

Systemes de soutènement et Méthodes de dimensionnement empiriques

MÉCANIQUE DES
ROCHES ET
OUVRAGES
SOUTERRAINS

Dr. F. SANDRONE

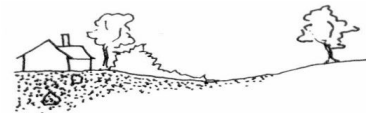
Systèmes de soutènement et Méthodes de dimensionnement empiriques

1. Effondrement du massif rocheux / du terrain autour des tunnels
2. Systèmes de soutènement des tunnels
 - 2.1. Soutènement temporaire et définitif
 - 2.2. Types de soutènement
3. Méthodes de dimensionnement des soutènements - Vue d'ensemble
4. Méthodes empiriques: systèmes de classification des massif rocheux
 - 4.1. Bieniawski (système RMR)
 - 4.2. Barton (système Q)
 - 4.3. AFTES
 - 4.4. Hoek-Kaiser-Bawden (Système GSI)
 - 4.5. Terzaghi (+ modifié par Deere et al. 1970)

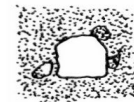
1. Exemples d'effondrements des tunnels



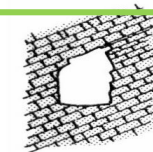
1. Comportement du massif rocheux autour des tunnels



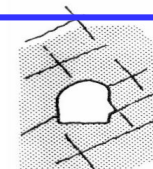
Sols /terrains de recouvrement et roches fortement altérées :
déformation rapide, déformation et écoulement du terrain



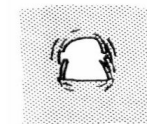
Blocs de roche et roches partiellement altérées :
chutes de blocs par gravité



Roche massive avec peu de joints :
pas de problèmes de stabilité particuliers



Roche massive à grande profondeur :
rupture induite par la contrainte, écaillage et éclatement avec
possibilité d'éclatement de la roche



DEPTH

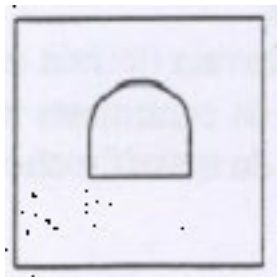


1. Comportement du massif rocheux (1/3)



Faible niveau de contrainte :

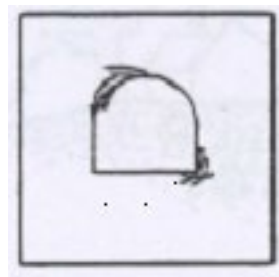
Influence de la gravité



Roche massive soumise à de faibles niveaux de contrainte in situ. **Réponse élastique linéaire** avec peu ou pas de rupture de la roche

Haut niveau de contrainte:

Influence des conditions de contraintes



Roche massive soumise à de fortes contraintes in situ. **L'écaillage, l'éboulement et l'écrasement** commencent aux points de concentration de contraintes élevées au contour et se propagent dans la massif rocheux.

1. Comportement du massif rocheux (2/3)

Faible niveau de contrainte :

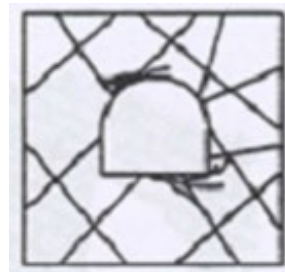
Influence de la gravité



Roche massive avec relativement peu de **discontinuités**, soumise à de faibles conditions de contrainte in situ. Des **blocs** ou des coins rocheux, isolés par l'intersection de discontinuités, **tombent ou glissent** sous l'effet de la gravité.

Haut niveau de contrainte:

Influence des conditions de contraintes



Roche massive présentant relativement peu de **discontinuités**, soumise à de fortes contraintes in situ. **La rupture se produit par glissement sur les surfaces de discontinuité, ainsi que par écrasement et rupture des blocs de roche.**

1. Comportement du massif rocheux (3/3)

Faible niveau de contrainte :

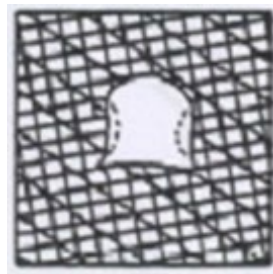
Influence de la gravité



Roche fortement jointive soumise à de faibles contraintes in situ. **Chute de petits blocs** et coins imbriqués les uns dans les autres. La rupture peut se **propager loin** dans le massif rocheux si elle n'est pas contrôlée.

Haut niveau de contrainte:

Influence des conditions de contraintes



Roche fortement jointive soumise à de fortes contraintes in situ. Rupture du massif rocheux entourant l'excavation par **glissement sur les discontinuités et par écrasement des petits blocs**. Le soulèvement du radier et la déformation par **convergence** des piédroits sont les résultats typiques de ce type de rupture.

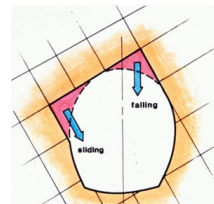
1. Types d'effondrement en fonction des conditions géologiques

Tunnel en roche

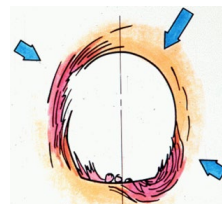
- Roches en blocs : chute de blocs et de coins
- Roches à grande profondeur : écaillage et éclatement
- Roches faibles et pauvres : écrasement
- Roches fortement fracturées et concassées : déchaussement et ruissellement

Tunnels en terrains meubles

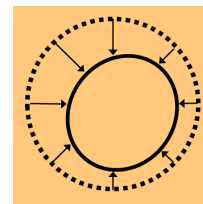
- Sols non cohésifs (sable et gravier) : déplacement, coulée, écoulement
- Sols cohésifs (argiles) : fluage, gonflement



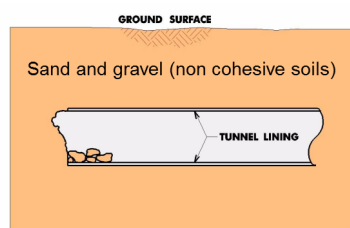
Block and wedge falling



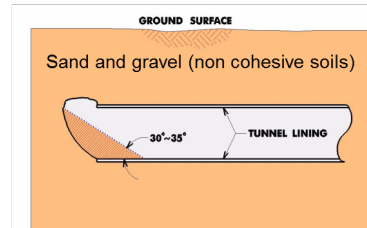
Spalling and bursting



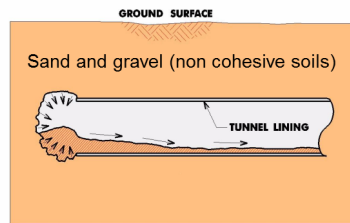
Squeezing



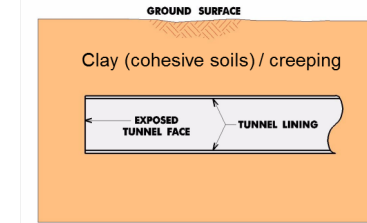
RAVELLING



RUNNING



FLOWING



FIRM GROUND

Systèmes de soutènement et Méthodes de dimensionnement empiriques

1. Effondrement du massif rocheux / du terrain autour des tunnels
2. Systèmes de soutènement des tunnels
 - 2.1. Soutènement temporaire et définitif
 - 2.2. Types de soutènement
3. Méthodes de dimensionnement des soutènements - Vue d'ensemble
4. Méthodes empiriques: systèmes de classification des massif rocheux
 - 4.1. Bieniawski (système RMR)
 - 4.2. Barton (système Q)
 - 4.3. AFTES
 - 4.4. Hoek-Kaiser-Bawden (Système GSI)
 - 4.5. Terzaghi (+ modifié par Deere et al. 1970)

2.1 Soutènement temporaire et définitif

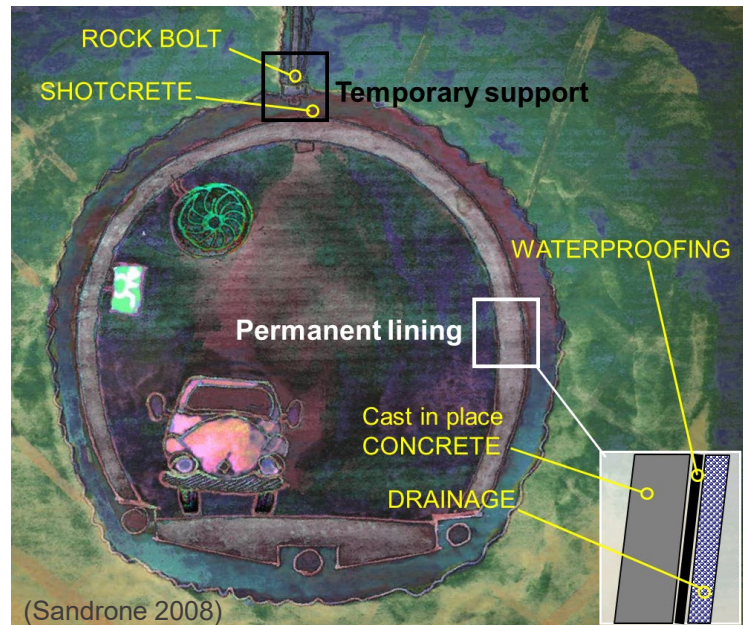


1. Le **soutènement temporaire** est installé immédiatement après l'excavation. Il est conçu pour stabiliser à court terme les parois du tunnel et est souvent composé de :

- Boulons / ancrages
- Cintres métalliques
- Béton projeté

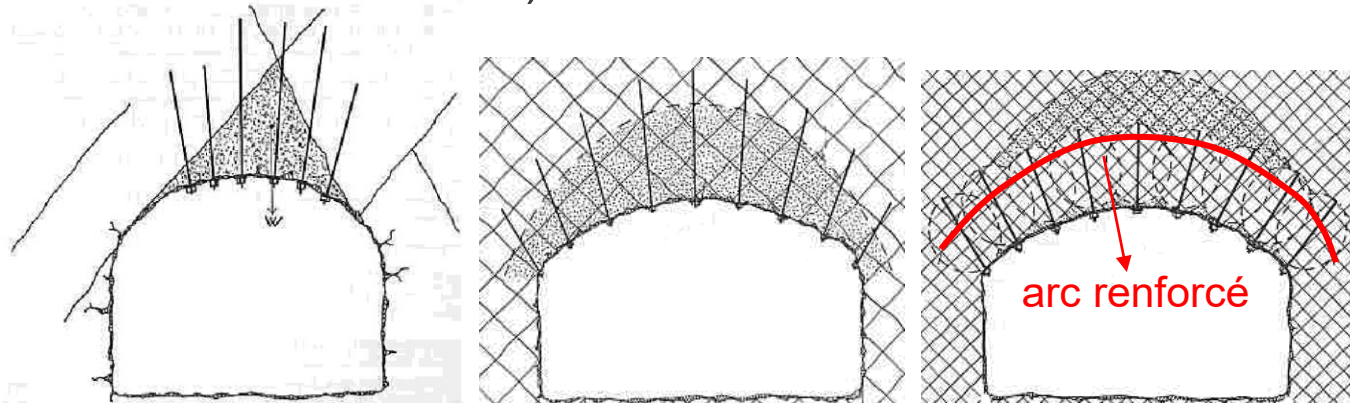
2. Le **revêtement permanent** est réalisé après l'excavation en fonction de l'utilisation future du tunnel. Il est principalement conçu pour assurer la durabilité du tunnel et est souvent composé de :

- Béton coulé sur place
- Anneau de voussoirs préfabriqués
- (Béton projeté)

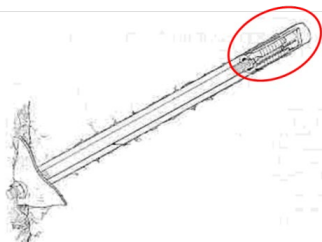


2.2 Support temporaire : Boulons de roche

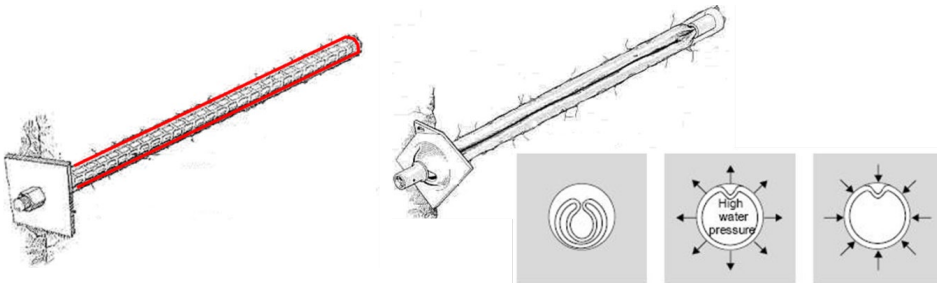
Le **boulonnage** peut être localisé ou systématique (souvent couplé avec un treillis métallique).



