

**Title:** Damage-fracture transition by an Eikonal-based gradient-type formulation for damage (-plastic) models

**Keywords:** Damage, Plasticity, Localization, Nonlocal, Eikonal, Regularization

**Abstract:** To properly handle material failure, one needs to be able to predict, for a given loading, the possible initiation and propagation of cracks. Aside from the Linear Elastic Fracture Mechanics, which only deals with existing cracks, this can be achieved through continuum damage mechanics, which also accounts for the associated progressive loss of stiffness. However, despite their advantages, those models suffer from a certain number of deficiencies, especially when handling strain localization. As it is, while local damage models suffer from spurious mesh dependency, the nonlocal ones, which were developed to address this issue, fail to make a highly damaged zone equivalent to a crack.

A nonlocal Eikonal-based formulation with damage-dependent interactions has been shown to successfully address these issues, though it still suffers from the drawbacks inherent to integral-type formulations. After proposing a definition of what is called here a “good” damage model, this work focuses on a new gradient-type formulation that derives from this approach and can thus be expected to address the issues associated with both local and nonlocal models.

This work first presents the non-intrusive implementation in Abaqus of the formulation associated with an isotropic damage model, which is used to study its properties in a one-dimensional

setting. This formulation is shown to have properties similar to those of a phase-field-based formulation, both successfully addressing the damage-fracture transition though they exhibit a rather brittle behaviour.

It then deals with the introduction of plasticity, i.e. using a damage-plastic model instead of a pure damage one, and how it could be used to address the brittleness issue while keeping the properties of the Eikonal-based approach. A one-dimensional study is thus conducted, focusing on the theoretical responses obtained with both models associated with either fixed or shrinking localization area. Based on its results, one can conclude that introducing permanent strains would reduce the brittleness linked to the shrinking of the localization area and the associated unloading.

Both damage and damage-plastic formulations are then implemented in the finite element code OOFEM, which is used to confirm these preliminary observations in a three-point-bending setting. It is then shown that both formulations can be used to model structural failure by providing mesh-independent results where a highly damaged zone is equivalent to a crack. Moreover, while the response associated with the pure damage model remains somewhat brittle, the issue is addressed by the damage-plastic one.



**Titre:** Transition endommagement-fissuration par une formulation eikonale pour les modèles d'endommagement avec et sans plasticité

**Mots clés:** Endommagement, Plasticité, Localisation, Nonlocal, Eikonale, Régularisation

**Résumé:** Modéliser la ruine des matériaux nécessite d'être capable de prédire pour un chargement donné l'initiation et la possible propagation de fissures. En dehors de la mécanique linéaire de la rupture qui ne traite que des fissures existantes, ceci peut être réalisé en utilisant la mécanique continue de l'endommagement qui permet également de prendre en compte la perte de rigidité associée. Cependant, malgré leurs avantages ces modèles présentent un certain nombre de défauts, notamment en ce qui concerne la localisation des déformations. En effet, alors que les modèles d'endommagement locaux présentent une dépendance pathologique au maillage, les modèles non locaux développés pour résoudre ce problème ne parviennent pas à rendre une zone fortement endommagée équivalente à une fissure.

Une formation non locale basée sur une approche eikonale avec des interactions dépendantes de l'endommagement s'est avérée adaptée pour palier ces défauts, même si elle conserve les inconvénients inhérents aux approches intégrales. Après avoir proposé une définition de ce qu'on qualifiera ici de « bon » modèle d'endommagement, ce travail se concentre sur une nouvelle formulation de type gradient qui dérive de cette approche, et dont on peut espérer qu'elle résolve les problèmes associés aux modèles locaux et non locaux.

Cette thèse présente dans un premier temps l'implémentation non-intrusive dans Abaqus de la formulation associée à un modèle d'endommagement isotrope qui est utilisée pour étudier ses propriétés dans un cas unidirection-

nel. Il est ainsi démontré que cette formulation a des propriétés similaires à celles d'une formulation basée sur les approches de type champs de phase, et que malgré un comportement plutôt fragile les deux formulations sont à même de gérer la transition endommagement-fissuration.

Elle traite ensuite de l'introduction de plasticité, i.e. de l'utilisation d'un modèle couplant endommagement et plasticité au lieu d'un modèle d'endommagement pur, et de la manière dont elle pourrait être utilisée pour résoudre le problème de la fragilité tout en conservant les propriétés de l'approche dite eikonale. Une étude unidimensionnelle se concentrant sur les réponses théoriques obtenues avec une zone de localisation fixe ou se rétrécissant est donc menée, et les résultats obtenus avec les deux modèles comparés. Les observations ainsi réalisées permettent de conclure que l'introduction de déformations permanentes réduirait la fragilité liée au rétrécissement de la zone de localisation et au déchargement associé.

Les deux formulations associées aux modèles d'endommagement avec et sans plasticité sont ensuite implémentées dans le code éléments finis OOFEM qui est utilisé pour confirmer ces observations dans le cas de la flexion trois points. On peut ainsi montrer que les deux formulations peuvent être utilisées pour modéliser la ruine d'une structure en fournissant des résultats indépendants du maillage où une zone fortement endommagée est bien équivalente à une fissure. De plus, alors que la réponse associée au modèle d'endommagement pur reste relativement fragile, ce problème est résolu par l'utilisation du modèle couplant endommagement et plasticité.

