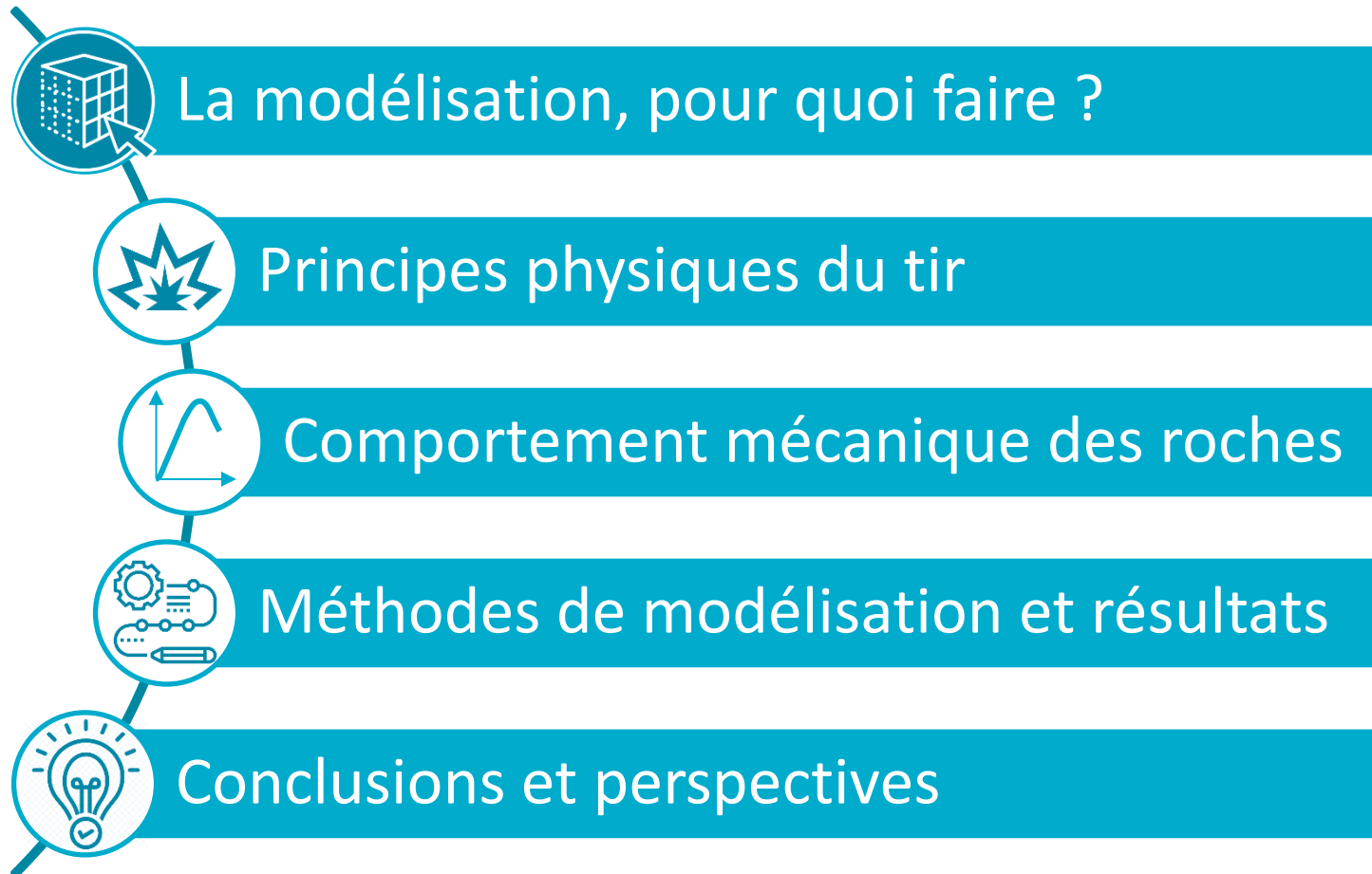


Outils de simulation numérique et abattage à l'explosif

Prof. Fanny Descamps

Outils de simulation numérique et abattage à l'explosif



La modélisation, pour quoi faire ?

Etudes mécaniques

- Distribution des contraintes
- Evolution de l'endommagement
- Simuler le mode de fracturation

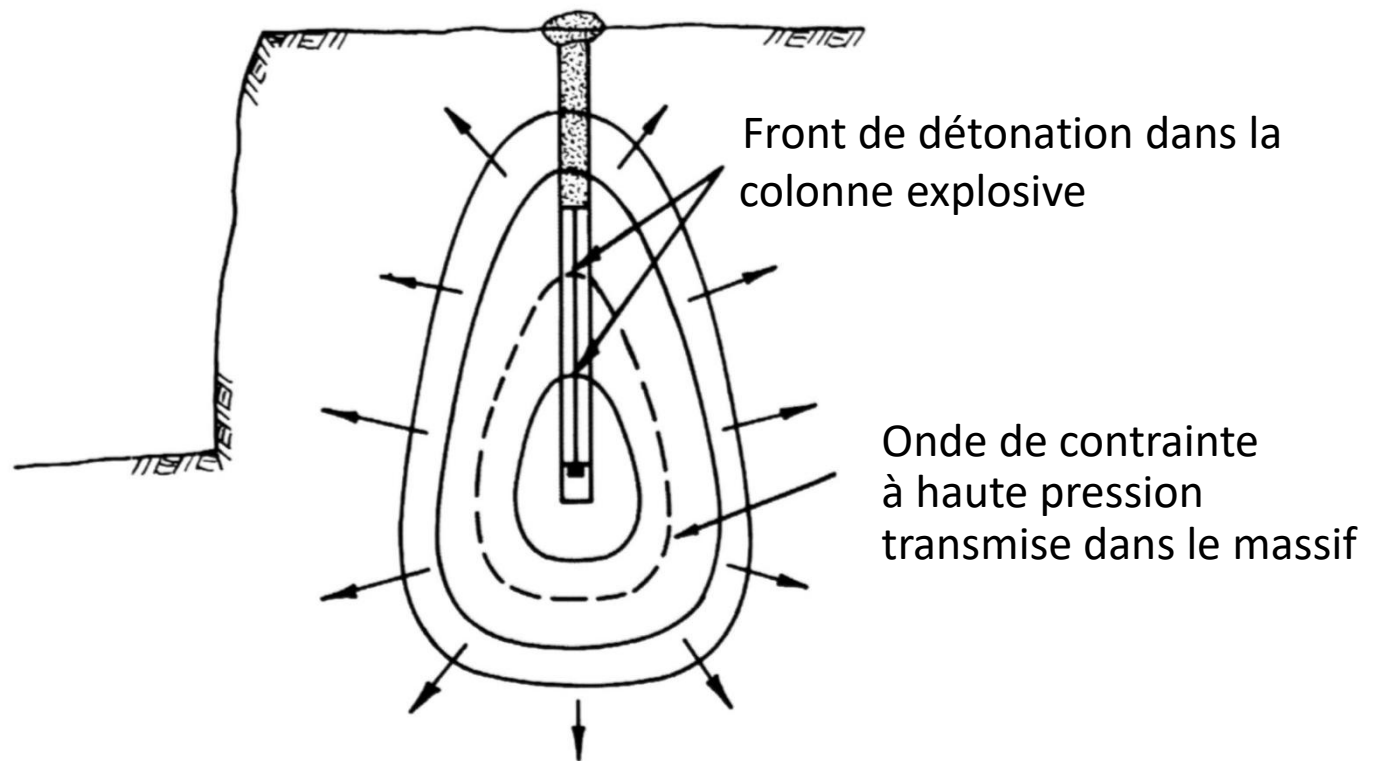
Optimisation des paramètres de tir

- Conception et dimensionnement du tir
- Mouvement de la masse rocheuse
- Fragmentation - blocométrie

