



Laurentian University
Université Laurentienne



SEEQ – 46^e session d'étude

Modélisation numérique d'un sautage de banc incluant l'effet de la pression des gaz dans les fractures

Par:

Omid Karimi, étudiant au doctorat, Université Laurentienne

Et:

Marie-Hélène Fillion, PhD, ing., Professeure adjointe, Université
Laurentienne/Ingénieure sénior en mécanique des roches, MTMD

Votre 
gouvernement

Québec 

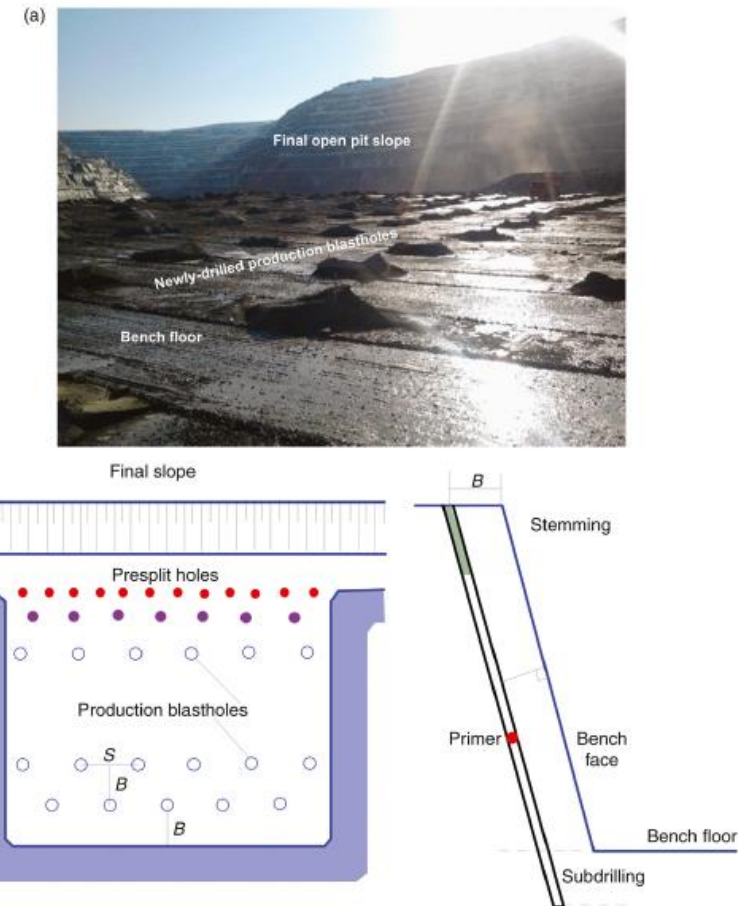
Contenu de la présentation



- Sautage d'un banc de production
- Influence des fractures présentes dans le massif rocheux
- Modélisation de systèmes de fractures (DFN)
- Simulation numérique du sautage d'un banc rocheux (FDEM)
- Développements depuis 2022 (SEEQ 45^e session): Pression des gaz dans les fractures
- Modèle numérique développé et résultats de la simulation de sautage du roc
- Quantification du niveau de dommage à la paroi rocheuse
- Conclusions et impact de la recherche

Sautage d'un banc de production

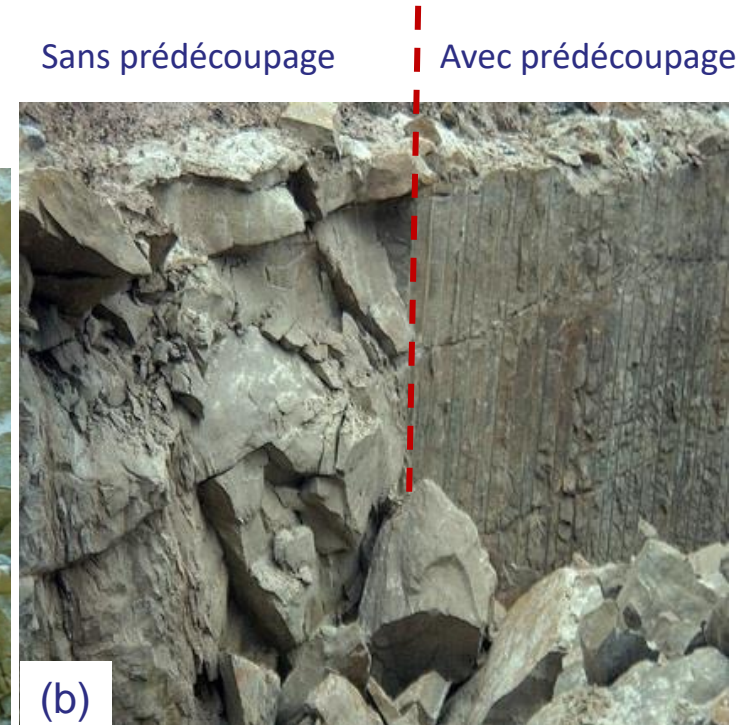
- Buts du sautage: fragmentation adéquate, forme et déplacement de l'empilement de fragments rocheux, niveau de dommage minimum, etc.
- Objectifs de la recherche:
 - Réduction du niveau de dommage
 - Développement d'une méthode pour quantifier le niveau de dommage
- Simulation de sautage pour optimiser les résultats
 - Connaissances suffisantes sur les propriétés des fractures naturelles et du roc
 - Modèle fiable pour la simulation du sautage du roc



Paramètres typiques de forage et sautage utilisé lors du sautage de bancs rocheux (a) Pente de mine à ciel ouvert et forages de production (b) exemple de plan de sautage (production et prédécoupage (Zhang, 2016)

