

Résumé

Cette thèse s'inscrit dans le cadre du développement de méthodes numériques innovantes pour le dimensionnement et l'optimisation des structures de génie civil. L'optimisation de l'utilisation de matériaux de construction, notamment dans le cas des structures en béton armé, présente aujourd'hui un enjeu écologique majeur. Cette optimisation nécessite néanmoins une compréhension fine du comportement à la ruine des structures. Toutefois, les outils standards de calculs non-linéaires par éléments finis sont trop coûteux et pas assez robustes pour une utilisation courante par l'ingénieur-structure.

Les approches de dimensionnement par la théorie de l'analyse limite/calcul à la rupture bénéficient aujourd'hui de solveurs d'optimisation très efficaces, rendant leur mise en œuvre numérique appropriée pour l'analyse de structures complexes. Peu de travaux se sont néanmoins intéressés à leur extension au cadre de l'optimisation de forme. Nous proposons donc une formulation générique consistant à trouver la répartition de matière pour laquelle la capacité portante de la structure est maximale, compte-tenu du choix d'un critère de résistance du matériau et d'une fraction volumique maximale de matière dans un domaine de calcul fixe. Le problème est convexifié en considérant un champ fictif continu de densité de matière et résolu à l'aide de solveurs d'optimisation conique. Nous proposons également une formulation alternative consistant à trouver la répartition de matière de volume minimal telle que la structure supporte un chargement imposé.

Dans une deuxième partie, nous étendons cette approche à la prise en compte de plusieurs matériaux, traitant le cas de l'optimisation de renforts dans une phase "matrice" fixée ou celle de deux phases de matériaux de résistances distinctes. On discute en particulier différentes possibilités de modélisation via le choix des critères de résistances : caractère uni-axial, anisotropie imposée, séparation des comportements en traction et compression, etc.

Ces développements ouvrent la voie à une utilisation pour les structures en béton armé, en revisitant notamment la méthode des Bielles-et-Tirants (BT) couramment utilisée pour l'analyse des structures massives. En partenariat avec Setec Tpi, nous menons une étude comparative des capacités de notre approche à générer des schémas BT de façon automatique et cohérente vis-à-vis des règles de l'Eurocode 2.

Mots-clés : optimisation topologique, analyse limite, éléments finis, béton armé, bielles et tirants, optimisation conique.

Abstract

This work contributes to the development of innovative numerical methods for designing and optimizing civil engineering structures. Optimizing construction material consumption, especially regarding reinforced-concrete structures, is today a key ecological challenge. Yet, structural optimization requires a fine understanding of the behavior of structures near their collapse state. Standard numerical tools such as nonlinear finite-elements are however too costly and not robust enough for a daily use by structural engineers.

Limit analysis/yield design methods benefit today from very efficient convex optimization solvers which make their numerical implementation a very interesting alternative to the failure analysis of complex structures. However, very few works addressed their extension to a structural optimization framework. We thus propose a generic formulation consisting in finding the optimal material distribution for which the structural load-bearing capacity is maximal, accounting for the choice of a material strength condition and a maximal volume fraction in a fixed computational domain. The problem is convexified through the use of a fictitious continuous density field and solved using conic optimization solvers. We also propose an alternative formulation aiming at finding a minimal-volume configuration, able to sustain an imposed loading.

In a second part, we extend this approach to the consideration of multiple materials, tackling the optimization of reinforcements in a fixed "matrix" phase or that of two phases with distinct strength properties. In particular, we discuss different modeling strategies depending on the choice of the material strength criteria : uni-axial behavior, imposed anisotropy, distinction between tensile and compressive behaviors, etc.

Finally, these developments pave the way to their use in the context of reinforced-concrete structures, thereby revisiting the Strut-and-Tie (ST) method widely used for the analysis of massive structures. In collaboration with Setec Tpi, we perform a comparative study of method ability to automatically generate ST models, consistently with Eurocode 2 design norms.

Keywords : topology optimization, limit analysis, finite elements, reinforced concrete, strut-and-tie, conic programming.