

Evaluation de l'endommagement dans le recouvrement d'une cavité saline par une approche numérique couplée continue-discrète

Diego Mercerat

▶ **To cite this version:**

Diego Mercerat. Evaluation de l'endommagement dans le recouvrement d'une cavité saline par une approche numérique couplée continue-discrète. 25. Rencontres universitaires de génie civil, May 2007, Bordeaux, France. pp.8. ineris-00973276

HAL Id: ineris-00973276
https://ineris.hal.science/ineris-00973276

Submitted on 4 Apr 2014

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.

Évaluation de l'endommagement dans le recouvrement d'une cavité saline par une approche numérique couplée continue-discrète

Enrique Diego Mercerat

Laboratoire Environnement Géomécanique et Ouvrages (LAEGO-INPL), École des Mines de Nancy, Parc de Saurupt, CS 14234, 54042 Nancy Cedex
INERIS

RESUME. Dans l'objectif de mieux comprendre la progression de l'endommagement dans le recouvrement d'une cavité saline créée par dissolution, une expérimentation in-situ a été entreprise sur une cavité de la région Lorraine. Le recouvrement est caractérisé par la présence d'un banc raide où la plupart de l'endommagement fragile (et de la microsismicité associée) est attendu lors de la reprise de l'exploitation. Ce travail présente une simulation numérique basée sur une approche couplant un modèle continu FLAC (pour les couches marneuses et le sel), et discret PFC (pour le banc raide), dont l'objectif est d'évaluer les mécanismes de développement des fractures dans les terrains du recouvrement. Une calibration exhaustive des microparamètres du modèle discret a été réalisée pour reproduire les propriétés macroscopiques d'échantillons provenant du site. La validation numérique du modèle est faite sur la base d'une comparaison à l'échelle du site entre les résultats d'une simulation purement continue (FLAC) avec ceux de la simulation couplée (FLAC-PFC). Les résultats montrent que le mécanisme de fracturation est fondamentalement en traction. Par ailleurs, l'analyse des microfissures calculées et de leur extension en fonction des sollicitations s'appliquant sur la cavité, ouvre des perspectives très intéressantes pour la confrontation avec des mesures qui seraient enregistrées lors de l'effondrement provoqué.

MOTS-CLÉS : modélisation numérique, endommagement des roches, cavités souterraine, FLAC, PFC.

ABSTRACT. With the objective to better understand the evolution of overburden damage on top of an underground solution mining, an in-situ experiment is undertaken over a salt cavity in the Lorraine region. The overburden overlying the salt cavity is characterized by a competent layer where most fragile damage, with the associated microseismicity, is expected. This work presents a coupled continuum-discrete modelling approach to simulate the mechanics of fracture initiation and propagation in the rock mass, a continuum approach FLAC for the marls and salt layers, and a discrete approach PFC for the competent layer. Numerous calibration experiments of the discrete model microproperties are firstly performed to reproduce the mechanical response of the competent layer samples. The numerical validation of the coupled approach is carried out by comparing the results with those from the fully continuum approach at the site scale. First modelling results suggest that the mechanisms of fracture in the competent layers is predominantly tensil. Moreover, microcrack simulation opens interesting perspectives for comparison with the observed microseismicity of the study area.

KEYWORDS : numerical modelling, rock damage, underground cavities, FLAC, PFC

1. INTRODUCTION

Un vaste programme de recherche a été entrepris par le GISOS (Groupement de recherche sur l'Impact et la Sécurité des Ouvrages Souterrains) concernant la fermeture des mines et les risques associés, notamment aux instabilités générées par l'effondrement des cavités abandonnées. Il s'agit de mettre au point et de valider des outils et des méthodes permettant, d'une part définir des moyens de surveillance, adaptés au contexte minier, en particulier celui du sel; et d'autre part, d'améliorer la connaissance sur le comportement et l'évolution des cavités souterraines, et son impact sur la stabilité du recouvrement. Ce travail s'inscrit dans ce dernier axe et concerne la modélisation numérique de

l'endommagement et les mécanismes de rupture attendus dans les terrains du recouvrement d'une cavité saline instrumentée dans la région Lorraine (France).

