

## **DynaTimberEyes – Développement de jumeaux numériques de bâtiments bois sur la base de mesures par caméras**

DION Jean-Luc<sup>1</sup>, CUMUNEL Gwendal<sup>2</sup>, CATTEROU Thomas<sup>3</sup>, LO FEUDO Stefania<sup>1</sup>,  
HAN Yunhyeok<sup>1</sup>, GOMEZ Dalmer<sup>2</sup>, KORDYLAS Layla<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ISAE SupMéca, Laboratoire Quartz, 3 rue Fernand Hainaut, Saint Ouen, France

<sup>2</sup>ENPC, Laboratoire Navier, 8 avenue Blaise Pascal, Champs sur Marne, France

<sup>3</sup>Institut technique FCBA, Pôle IB&C, Allée du Boutaut, Bordeaux, France

thomas.catterou@fcba.fr

**Mots clefs :** Construction bois, Jumeau numérique, assemblages, métrologie, intelligence artificielle

### **Contexte et méthodologie**

Les bâtiments bois moyenne et grande hauteur sont de plus en plus courants, notamment en France. Ces bâtiments étant relativement récents dans le paysage urbain, des questions se posent quant à leurs réelles caractéristiques une fois construits et sur leur évolution dans le temps. Le projet DynaTimberEyes porte sur la mise en place d'une méthode de mesure des vibrations de bâtiments par caméra, dans le but de créer des jumeaux numériques pour le suivi des bâtiments. Des mesures indirectes des performances des bâtiments pourront être réalisées sur la base d'une méthode non invasive depuis l'extérieur du bâtiment. Pour la réalisation de cet objectif, trois études distinctes mais complémentaires sont nécessaires :

- Développement d'une méthode de métrologie par caméra capable de mesurer des mouvements infimes d'un bâtiment à grande distance.
- Définition de modèle simple mais réaliste pour appréhender le comportement dynamique d'un bâtiment bois.
- Implémentation d'algorithmes d'assimilation de données pour créer le jumeau numérique sur la base des mesures collectées par caméra.

La méthodologie proposée est rendue possible par la relative souplesse des bâtiments à dominante bois : les déplacements dus aux vents ou aux vibrations sont donc plus facilement perceptibles à la caméra. Néanmoins les structures bois ont un comportement non-linéaire, notamment dû aux assemblages, qu'il est nécessaire de prendre en compte dans les modèles. Le projet est en cours et livrera ses résultats finaux en décembre 2025.

### **Métrologie par caméra**

La métrologie par caméra pour un bâtiment de grande dimension est un défi scientifique important. La précision de la méthode doit être extrêmement importante pour être capable de mesurer des petits déplacements.

**Synchronisation :** Plusieurs caméras synchronisées entre elles doivent être utilisées pour mesurer des déplacements en trois dimensions. Pour cela, un panneau lumineux puissant est utilisé et envoie un signal pulsé désynchronisé par rapport à la fréquence d'échantillonnage des caméras et qui contient l'information de temps (Han et al 2024). Il est ainsi possible de synchroniser les caméras avec une précision inférieure à la milliseconde.

**Distorsion :** Une image prise par une caméra est déformée par l'objectif, notamment au niveau de ces bords (l'effet « fish eye »). Pour corriger cette distorsion, la méthode de Zhang (2000)

est utilisée, avec une adaptation compte tenu de la dimension des objets d'étude. Le damier est remplacé par une « harpe » (voir Fig. 1a). Avant la réalisation des essais, plusieurs images sont prises pour définir la matrice de distorsion, en partant de l'hypothèse que les fils de la « harpe » sont rectilignes (Fig. 1b). Les images seront ensuite transformées en appliquant la distorsion inverse (Fig. 1c)

