

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

Audrey Goulet  
Martin Grenon



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

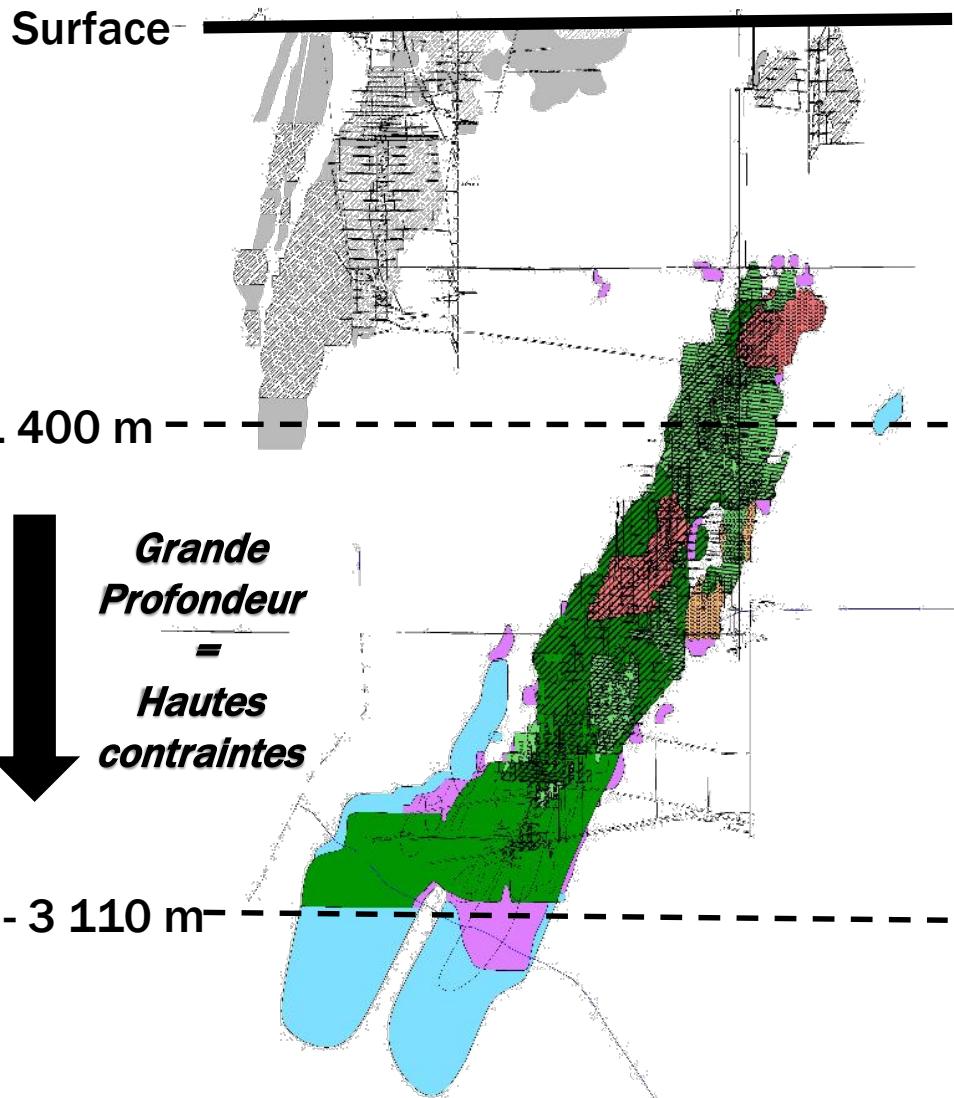


Figure 1 : Vue longitudinale de la mine LaRonde (tiré de Turcotte, 2014)

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

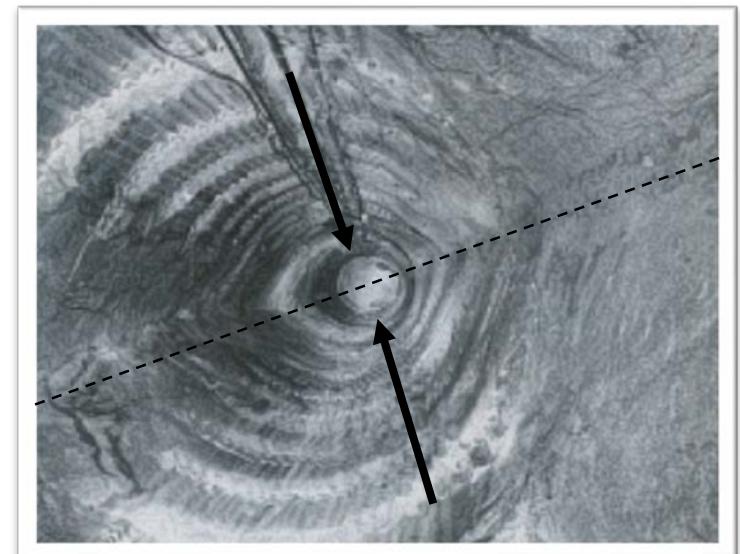
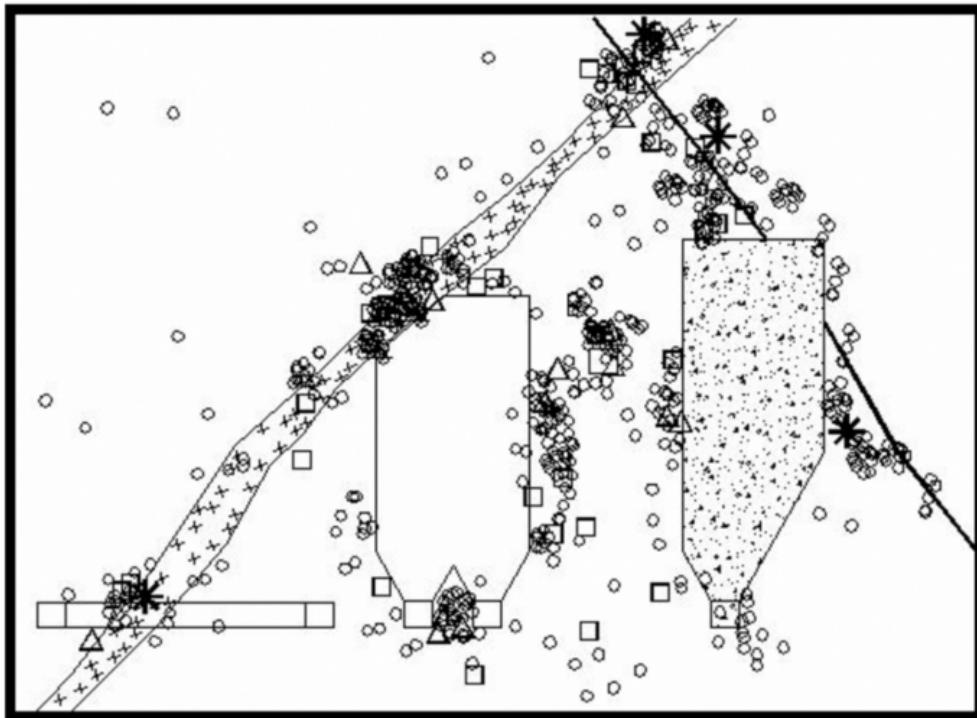