Fractures dans un massif rocheux

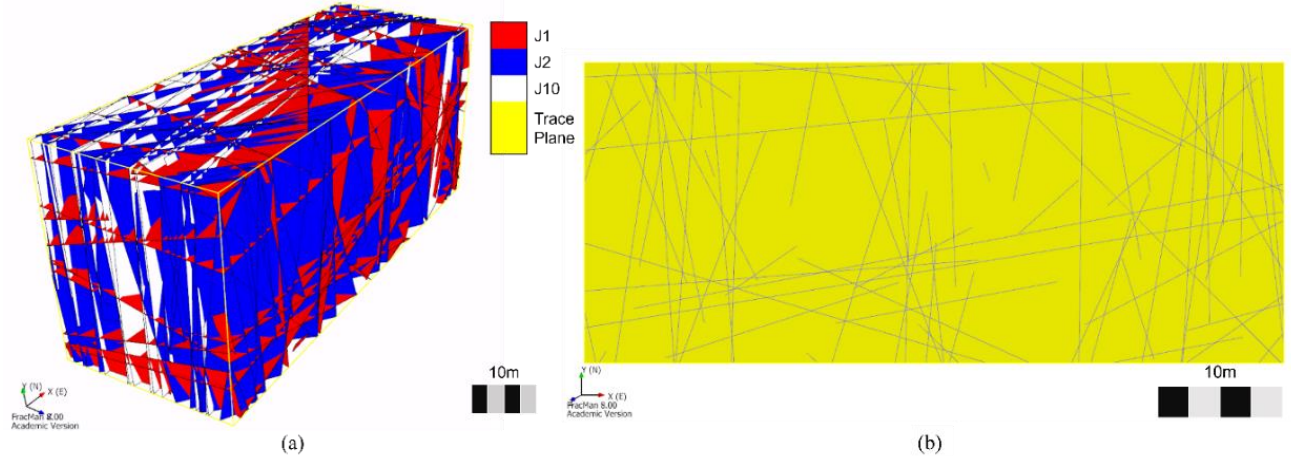
- Caractéristiques du massif rocheux:
 - Anisotrope
 - Hétérogène
 - Discontinu → Fractures naturelles (*in-situ*)
- Plans de fractures:
 - Plans de faiblesse
 - Dissipation de l'énergie explosive
 - Ventilation des gaz d'explosion



(a) Fractures in-situ dans un massif rocheux (Kalenchuk et al., 2006); (b) Dommage induit par le sautage (Courtoisie de Workplace Safety North).

Modélisation de systèmes de fractures (DFN)

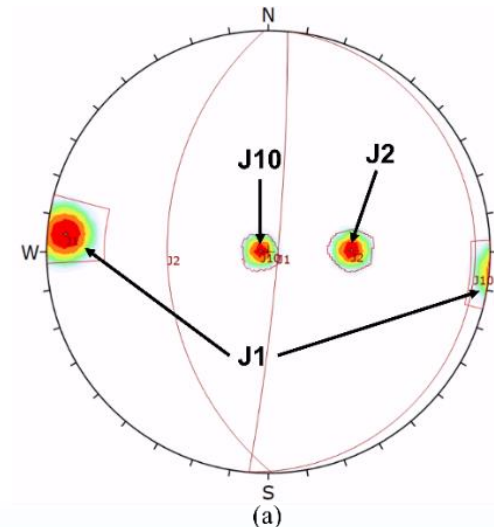
- Système de fractures (DFN) – Logiciel Fracman (WSP-Golder):
 - Représentation 3D d'un système de fractures
 - Basé sur des données quantifiées (orientation et dimension)



Paramètres pour la génération de DFN (mine à ciel ouvert – lamgold)

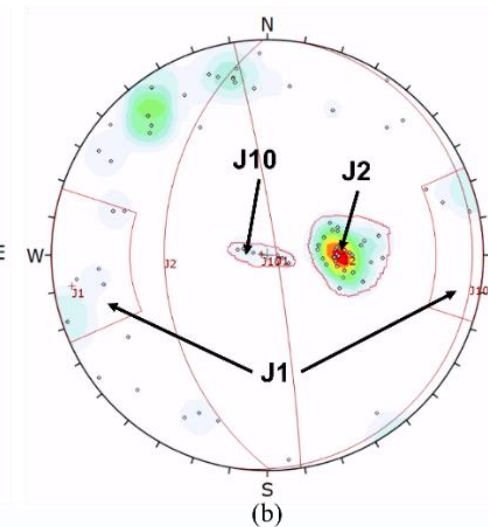
Familles de joints	Pendage (°)	Direction de pendage (°)
J1	85	95
J2	41	269
J10	4	96
Fisher's K		60
P32 (1/m)		0.52

