

III-1) Introduction

Le comportement mécanique d'un massif rocheux dépend, d'une part, de la **matrice rocheuse**, et d'autre part, des **discontinuités** (ou *joints*), qui le divisent en blocs. L'analyse structurale (ou tectonique) d'un massif consiste à décrire ces caractéristiques et la disposition de ces discontinuités. De plus, l'eau contenue dans les massifs rocheux influence fortement sur leur comportements mécaniques. L'objectif de ce chapitre est d'apprendre à décrire la structure d'un massif rocheux. La connaissance du cadre géologique général dans lequel se situe le massif, est nécessaire pour sa structure et la nature de la roche.

III-2) Type de discontinuités

Dans les massifs rocheux on peut distinguer plusieurs types de discontinuités, qui découpent massif à des blocs ayant différentes tailles.

- **Joints de stratification** : délimitent les strates des roches sédimentaires— **les plus communs** (*normalement par famille*) ;
- **Fracture** : terme général désignant toute cassure dans la roche ;
- **Dioclase** : fracture sans mouvement de cisaillement (*du grec "dia", à travers, et "klasis", rupture*) ;
- **Fissure** : discontinuité ne traversant pas complètement l'objet considéré ;
- **Faillie** : discontinuité résultant d'un mouvement de cisaillement (le déplacement relatif est appelé *rejet*) ;

III-3) Caractéristiques principales géométriques des joints

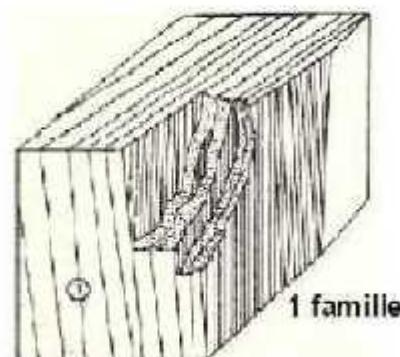
- ✓ Nombre de familles de joints ;
- ✓ Persistance du joint ;
- ✓ Orientation du plan du joint ;
- ✓ Espacement et fréquence des joints, taille du bloc élémentaire et RQD ;
- ✓ Rugosité à la surface du joint et imbrication ;
- ✓ Ouverture du joint et remplissage.

1) Nombre de familles de joints

Les joints sont disposés généralement par familles, par ex des joints parallèles. Le nombre de familles de joints peut aller jusqu'à 5.

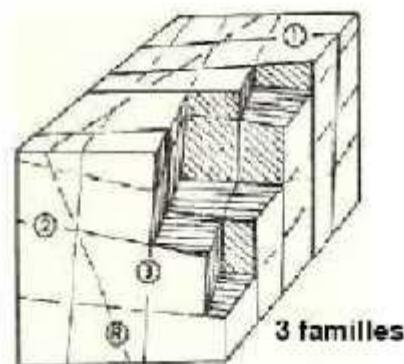
Typiquement, une famille de joint découpe le massif rocheux en plaques, deux familles perpendiculaires découpent la roche en colonnes et trois en blocs. Plus de trois familles découpent la roche en blocs de formes variées et de coins.

Les propriétés mécaniques du massif rocheux sont influencées par les familles de joints. Plus le nombre de familles de joints est grand, plus les possibilités de glissements potentiels sur les joints sont probables.



Description suggérée par l'ISRM

I	Massives, fractures aléatoires occasionnelles
II	Une famille de joints
III	Une famille de joints plus fractures aléatoires
IV	Deux familles de joints
V	Deux familles de joints plus fractures aléatoires
VI	Trois familles de joints
VII	Trois familles de joints plus fractures aléatoires
VIII	Quatre familles de joints ou plus
IX	Roche broyée, comme du sol

