

Ecole doctorale SMAER

Sujet de thèse 2014

à l'Institut d'Alembert - UPMC/CNRS UMR 7190

Contact

Laboratoire : Institut Jean Le Rond d'Alembert - Equipe MISES

Etablissement de rattachement : CNRS UMR 7190 - UPMC

Directeur de thèse et section CNU :

Boris Desmorat (MC HDR, CNU 60)

email : boris.desmorat@upmc.fr

Tel : 01 44 27 71 90

Web : www.dalembert.upmc.fr/home/desmorat

Titre de la thèse : Optimisation topologique de structures élasto-plastiques endommageables anisotropes

Le sujet peut être publié sur le site web de l'ED SMAER : OUI

Résumé

Afin de déterminer la répartition optimale de matière dans un volume de conception donné afin d'obtenir les meilleures performances possibles, de nombreux outils numériques d'optimisation topologique sont aujourd'hui déployés dans l'industrie au travers de codes commerciaux. Dès que le comportement des matériaux considérés n'est plus élastique, les méthodes perdent fortement en robustesse, ou ne sont tout simplement pas disponibles.

Un domaine encore peu traité dans la littérature est celui de l'optimisation topologique de structures endommageables. Il est en effet complexe de mettre en œuvre un algorithme d'optimisation numériquement réaliste lorsqu'un simple calcul de structure est très coûteux numériquement (sous chargement cyclique notamment). De plus, les comportements structuraux obtenus en considérant un matériau élasto-plastique endommageable sont difficiles à modéliser (dissymétrie de comportement en traction-compression induite, anisotropie initiale et/ou induite).

Dans cette thèse, nous proposons d'étendre les domaines d'application de méthodologies d'optimisation topologique de structures élastiques non-linéaires (an)isotropes développées au sein du laboratoire ces dix dernières années à la prise en compte de l'endommagement. Deux points de vue seront abordés au cours de cette thèse : l'optimisation de la tenue mécanique et l'optimisation de la rigidité structurale, en étudiant tout particulièrement le lien complexe entre anisotropie et endommagement.

Contexte général

L'optimisation topologique consiste, pour une structure isotrope, à déterminer la répartition optimale de matière dans un volume de conception donné afin d'obtenir les meilleures performances possibles [1, 2]. Les outils numériques permettant de réaliser de telles tâches sont aujourd'hui déployés dans l'industrie au travers de nombreux codes commerciaux. Des difficultés théoriques et numériques restent présentes dès lors que l'on souhaite prendre en compte des matériaux à lois de comportement non-linéaires. Le travail de recherche proposé considère la maximisation de la rigidité et de la tenue mécanique d'une structure élasto-plastique endommageable.

Contexte scientifique

Avec une rigidité structurale mesurée par le travail des efforts extérieurs (ou compliance), divers travaux réalisés au sein du laboratoire concernent l'optimisation structurale avec comportements non-linéaires : élasticité non-linéaire, élasto-plasticité, élasto-plasticité cyclique avec endommagement. Il a d'abord été démontré comment étendre l'algorithme d'optimisation des directions alternées (initialement introduit dans le cadre de l'élasticité linéaire) à une classe complète de comportements élastiques non-linéaires : les lois de comportement dérivant de potentiels positivement homogènes qui assurent la proportionnalité entre compliance et énergie de déformation. Des cas particuliers inclus dans cette famille de comportement sont les lois de comportement dissymétriques en traction compression (application aux composite [3]), les lois de comportement de type puissance et les lois de comportement d'interface (contact unilatéral sans frottement [4]).

En généralisant cet algorithme d'optimisation à des lois de *comportement élastiques non-linéaires à seuil*, il a été ensuite possible de traiter le problème d'optimisation en *fatigue à faible nombre de cycles pilotée par l'endommagement* d'une structure constituée d'un matériau isotrope *élasto-plastique* à écrouissage cinématique linéaire [5]. En faisant les hypothèses de découplage entre plasticité et endommagement (calcul de l'endommagement par cycle en post processeur d'un calcul élasto-plastique) et de chargement proportionnel, il est possible de définir analytiquement une loi de comportement élastique non-linéaire à seuil reliant amplitude de contraintes et de déformations, utilisable avec l'algorithme d'optimisation.

Originalité du projet

Les études proposées, applicables à une large classe de matériaux (allant des matériaux métalliques aux bétons) sont de nature exploratoire dans le domaine de l'optimisation topologique de structures endommageables encore peu traité dans la littérature. Pour des structures élasto-plastiques, les principaux points de nouveautés seront la prise en compte de *l'endommagement* (sous chargement monotone ou cyclique), de l'anisotropie initiale et/ou induite par l'endommagement, ainsi que de la dissymétrie de comportement induite par l'endommagement au sein d'une démarche d'optimisation topologique.

