

CARACTÉRISATION GÉOMÉCANIQUE POUR LE DYNAMITAGE DES GALERIES MINIÈRES À LA MINE LARONDE

Audrey Goulet
Martin Grenon



UNIVERSITÉ
LAVAL

Laboratoire de mécanique des roches

Plan de la présentation

- Mise en contexte du projet
 - *Défis des mines profondes*
- Cas d'étude
- Méthodologie
- Résultats préliminaires
 - *Propriétés du roc : variabilité spatiale et géologique*
 - *Fracturation : in situ et induite par le minage*
 - *Réaction sismique aux sautages*
- Travaux futurs
- Conclusion

Plan de la présentation

- Mise en contexte du projet
 - *Défis des mines profondes*
- Cas d'étude
- Méthodologie
- Résultats préliminaires
 - *Propriétés du roc : variabilité spatiale et géologique*
 - *Fracturation : in situ et induite par le minage*
 - *Réaction sismique aux sautages*
- Travaux futurs
- Conclusion

Exploitations minières

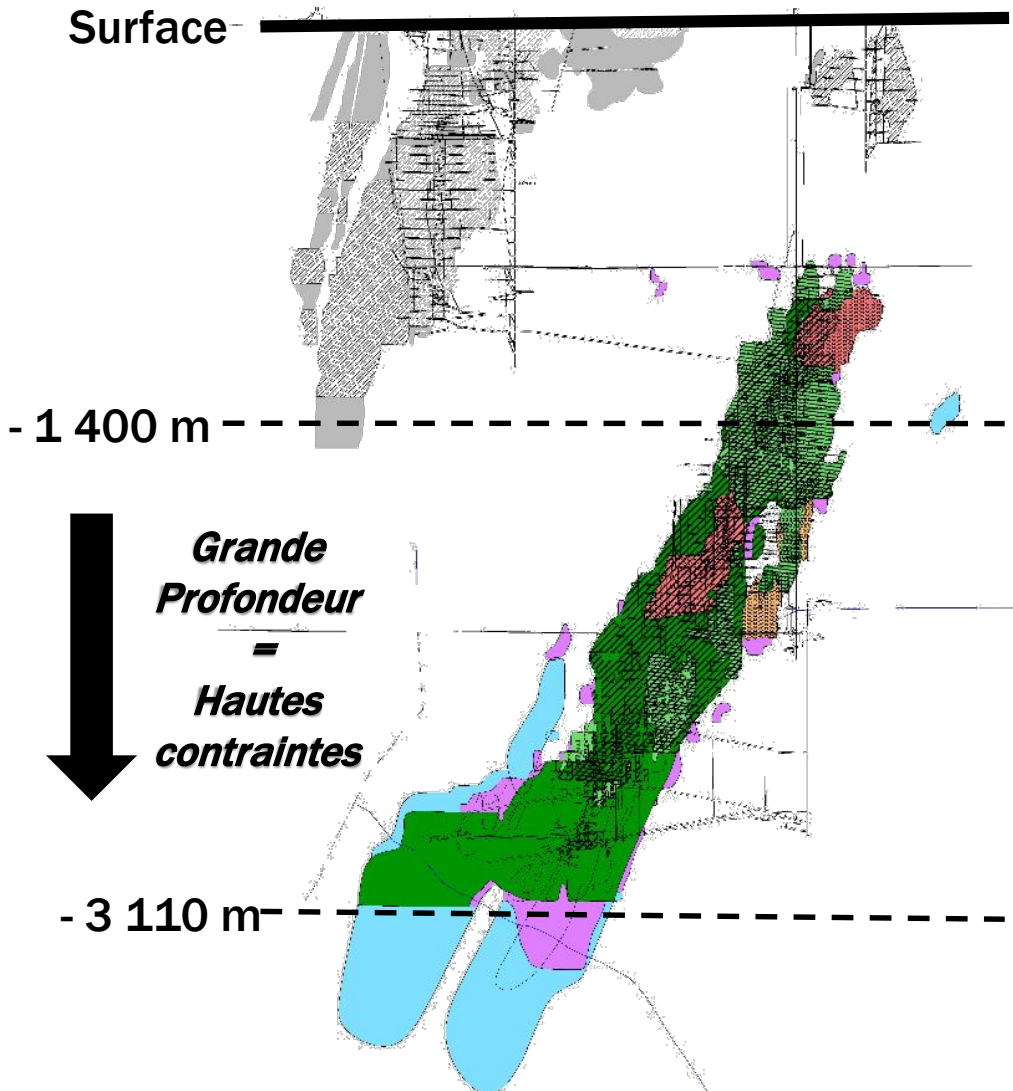


Figure 1 : Vue longitudinale de la mine LaRonde (tiré de Turcotte, 2014)

- Conséquences sur les excavations :
 - Écaillage et déformation
 - Séismicité

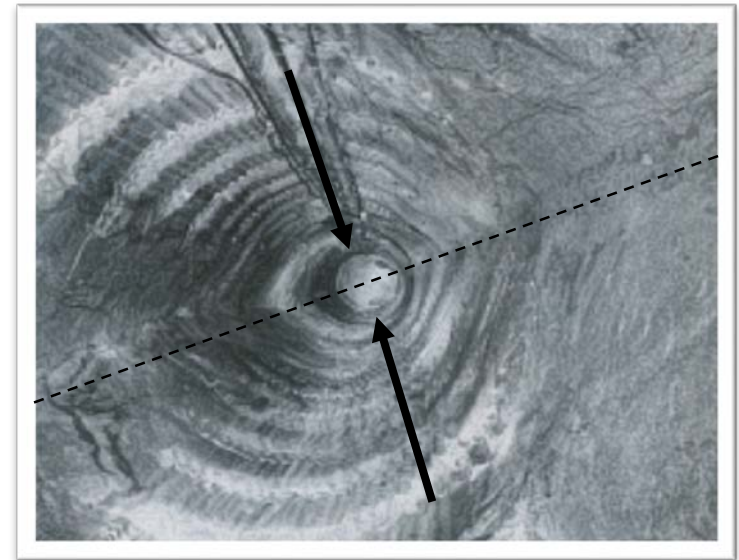


Figure 2 : Roc endommagé autour d'un tunnel par les contraintes (tiré de Ortlepp, 1997)

