

***Intitulé* : Cinétiques des déformations de la Charpente de Notre Dame de Paris et anticipation des pathologies à long terme**

Contexte et objectifs :

Le calcul réglementaire des structures de bâtiments anciens se fonde principalement sur le comportement élastique des matériaux. On cherche par des méthodes de pondérations (approche semi-probabiliste en bureau d'études) à anticiper les comportements structuraux pouvant mettre en péril la sécurité des systèmes et provoquer des déformations excessives à plus grande échelle durant la période de service. La base de calcul s'articule le plus souvent sur le comportement individuel de composants et d'assemblages. Le déplacement global est estimé par intégration sans qu'il y ait de calibration et de validation à l'échelle réelle de la structure et sans tenir compte des effets systèmes potentiels. Ce type d'approche reste sécuritaire au niveau des déformations des systèmes constructifs modernes, avec des descentes de charges relativement simples, et des possibilités de transferts d'efforts limitées. Dans le domaine des assemblages, les modèles sont moins bien renseignés, ce qui peut produire une dérive notable des prédictions et des taux de charges. Dans le cadre du patrimoine, ce type de modélisation est un point de départ pour l'investigation, mais l'histoire du chargement, les comportements différés et localisés des matériaux restent une problématique à part entière pour mieux connaître l'état de santé de ces structures et de leurs évolutions futures.

Il est proposé d'étudier une travée de la charpente de Notre Dame de Paris, dans le but de comprendre l'évolution en déformation. Les renseignements historiques (croquis, textes, relevés de points et de formes) mettent en évidence les caractères hyperstatiques des systèmes et des zones de renforcements. L'analyse fonctionnelle de chaque élément et des assemblages est nécessaire et elle doit être en lien avec les données historiques recueillies. L'objectif des modélisations est de comprendre l'évolution du chargement dans chaque composant en considérant les mises en œuvre et la dispersion de la qualité mécanique des matériaux lors de l'édification, puis des réparations successives.

Pour ce travail de thèse, deux stratégies sont envisagées : la première consiste à réaliser une équivalence élastique du comportement structurel en fonction des niveaux de charge dans les éléments et dans les connexions de barres. Ce travail se base sur une étude de la sensibilité du modèle avec ses paramètres d'entrées (géométries des barres, géométrie de la charpente, , modules d'élasticité, raideurs d'assemblages, densités, ...). L'objectif est de montrer quelles propriétés mécaniques « utiles ou fonctionnelles » des composants régissent le comportement global de la charpente. La deuxième stratégie est d'implémenter des lois de fluages les plus simples et les plus pertinentes pour le calcul de structure (en bureaux d'études), de manière à reproduire les déformations des treillis constatées par les données historiques recueillies. L'objectif est de développer un outil « embryonnaire » de diagnostic des structures capable de comprendre les évolutions passées et d'anticiper les déformations futures des charpentes, transposable aux bureaux d'études et experts en diagnostic des structures, afin de compléter sur ce point la récente norme EN 17121 : Conservation of cultural heritage - Historic Timber Structures - Guidelines for the On Site Assessment.

La modélisation fine de la charpente (éléments et liaisons) peut apporter une dimension supplémentaire à l'expertise des spécialistes du patrimoine ainsi qu'aux experts en bureaux d'études (maîtrise d'œuvre), puisque les variations des déplacements sont évaluées selon le chargement à long-terme. Les fluctuations d'humidité marquées, engendrées par la stabilisation de bois mis en œuvre vert, ou par les variations saisonnières, peuvent engendrer des déformations significatives dans les éléments, qu'il convient d'estimer. Le but est de prédire les sollicitations dans les assemblages selon les systèmes constructifs déclinés historiquement. Des cinétiques d'endommagement entraînant des déformations excessives des structures peuvent être identifiées et répertoriées par rapport aux données historiques. L'objectif du travail de thèse permet de fournir une aide à la décision basée sur un transfert de modèles scientifiques pour les bureaux d'études spécialisés. Il permet également de consolider les connaissances historiques en intégrant des notions de performances mécaniques des techniques médiévales. Des investigations très ciblées seront faites sur la caractérisation des assemblages les plus récurrents dans la charpente, pour analyser l'effet du retrait-gonflement du bois. On cherchera à mettre en évidence si un effet de pré-contrainte dans les liaisons et de possibles excentrement induits par le séchage sont envisageables. L'analyse du comportement élastique et jusqu'à la rupture est prévue pour alimenter la base de données sur les assemblages traditionnels.

