

Annexe D

Méthodes de classification des masses rocheuses fracturées

1. Le Rock Quality Designation index (Deere, 1967)
2. Le Tunnelling Quality Index (Barton, 1974)
3. Le Rock Mass Rating (Bieniawski, 1976)
4. Le Geological Strength Index (Hoek et Brown, 1995)
5. Le GSI modifié (Sonmez et Ulusay, 1999)
6. Corrélations entre les différentes méthodes de classification



1 Le Rock Quality Designation index (Deere, 1967)

Le *Rock Quality Designation (RQD)* a été développé par Deere et al. (1967) afin de donner une estimation quantitative de la fracturation influençant le comportement de la masse rocheuse à partir de l'examen de carottes obtenues par des forages. Le *RQD* est défini comme le pourcentage de morceaux intacts de longueur supérieure à 10 cm, sur la longueur totale du forage.

$$RQD = \frac{\sum \text{longueur des morceaux} > 10 \text{ cm}}{\text{longueur totale du forage}} \times 100 \quad (\text{D-1})$$

Palmström (1982) a suggéré que le *RQD* puisse être lié et déduit du nombre de discontinuités par unité de volume. Il a proposé la relation suivante, qui serait valable pour des roches sans argile et utilisable lorsqu'aucun forage n'est disponible mais que des traces de discontinuités sont visibles en surface :

$$RQD = 115 - 3,3J_v \quad (\text{D-2})$$

où J_v est la densité volumique des joints, c'est-à-dire la somme du nombre de joints par m^3 , pour toutes les familles de discontinuités présentes (*ISRM*, 1978). Ce paramètre permet de déterminer les dimensions des blocs dans un système rocheux fracturé.

2 Le Tunnelling Quality Index (Barton, 1974)

Le *Tunnelling Quality Index (NGI rock mass classification)*, ou Q , a été introduit par Barton, Lien et Lunde en 1974. Sur la base d'analyses d'un grand nombre de cas d'excavations souterraines, cet indice permet de rendre compte de la qualité de surface des discontinuités, afin d'en déduire le comportement mécanique de la masse rocheuse.

Les valeurs numériques de l'indice Q varient sur une base logarithmique de 0,001 à 1 000, d'après la formule suivante :

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \quad (\text{D-3})$$

où RQD est le *Rock Quality Designation index*,
 J_n est un nombre caractérisant l'ensemble formé par les familles de joints,
 J_r caractérise la rugosité des joints,
 J_a caractérise l'altération des joints,
 J_w est le facteur de réduction hydraulique des joints,
 SRF est le facteur de réduction des contraintes (*Stress Reduction Factor*)

Chacun de ces paramètres peut être estimé à partir des Tableaux D-1, D-2 et D-3.

DESCRIPTION	VALUE	NOTES
1. ROCK QUALITY DESIGNATION	R_{QD}	
A. Very poor	0 – 25	1. Where <i>R_{QD}</i> is reported or measured as ≤ 10 (including 0), a nominal value of 10 is used to evaluate <i>Q</i> .
B. Poor	25 – 50	
C. Fair	50 – 75	
D. Good	75 – 90	2. <i>R_{QD}</i> intervals of 5, i.e. 100, 95, 90, etc. are sufficiently accurate
E. Excellent	90 – 100	
2. JOINT SET NUMBER	J_n	
A. Massive, no or few joints	0.5 – 1.0	
B. One joint set	2	
C. One joint set plus random	3	
D. Two joint sets	4	1. For intersections use (3.0 × J _n)
E. Two joint sets plus random	6	
F. Three joint sets	9	2. For portals use (2.0 × J _n)
G. Three joint sets plus random	12	
H. Four or more joint sets, random, heavily jointed, 'sugar cube', etc.	15	
J. Crushed rock, earthlike	20	
3. JOINT ROUGHNESS NUMBER	J_r	
a. Rock wall contact		
b. Rock wall contact before 10 cm shear		
A. Discontinuous joints	4	
B. Rough and irregular, undulating	3	
C. Smooth undulating	2	1. Add 1.0 if the mean spacing of the relevant joint set is greater than 3 m
D. Slickensided undulating	1.5	
E. Rough or irregular, planar	1.5	
F. Smooth, planar	1.0	2. J _r = 0.5 can be used for planar, slickensided joints having lineations, provided that the lineations are oriented for minimum strength
G. Slickensided, planar	0.5	
c. No rock wall contact when sheared		
H. Zones containing clay minerals thick enough to prevent rock wall contact	1.0 (nominal)	
J. Sandy, gravely or crushed zone thick enough to prevent rock wall contact	1.0 (nominal)	
4. JOINT ALTERATION NUMBER	J_a	φ_r
a. Rock wall contact		
A. Tightly healed, hard, non-softening, impermeable filling	0.75	
B. Unaltered joint walls, surface staining only	1.0	25 – 35
C. Slightly altered joint walls, non-softening mineral coatings, sandy particles, clay-free disintegrated rock, etc.	2.0	25 – 30
D. Silty-, or sandy-clay coatings, small clay-fraction (non-softening)	3.0	20 – 25
E. Softening or low-friction clay mineral coatings, i.e. kaolinite, mica. Also chlorite, talc, gypsum and graphite, etc., and small quantities of swelling clays. (Discontinuous coatings, 1 – 2 mm or less)	4.0	8 – 16
		1. Values of φ _r , the residual friction angle, are intended as an appropriate guide to the mineralogical properties of the alteration products, if present