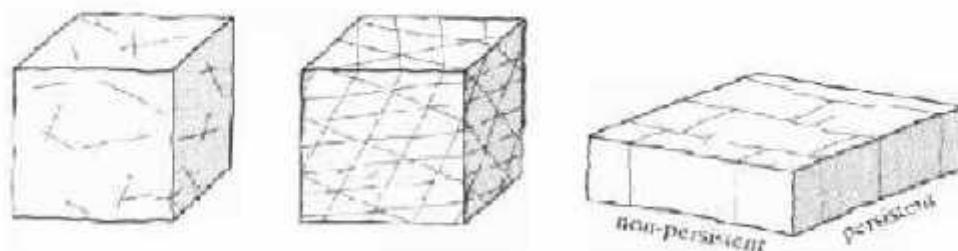


ISRM- International Society of Roc Mechanics

2) Persistance (Etendue ou Extension) du joint

La persistance est l'extension spatiale ou la longueur d'une discontinuité, elle peut être directement mesurée en observant les longueurs des traces des discontinuités sur les affleurements.

La persistance des systèmes de joints contrôle les glissements de grande échelle, rupture de pente en marches d'escalier, fondation de barrage et excavation de tunnel.



Description suggérée par l' ISRM	Longueur de la trace (m)
Persistante très faible	< 1
Persistante faible	1 - 3
Persistante moyenne	3 - 10
Persistante élevée	10 - 20
Persistante très élevée	> 20

3) Orientation du plan des joints

L'orientation du plan moyen d'une discontinuité est décrite par deux angles, un **pendage** et un **azimut**, définis respectivement par rapport à l'horizontale et au nord voir figure.

Le pendage est l'inclinaison de la ligne de plus grande pente. Il est mesuré dans un plan vertical, à l'aide d'un clinomètre. Il est compris entre 0° (pour un plan horizontal) et 90° (pour un plan vertical). On appelle vecteur pendage, le vecteur unitaire porté par la ligne de plus grande pente et dirigé vers le bas.

Pour définir complètement l'orientation d'un plan, il faut un deuxième angle **azimut**, qui est mesuré dans le plan horizontal, par rapport au nord et dans le sens horaire, à l'aide d'une boussole.

4) Espacement des joints, fréquence, taille des blocs, et RQD

Le degré de fracturation d'un massif rocheux est contrôlé par le nombre de joints à l'intérieur du massif. Plus de joints signifie un espacement moyen plus faible entre les joints.

L'espacement des joints contrôle la taille des blocs individuels. Cela contrôle le mode de rupture et l'écoulement. Par exemple, un espacement étroit donne une faible cohésion du massif et une rupture circulaire, voire même d'écoulement.

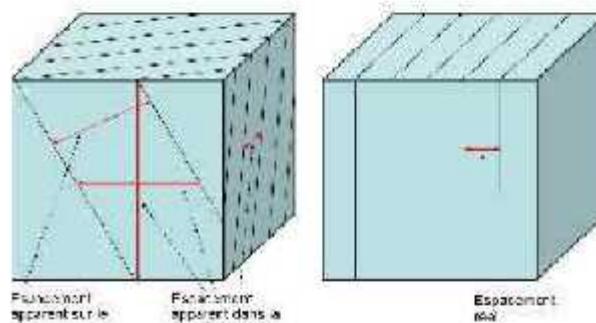
4-1) Espacement des joints

L'espacement des joints est la distance perpendiculaire entre les joints. Pour une famille de joints, il est habituellement exprimé comme l'espacement moyen de cette famille de joint. On mesure souvent l'espacement apparent.

La mesure de l'espacement des joints varie selon les différentes faces et directions de mesures. Par exemple, dans un massif rocheux fissuré verticalement, les mesures selon la direction verticale donneront un espacement bien plus important que selon la direction horizontale.

Classification de l'espacement des joints

Description	Espacement des joints (m)
Espacement extrêmement étroit	< 0.02
Espacement très étroit	0.02 - 0.06
Espacement étroit	0.06 - 0.2
Espacement modéré	0.2 - 0.6
Espacement large	0.6 - 2
Espacement très large	2 - 6
Espacement extrêmement large	> 6



4-2) Fréquence des Joints

La fréquence moyenne λ d'une famille de discontinuités est le nombre de discontinuités recoupées par une ligne de mesure perpendiculaire au plan moyen de la famille, divisé par la longueur de cette ligne ; ($\lambda = \text{nombre de joints} / \text{longueur} = n / L$).

