



Ouvrages souterrains

Quelques « *idées* »
pour améliorer la
pertinence des
approches continue

François LAIGLE

EDF

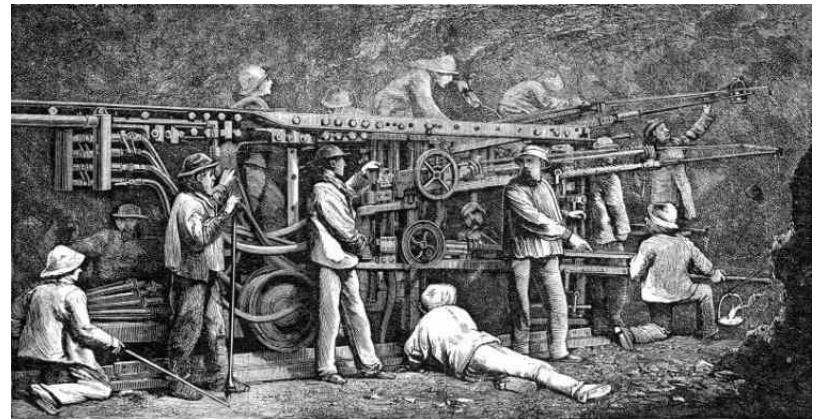
Centre d'Ingénierie Hydraulique

Les ouvrages souterrains

Le domaine de L'EXPERIENCE et du TERRAIN

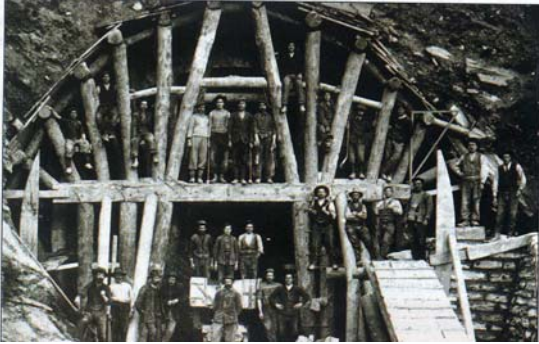


*le percement de la galerie de façade
du Lötschberg (Suisse), tunnel mis en service
en 1913.*



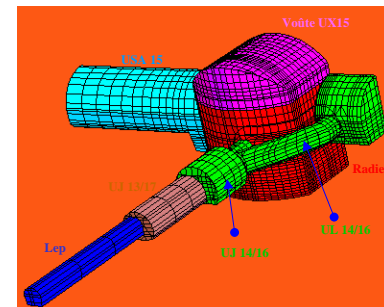
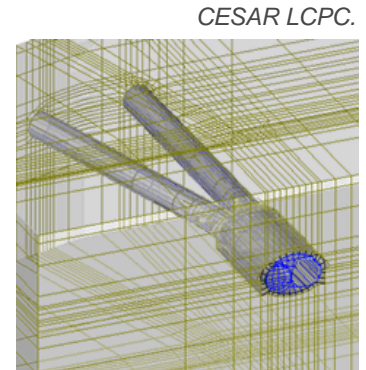
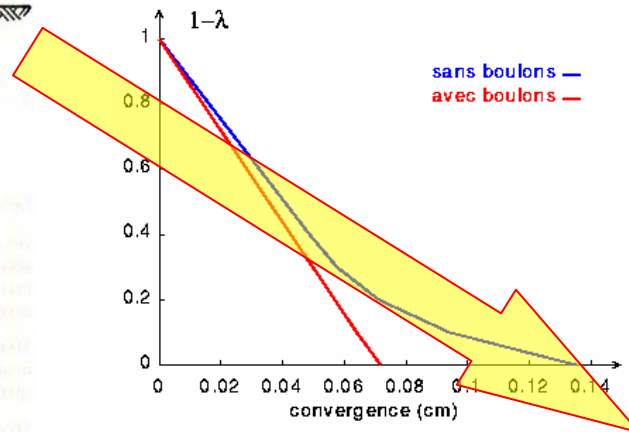
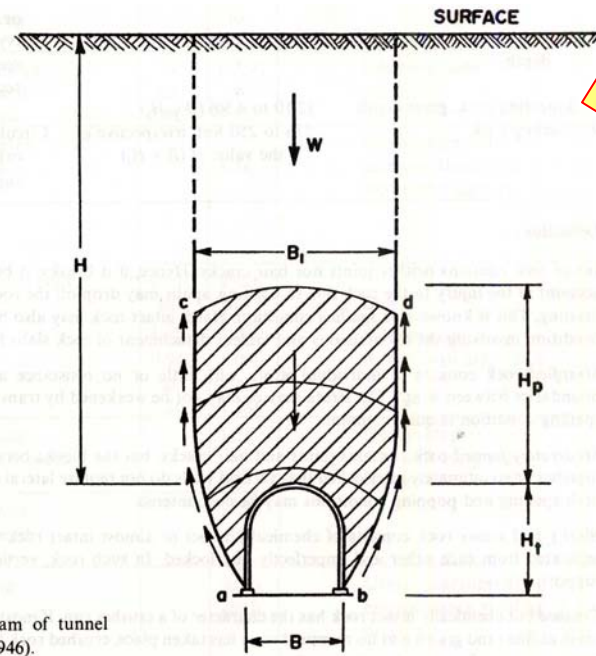
*Machine de foration de Sommelier (tunnel du
Mont-Cenis)*

Les calculs en souterrains



Protodiakonov 1909

Terzaghi 1946....

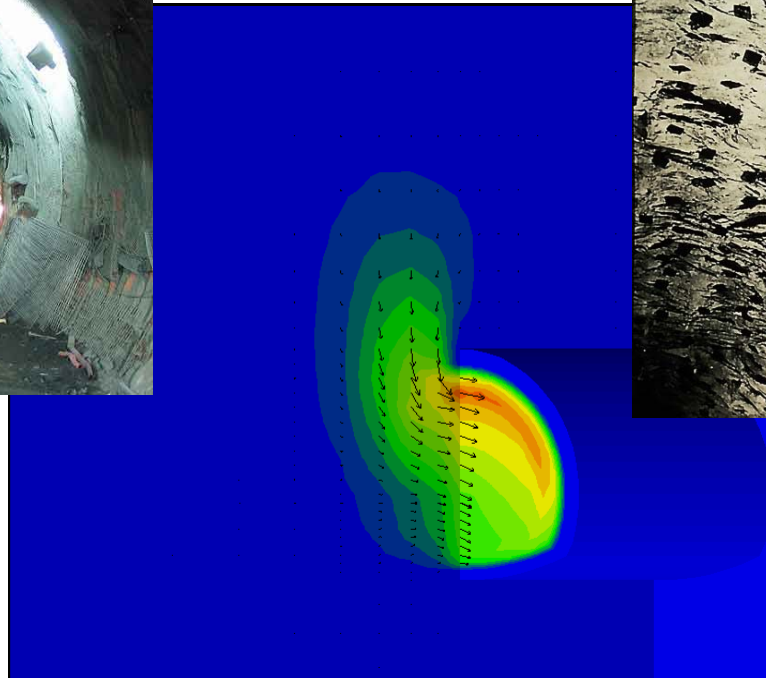


Qu'attend-t-on des calculs numériques en souterrain ?

