

# **Classifications et propriétés des massifs rocheux**

MÉCANIQUE DES  
ROCHES ET  
OUVRAGES  
SOUTERRAINS

Prof. M. VIOLAY

# Caractérisation et comportement des discontinuités

1. Introduction
2. Classifications
3. Propriétés des massifs rocheux

# Caractérisation et comportement des discontinuités

## 1. Introduction

## 2. Classifications

## 3. Propriétés des massifs rocheux

# 1. Introduction aux propriétés des massifs



## Propriétés du massif rocheux

Le massif rocheux est constitué de roche intacte et de discontinuités. Les propriétés du massif rocheux sont donc tributaires:

- des paramètres des discontinuités,
- des paramètres de la matrice rocheuse,
- des conditions aux limites.

Le comportement du massif peut changer d'un état élastique continu pour une roche intacte à un état discontinu pour les massifs rocheux fracturés, essentiellement en fonction de la présence des discontinuités.

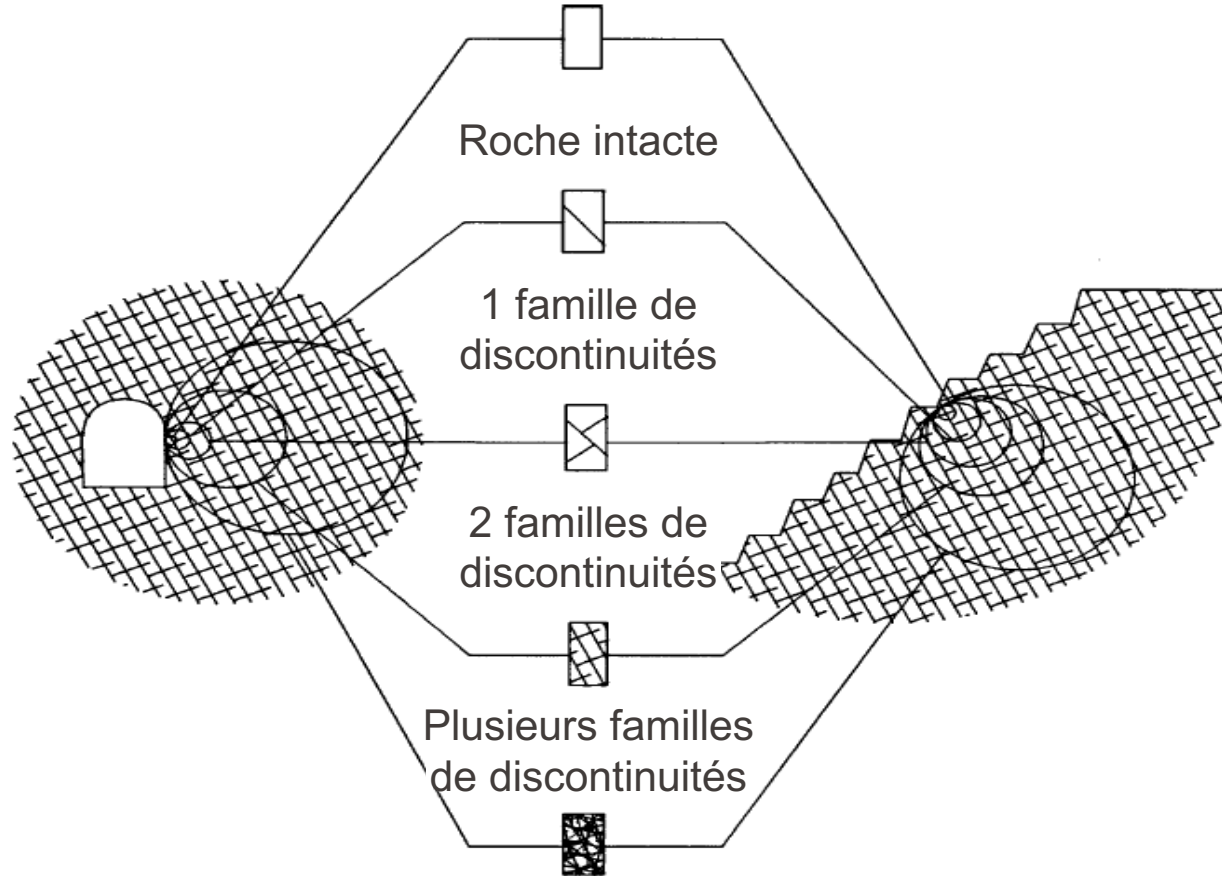
# 1. Introduction aux propriétés des massifs



## Principaux paramètres régissant les propriétés du massif rocheux

| Paramètres de la roche intacte                                                                              | Paramètres des discontinuités                                                                                                                                                                                                                                    | Conditions aux limites                                                                                                                         |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"><li>• Résistance à la compression</li><li>• Module d'élasticité</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>• Nombre de familles de discontinuités</li><li>• Orientation</li><li>• Espacement</li><li>• Ouverture</li><li>• Rugosité</li><li>• Erosion et altération</li><li>• Résistance au cisaillement (coef de friction)</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>• Pression d'eau et écoulement</li><li>• Contraintes in situ</li><li>• Dimensions de l'ouvrage</li></ul> |

# 1. Introduction aux propriétés des massifs



# Caractérisation et comportement des discontinuités

## 1. Introduction

## 2. Classifications

- |      |                                    |                                  |
|------|------------------------------------|----------------------------------|
| 2.1. | Terzaghi                           | <i>charge de dislocation</i>     |
| 2.2. | Lauffer                            | <i>portée active – stabilité</i> |
| 2.3. | Deere                              | <i>indice RQD</i>                |
| 2.4. | Bieniawski                         | <i>indice RMR</i>                |
| 2.5. | Barton, Lien et Lunde              | <i>indice Q</i>                  |
| 2.6. | Hoek                               | <i>indice GSI</i>                |
| 2.7. | Autres systèmes de classification  |                                  |
| 2.8. | Exemples d'application             |                                  |
| 2.9. | Corrélations entre classifications |                                  |

## 3. Propriétés des massifs rocheux

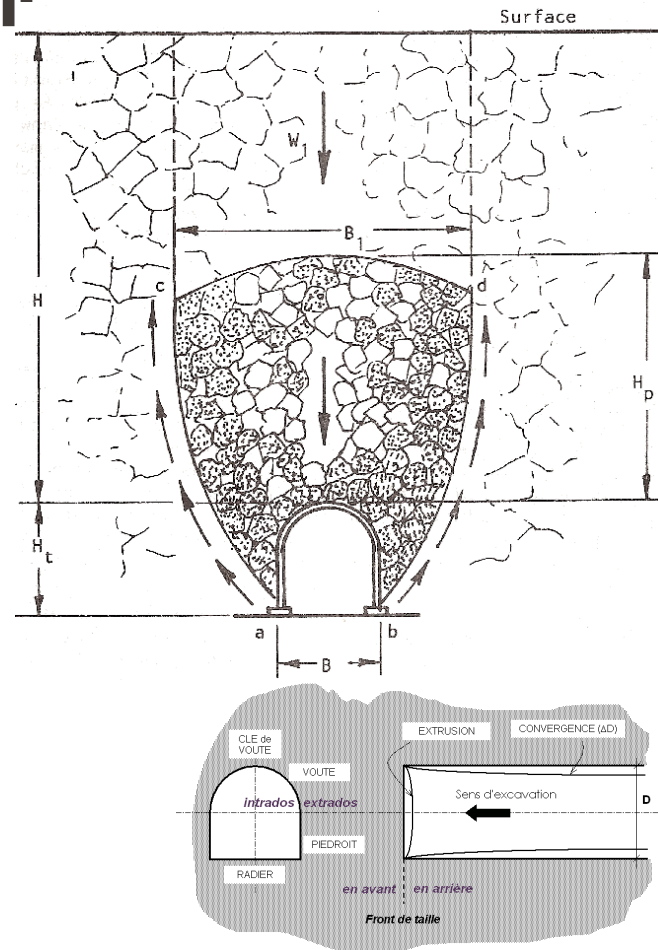
# 2.1 Classification de Terzaghi

Terzaghi (1946)

## Charge de dislocation

Terzaghi classe le massif rocheux en 9 classes. Le concept utilisé dans cette classification permet d'estimer la charge du terrain à reprendre par les cintres métalliques du soutènement du tunnel.

Pression s'exerçant sur le soutènement («charge» de dislocation):  $p = \gamma \cdot H_p$  [kN/m<sup>2</sup>]





# 2.1 Classification de Terzaghi

| Classe de roche                                   | Définition                                                                                                                                                                                                                                                    | Facteur de charge $H_p$                       | Remarques                                                                                               |
|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| I. Dure et intacte                                | Roche dure et intacte sans failles ni discontinuités. Après excavation la paroi de la roche peut s'effriter et éclater                                                                                                                                        | 0                                             | Soutènement léger s'il y a chute de pierres                                                             |
| II. Dure et stratifiée schistosée                 | Roche dure en bancs épais. Interface entre les couches cimentées. Fréquents éclats et effritements de la paroi excavée                                                                                                                                        | 0 to 0.5 $B$                                  | Soutènement léger de protection contre les éclats                                                       |
| III. Massive, moyennement discontinue             | Roche massive avec des discontinuités largement espacées. Taille des blocs est grande, les discontinuités sont imbriquées... Effritement possible                                                                                                             | 0 to 0.25 $B$                                 | Soutènement léger de protection contre les éclats                                                       |
| IV. Moyennement fracturée et ébouleuse            | Roche avec discontinuités moyennement espacées. Roche n'est pas altérée chimiquement ou physiquement. Discontinuités ne sont pas bien imbriquées et ont de petites ouvertures.. Effritement possible .Les parois verticales ne nécessitent pas de soutènement | 0.25 $B$ to 0.35 ( $B + H_i$ )                | Pas de pression latérale                                                                                |
| V. Très fracturée et ébouleuse                    | Roche n'est pas altérée chimiquement, a des discontinuités peu espacées. Discontinuités ouvertes et séparées. Paroi verticale a besoin de support.                                                                                                            | (0.35 to 1.1) ( $B + H_i$ )                   | Peu ou pas de pression latéral                                                                          |
| VI. Complètement broyée mais chimiquement intacte | Roche n'est pas altérée chimiquement, et très fracturée avec des fragments. Les fragments ne sont pas imbriqués. Front d'excavation dans ce matériel nécessite un fort soutènement.                                                                           | 1.1 ( $B + H_i$ )                             | .Forte pression latérale. Effets de radoucissement par l'eau en radier. Cintres circulaires recommandés |
| VII. Roche poussante à profondeur modérée         | Roche avance lentement dans le tunnel sans augmentation notable de volume. Profondeur moyenne entre 150 et 1000 m.                                                                                                                                            | (1.1 to 2.1) ( $B + H_i$ )                    | Grande pression latérale. Cintres circulaires recommandés                                               |
| VIII. Roche poussante à grande profondeur         | Roche avance lentement dans le tunnel sans augmentation notable de volume. Profondeur supérieure à 1000 m.                                                                                                                                                    | (2.1 to 4.5) ( $B + H_i$ )                    |                                                                                                         |
| IX. Roche gonflante                               | Augmentation du volume de la roche (et avance dans le tunnel) à cause du gonflement des minéraux argileux dans la roche en présence d'eau.                                                                                                                    | jusqu'à 75 m, Indépendamment de $B$ and $H_i$ | Cintres circulaires recommandés. Cintres coulissants dans les cas extrêmes,                             |

Notes: Le tunnel est présumé en dessous du niveau hydrostatique. Pour les tunnels situés au-dessus,  $H_p$  pour les Classes IV to VI est réduits de 50%.

Il est présumé que le tunnel est creusé à l'explosif. Pour les tunnels creusés mécaniquement,  $H_p$  pour les Classes II to VI est réduit de 20-25%.

## 2.1 Classification de Terzaghi



### Commentaires sur la classification de Terzaghi

- Son utilisation est plutôt préconisée pour des tunnels à moyenne profondeur avec une hauteur de couverture  $H > 1.5 \cdot (B + H_t)$
- Elle fournit une évaluation raisonnable de la pression s'exerçant sur le soutènement pour des tunnels de petit diamètre allant jusqu'à 6 mètres.
- On obtient une surestimation de la pression sur le soutènement dans le cas de tunnels dont le diamètre dépasse 6 mètres (Singh & Goel, 1999).

## 2.2 Classification de Lauffer

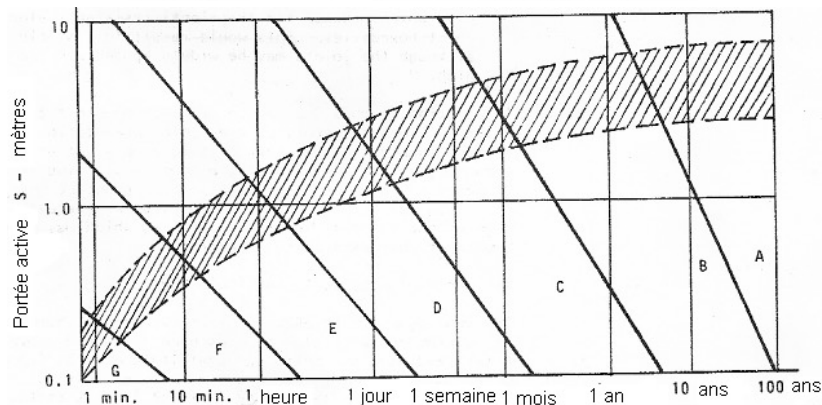
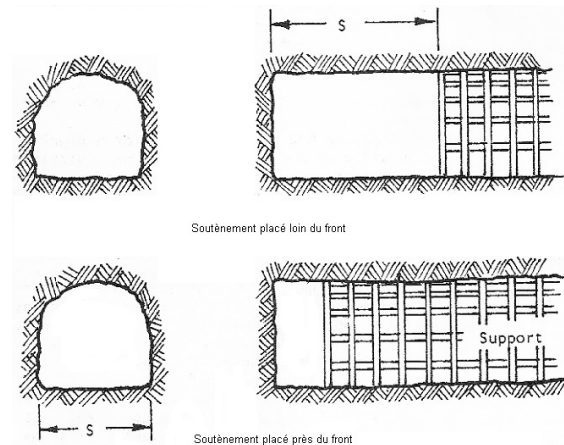
**Lauffer (1958)**

**Portée active et temps de tenue**

La portée active  $S$  est la plus grande dimension non soutenue dans le tunnel.