Exploitations minières

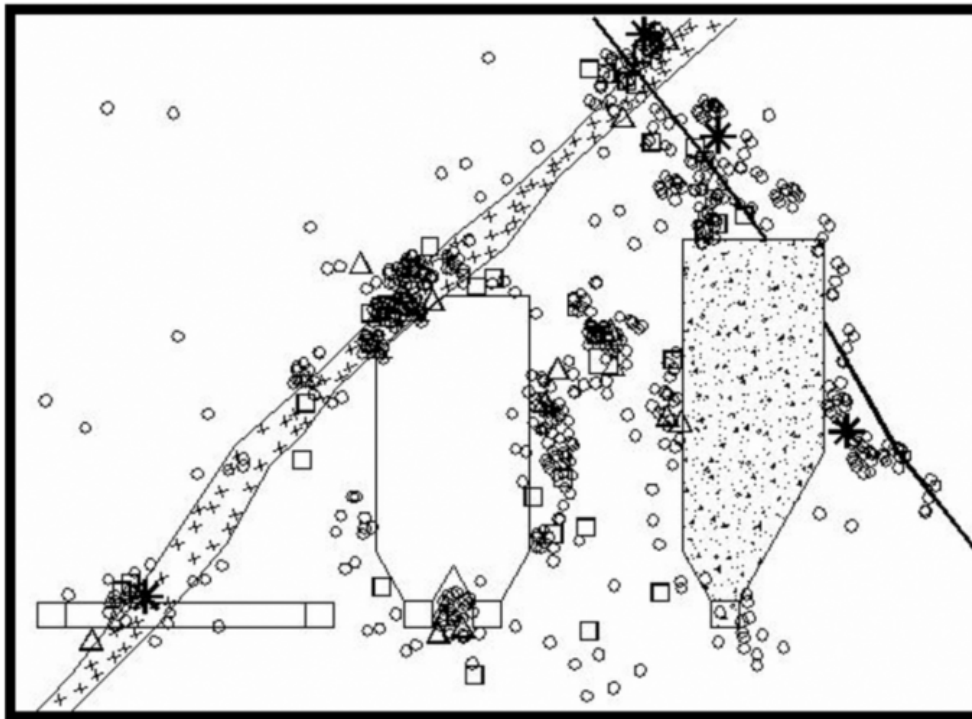


Figure 3 : Diagramme montrant les évènements sismiques résultants d'une rupture du massif rocheux (tiré de Hudyma et al. 2003)

Évènement sismique

Onde de contraintes dynamiques qui se produit comme un résultat d'une déformation ou d'une rupture localisée du massif rocheux (Heal et al. 2005)

- Mécanismes de rupture générant de la sismicité :
 - Contraste dans les propriétés du massif rocheux
 - Rupture locale du massif rocheux près des chantiers
 - Augmentation des contraintes dans un pilier
 - Glissement le long de structures géologiques

- Conséquences possibles :
 - *Coup de terrain*

Exploitations minières

Coup de terrain

Définition : Rupture soudaine et violente directement associée à un évènement sismique survenant dans un massif rocheux

Conséquences :

- Effet néfaste sur la sécurité du personnel
- Dommages aux excavations et aux équipements
- Diminution de la production

**Gestion du risque
sismique**



Figure 4 : Excavation non endommagée d'une mine souterraine (tiré de Morissette, 2017)



Figure 5 : Excavation suite à un coup de terrain dans une mine québécoise (tiré de Morissette, 2017)

Gestion du risque en milieu sismiquement actif
passe par la conception des ouvrages, reposant sur
trois piliers :

- ✓ *Caractérisation exhaustive des conditions de terrain*
- ✓ *Observation du massif rocheux suite aux sautages*
- ✓ *Analyse de l'évolution du comportement du massif rocheux*

Problématique :

Ces données et observations, souvent incomplètes, existent sous diverses formes et formats et ne peuvent être consultées et analysées efficacement, ne permettant pas une conception optimale

Objectif du projet

Élaboration d'un **modèle géotechnique global** dans une plate-forme **unique** permettant l'évaluation des **facteurs clés** responsables des **comportements** du massif rocheux, intégrant :

- ✓ Bases de données:
 - *Caractérisation géomécanique et géologique*
 - *Réponse sismique aux sautages*
- ✓ Outils d'analyse : spatial, temporel, statistique
- ✓ Plate-forme utilisée : 

Plan de la présentation

- ~~Mise en contexte du projet~~
 - ~~Défis des mines profondes~~
- **Cas d'étude**
- Méthodologie
- Résultats préliminaires
 - *Propriétés du roc : variabilité spatiale et géologique*
 - *Fracturation : in situ et induite par le minage*
 - *Réaction sismique aux sautages*
- Travaux futurs
- Conclusion

Cas d'étude : mine LaRonde

Historique

- Propriété d'Agnico Eagle Mines Ltd.
- Située à Preissac, Abitibi-Témiscamingue
- Mise en service : 1988
- Vie de mine estimée : 2025

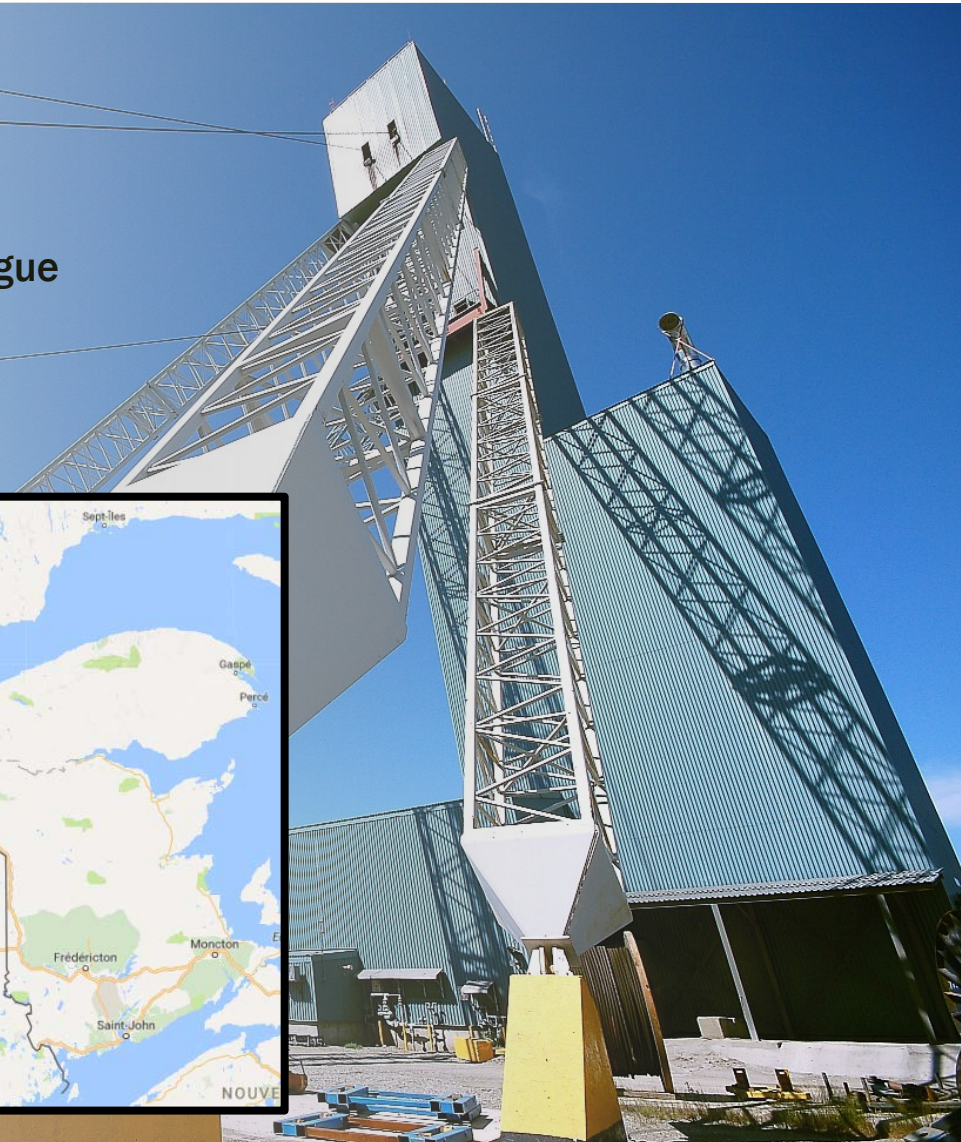


Figure 6 : Chevalement de la mine LaRonde (tiré de Turcotte, 2014)

