

Caractérisation du comportement d'assemblage bois avec broches métalliques - Lois de similitude et approche expérimentale

SOUSSEAU Yann¹, ELACHACHI Sidi Mohammed¹, CHAPLAIN Myriam¹, FAYE Carole²,
CATTEROU Thomas², GARCIA Patrice²

¹Institut de Mécanique et d'Ingénierie, 351 Cours de la Libération, 33405 Talence Cedex

²Institut technologique FCBA, allée de Boutaut, 33000 Bordeaux

yann.sousseau@u-bordeaux.fr

Mots clés : Assemblages bois ; Lois de similitude ; Expériences à taille réduite ; Incertitudes ; Intervalles de confiance

Introduction

Réaliser des essais sur des bâtiments bois de moyenne et grande hauteur nécessite des moyens très coûteux. La solution proposée est de tester des maquettes réduites représentatives, dont la conception est basée sur des lois de similitude (Casaburo 2019; Coutinho 2016). Puis à partir des réponses relevées aux échelles réduites, les lois de similitude permettent d'en déduire celles à taille réelle. Pour cela, des facteurs de similitude sont définis, pour chaque variable x (paramètres ou grandeur d'intérêt), par le rapport $\lambda_x = x^{(F)}/x^{(R)}$, avec $x^{(F)}$ et $x^{(R)}$ respectivement les valeurs de x à l'échelle 1 (Full scale) et aux échelles réduites (Reduced scale). L'ensemble de valeurs associées à ces facteurs constitue une loi de similitude.

Les travaux suivants consistent à établir une loi de similitude pour le comportement mécanique d'assemblages bois par broche, en vue d'établir une loi de similitude pour la structure. Les grandeurs d'intérêt retenues sont la raideur élastique K_e et la force maximale F_u . Les paramètres à considérer sont les « modules » C (en N/m²) et les propriétés géométriques L (en m). Le même matériau est utilisé entre les échelles 1 et 1/3, le facteur de similitude en module λ_C est égal à 1 et celui en dimension λ_L est égal à 3. Ainsi, en utilisant une méthode basée sur l'analyse dimensionnelle (Potter 2017; Wissmann 1968), les facteurs de similitude théoriques pour les grandeurs d'intérêt sont

$$\begin{cases} [K_e] = [C][L] \\ [F_u] = [C][L]^2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \lambda_{K_e} = \lambda_C \lambda_L = 3 \\ \lambda_{F_u} = \lambda_C \lambda_L^2 = 9 \end{cases} \quad (1)$$

avec $[x]$ désignant la dimension de la variable x .

Pour des raisons techniques, la réduction de certaines dimensions des éléments de nos assemblages (hauteur et épaisseur de la plaque métallique, hauteur de bois sous les broches (Fig. 1)) n'a pas pu être réalisée : ceci conduit à des distorsions géométriques. Cet article présente les facteurs de similitude obtenus sur la base d'essais réalisés aux échelles 1 et 1/3. La comparaison aux valeurs théoriques est analysée.

Caractérisation expérimentale du comportement des assemblages

Les essais sont réalisés selon la norme EN NF 26 891 (Norme d'essai NF EN 26891) afin de caractériser le comportement d'un assemblage bois-métal, connexion par 3 broches (Fig. 1). La plaque métallique est fixée au support et une charge verticale est appliquée sur l'éprouvette en bois (Fig. 1). Le déplacement relatif, glissement, entre la plaque métallique et le bois, est

enregistré par le suivi à l'aide de 2 caméras (une sur chaque face) de marqueurs A (sur la plaque) et B (sur le bois).

Pour chaque essai, une courbe force glissement est établie en calculant la moyenne des glissements au niveau des 2 côtés de l'assemblage, à partir de laquelle la raideur élastique K_e et la force maximale F_u sont calculées. La raideur K_e est obtenue par régression linéaire sur la phase de recharge (Xu 2009) entre les points A tel que $F = 0,1F_{u,th}$ et B tel que $F = 0,4F_u$ (Fig. 2) ; $F_{u,th}$ étant la force maximale théorique estimée de notre assemblage, et utilisée lors des phases de charge-décharge imposées par la norme (Norme d'essai NF EN 26891).