Comprendre et identifier les mécanismes comportementaux



LTF



Percement du tunnel
sous le Mont-Blanc

Qu'attend-t-on des calculs numériques en souterrain ?

Comprendre et identifier les mécanismes comportementaux

Concevoir



LHC – CERN

Qu'attend-t-on des calculs numériques en souterrain ?

Comprendre et identifier les mécanismes comportementaux

Concevoir

Dimensionner



Lötschberg



Percement du tunnel sous le Fréjus

Qu'attend-t-on des calculs numériques en souterrain ?

Comprendre et identifier les mécanismes comportementaux

Concevoir

Dimensionner

Justifier



Qu'attend-t-on des calculs numériques en souterrain ?

Comprendre et identifier les mécanismes comportementaux

Concevoir

Dimensionner

Justifier

Optimiser



Qu'attend-t-on des calculs numériques en souterrain ?

Comprendre et identifier les mécanismes comportementaux

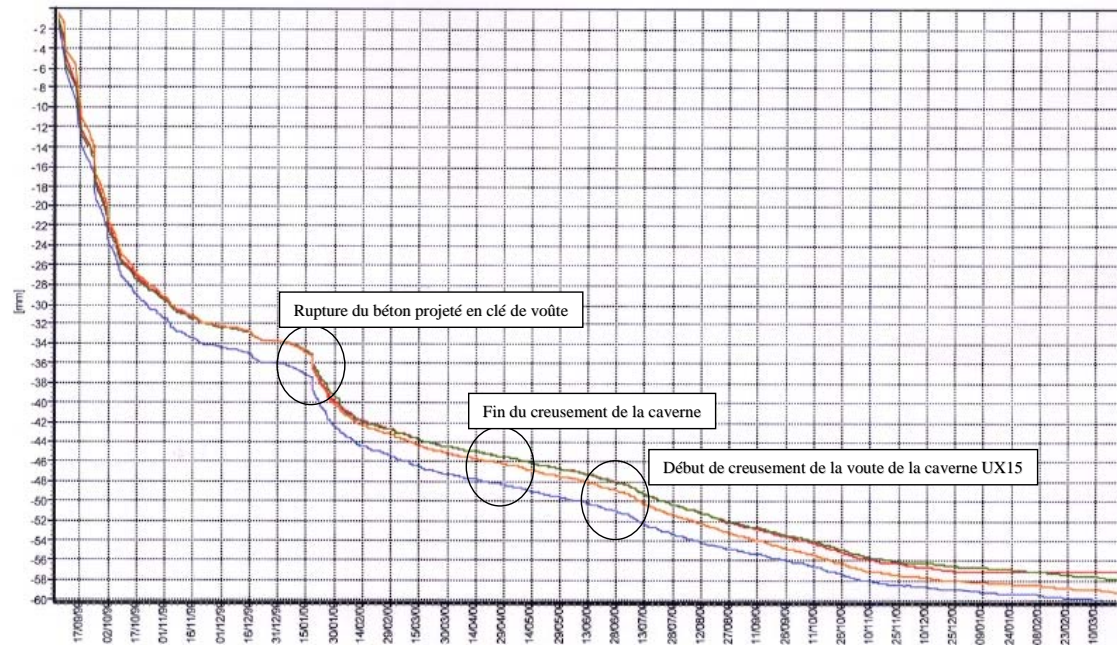
Concevoir

Dimensionner

Justifier

Optimiser

Prédire



Pertinence des prédictions et modélisations ?

