

# Caractérisation expérimentale des propriétés mécaniques d'assemblages à tenon-mortaise par mesures de champs cinématiques

Komlan Renaud TEVI<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université de Bordeaux, UMR 5295, Institut de Mécanique et d'Ingénierie (I2M), CNRS, 351 cours de la libération, 33405 Talence Cedex, France.

**RESUME** Les assemblages à tenon-mortaise sont des assemblages traditionnels courants dans les monuments historiques en bois. Cette étude vise à évaluer les propriétés mécaniques (raideurs et résistances) de ce type d'assemblages. Dans un premier temps, une étude est effectuée sur les chevilles en bois car leur comportement conditionne grandement celui des assemblages. Des essais de flexion 4 points et de cisaillement ont été réalisés sur ces chevilles pour déterminer respectivement leur moment plastique et leur résistance au cisaillement. Ensuite, des essais de traction ont été réalisés sur des assemblages à échelle réduite en pin et en chêne avec mesures de champs cinématiques. Les mesures de champs sont effectuées par la technique de corrélation d'images numériques et permettent d'estimer par analyse inverse les raideurs d'assemblage tout en fournissant un moyen qualitatif de contrôle de la qualité des essais effectués.

**Mots-clefs** assemblage à tenon-mortaise, cheville en bois, traction, corrélation d'images numériques

## I. INTRODUCTION

Les assemblages à tenon-mortaise sont constitués de deux pièces de bois dont l'extrémité de l'une est taillée dans une forme particulière appelée tenon assemblée dans la deuxième pièce par une réservation appelée mortaise. Les assemblages à tenon-mortaise font partie des assemblages traditionnels en bois les plus utilisés et sont généralement maintenus par des chevilles en bois contrairement à la plupart des assemblages en bois actuels reliés par des organes métalliques de fixation comme les boulons, broches, clous, anneaux, crampons, etc.

Les travaux de Johansen (Johansen, 1949) sur les organes de fixation en acier sollicités en double cisaillement ont servi de base à l'Eurocode 5 (NF EN 1995-1-1, 2005) (EC5) pour la prise en compte du comportement des assemblages en simple ou double cisaillement dans l'analyse des structures en bois.

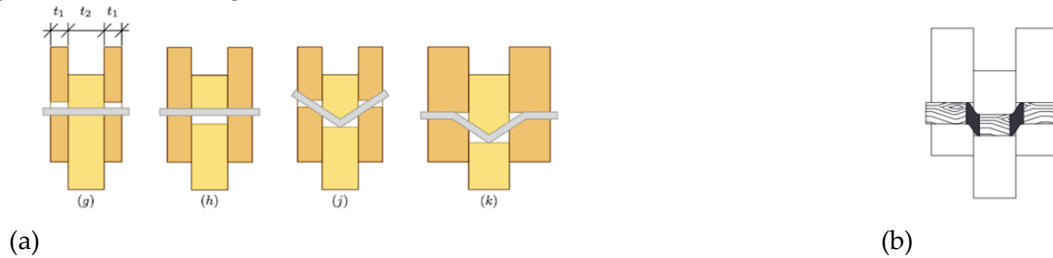
Au début du 21<sup>ème</sup> siècle, des études (Schmidt and Daniels, 1999 ; Sandberg et al., 2000) ont été réalisées sur des assemblages à tenon-mortaise en bois résineux avec des chevilles en bois résineux ou feuillus. Ces études ont abouti à la proposition d'un nouveau mode de ruine (Miller et al., 2010) en complément de ceux de l'EC5. Dans ce contexte, l'estimation des raideurs d'assemblages demeure un problème ouvert. Elles sont souvent estimées par analyse des courbes forces-

déplacements expérimentales obtenues (Shanks and Walker, 2005). A notre connaissance, il n'existe actuellement pas de méthodes analytiques permettant de déterminer les raideurs des assemblages à tenon-mortaise avec des chevilles en bois, à l'instar du module de glissement défini dans l'EC5 pour les organes de type tige en acier.