Le temps de tenue est la durée pendant laquelle une excavation peut tenir sans soutènement.

Les classes de roche sont définies en fonction du temps de tenue.





### Deere (1964)

### Indice de qualité (RQD)

Le RQD (Rock Quality Designation) est défini comme le pourcentage des carottes de roche qui ont une longueur supérieure ou égale à 10 cm sur la longueur totale du forage:

$$\text{RQD} = \sum L_i / L \times 100\%, \quad L_i \geq 10 \text{ cm}$$

Le RQD représente le degré de fracturation du massif rocheux.

Il reflète partiellement la qualité du massif.

| RQD      | Qualité du massif |
|----------|-------------------|
| < 25     | Très mauvaise     |
| 25 – 50  | Mauvaise          |
| 50 – 75  | Moyenne           |
| 75 – 90  | Bonne             |
| 90 – 100 | Excellente        |



**Bieniawski (1973 – 1989)**

**RMR: Rock Mass Rating**

Le système RMR comprend 5 paramètres de base.

1. Résistance de la roche intacte: résistance à la compression uniaxiale ou indice de résistance ponctuelle;
2. RQD;
3. Espacement des joints: espacement moyen de toutes les discontinuités rocheuses;
4. Conditions des joints: ouverture, rugosité, degré d'altération, remplissage;
5. Conditions hydrauliques: écoulement ou pression d'eau.

|    |                          |                                             |           |           |          |          |          |          |          |
|----|--------------------------|---------------------------------------------|-----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1. | Résistance de la matrice | Indice de résistance ponctuelle (MPa)       | > 10      | 4 – 10    | 2 – 4    | 1 – 2    |          |          |          |
|    |                          | Résistance à la compression uniaxiale (MPa) | > 250     | 100 – 250 | 50 – 100 | 25 – 50  | 5 – 25   | 1 – 5    | < 1      |
|    |                          | <i>Note</i>                                 | <i>15</i> | <i>12</i> | <i>7</i> | <i>4</i> | <i>2</i> | <i>1</i> | <i>0</i> |

|    |             |           |           |           |          |          |
|----|-------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|
| 2. | RQD (%)     | 90 – 100  | 75 – 90   | 50 – 75   | 25 – 50  | < 25     |
|    | <i>Note</i> | <i>20</i> | <i>17</i> | <i>13</i> | <i>8</i> | <i>3</i> |

|    |                |           |           |           |            |          |
|----|----------------|-----------|-----------|-----------|------------|----------|
| 3. | Espacement (m) | > 2       | 0.6 – 2   | 0.2 – 0.6 | 0.06 – 0.2 | < 0.06   |
|    | <i>Note</i>    | <i>20</i> | <i>15</i> | <i>10</i> | <i>8</i>   | <i>5</i> |



|    |                 |                                                                          |                                                                     |                                                               |                                                                               |                                                                 |
|----|-----------------|--------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| 4. | Etat des joints | Surfaces non continues, très rugueuses, non altérées, Epontes en contact | Surfaces légèrement rugueuses, légèrement altérées, ouverture <1 mm | Surfaces légèrement rugueuses, très altérées, ouverture <1 mm | Surfaces continues, lustrées, ou remplissage < 5 mm, ou ouverture de 1 à 5 mm | Surfaces continues, remplissage mou > 5 mm, ou ouverture > 5 mm |
|    | Note            | 30                                                                       | 25                                                                  | 20                                                            | 10                                                                            | 0                                                               |

|    |                         |                                                       |                    |         |           |             |            |
|----|-------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------|---------|-----------|-------------|------------|
| 5. | Conditions hydrauliques | Débit entrant par 10 m de longueur du tunnel (l /min) | aucun              | < 10    | 10 – 25   | 25 – 125    | > 125      |
|    |                         | Rapport pression d’eau / contrainte majeure in situ   | 0                  | 0 – 0.1 | 0.1 – 0.2 | 0.2 – 0.5   | > 0.5      |
|    |                         | Condition générale à la surface de l’excavation       | Complètement sèche | humide  | mouillée  | Égouttement | Écoulement |
|    | Note                    |                                                       | 15                 | 10      | 7         | 4           | 0          |

Ajustement du RMR pour tenir compte de l'orientation des discontinuités lors de la construction de tunnels (*cf. partie ouvrages souterrains*)

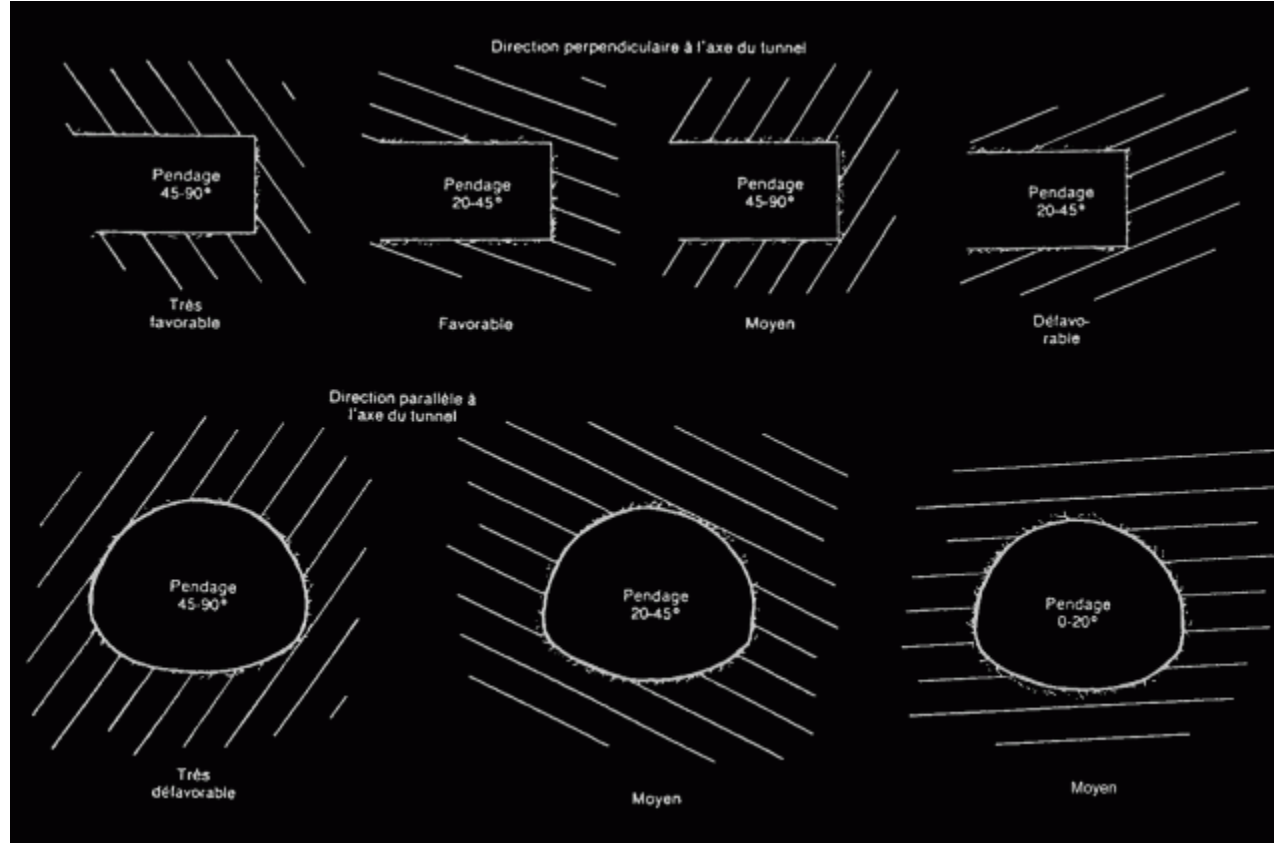
Tableau 11.9 : Système RMR ; ajustement des notes pour tenir compte de l'orientation des discontinuités

| Direction du pendage et des couches |            | très favorable | favorable | neutre | défavorable | Très défavorable |
|-------------------------------------|------------|----------------|-----------|--------|-------------|------------------|
| Note                                | tunnels    | 0              | - 2       | - 5    | - 10        | - 12             |
|                                     | fondations | 0              | - 2       | - 7    | - 15        | - 25             |
|                                     | Pentes     | 0              | - 5       | - 25   | - 50        | - 60             |

Tableau 11.10 : Système RMR ; effet de l'orientation en construction de tunnel

| Couche perpendiculaire à l'axe du tunnel |                   |                           |                   | Couche parallèle à l'axe du tunnel |                   | Pendage 0° – 20°          |
|------------------------------------------|-------------------|---------------------------|-------------------|------------------------------------|-------------------|---------------------------|
| Avancement avec pendage                  |                   | Avancement contre pendage |                   |                                    |                   |                           |
| Pendage 45° – 90°                        | Pendage 20° – 45° | Pendage 45° – 90°         | Pendage 20° – 45° | Pendage 45° – 90°                  | Pendage 20° – 45° | Indépendamment des couche |
| très favorable                           | favorable         | neutre                    | défavorable       | très défavorable                   | neutre            | neutre                    |



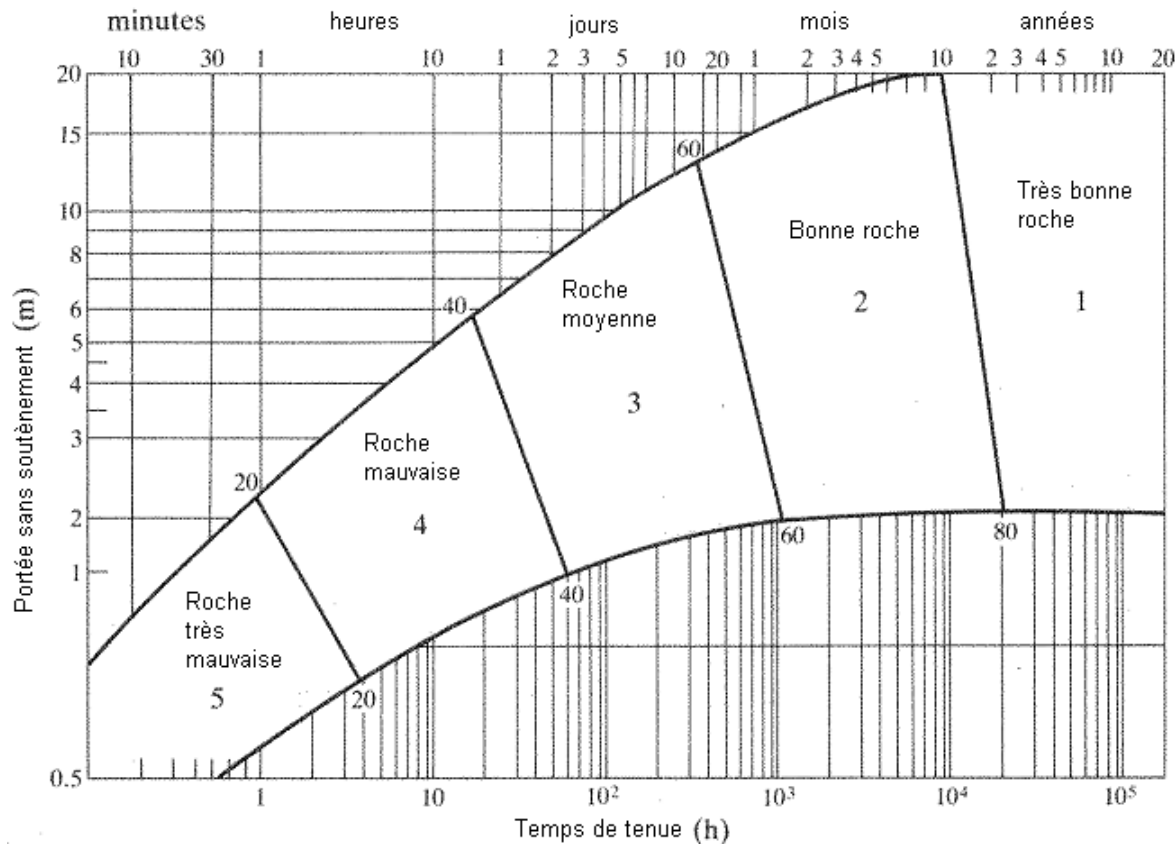




## RMR et qualité du massif rocheux

| Notes RMR                     | 81 – 100                   | 61 – 80                   | 41 – 60                      | 21 – 40                        | < 20                            |
|-------------------------------|----------------------------|---------------------------|------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| Classe du massif              | A                          | B                         | C                            | D                              | E                               |
| Description                   | Très bonne roche           | Bonne roche               | Roche moyenne                | Mauvaise roche                 | Roche très mauvaise             |
| 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°                           |

## Portée non soutenue et temps de tenue en fonction du RMR



## 2.4 Exemple d'application de Bieniawski



- Massif granitique avec 3 familles de joints,
- RQD moyen de 88%,
- espacement moyen des joints de 0.24 m,
- surfaces des joints généralement irrégulières et rugueuses, jointives et non altérées avec quelques taches,
- surface d'excavation humide, mais sans écoulement
- résistance moyenne à la compression uniaxiale de 160 MPa,
- tunnel excavé à 150 m de profondeur, sans état de contrainte in situ anormalement élevé.

|                           |  |            |  |
|---------------------------|--|------------|--|
| Résistance de la roche    |  | Note       |  |
| RQD (%)                   |  | Note       |  |
| Espacement des joints (m) |  | Note       |  |
| Conditions des joints     |  | Note       |  |
| Eau souterraine           |  | Note       |  |
|                           |  | <b>RMR</b> |  |



**Barton, Lien et Lunde (1974 - ...)**

**Indice de qualité pour les tunnels Q**

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

3 termes représentant:

- Taille blocs
- Résistance au cisaillement entre blocs
- L'état de contraintes

- RQD : Rock Quality Designation.
- $J_n$  : caractérise le nombre de familles de joints.
- $J_r$  : caractérise la rugosité des joints.
- $J_a$  : caractérise l'altération des joints en précisant le degré d'érosion, d'altération et de remplissage.
- $J_w$  : facteur lié à la pression hydraulique dans les joints.
- SRF : facteur de réduction des contraintes.



