

Offre de thèse de doctorat

Juillet 2023

Évaluation du comportement structurel des Cathédrales gothiques : méthodes constructives, contrebutements et gain de hauteur sous voûtes.

Contexte, sujet de la thèse

Ce travail de thèse s'inscrit dans le projet ANR ALTIOR qui débute en octobre 2023. Il s'effectuera au sein du laboratoire I2M de Bordeaux, département GCE en collaboration avec le laboratoire LMGC de Montpellier. Le projet ALTIOR, intitulé « *Les voûtes de Notre-Dame de Paris et la quête de la hauteur dans l'architecture gothique en France, XIIIe-XIIIe siècles* » a pour objectif d'expliquer les procédés techniques et architecturaux qui ont rendu possible cette incroyable conquête de la hauteur sous voûtes dans l'architecture gothique aux XIIIe et XIIIe siècles. Ce projet multipartenaire s'inscrit dans le cadre du chantier scientifique CNRS - Ministère de la Culture Notre-Dame. La compréhension des méthodes constructives ayant conduit à une élévation de la hauteur des voûtes des cathédrales gothiques convoquera sciences humaines et sociales (histoire de l'architecture, archéologie du bâti, archéométrie) et sciences pour l'ingénieur (sciences des matériaux, géophysique, génie civil, calcul de structure) en s'appuyant notamment sur une modélisation numérique performante des structures étudiées, basée sur les approches discrète (bloc à bloc) et/ou continue de la maçonnerie.

Objectifs de la thèse

Trois questions liées aux méthodes constructives devront être traitées dans cette thèse :

1. Quel est le phasage constructif probable d'une travée du chevet de Notre-Dame ?
2. Quel système de contrebutement initial a été mis en place au moment de l'édification de l'ouvrage ?
3. Quels sont les paramètres architecturaux et/ou matériaux ayant permis d'élever des voûtes toujours plus hautes ? Une analyse mécanique comparative des cathédrales de Sens, Chartres, Bourges et Amiens sera entreprise pour répondre à la question.

L'objectif de la thèse est d'apporter un éclairage mécanique et structurel à ces problématiques. Des modélisations mécaniques non linéaires s'appuyant sur la méthode des éléments finis (MEF) et/ou des éléments discrets (MED) seront mises en œuvre. Il s'agira notamment de modéliser mécaniquement, pas à pas, les différentes étapes de construction d'une travée, des fondations jusqu'aux voûtes, afin d'anticiper les tassements verticaux de chaque élément architectural au cours de la construction, et ainsi de retracer fidèlement le scénario de construction réel de l'ouvrage. La mise en œuvre d'une modélisation aux éléments discrets permettra d'apporter un nouvel éclairage à ces questions en tenant compte des interactions entre

les maçonneries et les dispositifs constructifs comme les cintres et les butons. Les états d'équilibre obtenus (contraintes et déplacements simulés de la structure, efforts dans les dispositifs de contrebutement temporaires) seront analysés à chaque étape du phasage. Les données mécaniques ainsi générées, notamment les endommagements potentiels engendrés ou encore l'aplomb des murs gouttereaux, apporteront un éclairage quant à la faisabilité mécanique des différents phasages proposés.

Sur cette base, la probabilité des différents scénarii de contrebutement initial de Notre-Dame sera étudiée et comprendra la simulation des modifications structurelles à apporter à l'ouvrage pour aboutir à la configuration actuelle (post 1300). Enfin, les paramètres (architecturaux et/ou matériaux) ayant permis d'élever des voûtes toujours plus hautes seront étudiés. On s'attachera en particulier à identifier les dispositions constructives ayant permis cette quête de hauteur sous voûtes parmi les ouvrages de comparaison comme (i) l'épaisseur des voûtes, (ii) la performance des systèmes de contrebutement (culée, volée et dispositifs de transfert des poussées voûte-volée) ou encore (iii) l'abandon des tribunes au profit de collatéraux de plus grande hauteur.

