



HAL
open science

Approche continue-discrète appliquée au comportement en cisaillement d'un joint rocheux

Olivier Nouailletas, Christian La Borderie, Céline Perlot-Bascoules

► To cite this version:

Olivier Nouailletas, Christian La Borderie, Céline Perlot-Bascoules. Approche continue-discrète appliquée au comportement en cisaillement d'un joint rocheux. CFM 2013 - 21ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2013, Bordeaux, France. hal-03439842

HAL Id: hal-03439842

<https://hal.science/hal-03439842v1>

Submitted on 22 Nov 2021

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.

Approche continue-localisée du cisaillement : Implémentation de conditions de contact/frottement à la géométrie d'une fissure dans un modèle d'endommagement

O. NOUAILLETAS^{a,b}, C. LA BORDERIE^a, C. PERLOT^a

a. *Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur Appliquées à la Mécanique et au génie Électrique (SIAME),
Allée du parc Montaury, 64600 ANGLET (FRANCE)*

b. *Laboratoire de Mécanique des Roches et de Géologie Appliquée (LMRGA),
2500 Boulevard de l'Université, J1K2R1 SHERBROOKE, QUÉBEC (CANADA)*

Résumé :

Le comportement au cisaillement d'un joint rocheux est un cas particulier de comportement d'une discontinuité dans un solide. En mécanique des roches, ce problème se caractérise expérimentalement par l'essai de cisaillement direct. Ce test a permis de mettre en évidence le rôle de la rugosité dans le comportement d'un joint sous contraintes combinées normales et tangentielles. La rugosité joue un rôle essentiel et complexe : la complémentarité éventuelle des deux épontes, l'angle que font les facettes avec le plan de cisaillement, la dimension de chacune des facettes, la résistance du matériau sont autant de facteurs qui ont une influence sur le comportement en cisaillement d'un joint. Les modèles macroscopiques utilisent des paramètres moyennés représentant physiquement ces facteurs. Les progrès dans le domaine de la mesure et des simulations numériques permettent désormais de digitaliser les surfaces rugueuses afin de modéliser le problème de la discontinuité à la petite échelle. En attendant que les moyens de calculs nous permettent de résoudre les problèmes posés directement à la petite échelle, les résultats obtenus par les simulations seront d'une grande utilité pour compléter les résultats expérimentaux et atteindre une meilleure compréhension du problème posé. Nous proposons de modéliser ce problème par la méthode des éléments finis. Un modèle d'endommagement isotrope unilatéral couplé à la plasticité est utilisé pour représenter le comportement du matériau alors que les conditions de contact/frottement utilisent une méthode de double multiplicateurs de Lagrange.

Abstract :

The behaviour of a discontinuity in a solid would be studied in the specific case of a rock joint sheared. In rock mechanics, direct shear test is an experimental way to analyse these behaviour. Results of numerous experimental campaigns concluded that roughness is an important parameter in the shear behaviour of a geomaterial joint. Mismatch of the crack lips, slip and size of asperities in relation with the global shape of the joint and material strength are some characteristics that illustrate the complexity of roughness and the importance of its role in the shear behaviour. The macroscopic models used averaged parameters representing physically these factors. The progress in experimental measurement and numerical simulations allow to digitize the rough surfaces in order to model the discontinuity problem at the small scale. Currently, we could not solve directly shearing problems, even at the small scale. But numerical results could complete experimental results to reach a better understanding of the problem. We propose to model this problem by the finite elements method. A model of unilateral isotropic damage coupled to plasticity is used to represent the material behaviour. Sliding is implemented by contact / friction conditions solving with the method of dual Lagrange multipliers.

Mots clefs : cisaillement, endommagement, contact, frottement, modélisation, rugosité, Cast3M.

Keys words : shear, damage, contact, friction, modelling, roughness, Cast3M.