Comprendre et identifier les mécanismes comportementaux

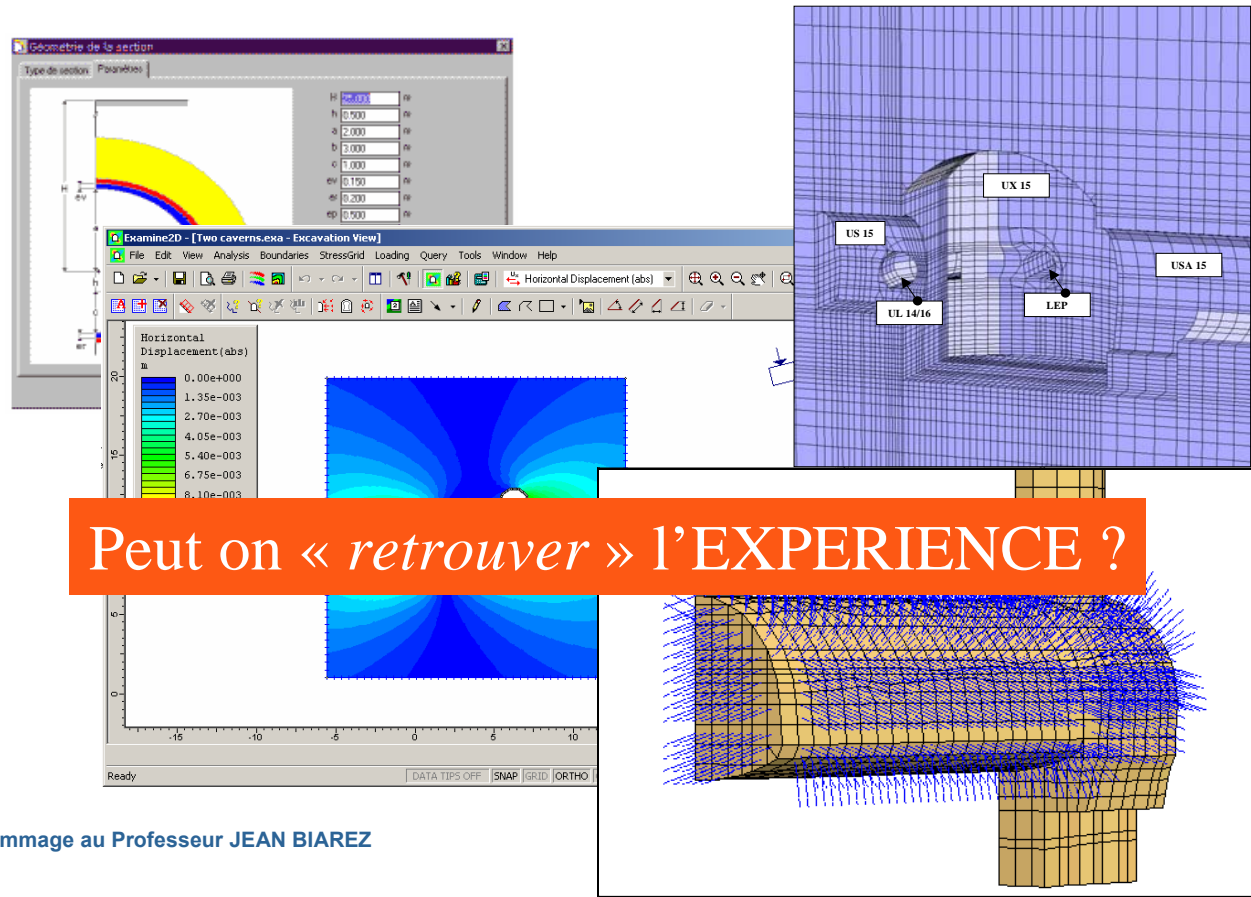
Concevoir

Dimensionner

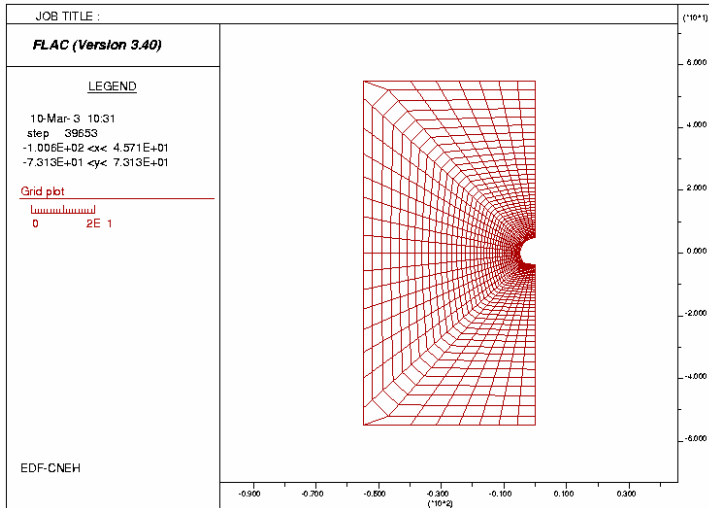
Justifier

Optimiser

Prédire



Pertinence des prédictions et modélisations ?



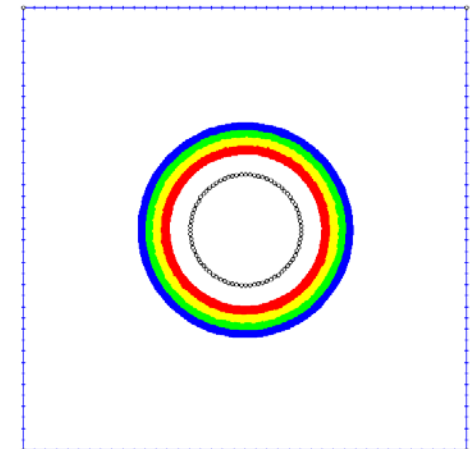
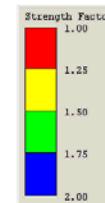
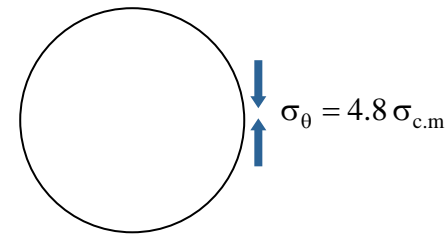
Tunnel profond:

- Diamètre: 10m
- Contrainte initiale isotrope: 12 MPa
- Résistance: 5 MPa

Analyse préliminaire:

$$\frac{2 \cdot \sigma_{\text{initiale}}}{\sigma_{c,m}} = 4.8$$

$$\frac{\sigma_{c,m}}{\sigma_{\text{initiale}}} = 0.4$$



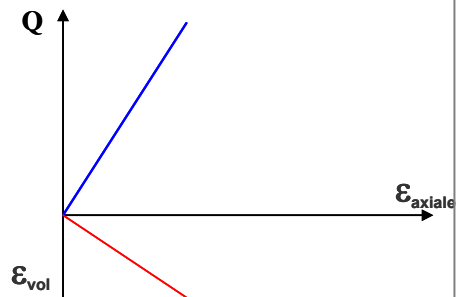
Zone en « rupture » se développant en paroi

Ouvrage pouvant poser des difficultés au creusement

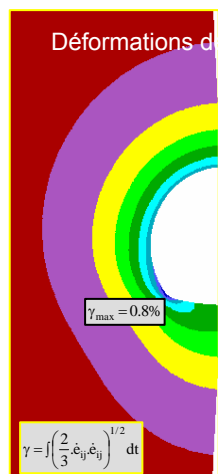
Soutènement indispensable

Stabilité du front ?...

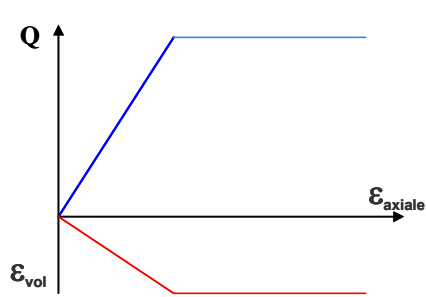
Pertinence des prédictions et modélisations ?



