

Contribution au diagnostic mécanique d'une structure en bois du patrimoine

BOUHLEL Sarra¹, COINTE Alain¹, MAURIN Emmanuel², HISTACE Aymeric³,
MELINGE Yannick²

¹Institut de Mécanique et d'Ingénierie (I2M), Université de Bordeaux

²Laboratoire de recherche des monuments historiques (LRMH), CRC - MNHN, CNRS,
Ministère de la Culture - UAR 3224

³Equipe Traitement de l'Information et Systèmes (ETIS), UMR 8051, CY Cergy Paris
Université, ENSEA, CNRS
sarra.bouhleb@u-bordeaux.fr

Mots clés : Patrimoine bois ; Diagnostic ; Lois de similitude ; Séchage ; Mécanosorption ; Assemblage bois-bois ; Monitoring

Contexte et objectifs

L'évaluation de la santé structurale d'un patrimoine en bois est très complexe. Seule l'expérimentation permet d'en obtenir une évaluation fiable. Toutefois, les essais à taille réelle s'avèrent souvent peu concluants, coûteux et parfois même irréalisables. Dans ce projet, la solution alternative consiste à mettre en place une maquette à échelle réduite du rez de chaussée de la « Halle de Villeréal » (Fig. 1), située dans le département du Lot-et-Garonne.



Fig. 1 : Vue 3D de la Halle de Villeréal à l'échelle 1/1 Fig. 2 : Vue 3D du modèle réduit à l'échelle 1/3

L'inspection visuelle de cet édifice patrimonial du XVI^e siècle, construit en bois de chêne à l'état vert, révèle divers désordres, tels que la dégradation de certains éléments, une fissuration dans une poutre de l'enrayure et la détérioration d'assemblages, notamment la rupture de chevilles d'assemblage poteau-poutre de type tenon-mortaise. La préservation de ce patrimoine en bois, ainsi que la garantie de sa résistance et de sa durabilité, demeurent un défi scientifique. Cela est principalement dû au manque d'informations sur le matériau existant, son histoire, ainsi qu'aux limites des outils de diagnostic disponibles.

Dans le cadre d'une inspection approfondie visant à mieux comprendre les causes des désordres observés et à évaluer la tenue mécanique de la « Halle de Villeréal », une maquette en bois de chêne vert a été mise en place dans le département de la Gironde, tout en prenant en compte les effets d'échelle (Fig. 2). Le suivi des déformations dans la maquette, a mis en lumière des phénomènes complexes, tels que le processus de séchage du bois et son impact sur les déformations différées, qui influencent la stabilité structurale de l'édifice, tant au niveau des assemblages que des éléments porteurs. Ces phénomènes sont analysés dans le projet d'article.

Matériel et méthode

Conception de la maquette

Dans nos travaux, la capacité d'accroître l'expertise des assemblages en bois et de mieux diagnostiquer passe par la réalisation d'une maquette du rez de chaussée de la « Halle de Villeréal », conçue selon des lois de similitude. Ces lois permettent d'établir des relations qui lient la réponse du modèle réduit à celle du prototype à l'aide de facteurs d'échelle. Chaque facteur d'échelle exprime le rapport d'une variable physique du modèle (x_m) et son équivalent du prototype (x_p), selon la relation $\lambda_x = \frac{x_m}{x_p}$ (Szucs 1980).

L'analyse dimensionnelle permet d'établir les relations de similitude selon le principe suivant : Deux systèmes peuvent être considérés comme semblables si leurs paramètres adimensionnels, ou paramètres de similitude, sont identiques et restent invariables par changement d'échelle. Elle montre que dans un modèle statique élastique, où les facteurs indépendants choisis sont le facteur d'échelle géométrique $\lambda_L = 1/3$ et celui de module d'Young $\lambda_E = 1$ (conservation des propriétés du matériau), les facteurs d'échelle pour les variables d'intérêt (chargement surfacique (q), contrainte (σ) et déplacement (u)) sont les suivants (Harris et Sabnis 1999) :

$$\begin{cases} \lambda_E = \lambda_\sigma = 1 \\ \lambda_E = \lambda_q = 1 \\ \lambda_u = \lambda_L = 1/3 \end{cases}$$

Une charge a été appliquée à l'aide d'une citerne souple couvrant une surface de $4,44 \times 4,77 \text{ m}^2$ et un volume d'eau de $10,3 \text{ m}^3$, soit une charge équivalente à 486 kg/m^2 . Cette charge surfacique est équivalente à celle appliquée sur le plancher du rez-de-chaussée de la structure réelle « Halle de Villeréal », qui mesure environ 14,5 m de côté et 4,8 m de hauteur. La maquette, également de forme carrée avec des côtés d'environ 4,8 m et 1,7 m de hauteur, repose sur des poteaux disposés selon deux carrés concentriques.

