

CHAPITRE VI

CLASSIFICATIONS

GEOMECANQUES DES MASSIFS

ROCHEUX

4.1. INTRODUCTION

4.2. LES CLASSIFICATIONS GEOMECANQUES

4.2.1. Types et buts des systèmes de classification

4.2.2. Rock Quality Designation (RQD)

4.2.3. Rock Mass Rating (RMR):

4.2.4. Le Q-Système

4.1. INTRODUCTION

Dans cette partie, nous abordons le sujet des méthodes de classification géomécaniques des massifs rocheux. En premier lieu, nous présentons les types de classification existante, puis nous exposons quatre classifications géomécaniques largement utilisées dans le domaine de la Mécanique des Roches : RQD, RMR, Qsystème, GSI

4.2. LES CLASSIFICATIONS GEOMECANIQUES

4.2.1. Types et buts des systèmes de classification

Les classifications des massifs rocheux fracturés continuent à évoluer depuis plus d'un siècle. Leur utilisation a un intérêt considérable lors de l'étude de faisabilité et de dimensionnement préliminaire d'un projet, surtout quand les informations mécaniques, hydrologiques et l'état de contrainte in-situ du massif rocheux ne sont pas disponibles.

Les systèmes de classification prennent en considération plusieurs facteurs affectant la stabilité des massifs rocheux. Ces facteurs sont reliés notamment à la résistance de la matrice rocheuse, la présence de l'eau et la description des discontinuités (nombre de familles, espacement, rugosité, altération des épontes, matériau de remplissage). Nous nous intéressons, dans ce qui suit, aux systèmes de classifications quantitatives, nommés également classifications géomécaniques.

Les buts principaux de ces classifications se résument comme suit :

- Estimer indirectement les propriétés mécaniques à grande échelle d'un massif fracturé, en particulier son module de déformation, sa résistance à la compression simple, sa cohésion et son angle de frottement interne.
- Estimer le temps durant lequel le massif rocheux peut tenir sans soutènement (standup time). C'est un indice très essentiel dans la détermination de la portée d'excavation.
- Donner des recommandations de soutènement des ouvrages.

D'après *Singh et Goel [1999]*, la popularité des classifications quantitatives dérivent de plusieurs facteurs :

- Elles représentent un langage commun entre les géologues, les ingénieurs, les concepteurs et les entrepreneurs.
- Moyennant ces classifications, l'observation, l'expérience et le jugement des ingénieurs sont mieux corrélés.

Ces systèmes de classification ont été développés à une époque où la plupart des ouvrages d'excavation sont réalisés par technique dite technique d'essai-erreur. De nos jours, l'utilité de ces systèmes n'est plus recommandée et des précautions doivent être appliquées lorsque ces documents sont consultés, car ces systèmes sont développés pour des conditions d'utilisation particulière ou bien calibrés d'après un nombre très limité d'études de cas documentés. Actuellement, il existe plusieurs systèmes de classification modernes dans la littérature. Le Tableau 4.1 énumère ceux-ci, ainsi que les systèmes plus anciens.

Tableau. 4.1. Système de classification des massifs rocheux

Rock Loads	Référence	Pays d'origine	Applications
Système de classification	Terzaghi, 1946	E.U.A	Tunnels avec support en acier
Stand-up time	Lauffer, 1958	Autriche	Tunnels
New Austrian tunnelling method (NATM)	Rabcewics, 1964/1965, 1975	Autriche	Tunnels
Rock Quality Designation	Deere, 1968	E.U.A	Carottes de forage, tunnels
Rock Strenght Rating (RSR)	Wickham et al, 1972	E.U.A	Tunnels
Rock Mass Rating (RMR)	Bieniawski, 1973, 1974, 1976, 1979, 1989	Afrique du Sud E.A.U	Tunnels, mines, SLOPES, fondations.
Extensions du système RMR	Laubscher 1977, 1984 Ghose and Raju, 1981 Kendorski et al, 1983 Seraphim and Pereira, 1983	Norvège	Mines Mines de charbon Mines en roche dure Fondations

