

## **Étude de sensibilité des paramètres descriptifs du comportement d'une structure ancienne en bois : la halle de Villeréal**

TEVI Komlan Renaud<sup>1</sup>, ELACHACHI Sidi Mohammed<sup>1</sup>, COINTE Alain<sup>1</sup>, MAURIN Emmanuel<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institut de Mécanique et d'Ingénierie, Département Génie Civil et Environnemental, 351 cours de la libération, 33405 Talence Cedex, France

<sup>2</sup>Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques, 29 Rue de Paris, 77420 Champs-sur-Marne

[komlan-renaud.tevi@u-bordeaux.fr](mailto:komlan-renaud.tevi@u-bordeaux.fr)

**Mots clefs :** diagnostic ; assemblages traditionnels ; étude de sensibilité ; plans d'expériences ; surfaces de réponse.

### **Contexte et objectifs**

L'importance d'un modèle mécanique dans la méthodologie de diagnostic d'une structure ancienne en bois est sans cesse grandissante. Dans la méthodologie d'analyse mécanique développée au cours de sa thèse (André 2003), l'auteur a souligné la mise en évidence des paramètres influents sur le comportement global d'une structure. La norme NF EN 17121 (AFNOR 2019) relative aux lignes directrices pour l'évaluation sur site des structures porteuses en bois mentionne l'importance d'identifier et d'indiquer les niveaux de contraintes au niveau des principaux éléments structuraux. Or l'analyse mécanique de structures anciennes en bois est soumise à plusieurs sources d'incertitudes (aléatoires/épistémiques) et la prise en compte de tous les facteurs incertains pour une analyse fiabiliste semble utopique et exigerait un coût numérique important. Il convient alors de tester la sensibilité de la réponse mécanique de la structure aux paramètres d'entrée. L'étude décrite, à travers ce résumé rentre dans le cadre d'une thèse portant sur la méthodologie d'évaluation de la santé structurale d'une structure bois du patrimoine en s'appuyant sur un cas concret (la halle de Villeréal). Une analyse de sensibilité des paramètres d'entrée sur la réponse globale de la structure est menée en considérant certains paramètres du bois (le module d'élasticité statique et la masse volumique) et des paramètres mécaniques d'assemblages (raideurs).

### **Matériel et méthodes**

#### *Les plans d'expérience*

L'utilisation des plans d'expérience dans l'analyse mécanique recouvre un double objectif : le premier est d'identifier les paramètres influents du modèle mécanique en évaluant leur sensibilité mécanique (Goupy 2006) et le second objectif est la construction des surfaces de réponse par une régression (Myers et al. 2016).

Le principe de fonctionnement des plans d'expériences consiste à créer une table de paramètres qui constituent les entrées pour une expérience, un essai ou une simulation numérique et à analyser la réponse du système étudié pour chaque jeu de paramètres.

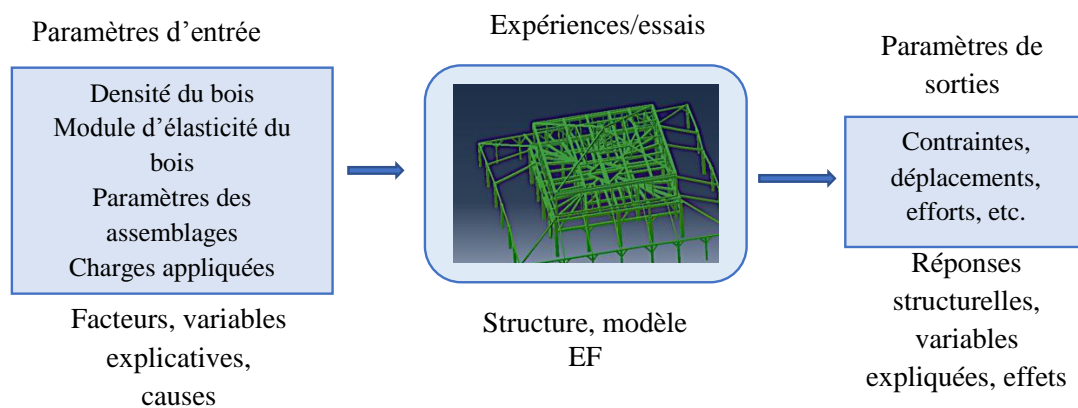


Fig. 1 : Principe de fonctionnement général des plans d'expérience

Un plan d'expérience est associé à une matrice d'essais  $X$  constituée par :

- $N$  lignes représentant le nombre de simulations ou combinaisons de facteurs à réaliser,
- $k$  colonnes représentant le nombre de paramètres ou facteurs à tester.

