

Principes et Méthodes de Conception des Grandes Cavernes Hydroélectriques Souterraines

F. Laigle

*EDF – CIH
Centre d'Ingénierie Hydraulique*

*Séance Technique du 4 juin 2015
Conception des cavernes souterraines*





- **Particularités des grandes cavernes hydroélectriques**
- **Expériences de EDF dans le domaine des cavernes souterraines**
- **Données Statistiques sur les cavernes hydroélectriques**
- **Comportement et mécanismes potentiels de ruine**
- **Outils de calcul et critères d'interprétation**
- **Conclusions**

Particularités des grandes cavernes hydroélectriques

- Géométries non circulaires et spécifiques
- Grandes dimensions
- Grandes profondeurs
- Interfaces et connexion avec de nombreux autres ouvrages.
- Des phasages spécifiques de creusement
- Faible élancement Longueur/Largeur

Difficile de mettre en œuvre des structures de soutènement et de revêtement rigides

(Revêtements en béton ou cintres)

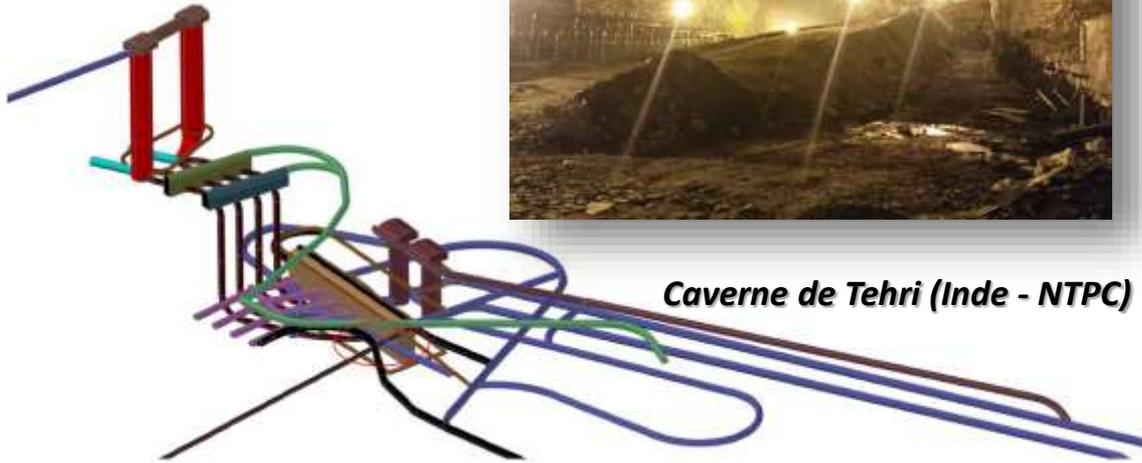
Nécessité de mobiliser au maximum le terrain pour assurer et participer à sa propre stabilité

Boulons et béton projeté – Tirants précontraints





Caverne de Tehri (Inde - NTPC)



Caverne de Kops (Autriche)



Caverne du CERN-LHC (Suisse)

Expérience eDF dans le domaine des cavernes hydroélectriques

37 Aménagements avec des usines souterraines en France.

- Différents contextes géologiques
- La plus large: 36 m (Caverne du Sautet)
- La plus vieille: Brommat I en 1933
- La dernière en cours de construction: Romanche-Gavet

Caverne d'Oraison (eDF)



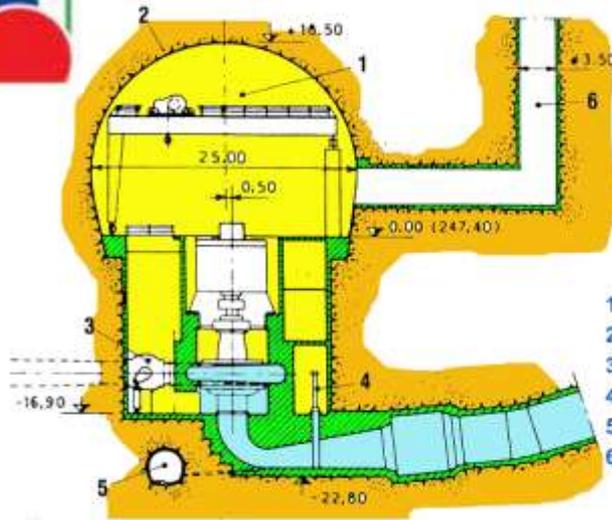
Projet Romanche-Gavet (eDF)

• Ouvrages hors France

- 2000: Large Hadron Collider Project (CERN)
- 2015: Terhi Underground powerplant (India)
- 2015: Gilboa Underground Powerplant (Israel)



Caverne de Gilboa (Israël)

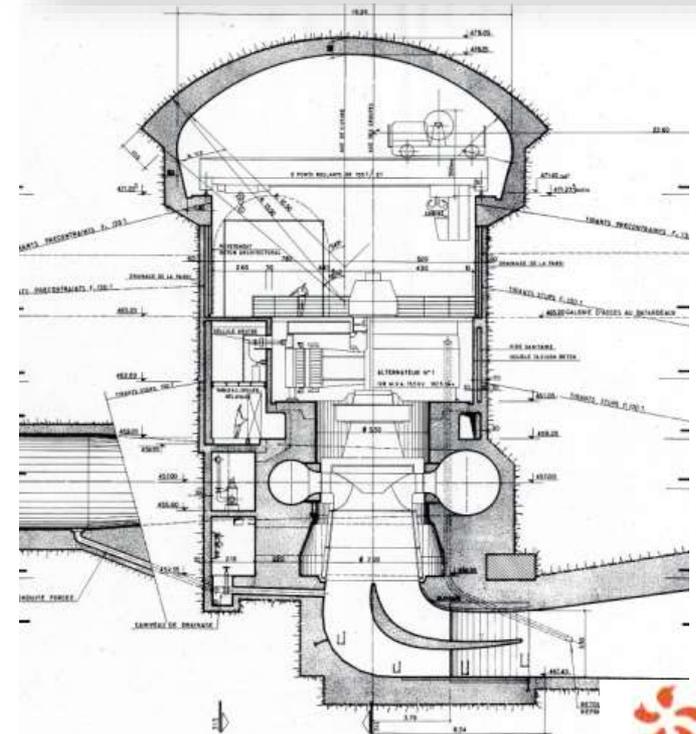


USINE de MONTEZIC Coupe transversale

1. Salle des machines
2. Béton projeté
3. Vanne amont
4. Vanne aval
5. Galerie de drainage
6. Puits des barres



Caverne de Sisteron (eDF)