## RQD

| 1. Classe de RQD (Rock quality Designation) |              | RQD      |
|---------------------------------------------|--------------|----------|
| A                                           | Très mauvais | 0 – 25   |
| B                                           | Mauvais      | 25 – 50  |
| C                                           | Moyen        | 50 – 75  |
| D                                           | Bon          | 75 – 90  |
| E                                           | Excellent    | 90 – 100 |

Note: (a) Quand RQD est noté ou mesuré comme étant  $\leq 10$  (0 inclus), une valeur nominale de 10 est utilisée pour évaluer Q. (b) Des intervalles de 5 pour RQD, i.e., 100, 95, 90, etc., sont suffisamment précis.

$J_n$ 

| 2. Nombre de familles de discontinuités |                                                                     | $J_n$   |
|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|---------|
| A                                       | Massif, pas ou peu de discontinuités                                | 0,5 – 1 |
| B                                       | Une famille de discontinuités                                       | 2       |
| C                                       | Une famille de discontinuités plus des discontinuités aléatoires    | 3       |
| D                                       | Deux familles de discontinuités                                     | 4       |
| E                                       | Deux familles de discontinuités plus des discontinuités aléatoires  | 6       |
| F                                       | Trois familles de discontinuités                                    | 9       |
| G                                       | Trois familles de discontinuités plus des discontinuités aléatoires | 12      |
| H                                       | Quatre familles ou plus de discontinuités,                          | 15      |
| J                                       | Roche écrasée, similaire au sol                                     | 20      |

Note: (a) Pour les croisements des galeries, adopter  $(3,0 \times J_n)$ . (b) Pour les têtes d'accès, adopter  $(2,0 \times J_n)$ .

$J_r$ 

## 3. Indice de rugosité des discontinuités

 $J_r$ *(a) Epontes en contact, et (b) Epontes en contact après cisaillement de moins de 10 cm*

|   |                                                     |     |
|---|-----------------------------------------------------|-----|
| A | Discontinuités non continues                        | 4   |
| B | Discontinuités ondulées, rugueuses ou irrégulières, | 3   |
| C | Discontinuités ondulées, lisses                     | 2   |
| D | Discontinuités ondulées, striées                    | 1,5 |
| E | Discontinuités planes, rugueuses ou irrégulières    | 1,5 |
| F | Discontinuités planes, lisses                       | 1,0 |
| G | Discontinuités planes, striées                      | 0,5 |

Note: (a) Les descriptions se réfèrent à des éléments de petites ou moyennes dimensions

*(c) Epontes hors contact après cisaillement*

|   |                                                                                     |     |
|---|-------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| H | Zone argileuse d'épaisseur suffisante pour empêcher le contact                      | 1,0 |
| J | Zone sableuse, graveleuse ou broyée d'épaisseur suffisante pour empêcher le contact | 1,0 |

Note: (b) Majorer de 1.0 si l'espacement moyen des discontinuités est  $\geq 3$  m.

(c)  $J_r = 0.5$  si les discontinuités planes et striées comportent des linéations et que celles-ci sont orientées de dans le plan de résistance minimum



J<sub>a</sub>

| 4. Indice d'altération des discontinuités |                                                                                                                                                                                  | $\phi_r$ approx. | J <sub>a</sub> |
|-------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----------------|
| <i>(a) Epontes en contact</i>             |                                                                                                                                                                                  |                  |                |
| A                                         | Discontinuité serré, dur, non radoucissant, remplissage étanche (quartz, épidote)                                                                                                | —                | 0,75           |
| B                                         | Epontes non altérées, taches superficielles seulement                                                                                                                            | 25 – 35°         | 1,0            |
| C                                         | Epontes légèrement altérées, enduit minéral non radoucissant, grain sableux, roche décomposée sans argile                                                                        | 25 – 30°         | 2,0            |
| D                                         | Enduits d'argile silteuse ou sableuse                                                                                                                                            | 20 – 25°         | 3,0            |
| E                                         | Enduits argileux, radoucissants ou à faible frottement, par ex., kaolinite ou mica. Egalement chlorite, talc, gypse, graphite, etc., and de petites quantité d'argiles gonflants |                  |                |

**J<sub>a</sub>**

(b) Contact paroi rocheuse avant 10 cm de cisaillement (remplissage minéraux fin)

|   |                                                                                                                                                                                          |          |        |
|---|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|--------|
| F | Particules sableuses, roche désintégrée sans argile, etc.                                                                                                                                | 25 – 30° | 4,0    |
| G | Remplissage de minéraux d'argile fortement surconsolidé non-radoucissant (continus, mais < 5 mm d'épaisseur)                                                                             | 16 – 24° | 6,0    |
| H | Remplissage de minéraux d'argile moyennement ou peu surconsolidé (continus, mais < 5 mm d'épaisseur)                                                                                     | 12 – 16° | 8,0    |
| J | Remplissage d'argile gonflants, i.e., montmorillonite (continus, mais < 5 mm épaisseur). Valeurs de J <sub>a</sub> dépendent du pourcentage d'argile gonflants, de l'accès à l'eau, etc. | 6 – 12°  | 8 – 12 |

(c) Aucun contact avec la paroi rocheuse lors du cisaillement (remplissage minéraux épais)

|         |                                                                                                           |         |            |         |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|------------|---------|
| K, L,   | Zones ou bandes de roche désintégrée ou écrasée et d'argile                                               | 6 – 24° | 6, 8, or   | 8 –     |
| M       | (voir G, H, J pour description des argiles concernés)                                                     |         |            | 12      |
| N       | Zones ou bandes d'argile limoneux ou sableux, petite fraction d'argile (non-radoucissante)                | -       |            | 5       |
| O, P, R | Zones ou bandes d'argiles épaisses et continues (voir G, H, J for pour description des argiles concernés) | 6 – 24° | 10, 13, or | 13 – 20 |

$J_w$ 

| 5. Facteur lié à la pression hydraulique                                                                                                                       |                                                                                                  | Pression hydraulique       | $J_w$      |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|------------|
| A                                                                                                                                                              | Excavation à sec ou flux mineur, i.e., < 5 l/min localement                                      | < 1 (kg/cm <sup>2</sup> )  | 1,0        |
| B                                                                                                                                                              | Flux ou pression faible, débouillage occasionnel au droit d'une discontinuité                    | 1 – 2,5                    | 0,66       |
| C                                                                                                                                                              | Flux fort ou pression importante dans du rocher de bonne tenue à discontinuités sans remplissage | 2,5 – 10                   | 0,5        |
| D                                                                                                                                                              | Flux fort ou pression importante, débouillages fréquents                                         | 2,5 – 10                   | 0,33       |
| E                                                                                                                                                              | Flux ou pression hydraulique très forte lors des tirs, diminuant avec le temps                   | > 10                       | 0,2 – 0,1  |
| F                                                                                                                                                              | Flux ou pression hydraulique très forte sans diminution notable avec le temps                    | > 10 (kg/cm <sup>2</sup> ) | 0,1 – 0,05 |
| Note: (a) Facteurs C à F sont des estimations. Augmenté $J_w$ si drainage installé. (b) Problèmes spéciaux liés à la formation de glace ne sont pas considérés |                                                                                                  |                            |            |

## SRF

## 6. Facteur de réduction de contrainte

SRF

(a) *Zone de faiblesses croissant l'excavation, ce qui pourrait créer un relâchement de la masse rocheuse quand le tunnel est excavé*

|   |                                                                                                                                                                    |     |
|---|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| A | Occurrences multiple de zones de faiblesses contenant de l'argile ou de la roche désintégrée chimiquement, Roche environnante très décomprimé (toutes profondeurs) | 10  |
| B | Zone de faiblesse unique contenant de l'argile ou de la roche désintégrée chimiquement (profondeur d'excavation $\leq 50$ m)                                       | 5   |
| C | Zone de faiblesse unique contenant de l'argile ou de la roche désintégrée chimiquement (profondeur d'excavation $> 50$ m)                                          | 2.5 |
| D | Zones de cisaillement multiples dans roche compétente (sans argiles) (profondeur d'excavation $\leq 50$ m)                                                         | 7.5 |
| E | Zones de cisaillement unique roche compétente (sans argiles) (profondeur d'excavation $\leq 50$ m)                                                                 | 5   |
| F | Zones de cisaillement unique roche compétente (sans argiles) (profondeur d'excavation $> 50$ m)                                                                    | 2,5 |
| G | Décomprimé, discontinuités ouvertes et nombreuses (toutes profondeurs)                                                                                             | 5   |

Note: (a) Réduire la valeur de SRF par 25-50% si la zone de cisaillement influence seulement mais n'intersecte pas l'excavation.

## SRF

$\sigma_\theta$  = contrainte tangentielle  
 $\sigma_c$  = contrainte  
 compression uniaxiale

| (b) | Roche compétente, Problèmes des contraintes des roches                                                                       | $\sigma_c / \sigma_1$ | $\sigma_\theta / \sigma_c$ | SRF         |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|----------------------------|-------------|
| H   | Contrainte faible, proche de la surface, discontinuités ouvertes                                                             | $> 200$               | $< 0.01$                   | 2.5         |
| J   | Contrainte moyenne, Condition de contrainte favorable                                                                        | $200 - 10$            | $0.01 - 0.03$              | 1           |
| K   | Contrainte élevée, structure très légère. généralement favorable à la stabilité mais pas favorable à la stabilité des parois | $10 - 5$              | $0.3 - 0.4$                | $0.5 - 2$   |
| L   | Décollement moyen de la roche après $> 1$ heure dans roche massive                                                           | $5 - 3$               | $0.5 - 0.65$               | $5 - 50$    |
| M   | Décollement et éclatement après quelques minutes dans roche massive                                                          | $3 - 2$               | $0.65 - 1$                 | $50 - 200$  |
| N   | Eclatement fort de la roche (strain-burst) et déformation dynamique immédiate dans roche massive                             | $< 2$                 | $> 1$                      | $200 - 400$ |

Note: (b) Si l'état de contraintes initiales est fortement anisotrope, si mesurée: pour  $5 \leq \sigma_1 / \sigma_3 \leq 10$ , réduire  $\sigma_c$  to  $0.75 \sigma_c$ ; pour  $\sigma_1 / \sigma_3 > 10$ , réduire  $\sigma_c$  to  $0.5 \sigma_c$ ; où  $\sigma_c$  résistance en compression uniaxiale,  $\sigma_1$  et  $\sigma_3$  contraintes principales majeures et mineures, et  $\sigma_\theta$  résistance en traction (estimé à partir de la théorie élastique). (c) Peu de cas disponible où la hauteur de couverture au dessus du toit soit plus faible que la largeur de l'ouvrage. Il est suggéré d'augmenté SRF de 2,5 à 5 si c'est le cas (voir H).

## SRF

|                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                     |                              |         |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------|---------|
| (c) Roche poussant: déformation plastique du rocher sous l'action de fortes contraintes naturelles                                                                                                                                                                             |                                     | $\sigma_{\theta} / \sigma_c$ | SRF     |
| O                                                                                                                                                                                                                                                                              | Pression de roche poussante moyenne | 1 – 5                        | 5 – 10  |
| P                                                                                                                                                                                                                                                                              | Pression de roche poussante forte   | 5                            | 10 – 20 |
| Note: (vi) Des cas de roches en compression peuvent se produire à une profondeur $H > 350 Q^{1/3}$ .<br>La résistance à la compression simple de la masse rocheuse peut être estimée à partir de $Q = 7 \gamma Q^{1/3}$ (MPa), où $\gamma$ = densité de la roche en $g/cm^3$ . |                                     |                              |         |
| (d) Roche gonflante: activité gonflante chimique dépendant de la présence d'eau                                                                                                                                                                                                |                                     |                              | SRF     |
| R                                                                                                                                                                                                                                                                              | Pression roche gonflante moyenne    |                              | 5 – 10  |
| S                                                                                                                                                                                                                                                                              | Pression de roche gonflante forte   |                              | 10 – 15 |

Note: La classification Jr et Ja est appliquée à la famille de discontinuité ou à la discontinuité qui est la moins favorable à la stabilité du point de vue orientation et résistance au cisaillement



## Commentaires sur le SRF (Stress Reduction Factor)

- SRF n'est pas assez fin pour le dimensionnement des ouvrages en rocher. Sa valeur couvre en effet une gamme de contraintes trop large.