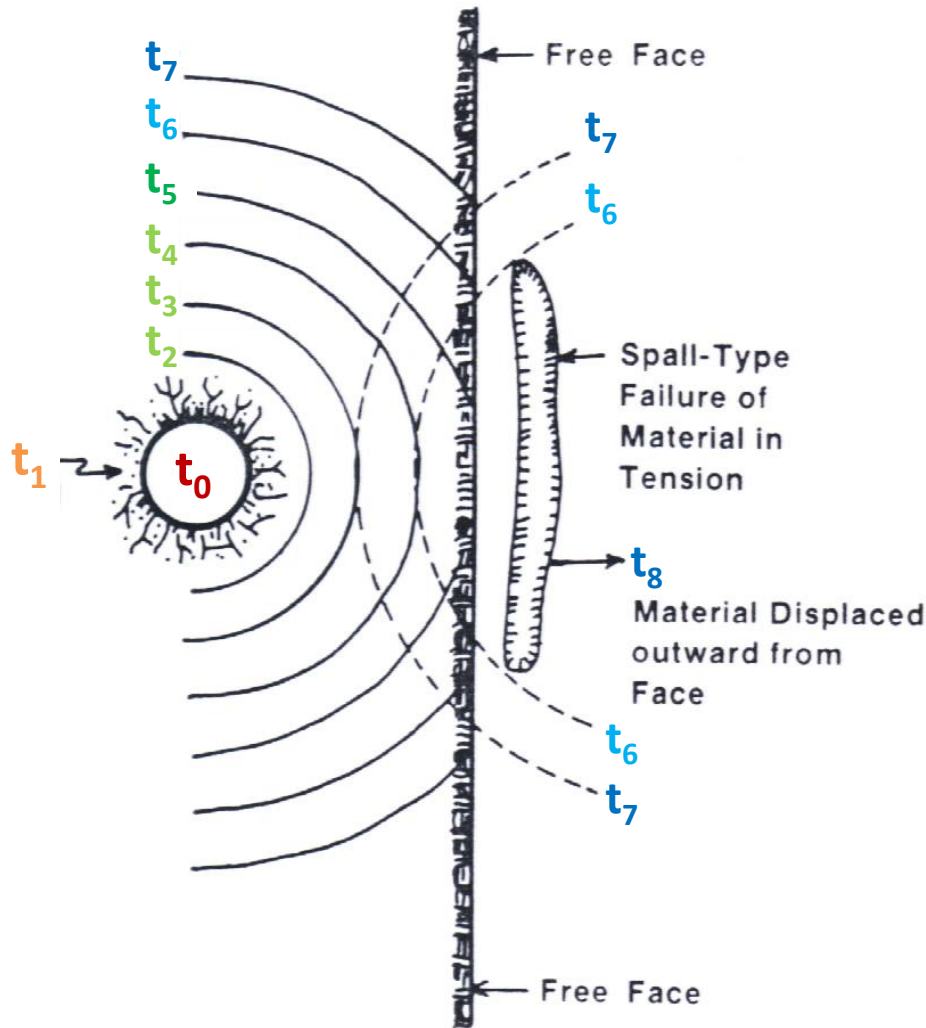
Sécurité et environnement

- Projections et distances associées
- Vibrations
- Dispersion des poussières

Principes physiques du tir

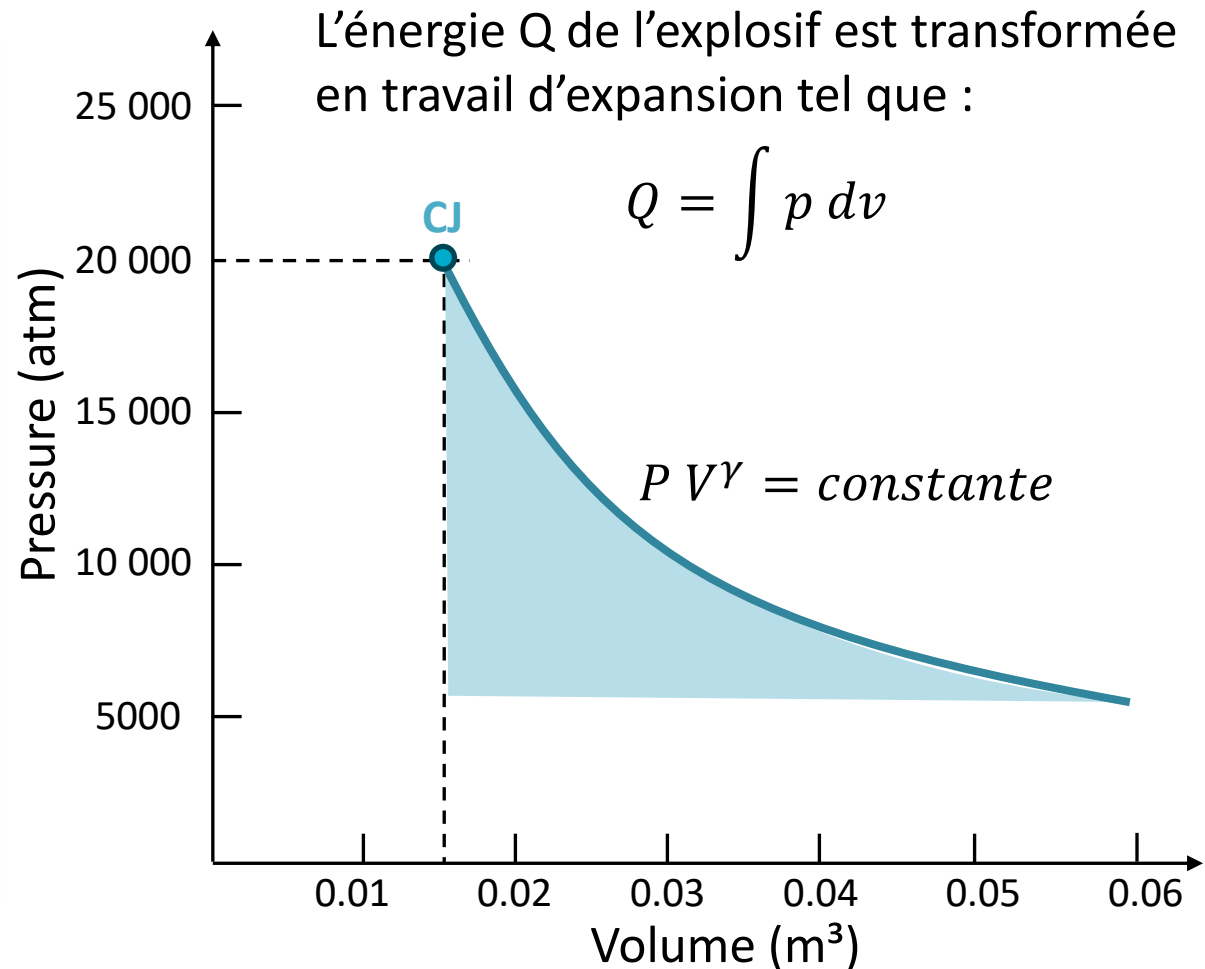
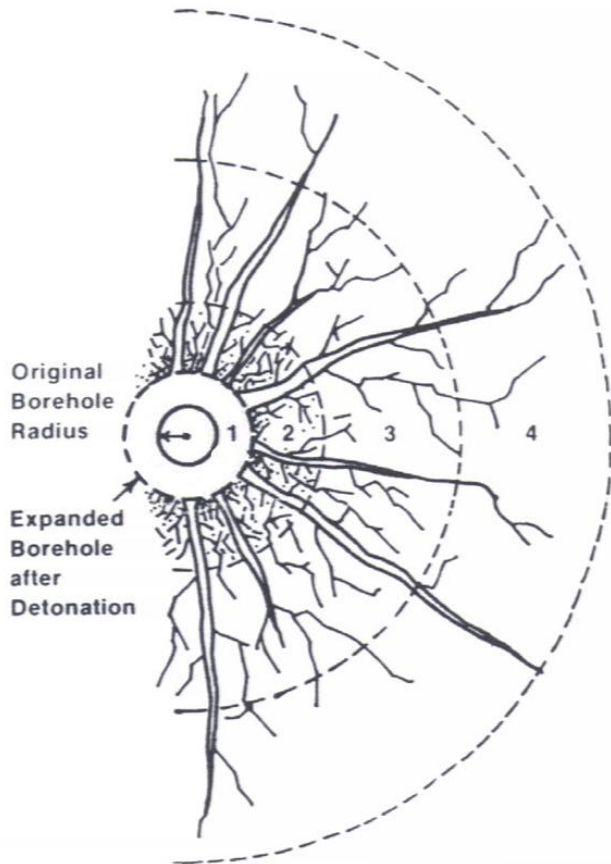