Compétences attendues

- Compétences solides en mécanique non linéaire, simulation numérique et modélisation des structures par éléments finis ou éléments discrets
- Gout pour la programmation
- Autonomie, force de proposition, bon relationnel
- Bon niveau d'anglais
- Bon relationnel car la thèse se déroulera le cadre d'un projet multipartenaire
- Profil Génie-Civil souhaitable, curiosité pour les structures du patrimoine et les monuments historiques

Contacts au laboratoire I2M de Bordeaux

Thomas Parent (thomas.parent@u-bordeaux.fr)

Stéphane Morel (stephane.morel@u-bordeaux.fr)

Contact au laboratoire LMGC de Montpellier

Frédéric Dubois (frederic.dubois@umontpellier.fr)

PhD Thesis Offer

July 2023

Evaluation of the Structural Behavior of Gothic Cathedrals: Construction Methods, Buttressing, and Height Gain under Vaults.

Context, thesis subject

This thesis work is part of the ANR ALTIOR project, which starts in October 2023. It will be conducted at the I2M laboratory in Bordeaux, GCE department, in collaboration with the LMGC laboratory in Montpellier. The ALTIOR project, entitled "The vaults of Notre-Dame de Paris and the quest for height in gothic architecture in France, 12th-13th centuries," aims to explain the technical and architectural processes that made possible this incredible conquest of height under vaults in Gothic architecture during the 12th and 13th centuries. This multi-partner project is part of the CNRS - Ministry of Culture Notre-Dame scientific program. Understanding the construction methods that led to an increase in the height of Gothic cathedral vaults will involve humanities and social sciences (history of architecture, built heritage archaeology, archaeometry) as well as engineering sciences (materials science, geophysics, civil engineering, structural analysis), relying in particular on advanced numerical modeling of the studied structures based on the discrete and/or continuous mechanical approaches.

Thesis Objectives

Three questions related to construction methods will be addressed in this thesis:

1. What is the probable construction stages of a span in the chevet of Notre-Dame?
2. What initial buttressing system was put in place during the construction of the structure?
3. What architectural and/or material parameters allowed for the construction of increasingly higher vaults? A comparative mechanical analysis of the cathedrals of Sens, Chartres, Bourges, and Amiens will be undertaken to answer this question.

The objective of the thesis is to provide mechanical and structural insights into these issues. Nonlinear mechanical modeling using the finite element method (FEM) and/or discrete element method (DEM) will be employed. This will involve step-by-step mechanical modeling of the various construction stages of a span, from foundations to vaults, in order to anticipate the vertical settlements of each architectural element during construction and thus faithfully reconstruct the actual construction scenario. The implementation of discrete element modeling will shed new light on these questions by considering the interactions between masonry and construction devices such as centering arch formwork and wooden buttresses. The equilibrium states obtained (stresses and displacements simulated in the structure, forces in temporary buttressing devices) will be analyzed at each stage of the construction. The mechanical data

generated, including potential damage and the verticality of the gouttereau walls, will provide insights into the mechanical feasibility of the proposed construction phases. Based on this, the probability of different initial buttressing scenarios for Notre-Dame will be studied, including the simulation of structural modifications made to the building to achieve its current configuration (post-1300). Finally, the parameters (architectural and/or material) that allowed for the construction of increasingly higher vaults will be investigated. This will focus on identifying the construction arrangements that facilitated the quest for height under vaults among comparative structures, such as (i) vault thickness, (ii) performance of buttressing systems (abutments, flying buttresses, and mechanisms for transferring vault thrusts), and (iii) the abandonment of tribunes in favor of higher collateral aisles.

Expected skills

- Strong skills in nonlinear mechanics, numerical simulation, and structural modeling using finite element or discrete element methods
- Proficiency in programming
- Autonomy, ability to propose innovative solutions, good interpersonal skills
- Good level of English and French
- Excellent interpersonal skills, as the thesis will be carried out within a multi-partner project
- Background in Civil Engineering is desirable, with curiosity for heritage structures and historical monuments.

Contact at I2M laboratory, Bordeaux

Thomas Parent (thomas.parent@u-bordeaux.fr)

Stéphane Morel (stephane.morel@u-bordeaux.fr)

Contact at LMGC laboratory, Montpellier

Frédéric Dubois (frederic.dubois@umontpellier.fr)