

Vers un dialogue modèle numérique-métriologie de la réplique de la charpente de Notre Dame de Paris.

KAUFFMANN Lawrence¹, COINTE Alain², GALIMARD Philippe³, COUREAU Jean-Luc⁴, SAUVAT Nicolas⁵

CNRS - Centre national de la recherche scientifique¹

I2M - Institut de mécanique et d'ingénierie^{2,3,4},

Laboratoire de bois PE⁵

lawrence.kauffmann@u-bordeaux.fr

Mots-clés

Charpente bois ; Métriologie ; Éléments finis ; Monte-Carlo

Contextes et objectifs

On se propose d'étudier la cinématique des déformations de la charpente de Notre-Dame de Paris, sur des composants de la nef. En collaboration avec le lycée professionnel des métiers du bâtiment de Felletin, la travée N°9 de la charpente entre les fermes N°4 et 5 de la nef a été reproduite à l'échelle 1 sur le site de l'établissement.

La campagne expérimentale qui entoure cette réplique constitue la base de l'investigation sur le comportement à long-terme de la charpente d'origine qui a dû subir des renforcements consécutifs à de possibles désordres apparus au cours de son histoire.

Une simulation par éléments finis est menée en parallèle et vise à analyser sur la sensibilité des propriétés mécaniques utiles ou fonctionnelles de la performance structurale. L'objectif est de développer une modélisation fine de la charpente capable de mieux rendre compte de comportement à l'aide de données historiques recueillies et de connaissances physique et mécanique du matériau utile à l'analyse des risques des structures du patrimoine.

Matériel et méthode

Métriologie :

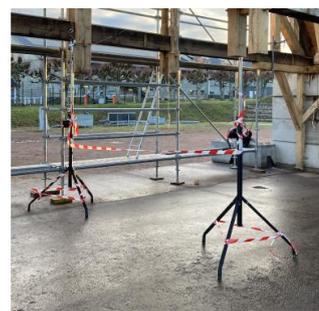


FIG1. Réplique de la travée (a)

dispositif de monitoring *in-situ* (b)

Deux méthodes de surveillance des déplacements de la travée ont été mises en place :

- Une station de monitoring, figure 1 (b), fait l'acquisition de données de déplacements avec 14 capteurs positionnés sur la réplique pendant plusieurs mois. Deux autres capteurs relèvent la température et l'humidité ambiante du site. Une centrale météo double les mesures de température et d'humidité de l'air ainsi que la vitesse du vent. D'autre part, une mesure de l'humidité de certains composants a été mise en place donnant une indication de la teneur en eau

des bois.

- Une série de relevés au tachéomètre permet de mesurer les déplacements de 40 cibles réparties sur les deux pignons de la travée figure 1 (a).

Au tachéomètre, l'utilisation de cibles réfléchissantes, permet une mesure globale de la déformation de la structure selon une fréquence bimensuelle [Courde.P, p 19-32]. Le monitoring, quant à lui, vient compléter ces mesures.

- En parallèle, un scan 3D de la structure est réalisé pour évoluer le niveau de déformation afin d'accéder au comportement tridimensionnel de l'ouvrage sous es charges permanentes et climatiques.

Le dépouillement de ces mesures permettra de renseigner le jumeau numérique en cours de développement

Monte-Carlo :

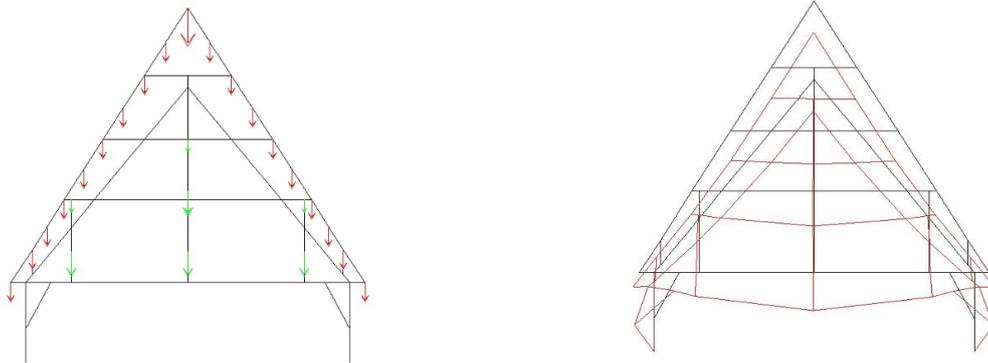


FIG3. Représentation des chargements(a)

Représentation des déformées (b)

Une modélisation du comportement de la structure par la méthode des éléments finis de la travée est en cours d'élaboration sur Cast3M afin d'approcher le comportement réel observé *in-situ*. Il tiendra compte du comportement, des assemblages et de la qualité des bois.