Dans le cadre de l'analyse de stabilité d'un massif rocheux, il est recommandé de faire appel aux techniques non-intrusives, comme la surveillance microsismique, pour l'évaluation du degré d'endommagement dans le massif (Mendecki, 1997). Pour la validation de cette technique dans un contexte salin, un réseau microsismique a été installé dans la concession de Cerville-Buissoncourt (Lorraine, France) exploitée par la société SOLVAY. En ce moment, le site est dans une phase dite *stable*, où la cavité remplie de saumure n'évolue pas, et par conséquent le recouvrement ne se déforme pas considérablement. Quand l'exploitation de la cavité sera reprise, l'évolution spatiale et temporelle de la sismicité induite par l'exploitation pourra être d'abord être enregistrée puis confrontée aux résultats de modélisation dont la méthodologie est présentée dans ce papier. La modélisation du comportement complexe du recouvrement suite a la diminution de la pression de saumure dans la cavité doit prendre en compte: (a) la géométrie actuelle de l'exploitation et la possibilité d'une évolution de la cavité dans le gisement de sel, (b) le comportement mécanique des différentes matériaux présents dans le recouvrement qui est loin d'être homogène, et finalement (c) l'initiation des microfissures et leur propagation dans le recouvrement, ce qui permettra à terme une comparaison avec la sismicité enregistrée sur site.

2. PRESENTATION DU SITE PILOTE DE CERVILLE-BUISSONCOURT

La cavité de la concession de Cerville-Buissoncourt se trouve actuellement dans un gisement du sel à 183 m de profondeur. D'après les dernières campagnes sonar faites par SOLVAY, elle présente une forme irrégulière, qui a été idéalisée pour les besoins de la modélisation (polygone de 180 m de base et 50 m de hauteur montré sur la Figure 1). Le recouvrement du gisement de sel est caractérisé par la présence des couches marneuses très peu indurés, intercalés des niveaux fins d'anhydrite, d'une épaisseur totale de 60 m (marnes a anhydrite); et au-dessus l'on trouve le banc le plus compétent du recouvrement, constitué au sommet d'un niveau d'anhydrite et à la base d'un banc de dolomie, qui font 8.5 m d'épaisseur total (dolomie de Beaumont).

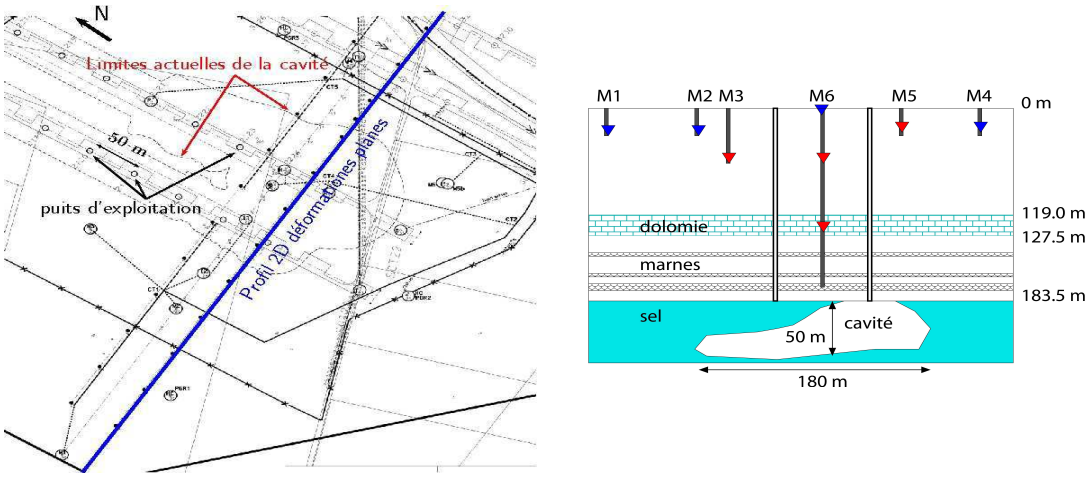


Figure 1. (Gauche) Plan du site pilote de Cerville-Buissoncourt avec le profil choisi pour la modélisation numérique. (Droite) Coupe schématique du profil avec la localisation des sondes microsismiques M1 – M6 dans forages cimentés entre 35 et 125 m de profondeur.