1 Introduction

La problématique de stabilité d'une discontinuité est récurrente en mécanique des roches. De manière expérimentale, elle est illustrée par l'essai de cisaillement direct qui a mis en valeur l'importance de la rugosité [1]. Les lois de comportement en décollant sont cependant limitées en considérant la rugosité comme un paramètre moyen caractérisant les surfaces cisillées. Les progrès de ces dernières décennies permettent de simuler les contacts et les frottements de manière plus locale. Cette approche permet de considérer la géométrie de la surface du joint (mesurée ou générée) comme étant une donnée du problème. La modélisation du cisaillement d'une discontinuité dans un géomatériau nécessite alors celle des conditions de contact/frottement appliquées au niveau des lèvres de la fissure et d'un éventuel endommagement du matériau induit par les frictions entre les aspérités en contact. Les outils numériques existants sont principalement basés sur la méthode des éléments discrets (DEM) et la méthode des réseaux de fracture discrets (DFN). Cependant, la problématique de friction peut aussi être envisagée avec une approche continue à travers la méthode des différences (ou volumes) finies (FDM/FVM), la méthode des éléments finis (FEM) ou encore la méthode des éléments frontières (BEM). Pour compléter cette liste non-exhaustive des méthodes numériques modélisant le comportement d'une discontinuité, des modèles hybrides ont été développés couplant ainsi les deux approches discontinue/continue. Les différentes applications de ces méthodes sont exposées dans [4].

La méthode présentée ici est une approche que l'on peut qualifier de continue du problème, car la gestion du contact/frottement se fait par l'intermédiaire d'un maillage type 'mortar' [2]. Ces éléments agissent comme des conditions aux limites non-linéaires (via les multiplicateurs de Lagrange) appliquées directement aux aspérités se situant de part et d'autre de la fracture. La résolution du contact et du frottement se fait de manière ponctuelle sur chaque élément. La particularité du modèle présenté est le couplage de ces conditions avec un problème non linéaire d'endommagement du géomatériau. Lors d'un essai de cisaillement, toute la surface n'est pas cisillée, seules les aspérités en contact sont soumises à des efforts, entraînant ainsi une contrainte importante ponctuelle qui peut amener les aspérités les plus sollicitées à leur rupture. Les travaux numériques suivants ont pour but de simuler ce phénomène via le code de calcul aux éléments finis Cast3M.

La première partie de cet article porte sur la présentation du modèle de contact/frottement et du modèle d'endommagement implémenté dans Cast3M. La seconde partie présente les résultats obtenus avec un modèle 2D et les premiers résultats du modèle 3D.

2 Modèle de cisaillement : couplage endommagement/frottement

La modélisation aux éléments finis du comportement au cisaillement d'un joint rocheux se traduit par la résolution d'un problème possédant une loi de comportement non-linéaire (modèle élastoplastique endommageable) auquel on impose des conditions aux limites non linéaires (modèle de contact/frottement).

2.1 Loi de comportement non-linéaire : modèle élastoplastique endommageable

Nous avons choisi de modéliser le matériau situé de part et d'autre de la discontinuité comme un matériau élastoplastique endommageable. Le modèle de comportement qui a été initialement développé pour le béton reproduit correctement les non linéarités pour un géomatériau fragile en traction-compression et cisaillement [3]. Un modèle de plasticité de type Nadai (Drucker Prager à deux cônes raccordés) est couplé à l'endommagement en utilisant la contrainte effective, $\bar{\sigma}_{ij}$.

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p, \quad \bar{\sigma}_{ij} = \frac{E}{1+\nu} \varepsilon_{ij}^e + \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \varepsilon_{kk}^e \delta_{ij} \quad (1)$$

La variable endommagement d est un scalaire qui agit différemment sur les parties positive $\langle \bar{\sigma} \rangle_{ij}^+$ et négative $\langle \bar{\sigma} \rangle_{ij}^-$ du tenseur des contraintes de façon à représenter l'effet unilatéral.

$$\sigma_{ij} = (1-d) \langle \bar{\sigma} \rangle_{ij}^+ + (1-d^\alpha) \langle \bar{\sigma} \rangle_{ij}^- \quad (2)$$

On suppose, comme pour le béton, que les extensions sont la cause de la création de l'endommagement qui est calculé à partir de la déformation équivalente définie par Mazars ([6], [7]) :

$$\tilde{\varepsilon} = \sqrt{\langle \varepsilon \rangle_{ij}^+ \langle \varepsilon \rangle_{ij}^+}, \quad d = 1 - \frac{f_t}{E \tilde{\varepsilon}} \exp\left(\frac{h f_t}{G_f} \left(\frac{f_t}{E} - \tilde{\varepsilon}\right)\right) \quad (3)$$

Où f_t est la résistance à la traction, E est le module d'élasticité longitudinal du matériau sain, h représente la taille de l'élément fini et G_f est l'énergie de fissuration. Il est à noter que les paramètres d'écrouissage de l'endommagement et de la plasticité sont liés à la taille de l'élément fini afin d'assurer une dissipation d'énergie constante et indépendante de la taille des mailles. Les paramètres à identifier sont f_t , E , G_f et la valeur de α est choisie de manière à obtenir la bonne contrainte limite en compression f_c .

