



**HAL**  
open science

# Modélisation numérique explicite de l'initiation et de la propagation de fractures rocheuses

Jabrane Hamdi

► **To cite this version:**

Jabrane Hamdi. Modélisation numérique explicite de l'initiation et de la propagation de fractures rocheuses. Rapport Scientifique INERIS, 2018, 2017-2018, pp.48-49. ineris-02044871

**HAL Id: ineris-02044871**

**<https://ineris.hal.science/ineris-02044871>**

Submitted on 21 Feb 2019

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Modélisation numérique explicite

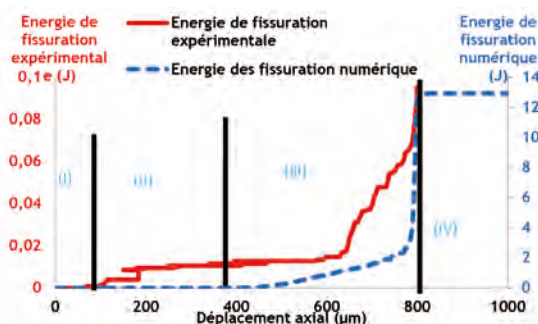
## de l'initiation et de la propagation de fractures rocheuses

Contributeur  
Jabrane HAMDJ

La fracturation des milieux rocheux soulève la question de performance et de sécurité dans le contexte d'exploitation du sous-sol : mines, stockages souterrains d'hydrocarbures ou de déchets, géothermie profonde, etc. Le développement d'outils de modélisation numériques permettant d'étudier, d'une manière satisfaisante, l'initiation et la propagation des fractures dans les roches est nécessaire pour connaître les phénomènes susceptibles d'intervenir et d'évaluer leurs conséquences.

L'étude de l'initiation et de la propagation des fractures fait appel à la mécanique linéaire de la rupture. Les méthodes numériques dédiées à la simulation de la fracturation sont basées sur la comparaison de l'évolution de certains paramètres, tels que le taux de restitution de l'énergie et/ou le facteur d'intensité des contraintes avec des valeurs seuils de ces paramètres (taux de restitution critique, facteur d'intensité critique aussi appelé ténacité), qui sont des valeurs intrinsèques au matériau rocheux. Sur la base de ces critères, des méthodes numériques ont été développées pour étudier la fracturation induite par les ouvrages souterrains et leur exploitation et/ou son interaction avec la fracturation naturelle préexistante. La méthode de modélisation numérique aux éléments finis étendus et la méthode des éléments discrets sont aujourd'hui les plus à même de traiter cette problématique.

**Figure 1** / Évolution des énergies dissipées par les émissions acoustiques (EA) au cours d'un essai de compression uniaxiale réalisé sur la couche brune du bassin ferrifère lorrain (dédites des EA enregistrées par Wassermann en 2006 et d'une valeur d'impédance de 10 kΩ) et les microfissures numériques.



### Objectif et méthodologie

Une thèse de doctorat menée à l'Ineris a permis de modéliser explicitement l'initiation et la propagation de fractures en intégrant les dimensions mécaniques et énergétiques du phénomène.

En fonction des sollicitations, on distingue habituellement trois modes élémentaires de rupture des roches : le mode I est le mode d'ouverture de la fracture ou d'extension, le mode II est associé à la rupture en cisaillement plan et le mode III à un cisaillement anti-plan (Figure 1). Le travail de thèse s'est intéressé plus particulièrement à la rupture en mode I, la plus développée dans les roches. D'un point de vue expérimental, elle peut être étudiée à travers différents types d'essais de laboratoire (traction directe, flexion en trois points ou double torsion). À l'échelle de l'ouvrage souterrain, ce mode de rupture se traduit par des fractures d'extension ou de l'écaillage en paroi et en champ proche de l'ouvrage.

En collaboration avec l'équipe « GeoRessources » de l'université de Lorraine, il a été décidé d'adopter le code de calcul aux éléments discrets Yade Open DEM, qui a déjà démontré sa capacité à reproduire le comportement mécanique des roches fragiles ainsi que la propagation des fractures dans le milieu rocheux. Des développements spécifiques ont été apportés à ce code de calcul afin de tenir compte des différentes formes d'énergie intervenant dans le comportement des roches [1;2] : le travail externe, l'énergie potentielle, l'énergie élastique, l'énergie de frottement, l'énergie de rupture, l'énergie cinétique et l'énergie d'amortissement. La validation de la formulation énergétique a été réalisée grâce à la comparaison entre les résultats de la simulation numérique et ceux d'essais de laboratoire.

### Travaux et résultats

La première partie de ce travail a concerné l'étude de la fracturation en mode I à l'échelle du laboratoire. Les différentes composantes de l'énergie (énergies de frottement, de fissuration, etc.) ainsi que le bilan d'énergie ont été intégrés dans le code de calcul Yade. La formulation énergétique a été validée en simulant des essais de laboratoire avec différents chemins de chargement : compression, traction et cisaillement. L'erreur commise sur le

bilan énergétique apparaît faible ; elle varie de 0,1 % à 3 % ce qui est tout à fait satisfaisant.