Fissuration due à l'onde de choc



- t₀** Détonation, génération de gaz à haute pression et t°
- t₁** Broyage et fracturation des parois du forage; expansion du trou
- t₂-t₄** Propagation de l'onde compression dans toutes les directions
- t₅** Une partie de l'onde compressive atteint la surface libre
- t₅-t₆** Une partie de l'onde continue vers l'extérieur et une partie est réfléchi sur la surface libre (en traction)
Un fragment de roche se détache et est poussé en avant
- t₇+** Arrivée d'autres ondes compressives sur la nouvelle surface et répétition du processus

Pression des gaz : énergie développée



Comportement du massif rocheux

Loi de comportement pour un milieu continu homogène isotrope :

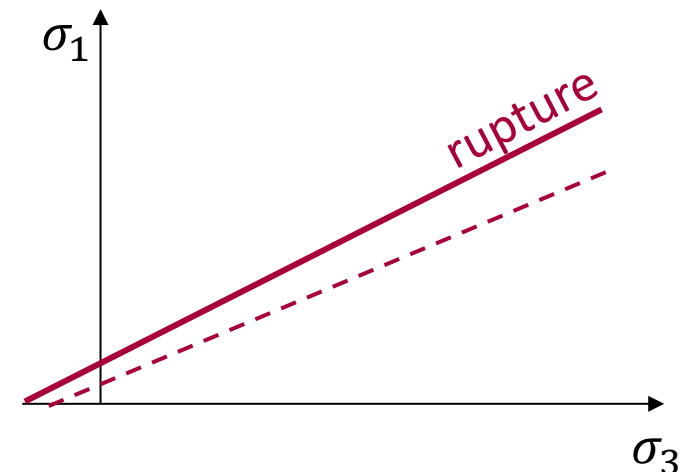
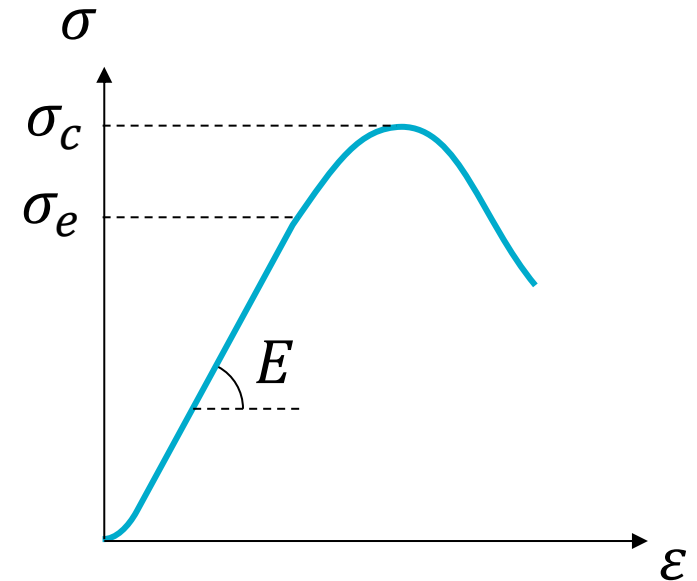
1. Équation(s) d'état :

$$[\sigma] = \lambda \operatorname{tr}[\varepsilon] [1] + 2G [\varepsilon]$$

2. Critère de rupture: $\sigma_1 = K_p \sigma_3 + \sigma_c$

3. Règle d'écoulement plastique

➔ Relation contraintes-déformations + quand et comment évoluent les phénomènes irréversibles



Comportement du massif rocheux

Prise en compte des discontinuités

- Indices de qualité : RQD, RMR, GSI



Structure du massif rocheux

GSI	Conditions de surface des discontinuités				
	VERY GOOD Very rough, fresh unweath	GOOD Rough, slightly weathered iron stained surfaces	FAIR Smooth, moderately weathered altered surfaces	POOR Slickensided, highly weathered compact coatings or fillings	VERY POOR Slickensided, highly weathered with soft clay coatings or fillings
BLOCKY - very well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three orthogonal discontinuity sets	80	75	65	55	45
VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed rock mass with multi-faceted angular blocks formed by four or more discontinuity sets	70	60	50	40	35
BLOCKY/DISTURBED - folded and/or angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets				30	25
DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces				20	15
					10