Cas d'étude : LaRonde

Production

- Production :
 - 305 788 onces d'or / an ^[1]
 - 6 300 t/j ^[2]
- Extraction par le puit Penna de 2,2 km ^[1]
- Excavation à plus de 3 km sous la surface ^[1]
- Méthode de minage : minage long trou ^[2]
- Chantier ^[2]
 - Hauteur : 30,0 m
 - Largeur : 13,5 m à 16,0 m

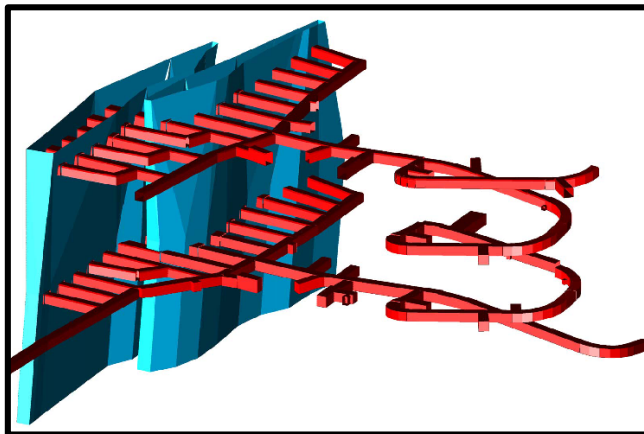


Figure 7 : Schéma de la méthode de minage de la mine LaRonde [2]

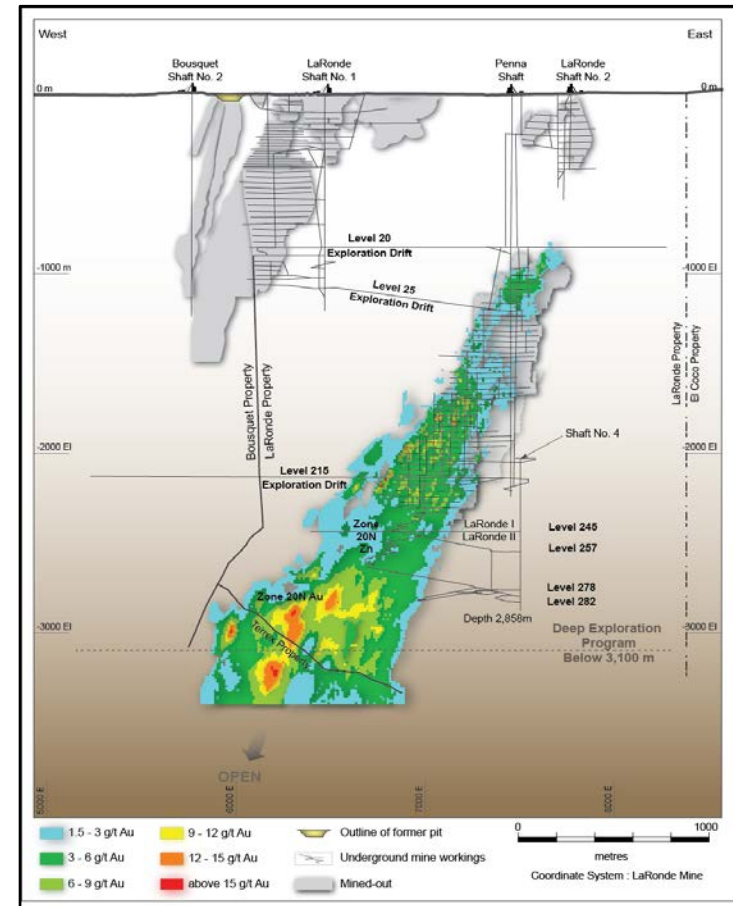


Figure 8 : Distribution de la teneur en or dans le gisement de la mine LaRonde [2]

Développement ^[2]

- 11,5 km de développement / an
- Dimension des excavations:
 - Traverbans : 5,0 m x 4,8 m
 - Galerie minéral : 4,5 m x 6,5 m

Cas d'étude : mine LaRonde

Défis géomécaniques

- Déformation : Convergence des murs des galeries
- Activité sismique et coups de terrain



Figure 9 : Déformation à la mine LaRonde
(tiré de Giroux, 2016)

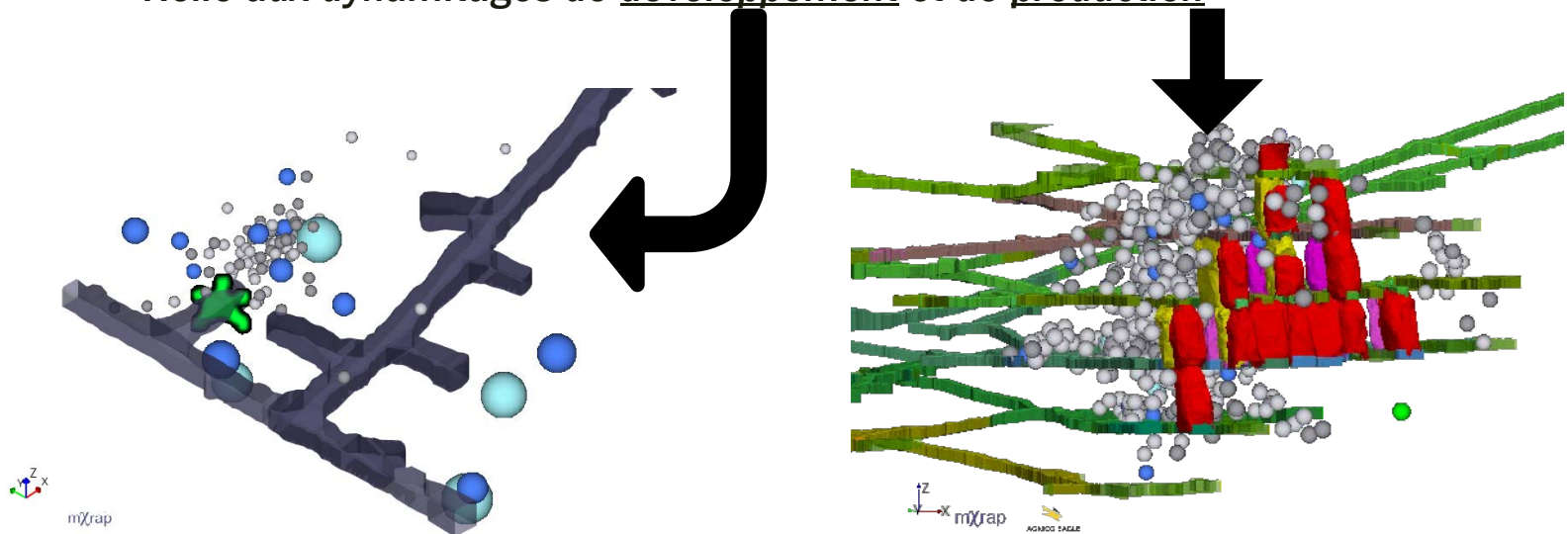


Figure 10 : Coup de terrain à la mine LaRonde
(tiré de Giroux, 2016)