1. Ancrage ponctuel

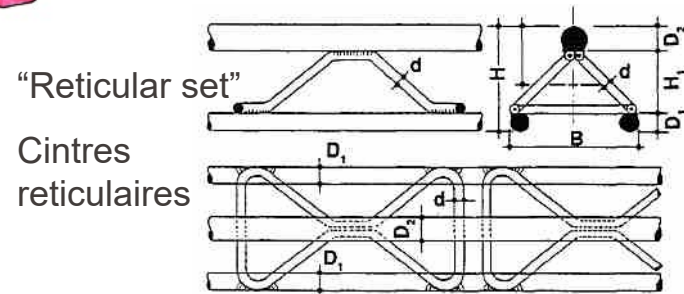
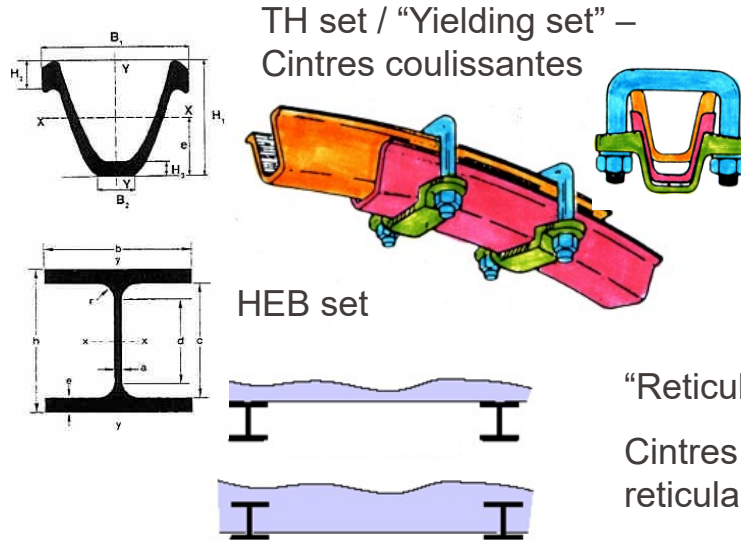


2. Ancrage scellé / reparti



2.2 Support temporaire : Cintres métalliques

Les **cintres métalliques** sont une méthode de soutènement assez répandue et elles peuvent être utilisées avec plusieurs types de roches et de terrains. Ils sont souvent combinés avec du béton projeté et des plaques



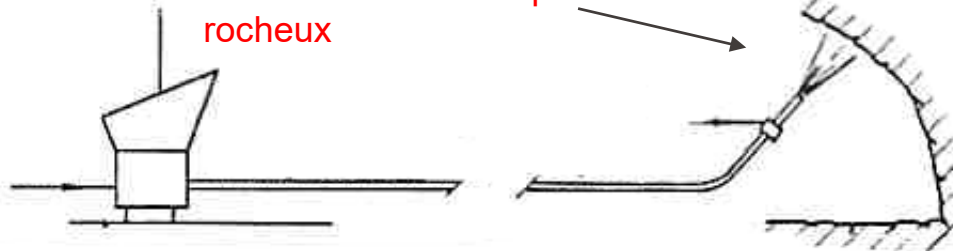
2.2 Support temporaire : Béton projeté

Le **béton est projeté** sur les parois et la voûte du tunnel. Dans certains cas, le front de taille est également recouvert de béton projeté afin d'en assurer la stabilité

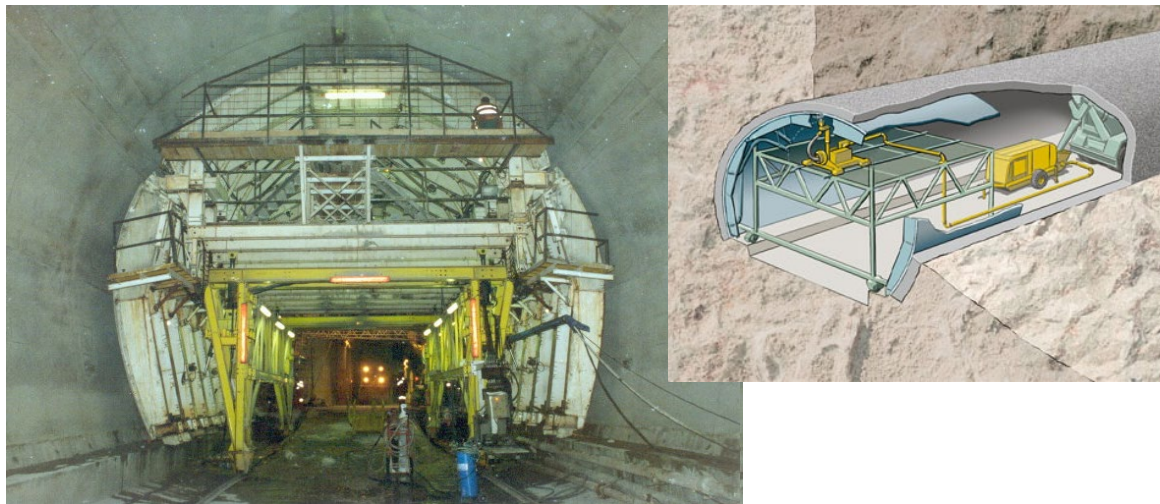
En général, ce type de soutènement est combiné avec des boulons ou des cintres.

Des fibres d'acier ou de polypropylène (2-6 cm) peuvent être ajoutées au mélange pour en augmenter la résistance et la ductilité.

Pénétration du ciment
Stabilisation des blocs de roche
Amélioration du comportement du massif rocheux



2.2 Revêtement final : Béton coulé



Les coffrages sont mis en place pour couler le revêtement final. Les **systèmes de drainage et d'étanchéité** sont généralement placés entre le soutènement temporaire et le revêtement en béton coulé.

La **membrane d'étanchéité** permet d'éviter les infiltrations d'eau souterraine à travers le revêtement final.

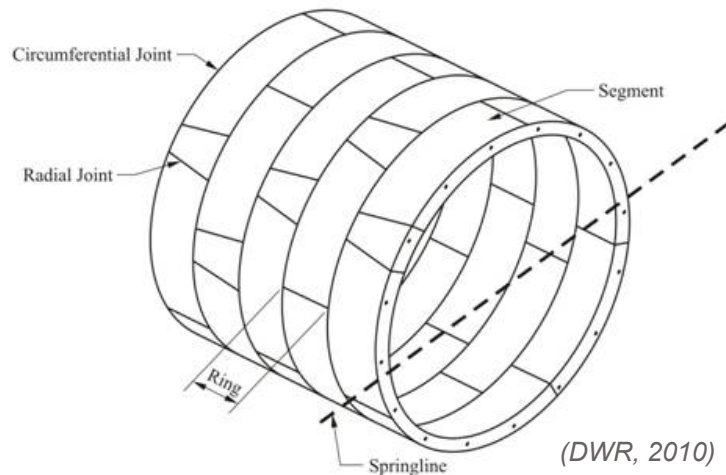
2.2 Anneau de voussoirs

Ce type de revêtement est typique des tunnels excavés avec un tunnelier à bouclier.

Le nombre et la forme des voussoirs ainsi que leur épaisseur peuvent varier en fonction des exigences de dimensionnement.

Ce type de revêtement peut également être utilisé comme soutènement temporaire et complété par un revêtement final en béton coulé.

Faciles à mettre en place et à transporter, ils nécessitent des endroits où ils peuvent être stockés après leur fabrication. Dans certains cas ils peuvent aussi être préfabriqués directement sur place.



Systèmes de soutènement et Méthodes de dimensionnement empiriques

1. Effondrement du massif rocheux / du terrain autour des tunnels
2. Systèmes de soutènement des tunnels
 - 2.1. Soutènement temporaire et définitif
 - 2.2. Types de soutènement
3. Méthodes de dimensionnement des soutènements - Vue d'ensemble
4. Méthodes empiriques: systèmes de classification des massif rocheux
 - 4.1. Bieniawski (système RMR)
 - 4.2. Barton (système Q)
 - 4.3. AFTES
 - 4.4. Hoek-Kaiser-Bawden (Système GSI)
 - 4.5. Terzaghi (+ modifié par Deere et al. 1970)

3. Vue d'ensemble des méthodes de dimensionnement des systèmes de soutènements



1. Méthodes empiriques : Méthodes basées sur les systèmes de classification des massif rocheux
2. Méthodes analytiques : Interaction terrain-soutènement (milieu continu)
3. Méthode basée sur la pression du terrain (ex. réactions hyperstatiques principalement pour les tunnels à faible profondeur et pour la conception des anneaux de voussoirs)
4. Méthodes basées sur la modélisation numérique

Basés sur les systèmes de classification des massif rocheux les plus courants :
Bieniawski (système RMR), Barton (système Q), AFTES, Hoek-Kaiser-Bawden (système GSI)

Terzaghi (+ modifié par Deere et al. 1970)

Couramment utilisée pour estimer les soutènements des tunnels lors de la **phase de dimensionnement/conception préliminaire**.

Systèmes de soutènement et Méthodes de dimensionnement empiriques

1. Effondrement du massif rocheux / du terrain autour des tunnels
2. Systèmes de soutènement des tunnels
 - 2.1. Soutènement temporaire et définitif
 - 2.2. Types de soutènement
3. Méthodes de dimensionnement des soutènements - Vue d'ensemble
4. Méthodes empiriques: systèmes de classification des massifs rocheux
 - 4.1. Bieniawski (système RMR)
 - 4.2. Barton (système Q)
 - 4.3. AFTES
 - 4.4. Hoek-Kaiser-Bawden (Système GSI)
 - 4.5. Terzaghi (+ modifié par Deere et al. 1970)

Blocs de roche intacte de différentes tailles

Massif rocheux = Roche intacte + discontinuités

Fractures, joints, failles

La roche à prendre en compte à l'échelle d'une excavation est donc le massif rocheux (taille de plusieurs dizaines de mètres). Le massif rocheux in situ est constitué de blocs de roche intacte intercalés pas tous les types de discontinuités (joints, failles, etc.).

4. Méthodes de classification des massif rocheux



Les méthodes de classification des massif rocheux sont couramment utilisés comme **outils de dimensionnement préliminaire**

Leur principal objectif est de fournir à l'ingénieur **une description qualitative et quantitative de la roche rencontrée avec l'excavation** et d'en évaluer les propriétés mécaniques et hydrauliques à l'échelle du tunnel.

Les méthodes de classification des massif rocheux les plus utilisées sont les systèmes **RMR** (Rock Mass Rating System - Bieniawski, 1973), **Q** (Barton et al. 1974) et AFTES, 2003.

Ces méthodes de classification ont été développées principalement pour les ouvrages souterrains. Elles sont le plus souvent utilisés pour estimer les **systèmes de soutènements nécessaires**.

Avantages :

- Faciles et rapides à utiliser
- Accessibles sans grand dépenses (peu coûteux)
- Possibilité de faire des comparaisons avec d'autres cas
- Peuvent aider à la conception finale du revêtement (simple identification des principales classes de soutènement → une analyse détaillée reste tout de même nécessaire)

Limites :

- Conception préliminaire de l'ouvrage
- Fonction de la qualité de la classification du massif rocheux :
 1. Les paramètres utilisés pour décrire le massif rocheux doivent définir correctement son comportement et ses caractéristiques.
 2. Le principal problème reste l'objectivité de l'estimation de ces paramètres
 3. Difficultés à quantifier correctement tous les paramètres décrivant le comportement de chaque massif rocheux
 4. Il est possible de trouver de grandes différences en fonction de la méthode utilisée (car les méthodes ne se basent pas toutes sur les mêmes critères pour la classification).