2.2 Conditions aux limites non linéaires : modèle de contact/frottement

Le modèle de contact/frottement développé sous Cast3M utilise deux algorithmes : un pour le contact et l'autre pour le frottement.

Le contact est un sujet fréquemment relaté dans la littérature sur les éléments finis. De nombreuses méthodes ont été développées ces dernières années. Les travaux de Wrigger [9] décrivent les différentes approches qui existent et discutent de leur domaine de validité. En résumé, la modélisation du contact par les éléments finis se définit par deux caractéristiques. La première est la méthode d'implémentation du contact et du frottement comme conditions aux limites non linéaires du modèle de comportement. L'approche retenue pour nos travaux est une dualisation de ces conditions contact/frottement. Elle consiste à appliquer deux fois la méthode des multiplicateurs de Lagrange lors de la résolution du système d'équations représentant le problème du comportement du matériau (matrice de rigidité). La seconde caractéristique est la méthode de discrétisation utilisée pour modéliser la friction (contact/frottement). Dans notre cas, les éléments générés sont analogues aux éléments 'mortar' [2] et la méthode utilisée est de type point (esclave) segment (maître) en 2D et de type point (esclave) triangle à trois points (maître) pour le 3D [2].

L'algorithme de frottement est une application directe du critère de Coulomb. Il y a frottement (glissement) si la composante tangentielle de la force de contact est supérieure à la force limite qui est égale à la composante normale de la force de contact multipliée par le coefficient de frottement propre aux surfaces, ψ , qui est fonction de l'angle de glissement sur surface lisse, ϕ ($\psi = \tan(\phi)$).

L'intérêt de séparer les itérations des deux algorithmes par la méthode de dualisation, est la résolution du problème en deux temps. La convergence de la procédure 'contact' est assuré sous réserve que la matrice de rigidité hors conditions soit symétrique définie positive. Du fait de la méconnaissance de l'instant de contact initial, l'algorithme de frottement ne converge pas nécessairement. Dans ce cas, sous Cast3M, il est possible de forcer la convergence en relâchant la condition de réaction tangentielle égale à la force limite de frottement. Cette action est possible du fait de la division des problèmes. L'inconvénient est la multiplication du nombre d'inconnues et donc du temps de calcul.

3 Modélisation d'un essai de cisaillement direct

3.1 Première Approche : Modélisation 2D

Les résultats présentés dans ce paragraphe résultent d'une simulation en deux dimensions d'un essai de cisaillement direct réalisé sur un joint en béton à l'Université de Sherbrooke (Québec, CANADA). Les détails du montage expérimental sont décrits dans [8].

La numérisation des surfaces rugueuses réalisée avec un profilomètre laser a permis de modéliser directement la géométrie de la rugosité sous forme de plusieurs profils 2D. Le profil représenté sous Cast3M est parallèle au sens de cisaillement et il passe par le centre de l'échantillon de diamètre 140 mm. Il est discrétisé avec des éléments de type segment deux points. N'ayant pas d'information sur l'emboîtement initial des épontes, l'hypothèse retenue est que les deux lèvres de la fissure coïncident en tous points dès le début de l'essai. Le reste des épontes est discrétisé avec des éléments de type triangles trois points.

L'échantillon est soumis à une pression normale (perpendiculaire au joint) de 0,34 MPa. Une éponte (1) est bloquée suivant les deux directions. La seconde (2) est soumise à un déplacement tangentiel (parallèle au joint) provoquant le cisaillement des surfaces.

Les caractéristiques mécaniques des épontes résumées dans le tableau 1 sont celles d'un béton. L'angle de glissement béton/béton choisi est de 30° , ce qui représente un coefficient de frottement de 0,57.

