



HAL
open science

Comportement hygromécanique de panneaux en bois peints du patrimoine, Etude menée pour le LRMH et le C2RMF, bilan des travaux effectués en 2007

Julien Colmars, Joseph Gril

► **To cite this version:**

Julien Colmars, Joseph Gril. Comportement hygromécanique de panneaux en bois peints du patrimoine, Etude menée pour le LRMH et le C2RMF, bilan des travaux effectués en 2007. 2007. hal-00566240

HAL Id: hal-00566240

<https://hal.science/hal-00566240v1>

Submitted on 15 Feb 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Comportement hygromécanique de panneaux en bois peints du patrimoine

Etude menée pour le LRMH et le C2RMF

Compte rendu intermédiaire no 1 : bilan des travaux effectués en 2007

Rédaction du rapport : Julien COLMARS et Joseph GRIL, LMGC

Personnels impliqués dans l'étude :

LMGC Montpellier	Joseph Gril	DR CNRS
	David Dureisseix	PR UM2
	Delphine Jullien	MC UM2
	Bertrand Marcon	Thèse BDI CNRS
	Julien Colmars	stagiaire ENSAM Cluny
LAMCOS INSA Lyon	Hubert Maigre	CR CNRS
	Fabrice Morestin	MC INSA
	Patrice Clerc	Ingénieur Mécanium
DISTAF Florence (IT)	Paolo Dionisi Vici	post-doc
LERMAB Nancy	Patrick Perré	PR ENGREF
	Romain Rémond	post-doc
Ministère de la Culture	Emmanuel Maurin	IE LRMH
	Marie-Claude Léonelli	DRAC PACA
Restaurateurs	Daniel Jaunard	
	Patrick Mandron	

Résumé.

Un grand nombre de dommages observés couramment sur les panneaux peints trouvent leur origine et leur interprétation dans le comportement hygromécanique du bois : ce sont en grande majorité des problèmes de dégradation de la couche picturale, par fissuration ou par décollement. Combinée au comportement hygromécanique du bois, s'ajoute l'influence de la couche picturale, dont nous faisons l'hypothèse qu'elle se comporte comme une couche très peu perméable, créant de forts gradients dans l'épaisseur du panneau peint. Les gradients d'humidité dans l'épaisseur, combinés aux variations d'humidité après équilibrage, produisent des déformations complexes et multiples du tableau.

L'instrumentation des œuvres en bois du patrimoine, le suivi de leurs déformations et de leur environnement d'exposition, devraient nous aider dans la compréhension du matériau bois soumis à l'épreuve du temps, et permettraient d'étoffer des modèles de comportement déjà existant, pour introduire des méthodes de conservation préventive et généralisables certainement à d'autres objets en bois du patrimoine.

Pour parvenir à cet objectif, il est indispensable de collecter un grand nombre d'informations sur le comportement du bois vieilli, et ce grâce aux panneaux peints, en recoupant des cas de conservation très divers. Dans ce document nous détaillons principalement deux études de panneaux peints conservés à Avignon, l'un dans une église et l'autre dans un hôtel particulier : nous présentons pour chacun les méthodes très diverses qui ont été mises en œuvre, ainsi que les résultats partiels dont nous disposons aujourd'hui.

Introduction Générale

Dans ce document, réalisé à l'attention de nos partenaires du LRMH et du C2RMF, nous dressons un bilan des activités menées par l'équipe « Mécanique de l'Arbre et du Bois » du LMGC Montpellier sur la thématique des panneaux peints du patrimoine.

A l'occasion du stage de master effectué par J. Colmars entre février et août 2007, et grâce aux financements accordés par le LRMH et le C2RMF, la thématique patrimoine bois qui avait commencé en 2004 (pour le laboratoire de Montpellier) avec l'étude mécanique de la Joconde, s'est étendue à trois autres panneaux peints que nous allons décrire dans la suite.

En choisissant d'étudier ces trois panneaux, qui diffèrent tant par leur géométrie que par leurs ambiances de conservation, nous avons pour objectif premier d'enrichir les données expérimentales sur les panneaux peints, encore très limitées à ce jour, et ainsi accroître notre connaissance du matériau bois et de ce fait des œuvres picturales dont il est le support.

Le premier de ces panneaux est un assemblage de trois planches de peuplier conservé dans le chœur d'une église d'Avignon. Il sera présenté dans la première partie du rapport, la plus longue, puisque c'est celui des trois tableaux qui a engendré à ce jour le plus d'études et d'analyse de notre part. Autour de ce premier panneau nous abordons principalement les aspects instrumentation in situ et modélisation hygromécanique.

L'instrumentation in situ des œuvres du patrimoine permet d'obtenir des données expérimentales sur des supports bois vieilli de plusieurs centaines d'années : ces mesures doivent nous permettre de déterminer les liens fondamentaux qui existent entre un objet en bois ancien, l'histoire climatique du ou des environnements successifs de conservation, et son état actuel, témoignage d'une histoire hygromécanique propre à chaque tableau.

Parallèlement à cette partie expérimentale, nous avons travaillé à l'élaboration de modèles numériques qui permettraient d'approcher le comportement des bois anciens soumis à des variations climatiques. Cette démarche devrait engendrer de nouvelles méthodes de conservation prédictive : comprendre les réactions spécifiques du bois à tel ou tel cycle d'humidité devrait permettre de prendre les décisions justes quant à son environnement de conservation.

Le second tableau a été choisi en raison de son parquetage : un cas typique de restauration effectuée dans les années 70. Un parquetage dit « à la française », pour un tableau qui aujourd'hui est menacé par de larges fissures dans l'unique planche qui en constitue le support. A l'occasion d'une intervention des restaurateurs sur ce parquetage, nous avons réalisé une étude mécanique du procédé, motivée par des questions courantes dans ce type de restauration : un parquetage, ou plus généralement le fait de bloquer les variations dimensionnelles d'un panneau peint, est-il profitable à l'œuvre ? Doit-on empêcher certains mouvements du bois ? Si oui, comment ?

Force est de constater que dans de nombreux cas avérés, la pose d'un parquetage a été suivie de complications de l'état du tableau : apparitions de fissures multiples, ou autres tensions internes qui, lorsqu'elles atteignent le support de bois, engendrent des dommages irréversibles de la couche picturale.

Sur ce panneau, des mesures optiques ont été effectuées, permettant de suivre l'évolution de la forme du tableau durant les étapes de retrait et remplacement du parquetage. Les données collectées au cours de cette séance de mesure ont été traitées par la suite, et ont permis d'alimenter un modèle éléments finis, une réplique numérique de la géométrie du tableau. A

partir des calculs effectués, nous cherchions à conclure sur les vertus et les défauts du procédé de parquetage.

Le troisième tableau s'inscrit dans la perspective des deux précédentes études : le musée Rigaud de Perpignan a contacté notre équipe pour une expertise d'un triptyque espagnol du XV^{ème} siècle. Une unique visite nous a permis d'établir quelques observations dont nous dressons ici le bilan. Très intéressant par sa structure, quoiqu'un peu complexe, ce troisième tableau nous donnera l'occasion de compléter notre étude et nos analyses par un cas de conservation dans un musée.

I. Instrumentation in situ d'un panneau peint - modélisation du comportement du support bois à long terme

1. GENERALITES.

Un grand nombre de dommages observés couramment sur les panneaux peints trouvent leur origine et leur interprétation dans le comportement hygromécanique du bois : ce sont en grande majorité des problèmes de dégradation de la couche picturale, par fissuration ou par décollement. Les premiers sont causés par des mouvements relatifs entre les différentes planches d'un support de panneau peint, tandis que les seconds témoignent des déformations propres à chaque planche de bois. Tous ces mouvements sont bien entendu le résultat de l'activité hygroscopique du matériau bois qui réagit aux variations d'humidité imposées par son environnement.

Une autre caractéristique des planches de panneaux peints est la couche picturale elle-même, dont nous faisons l'hypothèse qu'elle se comporte comme une couche de perméabilité très faible, créant ainsi de forts gradients d'humidité dans l'épaisseur. La diffusion de l'humidité dans le bois se produit avec une certaine vitesse, et l'équilibrage n'est donc pas instantané. Les gradients d'humidité dans l'épaisseur, combinés aux variations d'humidité après équilibrage, produisent des déformations complexes et multiples du tableau. Celles-ci se répercutent de manière plus ou moins importante sur la couche picturale qui subit ces décollements et ces fissurations caractéristiques.

L'instrumentation des œuvres en bois du patrimoine, le suivi de leurs déformations et de leur environnement d'exposition, devraient apporter des éléments de réponse sur les propriétés d'un bois soumis à l'épreuve du temps, et permettrait d'étoffer des modèles de comportement déjà existant, pour les généraliser à tous les objets en bois du patrimoine, des panneaux peints aux charpentes, des menuiseries aux sculptures.

Pour parvenir à cet objectif, il nous faut collecter à partir des panneaux peints un grand nombre d'informations sur le comportement du bois vieilli à long terme, en recoupant des cas de conservation très divers. Pour cela nous effectuons des mesures in situ qui rendent compte des déformations caractéristiques de l'œuvre, de leur évolution dans le temps, mais aussi des variations climatiques de l'environnement de conservation. Dans le cadre de notre étude nous avons travaillé dans des lieux aussi divers qu'un musée, une église et un hôtel particulier, qui illustrent chacun des ambiances de conservation bien particulières.

De cette manière nous cherchons à caractériser le comportement différé du matériau bois soumis à des cycles d'humidité typiques des lieux de conservation.

L'instrumentation des œuvres in situ pose de nombreux problèmes de conception sur lesquels nous allons revenir. Dans tous les cas, on s'emploie avant tout à ne pas nuire au tableau, et ce de manière directe ou indirecte. Quel que soit le panneau peint et sa valeur artistique, on évite de provoquer des modifications de sa géométrie ou son assemblage : du point de vue mécanique, on s'interdit de créer de nouvelles contraintes par l'installation d'un système de mesure ; ces contraintes viendraient s'opposer aux variations dimensionnelles d'origine hydriques que nous cherchons à caractériser, avec pour conséquence immédiate des dégradations accélérées du panneau peint.

2. LE CAS DU TABLEAU DE L'ÉGLISE SAINT DIDIER.

En première partie on détaille un cas d'instrumentation in situ d'un panneau peint sur peuplier, exposé dans le chœur d'une église d'Avignon. Ce premier cas nous a permis d'expérimenter une méthode spécifique d'acquisition des données sur panneau peint (mesure de tuilage), et d'obtenir ainsi une grande quantité de données exploitables, à la fois sur les déformations du panneau et sur les variations climatiques de son environnement d'exposition. La confrontation de ces différentes données nous a permis de mettre en évidence certains comportements types du panneau peint dans son environnement.

