

LES RECOMMANDATIONS DE L'AFTES

WEBINAIRE
22-23 septembre 2020

Recommandations établies par le GT30

Conception et Guide de
Dimensionnement du Boulonnage
Radial en Tunnel
GT30R1F1

Recommandations relatives à la
Conception et Justification du Pré-
Soutènement des Ouvrages
Souterrains

François LAIGLE





- **Conception et Guide de Dimensionnement du Boulonnage Radial en Tunnel**

GT30R1F1

Finalisé, approuvé par le CT AFTES et en cours de publication à l'automne 2020

- **Recommandations relatives à la Conception et Justification du Pré-Soutènement des Ouvrages Souterrains**

Démarré en septembre 2019

LES RECOMMANDATIONS DE L'AFTES

Conception et guide de dimensionnement du boulonnage radial en tunnel

GT30R1F1

Association Française des Tunnels
et de l'Espace Souterrain



ISBN 978-2-901148-10-4 - ISSN 2609-8822 - juillet 2020



Recommandation de l'AFTES N° GT30R1F1

CONCEPTION ET GUIDE DE DIMENSIONNEMENT DU BOULONNAGE RADIAL EN TUNNEL

Texte présenté par **François LAIGLE** (EDF-CIH)

Co-animateur : **Jean LAUNAY**

Ce document a été rédigé en active collaboration avec :

Hervé LE BISSONNAIS (TERRASOL), **François MARTIN** (BG), **Daniel BILLAUX** (ITASCA),
Christophe JASSIONESSE (GEOS), **Jean-Sébastien VILLEGAS** (VINCI CONSTRUCTION),
Eric MATHIEU (EIFFAGE), **Faouzi HADJ-HASSEN** (MINES ParisTech), **Didier SUBRIN** (CETU),
Olivier GASTEBLED (TRACTEBEL), **Adrien SAITTA** (EGIS TUNNELS).

Ont participé au groupe de travail :

Frédéric BULTEL (EGIS TUNNEL), **Philippe AUTUORI** (ARCADIS), **Anne BOUVARD** (TRACTEBEL),
Anne-Julie SCHELKER (BOUYGUES), **Laura BLANCO-MARTIN** (MINES ParisTech),
Bruno DARDART (SNCF), **Jean-Pierre RAJOT** (IFSTTAR), **Bruno HAMELIN**

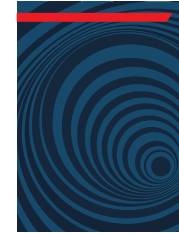
Ce manuscrit a été révisé et corrigé par :

Pascal GUEDON (Arcadis), **François RENAULT** (VINCI), **Réza TAHERZADEH** (Tractebel)

Ce texte a été validé par le Comité Technique de l'AFTES le 18 mai 2017.

L'AFTES accueillera avec intérêt toute suggestion relative à ce texte.

GT 30

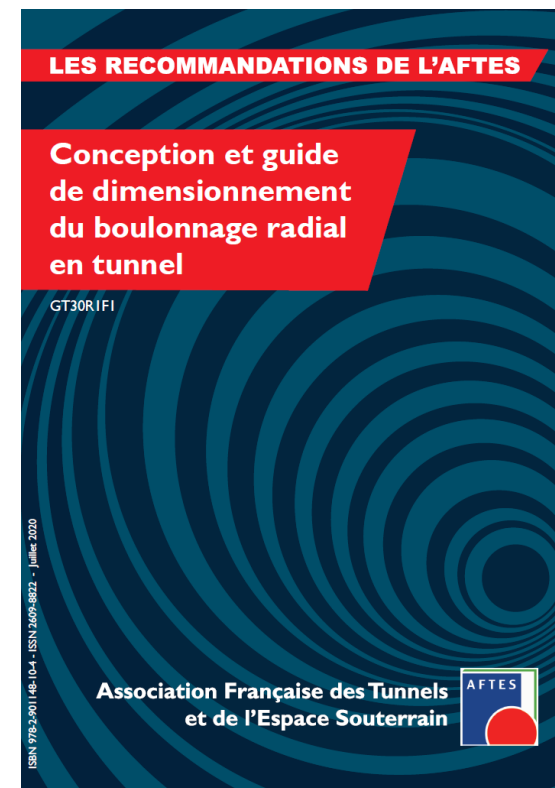


Approches de **Conception**, de **Justification** et de **Dimensionnement**

Les aspects technologiques sont abordés dans leurs grands principes dès lors qu'ils influent sur la Conception, la Justification, le Dimensionnement



GT 6



GT 30

GT 30 "Conception et guide de dimensionnement du boulonnage radial en tunnel"



