

# Prédiction de la réponse sismique de structures patrimoniales en bois.

T. DESCAMPS, S. DATOUSSAÏD, G. GUERLEMENT

Faculté Polytechnique de Mons - Génie Civil & Mécanique des Structures.

Rue du Joncquois, 53 – MONS – BELGIUM

Thierry.Descamps@fpms.ac.be

## I. INTRODUCTION

Bien que les structures en bois soient parmi les plus anciennes, force est de constater qu'elles ne bénéficient toujours pas des connaissances nécessaires pour répondre à certains besoins spécifiques des constructeurs d'aujourd'hui, en particulier dans le domaine de la restauration de structures anciennes.

Les normes européennes de dimensionnement des structures (eurocodes) fournissent aujourd'hui des règles statiques et dynamiques d'analyse, visant à un meilleur dimensionnement local (membrures et assemblages) et donc global, des structures. Premièrement développées pour la construction métallique, ces règles ont ensuite été transposées aux structures en bois pour couvrir, à l'heure actuelle, l'essentiel des problèmes pratiques de dimensionnement des structures en bois.

Après une brève introduction sur le calcul dynamique des structures et le bois en tant que matériau de construction, cet article présente brièvement les premiers essais menés à la Faculté Polytechnique de Mons sur la caractérisation du comportement statique et dynamique d'assemblages contemporains en bois.

Lors de travaux de restauration ou de réhabilitation d'anciens bâtiments, les ingénieurs sont parfois amenés à se prononcer sur la stabilité d'anciennes structures. Dans ce cadre, la caractérisation des assemblages dits « traditionnels » tels que les assemblages par tenon et mortaise ou par embrèvement, s'avère nécessaire. La seconde partie de l'article présente les premières investigations menées sur l'étude du comportement statique de tels assemblages pour lesquels aucune information normative n'est encore disponible.

## I. LE MATERIAU BOIS

Le bois est un matériau naturel anisotrope de part sa structure fibreuse orientée selon les directions longitudinale, radiale et tangentielle issues de la croissance de l'arbre. En outre, la présence de perturbations locales tels que les nœuds, les fissures ou encore les cernes de croissance, induit des variations locales des propriétés tant mécaniques que physiques du bois.

D'un point de vue mécanique, le bois est caractérisé par une loi de comportement de type élastique fragile pour des charges de traction de courtes durées appliquées parallèlement aux fibres. En compression, suite au flambement progressif des fibres, le bois présente un comportement de type élastique plastique. Pour des sollicitations de flexion, le comportement peut également être fragile si les contraintes de traction provoquent la ruine avant que les fibres comprimées n'atteignent le domaine plastique. Le comportement réel des éléments fléchis étant très sensible aux éventuels défauts, un comportement de type élastique fragile est retenu pour leur étude, ce qui est à priori très désavantageux face au séisme! Cependant, dans les structures en bois, des déformations plastiques importantes peuvent cependant apparaître, essentiellement

dues à la déformabilité des assemblages, de telle sorte que le comportement global de la structure peut-être ductile, en dépit du caractère fragile des ses éléments constitutifs.

De plus, de part sa faible densité, le bois réduit naturellement les effets d'inertie sous charges dynamiques. De nombreux exemple de part le monde peuvent illustrer la bonne tenue des ossatures en bois face aux sollicitations dynamiques.

## II. CALCUL DYNAMIQUE DES STRUCTURES :

Afin de réaliser l'étude dynamique d'une structure, on peut imaginer de travailler pas à pas et ainsi déterminer la réponse temporelle de la structure sous l'effet par exemple d'un séisme, en résolvant tout au long de l'évolution du tremblement de terre l'équation d'équilibre dynamique de la structure. Cette approche permet d'inclure naturellement les non linéarités mais demeure complexe et couteuse en temps de calcul.

Une seconde approche se limite à rechercher une réponse spectrale élastique de la structure. A cet effet, on a seulement besoin du spectre de réponse associé au séisme ainsi que des fréquences propres de la structure étudiée (elles même fonction des raideurs des assemblages). Par combinaison des effets associés à ces différents modes en conformité avec le spectre, on déterminera la réponse maximale de la structure en déplacement, en sollicitations et en accélération. Dans cette approche élastique, l'effet des non linéarités dues aux assemblages sera prise en compte par l'intermédiaire d'un facteur de comportement permettant d'estimer de manière réaliste la réponse non linéaire de la structure.

