

Etude probabiliste et de robustesse d'une structure en bois du patrimoine historique

Komlan Renaud TEVI¹, Sidi Mohammed ELACHACHI¹, Alain COINTE¹, Emmanuel MAURIN²

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

² Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques, 29 rue de Paris, 77420 Champs-sur-Marne.

komlan-renaud.tevi@u-bordeaux.fr

RESUME La sécurité d'une structure existante en bois dépend aussi de sa capacité à redistribuer les efforts subis en cas de dégradations/dommages localisés. Cette capacité est désignée par le terme de robustesse. Plusieurs indicateurs existent dans la littérature pour définir la robustesse d'un système structurel. L'objectif de ce travail est d'évaluer la robustesse d'une structure en bois du patrimoine historique à travers une étude probabiliste et fiabiliste en tenant compte des spécificités des structures en bois. Des campagnes expérimentales menées *in situ* et en laboratoire ont permis d'adopter des distributions probabilistes pour les variables et paramètres implémentés dans un modèle éléments finis simplifié représentatif de la structure. Les résultats ont permis d'identifier les assemblages les plus importants sur le plan de la robustesse de la structure.

Mots-clefs variabilité, fiabilité, robustesse, monument historique en bois

I. INTRODUCTION

La robustesse d'une structure est une propriété systémique représentant sa capacité à éviter une rupture globale brutale après les ruptures locales de certains éléments structuraux comme les poutres, poteaux, assemblages, etc. (Kirkegaard et al., 2011). La conception des structures avec prise en compte de la robustesse a pris de l'ampleur après l'effondrement d'ouvrages importants (tour Ronan Point à Londres en 1968 (Pearson and Delatte, 2005), toit de la patinoire de Bad Reichenhall en 2006).

Dans ce contexte, plusieurs études (Sørensen, 2011 ; Voulpiotis et al., 2021) ont proposé un cadre théorique pour analyser l'intérêt de la prise en compte de la robustesse dans la conception de structures nouvelles en bois élancées. Cependant, relativement peu de travaux existent sur l'évaluation de la robustesse des structures existantes en bois ou encore des structures anciennes en bois (Čizmar et al., 2011).

L'objectif de cet article est d'évaluer la robustesse d'un point de vue probabiliste et fiabiliste d'une structure ancienne en bois classée monument historique au travers d'approches numériques. La variabilité des propriétés matérielles (module d'élasticité, masse volumique) et structurelles (raideurs et résistances d'assemblages) est prise en compte par l'introduction de variables aléatoires selon des distributions statistiques bien définies dans un modèle éléments finis de la structure réalisé avec le logiciel Opensees sous environnement Python (Zhu et al., 2018).

II. MODELE ELEMENTS FINIS - ETUDE PROBABILISTE

A. Modèle éléments finis

La structure objet de notre étude est une structure en bois (la halle de Villeréal) classée monument historique en 2002. Le modèle numérique utilisé dans cette étude est un modèle 2D simplifié représentatif du portique principal de la structure. Ce modèle est constitué de 43 éléments de type poutres de Timoshenko à 2 nœuds pour modéliser les poutres, poteaux et diagonales ; de 66 nœuds et de 37 éléments de connecteurs de taille nulle pour modéliser les assemblages au sein de la structure. Le comportement de la structure étant piloté par celui des assemblages, le comportement des éléments bois est supposé élastique isotrope et celui des assemblages élastoplastique parfait (ductilité des assemblages à tenon-mortaise qui représentent 80% des assemblages de la structure) d'après la théorie de Johansen (Johansen, 1949). Les appuis sont considérés articulés. Le chargement est constitué d'une combinaison de valeurs moyennes de poids propres des éléments structuraux, des surcharges d'exploitation, des poids des couvertures et des charges climatiques (neige et vent).

B. Analyse probabiliste et fiabiliste

La distribution des contraintes et déformations dans une structure en bois dépend non seulement des charges appliquées et de la géométrie de la structure mais également des propriétés matérielles, des rigidités d'assemblages assez variables. Des essais de contrôle non destructif (Resistograph® et propagation de son) sont effectués sur site afin d'obtenir des distributions probabilistes de la masse volumique et du module d'élasticité longitudinal du bois. Des essais destructifs sur des assemblages traditionnels en bois ont permis de déterminer les propriétés d'assemblages (raideurs et résistances). L'analyse probabiliste (simulations de Monte Carlo (SMC)) considère les propriétés des éléments et celles des assemblages comme des variables aléatoires décorréées. Pour chaque simulation, les propriétés générées sont identiques pour l'ensemble des éléments structuraux (éléments et assemblages). Les coefficients de variation (COV) obtenus expérimentalement ainsi que les types de distributions des variables aléatoires sont résumés dans le Tableau 1.