Résistance en compression f_c [MPa]	Résistance en traction f_t [MPa]	Module d'Young E [GPa]	Coefficient de Poisson ν [-]	Énergie de fissuration G_f [J/m ²]
40	2,9	22	0,21	100

TAB. 1 – Récapitulatif des caractéristiques du béton modélisé.

La figure 1a représente les courbes de contrainte tangentielle / déplacement tangentielle obtenues numériquement (noir) et expérimentalement (gris). La contrainte maximale numérique égale à 1,17 MPa est semblable au résultat expérimental : 1,11 MPa. En revanche, la courbe numérique ne concorde pas avec la contrainte résiduelle post-pic trouvée expérimentalement et le calcul ne converge plus au delà d'une certaine valeur de chargement. L'endommagement des éléments les plus sollicités combiné au cisaillement et à la procédure de lagrangien réactualisé cause des aplatissements exagérés des éléments finis qui peuvent mener à un changement de signe du jacobien. Les oscillations représentent des micro-glissements entre les aspérités qui sont accompagnées d'un déchargement pouvant correspondre localement à leur rupture.

La figure 1b montre les courbes de dilatance obtenues numériquement (noir) et expérimentalement (gris). L'emboîtement parfait du modèle numérique entraîne l'absence de la phase de contractance. La valeur maximale de l'angle de dilatance i représente la pente de la courbe calculée au déplacement tangentielle correspondant au pic de contrainte de cisaillement [9]. La valeur obtenue pour un déplacement de 0,26 mm est de 58° pour l'essai et de 54° pour le modèle.

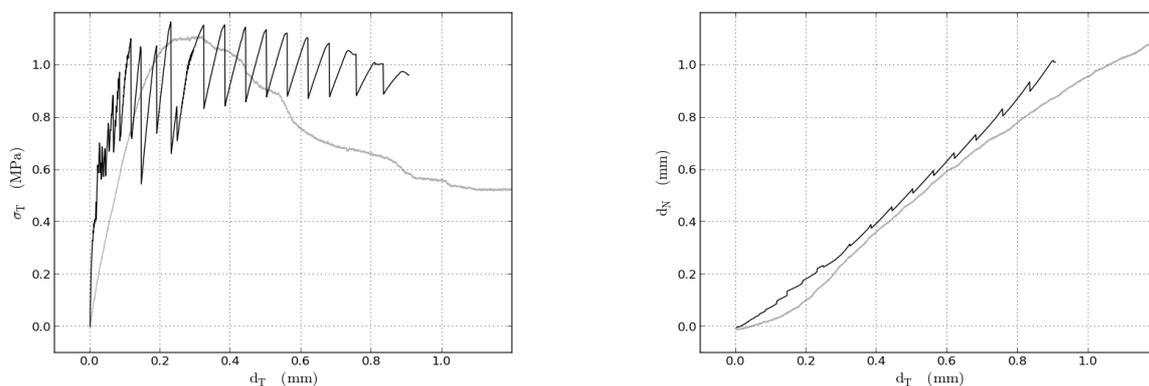


FIG. 1a : Courbes contrainte tangentielle / déplacement tangentielle (noir : numérique, gris : expérimentale) / FIG. 1b : Courbes de dilatance (noir : numérique, gris : expérimentale)

La figure 2 illustre l'endommagement dans les épontes cisailées. L'aspérité prépondérante située en bas du profil localise l'endommagement ($D = 1$) qui se diffuse dans l'éponte fixe. Une seconde zone de contact est dégradée de part et d'autre du joint. Des éléments sont aussi ponctuellement endommagés le long de la fissure suite à des frictions antérieures.

Les courbes de contrainte / déplacement tangentielle et de dilatance montrent que le comportement obtenu numériquement est tout à fait comparable à celui qui est observé expérimentalement tant du point de vue de la charge maximale atteinte que de l'ouverture de fissure. Les premiers résultats obtenus en deux dimensions valident aussi l'approche locale du frottement et l'intérêt de modéliser l'endommagement. Le modèle est capable de représenter le glissement d'une aspérité sur l'autre et de voir la transmission des contraintes à travers le contact. Il représente aussi les modifications géométriques de la rugosité au cours du cisaillement induit par les déformations locales puis la rupture des aspérités dominantes. Un problème subsiste encore, le modèle n'arrive pas à dépasser le pic de contrainte tangentielle. Numériquement, les aspérités les plus endommagées entraînent des déformations importantes au niveau des éléments qui empêchent la poursuite

du calcul. La solution envisagée afin de résoudre ce problème est d'implanter un modèle d'érosion qui éliminerait les éléments trop déformés ou de remailler les zones de contact.

