

Mécanique des roches appliquée aux ouvrages souterrains

Méthode de classification des terrains et
utilisation dans la conception des projets

ENPC - COTUN

Intervenants : Fabien BINET, Julian MARLINGE

(BE TERRASOL, groupe SETEC)



École des Ponts

ParisTech



p.1 **Classifications AFTES**

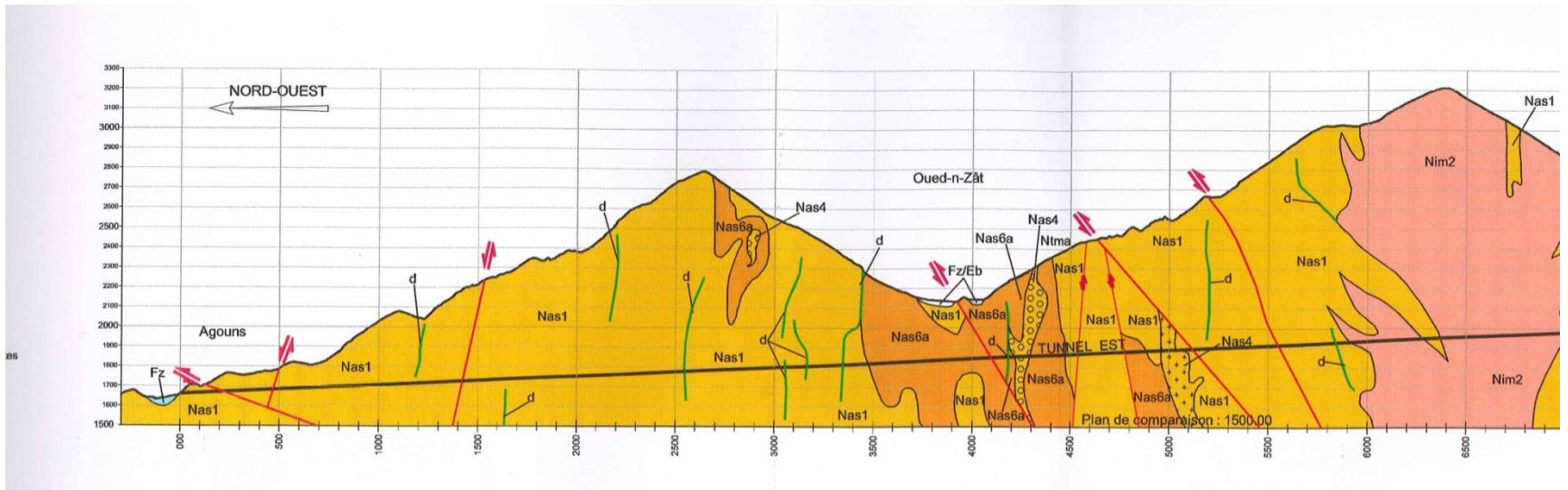
p.2 **La classification de BARTON (« Q System »)**

p.3 **La Classification de BIENIAWSKI (RMR)**

- ✓ **Objectif : évaluer les facteurs nécessaires pour établir un projet d'ouvrage souterrain.**
- ✓ **Moyens : reconnaissances géologiques, géométriques, puis géotechniques des terrains.**
- ✓ **Finalité : définir des zones homogènes pour le dimensionnement du projet.**

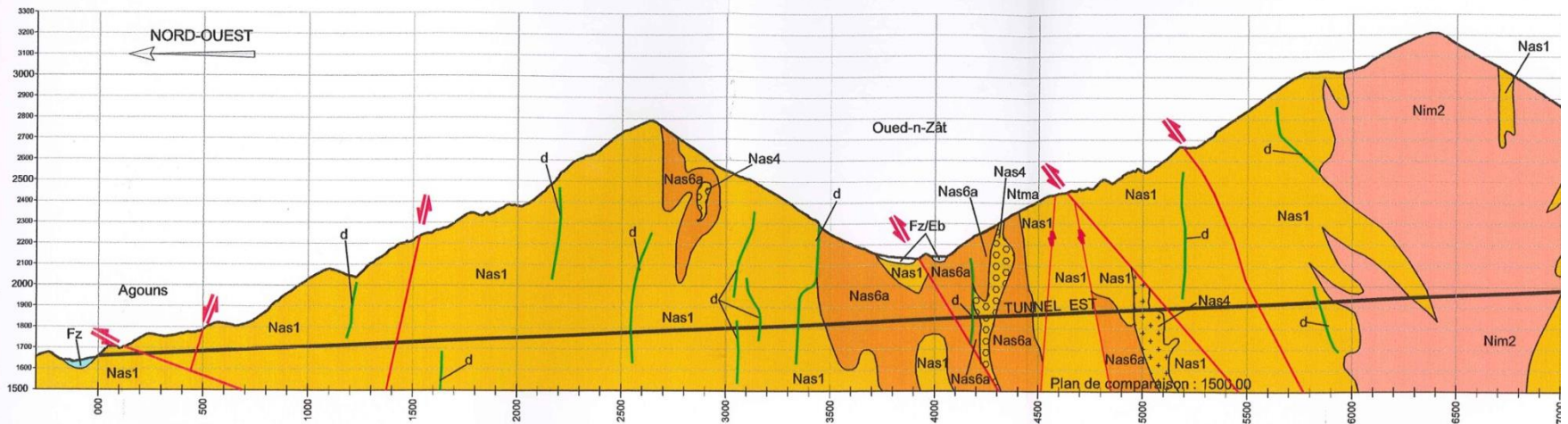
- ✓ **Utilisées essentiellement en études préliminaires (faisabilité, APS).**
- ✓ **Méthodes simples et rapides**

Exemple de profil géologique avec classes AFTES des terrains



Caractéristiques de la matrice	Résistance	RC 3				RC 5		RC3		RC5								
	Déformabilité matrice	DE 1				DE 3		DE 1		DE 3								
	Altération	AM2																
Caractéristiques du massif	Contrainte lithostatique	CN 1				CN 2		CN 1	CN 3		CN 1	CN 2		CN 3				
	R Q D	4-3	4	RQD 4-5		RQD 3-4		4-5	RQD 3-4				RQD 4-5					
	Déformabilité massif	DM 1		DM 2		DM 1		DM 2		DM 1				DM 3		DM 2		DM 1
Conditions hydrauliques	Péreméabilité	K2-K3																
	Charge	H0		H1	H3	H4												

Exemple de profil géologique avec classes de massif rocheux RMR



Description géologique	Lithologie	Granodiorite leucocrate, filons mafiques occasionnels				Granite à gros cristaux, filons mafique occasionnels		Granodiorite leucocrate, filons mafiques occasionnels		Monzogranite	
		F	F	F	F	Ch	F	Ch			
Classification RMR du massif rocheux	Classe II	20		10						10	
	Classe III	80	40	70	40	60	20	40	20	70	30
	Classe IV	20	50	20	50	40	40	50	60	20	50
	Classe V		10		10		40	10	20		20

- **Basée sur les recommandations du groupe de travail N°1**
« caractérisation des massifs rocheux utile à l'étude et à la réalisation des ouvrages souterrains (juin 2003)
- **Paramètres utiles à la description du massif :**
 - ✓ **Conditions hydrogéologiques : charge hydraulique, perméabilité**
 - ✓ **Discontinuités du massif rocheux : densité de fracturation, orientation, organisation en familles, comportement mécanique**
 - ✓ **Caractéristiques mécaniques des terrains : Identification, Résistance, Gonflement, Altérabilité.**
 - ✓ **Les contraintes naturelles**
 - ✓ **La déformabilité du massif**

Les études géologiques concernant le projet doivent comprendre :

- ✓ carte des affleurements,
- ✓ carte des formations rencontrées et phénomènes superficiels (fontis, glissements, ...)
- ✓ description des couches rencontrées (importance du contexte régional)

Dénominations recommandées des roches et des principales familles pétrographiques

ROCHES ERUPTIVES	Famille des Granites	<u>Granite</u> , granulite, granodiorite, <u>syénite</u> , microgranite, rhyolite, rhyodacite, trachyte, tuf...
	Famille des Diorites	<u>Diorite</u> , diorite quartzique, microdiorite, andésite, dacite, trachyandésite, lamprophyre...
	Famille des Basaltes et Gabbros	<u>Gabbro</u> , dolérite, diabase, ophite <u>basalte</u> , trapp, serpentinite, péridotite
ROCHES METAMORPHIQUES	Roches métamorphiques massives	<u>Gneiss</u> , amphibolites, cornéennes <u>quartzites</u> , marbres, calcaires cristallins, leptynite
	Roches métamorphiques schisteuses	Schistes, micaschistes, phyllades ardoises, calcschistes, schistes cristallins
ROCHES SEDIMENTAIRES	Roches sédimentaires carbonatées	<u>Calcaires</u> , <u>craies</u> , dolomies, <u>cargneules</u> , <u>travertins</u>
	Roches sédimentaires siliceuses	<u>Grès</u> , grès quartzitiques, molasses <u>meulière</u> , <u>silex</u> , arkoses,
	Roches sédimentaires carbonato-silicatées	Marnes, argiles, grauwack
	Roches salines	Sel gemme, roches sulfatées (gypse, anhydrite), potasse

Etat d'altération du massif rocheux.

CLASSES AFTES	TERMES DESCRIPTIFS DU DEGRE D'ALTERATION DU MASSIF ROCHEUX
AM1a	Rocher sain
AM1b	Rocher faiblement altéré Altération limitée aux surfaces de discontinuités principales ; rocher sain dans la masse
AM2	Rocher légèrement altéré Altération faible dans la masse rocheuse mais bien développée sur les discontinuités
AM3	Rocher modérément altéré Altération bien visible dans toute la masse rocheuse mais matériau non friable
AM4	Rocher très altéré Forte altération dans toute la masse rocheuse
AM5	Rocher complètement altéré La texture et les fissures importantes sont toujours visibles
AM6	Rocher complètement décomposé Texture et fissuration non reconnaissables Sol résiduel - Pas de remaniement

Tableau 16 : Description et classes d'état d'altération météorique des massifs rocheux.