Cas d'étude : mine LaRonde

Défis géomécaniques

- Déformation : Convergence des murs des galeries
- Activité sismique et coups de terrain
 - *Magnitude > 3,0 Richter*
 - *Moyenne de 70 évènements /jour*
 - *Relié aux dynamitages de développement et de production*



Importance de la gestion du risque sismique

Plan de la présentation

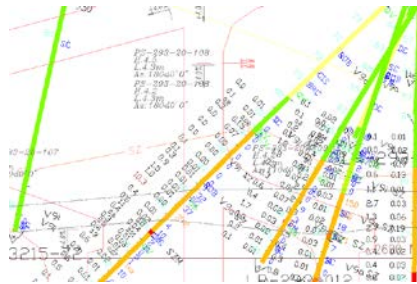
- ~~Mise en contexte du projet~~
 - ~~– Défis des mines profondes~~
- ~~Cas d'étude~~
- **Méthodologie**
- Résultats préliminaires
 - *Propriétés du roc : variabilité spatiale et géologique*
 - *Fracturation : in situ et induite par le minage*
 - *Réaction sismique aux sautages*
- Travaux futurs
- Conclusion

Méthodologie

1) Base de données : collecte, compilation et visualisation

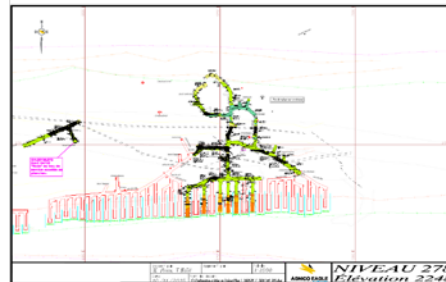
■ Données de forage

- Lithologie, altération, structures, minéralisation, RQD, etc.



■ Interprétation géologique

- Couloir d'altération
- Contact lithologiques



■ Données opérationnelles

- Dynamitages
- Direction des galeries

■ Séismicité

■ Essais géomécaniques

- UCS, TCS, DP, BX



2) Outils d'interrogation spatiale et temporelle

3) Outils d'analyse statistique

4) Application et validation à un secteur spécifique à la mine LaRonde

mXrap

Plan de la présentation

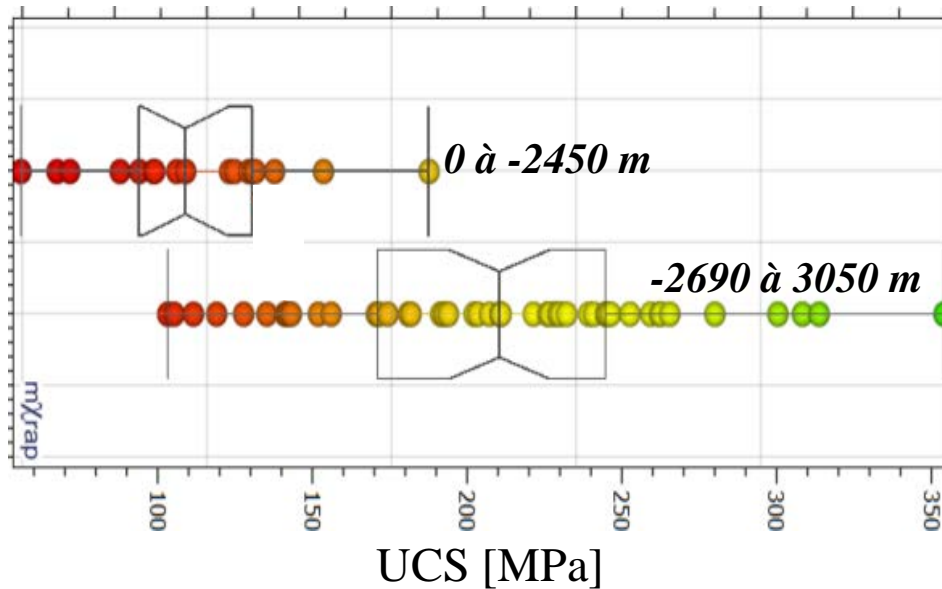
- ~~Mise en contexte du projet~~
 - ~~*Défis des mines profondes*~~
- ~~Cas d'étude~~
- ~~Méthodologie~~
- **Résultats préliminaires**
 - *Propriétés du roc : variabilité spatiale et géologique*
 - *Fracturation : in situ et induite par le minage*
 - *Réaction sismique aux sautages*
- ~~Travaux futurs~~
- ~~Conclusion~~