	Gonzales de Vallejo, 1983 Unal, 1983 Romana, 1985 Newman and Bieniawski, 1985		Tunnels Support du toit/charbon Stabilité des pentes Mines de charbon
Rock Mass Quality	Barton et al, 1974	Canada	Tunnels, chambres
Strength-Size	Franklin, 1975		Tunnels
Basic geotechnical description	ISRM, 1981a	Canada	Communication général
Geological strength index (GSI)	Hoek et al, 1995		Mines

Les systèmes le plus utilisés sont sans doute le "Rock Quality Designation" (RQD), "Rock Mass Rating" (RMR) et "Rock Mass Quality" (système Q), ainsi que le GSI. Fondés sur des philosophies différentes, ces systèmes caractérisent la masse rocheuse de manière distincte l'une de l'autre. Essentiellement, ils caractérisent différents paramètres reliés au comportement mécanique du massif rocheux. Avant l'utilisation d'un système de classification particulier, il est primordial de bien saisir les subtilités que présente chacun afin d'assurer la compatibilité avec le massif rocheux étudié.

4.2.2. Rock Quality Designation (RQD)

Deere (1964) propose un paramètre évaluant la qualité du roc de la masse rocheuse selon un index intitulé RQD (Rock Quality Designation). Obtenu à partir de carotte de forage géologique, cet indice représente l'évaluation du pourcentage des carottes récupérées sur une longueur de course précise. Basée sur un procédé qualitatif, seule la somme des longueurs de morceaux de plus de 10 Cm est conservée et cette somme est divisée par la longueur de course de la carotte de forage. Ce paramètre est défini comme suit :

$$RQD (\%) = \frac{\sum \text{longueurs de pièces} \geq 100 \text{ mm}}{\text{longueur totale de lacourse}} * 100 \quad (4.1)$$

Deere et al. (1967) affirment que le RQD s'avère utile pour déterminer le facteur de réduction du module de déformation de la roche intacte à la masse rocheuse.

La relation entre la valeur du RQD et la qualité du massif peut être établie selon la proposition de *Deere (1968)* et elle est présentée au Tableau 4.2 ci-dessous.

Tableau. 4.2. Corrélation entre l'indice RQD et la qualité du massif rocheux.

RQD (%)	Qualité du massif rocheux
< 25	Très pauvre
25 – 50	Pauvre
50 – 75	Moyenne
75 – 90	Bonne
90 - 100	Excellente

Il existe aussi des méthodes alternatives pour estimer l'indice RQD autre que par l'utilisation de carottes de forage géologique. *Priest et Hudson (1976)* ont établi une relation entre l'espacement des joints ([joints/mètre]) déterminé à partir de mesure de surface du massif rocheux exposé et de l'indice RQD:

$$RQD = 100e^{-0.1\lambda}(0.1\lambda + 1) \quad (4.2)$$

Lorsqu'aucun forage géologique n'est disponible, cette corrélation s'avère très utile. La méthode suivante est proposée pour un massif rocheux sans remplissage d'argile. Proposé par *Palmström (1982)*, l'indice RQD peut être indirectement déterminé par le nombre de joints/discontinuités par unité de volume pour définir la somme volumétrique des joints (J_v) caractérisant la surface du massif rocheux:

$$RQD = 115 - 3.3 J_v \quad (4.3)$$

Pour $J_v < 4.5$ le RQD = 100

Le système de classification RQD se base sur des forages géologiques standard et sa plus grande force retombe sur sa simplicité, la vitesse d'acquisition et aussi qu'il est peu coûteux. Le RQD doit être interprété comme un indice de qualité du massif lorsque la roche présente des caractéristiques problématiques comme un haut degré de détérioration et se présente par un

comportement ductile, une zone de cisaillement ou un massif fracturé (*Deere et Deere, 1988*). Ceci signifie que l'indice RQD est seulement capable d'évaluer la partie intacte du massif rocheux.