4.1 Systèmes de classification du massif rocheux

Systèmes de classification utilisés pour le dimensionnement des ouvrages souterrains

S. No.	Classification System	Abbreviation	Applications	Year	Authors [References]
1	Rock load	-	Tunnels	1946	Terzaghi [5]
2	Stand-up time	-	Tunnels	1958	Lauffer [13]
3	Rock quality designation	<i>RQD</i>	General	1964	Deere [14,15]
4	Rock structure rating	<i>RSR</i>	Tunnels	1972	Wickham et al. [16]
5	Rock mass rating	<i>RMR</i>	tunnels	1973	Bieniawski [8]
6	Tunneling quality index	<i>Q</i>	Tunnels	1974	Barton et al. [9]
7	Geological strength Index	<i>GSI</i>	general	1995	Hoek et al. [12]
8	Rock mass Index	<i>RMi</i>	General	1995	Palmstrom [11]
9	Rock tunneling quality index by TBM excavation	<i>Q_{TBM}</i>	TBM tunnels	1999	Barton [17]
10	Continuous rock mass rating	<i>CRMR</i>	General	2003	Sen and Sadagah [18]
11	Rock mass excitability	<i>RME</i>	TBM tunnels	2006	Von Preinls et al. [19]
12	Rock mass quality rating	<i>RMQR</i>	General	2014	Aydan et al. [7]

(d'après Rehman & al., 2018)

4.1 Méthode RMR (Bieniawski)



Les **six paramètres** suivants sont utilisés pour choisir le système de soutènement à l'aide de la méthode RMR :

1. Résistance à la compression uniaxiale du massif rocheux
2. Désignation de la qualité de la roche (RQD)
3. Espacement des discontinuités
4. Conditions des discontinuités
5. Conditions des eaux souterraines
- 6. Orientation des discontinuités**

} RMR

4.1 Système de soutènement selon RMR

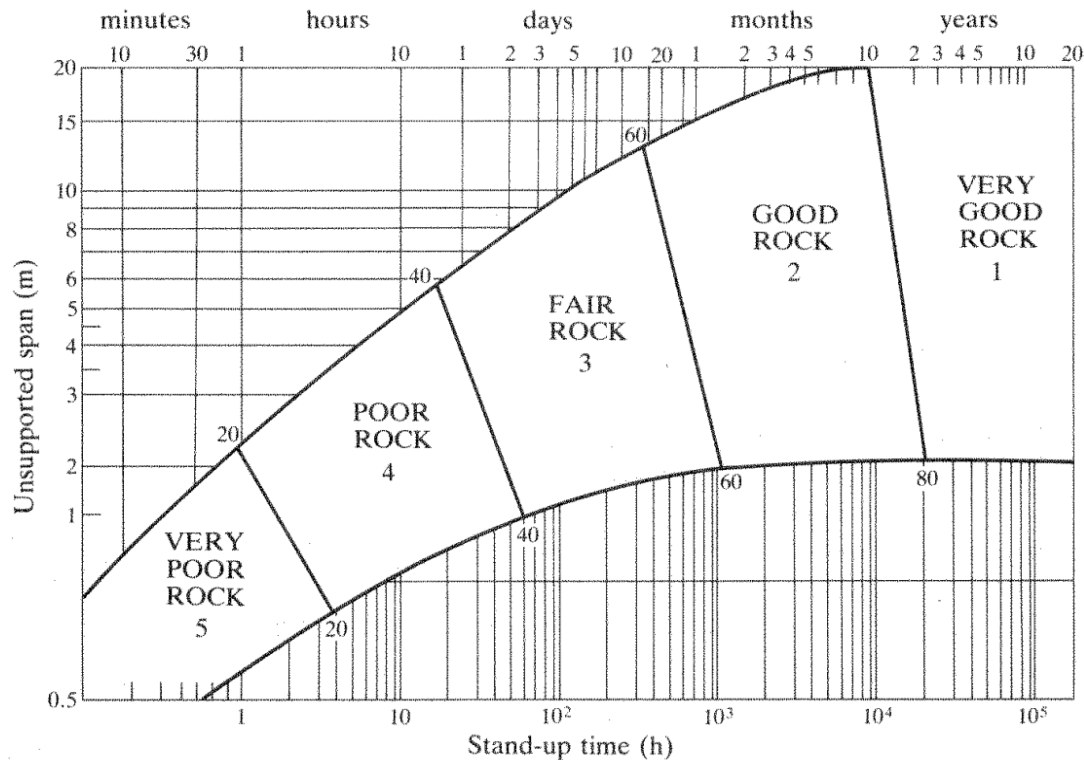


RMR et qualité du massif rocheux

Notations RMR	81 – 100	61 – 80	41 – 60	21 – 40	< 20
Classe du massif rocheux	A	B	C	D	E
Description	Très bonne roche	Bonne roche	Moyenne roche	Mauvaise roche	Très mauvaise roche
Durée moyenne excavation stable sans support	10 ans pour 15 m	6 mois pour 8 m	1 semaine pour 5 m	10 heures pour 2.5 m	30 minutes pour 0.5 m
Cohésion du massif rocheux (kPa)	> 400	300 – 400	200 – 300	100 – 200	< 100
Angle de frottement du massif rocheux	> 45°	35° – 45°	25° – 35°	15° – 25°	< 15°

4.1 Système de soutènement selon RMR

La portée maximale non soutenue et le temps d'attente avant la mise en place de soutènements peuvent être estimés à partir du tableau ci dessus.



4.1 Système de soutènement selon RMR

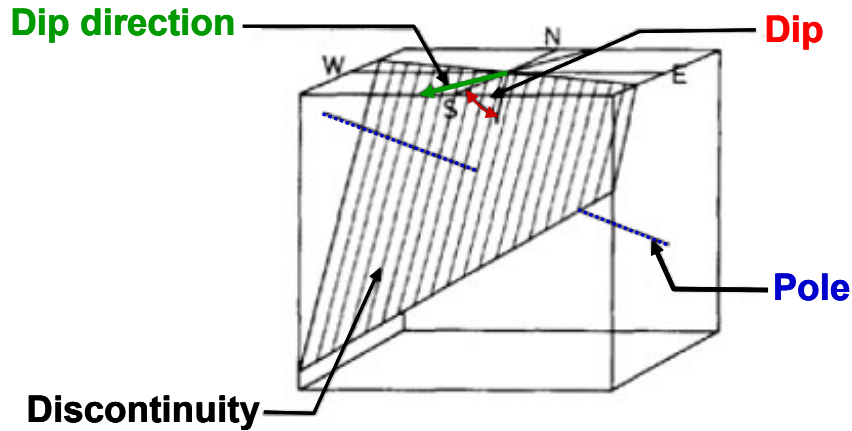
Ajustement du RMR pour l'excavation des tunnels

Pour utiliser le RMR pour la conception du soutènement d'un tunnel, la valeur du RMR doit être **ajustée en fonction de l'alignement du tunnel par rapport à l'orientation des joints.**

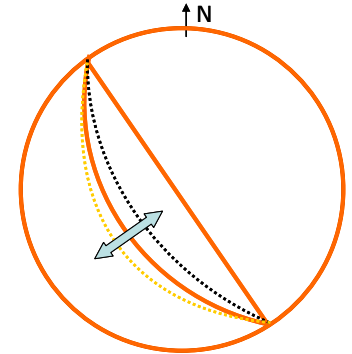
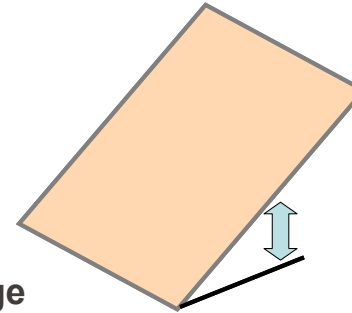
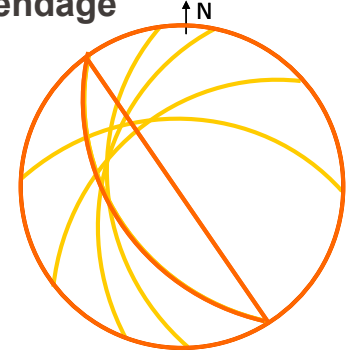
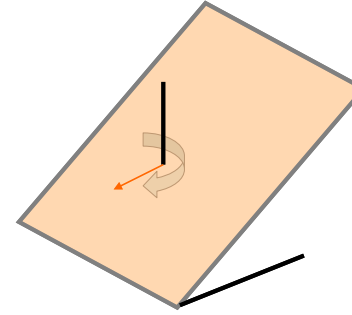
RMR ajusté = RMR original + ajustement

L'ajustement est compris entre 0 et -12.

4.1 Orientation des joints / discontinuités

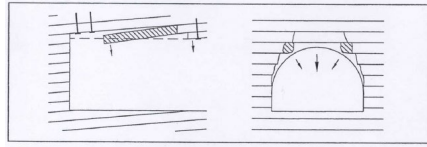


Variation de la direction du pendage



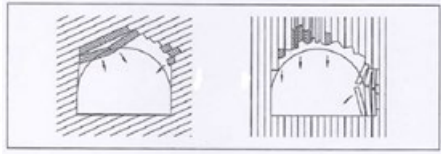
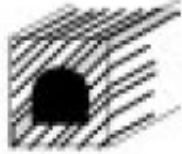
Variation du pendage

4.1 Discontinuités vs. Orientation excavation



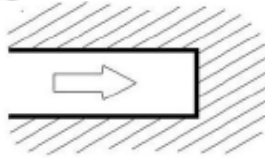
Discontinuités sub-horizontales

rupture en voûte et surprofil

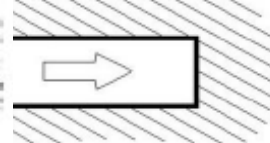


Discontinuités dans le sens du pendage

rupture de flexion et basculement



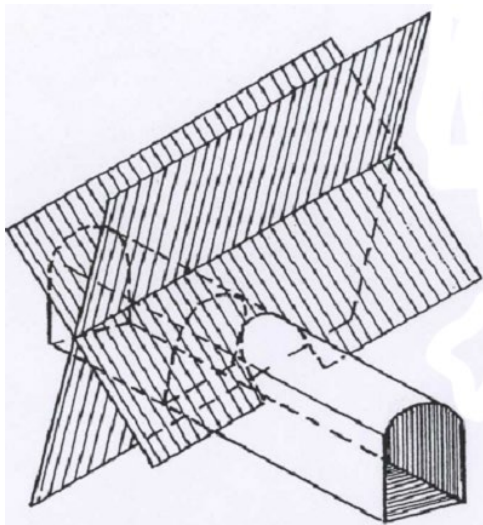
Discontinuités transversales excavation contre pendage



Discontinuités transversales excavation avec pendage

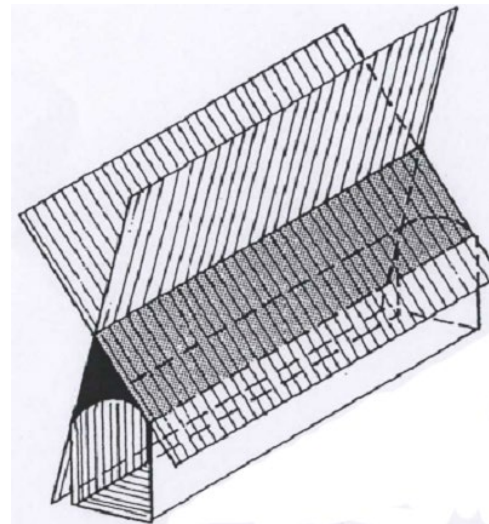
4.1 Orientation de l'axe du tunnel par rapport aux discontinuités du massif rocheux

Les discontinuités structurelles majeures du massif rocheux influencent la formation de coins / blocs instables en fonction de l'orientation de l'axe du tunnel.