E.g.  $\text{SRF} = 1 \rightarrow \sigma_c / \sigma_1 \sim 10 \div 200$ .

pour une roche avec  $\sigma_c = 50$  MPa, la contrainte in situ peut varier de 0.25 à 5 MPa sans influencer le facteur SRF

- L'importance de la contrainte in situ sur la stabilité des ouvrages souterrains n'est pas assez bien prise en compte dans le système de classification Q.

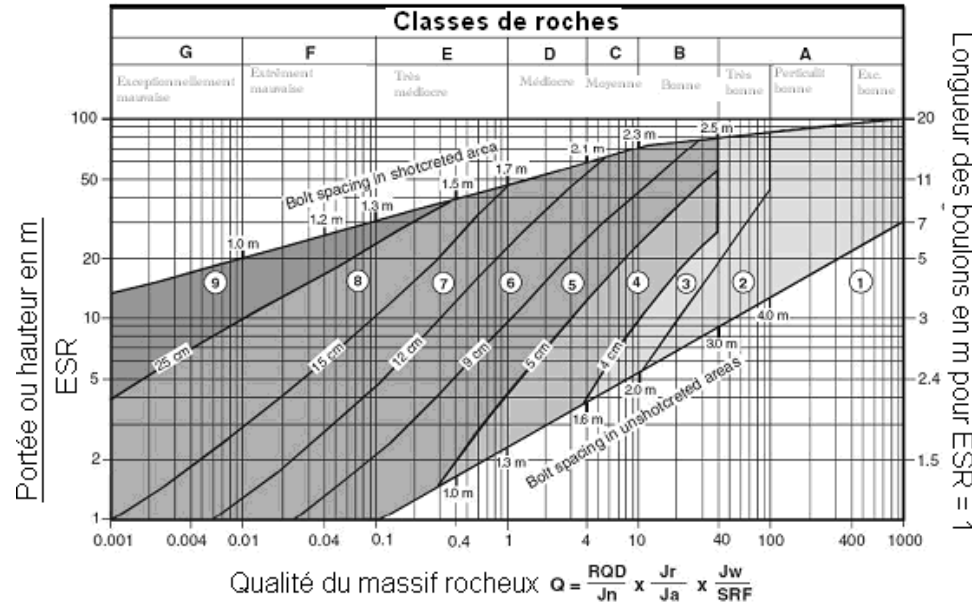


## Indice Q et qualité du massif rocheux

| 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 |



ESR (Excavation Support Ratio) étant un facteur dépendant de la finalité de l'excavation, autrement dit, du degré de sécurité recherché pour la stabilité.



1. Non-soutenu
2. Boulonnage local
3. Boulonnage systématique
4. Boulonnage systématique (et béton projeté non armé, 4-10 cm)
5. Béton projeté armé de fibres (5-9 cm) et boulonnage
6. Béton projeté armé de fibres (9-12 cm) et boulonnage
7. Béton projeté armé de fibres (12-15 cm) et boulonnage
8. Béton projeté armé de fibres (>15 cm), cintres, boulonnage
9. Revêtement en béton coffré



## Excavation Support Ratio (ESR)

| Catégorie d'excavation |                                                                                                                                                                                                | ESR   |
|------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| <b>A</b>               | Ouvertures temporaires dans les mines.                                                                                                                                                         | 3 – 5 |
| <b>B</b>               | Ouvertures permanentes dans les mines, conduites forcées pour usines hydroélectriques, galeries pilote, puits et galeries d'avancement pour grandes excavations.                               | 1.6   |
| <b>C</b>               | Chambres de stockage, installations de traitement des eaux, tunnels routiers et ferroviaires d'importance mineure, chambres d'équilibre et tunnels d'accès pour des projets hydro-électriques. | 1.3   |
| <b>D</b>               | Centrales électriques souterraines, tunnels routiers et ferroviaires d'importance majeure, abris souterrains, portails et intersections de tunnels.                                            | 1.0   |
| <b>E</b>               | Centrales nucléaires souterraines, stations ferroviaires, aménagements sportifs et publics, usines souterraines.                                                                               | 0.8   |

Dimension équivalente,  $D_e = \text{Dimension de l'excavation} / \text{ESR}$

## 2.5 Exemple d'application de Barton & al.

Q



- Massif granitique avec 3 familles de joints,
- RQD moyen de 88%,
- espacement moyen des joints de 0.24 m,
- surfaces des joints généralement irrégulières et rugueuses, jointives et non altérées avec quelques taches,
- surface d'excavation humide, mais sans écoulement
- résistance moyenne à la compression uniaxiale de 160 MPa,
- tunnel excavé à 150 m de profondeur, sans état de contrainte in situ anormalement élevé.

|                                           |  |                      |  |
|-------------------------------------------|--|----------------------|--|
| <b>RQD</b>                                |  | <b>RQD</b>           |  |
| <b>Nb de famille de joints</b>            |  | <b>J<sub>n</sub></b> |  |
| <b>Facteur rugosité du joint</b>          |  | <b>J<sub>r</sub></b> |  |
| <b>Facteur altération du joint</b>        |  | <b>J<sub>a</sub></b> |  |
| <b>Facteur eau du joint</b>               |  | <b>J<sub>w</sub></b> |  |
| <b>Facteur de réduction de contrainte</b> |  | <b>SRF</b>           |  |
|                                           |  | <b>Q</b>             |  |



## Hoek (1994)

## GSI (Geological Strength Index)

L'indice GSI sert à estimer la réduction de résistance du massif rocheux en fonction des conditions géologiques. Le système estime une valeur à partir:

- de la structure du massif rocheux;
- des conditions de surface des discontinuités.

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

GSI

| GEOLOGICAL STRENGTH INDEX (GSI)                                                                                                                                                                                      |                                                                                               | According to rock mass structure and discontinuity surface conditions observed on the rock mass at site, estimate the average or range of the GSI value. |  |  |  |  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--|--|--|
| ROCK MASS STRUCTURE                                                                                                                                                                                                  | JOINT SURFACE CONDITION                                                                       |                                                                                                                                                          |  |  |  |  |
|  <p>MASSIVE – mass in situ rock mass with few widely spaced joints</p>                                                            | <p>VERY GOOD – very rough, fresh, unweathered Joint surfaces</p>                              |                                                                                                                                                          |  |  |  |  |
|  <p>BLOCKY – very well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three orthogonal joint sets</p>    | <p>GOOD – rough, slightly weathered, stained joint surfaces</p>                               |                                                                                                                                                          |  |  |  |  |
|  <p>VERY BLOCKY – interlocked, partially disturbed rock mass with multi-faced angular blocks formed by four or more joint sets.</p> | <p>FAIR – smooth, moderately weathered, and altered surfaces</p>                              |                                                                                                                                                          |  |  |  |  |
|  <p>BLOCKY/FOLDED – folded and faulted with many intersecting discontinuities forming angular blocks.</p>                           | <p>POOR – slickensided, highly weathered surfaces with coating or fillings or fragments</p>   |                                                                                                                                                          |  |  |  |  |
|  <p>DISINTEGRATED – poorly interlocked, heavily broken rock mass with a mixture of angular and rounded blocks.</p>                  | <p>VERY POOR – slickensided, highly weathered, surfaces with soft clay coating or filling</p> |                                                                                                                                                          |  |  |  |  |
|  <p>SHEARED/LAMINATED – lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear zones.</p>                             |                                                                                               |                                                                                                                                                          |  |  |  |  |

↗ Decreasing Interlocking of Rock Blocks

Decreasing of Surface Quality ⇒

|     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 90  | 80  | 70  | 60  | 50  | 40  | 30  | 20  | 10  |
| N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A |

## Description générale de la structure rocheuse dans GSI

| Description GSI                | Désignation ISRM           | $J_v$<br>[discontinuités/<br>$m^3$ ] | RQD [%]  |
|--------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|----------|
| Fracturée                      | Blocs moyens à grands      | < 10                                 | 90 ~ 100 |
| Très fracturée                 | Blocs petits à moyens      | 10 – 30                              | 65 ~ 90  |
| Fracturée/Déstructurée/Failles | Blocs très petits à petits | > 30                                 | 35 ~ 65  |
| Désintégrée                    | Roche désintégrée          | > 60                                 | < 35     |

Nombre sans dimension

## Indice GSI et qualité du massif rocheux

| Valeur GSI                | 76 – 95          | 56 – 75    | 41 – 55      | 21 – 40        | < 20                 |
|---------------------------|------------------|------------|--------------|----------------|----------------------|
| Qualité du massif rocheux | Très bon<br>(VG) | Bon<br>(G) | Moyen<br>(F) | Mauvais<br>(P) | Très mauvais<br>(VP) |

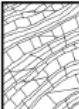
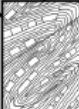
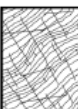
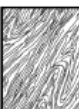
# 2.6 Classification de Hoek & al.

## GSI





## GSI pour des massifs rocheux hétérogènes tels que des Flysch

| GSI FOR HETEROGENEOUS ROCK MASSES SUCH AS FLYSCH<br>(Marinos.P and Hoek. E, 2000)                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                         | SURFACE CONDITIONS OF DISCONTINUITIES<br>(Predominantly bedding planes) |                                           |                                                          |                                                                                                                 |                                                                                                       |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| COMPOSITION AND STRUCTURE                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                         | VERY GOOD - Very rough, fresh unweathered surfaces                      | GOOD - Rough, slightly weathered surfaces | FAIR - Smooth, moderately weathered and altered surfaces | POOR - Very smooth, occasionally slickensided surfaces with compact coatings or fillings with angular fragments | VERY POOR - Very smooth slickensided or highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings |
|                                                                                                           | <b>A. Thick bedded, very blocky sandstone</b><br>The effect of peltic coatings on the bedding planes is minimized by the confinement of the rock mass. In shallow tunnels or slopes these bedding planes may cause structurally controlled instability. | 70                                                                      | 60                                        | <b>A</b>                                                 |                                                                                                                 |                                                                                                       |
|                                                                                                           | <b>B. Sandstone with thin inter-layers of siltstone</b>                                                                                                                                                                                                 |                                                                         | 50                                        | <b>B</b>                                                 |                                                                                                                 |                                                                                                       |
|                                                                                                           | <b>C. Sandstone and siltstone in similar amounts</b>                                                                                                                                                                                                    |                                                                         |                                           | <b>C</b>                                                 |                                                                                                                 |                                                                                                       |
|                                                                                                           | <b>D. Siltstone or silty shale with sandstone layers</b>                                                                                                                                                                                                |                                                                         |                                           | <b>D</b>                                                 |                                                                                                                 |                                                                                                       |
|                                                                                                         | <b>E. Weak siltstone or clayey shale with sandstone layers</b>                                                                                                                                                                                          |                                                                         |                                           |                                                          | <b>E</b>                                                                                                        |                                                                                                       |
| C,D, E and G - may be more or less folded than illustrated but this does not change the strength. Tectonic deformation, faulting and loss of continuity moves these categories to F and H. |                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                         |                                           |                                                          | 30                                                                                                              |                                                                                                       |
|                                                                                                           | <b>F. Tectonically deformed, intensively folded/faulted, sheared clayey shale or siltstone with broken and deformed sandstone layers forming an almost chaotic structure</b>                                                                            |                                                                         |                                           |                                                          | 20                                                                                                              |                                                                                                       |
|                                                                                                           | <b>G. Undisturbed silty or clayey shale with or without a few very thin sandstone layers</b>                                                                                                                                                            |                                                                         |                                           |                                                          |                                                                                                                 | <b>G</b>                                                                                              |
|                                                                                                           | <b>H. Tectonically deformed silty or clayey shale forming a chaotic structure with pockets of clay. Thin layers of sandstone are transformed into small rock pieces.</b>                                                                                |                                                                         |                                           |                                                          |                                                                                                                 | <b>H</b> 10                                                                                           |

→ : Means deformation after tectonic disturbance



## 2.6 Exemple d'application du GSI



- Massif granitique avec 3 familles de joints,
- RQD moyen de 88%,
- espacement moyen des joints de 0.24 m,
- surfaces des joints généralement irrégulières et rugueuses, jointives et non altérées avec quelques taches,
- surface d'excavation humide, mais sans écoulement
- résistance moyenne à la compression uniaxiale de 160 MPa,
- tunnel excavé à 150 m de profondeur, sans état de contrainte in situ anormalement élevé.

|                      |                                    |  |
|----------------------|------------------------------------|--|
| Structure du massif: | Conditions de surface des joints : |  |
|----------------------|------------------------------------|--|

## 2.7 Autres systèmes de classification



### Autres systèmes de classification des massifs rocheux

- **Rock Mass Number**  $N$  : indice de qualité  $Q$  de la roche lorsque SRF vaut 1, i.e.  $N = (RQD / J_n) (J_r / J_a) (J_w)$ . Cette valeur est utilisée pour caractériser le potentiel de squeezing des massifs rocheux.
- **Rock Mass Index**  $RMi = \sigma_{ci} J_p$  avec

$\sigma_{ci}$  : résistance à la compression uniaxiale de la roche intacte.