On impose ainsi les charges propres estimées, figure 3 (a), dues à la couverture, en rouge, ainsi qu'aux éléments transverses qui relies les fermes, en vert, puis on procède à la visualisation de la déformée issue du calcul statique élastique, figure 3 (b). Un chargement artificiel et maîtrisé sera par la suite appliqué *in-situ* pour mieux caler les modèles.

Résultats et discussions

Métrologie :

	E_i	E_a
Δx	0,7mm	2,2mm
Δy	2,1 mm	1,2 mm
Δz	2,1 mm	0,4 mm

TAB.1 Tableaux des erreurs de mesure au tachéomètre

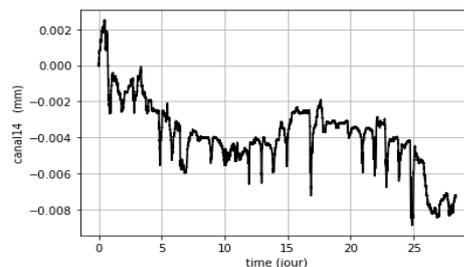


FIG.2 Évolution de la flèche (mm) à mi-portée de la travée

Le contrôle direct systématique (valeurs doubles) sur nos données permet d'estimer l'erreur statistique afin d'en apprécier la qualité de mesure. Ainsi, le tableau.1 représente une estimation par le calcul de la précision industrielle « E_i » ainsi que de l'erreur accidentelle « E_a » [Lhuillier.P, p 13] de mesure des coordonnées relevés au tachéomètre.

Le contrôle indirect consiste à comparer les mesures obtenues à partir des différentes méthodes, comme la flèche verticale de l'entrait calculée avec les données du tachéomètre et mesurée par monitoring, figure 2.

Monte-Carlo :

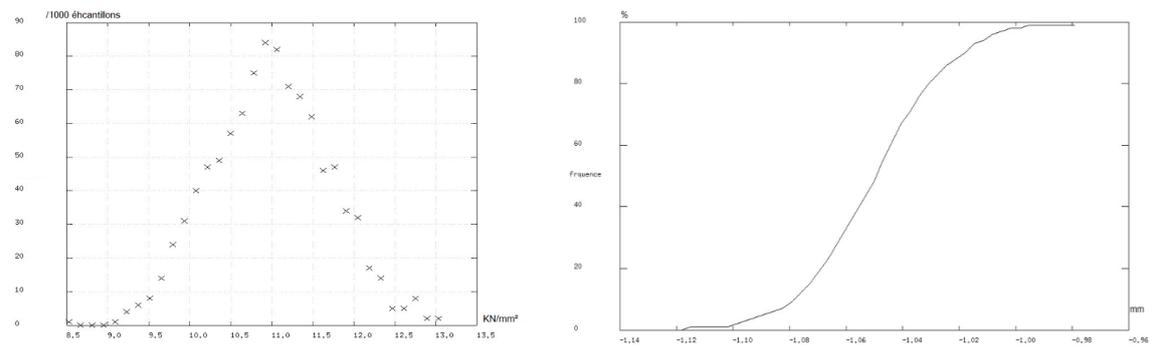


FIG4. Dispersion module d'élasticité(a)

Fréquences cumulées flèche verticale(b)

La méthode de Monte-Carlo consiste à éprouver la simulation un grand nombre de fois en distribuant aléatoirement les propriétés dans les barres suivant leur loi normale [FCBA, 2015], figure 4 (a).

En étudiant la sensibilité de la réponse de notre structure hyperstatique, figure4 (b), on est alors en mesure d'apporter des éléments de réflexion sur l'impact de la dispersion des propriétés mécaniques des poutres, ainsi que celle des assemblages.

Conclusion et perspectives

Métrologie :

Lorsqu'on entreprend le suivi instrumentalisé des déformations d'une structure, il faut choisir le dispositif le plus approprié ou les couplages métrologiques adéquates. La multiplicité des outils de surveillance permet de compenser leurs défauts et ainsi de fournir un dispositif de suivi et d'indicateurs mieux maîtrisés et potentiellement plus discriminants.

Monte-Carlo :

La méthode numérique de simulations Monte-Carlo permet d'observer en premier lieu les dispersions de propriétés à l'aide d'outils statistiques en intégrant un grand nombre de configurations et le filtrage par les effets systèmes inhérents à la géométrie de la structure. Le but de cette approche numérique est avant tout d'apporter des éléments de compréhension de la cinématique des déplacements globaux afin d'identifier certains phénomènes mis en jeu et points de vigilances qui corroborent l'analyse métrologique de la structure réelle.

Références

Lhuillier.P ; Précision des mesures, théorie des erreurs ; p 13/23 ; BTS métiers du géomètre[...], Lycée Livet ; Nantes.

Courde.P , Gatuing.B ; base de la topographie ; p 19-32/86 ; IUT de bordeaux.

FCBA, IRABOIS ; (2015) ; Fiche ABC ; p, 11-14/111