

Mécanique des roches appliquée aux ouvrages souterrains

Méthodes spécifiques d'analyse

ENPC - COTUN

Intervenants : Fabien BINET, Julian MARLINGE
(BE TERRASOL, groupe SETEC)

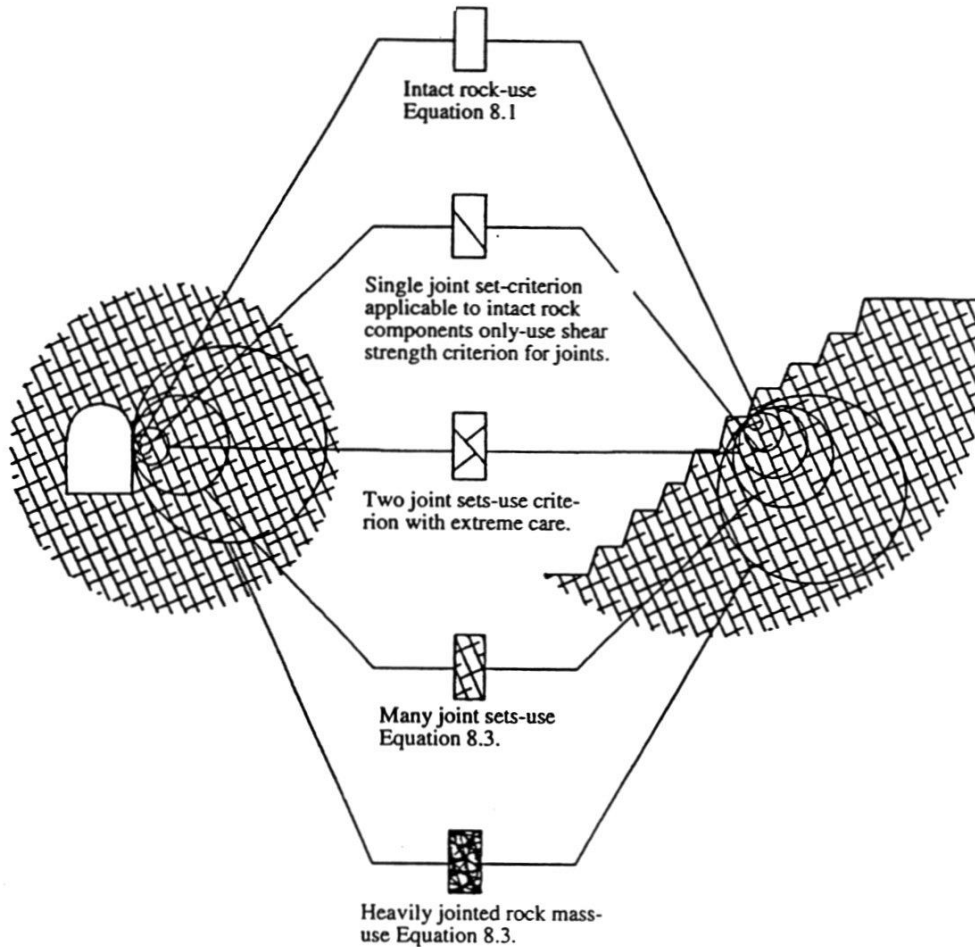


École des Ponts
ParisTech



- p.1 **Le comportement d'un massif rocheux**
- p.2 **Les discontinuités**
- p.3 **Stabilité des blocs et dièdres – Boulonnage**
- p.4 **Caractéristiques mécaniques du massif rocheux**

1\ Le Comportement d'un massif rocheux



- Combinaison Matrice / Discontinuités
- Comportement variable selon les échelles
- Caractérisation du comportement de la matrice
- Caractérisation du comportement des discontinuités
- Description globale du massif rocheux : indices RMR, GSI ...

p.1 **Le comportement d'un massif rocheux**

p.2 **Les discontinuités**

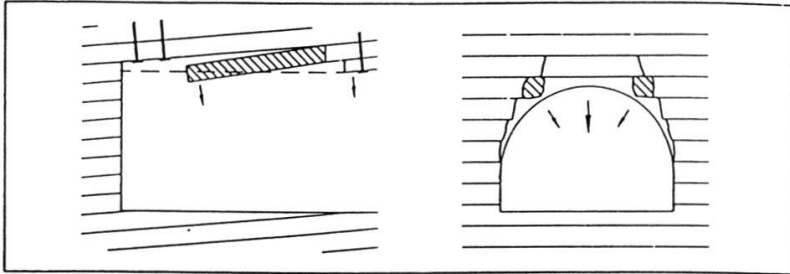
2.1 Discontinuités et schémas de rupture

2.2 Caractérisation des discontinuités

2.3 Comportement mécaniques des discontinuités

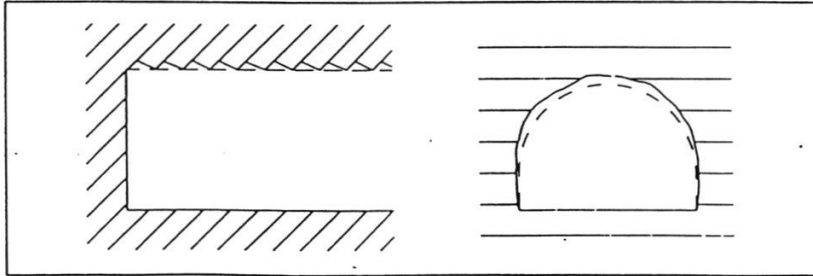
p.3 **Stabilité des blocs et dièdres – Boulonnage**

p.4 **Caractéristiques mécaniques du massif rocheux**



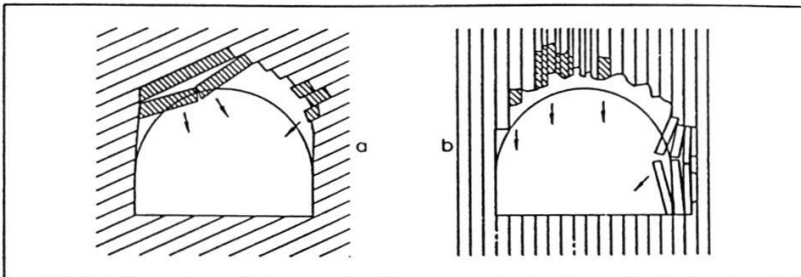
1 - Pendage subhorizontal : hors-profils et risques d'effondrement de la voûte (boulonnage)

Pendage subhorizontal



3 - Galerie en travers-bancs : d'autant moins de hors-profils que le pendage est plus proche de la verticale

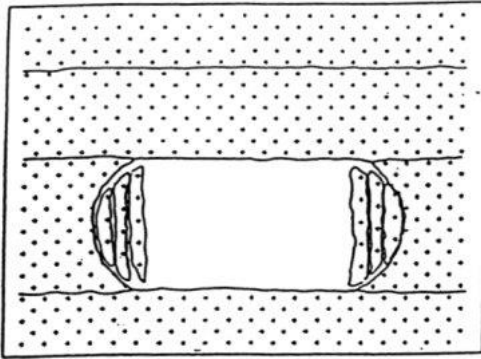
Galerie en travers-bancs



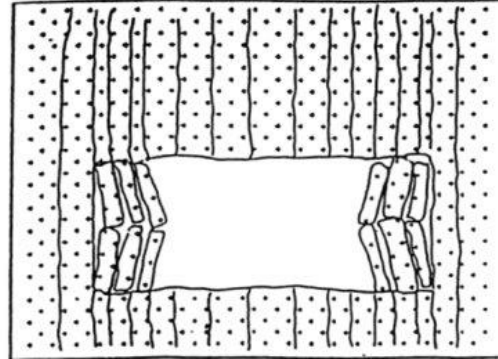
2 - Galerie en direction : a) pendage oblique b) pendage vertical
- hors-profils importants
- flexion des couches minées tangentes à la paroi (boulonnage)
- risque d'effondrement de panneaux importants dans le cas de pendage vertical

Galerie en direction

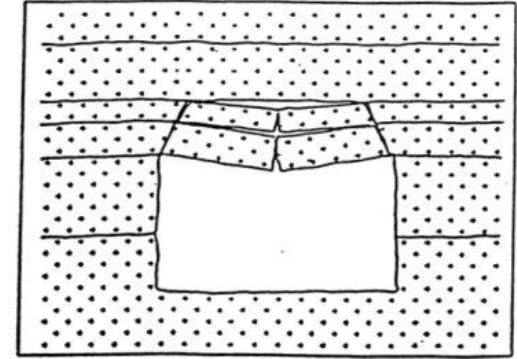
Rupture par Défaut de résistance



Excès de compression sur les parements

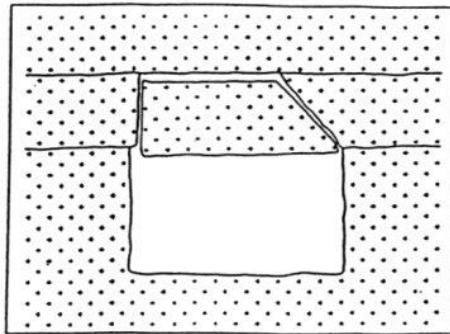


Flambage des parements

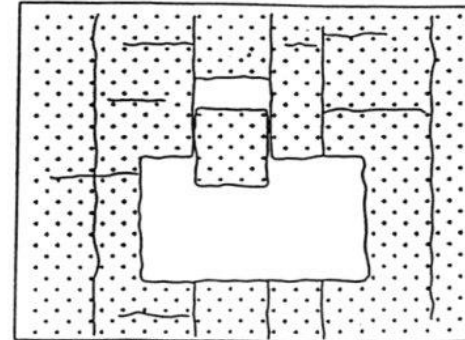


Flexion ou flambage

Rupture le long des discontinuités



Chute libre



Rupture en tiroir

Rupture en terrain fissuré

Rupture en voûte (fontis)