Charge hydraulique

CLASSES	VALEURS DE LA CHARGE HYDRAULIQUE INITIALE H (comptée en mètres au dessus du radier du tunnel)	TERMES DESCRIPTIFS DE LA CHARGE HYDRAULIQUE
H 0	Niveau situé en dessous du radier	Charge nulle
H 1	< 5	Charge faible
H 2	5 à 20	Charge moyenne
H 3	20 à 100	Charge forte
H 4	> 100	Charge très forte

Tableau 19 - Classes de charge hydraulique

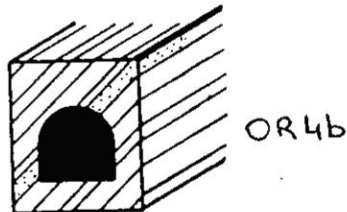
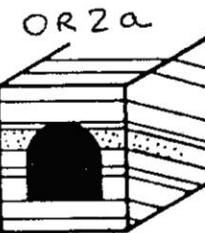
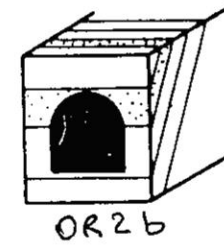
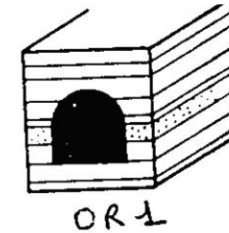
Perméabilité

CLASSES	VALEURS DE LA PERMEABILITE DU MASSIF K_M (m/s)	TERMES DESCRIPTIFS DE LA PERMEABILITE DU MASSIF
K 1	$< 10^{-8}$	Perméabilité faible
K 2	10^{-8} à 10^{-6}	Perméabilité moyenne
K 3	10^{-6} à 10^{-4}	Perméabilité forte
K 4	$> 10^{-4}$	Perméabilité très forte
K 5	Pratiquement infinie	De type karstique

Tableau 20 - Classes de perméabilité du massif

Orientation des discontinuités

CLASSES	ORIENTATION DES DISCONTINUITES		CONDITIONS DU CREUSEMENT	
	Angle entre pendage et axe d'avancement du creusement α°	Pendage β°		
OR 1	quelconque	0 à 20°	en bancs sub-horizontaux	
OR 2	a	0 à 30°	en travers banc	(a) avec le pendage
	b			(b) contre le pendage
OR 3	30 à 65°	20 à 90°	conditions intermédiaires	
OR 4	a	20 à 60°	en direction	(a) pendage moyen
	b	60 à 90°		(b) pendage fort



RQD

Le RQD, exprimé en %, est la somme, comptée sur une longueur de passe de 1 m, des longueurs des carottes supérieures à 10 cm, rapportée à la longueur de la passe.

CLASSES	VALEURS DE RQD %	TERMES DESCRIPTIFS DE QUALITE GLOBALE DU MASSIF ROCHEUX (D'après D. Deere)
RQD 1	90 à 100	Excellente (excellent)*
RQD 2	75 à 90	Bonne (good)*
RQD 3	50 à 75	Moyenne (fair)*
RQD 4	25 à 50	Mauvaise (poor)*
RQD 5	0 à 25	Très mauvaise (very poor)*

Tableau 13
Classes de qualité globale du massif rocheux estimée à partir du RQD

* d'après D. Deere

Indice de discontinuité ID

L'indice ID est défini comme la moyenne des intervalles découpés par les discontinuités successives le long d'une ligne de mesure

CLASSES	VALEURS DE L'INDICE ID cm	TERMES DESCRIPTIFS DE LA DENSITE DE DISCONTINUITÉ
ID 1	> 200	Densité de discontinuités très faible
ID 2	60-200	Densité de discontinuités faible
ID 3	20-60	Densité de discontinuités moyenne
ID 4	6-20	Densité de discontinuités forte
ID 5	< 6	Densité de discontinuités très forte

Tableau 14
Classes de densité
de discontinuités le
long d'une ligne de
mesure

Organisation en familles

Nombre de famille

CLASSES		TERMES DESCRIPTIFS DU NOMBRE DE FAMILLES DE DISCONTINUITES
N 1		Peu de discontinuité ou quelques discontinuités diffuses
N 2	a	Une famille principale
	b	Une famille principale et des discontinuités diffuses
N 3	a	Deux familles principales
	b	Deux familles principales et des discontinuités diffuses
N 4	a	Trois (et plus) familles principales
	b	Trois (et plus) familles principales et des discontinuités diffuses
N 5		Nombreuses discontinuités sans organisation

Tableau 10 - Classes et description suivant le nombre de familles de discontinuités

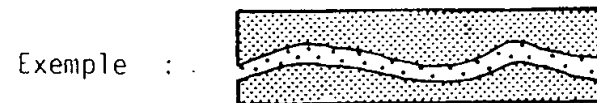
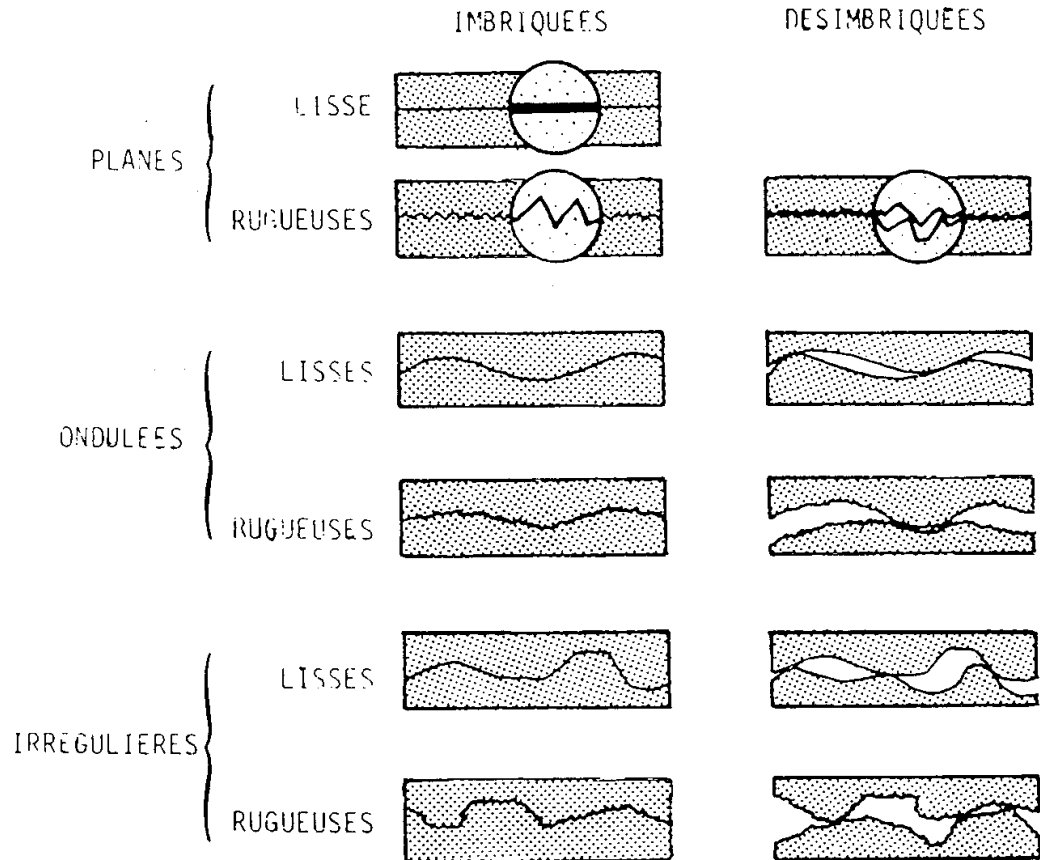
Organisation en familles

Espacement des discontinuités de chaque famille

CLASSES	VALEURS D'ESPACEMENT cm	TERMES DESCRIPTIFS D'ESPACEMENT DES DISCONTINUITES D'UNE MEME FAMILLE
ES 1	> 200	Discontinuités très espacées
ES 2	60 à 200	Discontinuités espacées
ES 3	20 à 60	Discontinuités moyennement espacées
ES 4	6 à 20	Discontinuités rapprochées
ES 5	< 6	Discontinuités très rapprochées

Tableau 12 - Classes d'espacement des discontinuités

Comportement mécanique des discontinuités



discontinuité ondulée lisse avec remplissage

Indice de continuité de la roche : calcul de la vitesse théorique V_p^* de propagation des ondes

La composition minéralogique d'une roche déterminée en lame mince permet de calculer la valeur théorique V_p^* de la célérité des ondes longitudinales du matériau par un simple calcul de pondération à partir des valeurs de la célérité dans chaque minéral présent.

$$\frac{1}{V_p^*} = \sum_i \frac{C_i}{V_{li}} \quad \text{avec} \quad \begin{array}{l} (V_{li} \text{ célérité dans } i\text{ème minéral}) \\ (C_i \text{ proportion du } i\text{ème minéral}) \end{array}$$

ANNEXE 2

MASSE VOLUMIQUE ET VITESSE THEORIQUE VP DES ONDES P DANS LES MINERAUX

Minéraux	Masse volumique ρ_p (g/cm ³)	Vp (m/s)*
Amphiboles	2,98 - 3,20	7 200
Augite	3,2 - 3,4	7 200
Biotite	2,90	5 130
Calcite	2,71	6 660
Dolomite	2,87	7 900
Magnétite	5,17 - 5,18	7 410
Muscovite	2,83	5 810
Oligoclase	2,64 - 2,67	6 260
Olivine	3,25 - 3,40	8 400
Orthose	2,57	5 690
Quartz	2,65	6 050

* d'après la norme P18-556

ORDRE DE GRANDEUR DE LA VITESSE THEORIQUE VP* DES ONDES P DANS QUELQUES ROCHES SUPPOSEES SAINES ET NON POREUSES

Roches	Vp* (m/s)
Granites et rhyolites	6 000
Diorites	6 500
Gneiss	6 000
Amphibolites	6 500
Calcaires	6 500
Roches siliceuses	6 000

* A utiliser au besoin dans la détermination de l'indice de continuité Ic

Identification : indice de continuité de la roche

A partir des vitesses de propagation des ondes : théorique V_p^* en fonction de la minéralogie et mesuré sur échantillon V_p

CLASSES	VALEURS DE L'INDICE DE CONTINUITÉ IC	VALEURS DE L'INDICE DE CONTINUITÉ IC
IC 1	IC > 90 %	Continuité très forte
IC 2	75 % < IC < 90 %	Continuité forte
IC 3	50 % < IC < 75 %	Continuité moyenne
IC 4	25 % < IC < 50 %	Continuité faible
IC 5	IC < 25 %	Continuité très faible

Tableau 3 - Classes de continuité de la matrice rocheuse

$$\frac{1}{V_p^*} = \sum \frac{c_i}{V_{p_i}}$$

$$IC(\%) = 100 \times (V_p/V_p^*)$$

Résistance de la roche

CLASSES	VALEURS DE RESISTANCE EN COMPRESSION UNIAXIALE σ_c	TERMES DESCRIPTIFS DE RESISTANCE
RC 1	$\sigma_c > 200 \text{ MPa}$	Résistance extrêmement élevée
RC 2	$100 \text{ MPa} < \sigma_c < 200 \text{ MPa}$	Résistance très élevée
RC 3	$50 \text{ MPa} < \sigma_c < 100 \text{ MPa}$	Résistance élevée
RC 4	$25 \text{ MPa} < \sigma_c < 50 \text{ MPa}$	Résistance moyenne
RC 5	$5 \text{ MPa} < \sigma_c < 25 \text{ MPa}$	Résistance faible
RC 6	$1 \text{ MPa} < \sigma_c < 5 \text{ MPa}$	Résistance très faible
RC 7	$\sigma_c < 1 \text{ MPa}$	Résistance extrêmement faible

Tableau 5 - Classes de résistance en compression uniaxiale

Résistance de la roche

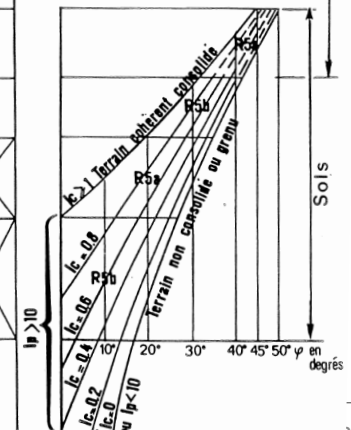
Autre classification issue de la recommandation du GT7
« soutènement et revêtement »

Catégorie	Désignation	Exemples	σ_c (MPa)
R1	Roche de résistance très élevée	Quartzites et basaltes de résistance élevée	>200
R2a	Roche de résistance élevée	Granits très résistants, porphyres, grès et calcaires de très haute résistance	200 à 120
R2b		Granits, grès et calcaires de très bonne tenue ou légèrement dolitis, marbres, dolomies, conglomérats compacts	120 à 60
R3a	Roche de résistance moyenne	Grès ordinaires, schistes siliceux ou grès schisteux, gneiss	60 à 40
R3b		Schistes argileux, grès et calcaires de résistance moyenne, marnes compactes, conglomérats peu consistants	40 à 20
R4	Roche de faible résistance	Schistes ou calcaires tendres ou très fracturés, gypses, grès très fracturés ou marneux, poudingues, craie	20 à 6
R5a	Roche de très faible résistance et sols cohérents consolidés	Marnes sableuses ou argileuses, sables marneux gypses ou craies altérés	6 à 0,5
R5b		Alluvions graveleuses sables argileux normalement consolidés	<0,5
R6a	Sols plastiques ou peu consolidés	Marnes altérées, argiles franches, sables argileux limons fins	
R6b		Tourbes silts et vases peu consolidés, sables fins sans cohésion	

$$I_p = \text{Indice de plasticité} = \frac{W_L - W_p}{W_p}$$

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

W_L et W_p = Limites d'Atterberg
 W = Teneur en eau naturelle



Roches

Sols

Gonflement :

rechercher la présence de minéraux gonflants (argiles, hydroxydes, sulfates, anhydrite ...).

