

Université A. Mira/Bejaïa

Année universitaire 2018/2019

Faculté de Technologie

Département des Mines et Géologie

OPTION : VRM

L3. S2

## **MECANIQUE DES ROCHES**

### **Contenu de la matière :**

#### **Chapitre 1 :**

Présentation, Naissance et Application de la mécanique des roches

#### **Chapitre 2 :**

Structure et classification des massifs rocheux

#### **Chapitre 3 :**

Notion de contrainte ; Notion de déformation

#### **Chapitre 4 :**

Propriétés mécaniques : Résistance à la compression ; Résistance à la traction, Résistance au cisaillement ;

# CHAPITRE 1 : PRESENTATION, NAISSANCE ET APPLICATION DE LA MECANIQUE DES ROCHES

## 1.1 Introduction

### Qu'est-ce que la mécanique des roches ?

Il est courant d'affirmer que le matériau rocheux est un matériau de qualité, rigide et résistant, et que les massifs rocheux sont de « bons terrains » pour les travaux de génie civil.

Cependant, l'optimisation des travaux au rocher nécessite une connaissance du comportement mécanique des roches, et les grands ouvrages de génie civil, tels que tunnels profonds, barrages, centrales nucléaires, ou viaducs de grande portée, sollicitent le massif rocheux parfois à la limite de ses capacités.

La mécanique des roches est une discipline qui utilise les principes de mécanique pour décrire le comportement des roches.

### En quoi la mécanique des roches est-elle spécifique ?

La roche à l'échelle d'ingénierie est Discontinue, Inhomogène, Anisotrope, et Non-linéairement Elastique.

La mécanique des roches traite du comportement des roches lorsque les conditions limites sont modifiées par l'ingénierie.

## 1.2 Origine des roches

La roche est une substance solide composée de minéraux. La formation des roches dépend de 3 origines :

- **Roches magmatiques** : elles résultent du refroidissement du magma (granite, basaltes, etc.).
- **Roches sédimentaires** : les roches sédimentaires de la lithification des sédiments ; elles résultent de la décomposition des roches d'origine magmatiques ou métamorphiques et couvrent plus de trois quarts de la surface des continents et presque la totalité des fonds des océans. Elles sont caractérisées par leur épaisseur limitée (calcaires, grès, roches argileuses, etc.).
- **Roches métamorphiques** : leur formation est due à un phénomène de transformation à l'état solide des roches sédimentaires ou magmatiques sous l'effet de hautes pressions et/ou augmentation de la température (marbre, quartzites, schistes...).