Tableau D-1 : Classification de Barton : paramètres individuels pour le calcul de l'indice *Q*, d'après Barton et al, 1974.

DESCRIPTION	VALUE		NOTES
5. JOINT ALTERATION NUMBER	J_a	ϕ_r	
b. Rock wall contact before 10 cm shear			
F. Sandy particles, clay-free, disintegrated rock, etc.	4.0	25 – 30	
G. Strongly over-consolidated, non-softening clay mineral fillings (continuous < 5 mm thick)	6.0	16 – 24	
H. Medium or low over-consolidation, softening clay mineral fillings (continuous < 5 mm thick)	8.0	12 – 16	
J. Swelling clay fillings, i.e. montmorillonite, (continuous < 5 mm thick). Values of J_a depend on percent of swelling clay-size particles, and access to water	8.0 – 12.0	6 – 12	
d. No rock wall contact when sheared			
I. Zones or bands of disintegrated or crushed rock and clay (see Gn H and J for clay conditions)	6.0 – 12.0	6 – 24	
J. Zones or bands of silty- or sandy-clay, small clay fraction, non-softening	5.0		
K. Thick continuous zones or bands of clay (see G, H and J for clay conditions)	6.0 – 24.0		
6. JOINT WATER REDUCTION			
	J_w	Approx. water pressure (kgf/cm ²)	
I. Dry excavation or minor inflow i.e. <5 l/m locally	1.0	< 1.0	
J. Medium inflow or pressure, occasional outwash of joint fillings	0.66	1.0 – 2.5	
K. Large inflow or high pressure in competent rock with unfilled joints	0.5	2.5 – 10.0	
L. Large inflow or high pressure	0.33	> 10	
M. Exceptionally high inflow or pressure at blasting, decaying with time	0.2 – 0.1		
N. Exceptionally high inflow or pressure	0.1 – 0.05	> 10	
7. STRESS REDUCTION FACTOR			
a. Weakness zones intersecting excavation, which may cause loosening of rock mass when tunnel is excavated		SRF	
A. Multiple occurrences of weakness zones containing clay or chemically disintegrated rock, very loose surrounding rock (any depth)		10.0	
B. Single weakness zones containing clay, or chemical disintegrated rock (excavation depth < 50 m)		5.0	
C. Single weakness zones containing clay, or chemical disintegrated rock (excavation depth > 50 m)		2.5	
D. Multiple shear zones in competent rock (clay free), loose surrounding rock (any depth)		7.5	
E. Single shear zone in competent rock (clay free), (depth of excavation < 50 m)		5.0	
F. Single shear zone in competent rock (clay free), (depth of excavation > 50 m)		2.5	
G. Loose open joints, heavily jointed or ‘sugar cube’, (any depth)		5.0	
		1. Reduce these values of <i>SRF</i> by 25 – 50% but only if the relevant shear zones influence do not intersect the excavation	

