours de la couche de dorure (© BSV).

À droite, T et HR pendant la mesure (21-22 juillet 2014) avec le microscope 3D (marqué avec des croix noires).

Selon Michalski, le stress le plus important des objets est causé par des fluctuations qui durent plus longtemps que le temps de réponse mais sont plus courtes que le temps de relaxation [Michalski, 1993 ; Michalski, 1996]. Cependant, en dehors d'un environnement de laboratoire, les temps de réponse et de relaxation de différents objets ne peuvent être qu'estimés.

Pour ce qui est du cas du château de Linderhof, il était clair au début du projet de recherche qu'à cause du système de ventilation, le schéma des fluctuations atmosphériques et les valeurs moyennes du climat intérieur auraient changé. Par conséquent, afin de juger l'effet du nouveau système, il était nécessaire de documenter la réaction du mobilier historique aux changements de climat. Les dommages causés par le climat ne sont pas faciles à documenter car ils ne se produisent généralement que sur de longues périodes. C'est pourquoi une technique de surveillance à vues multiples (SVM) a été mise au point. L'idée était de combiner trois méthodes d'essais non destructifs (END) à une surveillance climatique détaillée afin d'étudier les effets des fluctuations climatiques à court et à long termes.

Pour évaluer les changements causés par le nouveau climat, il était nécessaire de documenter à l'avance les changements saisonniers réguliers



Analyse du climat	Examen	Méthode
Fluctuations à court terme (quotidiennes – plusieurs jours)	Examen des surfaces déjà endommagées en ce qui concerne le mouvement (gonflement / rétrécissement)	Photographie SLR Microscopie 3D Recherche sur les surfaces sélectionnées
	Comparaison du détail d'une surface historique	Scanner de lumière structurée méthode « 1 shot »
Fluctuations saisonnières	Comparaison du détail d'une surface historique	Scanner de lumière structurée Recherche sur les surfaces sélectionnées

du mobilier historique. Cela a été réalisé avec un scanner à lumière structurée (SLS) (Fig. 3). Pour examiner les effets des fluctuations à court terme sur des surfaces déjà endommagées, nous avons choisi des zones telles que des parties desserrées d'un panneau de bois doré. L'étude de ces surfaces a permis de définir des plages acceptables pour les fluctuations à court terme. Pour cela, un microscope 3D et la photographie SLR ont été utilisés (Fig. 4). Le scanner de lumière structurée a également été utilisé pour examiner les effets des fluctuations à court terme à l'aide de la « méthode 1 shot ». Tous les examens ont été effectués à différentes saisons et sur plusieurs jours (Tab. 1).

*Tab. 1*  
Description des différentes méthodes utilisées pour examiner les réactions du mobilier historique à différentes périodes. Les surfaces sélectionnées ont été examinées avant et après la mise en place du système de ventilation.

### Scans de lumière structurée (SLS)

Le SLS est une combinaison de la technologie de triangulation optique (mesure de distance optique par mesure angulaire à l'intérieur de triangles) et d'interférométrie (interaction des ondes). Le gros avantage de cette méthode optique est l'enregistrement rapide de surfaces à haute résolution. Le scanner à lumière structurée COMET L3D 5M de Steinbichler (maintenant Carl Zeiss Optotechnik) a été utilisé pour les mesures au château de Linderhof (Fig. 3). Avec cette méthode, il est possible de numériser des zones de différentes tailles en changeant les objectifs. À l'aide de l'objectif de 250 mm, vous pouvez examiner une zone de 260 x 215 x 140 mm, tandis que pour l'objectif de 75 mm, cette zone correspond à 74 x 62 x 45 mm. La distance entre deux points mesurés dépend également de l'objectif : plus la section de l'image est petite, plus la résolution est élevée (objectif 250 mm : distance 100 µm, objectif 75 mm : 30 µm). À l'aide du logiciel Comet Plus 9.63, plusieurs scans sont combinés dans un seul fichier de données. Les scans ont été effectués en rangées avec un chevauchement vertical et horizontal de plus de 50 % entre chaque scan. Ces données redondantes réduisaient les erreurs de correspondance entre les scans individuels et garantissaient une précision géométrique supérieure pour chaque zone de surveillance [Drewello *et al.*, 2011].

