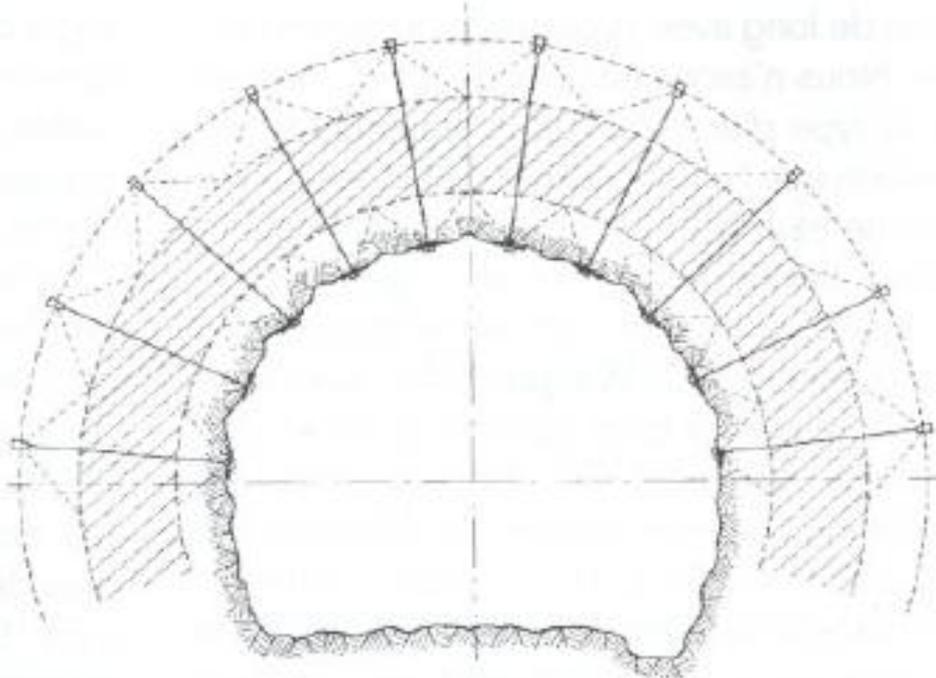


# Conception et justification du boulonnage

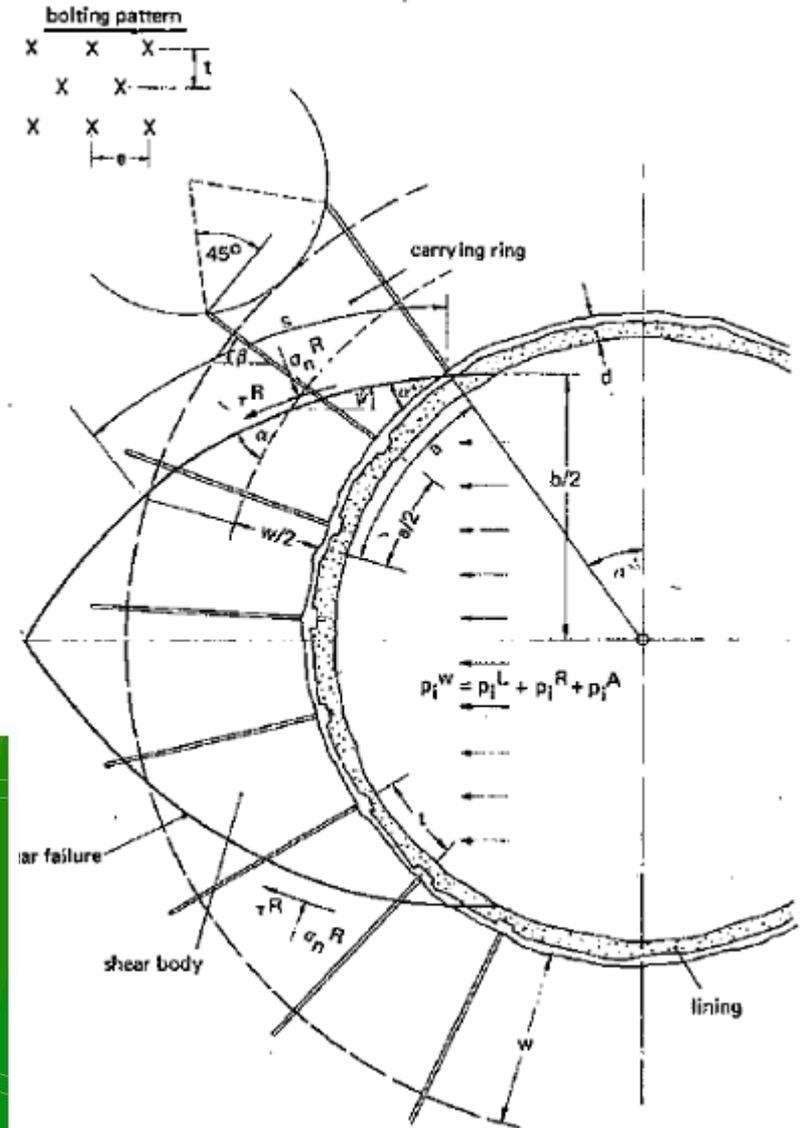
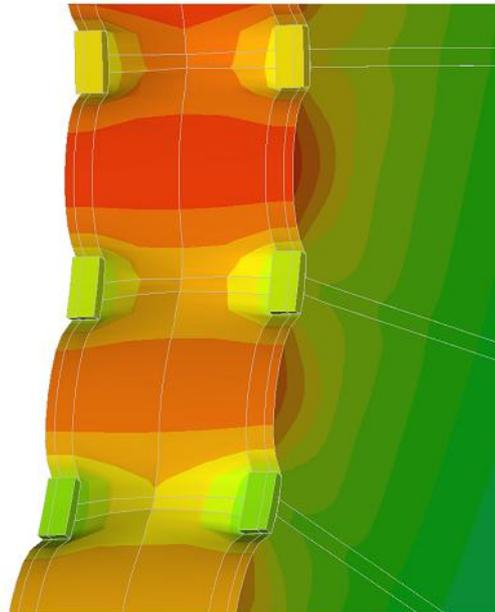
## Réflexions et avancées du Groupe de Travail n° 30 de l'AFTES

François Laigle



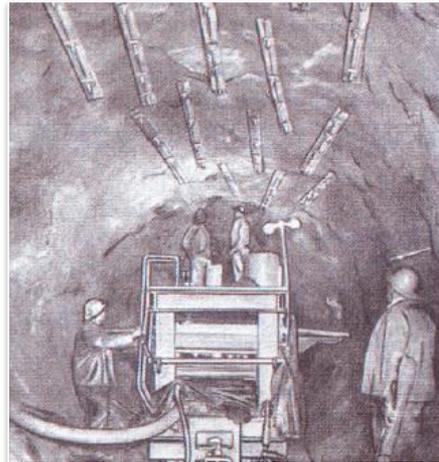
# Sommaire

- ◆ Constitution et historique du GT
- ◆ La Démarche et les attendus
- ◆ Les limites des recommandations
- ◆ Rôle et fonctionnement d'un boulonnage radial
- ◆ Critères de conception
- ◆ Perspectives



# Constitution et historique du GT 30

- 2 recommandations sur le boulonnage:
  - Technologie du boulonnage → 1974 TOS n° 4
  - Conditions d'emploi du boulonnage → 1979 TOS n° 31
- Importantes évolutions technologiques → boulons expansifs, ...
- Une volonté d'une plus grande justification des soutènements...
- Méconnaissance des principes de fonctionnement des soutènements par boulons (*en particulier passifs & scellés*)
- Inadéquation entre les méthodes de calculs récentes et l'expérience...