Un premier cas d'étude traité concerne une expérimentation de « *mine-by test* » réalisée dans un laboratoire souterrain dans le massif de granite du Bonnet au Canada. La simulation numérique reproduit bien l'état de contraintes fortement anisotrope du site (contrainte principale majeure quasi-horizontale d'amplitude 60 MPa, contrainte principale mineure quasi-verticale de 11 MPa et contrainte principale intermédiaire horizontale et parallèle à l'axe du tunnel d'amplitude 45 MPa). Dans la direction subverticale de la contrainte initiale mineure ( $\sigma_3$ ), le modèle proposé prédit une extension de la zone endommagée autour de l'ouvrage de 50 cm, en bonne cohérence avec la fracturation observée *in situ* ou celle prédite par des études numériques antérieures [3]. Les valeurs des ratios de bilan des énergies rapportées au travail des forces externes calculées pour les différentes discrétisations sont quasiment identiques et proches de 2 %. Ce qui constitue un élément de validation des formulations énergétiques implantées dans le code Yade et mises en œuvre à une plus grande échelle.

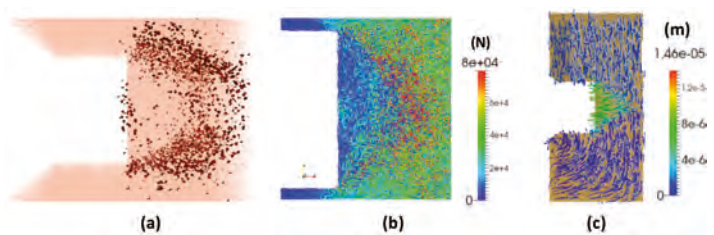
La seconde application à l'échelle d'une structure réelle a été la modélisation d'un pilier d'une mine de fer dans le bassin ferrifère lorrain. La fracturation du pilier a été simulée en conditions de compression uniaxiale (hypothèse souvent admise pour un pilier) jusqu'à atteindre la contrainte verticale prévalant dans le pilier avant l'excavation (estimée sur la base du poids des terrains sus-jacents). Les résultats ont été comparés aux résultats obtenus par Fougeron [4] basés sur une modélisation hybride combinant deux codes de calcul FLAC/PFC2D. Des similitudes qualitatives et quantitatives ont été constatées en termes de champ de déplacement dans le pilier. En revanche, les contraintes (ou efforts) dans le pilier ainsi que le mécanisme de fissuration au cœur du pilier restent différents. Plus précisément, le modèle numérique développé avec le code Yade montre deux modes de fissuration dans le pilier (Figure 2) : (a) écaillage en peau de pilier, (b) deux bandes de rupture s'initiant au niveau des coins du mur et du toit du pilier pour se propager vers le cœur du pilier [1]. La force de contact maximale est 12 fois moins importante dans le cas de la simulation avec Yade.

Ces travaux ouvrent des perspectives pour mieux étudier les conditions de rupture et de propagation de la fracturation autour d'ouvrages souterrains pouvant présenter des risques en termes de sécurité et d'impacts environnementaux.

## ABSTRACT /

Studying the performance of rocks subjected to industrial operations (mines, underground storages, geothermal, etc.) requires a good understanding of their response to varying stress fields up to their failure. Fracturing of rock is one form of energy dissipation that allows to restore the energy balance in the rock material. The aim of this research is to enhance the numerical modeling of the initiation and propagation of cracks or fractures in rocks in order to enhance the capabilities to predict the performance of deep underground structures. A critical review of the approaches developed to tackle this issue has led us to choose the discrete approach and more particularly the numerical code "Yade". Developments have been made to evaluate the different forms of energy dissipation involved in rock behavior. Validation of the energy approach was carried out by simulating laboratory tests. The evolution of the different energy components permitted to verify that the energy balance was correctly evaluated. The energy balance approach was also verified at mesoscopic scale by simulating the underground excavation of a real mine-by-test experiment conducted in the past. Another application was the modelling of an iron ore mine pillar in Lorraine. These applications yield good prospects for better modelling ruptures of the host rock and enhance significantly the security and performance assessment of underground operations.

**Figure 2 /** Simulation numérique d'un pilier des mines de fer lorraine :  
(a) distribution de microfissures prédites dans le pilier ;  
(b) forces aux contacts entre les particules ;  
(c) vecteurs déplacement.



## Références

- [1] Hamdi J. Modélisation explicite de l'initiation et de la propagation de fractures. Thèse de doctorat de l'université de Lorraine, soutenue le 18 décembre 2017.
- [2] Hamdi J.; Souley M.; Scholtès L.; Al Heib M.; Gunzburger Y. 2017b: Assessment of the energy balance of rock masses through discrete element modelling, Eurock 2017, Procedia Engineering 191, pp 442-450.
- [3] Hamdi J.; Scholtès L.; Souley M.; Al Heib M. 2017a: Effect of discretization at laboratory and large scales during discrete element modelling of brittle failure. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 100 (2017) 48-61.
- [4] Fougeron J. (2007). Affaissement et effondrement des mines de fer de Lorraine apport de la modélisation numérique. Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Lorraine.