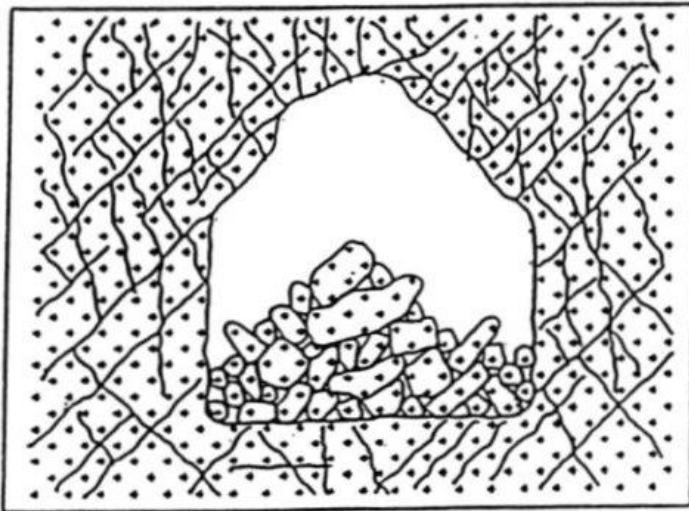
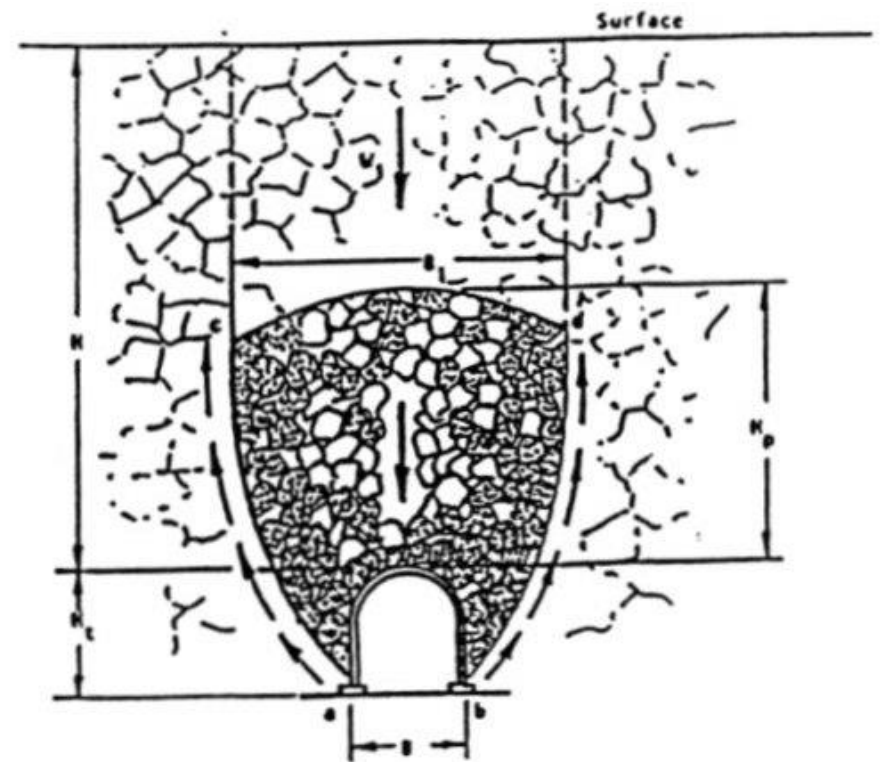


Schéma simplifié des déformations de terrains : « charge active » en voûte



- **Etudes des familles de discontinuités :**
 - *Définition - Famille de discontinuité : ensemble d'individus de caractéristiques similaires*
 - Etude dans la zone de l'ouvrage, en intégrant son l'échelle
 - Analyses statistiques des paramètres représentatifs :
 - Variabilité naturelle des paramètres géométriques
 - Variabilité des paramètres mécaniques
 - Description des familles représentatives de la fracturation du massif rocheux

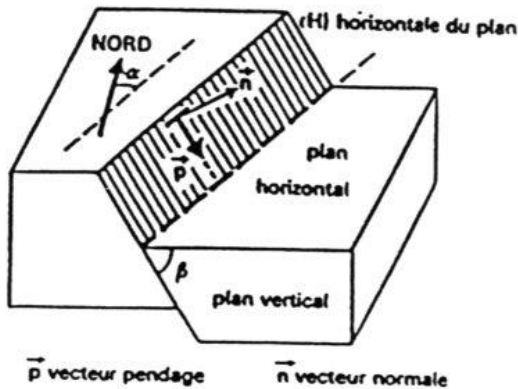
- **Les types de discontinuités :**

- **les plans de stratification** : entre strates dans les massifs sédimentaires. Leur extension peut être très grande
- **les contacts lithologiques** : Entre deux matériaux différents.
- **les plans de schistosité** : Débit des roches en feuillets parallèles. Origine liées aux contraintes tectoniques. Extension est plus ou moins grande
- **les diaclases** : discontinuités séparant deux compartiments sans mouvement relatif. Elles peuvent s'organiser en familles directionnelles
- **les failles** : mouvement relatif entre les deux compartiments : faille normale, inverse et de décrochement fonction du champ de contrainte. Leur extension est très variable (métrique à pluri-kilométrique)
- **les couloirs de fracturation** : Assemblage de petites discontinuités de faible extension et d'orientations variées formant une structure continue

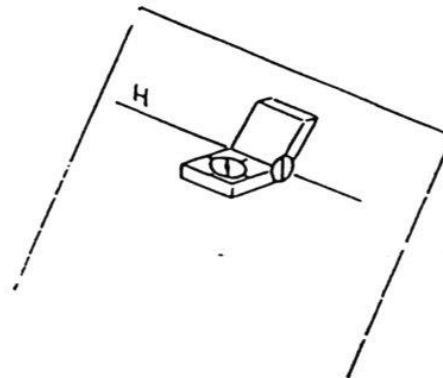
- Organisation des discontinuités en familles :



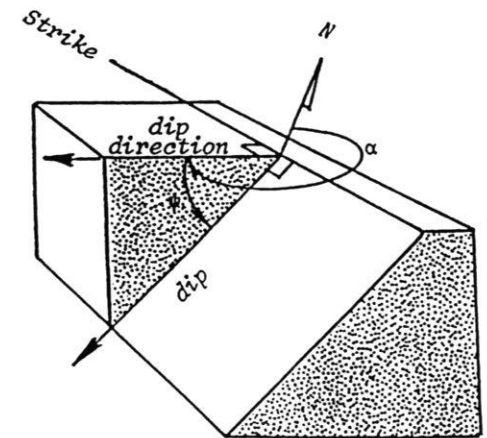
- Organisation des discontinuités en familles :
 - Résultent de phénomènes géologiques et tectonique
 - Diagenèse
 - Métamorphisme
 - Tectonique compressive
 - Tectonique distensive
 - Mesures systématiques : Azimut et pendage



Vecteur pendage / Vecteur normale



*Mesure de la direction et du pendage
(convention internationale)*



*Vecteur pendage
(convention alternative)*

- **8 paramètres caractérisent les discontinuités**
 - **orientation** : Position du plan de la discontinuité dans l'espace. Permet le classement en familles directionnelles.
 - **espacement** : distance entre deux discontinuités les plus proches d'une même famille mesurée perpendiculairement à celles-ci.
 - **extension** : L'extension ou taille des discontinuités correspond à la surface totale de la discontinuité dans l'espace.
 - **rugosité et ondulation de la surface de discontinuité** : A toutes les échelles, ces paramètres contrôlent la résistance au cisaillement de la discontinuité et la mobilisation ou non du phénomène de dilatance ;
 - **altération des épontes** : Agit sur la déformabilité, sur la possibilité de mobiliser de la dilatance et donc sur la résistance au cisaillement.
 - **ouverture** : distance entre épontes comptée perpendiculairement au plan de discontinuité ;
 - **remplissage**
 - **présence d'eau**

- **Précautions spécifiques aux mesures**

- Les mesures de terrain subissent de nombreux biais
 - Influence de l'opérateur
 - Possibilités d'observation réduites
 - Représentativité des observations faites / position du projet