Les travaux présentés ici visent à contribuer à une meilleure connaissance du comportement mécanique des assemblages à tenon-mortaise avec chevilles en bois. Ils sont menés au travers d'approches expérimentales (essais de flexion et de cisaillement sur les chevilles en bois et essais de traction sur des assemblages) mettant en jeu des mesures de champs cinématiques.

## II. COMPORTEMENT MECANIQUE DES ASSEMBLAGES A TENON-MORTAISE AVEC CHEVILLES EN BOIS

Le comportement en traction des assemblages avec des organes métalliques de type tige tel que décrit dans l'EC5 est de nature ductile bien que le bois seul ait un comportement fragile en traction et cisaillement. Dans les structures anciennes en bois, l'utilisation des chevilles en bois est plus commune que celle des tiges métalliques. Les efforts dans l'assemblage sollicitent les chevilles en double cisaillement et la ruine de l'assemblage résulte généralement d'un ou de la combinaison de plusieurs modes (Fig.1).



**FIGURE 1.** Modes de rupture des assemblages à tenon-mortaise (a) : EC5 et (b) (Miller et al., 2010)

La valeur caractéristique  $F_{v,Rk}$  de la résistance au cisaillement de l'assemblage dépend de la capacité en portance locale du bois  $f_{h,i,k}$ , de la capacité en flexion de la cheville, de diamètre  $d$ , donnée par le moment plastique caractéristique  $M_{y,Rk}$ . Elle est estimée dans l'EC5 par :

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,1,k} t_1 d \quad (g) \\ 0,5 f_{h,2,k} t_2 d \quad (h) \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{2 + \beta} \left( \sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - \beta \right) + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (j) \\ 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (k) \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\text{avec : } \beta = \frac{f_{h,2,k}}{f_{h,1,k}} \quad (2)$$

où  $F_{ax,Rk}/4$  est l'effet de corde, négligeable dans le cas des chevilles en bois,  $f_{h,1,k}$  et  $f_{h,2,k}$  les portances locales des deux pièces de bois.

Les modes de ruine (g) et (h) correspondent respectivement à la ruine par écrasement du bois de la mortaise et du tenon tandis que les modes (j) et (k) résultent de la ruine de la cheville par formation d'une ou de plusieurs rotules plastiques, combinée à une plastification du bois dans les pièces

centrale ou latérale. Le 5<sup>ème</sup> mode de rupture découle de multiples fractures de cisaillement transverses réparties sur le diamètre des chevilles (Miller et al., 2010) et la capacité résistante de l'assemblage dans ce cas est donnée par la formule suivante :

$$Z_v = \frac{\pi d^2 \sigma_v}{2R_d}; \sigma_v = 33440 G_{PEG} G_{BASE}^{\frac{3}{4}} \quad (3,4)$$

Où  $Z_v$  est la capacité résistante de l'assemblage,  $\sigma_v$  est la contrainte admissible en cisaillement de la cheville de diamètre  $d$ ,  $G_{PEG}$  et  $G_{BASE}$  sont respectivement la densité du bois de la cheville et la densité du bois de la mortaise et  $R_d$  est un coefficient réducteur égal à 3,5.

### III. ESSAIS DE FLEXION ET DE CISAILLEMENT DE CHEVILLES EN BOIS

En traction, il résulte de la section précédente que la cheville en bois et la portance locale du bois conditionnent grandement la capacité résistante des assemblages à tenon-mortaise avec chevilles. Peu de données existent sur les chevilles en bois alors que celles concernant la portance locale du bois sont plus courantes. Une série d'essais sur les chevilles est alors effectuée afin de déterminer les caractéristiques de chevilles en bois, notamment le moment plastique  $M_{y,Rk}$  (bien plus limité que celui des tiges métalliques) et la résistance au cisaillement. Toutes les chevilles utilisées dans l'étude sont en chêne.