Figure 2 : Roc endommagé autour d'un tunnel par les contraintes (tiré de Ortlepp, 1997)

# 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 séismicité :
  - 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 :

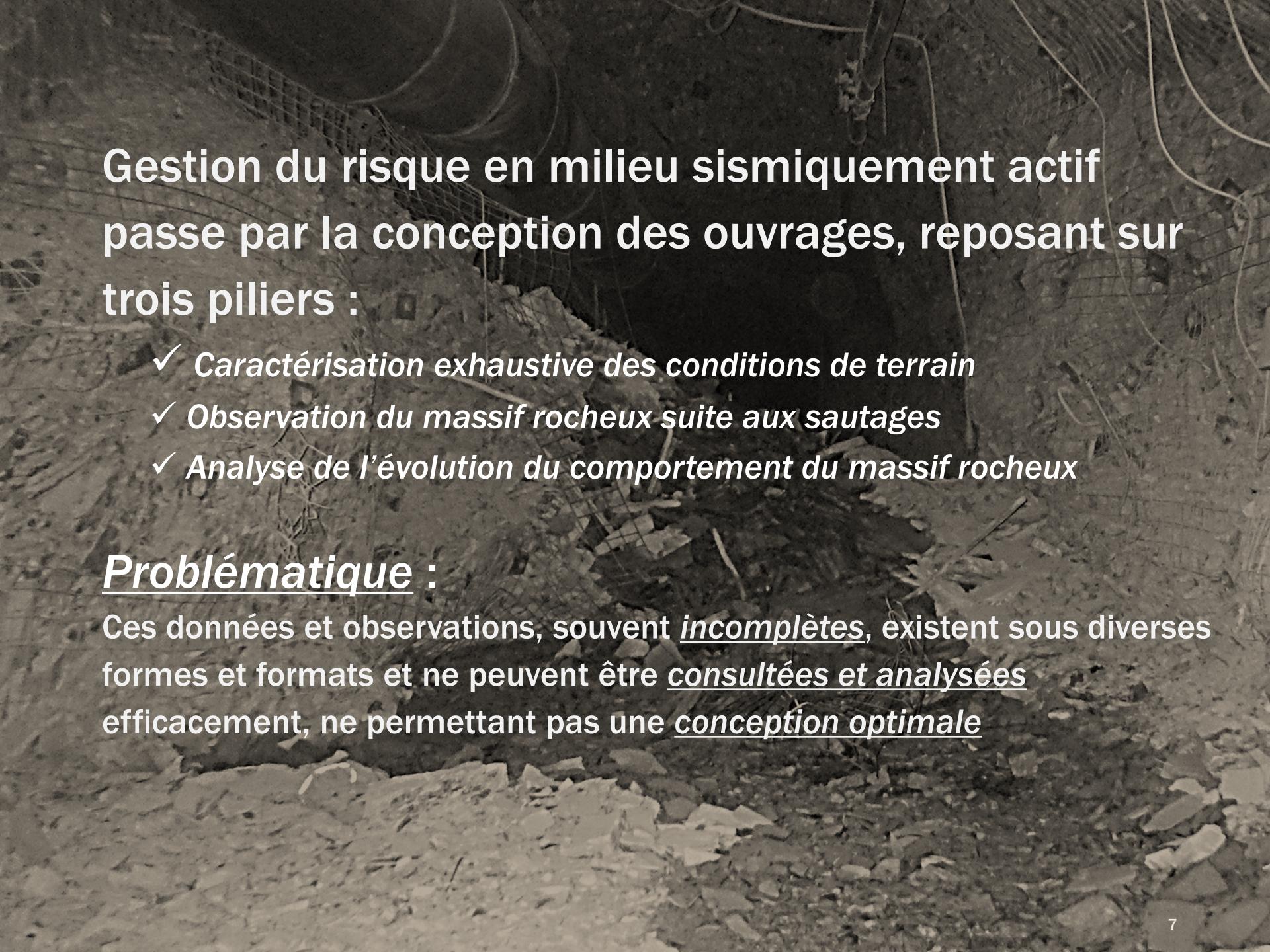
- Effet néfaste sur la sécurité du personnel
- Dommages aux excavations et aux équipements
- Diminution de la production