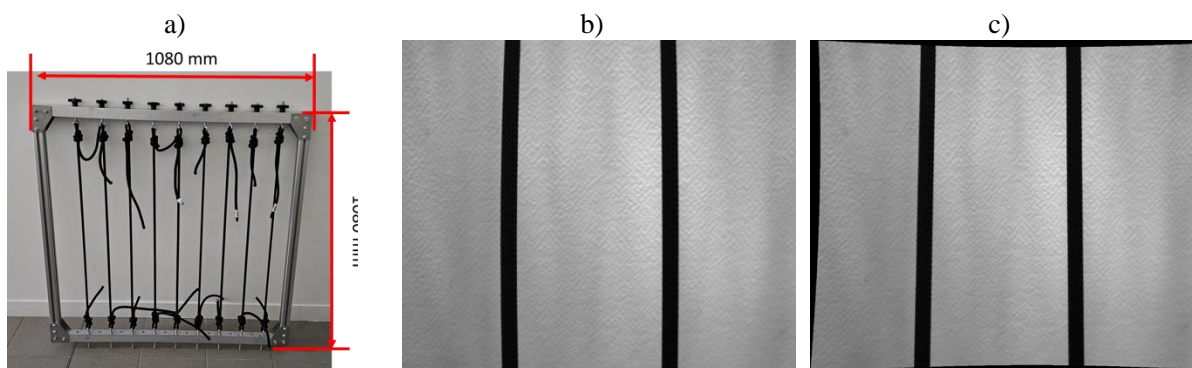


Fig. 1 : (a) Harpe de calibration, (b) Image déformée, (c) Image après transformation.

**Bruit :** La prise de mesure en extérieur induit des mouvements de la caméra à cause du vent, de la circulation etc... Compte tenu de la distance à laquelle sont prises les mesures, le moindre mouvement de la caméra occasionne des erreurs importantes. Deux méthodes de correction sont employées suivant la configuration de l'essai : soit il est possible d'identifier un « point fixe » dans le champ de la caméra dont le déplacement sera retranché du champ de déplacement mesuré, soit un accéléromètre placé sur la caméra permettra de prendre en compte ces bruits.

**Point de mesure :** Sur un bâtiment, il n'est pas possible de placer des cibles pour aller repérer des points de mesure. Un algorithme a été développé pour identifier des régions d'intérêt (ROI) reconnaissable en se basant sur les arêtes du bâtiment, avec un critère particulier pour établir la similarité entre les ROI entre deux images successives (Han et al 2024).

**Validation :** La méthodologie a été employée pour mesurer les vibrations d'une grue située à environ 50m du point de prise de vue. Un accéléromètre a pu être positionné en un point de la grue pour valider les valeurs d'accélération mesurées. La comparaison entre la méthode vidéo et l'accéléromètre est donnée en Fig. 2.

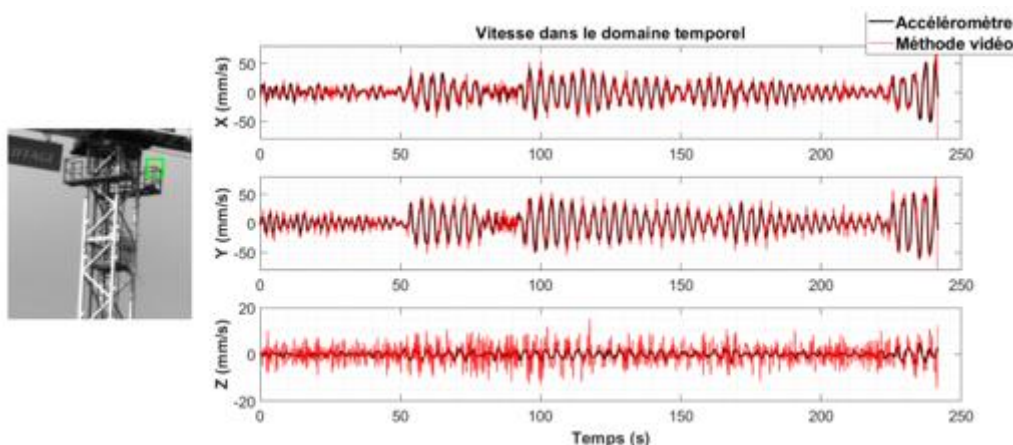


Fig. 2 : Validation de la mesure de déplacement 3D par vidéo avec un accéléromètre 3 axes (Han et al 2024)

La méthodologie fonctionne tant que le niveau de déplacement est suffisant ( $\sim 100\mu m$ ): lors des essais, le déplacement en z était trop faible pour être mesuré avec précision. Les mesures ont

permis de réaliser une analyse modale en champ complet de la structure avec une précision de moins de 1% par rapport aux mesures par accéléromètres.