#### A. Essais de flexion sur les chevilles

- Description et dispositif expérimental

Des essais de flexion 4 points sont réalisés sur des chevilles conformément à la norme ISO 10984 (2009). L'objectif est d'évaluer la capacité de flexion de ces chevilles en estimant le moment plastique. Cette campagne est réalisée sur des chevilles de diamètre 12 mm et 20 mm. La Fig. 2 présente le dispositif expérimental de l'essai de flexion 4 points sur les chevilles.



FIGURE 2. Dispositif expérimental pour essais de flexion sur chevilles circulaires en chêne

Les dimensions  $l_1, l_2, l_3$  respectent les conditions suivantes :

$$l_1 = l_3 \geq 2d, d \leq l_2 \leq 3d \quad (5,6)$$

Dans le cadre de cette étude, les dimensions adoptées sont présentées dans le tableau 1.

TABLEAU 1. Dimensions des chevilles testées

Diamètre (mm)	$l_1 = l_3$ (mm)	$l_2$ (mm)	Longueur totale (mm)
12	45	20	190
20	60	50	250

Trois capteurs LVDT (Linear Variable Differential Transformer) sont utilisés pour mesurer les déplacements aux extrémités et à mi-travée de la cheville au cours de l'essai. Le moment plastique est déterminé par la formule :

$$M_y = F_y \times l_1/2 \quad (7)$$

Où  $F_y$  (somme des forces appliquées) désigne la limite apparente d'élasticité de la cheville déterminée par l'intersection de la courbe force-déplacement avec la droite parallèle à la pente initiale de la courbe et à une distance de  $5\%d$  (ISO 10984, 2009).

- Résultats

La Fig. 3 présente l'allure typique des courbes force-déplacement obtenues pour les chevilles.

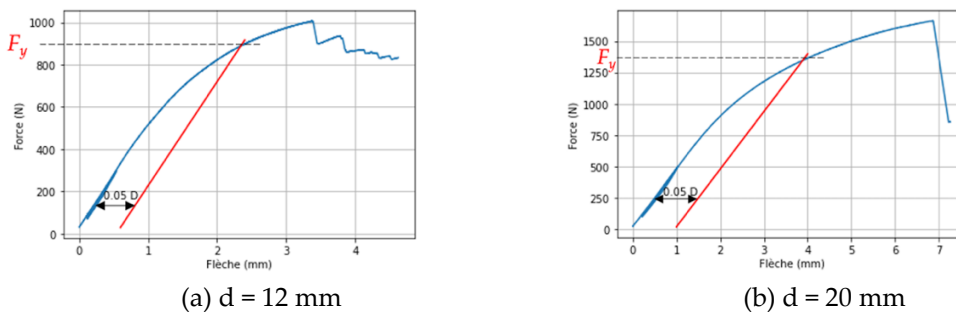


FIGURE 3. Détermination de la limite apparente d'élasticité  $F_y$  pour les chevilles

Au total 20 éprouvettes ont été testées dont 10 de diamètre 12 mm et 10 de diamètre 20 mm. Les valeurs moyennes des moments plastiques obtenues sont respectivement de 27230 N.mm (pour  $d=12$  mm) et de 72012 N.mm (pour  $d=20$  mm) avec des coefficients de variation de 22,7 et de 23,2%. Ces valeurs sont injectées dans l'équation (1) afin de comparer la force prédite à la charge de rupture obtenue expérimentalement sur les assemblages à tenon-mortaise (voir Fig. 9. (b)).