1. Préambule
2. Objectifs de cette recommandation
3. Terminologie et types de boulons
4. Critères de conception du soutènement par boulonnage
 - 4.1. Règles pratiques pour la conception du boulonnage
 - 4.2. Caractérisation du massif encaissant
 - 4.3. Caractéristiques techniques et mécaniques du boulonnage
 - 4.4. Durabilité du système de boulonnage
5. Fonctionnement et apport du soutènement par boulonnage
 - 5.1. Rôles et fonctionnement du boulonnage radiale
 - 5.2. Quantification de l'apport mécanique du boulonnage
 - 5.3. Ordres de grandeurs de l'apport mécanique du boulonnage
6. Conception générale du soutènement par boulons
 - 6.1. Retour d'expérience et recommandations générales
 - 6.2. Méthodes fondées sur les classifications et règles empiriques
7. Calcul et dimensionnement du boulonnage
 - 7.1. Approche de dimensionnement
 - 7.2. Actions et conditions de chargement
 - 7.3. Critères de dimensionnement
 - 7.4. Calcul du boulonnage porteur selon l'approche aux équilibres limites
 - 7.5. Méthodes de calcul sur la base d'une hypothèse de milieu continu
 - 7.6. Méthodes numériques de calcul du boulonnage pour un massif discontinu
8. Références
9. ANNEXE 1 – Analyse et illustration du chargement d'un boulon sous sollicitation axiale

Principes et règles de conception

Données d'entrée pour la conception et le "calcul"

Comprendre le fonctionnement et quantifier l'apport du boulonnage

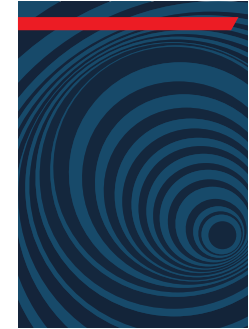
Domaine d'application de ce type de soutènement

Règles et méthodes de prédimensionnement

Critères de dimensionnement

Recommandations pour les calculs et modélisations

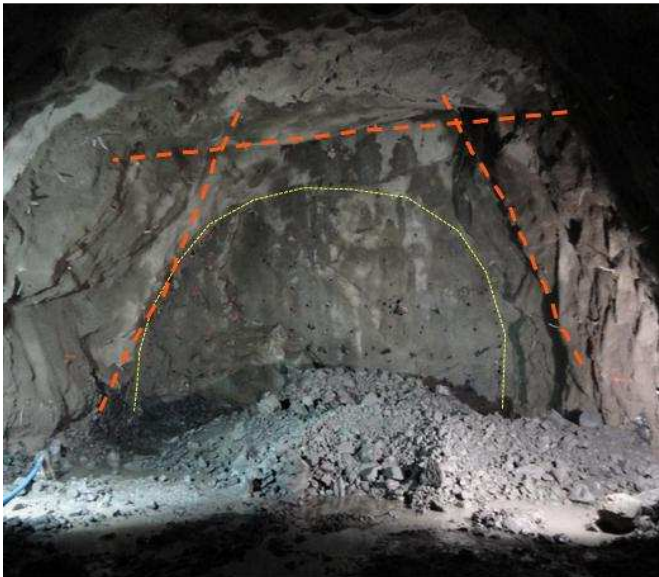
- 4. Critères de conception du soutènement par boulonnage**
- 4.1. Règles pratiques pour la conception du boulonnage
- 4.2. Caractérisation du massif encaissant
- 4.3. Caractéristiques techniques et mécaniques du boulonnage
- 4.4. Durabilité du système de boulonnage



Rappel de Règles "de bon sens" pour la conception du boulonnage

- Avoir une bonne connaissance et compréhension du contexte géologique et géotechnique
 - Se référer à des ouvrages antérieurs et similaires
 - Identifier suffisamment tôt les modes probables de ruine
 - Prévoir une auscultation associée à des critères pertinents
-
- Concevoir le soutènement en intégrant la possibilité d'adaptation sur site
 - Rappeler l'importance d'une mise en œuvre rapide du boulonnage
 - Association du boulonnage et le béton projeté ou autre mode de soutènement
 - Durabilité et protection contre la corrosion: Soutènement définitif ou permanent?
 - Vérifier la compatibilité de la conception proposée avec le contexte du chantier et les conditions de réalisation

