

P Ô L E S C I E N T I F I Q U E

BOIS



Musée du Louvre - Paris (75) - Galerie d'Apollon

1 - INTRODUCTION

Après quelques années de mise en place d'un réseau de partenaires et de structuration, le pôle scientifique « Bois » arrive dans une nouvelle phase. Cela se traduit en particulier par un nombre de publications conséquent, par l'augmentation du nombre d'études de cas (rédaction de rapports) et par la participation du pôle à des programmes nationaux (ANR) ou européens (action COST).

Dans le cadre de son activité de recherche, le pôle tente d'équilibrer d'une part les problématiques « musées » et « monuments » et d'autre part les travaux uniquement traités « en interne » et les travaux « en partenariat ». Les collaborations se multipliant (étude de cas), une convention associant le LRMH et l'Unité des sciences du bois et des biopolymères a été signée.

Pour ce qui concerne le service, 25 identifications de bois ont été réalisées.

Sous contrats ou subventions

■ Détection acoustique d'insectes xylophages

Laurent DAUDET, Jean Marc FONTAINE (Laboratoire d'acoustique musicale - UMR Culture-CNRS)
Emmanuel MAURIN – Dominique de REYER (LRMH)

La détection de la présence et de l'activité des larves d'insectes xylophages est indispensable pour déclencher la mise en œuvre d'un traitement des structures en bois ou de mobilier infesté. Le détecteur Inadec est capable de diagnostiquer sur site la présence de capricornes et de termites. Cependant, trop peu sensibles, les systèmes de détection acoustique disponibles sur le marché ne sont pas adaptés au contrôle d'*Anobium punctatum* (petite vrillette) et *Lyctus brunneus* qui contaminent largement le mobilier ancien.

Dans le cadre d'un programme de recherche démarré en 1998, nous avons mis au point un dispositif d'enregistrement des signaux acoustiques des larves d'insectes xylophages *Anobium punctatum* et *Lyctus brunneus*, en vue de leur détection. Différents élevages ont été entrepris par le LRMH pour l'obtention d'enregistrements « propres ». Ces signaux se caractérisent par des transitoires dans les fréquences audibles. On constate une forte variabilité de l'activité en fonction du temps et du contexte de l'enregistrement. Nos premiers essais *in situ* montrent des signaux plus difficiles à interpréter car sensiblement plus bruités. Nous avons en conséquence développé une solution logicielle pour le traitement des signaux acquis, permettant d'affiner le diagnostic d'infestation. Le traitement des signaux se fait en trois étapes. Tout d'abord, les signaux sont débruités par seuillage dans le domaine des ondelettes, cette opération mettant en évidence les parties impulsives des signaux. Ensuite, une étape de détection des événements significatifs est mise en œuvre sur la forme d'onde temporelle des signaux. Enfin, il est nécessaire de distinguer dans les événements sélectionnés ceux qui sont réellement dus à des activités larvaires de ceux provenant d'artefacts de la chaîne de mesure ou de bruits parasites. Cette étape de classification utilise un réseau de neurones prenant en entrée 4 paramètres décrivant les caractéristiques spectrales et temporelles des événements détectés. Après entraînement sur une base de données sonore conçue à cet effet, les taux de bonne classification s'avèrent très satisfaisants, ce qui est une étape préliminaire à une utilisation sur le terrain.



Commune des Arcs (83) - La Nativité - Anonyme
Détail d'un panneau en bois peint altéré par des insectes xylophages

Si un tel outil peut être élaboré et finalisé, il sera alors envisageable pour une entreprise de créer un appareil dédié, autonome et simple d'emploi, pour une utilisation systématique sur le terrain, aussi bien pour des mesures ponctuelles que pour un suivi sur le long terme sur des éléments de mobilier.