Petits blocs à soutenir

Plans perpendiculaires à l'axe du tunnel



Gros blocs à soutenir

Plans parallèles à l'axe du tunnel

4.1 Méthode RMR

Effets de l'orientation des joints / discontinuités

Strike $\perp$ to tunnel axis

Direction perpendiculaire à l'axe du tunnel

Drive with dip

Creusement dans le sens du pendage
(avec)

Drive against dip

Creusement dans le sens inverse du
pendage (contre)

Pendage $45^\circ - 90^\circ$



very favourable
très favorable

Pendage $20^\circ - 45^\circ$



favourable
favorable

Pendage $45^\circ - 90^\circ$



fair
moyen

Pendage $20^\circ - 45^\circ$



unfavourable
défavorable

4.1 Méthode RMR

Effets de l'orientation des joints / discontinuités

Strike // to tunnel axis
Direction parallèle à l'axe du tunnel

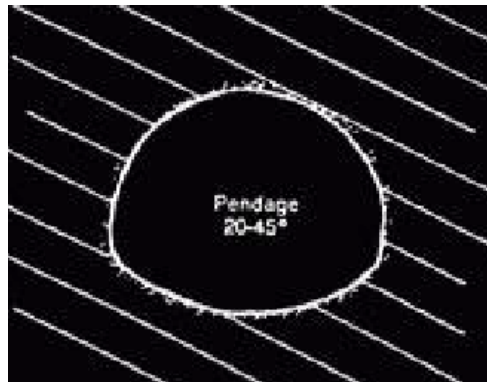
Sub-horizontal joints
*Discontinuités
 ~horizontales*

Pendage 45° – 90°



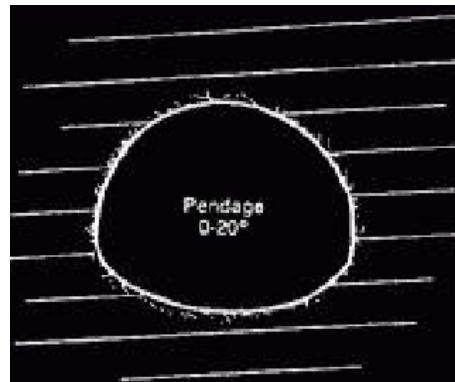
very unfavourable
très défavorable

Pendage 20° – 45°



fair
moyen

Pendage 0° – 20°



fair
moyen

4.1 Effets de l'orientation des joints/discontinuités

Ajustement selon l'orientation des joints

Condition	Très favorable	Favorable	Moyen	Défavorable	Très défavorable
Correction	0	- 2	- 5	- 10	- 12

Effets de l'orientation des joints pour l'excavation d'ouvrages souterrains

Direction $\perp$ à l'axe du tunnel, avancement <u>avec</u> le pendage		Direction $\perp$ à l'axe du tunnel, avancement <u>contre</u> le pendage	
Pendage $45^\circ - 90^\circ$ Très favorable	Pendage $20^\circ - 45^\circ$ Favorable	Pendage $45^\circ - 90^\circ$ Moyen	Pendage $20^\circ - 45^\circ$ Défavorable
Direction $//$ à l'axe du tunnel		Joint sub-horizontale (Pendage $0^\circ - 20^\circ$)	
Pendage $45^\circ - 90^\circ$ Très défavorable	Pendage $20^\circ - 45^\circ$ Moyen	Indépendant du pendage Moyen	

4.1 Systèmes de soutènement selon RMR

Notation ajustée = RMR initial - RA →

Ajustement : prend en compte l'orientation des familles des joints / discontinuités le plus significatives par rapport à la direction de creusement du tunnel

S'applique en général à des excavations de diamètre ~10 m et considère la mise en place d'un soutènement avec fonction permanente.

L'emploi de béton projeté fibré peut être considéré au lieu de l'utilisation d'un treillis métallique.

Rock mass class	Excavation	Rock bolts (20 mm diameter, fully grouted)	Shotcrete	Steel sets
I - Very good rock RMR: 81-100	Full face, 3 m advance.	Generally no support required except spot bolting.		
II - Good rock RMR: 61-80	Full face, 1-1.5 m advance. Complete support 20 m from face.	Locally, bolts in crown 3 m long, spaced 2.5 m with occasional wire mesh.	50 mm in crown where required.	None.
III - Fair rock RMR: 41-60	Top heading and bench 1.5-3 m advance in top heading. Commence support after each blast. Complete support 10 m from face.	Systematic bolts 4 m long, spaced 1.5 - 2 m in crown and walls with wire mesh in crown.	50-100 mm in crown and 30 mm in sides.	None.
IV - Poor rock RMR: 21-40	Top heading and bench 1.0-1.5 m advance in top heading. Install support concurrently with excavation, 10 m from face.	Systematic bolts 4-5 m long, spaced 1-1.5 m in crown and walls with wire mesh.	100-150 mm in crown and 100 mm in sides.	Light to medium ribs spaced 1.5 m where required.
V - Very poor rock RMR: < 20	Multiple drifts 0.5-1.5 m advance in top heading. Install support concurrently with excavation. Shotcrete as soon as possible after blasting.	Systematic bolts 5-6 m long, spaced 1-1.5 m in crown and walls with wire mesh. Bolt invert.	150-200 mm in crown, 150 mm in sides, and 50 mm on face.	Medium to heavy ribs spaced 0.75 m with steel lagging and forepoling if required. Close invert.

(d'après Bieniawski 1989)

4.1 Systèmes de soutènement selon RMR



Limites du système RMR

Le système de classification et choix de soutènement RMR a été développé principalement pour **l'exploitation minière**, c'est-à-dire pour des tunnels de taille limitée (généralement entre 2 et 15 m).

Le choix de la méthode de soutènement ne tient pas compte des effets de taille de l'excavation.

La conception **ne tient pas compte des exigences liées à l'exploitation et à l'utilisation de l'ouvrage** (coefficient de sécurité).

4.1 Longueur et espacement des boulons selon la méthode RMR



Il est recommandé de choisir la **longueur minimale des boulons** en tenant compte de la **plus grande des valeurs suivantes** :

1. deux fois l'espacement des boulons ;
2. trois fois l'espacement moyen des discontinuités pour les blocs rocheux critiques ;
3. $0.5B$ pour une taille d'excavation de $B < 6m$, ou $0.25B$ pour une taille d'excavation de $B = 18$ à $30m$ *

Pour les excavations *de plus de 18 m**, la longueur des boulons de paroi latérale doit être au moins égale à 1/5 de la hauteur de la paroi.

L'espacement maximal des boulons est recommandé à $\frac{1}{2}$ longueur de boulon ou 1.5 fois l'espacement moyen des discontinuités.

Si le **treillis métallique doit être ancré par les boulons**, un **espacement des boulons supérieur à 2 m** rend la fixation du treillis pratiquement **impossible**.

**Attention ces valeurs vont au delà du range optimale d'application de la méthode – méthode empirique!*

4.1 Béton projeté selon la méthode RMR



1. L'épaisseur du béton projeté (en particulier si fibré) ne doit pas dépasser 20 cm en une fois ;
2. Des couches épaisses de béton projeté peuvent être appliquées occasionnellement sur de petites zones de roches de très mauvaise qualité.

En général, le boulonnage systématique avec du béton projeté armé de fibres devrait être utilisé pour le soutènement de la calotte du tunnel dans le cas où les tunnels soient utilisés par des personnes avec ou sans des machines (fonction définitive du soutènement).

4.1 Systèmes de soutènement selon RMR



Exemple : tunnel d'accès à une centrale hydroélectrique de 10 m de portée (~diamètre), hauteur des parois 5 m

Le massif rocheux granitique avec 3 familles de joints (1 sub-horizontale, 1 sub-v verticale et 1 sub-v verticale // à l'axe du tunnel), RQD moyen de 88%, espacement moyen des joints de 0.24 m, surfaces des joints généralement en gradins (ondulés) et rugueuses, bien fermées et non altérées avec des taches d'altération occasionnelles observées, la surface d'excavation est mouillée mais sans égouttements, la résistance moyenne à la compression uniaxiale de la roche est de 160 MPa, le tunnel est excavé jusqu'à 150 m sous le niveau du terrain, où aucune contrainte anormale élevée in situ n'est attendue.

4.1 Soutènements rocheux utilisant le RMR



Résistance de la roche	160 MPa	Notation	12
RQD (%)	88%	Notation	17
Espacement des joints (m)	0.24 m	Notation	10
Condition de joints	en gradins, non altérés, bien jointifs / fermés	Notation	30
Eaux souterraines	humide / mouillé	Notation	7
		RMR	76

Condition d'orientation des discontinuités: moyenne, très favorable, très défavorable $\Rightarrow$ très défavorable

Correction = -12; **Valeur RMR ajustée = 64**

4.1 Soutènements rocheux utilisant le RMR

Rock mass class	Excavation	Rock bolts (20 mm diameter, fully grouted)	Shotcrete	Steel sets
I - Very good rock <i>RMR: 81-100</i>	Full face, 3 m advance.	Generally no support required except spot bolting.		
II - Good rock <i>RMR: 61-80</i>	Full face , 1-1.5 m advance. Complete support 20 m from face.	Locally, bolts in crown 3 m long, spaced 2.5 m with occasional wire mesh.	50 mm in crown where required.	None.
III - Fair rock <i>RMR: 41-60</i>	Top heading and bench 1.5-3 m advance in top heading. Commence support after each blast. Complete support 10 m from face.	Systematic bolts 4 m long, spaced 1.5 - 2 m in crown and walls with wire mesh in crown.	50-100 mm in crown and 30 mm in sides.	None.
IV - Poor rock <i>RMR: 21-40</i>	Top heading and bench 1.0-1.5 m advance in top heading. Install support concurrently with excavation, 10 m from face.	Systematic bolts 4-5 m long, spaced 1-1.5 m in crown and walls with wire mesh.	100-150 mm in crown and 100 mm in sides.	Light to medium ribs spaced 1.5 m where required.
V - Very poor rock <i>RMR: < 20</i>	Multiple drifts 0.5-1.5 m advance in top heading. Install support concurrently with excavation. Shotcrete as soon as possible after blasting.	Systematic bolts 5-6 m long, spaced 1-1.5 m in crown and walls with wire mesh. Bolt invert.	150-200 mm in crown, 150 mm in sides, and 50 mm on face.	Medium to heavy ribs spaced 0.75 m with steel lagging and forepoling if required. Close invert.

Avancement en section complète, boulonnage ponctuel, espacement 2.5m, longueur 3m. 5 cm de béton projeté pourraient être nécessaires en voûte

4.2 Méthode de classification Q (Barton et al.)



La valeur numérique de l'indice Q varie sur une échelle logarithmique de 0.001 à un maximum de 1'000 et est définie comme suit

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

Taille du bloc

Résistance au cisaillement entre blocs

Contrainte active

- *RQD* est la désignation de la qualité de la roche
- *J_n* est le nombre de familles de discontinuités
- *J_r* est l'index de rugosité du joint
- *J_a* est l'index d'altération du joint
- *J_w* est le facteur de réduction liés à la présence d'eau dans les joints
- *SRF* est le facteur de réduction des contraintes

4.2 Paramètres de la méthode de classification Q



La **taille des blocs (RQD/Jn)** représente la structure du massif rocheux, elle mesure la taille des blocs (valeurs extrêmes : 100/0.5 et 10/20).

La **résistance au cisaillement entre blocs (Jr/Ja)** représente la rugosité et les caractéristiques de frottement des surfaces du joint ou des matériaux de remplissage. Ce quotient est pondéré en faveur des joints rugueux, sains et fermés, favorables à la stabilité de l'excavation. Dans le cas de présence de remplissages argileux, la résistance est réduite de manière significative. Pour préserver l'excavation d'un collapse après de petits déplacements en cisaillement le contact du soutènement avec la paroi rocheuse doit être très serré.