Pour examiner les données SLS, deux scans de la même surface sont comparés à l'aide du logiciel Inspect Plus®. Après une orientation manuelle

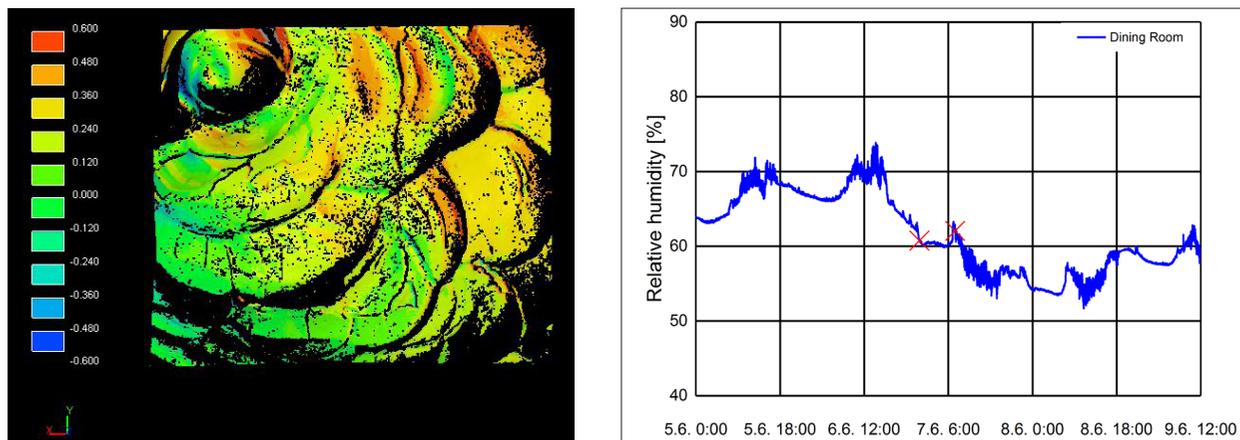


Fig. 6

À gauche, mesure 1 shot (7 juin 2017) montre les mouvements jusqu'à 1 mm (avec le système de ventilation).  
 À droite, HR durant toute la semaine de mesure. Le temps de l'étude avec la méthode 1 shot du SLS - (7 juin 2016) est indiqué par des croix rouges.

à l'aide de points de référence, le logiciel enregistre les numérations entre elles et calcule une « orientation optimale » (en spécifiant une erreur comprise entre 0,05 et 0,1 mm). Ensuite, une comparaison des surfaces peut être effectuée. Afin de démontrer l'écart entre les deux scans, le logiciel crée une image codée avec des couleurs illustrant l'écart. L'échelle de l'illustration en fausses couleurs est sélectionnée manuellement. Dans ce cas, une zone vert foncé signifie qu'il n'y a aucun changement ; les zones de couleur vont du vert clair (minimum) au rouge (maximum) elles indiquent qu'un gonflement avant a eu lieu, tandis que les couleurs allant du turquoise au bleu foncé indiquent un gonflement inversé (Fig. 6).

La méthode « 1 shot » vise à minimiser les erreurs pouvant survenir lors du traitement des données. Deux scans de la même zone sont effectués à des moments différents (le dernier scan du soir et le scan du matin) sans déplacer l'appareil de mesure. Il est ainsi possible d'obtenir une mesure quantitative à haute résolution du mouvement de la surface en raison des fluctuations climatiques à court terme sans avoir à orienter manuellement les scans via des points de référence (Fig. 7).