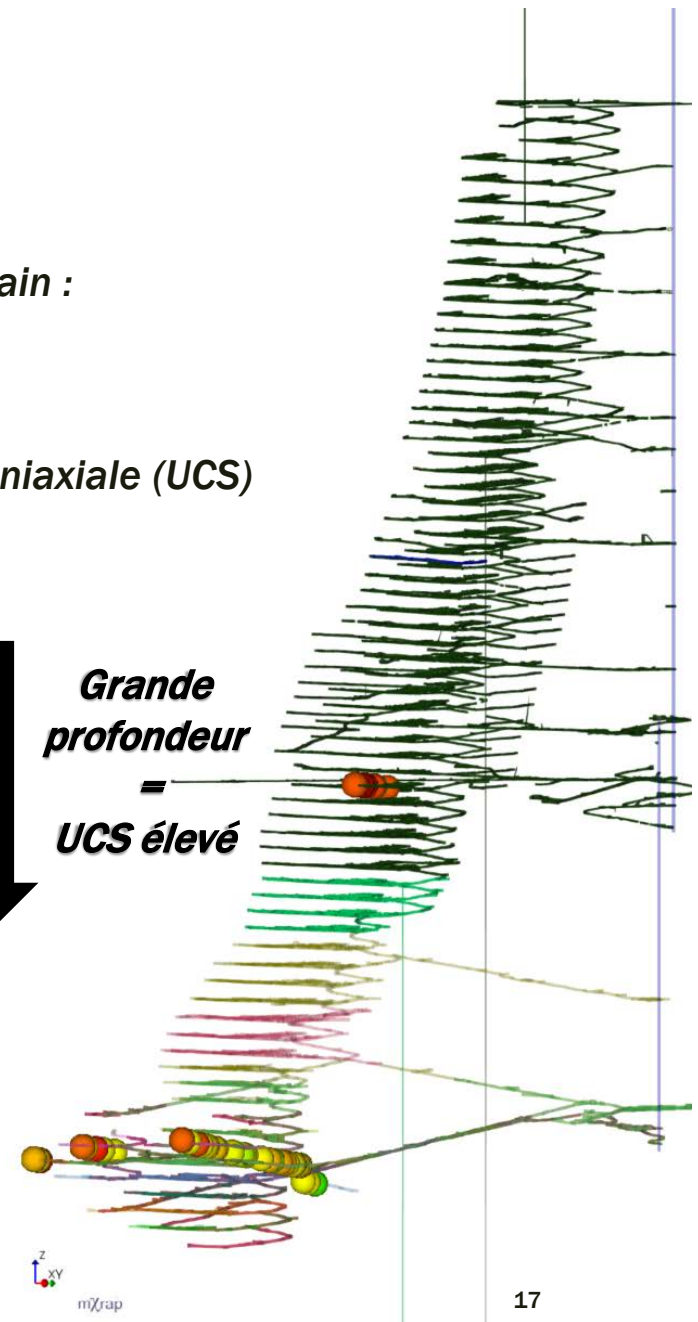
Résultats préliminaires

Exemple 1:

- ✓ *Caractérisation exhaustive des conditions de terrain :*
 - *Classification «in situ» du massif rocheux*
 - **Propriétés du roc intact**
 - *Résistance en compression uniaxiale (UCS)*



**Grande
profondeur**
= UCS élevé

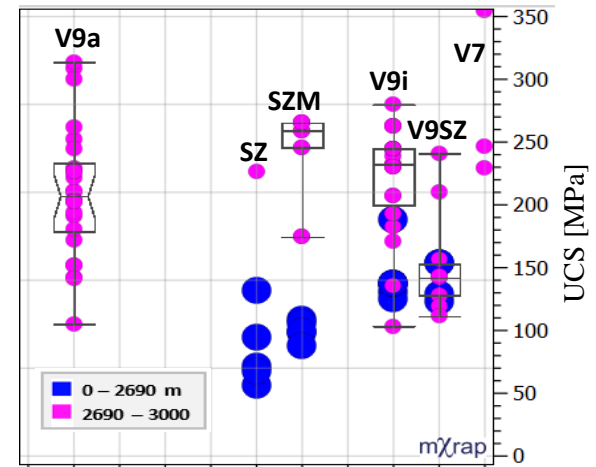


Résultats préliminaires

Exemple 1: Résistance en compression uniaxiale (UCS)

- Selon la profondeur
- Par groupe géologique : lithologie

Lithologie	Haut de mine (500 m – 2240 m)	Bas de mine (2690 – 2930 m)	Différence (MPa)
	$\bar{x} \pm \sigma$ (MPa)	$\bar{x} \pm \sigma$ (MPa)	
V9i	142 ± 21	221 ± 41	(+) 79 ± 62
V9a		210 ± 52	
V9 SZ	140 ± 14	152 ± 39	(+) 12 ± 53
SZ	84 ± 27	226	(+) 142 ± 27
SZM	100 ± 7	240 ± 35	(+) 140 ± 42
V7		354 ± 55	
TOUS	116,9	212,3	(+) 95,4



Grande profondeur = UCS élevé

- Augmentation moyenne de près de 100 MPa pour l'ensemble des échantillons
- Augmentation par lithologie :
 - Zone de sulfures semi-massifs à massifs (SZM et SZ) - Élevée : 140 MPa
 - Tuf intermédiaire / rhyodacite (V9i) - Moyenne : 80 MPa
 - Unité felsique avec sulfure disséminés (V9SZ) – Très faible : 12 MPa

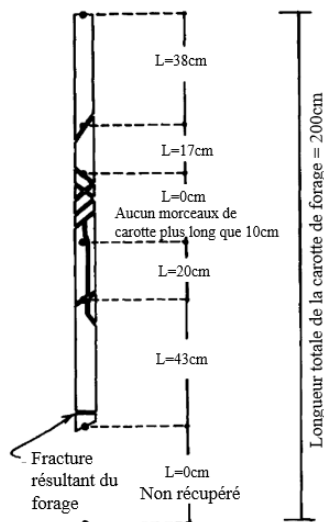
Résultats préliminaires

Exemple 2 :

- ✓ **Caractérisation exhaustive des conditions de terrain :**
 - ❑ **Classification «in situ» du massif rocheux**
 - **Caractéristiques des discontinuités**
 - **Fracturation liés aux failles (RQD)**
- ✓ **Observation du massif rocheux suite à l'excavation**
 - ❑ **Fracturation induite par le minage**
 - **RQD autour des excavations**



Figure 11 : Carottes de forages hautement fracturées (tiré de Giroux, 2016)



RQD : Désignation de la qualité de la roche

Mesure quantitative générale de la fréquence des fractures basée sur la récupération de carottes de forages exprimée en pourcentage (%)

$$RQD = \frac{\sum \text{Longueur des morceaux de carotte} > 10\text{cm}}{\text{Longueur de la carotte de forage}} * 100\%$$

$$RQD = \frac{38 + 17 + 20 + 43}{200} * 100$$

$$RQD = 59\% \text{ (Passable)}$$

Tiré de Deere et Deere (1988)

RQD	Qualité de la roche
< 25 %	Très mauvaise
25 - 50 %	Mauvaise
51 - 75 %	Moyenne
76 - 90 %	Bonne
91 - 100 %	Excellente