■ Impact de l'humidité et de la présence de champignons sur les mesures effectuées avec un Résistographe®

Jean-François DUMAIL (Société XYLOMECA)
Emmanuel MAURIN (LRMH)

Ce contrat avait pour objectif de proposer une méthode de diagnostic *in situ* de poutres altérées. Dans un premier temps, les travaux se sont focalisés sur les limites de performance du Résistographe®. Dans un deuxième temps, et au vu des performances du Résistographe®, une nouvelle méthode d'utilisation des ultra-sons a été testée. Le Résistographe® est un appareil de sondage largement utilisé en foresterie pour détecter des arbres dangereux. Le principe est de mesurer le couple nécessaire au perçage du bois par un foret. Les résultats obtenus permettent de conclure à la présence ou non de zones pourries à l'intérieur de l'arbre. L'appareil est donc utilisé en « tout ou rien », c'est-à-dire pourri ou sain. Dans le cadre d'une utilisation pour le diagnostic *in situ* des structures en bois, une telle utilisation en « tout ou rien » présente un intérêt lorsqu'il s'agit de vérifier la qualité du bois dans des zones inaccessibles (abouts de poutres encastrés, bois

recouverts...). Cependant, le diagnostic serait largement amélioré si le Résistographe® permettait d'obtenir des informations quantifiées, reliées si possible à la densité du bois et à ses propriétés mécaniques (module d'élasticité MOE ou la résistance à la rupture en flexion MOR). La première phase de l'étude a montré que l'humidité du bois et la direction de perçage n'ont aucun effet sur l'amplitude du signal délivré par le Résistographe®. La seconde phase de l'étude a démontré l'absence de relation, au niveau global, entre le MOE ou le MOR et le signal délivré par le Résistographe®. Cependant, une relation étroite a été mise en évidence entre l'amplitude moyenne du signal du Résistographe® le long du perçage et la densité. Cette relation ne permet cependant pas de déterminer la densité avec précision. Lors de la dernière phase de l'étude, une méthode originale utilisant la mesure du temps de propagation d'une onde ultra-sonore pour l'évaluation des propriétés mécaniques des poutres *in situ* a été testée. Les premiers résultats montrent que la méthode pourrait effectivement être pertinente pour des mesures de MOE et MOR *in situ*. Il reste à calibrer la méthode sur des éprouvettes altérés connus.

▣ Étude du comportement hygromécanique de panneaux en bois peints

Joseph GRIL (Laboratoire matériau et génie civil)

Béatrice SARRAZIN (Centre de recherche et de restauration des musées de France)

Emmanuel MAURIN (LRMH)

À la suite des travaux effectués sur la Joconde, un projet sur le comportement hygro-mécanique des panneaux en bois peints a été développé. Il s'agit au travers d'étude de différents panneaux de mieux comprendre leurs variations dimensionnelles. À partir d'un modèle mis en place par le Laboratoire de recherche sur le matériau bois (Nancy) l'objectif de l'étude doit permettre d'obtenir des mesures prédictives et ainsi d'optimiser les actes de conservation.

Dans le cadre d'une thèse consacrée à l'étude du comportement hygromécanique de panneaux peints sur bois du patrimoine, il est prévu d'étudier plus particulièrement quelques tableaux représentatifs des problèmes rencontrés par les praticiens de la conservation préventive. Ces études permettront d'une part d'éclairer les questionnements de la profession, d'autre part de valider les approches de simulation numérique qui seront développées pendant la thèse. La première phase consistera à étudier et instrumenter un tableau situé dans un monument historique et de ce fait soumis à un climat fortement variable. L'étude préalable du tableau fournira les informations de forme et de constitution interne nécessaires à sa modélisation numérique, tandis que l'instrumentation permettra d'acquérir des données d'humidité et température, ainsi que de flèche et de forces en plusieurs points de l'arrière du tableau, nécessaire à la validation du modèle. L'objectif de la modélisation est de permettre une compréhension améliorée du comportement du support bois ; elle permettra au final d'appuyer des propositions de mode de présentation réduisant les contraintes sur le bois, tout en préservant la couche picturale. Cette instrumentation se fera dans le cadre d'un stage ingénieur.