Caractérisation du Massif Encaissant



Comportement piloté par
la structure du massif



Comportement fragile
associé à de la fissuration
d'extension



Comportement ductile
associé à de la plasticité
en cisaillement

Comportement piloté par la rhéologie du massif

Facteur de Compétence

Résistance en compression simple Etat des contraintes

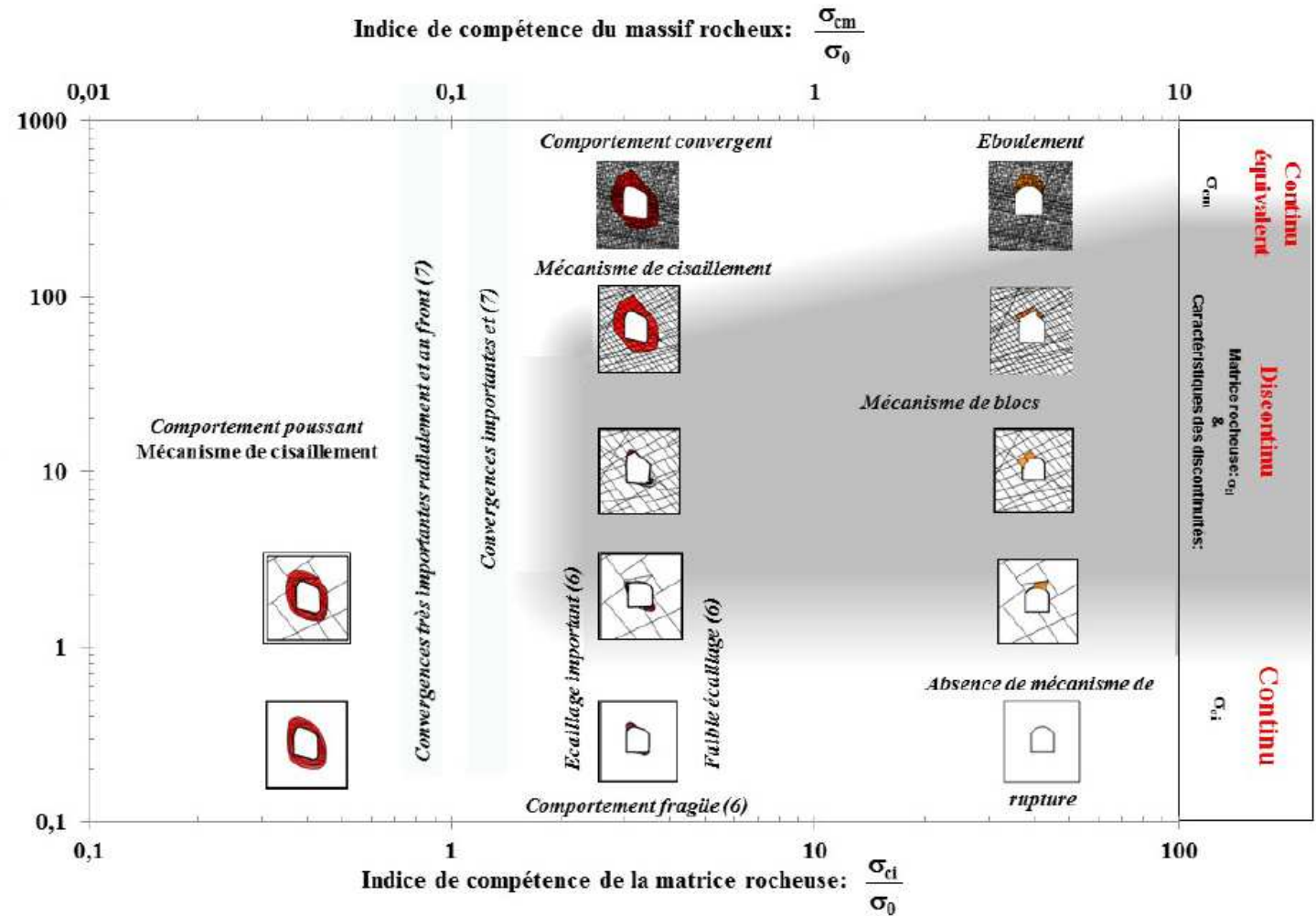
D_b : Dimension moyenne des blocs

D_b fonction de D_b ou de RQD

Facteur de Continuité

Dimension du tunnel
 D_b Dimension moyenne des blocs

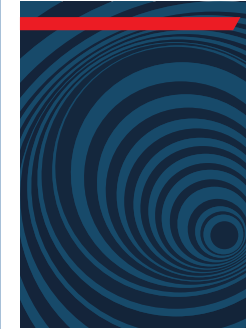
$$CF = \frac{\text{Dimension de l'excavation } D_t}{\text{Dimension moyenne des blocs } D_b}$$