Altérabilité :

rechercher la présence de minéraux sensibles :

- ✓ à l'eau (feldspaths, micas, gypse),
- ✓ au gel,
- ✓ aux variations de contraintes
- ✓ (essais spécifiques à réaliser)

Profondeur de l'excavation

Caractérisée par le rapport entre la résistance σ_c et la contrainte initiale σ^0
(\leftrightarrow rester dans le domaine élastique ou non)

CLASSES	RAPPORT σ_c / σ^0	DESCRIPTION DE L'ETAT DES CONTRAINTES NATURELLES
CN 1	> 4	Faible (a)
CN 2	4 à 2	Moyen (b)
CN 3	< 2	Fort (c)

✧ (a) classe CN 1 : la résistance de la roche est suffisante pour assurer la stabilité; un soutènement peut être cependant rendu nécessaire par la présence de discontinuités.

✧ (b) classe CN 2 : des ruptures peuvent se produire sur les parois.

✧ (c) classe CN 3 : la résistance de la roche est nettement insuffisante.

Attention à bien distinguer les paramètres du massif (échelle décimétrique)

Classe DM : modules de déformation déterminés à partir d'essais en place pour tenir compte de l'influence de la fracturation

CLASSES	VALEURS DU MODULE DE DEFORMATION DU MASSIF E_{Mas} (GPa)	TERMES DESCRIPTIFS DE LA DEFORMABILITE DU MASSIF
$D_M 1$	> 30	Massif très peu déformable
$D_M 2$	10 à 30	Massif peu déformable
$D_M 3$	3 à 10	Massif moyennement déformable
$D_M 4$	1 à 3	Massif déformable
$D_M 5$	0,1 à 1	Massif très déformable
$D_M 6$	< 0,1	Massif extrêmement déformable

Tableau 18 - Classes de déformabilité du massif rocheux

... des paramètres de la matrice (échelle décimétrique)

Classe DE : modules de déformation déterminés à partir d'essais sur échantillons

CLASSES	VALEURS DU MODULE DE YOUNG	TERMES DESCRIPTIFS DE RAIDEUR
DE 1	$E > 50 \text{ GPa}$	Matrice extrêmement raide
DE 2	$20 \text{ GPa} < E < 50 \text{ GPa}$	Matrice très raide
DE 3	$5 \text{ GPa} < E < 20 \text{ GPa}$	Matrice raide
DE 4	$1 \text{ GPa} < E < 5 \text{ GPa}$	Matrice moyennement raide
DE 5	$0,1 \text{ GPa} < E < 1 \text{ GPa}$	Matrice peu raide
DE 6	$E < 0,1 \text{ GPa}$	Matrice très peu raide

Tableau 4 - Classes de raideur (inverse de la déformabilité) de la matrice rocheuse

Utilisation de cette classification AFTES dans le choix d'un soutènement (GT7, juillet 1982)

- ✓ Critères à prendre en considération pour orienter le choix d'un type de soutènement

MAIS

- ✓ Ne permet pas le dimensionnement de ce soutènement

1\ Méthode AFTES \ 1.7 – Utilisation de la classification AFTES

Différents tableaux correspondants aux différents critères importants, et précisant si tel type de soutènement est plus ou moins bien adapté vis-à-vis de ce critère

- soit particulièrement recommandé (nettement favorable)
- soit possible à condition que d'autres critères soient particulièrement favorables (plutôt favorable)
- soit très mal adapté bien qu'éventuellement possible (plutôt défavorable)
- soit en principe impossible (nettement défavorable).















La superposition des résultats relatifs à chacun des critères doit permettre de sélectionner le type de soutènement le plus approprié.

+ superposition des critères

1\ Méthode AFTES \ 1.7 – Utilisation de la classification AFTES

Critère : Comportement mécanique

Tableau : 1

Comportement mécanique	Pas de soutènement	Béton projeté	Boulons			Cintres		Voussoirs		Tubes préforés	Bouclier ou pousse tube	Procédés spéciaux		
			a ancrage ponctuel	a ancrage réparti	barres foncées	lourds	legers coulissants	plaques métal assemblées	beton			Injection	Air comprimé	Congélation
														
R 1	•		•					×	×	×			×	×
R 2 a	•		•					×	×	×			×	×
R 2 b		•	•	•				×	×	×			×	×
R 3 a		•	•	•			•	×	×	×			×	
R 3 b		•	•	•			•		×	×	×			
R 4	×	•	×			•	•							
R 5 a		•				•	•	•						
R 5 b				×		•	•	•	•	•	•	•		
R 6 a					×	Enf	Enf	Enf	Bcl		•	•		
R 6 b						Enf Bif	Enf Bif	Enf Bif	Bcl Bif	Bif	•	•		•

LEGENDE

Enf : avec enfilage

Bif : avec blindage du front

Bcl : avec bouclier

Critère : Discontinuités Explosif avec pré découpage

Tableau: 2
Discontinuités
(Cas où l'excavation est faite à l'explosif avec découpage)
1/Matériaux rocheux (R1 à R4)

			Pas de soutènement	Béton projeté	Boulons			Cintres		Voussoirs		Tubes préforés	Bouclier ou pousse tube	Procédés spéciaux			
Nombre de familles	Orientation	espacement (1)			à ancrage ponctuel	à ancrage réparti	barres foncées	lourds	légers coulissants	plaques métal assemblées	béton			Injection	Air comprimé	Congélation	
		(1)															
N1			•							×	×						
N2	Or2 ou Or3	S1 à S3	•							×	×			×			
N2 N3 ou N4	quelconque	S1			•					×	×			×			
		S2			•	•				×	×			×			
		S3			•	Gr	Gr					×					×
		S4	×		•	Gr ou Bp	Gr ou Bp		•	•							×
		S5	×		•	×	Bp		•	•			×				×
N5			×	•	×	Bp		•	•	•		×	•	×	×		

Explosif avec pré découpage

2/ Sols (R5 et R6)

sans objet

NOTA: 1/ Pour la famille la plus dense
2/ Scellement au mortier de préférence à la résine lorsque les fissures sont ouvertes

LEGENDE: Gr : avec grillage continu
Bp : avec béton projeté
Bl : avec blindage bois ou métallique

Critère : Discontinuités Explosif sans pré découpage

Tableau : 2 bis Discontinuités (Cas où l'excavation est faite à l'explosif sans découpage) 1/ Matériaux rocheux (Classes R1 à R4)			Pas de soutènement	Béton projeté	Boulons			Gintres		Voussoirs		Tubes préforés	Bouclier ou pousse-tube	Procédés spéciaux			
Nombre de familles	Orientation	espacement (1)			à ancrage ponctuel	à ancrage réparti (2)	barres fongées	lourds	légers coulissants	plaques métal assemblées	béton			Injection	Air comprimé	Congélation	
			quelconque N1 à N4	quelconque	S1			•	•	×	•	×	×	×	×	×	×
S2					Gr	Gr	•	•	×	×	×	×	×	×	×	×	×
S3	×				•	Gr	Gr	•	•		×	×	×	×	×	×	×
S4 ou S5	×				•	×	Bp	•	•			×	×	×	×	×	×
N5			×		•	×	Bp	•	•			×	×	×	×	×	

2/ Sols (R5 et R6)

sans objet

NOTA : 1/ Pour la famille la plus dense

2/ Scellement au mortier de préférence à la résine lorsque les fissures sont ouvertes

LEGENDE : Gr : avec grillage continu
Bp : avec béton projeté
Bl : avec blindage bois ou métallique

1\ Méthode AFTES \ 1.7 – Utilisation de la classification AFTES

Critère : Discontinuités

Excavation mécanique (hors explosif)

Tableau: 2 ^{ter} Discontinuités Cas de l'excavation mécanique 1/ Matériaux rocheux (Classes R1 à R4)			Pas de soutènement	Béton projeté	Boulons			Cintres		Voussoirs		Tubes préforés	Bouclier ou pousse tube	Procédés spéciaux			
Nombre de familles	Orientation	espacement (1)			a ancrage ponctuel	a ancrage réparti	barres foncées	lourds	légers coulissants	plaques métal assemblées	béton			Injection	Air comprimé	Congélation	
			N1			•											
N2	Or2 ou Or3	S1 à S3															
N2		S1 / S2			•												
N3		S3			•	•			•								
N3 ou N4		S4		•	Gr ou Bp	Gr ou Bp			•								
		S5	×	•	Gr ou Bp	Gr ou Bp		Bl ou Bp	Bl ou Bp	•							
N5			×	•	×	•		Bl ou Bp	Bl ou Bp	•							

2/ Sols (R5 et R6)















sans objet

NOTA : 1/ Pour la famille la plus dense
2/ Scellement au mortier de préférence
à la résine lorsque les fissures sont ouvertes

LEGENDE : Gr : avec grillage continu
Bp : avec béton projeté
Bl : avec blindage bois ou métallique

1\ Méthode AFTES \ 1.7 – Utilisation de la classification AFTES

Critère : Altérabilité – gonflement

Tableau:3 \ Altérabilité - gonflement	Pas de soutènement		Béton projeté	Boulons			Cintres		Voussoirs		Tubes préforés	Bouclier ou pousse tube	Procédés spéciaux		
				à ancrage ponctuel	à ancrage réparti	barres foncées	lourds	légers coulissants	plaques métal assemblées	béton			Injection	Air comprimé	Congélation
															
Terrains susceptibles de délitage	×		•	Gr • Bp	Gr • Bp	Bl • Bp	Bl • Bp	Bl • Bp	•	•					
Terrains susceptibles de dissolution (1)	×		•	×	×	×	Bl •	Bl •	•	•					•
Terrains gonflants	×		• (2)	×	Bp	Bp	Bl • Bp	Bl • Bp		•					
Autres terrains															

NOTA : 1 / Dans la mesure où ils sont placés dans des conditions où le risque existe (circulations d'eau).