Enfin, en relation avec le Rectorat de l'Académie de Bordeaux, une maquette à l'échelle réelle va être édifiée courant 2020. De manière à caler les modélisations envisagées, un monitoring simple et pragmatique est à programmer dans ce travail de thèse. Il permettra de mettre en place des techniques de suivi. Cette action peut aussi fournir des dispositifs de monitoring mieux maîtrisés, pour les charpentes du patrimoine, touchant alors à un spectre plus large concernant les contrôles de l'existant et des réparations. La proposition du rectorat de l'académie de Bordeaux concernant une réplique partielle à l'échelle 1 :1 est une opportunité pour faire converger les actions de recherches et les actions pédagogiques, ce qui est une originalité d'investigation au niveau du territoire national. Le monitoring devrait aussi contribuer à valider plus rationnellement des hypothèses des modélisations. Diverses technologies de mesures seront à l'études : suivi de marqueurs (corrélation d'images), mesures locales de glissement d'assemblages, relevés au théodolite des points de connexions. Une stratégie de chargement à court terme sera aussi mise en œuvre (treillage ou masse morte) pour connaître l'évolution temporelle de la réponse instantanée de la structure.

Programme scientifique :

- Analyse de la documentation historique sur Notre Dame de Paris
- Modélisation globale de la structure par Eléments Finis
- Etude locale des assemblages traditionnels (Modélisation et expérimentation)
- Expérimentation et instrumentation de la maquette échelle 1

Compétences recherchées :

Le candidat devra avoir des connaissances solides en modélisation mécanique des matériaux et des structures du Génie Civil. Des expériences dans le domaine des transferts de masse et de chaleur, et / ou de l'instrumentation des structures seraient un plus. Le contexte exceptionnel du projet serait porteur pour un candidat ayant un goût pour les structures historiques, et un sens pratique permettant une adaptation des réglementations et outils de l'ingénierie à ces structures.

Encadrement :

Le projet est porté par le laboratoire I2M de Bordeaux, en partenariat avec quatre autres laboratoires pour assurer la meilleure complémentarité possible :

- I2M, Equipe Bois : Etude du comportement long terme des structures bois, et expériences d'application sur les Monuments Historiques

- CITERES, Laboratoire Archéologie et Territoire : Techniques de constructions historiques
- GC2D, Equipe Bois : Modélisation de la diffusion hydrique et appui sur l'étude du comportement différé ; instrumentation des ouvrages
- LRMH : Expertise dans les structures bois historiques
- GRECCAU : Laboratoire de l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture et du Paysage de Bordeaux

Localisation : Le (la) doctorant(e) sera accueilli(e) dans les différents laboratoires

Mots Clés :

Génie Civil, Charpentes médiévales (ou historiques), Modélisation des structures, Effets différés, Monitoring, Caractérisation

Compétences :

Calcul de structures, Mesures Monitoring, Construction Bois,

Financements : 50 % CNRS Obtenu, 50% Région Nouvelle Aquitaine en attente

Laboratoires : I2M, LGC2D, CITERES, LRMH, GRECCAU

Codirection :

Jean-Luc.Coureau (Université de Bordeaux) et Frédéric Dubois (Université de Limoges)

Contact : jean-luc.coureau@u-bordeaux.fr