Caverne de Tehri (Inde - NTPC)



LHC Project (CERN)



Caverne de Gavet (EDF)



Données statistiques sur les cavernes hydroélectriques

(From "International Water Power & Dam Construction")

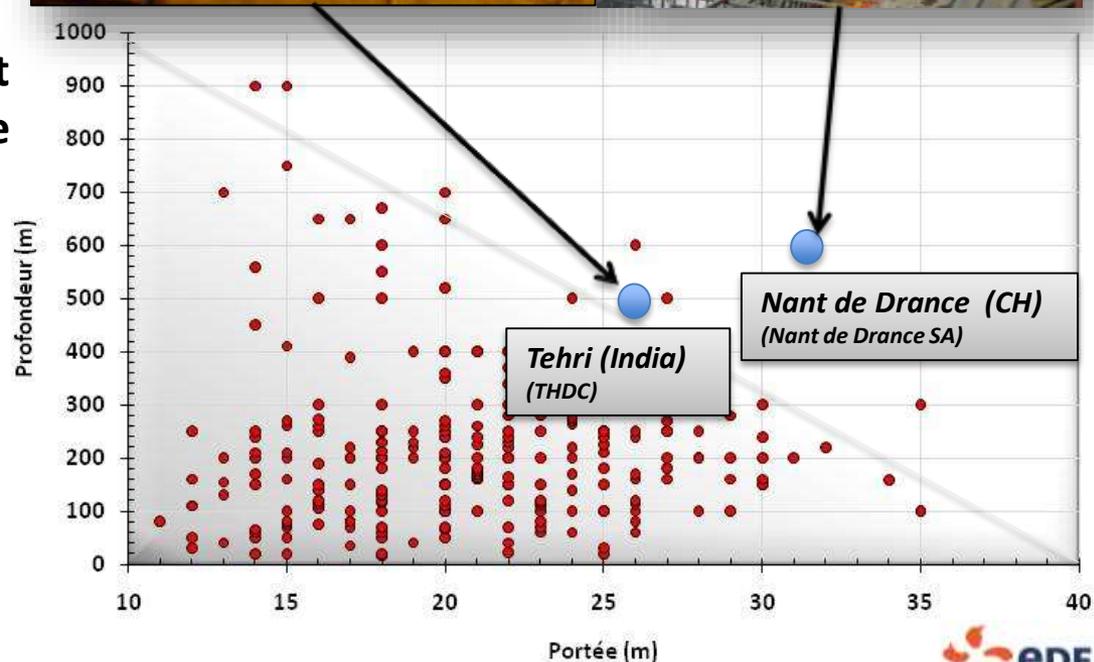
- Portée en fonction de la puissance unitaire des groupes
- Seulement 4% des cavernes ont une portée supérieure à 30 m
- Profondeur moyenne: 230 m
- La plupart des cavernes sont positionnées dans des roches de moyenne ou bonne qualité:
 - Q : 0.7 to 5
 - RMR : 40 to 60



Caverne de Tehri (Inde - NTPC)



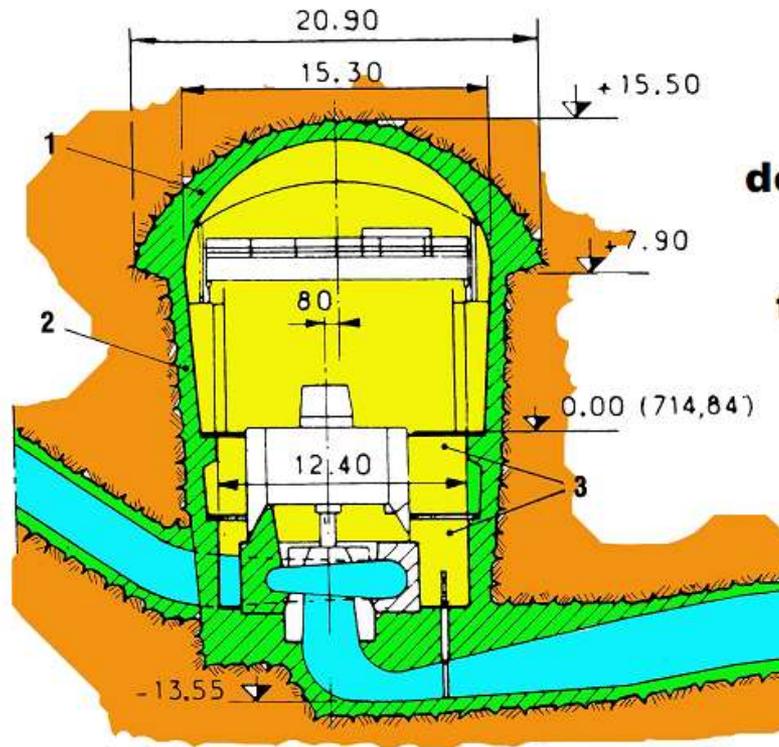
Nant de Drance (NdD SA)



Caverne de l'Echaillon (EDF)