2 / Le béton n'est recommandé qu'en absence de circulations d'eau dans le terrain

LEGENDE : Gr : avec grillage continu
 Bp : avec béton projeté
 Bl : avec blindage métallique ou bois














Critère : Hydrogéologie

Tableau: 4			Pas de soutènement	Béton projeté	Boulons			Cintres		Voussoirs		Tubes perforés	Bouclier ou pousse tube	Procédés spéciaux				
Hydrologie					a ancrage ponctuel	a ancrage réparti	barres foncées	lourds	légers coulissants	plaques métal assemblées	béton			Injection	Air comprimé	Congélation		
Hors d'eau						(1)												
Roches R1 à R4	Charge	H1	Perméabilité	K1 K2 ou K3	Dr	•	•	×	•	•				×				
				K4	×	•	•	×	•	•					•			
Sols R5 et R6	Charge	H1 H2 ou H3	Perméabilité	K1 ou K2	Dr	•	•	×	•					×				
				K3 ou K4	×	•	•	×	•						•			
				K1 ou K2	×	×	×	×	•	•	•	•				×		
				K3	×	×	×	×	Enf	Enf	Enf	Bcl	•	•	•	•	•	
				K4	×	×	×	×	Enf Bif	Enf Bif	Enf Bif	Bcl Bif	Bif	•	•	•	•	

NOTA : 1/ Scellement au mortier ou aux résines spéciales à durcissement en présence d'eau
2/ ou bentonite (préférable dans les cas de très forte perméabilité)

LEGENDE : **Dr** : avec drainage
Enf : avec enfilage
Bif : avec blindage front
Bcl : avec bouclier

Critère : Couverture

Tableau:5 Couverture		Pas de soutènement	Béton projeté	Boulons			Cintres		Voussoirs		Tubes préforés	Bouclier ou pousse tube	Procédés spéciaux		
				à ancrage ponctuel	à ancrage réparti	barres foncées	lourds	légers coulissants	plaques métal assemblées	béton			Injection	Air comprimé	Congelation
															
Roches R1 à R4	Couverture < D	×		×	×	×	•	•				×		×	
	CN1	•				×						×			
	CN2	×				×						×			
	CN3	×		×	• _{Sf}	• _{Sf}	×	Sf	Sf	Sf	Sf	×			
Sols R5 et R6	Couverture < 1,5 D	×	×	×	×	×	•	•	•	•	•	•	•	•	
	σ^0 modéré	×	×	×	×	×									
	$\sigma^0 > 10$ MPa	×	×	×	Sf	Sf	Sf	Sf	Sf	•	Sf	• _{Sf}	•		

LEGENDE















Sf: avec soutènement du front (éventuel)

1\ Méthode AFTES \ 1.7 – Utilisation de la classification AFTES

Critère : Dimensions de la galerie et environnement

Tableau: 6















Dimension de la galerie

	Pos de soutènement	Béton projeté	Boulons			Cintres		Voussoirs		Tubes préforés	Bouclier ou pousse tube	Procédés spéciaux		
			à ancrage ponctuel	à ancrage réparti	barres foncées	lourds	légers coulissants	plaques métal assemblées	béton			Injection	Air comprimé	Congélation
$D < 2,50 \text{ m}$														
$2,50 \text{ m} < D < 10 \text{ m}$											(1)			
$D > 10 \text{ m}$		Bc				×	Bo, Rev				×	(1)		

NOTA : 1 / Pousse tube en principe à exclure pour $D > 4 \text{ m}$

LEGENDE : **Bo** : avec boulonnage obligatoire

Rev : avec mise en place rapprochée du revêtement définitif

Environnement														
Sensibilité aux tassements (ouvrages proches)	×	Ci, Pm, Bp	Bp	Bp	Act	×	Enf	Bcl		Inj				

Légende : Ci : avec cintres et (éventuellement) boulons pour les terrains de classes R4a, R4b ou R4c

Bp : avec béton projeté

Act : cintres actifs (à vérins) et (éventuellement) calages expansibles

Inj : injections de bourrage immédiates ou anneaux extensibles

Bcl : avec bouclier

Enf : avec enfilage

Pm : prédécoupage mécanique (pour terrains R2b à R5a)

1\ Méthode AFTES \ 1.7 – Utilisation de la classification AFTES

Exemple 1 :

tunnel de 12 m de diamètre dans des schistes fracturés sous forte couverture ($\sigma_c / \sigma_0 < 2$) et hors d'eau

Exemple n° 1 TUNNEL $\varnothing 12^m$ dans les schistes fracturés sous forte couverture ($\sigma_c / \sigma_0 < 2$) hors d'eau		Pas de soutènement	Béton projeté	Boulons			Cintres		Voussoirs		Tubes préforés	Bouclier ou pousse tube	Procédés spéciaux		
				a ancrage ponctuel	a ancrage réparti	barres foncées	lourds	légers coulissants	plaques métal assemblées	béton			Injection	Air comprimé	Congélation
CRITERES	CLASSES														
① Comport.mécanique	R 3 a		•	•	•	✗		•	✗	✗	✗	✗		✗	
② Discontinuités	N 3 S 4	✗	•	Gr ou Bp	Gr ou Bp	✗	•	•			✗		✗	✗	
③ Altérabilité	Délitage	✗	•	Gr ou Bp	Gr ou Bp	Gr ou Bp	•	•		•					
④ Hydrologie	Hors d'eau														
⑤ Couverture	C N 3	✗	✗	•	•	✗	✗				✗				
⑥ Dimensions	D > 10		•	•	•		✗				✗				
			Bo												
								Bo • Bp							
								ou Rev							
Synthèse		✗	✗	•	•	✗	✗	Bo • Bp	✗	✗	✗	✗	✗	✗	
				Gr ou Bp	Gr ou Bp			ou Rev							

Conclusion : boulons à ancrage ponctuel ou réparti avec grillage ou béton projeté + cintres coulissants

1\ Méthode AFTES \ 1.7 – Utilisation de la classification AFTES

Exemple 2 :

tunnel de 6m de diamètre dans des argiles gypseuses sous 10 m de couverture dont 8 m sous la nappe et en agglomération

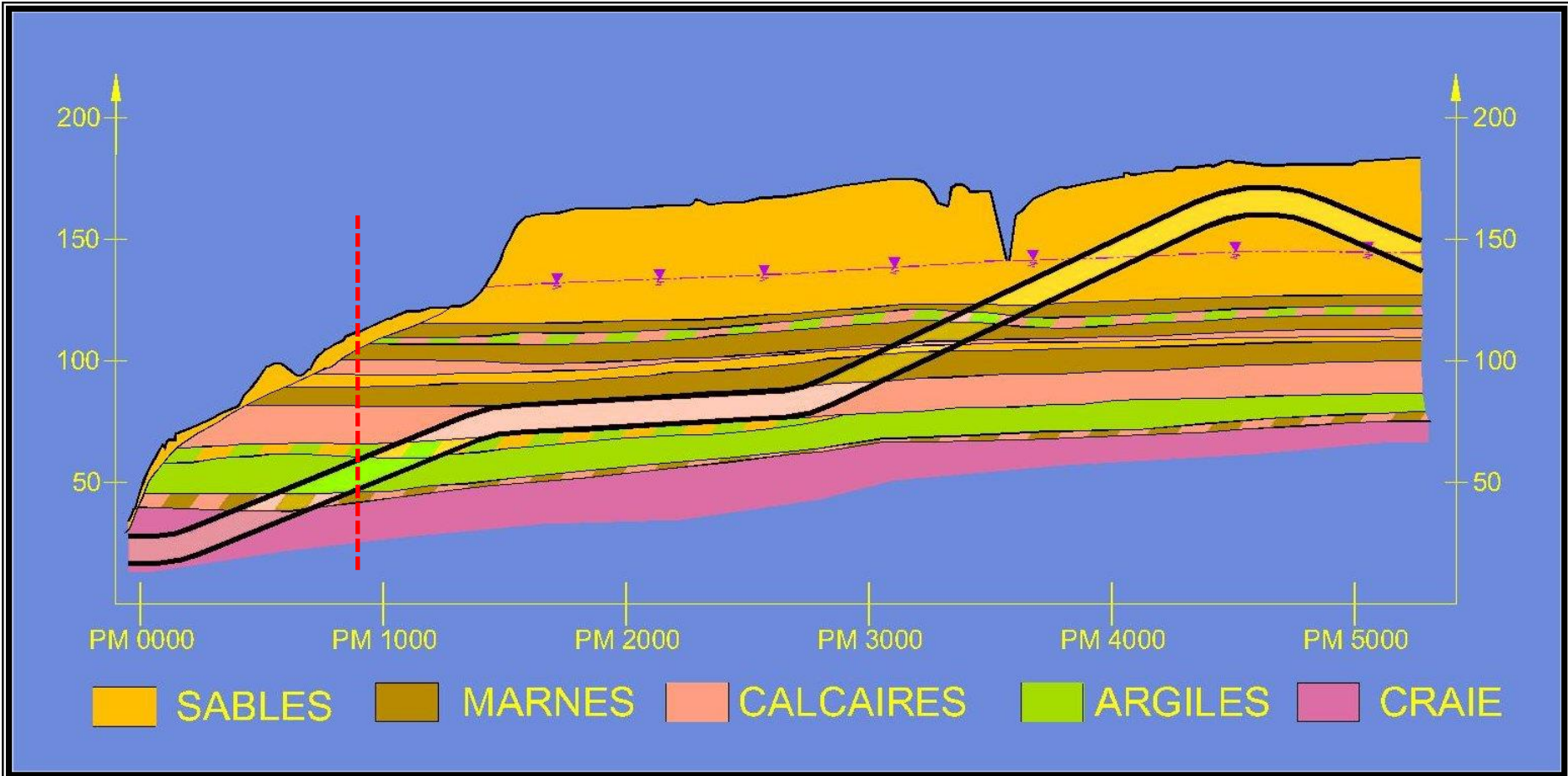
Exemple n° 2 TUNNEL Ø 6 ^m dans les argiles gypseuses sous 10 ^m de couverture, dont 8m. sous la nappe en agglomération.		Pas de soutènement	Béton projeté	Boulons			Cintres		Voussoirs		Tubes préforés	Bouclier ou pousse tube	Procédés spéciaux		
				à ancrage ponctuel	à ancrage réparti	barres foncées	lourds	légers coulissants	plaques métal assemblées	béton			Injection	Air comprimé	Congélation
CRITERES	CLASSES														
① Comportement méca.	R 5 a	X	•	X			•	•	•						
③ Altérabilité	Dissolution	X	•	X	X	X	Bl	Bl	•	•					
④ Hydrologie	H 1 K 2	X	Dr	X			•	•	•	•		•	X		
⑤ Couverture	σ ⁰ modéré	X		X											
⑦ Environnement	Sensible	X	Ci	X	X	X	Act	X				Inj			
Synthèse		X	X	X	X	X	Act+ Bl	X	•	•		Inj	X		

Conclusion : soit cintres lourds actifs + blindage, soit plaques métalliques assemblées + enfilage, soit voussoirs préfabriqués mis en place dans un bouclier

1\ Méthode AFTES \ 1.7 – Utilisation de la classification AFTES

Exemple 3 - Paris - A86 Ouest :

tunnel de 11 m de diamètre dans les argiles plastiques sous 50 m de couverture ; milieu urbain



1\ Méthode AFTES \ 1.7 – Utilisation de la classification AFTES















Exemple 3 - Paris - A86 Ouest

- ✓ Argile Plastique : $R_c = 0,4$ MPa
- ✓ Pas de discontinuité
- ✓ Risque de gonflement
- ✓ Hydrologie : perméabilité très faible ($k < 10^{-8}$ m/s)
- ✓ Couverture : 50 m
- ✓ Dimension : 11 m de diamètre