**Modé (Valente 2024).** Il s'agissait de s'assurer que les mesures dynamiques établies avec les caméras soient semblables aux essais cycliques « lents » réalisés en laboratoire. La raideur et l'énergie dissipée par les connecteurs ne sont pas significativement dépendante de la vitesse pour des vitesses de sollicitation allant de 2mm/min (comme préconisé dans l'EN12512 (AFNOR 2002)) lisation de la structure et des assemblages

Une des difficultés du projet est de définir des modèles simples mais réalistes de la structure et des connecteurs pour alimenter le jumeau numérique. Hors cas accidentel, les éléments poutres ou plaques se comportent de façon pseudo-linéaire contrairement aux connecteurs. Dans les bâtiments bois moyenne et grande hauteur, les assemblages sont le plus souvent réalisés avec des organes métalliques : broches, boulons ou pointes. Les caractéristiques statiques peuvent être calculées sur la base de l'Eurocode 5 (AFNOR 2005), même si la formule permettant de calculer la raideur des connecteurs est souvent remise en cause (Rahim 2019, Iraola et al 2021, Tao et al 2021). Le comportement cyclique est quant à lui très complexe et les lois de comportement les plus courantes (Foschi et Bonac 1977, Rinaldin et al 2013, Humbert et al 2014) nécessitent trop de paramètres pour être implémentées dans un jumeau numérique.

Un modèle rhéologique de type Dahl permet de reproduire le comportement du connecteur pour de faibles niveaux d'efforts. Des études de sensibilité ont été réalisées pour déterminer l'effet du jeu et des autres paramètres sur la raideur et l'énergie dissipée par le connecteur. L'étude a permis d'améliorer la compréhension sur les phénomènes influant sur la propriété des connecteurs pour bien les prendre en compte dans les modèles du jumeau numérique.

Des essais ont aussi été réalisés pour analyser l'effet de la vitesse de sollicitation sur les propriétés hystérétiques pour des connecteurs de type broche ou boulons jusqu'à 600mm/min.

### Assimilation de données – jumeau numérique

La conception d'un jumeau numérique nécessite la mise en place de méthode d'assimilation de donnée efficace utilisant l'intelligence artificielle pour définir les paramètres du modèle à partir des données expérimentales récoltées. Le filtre de Kalman (Fig. 3) permet d'intégrer les observations expérimentales au modèle, avec un indice de confiance correspondant au gain (Kalman 1960, Särkkä 2013)