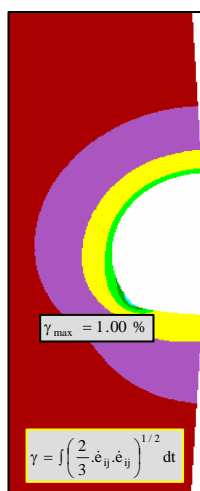
E=2200 MPa
ν=0.20



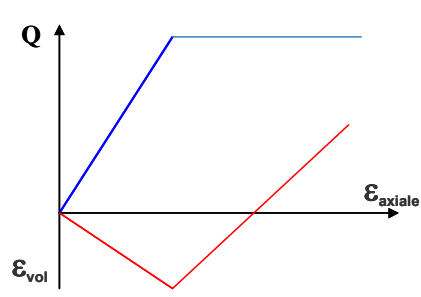
D_{max} = 3.06 cm



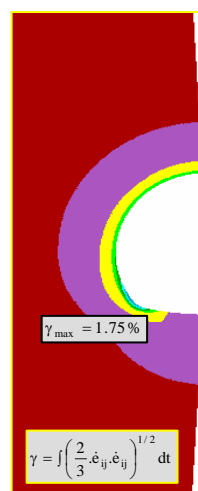
E=2200 MPa
ν=0.20
C=1.5 MPa
φ=30°



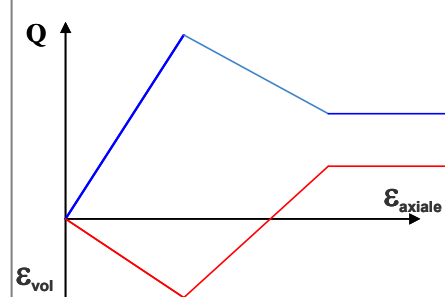
D_{max} = 3.17 cm



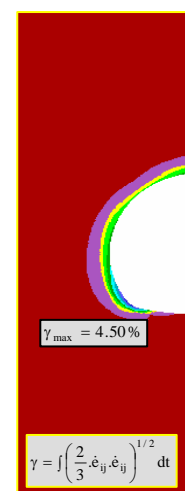
E=2200 MPa
ν=0.20
C=1.5 MPa
φ=30°



D_{max} = 3.31 cm



E=2200 MPa
ν=0.20
C=1.5 MPa **C_{res}=0.75 MPa**
φ=30° **φ_{res}=30°**



D_{max} = 4.81 cm

Pertinence des prédictions et modélisations ?

Convergences : 0.6% à 1.0 %

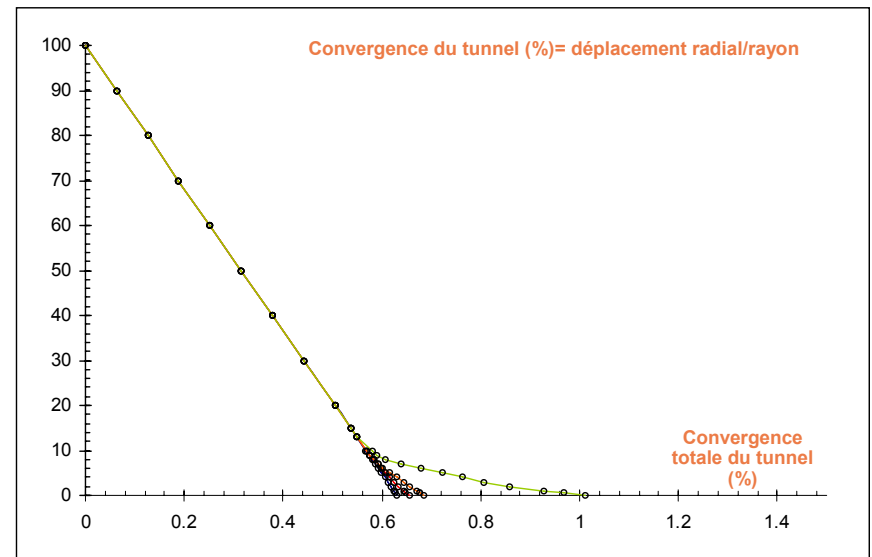
Déplacements totaux : 3 cm à 5 cm

Déformations limitées dans le massif

Epaisseur de la zone plastique limitée < 30 cm

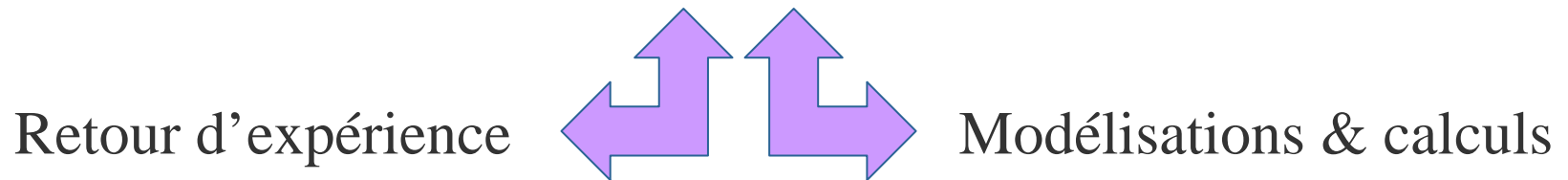
Conditions d'équilibre vérifiées à tout moment:

→ Déplacements stabilisés

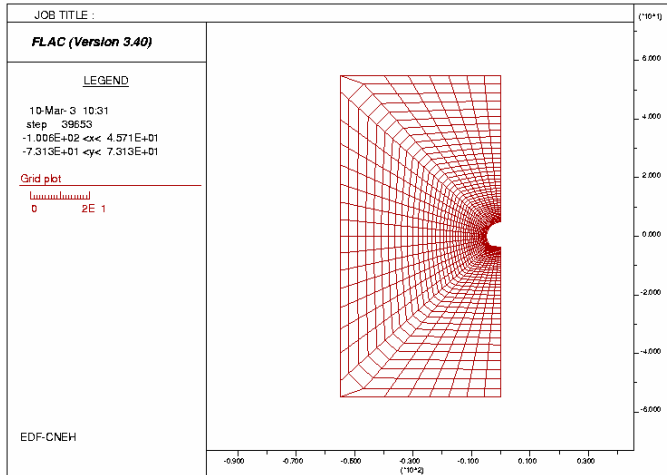


Stable ou instable ?

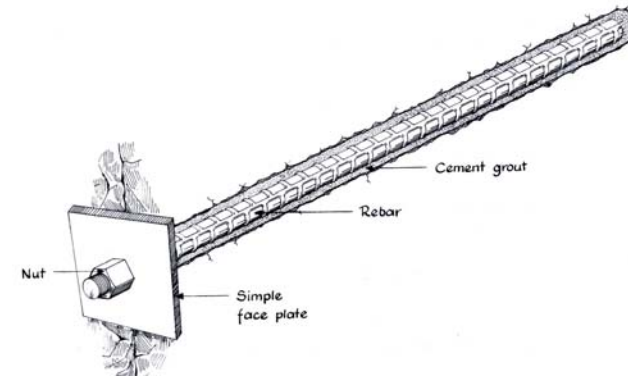
Creusement sans soutènement ?



Pertinence des prédictions et modélisations ?



Mise en place d'un soutènement par boulonnage passif

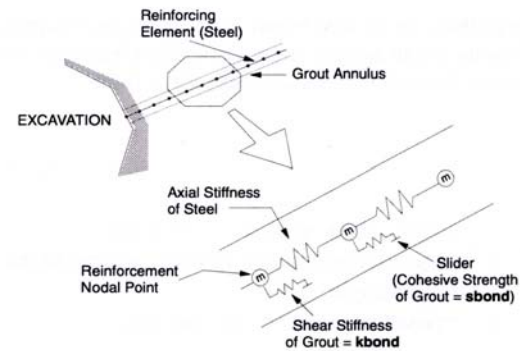


Mise en place d'un soutènement

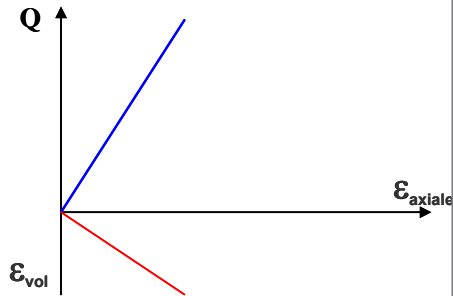
Longueur : 4 m

Maille : 1m x 1m

Diamètre des barres : 20 mm



Pertinence des prédictions et modélisations ?