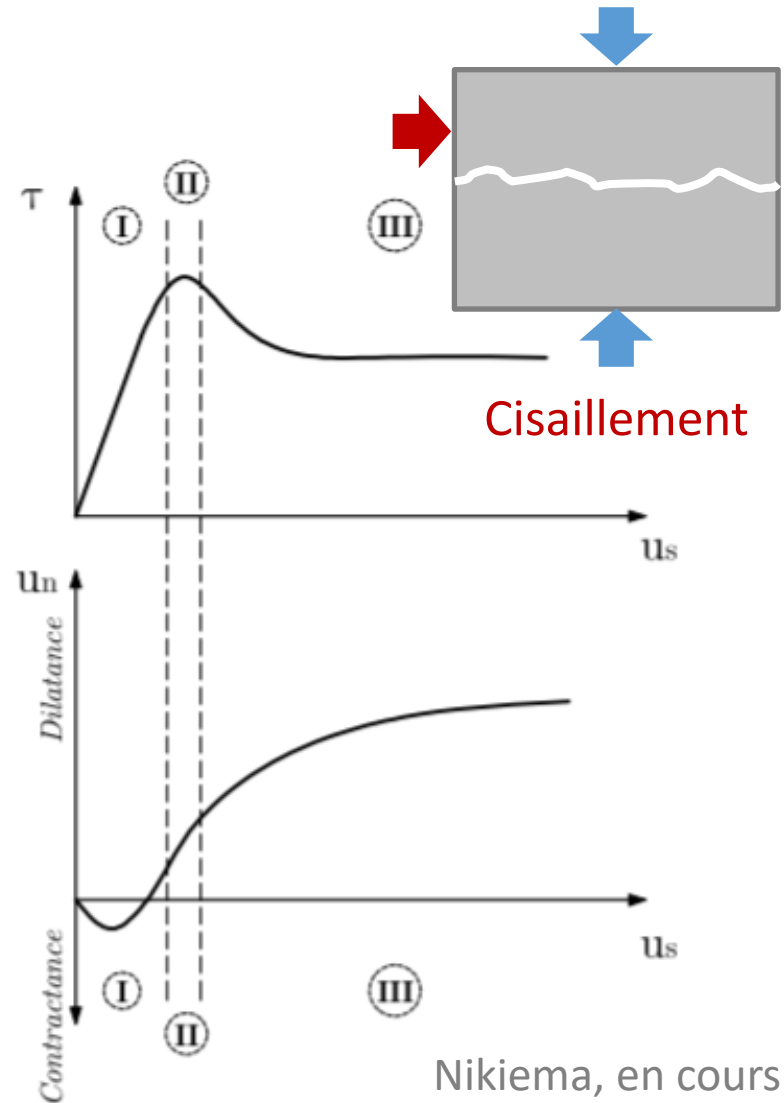
Decreasing interlocking of rock pieces

Decreasing surface quality

Comportement du massif rocheux

Prise en compte des discontinuités

- Indices de qualité : RQD, RMR, GSI
- Représentation explicite

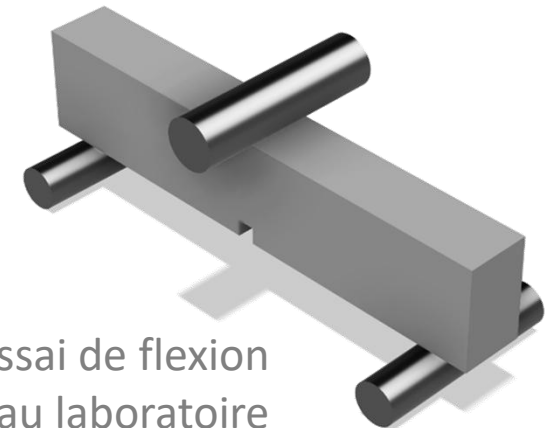
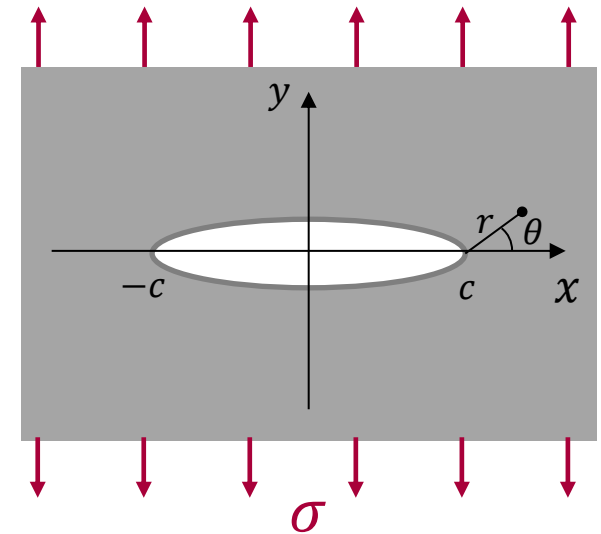


Mécanique de la rupture fragile

- Fissure assimilée à un trou elliptique
- Concentration de contraintes à la pointe de la fissure
- Champ de contrainte en pointe de fissure (mode I, cas plan)

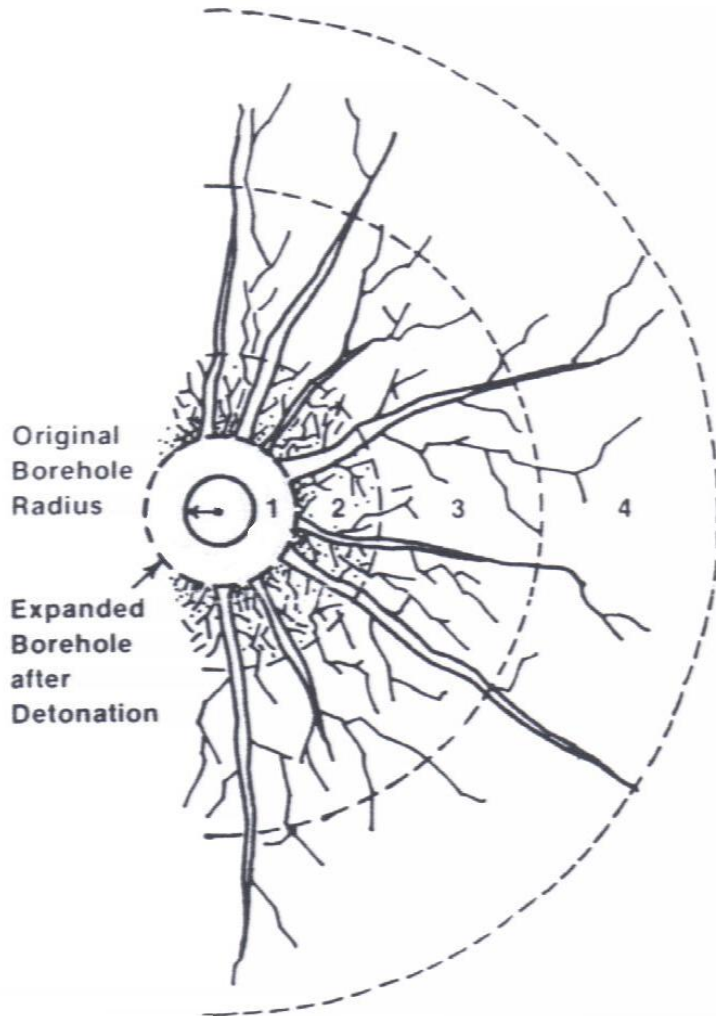
$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \frac{K_I(\sigma, c)}{\sqrt{2\pi r}} \begin{bmatrix} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\ \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\ \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} - \cos \frac{3\theta}{2} \end{bmatrix}$$

