

N° d'ordre : D -

THESE

présentée

devant l'Institut National des Sciences Appliquées de Rennes

en vue de l'obtention du

DOCTORAT

spécialité : Génie civil

par M Mohamad MOUSSA

Intitulé : Analyse Limite 2D/3D de la Maçonnerie Discrete : Modélisation Théorique, Benchmarking des Implémentations Numériques et Application aux Structures Réelles.

Directeur de Thèse : Fekri MEFTAH

Date, heure et lieu de soutenance : Le 29 janvier 2026 à 9h, à l'amphi GC du bâtiment 7

Membres du jury (nom, prénom, titre et établissement de rattachement, fonction)

DUPRAT Frederic, Professeur des Universités, INSA Toulouse, Rapporteur

ACARY Vincent, Directeur de Recherche, INRIA Grenoble, Rapporteur

LOURENCO Paulo, Full Professor, Université de Minho (Portugal), Examineur

RAGUENEAU Frédéric, Professeur des Universités, EPF Sceaux, Examineur

COLAS Anne-Sophie, Ingénieure-Chercheuse (HDR), UGE Lyon, Examinatrice

MEFTAH Fekri, Professeur des Universités, INSA Rennes, Directeur de Thèse

FERRADI Mohammed-Khalil, Maître de Conférences, UM6P (Maroc), Co-

encadrant

FLISCOUNAKIS Agnès, Maître de Conférences Associée, INSA Rennes, Invitée

RESUME DE LA THESE

Il est aujourd'hui nécessaire d'étudier les structures en maçonnerie existantes en vue de leur requalification, afin de garantir leur intégrité pour des usages présents et futurs, en particulier en raison de leur vieillissement. Cela requiert des outils d'analyse adaptés. Ces analyses peuvent être réalisées en considérant la réponse structurelle complète, mais elles peuvent également se concentrer uniquement sur l'état de ruine en étudiant la structure à son état limite. C'est dans ce second contexte que s'inscrit cette thèse. Plus précisément, ce travail présente les développements théoriques et numériques réalisés en 2D et en 3D dans le cadre de l'analyse limite, en adoptant une représentation de maçonnerie discrète à blocs rigides.

Dans ce cadre, nous présentons les approches statique et cinématique de l'analyse limite, formulées sous la forme de problèmes d'optimisation. Ces approches tiennent compte des différents mécanismes de ruine au niveau des joints qui gouvernent la ruine des maçonneries, notamment l'écrasement de joints. Ce dernier est défini en 3D à l'aide d'un critère de ruine de type cône du second ordre, tandis qu'en 2D il est traité au moyen d'un critère quadratique pouvant également être remplacé par son approximation multilinéaire. En se focalisant sur ce mécanisme de ruine, la démarche de dualisation --- qui présente le lien naturel entre les deux approches d'analyse limite --- est également détaillée. Cette démarche guide la dérivation directe d'une approche à partir de l'autre. Une comparaison théorique et numérique entre les deux approches est ensuite présentée. Elle montre qu'en 3D, les deux approches conduisent à la même charge de ruine, tandis qu'en 2D leurs résultats peuvent différer, nécessitant dans certains cas la résolution conjointe des deux. Les résultats indiquent également qu'en 2D, bien que les approches soient équivalentes en termes de charge de ruine, leur difficulté numérique peut différer et le choix de l'approche à privilégier résoudre dépend alors du cas étudié.

Ce travail présente également des approches qui étendent le cadre de l'analyse limite aux lois d'écoulement non associées, en 2D comme en 3D. En 2D, une étude approfondie est menée afin de proposer un cadre numérique adapté à une approche non associée. Cette étude, conduite à travers un benchmark de huit solveurs d'optimisation non linéaire, démontre l'efficacité d'une stratégie de résolution basée sur des termes de pénalisation et identifie IPOPT comme un solveur adapté. Les résultats prometteurs obtenus en 2D motivent l'extension future de cette étude en 3D.

Les différents développements présentés dans ce travail sont implémentés dans l'outil numérique 2D/3D Gavrinis. Gavrinis est évalué aussi bien sur des cas académiques que dans des études d'ingénierie avancées portant sur des structures à l'échelle réelle.