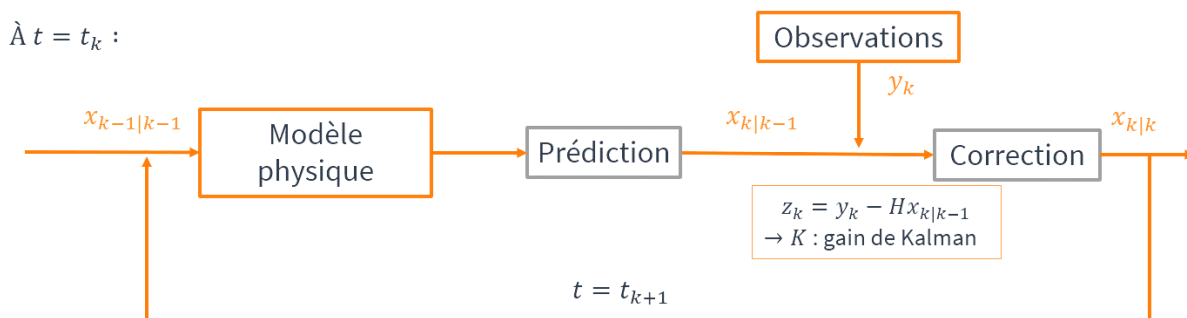


Fig. 3 : Principe de fonctionnement du filtre de Kalman

Un modèle physique de ressort linéaire associé en parallèle à un modèle de Dahl a été utilisé pour représenter une structure multi-étagé et qui prend en compte de la dissipation d'énergie par friction. Sur la base de l'état à l'instant précédent, une prédiction du comportement de la structure à l'instant  $t_k$  est réalisée. Cette prédiction est corrigée par les observations via le calcul d'un filtre de Kalman étendu adapté aux problèmes non-linéaires (Kordylas 2024).

## Conclusion et perspective

La méthodologie a été appliquée avec succès pour une maquette échelle réduite. Dans la suite du projet nous souhaitons valider la méthode pour une maquette grande échelle sur table sismique et sur des bâtiments réels. Si la méthode est fonctionnelle, elle permettra d'identifier simplement l'évolution des paramètres de raideurs et de masse d'un bâtiment, ce qui peut permettre de valider la construction d'un ouvrage ou de suivre la durabilité d'une structure dans le temps.

## Références

- AFNOR (2002) EN 12512 - Cyclic Testing of Joints Made with Mechanical Fasteners.
- Foschi RO, Bonac T (1977) Load-Slip Characteristics for Connections with Common Nails. Wood Science.
- Han Y, Cumunel G, Lo Feudo S, Renaud F (2024) Analyse Modale Opérationnelle par Caméras d'une Structure de Grande Hauteur. In . <https://hal.science/hal-04610891>.
- Han Y, Lo Feudo S, Cumunel G, Renaud F (2024) Sub-frame timestamping of a camera network using a coded light signal. Measurement 236 :115046. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.115046>.
- Humbert J, Lee SJ, Park JS, Park MJ. (2014) Improving the Moment Resistance of a Concealed Timber Post Base Joint. In Materials and Joints in Timber Structures, [https://doi.org/10.1007/978-94-007-7811-5\\_2](https://doi.org/10.1007/978-94-007-7811-5_2).
- Iraola B, Cabrero JM, Basterrechea-Arévalo M, Gracia J (2021) A Geometrically Defined Stiffness Contact for Finite Element Models of Wood Joints . Engineering Structures 235:112062. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112062>.
- Kalman RE (1960) A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. Transactions of the ASME–Journal of Basic Engineering 82: 35 45.
- Kordylas L (2024) Détection d'évolution de paramètre dynamique dans une structure à l'aide de méthode d'assimilation de données . In 16ème Colloque National en Calcul de Structures. Giens, <https://hal.science/hal-04610916>.
- Rahim NL (2019) Stiffness of Bolted Timber Connection. Thesis, ResearchSpace@Auckland. <https://researchspace.auckland.ac.nz/handle/2292/46384>.
- Rinaldin G, Amadio C, Fragiaco M (2013) A Component Approach for the Hysteretic Behaviour of Connections in Cross-Laminated Wooden Structures. Earthquake Engineering & Structural Dynamics 42 (13): 2023 42. <https://doi.org/10.1002/eqe.2310>.
- Särkkä S (2013) Extended and unscented Kalman filtering. In Bayesian Filtering and Smoothing, 64 95. Institute of Mathematical Statistics Textbooks. Cambridge University Press.
- Tao HT, Yang HF, Ju GY, Shi BK (2021) Elastic Stiffness of Timber Joints with Dowel-Type Fasteners and Slotted-in Steel Plate Based on the Theory of Beam on Elastic Foundation. Construction and Building Materials 294. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123569>.
- Valente C (2024) Analyse de l'influence de la vitesse de sollicitation sur le comportement des assemblages bois-métal. Institut technologique FCBA.
- Zhang Z (2000) A flexible new technique for camera calibration. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 22 (11): 1330 34. <https://doi.org/10.1109/34.888718>.