Ce tableau a été choisi en accord avec les restaurateurs pour différentes raisons. Tout d'abord pour son état général plutôt satisfaisant, puisqu'il n'y a pas de dégradation majeure de la couche picturale (autrement dit la partie majoritairement concernée par l'activité de conservation), et pour le type d'assemblage ; deux points qui en font un exemple pertinent de ce type de facture qui, soumise à l'épreuve du temps, tolère bien les variations de son environnement d'origine ; aucun dégât majeur n'ayant été constaté. Par ailleurs il est très intéressant d'avoir accès à des mesures climatiques dans une église, un lieu qui renferme généralement un grand nombre d'œuvres sur bois, et que l'on pourrait qualifier hâtivement de site d'exposition peu favorable : notre panneau en très bon état de conservation (même déformé) en est un bon contre exemple.

Enfin l'accessibilité à l'œuvre, facilitée par le personnel de l'église et par une fréquentation périodique mais ponctuelle du public, est un point non négligeable pour ce genre d'étude : il est essentiel d'avoir accès à l'œuvre pour retirer les données périodiquement, ou pour entreprendre des mesures approfondies sur le panneau peint et son environnement.

Les données collectées sur ce cas d'étude donnent lieu aujourd'hui encore à des développements divers : caractérisation du vieillissement physique du peuplier (très utilisé pour les panneaux peints), utilisation de l'outil numérique pour la modélisation du comportement hygroscopique des planches de peuplier (modèle prédictif pour les déformations induites par les cycles d'humidité saisonniers).

2.1 Descriptif du tableau.

Couronnement d'épines, Anonyme (1563), conservé dans le chœur de l'Église Saint Didier.
Hauteur : 143cm - Largeur : 178cm.

Ce panneau peint est constitué de 3 planches de peuplier, avec une direction du fil horizontale ou légèrement inclinée (les planches sont délimitées en blanc sur les photos de la figure 1.1). Il comprend un dernier morceau dans la partie inférieure que nous laisserons de côté durant notre étude. L'assemblage des planches est assuré au revers par deux traverses, avec un système de queues d'aronde. L'ensemble est monté flottant dans son cadre. Le cadre à son tour, repose sur deux équerres scellées dans le mur ; une troisième équerre le maintient par le

haut. De cette manière, les traverses sont plaquées contre le mur, le cadre est plaqué contre les équerres, et l'ensemble est légèrement contraint dans cette position.



Figure 1.1 - Couronnement d'épines (face avant et arrière)

Les variations d'humidité ont imposé au support du panneau peint un tuilage prononcé des trois planches principales, notamment la planche inférieure pour laquelle nous avons relevé en première observation une flèche d'environ 10 mm du côté de la face peinte. D'une manière générale, la couche picturale n'a pas subi de graves dommages. On note enfin que le tableau est altéré par une attaque massive de xylophages.

2.2 Matériel pour la mesure in situ (Principe et fabrication du montage).

L'objectif principal de l'étude était d'obtenir un système de mesure de la flèche en continu au revers du panneau. Nous avons conçu et fabriqué un prototype, puis nous l'avons installé au revers du panneau de l'église Saint Didier, afin de mesurer la variation de courbure des planches (tuilage) au cours du temps.

Parallèlement, on réalise un suivi des conditions climatiques (température et humidité) qui sont la cause de ces variations dimensionnelles. Les mesures climatiques sont réalisées à proximité de la mesure de flèche (toujours à l'arrière du panneau, la face avant étant considérée comme une surface qui n'échange pas ou très peu d'humidité avec le milieu environnant). La fréquence de l'ensemble des mesures est programmée sur un collecteur miniature en fonction des besoins de notre étude.

Le système nous informe sur la variation de flèche entre le centre de la planche et deux appuis de référence. Par principe on évite de visser des éléments dans le panneau ; on prévoit des contacts ponctuels et réversibles pour les trois appuis. Les mouvements continus du bois soumis à des cycles d'humidité obligent à créer un système mobile qui assure un contact permanent entre les touches et la planche à mesurer. Le principe de la mesure est schématisé à la figure 1.2



Figure 1.2 - Principe de mesure

L'espace disponible à l'arrière d'un panneau en exposition peut être très limité : dans notre cas il est d'environ 70 mm. Notre système de balancier s'insère dans cet espace disponible, tout en accueillant un capteur de déplacement linéaire qui réalise la mesure de flèche. Ce type d'encombrement nous oblige à développer des solutions complémentaires, dont l'exemple utilisé est schématisé à la figure 2b.

Cette solution, en plus d'être nécessaire dans de nombreux cas où l'encombrement est très limité, possède l'avantage de mieux exploiter la course du capteur, donc d'obtenir une meilleure précision avec un bon dimensionnement de l'ensemble.

Pour s'affranchir des effets de bords et de l'influence des traverses, on effectue la mesure de flèche au centre de la planche. Le système est fixé directement sur le tableau ; une solution qui possède l'avantage, par rapport à une fixation au mur, de conserver les mêmes références entre chaque décrochage du tableau, et facilite en outre toutes les manipulations.

L'installation de ce système ne doit pas être à l'origine de sur-contraintes pour le panneau peint (le poids du système ou le système de fixation pourraient accélérer le processus de dégradation). Le système repose sur une structure en profilés aluminium à l'arrière du panneau, fixée elle-même sur deux mords que l'on « pince » sur les traverses (figure 1.3). En réalisant cette solution, il faut garder une liberté de mouvement entre les deux traverses, qui fait partie des nombreux mouvements internes à l'assemblage : la solution adoptée est un tube coulissant à l'intérieur des mords. La solution globale de fixation sur les traverses a été approuvée par les restaurateurs, celle-ci n'ayant pas de répercussions évidentes sur les planches ni la couche picturale.

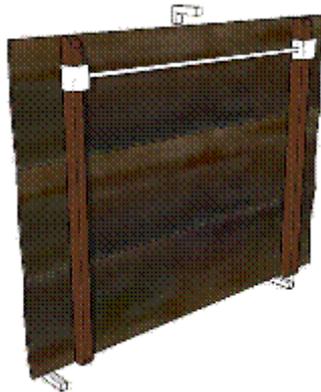


Figure 1.3 - Fixation au revers du panneau

2.3 Système d'acquisition des données (Partie électronique)

Nous utilisons des appareils de mesure thermo hygrométriques miniatures. Ce type de collecteur est programmable par ordinateur. Il enregistre et stocke simultanément les variations en température et humidité de l'air ambiant, ainsi que la variation de courbure sur le panneau. Ces trois mesures sont réalisées à intervalle régulier, que l'on peut choisir en fonction des besoins de l'étude.

Pour notre application, la mesure de flèche est réalisée par un capteur de déplacement linéaire, type potentiomètre résistif. L'alimentation du capteur est assurée directement par la pile interne du data logger (pile 3Volts), via les connecteurs jack (2.5mm / 3 pôles). Aucune alimentation supplémentaire n'est donc nécessaire : un point non négligeable dans le cadre de l'instrumentation in situ qui nécessite une installation discrète, que ce soit dans une église ou à plus forte raison dans un musée.

En résumé, le système d'acquisition est facile à mettre en œuvre : 1 potentiomètre linéaire, et 1 enregistreur pour la mesure des paramètres climatiques (T° et HR%), avec 1 voie externe pour collecter le signal provenant du capteur.

Le programme d'utilisation du data logger indique des capacités en mémoire de plus d'un an pour une mesure toute les quarante cinq minutes (avec quatre signaux pour chaque acquisition : $T^{\circ}C$, RH%, signal du capteur, tension de la pile). L'autonomie de la batterie 3 Volt, quant à elle, est au moins aussi importante, grâce à l'alimentation du capteur qui n'est réalisée que durant les courtes phases d'acquisition (8ms).

Le système a été validé sur CAO et le montage final a été réalisé en aluminium (voir figure 1.4 et 1.5). Le poids supplémentaire supporté par l'œuvre est d'environ 2.3 kilos.

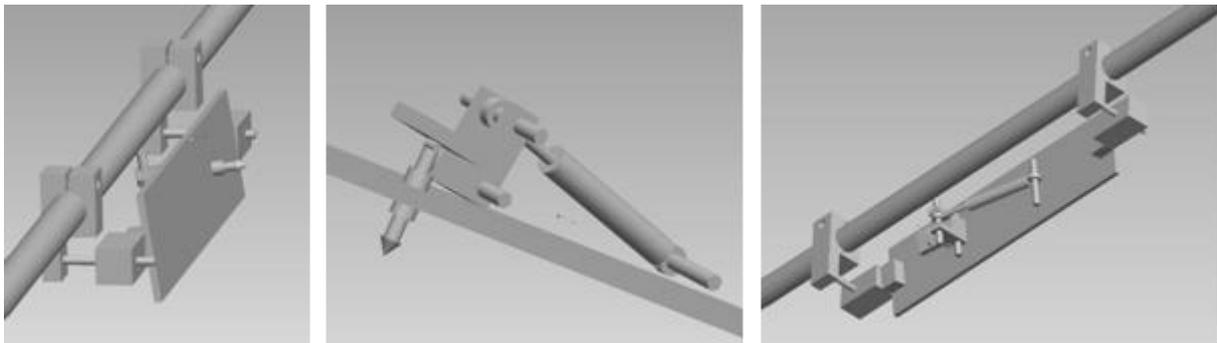


Figure 1.4 - Schémas CAO

2.4 Installation.

L'installation du système a revers du panneau a été effectuée dans une demi-journée, à l'occasion d'un décrochage dirigé par les restaurateurs. Auparavant, le panneau a été libéré en découpant l'équerre supérieure à flanc de mur. Cette dernière a été remplacée par deux nouveaux éléments vissés dans le mur d'une part, et dans le cadre du tableau d'autre part. Cette nouvelle solution d'accroche a permis d'incliner le panneau et donc de s'écarter légèrement du mur dans sa partie supérieure, laissant plus de place pour le système à installer.

Choix de la zone de mesure : La planche inférieure est celle des trois qui présente la flèche la plus prononcée (1 cm environ). Mais ce n'est pas forcément celle qui présente le plus de variations dimensionnelles à court terme. En outre elle a été autrefois recouverte de larges plaques de cire (pour des raisons inconnues) dont l'influence sur les transferts hygrométriques et sur le comportement mécanique général du bois aurait été difficile à interpréter.

En conclusion nous avons choisi la planche supérieure, très semblable à la planche centrale, mais qui offrait d'avantage d'espace pour le système. La zone de mesure enfin, a été positionnée approximativement à mi-distance des deux traverses, pour s'affranchir au maximum des effets de l'assemblage.

Le système une fois installé est représenté sur les photos de la figure 1.5.