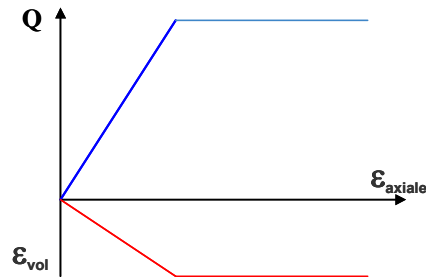
$E=2200 \text{ MPa}$
 $\nu=0.20$

Sans soutènement

$D_{\max}=3.06 \text{ cm}$

Avec soutènement

$D_{\max}=3.04 \text{ cm}$



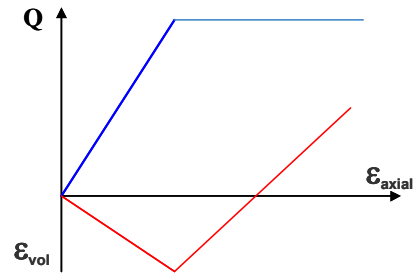
$E=2200 \text{ MPa}$
 $\nu=0.20$
 $C=1.5 \text{ MPa}$
 $\phi=33^\circ$

Sans soutènement

$D_{\max}=3.17 \text{ cm}$

Avec soutènement

$D_{\max}=3.14 \text{ cm}$



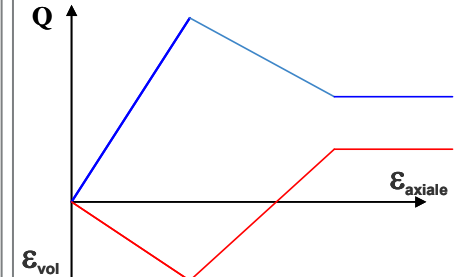
$E=2200 \text{ MPa}$
 $\nu=0.20$
 $C=1.5 \text{ MPa}$
 $\phi=33^\circ$

Sans soutènement

$D_{\max}=3.31 \text{ cm}$

Avec soutènement

$D_{\max}=3.27 \text{ cm}$



$E=2200 \text{ MPa}$
 $\nu=0.20$
 $C=1.5 \text{ MPa}$ $C_{\text{res}}=0.75 \text{ MPa}$
 $\phi=33^\circ$ $\phi_{\text{res}}=33^\circ$

Sans soutènement

$D_{\max}=4.81 \text{ cm}$

Avec soutènement

$D_{\max}=4.73 \text{ cm}$

!! Le boulonnage n'a aucun effet en souterrain !!



Justification du soutènement ?

Quels critères de conception et de dimensionnement ?

Quelques réflexions et idées

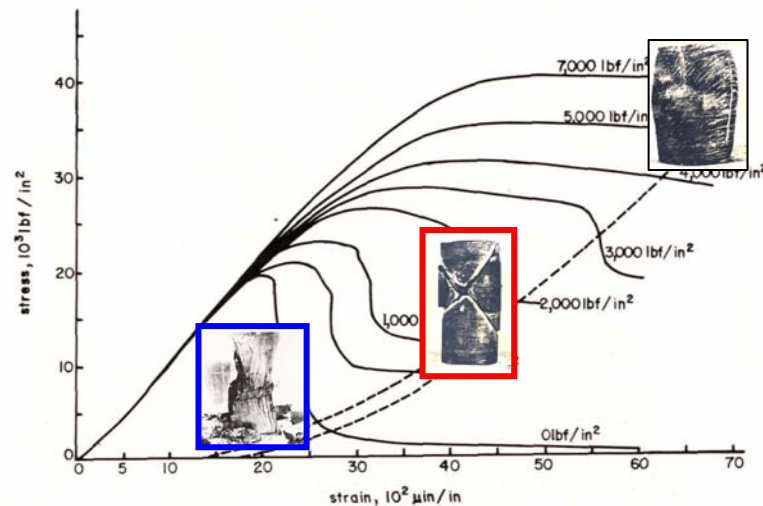
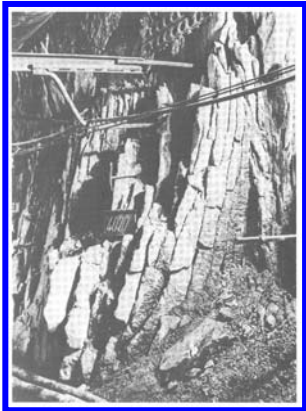


Tunnel profond

- Ouvrages isolés (pas de problèmes de tassements ou d'interaction...)
- Fortes contraintes
- Dégradation / rupture localisée du rocher

Comportement non-linéaire

Comportement aux moyennes et grandes déformations (Comportement radoucissant « Post-Pic »)

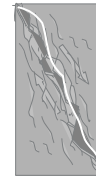
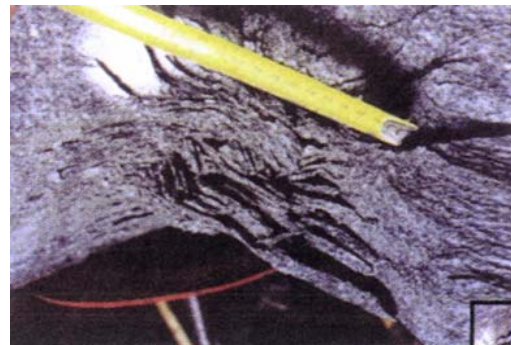