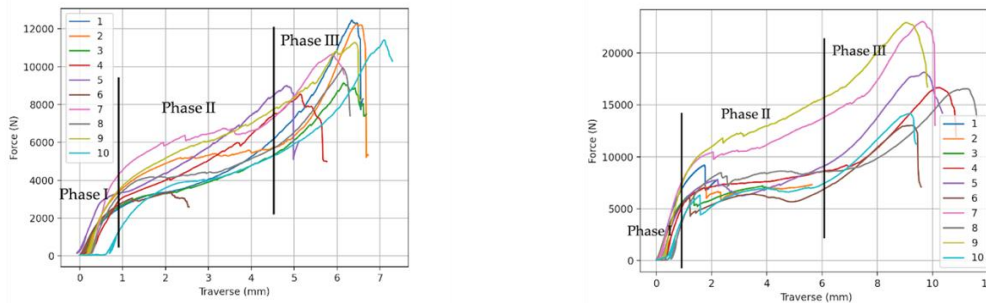
#### B. Détermination de la résistance au cisaillement

La résistance au cisaillement des chevilles est déterminée par un essai de cisaillement au cours duquel la cheville est logée dans un bâti métallique constitué de 2 pièces : la première en forme de « U » d'épaisseur latérale de 30 mm et la deuxième pièce, centrale d'épaisseur 50 mm (voir Fig. 4). Aucune métrologie autre que le système d'enregistrement de la charge appliquée n'a été utilisée pour cet essai car le but était d'obtenir la charge de ruine des chevilles en double cisaillement et d'analyser les modes de rupture obtenus. Au total 20 chevilles ont été testées dont 10 de diamètre 12 mm et 10 de 20 mm.



FIGURE 4. Montage expérimental (à gauche) et aspect de la cheville à la fin de l'essai (à droite)

La Fig. 5 présente l'évolution de la charge appliquée en fonction du déplacement de la traverse de la machine de chargement.



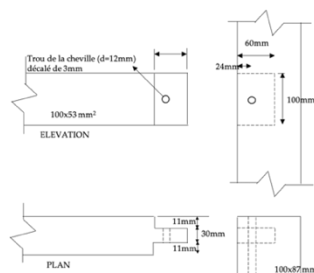
**FIGURE 5. Différentes phases du comportement en cisaillement des chevilles (d=12 mm à gauche et d=20 mm à droite)**

Le comportement global de la cheville peut être décomposé en 3 phases (Fig. 5) après un léger glissement initial pour la mise en place de l'éprouvette. La phase I correspond au domaine élastique, la phase II est un domaine non linéaire correspondant à la ductilité de la cheville (voir Fig. 5) avant d'atteindre un plateau donnant la résistance au cisaillement de la cheville. A la suite de la phase II débute une troisième phase marquée par une augmentation de la charge qui résulte de la densification du matériau due à la compression transversale des fibres du bois. La ruine finale correspond donc à la compression transversale des fibres de chevilles. Cette dernière ne nous intéresse pas dans le cadre de la détermination de la résistance au cisaillement des chevilles.

#### IV. ESSAIS DE TRACTION SUR LES ASSEMBLAGES A TENON-MORTAISE AVEC MESURES DE CHAMPS CINEMATIQUES

##### A. Géométrie de l'assemblage et matériau

L'assemblage à tenon-mortaise est constitué d'une pièce de bois de section  $100 \times 87 \text{ mm}^2$  (Fig.6) longue de 550 mm comportant en son milieu une mortaise large de 30 mm sur une profondeur de 60 mm et d'une deuxième pièce de section  $100 \times 53 \text{ mm}^2$  avec une longueur de 360 mm comportant à son extrémité le tenon. Six assemblages ont été réalisés avec des chevilles de diamètre 12 mm. La distance entre le centre de la cheville et le bord de la pièce portant la mortaise, appelée distance de rive est généralement de  $1,5d$  ; dans notre cas, une distance de  $2d$  est retenue. Le trou de la cheville dans la mortaise est décalé de 2 mm de celui dans le tenon pour créer une précontrainte de l'assemblage et réduire ainsi le glissement initial de l'assemblage. Il s'agit du chevillage « à la tire » classiquement utilisé dans la mise en œuvre traditionnelle des assemblages à tenon-mortaise.