Dans cette étude, les facteurs ou variables analysés sont la masse volumique, le module d'élasticité du bois, la raideur axiale  $K_x$  des assemblages, la raideur transverse  $K_y$  et la raideur rotationnelle  $K_{theta}$ . On définit des niveaux de valeurs pour chaque paramètre. Le niveau de référence (Niveau 0 dans le Tab. 1) des paramètres est évalué soit par une approche normative soit expérimentalement. Les niveaux supérieurs et inférieurs sont estimés en multipliant/divisant par un facteur de 2 le niveau de référence (si le paramètre est estimé par une approche normative) ou en considérant l'étendue des mesures effectuées (si le paramètre est estimé expérimentalement, ce qui est le cas de la masse volumique et du module d'élasticité).

Tab. 1 : Niveaux des paramètres étudiés

Variables	Niveau -2	Niveau -1	Niveau 0	Niveau 1	Niveau 2
$K_x$ [N/m]	$0,45 \cdot 10^7$	$0,9 \cdot 10^7$	$1,8 \cdot 10^7$	$3,6 \cdot 10^7$	$7,2 \cdot 10^7$
$K_y$ [N/m]	$2,25 \cdot 10^6$	$0,45 \cdot 10^7$	$0,9 \cdot 10^7$	$1,8 \cdot 10^7$	$3,6 \cdot 10^7$
$K_{theta}$ [N.m/rad]	72500	145000	290000	580000	$1,16 \cdot 10^6$
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	630	675	720	765	810
$E$ [N/m <sup>2</sup> ]	$8,00 \cdot 10^9$	$9,50 \cdot 10^9$	$1,1 \cdot 10^{10}$	$1,25 \cdot 10^{10}$	$1,4 \cdot 10^{10}$

Le plan utilisé pour la construction de la matrice d'essais est le Generalized Subset Design (Surowiec et al. 2017) qui permet l'étude des facteurs avec différents nombres de niveaux et réduit le nombre de simulations par un coefficient souhaité par l'utilisateur comparativement à un plan factoriel complet.

#### La méthode des surfaces de réponse

La méthode des surfaces de réponse (RSM : Response Surface Methodology) a pour objectif d'établir à travers une analyse de régression des relations mathématiques entre les variables d'entrée du modèle et la réponse de la structure. Elle constitue une généralisation de l'analyse par plans d'expérience. Le modèle mathématique utilisé est souvent une fonction polynomiale et peut être de degré 1 (surface de réponse plane) ou de degré 2 (surface de réponse quadratique). Le second type utilisé dans cette étude s'écrit sous forme algébrique :

$$y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j$$

Où les coefficients  $a_0$ ,  $a_i$  et  $a_{ij}$  sont recherchés en minimisant l'erreur entre les réponses observées (obtenues par calcul éléments finis) et les réponses estimées par le modèle mathématique.

### Premiers résultats

L'influence des paramètres est observée à travers les variations de pente autour de la moyenne (ligne rouge sur la Fig. 2 et la Fig. 3). Les Fig. 2 et Fig. 3 montrent respectivement les effets des paramètres d'assemblages et des propriétés matérielles sur la contrainte de compression maximale des poteaux au sein de la structure.

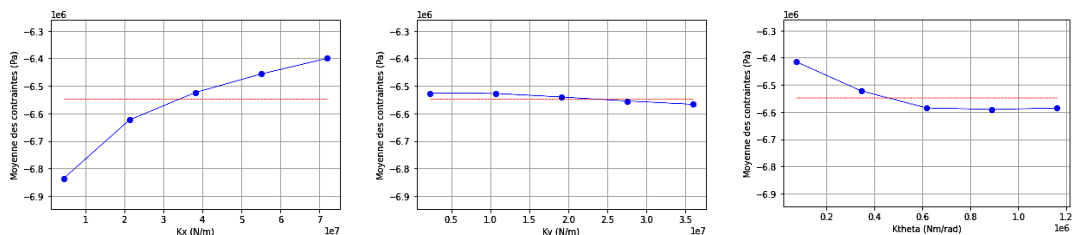


Fig. 2 : Effets individuels des paramètres d'assemblages sur la contrainte de compression maximale des poteaux de la structure