Quelques réflexions et idées



Comportement post-pic

Milieu continu



Milieu discontinu
associé à une
"Structure" induite

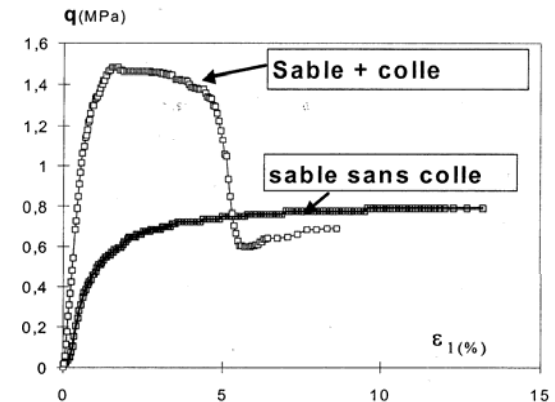
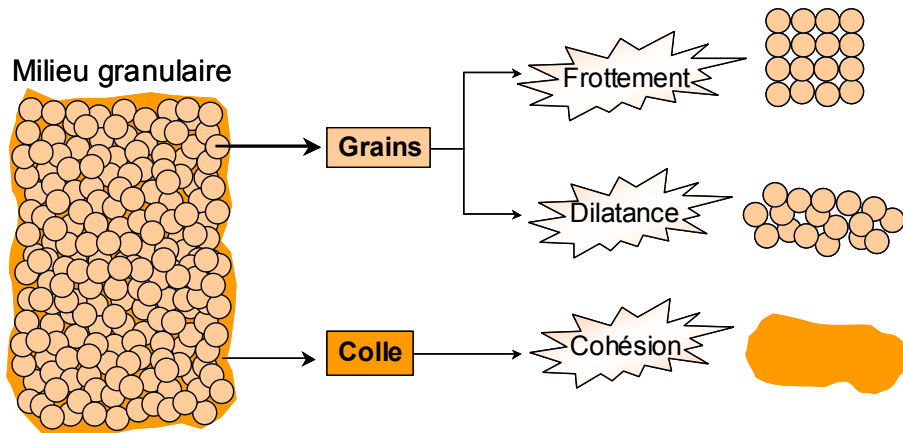


Milieu continu
"équivalent"

Quelques réflexions et idées

Le comportement macroscopique est régi par l'évolution de 3 composantes:

- La cohésion = Cimentation
- La dilatance = Structure granulaire
- Le frottement = particules élémentaires (grains, minéraux)

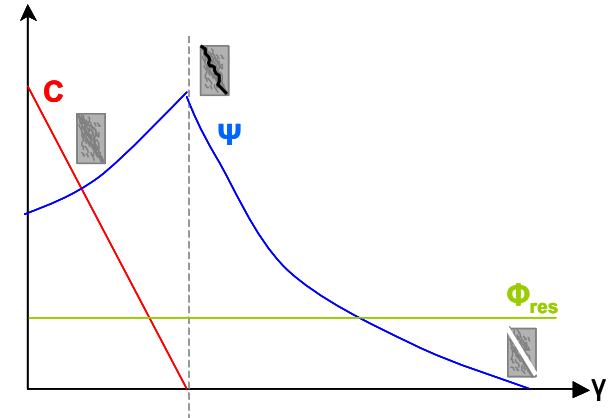


$$\tau = \sigma_n \cdot \text{Tan}(\psi(\gamma, \sigma) + \Phi_{\text{ult}}) + c(\gamma, \sigma)$$

Quelques réflexions et idées

Proposition de lois d'évolution pour $\Psi(\gamma, \sigma)$ et $C(\gamma, \sigma)$

Des comportements "repères":



- Annulation totale de la cohésion pour de grandes déformations de cisaillement

- Annulation totale de la dilatance pour de grandes déformations de cisaillement

- Valeur maximale de la dilatance associée à un état de bifurcation

- Angle de frottement constant correspondant à l'angle d'état critique du matériau remanié

- Dépendance de la dilatance et de la cohésion avec l'état des contraintes

Quelques réflexions et idées - Evolution de la cohésion

- Annulation totale de la cohésion pour de grandes déformations de cisaillement

SIMR – Paris 1999

Visualisation de l'effet d'un boulonnage passif



Effacement progressif de la cohésion

**Boulons de diamètre 20mm
et une maille de 1/m².**

$$C_{\text{boulons}} = + 84 \text{ kPa}$$

$$E_{\text{boulons}} = + 66 \text{ MPa}$$

Sans soutènement

$$E = 2200 \text{ MPa}$$

$$C = 1\,500 \text{ kPa}$$

$$C_{\text{res}} = 750 \text{ kPa}$$

$$C_{\text{res}} = 0 \text{ kPa}$$

Avec soutènement

$$E = 2266 \text{ MPa}$$

$$C = 1\,584 \text{ kPa}$$

$$C_{\text{res}} = 834 \text{ kPa}$$

$$C_{\text{res}} = 84 \text{ kPa}$$

Quelques réflexions et idées - Evolution de la dilatance

- Valeur maximale de la dilatance associée à un état de bifurcation

- Dépendance de la dilatance et de la cohésion avec l'état des contraintes

Potentiel Plastique :

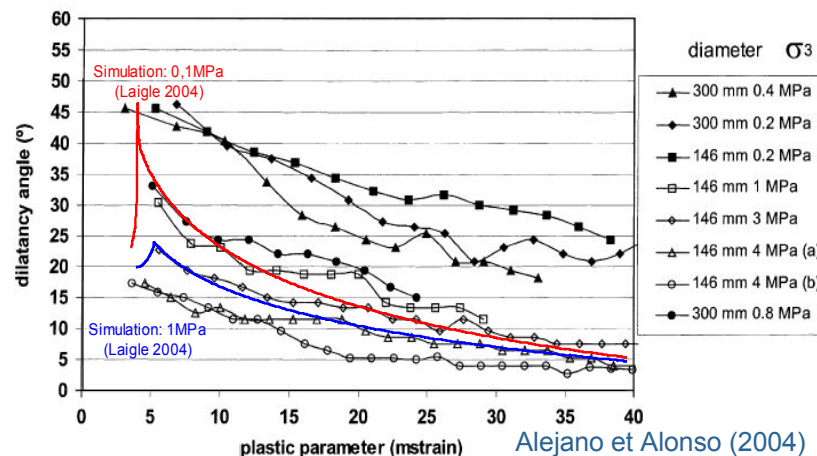
$$g(\bar{\sigma}, \gamma^p) = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \cdot \left(\frac{(\xi + \kappa) \cdot \alpha' + (1 - \kappa) \cdot \alpha_{\text{ult}}}{(\xi - \kappa) \cdot \alpha' + (1 + \kappa) \cdot \alpha_{\text{ult}}} \right) = 0$$

$$\alpha' = \frac{\sigma_{\max} + \frac{\tilde{c}(\gamma^p)}{\tan(\tilde{\phi}(\gamma^p))}}{\sigma_{\min} + \frac{\tilde{c}(\gamma^p)}{\tan(\tilde{\phi}(\gamma^p))}}$$