### Microscopie 3D et chronophotographie

Pour examiner les fluctuations à court terme, un appareil photo reflex (SLR) à objectif unique et un microscope 3D ont été installés devant la zone concernée, centrés sur les dommages et laissés pendant toute la durée de la campagne de mesures (Fig. 5). L'appareil photo et le microscope ont été programmés pour prendre une photo toutes les 20 minutes. Ainsi, l'impact des fluctuations à court terme pourrait être examiné aux niveaux micro et macroscopique.

Malheureusement, l'analyse de la quantification du mouvement avec le microscope 3D n'a pas fonctionné sur place, le moteur utilisé pour se focaliser sur l'objet provoquait trop de vibrations. Par conséquent, pour les deux méthodes, une comparaison optique a été effectuée en superposant des images uniques à l'aide du logiciel graphique Adobe Photoshop®. Le changement dû à la réponse mécanique est rendu visible en traçant le contour de la surface écaillée (Fig. 5, à gauche).

## Résultats

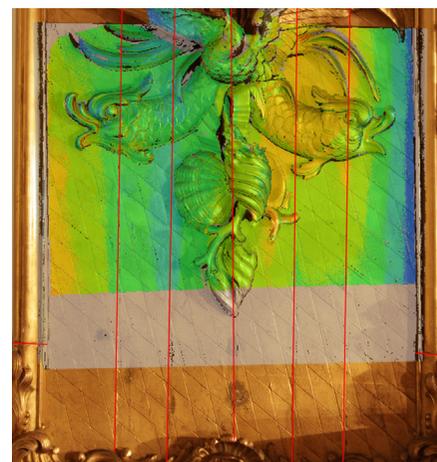
Puisque tous les mouvements enregistrés étaient causés par des fluctuations climatiques, il était nécessaire de corréler les résultats de tous les systèmes déployés avec les données climatiques correspondantes. Pour cette raison, un enregistrement détaillé des données climatiques proches des zones observées a été réalisé pendant la durée du projet.

### *Réponse du mobilier historique aux fluctuations à court terme*

Dans la période qui a précédé la mise en place du système de ventilation, les surfaces présentant des dommages existants (relâchement de la surface ou craquelures) ont été examinées au microscope 3D et avec la photographie SLR sur des périodes de plusieurs jours au cours de différentes saisons. Comme supposé initialement, le mouvement des pièces détachées dépendait des variations des niveaux d'humidité. Durant les mois d'été, par exemple, où les fluctuations journalières d'HR pouvaient parfois dépasser 15 %, les équipements montraient un mouvement plus fort qu'en hiver, lorsque le climat de la pièce était plus stable. La Fig. 5 (à droite), montre un graphique de la T et de la HR à côté de la surface examinée par microscopie 3D. Les croix noires marquent le climat pertinent au moment de l'examen. L'évaluation de l'examen au microscope 3D est présentée pour la période du 21 au 22 juillet 2014. Le diagramme climatique indique les moments les plus intéressants à utiliser pour l'examen graphique. La méthode décrite ici a également été utilisée pour évaluer les données prises par l'appareil photo SLR.

Les enquêtes ont montré que les parties déjà desserrées produisaient des mouvements macroscopiquement visibles causés par un gonflement/rétrécissement dû à une fluctuation quotidienne de 10 % de HR. Il a également été constaté que les fluctuations à court terme n'affectent pas la surface immédiatement, mais se produisent après un court délai, par exemple pendant la nuit.

Par rapport aux résultats obtenus avec le microscope 3D, les parties desserrées de la surface sont vues moins clairement avec l'appareil photo SLR en raison du grossissement réduit. Cependant, une réponse mécanique est



*Fig. 7*  
Illustration combinée de la photographie et de l'évaluation du scanner à lumière structurée (mars-octobre 2015). Les lignes rouges marquent les articulations.