(a) Modèle DFN 3D



(a) Paramètres d'entrée d'orientation des fractures

(b) Section longitudinale 2D

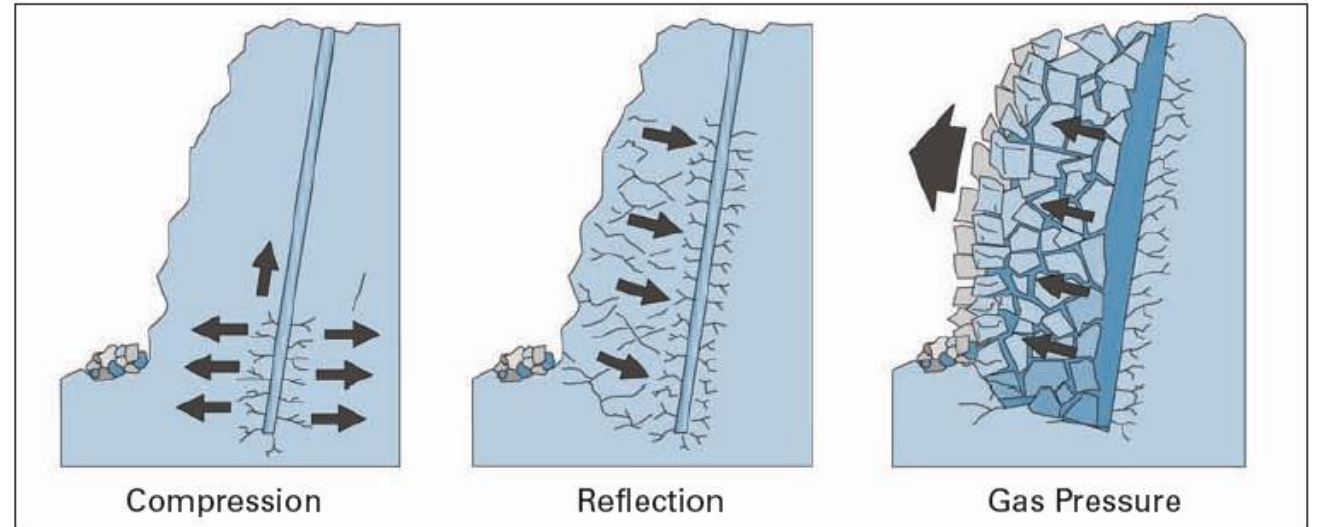


(b) Fractures générées par le modèle DFN

COMPARAISON

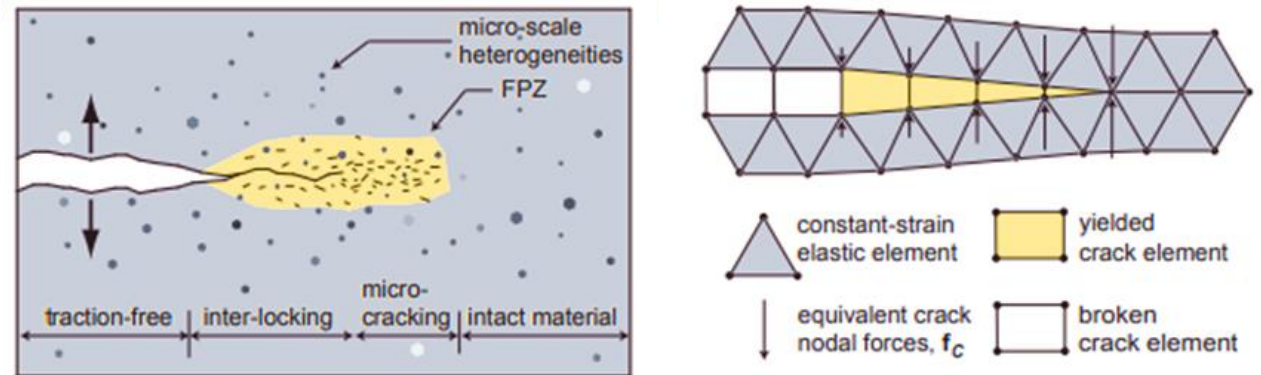
Simulation numérique du sautage d'un banc

- Processus de sautage du roc:
 - Phase statique: propagation d'ondes et initiation de fractures
 - Phase dynamique: fragmentation et déplacement



Processus de fragmentation du roc par sautage

- Méthode combinée d'éléments finis/discrets (FDEM) – Logiciel Irazu (Geomechanica Inc., 2022):
 - Déformation du matériau intact menant à la fracturation (continuum)
 - Développement des fractures (discontinuum)



Zone de propagation de fracture (Geomechanica Inc. 2022)

Résultats – 45^e session d'étude de la SEEQ (2022)

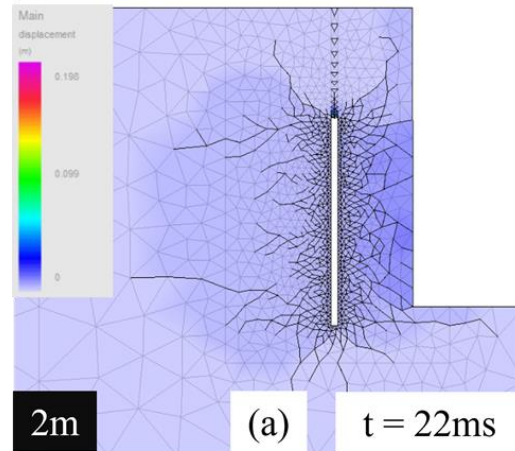
Effet de la présence de fractures

1) Sautage d'un banc sans DFN

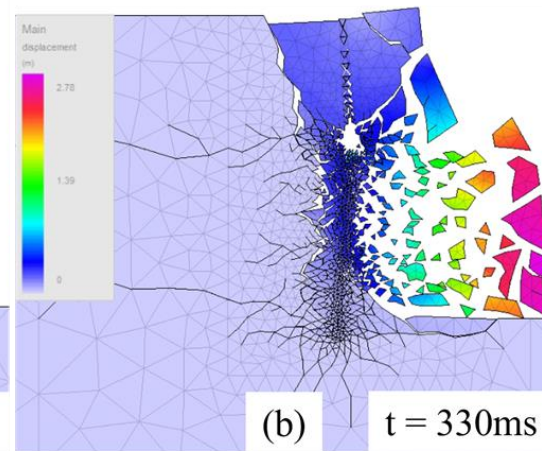
VS.

2) Sautage d'un banc avec DFN

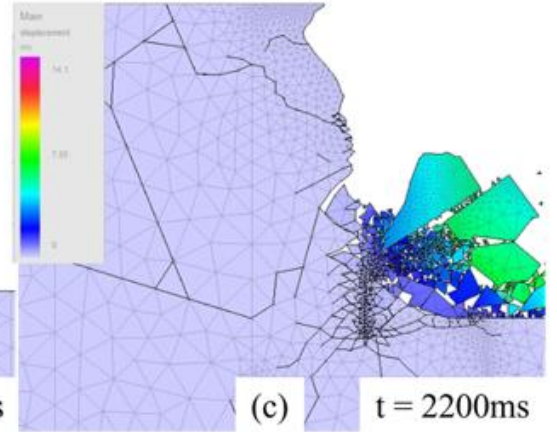
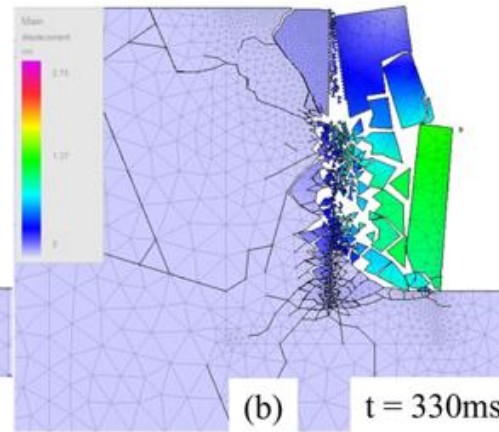
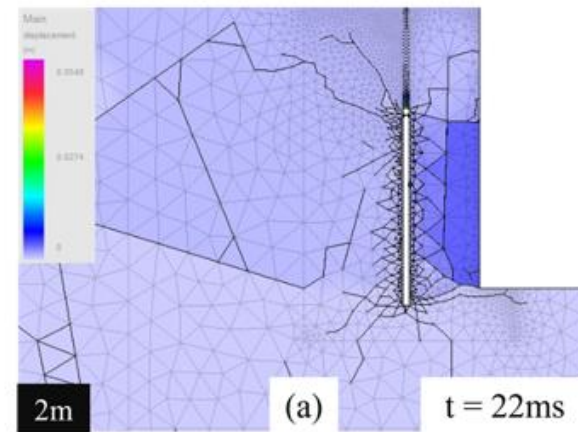
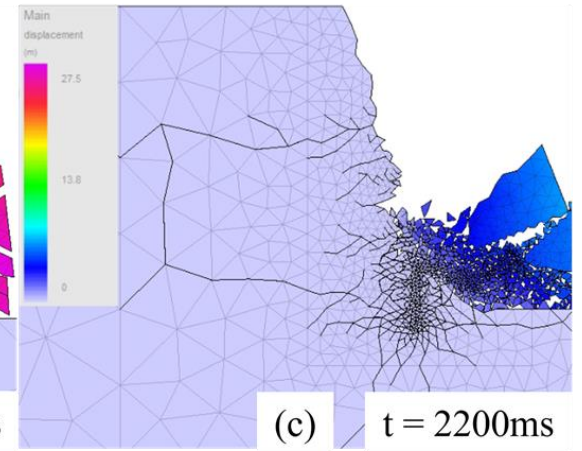
Fracturation initiale