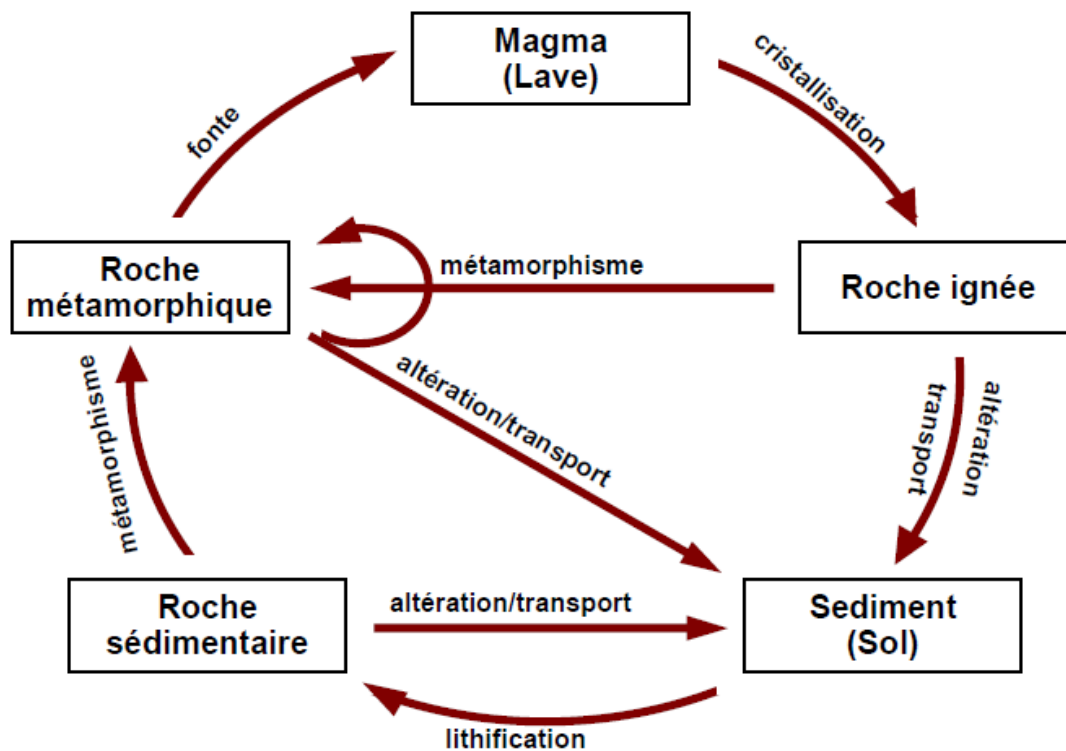


Fig. 1 : cycle de la roche

### 1.3 Naissance de la mécanique des roches

#### Une science cinquantenaire

Les premiers à avoir étudié et pratiqué la mécanique des roches, de façon empirique certes, mais efficace, furent les ingénieurs des mines confrontés à la stabilité des épontes (*les roches entourant une couche géologique considérée*) rocheuses de leur exploitation.

Les premiers traités d'exploitation des mines de *Re Metallica* (1566) ou l'*Encyclopédie* (1751) — ne mentionnent que les techniques d'excavation et de stabilité des terrains.

Les cours des mines publiés par la suite (H. De La Goupillière par exemple en 1911) ne furent guères plus précis dans la conception des soutènements. Une idée générale conduit à considérer que "construire sur le roc" est un gage de sécurité. Le développement de grandes infrastructures en altitude et la construction des barrages hydro-électriques de montagne ont rectifié cette considération.

La chute de blocs, les glissements de talus rocheux et l'importance de l'eau dans les fractures (catastrophe du barrage de Malpasset en 1959) ont poussé les ingénieurs à étudier plus en détail le comportement du massif rocheux dans sa globalité.

Le Comité International des Grands Barrages, créé en 1927, fut le premier à réfléchir sur le problème, et son congrès de 1964 marque le début de ce que l'on appelle la mécanique des roches. (*L'International Society of Rock Mechanics (ISRM) fut créée en 1962 mais son*

*premier congrès international remonte à 1966. Le terme mécanique des roches est dû à Talobre, ingénieur chez EDF, en 1956.)*

## 1.4 Panorama des problèmes

Pour les *reliefs naturels*, qu'il s'agisse de sols ou de roches, il faut s'assurer de la stabilité d'ensemble, en tenant compte de la pression de l'eau souterraine, y compris avec des régimes transitoires extrêmes, et en cas de séisme.

Pour les *ouvrages souterrains* profonds, seule la stabilité locale est à considérer, mais pour ceux qui sont proches de la surface, la déformation et la rupture éventuelle de cette surface prend de l'importance.

Pour les fondations au rocher, comme pour les *fondations* sur les sols, il convient de vérifier les critères de capacité portante, de tassement et de stabilité d'ensemble.

La détermination de la capacité portante et des tassements nécessite l'évaluation des caractéristiques de *résistance* et de *déformabilité* à l'échelle du massif rocheux.

Ces problèmes sont traités par des méthodes structurales fondées sur l'analyse limite ; ils nécessitent de connaître la distribution spatiale des discontinuités et la résistance au cisaillement le long de ces surfaces.