TABLEAU 1. Variables aléatoires et distributions

Groupes	Noms	Unité	Distribution	COV
Bois	Masse volumique ρ	kg/m ³	Normale	0.05
	Module longitudinal E	GPa	Lognormale	0.13
Assemblages	Raideur axiale K_x	N/m	Normale tronquée	0.25
	Raideur transverse K_y	N/m	Normale tronquée	0.25
	Raideur rotationnelle K_θ	N.m/rad	Normale tronquée	0.25
	Force ultime F_u	N	Normale tronquée	0.15
	Moment ultime M_u	N.m	Normale tronquée	0.15

Le nombre de SMC est de l'ordre de 10^4 en combinant Opensees et la librairie UQpy (Olivier et al., 2020). L'analyse de la robustesse est effectuée en considérant 2 situations :

- Situation 1 : la structure est considérée intacte où il n'y a pas de dégradation/perte d'éléments initiaux,

- Situation 2 : des réductions (de rigidité, de résistance) initiales ou une suppression totale sont appliquées à chaque assemblage au début de l'analyse.

Ces 2 situations permettent de déduire un indice de robustesse donné par l'équation (1) :

$$I_{rob} = \beta_{dmg} / \beta_{intact} \quad (1)$$

où β_{intact} et β_{dmg} sont respectivement les indices de fiabilité de la structure intacte et de la structure dégradée associées à une probabilité de rupture P_f . L'indice I_{rob} est compris dans $[0, 1]$ sachant qu'une valeur élevée correspond à un niveau élevé de robustesse de la structure. La situation 2 étant appliquée séquentiellement à l'ensemble des assemblages les plus sollicités, l'indice de robustesse de la structure est le minimum des indices obtenus par assemblage selon l'équation (2) :

$$I_{rob,structure} = \min_{\Sigma} (I_{rob,i}) \quad (2)$$

Avec Σ l'ensemble des assemblages les plus sollicités et $I_{rob,i}$ l'indice de robustesse décrit par l'équation (1) pour chacun des assemblages les plus sollicités.

III. RESULTATS ET DISCUSSIONS

L'indice de fiabilité $\beta = -\Phi^{-1}(P_f)$ où Φ^{-1} désigne l'inverse de la fonction de répartition de la loi normale standard est fonction de l'état limite considéré défini par l'équation (3) :

$$g(x) = 0,05 - Ux \quad (3)$$

Où Ux désigne le déplacement horizontal de l'étage supérieur de la structure (voire FIG. 1 (a)). Dans la mesure où il n'y a aucune indication dans l'Eurocode 5 sur les limites de déplacement horizontal, nous avons retenu comme valeur seuil $h/150$ ($\approx 5\text{cm}$), h étant la hauteur de la structure. La FIG. 1 (b) présente une distribution lognormale des déplacements horizontaux Ux obtenus pour la situation intacte.

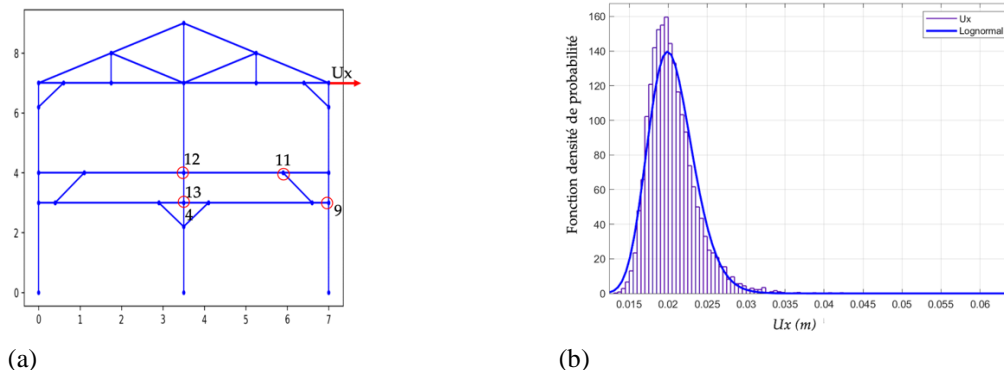


FIGURE 1. (a) Modèle éléments finis de la structure et (b) distribution probabiliste du déplacement Ux pour la structure intacte