Fracturation du massif rocheux

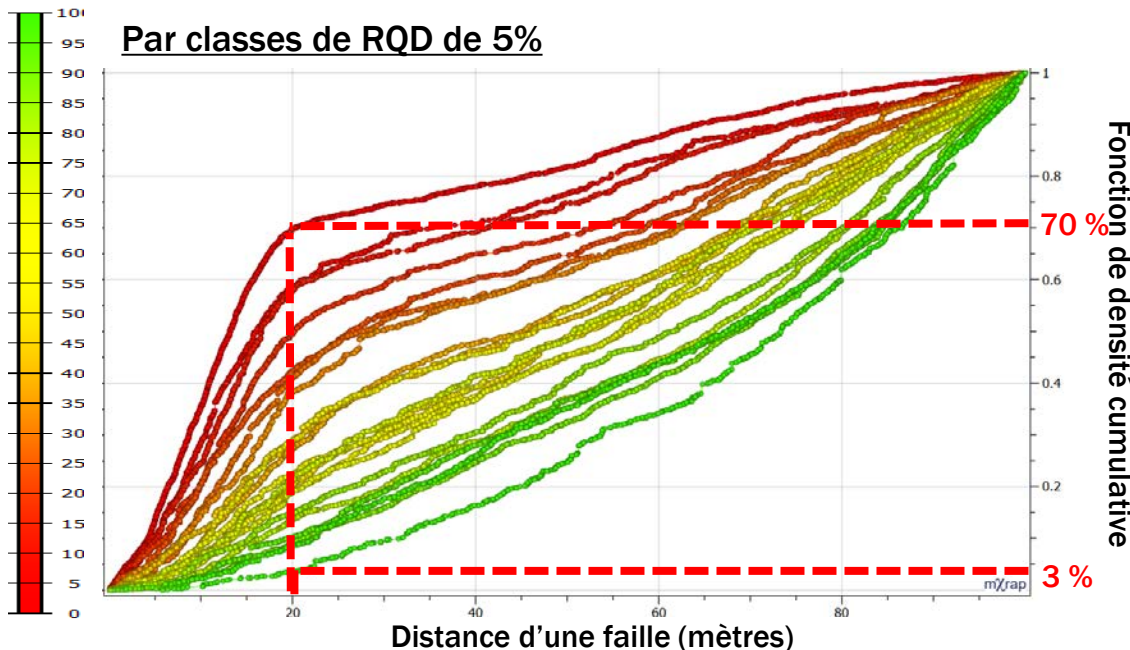
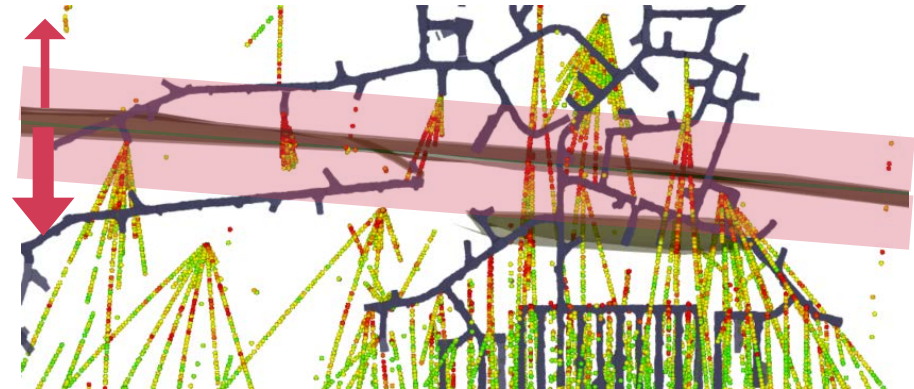
Analyse de la fracturation in situ et induite par le minage

Distribution des classes de RQD selon leur distance par rapport à la faille

Secteur analysé : Horizon 269 - 293
 Distance maximale analysée : 100 mètres
 Données de 2012 à 2017

Distance à la faille

Faille



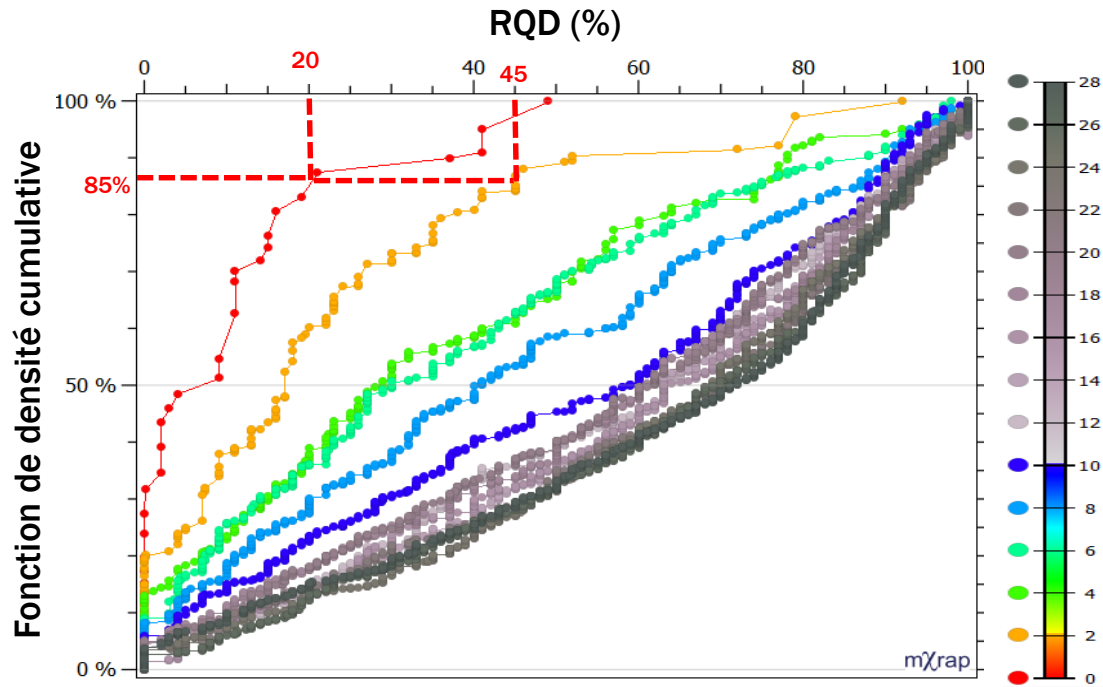
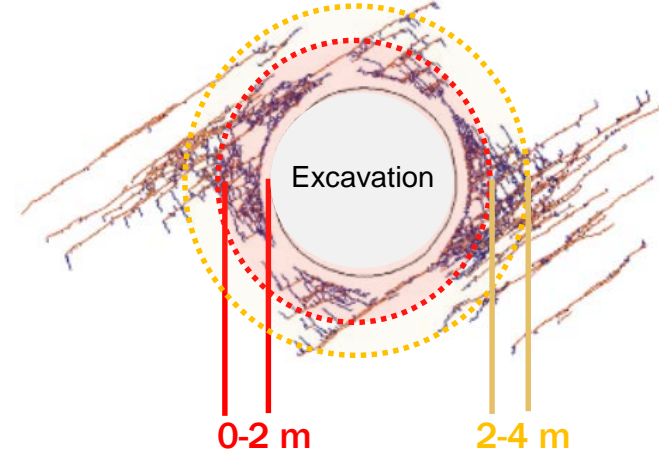
Parmi l'ensemble des données de RQD entre 0 à 100 mètres d'une faille :

- Seulement 3 % des RQD [95,100 [% se trouvent à moins de 20 m d'une faille
- 70% des RQD [0,5[se trouvent dans les 20 premiers mètres d'une faille

Fracturation du massif rocheux

Analyse quantitative spatiale de la fracturation induite par le minage

Représentation graphique de la zone endommagée autour d'une excavation (Tiré de Bradley, 2015)



RQD	Qualité de la roche
< 25 %	Très mauvaise
25 - 50 %	Mauvaise
51 - 75 %	Moyenne
76 - 90 %	Bonne
91 - 100 %	Excellente

RQD de 0 à 30 mètres autour des *excavations*; Classe de 2 mètres

- De 0 à 2 mètres d'une excavation, le massif rocheux est à plus de 85% de très mauvaise qualité.
- De 2 à 4 mètres d'une excavation, le massif rocheux est de mauvaise qualité à 85%.
- L'influence de la présence d'une excavation sur la fracturation du massif rocheux semble s'atténuer jusqu'à une distance de 10 mètres.