1\ Méthode AFTES \ 1.7 – Utilisation de la classification AFTES

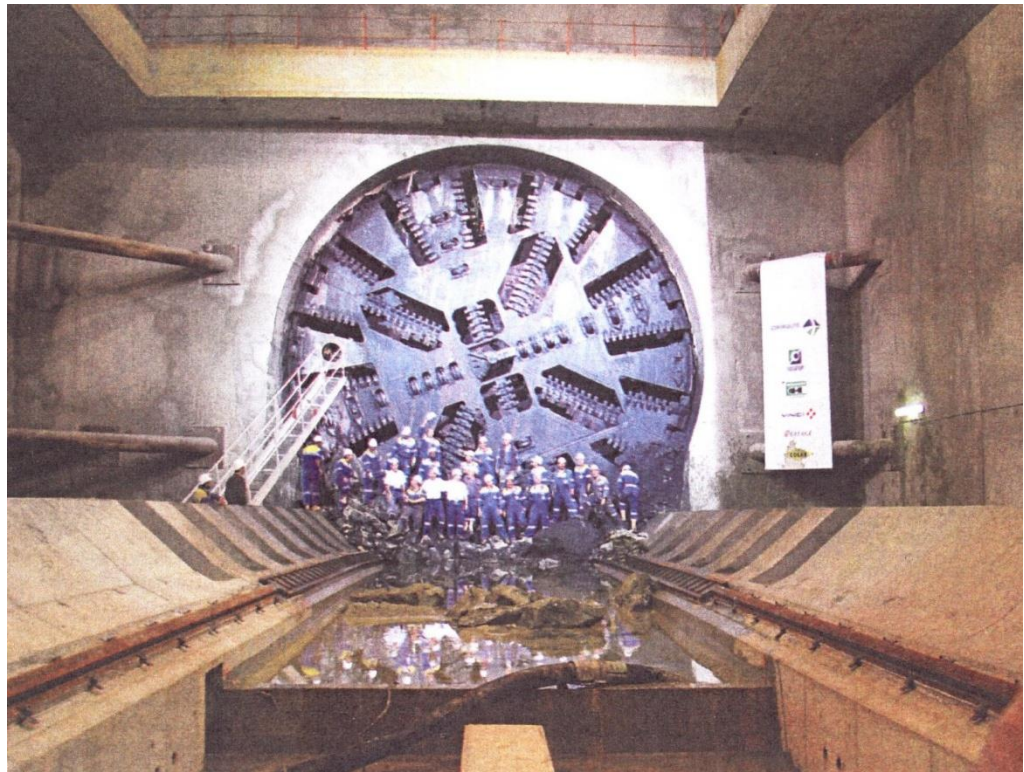
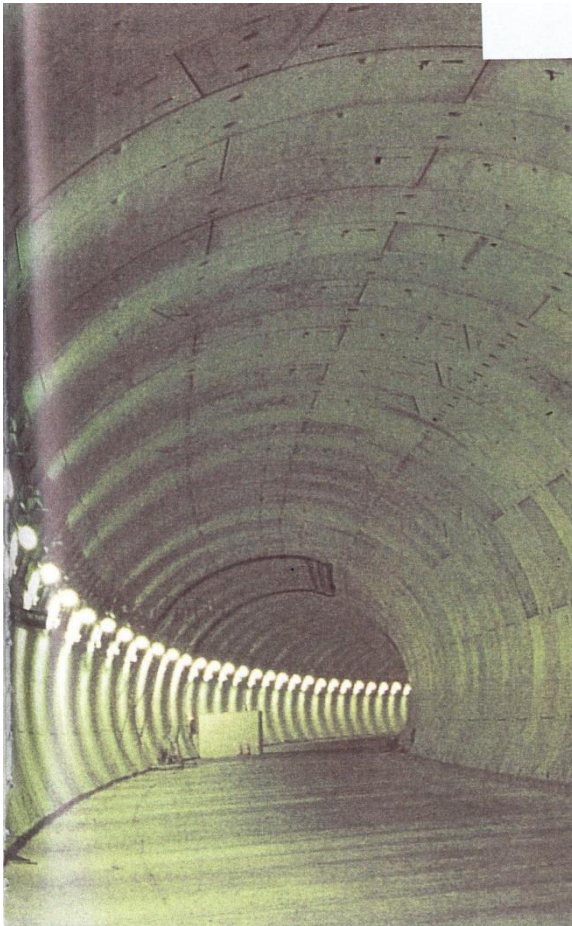
Exemple 3 - Paris - A86 Ouest :

tunnel de 11 m de diamètre dans les argiles plastiques sous 50 m de couverture ; pas de nappe ; milieu urbain

Exemple		Pas de soutènement	Béton projeté	Boulons			Cintres		Voussoirs		Tubes préforés	Bouclier ou pousse tube	Procédés spéciaux		
				à ancrage ponctuel	à ancrage réparti	barres foncées	lourds	légers coulissants	plaques métal assemblées	béton			Injection	Air comprimé	Congélation
CRITERES	CLASSES														
① Comport.mécanique															
② Discontinuités															
③ Altérabilité															
④ Hydrologie															
⑤ Couverture															
⑥ Dimensions															
Synthèse															

SOCATOP

TUNNEL CIRCULAIRE REALISE AU TUNNELIER AVEC VOUSOIR
BETON



1\ Méthode AFTES \ 1.8 – Conclusions sur la méthode AFTES

- ✓ **Pas de dimensionnement du soutènement**
- ✓ **Orientation pour le choix du type de soutènement**
- ✓ **En milieu rocheux : importance de la fracturation relativement limitée**

2 \ Classification de BARTON (Q system)

6 paramètres de base

R.Q.D. Fracturation

J_n Nombre de familles de discontinuités

J_r Rugosité du joint

J_a Altération du joint

J_w Effet de l'eau

S.R.F. Facteur de contrainte

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{S.R.F.}$$

$\frac{R.Q.D.}{J_n}$

$\frac{J_r}{J_a}$

$\frac{SPAN}{E.S.R.}$

--> Soutènement

2 \ Classification de BARTON (Q system)

- ✓ **RQD/J_n : caractérise la taille des blocs rocheux**
- ✓ **J_r/J_a : caractérise la résistance au cisaillement entre blocs**
- ✓ **J_w/SRF : Contrainte / force active**

- ✓ **SPAN : largeur, diamètre ou hauteur**
- ✓ **ESR : coefficient correcteur de dimension**
 - ✓ **SPAN/ESR = diamètre équivalent**

2 \ Classification de BARTON (Q system)

Importance du terme RQD :

Attention au travers de la mesure (qualité du sondage , diamètre de la carotte, orientation du forage, etc)

2 \ Classification de BARTON (Q system)

✓ RQD

DESCRIPTION DE LA FRACTURATION		R.Q.D.
A	Très forte	0 - 25
B	Forte	25 - 50
C	Moyenne	50 - 75
D	Faible	75 - 90
E	Très faible	90 - 100

✓ Jn

NOMBRE DE FAMILLES DE DISCONTINUITÉS		Jn
A	Roche massive, pas ou peu de fractures	0,5 - 1,0
B	Une famille de discontinuités	2
C	Une famille de discontinuités et des discontinuités dispersées	3
D	Deux familles de discontinuités	4
E	Deux familles et des discontinuités dispersées	6
F	Trois familles de discontinuités	9
G	Trois familles et des discontinuités dispersées	12
H	Quatre (ou plus) familles et des discontinuités dispersées, roche très densément fracturée en "morceaux de sucre"	15
I	Roche broyée	20

2 \ Classification de BARTON (Q system)

✓ Jr

RUGOSITE DES DISCONTINUITES		Jr
Les deux épontes sont en contact		
A	Discontinuité non persistante ^{ou discontinue}	4
B	Discontinuité rugueuse ou irrégulière et ondulée	3
C	Discontinuité lisse et ondulée	2
D	Discontinuité lissée et ondulée	1,5
E	Discontinuité plane et rugueuse ou irrégulière	1,5
F	Discontinuité plane et lisse	1,0
G	Discontinuité lissée et plane	0,5
Les deux épontes ne sont pas en contact		
H	Discontinuité avec un remplissage argileux	1,0
I	Discontinuité avec un remplissage sableux graveleux ou de roche broyée	1,0

2 \ Classification de BARTON (Q system)

✓ Ja

ALTERATION DE LA DISCONTINUITÉ		Ja	φ approximatif
Contact entre les deux épontes			
A	Remplissage imperméable, résistant fortement consolidé	0,75	—
B	Epontes non altérées, uniquement oxydées	1,0	25° - 35°
C	Epontes largement altérées, enduit sans minéraux argileux, mais avec des parties sableuses	2,0	25° - 30°
D	Enduit silteux ou sableux faiblement argileux	3,0	20° - 25°
E	Enduit de minéraux faiblement frottant c'est-à-dire kaolinite, mica, gypse, chlorite, talc, graphite... avec une petite quantité d'argiles gonflantes	4,0	8° - 16°
Epontes rocheuses restant en contact après un léger cisaillement			
F	Roche désintégrée, avec des parties sableuses mais sans argile	4,0	25° - 30°
G	Remplissage argileux fortement sur-consolidé	6,0	16° - 24°
H	Remplissage argileux faiblement à moyennement sur-consolidé	8,0	12° - 16°
I	Remplissage argileux avec minéraux gonflants ex montmorillonite, la valeur de Ja dépend du pourcentage de minéraux expansifs et des conditions d'hydratation	8,0 - 12,0	6° - 12°

2 \ Classification de BARTON (Q system)

✓ Ja

ALTERATION DE LA DISCONTINUITÉ		Ja	ϕ approximatif
Les épontes ne sont pas en contact			
K	Zones ou bandes de roche désintégrée ou broyée avec des conditions d'argile identiques aux cas G, H et I	6,0	
L		8,0	
M			
N	Zones ou bandes de matériau silteux, ou sableux avec une faible teneur en argile	5,0	
P	Zones ou bandes de matériau argileux épaisses avec des conditions sur les minéraux argileux identiques aux cas G, H et I	10,0 - 13,0	6° - 24°
Q		13,0 - 20,0	
R			

✓ Jw

EFFET DE L'EAU		Jw	H Charge hydraulique m
A	Excavation hors d'eau ou avec un débit très faible (< 5 l/mn) localement	1,0	< 10 m
B	Pression ou débit moyen, remplissage des discontinuités occasionnellement baigné	0,66	10 - 25
C	Pression ou débit important dans une roche compétente sans remplissage dans les discontinuités	0,5	25 - 100
D	Pression ou débit important remplissages largement baignés	0,33	25 - 100
E	Pression ou débit exceptionnellement élevé au moment de l'abattage puis diminuant avec le temps	0,2 - 0,1	> 100
F	Pression ou débit exceptionnellement élevé restant constant dans le temps	0,1 - 0,05	> 10

2 \ Classification de BARTON (Q system)

✓ **SRF :**

Stress Reduction Factor

(état tectonique du massif)