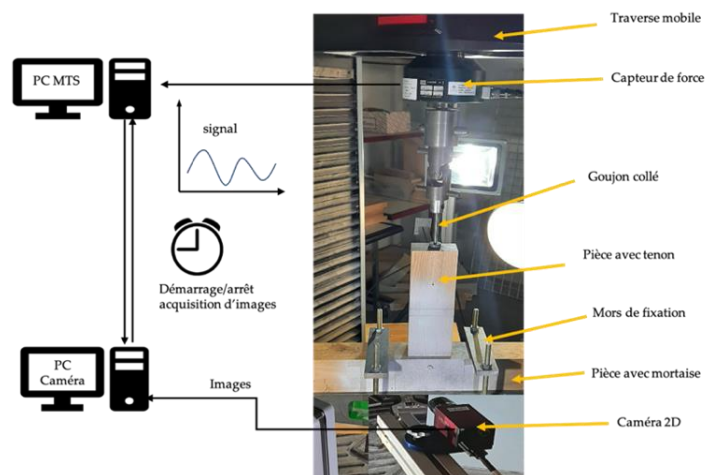
### FIGURE 6. Géométrie de l'assemblage à tenon-mortaise

Les assemblages sont réalisés en pin maritime (3) et en chêne (3). Les masses volumiques (déterminées expérimentalement) moyennes sont de 508 kg/m<sup>3</sup> pour le pin maritime et de 635 kg/m<sup>3</sup> pour le chêne.

#### B. Dispositif expérimental et mode opératoire de chargement

Le dispositif expérimental des essais réalisés est composé de deux chaînes de mesure (Fig. 7). La première chaîne de mesure est constituée d'une machine d'essais de type MTS Criterion® de modèle C45.504 ayant une capacité de force nominale de 50 kN et une précision de 0,5%. Les déplacements de la traverse sont enregistrés au cours de l'essai. Il faut noter les sources d'imprécision de mesure de déplacements dues aux déformations du bâti et de la traverse au cours de l'essai, ce qui limite l'exploitation des données relatives au déplacement de la traverse dans l'analyse des résultats. Il est donc proposé dans cette étude, d'ajouter une deuxième chaîne de mesure de déplacements utilisant des caméras et basée sur la corrélation d'images numériques (CIN) afin d'analyser les champs de déplacements et de déformations. Ce second système de mesure est composé de 2 caméras qui enregistrent une séquence d'images de chacune des faces de l'éprouvette préalablement mouchetée. La résolution des caméras utilisée est de l'ordre de 2048x2048 pixels<sup>2</sup>.

Les images sont ensuite traitées par CIN avec le logiciel Vic-2D® (2009) pour fournir les champs de déplacements et de déformations au cours de l'essai.



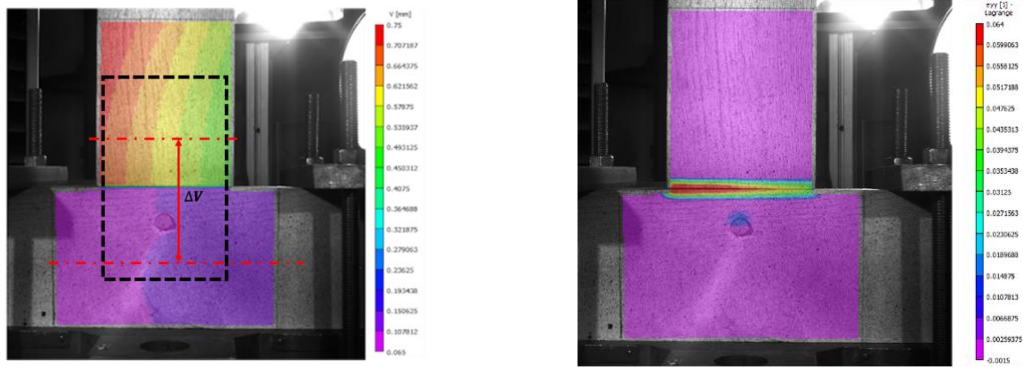
**FIGURE 7. Dispositif expérimental de l'essai de traction sur assemblage à tenon-mortaise avec mesures sans contact**