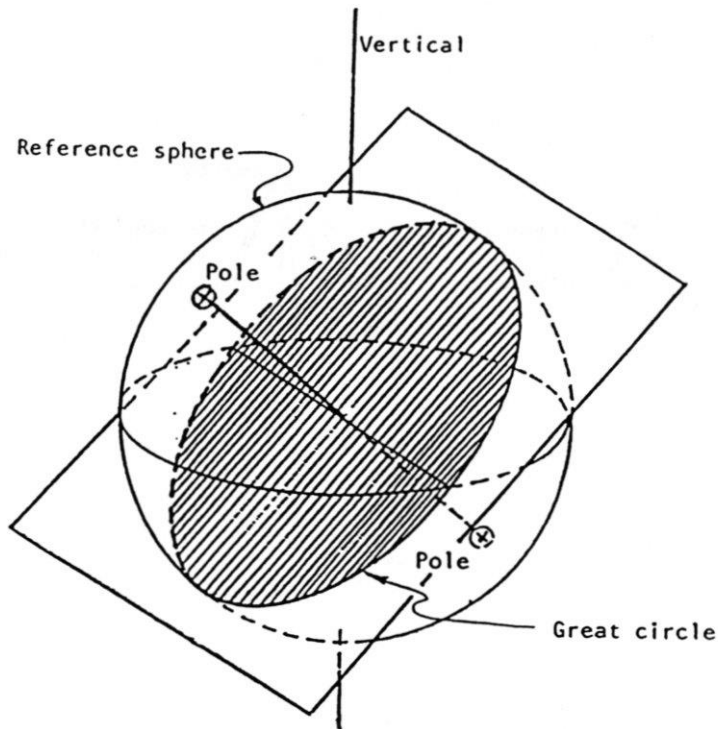
- **Précautions spécifiques aux mesures**

- Les mesures de terrain subissent de nombreux biais
 - Influence de l'opérateur
 - Possibilités d'observation réduites
 - Représentativité des observations faites / position du projet

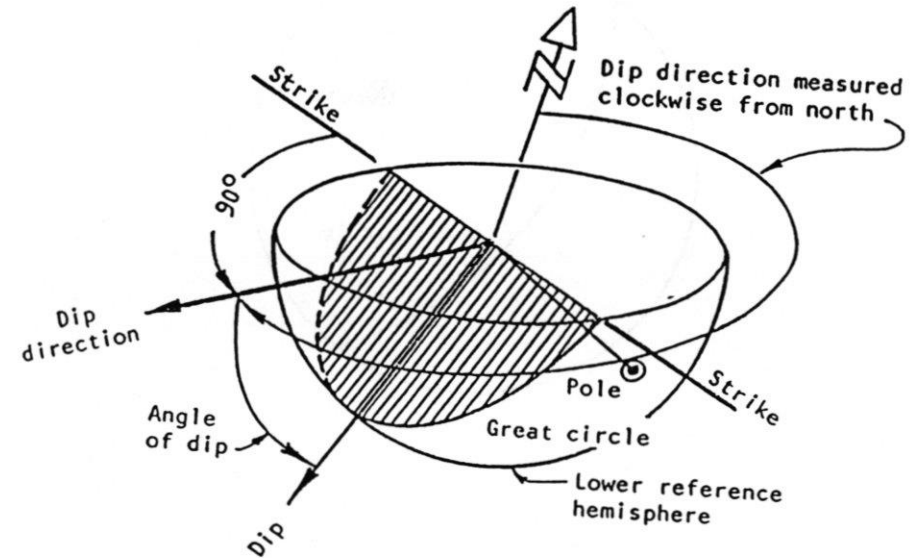
- Pour limiter les biais de mesure
 - Mesures selon plusieurs directions de l'espace
 - Mesure sur un volume suffisant par rapport à la densité moyenne de fracturation du massif
 - Approche statistique
 - Description de la méthode d'acquisition utilisée

• Méthode de représentation des discontinuités

- Projection polaire

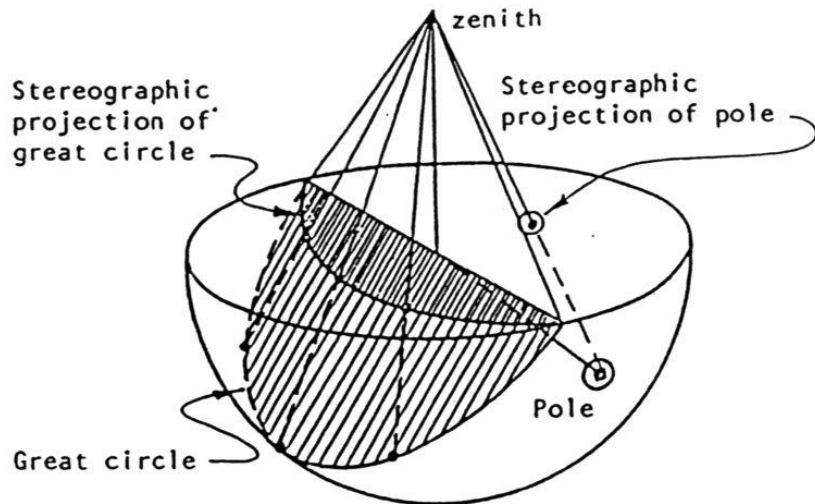


Intersection sphère / plan

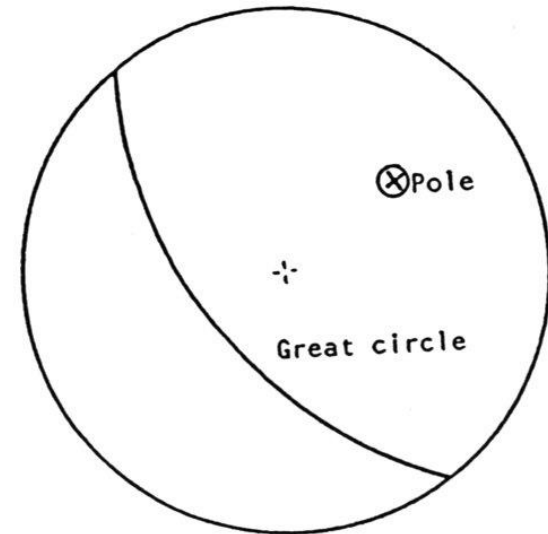


Demi sphère inférieure

- Méthode de représentation des discontinuités

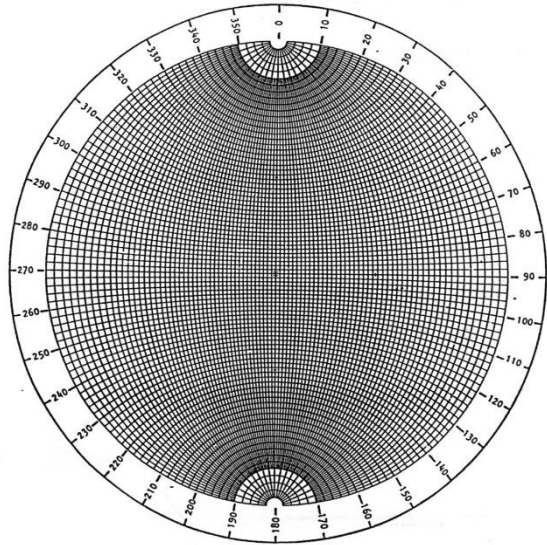


Projection par rapport au zenith

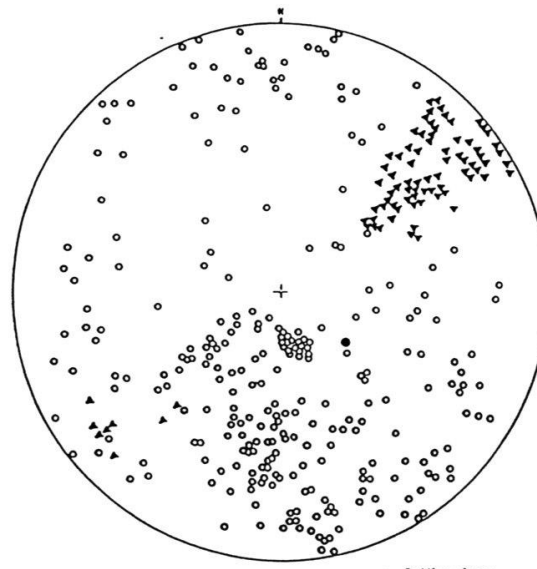


Représentation cyclographique
et polaire

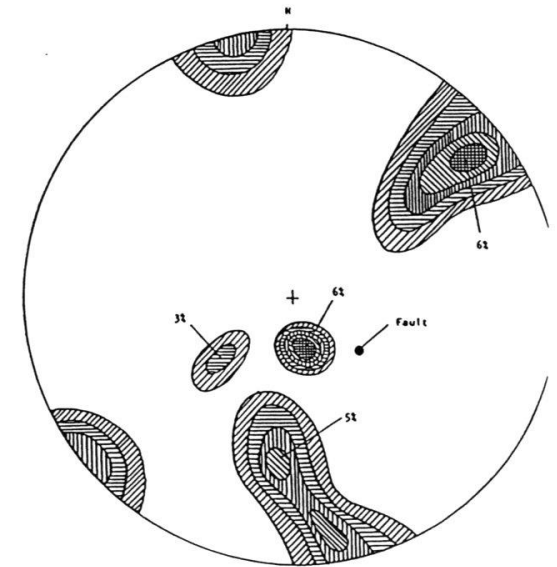
- Notion de familles et analyse statistique