*Fig. 8*  
À gauche, comparaison mars-juillet 2015. Un décalage du panneau est visible (bleu : mouvement vers l'arrière, jaune/rouge : mouvement vers l'avant). À droite, comparaison juillet-octobre 2015. Le contre-mouvement, bien que moins distinctif, est visible. Les deux mesures ont été réalisées avec un objectif 250 mm. Sur les deux figures, un mouvement d'environ  $\pm 0,25$  mm est visible.

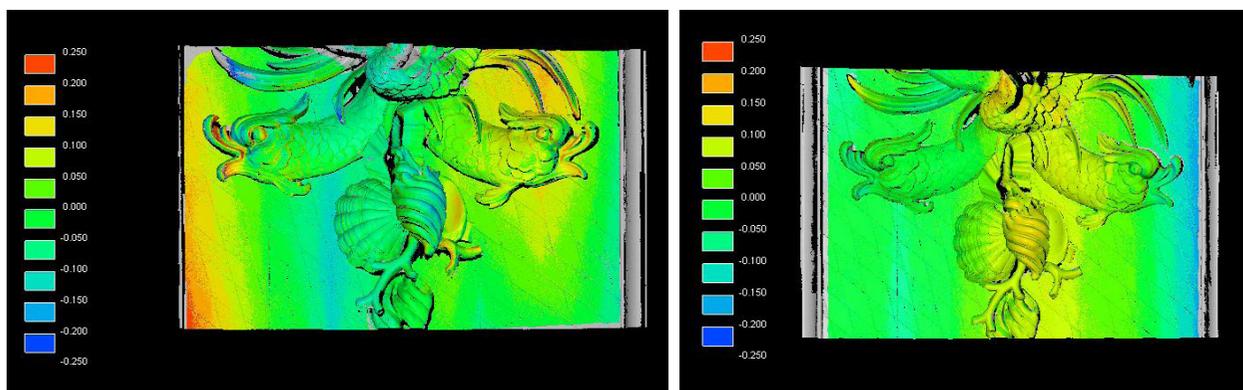
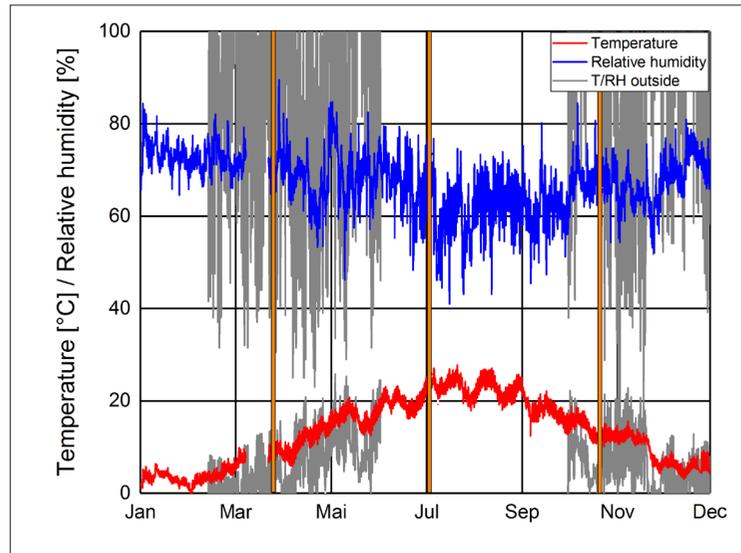


Fig. 9

Diagramme linéaire de HR et T dans la salle à manger (bleu et rouge) par rapport au climat extérieur (gris) pour l'année 2015. Les parties en orange indiquent les heures auxquelles les campagnes de mesure ont été menées.