Caractéristiques techniques

Types de boulons les plus couramment utilisés		Nuance d'acier	Module d'élasticité E	Limite élastique σ_e	Charge limite élastique T_e	Charge à la rupture T_r	Allongement à la rupture	Résistance en cisaillement
Boulons à friction	Ancrage par gonflement du tube	S275JR/S355MC	210 GPa	275 MPa à 355 MPa	90 kN à 190 kN	110 kN à 240 kN	10 à 20 %	400 MPa
	Boulons à tube fendu		210 GPa	500 MPa	30 kN à 90 kN	105 kN à 150 kN	15 %	350 MPa
Boulons à ancrage réparti scellé ou boulons à ancrage ponctuel	Barres HA 25	Fe E500	210 GPa	500 MPa	210 kN (filetage) à 246 kN	230 kN (filetage) à 270 kN	12 %	180 kN
	Barres HA 32	Fe E500	210 GPa	500 MPa	347 kN (filetage) à 402 kN	382 kN (filetage) à 442 kN	12 %	293 kN
	Barres pour boulons autoforeurs (ϕ_{ext} : 27 à 100 mm) (ϕ_{int} : 16 à 78 mm)	E355 à E460	210 GPa	470 MPa à 590 MPa	180 kN à 2700 kN	220 kN à 3460 kN		58 kN à 88 kN
Boulons en fibre de verre	Barres rondes pleines, rondes creuses, à section en Y, barres plates	-	40 GPa	750 à 1000 MPa	-	-	3 à 4 %	100 à 200 MPa
Boulons en fibre de carbone	Barres rondes pleines ou plates Sections de 44 mm ² à 200 mm ²	-	130 GPa	2300 MPa	100 kN à 450 kN	100 kN à 450 kN	1,8 %	-
Boulon à ancrage ponctuel injectable sur toute sa longueur	Barres $\phi 20$ à 22 mm	Fe E500	210 GPa	500 MPa	157 kN à 190 kN	173 kN à 266 kN		

Référence	Valeur de q_s		
Boulons Swellex - Li [1999]	Roche tendre $E < 5$ GPa $\lambda = 0,36$ $q_s = 1$ à 3 MPa	Roche dure $E > 10$ GPa $\lambda = 1$ $q_s = 1$ à 3 MPa	
Boulons Swellex Atlas Copco	Roche tendre Mn12/Pm12 $\rightarrow q_s = 1.4$ MPa Mn24/Pm24 $\rightarrow q_s = 1.8$ MPa	Roche dure Mn12/Pm12 $\rightarrow q_s = 1.9$ MPa Mn24/Pm24 $\rightarrow q_s = 2.6$ MPa	
Le soutènement des galeries minières (Fine [1998])	Granite altéré $q_s = 0,08$ à 0,2 MPa	Roche calcaire $q_s = 0,5$ à 1,25 MPa	Granite sain $q_s = 1,9$ à 2,3 MPa
tunnel de Croix-Rousse	Molasses sableuses $\rightarrow q_s = 0.16$ MPa		
CMHM de l'Andra	Argilite $\rightarrow q_s \approx 0.6$ MPa		
Boulons Split-Set (Larsson [1983])	$q_s = \lambda \cdot \sigma_n : \sigma_n$ contrainte normale à l'interface dépendant du type de boulon et du diamètre de foration. $\sigma_n = 0,3$ à 1,0 MPa.		



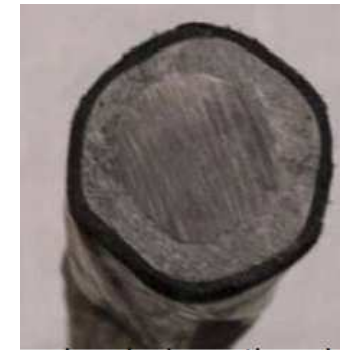
Durabilité - Soutènement permanent ou Provisoire ?

Principe général de la protection contre la corrosion: Double Barrière

- Scellement cimentaire continu + Protection de surface (*galvanisation, résine époxy...*);
- Scellement cimentaire continu + épaisseur sacrificielle;
- Scellement cimentaire continu + gaine polyéthylène



Force corrosive*	Epaisseur minimale sacrifiée à la corrosion (mm)				
	Durée de vie de l'ouvrage				
	2 ans	5 ans	30 ans	70 ans	100 ans
Faible		1.5 mm	2.5 mm	3.0 mm	3.5 mm
Moyenne		1.5 mm	3.0 mm	4.0 mm	5.0 mm
Forte	1.5 mm	1.6 mm	Protection complémentaire recommandée : <ul style="list-style-type: none">• Boulons avec gaine imperméable• Mise en place d'un revêtement pour assurer la stabilité mécanique à long terme		

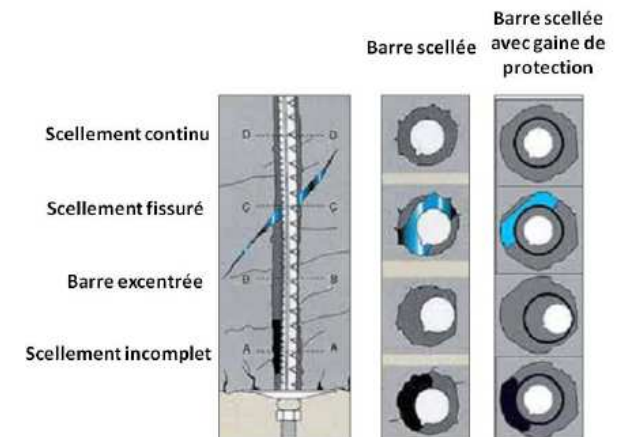


Ne sont pas considérés comme pérennes:

- Boulons à friction type "Swellex" ou similaires
- Les boulons scellés par des cartouches de résine

Attention à la protection des têtes de boulons

Si fort risque de corrosion en milieu agressif → Revêtement



- 5. **Fonctionnement et apport du soutènement par boulonnage**
- 5.1. Rôles et fonctionnement du boulonnage radiale
- 5.2. Quantification de l'apport mécanique du boulonnage
- 5.3. Ordres de grandeurs de l'apport mécanique du boulonnage



Rôle et fonctionnement du boulonnage radial

Identifier et comprendre le comportement d'un boulon et quantification de sa contribution mécanique



Deux objectifs principaux

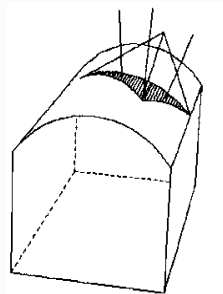


Assurer la stabilité locale et générale

Limiter les déformations du terrain

Deux modes de fonctionnement

Fonction "d'accrochage"
Rôle Porteur



Fonction "de Renforcement"
Rôle de confinement
Rôle de Renforcement

Rôle et fonctionnement du boulonnage radial

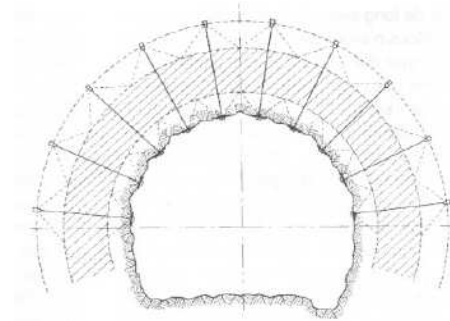
Rôle de renforcement

Objectif:

Assurer la stabilité générale en maintenant et permettant un "cheminement" des contraintes autour de la cavité



Maintenir une capacité de résistance en cisaillement



Résistance du terrain non boulonné

$$\tau_{\max} = \sigma_n \cdot \tan(\phi) + (C)$$

Et/ou

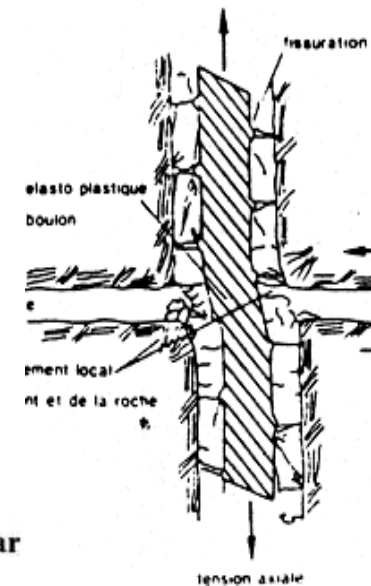
Accroissement de la résistance par confinement local

$$\tau_{\max} = (\sigma_n + \Delta\sigma_n) \cdot \tan(\phi) + C$$

Accroissement de la résistance par renforcement local

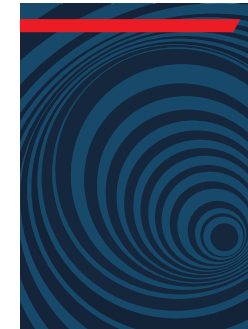
$$\tau_{\max} = \sigma_n \cdot \tan(\phi) + (C + \Delta C)$$

$$\tau = (c + \Delta c_b) + (\sigma_n + \Delta\sigma_b) \cdot \tan \phi_j$$



Quantification de l'apport mécanique du boulonnage radial

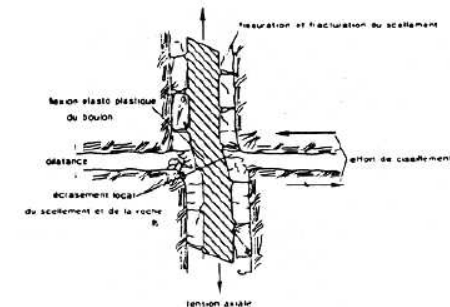
Nature de la barre et nuance	Diamètre extérieur	Limite d'élasticité	Charge admissible	Maille de boulonnage	Pression de confinement
Barres à Haute Adhérence HA					
HA Fe E 500	20 mm	500 MPa	157 kPa	2,00 x 2,00	39 kPa
	25 mm		245 kPa		61 kPa
	32 mm		402 kPa		100 kPa
HA Fe E 500	20 mm	500 MPa	157 kPa	1,00 x 1,00	157 kPa
	25 mm		245 kPa		245 kPa
	32 mm		402 kPa		402 kPa
Boulons autoforeurs					
MAI R25N	25 mm	500 MPa	150 kN	2,00 x 2,00	37 kPa
				1,00 x 1,00	150 kPa