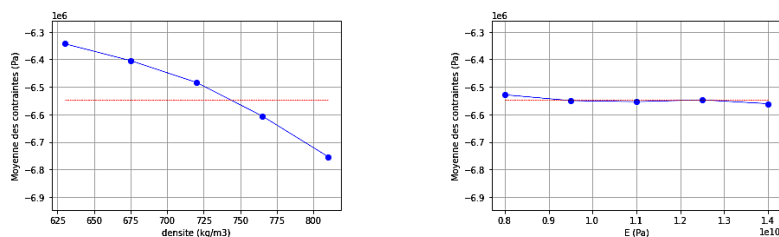


Fig. 3 : Effets individuels des propriétés matérielles sur la contrainte de compression maximale des poteaux de la structure

D'autres variables de réponse structurelle comme les déplacements nœuds maximums, les contraintes de flexion des poutres sont considérées pour cette étude. Globalement, on note une influence prépondérante des paramètres d'assemblages comparativement aux propriétés matérielles.

Afin d'évaluer l'influence des interactions entre la réponse considérée, la RSM est utilisée en considérant 3/5 de la table d'essais pour calibrer le modèle mathématique et 2/5 pour la validation du modèle obtenu. Des résultats satisfaisants ( $R^2 > 0.8$ ) sont obtenus pour la réponse considérée (Fig. 4).

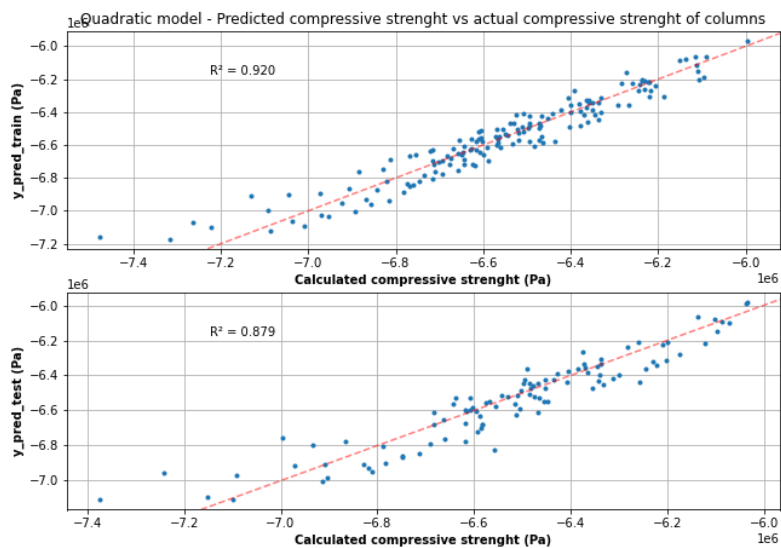


Fig. 4 : Contrainte maximale de compression des poteaux prédite par rapport à celle obtenue par calcul éléments finis

### Conclusion et perspectives

D'après les premiers résultats, il semble que l'influence des paramètres d'assemblages soit plus marquée que celle des propriétés du matériau (masse volumique et module d'élasticité). On note également l'influence des interactions entre la masse volumique et les raideurs d'assemblages sur la réponse considérée. Les relations établies par la méthode des surfaces de réponse prennent en compte les facteurs ayant une influence significative et permettront de réaliser une étude probabiliste en limitant le nombre de simulations. Vu l'influence des raideurs d'assemblages, il est important de maîtriser les valeurs de référence utilisées pour l'étude de sensibilité ce qui explique la mise en place d'essais pour la caractérisation d'assemblages traditionnels en bois.

### Références

- AFNOR. (2019). « NF EN 17121, "Conservation du patrimoine culturel-Structures en bois du patrimoine-Lignes directrices relatives à l'évaluation sur site des structures porteuses en bois" ».
- André N. (2003) « Méthodologie d'analyse mécanique des structures bois du patrimoine : application à la réhabilitation d'un beffroi », Thèse de doctorat, Université de Bordeaux 1.
- Goupy J. 2006. « LES PLANS D'EXPERIENCES », 43.
- Myers, R.H., Montgomery D.C., et Anderson-Cook C.M. (2016) *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*, John Wiley & Sons.
- Surowiec I., Vikström L., Hector G., Johansson E., Vikström C., et Trygg J. (2017) « Generalized Subset Designs in Analytical Chemistry ». *Analytical Chemistry* 89 (12).