Tableau D-2 : Classification de Barton : paramètres individuels pour le calcul de l'indice Q , d'après Barton et al, 1974. (suite)

DESCRIPTION	VALUE			NOTES
8. STRESS REDUCTION FACTOR				
b. Competent rock, rock stress problems				
	σ_c/σ_1	σ_t/σ_1		
H. Low stress, near surface	> 200	> 13	2.5	
J. Medium stress	200 – 10	13 – 0.66	1.0	2. For strongly anisotropic virgin stress field (if measured): when $5 \leq \sigma_1/\sigma_3 \leq 10$, reduce σ_c to $0.8\sigma_c$ and σ_t to $0.8\sigma_t$. When $\sigma_1/\sigma_3 > 10$ reduce σ_c to $0.6\sigma_c$ and σ_t to $0.6\sigma_t$.
K. High stress, very light structure (usually favourable to stability, may be unfavourable to wall stability)	10 – 5	0.66 – 0.33	0.5 – 2	
L. Mild rockburst (massive rock)	5 – 2.5	0.33 – 0.16	5 – 10	
M. Heavy rockburst (massive rock)	< 2.5	< 0.16	10 – 20	
c. Squeezing rock, plastic flow of incompetent rock under influence of high rock pressure				
N. Mild squeezing rock pressure			5 – 10	3. Few case records available when depth of crown below surface is less than span width. Suggest <i>SRF</i> increase from 2.5 to 5 for such cases (see H)
O. Heavy squeezing rock pressure			10 – 20	
d. Swelling rock, chemical swelling activity depending on presence of water				
P. Mild squeezing rock pressure			5 – 10	
R. Heavy squeezing rock pressure			10 – 15	
ADDITIONAL NOTES ON THE USE OF THESE TABLES				
When making estimates of the rock mass Quality (<i>Q</i>), the following guidelines should be followed in addition to the notes listed in the tables.				
1. When borehole core is available, <i>RQD</i> can be estimated from the number of joints per unit volume, in which the number of joints per metre for each joint set are added. A simple relationship can be used to convert this number to <i>RQD</i> for the case of clay free rock masses. $RQD = 115 - 3.3J_v$ (approx.), where J_v = total number of joints per m^3 ($0 < RQD < 100$ for $35 > J_v > 4.5$).				
2. The parameter J_n representing the number of joint sets will often be affected by foliation, schistosity, slaty cleavage or bedding, etc. if strongly developed, these parallel 'joints' should obviously be counted as a complete joint set. However, if there are few 'joints' visible, or if only occasional breaks in the core are due to these features, then it will be more appropriate to count them as 'random' joints when evaluating J_n .				
3. The parameters J_r and J_a (representing shear strength) should be relevant to the weakest significant joint set or clay filled discontinuity in the given zone. However, if the joint set or discontinuity with the minimum value of J_r / J_a is favourably oriented for stability, then a second, less favourably oriented joint set or discontinuity may sometimes be more significant, and its higher value of J_r / J_a should be used when evaluating <i>Q</i> . The value of J_r / J_a should in fact relate to the surface most likely to allow failure to initiate.				
4. When a rock mass contains clay, the factor <i>SRF</i> appropriate to loosening loads should be evaluated. In such cases the strength of the intact rock is of little interest. However, when jointing is minimal and clay is completely absent, the strength of the intact rock may become the weakest link, and the stability will then depend on the ratio rock-stress/rock-strength. A strongly anisotropic stress field is unfavourable for stability and is roughly accounted for as in note 2 in the table for stress reduction factor evaluation.				
5. The compressive and tensile strengths (σ_c and σ_t) of the intact rock should be evaluated in the saturated condition if this is appropriate to the present and future in situ conditions. A very conservative estimate of the strength should be made for those rocks that deteriorate when exposed to moist or saturated conditions.				