Fragmentation



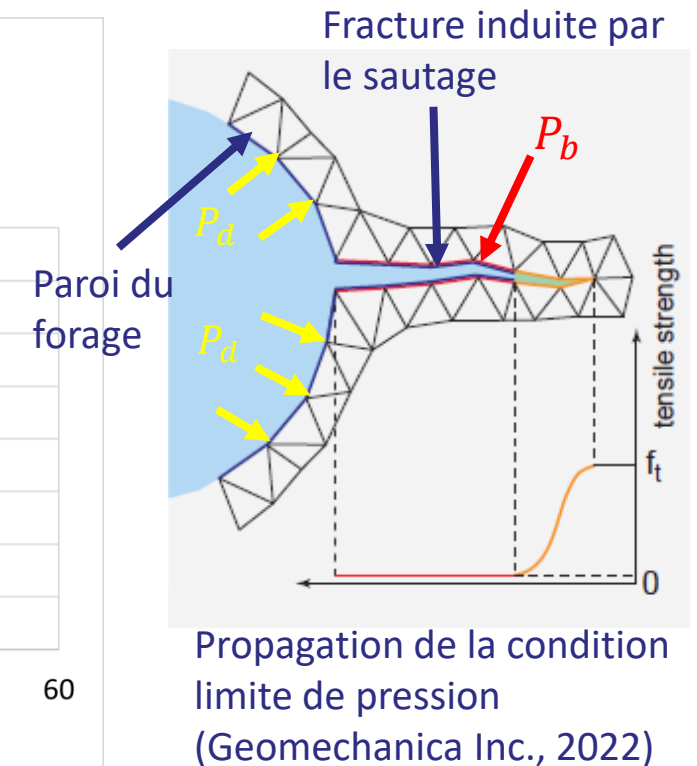
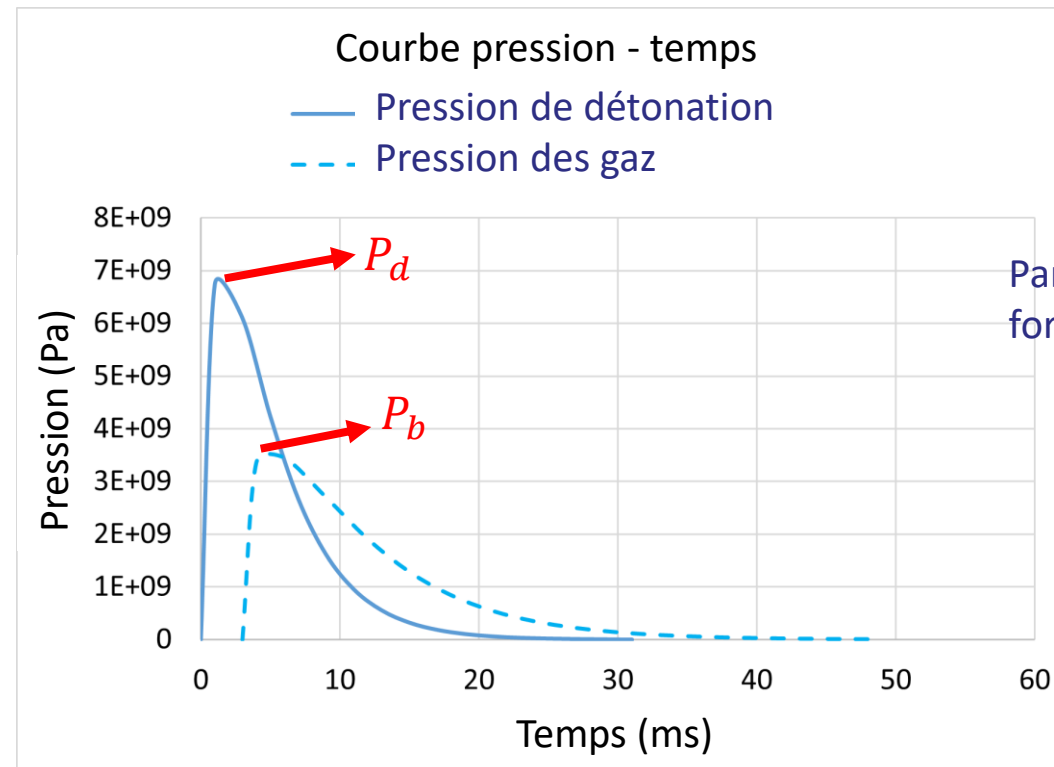
Formation de l'empilement