3. CARACTERISATION MECANIQUE DES ROCHES

Une caractérisation physique et mécanique des différents matériaux issus d'un forage carotté à quelques mètres de la future zone d'effondrement a été réalisée par le Laboratoire Environnement, Géomécanique et Ouvrages (INPL). Les principaux résultats sont extraits de (Homand, 2003; Laouafa et Daupley, 2003), et mis à notre disposition par la société SOLVAY pour cette étude. La dolomie de Beaumont et l'anhydrite présentent des Modules de Young d'environ 80 GPa et résistances en compression simple qui peuvent atteindre les 200 MPa, valeurs trop importantes pour des roches sédimentaires. La résistance à la traction, mesurée indirectement par des tests brésiliens, est autour de 15 MPa. En revanche, les valeurs moyennes des caractéristiques des marnes à anhydrite situés entre le banc raide et le gisement de sel, présentent une dispersion plus importante et sont extrêmement plus faibles (Homand *et al*, 2003). Les résultats de cette caractérisation mécanique vont être utilisés comme données d'entrée pour la conception du modèle numérique du site, et pour la procédure de calibration des microparamètres nécessaires dans l'approche couplée modélisant les bancs de dolomie et anhydrite.

4. MODELISATION NUMERIQUE

4.1 STRATEGIE : COUPLAGE CONTINU-DISCRET

Quand l'exploitation du sel sera reprise (par rabattement du niveau de saumure et/ou par dissolution) la cavité s'élargira progressivement, et l'endommagement des couches du recouvrement aura lieu jusqu'à l'effondrement final. La modélisation numérique nécessite un modèle à grande échelle au regard des dimensions de la cavite; d'une part, considère le comportement mécanique des différents matériaux présents dans le recouvrement; et d'autre part, tient compte de l'initiation des microfissures, et la formation des macrofractures qui pourront être confrontées aux mesures sismiques.

Le modèle comprend deux parties: (i) les couches compétentes, dont le comportement est élastofragile, seront modélisées comme une inclusion discrète en utilisant le logiciel PFC2D (Itasca Cons, 1999) ; (ii) pour les autres matériaux, dont le comportement est plus ductile et visco-plastique (couches marneuses et salines), une approche continue basée sur FLAC (Itasca Cons, 1999) est utilisée, pour mieux rendre compte des comportements rhéologiques plus complexes.

Ainsi l'inclusion discrète PFC2D est immergée dans un maillage FLAC des Différences Finies classique (voir Figure 2). Le couplage entre les deux logiciels basés sur une résolution explicite des équations de mouvement, peut être assimilé à des conditions aux limites à imposer aux frontières entre les deux domaines évoluant à chaque pas de temps. Cela induit une continuité des déplacements et des forces aux frontières communes des deux domaines pendant toute la simulation.

4.2 CALIBRATION DES MICROPARAMETRES PFC2D

Une roche est modélisée dans PFC2D comme un assemblage des particules circulaires collées aux points de contact (liaisons) pour simuler la cimentation intragranulaire (Potyondy et Cundall, 2004). Les liaisons peuvent être rompues au cours de la simulation, si les seuils des résistances en traction/cisaillement sont dépassés. Ainsi, une microfissure en traction/cisaillement est créée *explicitement* dans le modèle. Dans l'approche micromécanique discrète de PFC2D, l'arrangement des particules, les rigidités de contacts, le coefficient de frottement et le type de liaison choisi entre grains

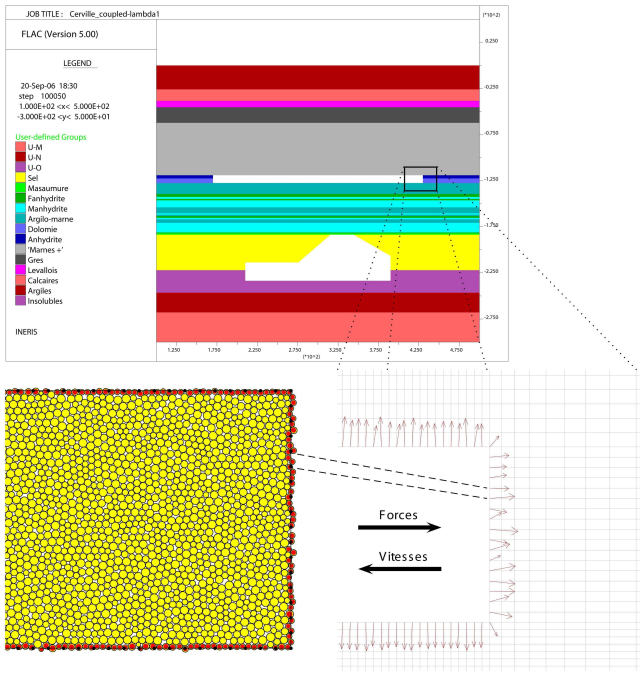


Figure 2. Détail du modèle géomécanique du site (approche couplée). A chaque pas de temps, l'inclusion discrète PFC2D envoie les forces aux nœuds du maillage FLAC (en noir), qui à son tour envoie les vitesses aux particules de la frontière commune (en rouge).