Tableau D-3 : Classification de Barton : paramètres individuels pour le calcul de l'indice *Q*, d'après Barton et al, 1974. (fin)

Le *Tunnelling Quality Index Q* peut alors être considéré comme une fonction de seulement trois paramètres, qui sont une mesure directe :

1. de la taille des blocs (RQD/J_n) ,
2. de la résistance au cisaillement inter-blocs (J_r/J_a) , et
3. des contraintes actives globales et hydrauliques (J_w/SRF) .

3 Le Rock Mass Rating (*Bieniawski, 1976*)

Bieniawski a publié en 1976 les détails d'une classification des masses rocheuses intitulée *Geomechanics Classification or the Rock Mass Rating (RMR) system*. Depuis la version originale, certaines modifications ont été apportées. Désormais, plusieurs variantes de la classification de Bieniawski sont disponibles. Les versions 1976 et 1989 sont les plus couramment utilisées.

La classification de Bieniawski prévoit l'évaluation de différents paramètres pour chacun desquels un coefficient numérique est attribué suivant le barème présenté dans le Tableau D-4. La somme de ces coefficients détermine la valeur du *RMR*, qui peut varier entre 0 et 100.

Les six paramètres suivants sont nécessaires pour estimer la résistance à la compression d'un massif rocheux en utilisant le système *RMR* :

1. la résistance à la compression uniaxiale de la roche,
2. la valeur de l'indice *RQD* pour la masse rocheuse,
3. l'espacement des discontinuités,
4. l'état des discontinuités,
5. les conditions hydrauliques, et
6. l'orientation des discontinuités.

A. CLASSIFICATION PARAMETERS AND THEIR RATINGS									
Parameter			Range of values						
1	Strength of intact rock material	Point-load strength index	>10 MPa	4 - 10 MPa	2 - 4 MPa	1 - 2 MPa	For this low range - uniaxial compressive test is preferred		
		Uniaxial comp. strength	>250 MPa	100 - 250 MPa	50 - 100 MPa	25 - 50 MPa	5 - 25 MPa	1 - 5 MPa	< 1 MPa
	Rating	15	12	7	4	2	1	0	
2	Drill core Quality RQD		90% - 100%	75% - 90%	50% - 75%	25% - 50%	< 25%		
	Rating		20	17	13	8	3		
3	Spacing of discontinuities		> 2 m	0.6 - 2 . m	200 - 600 mm	60 - 200 mm	< 60 mm		
	Rating		20	15	10	8	5		
4	Condition of discontinuities (See E)		Very rough surfaces Not continuous No separation Unweathered wall rock	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Slightly weathered walls	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Highly weathered walls	Slickensided surfaces or Gouge < 5 mm thick or Separation 1-5 mm Continuous	Soft gouge >5 mm thick or Separation > 5 mm Continuous		
	Rating		30	25	20	10	0		
5	Ground water	Inflow per 10 m tunnel length (l/m)	None	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125		
		(Joint water press)/ (Major principal σ)	0	< 0.1	0.1, - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5		
		General conditions	Completely dry	Damp	Wet	Dripping	Flowing		
	Rating		15	10	7	4	0		
B. RATING ADJUSTMENT FOR DISCONTINUITY ORIENTATIONS (See F)									
Strike and dip orientations			Very favourable	Favourable	Fair	Unfavourable	Very Unfavourable		
Ratings	Tunnels & mines		0	-2	-5	-10	-12		
	Foundations		0	-2	-7	-15	-25		
	Slopes		0	-5	-25	-50			
C. ROCK MASS CLASSES DETERMINED FROM TOTAL RATINGS									
Rating			100 ← 81	80 ← 61	60 ← 41	40 ← 21	< 21		
Class number			I	II	III	IV	V		
Description			Very good rock	Good rock	Fair rock	Poor rock	Very poor rock		
D. MEANING OF ROCK CLASSES									
Class number			I	II	III	IV	V		
Average stand-up time			20 yrs for 15 m span	1 year for 10 m span	1 week for 5 m span	10 hrs for 2.5 m span	30 min for 1 m span		
Cohesion of rock mass (kPa)			> 400	300 - 400	200 - 300	100 - 200	< 100		
Friction angle of rock mass (deg)			> 45	35 - 45	25 - 35	15 - 25	< 15		
E. GUIDELINES FOR CLASSIFICATION OF DISCONTINUITY conditions									
Discontinuity length (persistence)			< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m		
Rating			6	4	2	1	0		
Separation (aperture)			None	< 0.1 mm	0.1 - 1.0 mm	1 - 5 mm	> 5 mm		
Rating			6	5	4	1	0		
Roughness			Very rough	Rough	Slightly rough	Smooth	Slickensided		
Rating			6	5	3	1	0		
Infilling (gouge)			None	Hard filling < 5 mm	Hard filling > 5 mm	Soft filling < 5 mm	Soft filling > 5 mm		
Rating			6	4	2	2	0		
Weathering			Unweathered	Slightly weathered	Moderately weathered	Highly weathered	Decomposed		
Ratings			6	5	3	1	0		
F. EFFECT OF DISCONTINUITY STRIKE AND DIP ORIENTATION IN TUNNELLING**									
Strike perpendicular to tunnel axis					Strike parallel to tunnel axis				
Drive with dip - Dip 45 - 90°			Drive with dip - Dip 20 - 45°		Dip 45 - 90°		Dip 20 - 45°		
Very favourable			Favourable		Very unfavourable		Fair		
Drive against dip - Dip 45-90°			Drive against dip - Dip 20-45°		Dip 0-20 - Irrespective of strike°				
Fair			Unfavourable		Fair				