## A.F.T.E.S.

### GROUPE DE TRAVAIL N° 6 et 7 BETON PROJETE - SOUTENEMENT

#### TECHNOLOGIE DU BOULONNAGE

Version 3 du 3 mai 1974

par C. LOUIS et J. PIRAUD

**Technologie, recommandations de mise en œuvre...**

**L'aspect dimensionnement n'est pas traité**

## A.F.T.E.S

### GROUPES DE TRAVAIL N° 6 et 7 BÉTON PROJETÉ / SOUTÈNEMENT REVÊTEMENT

texte des recommandations sur les conditions  
d'emploi du boulonnage

Projet présenté par C. LOUIS (animateur du groupe de travail N° 6 avec la collaboration de :)

#### Groupe 6

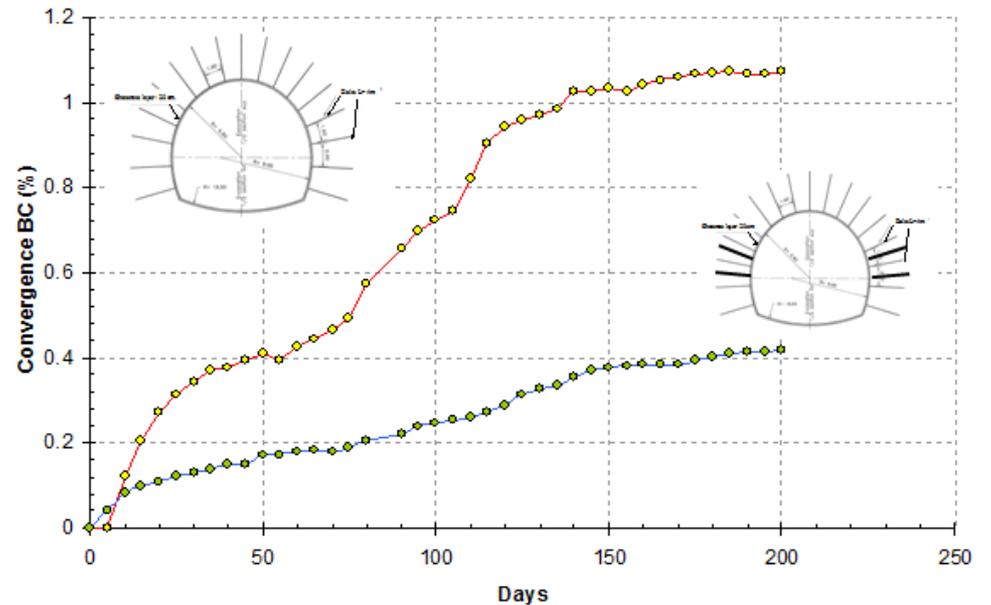
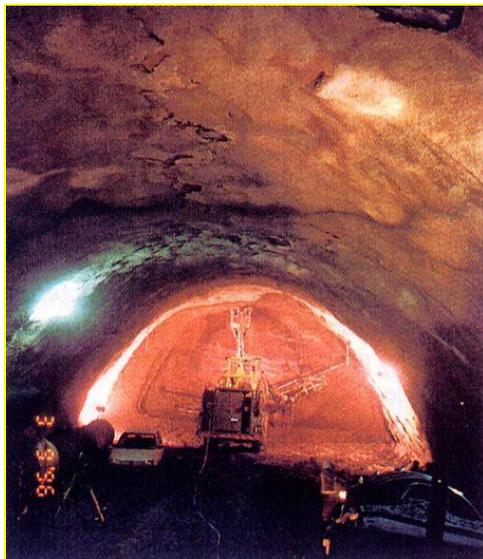
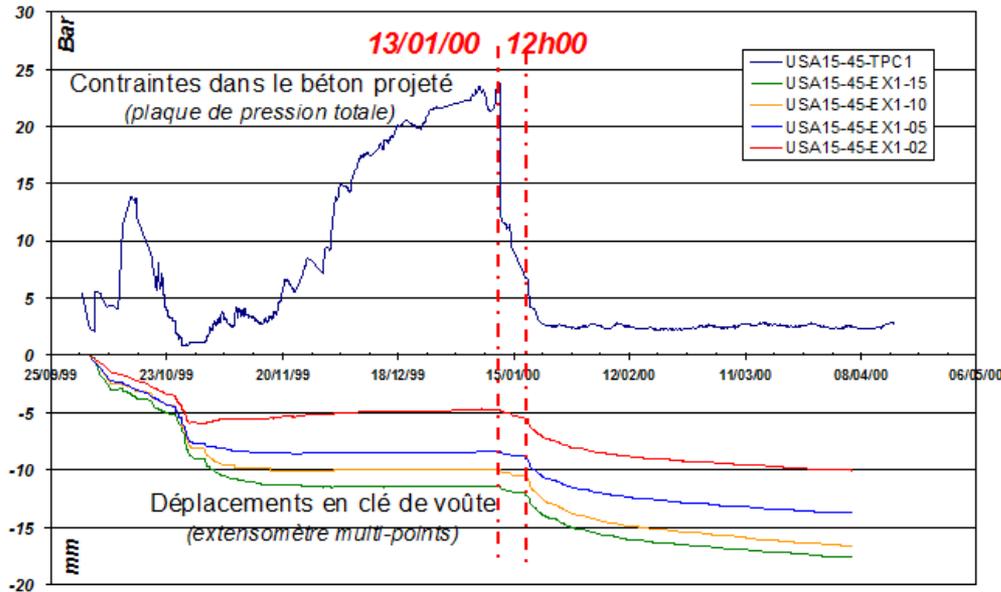
M. BONNAIRE	M. CUEILHES	M. HUG	M. RESSE
M. CELSA	M. DUFFAUT	M. LACHAUD	M. SAILLET
M. COLLA	M. ERAUD	M. LETHUAIRE	M. VINCENT
M. COLOMBET	M. FINDELING	M. PIRAUD	
M. COMBE	M. GAUTRAIS	M. RAFFOUX	