## 1.5 Applications

La mécanique des roches trouve ses applications dans divers domaines de l'ingénierie et de la recherche :

- A. **Géologie** : déformations tectoniques entraînant plissements, diaclases et failles ;
- B. **Physique du globe** : comportement sous haute pression et température, séismes ;
- C. **Mine** : stabilité des excavations, des tailles, galeries et puits ;
- D. **Pétrole** : extraction des fluides en milieu poreux, stabilité des forages profonds ;
- E. **Stockages souterrains** : stabilité, transport des polluants, perméabilité, couplages thermomécaniques ;
- F. **Géothermie** : échange de chaleur entre fluides et massif rocheux fracturé, durée de vie d'un pompage ;
- G. **Génie Civil** : fondations des grands ouvrages (barrages, centrales électriques, ponts), terrassements routiers, stabilité des talus et versants, travaux souterrains, concassage et travaux de carrière, utilisation comme matériau (enrochements, pierre de construction, granulats).

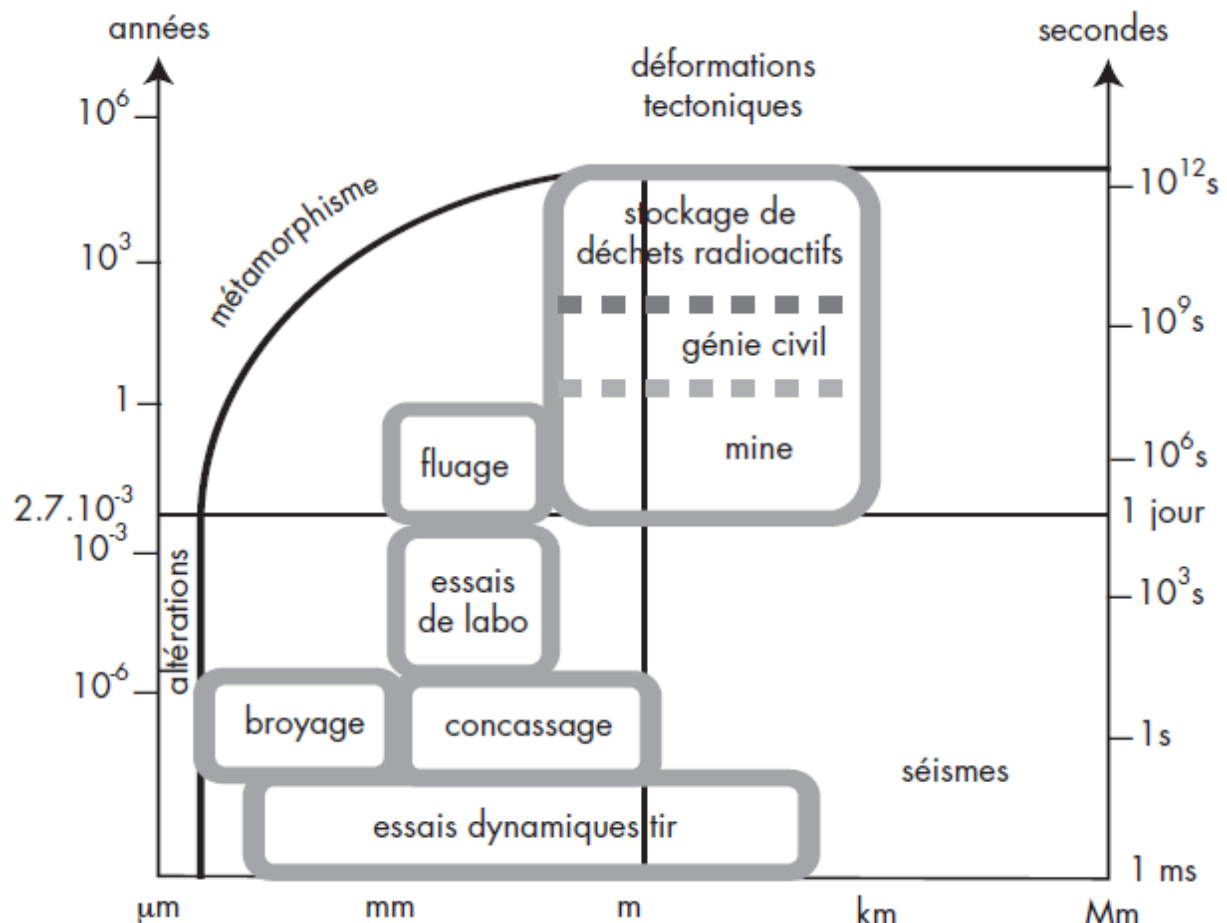


Fig. 3 : Quelques domaines d'application de la mécanique des roches, sur un graphique bi-logarithmique longueur-temps ; la ligne horizontale médiane correspond à 1 jour soit 0,00274 année sur l'échelle de gauche et 86400 secondes sur celle de droite ; les limites des domaines sont schématisées, elles n'ont qu'une valeur indicative.

## CHAPITRE 2 : STRUCTURE ET CLASSIFICATION DES MASSIFS ROCHEUX

### 2.1 Structure des massifs rocheux

#### 2.1.1 Distinction sol/ roche

La limite qui différencie un sol d'une roche est assez étroite et complexe à la fois.

Un agrégat de grains minéraux qui peuvent être séparé par un moyen doux ; comme l'agitation dans l'eau est un sol. Alors que les grains minéraux d'une roche sont liés par des forces de cohésion fortes et permanentes.

- Les sols comportent des matériaux granulaires non cimentés (donc meubles et sans cohésion et pratiquement pas de résistance à la compression simple) comme le sable et des matériaux argileux de faible cohésion.

