

Sujet de thèse 2019-2022

Centre des Matériaux Mines ParisTech - Transvalor

Méthode de régularisation automatique pour la simulation par éléments finis de la plasticité et de l'endommagement en grandes déformations

Encadrement Mines ParisTech : Samuel Forest, Jacques Besson, Kais Ammar, Basile Marchand, Cristian Ovalle

Encadrement Transvalor : Nikolay Osipov, Stéphane Quilici

Mots-clés : Plasticité, Transformations finies, Lois de comportement non linéaires, Modèles à gradient, Localisation de la déformation plastique, Endommagement ductile

Lieu : Mines ParisTech Centre des Matériaux, 91003 Evry

<http://www.mat.mines-paristech.fr/Recrutements/Theses/>

Contact : samuel.forest@mines-paristech.fr

Contexte : La simulation numérique par éléments finis des phénomènes de localisation de la déformation plastique et de l'endommagement s'accompagne en générale d'une forte dépendance des résultats par rapport au maillage (taille et forme des éléments) et aux algorithmes utilisés. Cette difficulté est la manifestation du caractère mal posé du problème aux limites en présence d'un fort adoucissement, notamment à cause de la perte d'ellipticité des équations en jeu. Des méthodes dites de régularisation ont été proposées en se basant sur la mécanique des milieux continus généralisés : milieux à gradient d'ordre supérieur, milieux à gradient de variable interne, milieux de Cosserat ou micromorphes, méthode des champs de phase. Elles s'appuient sur l'introduction de longueurs caractéristiques associées à la dimension physique caractéristique des zones de localisation (taille de grain, espacement entre cavités, etc.). Aucun code par éléments finis industriel ou de recherche ne dispose, à ce jour, d'un outil systématique permettant de régulariser de telles simulations et qui soit pratiquement "transparent" pour l'utilisateur. Une telle approche doit d'emblée intégrer l'élastoplasticité en transformations finies.

Objectif : Une méthode théorique et numérique, s'appuyant sur les théories actuelles pour les milieux micromorphes et à gradient, sera proposée et implémentée afin de régulariser un modèle élastoplastique endommageable laissé au choix de l'utilisateur. L'utilisateur devra fournir un minimum d'informations (paramètres) supplémentaires par rapport au modèle original, au minimum une ou plusieurs longueurs caractéristiques. La cohérence et la robustesse du modèle régularisé seront garanties par la formulation thermodynamique de la modification du modèle original grâce à l'emploi du potentiel énergie libre et d'un potentiel de dissipation adapté.

Une première étape indispensable à ce travail est une formulation cohérente et robuste du modèle d'origine en grandes transformations. La plupart des codes existants s'appuient sur l'utilisation de dérivées objectives ne garantissant pas l'existence d'un potentiel d'élasticité pourtant requise par le premier principe de la thermodynamique. En conséquence, des artefacts sont possibles pour des chargements cycliques et/ou thermiques. On substituera donc à ces lois une méthode systématique de formulation des lois de comportement en transformations finies s'appuyant sur la décomposition multiplicative du gradient de la transformation et le tenseur des contraintes de Mandel. Les informations requises pour l'extension des lois formulées en petites déformations au cas général sont le choix du critère ou du potentiel viscoplastique, les types d'écrouissage et le taux de rotation des

directeurs de la matière (*plastic spin*). Par défaut (cas isotrope), ce taux est nul. Le cas de l'écroutissage cinématique fera l'objet d'une attention particulière en raison de l'anisotropie induite.

Déroulement :

Le travail se déroulera en trois étapes principales (non nécessairement successives) :

1. Formulation et implémentation d'une méthode systématique d'extension des lois de comportement écrites en petites déformations au cas des transformations finies, par une approche à deux potentiels.
2. Formulation d'une méthode de régularisation automatique d'un modèle élastoplastique endommageable, par une approche à deux potentiels.
3. Application à deux situations physiques : endommagement ductile isotrope (régularisation des extensions du modèle de type Gurson / Rousselier), et cas anisotrope de la plasticité du polycristal (approche multisurface). Des confrontations à des résultats expérimentaux seront réalisées pour la validation de l'approche (tôles d'acier et d'aluminium, dans les cas isotropes anisotropes).

Les développements se feront dans le code Zset www.zset-software.com codé en C++. Les algorithmes adéquats devront être proposés pour une intégration implicite (méthode de Newton) des lois de comportement. L'utilisation dans le cas de formulations explicites sera également envisagée.

Production :

Le sujet se prête particulièrement à la publication d'articles dans des revues internationales à comité de lecture dans le domaine de la mécanique numérique et de la mécanique des matériaux.

La code produit sera utilisable pour les applications industrielles, notamment celles traitées par le partenaire Transvalor.

Des validations expérimentales seront envisagées autant que possible.

References :

S. Forest and R. Sievert, *Elastoviscoplastic constitutive frameworks for generalized continua*, Acta Mechanica, vol. 160, pp. 71-111, 2003.

http://matperso.mines-paristech.fr/Donnees/data04/420-Forest_Sievert_ActaMech03.pdf

S. Forest, *Nonlinear regularization operators as derived from the micromorphic approach to gradient elasticity, viscoplasticity and damage*, Proc. R. Soc. A, vol. 472, pp. 20150755, 2016.

<http://matperso.mines-paristech.fr/Donnees/data13/1309-rspa16.pdf>

C. Ling, S. Forest, J. Besson, B. Tanguy and F. Latourte, *A reduced micromorphic single crystal plasticity model at finite deformations. Application to strain localization and void growth in ductile metals*, International Journal of Solids and Structures, vol. 134, pp. 43-69, 2018.

<http://matperso.mines-paristech.fr/Donnees/data14/1438-chaoling18ijss.pdf>

E Lorentz, J Besson, V Cano, *Numerical simulation of ductile fracture with the Rousselier constitutive law*, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 197, 1965-1982, 2008.

Y. Zhang, E. Lorentz, J. Besson, *Ductile damage modelling with locking-free regularised GTN model*, International Journal for Numerical Methods in Engineering 113, 1871-1903, 2018.