L'espacement moyen **ES** est la moyenne des intervalles découpés par les discontinuités le long de cette ligne. C'est l'inverse de la fréquence : ($S_I = 1 / \lambda$).

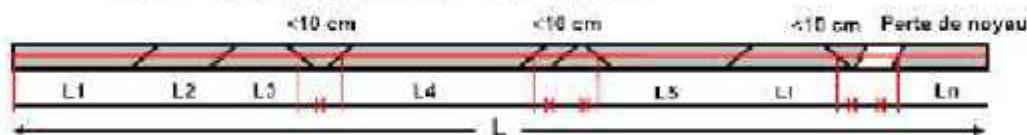
L'histogramme des espacements orthogonaux entre discontinuités d'une même famille reflète la distribution de celles-ci. Il nécessite de relever les distances entre les intersections successives des discontinuités avec la ligne de mesure.

4-3) Densité de fractures du massif - RQD

L'indice **ID** (*intervalle entre discontinuités*) est la moyenne des intervalles découpés par les discontinuités successives le long d'une ligne de mesure (axe d'un forage ou ligne de mesure à affleurement). Il est nécessaire de réaliser des mesures dans plusieurs directions, choisies en fonction des directions des discontinuités. L'inverse de **ID** est une **densité linéique de fractures** appelée aussi **fréquence**. L'histogramme des intervalles mesurés permet d'obtenir une image plus complète de la fracturation (la courbe cumulative de distribution est équivalente à une courbe granulométrique).

L'indice **RQD** (*Rock Quality Designation*) est défini comme le pourcentage des carottes de roches qui ont une longueur égale ou supérieure à 10 cm sur la longueur totale du forage.

$$RQD = \frac{\sum LI}{L} \times 100\%, \quad LI > 10 \text{ cm}$$

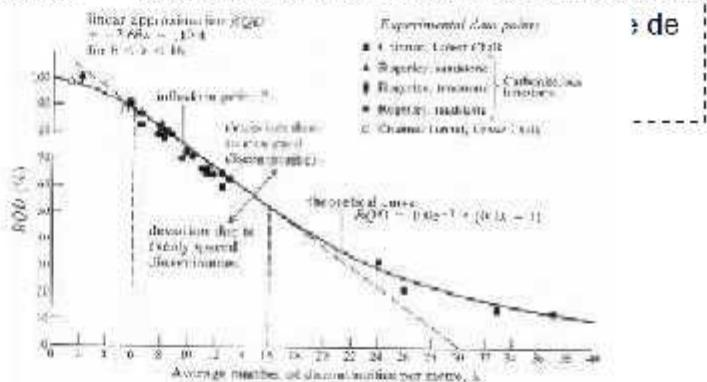


$$RQD = \frac{(L1 + L2 + \dots + Ln)}{L} \times 100\%$$

Pour $L = 6$ et $16/m$, cela peut être approché par :

$$RQD = 110.4 - 3.68\lambda$$

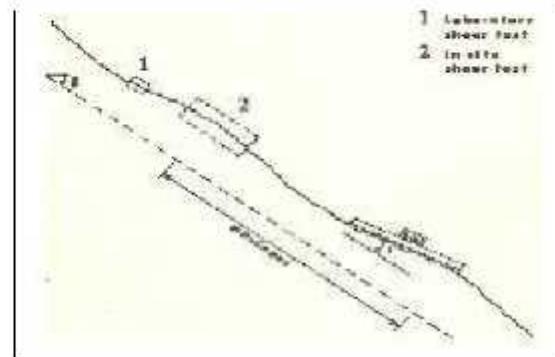
RQD a été initialement proposé pour tenter de décrire la qualité des massifs rocheux. En réalité, il décrit seulement le degré de fracturation, mais pas d'autres propriétés, telles que l'altération des joints, l'eau souterraine et la résistance de la roche.



5) Rugosité de la surface du joint

Un joint est une interface de deux surfaces en contact. Les surfaces peuvent être lisses ou rugueuses; elles peuvent être en bon contact et imbriquées, ou en mauvais contact et ne pas s'imbriquer.