Canevas de Wulff



Représentation polaire
par famille

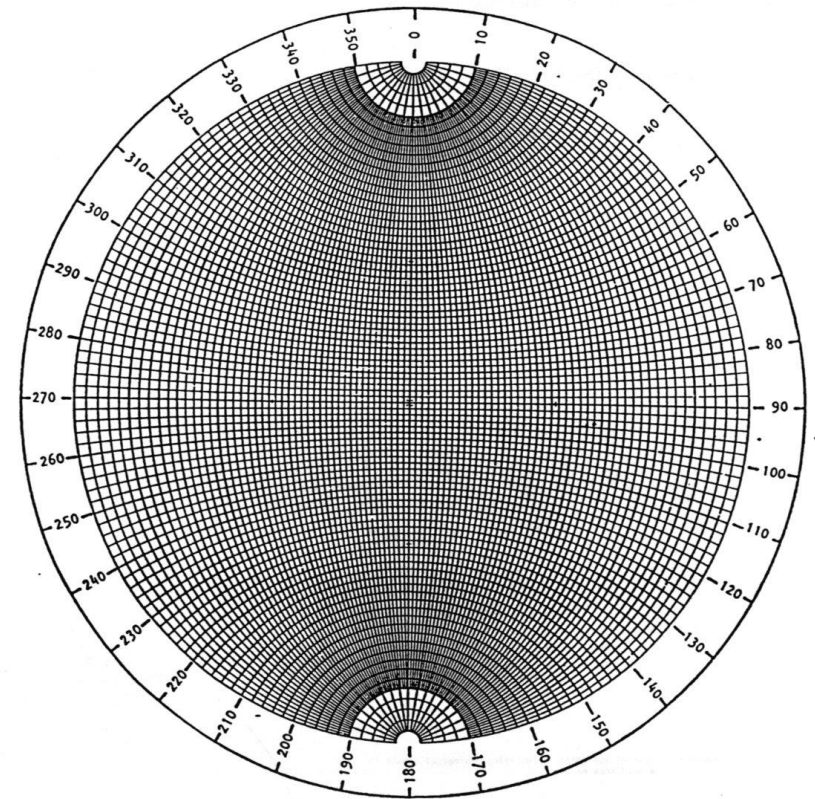


Courbes isodensité

Application :

Canevas de Wulff - Représentation des familles suivantes :

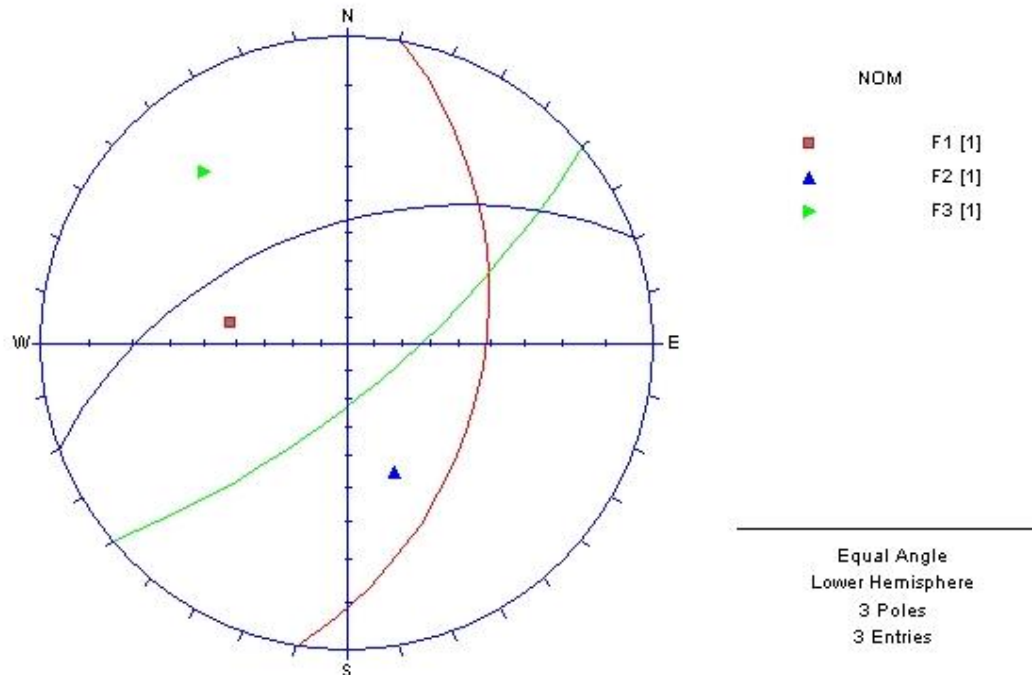
- *Famille F1 : N 10 E 42 E*
- *Famille F2 : N 70 E 48 N*
- *Famille F3 : N 50 E 72 SE*
- *Talus : N 140 E 45 NE*



Application :

Canevas de Wulff - Représentation des familles suivantes :

- *Famille F1 : N 10 E 42 E*
- *Famille F2 : N 70 E 48 N*
- *Famille F3 : N 50 E 72 SE*
- *Talus : N 140 E 45 NE*

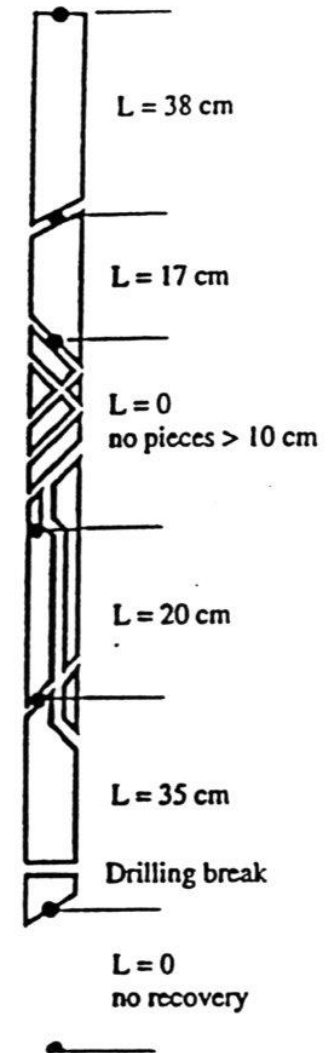


2\ Discontinuités \ 2.2 – Caractérisation



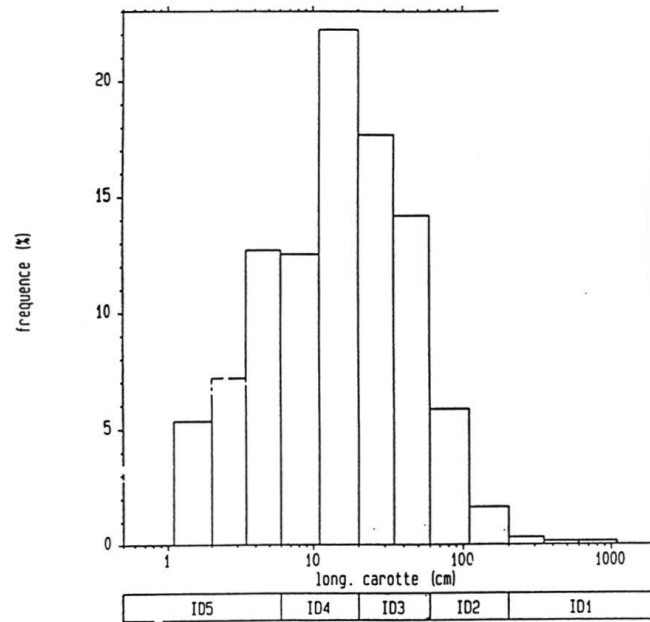
Analyse statistique

- Orientation des familles de discontinuité
- Extension des familles
- Analyse de l'espacement des discontinuités :
 - **Diagramme intégral de carottage**
 - Indice RQD (Rock Quality Designation)
 - Fréquence des discontinuités : FD
FD = nombre de discontinuité par mètre



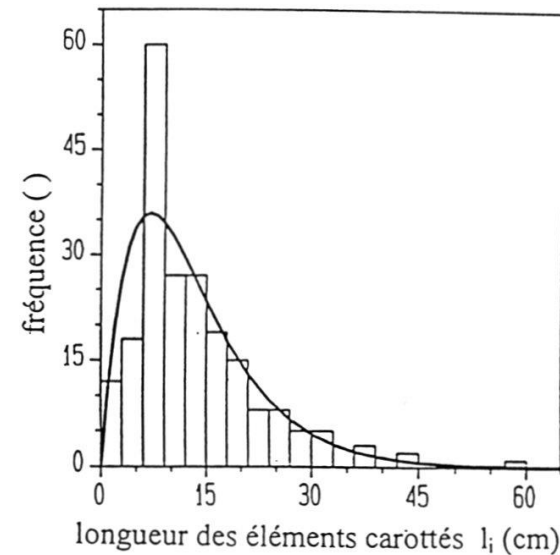
Analyse statistique :

Analyse de l'espacement des discontinuités (Représentation)