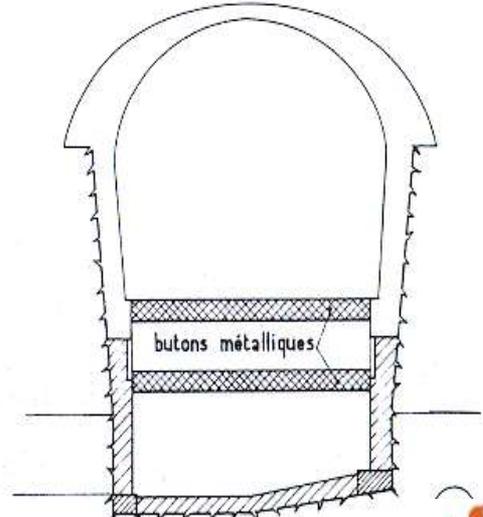
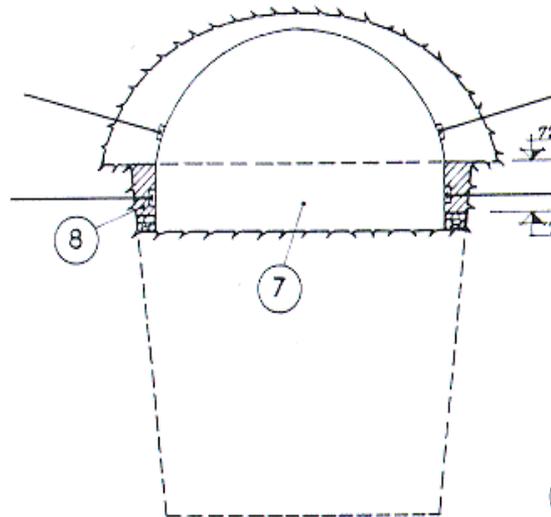
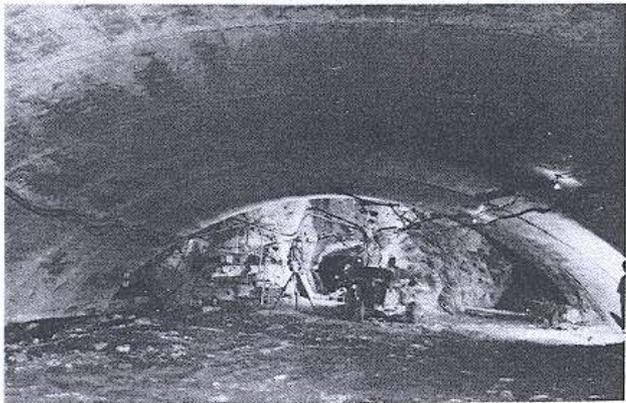
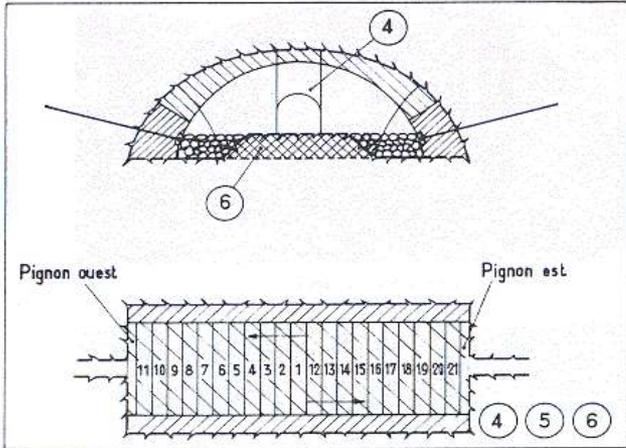
USINE de la SAUSSAZ

Coupe transversale



1. Voûte en béton (épaisseur en clé : 80 cm)
2. Revêtement des pénétrations en béton (e = 70 cm)
3. Butons métalliques

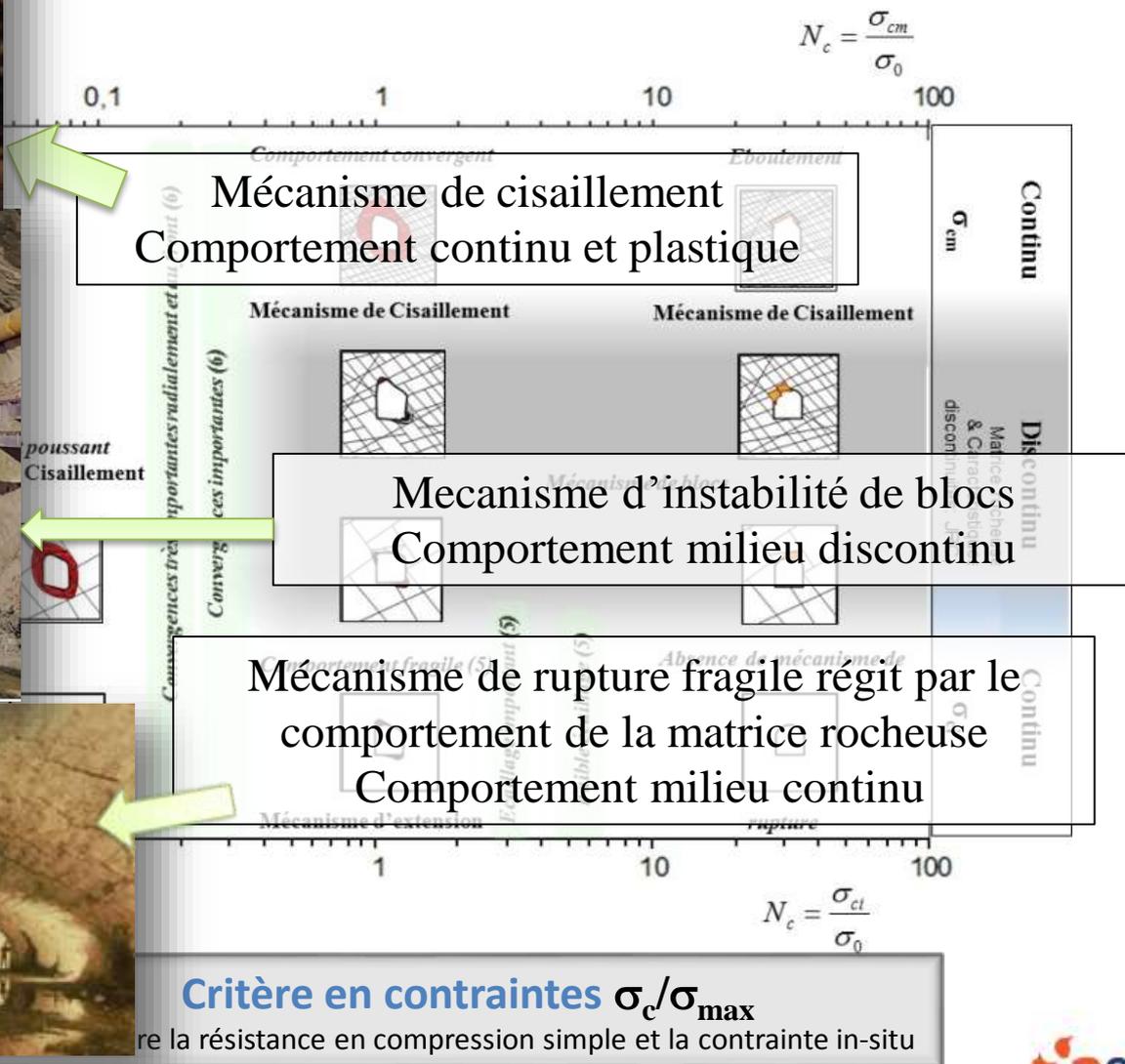
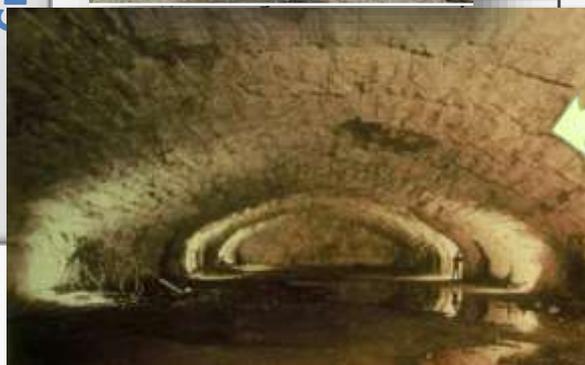
**MAUVAIS
TERRAIN**