▣ Zéphyr : base de données sur les produits de conservation restauration

Ariane SEGELSTEIN - Eric BOQUIER (EXTERNAL)

Laurent FORTIER - Emmanuel MAURIN (LRMH)

La présentation générale du programme et la synthèse des résultats sont détaillées par le pôle « Informatique », page 121.

Hors contrats ou subventions

▣ Impact de la congélation sur le matériau bois

Emmanuel MAURIN (LRMH)

La congélation est une méthode classiquement utilisée pour la conservation des textiles. Les premiers tests ont montré qu'il pouvait être pertinent d'appliquer la méthode sur des objets en bois. En effet, lorsque l'humidité du bois est inférieure à 20 %, les variations dimensionnelles durant la congélation sont inférieures à 0,4 %. La mesure de l'évolution des propriétés physiques n'a permis d'observer aucune modification du matériau. Des essais de mesures sur le comportement de colles ou de produits de finition ont été entrepris et semblent encourageants.



Exemple de copies de marqueterie réalisées en 1983 par Anna ØSTRUP et sur lesquelles sont effectués différents essais de congélation



COST IE0601 : wood sciences for cultural heritage

Joseph GRIL, vice président du COST (Laboratoire matériau et génie civil)

Emmanuel MAURIN, coordinateur adjoint de la représentation française (LRMH)

Le patrimoine culturel européen comprend un grand nombre d'objets faits en partie ou totalement en bois, par exemple des panneaux peints, des sculptures, des instruments de musique, des meubles, des outils, des structures en bois, des piliers de fondations. Le bois est un matériau particulier, d'origine biologique, d'une grande variabilité, sensible aux altérations physico-chimique et biologiques, hygroscopique, susceptible de gonfler ou de se rétracter en fonction de l'humidité relative de l'air et de la température, anisotropique, viscoélastique, mécanosorptif. Son comportement lors de son vieillissement n'est pas encore bien connu. Les sciences du bois se sont beaucoup développées ces quelques dernières années, et c'est depuis peu qu'elles commencent à trouver des applications dans le domaine de la conservation-restauration des œuvres d'art.

Cette action COST a pour but d'améliorer la conservation (ce qui comprend études, conservation préventive et restauration) d'objets en bois du patrimoine européen (WCHOs) par des recherches ciblées et des collaborations interdisciplinaires entre des scientifiques du domaines du bois, des conservateurs, et d'autres scientifiques. Une attention particulière sera apportée à l'étude de la durabilité du matériau (par exemple ces facteurs - physiques, mécaniques, biologiques, chimiques, environnemental - et leur interactions), les méthodes d'étude des altérations à long terme, les interactions entre les WCHOs et l'environnement (dans l'atmosphère et dans le sol, ce qui inclut les bois archéologiques), l'évaluation à long terme de la compatibilité des méthodes et des produits de restauration, l'évaluation des appareils de diagnostic, restauration, monitoring et conservation des WCHOs, les pratiques d'implémentation des résultats en conservation préventive et la standardisation. Un site d'information sur le Cost est consultable à l'adresse suivante : <http://www.woodculther.org>.



PLasmas Appliqués aux Surfaces des MATériaux et des PALettes (PLASMAPAL)

Geneviève ORIAL - Emmanuel MAURIN (LRMH)

La présentation générale du programme et la synthèse des premiers résultats sont détaillées par le pôle « Microbiologie », page 67.

3 - ÉTUDES

Quelques exemples de dossiers traités sont développés ci-dessous.