- Les roches ont une forte cohésion et une résistance à la compression simple supérieure à 10 MPa, mais comporte généralement des surfaces de discontinuités donc la roche à l'échelle d'ingénierie est Discontinue, Inhomogène, Anisotrope, et Non-linéairement Elastique [6].

### 2.1.2 Description des massifs rocheux

Formés d'une juxtaposition de matériaux hétérogènes, les massifs rocheux sont des structures très complexes. Ils sont assimilés à un assemblage de blocs appelés matrice rocheuse lesquels sont délimités par des discontinuités constituées de fissures, de fractures ou de failles ou encore de limites stratigraphiques. Le comportement mécanique des massifs rocheux est un facteur essentiel dans le dimensionnement des ouvrages qui y sont exécutés.

Afin de comprendre, expliquer et modéliser ce comportement, il est nécessaire de connaître la structure géométrique ou plus précisément le modèle de distribution géométrique des fractures, ainsi que les propriétés mécaniques de chacune des composantes que sont la matrice rocheuse et les discontinuités.

Un massif rocheux contient (i) du matériau rocheux sous forme de blocs de roche intacte de tailles variées, et (ii) des discontinuités qui coupe le massif sous forme de fractures, joints, failles, plans de stratification.

$$\text{Massif rocheux} = \text{Matrice rocheuse} + \text{Discontinuités}$$

### 2.1.3 La matrice rocheuse

Le Comité Français de Mécanique des Roches (CFMR-MMR [2000]) définit la roche comme étant « un assemblage de minéraux qui ont acquis des liaisons plus ou moins fortes au cours de leur histoire géologique ».

### 2.1.4 Aspect géologique

Afin d'étudier le comportement mécanique d'un massif rocheux, il est essentiel de connaître le degré de fracturation ainsi que la répartition des discontinuités dans l'espace. Pour un ensemble de massifs rocheux, les discontinuités constituent une superposition de différentes familles de fractures, disposant chacune de lois de distribution et des caractères statistiques différents. Ces derniers sont souvent déterminés par le biais de la méthode de projection stéréographique.