Le facteur de **contrainte active (Jw/SRF)** se compose de deux paramètres liés aux contraintes:

- *SRF* est une mesure de la charge de dislocation (excavation à travers des zones de faille et des roches argileuses), de la contrainte de la roche (roche massive), des charges poussantes (roches plastiques déformables).
- *Jw* est une mesure de la pression de l'eau qui a un effet négatif sur la résistance au cisaillement des joints en raison d'une réduction de la contrainte normale effective, l'eau peut provoquer un ramollissement et un affaissement des joints avec remplissage argileux.

4.2 Systèmes de classification du massif Q



Valeur Q	Classe	Qualité du massif rocheux
400 ~ 1000	A	Exceptionnellement bonne
100 ~ 400	A	Extrêmement bonne
40 ~ 100	A	Très bonne
10 ~ 40	B	Bonne
4 ~ 10	C	Moyenne
1 ~ 4	D	Mauvaise
0.1 ~ 1	E	Très mauvaise
0.01 ~ 0.1	F	Extrêmement mauvaise
0.001 ~ 0.01	G	Exceptionnellement mauvaise

4.2 Dimension équivalente de l'excavation (De)



Ce paramètre relie la valeur de l'indice Q aux exigences de stabilité et de soutien des excavations souterraines (Barton et al., 1974). Il est obtenu en divisant le diamètre de l'excavation par le rapport de soutien de l'excavation (**Excavation Support Ratio, ESR**) :

$$De = \frac{\text{Excavation dimension (m)}}{ESR}$$

Le facteur ESR est lié à l'utilisation prévue de l'excavation et il est associé à un facteur de sécurité pour le système de soutènement choisi pour garantir la stabilité de l'excavation.

4.2 Coefficient de soutènement de l'excavation (ESR)



Excavation support ratio

Catégorie d'excavation		ESR
A	Excavations temporaires de mines.	3 – 5
B	Excavations permanentes de mines, tunnels d'eau pour les projets hydroélectriques, tunnels pilotes, galeries et ouvertures partielles pour des grandes excavations.	1.6
C	Cavernes de stockage, stations de traitement des eaux, petits tunnels routiers et ferroviaires, chambres de compression et galeries d'accès dans un projet hydroélectrique.	1.3
D	Cavernes des centrales électriques souterraines, tunnels routiers et ferroviaires principaux, cavernes pour la protection civile, portails et intersections des tunnels.	1.0
E	Centrales nucléaires souterraines, gares ferroviaires, installations sportives et publiques, usines souterraines.	0.8

4.2 Systèmes de soutènement selon Q



Méthodologie de conception du soutènement

Il s'agit d'une **conception empirique** basée sur des milliers de cas, qui permet de concevoir des systèmes de soutènement (permanents) en utilisant la valeur de l'index de classification Q.

Q est également une mesure de la stabilité de la roche par rapport à la **taille de l'excavation**.

Le choix du soutènement dépend de la **taille effective de l'excavation** (diamètre ou hauteur) ainsi que de **l'usage prévu pour l'ouvrage** (coefficient de sécurité).

4.2 Systèmes de soutènement selon Q : Voûte

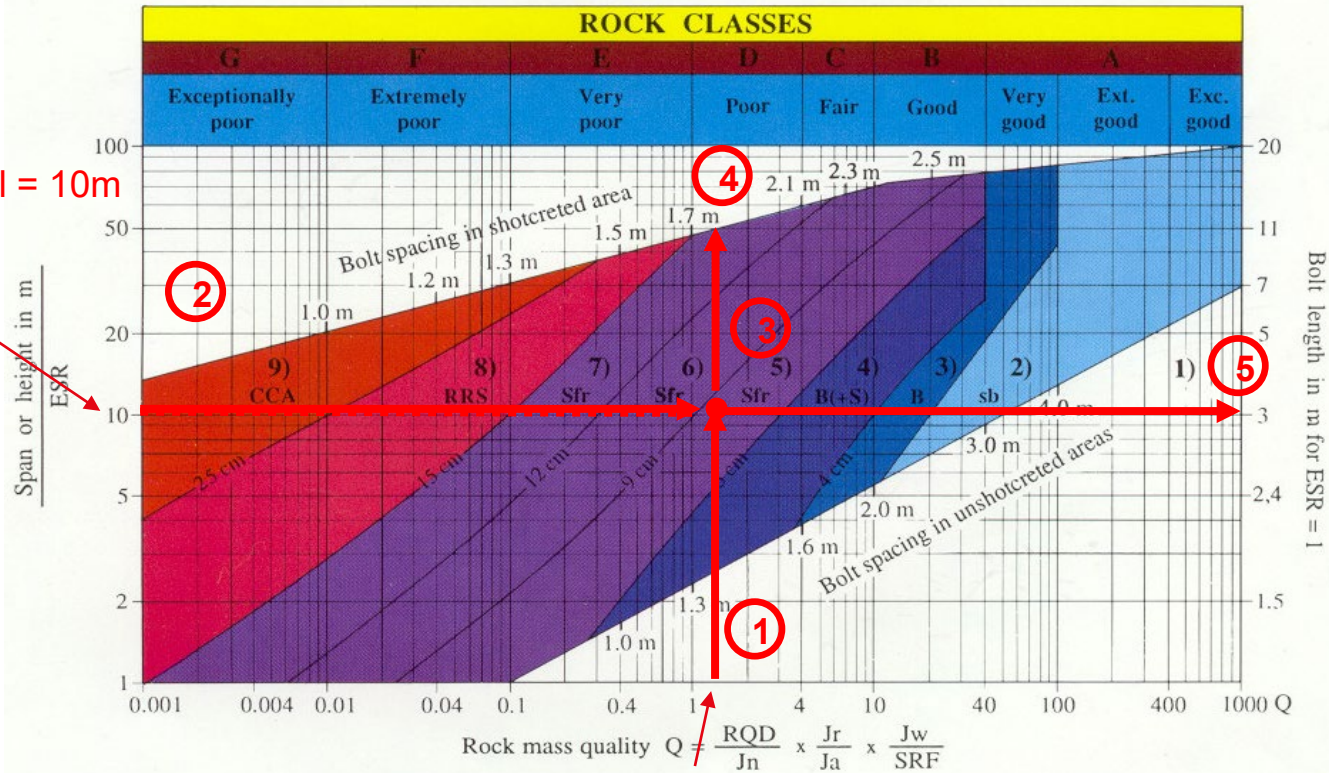


Diagramme Q

Le diagramme indique les exigences en termes de soutènement pour la voûte du tunnel (avec fonction permanente).

1. L'axe horizontal représente la valeur Q du massif rocheux
2. L'axe vertical gauche est la dimension équivalente (D_e) de l'excavation.
3. Le point d'intersection définit la « zone d'exigence pour le système de soutènement », qui indique le type de soutènement ainsi que l'épaisseur du béton projeté (le cas échéant).
4. En prolongeant le point d'intersection verticalement vers le haut (avec b_p) / ou vers le bas (sans b_p) on obtient l'espacement des boulons.
5. En prolongeant le point d'intersection horizontalement vers la droite on obtient la longueur des boulons → NB il faut considérer ici la **taille réelle** de l'excavation et non pas la taille équivalente (D_e).

Diamètre tunnel = 10m
 ESR = 1.0
 De = 10m



REINFORCEMENT CATEGORIES

- 1) Unsupported
- 2) Spot bolting, sb
- 3) Systematic bolting, B
- 4) Systematic bolting, (and unreinforced shotcrete, 4-10 cm), B(+S)
- 5) Fibre reinforced shotcrete and bolting, 5-9 cm, Sfr+B
- 6) Fibre reinforced shotcrete and bolting, 9-12 cm, Sfr+B
- 7) Fibre reinforced shotcrete and bolting, 12-15 cm, Sfr+B
- 8) Fibre reinforced shotcrete, >15 cm, reinforced ribs of shotcrete and bolting, Sfr, RRS+B
- 9) Cast concrete lining, CCA

(d'après Grimstad & Barton, 1993)

4.2 Méthode Q: Longueur et espacement des boulons



Le **boulonnage ponctuel / localisé** est utilisé pour fixer des blocs de roche isolés.

L'espacement dépend de la taille du bloc, qui peut être estimée à partir des caractéristiques des joints.

Les boulons doivent être suffisamment longs pour obtenir un **ancrage adéquat dans la roche stable** au-delà du bloc (1~2 m dans la roche stable).

Pour le **boulonnage systématique**, l'espacement des boulons (fonction de l'espacement des joints) ainsi que leurs longueur doivent être estimés à partir du **graphique Q**.

4.2 Méthode Q: Longueur et espacement des boulons



Notes sur le graphique Q

La longueur des boulons est déterminée en fonction de taille réelle (c'est-à-dire ESR=1). Elle peut aussi être estimée par l'équation suivante :

$$L = 1.4 + 0.184 * \text{taille de l'excavation.}$$

L'espacement des boulons est déterminé par la valeur Q, les valeurs sont différentes si la zone dans laquelle on se trouve prévoit ou pas du béton projeté.

4.2 Systèmes de soutènement selon Q



Portée maximale non soutenue

Pour un massif rocheux d'assez bonne qualité, il est possible de laisser le contour de l'excavation sans soutènement pendant une certaine période (voir à long terme).

Il est possible de déterminer la portée maximale non soutenue en tenant compte de la valeur de Q et de l'utilisation prévue de l'excavation:

$$2 \text{ ESR } Q^{0,4}$$

Exemple :

$Q = 10$, $\text{ESR} = 1 \rightarrow$ portée maximale non soutenue = 5 m

4.2 Systèmes de soutènement selon Q : Parois



Conception du soutènement des parois

La **hauteur des parois / piédroits** doit être utilisée comme "dimension équivalente".

Les valeurs Q obtenues pour le massif peuvent être modifiées (améliorées) lors de la conception du soutènement des parois selon les règles suivantes:

$$\text{Pour } Q > 10, Q_{\text{wall}} = 5 Q$$

$$\text{Pour } 0.1 < Q < 10, Q_{\text{wall}} = 2.5 Q$$

$$\text{Pour } Q < 0.1, Q_{\text{wall}} = Q$$

4.2 Systèmes de soutènement selon Q



Exemple : tunnel d'accès à une centrale hydroélectrique de 10 m de portée (~diamètre), hauteur des parois 5 m

Le massif rocheux granitique avec 3 familles de joints (1 sub-horizontale, 1 sub-verticale et 1 sub-verticale // à l'axe du tunnel), RQD moyen de 88%, espacement moyen des joints de 0.24 m, surfaces des joints généralement en gradins (ondulés) et rugueuses, bien fermées et non altérées avec des taches d'altération occasionnelles observées, la surface d'excavation est mouillée mais sans égouttements, la résistance moyenne à la compression uniaxiale de la roche est de 160 MPa, le tunnel est excavé jusqu'à 150 m sous le niveau du terrain, où aucune contrainte anormale élevée in situ n'est attendue.