Comportement et mécanismes potentiels de ruine

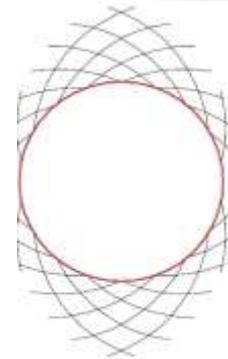
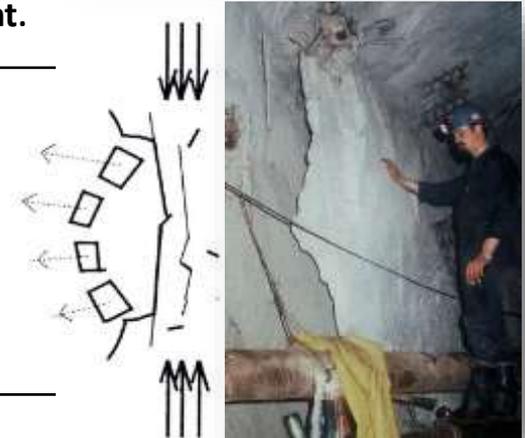


Critère géométrique, Db/D



Outils de calculs et critères d'interprétation

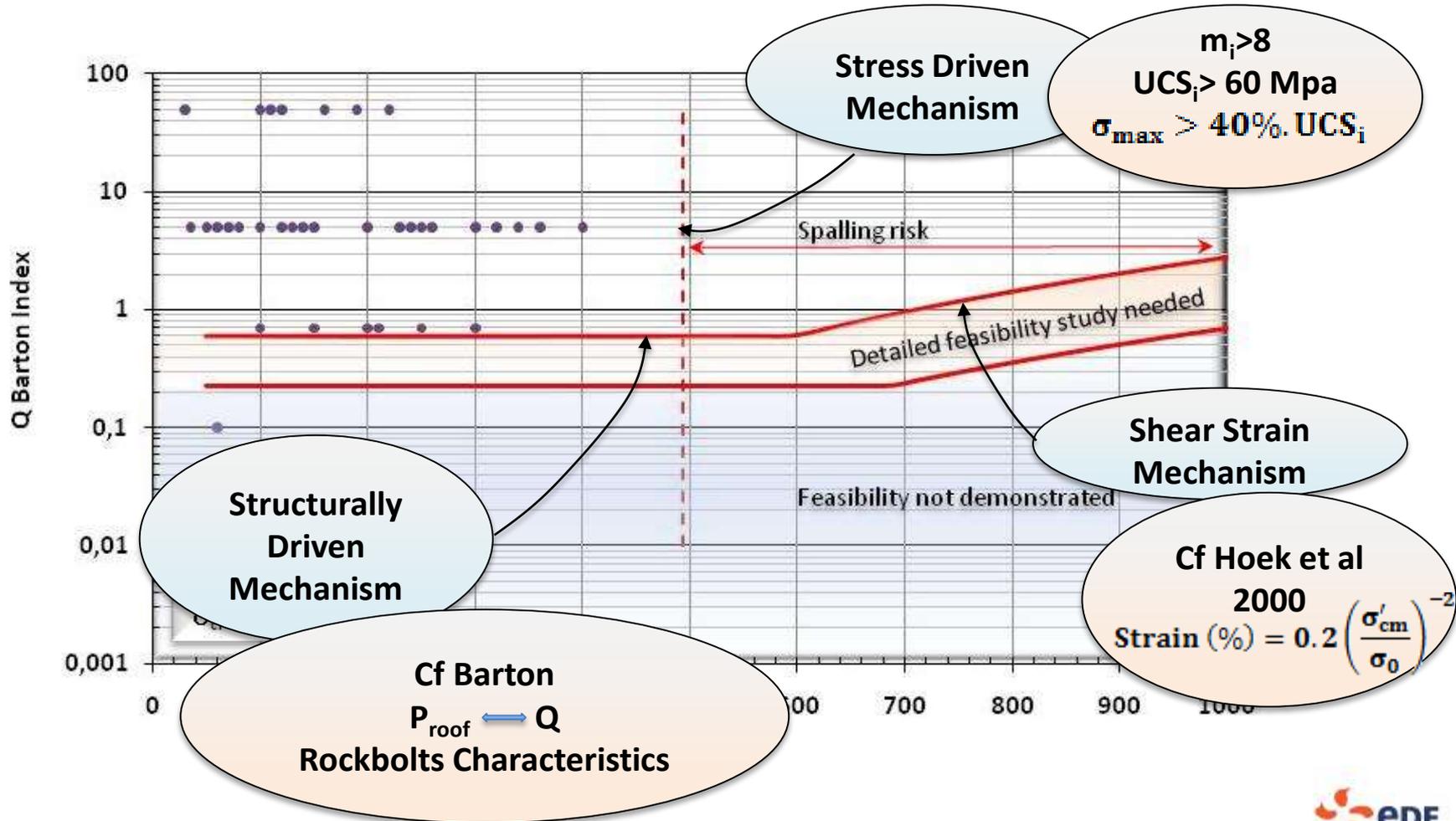
Mécanisme	Outils de calcul	Critères d'interprétation
<p>Mécanisme de blocs</p> <p>Structurally Driven Mechanism</p>	<p>Approche discontinue</p> <p>Modèles aux éléments discrets</p> <p>Approche d'équilibre limite</p>	<p>Définition d'un coefficient de sécurité</p> <p>Contraintes et/ou déformations dans les boulons.</p> <p>Contraintes dans les structures de soutènement/revêtement.</p>
<p>Mécanisme de rupture fragile</p> <p>Stress Driven Mechanism</p>	<p>Approche continue avec un comportement élastique linéaire.</p> <p>FEM, FDM, Elements frontières...</p>	<p>Analyse du champ des contraintes</p>
<p>Mécanisme de cisaillement</p> <p>Continuous Plastic behaviour</p>	<p>Approche continue non-linéaire</p> <p>Modèle de comportement "pertinent" dans le domaine des moyennes et grandes "déformations" i.e au-delà du pic de résistance</p> <p>FEM ou DEM Codes</p>	<p>Analyse du champ des déformations de cisaillement</p> <p>Analyse des déplacements</p> <p>Estimation des efforts et/ou déformations dans les boulons</p> <p>Estimation des contraintes dans les structures de revêtement et de soutènement.</p>