Histogramme des longueurs des éléments d'un sondage carotté dans des calcaires :
 nombre total d'éléments 1197 longueur carottée 158 m
 nombre d'éléments ($e_i > 1$ cm) 599 longueur maximale 7,17 m
 moyenne des longueurs 25,4 cm ($\lambda = 0,0411$)
 écart-type 42,3 cm
 classification: ID3(4) fracturation moyenne à forte

Histogramme des longueurs de carottes (loi normale)

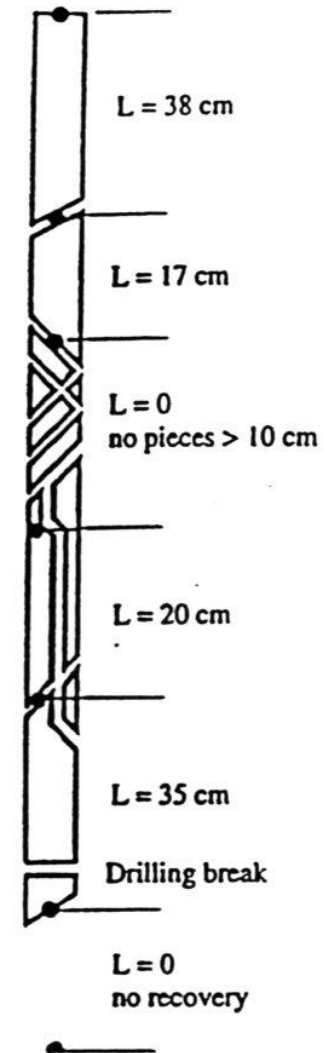


Histogramme des longueurs des éléments carottés dans un massif calcaire, sans prise en compte des petits éléments (présents sur 1,85 m au total).
 Longueur du sondage 30 m, nombre d'éléments 213, --
 longueur maximale 58 cm, longueur moyenne 13,2 cm,
 écart-type des longueurs 9,1 cm.
 Distribution gamma avec $\alpha = 1,13$ et $\beta = 6,21$.

Histogramme des longueurs de carottes (loi log-Normale)

Analyse statistique

- Orientation des familles de discontinuité
- Extension des familles
- Analyse de l'espacement des discontinuités
 - Diagramme intégral de carottage
 - **Indice RQD (Rock Quality Designation)**
 - Fréquence des discontinuités : FD
FD = nombre de discontinuité par mètre



RQD = (Σ éléments de carottes > 10 cm/mètre foré) x 100

Indice global de densité de facturation.

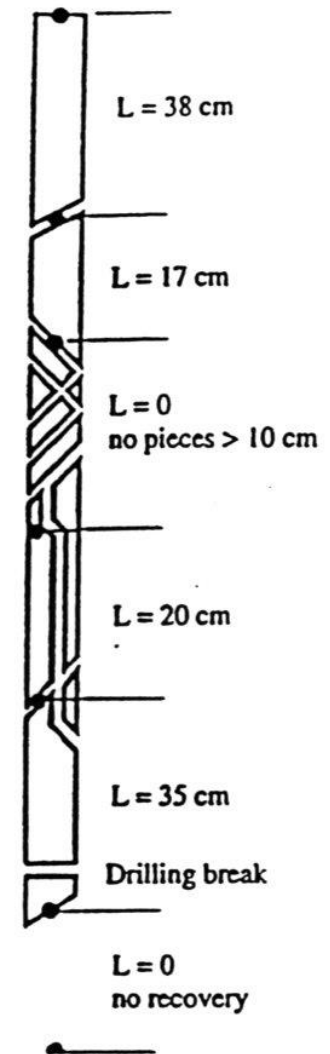
Certaines conditions sont à respecter, relatives :

- Au diamètre des carottes
- A la mesure des longueurs des éléments au niveau de l'axe
- A l'indice de récupération compris entre 90 % et 100 %
- A la prise en compte uniquement des discontinuités naturelles
- A l'exclusion des discontinuités sub-parallèles à l'axe de la carotte
- A l'établissement du RQD dès (ou rapidement après) la sortie du carottier, afin de s'affranchir d'une éventuelle évolution du matériau par gonflement, libération de contraintes, dessiccation...

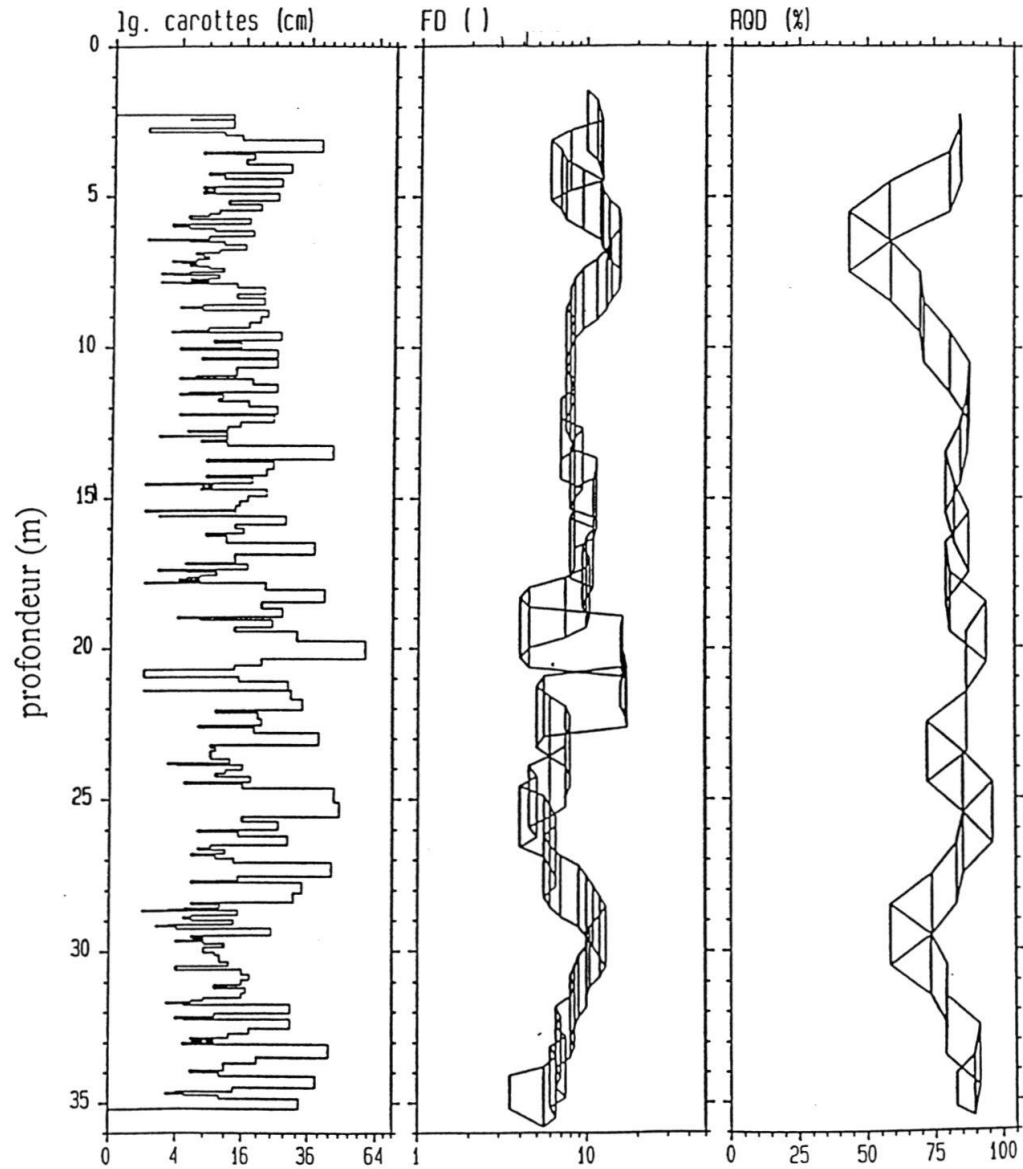
RQD (%)	QUALITE GLOBALE DU MASSIF ROCHEUX (D'après D. Deere)
90 à 100	Excellente
75 à 90	Bonne
50 à 75	Moyenne
25 à 50	Mauvaise
0 à 25	Très mauvaise

Analyse statistique

- Orientation des familles de discontinuité
- Extension des familles
- Analyse de l'espacement des discontinuités
 - Diagramme intégral de carottage
 - Indice RQD (Rock Quality Designation)
 - **Fréquence des discontinuités : FD**
FD = nombre de discontinuité par mètre