Divers auteurs ont essayé de regrouper les structures géométriques des massifs rocheux dans des catégories bien définies. La figure 02 illustre une série de massifs rocheux citée par (Palmström. A, 1995). Nous distinguons les massifs à bloc polyédriques, equidimensionnels, prismatiques ou en colonnes, les massifs à bancs minces dont l'épaisseur est moins épaisse que leur longueur et les massifs comprenant plusieurs familles de fractures.

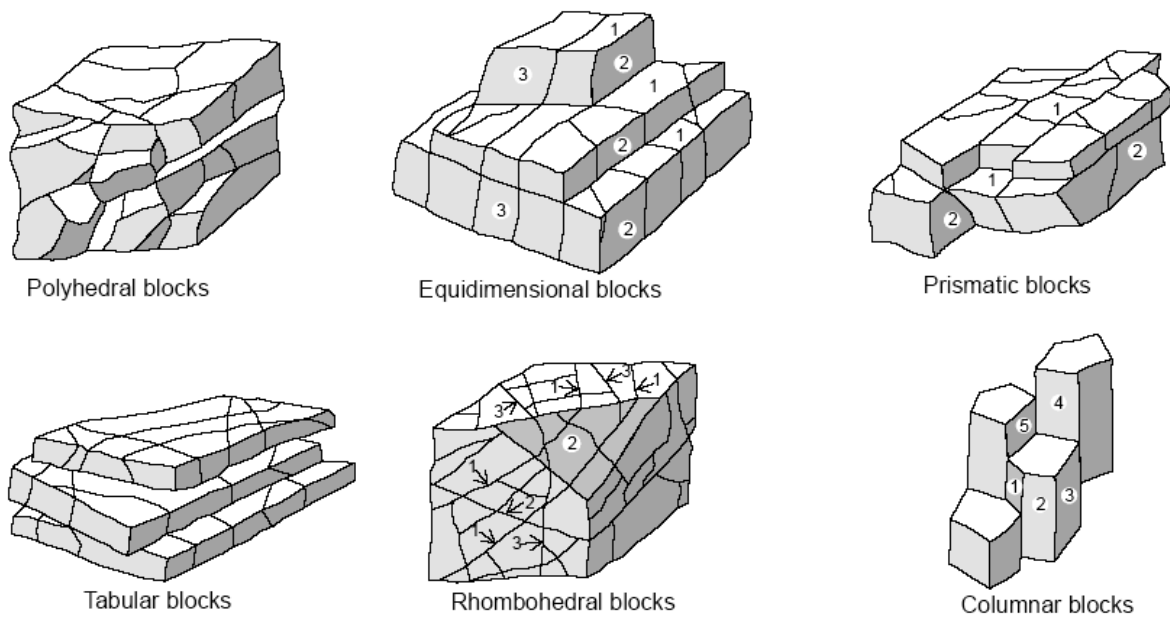


Fig. 4 : Différentes structures géométriques de massifs rocheux fracturés (Palmström [1995])

### 2.1.5 Description des discontinuités

On définit une discontinuité dans un massif rocheux par une surface qui interrompt la continuité physique du milieu sain [1]. L'identification géologique, géométrique et mécanique des discontinuités, à toutes les échelles est indispensable dans l'étude de comportement du massif.

Elle nécessite une analyse statistique, pour pouvoir différencier toutes les familles de discontinuités qui affectent le massif. Chaque famille est alors analysée à part pour déterminer la distribution des différents paramètres géométriques.

### 2.1.6 Influence des discontinuités dans le comportement d'un massif rocheux

- \* De couper la roche en plaques, blocs et coins (libres de tomber et de bouger) ;
- \* D'agir comme plan de faiblesse pour le glissement ;
- \* De faciliter l'écoulement d'eau et créer des réseaux d'écoulement ;
- \* D'entraîner de grandes déformations ;
- \* De changer la distribution et l'orientation des contraintes.

### 2.1.7 Paramètres géométriques des discontinuités

Les caractéristiques géométriques les plus importantes des discontinuités, qui ont une influence sur le comportement du massif rocheux sont :

- a) **Orientation** : Les orientations des discontinuités déterminent la forme de blocs individuels existant dans un massif rocheux et par suite elles sont responsables de leur anisotropie qui gouverne leur comportement hydraulique et mécanique.