4.2.3. Rock Mass Rating (RMR):

Cette classification a été développée par *Bieniawski [1973]* au *South African Council of Scientific and Industrial Research (SACSIR)*. Elle est basée sur l'étude de quelques centaines de tunnels creusés principalement dans des roches sédimentaires à profondeur modérée. L'utilisation de cette classification nécessite de diviser au préalable le site en régions homogènes d'un point de vue de structures géologiques. Chaque région est classifiée séparément. Le RMR résulte de la somme de cinq notes de caractérisation (de A1 à A5) et d'une note d'ajustement. Ces paramètres sont illustrés sur la figure 4.1.

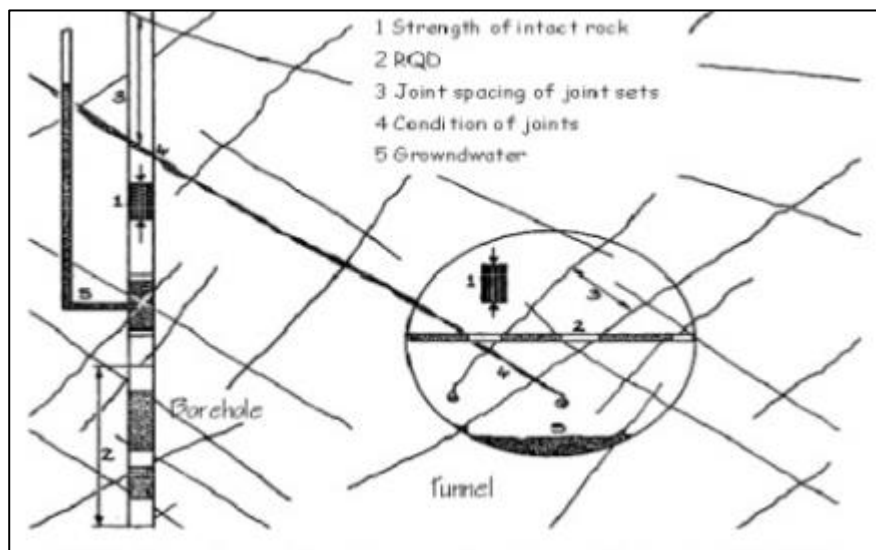


Figure. 4.1. Illustration graphique des paramètres de caractérisation du RMR.

La somme de ces notes attribue une valeur comprise entre 0 et 100 au massif. Cette valeur utilise à plus de 70% la fracturation et elle accorde 15% d'influence aux propriétés de la matrice rocheuse et 15% à la présence d'eau.

La signification des indices du RMR sont définis comme suit :

- A1 (*Strength of intact rock material*) : la résistance à la compression simple de la matrice rocheuse est obtenue, soit par procédure d'écrasement d'un échantillon, soit par procédure de chargement ponctuel (note : de 0 à 15).
- A2 (*Rock Quality Designation RQD, Deer [1964]*): il caractérise la qualité des carottes de sondage en calculant le rapport entre la longueur cumulée des carottes supérieures à dix centimètres et la longueur totale considérée (note : de 3 à 20).
- A3 (*Spacing of discontinuities*) : dans le cas de plusieurs familles de fractures le minimum des notes attribuées à l'espacement des fractures est considéré (note : de 5 à 20).
- A4 (*Conditions of discontinuities*) : cet indice caractérise l'extension, l'ouverture, la rugosité, le matériau de remplissage et l'altération des épontes des discontinuités (note : de 0 à 30).
- A5 (*Groundwater conditions*) : Il est en rapport avec les conditions hydrogéologiques et consiste à réaliser des mesures de flux d'eau ou de pressions interstitielles des joints (note : de 0 à 15).
- B (*Adjustment for joint orientation*) : c'est un facteur correctif qui est en rapport avec l'effet de l'azimut et du pendage des familles de discontinuités sur la stabilité de l'ouvrage (note : de 12 à 12 pour les tunnels, de 25 à 0 pour les fondations et de 60 à 0 pour les talus).