$J_p$  : facteur de réduction représentant l'effet des joints sur la résistance du massif rocheux. Il est fonction de 4 caractéristiques des joints : densité, taille, rugosité et degré d'altération.  $J_p=1$  pour la roche intacte,  $J_p=0$  pour les massifs fracturés.

### AFTES (Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain)

- Normes SIA ( Association suisse des ing.) (197 – 198 – 199)

## 2.8 Exemples d'application

|                           |                                            |            |           |
|---------------------------|--------------------------------------------|------------|-----------|
| Résistance de la roche    | 160 MPa                                    | Note       | 12        |
| RQD (%)                   | 88%                                        | Note       | 17        |
| Espacement des joints (m) | 0.24 m                                     | Note       | 10        |
| Conditions des joints     | Très rugueux, inaltérés, pas de séparation | Note       | 30        |
| Eau souterraine           | mouillé                                    | Note       | 7         |
|                           |                                            | <b>RMR</b> | <b>76</b> |

|                                    |                                                           |          |           |
|------------------------------------|-----------------------------------------------------------|----------|-----------|
| RQD                                | 88%                                                       | RQD      | 88        |
| Nb de famille de joints            | 3 familles                                                | $J_n$    | 9         |
| Facteur rugosité du joint          | rugosité avancée ( $\Rightarrow$ ondulation)              | $J_r$    | 3         |
| Facteur altération du joint        | inaltéré, quelques taches                                 | $J_a$    | 1         |
| Facteur eau du joint               | Seulement mouillé (excavation sèche ou écoulement mineur) | $J_w$    | 1         |
| Facteur de réduction de contrainte | $\sigma_c/\sigma_1 = 160/(150 \times 0.027) = 39.5$       | SRF      | 1         |
|                                    | (88/9) (3/1) (1/1)                                        | <b>Q</b> | <b>29</b> |

|                               |                                                |                                  |
|-------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------|
| Structure du massif: en blocs | Conditions de surface des joints : très bonnes | <b>GSI = 75<math>\pm</math>5</b> |
|-------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------|

## 2.8 Exemples d'application



### Cas (b) – Estimation de RMR, Q et GSI

Massif de grès, découpé par 2 familles de joints plus des fractures aléatoires, RQD moyen de 70%, espacement moyen des joints de 0.11 m, surfaces des joints légèrement rugueuses, altérées avec des taches marquées, mais sans présence d'argile, joints généralement en contact avec des ouvertures inférieures au mm, résistance moyenne à la compression uniaxiale de 85 MPa, tunnel excavé à 80 m de profondeur et niveau de la nappe 10 m sous le terrain.

## 2.8 Exemples d'application

|                           |                                                           |            |           |
|---------------------------|-----------------------------------------------------------|------------|-----------|
| Résistance de la roche    | 85 MPa                                                    | Note       | 7         |
| RQD (%)                   | 70%                                                       | Note       | 13        |
| Espacement des joints (m) | 0.11 m                                                    | Note       | 8         |
| Conditions des joints     | Légèrement rugueux, fortement altérés,<br>ouverture < 1mm | Note       | 20        |
| Eau souterraine           | Pression d'eau/contrainte = 0.32                          | Note       | 4         |
|                           |                                                           | <b>RMR</b> | <b>52</b> |

|                                    |                                                                       |          |            |
|------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|----------|------------|
| RQD                                | 70%                                                                   | RQD      | 70         |
| Nb de famille de joints            | 2 familles plus fractures aléatoires                                  | $J_n$    | 6          |
| Facteur rugosité du joint          | Légèrement rugueux ( $\Rightarrow$ rugosité planaire)                 | $J_r$    | 1.5        |
| Facteur altération du joint        | altéré avec des taches marquées, mais<br>sans matériau de remplissage | $J_a$    | 2          |
| Facteur eau du joint               | 70 m hauteur d'eau = 7 kg/cm <sup>2</sup> = 7 bars                    | $J_w$    | 0.5        |
| Facteur de réduction de contrainte | $\sigma_c/\sigma_1 = 85/(80 \times 0.027) = 39.3$                     | SRF      | 1          |
|                                    | (70/6) (1.5/2) (0.5/1)                                                | <b>Q</b> | <b>4.4</b> |

|                               |                                                |                   |
|-------------------------------|------------------------------------------------|-------------------|
| Structure du massif: en blocs | Conditions de surface des joints : très bonnes | <b>GSI = 40±5</b> |
|-------------------------------|------------------------------------------------|-------------------|

## 2.8 Exemples d'application



### Cas (c) – Estimation de RMR, Q et GSI

Massif de silt très fracturé, avec 2 familles de joints et de nombreuses fractures aléatoires, RQD moyen de 41%, joints continus observés en tunnel, surfaces des joints lustrées et ondulées, fortement altérées, joints ouverts de 3 à 5 mm, remplis d'argile, résistance moyenne à la compression uniaxiale de 65 MPa, venues d'eau par 10 m de tunnel d'environ 50 litres/minute, avec débouillage important des matériaux de remplissage des joints. Le tunnel est à 220 m de profondeur.

## 2.8 Exemples d'application

|                           |                                               |            |           |
|---------------------------|-----------------------------------------------|------------|-----------|
| Résistance de la roche    | 65 MPa                                        | Note       | 7         |
| RQD (%)                   | 41%                                           | Note       | 8         |
| Espacement des joints (m) | 0.05 m                                        | Note       | 5         |
| Conditions des joints     | continus, plan de glissement, ouverture 1-5mm | Note       | 10        |
| Eau souterraine           | Débit = 50 l/min                              | Note       | 4         |
|                           |                                               | <b>RMR</b> | <b>34</b> |

|                                    |                                                   |          |             |
|------------------------------------|---------------------------------------------------|----------|-------------|
| RQD                                | 41%                                               | RQD      | 41          |
| Nb de famille de joints            | 2 familles et fractures aléatoires                | $J_n$    | 6           |
| Facteur rugosité du joint          | plan de glissement et ondulation                  | $J_r$    | 1.5         |
| Facteur altération du joint        | fortement altérées, remplies avec 3-5 mm d'argile | $J_a$    | 4           |
| Facteur d'eau du joint             | fort écoulement avec débouillage important        | $J_w$    | 0.33        |
| Facteur de réduction de contrainte | $\sigma_c/\sigma_1 = 65/(220 \times 0.027) = 11$  | SRF      | 1           |
|                                    | (41/6) (1.5/4) (0.33/1)                           | <b>Q</b> | <b>0.85</b> |

|                              |                                                |                   |
|------------------------------|------------------------------------------------|-------------------|
| Structure du massif: en bloc | Conditions de surface des joints : très bonnes | <b>GSI = 20±5</b> |
|------------------------------|------------------------------------------------|-------------------|

Exemple – Estimation de RMR, Q et GSI

|             | <b>RMR</b> | Qualité | <b>Q</b> | Qualité | <b>GSI</b> | Qualité |
|-------------|------------|---------|----------|---------|------------|---------|
| (a) Granite | 76         | G       | 29       | G       | 75         | G       |
| (b) Grès    | 52         | F       | 4.4      | F       | 40         | F       |
| (c) Silt    | 34         | P       | 0.85     | VP      | 20         | VP      |



## 2.9 Corrélations entre classifications

### Corrélation entre Q, RMR et GSI

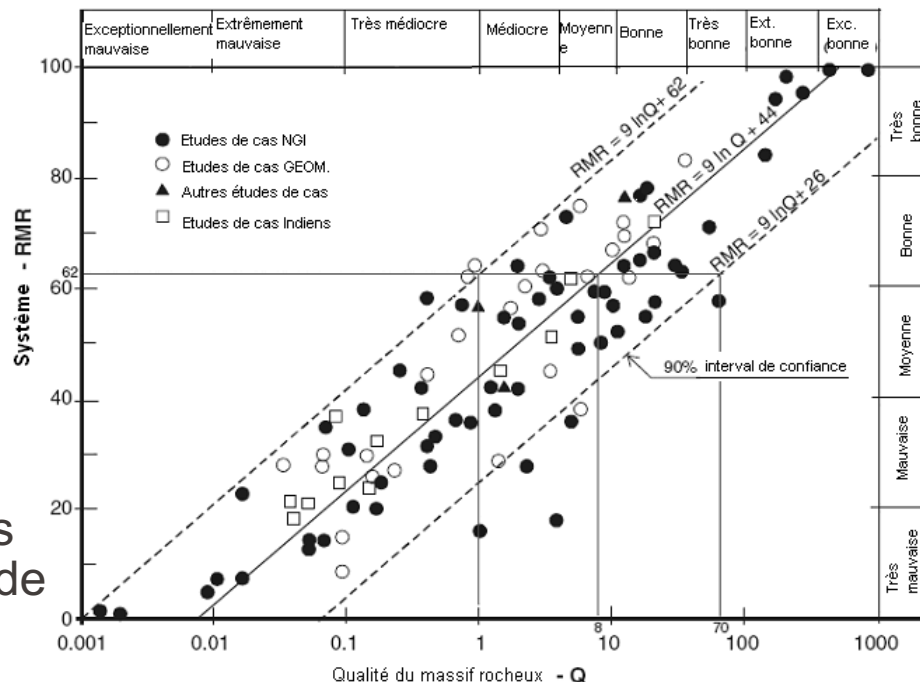
$$\text{RMR} = 9 \ln Q + (44 \pm 18)$$

$$\text{RMR} = 13.5 \log Q + 43$$

$$\text{GSI} = \text{RMR} - 5$$

(pour GSI > 25)

Cette dernière corrélation n'est pas valable pour des massifs rocheux de très mauvaise qualité (VP) !



# Caractérisation et comportement des discontinuités

1. Introduction

2. Classifications

**3. Propriétés des massifs rocheux**

**3.1. Critère de résistance de Hoek-Brown généralisé**

**3.2. Déformabilité**

**3.3. Massifs rocheux poussants**

# 3.1 Classification de Hoek-Brown



## Résistance d'un massif rocheux

La résistance d'un massif rocheux dépend de:

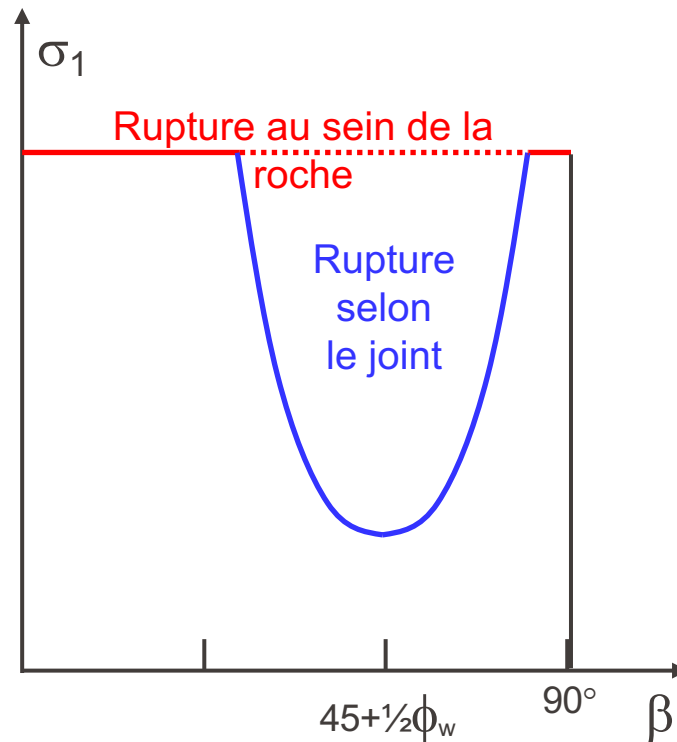
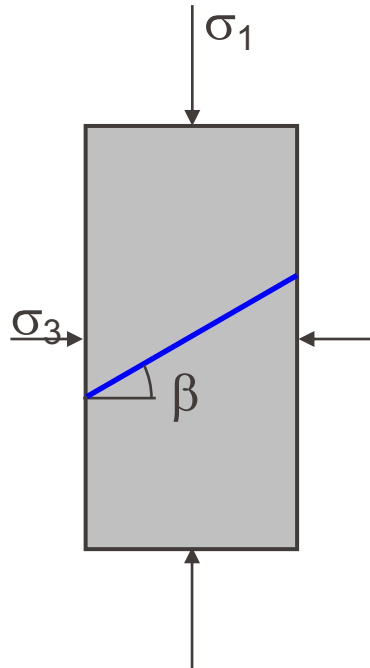
- la résistance de la matrice rocheuse,
- la résistance au cisaillement des discontinuités,
- le nombre et l'orientation de ces discontinuités.

Il en est de même pour les propriétés de déformabilité.

En général, un massif de bonne qualité (roche dure, joints rares et de bonne qualité) a une résistance et un module de déformation plus élevés qu'un massif de qualité médiocre.