$$P_{s-max} = \frac{T_b}{s_t \cdot s_l}$$

Estimation des pressions de confinement applicable en paroi du tunnel

Sollicitation de la barre dans le domaine plastique jusqu'à 5 % de déformation		
Caractéristiques du boulonnage	Confinement supplémentaire	Cohésion supplémentaire
Diamètre : 20 mm Maille : 1 m x 1m	126 kPa	87 kPa
Diamètre : 20 mm Maille : 1 m x 2m	63 kPa	43 kPa
Diamètre : 20 mm Maille : 2 m x 2m	31 kPa	22 kPa
Diamètre : 25 mm Maille : 1 m x 1m	196 kPa	136 kPa



Estimation de la pression de confinement et de la cohésion apparente au droit d'une discontinuité en cisaillement

Quantification de l'apport mécanique du boulonnage radial

- Pression de confinement pour un boulonnage à ancrage ponctuel

50 à 200 kPa

- Apport local d'un boulonnage à ancrage réparti:

50 à 150 kPa en cohésion équivalente
100 à 200 kPa en pression de confinement

Ces pressions sont "faibles" par rapport aux contraintes et résistances mises en jeu dans des milieux "cohérents", rocheux, et/ou plus ou moins profonds

- Un soutènement par boulon correspond à une pression de soutènement relativement faible: quelques dizaines à centaines de kPa
- Cette contribution est mobilisée après déplacements.
- La contribution du boulonnage n'est visible que si son apport mécanique est plus fort ou de l'ordre de grandeur des caractéristiques mécaniques du terrain (Module et/ou résistance)



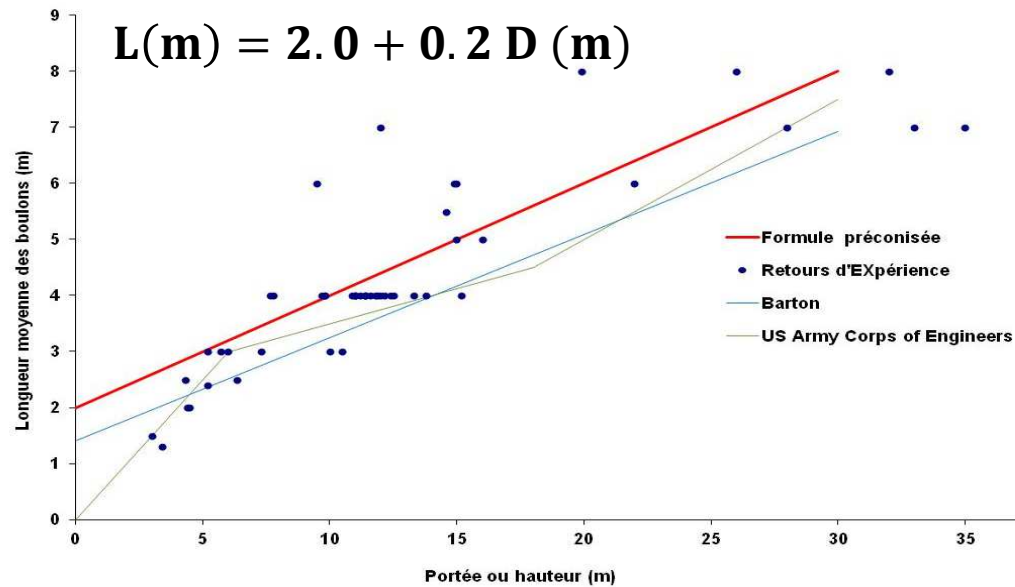
Roche tendre: $R_c = 5 \text{ MPa}$ - $\phi = 45^\circ \rightarrow C \cong 1\,000 \text{ kPa} \gg \cong 100 \text{ kPa}$