* Some conditions are mutually exclusive . For example, if infilling is present, the roughness of the surface will be overshadowed by the influence of the gouge. In such cases use A.4 directly.

** Modified after Wickham et al (1972).

Tableau D-4 : Détails de la classification RMR, d'après Bieniawski (1989).

4 Le Geological Strength Index (Hoek et Brown, 1995)

Introduit par Hoek (1995) et Hoek, Kaiser et Bawden (1995), le *GSI* est un nombre sans dimension, déterminé empiriquement, qui varie entre 5 et 85, et qui peut être estimé à partir d'un examen de la qualité de la masse rocheuse in situ. La méthode *GSI* s'appuie donc sur une observation directe de la structure du massif rocheux.

La Figure D-1 (d'après Hoek, 1995) présente les 20 codes qui permettent d'identifier chaque catégorie de masses rocheuses, et d'estimer la valeur du *GSI* à partir des conditions de surface des discontinuités et de leur structure.

Par définition, les valeurs proches de 5 correspondent à des matériaux de très mauvaise qualité, tandis que les valeurs proches de 85 décrivent des matériaux d'excellente qualité (pour lesquels la résistance de la masse est égale à celle de la matrice rocheuse).

Cependant, en raison du manque de paramètres mesurables plus représentatifs, et de la largeur des intervalles permettant de décrire les conditions de surface des discontinuités, seules des gammes de valeurs peuvent être estimées à partir de la classification *GSI*.

Par exemple, pour une roche FRACTURÉE avec des discontinuités ayant des conditions de surface TRES BONNES, les valeurs du *GSI* obtenues à partir de la Figure D-1 varient entre 63 et 85.

L'imprécision apparente peut susciter des interrogations, mais Hoek indique que la géologie n'aspire pas à une telle précision et qu'il serait simplement irréaliste d'assigner une valeur unique. Il ajoute que pour des études préliminaires il peut être prudent de considérer des déviations plus importantes pour les paramètres d'entrée.