Instrumentation et monitoring de la maquette

Cette approche expérimentale repose sur l'application d'un chargement surfacique au plancher d'une maquette exposée à un environnement climatique réel. Chaque élément de la structure subit ainsi des sollicitations mécaniques et hydriques. La nature des contraintes mécaniques varie en fonction de la transmission de la charge, de la position et du rôle de chaque élément dans la structure, ainsi que de l'orientation des fibres du bois par rapport à la direction de la charge. Comme l'illustre la Fig. 2, le bois du carré externe, directement exposé aux fluctuations climatiques, relève de la classe de service 3, tandis que le portique intérieur, étant couvert, est soumis à des conditions moins sévères correspondant à la classe de service 2.

Cette méthodologie permet d'évaluer la réponse des éléments structurels de la maquette, installée depuis six mois, tout en assurant un suivi par monitoring jusqu'à fin 2025. Elle vise également à caractériser le comportement des assemblages traditionnels face aux sollicitations mécaniques et aux variations climatiques. Ainsi, le dispositif expérimental mis en place comprend les éléments suivants :-

- Capteurs de mesure : 18 capteurs potentiométriques de référence MMR10 ont été installés pour mesurer les déplacements relatifs entre les différents composants de la structure. En complément, 2 capteurs ont été mis en place pour enregistrer les déplacements absolus (flèches).

- Capteurs environnementaux : 2 capteurs de température et d'humidité de référence HTM2500LF, ont été disposés en des points stratégiques afin de suivre les conditions environnementales de l'air ambiant.
- Système d'acquisition des données : une centrale d'acquisition (imc SPARTAN) et un logiciel de pilotage automatisé (imc STUDIO) ont été configurés pour enregistrer les données toutes les deux secondes.
- Traitement et analyse des données : le logiciel MATLAB a été utilisé pour traiter et analyser les données collectées comprenant des mesures de déplacement, de température et d'humidité.

Le positionnement des capteurs a été défini en fonction des zones présentant des pathologies observées sur la « Halle de Villeréal », comme illustré dans les Fig. 3 à 6.



Fig. 3 : Rupture des clefs dans l'assemblage tenon-mortaise entre poteau et poutre



Fig. 4 : Capteurs 06 et 07 de mesures des déplacements relatifs entre poteau et poutres de la travée extérieure



Fig. 5 : Illustration de l'endommagement mécanique dans des poutres portant le rez de chaussée



Fig. 6 : Déplacements verticaux enregistrés par les capteurs 05 et 18, positionnés aux extrémités des poutres de l'enrayure

Résultats et discussion

Au cours de la période analysée, l'humidité relative ambiante a varié entre 21,58% et 100%, tandis que la température a fluctué entre 7,52 °C et 32,1 °C. La charge appliquée était constante, et le temps de chargement s'est étendu du 28 mars 2024 jusqu'à présent.

Les données expérimentales présentées dans la section suivante couvrent une période de 150 jours, allant du 28 mars au 31 août.

Le monitoring de la déformation de certains éléments au sein de la maquette révèle un retrait dans quelques poutres du plancher. L'évolution du retrait de ces poutres (Fig. 7) suit une cinétique caractéristique d'un phénomène de fluage, marquée par une phase transitoire où la vitesse de déformation diminue, suivie d'une phase secondaire à vitesse stable. La Fig. 8 met en évidence un déplacement particulièrement prononcé, mesuré par le capteur 08, illustrant le retrait tangentiel de la poutre A1 du plancher, dont la section est présentée dans la Fig. 9a. Ce déplacement, atteignant environ 3,5 mm, est presque deux fois supérieur à ceux relevés par les capteurs 09, 16 et 17 (environ 1,9 mm). Le capteur 09 est dédié à la mesure du retrait transversal de la poutre A2 (Fig. 9b), tandis que les capteurs 16 et 17 mesurent le retrait radial de la poutre

A3 (Fig. 9c). Ces observations soulignent une différence significative entre les retraits tangentiels et radiaux au sein de la structure.