**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 : **mχrap**

# 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

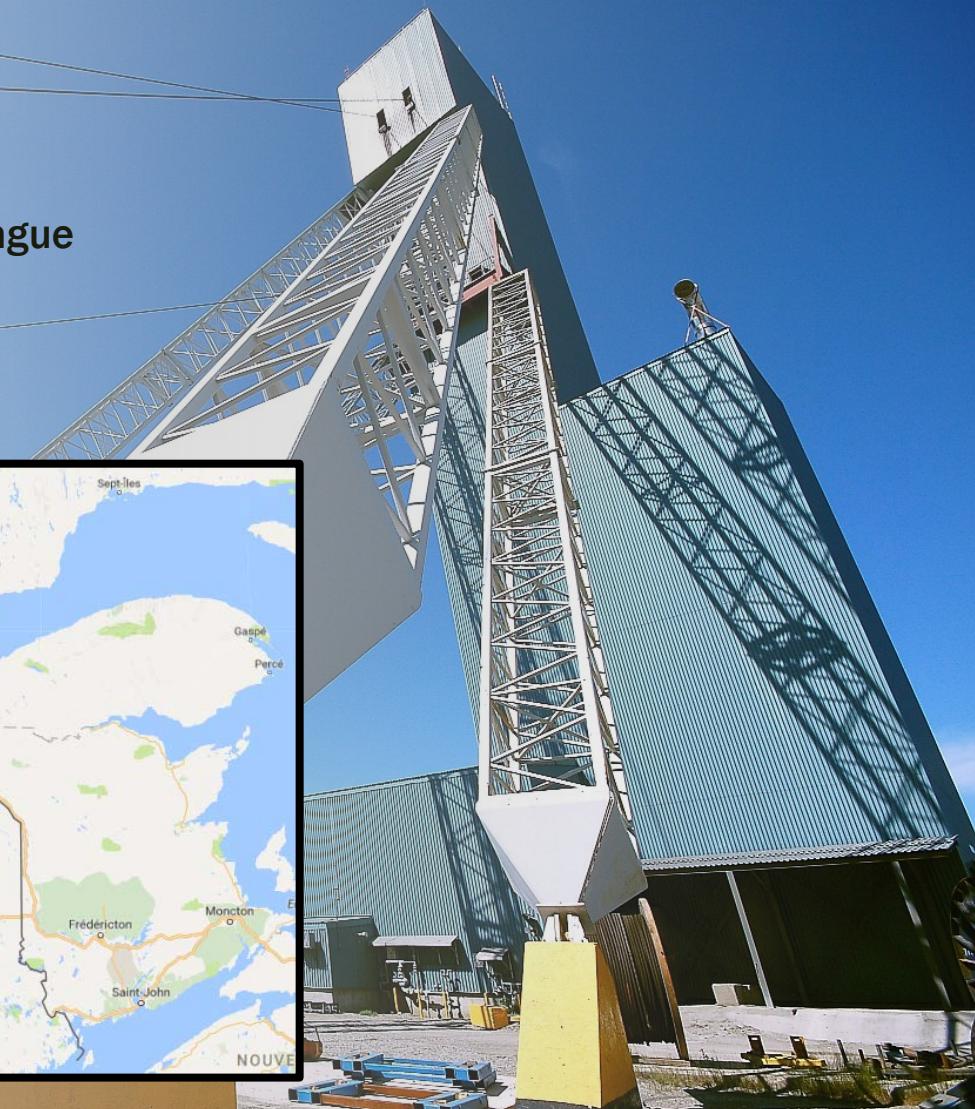
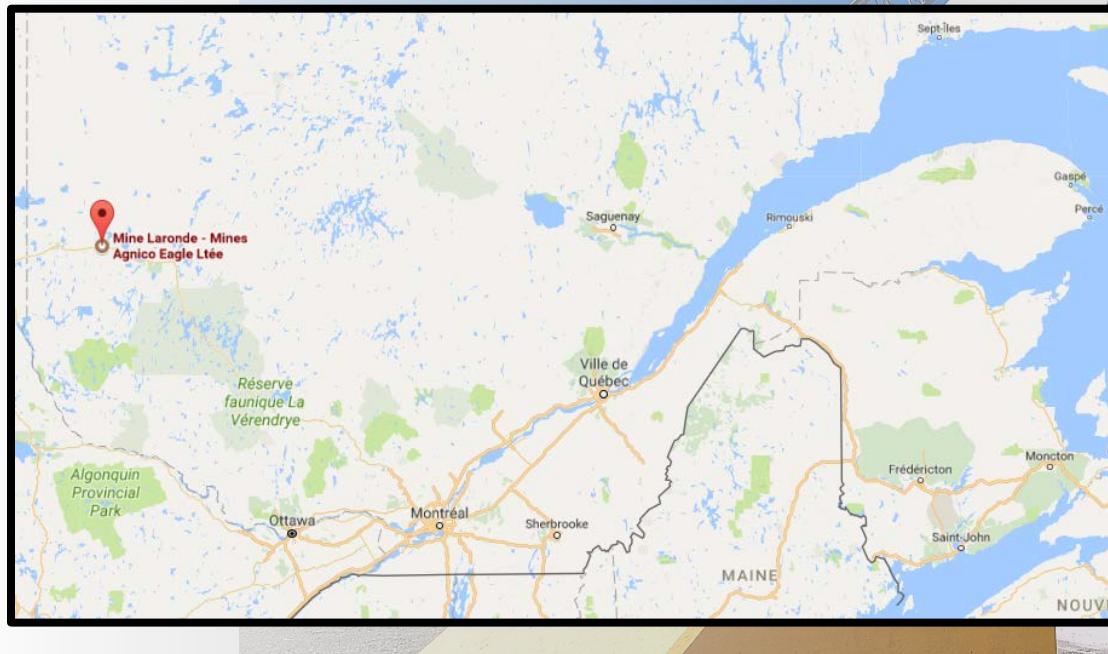


Figure 6 : Chevalement de la mine LaRonde (tiré de Turcotte, 2014)

# Cas d'étude : LaRonde

## Production

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

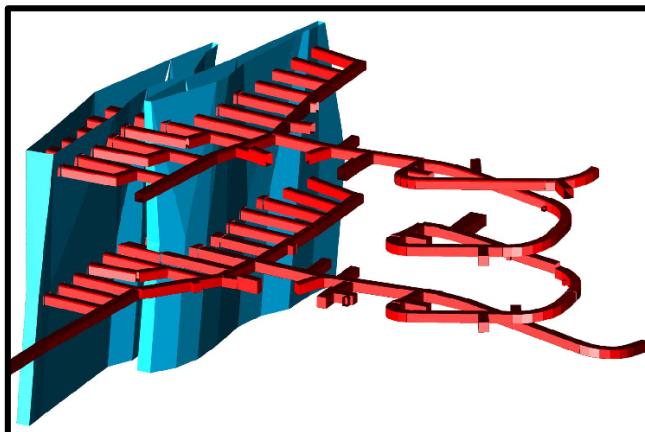


Figure 7 : Schéma de la méthode de minage de la mine LaRonde <sup>[2]</sup>

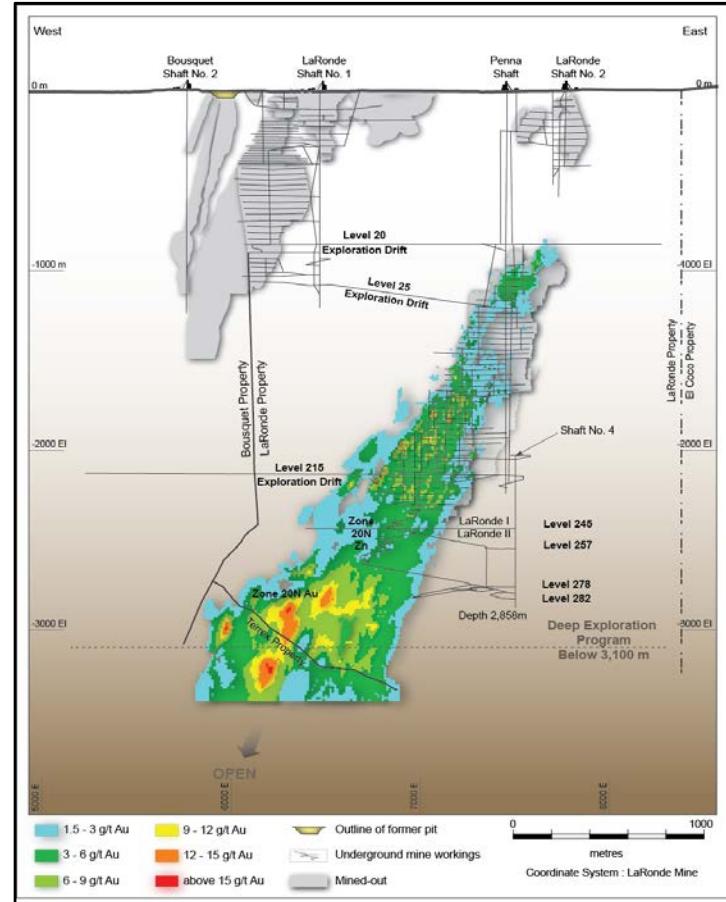


Figure 8 : Distribution de la teneur en or dans le gisement de la mine LaRonde <sup>[2]</sup>

## Développement <sup>[2]</sup>

- 11,5 km de développement / an
- Dimension des excavations:
  - Traversans : 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)

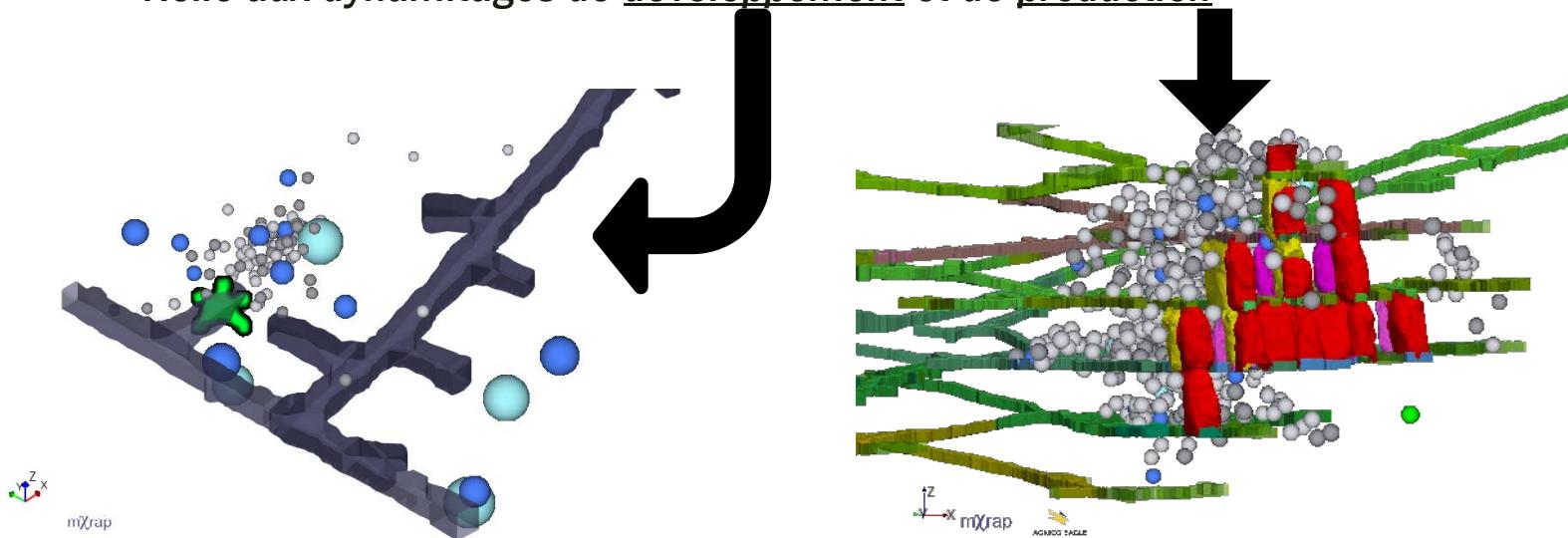


**Figure 10 :** Coup de terrain à la mine LaRonde  
(tiré de Giroux, 2016)

# 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

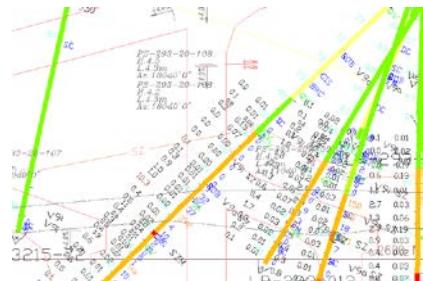
- **Mise en contexte du projet**
  - *Défis des mines profondes*
- **Cas d'étude**
- **Méthodologie**
- **Résultats préliminaires**
  - *Propriétés du roc : variabilité spatiale et géologique*
  - *Fracturation : in situ et induite par le minage*
  - *Réaction sismique aux sautages*
- **Travaux futurs**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

# Méthodologie

## 1) Base de données : collecte, compilation et visualisation

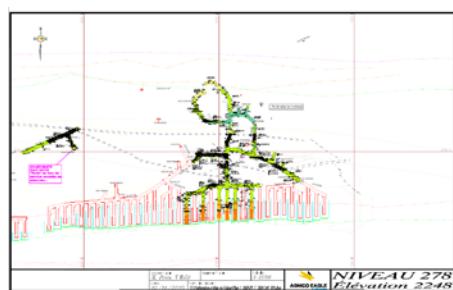
### ■ Données de forage

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



### ■ Interprétation géologique

- Couloir d'altération
- Contact lithologiques



### ■ Données opérationnelles

- Dynamitages
- Direction des galeries

### ■ Essais géomécaniques

- UCS, TCS, DP, BX



### ■ Séismicité

## 2) Outils d'interrogation spatiale et temporelle

## 3) Outils d'analyse statistique

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

mχrap

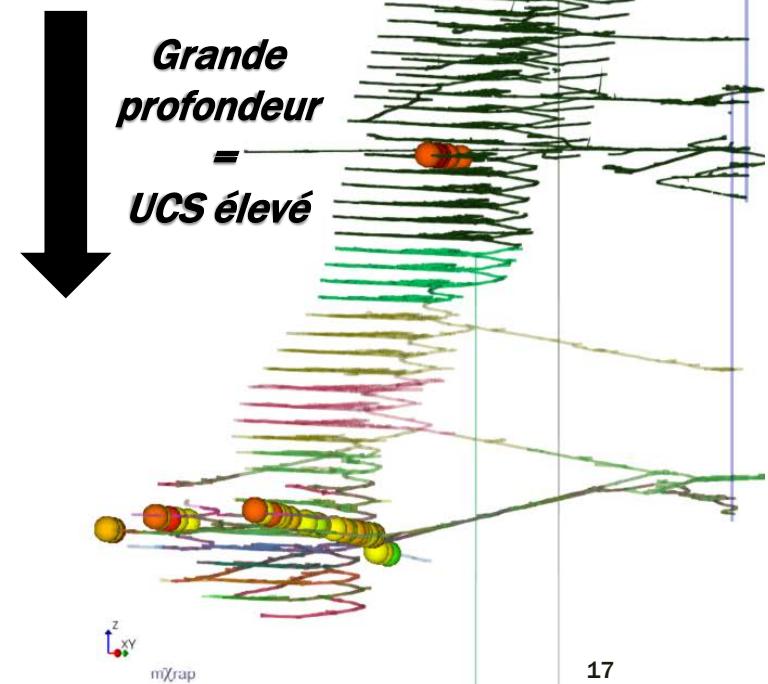
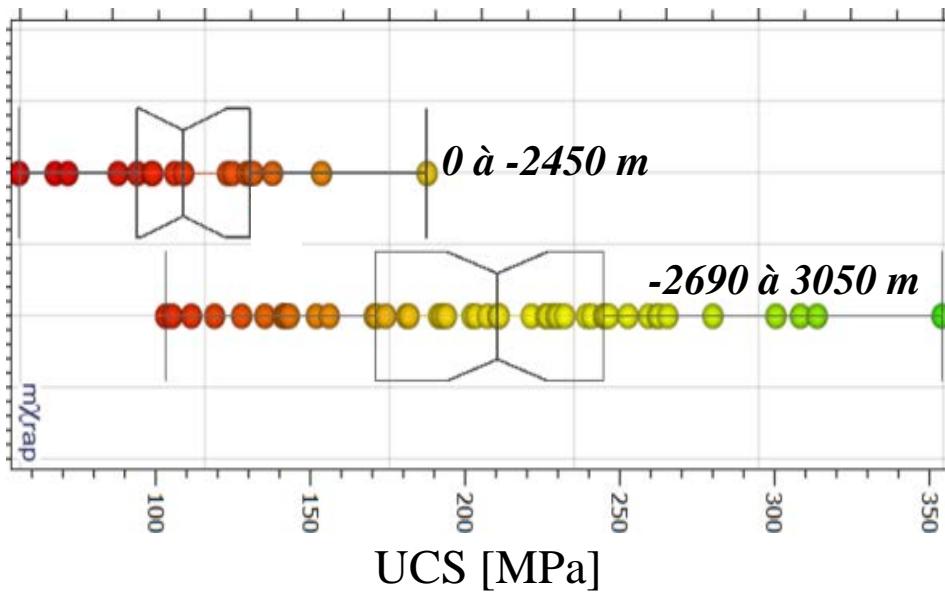
# Plan de la présentation

- 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)

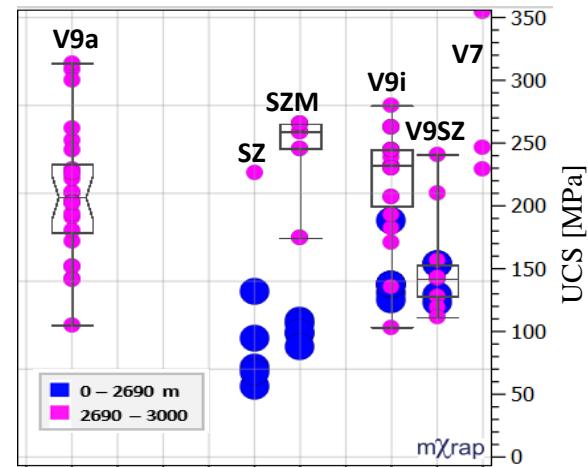


# Résultats préliminaires

## Exemple 1: Résistance en compression uniaxiale (UCS)

- Selon la profondeur
- Par groupe géologique : lithologie

Lithologie	Haut de mine	Bas de mine	Différence (MPa)
	(500 m – 2240 m)	(2690 – 2930 m)	
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	
<b>TOUS</b>	<b>116,9</b>	<b>212,3</b>	<b>(+) 95.4</b>



### **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

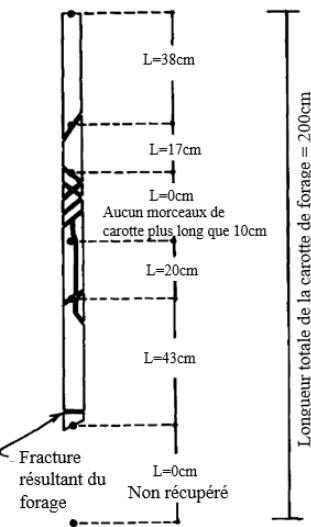
# Résultats préliminaires

## 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)*

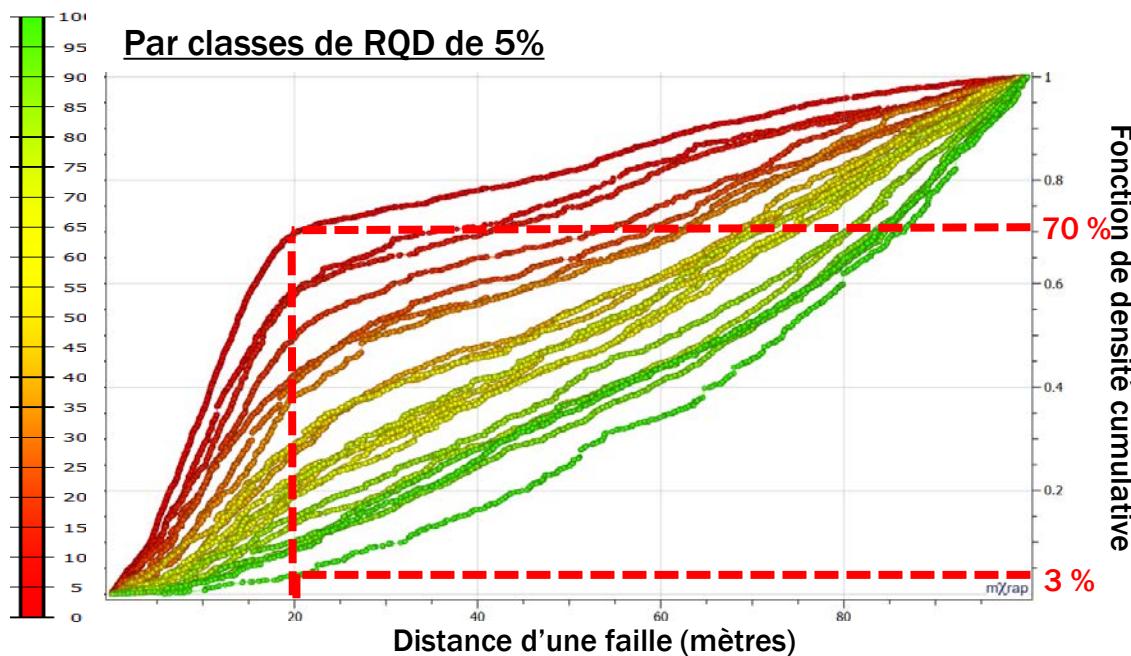
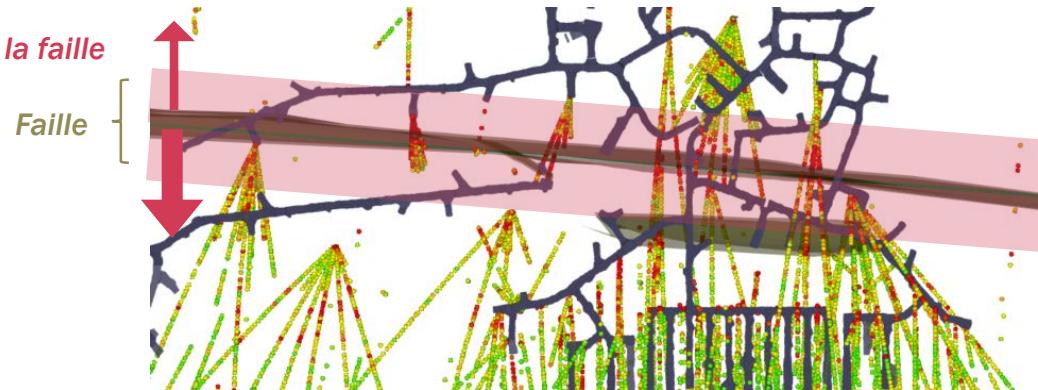
RQD	Qualité de la roche
< 25 %	Très mauvaise
25 - 50 %	Mauvaise
51 - 75 %	Moyenne
76 - 90 %	Bonne
91 - 100 %	Excellent

# 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

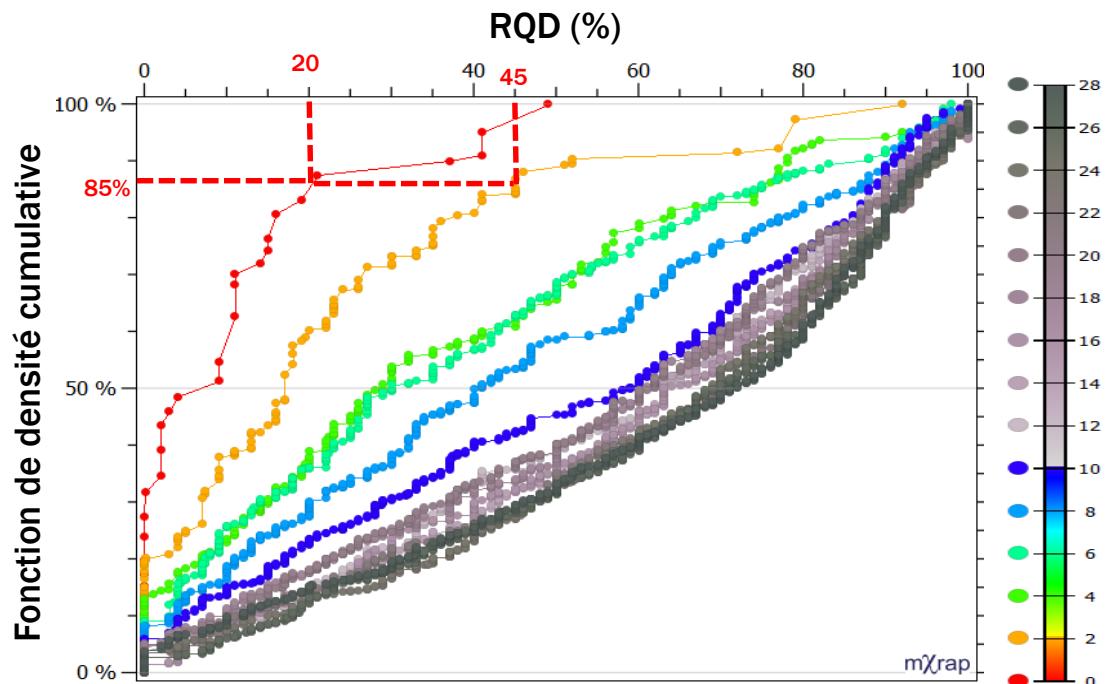


Parmi l'ensemble des données de RQD entre 0 à 100 mètres d'une faille :

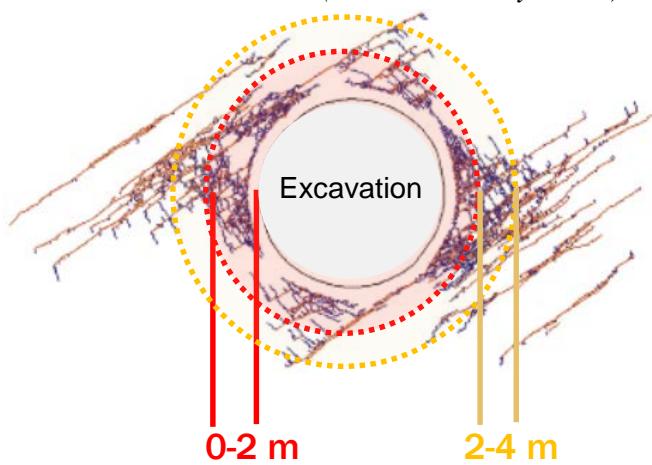
- Seulement 3 % des RQD [95,100 [ % se trouvent à moins de 20 m d'une faille
- 70% des RQD [0,5[ se trouvent dans les 20 premiers mètres d'une faille

# 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

- 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.

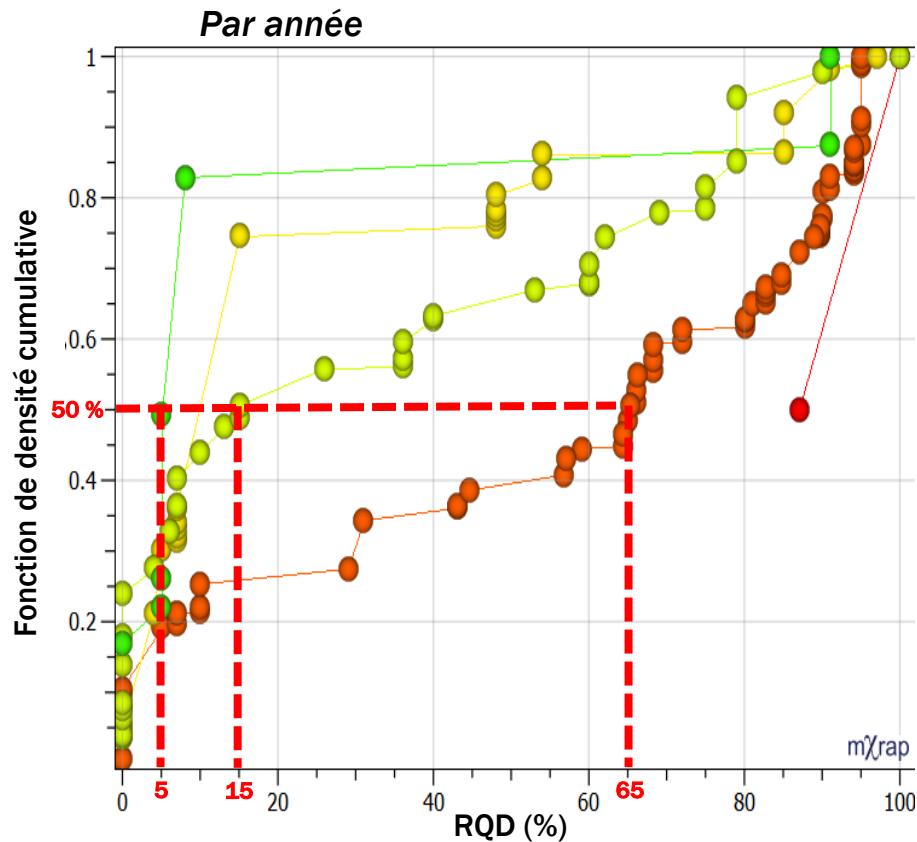
# Fracturation induite par le minage

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



Dégénération 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 :