- K_I , facteur d'intensité de contraintes en mode I



Essai de flexion
au laboratoire

Mécanique de la rupture fragile



Pour estimer le nombre de fissures radiales :

$$n = 2\pi R \left(\frac{d \dot{\epsilon} c}{6 K_{Ic}} \right)^{2/3}$$

- R , rayon du trou
- d , densité de la roche
- c , vitesse de l'onde de contrainte
- $\dot{\epsilon}$, vitesse de déformation volumétrique à la rupture

$d c$ est l'impédance acoustique.
+ elle est élevée, + on provoque des fissures

Méthode des éléments finis

- Massif = milieu continu
- Grands principes :
 - Approximation (\neq solution exacte)
 - Discrétisation (équations algébriques)
 - Interpolation
- En élasticité : calcul direct
- En plasticité : parfois difficile de converger
- Variables eulériennes (problème si grandes déformations)

Exemple pour un problème d'équilibre :

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho X_i = 0$$

$$\rightarrow [K]\{U\} = \{F\}$$

$$[K] = f(E, \nu, C, \phi, \dots)$$

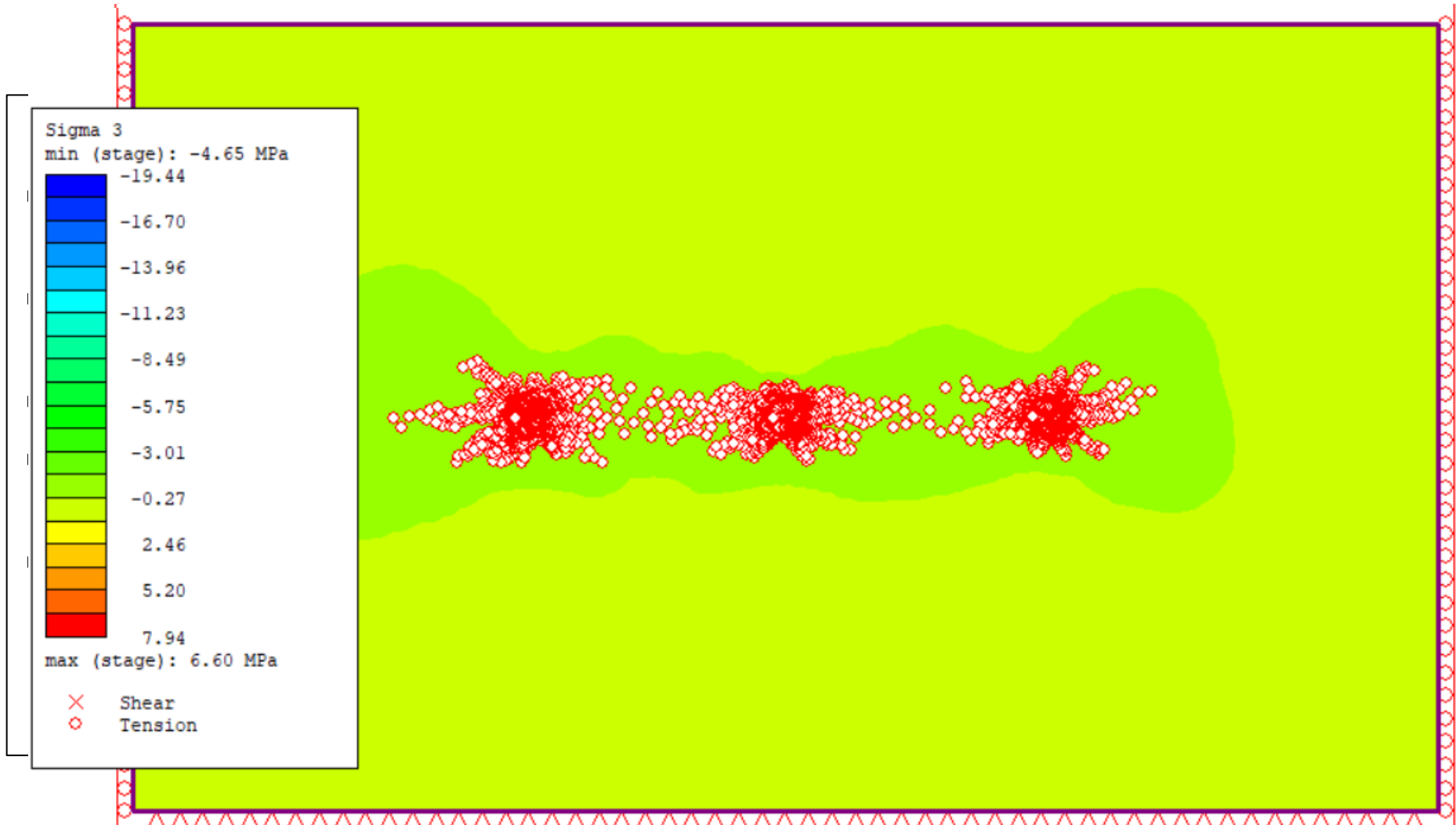
matrice caractérisant le système

$\{U\}$ les variables inconnues

$\{F\}$ les sollicitations connues

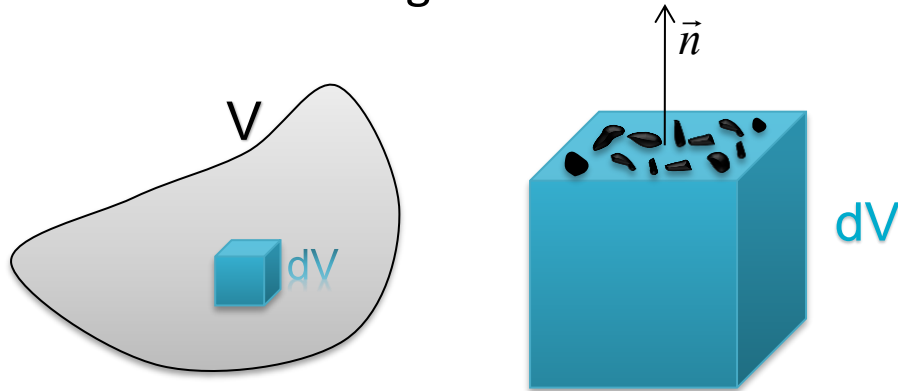
La clé: inverser la matrice [K]

MEF & explosifs



Exemple MEF avec LS-DYNA

- Modélisation de la fragmentation
- Principe : retirer les éléments du maillage lorsqu'ils atteignent un seuil d'endommagement