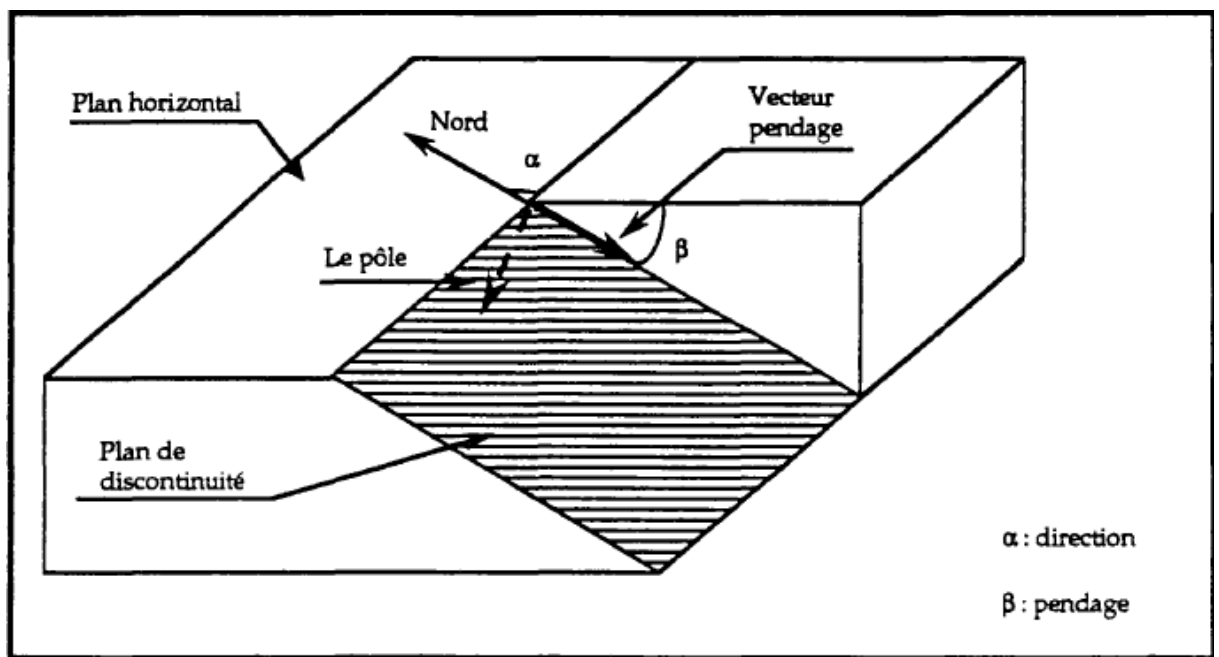


Fig. 5 : Orientation d'un plan de discontinuité

- b) **Extension** : L'extension (on dit aussi étendue) d'une discontinuité est schématisée par une longueur et une largeur. Ce paramètre est difficile à évaluer car sur le terrain on n'observe pas la totalité de la discontinuité mais uniquement sa trace sur un parement. L'extension peut être estimée à partir de la distribution de la longueur de trace de la discontinuité.
- c) **Espacement** : C'est la distance moyenne qui sépare deux intersections successives d'une ligne droite, appelée également ligne d'échantillonnage.