▣ PARIS (75). Musée du Louvre, galerie d'Apollon - Vérification de l'état de la panne sablière et des pieds d'arbalétriers et d'arêtiers de la galerie d'Apollon à l'aide d'un Résistographe® et d'un endoscope (rapport n° B222)

Jean-François DUMAIL (Société XYLOMECA)

Emmanuel MAURIN (LRMH)

Des sondages ponctuels réalisés sur l'extrados de la voûte de la galerie d'Apollon, à l'occasion de travaux de couverture, ayant montré des zones de pourriture importante de la charpente, l'architecte en chef des monuments historiques a sollicité le LRMH pour l'aider à établir un diagnostic fiable, sans intervenir sur l'intrados récemment restauré.

La vérification de l'état de conservation de la panne sablière et des pieds d'arbalétrier et d'arêtier de la galerie d'Apollon a été réalisée en utilisant les résultats donnés par un Résistographe®, appareil permettant de mesurer la résistance au perçage du bois, et ceux issus d'une observation du bois par endoscopie. Ces deux méthodes ont été couplées en quatre points différents de la sablière, côté Seine de la galerie, au niveau des fermes n° 2, 5, 9 et 14, montrant, avec une parfaite concordance, que ces zones de la sablière étaient sujettes à la pourriture. Le contrôle de la sablière côté Seine au niveau des autres fermes, à partir d'une simple analyse par Résistographe®, a montré que la pourriture s'étendait pratiquement sur toute la longueur de l'élément. Seule la zone s'étendant de la ferme n° 7 à la ferme n° 8 présentait un état de conservation convenable.

La sablière côté Louvre a été également contrôlée en utilisant le Résistographe®, mais dans ce cas aucune trace de dégradation n'a été détectée. À la suite de cette étude, l'Unité des sciences du bois et des biopolymères a réalisé une modélisation du comportement de la structure par le logiciel Abaqus qui s'appuie sur des relevés de la société Étude charpente et structure bois et sur des prélèvements de plâtre réalisés par le LRMH. Cette étude a permis de faire des propositions raisonnées en conservation-restauration.



Photo de la galerie d'Apollon pendant les travaux de diagnostic

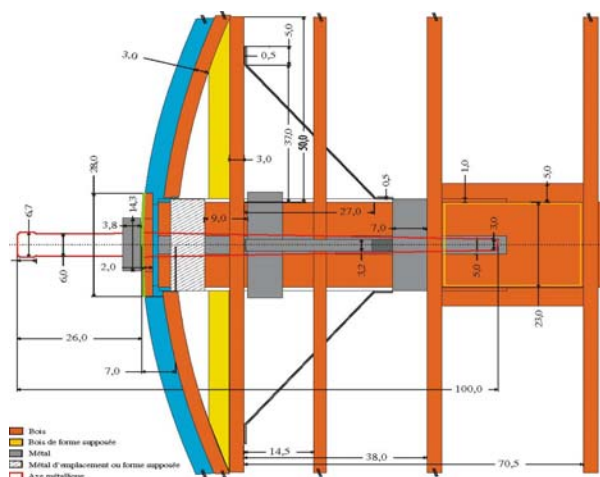
**PARIS (75). Bibliothèque nationale de France, globes de Coronelli (rapport n° 1218 A)
Diagnostic mécanique des globes de Coronelli en vue de leur redressement**

Philippe GALIMARD - Alain COINTE (Unité des sciences du bois et des biopolymères)
Thierry BOYER (Centre de recherche et de restauration des musées de France)
Emmanuel MAURIN (LRMH)

Les globes dits de Coronelli sont deux sphères à structure bois de 3,80 m de diamètre, pour un poids de 23 kN, construits et peints en 1683 pour représenter la Terre et le Ciel. Ils ont été présentés au public jusqu'à la fin du XIX^e siècle dans leur position initiale (axe nord-sud incliné de 23° par rapport à la verticale) puis transportés et stockés depuis lors dans la position axe nord-sud horizontal. Ils appartiennent maintenant aux collections de la Bibliothèque nationale de France qui souhaitait que le public puisse, de nouveau, avoir accès à ces oeuvres. Une action concertée a permis d'identifier les différents bois constitutifs et proposer un plan des globes à partir de mesures sur site et de radiographies. Par ailleurs, les mesures d'inclinométrie ont permis d'envisager le redressement des globes ainsi qu'une exploitation mesurée de la rotation en toute sérénité. En effet, elles n'ont pas révélé de défaut majeur de la structure.