Effet de la pression des gaz dans les fractures

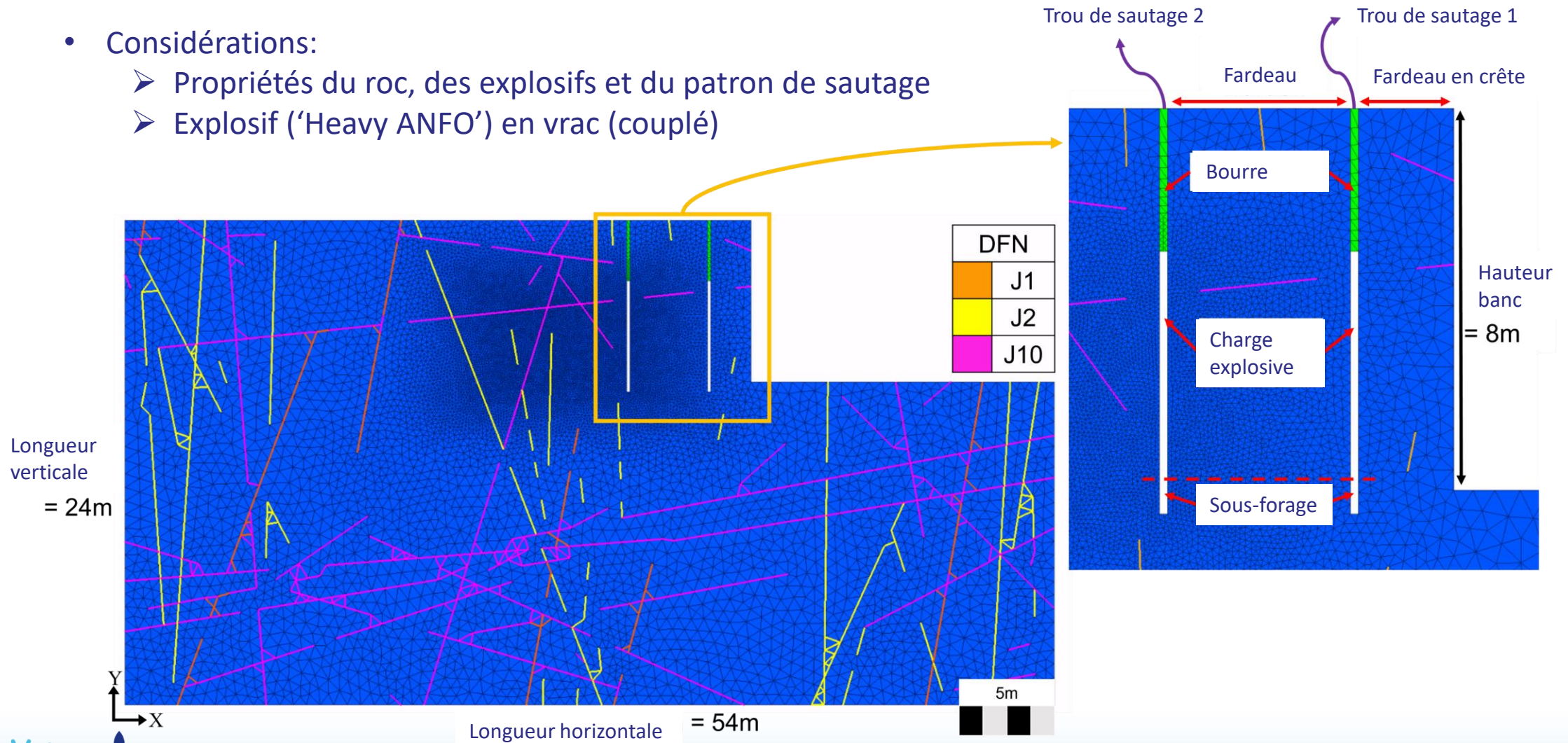
Développements depuis SEEQ 45^e session (2022):

- Modélisation de 2 trous de sautage (vs. 1 seul trou) avec délai
- Modélisation avec deux conditions limites de pression:
 - Pression de **détonation (Pd)** sur la paroi
 - Pression des **gaz (Pb)** dans les fractures
→ propagation de la condition limite
(Geomechanica Inc., 2022)



Simulation numérique du sautage d'un banc

- Considérations:
 - Propriétés du roc, des explosifs et du patron de sautage
 - Explosif ('Heavy ANFO') en vrac (couplé)



Courbes pression-temps

- Courbes pression-temps (Hajibagherpour et al., 2020)

$$P_t = 4P(e^{-\frac{\beta t}{\sqrt{2}}} - e^{-\sqrt{2}\beta t})$$

$$\beta = -\sqrt{2} \frac{\ln(1/2)}{t_r}$$

$$t_r = \frac{L_e}{VOD} \text{ (Lu et al., 2012)}$$

P_t = historique de temps de la charge dynamique imposée à la paroi du trou de forage (Pa)

P = Pression de détonation/gaz (Pa)