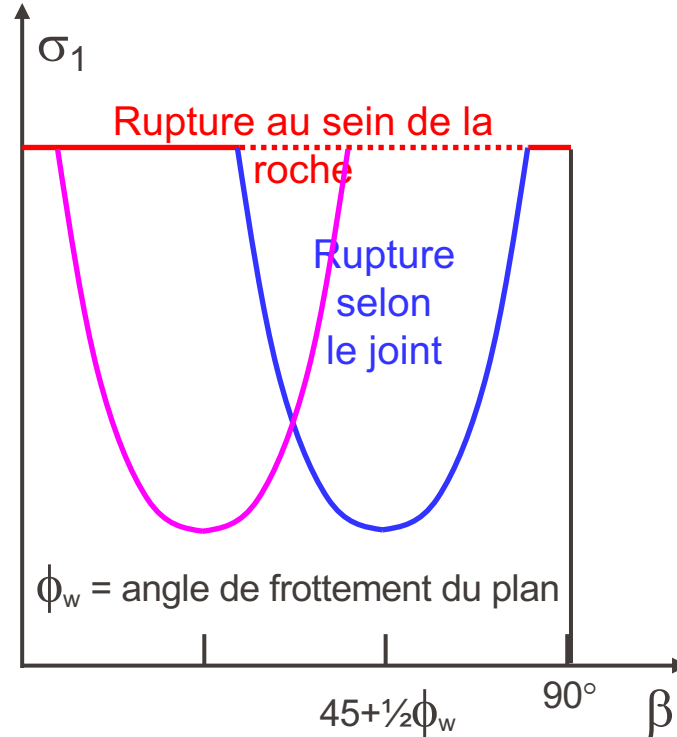
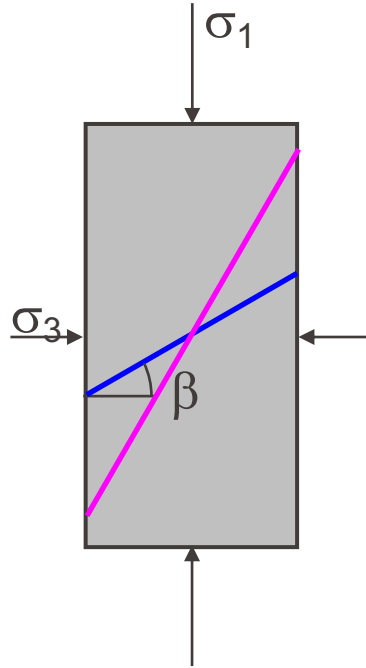
# 3.1 Critère de résistance de Hoek-Brown

## Application du critère de résistance orienté



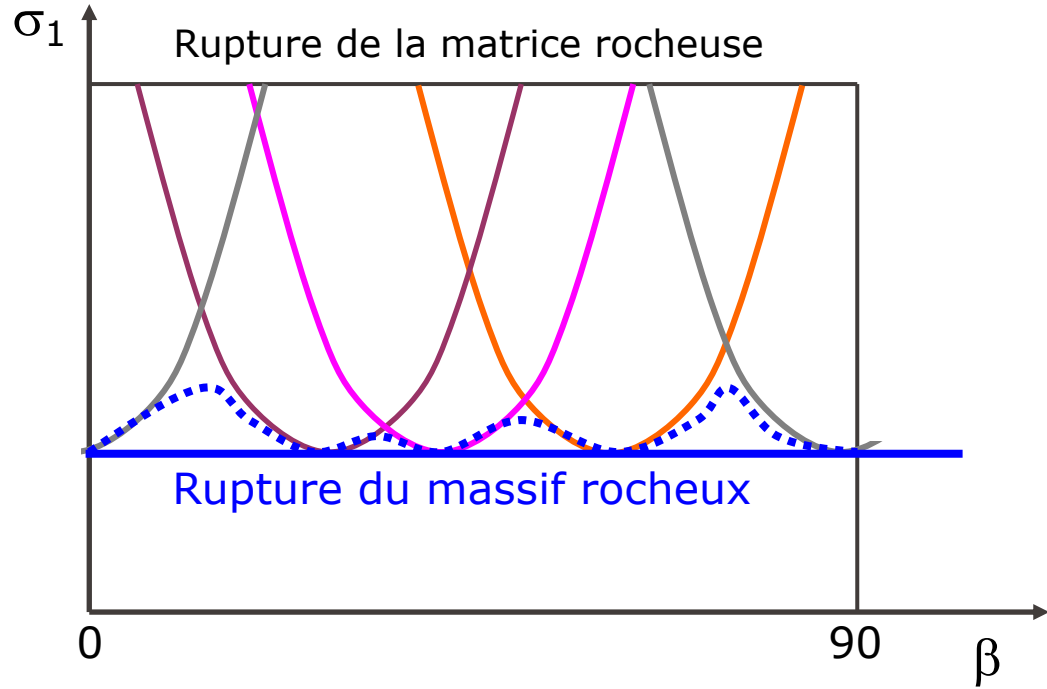
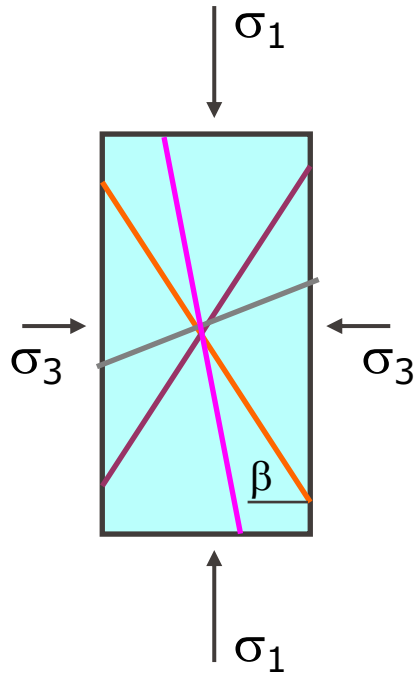
# 3.1 Critère de résistance de Hoek-Brown

## Application du critère de résistance orienté



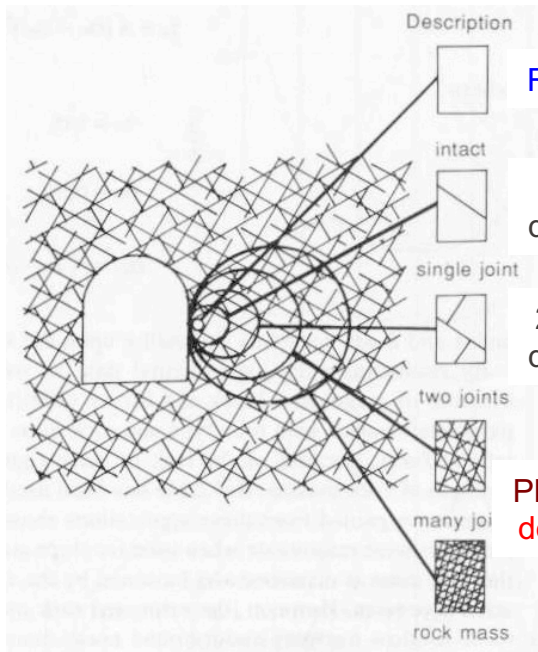
# 3.1 Critère de résistance de Hoek-Brown

## Application du critère de Hoek-Brown pour le massif



# 3.1 Critère de résistance de Hoek-Brown

## Domaine de validité du critère de Hoek-Brown

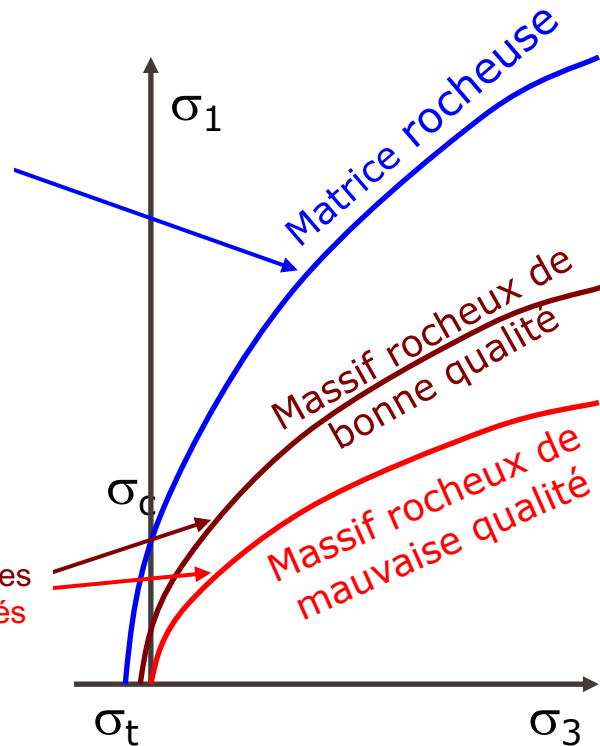


Roche intacte

1 famille de discontinuités

2 familles de discontinuités

Plusieurs familles de discontinuités



# 3.1 Critère de résistance de Hoek-Brown

## Domaine de validité du critère de Hoek-Brown



| Description                                                                                                         | Application                                                                                        |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  <p>Intact</p>                    | Critère de Hoek-Brown est applicable- utilise valeurs intact de m et s                             |
|  <p>Discontinuité unique</p>      | Critère de Hoek-Brown pas applicable utilisé un critère anisotrope tel que celui par Amadei (1988) |
|  <p>Deux discontinuité</p>        | Critère de Hoek-Brown pas applicable utilisé un critère anisotrope tel que celui par Amadei (1988) |
|  <p>Beaucoup de discontinuité</p> | Critère de Hoek-Brown applicable avec prudence pour 4 ou + de discontinuité de résistance uniforme |
|  <p>Masse rocheuse</p>            | Critère de Hoek-Brown applicable                                                                   |



# 3.1 Critère de résistance de Hoek-Brown



## Critère généralisé de Hoek-Brown pour le massif rocheux

Massif intact

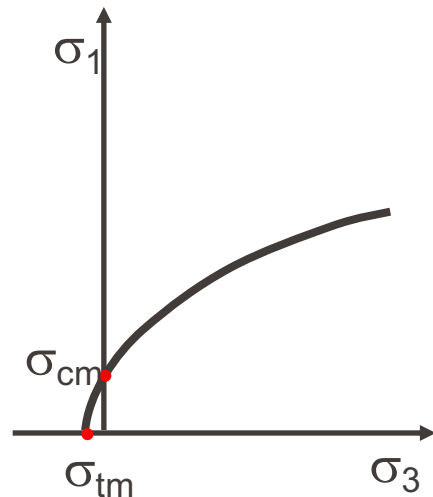
$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m_i \cdot \sigma_3 \cdot \sigma_{ci} + \sigma_{ci}^2}$$

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \left( m_b \cdot \sigma_3 \cdot \sigma_{ci} + s \cdot \sigma_{ci}^2 \right)^a$$

ou

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left( m_b \cdot \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_{ci}} = \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + \left( m_b \cdot \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$



$m_b$ ,  $s$  et  $a$

des paramètres fonction du type de roche  
et de la qualité du massif

## 3.1 Critère de résistance de Hoek-Brown



### Critère généralisé de Hoek-Brown pour le massif rocheux

$\sigma_{ci}$  est la résistance à la compression uniaxiale de la roche intacte. Elle est utilisée dans le critère de Hoek-Brown pour la matrice rocheuse et le massif rocheux.

$\sigma_1$  est la résistance du massif pour une contrainte de confinement  $\sigma_3$ .

Le critère généralisé dégénère en sa forme originale pour la matrice rocheuse pour  $s = 1$ ,  $a = 0.5$ ,  $m_b = m_i$ .

Les paramètres  $m_b$  et  $s$  dépendent du type de roche et de la qualité du massif (cf. tableau page suivante). Le paramètre  $a$  est généralement égal à 0.5.

# 3.1 Critère de résistance de Hoek-Brown

| Critère de rupture de Hoek-Brown                        | Roches carbonatées<br>dolomie,<br>calcaire,<br>marbre | Roches argileuses -<br>limon,<br>siltstone,<br>schiste,<br>ardoise | Roches arénacées -<br>grès, quartzite | Roches ignées à grain fin:<br>andésite,<br>dolerite, basalte,<br>rhyolite | Roches métamorphiques et ignées à grain grossier:<br>gabbro, gneiss,<br>granite |
|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| Roche intacte<br><i>RMR = 100, Q = 500</i>              | $m_i = 7.0$<br>$s = 1.0$                              | $m_i = 10.0$<br>$s = 1.0$                                          | $m_i = 15.0$<br>$s = 1.0$             | $m_i = 17.0$<br>$s = 1.0$                                                 | $m_i = 25.0$<br>$s = 1.0$                                                       |
| Roche de très bonne qualité<br><i>RMR = 85, Q = 100</i> | $m_b = 3.5$<br>$s = 0.1$                              | $m_b = 5.0$<br>$s = 0.1$                                           | $m_b = 7.5$<br>$s = 0.1$              | $m_b = 8.5$<br>$s = 0.1$                                                  | $m_b = 12.5$<br>$s = 0.1$                                                       |
| Roche de bonne qualité<br><i>RMR = 65, Q = 10</i>       | $m_b = 0.7$<br>$s = 0.004$                            | $m_b = 1.0$<br>$s = 0.004$                                         | $m_b = 1.5$<br>$s = 0.004$            | $m_b = 1.7$<br>$s = 0.004$                                                | $m_b = 2.5$<br>$s = 0.004$                                                      |
| Roche de qualité moyenne<br><i>RMR = 44, Q = 1.0</i>    | $m_b = 0.14$<br>$s = 0.0001$                          | $m_b = 0.20$<br>$s = 0.0001$                                       | $m_b = 0.30$<br>$s = 0.0001$          | $m_b = 0.34$<br>$s = 0.0001$                                              | $m_b = 0.50$<br>$s = 0.0001$                                                    |
| Roche mauvaise<br><i>RMR = 23, Q = 0.1</i>              | $m_b = 0.04$<br>$s = 0.00001$                         | $m_b = 0.05$<br>$s = 0.00001$                                      | $m_b = 0.08$<br>$s = 0.00001$         | $m_b = 0.09$<br>$s = 0.00001$                                             | $m_b = 0.13$<br>$s = 0.00001$                                                   |
| Roche très mauvaise<br><i>RMR = 3, Q = 0.01</i>         | $m_b = 0.007$<br>$s = 0$                              | $m_b = 0.01$<br>$s = 0$                                            | $m_b = 0.015$<br>$s = 0$              | $m_b = 0.017$<br>$s = 0$                                                  | $m_b = 0.025$<br>$s = 0$                                                        |

# 3.1 Critère de résistance de Hoek-Brown



## Détermination des paramètres pour le massif rocheux

Au fur et à mesure de l'expérience acquise lors de l'utilisation du critère, la définition des paramètres  $m_b$ ,  $s$  et  $a$  s'est améliorée.