L'indice de robustesse (I_{rob}) est évalué pour chacun des assemblages de Σ ($n^{\circ}4, 9, 11, 12$ et 13). Les résultats de la FIG. 2 montrent l'importance des assemblages $13, 12$ et 9 au niveau de la robustesse de la structure. En effet, leurs indices de robustesse relatifs sont plus faibles (respectivement 17%, 19% et 22%) que ceux des autres assemblages. Il faut noter que cet indice ne peut être apprécié que d'un point de vue relatif dans la mesure où les normes ou la littérature actuelle ne définissent pas un niveau requis de robustesse d'une structure pour garantir sa sécurité. Ainsi, dans le cas des I_{rob} faibles, il peut être envisagé des solutions de renforcement de ces assemblages clés pour les rendre

plus ductiles ou envisager des chemins de chargement alternatifs dans la structure afin d'augmenter sa robustesse.

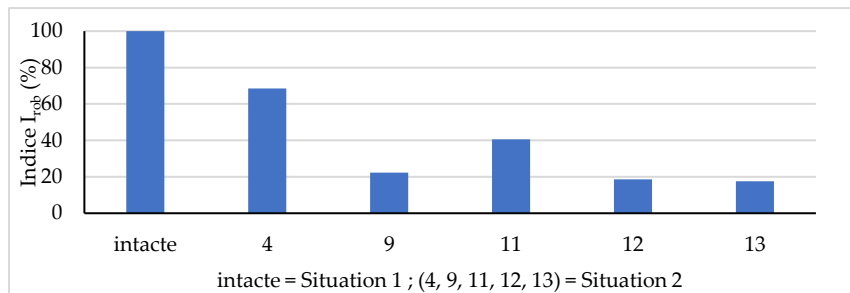


FIGURE 2. Indice de robustesse correspondant aux différentes situations analysées

IV. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Une étude probabiliste et fiabiliste du comportement mécanique d'une structure bois a été effectuée dans le but de quantifier son état de robustesse en lien avec sa fiabilité. Les résultats obtenus ont permis d'identifier les assemblages qui ont, du point de vue de la robustesse structurelle, la plus grande influence et qui doivent par conséquent être pris en compte de façon particulière dans le calcul de la charpente réelle de Villeréal. Ces premiers résultats ne tiennent compte que d'un seul état limite. D'autres états limites seront également étudiés par la suite dans le but de définir une robustesse globale de la structure multi-états.

REFERENCES

- Čizmar, D., Kirkegaard, P.H., Sørensen, J.D., Rajčić, V., 2011. Reliability-based robustness analysis for a Croatian sports hall. *Engineering Structures* 33, 3118–3124. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.05.006>
- Johansen, K.W., 1949. Theory of Timber Connections. *International Association of Bridge and Structural Engineering Journal*, 9, 249-262.
- Kirkegaard, P.H., Sørensen, J.D., Čizmar, D., Rajčić, V., 2011. System reliability of timber structures with ductile behaviour. *Engineering Structures* 33, 3093–3098. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.03.011>
- Olivier, A., Giovanis, D.G., Aakash, B.S., Chauhan, M., Vandanapu, L., Shields, M.D., 2020. UQpy: A general purpose Python package and development environment for uncertainty quantification. *Journal of Computational Science* 47, 101204. <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2020.101204>
- Pearson, C., Delatte, N., 2005. Ronan Point Apartment Tower Collapse and its Effect on Building Codes. *Journal of Performance of Constructed Facilities* 19, 172–177. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3828\(2005\)19:2\(172\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3828(2005)19:2(172))
- Sørensen, J.D., 2011. Framework for robustness assessment of timber structures. *Engineering Structures* 33, 3087–3092. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.02.025>
- Voulpiotis, K., Köhler, J., Jockwer, R., Frangi, A., 2021. A holistic framework for designing for structural robustness in tall timber buildings. *Engineering Structures* 227, 111432. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111432>
- Zhu, M., McKenna, F., Scott, M.H., 2018. OpenSeesPy: Python library for the OpenSees finite element framework. *SoftwareX* 7, 6–11.