Dans un calcul sismique, les déplacements, vitesses et accélérations imposés à la structure sont tels qu'il n'est évidemment pas raisonnable de la dimensionner en régime purement élastique. Dans ce cadre, quelque soit l'approche choisie, il s'avère nécessaire de caractériser le comportement semi-rigide de **tous** les types d'assemblages en bois, sous sollicitations cycliques. Cette caractérisation est indispensable à l'étude dynamique. Bien entendu, la tâche est d'autant plus ardue que la diversité et la complexité des assemblages utilisés en construction bois est importante.

## III. SEMI-RIGIDITE DES ASSEMBLAGES EN BOIS

Dans l'approche suivie par l'EC5, les assemblages sont supposés être infiniment élastiques. Ils peuvent être modélisés comme rigides en rotation si leur déformation n'a pas d'effet significatif sur la distribution des efforts dans la structure.

A l'exception des assemblages collés, les grande majorité des assemblages utilisés présentent un comportement semi-rigide bien marqué. Tenir compte du comportement semi-rigide des assemblages permet, lors d'un calcul statique, de

réduire le poids propre de la structure tout en vérifiant les contraintes de déformabilité et de résistance.

#### A. Assemblages contemporains :

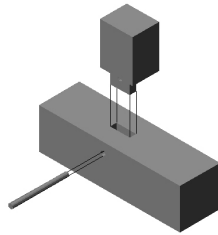
Pour les assemblages par organes de type tige (clous, vis, broches, boulons), la raideur est définie aux états limites de service (ELS) à l'aide d'un coefficient de glissement  $K_{ser}$ . Ce coefficient est défini par tige et par plan de cisaillement. Il peut être évalué à l'aide d'équations empiriques faisant intervenir le diamètre de la tige et la masse volumique du bois. La rigidité rotationnelle  $K_{rot}$  d'un assemblage soumis à un moment de flexion peut être évaluée à partir de la géométrie de l'assemblage et de  $K_{ser}$  :

$$K_{rot,ser} = K_{ser} \sum_{i=1}^n r_i^2$$

La raideur aux états limites ultimes (ELU) est définie conventionnellement comme valant 2/3 de la raideur aux ELS.

#### B. Assemblages traditionnels :

Pour des assemblages « traditionnels » tels que les assemblages par emboîtement ou par tenon et mortaise, aucunes règles spécifiques n'existent pour la détermination

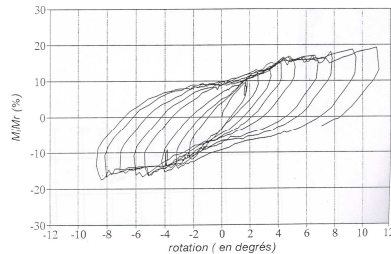


des raideurs rotationnelles.

Fig. 1 : Exemple d'assemblage par tenon et mortaise

### IV. COMPORTEMENT DYNAMIQUE D'ASSEMBLAGES CONTEMPORAINS EN BOIS

La première partie de ce travail de recherche a visé à caractériser le comportement dynamique de différents types d'assemblages contemporains rencontrés dans les structures en bois. Nous ne présenterons ici que quelques résultats relatifs à ceux-ci afin de développer plus en détail les dernières investigations menées dans le domaine des



assemblages traditionnels.

Fig. 2 : Résultats d'essai dynamique sur un connecteur BAT renforcé.

Plusieurs types d'assemblages ont été étudiés (assemblage par goussets cloués, équerres, plaques, connecteurs BAT cloués ou tirefonés). Divers comportements ont ainsi été mis en évidence et utilisés pour étudier le comportement, à

l'aide d'un logiciel d'analyse dynamique non linéaire (DRAIN 2D) d'un portique. Voici pour exemple les résultats du comportement dynamique d'un connecteur BAT présentant un cycle d'hystérésis « dissipatif ». Afin de faire apparaître la sécurité de l'assemblage vis à vis d'une rupture de la membrure, les cycles ont été tracés en fonction du rapport  $M/M_r$ , où  $M$  est le moment sollicitant et  $M_r$  le moment ultime élastique des membrures assemblées.