(dorénavant appelés microparamètres) gouvernent le comportement mécanique de l'ensemble. Les propriétés macroscopiques (modules, résistances) sont des produits plus que des composants. Or, une calibration doit être réalisée pour trouver l'ensemble des microparamètres qui reproduisent les propriétés mécaniques clés, issues des essais au laboratoire sur des échantillons de la dolomie de Beaumont. Pour y parvenir, nous nous sommes inspirés par des nombreux exemples de calibration mécanique trouvés dans la littérature (Kulatilake *et al*, 2001; Boutt et Mc Pherson, 2002; Potyondy et Cundall, 2004). Une difficulté, bien connue dans PFC2D, a été rencontrée pour calibrer, à la fois, la résistance à la traction et à la compression d'un échantillon numérique (Potyondy et Cundall, 2004; Fakhimi et Villegas, 2004). Nous avons décidé de privilégier la calibration de la résistance à la traction, car les simulations réalisées exclusivement avec l'approche continue et des études préalables (Laouafa et Daupley, 2003), indiquaient que le mode de rupture du banc raide sera plutôt en traction. Le Tableau 1 résume les microparamètres optimaux obtenus à l'issue de cette calibration.

Particules	**Ciment (liaisons *en parallèle*)**
Densité $\rho = 2820$ kg/m^3	Rigidité normale $\underline{k}n = 80$ GPa
Rayon $r_{max}/r_{min} = 1.5$ $r_{avg} = 0.5$ mm	Rigidité tangentielle $\underline{k}_n/\underline{k}_s = 4$
Rigidité normale $kn = 80$ GPa	Résistance normale $\underline{\sigma}c = 15 \pm 5$ MPa
Rigidité tangentielle $k_n/k_s = 4$ Coef. friction $\mu = 0.5$	Résistance tangentielle $\underline{\tau}c = 25 \pm 8$ MPa

Tableau 1. Microparamètres du modèle PFC2D (Parallel bond model).

4.3 MODELE GEOMECANIQUE DU SITE DE CERVILLE-BUISSONCOURT

Le modèle géométrique montré sur la Figure 3, s'inspire de la coupe géologique du site et est essentiellement composé de :

- le gisement du sel, qui s'étend dès la limite inférieure du modèle jusqu'au toit de la cavité,
- au-dessus de la couche de sel, les marnes à anhydrite, composées des niveaux fins d'anhydrite, jusqu'aux marnes argileuses très peu indurés,
- et le recouvrement, caractérisé par la présence du banc raide (dolomie de Beaumont), continué par une série des carbonates, grès et marnes jusqu'à la surface du terrain.

Les propriétés mécaniques du sel, les marnes à anhydrite et le banc raide sont issues des essais au laboratoire, tandis que les propriétés des autres matériaux sont inspirées des études précédentes sur des sites similaires (Nothnagel, 2003). Dans une première approche, un comportement elastoplastique est assigné à tous les matériaux, y compris le sel. Dans ce travail, nous allons présenter les résultats d'une seule modalité (Mohr-Coulomb parfait) avec critères basés sur les seuils d'endommagement (perte de linéarité en pré-pic). Ce qui représente un scénario pessimiste puisque le seuil d'endommagement représente (en moyenne) 50% de la résistance à la rupture.

La génération de l'inclusion PFC2D à l'échelle du site (260 m x 8.5 m) entraîne un changement d'échelle. Les moyens de calcul disponibles nous empêchent de générer une telle inclusion avec particules millimétriques utilisées pour la calibration du modèle discrète. Nous avons numériquement constaté l'invariance de la réponse mécanique d'un échantillon soumis à une homothétie de facteur supérieur à 1. Naturellement de cette manière, la résolution microscopique du modèle est dégradée, et l'on ne peut plus associer une particule avec un 'grain', comme c'est le cas avant l'homothétie. Ainsi, les micropropriétés de l'inclusion PFC2D restent celles du Tableau 1, sauf pour le rayon moyen des particules, autour de 12 cm.