2\ Discontinuités \ 2.2 – Caractérisation

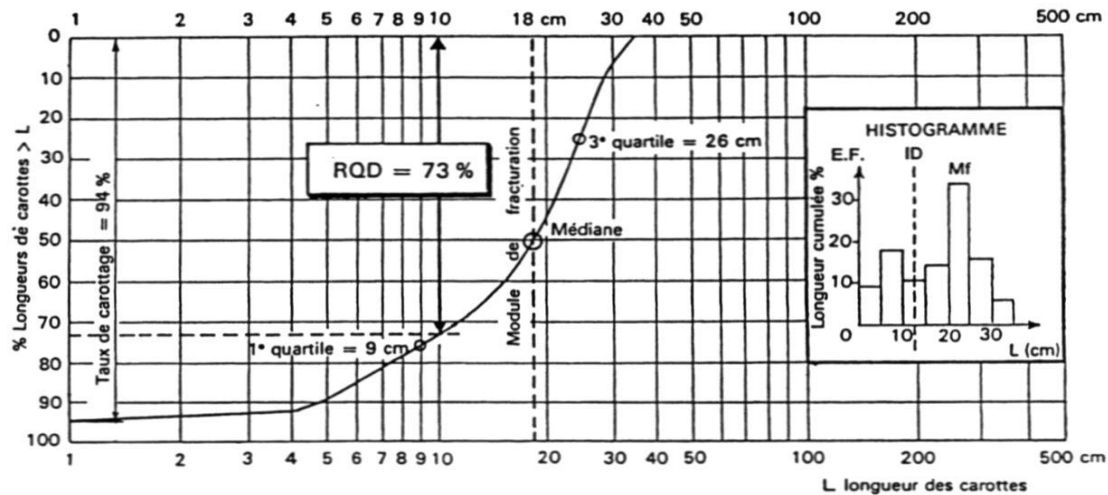


ID = intervalle moyen entre discontinuités

Indice global de densité de facturation

INDICE ID D'INTERVALLE ENTRE DISCONTINUITES	TERMES DESCRIPTIFS DE LA DENSITE DE DISCONTINUITES
> 200 cm	Densité de discontinuités très faible
60-200 cm	Densité de discontinuités faible
20-60 cm	Densité de discontinuités moyenne
6-20 cm	Densité de discontinuités forte
<6 cm	Densité de discontinuités très forte

Courbe « granulométrique » de carotte



Histogramme et courbe cumulative des longueurs de carottes dans un sondage (d'après C. Louis, 1974)

Paramètres essentiels :

- Résistance au cisaillement
 - Angles de frottement de pic et résiduel
 - Cohésion apparente.
- Déformabilité :
 - Rigidité normale
 - Rigidité tangentielle
- Un paramètre "géométrique" :
 - la dilataance : Variation de déformation normale qui accompagne la déformation tangentielle lors d'un cisaillement

Résistance au cisaillement :

La résistance au cisaillement est fonction, entre autres :

- du frottement des épontes,
- de la rugosité des épontes,
- de leur degré d'imbrication
- et de leur altération..

Discontinuité plane et lisse a un comportement régi par :

- le frottement des épontes avec un critère de Coulomb

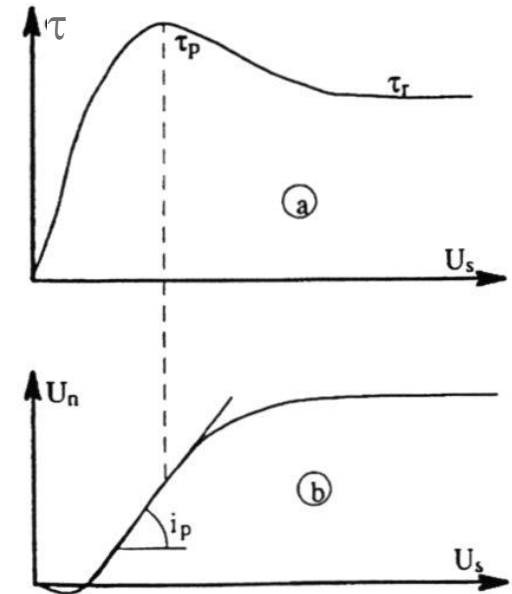
$$\tau = \sigma_n \cdot \text{tg} \phi_b$$

où ϕ_b est l'angle de frottement de base, fonction de la nature minéralogique et du degré d'altération des épontes)

Résistance au cisaillement :

3 paramètres fondamentaux régissant le comportement au cisaillement :

- **la résistance de pic**, définie par la contrainte de cisaillement maximum (τ_p), correspond au cisaillement des aspérités ;
- **la résistance résiduelle** (τ_r) caractéristique du frottement des épontes en contact après rupture des aspérités ;
- **la dilatance** caractérisée par l'angle de dilatance i (angle de la pente de la courbe de dilatance donnant le déplacement normal U_n en fonction du déplacement tangentiel U_s). Cet angle présente un maximum i_p au point d'inflexion de la courbe de dilatance



Résistance au cisaillement :

Approche empirique de BARTON (1973) :

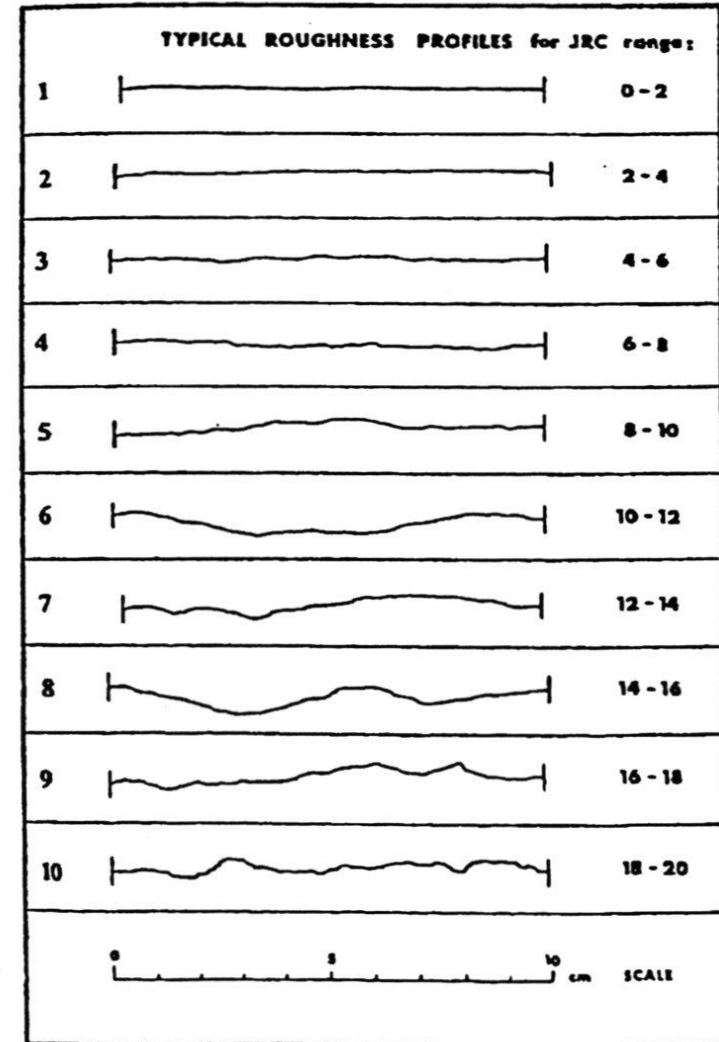
$$\tau_{pic} = \sigma_n \cdot \text{tg}(\phi_b + i) = \sigma_n \cdot \text{tg}(\phi_b + JRC \cdot \log_{10} \frac{JCS}{\sigma_n})$$

ϕ_b : angle de frottement de base, qui diffère de quelques degrés de l'angle de frottement résiduel ϕ_r

JRC : « Joint Roughness Coefficient » : morphologie du joint

JCS : « Joint Compressive Strength » : résistance en compression simple des épontes ; elle est souvent estimée indirectement in situ au moyen d'un scléromètre

σ_n : contrainte normale appliquée sur la discontinuité



Déformabilité :

Rigidité normale :

- La pente de la courbe donne la rigidité normale K_n qui est définie par la relation :

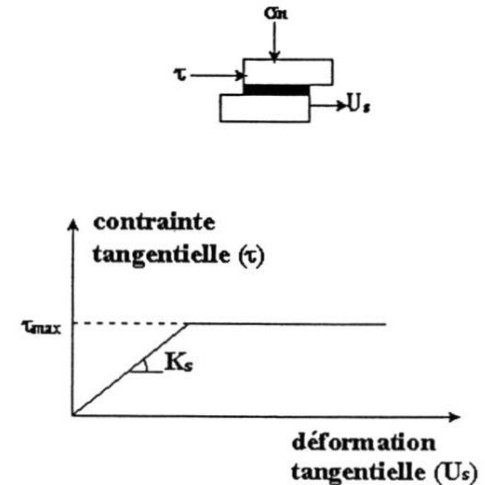
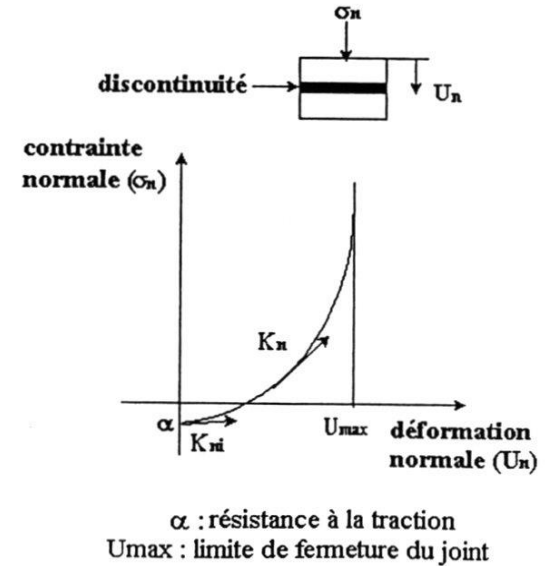
$$K_n = \frac{\delta\sigma_n}{\delta U_n}$$