La charge est introduite par un goujon ancré sur la partie supérieure de la pièce en bois contenant le tenon. Le choix de la longueur d'ancrage est issu des travaux de Lartigau (2013).

Le protocole de chargement adopté est constitué de 2 cycles de charges-décharges avant de réaliser une dernière montée en charge jusqu'à la rupture. L'essai est piloté en déplacement à une vitesse de 0,8 mm/min de la traverse de chargement pour que la durée de l'essai soit comprise entre 5 et 10 minutes.

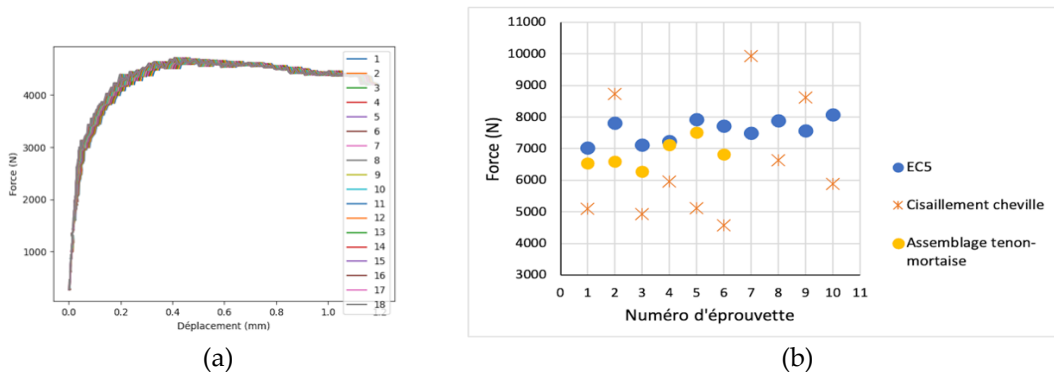
#### C. Résultats de la campagne expérimentale avec mesures de champs cinématiques

La Fig. 8 montre les champs de déplacements verticaux et des déformations verticales après 6 minutes du début de l'essai.



**FIGURE 8.** Champs cinématiques obtenus après 6 minutes d’essai : champ de déplacement vertical (à gauche) et champ de déformation verticale (à droite)

La courbe force-déplacement globale (Fig. 9. (a)) de l’essai est obtenue à partir du déplacement relatif de la pièce en bois verticale par rapport à la ligne moyenne de la pièce de bois horizontale. Le déplacement relatif  $\Delta V$  (Fig.8) est calculé à partir des moyennes des déplacements obtenus sur la largeur de la pièce chargée afin d’éliminer les effets de bord dus à la flexion de la pièce chargée. Afin de faire une approximation un peu plus fine de la zone d’assemblage, la zone d’étude est subdivisée en bandes horizontales de hauteur égale à 50 pixels chacune (environ 6,5 mm  $\pm$  0,2 mm).



**FIGURE 9.** Courbe force-déplacement relatif de l’essai de traction pour chaque bande de la zone d’étude (a) et comparatif des résultats expérimentaux de résistances aux valeurs estimées par EC5 (b)

La raideur de chaque assemblage est déterminée en faisant la moyenne des pentes dans le domaine élastique des différentes courbes forces-déplacement des bandes horizontales explorées. On a :

$$K_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{F_a - F_b}{\Delta v_a - \Delta v_b} \right), K_{moy} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m K_j \tag{8, 9}$$