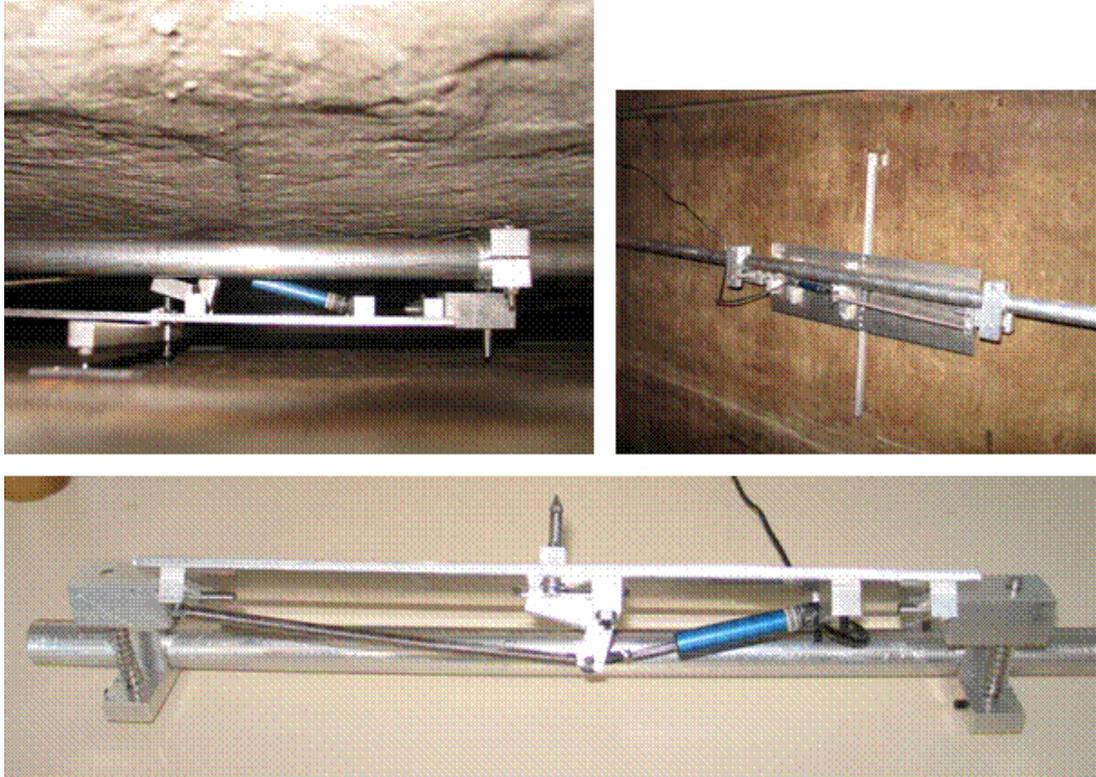


Figure 1.5 - Photos du montage

3. RESULTATS ET DISCUSSION.

3.1 Présentation des résultats.

On présente ici les résultats des mesures effectuées entre le mercredi 2 mai, date de l'installation du système, et le mercredi 28 août, soit 17 semaines de mesure. Pour ce tracé, on a gardé uniquement les variations d'humidité (courbe bleue) et la variation de flèche (courbe verte). Pour plus de lisibilité vis-à-vis des variations d'humidité, on tracera toujours l'opposé de la variation de flèche. L'échelle des temps est découpée en semaines, de dimanche à dimanche (jour repère pour les églises).

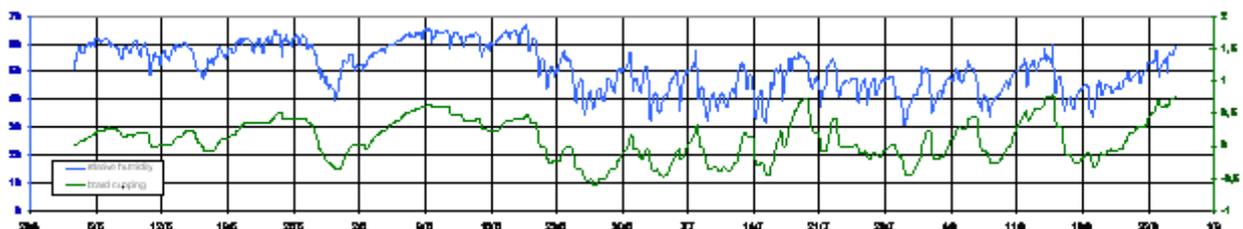


Figure 1.6 - Mesures in situ : humidité relative de l'air et variations dimensionnelles du panneau

Les variations d'humidité relative de l'air, comprises entre 40% et 65%, induisent une variation de flèche de l'ordre de 1,5 mm sur la planche étudiée. La première observation de ces courbes semble montrer une bonne corrélation entre les variations d'humidité et les mouvements du panneau ; c'est ce que l'on confirme par calcul d'un coefficient de corrélation proche de 0.79 (voir tracé figure 1.7a).

Les mouvements du panneau sont très souvent en retard vis-à-vis des fluctuations de RH%. A première vue, le décalage ne semble pas le même selon que l'on se place dans une phase d'humidification ou de séchage. Pour préciser cette différence de comportement, on sépare les données en deux groupes, humidification et séchage, en fonction de la courbe d'humidité, c'est-à-dire selon que la tendance de cette courbe est descendante ou ascendante.

Or, la courbe d'humidité possède un grand nombre de variations rapides que le bois ne traduit pas toujours en déplacements. Si l'on veut pouvoir identifier clairement les phases de séchage et d'humidification, tout en restant pertinent au regard du bois, il nous semble nécessaire de se ramener à une courbe d'humidité lissée. En première approche, si l'on suppose qu'il existe un temps caractéristique de la planche vis-à-vis des variations d'humidité, on doit pouvoir trouver un critère de lissage qui optimise la corrélation entre humidité relative et déplacements.

Après lissage de la courbe d'humidité par utilisation d'une moyenne mobile, on obtient des tendances beaucoup plus claires d'humidification et de séchage. Après quoi on peut traiter numériquement deux groupes de données distincts, en sorption (S) et désorption (D). En reprenant la corrélation RH / flèche pour chacun des groupes, et en les comparant à la tendance générale établie à la figure 7a, on distingue très nettement une répartition des cycles S et D de part et d'autre de la courbe (voir la figure 7c et d).

Si l'on calcule à nouveau les coefficients de corrélation des deux groupes on obtient des valeurs voisines de 0.90 (R^2). L'humidité lissée s'accorde mieux avec le comportement hygromécanique de notre panneau peint. Ces dernières données mettent en évidence des hystérésis de structure, liées seulement aux processus de diffusion dans la planche ; TransPore n'intégrant pas l'hystérésis relative à l'humidité d'équilibre. Les coefficients de corrélation dépendent évidemment du critère de lissage. Sur la figure 7b on montre l'évolution du coefficient R^2 en fonction de ce critère de lissage, à la fois pour la courbe générale, ainsi que pour les deux groupes S et D. Ces trois résultats sont parfois difficiles à accorder, car les maxima ne concordent pas forcément.

Le fait de trouver la meilleure corrélation n'est pas un résultat en soi, mais doit seulement nous permettre de caractériser une tendance globale du panneau peint dans son environnement. On peut ainsi chercher à savoir le type de variations climatiques induisant des déplacements et si ceux-ci sont nuisibles sur le long terme. Quant aux variations n'influant pas directement la géométrie du panneau, il conviendra tout de même d'en discuter les conséquences par la suite, les cycles d'humidité qui n'engendrent pas de déplacements apparents n'étant pas forcément sans conséquences pour le support de bois.

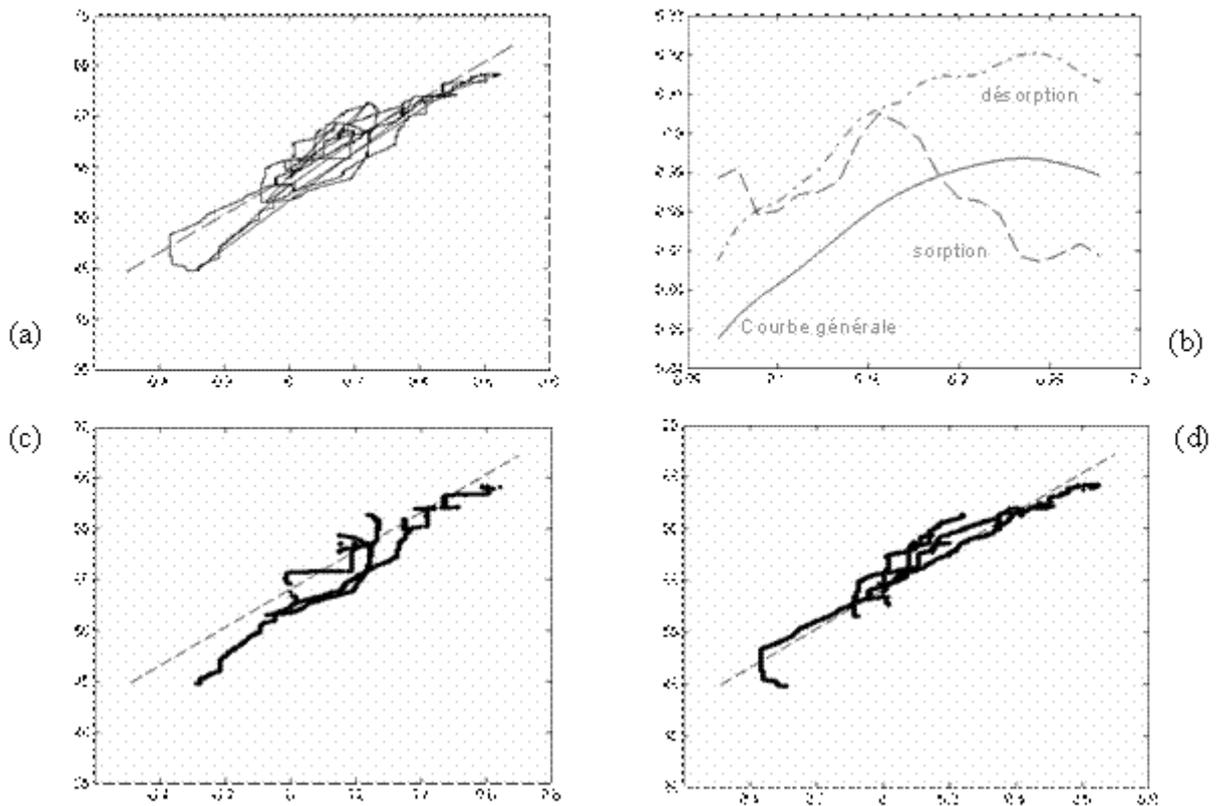


Figure 1.7 - Traitement des résultats : a) corrélation humidité déplacements b) variations de la corrélation en fonction du lissage des données en humidité c) corrélation humidité déplacements en sorption d) en désorption

3.2 Confrontation des résultats avec une simulation 1D (TransPore).

Au sein du LERMAB de Nancy, l'équipe de P. Perré développe un outil numérique d'aide à la compréhension des phénomènes de séchage du bois, destiné à mieux appréhender le procédé industriel de séchage des avivés pour la construction. L'implémentation des équations mécaniques dans la version 1D de TransPore, réalisée durant la thèse de R. Rémond (2005), permet de prédire la déformation d'une planche de bois soumise à des cycles de séchage. Il est intéressant de simuler des séchages dissymétriques, sources de déformations complexes, ou de bloquer la courbure pour s'intéresser aux contraintes dans le matériau.

On choisit d'utiliser les données en humidité mesurées à l'église Saint Didier, pour simuler la réaction d'une planche de peuplier standard, isolée sur une face (la face peinte), et libre de l'autre. Ceci dans le but de confronter les résultats numériques aux données expérimentales.

Le logiciel de calcul prévoit deux cas de simulation avec, soit une courbure libre pour observer la déformation, soit une courbure bloquée correspondant à l'action de traverses. Dans notre cas nous utilisons la première méthode, en supposant que les deux traverses n'entravent pas trop la liberté de mouvement de la planche considérée.