Malgré la forme asymétrique de la cavité, nous avons choisi de rester en 2 dimensions, en considérant la section transversale à la dimension maximale de la cavité, avec l'hypothèse de déformations planes. La taille finale du modèle est 4600 m x 850 m avec déplacements normaux fixés sur les bords latéraux et inférieur. L'état de contrainte initial est supposé isotrope et égal au poids de terrain, hypothèse valide pour les couches salines et marneuses, mais peut être contestable pour les couches raides. Dans l'inclusion PFC2D, la contrainte initiale moyenne est autour de 3 MPa correspondant au poids du terrain à la profondeur de l'inclusion (120 m). La seule sollicitation surfacique variable pendant les simulations est la pression de saumure aux parois de la cavité. Dans une première approche, la géométrie de la cavité restera fixe dans la couche saline (on néglige les effets de dissolution).

4.4 RESULTATS DE LA MODELISATION A GRANDE ECHELLE

4.4.1 Modélisation purement continue (FLAC)

Nous avons réalisé la simulation de la vidange de la cavité avec le modèle purement continu FLAC, pour identifier l'apparition de la plasticité dans le banc raide du recouvrement. Cela se produit quand le niveau de saumure atteint les 160 m de profondeur, comme on peut le voir sur la Figure 3. Les zones plastiques correspondent aux zones des efforts maximales en traction au sommet du banc sur les appuis, et à la base du banc dans la zone centrale. Après cette étape (niveaux de saumure plus bas), l'équilibre n'est plus atteint, et la plasticité se généralise dans le banc raide parallèle à l'arc de compression maximale. Ce modèle continu montre également le comportement global de tout le recouvrement et constituera un élément de calage par rapport au modèle continu/discret.

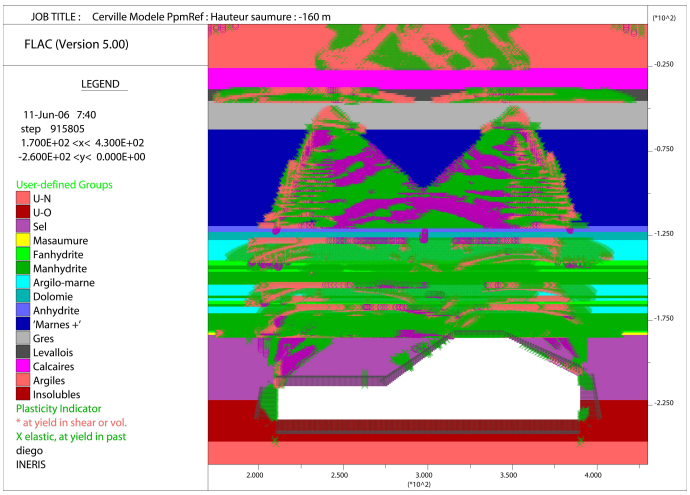


Figure 3.Zones rompues dans le recouvrement (niveau de saumure -160 m) identifiées notamment dans le banc raide sur les appuis et au centre sur la fibre inférieure.

4.4.2 Modélisation couplée (FLAC/PFC2D)

Dans un second temps, nous avons réalisé les calculs avec l'inclusion PFC2D pour la même modalité (modèle continu/discret). La validation du modèle couplé est accomplie en comparant les flèches et les contraintes obtenues par les deux approches: continue et continue/discrète. Sur la Figure 4, nous avons représenté les profils de déplacements verticaux et contraints à différentes profondeurs dans les massifs, à l'étape juste avant que la plasticité ne se développe dans le banc raide (niveau de saumure -150 m). La similitude est presque parfaite, ce qui valide; d'une part, la procédure du couplage numérique; et d'autre part, la calibration des microparamètres du modèle PFC2D (au moins en ce qui concerne sa réponse élastique).

Quand le niveau de saumure dépasse les 160 m de profondeur (voir Figure 5), deux ruptures par coalescence de microfissures se produisent sur les appuis (inclinées vers l'intérieur correspondant à la direction perpendiculaire à la traction maximale), et dans la zone centrale où plusieurs zones de rupture (concentration des microfissures) se génèrent du bas vers le haut (-170 m). D'après le comptage montré sur la Figure 6, plus de 90 % des ces microfissures sont *de traction*, ce qui confirme l'hypothèse des ruptures fondamentalement en traction du banc raide.