- La valeur de K_n dépend de la contrainte normale

Rigidité tangentielle :

- La pente de la courbe donne la rigidité normale K_n qui est définie par la relation :

$$K_s = \frac{\delta\tau}{\delta U_s}$$



p.1 **Le comportement d'un massif rocheux**

p.2 **Les discontinuités**

p.3 **Stabilité des blocs et dièdres – Boulonnage**

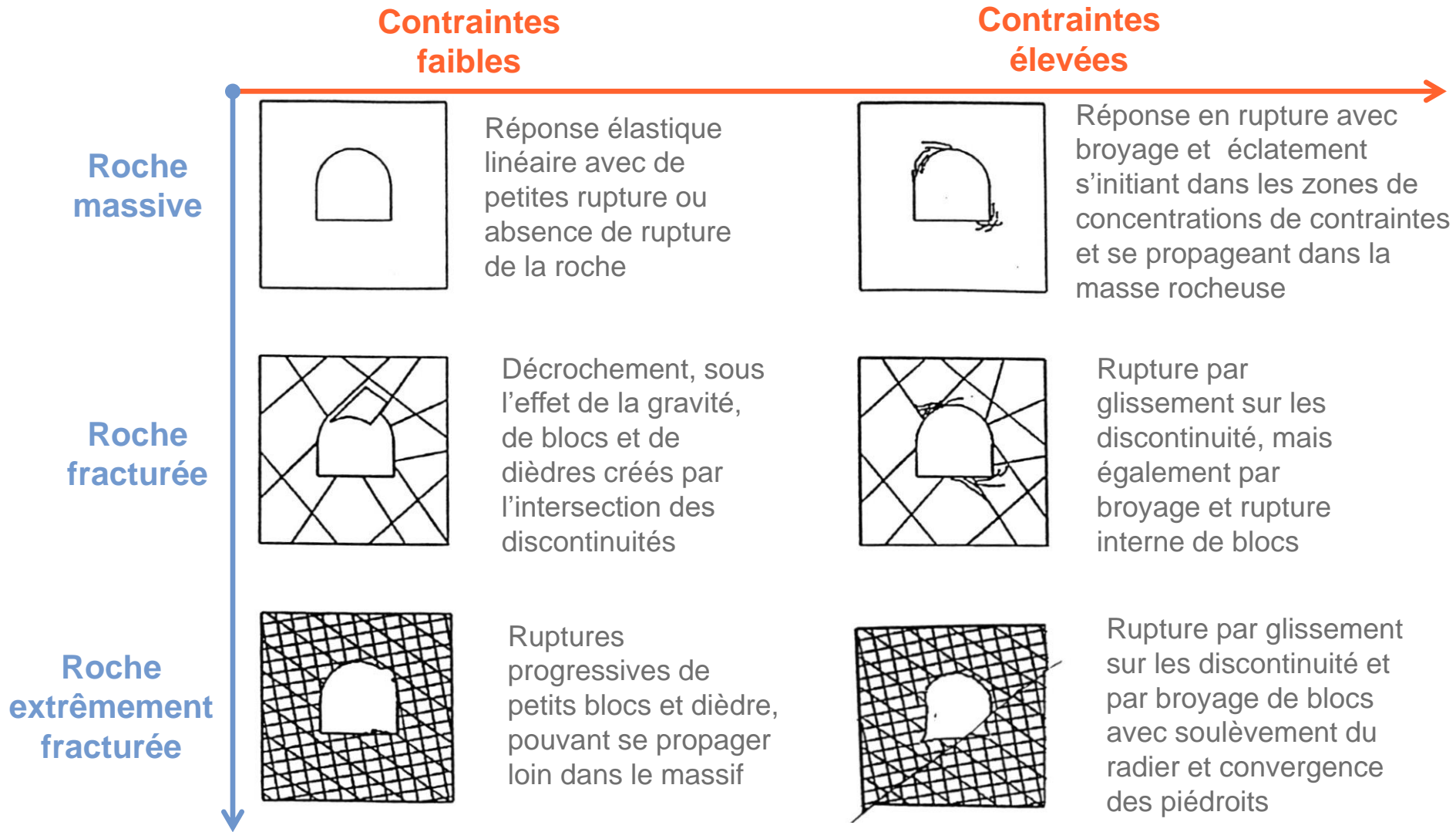
3.1 Fracturation, Stabilité et Boulonnage

3.2 Types de boulon utilisés

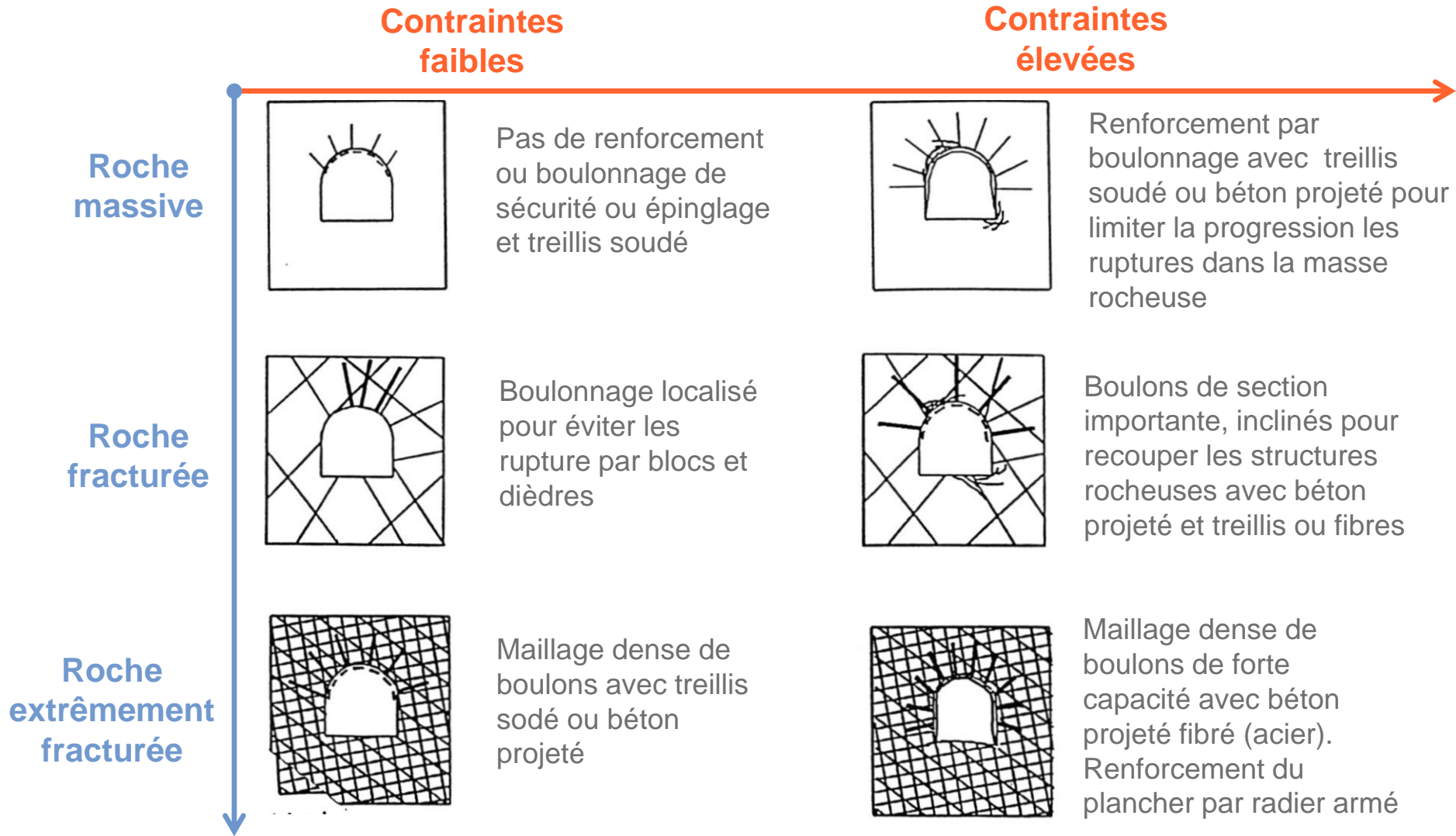
3.3 Principes de dimensionnement du boulonnage