#### Groupe 7

M. DESSENNE
M. GESTA
M. GODARD
M. MALCOR
M. LEGRAND

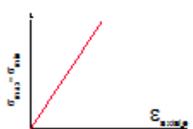
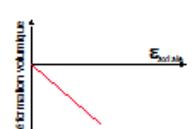
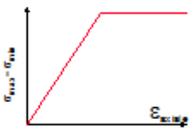
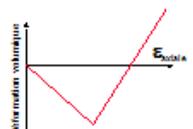
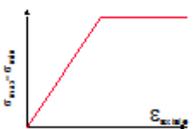
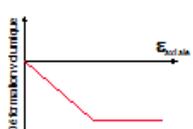
**Préciser les conditions d'emploi et le  
choix du type de boulonnage**

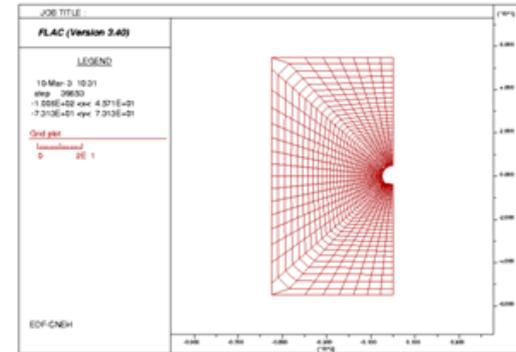
# CONSTITUTION ET HISTORIQUE DU GT 30



# CONSTITUTION ET HISTORIQUE DU GT 30

Journée AFTES/CFMR de 2005

Modèle	Paramètres	$(\sigma, \epsilon_{axiale})$	$(\epsilon_{volumique}, \epsilon_{axiale})$	Dmax	Dmax
1	Elastique E=2200 MPa ν=0.20			≈ 3.06 cm	≈ 3.04 cm
2	Elastique-plastique E=2200 MPa ν=0.20 C=1.5 MPa Critère de Mohr-Coulomb φ=33° ψ=33°			≈ 3.31 cm	≈ 3.27 cm
3	Elastique-plastique E=2200 MPa ν=0.20 C=1.5 MPa Critère de Mohr-Coulomb φ=33° ψ=0°			≈ 3.17 cm	≈ 3.14 cm
4	Elastique-plastique radoucissant E=2200 MPa ν=0.20 C <sub>pc</sub> =1.5 MPa φ <sub>pc</sub> =φ <sub>res</sub> =33° Critère de Mohr-Coulomb C <sub>res</sub> =0.75 MPa ψ <sub>pc</sub> =33° ψ <sub>res</sub> =0°			≈ 4.81 cm	≈ 4.73 cm



N=4.8 Diamètre: 10 m

Sans soutènement

Avec soutènement

Longueur : 4 m

Maille : 1m x 1m

Diamètre des barres : 20 mm

# CONSTITUTION ET HISTORIQUE DU GT 30

## Besoin et intérêt de la constitution d'un GT → GT30

2002 → 2005 (*Animateur: A Saïtta*)

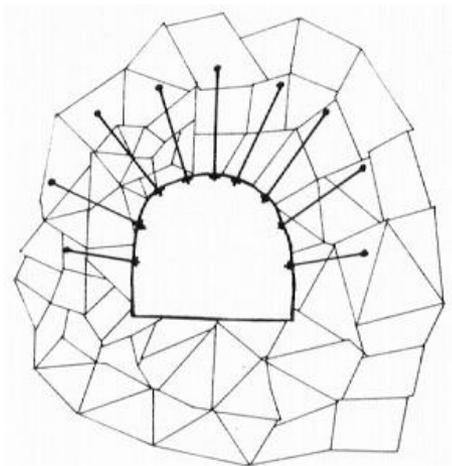
2009 → 2011 (*Animateur: F. Laigle*)

Justifier le choix d'un soutènement par boulonnage

Démontrer sa pertinence

Justifier le choix du type de boulon sur des critères de conception et de comportement général de la structure

Recommander des démarches d'analyse et de calcul pour dimensionner ou justifier le soutènement



## Constitution du Groupe

### Université / Ecoles / Organismes de recherche

Ecole des Mines de Paris

### Bureaux d'Etudes

Tractebel Ing.

Terrasol

Geos

Itasca

Egis

BG

### Entreprises

Vinci.

Razel

Bouygue

### Maitres d'Ouvrages

EDF

SNCF

ANDRA

CETU

# Démarche et attendus

Un sujet controversé sujet à de nombreux débats !

## En GC, peu de travaux et réflexions partagés sur la **justification, la conception et le dimensionnement**

- *Peu d'attente des Maitres d'Ouvrages en GC*
- *Méthodes et règles de l'art..;*
- *Peu d'intérêt de la part des organismes de recherche*

## Bien comprendre et partager **mécanismes**

- *Objectifs du soutènement par boulons*
- *Mécanismes de déformation et de rupture des ouvrages*
- *Modes de fonctionnement*
- *Quantification des apports*
- *Critères de conception*

## Proposer un document:

- *Pédagogique et accessible*
- *S'appuyant sur les récentes évolutions dans le domaine de la conception et analyse des travaux souterrains*
- *Fournissant des outils simples d'aide au concepteur*
- *Transmettre quelques idées simples mais fondamentales*



# Les limites des recommandations

Complexité et multi-dimensionnalité du problème

- ✚ **Multitude d'expériences et divergence sur la compréhension des mécanismes**
- ✚ **Couplage fort entre le comportement du soutènement et le contexte géologique/ géotechnique**
  - ✚ *Sollicitations – Contraintes initiales*
  - ✚ *Conditions hydrologiques*
  - ✚ *Anisotropie & hétérogénéités*
  - ✚ *Nature physico-chimique des roches*
- ✚ **Géométrie et dimensions des excavations**
- ✚ **De multiples critères de dimensionnement:**
  - ✚ *Sécurité*
  - ✚ *Convergences*
  - ✚ *Stabilité d'ensemble ou local*
  - ✚ *Cadences et méthodes*
  - ✚ *Durabilité*
  - ✚ *Flexibilité et adaptabilité...*



**L'objectif de la recommandation n'est donc pas de se substituer  
à l'Expérience et au Jugement de l'ingénieur**

Mais seulement de fournir

- **une démarche partagée d'analyse et de réflexions**
- **une compréhension des mécanismes**
- **des recommandations sur les méthodes de calcul**