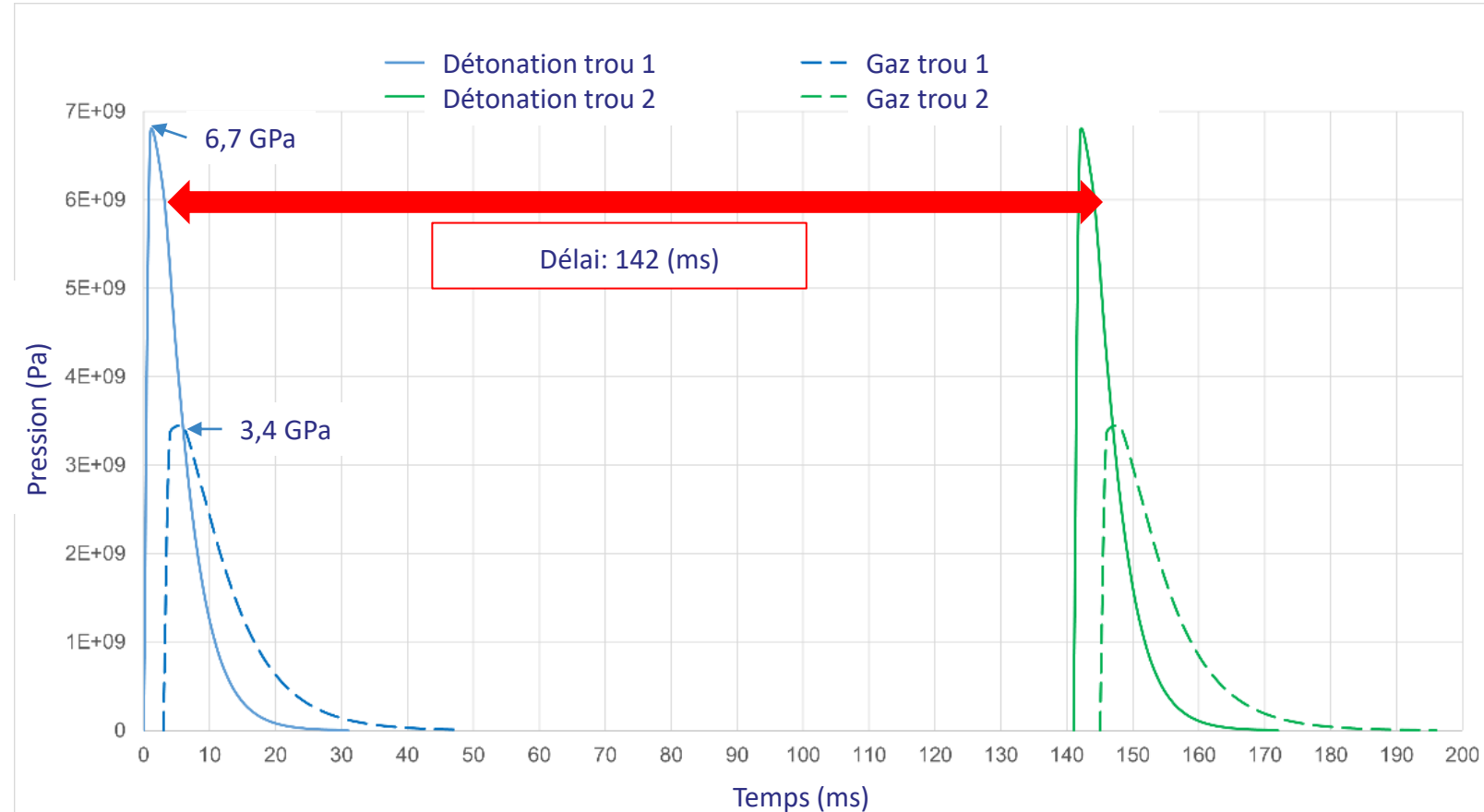
β = facteur d'amortissement (1/ms)

t = temps (ms)

t_r = temps de croissance (ms)

L_e = Longueur de la charge explosive (m)

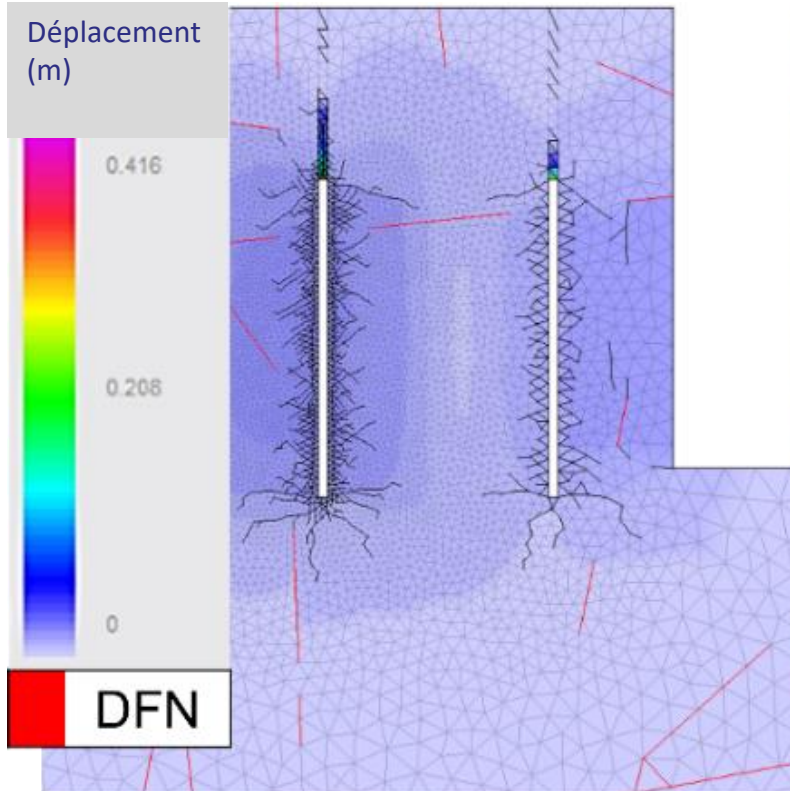
VOD = Vitesse de détonation (m/s)



Courbes pression-temps pour la pression de détonation et gaz

Résultats de la simulation de sautage

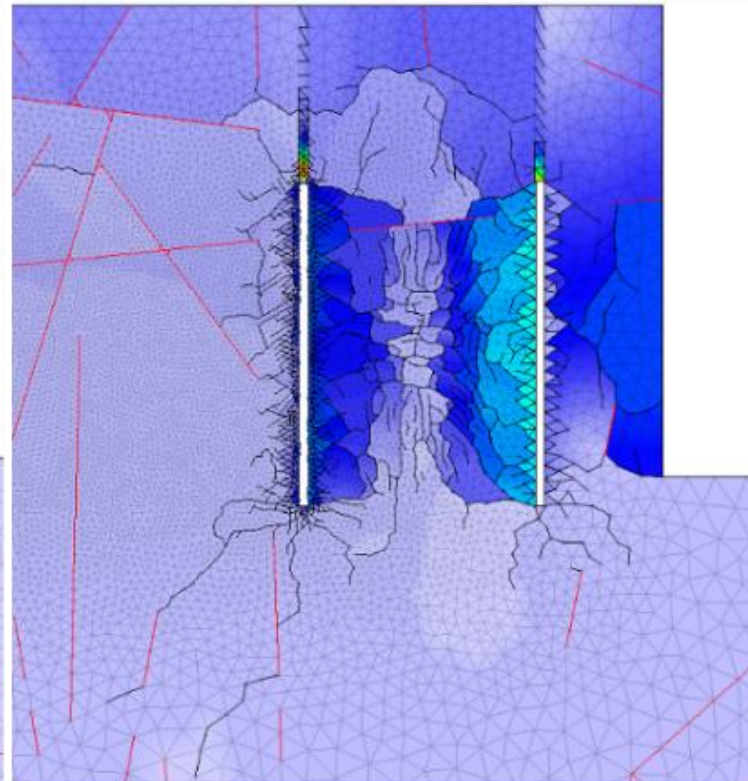
Fractures après l'initiation du sautage



(a)