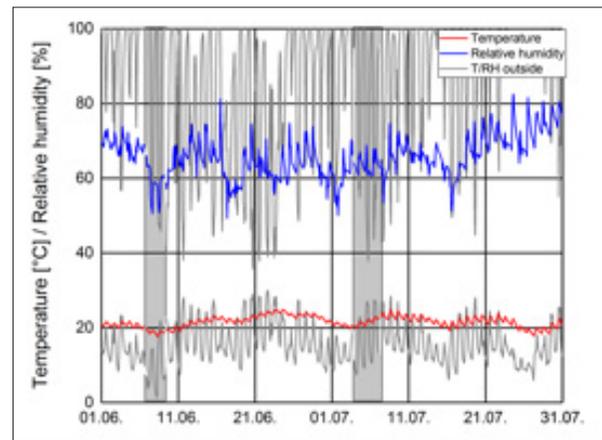
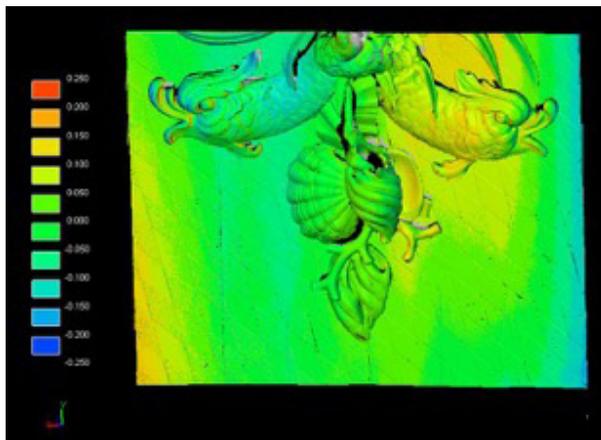


toujours visible. Ainsi, un examen avec un appareil photo SLR est suffisant pour évaluer quelles fluctuations à court terme sont acceptables.

En ce qui concerne l'évaluation de la réaction du mobilier historique au changement du climat intérieur, les résultats des méthodes « 1 shot » ont été particulièrement instructifs (Fig. 6, à gauche). Le diagramme climatique (Fig. 6, à droite) montre que l'HR était très constante pendant la période où les mesures ont été effectuées (croix rouges,  $\Delta$  2,9 % HR) mais comme il y avait des fluctuations assez importantes dans les jours qui ont précédé la documentation, il est clair que les changements dans le mobilier historique enregistrés par les mesures à une prise sont causés par ces changements climatiques antérieurs. De plus, la mise en service du système a lancé un processus de déshumidification à long terme du mobilier, qui pourrait également être visible ici. Une enquête sur un cycle mensuel pourrait donner une meilleure réponse ici.

#### *Réponse de l'ameublement historique aux fluctuations saisonnières*

L'exemple décrit dans cet article est un panneau en bois sculpté et doré dédié à l'art de la pêche situé dans la salle à manger. Des éclats et des pertes de dorure ont été trouvés sur le panneau, en particulier sur la tête de poisson à gauche (Fig. 3). Les joints ont été partiellement réparés, ce qui indique des réactions mécaniques importantes dans le matériau composite (Fig. 7). Avant l'installation du système de ventilation, le mouvement le plus important et le plus fréquent du panneau a eu lieu entre le printemps et l'automne 2015 (Fig. 8, à gauche). Pendant cette période, plusieurs parties du panneau ont réagi différemment. De mars à juillet, la partie gauche de la surface a gondolé vers l'avant, tandis que de juillet à octobre, la partie droite s'est déformée vers l'arrière (Fig. 8, à droite). Les modifications de T et de RH au cours de 2015, ainsi que les heures de collecte des données (indiquées en orange), sont détaillées à la Fig. 9.



Après la mise en place du système de ventilation, deux campagnes de mesure ont été menées en juin et juillet 2016. Les résultats sont présentés à la Fig. 10. La surface observée présente un mouvement de  $\pm 0,2$  mm, comparable aux mesures précédentes. Nous pouvons constater que le climat créé par le système de ventilation n'a jusqu'à présent pas accru les mouvements dans le mobilier historique. Cependant, les observations doivent être effectuées sur une période plus longue avant que nous puissions faire une déclaration fiable.