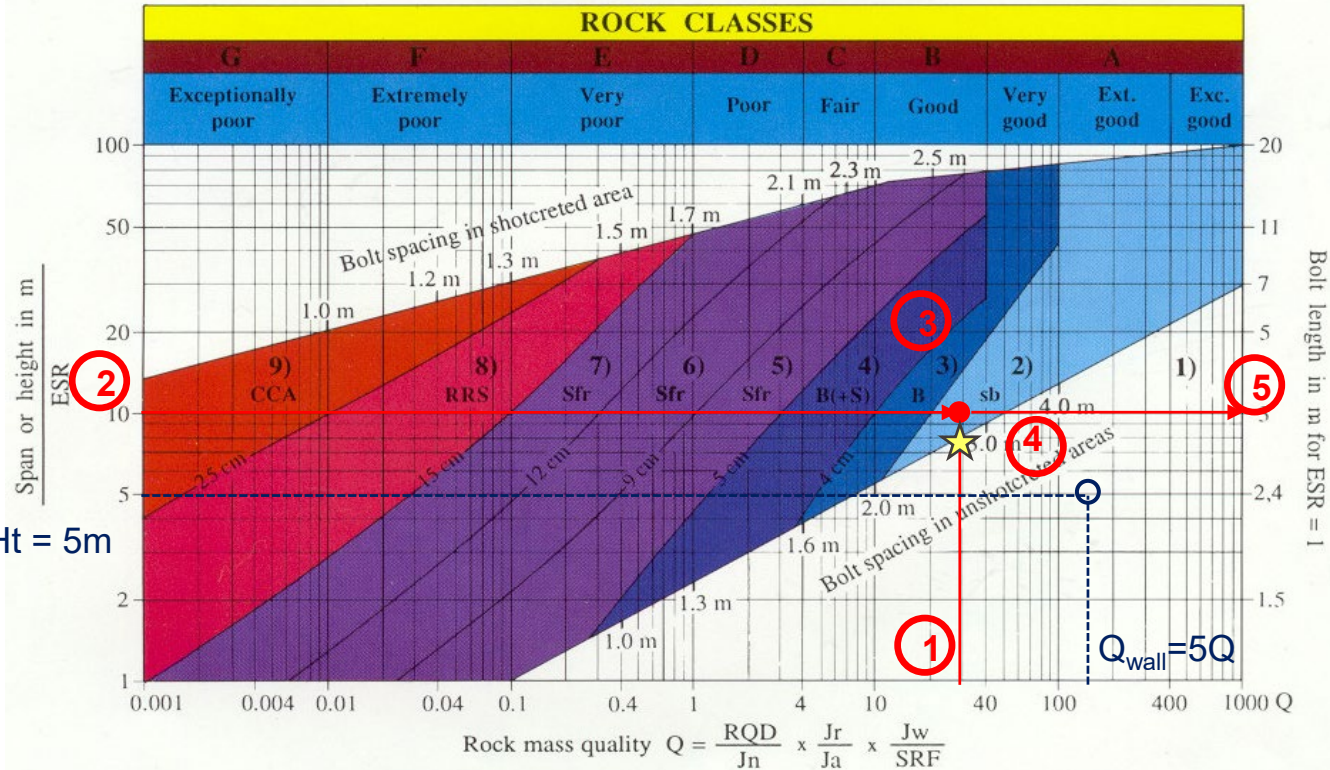
4.2 Soutènements rocheux utilisant le système Q



RQD	88%	RQD	88
Nombre d'ensemble de joints	3 familles	J_n	9
Indice de rugosité des joints	en gradins ($\Rightarrow$ ondulé)	J_r	3
Nombre d'alteration des joints	inaltéré, quelques taches	J_a	1
Facteur d'humidity des joints	humide uniquement (excavation sèche ou afflux mineur)	J_w	1
Facteur de reduction de contraintes	$\sigma_c/\sigma_1 = 160/(150 \times 0.027) = 39.5$	SRF	1
Q	(88/9) (3/1) (1/1)		29

Q = 29,
ESR = 1.0,
Span = 10m,
De = 10m

Ht = 5m



REINFORCEMENT CATEGORIES

1) Unsupported

2) Spot bolting, sb

3) Systematic bolting, B

4) Systematic bolting, (and unreinforced shotcrete, 4-10 cm), B(+S)

5) Fibre reinforced shotcrete and bolting, 5-9 cm, Sfr+B

6) Fibre reinforced shotcrete and bolting, 9-12 cm, Sfr+B

7) Fibre reinforced shotcrete and bolting, 12-15 cm, Sfr+B

8) Fibre reinforced shotcrete, >15 cm, reinforced ribs of shotcrete and bolting, Sfr, RRS+B

9) Cast concrete lining, CCA

4.2 Soutènements rocheux utilisant le système Q



Exigences en matière de **soutènement de la voûte** à partir du graphique Q:

- ✓ Boulonnage localisé
- ✓ (Espacement des boulons à 2.7 m)
- ✓ Longueur des boulons de 3 m
- ✓ Pas de béton projeté

Exigences en matière de **soutènement de parois / piédroits**:

- ✓ En général, aucun système de soutènement n'est nécessaire

4.2 Comparaison des méthodes Q et RMR



RMR (cf. Slide 37-39)	Avancement en section complète, boulonnage ponctuel , espacement 2.5m, longueur 3m. 5 cm de béton projeté en voûte (si besoin)
Q (cf. Slide 53-56)	Voûte: boulonnage ponctuel , espacement 2.7m, longueur 3m. Piédroits: pas de soutènement

4.2 Comparaison des méthodes Q et RMR



La méthode **RMR ne prend pas en compte la taille de l'excavation**, elle est généralement bien adaptée aux excavation de taille limitée (2 - 15m).

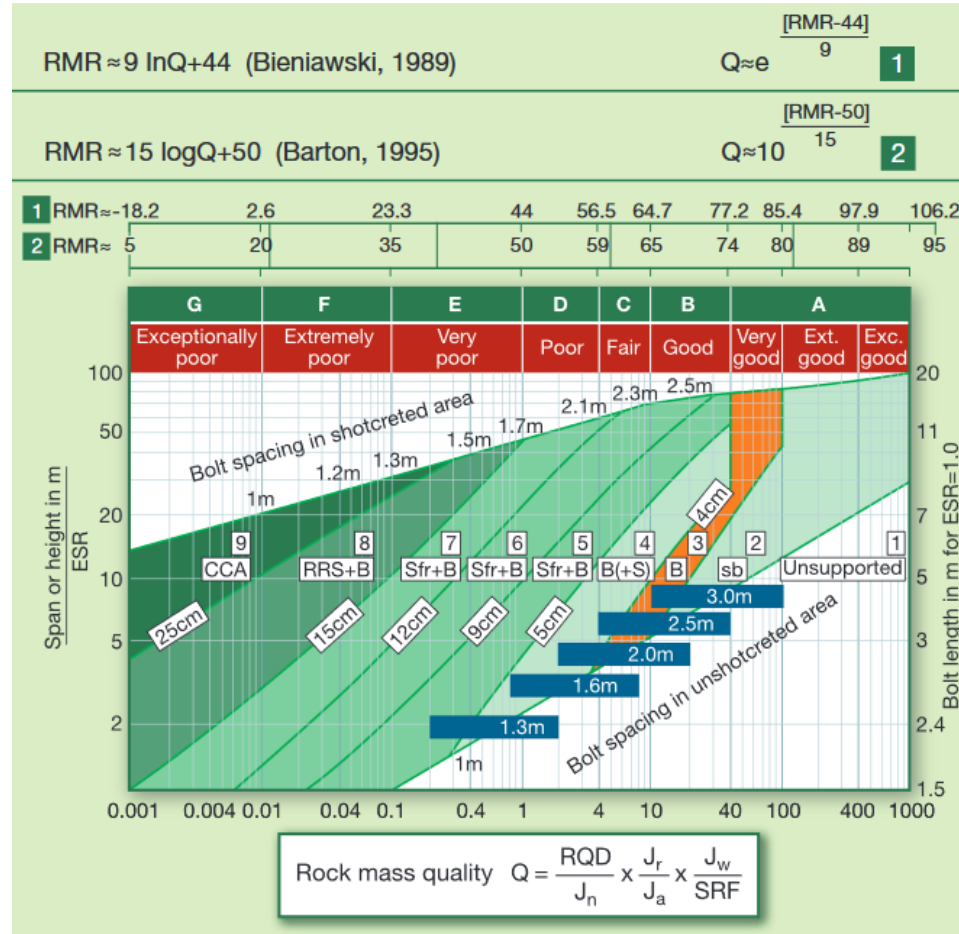
La RMR ne fait pas de distinction entre le soutènement de la voûte et celui des parois/piédroits.

Le **caractère empirique des méthodes** peut parfois donner lieu à des **différences dans les résultats**. En particulier:

Pour un massif rocheux de **qualité moyenne à très bonne**, les deux méthodes donnent des **résultats similaires**. Pour un massif rocheux de **très mauvaise qualité**, **la différence peut parfois être importante**:

- Le système Q n'est pas initialement conçu pour des roches des mauvaise qualité (méthode norvégienne).
- Le système RMR est plus adapté aux massif rocheux de qualité médiocre ou inférieure (orientation des joints).

4.2 Comparaison des méthodes Q et RMR



(Barton & Bieniawski, 2008)

4.3 Recommandations de l'AFTES (GT 7)



Type de soutènement choisi en fonction des caractéristiques du massif rocheux, du type d'excavation et de l'environnement.

1. Critères relatifs au terrain :

- Résistance de la roche
- Discontinuités (nombre de familles, orientation, espacement)
- Potentiel d'altération
- Hydrogéologie (pression d'eau et perméabilité)
- Conditions de contraintes (contraintes naturelles et couverture)

2. Critères relatifs au type d'excavation :

- Forme et dimensions (géométrie)
- Méthode de construction

3. Critères environnementaux :

- Tassements
- Impact sur le système hydrogéologique
- Emploi de techniques de consolidation du terrain

4.3 Recommandations de l'AFTES (GT 7)

Non soutenu	Béton projeté	Boulons non scellés	Boulons scellés	Ancrages	Cintres lourdes en acier	Cintres en acier coulissantes	Voussoirs en acier	Voussoirs en béton	Voûte parapluie
Bouclier – pousse tube	Injectons	Air comprimé	Congélation						

En fonction des différents paramètres caractérisant les critères, plusieurs **tableaux** ont été élaborés pour déterminer le type de soutènement le plus adapté :

- ☒ recommandé (**bon**)
- ☐ favorable (**moyen**)
- ☒ non favorable (**mauvais**)
- ☒ impossible (**très mauvais**)

En fonction des différents paramètres caractérisant les critères, plusieurs **tableaux** ont été élaborés pour déterminer le type de soutènement le plus adapté :

- ☒ recommandé (**bon**)
- ☐ favorable (**moyen**)
- ☒ non favorable (**mauvais**)
- ☒ impossible (**très mauvais**)

4.3 Propriétés mécaniques du terrain : Tableau 0

(1/2)



Roche

Catégorie	Description	Exemples	σ_c (MPa)
R1	Roche très résistante	Quartzite et basalte compétents	> 200
R2a	Roche résistante	Granite, porphyre, grès et calcaire compétents	200 - 120
R2b		Granites, calcaires et grès résistants, marbres, dolomies, conglomérats compacts	120 - 160
R3a	Roche modérément résistante	Grès ordinaire, schiste siliceux et grès schisteux, gneiss	60 - 40
R3b		Schiste argileux modérément résistants, calcaire, marne compacte, conglomérats de faible consistance	40 - 20
R4	Roche peu résistante	Schiste tendre et bien fracturé, calcaire, gypse, marne et grès, poudingue, craie	20 - 6
R5a	Roche très faible	Marnes sableuses ou argileuses, sables marneuses, gypse altéré et craie	6 – 0.5
R5b	Sol cohésif consolidé	sables argileuses non consolidées, graviers	< 0.5
R6a	Sol plastique ou faiblement consolidé	Marnes altérées, argiles, sables argileuses, limons fins	--
R6b		Tourbe peu consolidée, limon, boue et sable fin sans cohésion	--

Sol

4.3 Propriétés mécaniques du terrain : Tableau 0 (2/2)

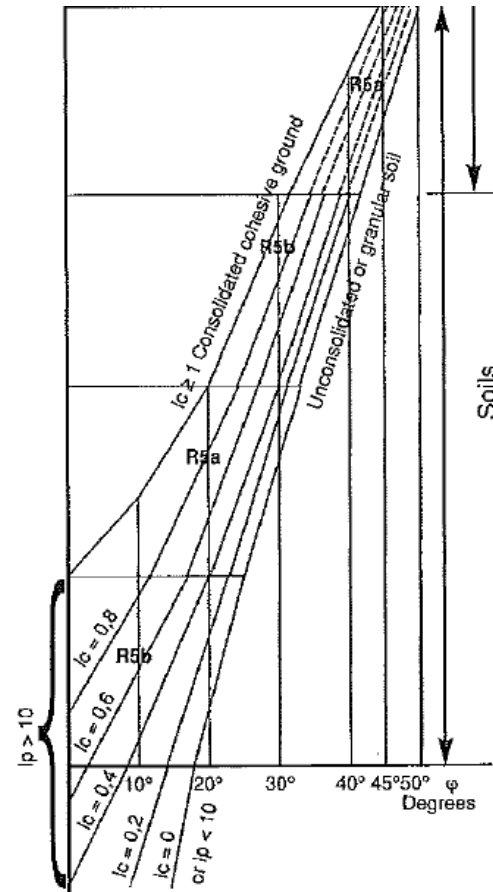
Sol

I_p = Indice plastique $\rightarrow W_L - W_p$

W_L, W_p = Limites d'Atterberg

I_c = Indice de consistance $\rightarrow \frac{W_L - W}{I_p}$

W = taux d'humidité naturelle



4.3 Tableau 1

Mechanical behaviour	Unsupported		Shotcrete	Rock bolts			Steel ribs		Segments		Perforated tubes	Shield or jacked pipe	Special		
				Ungouted	Grouted	Jacked bars	Heavy	Light, yielding	Steel	Concrete			Grouting	Comp. air	Freezing
R1	•			•		X			X	X	X	X		X	X
R2a	•			•		X			X	X	X	X		X	X
R2b			•	•	•	X			X	X	X	X		X	X
R3a			•	•	•	X		•	X	X	X	X		X	
R3b			•		•	X		•		X	X	X			
R4	X		•	X			•	•							
R5a	X		•	X			•	•	•						
R5b	X			X	X		•	•	•	•	•	•	•		
R6a	X		X	X	X	X	Enf	Enf	Enf	Bcl		•	•		
R6b	X		X	X	X	X	Enf Bif	Enf Bif	Enf Bif	Bcl Bif	Bif	•	•		•