6. Conception générale du soutènement par boulons

6.1. Retour d'expérience et recommandations générales

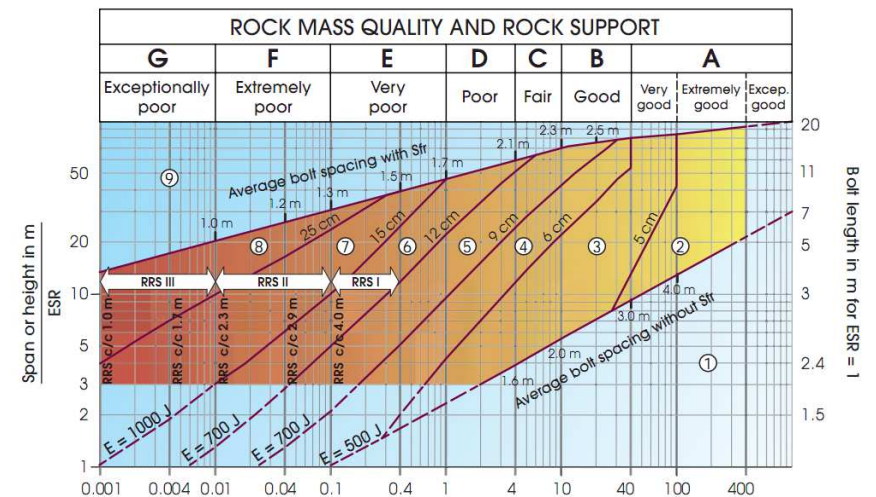
6.2. Méthodes fondées sur les classifications et règles empiriques

Conception générale du soutènement par boulons

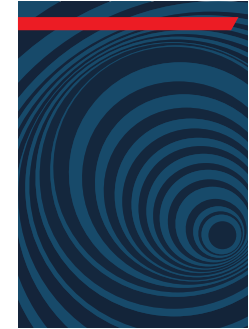


Domaine d'application du boulonnage comme
soutènement principal

Q	0.001	0.01	0.1	1	10	100	1000
P _{voûte}	1000 kPa	460 kPa	220 kPa	100 kPa	50 kPa	20 kPa	10 kPa



7.	Calcul et dimensionnement du boulonnage
7.1.	Approche de dimensionnement
7.2.	Actions et conditions de chargement
7.3.	Critères de dimensionnement
7.4.	Calcul du boulonnage porteur selon l'approche aux équilibres limites
7.5.	Méthodes de calcul sur la base d'une hypothèse de milieu continu
7.6.	Méthodes numériques de calcul du boulonnage pour un massif discontinu



Calcul et Dimensionnement du Boulonnage

- **Approche déterministe: Évaluation déterministe des Charges et des "Propriétés" des matériaux, par des valeurs caractéristiques.**
- **Pas de pondération partielle des paramètres de calcul**
- **Évaluation du dimensionnement à partir d'un coefficient de sécurité global basé sur un rapport de contraintes ou de déformations**

Critères de dimensionnement

- **Un mécanisme d'instabilité générale**

correspondant à la configuration de l'ouvrage en l'absence de tout soutènement, ou à un mécanisme d'instabilité en grand n'interférant pas avec le soutènement par boulons.

- **Un mécanisme d'instabilité interne**

correspondant à une défaillance du renforcement par boulons, par insuffisance soit de la résistance en traction/cisaillement des inclusions, soit de la capacité de liaison entre les inclusions et le terrain, soit de la résistance du dispositif d'ancrage en parement

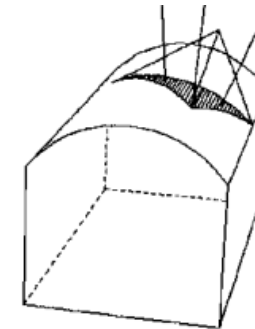
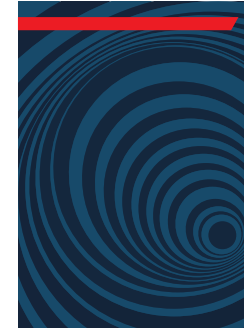
- **Un mécanisme d'instabilité mixte**

mobilisant le terrain dans sa zone renforcée, selon un mécanisme interférant avec le système de boulonnage.

Calcul et Dimensionnement du Boulonnage

■ Coefficients de sécurité pour les approches aux équilibres limites

	Critère de stabilité générale	Critère de stabilité interne	Critère de stabilité mixte
Configuration	Situation courante		
Bloc en voûte de tunnel	1,8	$T_b < T_{admissible} = \sigma_e A$ Vérification de la résistance à l'interface ou de l'ancrage	1,8
Bloc en piedroit de tunnel	1,6	Vérification de la plaque de tête	1,6
Configuration	Critère de stabilité générale	Critère de stabilité interne	Critère de stabilité mixte
Situation exceptionnelle (séisme – approche pseudo-statique)			
Tous les blocs	1,0	$T_b < T_{admissible} = \sigma_e A$ Vérification de la résistance à l'interface ou de l'ancrage Vérification de la plaque de tête	1,0