### V. COMPORTEMENT STATIQUE D'ASSEMBLAGES PAR TENON ET MORTAISE

Les charpentes traditionnelles en bois comptent parmi les structures les plus anciennes et les plus répandues. Fruit d'un haut niveau de savoir-faire et d'artisanat, ces structures comportent de nombreux types d'assemblages souvent complexes. L'étude de telles charpentes n'est pas une chose aisée. En effet, en plus des difficultés liées au matériau, ces assemblages fonctionnant essentiellement par contact et frottement, présentent des géométries complexes et variées.

Lors de travaux de restauration ou de réhabilitation d'anciens bâtiments, les ingénieurs sont parfois amenés à se prononcer sur la bonne stabilité d'anciennes structures. Cette question est d'autant plus délicate qu'elle concerne le plus souvent des bâtiments présentant à la fois un grand intérêt archéologique et patrimonial.

Notons encore que la caractérisation de la rigidité rotationnelle de l'assemblage ne suffit pas pour réaliser une modélisation, même statique, d'une charpente complète. En effet, les assemblages sont en pratique soumis à une combinaison d'effort normal et de moment de flexion, (caractérisée par l'excentricité  $e=M/N$ ). Les efforts étant transmis par contact et frottement, il est évidemment important de quantifier l'influence de l'effort normal sur la rigidité de l'assemblage.

La première étape dans la caractérisation du comportement est donc la caractérisation de la rigidité lors d'un cycle de chargement/déchargement. Pour cela, trois approches ont été suivies.

#### A. Estimation de la semi-rigidité: approche analytique.

Souvent utilisée en construction métallique, la méthode des composantes permet de calculer la rigidité flexionnelle d'un assemblage sur base de ses dimensions géométriques et de ses propriétés mécaniques.

Lorsque l'assemblage est soumis à une sollicitation, des efforts transitent d'une membrure à l'autre par contact entre les pièces de bois. En négligeant le frottement, on peut associer une rigidité équivalente à chaque paire de surface en contact, ce qui équivaut à mettre en série la rigidité propre de chacune des deux surfaces en contact :

$$K_{eq} = \frac{1}{\sum_i 1/k_i}$$

où  $k_i$  est la rigidité propre d'une des surfaces constitutives de la paire en contact. En supposant que la cheville impose la position du centre instantané de rotation, la rigidité "totale" de l'assemblage peut alors être calculée à partir des rigidités équivalentes de chaque paire de surfaces et du bras de levier de la résultante des contraintes distribuées sur ces surfaces par rapport au centre de rotation de l'assemblage.

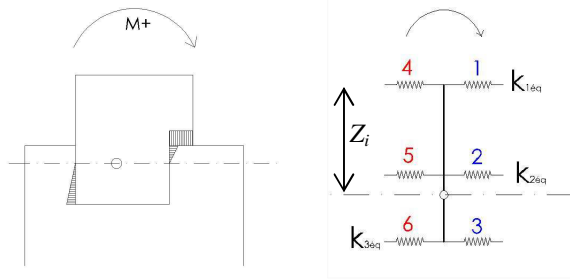


Fig. 3 : Transmission d'un moment positif par contact dans un assemblage par tenon et mortaise chevillé, dissymétrique – Schéma de raideur équivalent.

$$K = \sum_i K_{eq,i} \cdot Z_i^2 \quad [\text{N.mm} / \text{rad}]$$

où  $K_{eq,i}$  est la rigidité équivalente de la paire de surface  $i$  et  $Z_i$  est le bras de levier par rapport au centre de rotation de l'assemblage. L'estimation des rigidités propre des surfaces en contact provient de la théorie de déformation d'un demi-espace élastique (mécanique des sols) corrigée pour tenir compte de la proximité de bords libres et de la cinétique de déformation réelle observée lors des essais. Cette approche utilisée en régime élastique ne permet de déterminer que la rigidité initiale de l'assemblage. Les résultats fournis par cette méthode tendent à surestimer la rigidité flexionnelle par rapport aux résultats obtenus à l'aide des deux méthodes décrites ci-dessous.

#### B. Estimation de la semi-rigidité: approche numérique.

La rigidité flexionnelle de l'assemblage a également été estimée à l'aide de modèles éléments finis 3D. Le matériau est orthotrope élastique linéaire. Les modules d'élasticité utilisés ont été mesurés en laboratoire. Des conditions de contact avec frottement sont introduites par paire de surface (conditions entre les deux membrures et conditions entre la cheville et les membrures).