Le débit des planches constituant le tableau n'a malheureusement pas encore été identifié, faute de prélèvements et d'une identification visuelle incertaine. Le logiciel de simulation pour sa part peut intégrer différents cas de débit en précisant l'angle de la tangente aux cernes par rapport à la surface (0° pour une dosse et 90° pour un quartier). Le nombre de paramètres nous manquent aujourd'hui sur les propriétés du bois de ce panneau, nous empêche de pouvoir identifier clairement le débit grâce à la simulation.

Ce que l'on peut dire pour l'instant, c'est qu'à l'issue de plusieurs essais simulés sur dosse et quartier, c'est la simulation sur quartier qui approche le mieux la réalité (les déformations engendrées sur une dosse pourraient être beaucoup plus importantes). Le débit sur quartier est plutôt surprenant pour ce genre d'application et de géométrie, mais il n'est pas à exclure pour autant.

Première simulation : perméabilité de la couche picturale.

Lors des premières simulations, nous avons cherché à quantifier le rôle de la couche picturale dans l'apparition des gradients d'humidité au sein de la planche, et des déformations permanentes qui en résultent. Ainsi nous avons comparé deux cas distincts qui sont : une couche picturale totalement imperméable et une couche perméable ou peu perméable.

Lorsqu'on suppose que la couche picturale est supposée totalement imperméable, la variation de flèche simulée est non seulement beaucoup plus grande que celle mesurée dans la réalité, mais on observe un comportement simulé difficilement compatible avec la réalité : les deux courbes ne suivent pas du tout la même ligne temporelle .

En revanche, si on suppose que la couche picturale peut absorber l'humidité, alors il semble que le recalage de la simulation sur la réalité devienne plus aisé.

Dans la suite on définit une perméabilité relative de la face peinte par rapport à la face arrière. Cela permet d'éviter les valeurs des coefficients d'échange sur les différentes faces (en $W/m^2/^\circ C$) qui sont peu commodes à manier. Dans l'hypothèse d'une surface peinte de perméabilité relative 1% (qui échange 100 fois moins que la face arrière), on obtient la courbe de la figure 1.8.

La modification de la perméabilité du côté de la couche picturale contribue à limiter l'amplitude des déformations (souvent plus grandes dans la simulation que dans la réalité), mais permet surtout de mieux reproduire les mouvements de la planche autour de sa position au temps $t=0$: ce résultat constitue la première étape de notre démarche, et restera une donnée du modèle dans toute la suite.

Notons au passage que les deux états initiaux (simulé et réel) ne sont pas les mêmes ; puisque la simulation démarre d'une planche plate. Pourtant la solution doit rester identique, puisque la version de TransPore utilisée est une version 1D qui effectue tous les calculs dans l'épaisseur. De ce fait on est contraints de faire l'hypothèse que les effets 3D sont négligeables dans le comportement général du panneau (ceci étant justifié par la géométrie des planches et le fait que l'on mesure une déformation de tuilage relativement simple).

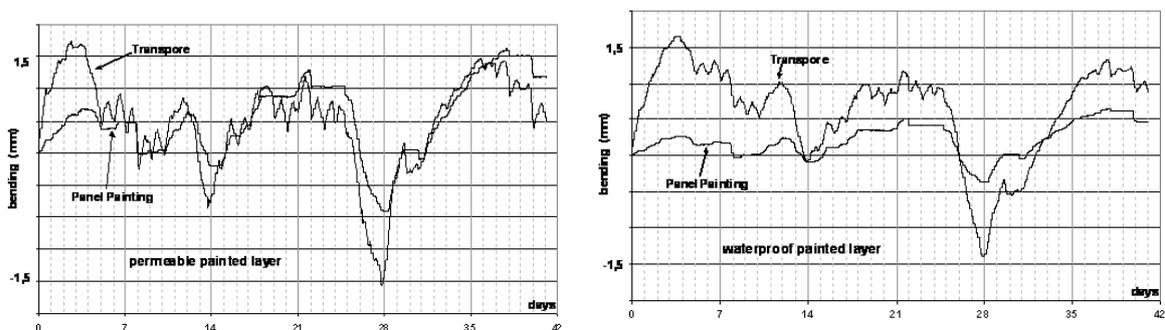


Figure 1.8 - Calcul avec couche imperméable à gauche et couche perméable à droite

Modélisation du vieillissement du bois.

Durant tout le temps de conservation dans l'église Saint Didier, le support de bois de notre panneau peint a été soumis à une quantité très élevée de cycles journaliers. Si on raisonne sur

la base d'un cycle d'humidité relative pour chaque jour, pour une durée de plus de 400 ans d'exposition, il est vraisemblable de penser, littérature à l'appui, que les propriétés mécaniques du peuplier en ont été considérablement modifiées, particulièrement les coefficients de retraits.

Pour obtenir un modèle prédictif solide, il nous faudrait pouvoir le valider sur un matériau dont nous maîtrisons tous les paramètres : géométrie, mécanique...etc. Or nous ne connaissons pas les propriétés du peuplier vieilli, en tout cas celui de notre panneau peint. Dans la littérature, on peut trouver des données concernant du peuplier soumis à des cycles de vieillissement accéléré. Certains essais ont été entrepris avec ce type de résultats : le comportement linéaire vis-à-vis des coefficients de retrait donne évidemment des résultats d'amplitude moins élevée, souvent plus proches de la réalité.

Pour l'heure nous choisissons de prendre le problème inverse : c'est-à-dire identifier les paramètres du matériau en considérant que notre modèle est juste, au moins dans la forme des variations dimensionnelles, puis en utilisant la linéarité de la réponse vis-à-vis du retrait.

On effectue la simulation avec des coefficients de retrait donnés pour le peuplier standard de Guitard, puis on recherche les meilleurs coefficients correcteurs afin d'obtenir la simulation la plus proche des données expérimentales (au sens des moindres carrés).

Les paramètres recherchés sont : le coefficient de retrait corrigé, l'écart moyen entre les courbes, et l'influence de l'humidité moyenne dans la planche.

Dans un premier temps nous avons cherché à déterminer le coefficient de retrait corrigé, tenant compte du vieillissement du bois de peuplier. Pour chaque débit (quartier ou dosse) et une perméabilité sur la face avant fixée d'après les résultats précédents, on recherche les coefficients a et b qui minimisent le carré de l'écart entre réalité et simulation, tels que :

$$\text{flèche corrigée} = a * \text{flèche simulée} + b.$$

le paramètre a devant rendre compte de l'altération des propriétés de retrait/gonflement du bois vieilli, et le paramètre b corrigeant l'erreur moyenne.

Avant de montrer les résultats de ce premier recalage, on a procédé à un vieillissement virtuel de la simulation. En effet, sur les cinq premiers jours de simulation, les écarts à la réalité sont d'ordre beaucoup plus élevé que pour le reste des données. Il est certain qu'en faisant débiter les données climatiques au temps $t = 0$ de la simulation, on néglige les effets antérieurs, le passé hygromécanique du panneau peint. N'ayant pas de données antérieures, et si l'on veut exploiter le maximum de données (sans en utiliser à chaque fois une grande partie comme histoire du matériau) on se propose de recréer un passé artificiel, capable de "fatiguer" le matériau.

En récupérant un cycle d'une semaine et en l'appliquant en boucle à la planche simulée, on peut observer le type de réponse intégrée à la résolution de TransPore.

L'amplitude des variations dimensionnelles diminue à chaque cycle, nettement lors des trois premiers cycles, puis elle semble se stabiliser : de cette manière on réduit l'erreur qui était particulièrement élevée en début de simulation (voir figure 1.9). Dans la suite on appliquera systématiquement trois semaines de cycles antérieurs pour simuler des effets sur le long terme.

A la suite de ces résultats, on part sur l'observation suivante : l'écart moyen entre panneau et simulation n'est pas du même signe selon que l'on se place dans la période humide ou la période sèche. Pour compenser ce phénomène, on intègre un troisième membre à notre équation qui tient compte de l'humidité moyenne dans la planche, celle-ci était donnée dans TransPore. Ce terme doit rendre compte de la déformation « permanente » liée à l'orientation des cernes, au débit. L'erreur faite sur le calcul de la flèche en supposant que le débit est soit parfaitement tangentiel, soit parfaitement radial, devrait être compensé par ce troisième terme.

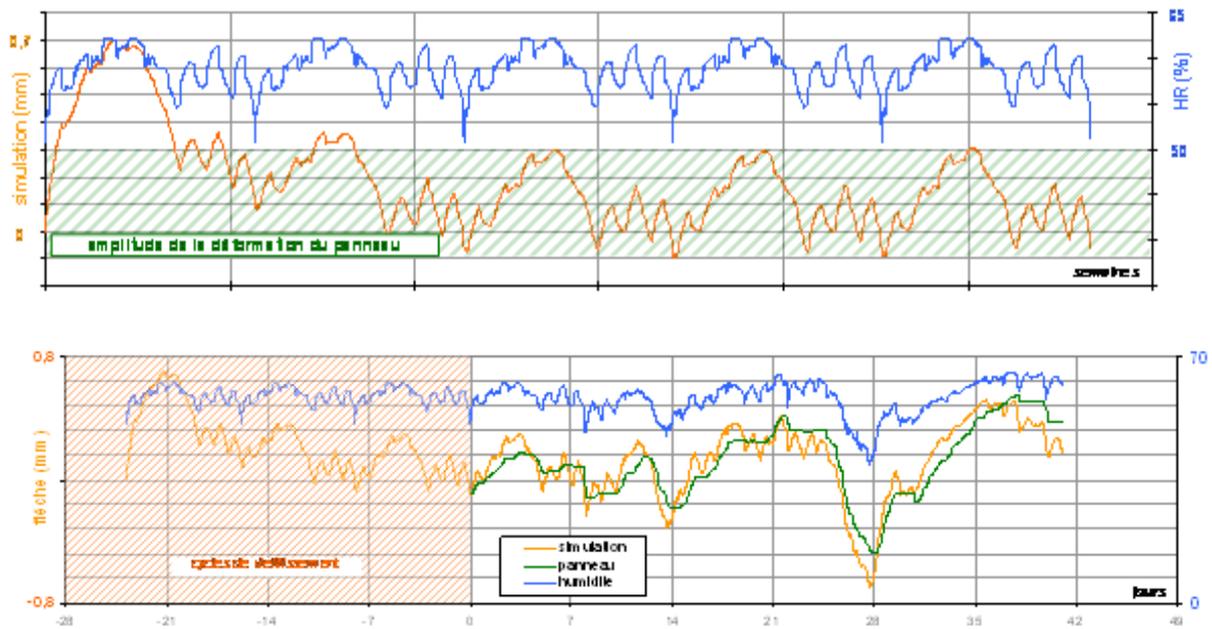


Figure 1.9 - Cycles simulés de vieillissement

L'équation devient :

$$\text{flèche corrigée} = a * \text{flèche simulée} + b + c * \langle h \rangle$$

Où $\langle h \rangle$ est l'humidité moyenne d'équilibre dans la planche à chaque instant de calcul. Le tableau suivant donne la valeur des paramètres ajustés, pour les deux débits extrêmes envisagés.