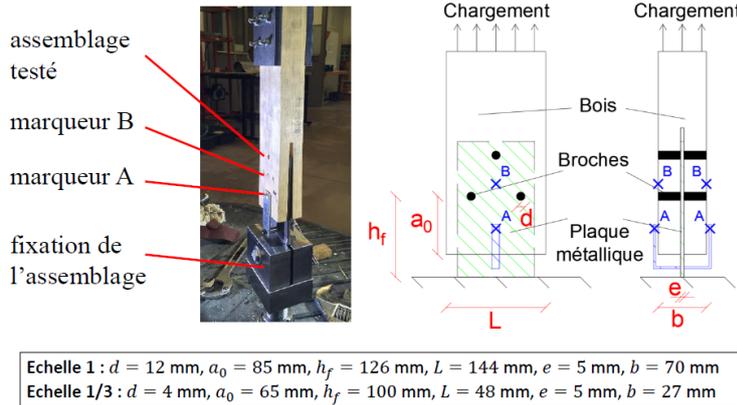


Fig. 1 : Assemblages testés

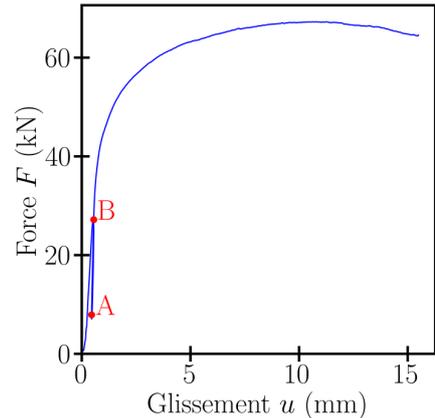


Fig. 2 : Courbe force déplacement expérimentale (échelle 1)

Ensuite, pour chaque échelle, les valeurs caractéristiques moyennes sont calculées à partir des différents essais (Tab. 1).

Tab. 1 : Caractéristiques expérimentales

Caractéristique x	échelle 1 ($n^{(F)} = 8$ essais)		échelle 1/3 ($n^{(R)} = 10$ essais)	
	Moyenne $\bar{x}^{(F)}$	COV (%)	Moyenne $\bar{x}^{(R)}$	COV (%)
Raideur élastique K_e (MN/m)	174	18,5	44,2	19,3
Force maximale F_u (kN)	69,5	8,20	8,89	5,82

La dispersion est importante, il sera traité dans la partie suivante son impact sur les facteurs de similitude.

Evaluation des facteurs de similitude

Pour chaque caractéristique x étudiée, les facteurs de similitude expérimentaux sont calculés, puis comparés avec ceux théoriques $\lambda_x^{(th)}$ (Tab. 2). La moyenne expérimentale de λ_x , notée $\bar{\lambda}_x$, est égale au rapport des valeurs moyennes de x à l'échelle 1 (F) et réduite (R) (la barre supérieure indique la moyenne de la grandeur):

$$\bar{\lambda}_x = \overline{x^{(F)}} / \overline{x^{(R)}} \quad (1)$$

Son écart type σ_{λ_x} est donné par (6) :

$$(\sigma_{\lambda_x})^2 = \left(\frac{\sigma_{x^{(F)}}}{x^{(R)}} \right)^2 + \left(\sigma_{x^{(R)}} \frac{\overline{x^{(F)}}}{(x^{(R)})^2} \right)^2 \quad (2)$$

En plus des écarts entre les valeurs théoriques $\lambda_x^{(th)}$ et les moyennes expérimentales $\overline{\lambda_x}$, des dispersions importantes sont constatées sur les facteurs de similitude expérimentaux, du fait de la variabilité observée sur les caractéristiques aux échelles 1 et 1/3.

Il s'agit à présent de déterminer si ces écarts entre valeurs théoriques et moyennes expérimentales sont significatifs étant donnée la dispersion des résultats expérimentaux.

Tab. 2 : Facteurs de similitude, comparaison entre théorique et expérimental

Caractéristique x	Facteur théorique $\lambda_x^{(th)}$	Facteur expérimental λ_x		
		Moyenne $\overline{\lambda_x}$	Ecart type σ_{λ_x}	COV (%)
Raideur élastique K_e (N/m)	3	3,93	1,05	26,7
Force maximale F_u (N)	9	7,82	0,79	10,1

Sur la raideur

Un intervalle de confiance (Ayyub 2011) est établi, pour la moyenne estimée du facteur de similitude sur la raideur, $\mu_{\lambda_{Ke}}$. Pour cela, on considère que la variable λ_{Ke} suit une loi de distribution log normale, donc que $\overline{\ln \lambda_{Ke}} = \overline{\ln K_e^{(F)}} - \overline{\ln K_e^{(R)}}$ suit une loi normale, ainsi l'intervalle de confiance pour $\mu_{\ln \lambda_{Ke}}$ est obtenu par :

$$\begin{aligned} \overline{\ln \lambda_{Ke}} - q \sqrt{\frac{(\sigma_{\ln K_e^{(F)}})^2}{n^{(F)}} + \frac{(\sigma_{\ln K_e^{(R)}})^2}{n^{(R)}}} &\leq \mu_{\ln \lambda_{Ke}} \\ &\leq \overline{\ln \lambda_{Ke}} + q \sqrt{\frac{(\sigma_{\ln K_e^{(F)}})^2}{n^{(F)}} + \frac{(\sigma_{\ln K_e^{(R)}})^2}{n^{(R)}}} \end{aligned} \quad (3)$$