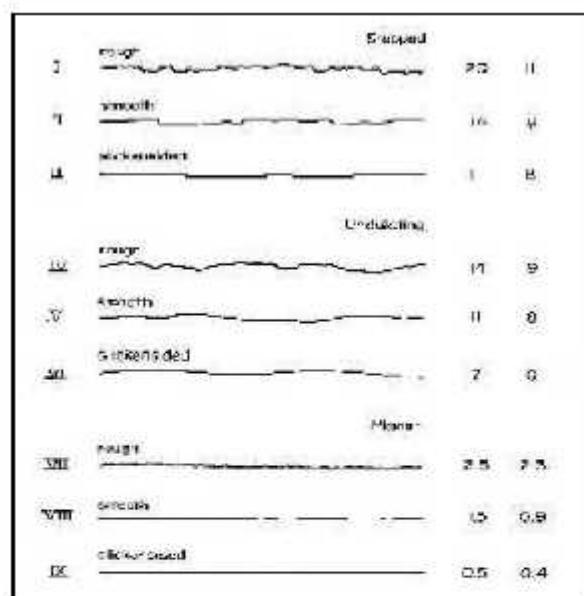
La rugosité de la surface du joint est une mesure des irrégularités et des ondulations de la surface du joint relativement à son plan moyen. La rugosité de la surface du joint est caractérisée par des ondulations à grande échelle et par des irrégularités à petite échelle. C'est le facteur principal qui régit la direction du cisaillement, la résistance au cisaillement, et en conséquence, la stabilité des blocs susceptibles de glisser.



La rugosité devrait premièrement être décrite à l'échelle métrique (marche, ondulation, plan) puis à l'échelle centimétrique (rugueux, aplatie, lisse), comme le suggère l'ISRM. Ce n'est pas une mesure quantitative.

Le coefficient de rugosité du joint (JRC) est une mesure quantitative de la rugosité, variant de 0 pour une surface plane et lisse à 20 pour une surface très rugueuse. La rugosité du joint est liée à une échelle géométrique.

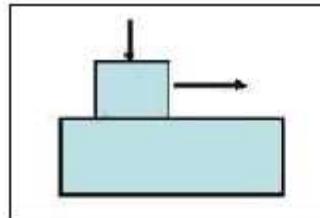
Le nombre JRC est obtenu en comparant directement le profil de la surface réelle avec le profil type dans le diagramme. JRC20 est le profil pour 20 cm et JRC100 pour 100 cm. La valeur du JRC décroît avec une taille croissante.



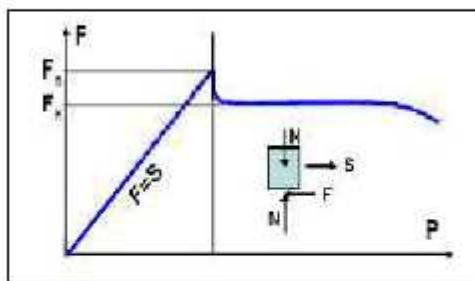
III-4) Résistance au cisaillement et frottement entre les plans de contact (Les Joints)

Le phénomène le plus commun de cisaillement d'une discontinuité est le glissement entre deux surfaces de contact. La théorie du frottement fournit un rapport entre l'angle de frottement ϕ , la force normale (N) et force de cisaillement (T), tel que : $T = N \tan \phi$

Lorsque le glissement sur la surface de contact est à la limite de se produire, la force de frottement statique maximale est proportionnelle à la force normale. Lorsque le glissement se produit, la force de frottement cinétique est proportionnelle à la force normale.



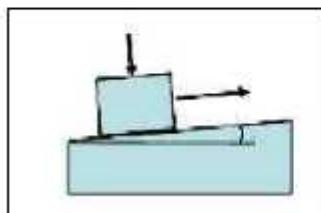
Si la surface de contact est inclinée d'un angle (i), la force normale est $N \cos(i)$, la force de cisaillement est $T \cos(i) - N \sin(i)$. Par la théorie du frottement,



$$T \cos(i) - N \sin(i) = [N \cos(i) + T \sin(i)] \tan \phi,$$

$$T - N \tan(i) = N \tan \phi + T \tan \phi \tan(i),$$

$$T = [N (\tan \phi + \tan(i))] / [1 + \tan \phi \tan(i)]$$



1) Résistance au cisaillement des joints

Le comportement au cisaillement des joints est probablement un des paramètres les plus importants en mécanique des roches et génie civil. Les conditions de glissement de blocs rocheux le long de joints existants et de failles dans des pentes de terrain ou des excavations sont régies par les résistances au cisaillement développées sur les discontinuités.