Les sommes des cinq premiers indices caractérisent le RMR de base. Quant aux travaux souterrains, il faut ajouter l'effet du facteur correctif. Le RMR_{89} s'écrit alors :

$$RMR_{89} = A1 + A2 + A3 + A4 + A5 + B \quad (4.4)$$

Cette classification ne prend pas en considération l'état de contrainte in-situ ni la rugosité des fractures et l'angle de frottement du matériau de remplissage ; les roches gonflantes n'y sont pas non plus traitées. L'application de cette classification est limitée aux cas des massifs dont la matrice a une bonne résistance et dont le comportement est régi par les discontinuités. La version 1976 du système de classification (RMR_{76}) l'utilisation du RMR se repose sur la simplicité à déterminer les différents paramètres suivants et leurs pondérations.

- A1 : Résistance en compression uniaxiale de la roche intacte.
- A2: Rock Quality Index (RQD).

- A3 : Espacement des diaclases.
- A4 : Condition des joints.
- A5 : L'état d'infiltration d'eau souterraine.
- A6 : Orientation des discontinuités.

$$RMR_{76} = A1 + A2 + A3 + A4 + A5 + A6 \quad (4.4)$$

Tableau. 4.3. Classification du massif rocheux selon RMR, traduit de Bieniawski

Classe du massif	RMR	qualification
I	81 – 100	Excellente
II	61 – 80	Bonne
III	41 - 60	Moyenne
IV	21 – 40	Faible
V	< 20	Très faible

4.2.4. Le Q-Système

Barton et al. (1974) ont introduit le système Q, un indice permettant de décrire la qualité de la masse rocheuse pour l'excavation de tunnels. Le système de classification se nomme *Rock Mass Quality* ou *Tunnelling Quality Index* (système Q) ou tout simplement système du NGI en hommage de *l'Institution Géotechnique Norvégienne*.

Le système Q juge important d'évaluer, en tant que paramètres de classification, six caractéristiques particulières du massif rocheux, soit :

- Indice RQD (*Deere, 1964*) ;
- Nombre de familles de joints (JN) ;
- Indice de rugosité des joints (JR), celle du plus faible plan de fissuration ;
- Indice de l'altération des joints (JA), caractéristiques de ce dont les fissures sont remplies;
- Facteur de réduction pour la présence d'eau (JW) ;
- Facteur de réduction pour les contraintes in situ (SRF).

CHAPITRE IV : Classifications géomécaniques des massifs rocheux

La valeur des différents paramètres de cette classification, ainsi que des notes explicatives supplémentaires permettant d'évaluer ceux-ci plus adéquatement, sont donnés au Tableau 4.4.

Tableau. 4.4. Valeur des différents paramètres de la classification Q-Système.

Nombre de famille de diaclases	Jn	
Massif, peu ou pas de diaclases	0.5 – 1	
Une famille de diaclases	2	
Une famille et diaclases aléatoires	3	
Deux familles de diaclases	4	
Deux famille et diaclases aléatoires	6	
Trois familles de diaclases	9	1 pour une intersection, utilisez $3 \times Jn$
Trois familles et diaclases aléatoires	12	
Quatre familles et plus, diaclases aléatoires très nombreuses	15	2 pour un portail, utilisez $3 \times Jn$
Roche concassée, semblable à un sol	20	
Rugosité des diaclases	Jr	
<i>Parois en contact</i>		
Diaclases discontinues	4	
Rugueuses, irrégulières, ondulées	3	
Lisses, ondulées	2	
Très lisses, ondulées	1.5	1. Ajoutez 1.0 si l'espacement moyen de la famille dominante > 3m
Rugueuses ou irrégulières, planaires	1.5	
Lisses, planaires	1	
Très lisses, planaires	0.5	
<i>parois séparées lorsque cisaille</i>		
Zone avec remplissage de minéraux argileux assez épais pour empêcher le contact des parois.	1	
Zone sableuse, de gravier ou concassé assez épaisse pour empêcher le contact des parois.	1	