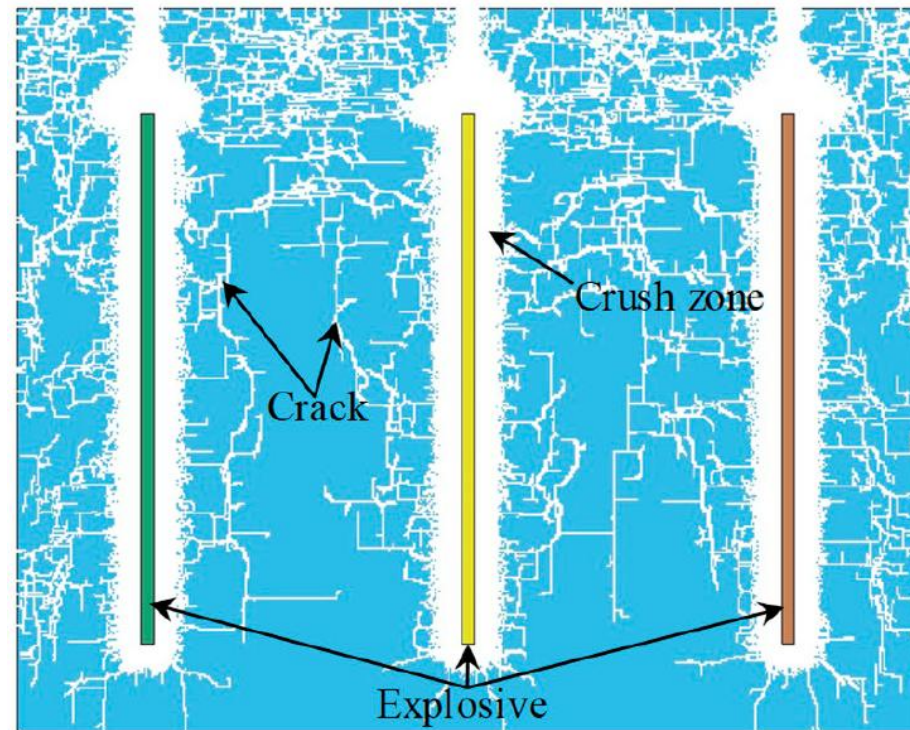


Variable d'endommagement D_n dans la direction \vec{n} :

$$D_n = \frac{S_d}{S}$$

S_d , aire totale des défauts

$S_r = S - S_d$, surface résistante



Yang et al. (2025)

Méthode des différences finies

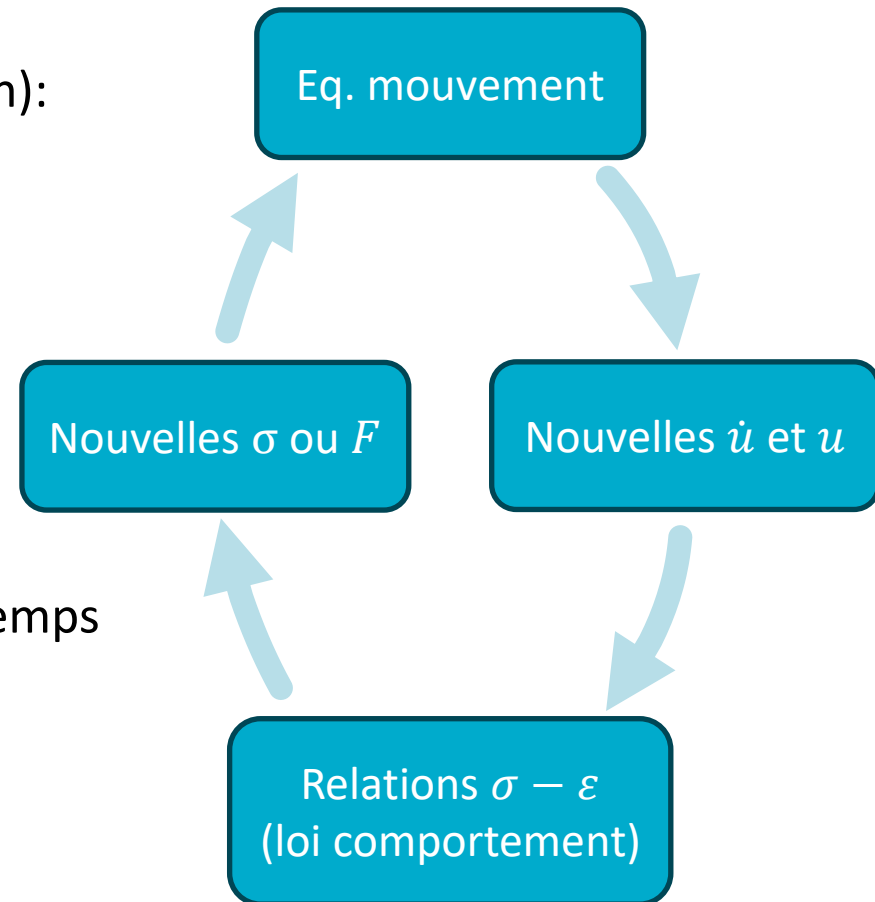
- Massif = milieu continu
- Équation de mouvement (loi de Newton):

$$m \frac{d\dot{u}}{dt} = F$$

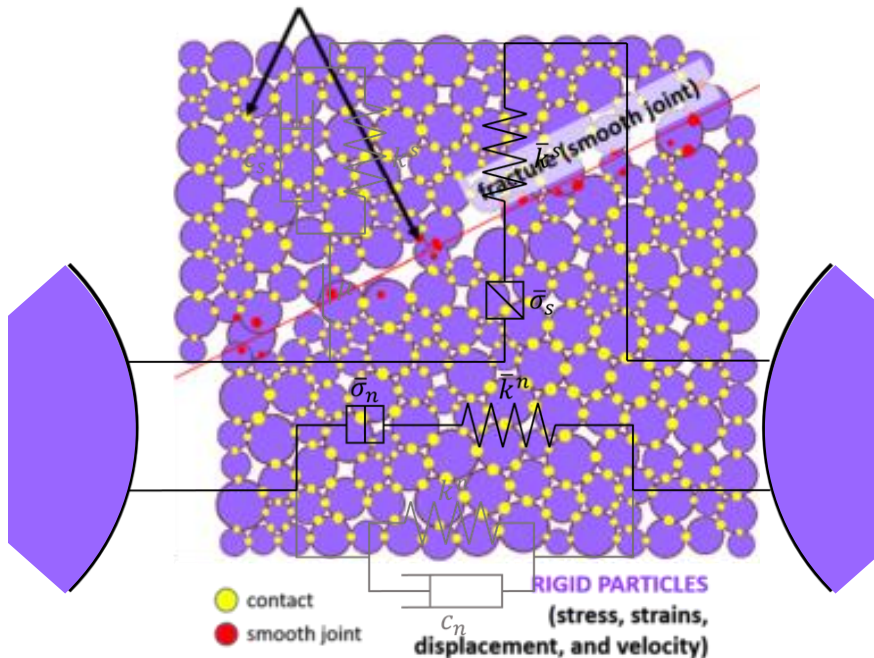
- dans les équations d'équilibre :

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho X_i = \rho \frac{\partial \dot{u}_i}{\partial t}$$

- Méthode itérative : travail par pas de temps
- En élasticité : plusieurs itérations
- En plasticité : converge + vite que FEM
- Coordonnées lagrangiennes