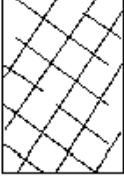



<p>CARACTERISTIQUES DE LA MASSE ROCHEUSE POUR L'ESTIMATION DE LA RESISTANCE</p> <p>A partir de l'apparence de la roche, choisir la catégorie qui donne, selon vous, la meilleure description des conditions moyennes de structure in situ. [...] Le critère de Hoek-Brown devrait uniquement être appliqué à des masses rocheuses dont la taille des blocs individuels est petite devant celle de l'excavation.</p>		<p>CONDITIONS DE SURFACE</p> <p>TRES BONNES Surfaces fraîches, non-altérées, très rugueuses</p> <p>BONNES Surfaces couleur de fer, rugueuses et légèrement altérées</p> <p>MOYENNES Surfaces lisses, altérées ou moyennement altérées</p> <p>PAUVRES Surfaces aux contours lisses, fortement altérées avec enduit ou remplissage compact de fragments anguleux</p> <p>TRES PAUVRES Surfaces aux contours lisses, fortement altérées avec enduit ou remplissage d'argile plastique</p>					
STRUCTURE	QUALITÉ DÉCROISSANTE						
<p>AGENCEMENT DES BLOCS ROCHEUX DÉCROISSANT</p>		80	70	60	50	40	
		 <p>FRACTURÉE – masse rocheuse non perturbée, très bien assemblée, constituée de blocs cubiques formés par trois familles de discontinuités orthogonales</p>	70	60	50	40	30
		 <p>TRÈS FRACTURÉE – masse rocheuse partiellement perturbée, bien assemblée, constituée de blocs anguleux à plusieurs facettes formés par au moins quatre familles de discontinuités orthogonales</p>	60	50	40	30	20
		 <p>FRACTURÉE/DESTRUCTURÉE – blocs anguleux formés par plusieurs familles de discontinuités entrecoupées, avec pliures et/ou failles</p>	50	40	30	20	10
		 <p>DÉSINTÉGRÉE – masse rocheuse fortement broyée, mal assemblée, avec un mélange de blocs rocheux anguleux et arrondis</p>	40	30	20	10	0

Figure D-1 : Estimation du GSI à partir d'une description géologique de la masse rocheuse, d'après Hoek et Brown (1995).

5 Le GSI modifié (Sonmez et Ulusay, 1999)

Sonmez et Ulusay (1999) ont proposé des perfectionnements à la classification *GSI* qu'ils estiment trop approximative. A leur avis, le manque de paramètres permettant de décrire les conditions de surface des discontinuités et la structure de la masse rocheuse empêche d'obtenir des valeurs plus précises du *GSI*. Pour ces raisons, ils ont suggéré l'introduction de deux paramètres additionnels :

➤ *le Surface Condition Rating SCR :*

Cet indice s'obtient par sommation de 3 coefficients décrivant la rugosité, l'altération et le remplissage des joints :

$$SCR = R_r + R_w + R_f \quad (D-4)$$

R_r , R_w et R_f peuvent être estimés à partir du tableau situé en haut à droite de la Figure D-2. La valeur maximale pouvant être atteinte par le *SCR* étant 18, l'axe horizontal de la classification *GSI* a été divisé en 18 intervalles de même longueur.

➤ *le Structure Rating SR :*

La dimension des blocs peut être un indicateur très important du comportement mécanique de la roche : de grands blocs sont en général moins déformables, et moins sujets à des rotations que des blocs plus petits.

La courbe semi-logarithmique située en haut à gauche de la Figure D-2 permet de déduire une valeur du *SR*, à partir de la mesure de la densité volumique des joints (J_v).

A l'aide de ces deux paramètres supplémentaires, Sonmez et Ulusay estiment que l'apport d'informations concernant les propriétés structurelles de la roche permettent de déterminer une valeur plus précise pour le *GSI*.

On peut toutefois s'interroger sur la validité de cette argumentation, au vu de la précision discutable des paramètres additionnels utilisés (notamment J_v).