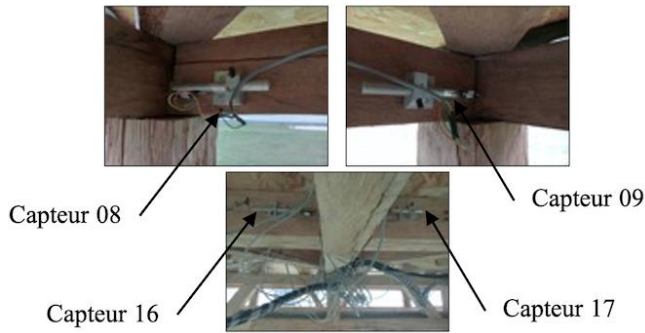


Fig. 7 : Disposition des capteurs pour la mesure des variations dimensionnelles transversales

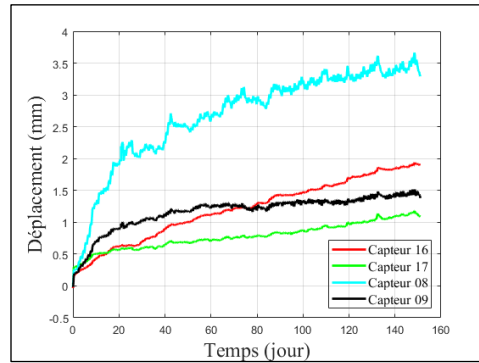


Fig. 8: Évolution du retrait transversal des éléments structuraux au cours du temps

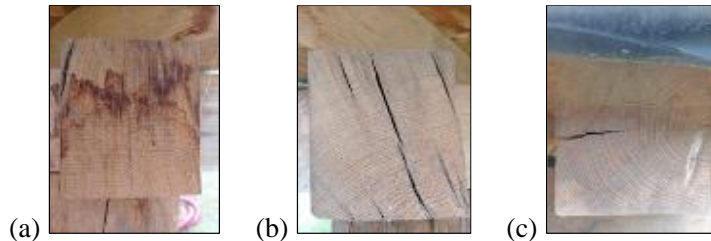


Fig. 1 : Sections transversales : (a) poutre A1 ; (b) poutre A2 ; (c) poutre A3

En outre, le monitoring du comportement mécanosorptif a été réalisé à travers l'analyse des flèches enregistrés par les capteurs 12 et 20. Ce comportement résulte du couplage entre la contrainte mécanique (flexion des poutres) et les variations d'humidité. L'étude met en évidence l'effet élastique instantané lors du chargement initial, la variation du module due à la variation de l'humidité relative, la déformation hydrique et l'évolution viscoélastique sous charge constante, amplifiée par l'effet mécanosorptif. Ce dernier se traduit par une augmentation de la déformation pendant les phases d'humidification, liée à l'assouplissement progressif des propriétés élastiques sous l'effet de la diffusion du front d'humidité. Il se manifeste également par le phénomène d'hygro-verrou (Fig. 10 et 11), caractérisé par un blocage partiel et temporaire des déformations élastiques en raison de la rigidification du matériau pendant les phases de séchage sous contrainte, suivi d'une reprise du fluage au cours de la phase de ré-humidification (Gril 1988, Dubois et al 2005, Saifouni 2014, Nguyen 2017).