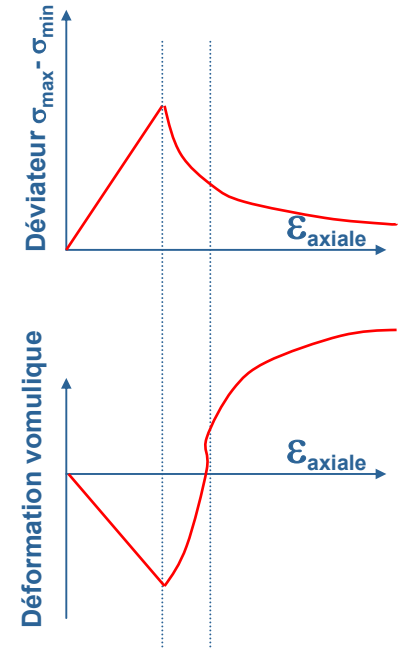
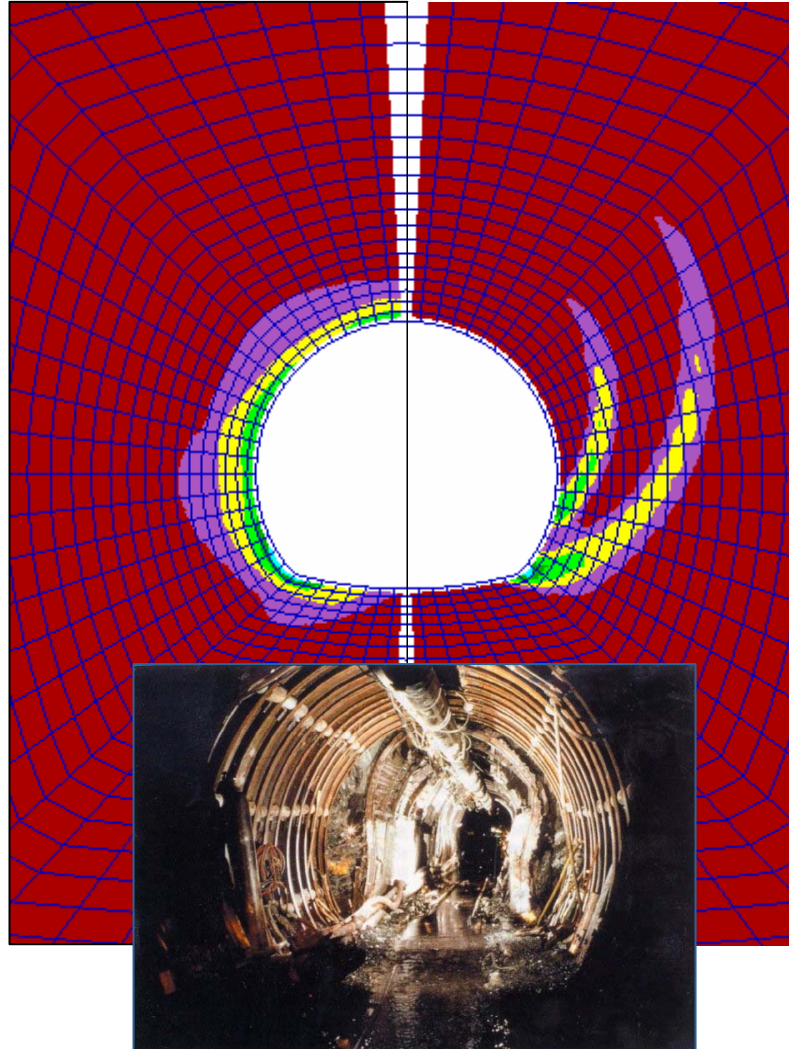
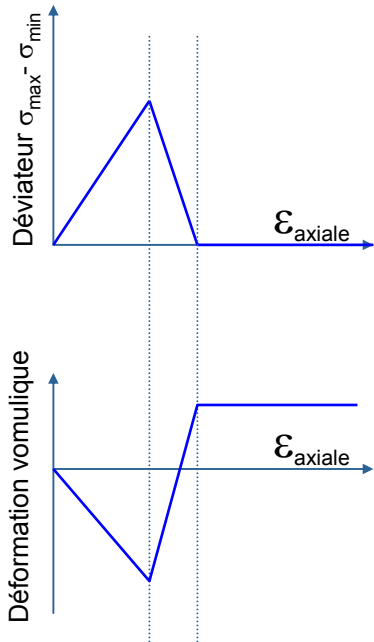
$$\xi = \kappa = 1$$

$\sigma_c = 0$ Matériaux pulvérulents

Formulation de la loi de Rowe



Identification des mécanismes

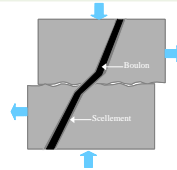


(Elastoplastique - Laigle 2004)

(Viscoplastique - Kleine 2007)