Facteur de contrainte		σ_c/σ_1	σ_t/σ_1	SRF
Ouvrage souterrains rencontrant des zones altérées susceptibles d'induire des instabilités de masses rocheuses lors de l'excavation				
A	Multiplés zones d'altération contenant des argiles ou du matériau chimiquement dégradé			10,0
B	Une zone d'altération isolée contenant des argiles ou du matériau chimiquement dégradé, à une profondeur < 50 m			5,0
C	Idem mais profondeur > 50 m			2,5
D	Multiple zones de cisaillement dans une roche compétente sans argile			7,5
E	Zone de cisaillement isolée dans roche compétente, sans argile, profondeur < 50 m			5,0
F	Idem mais profondeur > 50 m			2,5
G	Discontinuités ouvertes, roche fortement fracturée			5,0
Roches compétentes – Etat de contrainte				
H	Faible contrainte, faible profondeur	> 200	> 13	2,5
I	Contrainte moyenne	10 - 200	0,66 - 13	1,0
J	Contrainte importante, structure fortement comprimée	5 - 10	0,33 - 0,66	0,5 - 2
K	Ecaillage moyen	2,5 - 5	0,16 - 0,33	5 - 10
L	Ecaillage important	< 2,5	< 0,16	10 - 20

2 \ Classification de BARTON (Q system)

✓ SRF

Facteur de contrainte		σ_c/σ_1	σ_t/σ_1	SRF
Roches poussantes, déformation importantes				
M	Pression de déformation moyenne			5 - 10
N	Pression de déformation élevée			10 - 20
Roches gonflantes				
O	Pression de gonflement moyenne			5 - 10
P	Pression de gonflement élevée			10 - 20

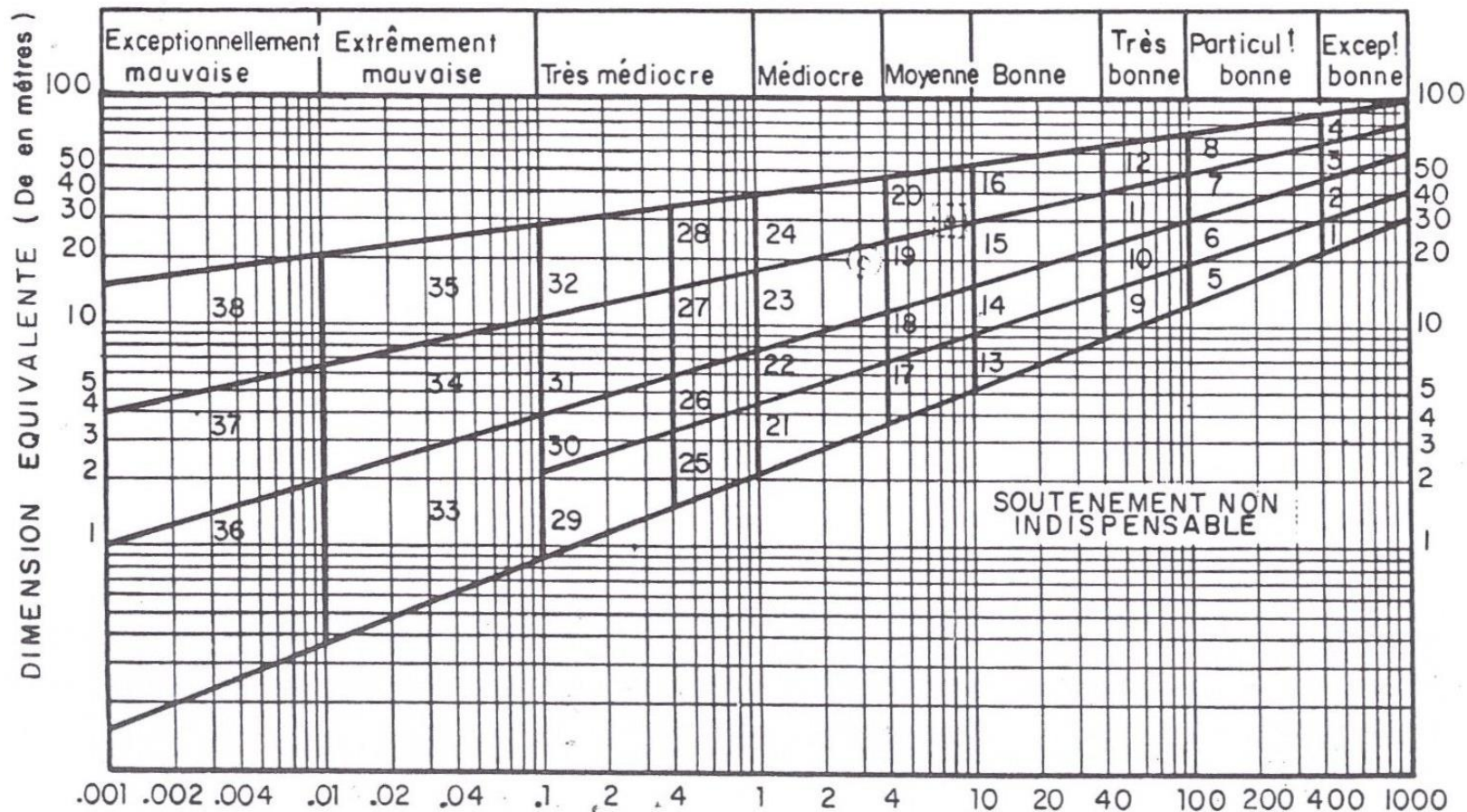
✓ ESR (Equivalent Support Ratio)

Nature de l'ouvrage		ESR	N
A.	Galeries temporaires de mines, etc.	env. 3,5 ?	(2)
B.	Puits verticaux :		
	- section circulaire	env. 2,5 ?	(0)
	- section rectangulaire/carrée	env. 2,0 ?	(0)
C.	Galeries permanentes de mines, galeries hydrauliques d'aménagements hydro-électriques (à l'exclusion des galeries à forte charge), galeries pilotes, etc.	1,6	(83)
D.	Salles de stockage, usines de traitement d'eau, tunnels secondaires routiers et ferroviaires, cheminées d'équilibre, galeries d'accès, etc.	1,3	(25)
E.	Usines électriques, principaux tunnels routiers et ferroviaires, abris atomiques, entrées en galeries, croisements, etc.	1,0	(79)
F.	Usines nucléaires, gares ferroviaires, aménagements sportifs ou publics, installations industrielles, etc.	env. 0,8 ?	(2)

Note : N représente le nombre de cas étudiés dans chaque catégorie ; la confiance que l'on peut accorder à la valeur de ESR est donc fonction de ce nombre.

2 \ Classification de BARTON (Q system)

✓ Choix des soutènements



QUALITE DU MASSIF ROCHEUX

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

2 \ Classification de BARTON (Q system)

✓ Choix des soutènements

Catégorie Soutènement	Facteurs déterminants			Soutènement
	$\frac{RQD}{J_n}$	$\frac{J_r}{J_a}$	$\frac{\text{Portée}}{\text{ESR}}$	
1*	-	-	-	sb (utg)
2*	-	-	-	sb (utg)
3*	-	-	-	sb (utg)
4*	-	-	-	sb (utg)
5*	-	-	-	sb (utg)
6*	-	-	-	sb (utg)
7*	-	-	-	sb (utg)
8*	-	-	-	sb (utg)
9	≥ 20	-	-	sb (utg)
	< 20	-	-	B (utg) 2,5-3 m
10	≥ 30	-	-	B (utg) 2-3 m
	< 30	-	-	B (utg) 1,5-2 m + clm
11*	≥ 30	-	-	B (tg) 2-3 m
	< 30	-	-	B (tg) 1,5-2 m + clm
12*	≥ 30	-	-	B (tg) 2-3 m
	< 30	-	-	B (tg) 1,5-2 m + clm
13	≥ 10	$\geq 1,5$	-	sb (utg)
	≥ 10	$< 1,5$	-	B (utg) 1,5-2 m
	< 10	$\geq 1,5$	-	B (utg) 1,5-2 m
	< 10	$< 1,5$	-	B (utg) 1,5-2 m + S 2-3 cm
14	≥ 10	-	≥ 15 m	B (tg) 1,5-2 m + clm
	< 10	-	≥ 15 m	B (tg) 1,5-2 m + S (mr) 5-10 cm
	-	-	< 15 m	B (utg) 1,5-2 m + clm

Soutènement des massifs de qualité "excellente, extrêmement bonne, très bonne, bonne" $Q = 1\ 000$ à 10

sb - (Spot bolting) boulonnage local

B - (Systematic bolting) boulonnage systématique suivi de l'écartement des boulons en m

(utg) - (Untensioned, grouted) passif, injecté

(tg) - (Tensioned) précontraint (coquille à expansion pour les massifs résistants, scellement au coulis et post-contraint pour les massifs très médiocres - voir note XI)

S - (Shotcrete) béton projeté suivi de l'épaisseur en cm

(mr) - (Mesh reinforced) treillis soudé

clm - (Chain link mesh) grillage

CCA - (Cast Concrete Arch) revêtement en béton coffré suivi de l'épaisseur en cm

(sr) - (Steel reinforced) armature acier

Nota : Les boulons sont supposés être de $\varnothing 20$ mm.

2 \ Classification de BARTON (Q system)

✓ Choix des soutènements

Catégorie Soutènement	Facteurs déterminants			Soutènement	Voir Notes
	$\frac{RQD}{J_n}$	$\frac{J_r}{J_a}$	$\frac{Portée}{ESR}$		
15	> 10	-	-	B (tg) 1,5-2 m + clm	I.II.IV
	≤ 10	-	-	B (tg) 1,5-2 m + S (mr) 5-10 cm	I.II.IV
16* Voir note XII	> 15	-	-	B (tg) 1,5-2 m + clm	I.V.VI
	≤ 15	-	-	B (tg) 1,5-2 m + S (mr) 10-15 cm	I.V.VI

Note : La nature du soutènement nécessaire pour les catégories 1 à 8 dépend de la technique d'abattage utilisée. La méthode de découpage fin avec finition à la main peut éliminer le soutènement. Les méthodes plus grossières peuvent nécessiter l'emploi d'une seule couche de béton projeté, notamment pour les hauteurs d'excavation de plus de 25 m. Les expériences futures devront permettre de distinguer entre les catégories 1 à 8.