# Rôle et fonctionnement du boulonnage radial

## ✚ Garantir une stabilité locale de l'excavation

- ✚ Rôle d'accrochage et de supportage

## ✚ Assurer une stabilité générale de l'excavation

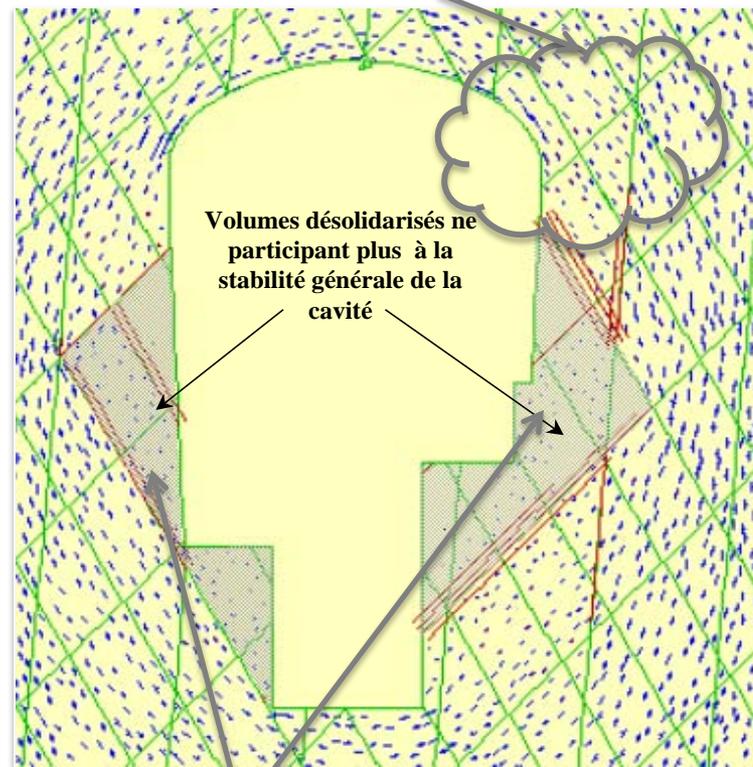
Garantir une résistance suffisante en cisaillement pour permettre le transfert de sollicitations

## ✚ Contrôler et limiter les déformations du massif

Limiter les dégradations locales de la roche → Assurer la stabilité générale

Limitation des déplacements sur les structures avoisinantes → En association à un autre soutènement

Transfert des contraintes autour de la cavité



Volumes désolidarisés ne participant plus à la stabilité générale de la cavité

Stabilité assurée par un boulonnage porteur  
Volumes ne participant plus à la stabilité générale de l'excavation

*Outre les aspects sécurité non traités dans cette recommandation*

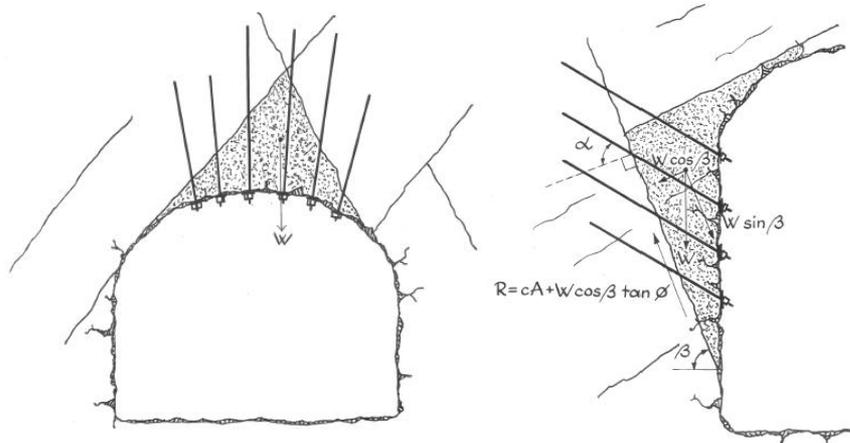
# Rôle et fonctionnement du boulonnage radial

## ✚ Garantir une stabilité locale de l'excavation

### Vérification à l'équilibre limite

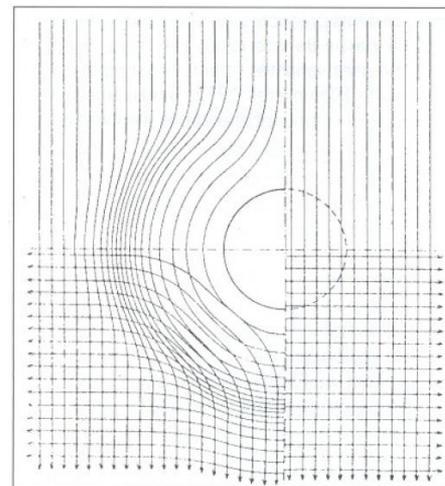
Proposition de coefficients de sécurités en fonction de cas de charge:

- Permanent
- Rare
- Extrême



## ✚ Assurer une stabilité générale de l'excavation

Garantir une résistance suffisante en cisaillement de la masse rocheuse pour permettre le transfert de sollicitations autour du tunnel



Weismann 1912

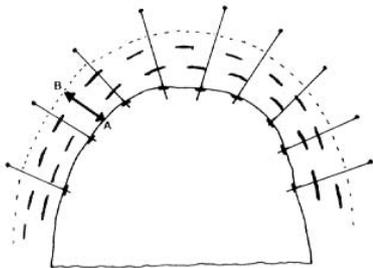
# Rôle et fonctionnement du boulonnage radial

➤ Maintenir ou accroître la résistance en cisaillement

$$\tau = \sigma_n \tan(\phi + \psi) + C$$

Amélioration de la résistance par confinement

en parement ou au droit des discontinuités induites ou existantes



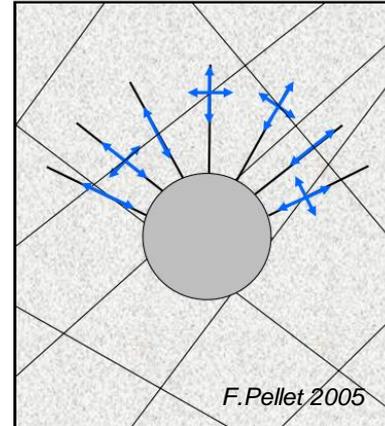
AB = ÉPAISSEUR DE LA COURONNE ROMPUE ET CONFINÉE PAR LES BOULONS

Rôle confinant (Mines et Carr. 1992)