Paramètres du modèle / Modes de débit	quartier	dosse
a	0.800	0.176
b	-1.707	-0.365
c	0.154	0.039
Coefficient de retrait corrigé	0.096 (radial)	0.077 (tangential)
Corrélation simulation corrigée / déplacements (R ²)	0.89	0.658

3.3 Perspectives.

A ce stade on peut déjà prétendre que le modèle implémenté dans TransPore 1D suffit à décrire le comportement général d'une planche de bois, voire d'une planche vieillie typique d'un panneau peint en jouant pour l'instant sur les quelques paramètres identifiés, à savoir : les coefficients de retrait, la perméabilité de la face peinte, ou encore l'influence de l'humidité moyenne d'équilibre (une tendance plutôt proche du climat général, sec ou humide).

Dans le cas de la simulation sur quartier, débit dont nous avons déjà discuté les interrogations qu'il peut susciter, on peut obtenir après recalage un coefficient de corrélation de 0,89 entre modèle et réalité.

En perspective nous pouvons discuter d'autres points de divergence :

- La simulation réagit plus facilement que le panneau aux variations hydriques de fréquence élevée.
- Selon la période climatique (humide ou sèche) et la cinétique des échanges (sorption et désorption), la simulation réagit plus ou moins en avance sur le panneau.

- Quelques phénomènes très localisés, du type pics d'amplitudes (tantôt en faveur de la simulation, tantôt en faveur du panneau peint), sont encore à discuter.

Pour les deux premiers types d'écart, on propose en perspective une modélisation qui devrait améliorer leur prédiction. Ces écarts sont pour nous la preuve d'un comportement différé du bois, acquis lors du vieillissement. Ce n'est plus seulement la diffusion qui est concernée ici (un paramètre que nous avons d'ailleurs amélioré avec l'approche d'une couche picturale perméable), mais probablement des différences de comportement dans l'épaisseur de la planche.

En effet, on pourra faire l'hypothèse d'un gradient des propriétés dans l'épaisseur de la planche, avec un vieillissement plus prononcé en surface. Cet argument, justifié par le fait que le bois du côté de la face libre a subi plus de cycles d'humidité que celui dans l'épaisseur, permettra de formuler d'autres types de retard. Par exemple, si on suppose que le bois en surface a été plus altéré par le temps (ou les cycles d'humidité), et que par conséquent ses coefficients de retrait gonflement sont amoindris, il faut attendre la diffusion de l'humidité dans l'épaisseur, vers les couches plus réactives, pour voir apparaître des déformations aux causes antérieures.

En perspective, on envisage d'effectuer d'autres simulations avec non plus des coefficients de retrait corrigés, mais des gradients de coefficient dans l'épaisseur, toujours dicté par un processus de vieillissement qui tient compte de l'exposition de l'épaisseur aux cycles d'humidité extérieurs.

Par exemple on pourra tracer les courbes d'humidité à différents points de l'épaisseur pour en déduire une loi de répartition du gradient : grâce aux courbes d'humidité mesurées in situ, on pourra quantifier le nombre de cycles humides qui ont perturbé chaque point de l'épaisseur, et conclure quant à leur état de dégradation.

A cette première approche il faudra tenir compte d'une limite probable dans le processus de vieillissement ou d'altération des propriétés mécanique : on entend par là qu'on ne pourra pas atteindre des coefficients de retrait totalement nuls... et qu'il faudra déterminer les limites de ces processus de dégradation.

Vers un modèle prédictif...

Jusqu'à maintenant, en utilisant le modèle de TransPore, nous avons approché le comportement global d'une planche de panneau peint, et nous avons tenté une identification des paramètres matériau par recouplement des variations de flèche.

Si l'on veut pour la suite pouvoir obtenir un modèle prédictif général, il faudrait valider la résolution TransPore sur un matériau parfaitement identifié et instrumenté, c'est-à-dire dont nous aurions les courbes de comportement sous des variations hygrométriques données.

Pour ce faire, nous pensons effectuer une série de comparaison entre la simulation TransPore et les expériences menées par nos collègues de Florence en Italie. Ces derniers ont instrumenté des planches simulacres dans l'enceinte d'un musée renfermant un certain nombre de panneaux peints. Les propriétés des planches test utilisées, constituées de bois jeune et ancien, sont plus facilement identifiables que celles des panneaux peints. En comparant ces résultats expérimentaux et une simulation TransPore appliquée à une géométrie identique, nous espérons étalonner et valider définitivement notre modèle prédictif.

II.

Un cas de suivi d'une restauration de parquetage à la française : mesures non invasives et approche numérique par éléments finis.

1. INTRODUCTION

Dans la seconde partie nous décrivons une méthode de mesure optique non invasive (non destructive et sans prélèvement d'échantillon, mesure sans contact) mise en œuvre en collaboration avec l'équipe du LamCos à l'INSA Lyon. La méthode employée, dite de stéréo corrélation, permet d'obtenir des topographies 3D, soit une représentation numérique en trois dimensions d'un objet donné. Nous avons plusieurs fois employé cette méthode pour obtenir la géométrie du panneau, essentiellement du côté de la face peinte, afin de rendre compte des déformations qui affectent le support bois.

Les méthodes sans contact présentent de nombreux avantages pour des applications patrimoine, mais dans ce cas notamment, il est impossible d'obtenir des données en continu. Les mesures sont effectuées ponctuellement, et souvent à des dates très éloignées, du fait de la difficulté de mise en œuvre du matériel, plutôt encombrant et long à calibrer.

2. CAS DU PARQUETAGE DU PALAIS DU ROURE : LE BAPTEME DU CHRIST.

Le second panneau est un cas de restauration typique présentant à son revers un parquetage à la française en hêtre. Le support en bois et la couche picturale, conservés dans un hôtel particulier de la ville d'Avignon, ont subi des dégâts irréversibles : support fissuré et peinture craquelée. Les restaurateurs ont décidé d'effectuer quelques opérations de consolidation, et de remplacer certaines parties du parquetage en hêtre, jugé trop contraignant pour le panneau peint.

Les méthodes enseignées dans les écoles de restauration puis appliquées sur des parquetages de ce type n'ont quasiment pas évolué en plusieurs décennies, et les restaurateurs ne cessent de s'interroger sur leur bien fondé. La compréhension des phénomènes mécaniques mis en jeu dans ce type d'assemblage devrait permettre de discuter des méthodes toujours en pratique, ou de conforter certains choix : faut-il utiliser telle essence plutôt qu'une autre ? La géométrie du parquetage est-elle optimisée au regard du type de panneau et de son environnement ?

La question de la restauration par parquetage soulève de nombreux problèmes relatifs au comportement général des panneaux peints, voire à l'éthique de la conservation, ceci pouvant aller jusqu'à la remise en cause intégrale de ce genre d'intervention. Dans notre étude nous nous bornerons à identifier des critères mécaniques communs à de nombreux panneaux peints : des éléments de réponses, certes insuffisants pour tirer des conclusions définitives, mais qui permettront toutefois d'appréhender plus sereinement les étapes de restauration, ou encore et toujours de renforcer notre expérience du matériau bois.

Cette deuxième partie est donc consacrée à l'analyse des données optiques collectées à Avignon, en passant par le traitement des données brutes et la modélisation par éléments finis.

2.1 Description du tableau.

Baptême du Christ, Anonyme, conservé au Palais du Roure (Avignon). Hauteur : 485mm - Largeur : 405mm.

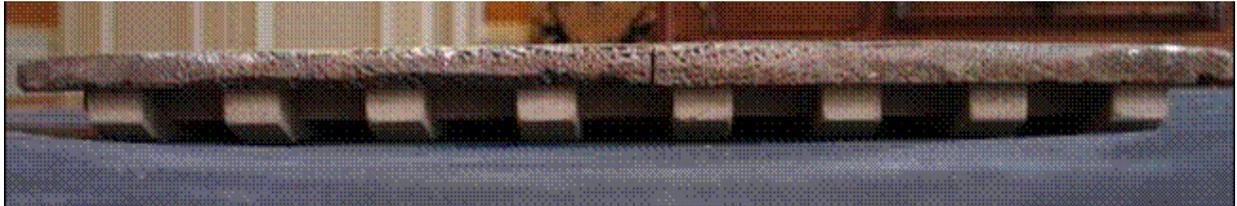


Figure 2.1 - Débit du panneau parqueté

Ce panneau est constitué d'une unique planche de résineux de débit radial (figure 2.1). Au revers figure un parquetage en hêtre (figure 2.2) probablement installé au cours des années 70. La présence de ce parquetage très rigide, combinée aux variations hygrométriques de la salle d'exposition (un hôtel particulier d'Avignon, donc une ambiance climatique mal maîtrisée, mais peu de fréquentation en revanche), ont mené à une accumulation de contraintes internes dans le panneau peint, résultant en deux fissures dans le support de bois, et des craquelures multiples de la couche picturale.

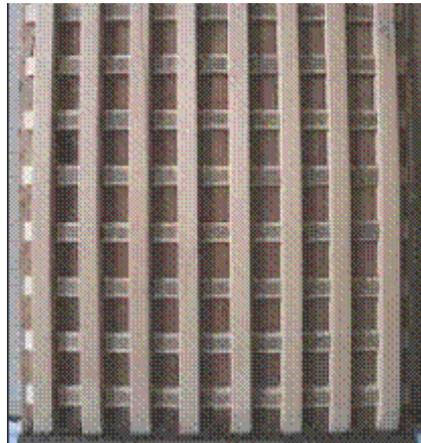


Figure 2.2 - Vue générale du parquetage

Afin de réduire les contraintes dans l'assemblage, les restaurateurs ont procédé au remplacement des traverses en hêtre, tout en conservant globalement leur géométrie, mais en choisissant une nouvelle essence, l'épicéa (figure 2.3). L'argument principal invoqué par les restaurateurs est qu'il s'agit d'une essence beaucoup plus flexible (ou souple) que la précédente, donc moins contraignante pour l'assemblage en mouvement.

Lors de la mise en place du parquetage, nous notons que les montants ont été collés au panneau, tandis que les traverses ont été posées pour être libres de se déplacer à l'intérieur des gorges creusées dans les montants.

Avant cette intervention des restaurateurs, suite aux déformations du panneau et probablement au gonflement des traverses, l'ensemble était complètement bloqué ; les efforts ainsi exercés ont du contribuer à la dégradation accélérée du support bois (on ignore cependant à quelle époque sont apparues les fissures).



Figure 2.3 - Détail du parquetage / intervention des restaurateurs

2.2 Etude mécanique préalable.

Avant même de concevoir une analyse par éléments finis, il faut être capable de caractériser complètement le matériau d'étude. Pour la partie panneau, il faudrait envisager des prélèvements et l'on sait que ce choix est difficile pour les objets du patrimoine. Nous avons donc modélisé cette partie par un épicea standard de la littérature. En revanche les traverses qui constituent le parquetage ont pu, elles, être caractérisées par différentes méthodes décrites dans la suite. Ce faisant, nous avons été capables de montrer que le choix du bois n'était pas forcément pertinent du point de vue mécanique.