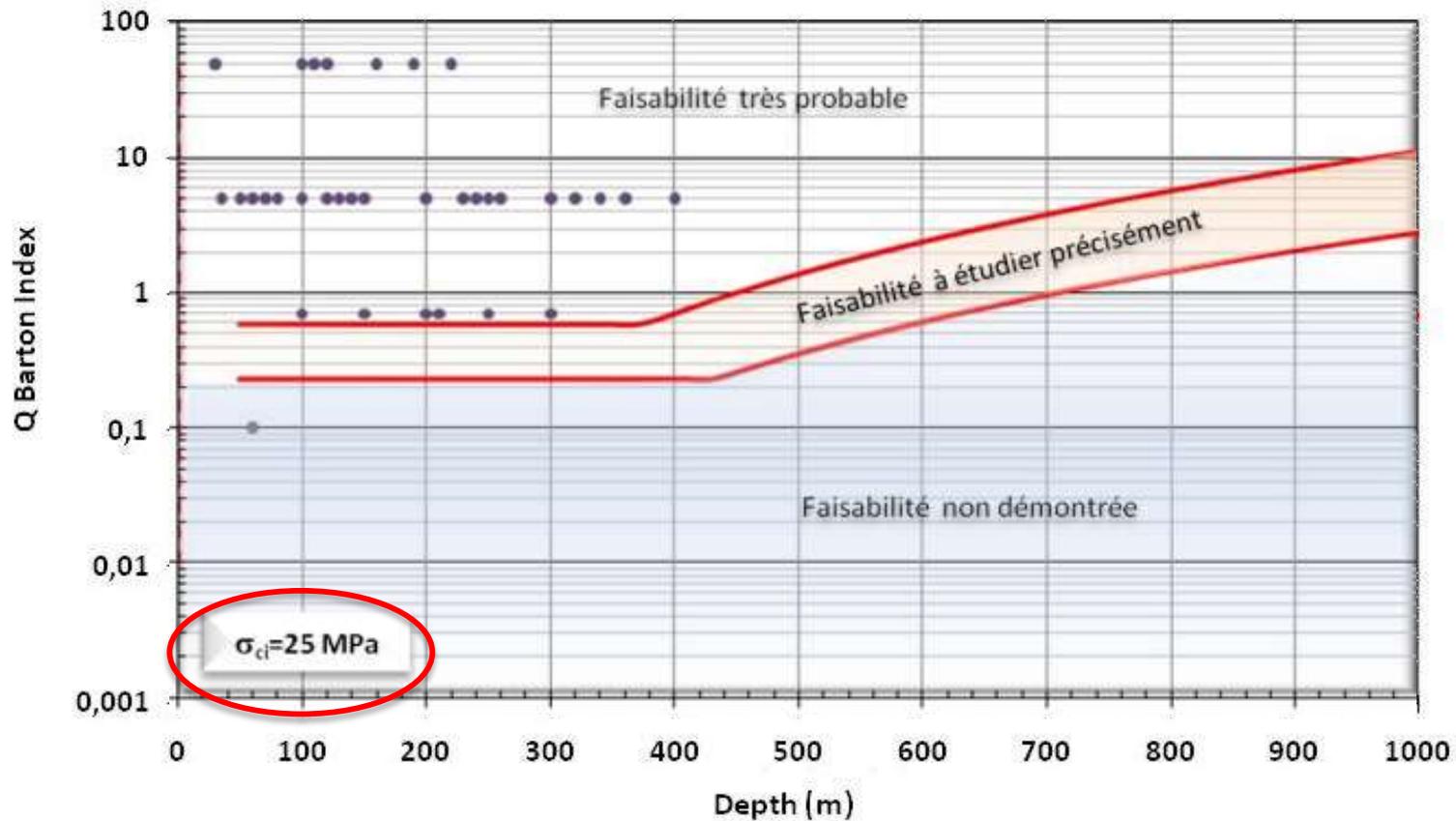
Outils de calculs et critères d'interprétation

Etablissement d'un abaque d'aide à la démonstration de faisabilité

- La Profondeur
- L'indice Q-NGI
- La résistance en compression simple de la matrice rocheuses