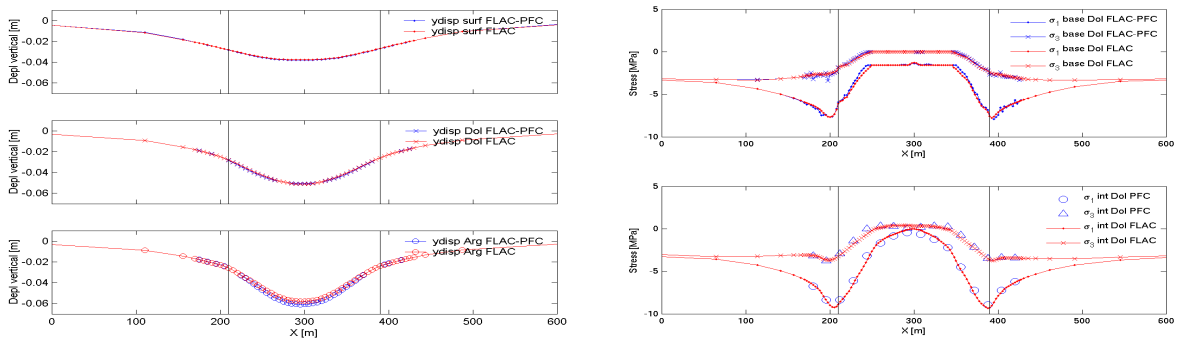


Figure 4. (Gauche) Profils de flèches à trois profondeurs différents (0 m, -127.5 m, -139 m) calculés par les approches purement continu (rouge) et continue-discrète (bleu). (Droite): contraintes principales à la base (haut) et à l'intérieur (bas) du banc raide.

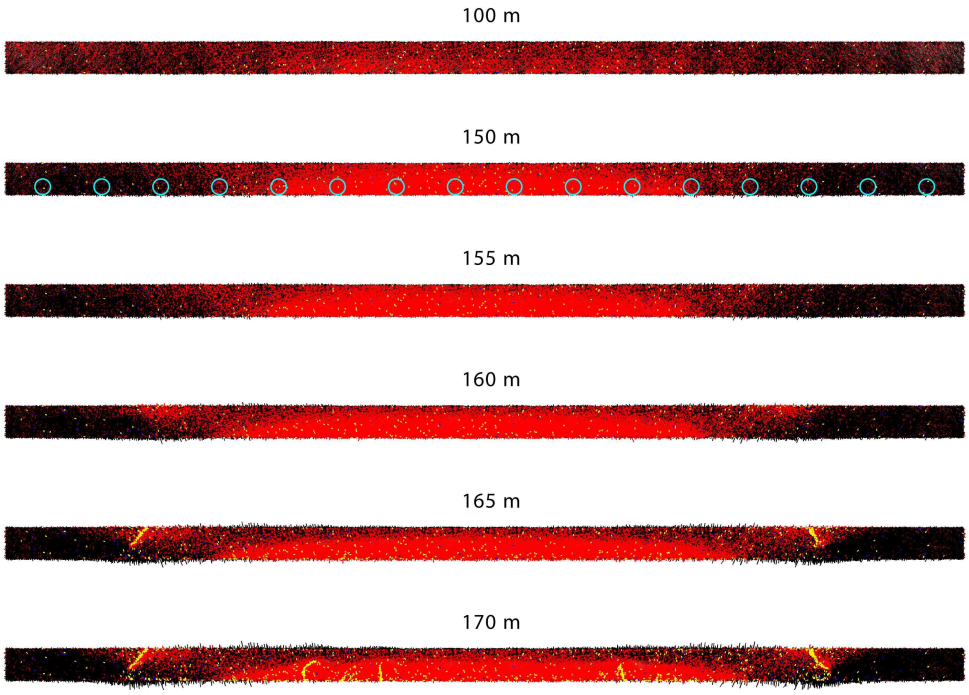


Figure 5. Inclusion PFC2D à différents étapes de la vidange (niveaux de saumure -100 m à -170 m). Forces dans le ciment tension/compression (rouge/noir). Fissures en tension/cisaillement (jaune/bleu). Plus de 90 % sont en tension. Cercles de mesure de contraintes(PFC2D) en cyan.