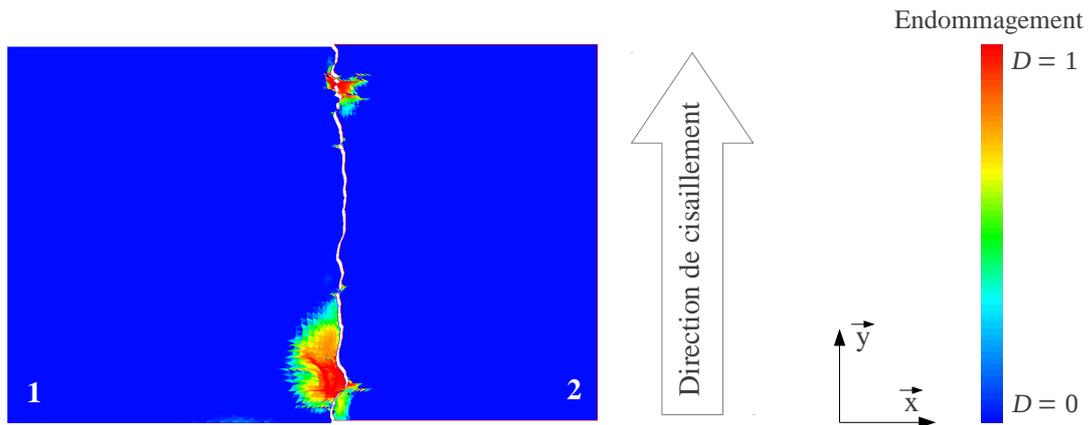


FIG. 2 – Endommagement local lors du cisaillement de l'éponte mobile (2) sur l'éponte fixe (1)

3.2 Vers une modélisation 3D

La modélisation en deux dimensions a montré la pertinence de notre modèle de cisaillement. Afin de représenter au mieux la réalité, la modélisation en trois dimensions apparaît la plus appropriée pour prendre en compte la géométrie tri-dimensionnelle d'une fissure.

Comme pour le modèle 2D, les maillages des lèvres du joint sont obtenues par digitalisation de surfaces réelles. Les éléments utilisés sont de type triangle trois points. Afin de ne pas alourdir les calculs durant cette phase de test, les surfaces cisillées sont réduites. Un nettoyage numérique est réalisé : il consiste à éliminer les éléments périphériques dont le coefficient de forme est trop faible pour qu'ils ne gênent pas le calcul. Au final, la surface rugueuse inférieure est un rectangle de 1 mm x 10 mm. L'éponte supérieure est un parallélépipède rectangle dont la base mesure 1 mm x 5 mm, ce qui limite le nombre d'éléments de la surface de contact à 500. Les épontes sont composées par des éléments de type tétraèdre 4 nœuds.

Le modèle de cisaillement 3D présenté est dans un premier temps limité à un modèle élastique couplé à des conditions de contact/frottement. Les caractéristiques du matériau élastique se résument à un module d'Young de 30 GPa et à un coefficient de Poisson de 0,2.

Les conditions aux limites sont analogues au modèle 2D, la sous face de l'éponte inférieure (fixe) est bloquée suivant les axes \vec{x} et \vec{y} . L'éponte supérieure (mobile) est soumise à un déplacement selon l'axe \vec{y} . Une pression de 1 MPa est imposée sur sa face supérieure qui doit rester dans un plan orthogonal à \vec{z} .