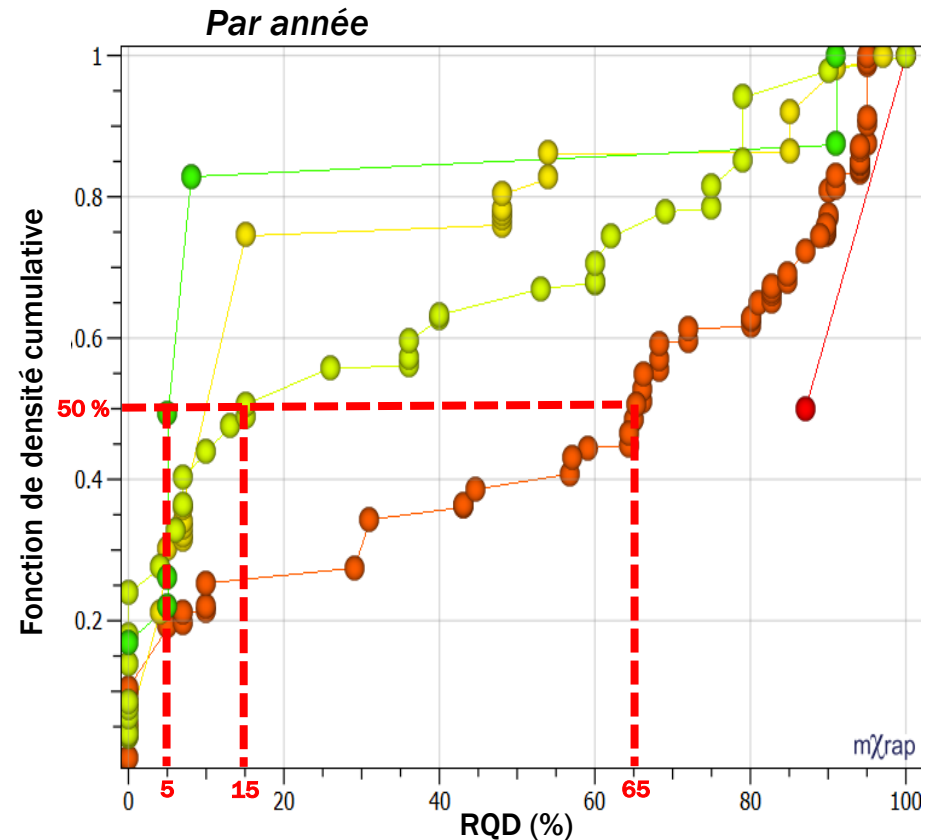
Fracturation induite par le minage

Évolution annuelle de fracturation induite par le minage

- De [0, 4[mètres des excavations

Secteur analysé : Niveau 290
Données de 2012 à 2016

Date minimum de la classe	Nombre de sautages	Nombre de données autour des galeries	\overline{RQD} autour des galeries	Nombre de données du secteur	\overline{RQD} secteur
11/01/2012		2	93.5	408	52.4
11/01/2013		71	55.1	1,814	66
11/01/2014	55	20	25.5	1,220	57.6
11/01/2015	224	35	33.5	1,320	59.9
11/01/2016	175	7	19.8	273	62.6



Dégradation temporelle du massif rocheux dans le rayon d'influence des excavations :

- Avant excavation
 - 2013 : $\frac{1}{2}$ des données de RQD < 65%
- Pendant excavation
 - 2014 : $\frac{1}{2}$ des données de RQD < 15%
 - 2016 : $\frac{1}{2}$ des données de RQD < 5%

Résultats préliminaires

Exemple 3 :

✓ *Observation du massif rocheux suite à l'excavation*

Réponse sismique

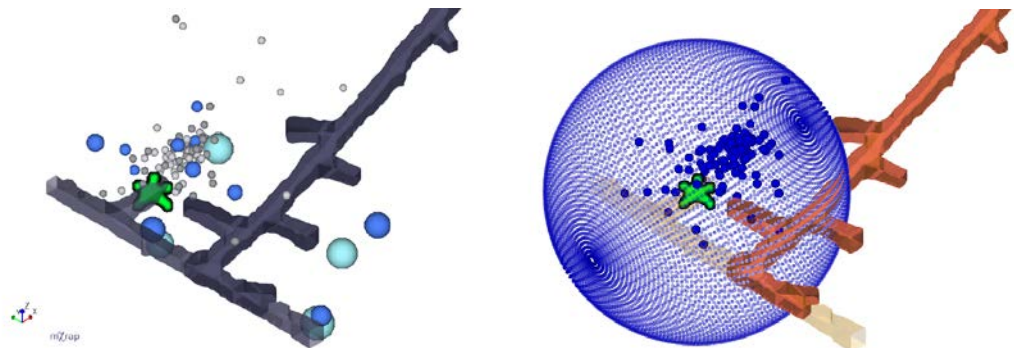
• *Selon la direction des excavations*

- **Nombre d'évènements**
- **Magnitude**

1) **Lier les évènements sismiques à un dynamitage**

- Sélection du dynamitage
- Identifier les évènements sismiques ayant lieu à une certaine distance du dynamitage dans un certain laps de temps

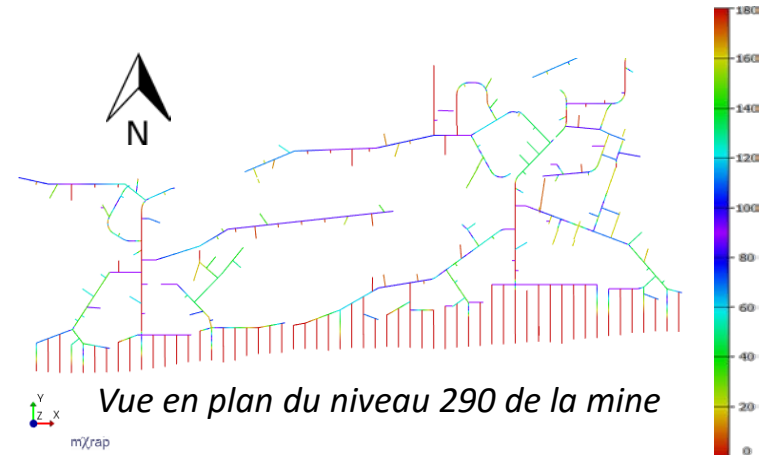
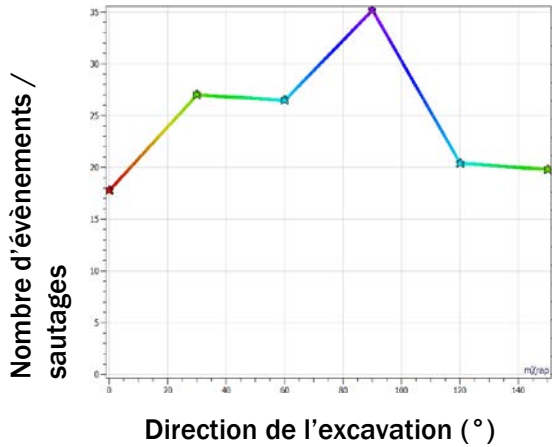
Distance : 50 mètres
Temps : 11h