avec q le quantile pour la loi normale. Enfin, l'intervalle de confiance pour $\mu_{\lambda_{Ke}}$ est obtenu en considérant :

$$\mu_{\lambda_{Ke}} = \exp\left(\mu_{\ln \lambda_{Ke}} + (\sigma_{\ln \lambda_{Ke}})^2 / 2\right) \quad (4)$$

avec $(\sigma_{\ln \lambda_{Ke}})^2 = (\sigma_{\ln K_e^{(F)}})^2 + (\sigma_{\ln K_e^{(R)}})^2$. Le risque α est la probabilité que $\mu_{\lambda_{Ke}}$ ne soit pas dans l'intervalle de confiance, et q est le quantile $1 - \alpha/2$. Pour $\alpha = 0,05$, on a $3,39 \leq \mu_{\lambda_{Ke}} \leq 4,88$, la valeur $\lambda_{Ke}^{(th)}$ n'est pas contenue dans cet intervalle. Autrement dit, la probabilité que $\mu_{\lambda_{Ke}}$ soit égale à la valeur théorique $\lambda_{Ke}^{(th)}$ est inférieure à 0,05, donc cette hypothèse est rejetée. L'écart entre les valeurs théorique et moyenne expérimentale est donc significatif. Cet écart pourrait en partie s'expliquer par les distorsions géométriques : à l'échelle 1/3, par rapport à la configuration vérifiant les relations de similitude, la hauteur de la plaque est supérieure, donc la raideur K_e est inférieure (la plaque, chargée verticalement, se déformant plus), et le facteur

λ_{Ke} est supérieur. Une modélisation de la configuration à l'échelle réduite avec distorsion est en cours de réalisation. Elle permettra d'évaluer son impact sur le facteur de similitude.

Sur la force maximale

Pour le facteur de similitude sur la force maximale, l'intervalle de confiance est $7,34 \leq \mu_{\lambda_{Ke}} \leq 8,39$, avec $\alpha = 0,05$. La valeur $\lambda_{Fu}^{(th)}$ n'est pas contenue dans l'intervalle de confiance, de nouveau l'écart constaté entre les valeurs théorique et moyenne expérimentale est significatif. Cet écart peut être dû à l'effet d'échelle matériel (Fryer 2018) (bois et / ou acier), correspondant à une augmentation des contraintes limites à l'échelle 1/3, donc une augmentation de $F_u^{(R)}$ et ainsi une diminution de λ_{Fu} . Enfin, cet écart peut aussi être dû aux distorsions géométriques. En effet, par rapport à la configuration vérifiant les relations de similitude, la hauteur de bois sous les broches est supérieure, donc la force F_u est supérieure (car il y a moins d'effets de bords), et le facteur λ_{Fu} est inférieur.

Conclusion

Ces travaux sont la première étape d'un programme de recherche consistant à établir des lois de similitude pour étudier le comportement mécanique de bâtiments en bois de grande hauteur. Tout d'abord, des lois de similitude ont été établies, à l'aide d'une analyse dimensionnelle, pour le comportement d'assemblages bois. Puis des essais de caractérisation ont été réalisés sur ces assemblages : des écarts significatifs ont été constatés entre lois de similitude théoriques et expérimentales, du fait des distorsions géométriques.

Par la suite, ces facteurs de similitude doivent être introduits dans la loi de similitude relative au comportement, statique et dynamique, de la structure.

Remerciements

Nous tenons à remercier l'Ademe et le Codifab pour leur soutien financier.

Références

- Ayyub, Bilal M, et Richard H McCuen (2011) Probability, Statistics, and Reliability for Engineers and Scientists, Third Edition. 663. Chapman & Hall Book.
- Casaburo A., Petrone G., De Rosa S. (2019) A Review of Similitude Methods for Structural Engineering. Applied Mechanics Reviews 71(3): 32.
- Coutinho C.P., Baptista A.J. (2016) Reduced scale models based on similitude theory: a review up to 2015. Engineering Structures 119: 81-94.
- Fryer B.K., Foster R.M., Ramage M.H. (2018) Size Effect of Large Scale Timber Columns. World Conference of Timber Engineering. Seoul, Republic of Korea. 7.
- NF EN 26891. (1991). Structures en bois - Assemblages réalisés avec des éléments mécaniques de fixation. AFNOR.
- Potte M., Wiggert D., Ramadan B. (2017) Dimensional Analysis and Similitude. Mechanics of Fluids, Fifth Edition. 816. Cengage learning.
- Wissmunn J.W. (1968) Dynamic Stability of Spacevehicles. Rapport. 53
- Xu B.H. (2009) Modélisation du comportement mécanique d'assemblages bois avec prise en compte de critères de rupture. Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand.