



14 septembre 2017 ■ ■

■ Jubilé du Comité Français de Mécanique des Roches

Mines d'aujourd'hui et de demain,
sous l'angle de la mécanique des roches

Damien Goetz, Professeur, MINES ParisTech

Mécanique des roches – Industrie minière : une coopération riche

- **L'industrie minière : un terrain d'expérimentation idéal pour la mécanique des roches**
 - D'importants enjeux de sécurité, en particulier des personnels
 - Des environnements géomécaniques très variés
- **L'industrie minière : une industrie qui a bénéficié et bénéficie toujours des avancées de la mécanique des roches**
 - Amélioration de la sécurité par la compréhension des mécanismes d'instabilités
 - Optimisation économique des mines à ciel ouvert (angle des talus) et des mines souterraines (taux de récupération des gisements)
 - Mise au point et maîtrise de méthodes innovantes

Des enjeux de sécurité forts : pour les personnels



Photographie : Pierre Thomas

Eboulement en environnement sédimentaire



Eboulement en roche massive



Contraintes sur une galerie de block caving



Soutènement d'une galerie profonde (charbon)

Des enjeux de sécurité forts : pour les riverains



Fontis généré par la mine de talc de Lassing en Autriche



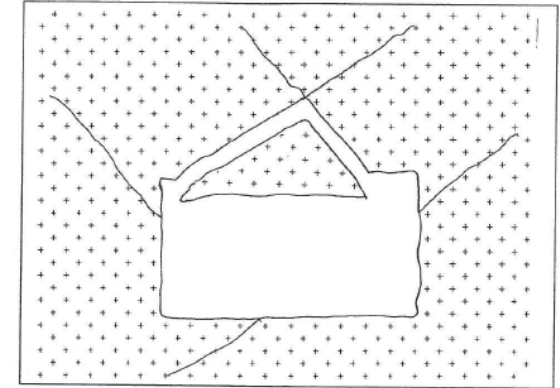
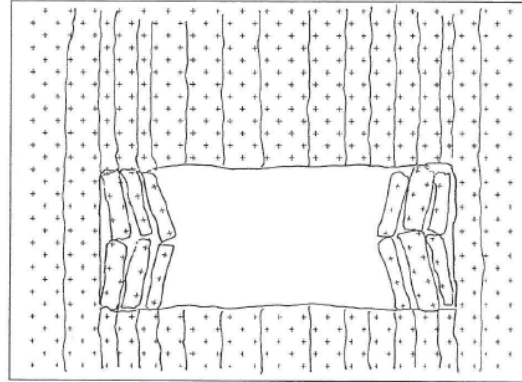
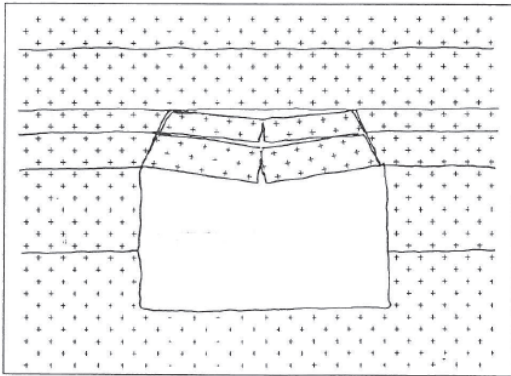
Fontis généré par la mine de potasse de Solikamsk en Russie



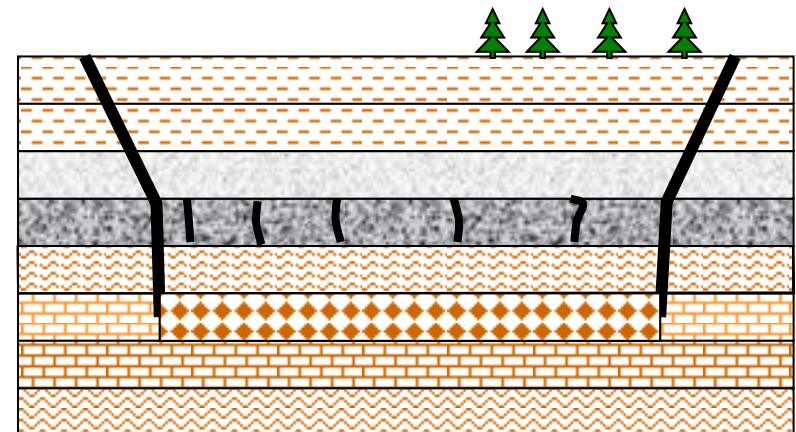
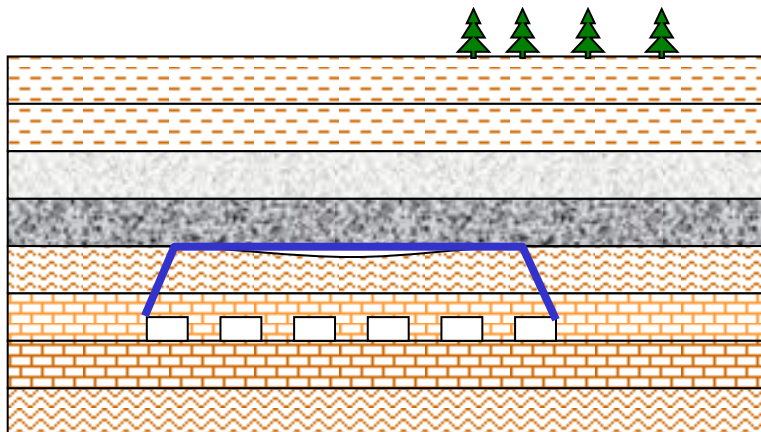
Affaissement de surface en Lorraine

- **Compréhension des mécanismes d'instabilité**

- **A l'échelle de la galerie :** Mécanismes d'éboulements de galeries (J. Fine)



- **A l'échelle du massif**

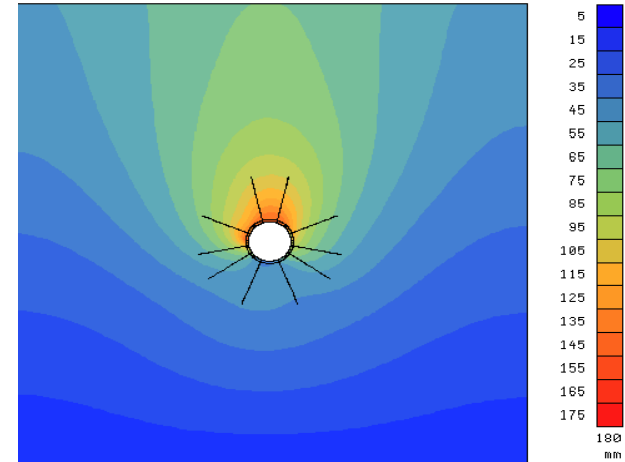
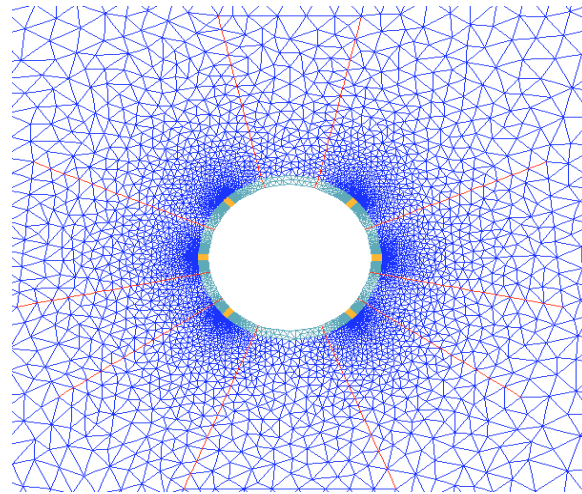


Mécanismes des effondrements spontanés des mines de fer (E. Tincelin)

- Développement d'outils de modélisation dédiés

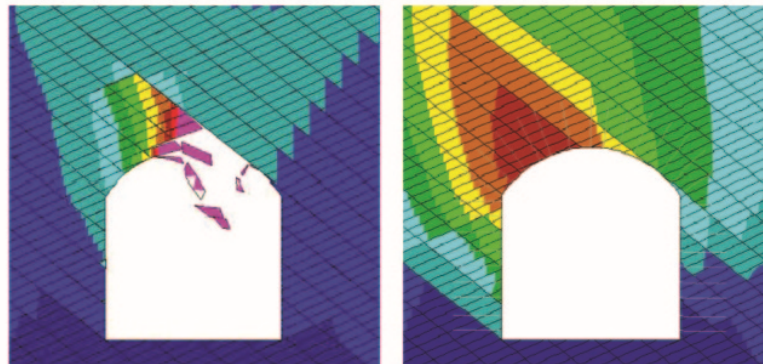
Détail du maillage indiquant la galerie avec :

- le boulonnage long
- le béton projeté
- les éléments compressibles

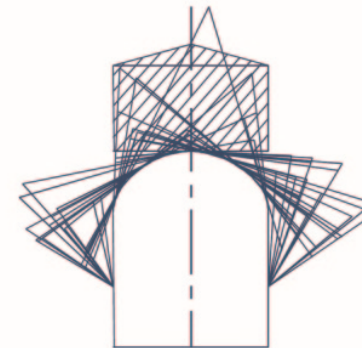


Norme du déplacement

Modélisations par éléments finis



Modélisation de blocs



Amélioration de la sécurité : moyens de laboratoire

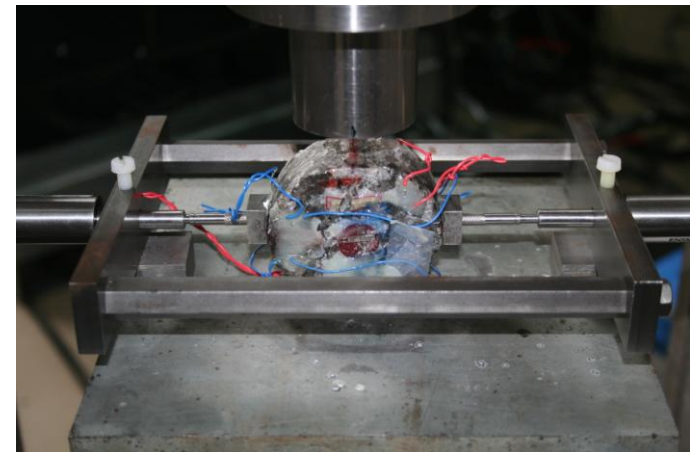
- Développement des capacités de caractérisation
 - Essais en laboratoire



Presse pour essais tri-axiaux



Cellules de fluage

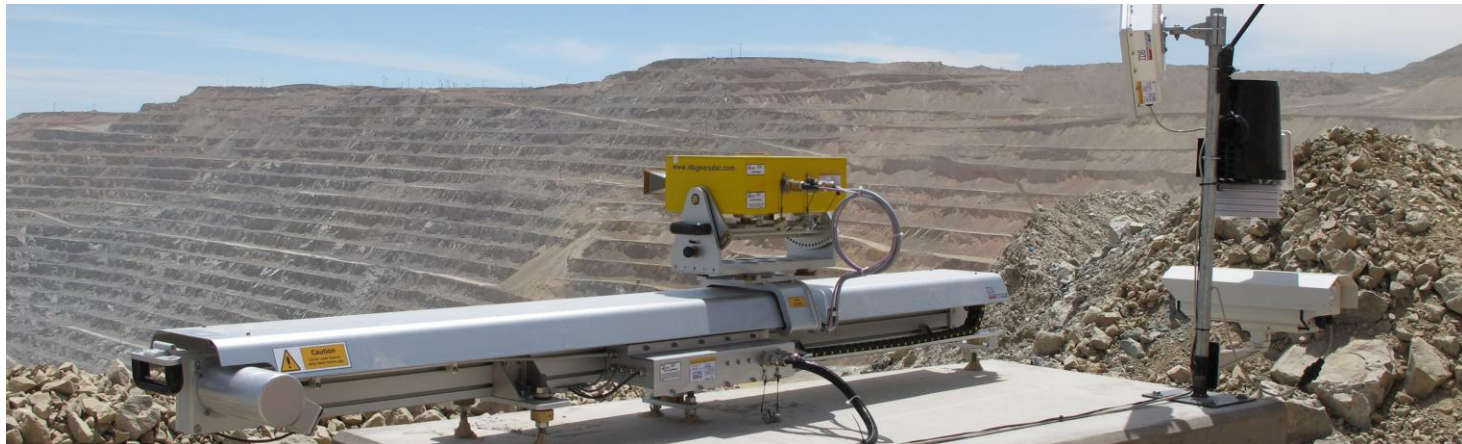


Essai brésilien instrumenté

- Instrumentation in-situ

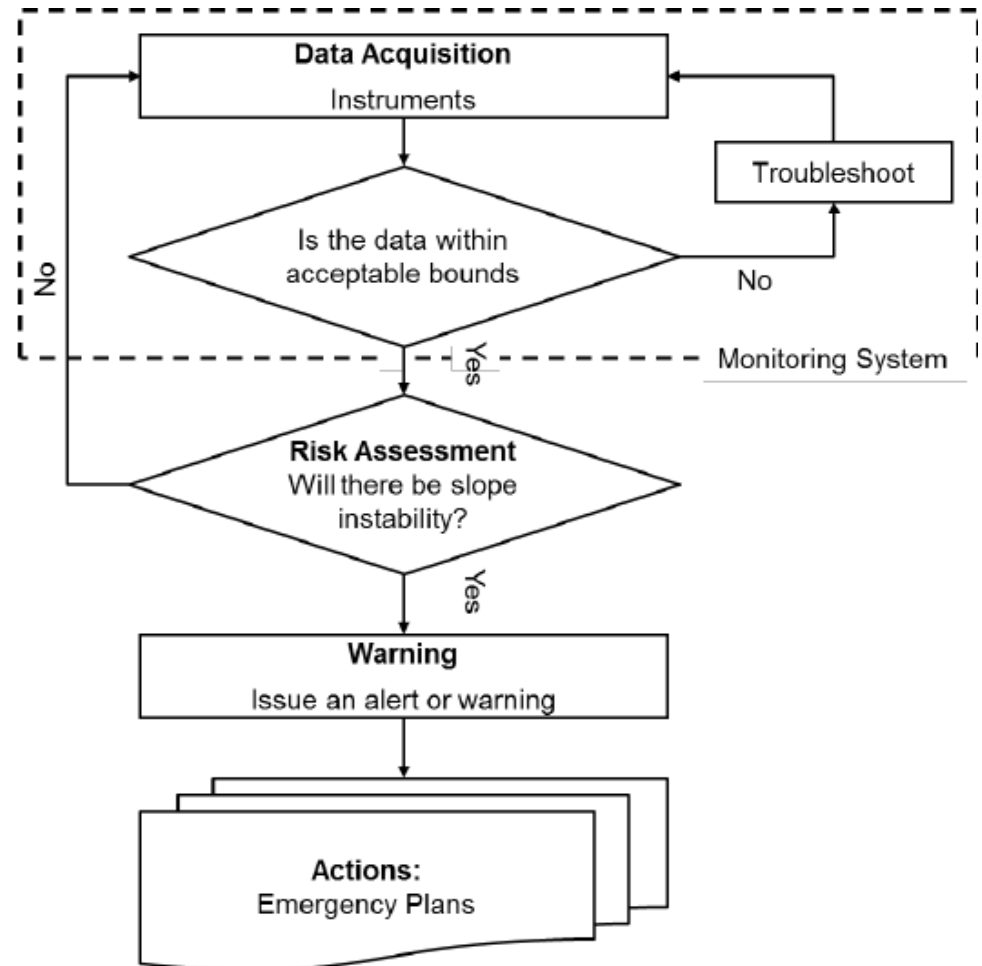
- **Des solutions techniques adaptées**
 - **Petites déformations**
 - Boulonnage (ancrage ponctuel / ancrage réparti)
 - Câblage
 - Grillage
 - Gunitage
 - Cintres rigides
 - Injection des terrains
 - **Grandes déformations**
 - Cintres coulissants
 - Boulonnage - Câblage
 - Blocs compressibles
- **Mais la difficulté du changement d'échelle**

- Suivi en temps réel des talus



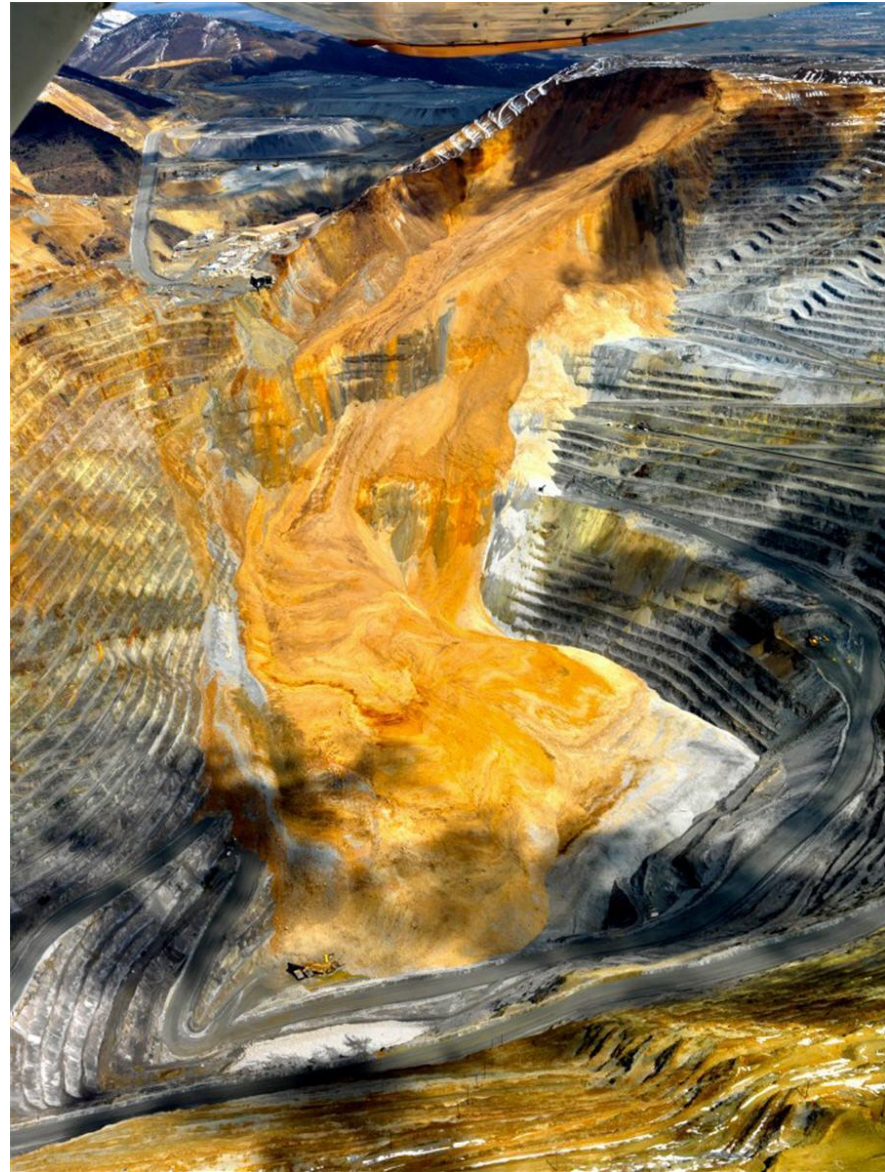
Exemples d'équipements de suivi en temps réel des talus de mines à ciel ouvert

- Permettant, en association avec les modèles de comportement des talus, de diminuer les facteurs de sécurité dans le dimensionnement des angles



Logigramme type de déclenchement d'alarme

Le méga-glissement de terrain de la mine de Bingham Canyon (2013)



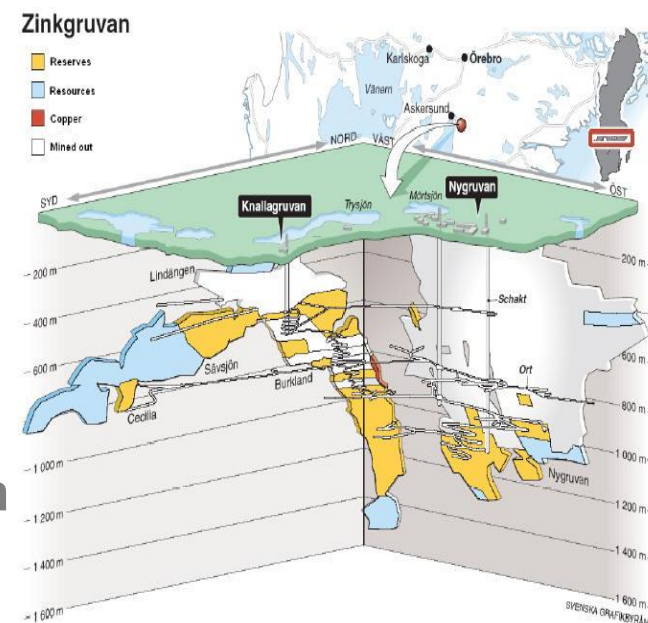
Optimisation économique : angle limite des talus



Le méga-glisement de terrain de la mine de Bingham Canyon (2013)

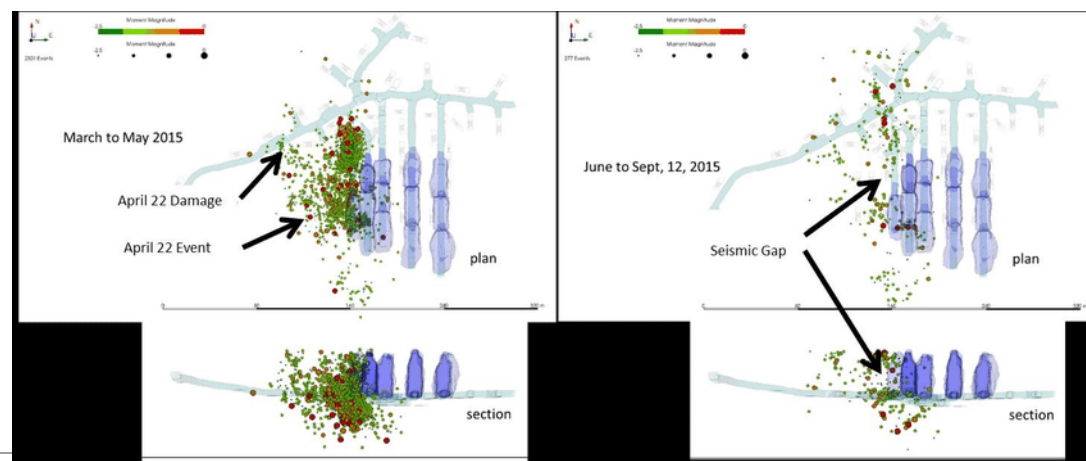
Optimisation économique : taux de récupération des mines souterraines

- La récupération d'un gisement souterrain n'est généralement que partielle
 - Des stots permettent d'assurer la stabilité d'ensemble
- Le suivi micro-sismique permet :
 - D'augmenter les taux de récupération (Zinkgruvan)
 - De minimiser les pertes et les coûts (Nickel Rim South)

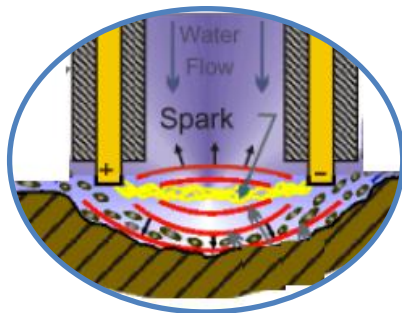


Vue d'ensemble de la mine de Zinkgruvan (Suède)

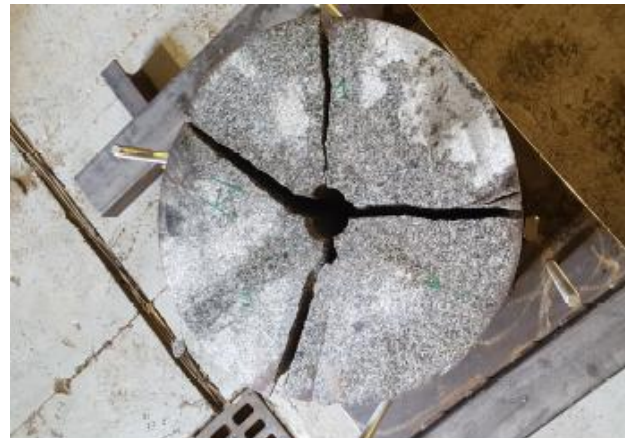
Suivi micro-sismique en appui à la planification à la mine de Nickel Rim South (Canada)



- **Elargissement du champ d'application de la méthode de fragmentation mécanique**
 - Compréhension des lois de coupe des différents outils (rabots, pics, molettes)
 - Compréhension des mécanismes d'interaction entre saignées et optimisation des têtes de coupe
 - Amélioration de la conception des outils
- **Développement de méthodes assistées**
 - Jet d'eau haute pression, hautes puissances pulsées,...

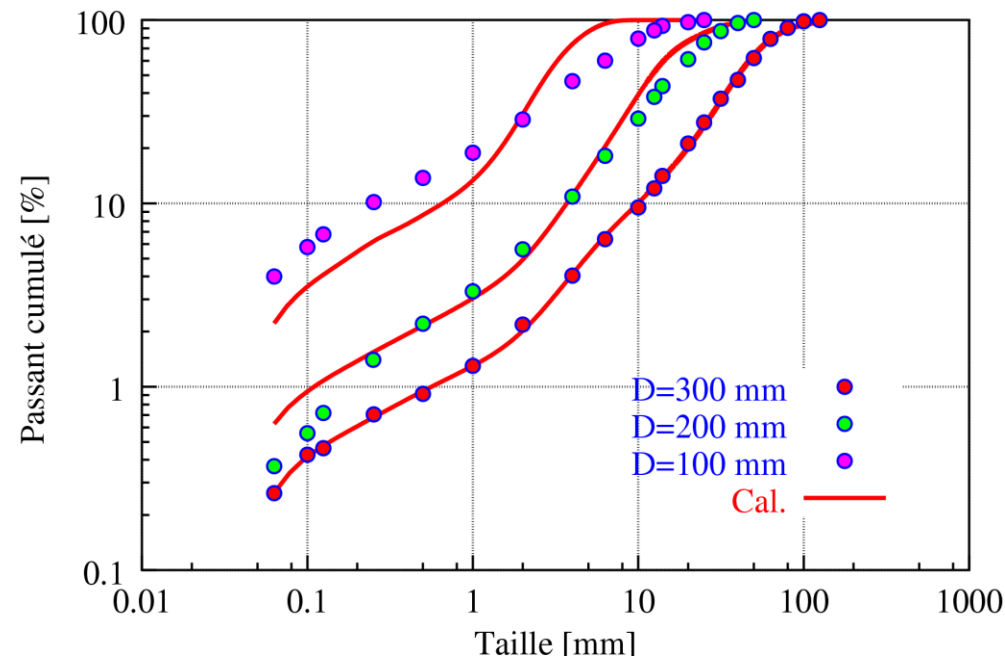


(thèse de master de Mohamed Abid, encadrement H. Sellami)



Fragmentation d'un bloc de granite par hautes puissances pulsées

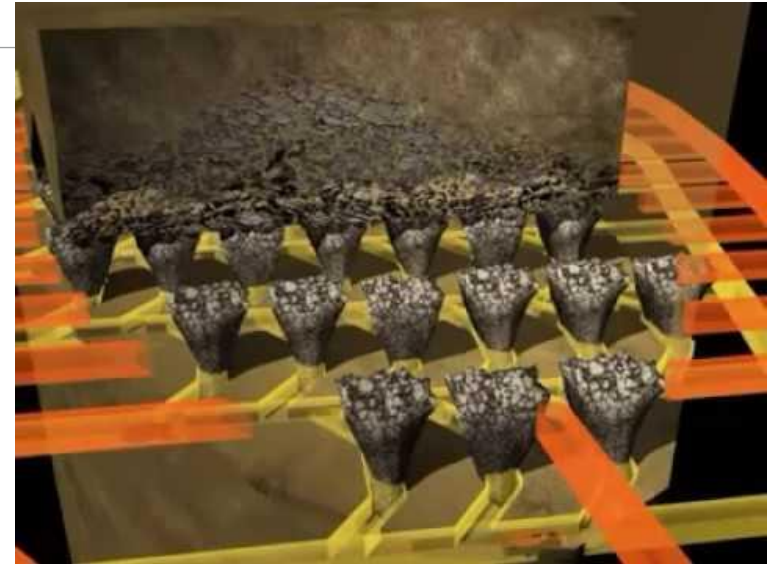
- Développement des simulations du tir à l'explosif
 - Pour la maîtrise de la granulométrie après tir et une optimisation globale de la comminution
 - Pour une prédiction du déplacement généré par un tir d'ébranlement



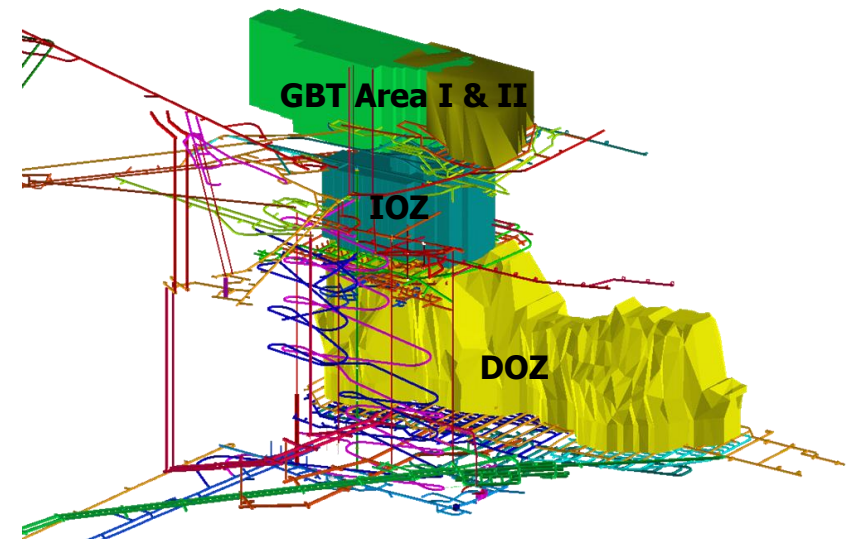
Prévision de fragmentation par simulation du tir,
thèse A. Rouabhi

Innovation : le développement des exploitations par block caving

- Fort développement des exploitations par block caving
 - Faible coût
 - Forte productivité
 - Enracinements de gisements type porphyry copper ou kimberlite



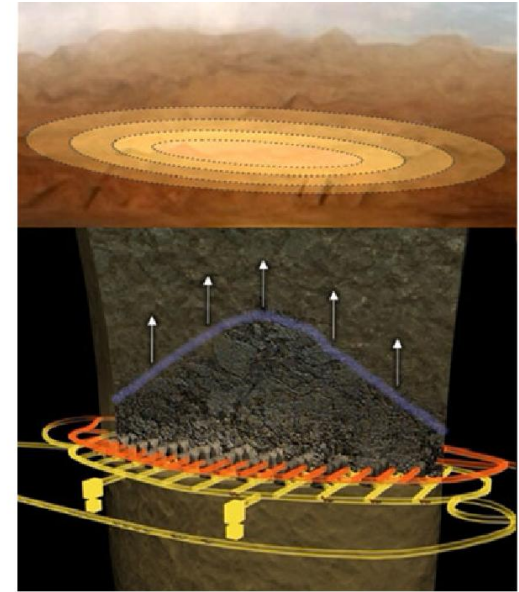
Principe du Block Caving



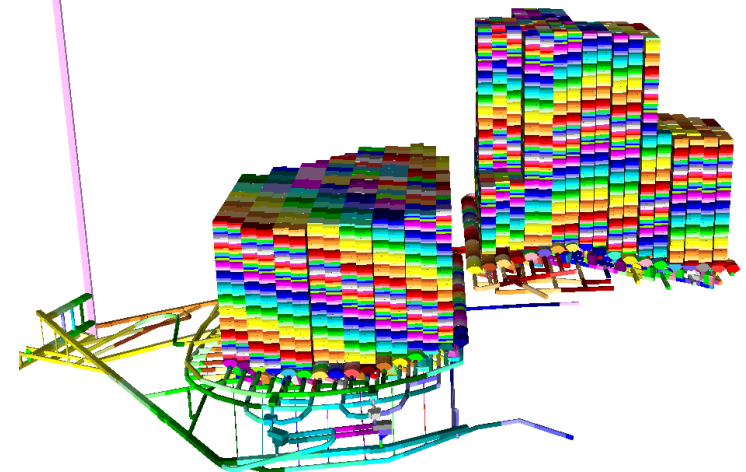
Block Caving à Grasberg (Indonésie)

Innovation : le développement des exploitations par block caving

- **Nécessité de contrôle de la limite de foudroyage**
 - Maîtrise du vide entre limite de foudroyage et matelas de roche
 - Apport de la micro-sismique
- **Importance de la maîtrise des écoulements lors du soutirage**
 - Pour le contrôle géomécanique et pour le contrôle de teneur
 - Apport des modélisations d'écoulement de matériaux bloqueux



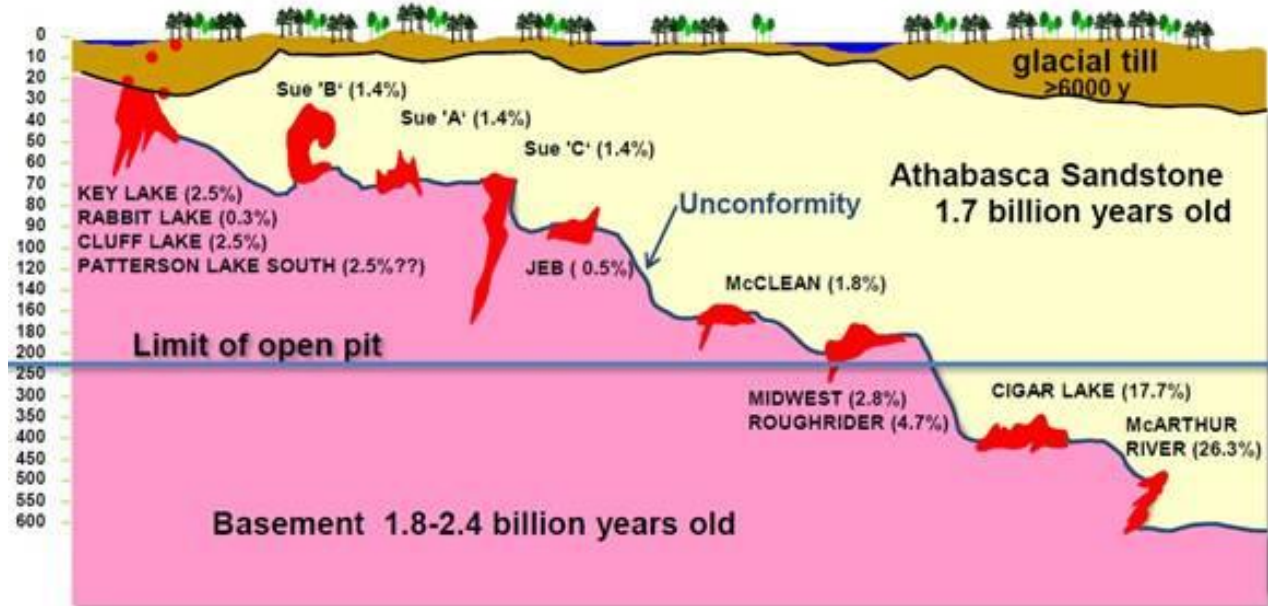
Vue schématique de la limite de foudroyage



01-Jul-26 to 01-Aug-26

Planification de l'exploitation de Cullinan

- Le contexte très difficile des mines d'uranium de la Saskatchewan
 - Des gisements d'une richesse exceptionnelle
 - A la discordance entre :
 - un socle fracturé,
 - et le remplissage marno-gréseux du bassin de l'Athabasca, de mauvaise qualité mécanique, et gorgé d'eau



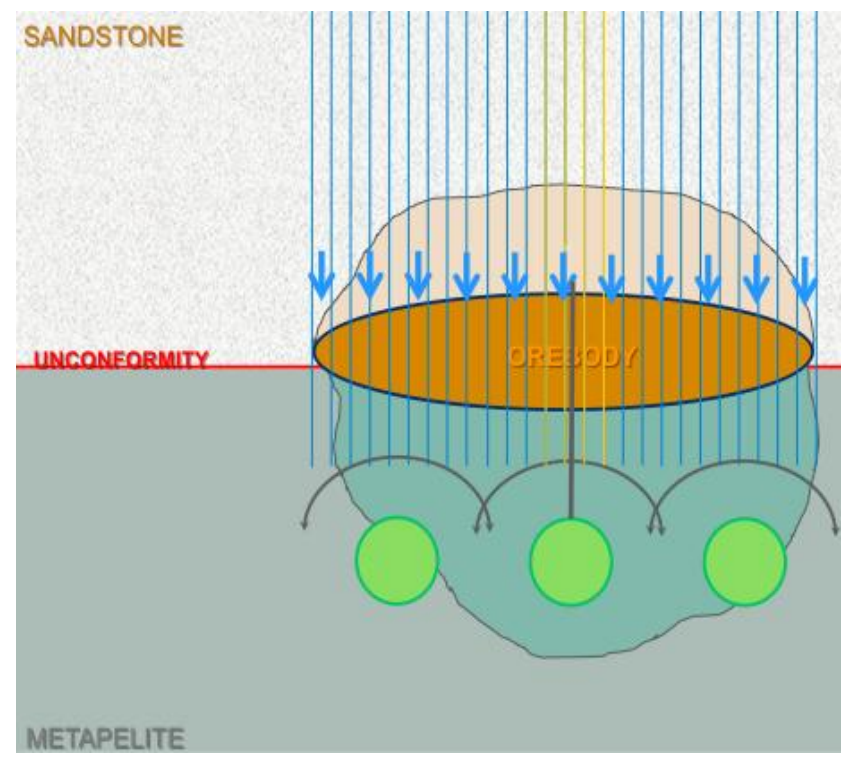
Coupe schématique des gisements d'uranium du bassin de l'Athabasca

Innovation : la congélation à grande échelle des terrains

- Seule une congélation à grande échelle des terrains permet d'assurer la sécurité de l'exploitation
 - Depuis la surface sur près de 500m de hauteur à Cigar Lake

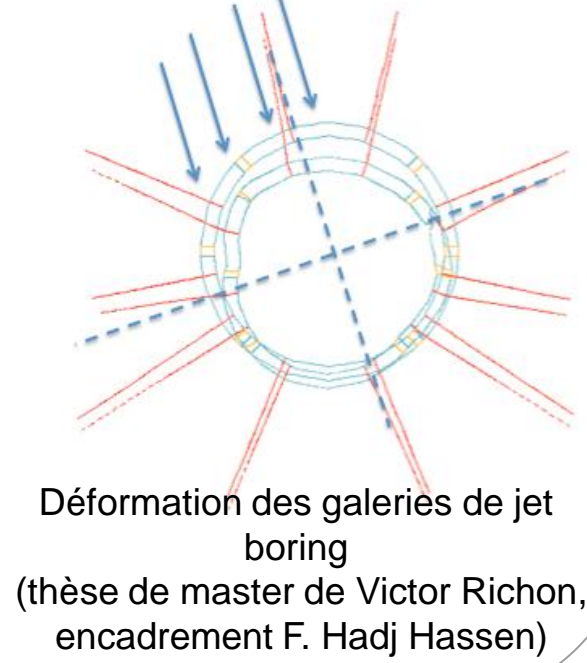
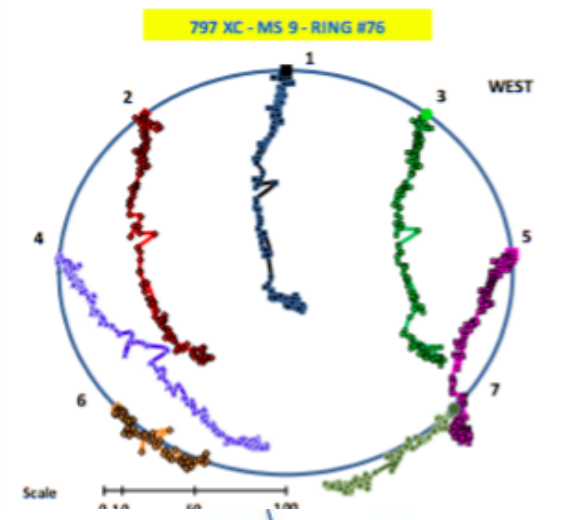
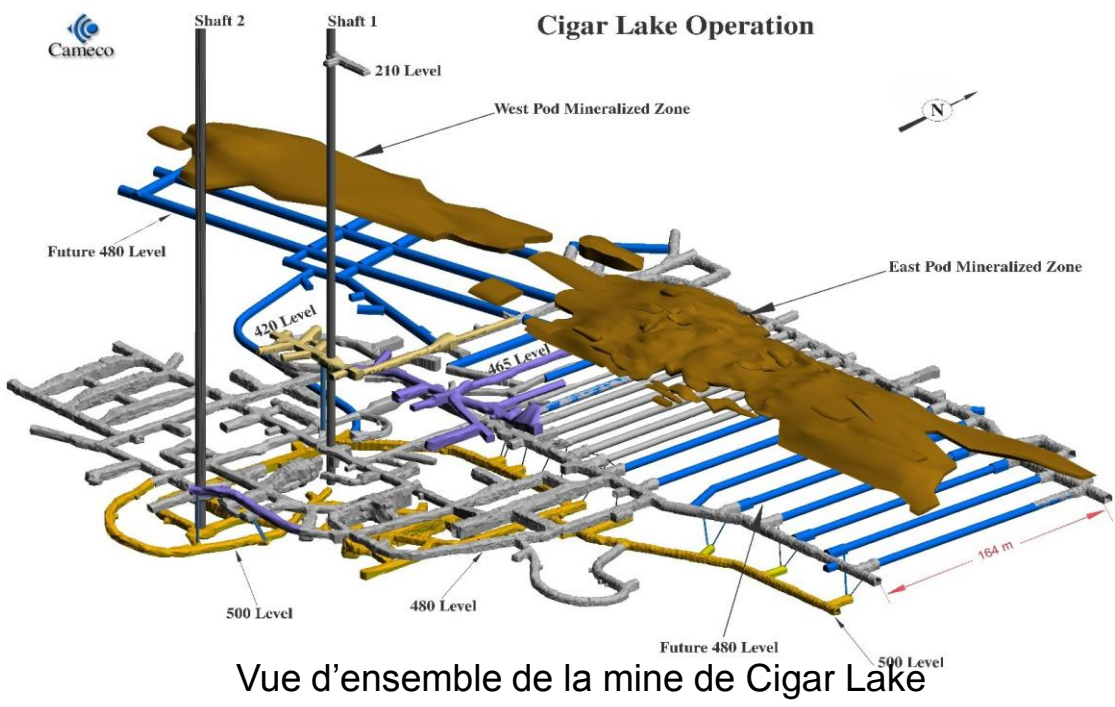


Congélation au fond à Mac Arthur River



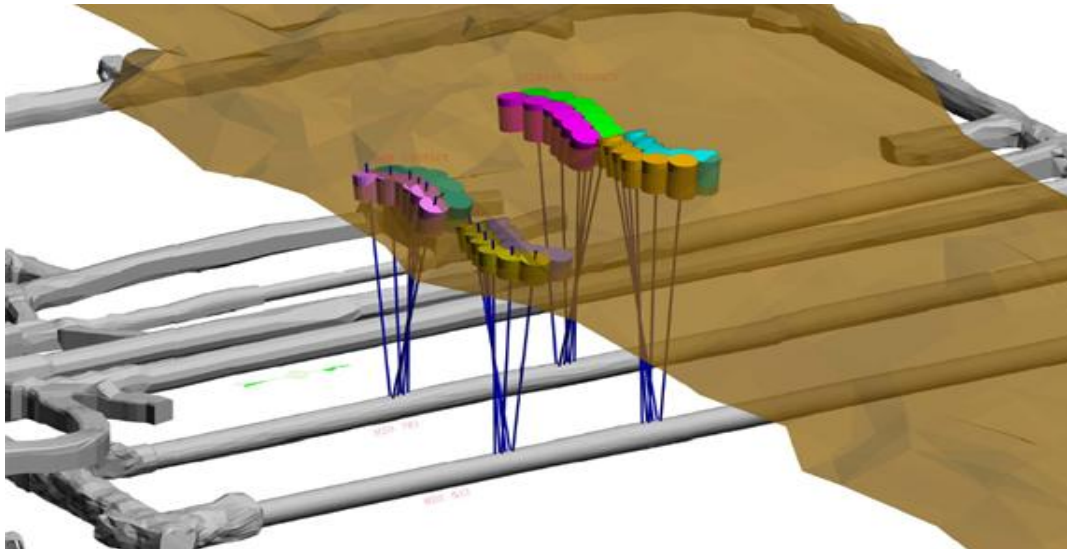
Congélation depuis la surface à Cigar Lake

- Développement de modélisation THM
 - Pour la prévision de la congélation et la minimisation de son coût
 - Pour la compréhension de l'impact de la congélation sur les ouvrages souterrains existants

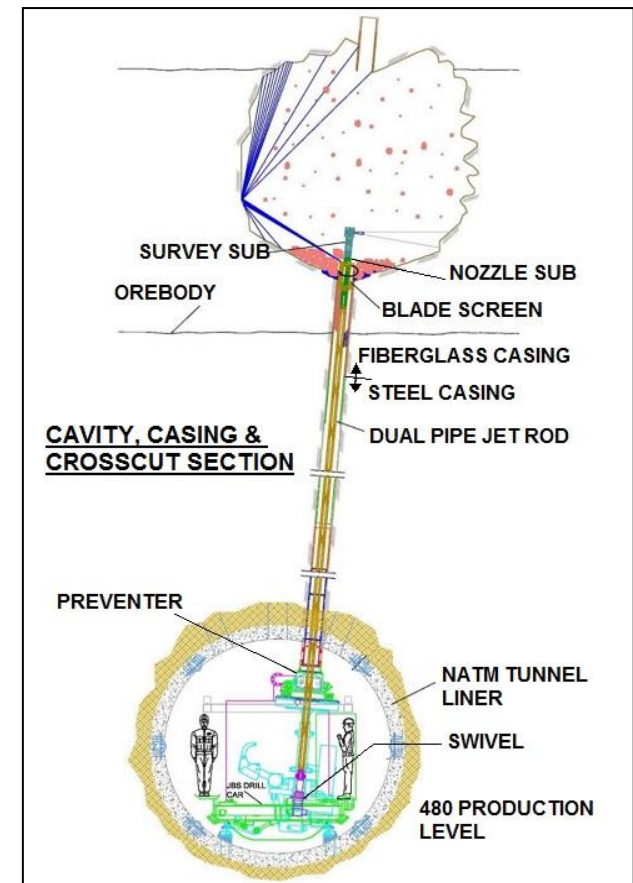


Innovation : l'abattage au jet d'eau à haute pression

- Développement de techniques d'abattage alternatives
 - Exploitation à distance (très fortes teneurs)
 - Par des jets d'eau à haute pression

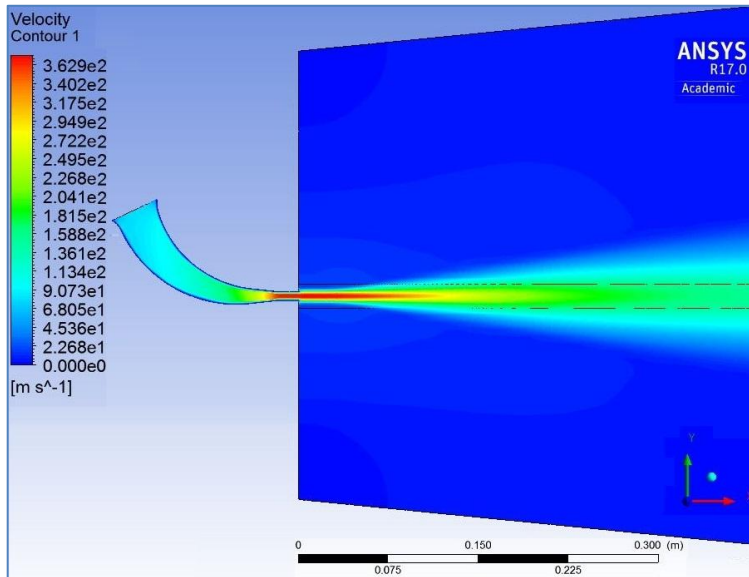


Principe du jet boring à Cigar Lake

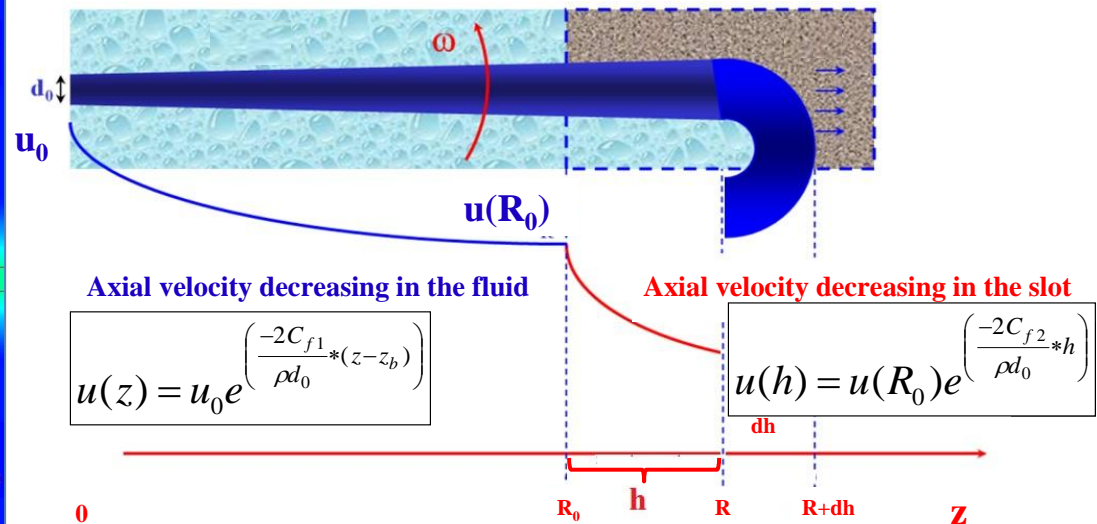


- Développement de techniques d'abattage alternatives

- A l'interface entre mécanique des fluides et mécanique des roches



Modélisation du jet d'eau dans l'air



Interaction jet-roche

(thèse de master de Dona Chela, encadrement F. Hadj Hassen)



14 septembre 2017 ■ ■

■ Jubilé du Comité Français de Mécanique des Roches

Mines d'aujourd'hui et de demain,
sous l'angle de la mécanique des roches

Damien Goetz, Professeur, MINES ParisTech