2 \ Classification de BARTON (Q system)

✓ Choix des soutènements

Méthode de N. BARTON

Soutènement des massifs de qualité « moyenne » et « médiocre »

$Q = 10$ à 1

Catégorie Soutènement	Facteurs déterminants			Soutènement	Voir Notes
	RQD Jn	Jr Ja	Portée ESR		
17	> 30	-	-	sb (utg)	I
	$\geq 10, \leq 30$	-	-	B (utg) 1-1,5 m	I
	< 10	-	≥ 6 m	B (utg) 1-1,5 m + S 2-3 cm	I
	< 10	-	< 6 m	S 2-3 cm	I
18	> 5	-	≥ 10 m	B (tg) 1-1,5 m + clm	I.III
	> 5	-	< 10 m	B (utg) 1-1,5 m + clm	I
	≤ 5	-	≥ 10 m	B (tg) 1-1,5 m + S 2-3 cm	I.III
	≤ 5	-	< 10 m	B (utg) 1-1,5 m + S 2-3 cm	I
19	-	-	≥ 20 m	B (tg) 1-2 m + S (mr) 10-15 cm	I.II.IV
	-	-	< 20 m	B (tg) 1-1,5 m + S (mr) 5-10 cm	I.II
20* Voir note XII	-	-	≥ 35 m	B (tg) 1-2 m + S (mr) 20-25 cm	I.V.VI
	-	-	< 35 m	B (tg) 1-2 m + S (mr) 10-20 cm	I.II.IV
21	$\geq 12,5$	$\leq 0,75$	-	B (utg) 1 m + S 2-3 cm	I
	< 12,5	$\leq 0,75$	-	S 2,5-5 cm	I
	-	> 0,75	-	B (utg) 1 m	I
22	> 10, < 30	> 1,0	-	B (utg) 1 m + clm	I
	≤ 10	> 1,0	-	S 2,5-7,5 cm	I
	< 30	$\leq 1,0$	-	B (utg) 1 m + S (mr) 2,5-5 cm	I
	≥ 30	-	-	B (utg) 1 m	I
23	-	-	≥ 15 m	B (tg) 1-1,5 m + S (mr) 10-15 cm	I.II.IV.VII
	-	-	< 15 m	B (utg) 1-1,5 m + S (mr) 5-10 cm	I
24* Voir note XII	-	-	≥ 30 m	B (tg) 1-1,5 m + S (mr) 15-30 cm	I.V.VI
	-	-	< 30 m	B (tg) 1-1,5 m + S (mr) 10-15 cm	I.II.IV

2 \ Classification de BARTON (Q system)

Soutènement des massifs de qualité « très médiocre »
 $Q = 1,0 \text{ à } 0,1$

Catégorie Soutènement	Facteurs déterminants			Soutènement	Voir Notes
	$\frac{RQD}{J_n}$	$\frac{J_r}{J_a}$	$\frac{\text{Portée}}{\text{ESR}}$		
25	> 10	$> 0,5$	-	B (utg) 1 m + mr ou clm	I
	≤ 10	$> 0,5$	-	B (utg) 1 m + S (mr) 5 cm	I
	-	$\leq 0,5$	-	B (tg) 1 m + S (mr) 5 cm	I
26	-	-	-	B (tg) 1 m + S (mr) 5-7,5 cm	VIII.X.XI
	-	-	-	B (utg) 1 m + S 2,5-5 cm	I.IX
27	-	-	$\geq 12 \text{ m}$	B (tg) 1 m + S (mr) 7,5-10 cm	I.IX
	-	-	$< 12 \text{ m}$	B (utg) 1 m + S (mr) 5-7,5 cm	I.IX
	-	-	$> 12 \text{ m}$	CCA 20-40 cm + B (tg) 1 m	VIII.X.XI
	-	-	$< 12 \text{ m}$	S (mr) 10-20 cm + B (tg) 1 m	VIII.X.XI
28* Voir note XII	-	-	$\geq 30 \text{ m}$	B (tg) 1 m + S (mr) 30-40 cm	I.IV.V.IX
	-	-	$(\geq 20 \text{ m}, < 30 \text{ m})$	B (tg) 1 m + S (mr) 20-30 cm	I.II.IV.IX
	-	-	$< 20 \text{ m}$	B (tg) 1 m + S (mr) 15-20 cm	I.II.IX
	-	-	-	CCA (sr) 30-100 cm + B (tg) 1 m	IV.VIII.X.XI
29*	> 5	$> 0,25$	-	B (utg) 1 m + S 2-3 cm	-
	≤ 5	$> 0,25$	-	B (utg) 1 m + S (mr) 5 cm	-
	-	$\leq 0,25$	-	B (tg) 1 m + S (mr) 5 cm	-

Catégorie Soutènement	Facteurs déterminants			Soutènement	Voir Notes
	$\frac{RQD}{J_n}$	$\frac{J_r}{J_a}$	$\frac{\text{Portée}}{\text{ESR}}$		
30	≥ 5	-	-	B (tg) 1 m + S 2,5-5 cm	IX
	< 5	-	-	S (mr) 5-7,5 cm B (tg) 1 m	IX VIII.X.XI
	-	-	-	+ S (mr) 5-7,5 cm	
31	> 4	-	-	B (tg) 1 m + S (mr) 5-12,5 cm	IX
	$\leq 4, \geq 1,5$	-	-	S (mr) 7,5-25 cm CCA 20-40 cm	IX IX
	$< 1,5$	-	-	+ B (tg) 1 m CCA (sr) 30-50 cm + B (tg) 1 m	VII.X.XI
32 Voir note XII	-	-	$\geq 20 \text{ m}$	B (tg) 1 m + S (mr) 40-60 cm	II.IV.IX
	-	-	$< 20 \text{ m}$	B (tg) 1 m + S (mr) 20-40 cm	III.IV.IX
	-	-	-	CCA (sr) 40-120 cm + B (tg) 1 m	IV.VIII.X.XI

2 \ Classification de BARTON (Q system)

✓ Choix des soutènements

Tableau 3.18
Méthode de N. BARTON
Soutènement des massifs de qualité
« extrêmement médiocre, exceptionnellement mauvaise » $Q = 0,1$ à $0,001$

Catégorie Soutènement	Facteurs déterminants			Soutènement	Voir Notes
	RQD Jn	Jr Ja	Portée ESR		
33*	≥ 2	-	-	B (tg) 1 m + S (mr) 2,5-5 cm	IX
	< 2	-	-	S (mr) 5-10 cm	IX
	-	-	-	S (mr) 7,5-15 cm	VIII.X
34	≥ 2	$\geq 0,25$	-	B (tg) 1 m + S (mr) 5-7,5 cm	IX
	< 2	$\geq 0,25$	-	S (mr) 7,5-15 cm	IX
	-	$< 0,25$	-	S (mr) 15-25 cm	IX
	-	-	-	CCA (sr) 20-60 cm + B (tg) 1 m	VIII.X.XI
35 Voir note XII	-	-	≥ 15 m	B (tg) 1 m + S (mr) 30-100 cm	II.IX
	-	-	≥ 15 m	CCA (sr) 60-200 cm + B (tg) 1 m	VIII.X.XI II
	-	-	< 15 m	B (tg) 1 m + S (mr) 20-75 cm	IX.III
	-	-	< 15 m	CCA (sr) 40-150 cm + B (tg) 1 m	VIII.X.XI. III
36*	-	-	-	S (mr) 10-20 cm	IX
	-	-	-	S (mr) 10-20 cm + B (tg) 0,5-1,0 m	VIII.X.XI
37	-	-	-	S (mr) 20-60 cm	IX
	-	-	-	S (mr) 20-60 cm + B (tg) 0,5-1,0 m	VIII.X.XI
38 Voir note XIII	-	-	≥ 10	CCA (sr) 100-300 cm	IX
	-	-	≥ 10	CCA (sr) 100-300 cm + B (tg) 1 m	VIII.X.XI XI
	-	-	< 10	S (mr) 70-200 cm	IX
	-	-	< 10	S (mr) 70-200 cm + B (tg) 1 m	VIII.X. III.XI

2 \ Classification de BARTON (Q system)

✓ Choix des soutènements

Exemple classe 21

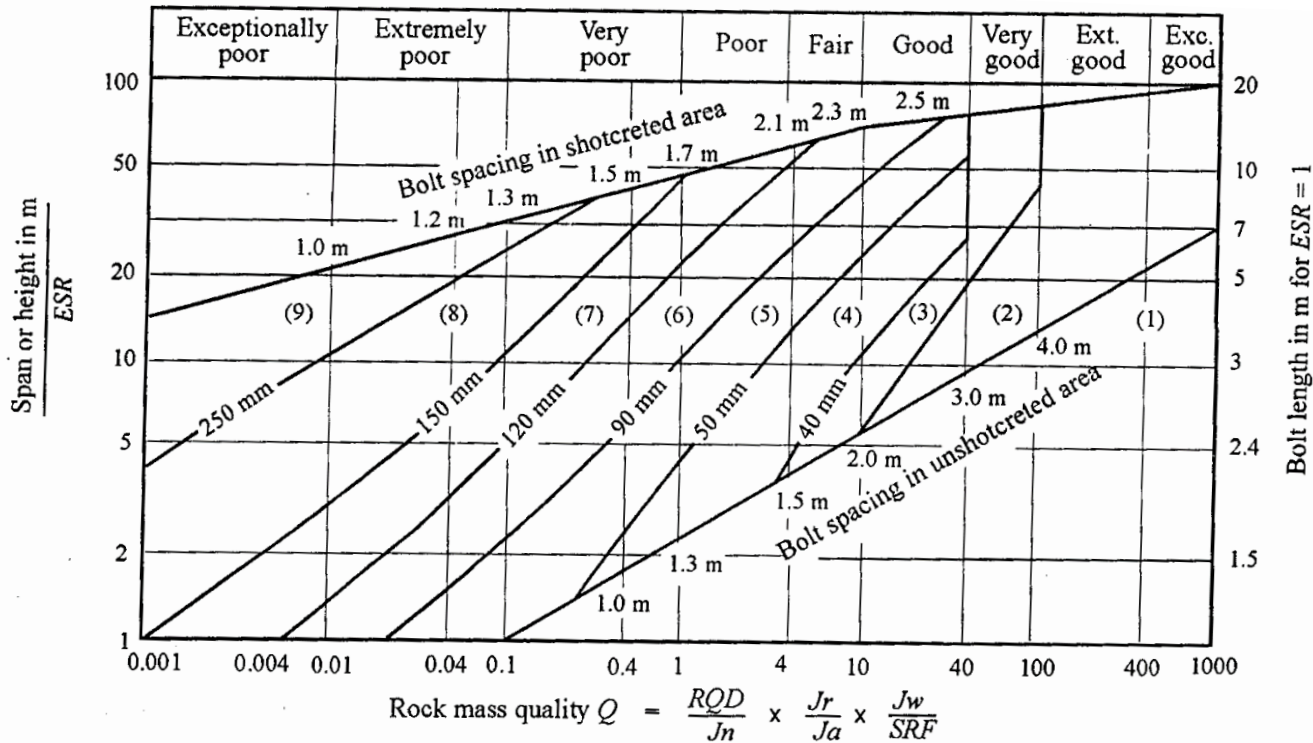
FACTEURS DETERMINANTS		SOUTÈNEMENT
$\frac{R.Q.D.}{J_n}$	$\frac{J_r}{J_a}$	
$\geq 12,5$	$< 0,75$	Boulonnage systématique passif et injecté tous les mètres. Béton projeté de 2 à 3 cm d'épaisseur.
$< 12,5$	$\leq 0,75$	Béton projeté de 2,5 à 5 cm d'épaisseur
$< 12,5$	$\geq 0,75$	Boulonnage systématique passif et injecté tous les mètres.

Note : En cas de problème grave de décompression brutale tel que l'éclatement, on emploie souvent des boulons précontraints à plaques d'appui à grandes dimensions, d'écartement 1 m environ, parfois de 0,8 m. Le soutènement définitif est mis en place après disparition du phénomène de décompression. (D'après BARTON).