Dans la pente, le cisaillement est soumis à une charge normale constante générée par le poids des blocs. Dans un tunnel, le cisaillement est soumis à une rigidité constante due aux effets du déplacement latéral.

2) Modèle bilinéaire de résistance au cisaillement

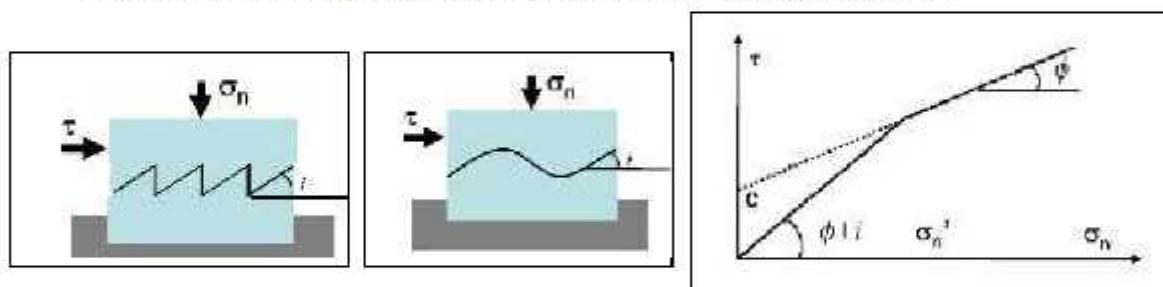
Lorsque l'effort normal dépasse la valeur critique, l'effort de cisaillement peut atteindre une valeur si haute qu'il se produit une rupture par cisaillement à travers les aspérités. Lorsqu'un tel cisaillement à travers les aspérités se produit, la résistance est liée d'une certaine manière à la résistance au cisaillement du matériau des aspérités. Les roches ont une cohésion plus forte et un angle de frottement interne généralement autour de 30° .

Ainsi, la résistance au cisaillement pour une rupture rugueuse peut montrer deux phénomènes, à faible effort normal un cisaillement montant le long des aspérités, et à effort élevé un cisaillement à travers les aspérités. Ceci mène à un modèle bilinéaire de résistance au cisaillement.

$$\tau = \sigma_n \tan(\phi + i) \quad \text{pour } \sigma_n \leq \sigma_n^*$$

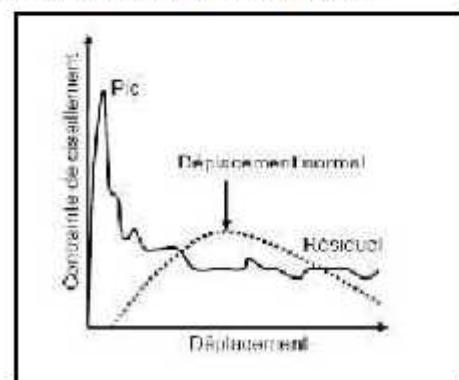
$$\tau = C + \sigma_n \tan \phi \quad \text{pour } \sigma_n \geq \sigma_n^*$$

σ_n^* est l'effort normal critique où le cisaillement des aspérités peut débuter.