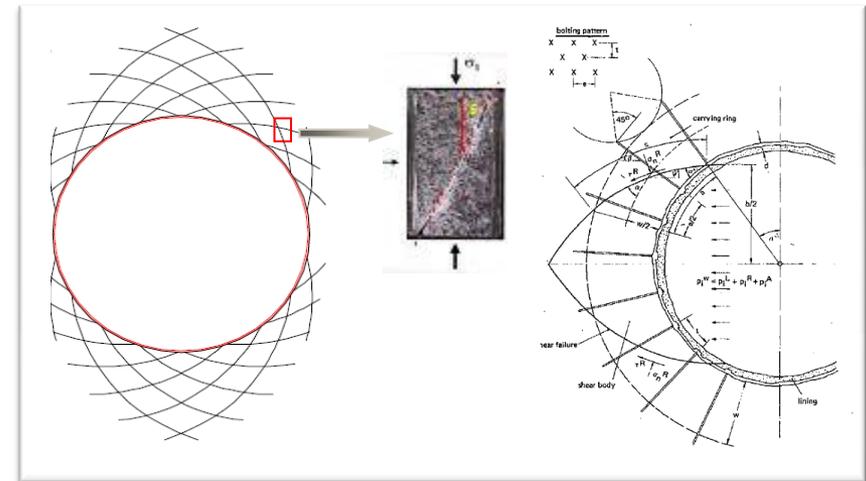
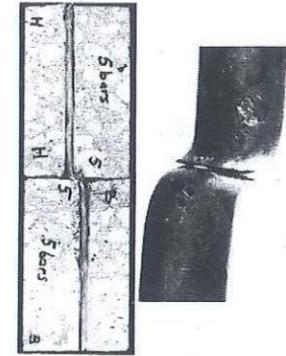
Amélioration des propriétés par renforcement

Assimilable à une notion de « roche armée » (Londe et al 1974)

Renforcement au droit de discontinuités existantes ou induites



F. Pellet 2005



Londe & Bonazzi 1974 « La roche armée »

3<sup>ème</sup> congrès International de Mécanique des Roches. Denver. Vol II. pp1208-1211.

Maury 1987 « Observations, recherches et résultats récents sur les mécanismes de ruptures autour de galeries isolées »

6<sup>ème</sup> congrès International de Mécanique des Roches. Montréal. pp1119-1128. Balkema.

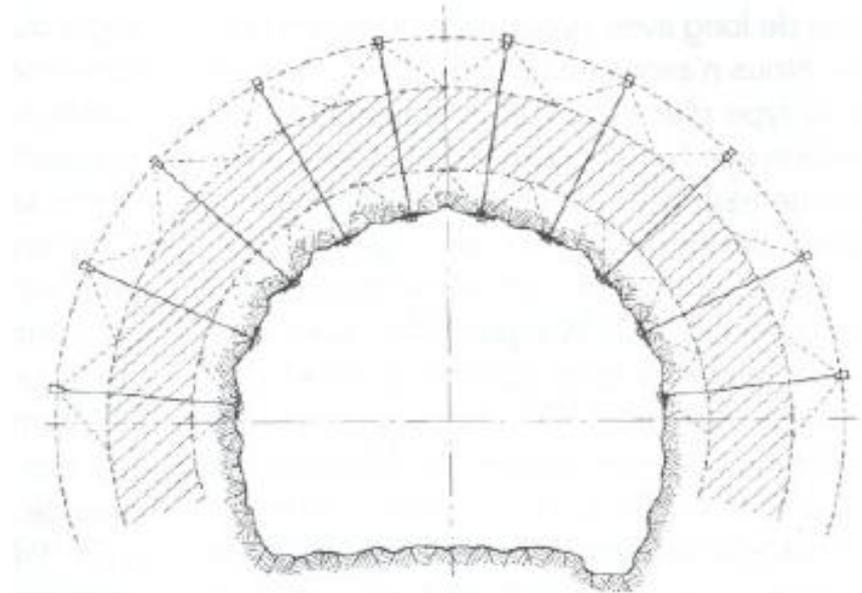
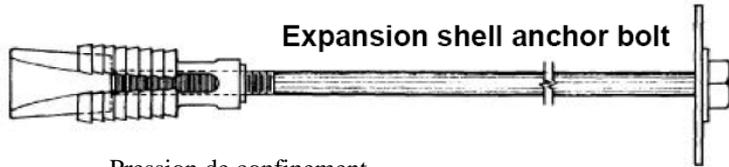
# Rôle et fonctionnement du boulonnage radial

## + Boulonnage à ancrage ponctuel

$$\tau = \sigma_n \tan(\phi + \psi) + C$$



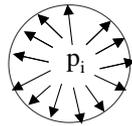
Amélioration de la résistance par confinement en parement



J. Talobre

Pression de confinement

Courbe de convergence du terrain



Application d'un confinement Pi en paroi

Point d'équilibre

Pi

Convergence

Nature de la barre et nuance	Diamètre extérieur	Limite d'élasticité	Charge limite	Charge admissible	Maille de boulonnage	Pression de confinement
<i>Barres Hautes Adhérence HA</i>						
HA Fe E 500	20 mm	500 MPa	157 kN	117 kN	2,00 x 2,00	29 kPa
	25 mm		245 kN	183 kN		45 kPa
	32 mm		402 kN	301 kN		75 kPa
HA Fe E 500	20 mm	500 MPa	157 kN	117 kN	1,00 x 1,00	117 kPa
	25 mm		245 kN	183 kN		183 kPa
	32 mm		402 kN	301 kN		301 kPa

# Rôle et fonctionnement du boulonnage radial

## +Boulonnage à ancrage réparti

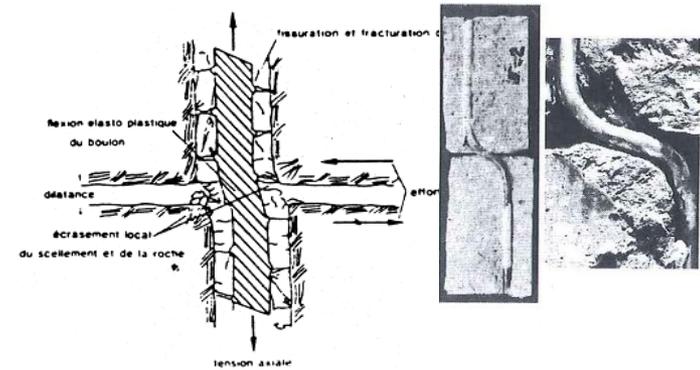
$$\tau = \sigma_n \tan(\phi + \psi) + C$$



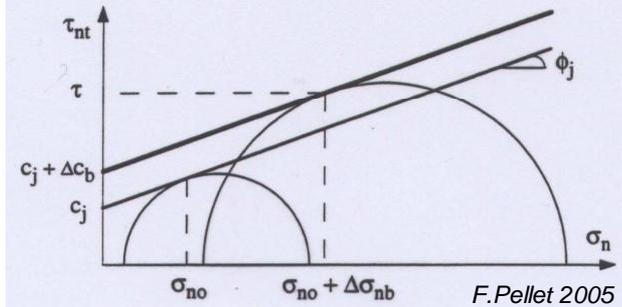
Amélioration de la résistance par confinement au droit des discontinuités induites ou existantes



Amélioration des propriétés par renforcement au droit de discontinuités existantes ou induites