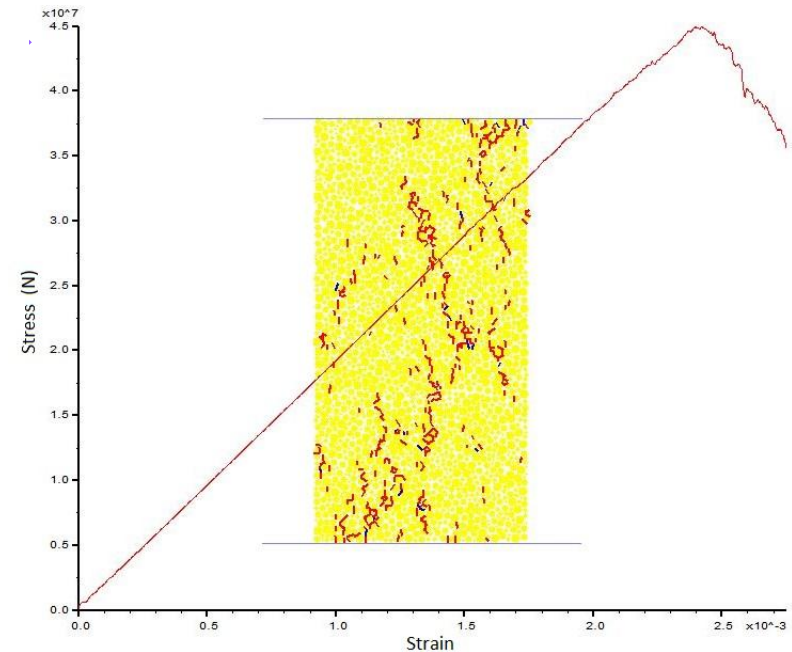
Méthode des éléments discrets



- Élément circulaire (2D) ou sphérique (3D)
- Element uniquement rigide
- Contact en un et un seul point

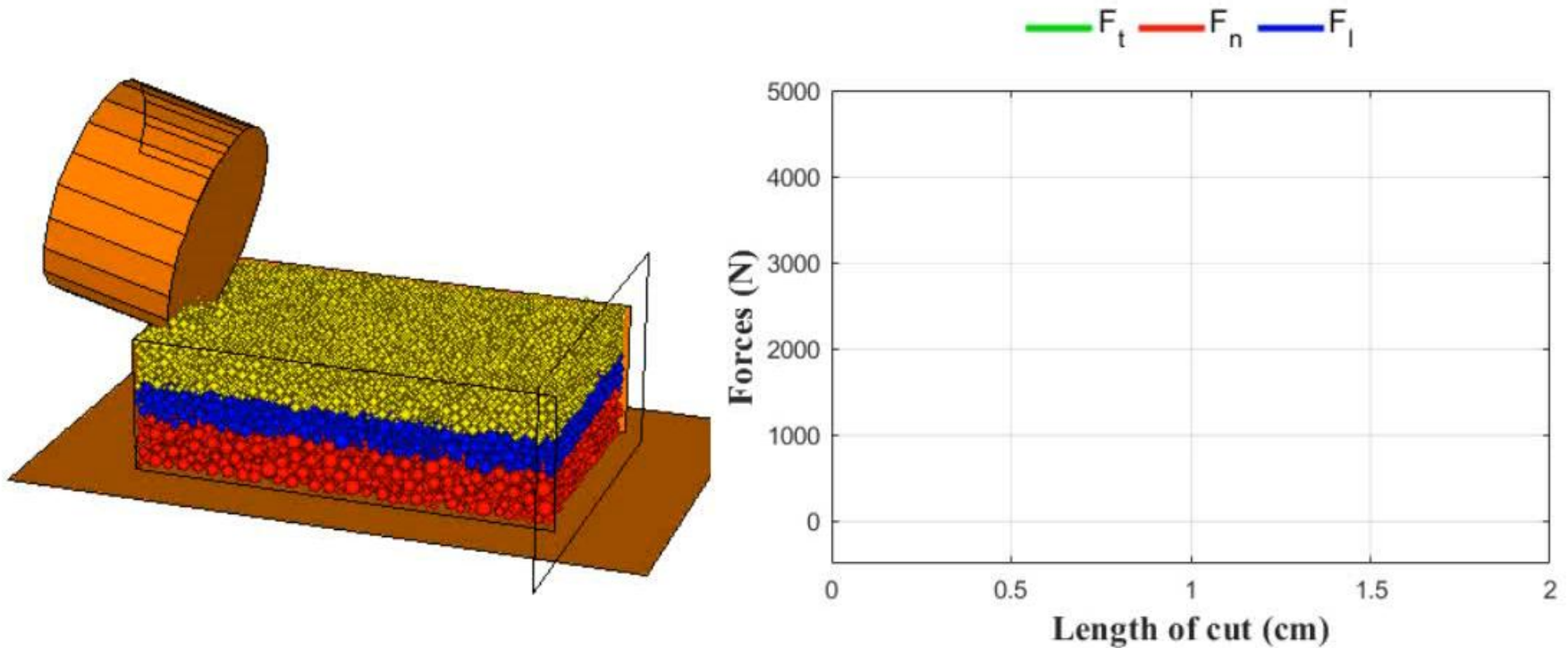
Méthode complexe

- Paramètres du modèle \neq propriétés mécaniques de la roche
- Etape de calibration



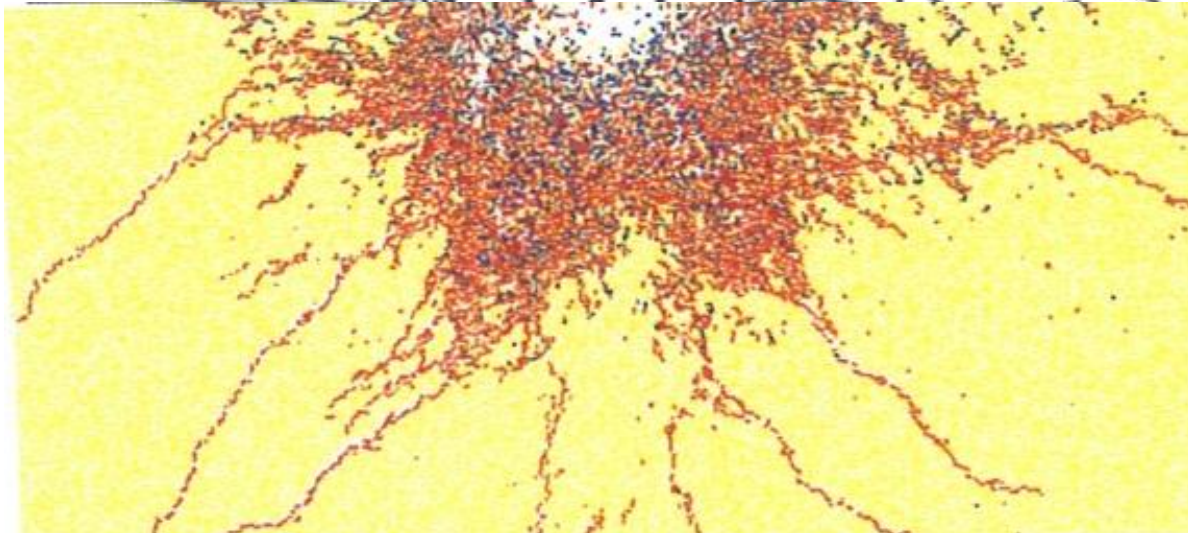
Exemple DEM

Modélisation de la coupe par outils PDC



Gonze (2022)

DEM & explosifs



Nzonteu (2017)