Aperçu du globe céleste de Coronelli



Proposition de plan des pôles des globes de Coronelli

■ Rédaction d'un guide de règles professionnelles pour la mise en œuvre de techniques de renforcement local de poutres par des résines époxy (rapport n° 1215 A)

Emmanuel MAURIN (LRMH)

Les travaux réalisés précédemment en partenariat avec les entreprises ont montré que certaines techniques de renforcement utilisant des résines peuvent être pertinentes. Les travaux antérieurs ont par exemple montré la durabilité potentielle de ce type de travaux. Cependant, il a aussi été démontré la sensibilité des colles à la température et la difficulté de contrôler des collages. Pour ces différentes raisons, il était nécessaire d'encadrer la mise en œuvre de travaux utilisant des résines par des règles professionnelles. Un document a été rédigé par le LRMH en partenariat avec l'Unité des sciences du bois et des biopolymères. Ce document est en cours de validation par une association d'entreprise (RBR) utilisant ces méthodes de renforcement.

■ DIJON (21), musée Magnin, fauteuil cabriolet Louis XVI (rapport n° 1209 A) Comparaison de produits consolidants en vue de la restauration du siège

Centre de recherche et de restauration des Musées de France, atelier de restauration mobilier
Emmanuel MAURIN (LRMH)

À la suite de ses travaux sur les produits de consolidation du bois par imprégnation, une étude de cas a été proposée au LRMH par les ateliers de restauration des Musées de France. Il s'agit d'un fauteuil cabriolet appartenant au Musée Magnin de Dijon, conservé dans les réserves des ateliers de Versailles depuis environ 15 ans. Le siège était totalement démonté, certaines pièces comportaient des manques, d'autres étaient très altérées par des insectes. Différents types de consolidation en fonction des différentes problématiques (comblement ou imprégnation) ont été envisagés. Pour la consolidation des bois très altérés par imprégnation, une méthode originale a permis de comparer différents produits. Il a été démontré que l'utilisation du Paraloid B72 n'apportait pas d'amélioration de la tenue mécanique du matériau. Le Paraloid reste cependant intéressant pour le refixage des peintures. Par ailleurs, l'imprégnation de résine epoxy permet de recouvrer très partiellement certaines propriétés mécaniques (20 % en compression). Les résines epoxy sont très simples à mettre en œuvre, mais elles ne peuvent être ré-essuyées après séchage.



Détail d'altération du siège cabriolet du musée Magnin

■ CHAMPS-SUR-MARNE (77), Château (rapport n° 1217 A) Étude sur la tenue des plafonds et des planchers

Jacques MOULIN (architecte en chef des monuments historiques) - Philippe GALIMARD - Alain COINTE (Unité des sciences du bois et des biopolymères) - Jean-François DUMAIL (XYLOMECA)
Emmanuel MAURIN (LRMH)

Au mois de septembre 2006, une partie du plafond du salon chinois du château de Champs-sur-Marne est tombée révélant que la sous face des solives était partiellement altérée par des champignons. À la suite de cet événement, Monsieur Jacques Moulin, architecte en chef des monuments historiques, a demandé au LRMH dans quelle mesure il était possible de contrôler la tenue des autres plafonds. Une étude proposant un diagnostic par approche successive (thermographie infrarouge, vibration, Résistographe®/endoscopie) a été réalisée et ses résultats sont détaillés dans le rapport. Cette approche doit être affinée dans l'année en cours en utilisant notamment un « plafond modèle » (échelle 1) sur lequel des essais de traction seront réalisés. La modélisation des planchers doit apporter une idée sur leur résistance potentielle.



Château de Champs-sur-Marne - Plafond du salon chinois