2 \ Classification de BARTON (Q system)

✓ Choix des soutènements

Autre présentation (plus synthétique)



REINFORCEMENT CATEGORIES

- | | |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> 1) Unsupported 2) Spot bolting 3) Systematic bolting 4) Systematic bolting with 40-100 mm unreinforced shotcrete | <ul style="list-style-type: none"> 5) Fibre reinforced shotcrete, 50 - 90 mm, and bolting 6) Fibre reinforced shotcrete, 90 - 120 mm, and bolting 7) Fibre reinforced shotcrete, 120 - 150 mm, and bolting 8) Fibre reinforced shotcrete, > 150 mm, with reinforced ribs of shotcrete and bolting 9) Cast concrete lining |
|---|---|

Commentaires sur la méthode de Barton

- ✓ basée sur plus de 200 cavités existantes (Europe et Scandinavie),
- ✓ essentiellement en terrain rocheux,
- ✓ recommandations pour le choix du soutènement à utiliser avec prudence
(aboutit souvent à un surdimensionnement)

RMR (Rock Mass Rating)

3 \ Classification de BIENIAWSKI

5 Critères principaux

- ✓ Résistance de la roche (Rc ou essai Franklin)
- ✓ Fracturation : RQD
- ✓ Espacement des joints (tous types de discontinuités : stratification, schistosité, fractures, diaclases)
- ✓ Nature des joints
- ✓ Venues d'eau

3 \ Classification de BIENIAWSKI

- ✓ **Chaque paramètre reçoit une note**
- ✓ **RMR = somme des notes**
- ✓ **Ajustement pour tenir compte de l'orientation de la fracturation**
- ✓ **5 classes (roche très mauvaise pour $RMR < 20$ à très bonne roche pour $RMR > 80$)**

3 \ Classification de BIENIAWSKI

Attribution des notes

A. PARAMETRES DE CLASSIFICATION ET NOTATIONS CORRESPONDANTES									
Paramètres		Plages de valeurs							
1	Résistance de la roche (matrice)	Indice Franklin I_s	> 10 MPa	4 - 10 MPa	2 - 4 MPa	1 - 2 MPa	Pour les faibles valeurs de I_s utiliser la résistance en compression uniaxiale		
		Réist. compr. uniax. σ_c	> 250 MPa	100 - 250 MPa	50 - 100 MPa	25 - 50 MPa	5 - 25 MPa	1 - 5 MPa	< 1 MPa
Notation			15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		90% - 100%	75% - 90 %	50% - 75%	25% - 50%	< 25%		
	Notation		20	17	13	8	3		
3	Espacement des discontinuités		> 2 m	0,6 m - 2 m	200 mm - 600 mm	60 mm - 200 mm	< 60 mm		
	Notation		20	15	10	8	5		
4	Nature des discontinuités (voir E)		Surfaces très rugueuses Non continues Epontes en contact Epontes non altérées	Surfaces légèrement rugueuses Epaisseur < 1 mm Epontes faiblement altérées	Surfaces légèrement rugueuses Epaisseur < 1 mm Epontes fortement altérées	Surfaces lustrées ou Remplissage < 5 mm ou Epaisseur de 1 à 5 mm Joint continu	Remplissage mou > 5 mm ou Epaisseur > 5 mm Joint continu		
	Notation		30	25	20	10	0		
5	Eau	Débit sur 10 m de longueur de tunnel (l/min)	Aucun	< 10 l/min	10 à 25 l/min	25 à 125 l/min	> 125 l/min		
		Ratio : pression eau / contr. princ. σ_1	0	< 0,1	0,1 - 0,2	0,2 - 0,5	> 0,5		
		Conditions générales	Complètement sec	Humide	Mouillé	Suintant	Débitant		
		Notation	15	10	7	4	0		

RMR = Somme des notations des paramètres 1 à 5

3 \ Classification de BIENIAWSKI

Attribution des notes (suite)

E. INDICATIONS POUR LA NOTATION "NATURE DES DISCONTINUITES"					
Longueur des discontinuités	< 1 m	de 1 à 3 m	de 3 à 10 m	de 10 à 20 m	> 20 m
Notation	6	4	2	1	0
Ouverture des discontinuités	aucune	< 0,1 mm	de 0,1 à 1 mm	de 1 à 5 mm	> 5 mm
Notation	6	5	4	1	0
Rugosité des épontes des discontinuités	Très rugueuse	Rugueuse	Légèrement rugueuse	Lisse	Lustrée
Notation	6	5	3	1	0
Altération des épontes	Non altéré	Légèrement altéré	Moyennement altéré	Très altéré	Décomposé
Notation	6	5	3	1	0
Matériau de remplissage des discontinuités	Aucun	Remplissage dur < 5 mm	Remplissage dur > 5 mm	Remplissage mou < 5 mm	Remplissage mou > 5 mm
Notation	6	4	2	2	0

Nota : Certaines conditions sont mutuellement exclusives. Par exemple, si du matériau de remplissage est présent, il n'est plus pertinent de considérer la rugosité dans la mesure où son effet sera effacé par celui du remplissage. Dans ce cas utiliser directement la notation du tableau A 4.

F. INFLUENCE DE L'ORIENTATION ET DU PENDAGE DES DISCONTINUITES POUR LA STABILITE DES TUNNELS

Horizontale du plan de discontinuité perpendiculaire à l'axe longitudinal du tunnel (creusement en travers bancs)		Horizontale du plan de discontinuité parallèle à l'axe longitudinal du tunnel (creusement en direction)	
Creusement dans le sens du pendage		Pendage 45° à 90° : très défavorable	Pendage 20° à 45° : moyen
Pendage 45° à 90° : très favorable	Pendage 20° à 45° : favorable		
Creusement contre le sens du pendage		Pendage 0° à 20° et orientation quelconque : moyen	
Pendage 45° à 90° : moyen	Pendage 20° à 45° : défavorable		

3 \ Classification de BIENIAWSKI

Attribution des notes (suite)

- ✓ Classification
- ✓ Caractéristiques moyennes des massifs

B. AJUSTEMENT DE LA VALEUR DE RMR EN FONCTION DE L'ORIENTATION DES DISCONTINUITES (voir F)

Direction et pendage		Très favorable	Favorable	Moyen	Défavorable	Très défavorable
Notation	Tunnels	0	- 2	- 5	- 10	- 12
	Fondations	0	- 2	- 7	- 15	- 25
	Talus	0	- 5	- 25	- 50	- 60

C. CLASSES DE MASSIF ROCHEUX DETERMINEES PAR LE RMR

Valeur du RMR	100 ← 81	80 ← 61	60 ← 41	40 ← 21	< 21
Classe	I	II	III	IV	V
Description	Très bon rocher	Bon rocher	Rocher moyen	Rocher médiocre	Rocher très médiocre

D. PROPRIETES GLOBALES ATTRIBUEES AU MASSIF ROCHEUX EN FONCTION DES CLASSES

Classe	I	II	III	IV	V
Temps de tenue sans soutènement	20 ans pour une portée de 15 m	1 an pour une portée de 10 m	1 semaine pour une portée de 5 m	10 h pour une portée de 2,5 m	30 mn pour une portée de 1 m
Cohésion du massif rocheux (kPa)	> 400 kPa	300 à 400 kPa	200 à 300 kPa	100 à 200 kPa	< 100 kPa
Angle de frottement du massif rocheux (°)	> 45°	35° à 45°	25° à 35°	15° à 25°	< 15°

3 \ Classification de BIENIAWSKI

Choix du type de soutènement

Recommandations d'avant-projet sommaire du soutènement
d'après Z. Bieniawski
(tunnels de 5 à 12 m de portée, excavés à l'explosif)

Classe de la roche	TYPE DE SOUTÈNEMENT						
	BOULONS D'ANCRAGE (1)		BETON PROJETÉ			CINTRES METALLIQUES	
	Espace-ment	Complément d'ancrage	Voûte	Pié-droits	Complément de soutènement	Type	Espace-ment
1	GÉNÉRALEMENT PAS NÉCESSAIRE						
2	1,5-2,0 m	Occasionnellement treillis soudé en voûte	50 mm	néant	néant	non rentable	
3	1,0-1,5 m	treillis soudé + 30 mm de béton projeté en voûte si nécessaire	100 mm	50 mm	occasionnellement treillis et boulons si nécessaire	cintres légers	1,5-2,0 m
4	0,5-1,0 m	treillis soudé + 30-50 mm de béton projeté en voûte et en piédroits	150 mm	100 mm	treillis soudé et boulons de 1,5 à 3 m d'espace-ment	Cintres moyens + 50 mm de béton projeté	0,7-1,5m
5	Non recommandé		200 mm	150 mm	treillis soudé boulons et cintres légers	Immédiatement 80 mm de béton projeté puis cintres lourds à l'avancement	0,7 m

(1) diamètre des boulons : 25mm, longueur : 1/2 diamètre du tunnel, scellement réparti à la résine

4 \ Exercice

Tunnel de Bocognano (Corse) – diamètre 10.5 m

- ✓ Granite altéré
- ✓ Poids volumique : $\gamma = 24,8 \text{ kN:m}^3$
- ✓ Vitesse des ondes longitudinales $V_p = 2500 \text{ m/s}$
- ✓ Résistance en compression $R_c = 10 \text{ MPa}$
- ✓ Couverture / clé de voûte = 50 m
- ✓ Module de déformation de la matrice $E = 3700 \text{ MPa}$
- ✓ Module de déformation du Massif $E_m = 1000 \text{ MPa}$
- ✓ RQD = 20%
- ✓ Nombre de familles de discontinuité : 2
- ✓ Discontinuité diffuse : Oui
- ✓ Joints rugueux et altérés
- ✓ Espacement : 30 cm
- ✓ Orientation : angle de 20° entre le pendage et l'axe d'avancement
- ✓ Pendage de 45°
- ✓ Massif très altéré
- ✓ Charge hydraulique : 30 m ; perméabilité : $5 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$

4 \ Exercice : Tunnel de Bocognano (Corse)

Classe AFTES

- ✓ **Identification (classe IC)**
- ✓ **Caractéristiques mécaniques (classe RC)**
- ✓ **Contraintes naturelles (classe CN)**
- ✓ **Déformabilité (classes DE et DM)**
- ✓ **Discontinuité du massif (classes RQD, N, ES, OR)**
- ✓ **Altération du massif (classe AM)**
- ✓ **Conditions hydrogéologiques (classe H et K)**

RMR (Bieniawski)

Nombre Q (Barton)

4 \ Exercice : Tunnel de Bocognano (Corse)

Classe AFTES :

Tunnel de Bocognano	Classe	Termes descriptifs
Caractéristiques mécaniques		
Contrainte naturelles		
Déformabilité		
Discontinuité du massif		
Etat d'altération		
Conditions hydrogéologiques		

4 \ Exercice : Tunnel de Bocognano (Corse)

Classification RMR

Valeurs des Paramètres			Coefficient (note)		
Résistance Rc (MPa)			Résistance Rc (MPa)		
RQD	RQD (%)		RQD	R	
Espacement des joints	E (cm)		Espacement des joints	E	
Nature des joints	Ji		Nature des joints	Ji	
Venues d'eau			Venues d'eau		
Charge/radier	H (m)				
Perméabilité	K (m/s)		Ajustement orientation des joints		
Débit sur 10 m de longueur	(l/min)				
Rapport pression eau / σ^o					
Hydrogéologie					
Conditions générales			Note finale	RMR	
	Note		Classe de rocher		
Orientation des joints					
	Note		Description		

4 \ Exercice : Tunnel de Bocognano (Corse)

DETERMINATION DE L'INDICE DE QUALITE Q DU ROCHER (Méthode de BARTON)

RQD	RDQ	
Famille de joints	Jn	
Rugosité des joints	Jr	
Altération des joints	Ja	
Venue d'eau en forage	Jw	
Zone de faiblesse	SRF	
	RDQ/Jn	
	Jr/Ja	
	Jw/SRF	
	Q	
Qualité du massif rocheux		
	ESR	
	De	
catégorie soutènement		

- Fin du support -