$m_i$  est déterminé par essais ( $\approx \sigma_{ci} / \sigma_{ti}$ ) ou à défaut d'après tableau.

Pour un GSI (general strength index) donné, on peut calculer  $m_b$ ,

$$m_b = m_i \exp [(GSI-100)/28]$$

Pour  $GSI > 25$ , soit des massifs de bonne qualité:

$$s = \exp [(GSI-100)/9] \quad a = 0.5$$

Pour  $GSI < 25$ , soit des massifs de mauvaise qualité:

$$s = 0 \quad a = 0.65 - GSI/200$$

Note: pour  $\sigma_3 = 0$ ,  $\sigma_{cm} = \sigma_1 = (s \cdot \sigma_{ci}^2)^a$  et donc  $\sigma_{cm} = 0$  si  $s = 0$

# 3.1 Critère de résistance de Hoek-Brown

| Type de roche |                       | Nom de la roche et valeurs $m_i$                 |                                           |                                              |                                      |
|---------------|-----------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------|
| Ignée         | Intrusive             | Granite $32\pm3$<br>Granodiorite $29\pm3$        | Diorite $25\pm5$<br>Dolérite ( $16\pm5$ ) | Gabbro $27\pm3$<br>Norite $22\pm5$           | Péridotite ( $25\pm5$ )              |
|               | Extrusive             | Rhyolite ( $16\pm5$ )                            | Andésite $25\pm5$                         | Basalte ( $16\pm5$ )<br>Diabase ( $16\pm5$ ) | Porphyres ( $20\pm5$ )               |
|               | Volcanique            |                                                  | Agglomérat ( $19\pm3$ )                   | Tuff ( $13\pm5$ )                            |                                      |
| Sédimentaire  | Clastique             | Conglomérat ( $4\pm18$ )<br>Breccia ( $4\pm16$ ) | Grès $17\pm4$                             | Siltstone $7\pm2$<br>Marnes ( $7\pm2$ )      | Limon $4\pm2$<br>Schiste ( $6\pm2$ ) |
|               | Carbonatée            | Calcaire cristallin ( $12\pm3$ )                 | Calcaire Sparitique ( $10\pm2$ )          | Calcaire Micritique ( $9\pm2$ )              | Dolomie ( $9\pm3$ )                  |
|               | Chimique              |                                                  | Gypse $8\pm2$                             | Anhydrite $12\pm2$                           |                                      |
|               | Organique             |                                                  |                                           | Charbon ( $8\pm12$ )                         | Craie $7\pm2$                        |
| Métamorphique | Feuilletée            | Gneiss $28\pm5$                                  | Schiste $12\pm3$                          | Phyllites ( $7\pm3$ )                        | Ardoise $7\pm4$                      |
|               | Légèrement Feuilletée | Migmatite ( $29\pm3$ )                           | Amphibolite $26\pm6$                      |                                              |                                      |
|               | Non Feuilletée        | Quartzite $20\pm3$                               | Meta-grès ( $19 \pm 3$ )                  | Hornfels ( $19\pm4$ )                        | Marbre $9\pm3$                       |

être prudent avec la forte incertitude

# 3.1 Critère de résistance de Hoek-Brown



## Application du critère de Hoek-Brown avec le GSI

Cas (a) 
$$\sigma_1 = \sigma_3 + (m_b \sigma_3 \sigma_{ci} + s \sigma_{ci}^2)^a$$

Massif granitique,  $\sigma_{ci} = 160$  MPa, GSI = 75  
 $m_i$  pour le granite est de 32.

$$m_b = m_i \exp[(\text{GSI} - 100)/28] = 13.1$$

$$s = \exp[(\text{GSI} - 100)/9] = 0.062$$

$$a = 0.5$$

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (2096 \sigma_3 + 1591)^{0.5}$$

$$\text{Quand } \sigma_3 = 0, \sigma_{cm} = 1591^{0.5} = 39.9 \text{ MPa}$$

# 3.1 Critère de résistance de Hoek-Brown



## Application du critère de Hoek-Brown avec le GSI

Cas (c)

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (m_b \sigma_3 \sigma_{ci} + s \sigma_{ci}^2)^a$$

Massif de silt,  $\sigma_{ci} = 65$  MPa, GSI = 20

$m_i$  pour le silt est de 7 .

$$m_b = m_i \exp[(\text{GSI} - 100)/28] = 0.4$$

$$s = \exp[(\text{GSI} - 100)/9] = 0.00014$$

$$\text{GSI} < 25, a = 0.65 - (\text{GSI}/200) = 0.55$$

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (26 \sigma_3 + 0.59)^{0.55}$$

$$\text{Quand } \sigma_3 = 0, \sigma_{cm} = 0.59^{0.55} = 0.75 \text{ MPa}$$

# 3.1 Critère de résistance de Hoek-Brown



## Critères de Hoek-Brown et de Mohr-Coulomb

Il n'existe pas de relation directe entre le critère linéaire M-C et le critère non linéaire H-B.

Si les paramètres de Mohr-Coulomb  $c$  et  $\phi$  sont nécessaires pour l'étude d'un ouvrage et/ou pour des modélisations numériques:

- i. Utiliser directement les résultats d'essais sur le massif (in situ), s'il en existe.
- ii. Utiliser le critère de Hoek-Brown pour générer une série de données  $\sigma_1 - \sigma_3$  et dessiner les cercles de Mohr. Pour trouver  $c$  et  $\phi$ , ajuster ensuite la "meilleure" enveloppe tangente dans le domaine de contraintes pertinent.



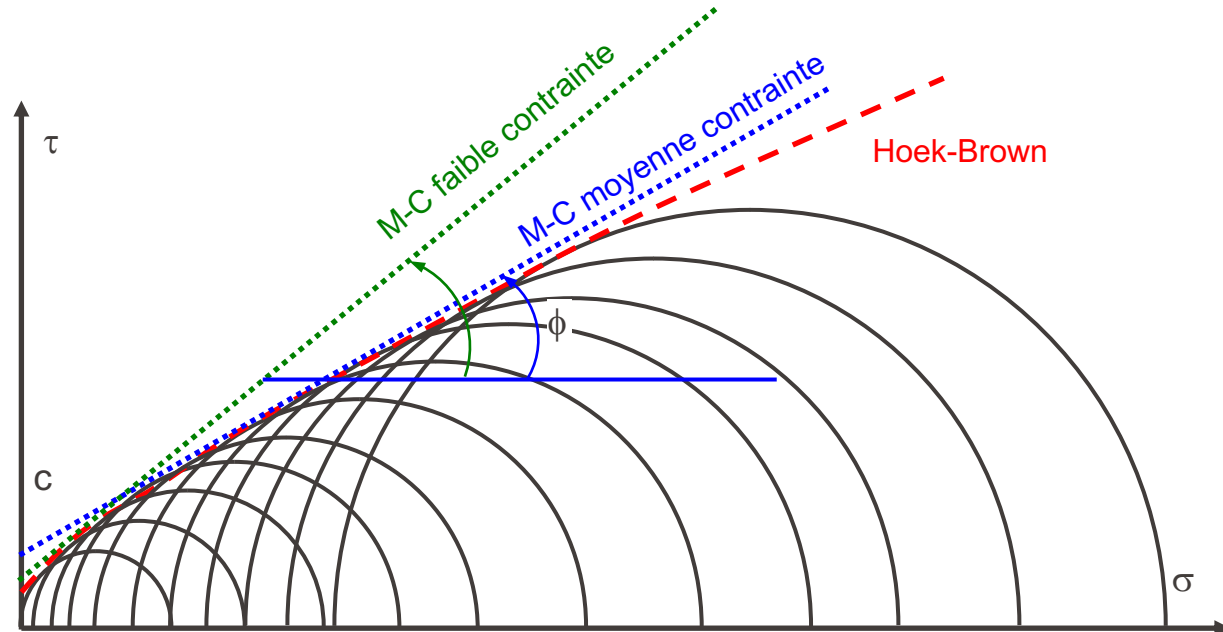
# 3.1 Critère de résistance de Hoek-Brown



## Détermination de $c$ et $\phi$ d'après l'équation de Hoek-Brown

| $\sigma_3$ | $\sigma_1$ |
|------------|------------|
| 0          | 6          |
| 2          | 12         |
| 4          | 17         |
| 6          | 21         |
| 8          | 25         |
| 10         | 28         |
| 12         | 32         |
| 15         | 37         |
| 20         | 45         |
| 30         | 61         |
| 40         | 75         |

$$\sigma_{ci} = 100 \text{ MPa}, \quad m_b = 0.3, \quad s = 0.004, \quad a = 0.5$$



$$\text{Rayon} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2}$$

$$\text{Centre} = \frac{(\sigma_1 + \sigma_3)}{2}$$

## 3.2 Déformabilité des massifs rocheux



### Estimation de la déformabilité à partir de la qualité des massifs rocheux

Le module d'élasticité des massifs rocheux  $E_m$  [GPa] peut être estimé à partir des indices RMR ou Q, pour des massifs rocheux de qualité moyenne à bonne:

$$E_m = 25 \log_{10} Q \quad \text{pour } Q > 1$$

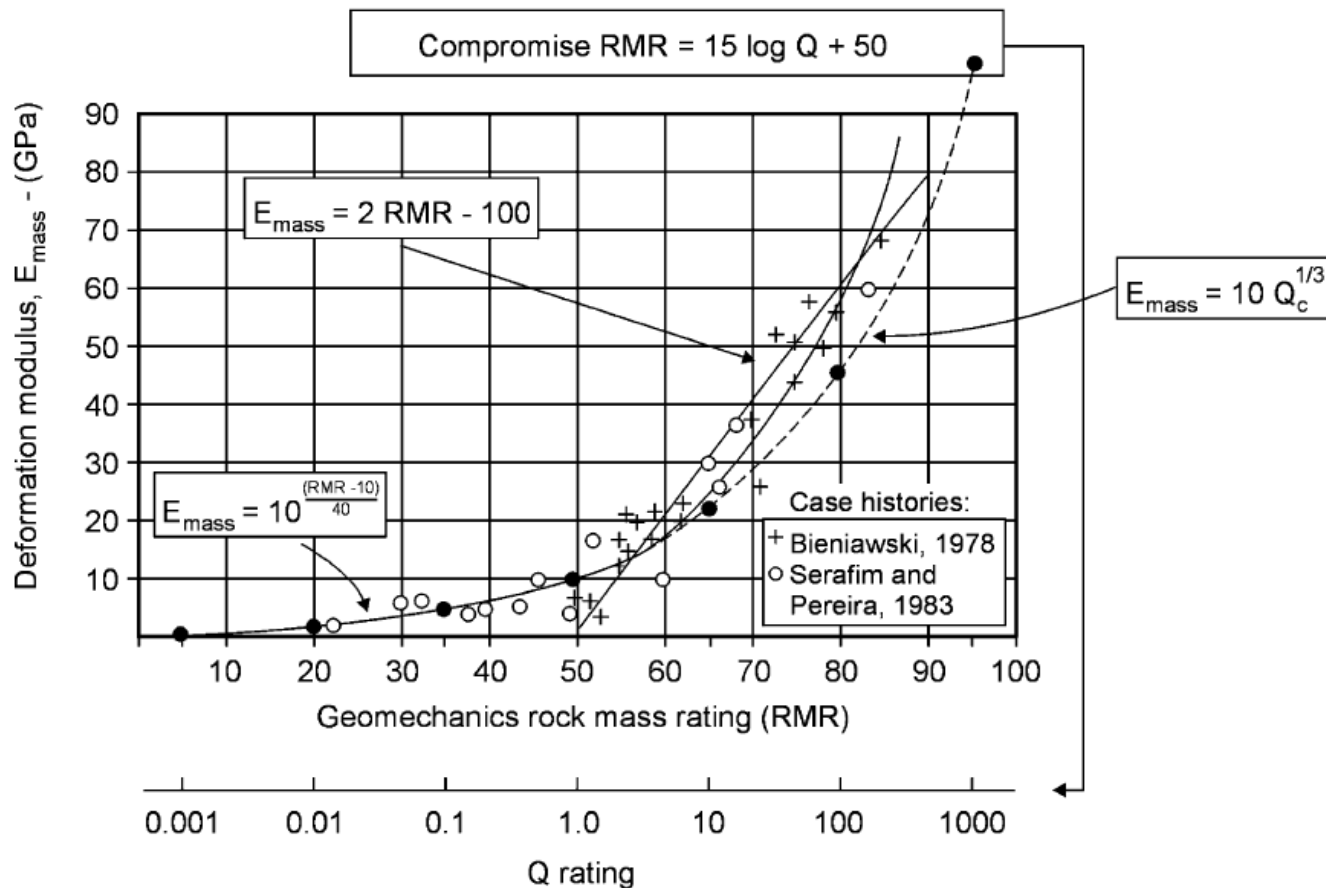
$$E_m = 10 (Q \sigma_{ci} / 100)^{1/3}$$

$$E_m = 2 \text{ RMR} - 100 \quad \text{pour } \text{RMR} > 50$$

$$E_m = 10^{(\text{RMR} - 10)/40} \quad \text{pour } 20 < \text{RMR} < 85$$

$$E_m = 10^{(15 \log Q + 40)/40}$$

# 3.2 Déformabilité des massifs rocheux



## 3.2 Déformabilité des massifs rocheux



### Estimation de la déformabilité à partir de la qualité des massifs rocheux

Pour les roches fragiles avec  $\sigma_{ci} < 100$  MPa:

$$E_m = (\sigma_{ci} / 100)^{0.5} \cdot 10^{(GSI-10)/40}$$

Cette équation est dérivée de relations entre  $E_m$  et RMR d'une part, et entre  $E_m$ ,  $Q$  et  $\sigma_{ci}$  d'autre part; elle permet de refléter l'effet du changement de résistance de la roche.