Temps = 21

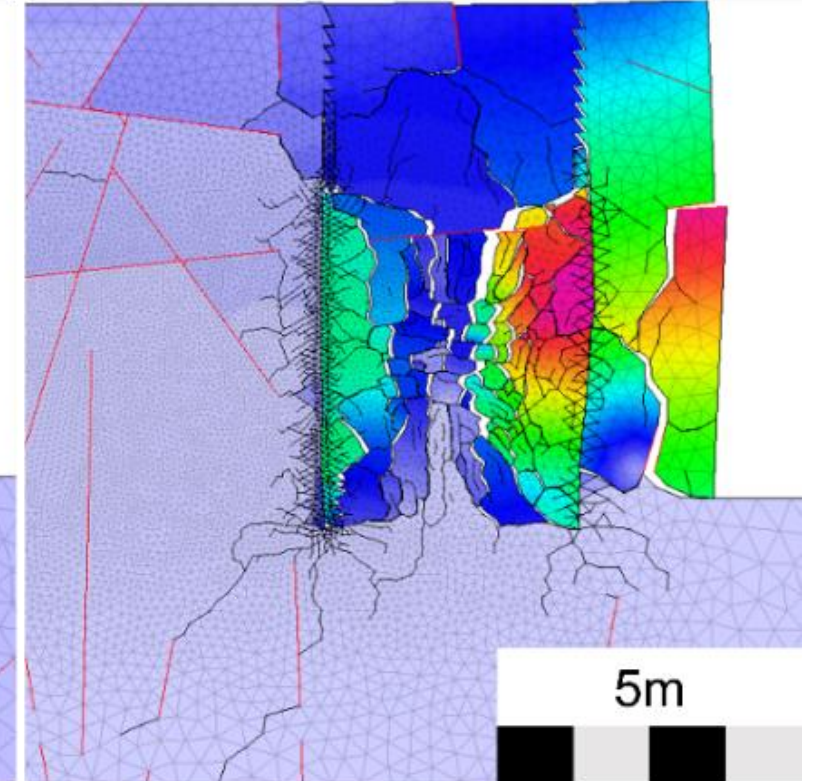
Propagation des fractures



(b)

Temps = 27

Ventilation des gaz d'explosion → pas de dommage additionnel



(c)

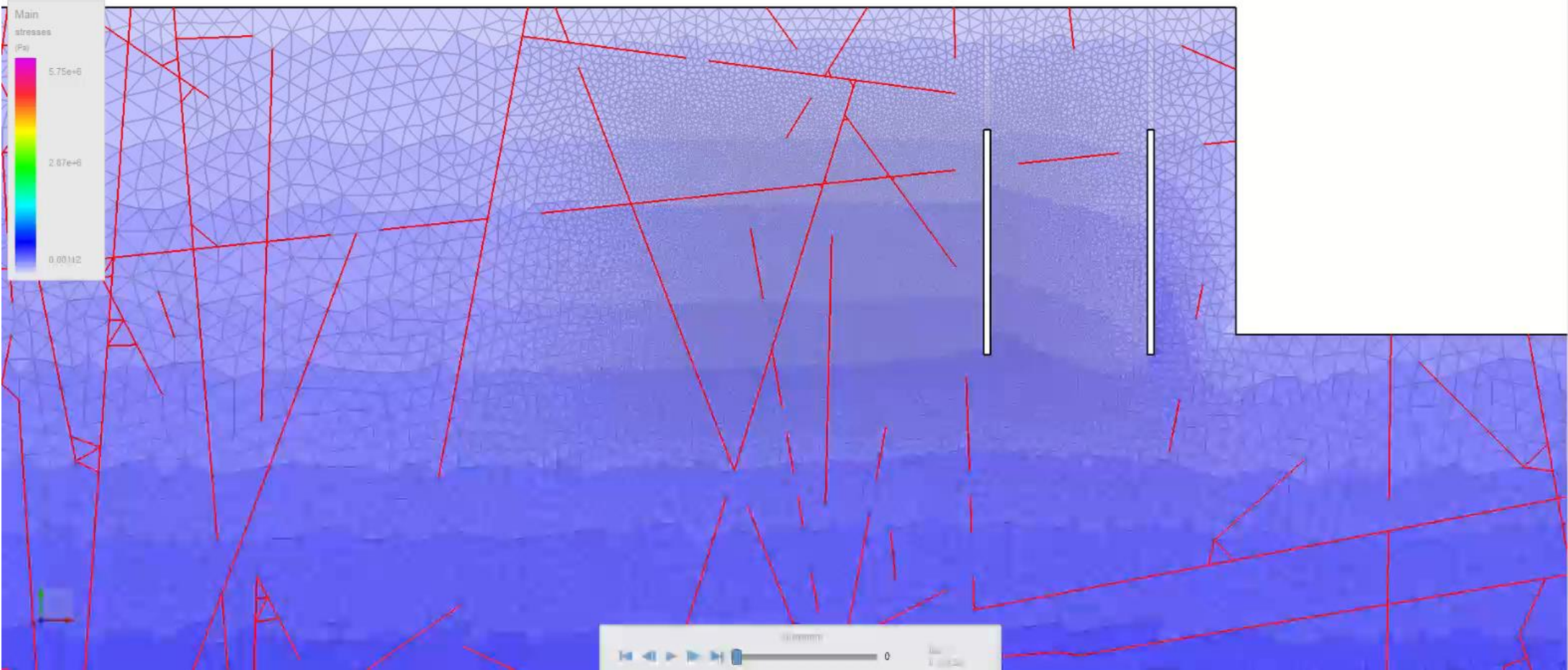
Temps = 288

Simulation d'un sautage de banc rocheux avec la propagation de la condition limite de pression des gaz