Intégration du sujet au sein des thématiques de l'équipe MISES

Le sujet de thèse présenté recoupe les mots-clés (optimisation, anisotropie, endommagement, comportement des matériaux) de deux des trois thèmes fédérateurs de l'équipe mises (Structures & Micromécanique). www.dalembert.upmc.fr/mises

Objectifs

Les deux objectifs scientifiques principaux de la thèse sont le développement de méthodologies d'optimisation topologique

1. de la rigidité et de la tenue en fatigue pilotée par l'endommagement d'une structure élasto-plastique sous chargement cyclique (les premiers travaux se concentreront sur le cas d'un matériau homogène isotrope, la finalité de la thèse étant le traitement du cas des matériaux homogènes anisotropes).
2. de la rigidité d'une structure élasto-plastique endommageable sous chargement monotone en tenant compte de l'anisotropie et du comportement dissymétrique en traction-compression induits par l'endommagement.

L'objectif numérique principal est la définition d'un outil de calcul performant en terme de temps de calcul, ce qui peut être obtenu à l'aide de l'algorithme des directions alternées, qui ne nécessite que des calculs de sensibilité locaux, résolus de façon analytique dans la plupart des cas (une comparaison avec des méthodologies d'optimisation plus classiques sera effectuée).

Programme détaillé

Cas d'un matériau homogène isotrope. Le point de départ sera l'approche d'optimisation topologique généralisée à des lois de comportement élastiques non-linéaires à seuil.

Sous *chargement monotone*, certaines lois de comportement élasto-plastiques tombent dans ce cadre (loi de Hencky-Mises) et peuvent donc être prises en compte. La mise en œuvre de l'algorithme des directions alternées sera comparée aux approches utilisant des calculs de gradients par la méthode de l'état adjoint [6]. Le cas particulier de lois élasto-plastiques à écrouissage cinématique linéaire sera spécifiquement étudié, en considérant des modules plastiques faibles, afin de s'approcher du cas de la plasticité parfaite. Les résultats obtenus seront comparés à une étude alternative combinant analyse limite et algorithme d'optimisation.

Pour l'optimisation topologique avec *chargements cycliques*, le cas d'un comportement élasto-plastique avec écrouissage linéaire a été traité en supposant un découplage entre élasto-plasticité et endommagement pour le calcul de la durée de vie. Afin d'améliorer le modèle prédictif de la durée de vie en fatigue, il est envisagé d'utiliser une loi de comportement élasto-plastique avec écrouissage cinématique non-linéaire non saturant [7] en suivant une démarche similaire.

Prise en compte de l'anisotropie. Dans un second temps, la prise en compte de l'anisotropie dans une approche d'optimisation topologique d'une structure constituée d'un matériau élasto-plastique endommageable sera considérée. Il ne s'agira alors plus seulement de déterminer la distribution optimale du matériau, mais aussi la distribution de l'anisotropie.

En supposant à nouveau le découplage entre élasto-plasticité et endommagement pour le calcul de la durée de vie afin de rester dans le cadre des lois de comportement élastiques non-linéaires à seuil, l'extension au cas d'un chargement cyclique devra être repensée compte tenu de l'hypothèse de chargement proportionnel utilisée dans le cas isotrope.

Prise en compte du couplage entre élasto-plasticité et endommagement. La prise en compte du couplage entre élasto-plasticité et endommagement implique l'utilisation d'un algorithme d'optimisation différent de celui des directions alternées. Sous chargement monotone, une approche par calcul de gradient à l'aide l'état adjoint est envisagée. Les deux principaux thèmes qui seront traités sont la prise en compte de l'anisotropie et de la dissymétrie de comportement en traction-compression induites par l'endommagement. Une méthodologie d'optimisation basée sur les modèles d'endommagement utilisant la décomposition de Kelvin [8] ou bien la décomposition polaire [9] sera développée.

Compétences recherchées

L'étudiant recherché possèdera des compétences numériques de programmation sous Matlab et d'utilisation de codes EF ainsi qu'une connaissance approfondie des lois de comportement élasto-plastique.

References

- [1] G. Allaire. *Conception optimale de structures*, volume 58 of *Mathématiques et Applications*. Springer, 2007.
- [2] M.P. Bendsoe and O. Sigmund. *Topology Optimization. Theory, Methods and Applications*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2003.
- [3] B. Desmorat and G. Duvaut. Compliance optimization with nonlinear elastic materials: Application to constitutive laws dissymmetric in tension-compression. *European Journal of Mechanics A/Solids*, 22:179–192, 2003.
- [4] B. Desmorat. Structural rigidity optimization with frictionless unilateral contact. *International Journal of Solids and Structures*, 44(3-4):1132–1144, 2007.
- [5] B. Desmorat and R. Desmorat. Topology optimization in damage governed low cycle fatigue. *Comptes-Rendus Mécanique*, 336(5):448–453, 2008.
- [6] P. Michaleris, D.A. Tortorelli, and C.A. Vidal. Tangent operators and design sensitivity formulations for transient non-linear coupled problems with applications to elasto-plasticity. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 37(14):2471–2499, 1994.
- [7] R. Desmorat. Non-saturating nonlinear kinematic hardening laws. *Comptes-Rendus Mécanique*, 338(3):146 – 151, 2010.
- [8] R. Desmorat. Décomposition de kelvin et concept de contraintes effectives multiples pour les matériaux anisotropes. *Comptes-Rendus Mécanique*, 337:733–738, 2009.
- [9] B. Desmorat and P. Vannucci. An alternative to the kelvin decomposition for plane anisotropic elasticity. *Mathematical Methods in the Applied Sciences*, doi : 10.1002/mma.3059, 2014.