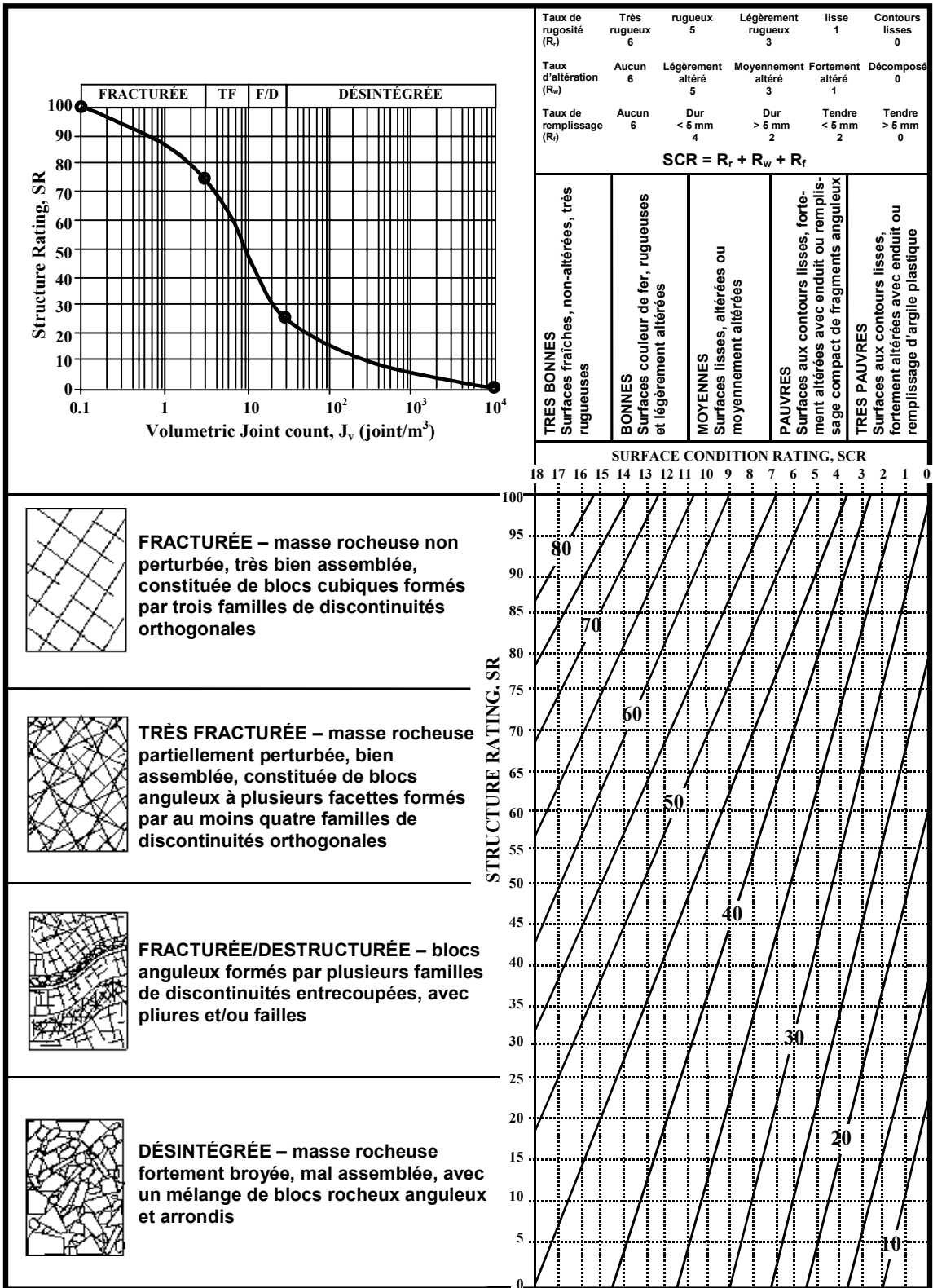


Figure D-2 : Classification GSI modifiée, d'après Sonmez et Ulusay (1999).

6 Corrélations entre les différentes méthodes de classification

Des relations empiriques existent entre ces différents indices. Bieniawski propose de relier le *RMR* et le *Tunnelling Quality Index Q* de Barton :

$$RMR = 9 \log Q + 44 \quad (D-5)$$

Pour des roches de bonne qualité ($GSI > 25$), la valeur de *GSI* peut également être estimée directement à partir de la version 1976 du *RMR* de Bieniawski :

$$GSI = RMR_{76}^* \quad (D-6)$$

* avec un *groundwater rating* de 10 (humide) et un ajustement pour l'orientation des discontinuités égal à 0 (très favorable) (Tableau D-4).

De même, si la version 1989 de la classification *RMR* de Bieniawski est utilisée, alors on peut estimer un *GSI* correspondant :

$$GSI = RMR_{89} - 5^* \quad (D-7)$$

* avec un *groundwater rating* de 15 (sec) et un ajustement pour l'orientation des discontinuités égal à 0.