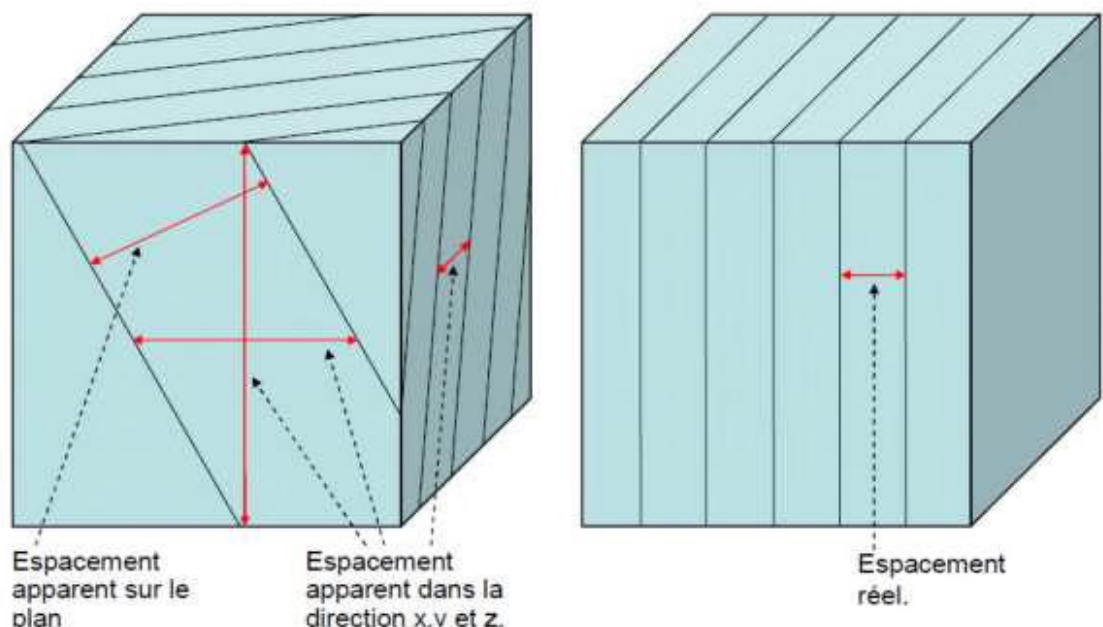


Fig. 6 : Mesure de l'espacement



TAB. 1 : Description de l'espacement des discontinuités

Espacement des discontinuités (m)	Description
<0,02	Espacement extrêmement étroit
0,02-0,06	Espacement très étroit
0,06-0,2	Espacement étroit
0,2-0,6	Espacement modéré
0,6-2	Espacement large
2-6	Espacement très large
>6	Espacement extrêmement large

- d) **Ouverture** : Ce paramètre affecte largement la perméabilité des discontinuités et par suite leur comportement hydromécanique. Il est défini comme étant la distance entre les deux épontes d'une discontinuité mesurée perpendiculairement.
- e) **Matériaux de remplissage** : Il est très rare que les deux surfaces d'une discontinuité soient en contact, généralement il existe un espace entre elles, qu'il soit rempli d'air, d'eau (joint ouvert) ou avec des matériaux de remplissage.

## 2.2 Classification des masses rocheuse

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)

### 2.2.1 Le Rock Quality Designation index (Deere, 1967)

La RQD (*Rock Quality Designation*) a été développée en 1964 par D.U Deere\*. Elle est déterminée en mesurant le pourcentage de récupération de morceaux de carotte de forage dont la longueur est supérieure à 100 mm. Les échantillons de forage qui ne sont pas durs ou en bon état ne doivent pas être pris en compte, même s'ils ont 100 mm de longueur.

$$RQD = \frac{\sum \text{longueur des morceaux} > 10 \text{ cm}}{\text{longueur totale du forage}} * 100$$

Le tableau (2) résume la classification de la masse rocheuse selon RQD

RQD. %	Description
90 – 100	Excellente
75 – 90	Bonne
50 – 75	Faible
25 – 50	Pauvre
0 – 25	Très pauvre

### 2.2.2. Le Tunnelling Quality Index (Barton, 1974)

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.

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.

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 ( $J_n$ ) ;
- Indice de rugosité des joints ( $J_r$ ), celle du plus faible plan de fissuration ;
- Indice de l'altération des joints ( $J_a$ ), caractéristiques de ce dont les fissures sont remplies ;
- Facteur de réduction pour la présence d'eau ( $J_w$ ) ; et
- Facteur de réduction pour les contraintes in situ (SRF).