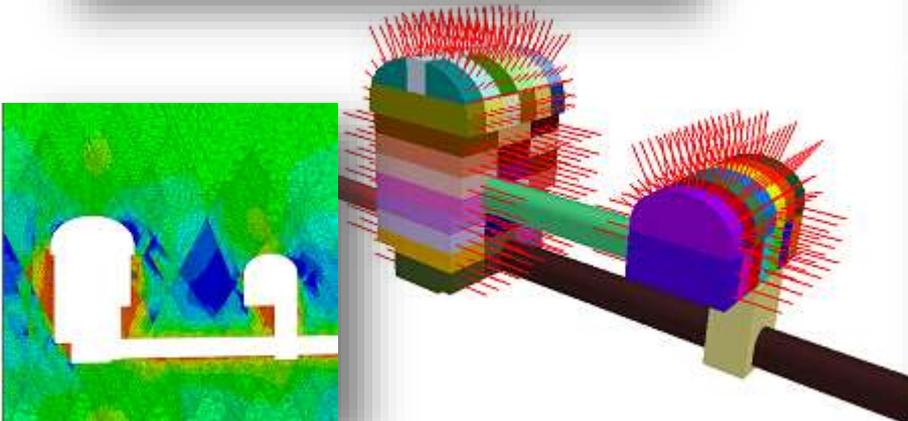
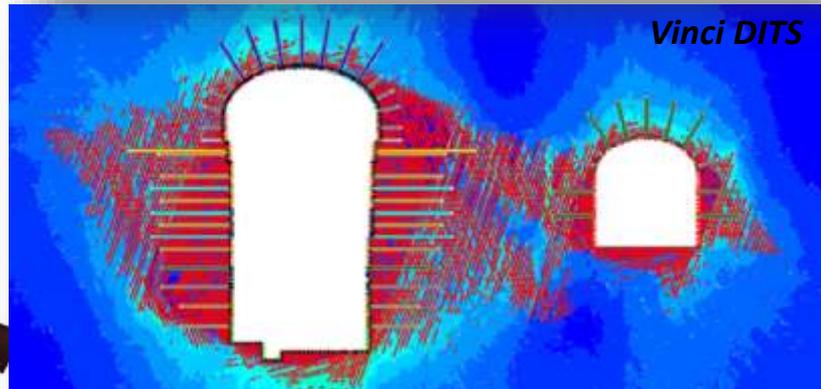
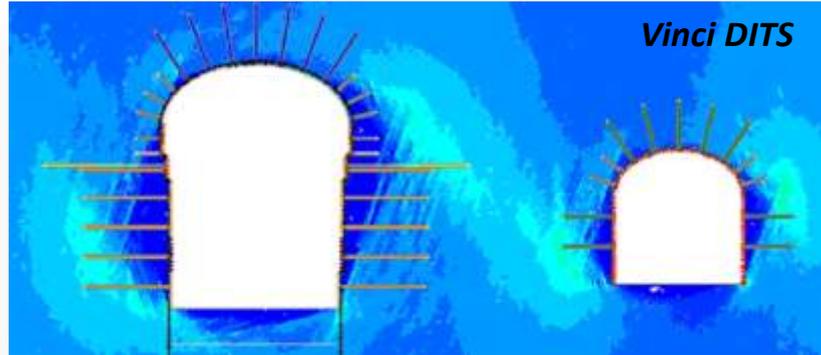
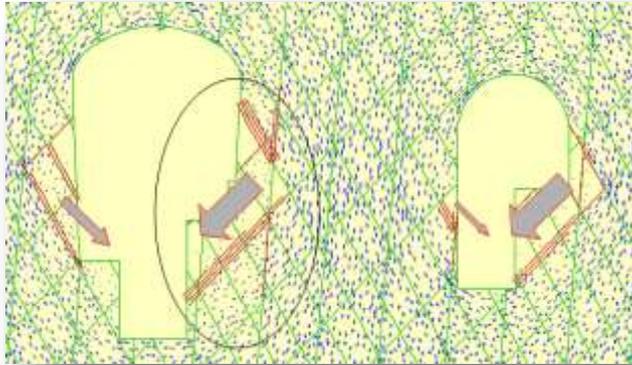
Outils de calculs et critères d'interprétation