La figure 3 illustre la transmission des contraintes verticales à travers les contacts entre les aspérités dominantes. Le chargement vertical, initialement homogène en tête de l'éponte supérieure, devient non-uniforme sous l'action du déplacement tangentiel. Sur la figure 3, la localisation des contraintes normales met en évidence trois zones de contacts : deux sur la face avant et un sur la face arrière. À l'instant initial, les épontes ne sont soumises qu'à la pression verticale de compression et elles sont parfaitement emboîtées. Le maillage de contact étendu à toute la surface permet alors de transmettre la charge de 1 MPa à l'éponte inférieure de manière uniforme. Le déplacement tangentiel a réduit cette surface de contact entraînant une augmentation locale de la contrainte verticale pouvant multiplier sa valeur par un facteur dépassant 10. Cette augmentation brutale aura pour conséquence l'endommagement des éléments en contacts lors de l'implémentation prochaine du modèle plastique endommageable.

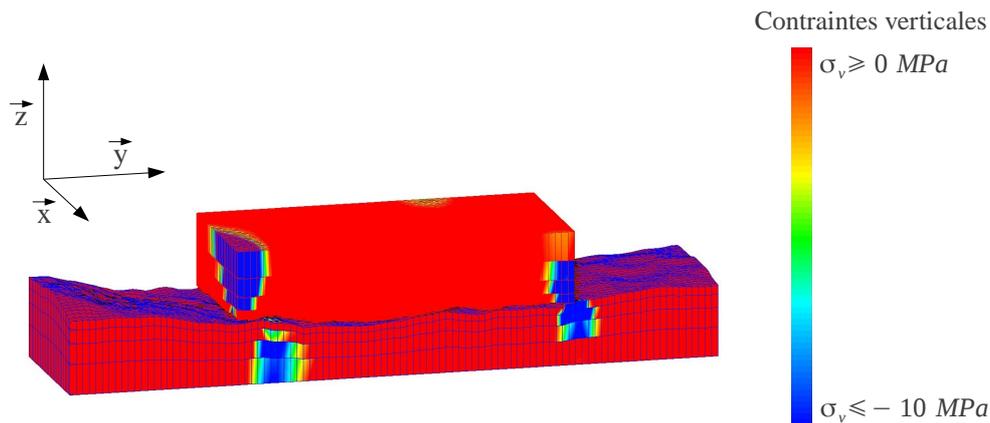


FIG. 3 – Modèle contact/frottement élastique : représentation des contraintes verticales

4 Conclusion

Les résultats obtenus par le modèle en deux dimensions et en trois dimensions montrent la pertinence de l'approche localisée du cisaillement. L'application de conditions de contact/frottement à la géométrie des lèvres de la fissure permet de limiter la transmission des contraintes uniquement au niveau des aspérités qui se touchent. L'implémentation de ces conditions dans un modèle élastoplastique endommageable permet de modéliser localement les micro-fissurations induites par les contraintes de frottement au niveau des aspérités. Ce modèle permet aussi de modéliser la dégradation du matériau engendrée par le cisaillement du joint dans le reste des épontes. Des travaux restent cependant à réaliser au niveau des éléments totalement endommagés qui bloquent le calcul et sur les degrés de liberté au niveau des conditions de contact/frottement afin de modéliser des surfaces plus étendues.

Références

- [1] Barton, N., Review of a new shear-strength criterion for rock joints. *Engineering Geology* 7, 287–332, 1973.
- [2] Cichosz, T. and Bischoff, M., Consistent treatment of boundaries with mortar contact formulations using dual Lagrange multipliers. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 200, 1317–1332, 2011.
- [3] Fichant, S., Pijaudier-Cabot, G., La Borderie, C., Continuum damage modelling: Approximation of crack induced anisotropy. *Mechanics Research Communications* 24, 109–114, 1997.
- [4] Jing, L., A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 40, 283–353, 2003.
- [5] Marache, A., Comportement mécanique d'une fracture rocheuse sous contraintes normale et tangentielle. Université de Bordeaux 1, Bordeaux, 2002.
- [6] Mazars, J. Application de la mécanique de l'endommagement au comportement non linéaire et à la rupture du béton de structure (Doctorat d'État). Paris VI, 1984.
- [7] Mazars, J., Pijaudier-Cabot, G., From damage to fracture mechanics and conversely: A combined approach. *International Journal of Solids and Structures* 33, 3327–3342, 1996.
- [8] Rousseau, B., Interfaces fragiles des ouvrages hydrauliques : morphologie et comportement mécanique. Université de Bordeaux 1 et Université de Sherbrooke, 2010.
- [9] Wriggers, P. *Computational Contact Mechanics*. Springer, 2006.