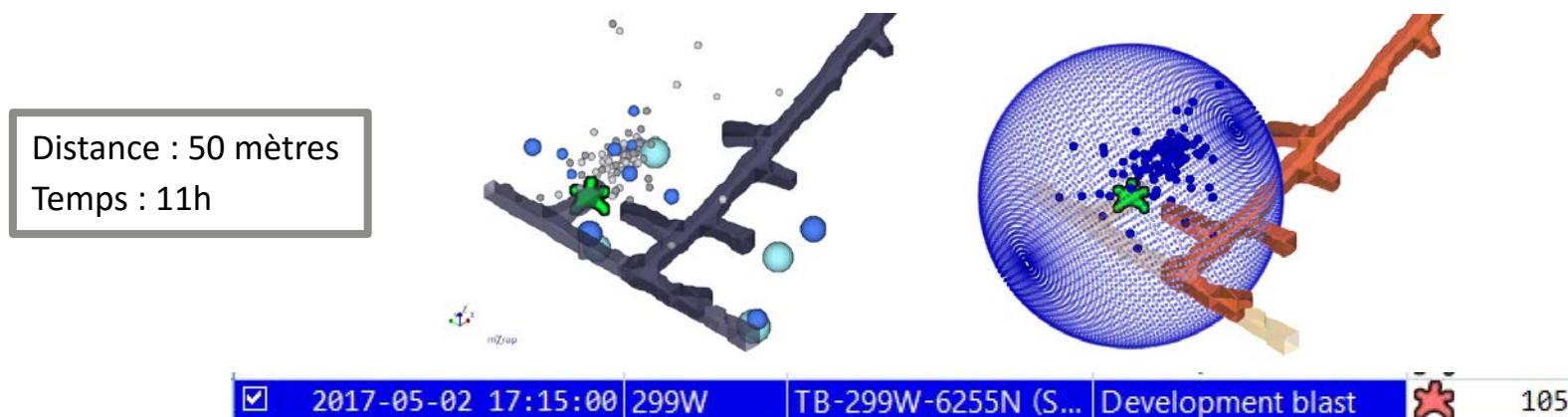
- ✓ *Observation du massif rocheux suite à l'excavation*

- Réponse sismique*

- *Selon la direction des excavations*
    - **Nombre d'évènements**
    - **Magnitude**

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

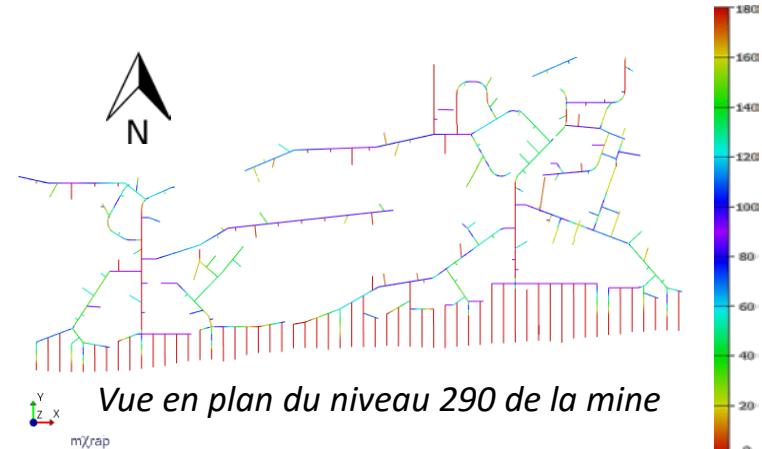
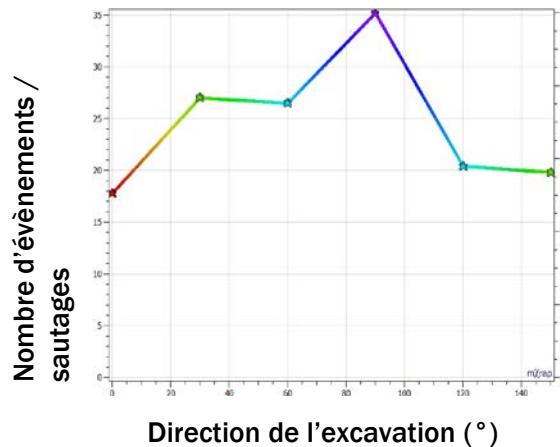
- Sélection du dynamitage
  - Identifier les évènements sismiques ayant lieu à une certaine distance du dynamitage dans un certain laps de temps



# Réponse sismique aux sautages

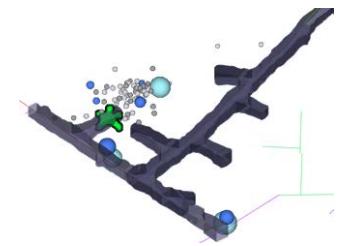
Une fois les évènements liés à un sautage:

## 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	direction	Nombre de sautages	Nombre total d'évènements	Nombre d'évènements/ sautages	Magnitude maximale /sautage
[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*



**Figure 11 :** Bâti PIL-7 de Roctest 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 de 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**



**AGNICO EAGLE**  
LaRONDE