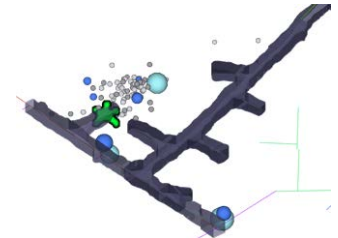
Réponse sismique aux sautages

Une fois les évènements liés à un sautage:

2) Lier le sautage à une direction d'excavation



Horizon 269-290 de la mine
Données de 2012 à 2017
Rayon de 50 m autour des dynamitages
Temps de réponse analysée :11h



Intervalle de direction	<i>direction</i>	Nombre de sautages	Nombre total d'évènements	Nombre d'évènements/sautages	<i>Magnitude maximale /sautage</i>
[165, 15[	0	2,341	34,048	17.8	-1.83
[15, 45[	30	220	5,539	27	-1.63
[45, 75[	60	583	13,775	26.5	-1.53
[75, 105[	90	1,092	35,373	35.2	-1.46
[105, 135[	120	435	8,186	20.4	-1.69
[135, 165[	150	488	8,584	19.8	-1.64

Réponse sismique selon la direction de l'excavation dans laquelle a eu lieu le sautage :

- Évènements sismiques plus nombreux et de plus grande magnitude lorsque l'excavation est à 90° par rapport au Nord

Plan de la présentation

- ~~Mise en contexte du projet~~
 - ~~Défis des mines profondes~~
- ~~Cas d'étude~~
- ~~Méthodologie~~
- ~~Résultats préliminaires~~
 - ~~Propriétés du roc : variabilité spatiale et géologique~~
 - ~~Fracturation : in situ et induite par le minage~~
 - ~~Réaction sismique aux sautages~~
- **Travaux futurs**
- **Conclusion**



Travaux futurs

- ✓ *Collecte de données complémentaires sur le terrain pour un secteur précis*

Obtention d'une plus grande densité de données sur le roc intact

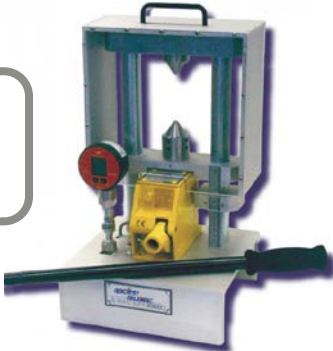
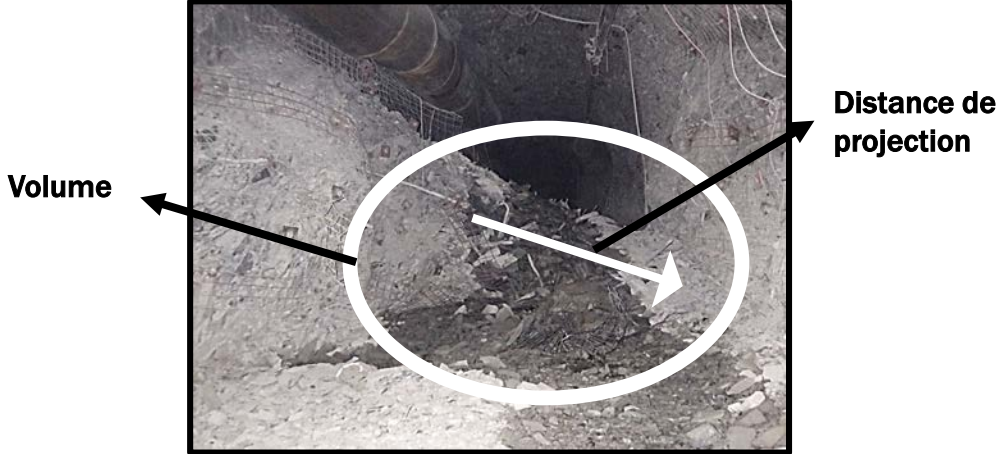


Figure 11 : Bâti PIL-7 de Rocstest pour réaliser des essais de double poinçonnement

- ✓ *Ajout des dommages reliés aux coups de terrain et de leur analyse*



Plan de la présentation

- ~~Mise en contexte du projet~~
 - ~~Défis des mines profondes~~
- ~~Cas d'étude~~
- ~~Méthodologie~~
- ~~Résultats préliminaires~~
 - ~~Propriétés du roc : variabilité spatiale et géologique~~
 - ~~Fracturation : in situ et induite par le minage~~
 - ~~Réaction sismique aux sautages~~
- ~~Travaux futurs~~
- **Conclusion**



Conclusion

L'intégration dans une plate-forme unique de nombreuses bases des données telles que :

- *Géomécanique : propriétés du roc intact, RQD*
- *Géologique : données de forages, plans d'interprétation*
- *Évènements sismiques*



Fournit des outils pour les milieux de mines profondes, sous hautes contraintes et actives sismiquement pour :

- *Améliorer la compréhension du comportement du massif rocheux, tel que celui suivant le dynamitage de galeries*
- *Mieux concevoir les ouvrages miniers et gérer le risque sismique*

RÉFÉRENCES

- Agnico Eagle Ltd, LaRonde, Between Rouyn-Noranda & Val d'Or, Qc, Canada, <https://www.agnicoeagle.com/English/operations-and-development-projects/operations/laronde/default.aspx> (consulté en novembre 2017)
- Bradley, A. L. (2015). Investigating the Influence of Mechanical Anisotropy on the Fracturing Behavior of Brittle Clay Shales with Application to Deep Geological Repositories. In *13th ISRM International Congress of Rock Mechanics*. International Society for Rock Mechanics.
- Heal, D., et al. (2005). Seismic hazard at Agnico-Eagle's Laronde Mine using MS-RAP'. CIM Maintenance Engineering and Mine Operators Conference, CIM Montreal.
- HUDYMA, M.R., HEAL, D., and MIKULA, P. Seismic monitoring in mines—old technology—new applications, Proceedings 1st Australasian Ground Control in Mining Conference, The University of NSW, Sydney, 10–13 November 2003, pp. 201–218.
- Deere et Deere (1988). The Rock Quality Designation (RQD) Index in Practice. Rock Classification Systems for Engineering Purposes. ASTM STP 984. L. Kirkaldie Ed. ASTM
- Giroux, V. (2016). Gestion du risque sismique à la mine LaRonde. Congrès de l'Association Minière du Québec, Val D'Or, Canada, 26 p.
- Morissette, P. (2017). Pro-Active Strategies for Mitigating the Consequences of Strainbursts at LaRonde Mine. ACG Strainburst in Mining International Seminar – How to Mitigate the Consequences, Sudbury, Canada 27 p.
- Ortlepp, W. D. (1997). Rock Fracture and Rockbursts; an illustraed study. Johannesburg, The South African Institute of Mining and Metallurgy.
- Turcotte, P. (2014). Pratical applications of a rockburst database to ground support desgin at LaRonde Mine. Seventh International Conference on Deep and High Stress Mining. , Sudbury, Canada.

Remerciements aux partenaires

**Fonds de recherche
Nature et
technologies**

Québec 



AGNICO EAGLE
LaRONDE



CSIRO | The University of Western Australia | Joint Venture



**UNIVERSITÉ
LAVAL**

Laboratoire de mécanique des roches