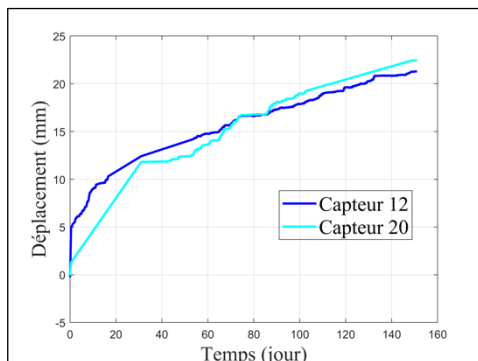


Fig. 10 : Évolution temporelle des mesures des flèches enregistrées par les capteurs 12 et 20

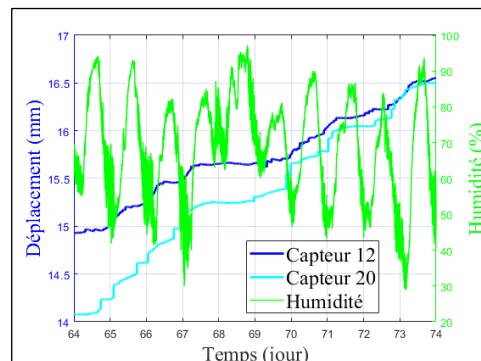


Fig. 11 : Effet des variations d'humidité sur le comportement mécanosorptif

La Fig. 10 révèle que les flèches mesurées pour les deux poutres de section 9x10 cm² de la travée intérieure, atteignent environ 23 mm après 150 jours. Cette déformation entraîne une

compression de la fibre supérieure et une traction de la fibre inférieure de chaque poutre. Par ailleurs, elle induit une rotation au niveau des zones d'assemblage tenon-mortaise entre le poteau d'angle de section 13x13 cm² et la poutre. Cela provoque un double cisaillement des chevilles aux interfaces entre les joues du tenon et celles de la mortaise. Ce mode de déformation, par cisaillement des chevilles, constitue généralement le mécanisme principal de rupture de l'assemblage (Fig. 12 et 13).



Fig. 12 : Flexion de la poutre appuyée sur deux poteaux dans la travée intérieure

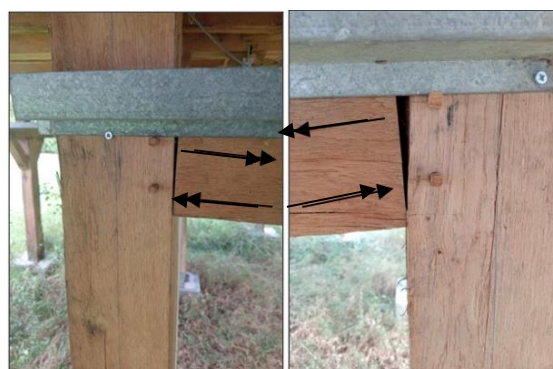


Fig. 13 : Rotation de la zone d'assemblage sous l'effet de la flexion

Pour caractériser l'effet de la variation d'humidité sur le comportement des assemblages tenon-mortaise chevillés entre les poteaux d'angle et les poutres, ainsi qu'entre les poteaux centraux et les poutres, des capteurs de déplacement relatif sont utilisés. Ces dispositifs sont conçus pour mesurer principalement les jeux causés par les variations dimensionnelles transversales (retrait/gonflement) du poteau, ainsi que par le retrait longitudinal de la poutre, qui est nettement moins prononcé (Guitard 1987).

L'évolution des jeux dans les assemblages poteau-poutre révèle des variations plus importantes, atteignant jusqu'à 1,8 mm, notamment au niveau des capteurs 13 et 14 qui mesurent le déplacement relatif dans la travée intérieure. En comparaison, les capteurs 01 et 03, situés dans la travée extérieure, enregistrent des variations ne dépassant pas 0,4 mm (Fig. 14 et 15). Cette différence peut s'expliquer par la cinétique de séchage, les assemblages de classe 2 (travée intérieure) séchant plus rapidement que ceux de classe 3 (travée extérieure). Par ailleurs, la flexion est plus marquée dans la travée intérieure, où les poutres reposent sur deux poteaux, tandis que dans la travée extérieure, la présence de trois appuis réduit cet effet.