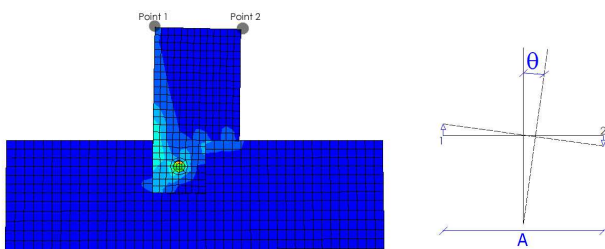
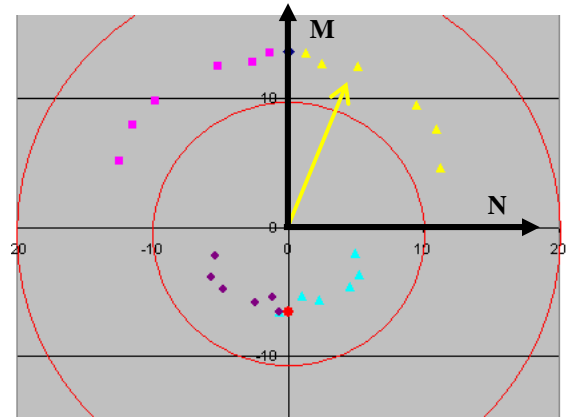


Fig 4 : Modèle élément finis 3D – Mesure de la rotation à partir des déplacements verticaux de 2 points de référence.

Ces modèles ont permis d'établir des courbes d'interaction  $M/N$  (Fig 5). Dans ce graphique, la pente d'un rayon vecteur caractérise l'excentricité de la section et sa longueur la raideur de l'assemblage. On peut observer que la rigidité est fortement influencée par le sens du moment sollicitant (assemblage dissymétrique). Les conclusions essentielles de l'étude paramétrique menée sont les suivantes:

- la rigidité est peu sensible au signe et à l'intensité de l'effort normal.



- le frottement doit être pris en compte (variation de la rigidité estimée de 10% pour une variation du coefficient de frottement du simple au double).

Fig. 5 : Courbe d'interaction  $M/N$

#### C. Estimation de la semi-rigidité: approche expérimentale.

Des essais de laboratoire ont également été effectués afin de mettre en évidence l'influence du frottement et de l'effort normal sur la rigidité mesurée. Les conclusions essentielles sont les suivantes :

- l'effort normal influence très peu la rigidité.
- le frottement influence la rigidité (jusqu'à 30% de perte de rigidité dans le cas d'un frottement nul).
- les résultats expérimentaux et numériques concordent à condition de prendre en compte un jeu initial (inévitables dans la pratique).

## VI. CONCLUSION

L'étude des assemblages traditionnels en bois demeure un terrain d'investigation vaste dont la caractérisation statique effectuée ici ne représente que le début. Tant l'approche analytique que numérique peuvent être améliorées notamment par la prise en compte la plastification locale du matériau. Les premières recherches que nous avons entreprises sont encourageantes, cependant des études complémentaires relatives aux comportements sur plusieurs cycles et couvrant diverses géométries sont encore nécessaires afin de fournir aux ingénieurs les moyens d'analyser ce type de structure.

### References

- [1] T. Descamps, J. Lambion, D. Laplume. *Timber Structures: Rotational stiffness of carpentry joints*. In proceedings of the World Conference on Timber Engineering, 6-10 August 2006, Portland, USA.
- [2] J. Lambion, T. Descamps. *Old carpentry joints : case study on the framings of the Cathedral of Tournai*. In proceedings of the National Congress on Theoretical and Applied Mechanics, 29-30 May 2006, Mons, Belgium.
- [3] F. Wald, J. Mareš, Z. Sokol. *Component method for historical timber joints* – Faculty of Civil Engineering, Czech Technical University - Prague, Czech Republic.
- [4] K.U Schober. *Numerical simulation of contact problems – Traditional timber joints under monotonous loading* – UT, Dresden, Germany.
- [5] M. Drdádský, F. Wald, Z. Sokol. *Sensitivity of historic timber structures to joint response* – Faculty of Civil Engineering, Czech Technical University - Prague, Czech Republic.
- [6] A. Ceccotti. *Structural behavior of timber constructions in seismic zones*. Dipartimento di Ingegneria Civile, Università di Firenze.
- [7] ABAQUS CAE User's Manual – ABAQUS Documentation – Version 6.5