Résultats typiques d'essais de cisaillement sur discontinuités

Contrainte normale	Rés. Max. au cisaillement	Rés. Résiduelle cisaillement	Déplacement pour la résistance de cisaillement max
σ_n (MPa)	τ_s (MPa)	τ_r (MPa)	Normal v Shear u (mm)
0.25	0.26	0.16	0.54 2.00
0.50	0.50	0.30	0.87 2.00
1.00	1.00	0.60	0.66 3.20
2.00	1.66	1.16	0.45 3.80
3.00	2.16	1.70	0.30 4.00
4.00	2.60	..	0.16 4.20



Résultat typique d'un essai de cisaillement sous contrainte normale constante

3) Effet de l'eau et pression d'eau

Lorsqu'un joint est humide, il a généralement un angle de frottement plus faible qu'un joint sec. La résistance au cisaillement d'un joint humide est calculée en utilisant l'angle de frottement humide (et drainé). Si un joint est soumis à une pression d'eau, l'effort normal dans l'équation de résistance au cisaillement est l'effort normal effectif, c.-à-d., contrainte totale - pression interstitielle.

III-5) Propriétés des massifs rocheux

1) Paramètres régissant la qualité des roches

Le massif rocheux est constitué de roche intacte et de discontinuités. Les propriétés du massif rocheux sont donc tributaires des paramètres des discontinuités et de la matrice rocheuse, ainsi que des conditions aux limites.

Les changements de comportement du massif, de l'état élastique continu de la roche intacte aux massifs rocheux discontinus fortement fracturés, dépendent essentiellement de la présence des discontinuités.

Principaux paramètres régissant les propriétés du massif rocheux

Paramètres des discontinuités	Paramètres de la roche	Conditions aux limites	RQD	Qualité du massif
Nombre de familles de discontinuités	Résistance à la compression	Pression d'eau et écoulement	< 25	Très pauvre
Orientation	Module d'élasticité	Contraintes in situ	25 - 50	Pauvre
Espacement			50 - 75	Moyen
Ouverture			75 - 90	Bon
Rugosité			90 - 100	Excellent
Erosion et altération				

RQD représente le degré de fracturation du massif rocheux.

2) Le système de classification RMR (Rock Mass Rating)

En 1973 Bieniawski a introduit la Classification Géo-mécanique connue aussi sous le nom *Rock Mass Rating (RMR)*, en Afrique du sud. Lorsque le système RMR est appliqué, le massif rocheux est divisé en plusieurs zones structurelles et chaque zone est classée séparément. Le système *RMR* utilise six paramètres dont leurs notations sont ajoutées pour obtenir une valeur totale de *RMR*.

- (a) Résistance de la roche intacte: résistance à la compression uniaxiale ou indice de résistance ponctuelle;
- (b) RQD;
- (c) Espace des joints: espacement moyen de toutes les discontinuités rocheuses;
- (d) Conditions des joints: ouverture, rugosité, érosion, altération, remplissage;
- (e) Conditions hydrauliques: écoulement ou pression d'eau ;
- (f) Orientation des joints.

Les cinq premiers paramètres représentent les paramètres de base (RMR_{base}) dans le système de classification. Le sixième paramètre est traité séparément car l'effet de l'orientation des discontinuités dépend de type d'application.

$$RMR_{base} = \sum \text{paramètres (i + ii + iii + iv + v)}$$

$$RMR = RMR_{base} + \text{ajustement pour orientation des joints}$$

Selon Bieniawski (1989) le système RMR avait été appliqué au plus de 268 cas comme les tunnels, les mines, les talus, les fondations et cavité en roche. Il faut bien noté que le système RMR est calibré utilisant l'expérience à partir des mines de charbon, excavation en Génie Civil et tunnels moins profonds.

Paramètres pour **RMR** et qualité du massif rocheux

Notes RMR	81 – 100 A Très bonne roche	61 – 80 B Bonne roche	41 – 60 C Roche moyenne	21 – 40 D Mauvaise roche	< 20 E Roche très médiocre
Temps de tenue moyen	10 ans pour 15 m de portée	6 mois pour 8 m de portée	1 semaine pour 5 m de portée	10 heures pour 2.5 m de portée	30 minutes pour 0.5 m de portée
Cohésion du massif (kPa)	> 400	300 – 400	200 – 300	100 – 200	< 100
Angle de frottement du massif	> 45°	35° – 45°	25° – 35°	15° – 25°	< 15°

L'utilisation du système **RMR** est très simple, et les paramètres de classification sont facilement obtenus à partir des données des sondages ou exploration des sous terrains. Il peut être utilisé pour le choix du système de support pérennant. La plupart des applications de système RMR avait été dans le domaine des tunnels mais aussi dans les différentes analyses de stabilité des talus, fondations et exploitation minière.