Résultats – Fracturation et fragmentation



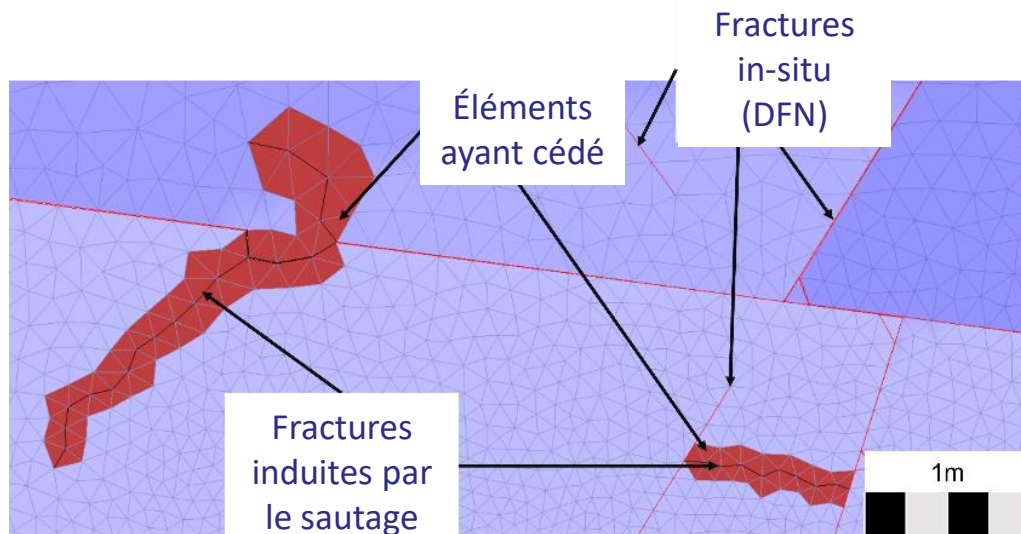
Résultats – Distribution des contraintes



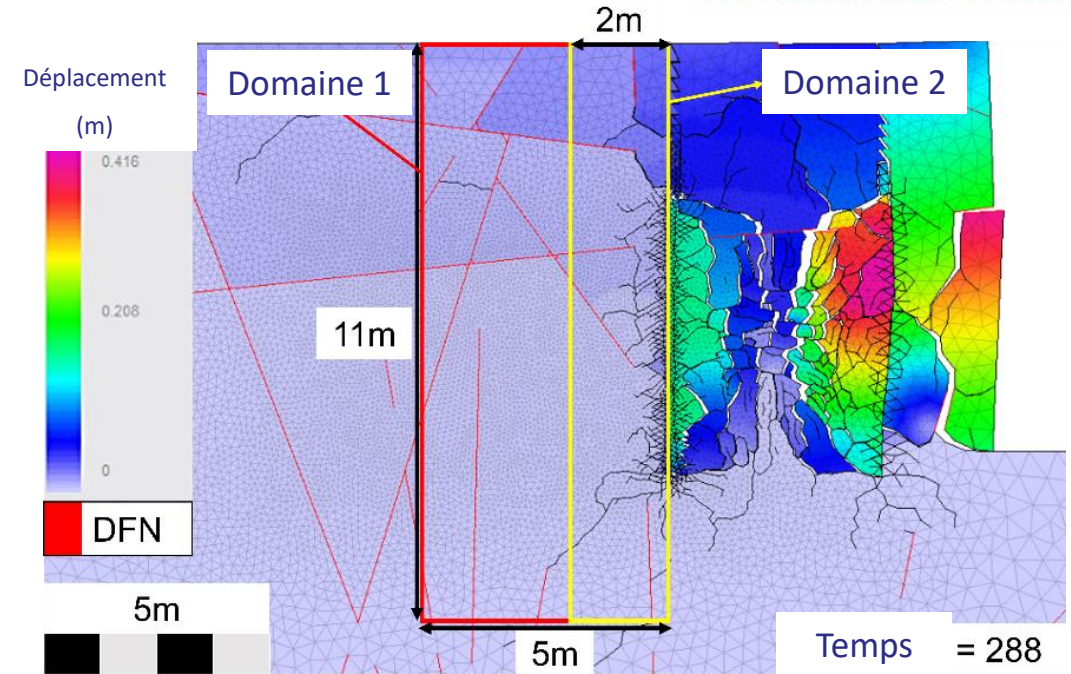
Quantification du niveau de dommage à la paroi

- Intensité de dommage (D_i): aire occupée par les éléments qui ont cédé, divisée par l'aire totale de la zone de dommage (Lupogo et al. 2014)

- $D_i = \frac{\text{Aire des éléments ayant cédé}}{\text{Aire totale}}$



Exemple d'éléments qui ont cédé (en rouge)



Aire totale pour le calcul de l'intensité de dommage (domaine 1 en rouge et domaine 2 en jaune)

Scénario de sautage	Intensité de dommage D_i	
	Domaine 1	Domaine 2
Sautage avec propagation de la condition limite de pression des gaz	0.012	0.015

Conclusion et impact de la recherche



- **Conclusions:**
 - Fractures naturelles → influence sur la trajectoire de propagation des fractures induites par le sautage du roc
 - Systèmes de fracture DFN → représentent l'orientation et l'intensité des fractures naturelles en 3D
 - Méthode combinée FDEM → simuler la phase statique et la phase dynamique du sautage du roc
 - **Propagation de la condition limite de pression** → simulation réaliste du développement des fractures, de l'interaction entre les trous de sautage et de la fragmentation

- **Impact de la recherche:**
 - La méthode d'évaluation de l'intensité du niveau de dommage peut permettre de:
 - Évaluer différents scénarios de sautage pour réduire le niveau de dommage (meilleur niveau de stabilité)
 - Réduire les coûts associés aux multiples essais de sautage

Remerciements

- Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG)
- La compagnie minière IAMGOLD
- Geomechanica Inc. (Logiciel FDEM Irazu)
- WSP-GOLDER (Logiciel DFN Fracman)