Où  $K_j$  est la raideur d’un assemblage,  $n$  le nombre de bandes horizontales considérées pour le calcul de la raideur d’un assemblage,  $F_a$  et  $F_b$  les forces délimitant le domaine élastique,  $\Delta v_a$  et  $\Delta v_b$  les déplacements relatifs correspondants et  $K_{moy}$  est la raideur moyenne sur  $m$  éprouvettes. La moyenne des raideurs estimée est de 43775 N/mm avec un coefficient de variation de 37%. La moyenne des charges de rupture obtenues est de 4535 N avec un coefficient de variation de 7%. Du fait que certains assemblages sont réalisés en pin et d’autres en chêne et que le point commun de ces assemblages est la nature des chevilles (réalisées toutes en chêne), il ressort que la résistance de l’assemblage dépend uniquement de la résistance au cisaillement des chevilles. Le mode de ruine

observé pour les assemblages semble être le mode V pour les assemblages dont la cheville a pu être extraite à la fin de l'essai. La Fig.9. (b) montre une adéquation assez bonne entre les valeurs de calcul de la résistance de l'assemblage estimée par l'EC5 (données EC5), les résistances au cisaillement des chevilles obtenues par essais de cisaillement et les charges de rupture des assemblages tenon-mortaise en traction.

## V. CONCLUSION

Cette étude expérimentale a permis la caractérisation de chevilles en chêne afin d'estimer les capacités portantes d'assemblages à tenon-mortaise chevillés à une échelle réduite. Dans un premier temps, on constate que les résistances estimées par les relations de l'EC5 (en intégrant la nature bois et non métal des chevilles) semblent correspondre aux valeurs obtenues expérimentalement. D'autre part, des essais de traction sur des assemblages ont montré les avantages de la CIN comme technique de mesures sans contact de champs cinématiques lors d'essais mécaniques. Les mesures de champs permettent notamment de contrôler la qualité des essais en faisant ressortir la flexion parasite au cours du chargement et sa prise en compte dans l'estimation de la raideur axiale d'assemblage en traction. Ce travail fournit une base de méthode de caractérisation d'assemblages à tenon-mortaise chevillés, l'objectif étant la prise en compte des propriétés d'assemblages (raideurs, résistances) dans les modèles numériques d'analyse de structures en bois du patrimoine. Des essais de traction à une échelle plus grande et également en compression sont en cours afin d'obtenir un modèle de comportement pour l'assemblage à tenon-mortaise avec chevilles en bois.

## REFERENCES

- Correlated Solutions. Vic-2D 2009 [WWW Document]. Vic-2D Reference Manual. URL <http://www.correlatedsolutions.com/>
- ISO 10984-1:2009. Timber structures – Dowel-type fasteners - Part 1: Determination of yield moment.
- Johansen, K.W., 1949. Theory of Timber Connections. *International Association of Bridge and Structural Engineering Journal*, 9, 249-262.
- Lartigau, J., 2013. Caractérisation du comportement des assemblages par goujons collés dans les structures en bois. Thèse de doctorat, Bordeaux 1.
- Miller, J.F., Schmidt, R.J., Bulleit, W.M., 2010. New Yield Model for Wood Dowel Connections. *Journal of Structural Engineering* 136, 1255–1261. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000224](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000224).
- NF EN 1995-1-1, 2005. Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings. European Committee for Standardization (CEN).
- Sandberg, L.B., Bulleit, W.M., Reid, E.H., 2000. Strength and Stiffness of Oak Pegs in Traditional Timber-Frame Joints. *Journal of Structural Engineering* 126, 717–723. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2000\)126:6\(717\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2000)126:6(717)).
- Schmidt, R.J., Daniels, C.E., 1999. Design Considerations for Mortise and Tenon Connections. Report for Timber Framers Guild, Becket, MA.
- Shanks, J.D., Walker, P., 2005. Experimental performance of mortice and tenon connections in green oak. *Structural Engineer* 83, 40–45.