Les valeurs numériques de l'indice  $Q$  varient sur une base logarithmique de 0,001 à 1000, d'après la formule suivante :

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

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

- $RQD/J_n$  représente la structure globale du massif, ce qui constitue une mesure approximative de la taille des blocs rocheux ;
- $J_r/J_a$  représente la résistance au cisaillement des discontinuités séparant les blocs rocheux ;
- $J_w/SRF$  consiste le paramètre de réduction due à la présence d'eau  $J_w$  qui a un effet néfaste sur la résistance au cisaillement et indirectement quant à l'évaluation de l'état général des contraintes SRF.

Tableau 3 : Évaluation de la cote  $Q$  et de la qualité du massif (d'après Barton et al. 1974)

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 - 1000	Exceptionnellement bonne

### 2.2.3. 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*.

La Classification Géomécanique ou Rock Mass Rating (RMR) est basée sur l'expérience professionnelle de l'auteur dans des tunnels de faible profondeur pour des massifs sédimentaires.

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

- A1. La résistance à la compression uni-axiale de la roche intacte ;
- A2. La valeur de l'indice  $RQD$  pour la masse rocheuse,
- A3. L'espacement des discontinuités,
- A4. L'état des discontinuités,
- A5. Les conditions hydrauliques, et
- A6. L'orientation des discontinuités.

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

$$RMR = A1 + A2 + A3 + A4 + A5 + A6$$

Tableau : Classification du massif rocheux selon le 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

#### 2.2.4. 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.

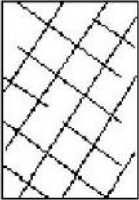
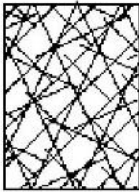
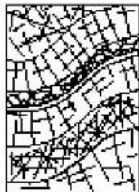
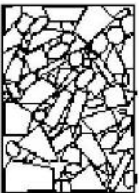
La Figure D-1 (d'après Hoek, 1995) présente les 20 codes qui permettent d'identifier chaque catégorie de masses rocheuses, et d'estimer la valeur du *GSI* à partir des conditions de surface des discontinuités et de leur structure.

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.

<b>CARACTERISTIQUES DE LA MASSE ROCHEUSE POUR L'ESTIMATION DE LA RESISTANCE</b>  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.		<b>CONDITIONS DE SURFACE</b>  <b>TRES BONNES</b> Surfaces fraîches, non-altérées, très rugueuses  <b>BONNES</b> Surfaces couleur de fer, rugueuses et légèrement altérées  <b>MOYENNES</b> Surfaces lisses, altérées ou moyennement altérées  <b>PAUVRES</b> Surfaces aux contours lisses, fortement altérées avec enduit ou remplissage compact de fragments anguleux  <b>TRES PAUVRES</b> Surfaces aux contours lisses, fortement altérées avec enduit ou remplissage d'argile plastique				
STRUCTURE		<b>QUALITÉ DÉCROISSANTE</b>				
 <b>FRACTURÉE</b> – masse rocheuse non perturbée, très bien assemblée, constituée de blocs cubiques formés par trois familles de discontinuités orthogonales	<b>AGENCEMENT DES BLOCS ROCHEUX DÉCROISSANT</b>	80				
 <b>TRÈS FRACTURÉE</b> – masse rocheuse partiellement perturbée, bien assemblée, constituée de blocs anguleux à plusieurs facettes formés par au moins quatre familles de discontinuités orthogonales		70	60			
 <b>FRACTURÉE/DESTRUCTURÉE</b> – blocs anguleux formés par plusieurs familles de discontinuités entrecoupées, avec pliures et/ou failles			50	40		
 <b>DÉSINTÉGRÉE</b> – masse rocheuse fortement broyée, mal assemblée, avec un mélange de blocs rocheux anguleux et arrondis				30	20	10

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