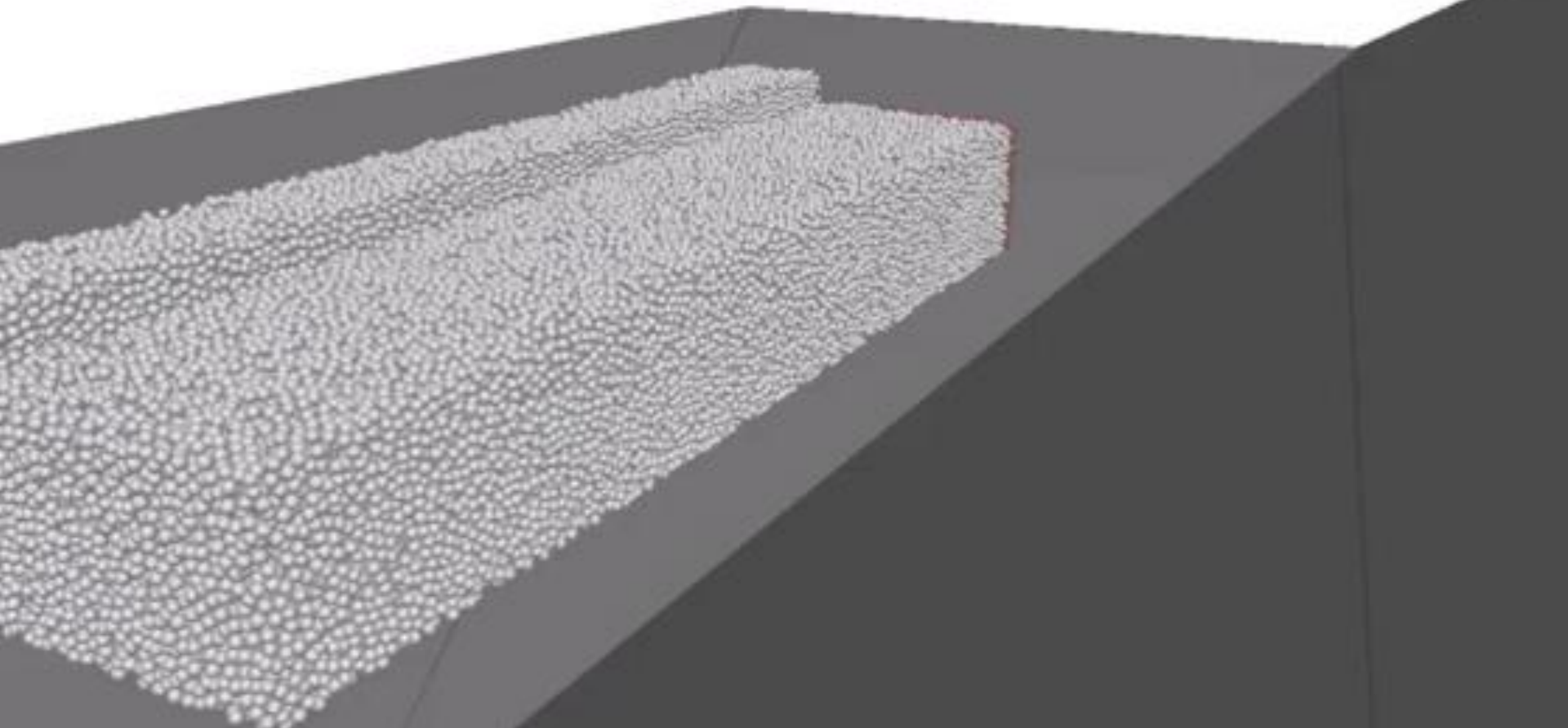
PFC3D 9.00

©2022 Itasca Consulting Group, Inc.

DEM & explosifs

Représentation plus globale pour mettre en évidence :

- Tir séquentiel
- Etalement du tas



Combinaison FEM-DEM

Time step: 0



Geomechanica, 2015

Conclusions et perspectives

Méthodes	Eléments finis	Eléments discrets	FEM-DEM
Domaines de recherche	Etudes mécaniques Distribution des contraintes Evolution de l'endommagement Simuler le mode de fracturation	Optimisation des paramètres de tir Conception du tir Mouvement de la masse rocheuse Fragmentation - blocométrie	Sécurité et environnement Projections et distances associées Vibrations Dispersion des poussières
Défis	Phénomènes non-linéaires et transitoires	Dynamique et ajustement des paramètres	Temps de calcul et ressources
Futur	Superposition des ondes Monitoring in situ Remote sensing Forage intelligent	IA Machine learning Deep learning	Calcul en parallèle Accélération GPU Multi-thread

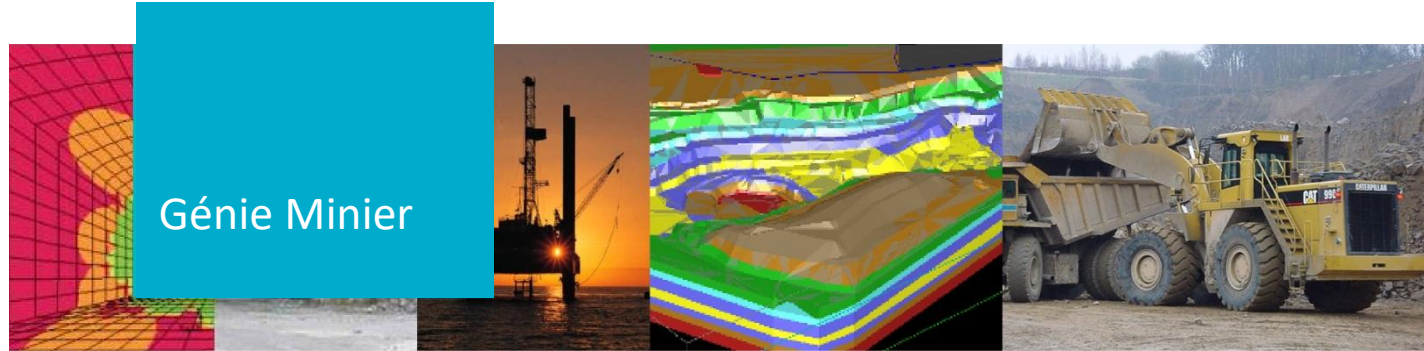
Modifié de Tan et al. (2025)

Conclusions et perspectives

Mais attention :

- Représentation réaliste du massif : rôle critique des fractures, discontinuités, anisotropie
- Validation systématique par mesures de terrain: attention à la pertinence des prédictions de fragmentation et vibrations

Objectif final: plus de précision, moins de risques, optimisation économique



Merci de votre attention

Prof. Fanny Descamps

UMONS – Génie Minier

53 rue du Joncquois

7000 Mons

fanny.descamps@umons.ac.be

Références

Gonze N. (2022). Understanding of rock cutting mechanism under confinement, these de doctorat, Université de Mons.

Nzonteu B. (2017). Modélisation d'un tir de mines à partir des propriétés de la géomécanique – application au porphyre de Quenast, travail de fin d'études, Université de Mons.

Tan et al. (2025). Global research status and intelligent technology development trend of open-pit mining blasting: visualization analysis based on CiteSpace and VOSviewer. Geomech. Geophys. Geo-energ. Geo-resour. (2025) 11:46 <https://doi.org/10.1007/s40948-025-00953-3>

Yang et al. (2025). Application of simulation methods and image processing techniques in rock blasting and fragmentation optimization, Appl. Sci. 2025, 15, 3365.