# 3.3 Massifs rocheux poussants

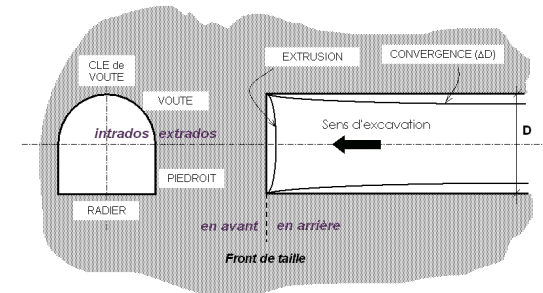


## Comportement des massifs rocheux poussants

Dans les ouvrages souterrains, un terrain dit "poussant" (squeezing) se caractérise par des grandes déformations qui évoluent avec le temps. Elles sont essentiellement associées à du fluage, causé par un excès de contrainte de cisaillement.

Classification des degrés de "contraction" ("serrage") :

- i. Légèrement poussant: fermeture = 1-3% de l'ouverture  $D$
- ii. Modérément poussant: fermeture = 3-5% de  $D$
- iii. Fortement poussant: fermeture  $> 5\%$  de  $D$



## 3.3 Massifs rocheux poussants



### Comportement des massifs rocheux poussants

Le caractère poussant d'un massif rocheux est typiquement observé par sa déformation plastique à l'intérieur des tunnels.

Le taux de convergence est proportionnel au temps et à la contrainte. Habituellement, le taux est élevé au début (après l'excavation), e.g. convergences de plusieurs cm/jour, puis il se réduit avec le temps. La convergence peut continuer pendant une longue période.

Ce phénomène se produit plutôt dans des tunnels à grande profondeur creusés dans des massifs rocheux de résistance modérée à faible. Cependant, il peut également se présenter dans des tunnels à faible profondeur si la qualité du massif rocheux est médiocre.

### 3.3 Massifs rocheux poussants

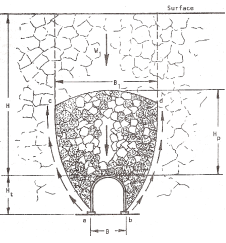


Squeezing au tunnel  
Yacambu-Quibor au  
Venezuela



Squeezing à Faido  
(tunnel de base du  
Gothard)

*Image: Heinz Ehrbar*



# 3.3 Massifs rocheux poussants

## Estimation de la contraction d'après la classification Q

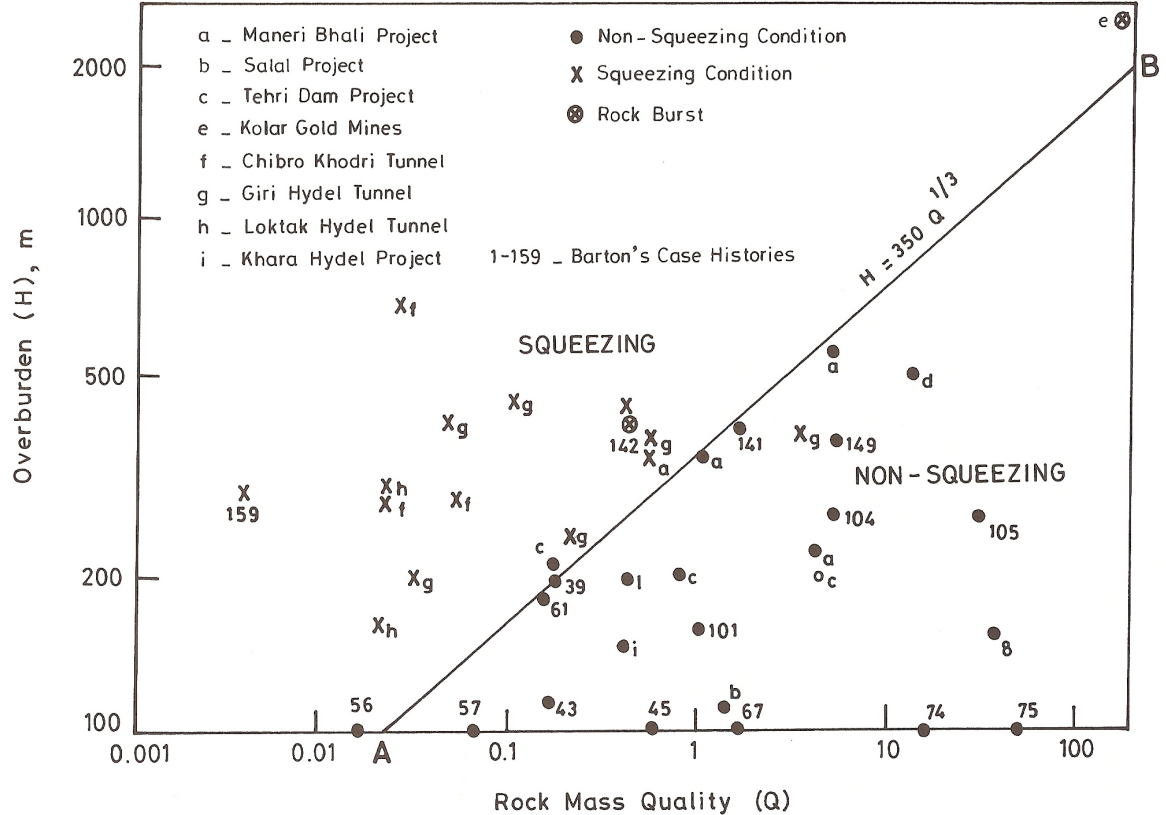
Terrain poussant:

$$H > 350 Q^{1/3}$$

Avec H hauteur de couverture [m]

Non poussant:

$$H < 350 Q^{1/3}$$





# 3.3 Massifs rocheux poussants

## Estimation de la contraction d'après la classification N (Rock Mass Number )

Non poussant:

$$H < (275 N^{1/3}) B^{-0.1}$$

Légèrement poussant:

$$H > (275 N^{1/3}) B^{-0.1}$$

$$H < (450 N^{1/3}) B^{-0.1}$$

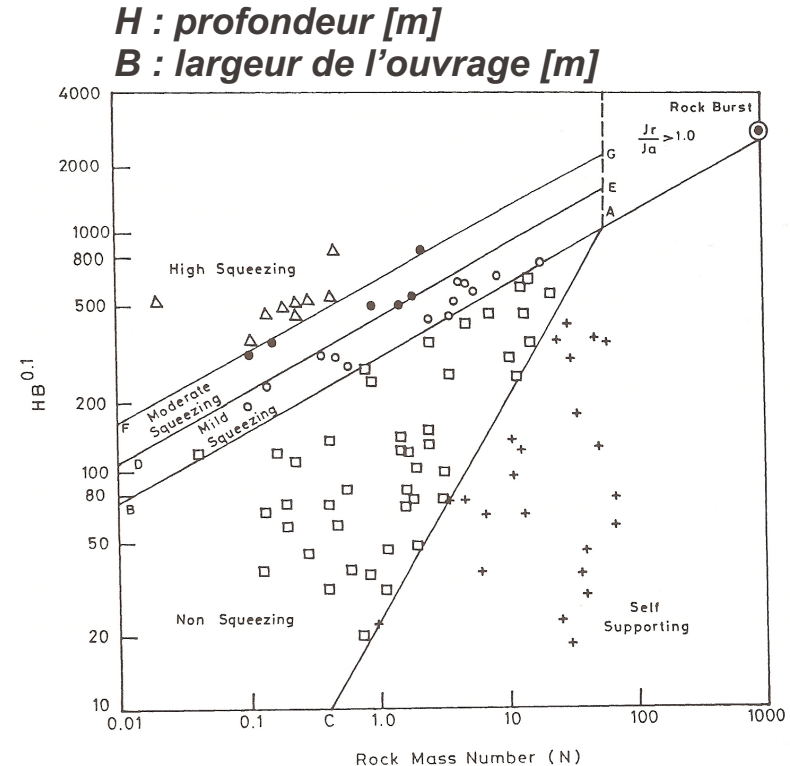
Modérément poussant:

$$H > (450 N^{1/3}) B^{-0.1}$$

$$H < (630 N^{1/3}) B^{-0.1}$$

Fortement poussant:

$$H > (630 N^{1/3}) B^{-0.1}$$



## 3.3 Massifs rocheux poussants



### Estimation des conditions de contraction

Théoriquement, le rocher autour d'un tunnel est considéré comme poussant lorsque:

$$\sigma_{\theta} > \text{résistance} = \sigma_{cm} + \sigma_x \cdot A/2$$

avec:

- $\sigma_{\theta}$  la contrainte tangentielle à la paroi du tunnel
- $\sigma_{cm}$  la résistance à la compression uniaxiale pour le massif rocheux
- $\sigma_x$  la contrainte in situ dans l'axe du tunnel
- A un paramètre de la roche fonction du frottement

### 3.3 Massifs rocheux poussants

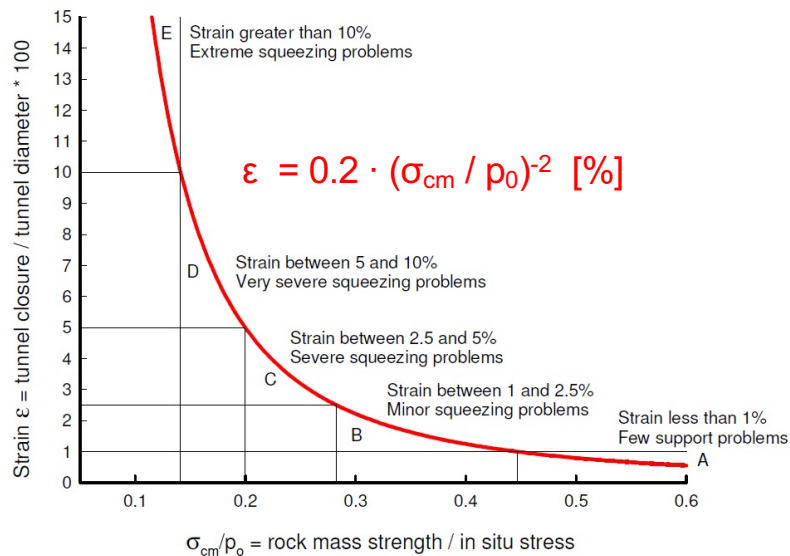


#### Estimation des conditions de contraction

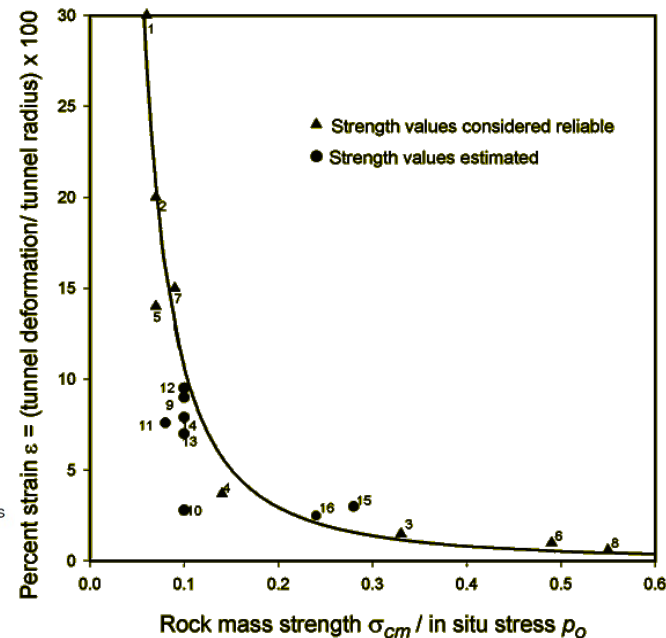
| Degré de Serrage     | $\sigma_{\theta} / \sigma_{cm}$ (ISRM) | $\sigma_{cm} / p_0$ (Hoek) |
|----------------------|----------------------------------------|----------------------------|
| Non poussant         | $< 1.0$                                | $> 0.35$                   |
| Légèrement poussant  | $1.0 - 2.0$                            | $0.2 - 0.35$               |
| Moyennement poussant | $2.0 - 4.0$                            | $0.15 - 0.2$               |
| Fortement poussant   | $> 4.0$                                | $< 0.15$                   |

Selon Hoek, le taux de convergence peut être corrélé avec le rapport entre la résistance à la compression uniaxiale du massif rocheux  $\sigma_{cm}$  et les contraintes in situ  $p_0$ . La contraction se produit lorsque ce facteur est inférieur à 0.35 (Hoek 2000).

# 3.3 Massifs rocheux poussants



Courbe de prédiction des massifs rocheux poussants pour différents rapports résistance / contrainte in situ (Hoek 2000)



Exemples de cas de tunnels poussants comparés avec la courbe de prédiction (Hoek 2000)