■ Coefficients de sécurité pour les approches en déformations

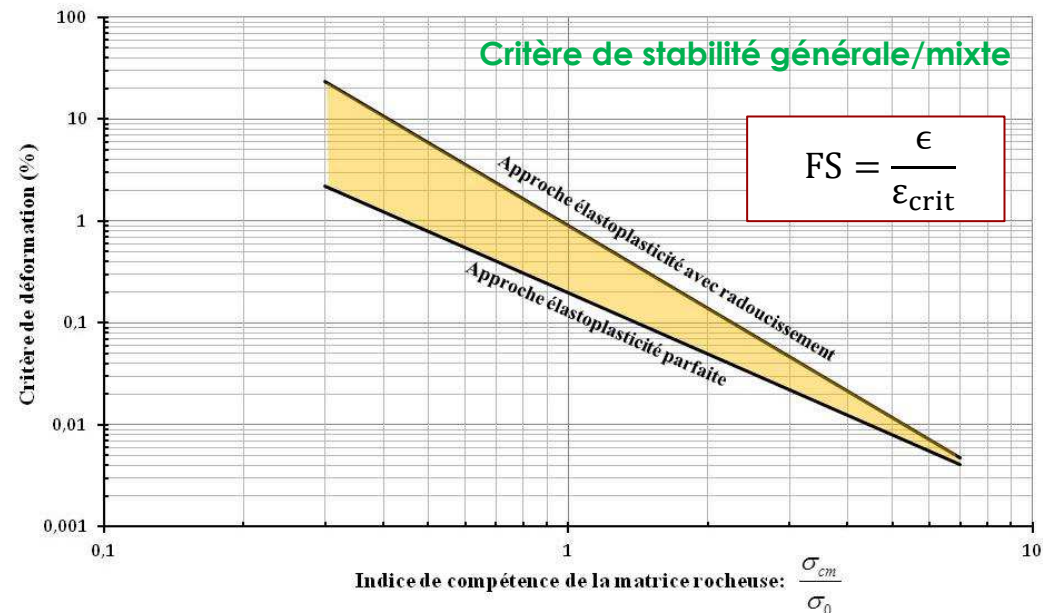
Critère de stabilité interne

Barre: $\epsilon < 50\%$ de l'allongement à la rupture

Scellement: Résistance limite non atteinte sur toute la longueur de la barre

Vérification de l'ancrage en fonction des caractéristiques de la coquille

Vérification de la plaque



Conception et Guide de Dimensionnement du Boulonnage Radial en Tunnel



- Outil d'aide au concepteur dans sa démarche de conception, prédimensionnement, dimensionnement et/ou justification de son soutènement
- Fournir des ordres de grandeurs des données nécessaires au "calcul"
- Importance de bien comprendre par anticipation le comportement du terrain et les mécanismes probables de ruine
- Proposition de critères de dimensionnement et d'interprétation des calculs
- Rappel de règles de bonnes pratiques et conseils pour la réalisation des modélisations numériques
-

Recommandations relatives à la Conception et Justification du Pré-Soutènement des Ouvrages Souterrains



LAIGLE	François	BG (Animateur)
SAITTA	Adrien	EGIS Tunnel
JASSIONNESSE	Christophe	SPIE BATIGNOLLES
SUBRIN	Didier	CETU
BILLAUX	Daniel	ITASCA
MATHIEU	Eric	Eiffage
DHALLUIN	Olivier	Eiffage
HADJ-HASSEN	Faouzi	Mines Paristech
MARTIN	François	BG
LEBISSONNAIS	Hervé	Terrasol
JANIN	Jean-Pierre	Terrasol
VILLEGAS	Jean-Sébastien	Vinci Construction
LAUNAY	Jean	
GONZALES	Jose	SYSTRA
AL-HOUT	Julie	Bouygues Construction
BELIGON	Chiquitta	Arcadis
DIAS	Daniel	Antea
LACOURT	Charles	SWS



- **Inclusions dans le terrain en avant du front**
 - Enfilage de barres/boulons en calotte du tunnel (Forepolling) ;
 - Enfilage de plaques métalliques en calotte du tunnel (polling plate) ;
 - Boulonnage divergent ;
 - Casquette auréolaire en attaque de tunnel ;
 - Les voûtes parapluies ;

- **Prévoûte**
 - Pré-voûte par tube jointifs (pipe roof method) ;
 - Pré-voûte par arc cellulaire (Cellular Arch) ;
 - Technique Cross-over ;
 - Pré-voûte par prédécoupage mécanique (méthode Perforex).

- **Renforcement par inclusions du front de taille**
 - Renforcement du front par boulons métalliques ;
 - Renforcement du front par boulons en fibre de verre ;

- **Consolidation du terrain**
 - injection de consolidation depuis le tunnel ;
 - colonnes de jet grouting dans l'emprise du front ou/et en périphérie de la section d'excavation ;

- **Traitement du terrain**
 - Congélation du massif ;
 - Drainage ;
 - Injection d'étanchéité.