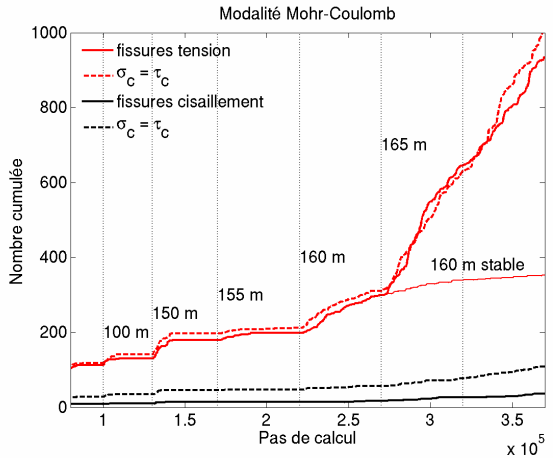


Figure 6. Nombre cumulée de microfissures dans l'inclusion PFC2D à différents étapes de la vidange (lignes verticales). L'étape à 160 m a été prolongée pour trouver la stabilité. Une claire instabilité est notée à partir de 165 m.

5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Dans ce travail, nous avons étudié numériquement l'endommagement et les modes de rupture attendus dans le site salin de Cerville-Buissoncourt, en particulier l'initiation et propagation des microfissures dans le banc raide du recouvrement. Une approche discrète basée sur PFC2D a été utilisée pour modéliser ce banc raide, dont le comportement est élastofragile. La calibration des

microparamètres faite sur la base des échantillons de laboratoire, a été aussi utilisée pour créer l'inclusion discrète à l'échelle du site. Pour les autres matériaux, dont le comportement est soit ductile ou viscoplastique, une approche continue FLAC a été adoptée.

Une approche *hybride* continue/discrète (FLAC/PFC2D) a été mise en œuvre pour simuler le comportement de l'ensemble du recouvrement. La validation numérique du modèle est faite sur la base d'une comparaison à l'échelle du site entre les résultats d'une simulation purement continue (FLAC) avec ceux de la simulation couplée (FLAC/PFC2D). De plus, l'initiation et coalescence des microfissures correspondent bien à la localisation des zones rompues prédites par le calcul continu. En fin, le simple comptage des microfissures donne une indication claire des instabilités produites dans le banc raide à partir d'un niveau de saumure en particulier. Les résultats de modélisation suggèrent qu'une fois la coalescence des microfissures dans le banc raide ait lieu, et des zones de ruptures *en traction* se développent, l'effondrement des tous les terrains du recouvrement est probable.

Des perspectives intéressantes s'ouvrent vis-à-vis une future corrélation avec les données de microsismicité induite qui seront enregistrées par le réseau de surveillance installé sur site, une fois l'exploitation de la cavité sera reprise.

BIBLIOGRAPHIE

Boutt, D. F. et B. J. O. L. McPherson (2002). Simulation of Sedimentary Rock Deformation : Lab-Scale Model Calibration and Parametrization. *Geophys. Res. Lett. 29*(4), 13–1–13–4.

Fakhimi, A. et T. Villegas (2004). Calibration of a Discrete Element Model for Rock Failure Envelope and Tensile Strength. In Shimizu, Hart, et Cundall (Eds.), *Numerical Modelling in Micromechanics via Particle Methods*, pp. 383–390. London : Taylor and Francis.

Hommand, F. (2003). *Caractérisation physique et mécanique du sondage Cerville 3129*. Rapport LAEGO-ENSG. LG.FH.SOL.PSI.RPRE.02.05.12A.

Itasca Consulting Group (1999a). *FLAC Fast Lagrangian Analysis of Continua*. Minneapolis, Minnesota: Itasca Consulting Group.

Itasca Consulting Group (1999b). *PFC2D Particle Flow Code in 2 Dimensions*. Minneapolis, Minnesota: Itasca Consulting Group.

Kulatilake, P. H. S.W., B. Malama et J.Wang (2001). Physical and particle flow modelling of jointed rock block behaviour under uniaxial loading. *Int. J. Rock Mech. and Mining Sci. 38*, 641–657.

Laouafa, F. et X. Daupley (2003). *Prévision du premier effondrement à l'amont des pistes 2100 et 2200 dans la concession de Cerville-Buissoncourt*. Rapport INERIS. DRS-03-38235/R01.

Potyondy, D. et P. Cundall (2004). A Bonded Particle Model for Rock. *Int. J. Rock Mech. and Mining Sci. 41*(8), 1329–1364.