En effet, par la méthode BING et par méthode ultrasonore, il a été démontré que le comportement en flexion des deux essences était presque similaire. Par conséquent, le fait de remplacer du hêtre par de l'épicéa au niveau des traverses (essentiellement sollicitées en flexion) ne changera quasiment rien au processus de tuilage du panneau, et donc aux contraintes dans le panneau de bois. L'épicéa étant un bois de faible densité, donc plus léger et donc en apparence moins rigide, il pouvait apparaître comme une alternative efficace aux parquetages très rigides en hêtre. Or une des propriétés de l'épicéa, largement utilisé dans la construction bois comme d'autres résineux, est de présenter un rapport module d'élasticité sur densité élevé. Cela est singulièrement le cas d'un l'épicéa de luthier, généralement sélectionné pour son rapport module sur densité élevé, qui justement a été employé dans ce cas. Cela est très probablement de très peu d'incidence sur l'efficacité de l'opération de restauration, qui a consisté avant tout à prévenir l'extension des fissures existantes dans la partie centrale et libérer les traverses, jusque là retenues tant par frottement que par les débordements du collage des montants verticaux.

Pour conclure sur ce premier aspect, on peut tout de même dire que dans une opération de restauration, le choix des essences mis en œuvre doit être pensé selon des critères objectifs pouvant dans certains cas aboutir à remettre en causes certaines pratiques et habitudes du métier.

2.3 Analyse numérique.

A différentes étapes de la restauration de ce parquetage, l'équipe de l'INSA Lyon a réalisé des mesures par stéréo corrélation de la face avant du panneau (côté peinture), pour en obtenir les états déformés successifs. Parallèlement au LMGC nous avons préparé une réplique du panneau parqueté sous CASTEM(application éléments finis).

La démarche qui est détaillée dans la suite est la suivante : récupérer la valeur des déplacements mesurés sur le panneau peint, puis les appliquer à son modèle éléments finis, pour enfin visualiser les sollicitations mécaniques diverses dans le panneau et les traverses.

La création du modèle 3D comporte de nombreuses étapes, parfois fastidieuses, qui ne seront pas détaillées dans ce rapport. Il est clair en revanche que les résultats que nous obtiendrons par la suite seront dépendant des choix de modélisation qui auront été faits : ce qui veut dire

qu'en préambule à toute discussion future, nous renverrons le lecteur à d'autres documents plus détaillés sur la création du modèle éléments finis.

Pour lors, nous décidons de revenir sur la démarche globale de l'étude, en détaillant les échanges de données entre les sources optiques et le modèle, résultat de la coopération avec les partenaires du LamCos (Insa Lyon).

2.4 Traitement des données optiques.

Chaque topographie 3D du panneau parqueté contient 80.000 points environ. La face avant du modèle 3D n'en contient généralement pas plus d'un millier (cela dépend de la précision du maillage qui aura été choisie).

L'objectif général consistait à récupérer ce champ de déformations, mesuré à un instant t de la restauration sur la face avant du parquetage, et de l'imposer à la géométrie maillée dans CASTEM, et ce afin de comparer les différentes vues en termes de déformations, de contraintes, et de choix des matériaux.

Comme pour la création du maillage CASTEM (figure 2.4), on a cherché à automatiser au maximum le traitement des données optiques, l'objectif étant de généraliser l'utilisation du procédé à d'autres panneaux peints.

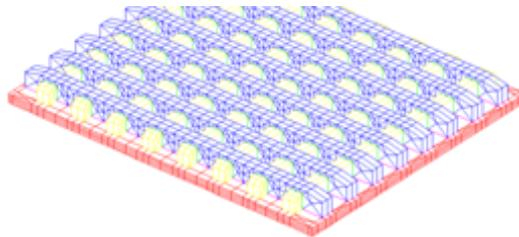


Figure 2.4 - Modèle éléments finis sous CASTEM

2.5 Discussions autour du recalage des mesures – Déplacements de corps solides.

Que l'on veuille comparer deux configurations entre elles (avec et sans traverses par exemple), où que l'on veuille retrouver précisément les lieux de concentrations de contraintes dans le panneau, cela suppose qu'on a identifié la position exacte de chaque point de mesure par rapport à la géométrie du panneau.

Si on prend l'exemple des deux configurations avec et sans traverses, il faudrait pour les comparer, retrouver trois points matériels identiques entre les deux vues, c'est-à-dire trois points clairement identifiés sur la géométrie du panneau, qui nous renseignent sur le déplacement de corps solide qui a eu lieu entre les deux prises de vue. Or pour réaliser le remplacement des traverses, le panneau est déplacé entre chaque mesure par rapport à la caméra. Alors entre deux images du tableau (de la déformée), on a toujours un déplacement de corps solide, considéré comme « grand », et des déformations de l'objet mesuré, considérées plutôt comme « petites ».

Une première tentative de récupération de points matériels a été entreprise avec l'équipe de Lyon. Il s'agissait de repérer un élément de la couche picturale sur les clichés, et d'analyser ses déplacements entre différentes vues. La précision de cette analyse, qu'il faudra répéter manuellement à chaque prise de vue, est fortement dépendante de l'analyse de l'opérateur. En effet, face à une zone agrandie de l'image qui fait apparaître les pixels, l'opérateur a la responsabilité de cliquer au « bon endroit »... Le nombre de pixels présents dans la zone de la peinture dépend de nombreux paramètres, notamment le choix de positionnement des caméras par rapport au tableau. Sans considérer des calculs d'erreurs complexes, en raisonnant sur le nombre de pixels d'une zone donnée (que d'ailleurs on ne connaît pas) on peut déjà remarquer

qu'il existe peu de zones homogènes en couleur (ou en géométrie) sur le tableau pour procéder à un repérage précis.

Un autre inconvénient qui nous empêche de discerner les grands déplacements des petits, est le fait qu'on ne mesure pas les bords de la géométrie du panneau, sur lesquels le programme de traitement a tendance à produire des erreurs. Dans le cas contraire, on pourrait simplement, lors du traitement sous MATLAB, retrouver les matrices de changement de repère. On peut ajouter à cette remarque le fait que dans notre étude, le panneau maillé n'est pas la représentation fidèle de la réalité, mais une copie de géométrie « parfaite ».

Pour tenter de résoudre ce problème, et conclure sur le sujet, on pourrait envisager de lier au panneau un objet de géométrie connue et identifiable par le système de traitement automatique des données, qui nous permettrait d'identifier clairement les déplacements de corps solide entre deux vues : considérant les rotations et les translations, il nous faudrait trois points identifiables pour arriver à nos fins.

2.6 Automatisation du traitement des données.

On vient de souligner la difficulté de replacer convenablement la zone de mesure sur la géométrie maillée. On sait par ailleurs que le choix de la zone de mesure 3D est déterminée manuellement lors de l'acquisition, et que cette zone s'apparente à un quadrilatère quelconque, plus ou moins déformé selon l'angle vue des caméras.

En début de programme, on récupère les coordonnées des 80.000 de mesure stéréo d'une part, et d'autre part les points du maillage de la surface maillée concernée, préalablement exportés depuis CASTEM. Le nombre de ces points varie en fonction de la densité de maillage choisie pour le modèle ; globalement ce nombre reste nettement inférieur au nombre de points de mesures. On est donc amenés à réaliser une interpolation.

On peut être amenés à supprimer quelques points erronés sur les topographies 3D. Souvent ces erreurs sont difficiles à identifier et corriger de manière automatique, et il faut souvent y remédier manuellement ; cela fait partie des points en développement de notre étude.

Une fois les points nettoyés, on procède à l'interpolation des déplacements mesurés sur les points du maillage CASTEM. Pour chaque point du maillage, on cherche les points proches correspondants dans la topographie. Pour chaque groupe de points proches, on identifie un plan moyen : on aboutit à une facettisation de la déformée que l'on voit sur la figure 2.5. La déformée au point considéré du maillage est estimée à partir du déplacement des plans moyens.

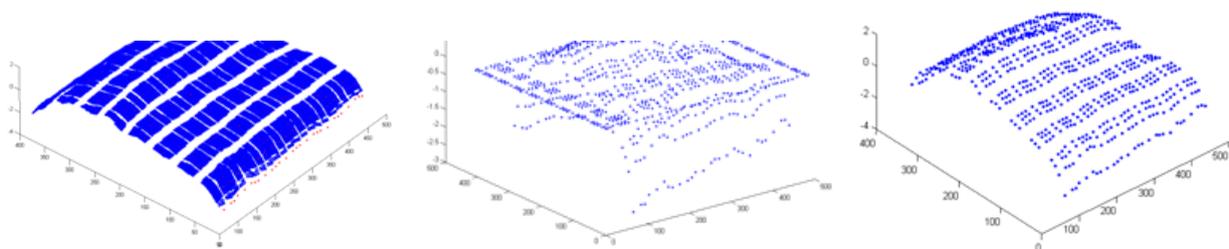


Figure 2.5 - Traitement des données optiques sous MatLab

A ce stade, on peut nettoyer de manière automatisée un certain nombre d'aberrations qui pourraient subsister. Celles-ci sont d'autant plus gênantes qu'elles se traduisent lors du passage dans CASTEM par des concentrations de contraintes qui n'auraient pas de réel sens physique. Cette étape de localisation des points aberrants ne s'effectue correctement que dans des zones éloignées des bords, pour lesquels nous avons préféré un nettoyage manuel ; cette remarque va avoir d'autres conséquences au niveau de la résolution effectuée dans CASTEM.

Après ces étapes de calcul, on peut récupérer les déplacements de l'ensemble des points du maillage. Une fois tous les traitements achevés, il ne reste que le champ de déplacement à imposer sur la géométrie maillée.

2.7 Calcul des contraintes : déplacements imposés (CASTEM).

Les champs de déplacements exportés depuis MATLAB vont pouvoir être exploités sous CASTEM, pour peu qu'ils soient ré appliqués sur les maillages correspondants.

On choisit de travailler en déplacements imposés. Dès lors, nous pouvons calculer les contraintes générées par un champ de déplacement donné, sur un état initial complètement relaxé, c'est-à-dire sans contraintes résiduelles. L'état initial commun que nous pouvons trouver pour tous les états du panneau, c'est l'état idéalement plat généré dans CASTEM qui correspond au plan moyen par rapport auquel nous avons recalculé chaque champ de déplacement dans MATLAB.

Pour traduire les évolutions de structure dans le panneau durant l'étape de changement du parquetage, on choisit d'étudier et de comparer deux états de déformation caractéristiques :

- l'état complètement relaxé du panneau sans traverse
- l'état sous contraintes avec les traverses

La démarche est la suivante : l'état déformé sans les traverses est considéré comme l'état 0 de contrainte globale $\sigma_0 = 0$. Lorsqu'on installe les traverses dans leur logement, on impose au tableau une légère remise à plat, induisant un état de contrainte final $\sigma_1 \neq 0$.