Outils de calculs et critères d'interprétation

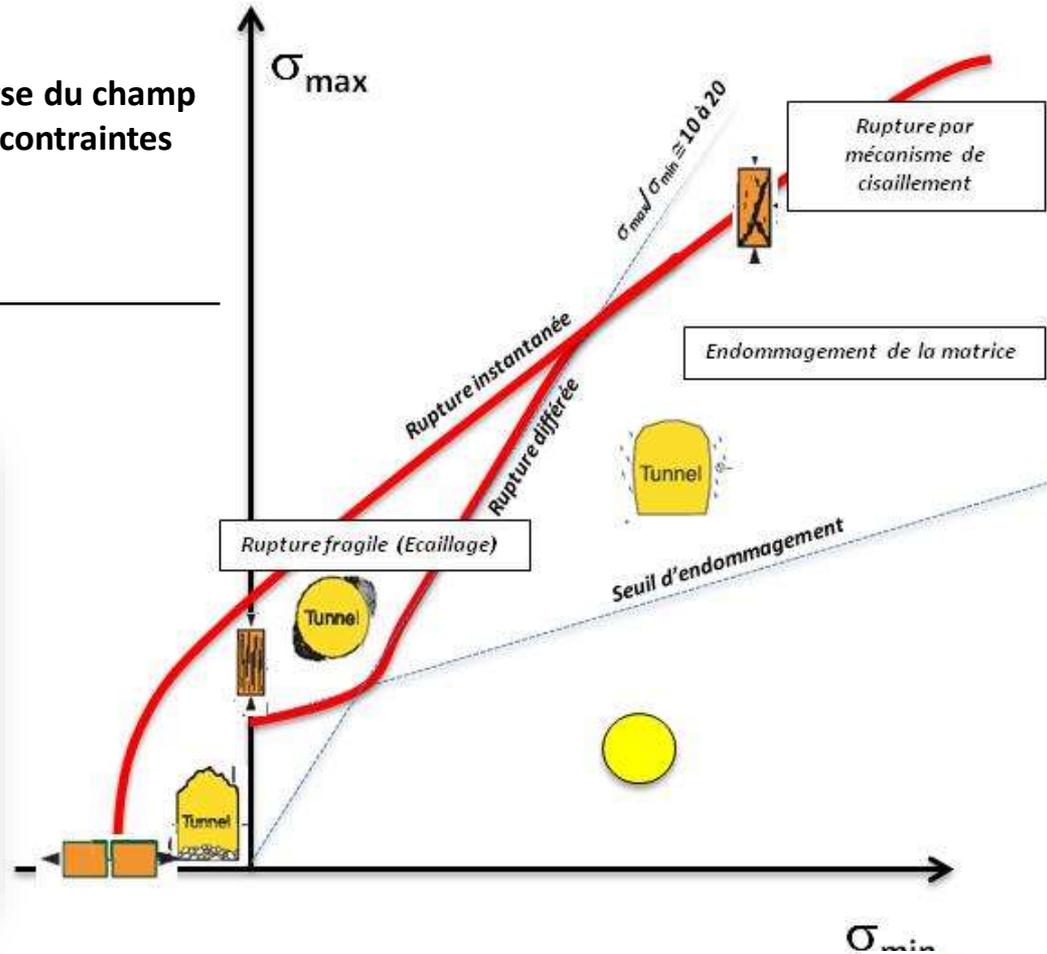
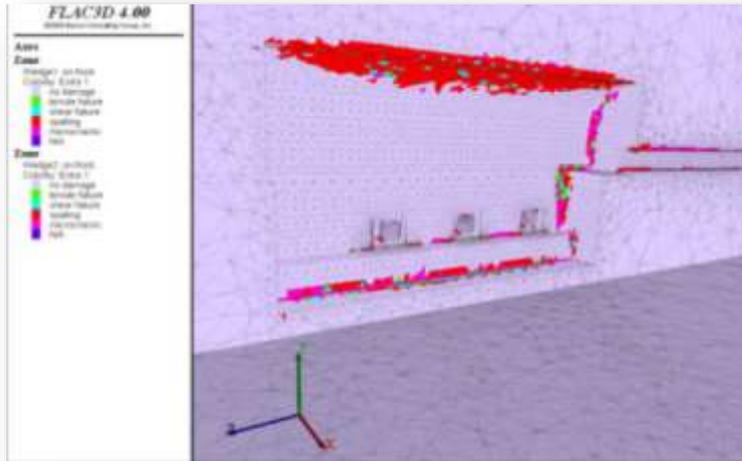
Mécanisme	Outils de calcul	Critères d'interprétation
Mécanisme de blocs	Approche discontinue	Définition d'un coefficient de sécurité
Structurally Driven Mechanism	Modèles aux éléments discrets	Contraintes et/ou déformations dans les boulons.
	Approche d'équilibre limite	Contraintes dans les structures de soutènement/revêtement.

- Provisoire: 1.3 à 1.5
 - Définitif: 1.5 à 2.0
 - Extrême: 1.1
- Déformation limite dans les barres scellées*
- Justification du béton projeté? Prise en compte dans les calculs?*



Outils de calculs et critères d'interprétation

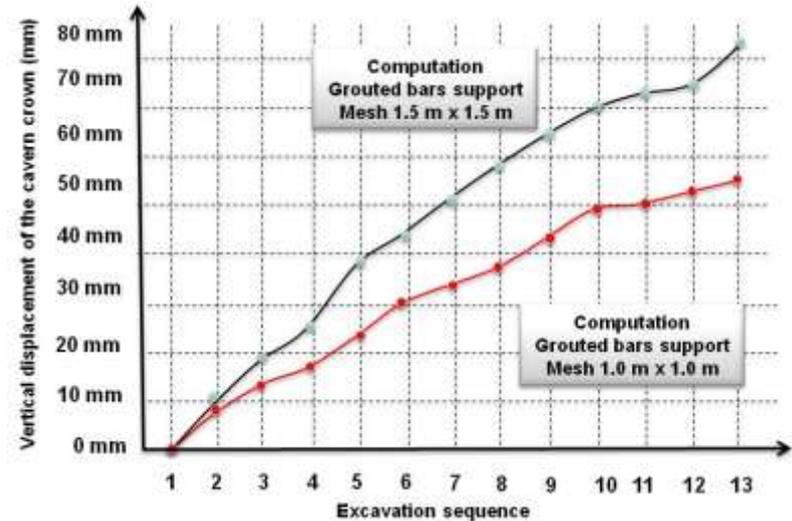
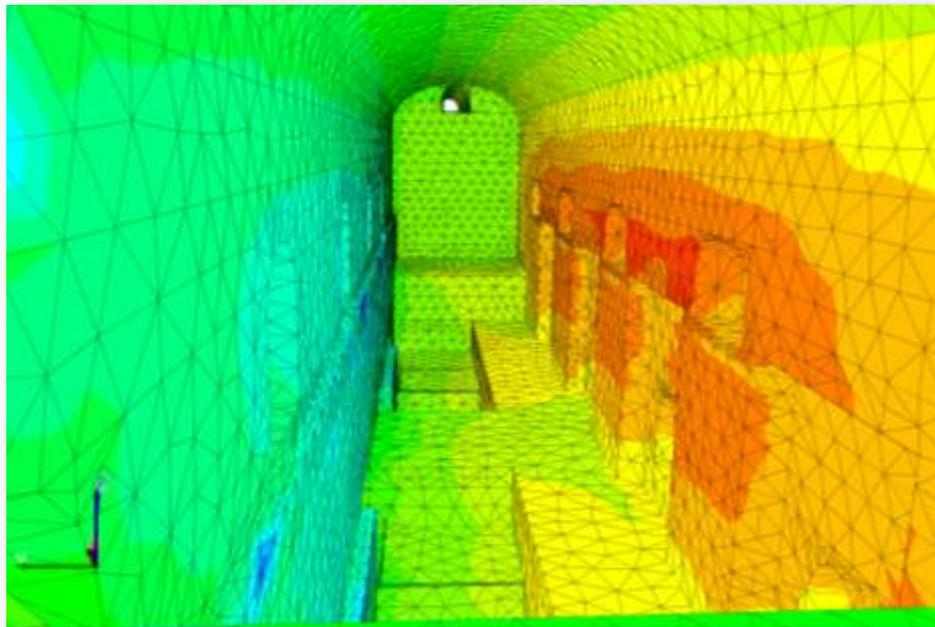
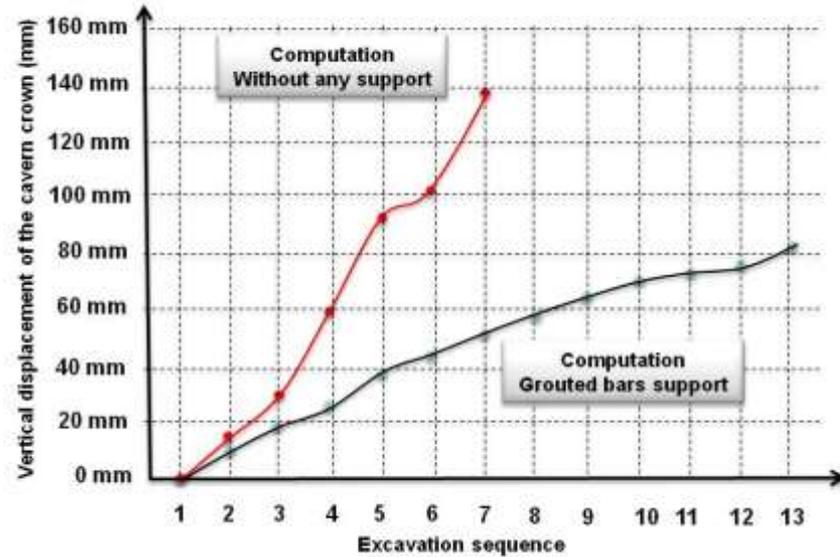
Mécanisme	Outils de calcul	Critères d'interprétation
<p>Mécanisme de rupture fragile</p> <p>Stress Driven Mechanism</p>	<p>Approche continue avec un comportement élastique linéaire.</p> <p>FEM, FDM, Elements frontières...</p>	<p>Analyse du champ des contraintes</p>