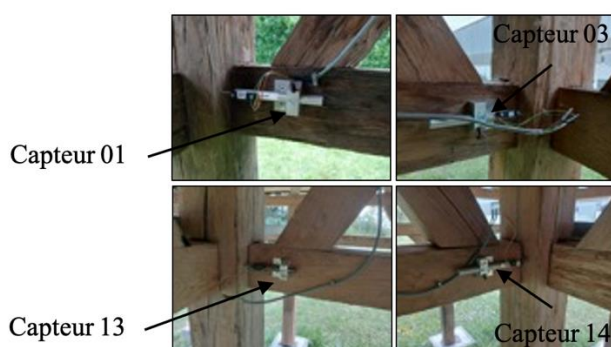


Fig. 14 : Disposition des capteurs entre le poteau d'angle et la poutre

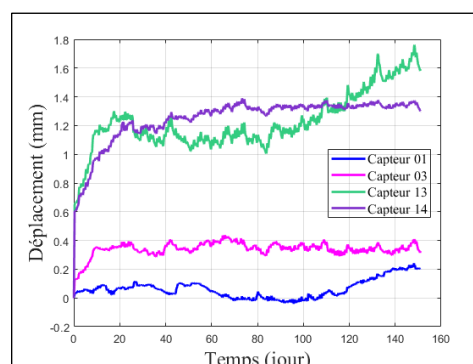


Fig. 15 : Évolution du déplacement relatif dans les assemblages poteau-poutre au cours du temps

L'analyse des assemblages révèle une sensibilité significative aux variations hygrométriques, se manifestant par des fluctuations cycliques liées aux phénomènes de retrait et de gonflement libre du bois. Dans la travée intérieure, l'évolution du déplacement relatif entre poteau et poutre

au niveau des assemblages est amplifiée par un double effet : d'une part, la rotation induite par la flexion de la poutre, et d'autre part, l'influence mécanosorptive qui accentue cette flexion. En revanche, cette sollicitation en flexion est limitée dans les assemblages de la travée extérieure où la présence d'un potelet à mi-travée joue un rôle stabilisateur, empêchant ainsi les déformations excessives. Cette différence de comportement souligne l'importance de la configuration structurelle dans la réponse des assemblages aux variations environnementales et aux contraintes mécaniques.

Conclusion et perspectives

Le diagnostic du comportement mécanique différé d'une structure en bois nécessite une analyse approfondie des assemblages et de la stabilité des éléments structurels, en intégrant les effets des charges à long terme et des variations climatiques. Le couplage thermo-hygro-mécanique, notamment à travers l'effet d'hygro-verrou, accentue la flexion de la poutre portant le tenon, ce qui intensifie la sollicitation en double cisaillement sur les chevilles au niveau des interfaces latérales dans les assemblages de type tenon et mortaise. Ce processus peut engendrer une dégradation prématurée des assemblages.

Bien que le séchage du bois puisse provoquer des fissures importantes dans les éléments structuraux, il reste essentiel d'évaluer la réponse dynamique de la structure à travers une analyse modale expérimentale. Cette approche globale, qui intègre l'étude des contraintes mécaniques, des effets hygroscopiques et des sollicitations dynamiques, permet de garantir la durabilité des ouvrages en bois tout au long de leur cycle de vie, en anticipant et en prévenant les divers facteurs pouvant compromettre leur intégrité structurelle à long terme.

Références

- Dubois F, Randriambololona H, Petit C (2005) Creep in wood under variable climate conditions: numerical modeling and experimental validation, *Mechanics of Time-Dependent Materials*, Vol. 9, pp. 137-202.
- Gril J (1988) Une modélisation du comportement hygro-rhéologique du bois à partir de sa microstructure, Thèse de doctorat de l'université Paris 6.
- Guitard D (1987) *Mécanique du matériau bois et composites*, CEPADUES- Editions.
- Harris HG, Sabnis GM (1999) *Structural modeling and experimental techniques* (2nd ed.). CRC Press.
- Miller JF, Schmidt RJ, Bulleit WM (2010) New yield model for wood dowel connections. *Journal of Structural Engineering*, 136(10) :1255–1261.
- Nguyen SL (2017) *Modélisation hydromécanique du bois : Application au sapin blanc du Massif Central*, thèse de doctorat, Université Clermont Auvergne.
- Saifouni O (2014) *Modélisation des effets rhéologiques dans les matériaux : application au comportement mécanosorptif du bois*, thèse de doctorat, Université Blaise Pascal.
- Szucs E (1980) *Similitude and modelling*. Elsevier, NY.
- Tevi KR (2023) *Méthodologie d'évaluation de la santé structurelle d'une structure bois du Patrimoine : étude de la halle de Villeréal*, thèse de doctorat, Université de Bordeaux.