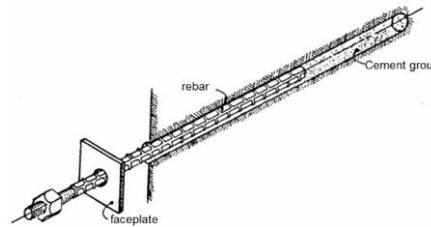
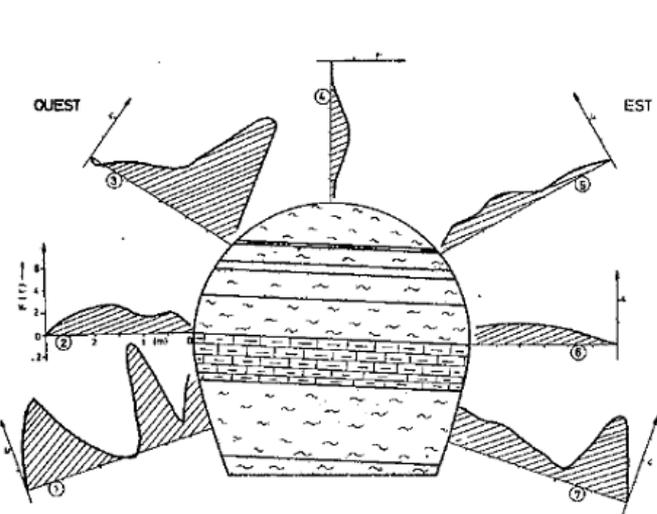


$$\tau = (c_j + \Delta c_b) + (\sigma_{no} + \Delta \sigma_{nb}) \tan \phi_j$$



F. Pellet 2005

Pellet, Grasseli, Spang, Egger, Jalifar...



## Homogénéisation des milieux périodiques...

$$C_{\text{boulons}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{T_b}{e_L \cdot e_T} \cdot \frac{R}{\rho}$$

$$E_\rho = E \left( 1 + \frac{\pi \cdot \Phi_b^2}{4} \cdot \frac{E_b}{e_L \cdot e_T} \cdot \frac{1}{E} \cdot \frac{R}{\rho} \right)$$

De Buhan, Greuel, Gharbi, Wong, Subrin...

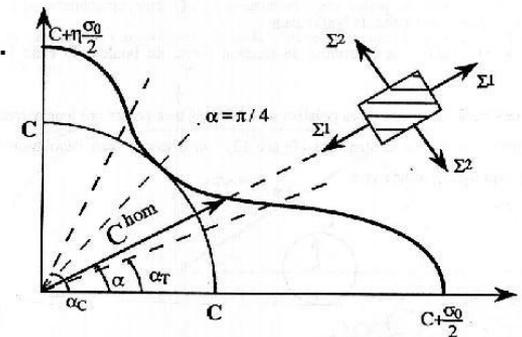


Fig. 6 Métro de Marseille - Efforts le long des boulons

# Rôle et fonctionnement du boulonnage radial

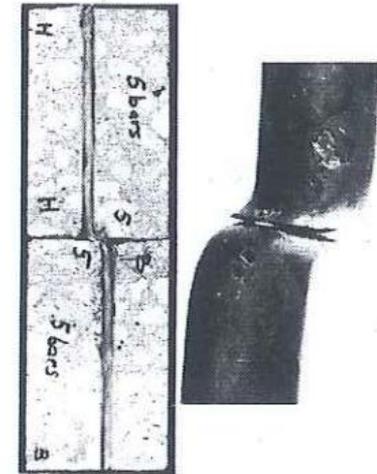
## + Boulonnage à ancrage réparti

Caractéristiques du boulonnage	Confinement supplémentaire	Cohésion supplémentaire
<b>Sollicitation de la barre dans le domaine élastique</b>		
Diamètre : 20 mm Maille : 1m x 1m	1.3 kPa	43 kPa
Diamètre : 20 mm Maille : 2m x 2m	0.3 kPa	11 kPa
Diamètre : 25 mm Maille : 1m x 1m	2.1 kPa	67 kPa
<b>Sollicitation de la barre dans le domaine plastique jusqu'à 5% de déformation</b>		
Diamètre : 20 mm Maille : 1m x 1m	126 kPa	87 kPa
Diamètre : 20 mm Maille : 2m x 2m	31 kPa	22 kPa
Diamètre : 25 mm Maille : 1m x 1m	196 kPa	136 kPa

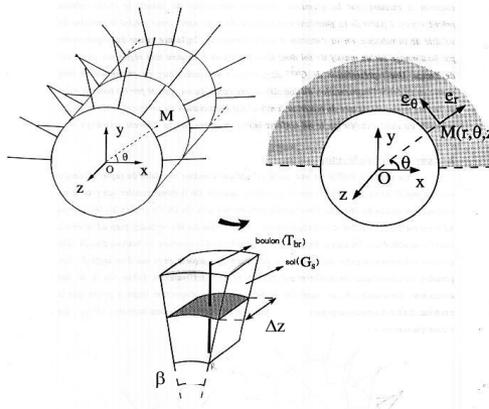
Glissement du joint

→ 0.6 mm

→ 13 mm



Ordre de grandeur de la cohésion et d'un confinement additionnel générés par un boulonnage à ancrage réparti. Boulons HA scellés, de limite d'élasticité 540 MPa. Résistance de la matrice rocheuse de 100 MPa.



$$C_{\text{boulons}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{T_b}{e_L \cdot e_T} \cdot \frac{R}{\rho}$$

*Exemple de*  
**cohésion supplémentaire maximale en paroi**  
*d'un tunnel de 10 m de diamètre*

Caractéristiques du boulonnage	Boulons acier HA scellés. Limite d'élasticité 540 MPa
Diamètre : 20 mm Maille : 1m x 1m	84 kPa
Diamètre : 20 mm Maille : 2m x 2m	21 kPa
Diamètre : 25 mm Maille : 1m x 1m	132 kPa

# Rôle et fonctionnement du boulonnage radial

Exemple d'un tunnel de 10 m

## Caractéristiques de la masse rocheuse

$R_c=20 \text{ MPa} \rightarrow \text{cohésion}=4.6 \text{ MPa}$

angle de frottement= $40^\circ$

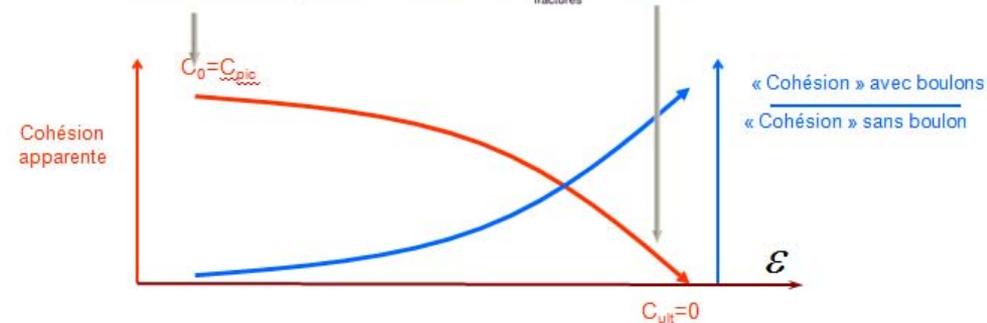
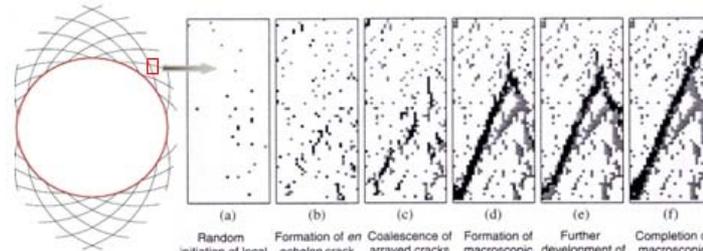
Module d'élasticité= $4 \text{ Gpa}$