Si l'on veut réaliser une telle analyse sous CASTEM, il nous faut partir de l'état idéalement plat auquel on va imposer les champs de déplacement mesurés par stéréoscopie. Appelons $chpst$ (respectivement $chpat$) le champ de déplacement qui mène de la configuration parfaitement plane à la configuration sans traverses (respectivement avec traverses) (figure 2.6).

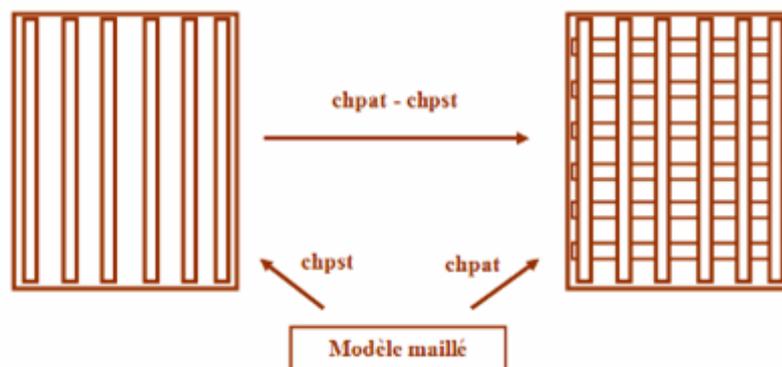


Figure 2.6 - Illustration du raisonnement sur le calcul des contraintes

La difficulté majeure d'appliquer ce raisonnement sur notre modèle éléments finis, réside dans l'utilisation des différents champs de déplacements. En effet, comme nous l'avons dit, les états déformés que l'on étudie sont calculés à partir de champs, eux même déterminés par rapport à une configuration de départ parfaitement plane qui tient le rôle de plan moyen. Pour que CASTEM puisse utiliser un champ de déplacement, il faut qu'il ait un support, c'est à dire un maillage contenant des nœuds auxquels la valeur du champ est définie. Cette remarque nous amène à discuter quelques points importants pour notre méthode optique.

Tout d'abord, notre incapacité à lier les états de déformations directement entre eux, à cause des déplacements de corps solides, nous a obligés à calculer chaque champ de déplacement par rapport à l'état idéal plan. Par conséquent tous les champs utilisés sont définis sur un morceau seulement de ce maillage plan : c'est un ensemble de points interpolés, débarrassé

des points non mesurés et quelques-uns jugés erronés. Donc si on veut utiliser ces champs sur des configurations déjà déformées, il faut redéfinir le maillage d'application des champs de déplacement (la méthode employée consiste à déformer le maillage support du champ de la même quantité que l'on a déformé la géométrie de départ).

D'autre part on constate que les points de définition ne sont pas les mêmes entre deux champs associés à deux états de déformation. Il faut donc travailler sur la zone de définition commune aux deux champs, en vertu du même principe qui nous a amenés à exclure les blocages nuls dans ces mêmes champs (la valeur 0 est une valeur physique...). Ainsi, si l'on multiplie le nombre de vues considérées dans notre étude, qu'on s'intéresse par exemple à toutes les étapes de la restauration, on diminue considérablement la zone de définition commune à tous les champs, et prend le risque de perdre beaucoup d'informations.

Si l'on voulait multiplier le nombre d'étapes dans notre calcul éléments finis, par exemple pour mieux approcher des comportements à long terme, il faudrait pouvoir assurer une définition maximale de la déformation sur la couche picturale, c'est-à-dire dans l'idéal avoir le déplacement de tous les points de la surface. On a vu précédemment qu'il était difficile à la fois de mesurer de manière pertinente les bords d'un panneau, mais également d'y retraiter des données. Une solution qui s'offre à nous est d'interpoler la déformation sur les bords à chaque étape, grâce aux éléments finis qui sont beaucoup plus pertinents qu'une interpolation des points mesurés.

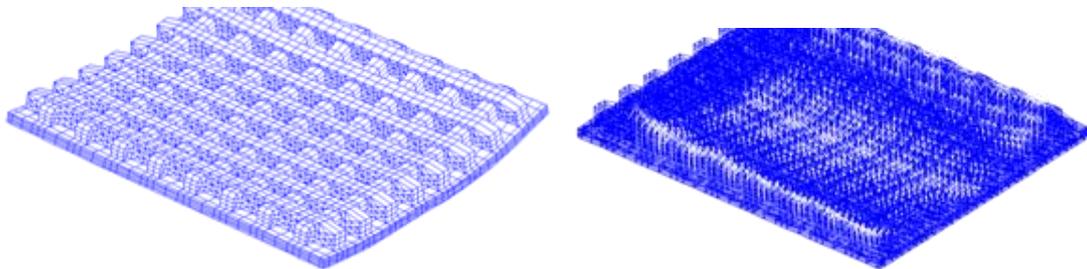


Figure 2.7 - Champ de déformation et tableau déformé

Lorsqu'on connaît les déplacements d'une partie de la couche picturale, à partir de l'état parfaitement plan, et qu'on veut retrouver les déplacements de toute la structure, il faut résoudre le problème mécanique en déplacements imposés.

Une fois la résolution obtenue, il suffit de créer une nouvelle géométrie à partir de la géométrie plane de départ, ce grâce au champ de déformation calculé par CASTEM qui déplace tous les nœuds du maillage initial, et non seulement la face partielle mesurée (comme le fait de champ de déplacement imposé). Cette nouvelle géométrie, si on n'actualise pas le calcul des contraintes à cette étape, ne comporte aucune précontrainte pour la suite ; c'est la géométrie déformée initiale à l'état $\sigma_0 = 0$ (état relaxé sans contraintes).

3. DISCUSSION ET PERSPECTIVES.

A l'heure actuelle, tous les calculs entrepris n'ont pas encore été menés à bien. Concernant le traitement des données issues de la stéréo corrélation, nous continuons de travailler avec nos collègues de Lyon à une meilleure automatisation du traitement, ceci afin de valider des méthodes amenées à être très utiles pour l'étude d'autres panneaux.

Le programme de résolution CASTEM développé par notre équipe existe, fonctionne en très grande partie, et doit faire l'objet d'autres développements. Il permet de calculer des états de contraintes entre différentes configurations de déformée du panneau, et pourrait même (cette partie ne sera pas évoquée ici) simuler des scénarios de propagation de fissure. Une étude

similaire avait été menée sur la Joconde en 2005, en collaboration avec le C2RMF, le LMS de l'Université de Poitiers et de DISTAF de l'Université de Florence, établissant du même coup que le risque de propagation de la fissure sur le panneau de peuplier était extrêmement faible. Outre le fait de s'intéresser à sa propagation, la présence d'une ou plusieurs fissures (deux dans la réalité) dans le modèle éléments finis, doit permettre d'obtenir des résultats beaucoup plus pertinents au niveau des contraintes dans le panneau peint.

L'étude menée dans cette seconde partie, bien qu'elle soit encore incomplète, nous a permis plusieurs développements importants : la mise en œuvre d'un procédé de mesure optique, sans contact, dont l'application systématique à l'étude des panneaux peints est en bonne voie. Enfin comme précédemment, on devrait généraliser l'utilisation de modèles prédictifs (par éléments finis comme par une autre méthode) dans les activités de conservation.

III.

Pré-étude d'un panneau peint dégradé, conservé dans un musée public de Perpignan.

LE CAS DU TRIPTYQUE SPIRIDON – MUSEE RIGAUD / PERPIGNAN.

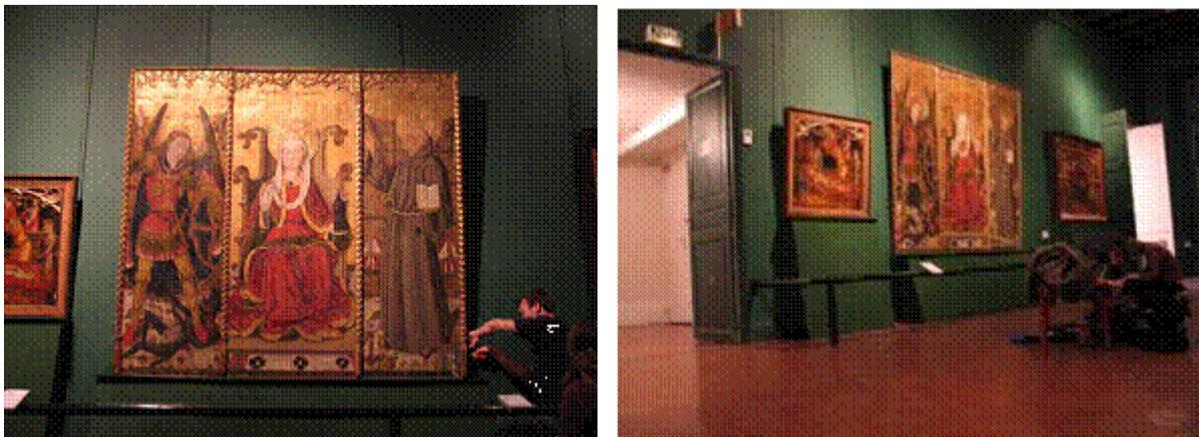


Figure 3.1 – Vues du tryptique dans son environnement

Triptyque - XVème siècle - 2.20m x 2m.

Le panneau a été conservé dans la même salle d'exposition depuis les années 70 (figure 3.1). Le cadre repose de toute sa longueur sur un caisson, et il est suspendu en hauteur par des chaînes permettant une légère inclinaison de l'ensemble. L'humidité de la pièce est surveillée régulièrement, puis corrigée si besoin par un déshumidificateur. Cette solution garde l'inconvénient d'être ponctuelle, et de provoquer des variations d'humidité à la fois rapides et élevées – peu être même localisées -, se différenciant en cela d'une atmosphère régulée de manière permanente. Notons au passage que le déshumidificateur est placé juste à côté du panneau étudié qui en subira d'autant plus les variations hygroscopiques imposées.