Legend

Enf : with forepoling

Bif : face lined

Bcl : shield

4.3 Tableau 2

Discontinuities (tunnel driven with explosives, with smooth-blasting) 1 — Rock (R1 to R4)			Unsupported		Shotcrete	Rock bolts			Steel ribs		Segments		Perforated tubes	Shield or jacked pipe	Special		
						UngROUTED	GROUTED	JACKED bars	Heavy	Light, yielding	Steel	Concrete			GROUTING	Comp. air	Freezing
Number of sets	Orientation	Spacing (1)															
N1			•					X			X	X	X	X	X	X	X
N2	Or2 or Or3	S1 to S3	•					X			X	X	X	X	X	X	X
N2 N3 or N4	Random	S1				•		X			X	X	X	X	X	X	X
		S2				•	•	X			X	X	X	X	X	X	X
		S3			•	Gr	Gr	X				X	X	X			X
		S4	X		•	Gr or Bp	Gr or Bp	X	•	•				X		X	X
		S5	X		•	X	Bp	X	•	•				X		X	X
N5			X		•	X	Bp	X	•	•	•			X	•	X	X

2 — Soil (R5 and R6)

Not applicable

Table 2

Nota

1 — For densest set

2 — Mortar grout preferred to resin when joints are open

Legend

Gr = with continuous mesh

Bp = with shotcrete

Bl = with timber or steel lagging

4.3 Tableau 2a

Discontinuities (tunnel driven with explosives, without smooth-blasting) 1 — Rock (R1 to R4)			Unsupported		Shotcrete	Rock bolts			Steel ribs		Segments		Perforated tubes	Shield or jacked pipe	Special		
						UngROUTED	GROUTED	JACKED bars	Heavy	Light, yielding	Steel	Concrete			GROUTING	Comp. air	Freezing
Number of sets	Orientation	Spacing (1)															
Random N1 to N4	Random	S1				•	•	X		•	X	X	X	X	X	X	X
		S2				Gr	Gr	X		•	X	X	X	X	X	X	X
		S3	X		•	Gr	Gr	X	BI	BI		X	X	X		X	X
		S4 or S5	X		•	X		X	BI ou Bp	BI ou Bp			X	X		X	X
N5			X		•	X		X	BI ou Bp	BI ou Bp	•			X		X	X

2 — Soil (R5 and R6)

Not applicable

Table 2 a

Nota

1 — For densest set

2 — Mortar grout preferred to resin when joints are open

Legend

Gr = with continuous mesh

Bp = with shotcrete

BI = with timber or steel lagging

Discontinuité (tunnel driven with explosion without smooth-blast)														Special
1 — Rock (R1 to R5)														
Number of sets	Orientation													
Random N1 to N4	Random													
N5														

4.2.1. — Number of district joint sets

- N1 No (or very few) joints
- N2 One main set
- N3 Two main sets
- N4 More than two main sets
- N5 Abundant joints, no discernible pattern.

2 — Soil (R5 and R6)

Not applicable

Table 2 a

Nota 1 — For densest set

2 — Mortar grout preferred to resin when joints are open

Legend Gr = with continuous mesh

Bp = with shotcrete

Bl = with timber or steel lagging

Discontinuities (tunnel driven with explosives, without smooth-blasting) 1 — Rock (R1 to R4)			Unsupported		Shotcrete	Rock bolts			Steel ribs		Segments		Perforated tubes	Shield or jacked pipe	Special		
Number of sets	Orientation	Spacing				UngROUTED	GROUTED	JACKED bars	Heavy	Light, yielding	Steel	Concrete			Grouting	Comp. air	Freezing
Random N1 to N4	Random																
N5																	

2 — Soil (R5 and
Not applicable

Nota 1 — For
2 — Mor

Legend Gr = with

4.2.2. — Joint set orientation with respect to tunnel direction

- OR1 Subhorizontal joints
- OR2 Tunnel perpendicular to strike
- OR3 Intermediate
- OR4 Tunnel parallel to strike.

4.3 Tableau 2a

Discontinuities (tunnel driven with explosives, without smooth-blasting) 1 — Rock (R1 to R4)			Unsupported
Number of sets	Orientation	Spacing (1)	
Random N1 to N4	Random	S1	
		S2	
		S3	X
		S4 or S5	X
N5			X

— S1 Very wide spacing :

$S > 200 \text{ cm}$ or $RQD > 90 \%$

— S2 Wide spacing :

$60 \text{ cm} < S < 200 \text{ cm}$ or $75 \% < RQD < 90 \%$

— S3 Moderate spacing :

$20 \text{ cm} < S < 60 \text{ cm}$ or $50 \% < RQD < 75 \%$

— S4 Close spacing :

$6 \text{ cm} < S < 20 \text{ cm}$ or $25 \% < RQD < 50\%$

— S5 Very close spacing :

$S < 6 \text{ cm}$ or $RQD < 25 \%$

2 — Soil (R5 and R6)

Not applicable

Nota

1 — For densest set

2 — Mortar grout preferred to resin when joints are open

Legend

Gr = with continuous mesh

Bp = with shotcrete

Bl = with timber or steel lagging

Table 2 a

4.3 Tableau 2b

Discontinuities (machine-driven tunnel) 1 — Rock (R1 to R4)			Unsupported		Shotcrete	Rock bolts			Steel ribs		Segments		Perforated tubes	Shield or jacked pipe	Special		
						UngROUTed	Grouted	Jacked bars	Heavy	Light, yielding	Steel	Concrete			Grouting	Comp. air	Freeing
Number of sets	Orientation	Spacing (1)															
N1			•														
N2	Or2 or Or3	S1 to S3															
N2		S1 S2				•											
N3		S3				•	•			•							
or		S4			•	•	•			•							
N4		S5			•	Gr Bp	Gr Bp			Bl Bp	Bl Bp	•					
N5					•							•					

2 — Soil (R5 and R6)
Not applicable

Table 2 b

Nota 1 — For densest set
2 — Mortar grout preferred to resin when joints are open

Legend Gr = with continuous mesh Bp = with shotcrete

Bl = with timber or steel lagging

4.3 Tableau 3

Weathering potential & swelling	Unsupported		Shotcrete	Rock bolts			Steel ribs		Segments		Perforated tubes	Shield or jacked pipe	Special		
				Ungouted	Gouted	Jacked bars	Heavy	Light, yielding	Steel	Concrete			Grouting	Comp. air	Freezing
Exfoliation potential	×		•	Gr _{ev} Bp	Gr _{ev} Bp	Bl _{ev} Bp	Bl _{ev} Bp	Bl _{ev} Bp	•	•					
Dissolution potential (1)	×		•	×	×	×	Bl	Bl	•	•					•
Swelling potential	×		• ⁽²⁾	×		Bp	Bp	Bl _{ev} Bp	Bl _{ev} Bp	•					
Others															

Table 3

Nota 1 — If risk effectively exists (flowing water)

2 — Concrete only recommended if there is no flowing water in ground

Legend Gr = with continuous mesh

Bp = with shotcrete

Bl = with timber or steel lagging

4.3 Tableau 4

Hydrology			Unsupported		Shotcrete	Unencased
Dry						
Rocks R1 to R4	Charge	H1	Permeability	K1 K2 or K3		Dr
				K4		
		H2 or H3		K1 or K2		Dr
				K3 or K4		
Soils R5 and R6		H1		K1 or K2		Dr
		H2 or H3		K3		
				K4		

Nota 1 — Mortar grout, or special wet-curing resins
 2 — Or bentonite (preferable with very high permeability)
 Legend Dr = with drainage Ent = with forepoling

— Water load

H1	< 10 m	Low
H2	10 m - 100 m	Moderate
H3	> 100 m	High

— Mass permeability

K1	< 10^{-8} m/s	Very low to low
K2	10^{-8} to 10^{-6}	Low to moderate
K3	10^{-6} to 10^{-4}	Moderate to high
K4	> 10^{-4} m/s	High to very high

4.3 Tableau 5

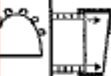
Rock/ Soil cover		Unsupported	Rock bolts			Steel ribs		Segments		Perforated tubes	Shield or jacked pipe	Special					
			CN1 $\sigma_c / \sigma_0 > 4$														
			CN2 $2 < \sigma_c / \sigma_0 < 4$														
Rocks R1 to R4	Cover < D																
	CN1																
	CN2																
	CN3																
Soils R5 and R6	Cover < 1,5 D																
	σ_0 moderate																
	$\sigma_0 > 10$ MPa																

Table 5

Legend Sf = face support if necessary

Facteur limitant → Couverture minimale (profondeur) nécessaire pour développer un effet de voûte au-dessus du tunnel, assurant ainsi la stabilité. Cette valeur minimale est d'environ 1 à 2 fois la largeur (diamètre) du tunnel.

4.3 Tableau 6

Tunnel size	Unsupported		Shotcrete	Rock bolts			Steel ribs		Segments		Perforated tubes	Shield or jacked pipe	Special		
				Ungouted	Grouted	Jacked bars	Heavy	Light, yielding	Steel	Concrete			Grouting	Comp. air	Freezing
$D < 2,50 \text{ m}$			X	X	X	X		•	•			•			
$2,5 \text{ m} < D < 10 \text{ m}$												(1)			
$D > 10 \text{ m}$			Bo •	•	•		X	Bo, Rev				X (1)			

Table 6

Nota 1 — Pipe jacking usually unsuitable for D greater than 4 m

Legend Bo = bolting always necessary

Rev = permanent lining follows close behind

4.3 Tableau 7

Environment	Unsupported		Shotcrete	Rock bolts			Steel ribs		Segments		Perforated tubes	Shield or jacked pipe	Special		
				Ungouted	Grouted	Jacked bars	Heavy	Light, yielding	Steel	Concrete			Grouting	Comp. air	Freezing
Sensitivity to settlement (nearby buildings)	X		Ci, Pm	Bp	Bp	Bp	Act	X	Enf	Bcl		Inj			

Table 7

Legend

- Ci = with ribs (and bolts if necessary) for R4a, R4b, R4c rocks
- Bp = with shotcrete
- Act = active ribs (with jacks) (and if necessary expanding chocks)
- Inj = gaps grouted immediately, or expanding rings
- Bcl = shield
- Enf = with forepoling
- Pm = mechanical pre-splitting (for R2b to R5a ground)

4.3 Recommandations de l'AFTES (GT 7)



Le tableau final résume les 8 critères en prenant en considération que les systèmes de soutènement pertinentes pour chaque critère examiné.

Si l'une des colonnes présente une évaluation faible à très faible → elle sera considérée comme *inappropriée* pour le reste de l'analyse.

Le choix final est fait en considérant les bonnes évaluations en fonction de l'importance relative des critères selon lesquels la méthode choisie et considérée comme favorable.