## Caractéristiques du boulonnage

$\rightarrow$  Boulonnage à scellement réparti

HA 20 mm

1 barre/m<sup>2</sup>



$$\tau = \sigma_n \tan(\phi + \psi(\epsilon)) + C(\epsilon)$$

### Modélisation selon une loi rhéologique élastique purement linéaire :

Module du terrain non boulonné :	4 000 MPa
Module du terrain boulonné :	4 066 MPa

### Modélisation selon une loi rhéologique élastoplastique sans écrouissage :

Cohésion du terrain non boulonné :	4 600 kPa	
Cohésion supplémentaire apparente induite par le boulonnage :	78 kPa	
Cohésion du terrain boulonné :	4 678 kPa	
Taux d'accroissement relatif de la cohésion :		+1.7 %

### Modélisation selon une loi rhéologique élastoplastique avec radoucissement :

Cohésion résiduelle du terrain non boulonné :	1 000 kPa	
Cohésion supplémentaire apparente induite par le boulonnage :	78 kPa	
Cohésion du terrain boulonné :	1 078 kPa	
Taux d'accroissement relatif de la cohésion :		+7.8 %

# Rôle et fonctionnement du boulonnage radial

Un système de boulonnage passif:

✚ **ne peut empêcher le développement d'une fissuration du massif.** Il limitera cette dégradation de la roche, mais uniquement à partir du moment où les contraintes mises en jeu par ce soutènement deviennent significatives face aux contraintes en place ou face à la résistance de la roche fissurée.

✚ **ne peut pas empêcher la déformation du massif,** et donc l'apparition de convergences, sauf sous de faibles couvertures de terrains mobilisant des contraintes relativement faibles.

✚ **peut stabiliser des volumes instables, en particulier des plaques ou écailles apparues en parements de tunnels profonds.** Un faible confinement en paroi est généralement apte à maintenir en place ces plaques, mais insuffisant pour empêcher la propagation de la fissuration d'extension dans le massif.

✚ **peut créer le monolithisme d'une zone de terrain** et empêcher une déstructuration complète du massif au voisinage de l'excavation.

✚ **ne peut limiter les mouvements de terrain dans le cas de roches poussantes,** même si le **boulonnage permet de rendre monolithique l'anneau** qui se déforme et accompagne alors les convergences.

✚ **ne présentera un effet significatif que dans le cas de matériaux faiblement cohérents, soit initialement soit après une dégradation généralisée ou localisée** des caractéristiques mécaniques apparentes associée au développement de déformations et de convergences.

# Critères de conception

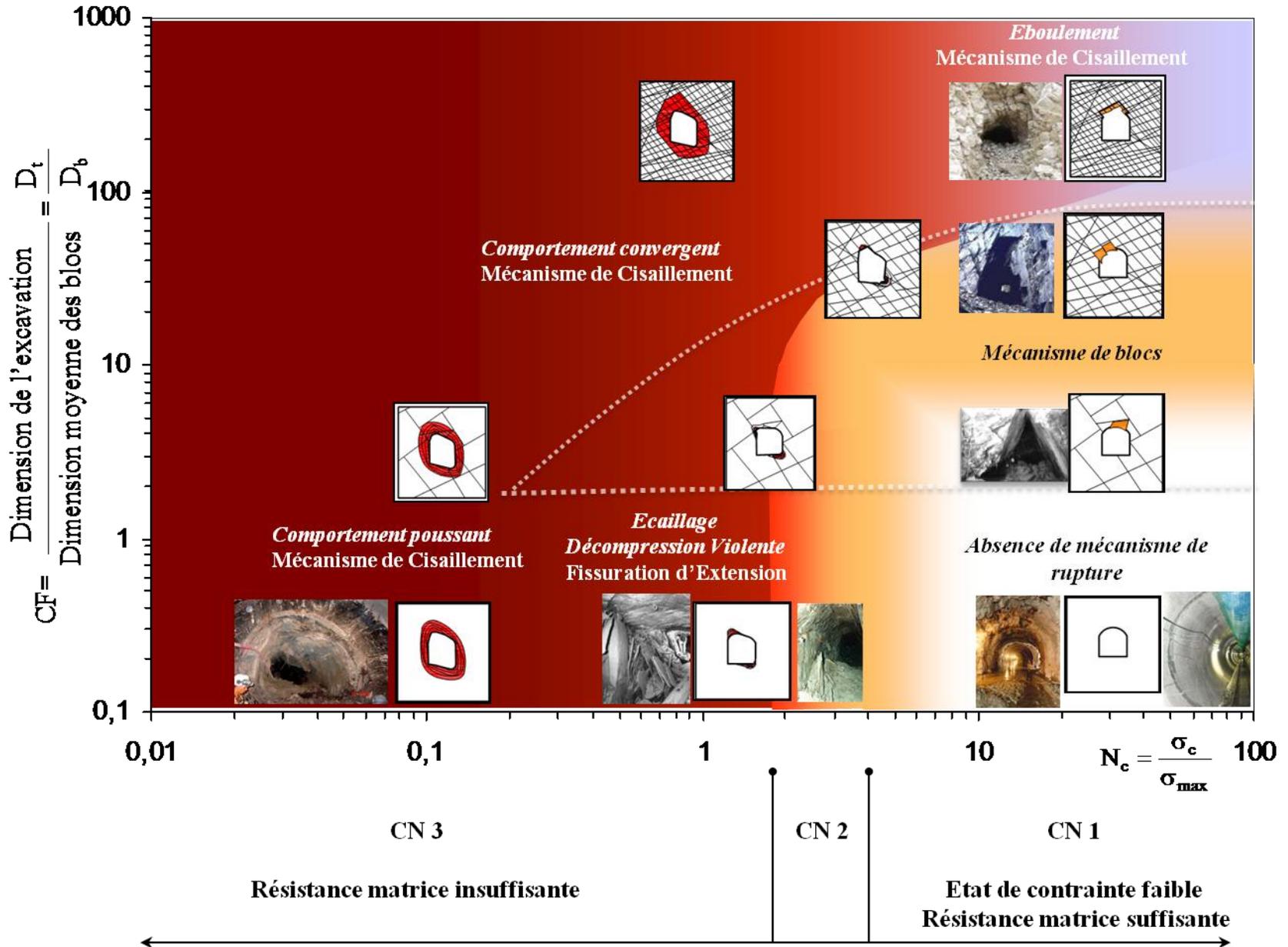
## Formalisation des réflexions au travers de graphes synthétiques