Altération des diaclases	Jr	
<i>Parois en contact</i>		
Dure, élastiques, remplissage imperméable		0.75
Non altérées, salissage de surface seulement		1
Légèrement altérées, minéraux non déformables, particules sableuses etc.		2
Remplissage silteux, sableux, avec une faible fraction d'argile		3
Matériaux déformables, i.e kaolinite, mica etc. épaisseur < 1-2 mm		4
Infiltration d'eau	Jw	Pression d'eau (kgf/cm²)
Sec ou infiltration mineure <5 l/m	1	< 0.1
Infiltration moyenne, lessivage occasionnel	0.66	1.0 – 2.5
Infiltration importante, roc compétant sans remplissage	0.5	2.5 – 10
Infiltration importante	0.33	2.5 – 10
Infiltration exceptionnelle importante après sautage, réduction dans le temps	0.2 – 0.1	> 10
Infiltration exceptionnellement importante	0.1 0.05	> 10

Le calcul de la cote Q se fait comme suit et varie sur une échelle logarithmique de 0,001 à 1000 :

$$Q = \left[\frac{RQD}{J_N} \right] \cdot \left[\frac{J_R}{J_A} \right] \cdot \left[\frac{J_w}{SRF} \right] \quad (4.5)$$

Les trois quotients de la formule représentent des caractéristiques particulières du massif rocheux, l'interprétation est la suivante :

- RQD/JN représente la structure globale du massif, ce qui constitue une mesure approximative de la taille des blocs rocheux (éléments dissemblables) ;

- JR/JA représente la résistance au cisaillement des discontinuités (les plus défavorables ou argileuses) séparant les blocs rocheux ;
- JW/SRF consiste le paramètre de réduction due à la présence d'eau JW qui a un effet néfaste sur la résistance au cisaillement et indirectement quant à l'évaluation de l'état général des contraintes SRF.

La cote Q permet d'évaluer qualitativement la masse rocheuse selon neuf catégories de qualité pour la construction de tunnels. Le Tableau 4.5 présente cette qualification :

Tableau. 4.5. Evaluation de la cote Q et de la qualité du massif

Indice Q	Qualité de la masse rocheuse
0.001 – 0.01	Exceptionnellement pauvre
0.01 – 0.1	Extrêmement pauvre
0.1 – 1	Très pauvre
1 – 4	Pauvre
4 – 10	Moyenne
10 – 40	Bonne
40 – 100	Très bonne
100 – 400	Extrêmement bonne
400	Exceptionnellement bonne

Bieniawski [1976] a été le premier à proposer des corrélations empiriques entre le RMR et le Q-system.:

$$\text{RMR} = 9 \log Q + 44 \quad (4.6)$$

Le RMR et le Q-system ne prennent pas en considération les mêmes paramètres et donc, elles ne sont pas équivalentes.

4.2.5. Le Géological Strenght Index (GSI)

Introduit par *Hoek et al. [1995]* puis amélioré par *Hoek et Brown [1997]*, le *Geological Strength Index* ne présente pas une classification géomécanique en tant que telle. Cependant, il

constitue un lien entre le RMR (Q-system) et la détermination des paramètres de déformabilité et de résistance des massifs rocheux.

Afin d'estimer le GSI, il est nécessaire de calculer le RMR de base et le Q qui sont des valeurs modifiées de RMR et de Q. Le RMR de base est calculé en retenant une valeur 15 pour le coefficient relatif à l'eau (A5) et une valeur nulle pour le coefficient de correction relatif à l'orientation des discontinuités (B).

$$RMR_{\text{Base}} = A1 + A2 + A3 + A4 + 15 \quad (4.7)$$

De même, Q' se calcule en ne tenant pas compte de l'état initial du massif par rapport à l'eau et aux contraintes (Jw/SRF).

$$Q' = \frac{RQD}{Jn} * \frac{Jr}{Ja} \quad (4.8)$$

Ayant calculé RMR' et Q' le GSI se détermine comme suit :

$$GSI = RMR'_{89} - 5 \quad \text{si } RMR'_{89} > 23 \quad (4.9)$$

$$GSI = 9(\log Q' + 44) \quad \text{si } RMR'_{89} \leq 23 \quad (4.10)$$

L'estimation du GSI s'appuie sur une observation directe de la structure du massif rocheux à partir d'un examen de la qualité de la masse rocheuse in situ. Cet indice varie entre 5 et 85. 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.