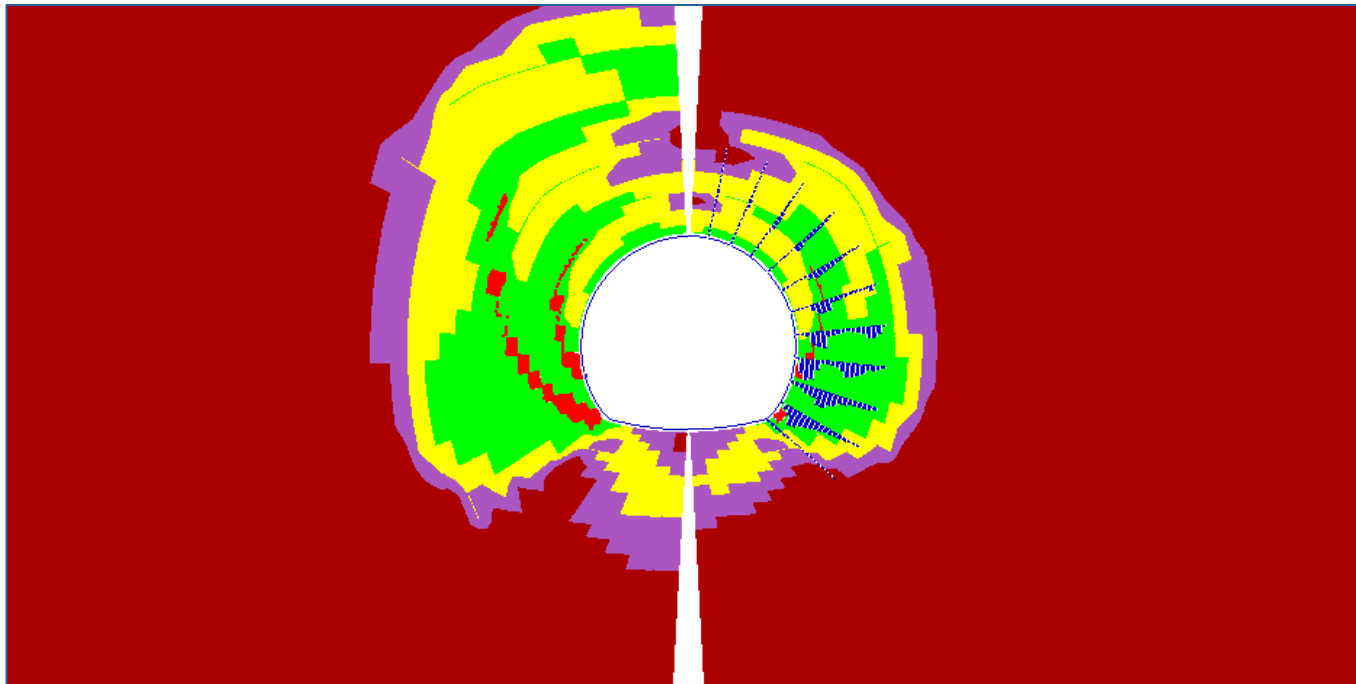
Applications

Apporter une cohésion au droit des
Discontinuités existantes ou induites



Effet du boulonnage

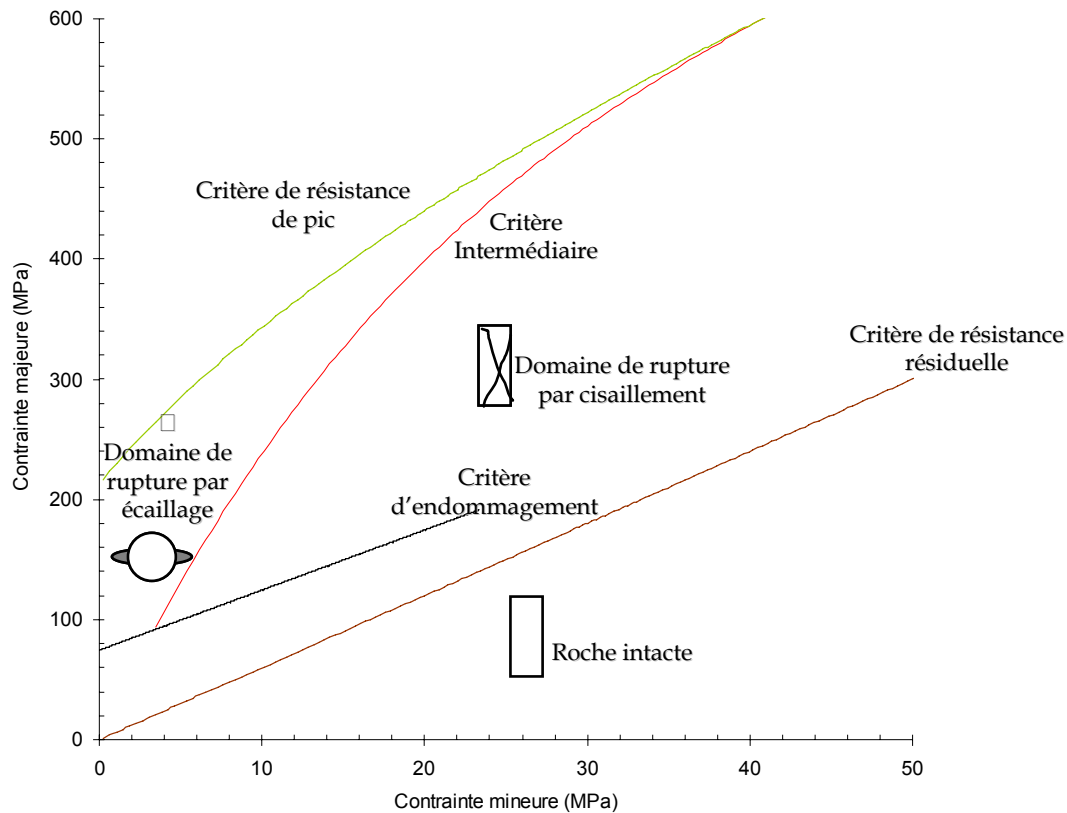
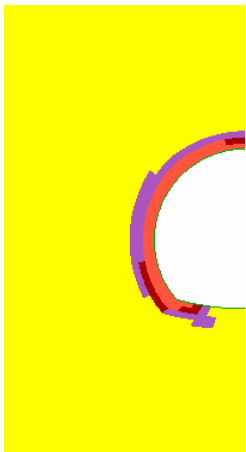
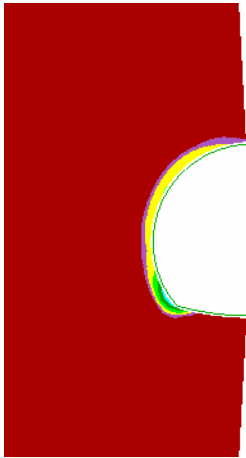
Cohésion massif \leftrightarrow "Cohésion" boulonnage



Applications

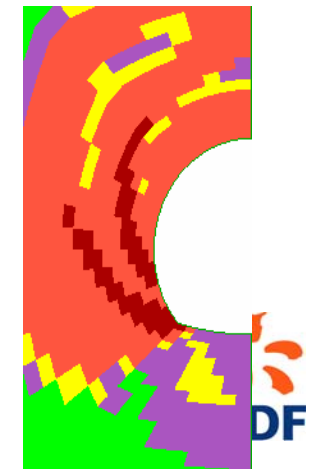
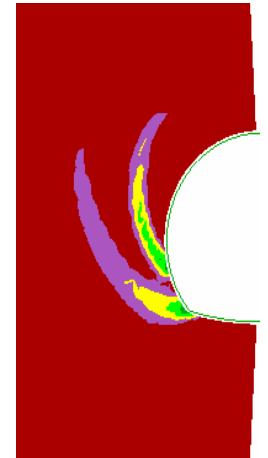
Mode de rupture par Ecaillage

Cas particulier: Nombre de stabilité : $N=1.9$



Mode de rupture par Cisaillement

Cas particulier: Nombre de stabilité : $N=3.6$



Outils numériques performants et conviviaux mis à disposition des Ingénieurs

Attention à leur mise en œuvre dans le cadre des études d'ouvrages souterrains profonds en milieu rocheux

Justification délicate de ces modélisations « courantes »

Identification des mécanismes de comportement

Comparaison avec l'Expérience de terrain (effet du boulonnage)

...

En se limitant à des outils de calcul basés sur les approches « continues »:

Proposition de comportement repères améliorant la pertinence des calculs

- Prise en compte du comportement post-pic radoucissant
 - Evolution progressive de la cohésion et annulation de celle-ci
 - Evolution de la dilatance, passant par un maximum puis s'annulant
 - Dépendance de ces lois d'écroutissement avec la contrainte

- Prise en compte du comportement différé