Rock mechanical aspects for cavern stability
Pilgerstorfer et al – Eurock 2013

Outils de calculs et critères d'interprétation

Mécanisme	Outils de calcul	Critères d'interprétation
<p>Mécanisme de cisaillement</p> <p>Continuous Plastic behaviour</p>	<p>Approche continue non-linéaire</p> <p>Modèle de comportement "pertinent" dans le domaine des moyennes et grandes "déformations" i.e au-delà du pic de résistance</p>	<p>Analyse du champ des déformations de cisaillement</p> <p>Analyse des déplacements</p> <p>Estimation des efforts et/ou déformations dans les boulons</p> <p>Estimation des contraintes dans les structures de revêtement et de soutènement.</p>

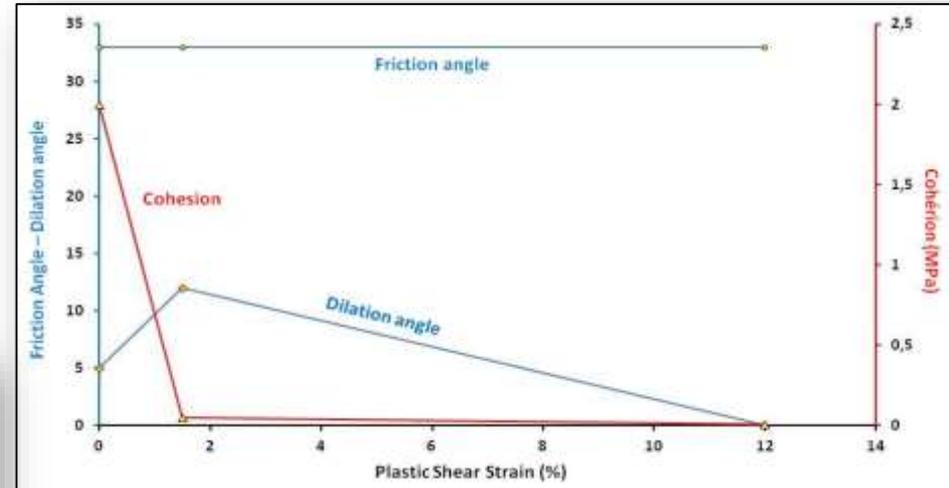


Mécanisme de cisaillement – Milieu continu

Caverne souterraine à 500m de profondeur dans des phyllites

Résistance en compression simple entre 35 to 50 MPa

Soutènement : béton projeté et boulons



Nécessité d'une loi de comportement avec une description "pertinente" et "justifiée" des évolutions de la cohésion et de l'angle de dilatance

Conclusions

Considérations générales sur la conception des soutènements

1/ **La stabilité repose essentiellement sur le comportement du massif**  NATM

Les soutènements renforcent le massif

Soutènement « souple » → Béton projeté et boulons scellés

2/ **Le béton projeté peut avoir une épaisseur limitée** (<20cm).

CERN-LHC: 20 cm de béton projeté

Fonction locale ayant un effet global en limitant la désorganisation du massif au voisinage du parement

Soutènement souple: Attention à la fissuration du béton projeté en voûte !!

3/ Si milieu « continu », **le boulonnage n'a pas lieu d'être excessivement long:**

$$L(m) = 2 + 0.2 \times \text{portée}(m) \quad (\text{cf } GT30)$$

Privilégier la densité.

4/ **Structure « souple »:**

Difficulté potentielle de dimensionnement des voûtes rigides

Critères de convergences? **0.5 à 1%**

5/ En préfaisabilité, **$Q > 0.7$**

6/ Attention au **choix du modèle rhéologique** dans le cas d'un milieu « continu »



Waldeck II, Germany:

Large cavern for an underground power station, where stability depends on over 800 anchorages post-tensioned to loads of 90 to 120 tons (900 to 1200kN).