EXEMPLE :

Tunnel de 12 m de diamètre → Tableau 6

Schiste jointoyé → Tableaux 0, 1, 2, 3

Couverture rocheuse profonde : $\frac{\sigma_c}{\sigma_0} < 2 \rightarrow$ Tableau 5
(pas de tassement, donc pas de tableau 7)

Pas d'eau souterraine → Tableau 4

4.3 Recommandations de l'AFTES (GT 7) : Exemple

Example n° 1 12 m diameter tunnel in jointed shale, deep rock cover ($\sigma_d/\sigma_o < 2$) no groundwater		Unsupported		Shotcrete	Rock bolts			Steel ribs		Segments		Perforated	Shield or jacked pipe	Special		
Criteria	Categories				Ungouted	Gouted	Jacked bars	Heavy	Light, yielding	Steel	Concrete			Grouting	Comp. air	Freezing
1 Mecha. behaviour	R3a			•	•	•	×		•	×	×	×	×		×	
2 Discontinuities	N3 S4	×		•	Gr eu Bp	Gr eu Bp	×	Bl eu Bp	Bl eu Bp				×		×	×
3 Weathering	Exfoliation	×		•	Gr eu Bp	Gr eu Bp	Gr eu Bp	Bl eu Bp	Bl eu Bp	•	•					
4 Hydrology	Dry															
5 Cover	CN3	×		×	•	•	×	×					×			
6 Size	D > 10			Bo	•	•		×	Bo eu Rev				×			
Synthesis		×		×	• Gr eu Bp	• Gr eu Bp	×	×	Bo eu Rev	×	×	×	×	×	×	×

GSI Geological Strength Index

Ce paramètre est *principalement* une *combinaison des systèmes de classification RMR et Q* (combine l'expérience des trois auteurs).

Champ d'application :

- Cette méthode s'adapte aux **massif rocheux discontinus**
- Le **champ de contraintes n'est pas défini**
- **Tout** type de **géométrie** de tunnel (principalement adapté pour des soutènements en béton projeté)
- **Tout** type de **comportement de la massif rocheux**
- **Pas de limitations en termes de couverture**

Limites :

- Cette méthode se focalise sur l'emploi de **béton projeté en indiquant** le type et l'épaisseur du revêtement en béton projeté à mettre en place dans chaque cas.
- Il est important ne pas oublier qu'il s'agit d'une méthode empirique qui donne une **estimation** de dimensionnement du système de soutènement qui doit par la suite faire l'objet d'une vérification (p. ex. analyses numériques).

4.5 Classification du massif par Terzaghi (1946)

Classification des massif rocheux pour la conception des soutènements de tunnels introduite par Terzaghi en 1946 (1^{ère} fois)

Le **POIDS DE LA ROCHE** doit être soutenu par des cintres en acier en fonction du type de massif en considérant l'action de la **gravité** comme force dominante tout en examinant le comportement du massif rocheux.

H_p : Hauteur de la zone détendue au-dessus de la calotte du tunnel développant la charge (donnée en pieds).

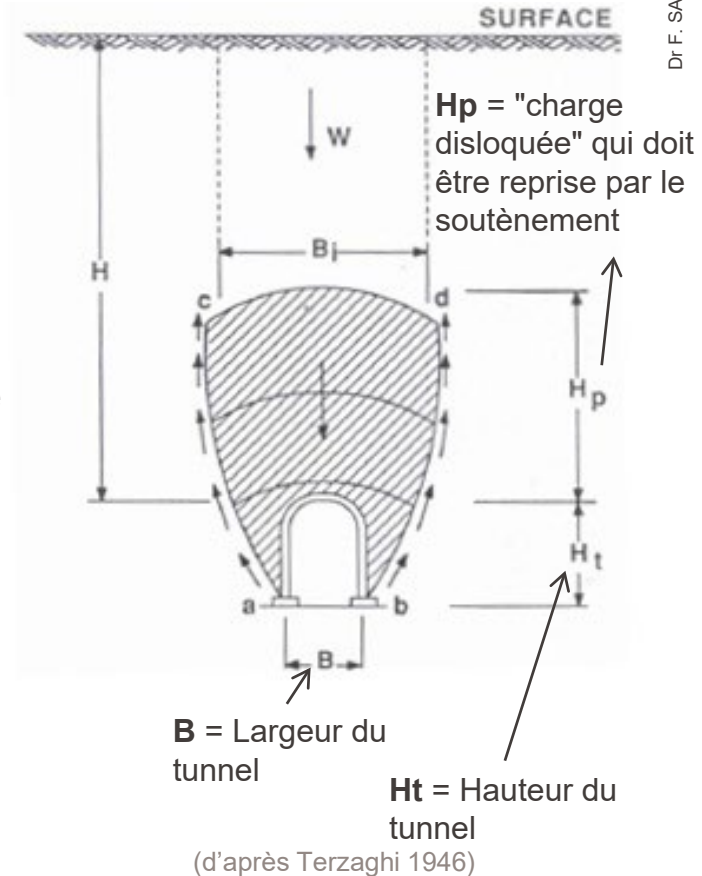
p_v : pression verticale de soutènement = $\gamma \cdot H_p$

Limitation :

B de préférence $\leq 6\text{m}$;

Profondeur $> 1,5(B + H_t)$

Voûte du tunnel située au-dessus de la nappe phréatique (si ce n'est pas le cas, les classes IV, V et VI peuvent être réduites de 50 %).



4.5 Méthode de classification de Terzaghi

<i>Classe de roche</i>	<i>Définition</i>	<i>Facteur de charge des roches H_p (m)</i>	<i>Remarque soutènement</i>
I. Dure et intacte	La roche dure et intacte ne contient pas de joints ni de fractures. Après l'excavation, la roche peut présenter des éclatements et des épaufrures au niveau du front d'excavation.	0	Un revêtement léger n'est nécessaire qu'en cas d'écaillage ou d'éclatement.
II. Dure, Stratifiée et schisteuse	Les roches dures sont constituées de strates et de couches épaisses. L'interface entre les couches est cimentée. L'éclatement et l'écaillage au niveau du front d'excavation sont fréquents.	0 à 0.5 B	Support léger pour la protection contre l'écaillage. La charge peut varier d'une couche à l'autre.

4.5 Méthode de classification de Terzaghi



<i>Classe de roche</i>	<i>Définition</i>	<i>Facteur de charge des roches H_p (m)</i>	<i>Remarque soutènement</i>
III. Massive, avec un nombre modéré de discontinuités	Les roches massives contiennent des joints et des fractures très espacés. La taille des blocs est importante. Les joints sont imbriqués les uns dans les autres. Les piédroits verticaux n'ont pas besoin d'être soutenus. Des écaillages peuvent se produire.	0 à 0.25 B	Support léger pour la protection contre l'écaillage.
IV. Modérément en blocs et fissurée	La roche contient des joints modérément espacés. La roche n'est pas altérée chimiquement. Les joints ne sont pas bien imbriqués et présentent de petites ouvertures. Les piédroits verticaux n'ont pas besoin d'être soutenus. Des écaillages peuvent se produire.	0.25 B à 0.35 (B + H_t)	Pas de pression latérale.

4.5 Méthode de classification de Terzaghi

<i>Classe de roche</i>	<i>Définition</i>	<i>Facteur de charge des roches H_p (m)</i>	<i>Remarque soutènement</i>
V. Très fissure et en blocs	La roche n'est pas altérée chimiquement et contient des joints très rapprochés. Les joints sont ouverts et séparés. Les piédroits verticaux ont besoin d'être soutenus.	$(0.35 \text{ à } 1.1) (B + H_t)$	Pression latérale faible ou nulle.
VI. Complètement broyée mais chimiquement intacte	La roche n'est pas altérée chimiquement mais elle est très fracturée avec de petits fragments. Les fragments sont lâches et ne sont pas imbriqués les uns dans les autres. Le front d'excavation dans ce matériau nécessite d'être soutenu.	$1.1 (B + H_t)$	Pression latérale considérable. Perte de résistance causé par l'eau à la base du tunnel. Utiliser des cintres circulaires ou prévoir un soutènement des pieds des cintres.

4.5 Méthode de classification de Terzaghi

<i>Classe de roche</i>	<i>Définition</i>	<i>Facteur de charge des roches H_p (m)</i>	<i>Remarque soutènement</i>
VII. Roche poussante à profondeur modérée	La roche converge lentement sans augmentation perceptible du volume. La profondeur modérée est considérée comme étant comprise entre 150 et 1000 m.	$(1.1 \text{ à } 2.1)(B + H_t)$	Forte pression latérale. Un radier voûté est nécessaire. Cintres circulaires recommandés.
VIII. Roche poussante à grande profondeur	La roche converge lentement sans augmentation perceptible du volume. Une grande profondeur est considérée comme supérieure à 1000 m.	$(2.1 \text{ à } 4.5)(B + H_t)$	
IX. Roche gonflante	Le volume de la roche se dilate (convergence) en raison du gonflement des minéraux argileux de la roche en présence d'humidité.	Jusqu'à 75 m (= 250 pieds), indépendamment de B et de H_t	Cintres circulaires requises. Dans les cas extrêmes, utiliser un soutènement coulissant.

4.5 Méthode de Terzaghi modifiée par Deere et al. (1970)



- Deere et al. 1970 ont considéré le **massif rocheux comme partie intégrante du système de soutènement**
- Cette hypothèse n'est manifestement **pas applicable aux massif rocheux détendus (disloqués) et fortement broyés.**
- Une autre hypothèse importante concerne la méthode d'excavation :
 - **l'excavation à la machine réduit la charge de la roche d'environ 20-25%.**

4.5 Méthode Terzaghi modifiée par Deere et al. (1970)



Condition de la roche	RQD	Hp (m)	Observations
Dure et intacte	95-100	0	= Terzaghi 1946
Dure, Stratifiée et schisteuse	90-99	0-0.5B	= Terzaghi 1946
Massive, avec un nombre modéré de discontinuités	85-95	0-0.25B	= Terzaghi 1946
Modérément en blocs et fissurée	75-85	0.25B-0.35(B+Ht)	Réduit de ~50% par rapport à la valeur de Terzaghi en raison du fait que la nappe phréatique a une faible influence sur la charge de la roche (Terzaghi, 1946 ; Brekke, 1968).
Très fissure et en blocs	30-75	(0.2-0.6)(B+Ht)	
Complètement broyée mais chimiquement intacte	3-30	(0.6-1.1)(B+Ht)	
Sable et gravier	0-3	(1.1-1.4)(B+Ht)	
Roche poussante à profondeur modérée	NA	(1.1-2.1)(B+Ht)	= Terzaghi 1946
Roche poussante à grande profondeur	NA	(2.1-4.5)(B+Ht)	= Terzaghi 1946
Roche gonflante	NA	Jusqu'à 80 m indépend. de (B+Ht)	= Terzaghi 1946

4.5 Soutènements pour tunnels de 6 à 12 m de diamètre en roche par Deere et al. (1970)



RQD	Méthode constr.	Cintres en acier		Boulons		Béton projeté		Soutènements addition.
		Poids	Espacement	Maillage	Exigences additionnelles	Voûte	Piédroits	
>90	TBM	Léger	Aucun à occasionnel	Aucun à local	Rare	Aucun à local	Aucun	Aucun
	D&B	Léger	Aucun à occasionnel	Aucun à local	Rare	Aucun à local	Aucun	Aucun
75-90	TBM	Léger	Occasionnel à 1.5-1.8 m	Local à 1.5-1.8 m	Mailles ou sangles occasion.	Local 5-7.5 cm	Aucun	Aucun
	D&B	Léger	1.5-1.8 m	1.5-1.8 m	Mailles ou sangles occasion	Local 5-7.5 cm	Aucun	Aucun
50-75	TBM	Léger - Moyen	1.2-1.5 m	1.2-1.8 m	Mailles et sangles	5-10 cm	Aucun	Boulons
	D&B	Léger – Moyen	0.6-1.2 m	0.9-1.5 m	Mailles et sangles	> 10 cm	> 10 cm	Boulons
25-50	TBM	Moyen. fermé	0.9-1.5 m	0.9-1.5 m	Mailles et sangles	10-15 cm	10-15 cm	Boulons 1.2-1.8 m