3) Le système de classification Q

Barton et al. (en 1974) ont été les premiers à introduire le *System-Q*, l'Indice de Qualité pour le creusement des tunnels dans les massifs rocheux (*the Tunnelling Quality Index*). La méthode de classification et les recommandations pour les supports associées sont basées sur une analyse de 212 cas recordés. Le système est appelé la Qualité de la Masse Rocheuse a été développé par L'institut Géotechnique Norvégien (IGN).

Le Système-Q original (Barton et al, 1974) utilise les six paramètres suivants :

RQD - Rock Quality Designation.

Jn - caractérise le nombre de familles de joints.

Jr - caractérise la rugosité des joints.

Ja - caractérise l'altération des joints en précisant le degré d'érosion, d'altération et de remplissage.

Jw = facteur de réduction hydraulique des joints.

SRF = facteur de réduction des contraintes.

$$Q = \left| \frac{RQD}{J_n} \right| \cdot \left| \frac{J_r}{J_a} \right| \cdot \left[\frac{J_w}{SRF} \right]$$

Valeur de Q et qualité du massif rocheux

Les paramètres géotechniques fondamentaux sont, d'après Barton (1988), Taille de bloc, la résistance au cisaillement minimum inter-bloc et contraintes actives. Ces paramètres sont représentés par les ratios suivants (Barton, 2002).

- Taille relative des blocs = RQD / Jn
- Force de frottement relative (de l'ensemble des joints le moins favorable ou discontinuité remplie) = Jr / Ja
- Contraintes actives = Jw / SRF .

Valeur Q	Classe	Qualité du massif rocheux
400 - 1000	A	Exceptionnellement bon
100 - 400	A	Extrêmement bon
40 - 100	A	Très bon
10 - 40	B	Bon
4 - 10	C	Moyen
1-4	D	Mauvais
0.1-1	E	Très mauvais
0.01-0.1	F	Extrêmement mauvais
0.001-0.01	G	Exceptionnellement mauvais

$$D_e = \frac{\text{Excavation span, diameter or height (m)}}{\text{Excavation support ratio}}$$

L'ESR est déterminé à partir des investigations de la relation entre la durée maximale de tenue d'une excavation non soutenue (Porté) et Q autour d'une excavation qui a tenue plus que 10 ans. La relation suivante est définie :

4) L'indice géologique GSI (Geological Strength Index)

L'indice **GSI** sert à estimer la réduction de résistance du massif rocheux pour différentes conditions géologiques. Le système donne une valeur **GSI** estimée à partir de la structure du massif et des conditions de surface des discontinuités. Hoek et al., (1995) ont introduit **GSI** comme un complément à leur critère de rupture généralisé pour les massif rocheux et comme une manière d'estimer les paramètres s , u_n et mb dans le critère. L'indice **GSI** estime la réduction de la résistance de la masse rocheuse pour différent conditions géologiques.

L'application directe de la valeur **GSI** sert à estimer les paramètres du critère de résistance de **Hoek-Brown** pour les massifs rocheux.

GSI et qualité du massif rocheux					
Valeur GSI	76 - 95	56 - 75	41 - 55	21 - 40	< 20
Qualité du massif rocheux	Très bon	Bon	Moyen	Mauvais	Très mauvais

Estimation de **GSI** (Hoek, 2002).

Les modules des massifs rocheux (E_m , GPa) peuvent être estimés par **RMR** et **Q**, pour des rochers de qualité moyenne à bonne,

$$\begin{aligned}
 E_m &= 25 \log(10.Q), & \text{pour } Q > 1 \\
 E_m &= 10 \cdot (Q \sigma_{ci} / 100)^{1/3} \\
 E_m &= 2 \cdot RMR - 100, & \text{pour } RMR > 50 \\
 E_m &= 10^{(RMR - 10) / 40} & \text{pour } 20 < RMR < 85
 \end{aligned}$$