



École nationale supérieure
d'architecture Paris-Malaquais



Doctorant : **Paul Nougayrede**

Laboratoire de recherche : Laboratoire Géométrie Structure Architecture - ENSA Paris Malaquais

École doctorale : Ville, Transports et Territoires (VTT), Université Paris-Est Sup

Sous la direction de : Thierry Ciblac, Professeur (GSA, ENSA Paris-Malaquais)

Titre de la thèse : **Analyse et conception des structures clavées : démarches théorique et expérimentale**

Résumé :

Le contexte actuel engage les différents acteurs du domaine de l'architecture et de la construction à réinterroger de plus en plus les méthodes de conception et les techniques de production architecturales, au regard des problématiques liées au changement climatique et à la raréfaction de certaines ressources. Dans cette optique, la réhabilitation de l'utilisation du matériau pierre par rapport aux matériaux dits contemporains semble bénéficier d'un intérêt grandissant, depuis quelques décennies, pour plusieurs raisons : qualités mécaniques, durabilité importante, potentielle ressource de proximité. On s'intéresse notamment aux structures clavées, c'est-à-dire constituées de claveaux en pierre, géométriquement déterminés, taillés et appareillés.

Ce type de structures constitue une importante proportion du patrimoine bâti historique : arcs, voûtes, dômes, plates-bandes, etc. Leurs propriétés mécaniques fascinantes font encore aujourd'hui l'objet d'une grande diversité de travaux de recherches qui mettent en œuvre différentes approches pour l'étude de leur stabilité, selon les cas. La modélisation avancée de ces monuments permet ensuite d'alimenter une réflexion poussée sur la conception de typologies de structures en pierre inédites (structures mixtes, structures réciproques, collages, optimisation de la forme, de l'utilisation de la matière) et plus seulement sur le diagnostic mécaniques de l'existant.

Pour cela, deux types de modélisations dites bloc à bloc sont implémentées dans ce travail. La Méthode des Éléments Finis (MEF) permet de simuler de manière détaillée les déformations et contraintes dans les blocs et dans les joints de mortier, via des routines mathématiques solidement ancrées dans la recherche structurelle depuis les tout premiers ordinateurs. Une modélisation avancée par la MEF est notamment réalisée dans le cadre du chantier scientifique pour l'évaluation de la stabilité des voûtes de la cathédrale Notre Dame de Paris, suite à l'incendie de 2019.

L'utilisation conjointe de la modélisation par Analyse Limite (AL) permet de contourner les difficultés inhérentes à la MEF : gourmandise en ressources de calculs, implémentation et traitement des résultats

complexes. L'AL permet, au contraire, de déterminer relativement aisément et rapidement un domaine de stabilité à partir des seules hypothèses de géométrie, des critères de rupture et de chargements extérieurs. L'application de cette méthode a trouvé écho dans une longue tradition d'études des structures en maçonneries patrimoniales qui ont ainsi pu faire les preuves de son efficacité, malgré un compromis sur la précision des réponses qu'elle permet de donner selon les cas, relativement à la MEF. On se propose donc d'implémenter numériquement les approches en AL de la manière la plus générale possible en s'appuyant sur des outils de résolutions mathématiques avancés, dans le but de rendre son utilisation accessible au plus grand nombre.