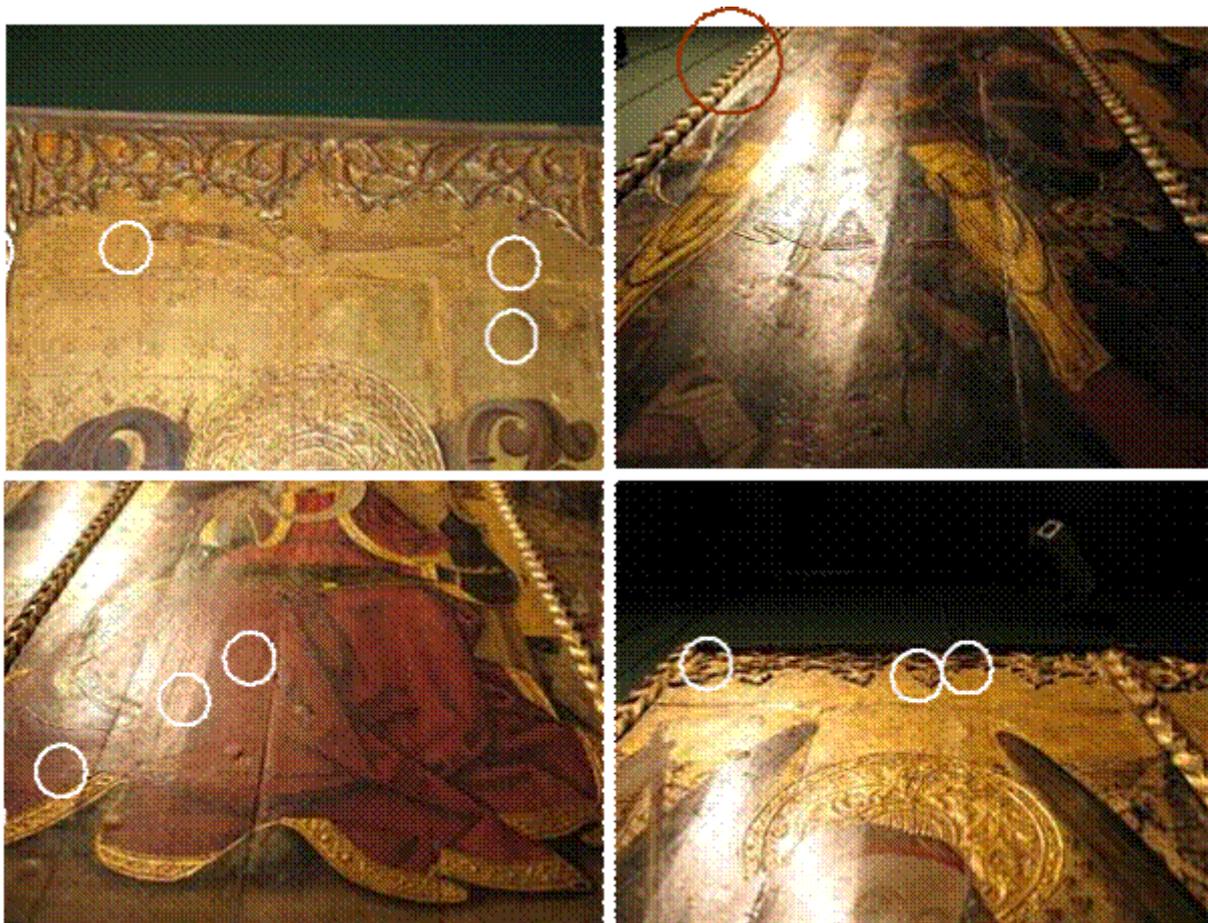
Les restaurateurs avaient attiré notre attention sur un décollement localisé de la couche picturale situé dans le coin inférieur droit. Cet état de dégradation n'a pas été daté pour l'instant mais il serait, d'après eux, la conséquence des cycles d'humidité imposés dans cette pièce. Pour l'instant nous avons seulement établi quelques observations de la structure globale de l'assemblage.

Du côté de la couche picturale en premier lieu, nous avons porté notre attention sur le nombre de planches utilisées dans ce triptyque, ainsi que leur agencement, décrit à la fin de cette partie.



Figure 3.2 - Vue de dos : aperçu des traverses

Le revers du panneau n'a pu être qu'en partie décrypté en le décollant faiblement du mur (figure 3.2). Le décrochage du panneau sera envisagé plus tard, si une étude à long terme permet de débloquent des financements appropriés. Une observation rapide a toutefois permis de se rendre compte de la complexité de l'assemblage. Il semblerait que des traverses aient déjà été changées, si l'on en croit les traces d'anciens clous qui témoignent de leur position du côté de la couche picturale (figure 3.3).



**Figure 3.3 - Déformations de la couche picturale.
Les cercles indiquent les positions de clous actuels ou anciens**

Les mouvements de l'ensemble du triptyque sont clairement établis aux jointures de chaque planche (figure 3.3). Le décollement de peinture évoqué par les restaurateurs devrait être lui aussi, une conséquence des déplacements relatifs entre deux planches voisines.

Un enregistreur a été installé au revers du panneau. Lors de notre prochaine visite, nous aurons une idée plus précise des variations hygroscopiques et thermiques auxquelles est soumis le triptyque.

Les figures 3.4 et 3.5 fournissent les mesures géométriques réalisées sur les panneaux.

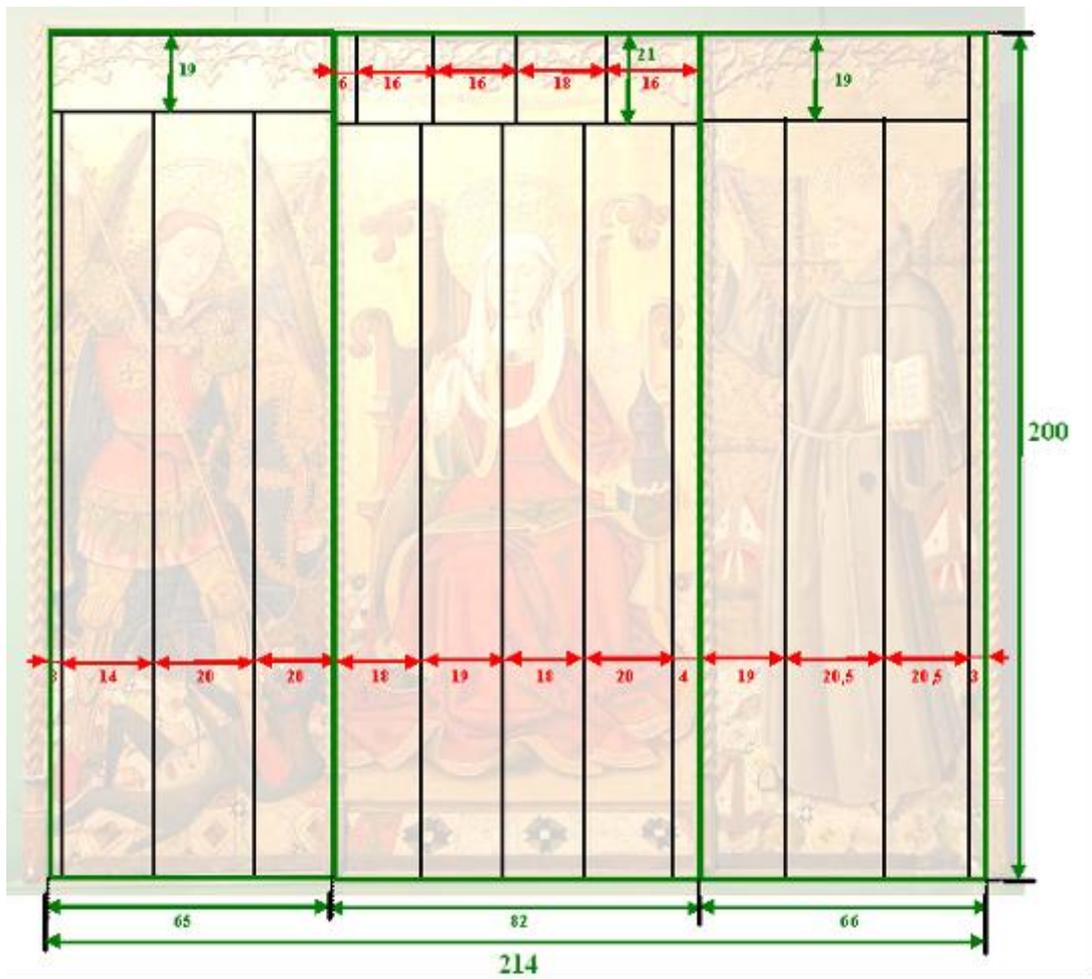


Fig. 3.4 - Mesures effectuées à l'avant du triptyque (valeurs en cm)

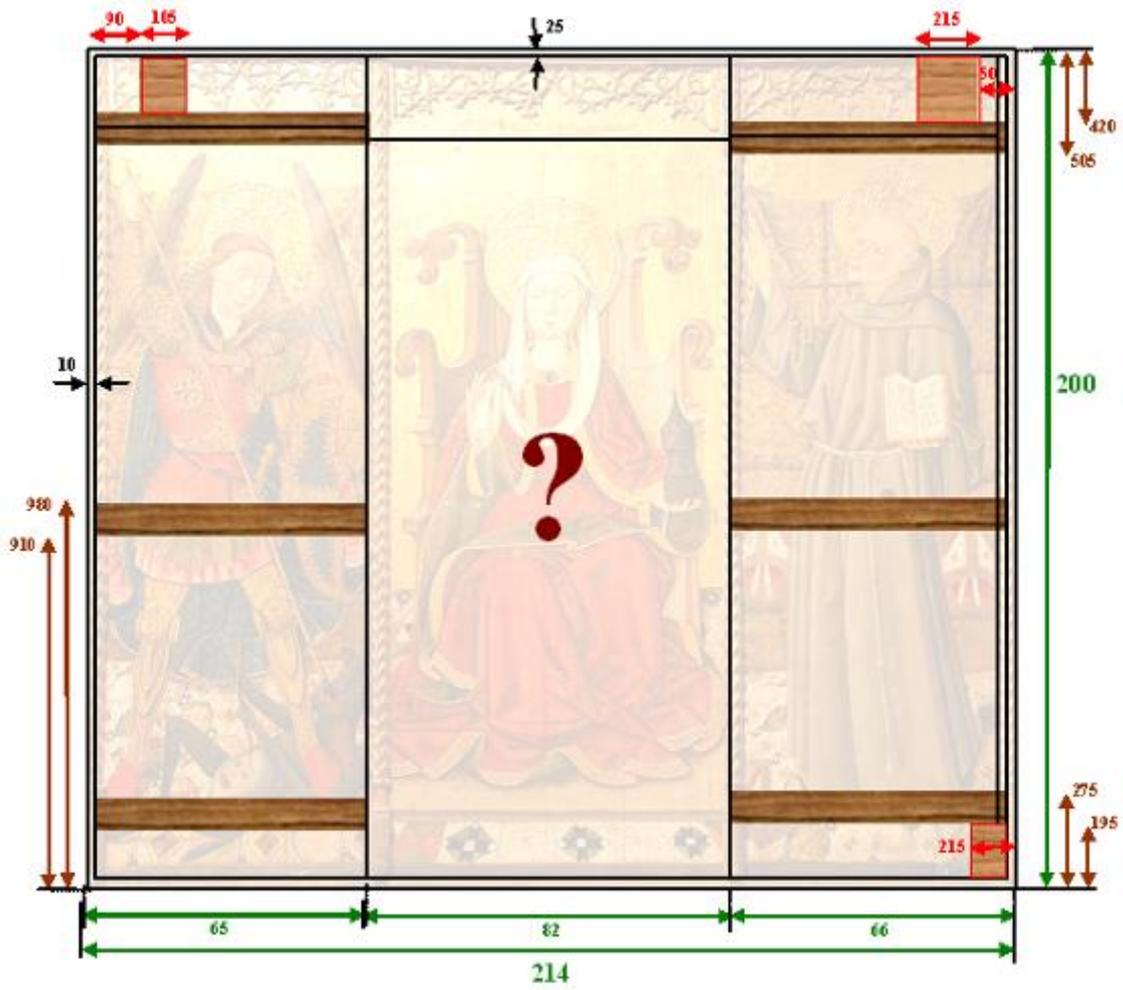


Fig. 3.5 - Mesures effectuées à l'arrière du triptyque (valeurs en cm)