- Caractéristiques géométriques →  $Db/D$  **Facteur de continuité**  
Db: Dimension moyenne des blocs  
D: Dimension principale de l'excavation
- Niveau de sollicitation →  $CN = \sigma_{ci} / \sigma_{max}$  **Facteur de compétences**

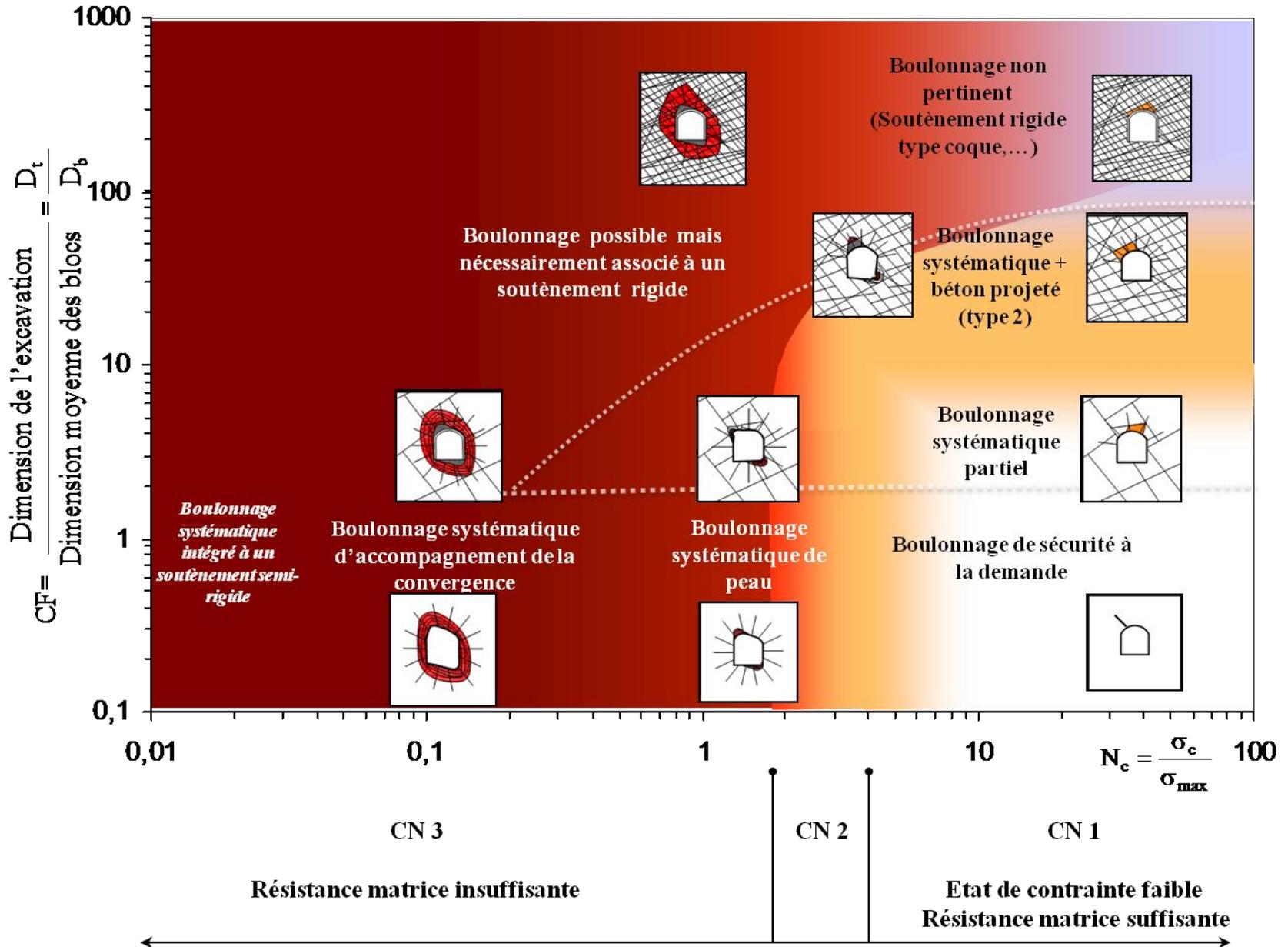
## Aide à la conception:

- Identification de la structuration du massif → Milieu continu ou discontinu
- Identification des mécanismes de dégradation et de ruine
- Identification des domaines de pertinence du soutènement par boulons
- Identification des méthodes de calcul les mieux adaptées

# Critères de conception



# Critères de conception





# Conclusions

AFTES - Groupe de Travail 30

## Recommandations relatives à la conception et au dimensionnement du boulonnage radial

### Sommaire de la recommandation

PREAMBULE.....	3
OBJET DES RECOMMANDATIONS.....	3
TERMINOLOGIE ET TYPES DE BOULONS.....	5
ROLES ET FONCTIONNEMENT DU BOULONNAGE RADIAL.....	7
FONCTION ATTENDUE.....	7
ROLE PORTEUR.....	8
ROLE DE CONFINEMENT ET DE RENFORCEMENT DU MASSIF.....	9
<i>Rôle de confinement</i> .....	10
<i>Rôle de renforcement</i> .....	11
SIMULTANÉITÉ DES MODES.....	12
ROLE DE LA PLAQUE DE TÊTE ET DE L'ASSOCIATION AVEC LE BÉTON PROJETÉ.....	14
CRITÈRES POUR LA CONCEPTION DU BOULONNAGE RADIAL.....	15
CARACTÉRISTIQUES DU MASSIF ENCAISSANT.....	16
<i>Milieu continu / Milieu discontinu</i> .....	16
Le milieu continu.....	16
Le milieu discontinu.....	16
Les Limites d'application.....	17
La dimension du bloc « moyen ».....	18



ASSOCIATION FRANÇAISE DES TUNNELS ET  
DE L'ESPACE SOUTERRAIN

CONGRES LYON 2011

ESPACES SOUTERRAINS de demain

Conception et justification du boulonnage – *Reflexions* et avancées du Groupe de Travail n°30 de l'AFTES

Article proposé en co-rédaction par les membres du groupe de travail 30 de l'AFTES

**Boulons expansifs**

**Caractéristiques mécaniques (qs...)**

**Pérennité et vieillissement**

**Coefficients de sécurité**

**Critères de dimensionnement (*Contrainte/ déformation*)**

**Béton projeté/Boulons**

...