En conclusion, les panneaux examinés montrent une réponse mécanique claire aux changements saisonniers de l'environnement. Selon la position des objets dans le château, la réponse a été la plus prononcée entre le printemps et l'été ou le printemps et l'automne. Le contre-mouvement, qui est en corrélation avec les changements saisonniers du climat, était perceptible entre l'été et l'automne. La réponse mécanique au printemps (Fig. 8, à gauche) et en automne (Fig. 8, à droite) était clairement différente. Cela peut être expliqué en prenant pour exemple l'amplitude de deux ondes sinusoïdales : en fonction du déphasage, l'onde s'intensifie ou diminue. Dans notre cas, la réponse mécanique dépend des conditions climatiques. Il convient de noter que les mesures n'enregistrent qu'un seul instant de la condition environnementale totale. Il n'est donc pas surprenant que la réponse mécanique maximale diffère en fonction de l'emplacement et de l'équilibre de la teneur en humidité des panneaux individuels. L'augmentation des intervalles de mesure (mensuels, par exemple) fournit des informations plus détaillées sur le mouvement et les modifications dimensionnelles des panneaux. La Fig. 10 montre la réaction de la surface au « nouveau climat » créé par le système de ventilation. Le mobilier historique réagit à la diminution de HR moyenne mais le mouvement ne dépasse pas le mouvement précédent de  $\pm 0,2$  mm mesuré en juin-juillet 2017.

Fig. 10

À gauche, la comparaison juin-juillet 2017, réalisée avec un objectif de 250 mm, montre un mouvement d'environ  $\pm 0,25$  mm. À droite, le diagramme de la T et de l'HR de la salle à manger (bleu et rouge) par rapport au climat extérieur (gris) relevées entre le 1<sup>er</sup> juin et le 31 juillet. Les parties en gris indiquent les heures auxquelles les campagnes de mesure ont été menées.

#### *Effets du système de ventilation sur le climat intérieur – première évaluation*

Comme indiqué précédemment, le climat intérieur du château de Linderhof est affecté par de fortes fluctuations quotidiennes. Celles-ci surviennent surtout pendant les mois d'été en raison du nombre élevé de

visiteurs, source supplémentaire de T et d'humidité. Cela oblige le personnel à ouvrir les fenêtres pour avoir plus d'air frais.

En mettant en œuvre le système de ventilation, le climat ambiant est progressivement déshumidifié, car un changement rapide du climat général pourrait stresser et endommager les surfaces historiques. Par conséquent, la HR sera réduite par petites étapes sur plusieurs années. Pour l'instant, la valeur est d'environ 67 % HR. Dans les prochaines années, elle sera réduite à la valeur cible de 62 % HR.

D'autres campagnes de surveillance montreront comment le système de ventilation réduit les fluctuations à court terme, en particulier pendant les mois d'été.

### **Conclusion et perspectives**

La comparaison des premières mesures *in situ* montre le grand potentiel de la SVM pour répondre aux questions de conservation préventive. En utilisant cette combinaison de techniques, les forces et les faiblesses des technologies individuelles peuvent être exploitées de manière optimale. Grâce au SLS, les données de mesure tridimensionnelles des surfaces historiques sont disponibles avec une résolution extrêmement élevée. Ici, même les plus petits mouvements des surfaces peuvent être enregistrés et visualisés, ce qui permet de comparer les campagnes de mesure avec une précision au sous-millimètre sur une longue période. Cependant, au cours de chaque campagne – à l'exception des « mesures 1 shot » –, les zones de test ne pouvaient être documentées qu'une fois par champ de mesure (250 mm et 75 mm).

Le microscope 3D convient parfaitement à la détection des mouvements quotidiens et permet un enregistrement et une visualisation semi-automatiques. La configuration relativement complexe de la technique ne permet toutefois que l'enregistrement d'une ou de deux zones d'échantillonnage au maximum par campagne. Une autre restriction est que seules les données acquises au cours d'une campagne peuvent être comparées directement, car la position de la caméra et l'angle de vision ne doivent pas être modifiés entre les mesures. Ici, la technique de corrélation d'images numériques pourrait améliorer l'évaluation des données.

La photographie SLR représente la troisième colonne du SVM. Ici, une configuration très simple peut être utilisée pour enregistrer automatiquement des séries de photos des surfaces de test, et la visualisation des résultats est également simple. Cela permet de bien documenter les mouvements à court terme. Cependant, seules des photos sont prises et, comme dans le cas du microscope 3D, seules les images d'une même campagne peuvent être comparées directement.

Étant donné que pour toutes les techniques, la durée d'enregistrement des données est documentée à la seconde, les résultats peuvent être liés directement les uns aux autres et également corrélés aux mesures climatiques. Cela permet de différencier les effets des fluctuations

climatiques quotidiennes à court terme des mouvements à long terme, afin de poursuivre les investigations.

Montrer le mouvement dû aux changements de T et d'HR est une étape importante en considérant le potentiel de dommages causés par les fluctuations du climat. Toutefois, pour distinguer les mouvements périodiques des dommages réels, des investigations supplémentaires sont nécessaires. L'analyse de la distribution de la T et de l'HR dans une œuvre d'art via une simulation hygrothermique aidera à évaluer les résultats optiques.

### Références bibliographiques

- BICHLMAIR S., HOLL K., KILIAN R., 2012. « The moving fluctuation range – a new analytical method for evaluation of climate fluctuations in historic buildings ». In : *Climate for Collections. Klima und Kulturgut – Wissen und Unwissen*, 9-11 novembre 2012, Munich. Londres : 2013, p. 429-440.
- BICHLMAIR S., KILIAN R., KRUS M., 2013. « Concept of a new airing strategy and simulation of the expected indoor climate in Linderhof Palace ». In : *Clima 2013*, 16-19 juin 2013, Prague. Prague : p. 2879-2889.
- DIN EN 15757, 2010-2012. *Conservation of Cultural Property - Specifications for temperature and relative humidity to limit climate-induced mechanical damage in organic hygroscopic materials*.
- DREWELLO R., WETTER N., RAHRIG M., BELLENDORF P., 2011. « 3D-Dokumentation mittelalterlicher Glasmalerei mit der Methode der 3D-Weißlicht-Streifenprojektion », in BORNSCHEIN F. *et al.*, *Konservierung mittelalterlicher Glasmalerei im Kontext spezieller materieller und umweltbedingter Gegebenheiten*. Stuttgart, p. 142-154.
- HOLL K., 2013. « Comparison of the indoor climate analysis according to current climate guidelines with the conservational investigation using the example of Linderhof Palace ». In : *Climate for Collections. Klima und Kulturgut – Wissen und Unwissen*, 9-11 novembre 2012, Munich. Londres, p. 289-300.
- HOLL K., BICHLMAIR S., JANIS K., NAUMOVIĆ T., KILIAN R., 2015. « Konservierungswissenschaftliche Begleitung der Inbetriebnahme einer innovativen Lüftungsanlage in Schloss Linderhof ». *Bausubstanz* 4, p. 40-47.
- HOLL K., 2016. *Der Einfluss von Klimaschwankungen auf Kunstwerke im historischen Kontext. Untersuchungen des Schadensrisikos anhand von restauratorischer Zustandsbewertung, Laborversuchen und Simulation*, Dissertation, Munich.
- MICHALSKI S., 1993. « Relative humidity: a discussion of correct/incorrect values ». In 10th Triennial Meeting, Washington, DC, USA, 22-27 August 1993, Paris, 1993, p. 624-629.
- MICHALSKI S., 1996. « Quantified risk reduction in the humidity dilemma ». *APT Bulletin*, 27 (3), Museums in historic buildings, p. 25-29.



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)