p.4 **Caractéristiques mécaniques du massif rocheux**

Densité de fracture et niveau de contrainte



Densité de fracture et niveau de contrainte



Soutènement par boulonnage : sections en tunnel

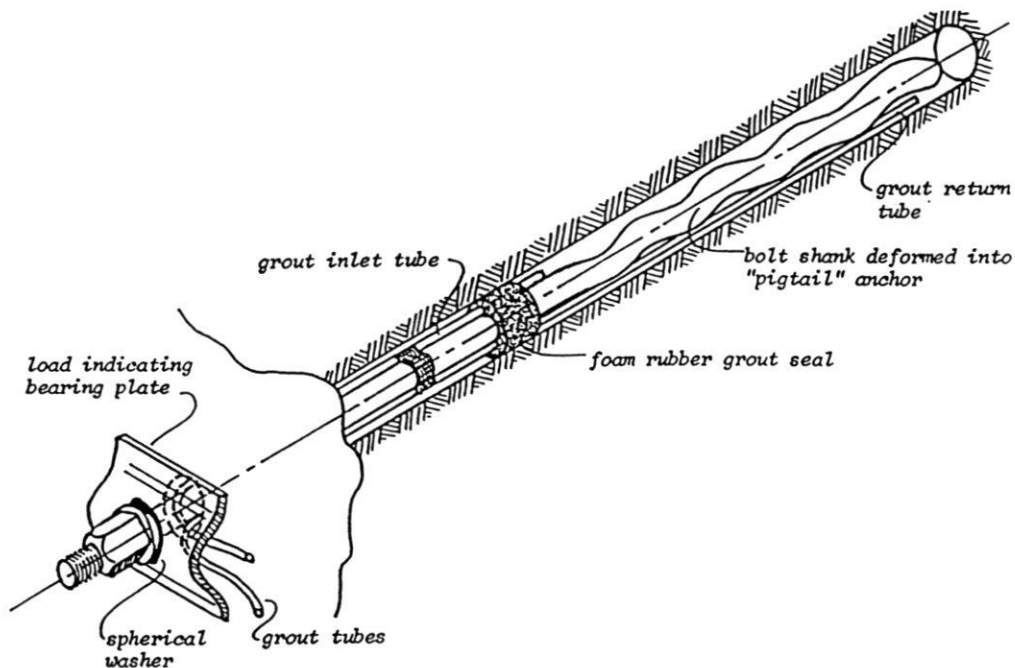


Soutènement par boulonnage : renforcement des tympans



Boulons scellés au terrain :

1. Boulons scellés au coulis



Avantages :

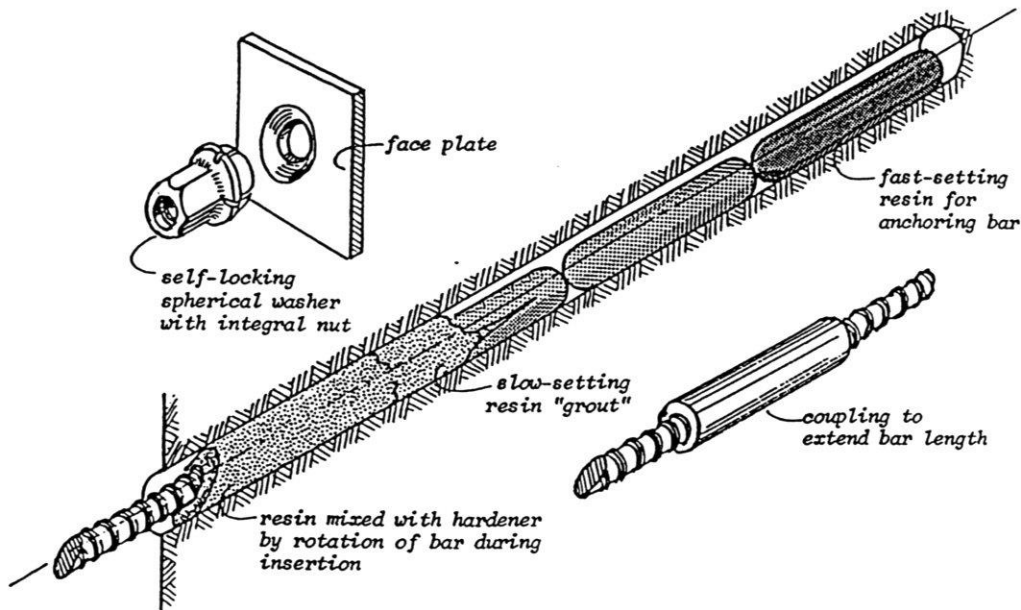
- Nombreux modèles
- Avantage du scellement au coulis dans les mauvais terrains
- Injection de coulis mais possibilité de mortier sec et d'eau séparée
- Système peu coûteux applicable sur une large plage de conditions géotechniques.

Inconvénients :

- nécessité de bien travailler pour qu'ils soient efficaces
- délai d'attente pour la prise du coulis avant mise en tension

Boulons scellés au terrain :

2. Boulons scellés à la résine



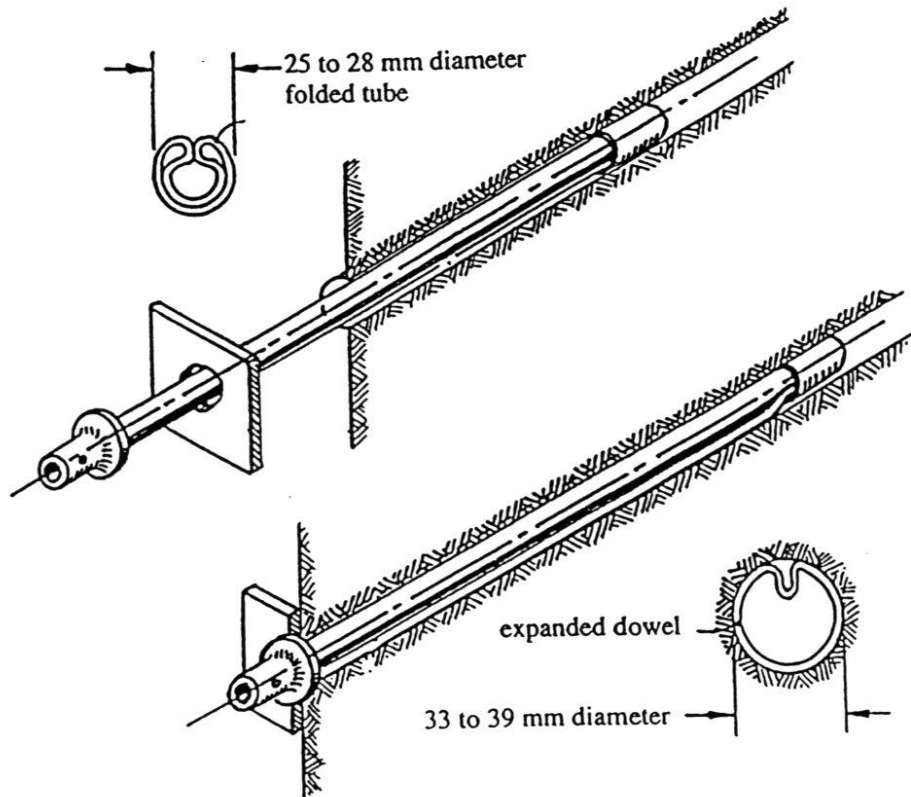
Avantages :

- facilité de mise en œuvre (résine conditionnée en cartouches)
- scellement de haute résistance dans les mauvais terrains
- mise en tension immédiate possible

Inconvénients :

- coût élevé

Boulons à friction (type swellex) :



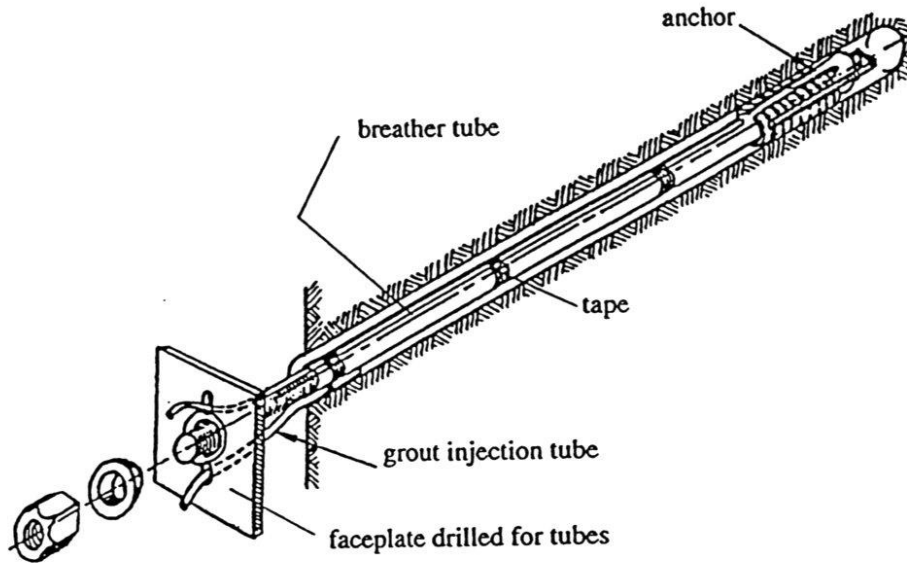
Avantages :

- Rapidité de mise en œuvre ;
- mise en tension immédiate possible

Inconvénients :

- résistance à l'arrachement variable (effet de l'irrégularité du trou de forage);
- Pérennité mal connue (utilisation uniquement en soutènement provisoire)

Boulons à ancrage en fond de trou:



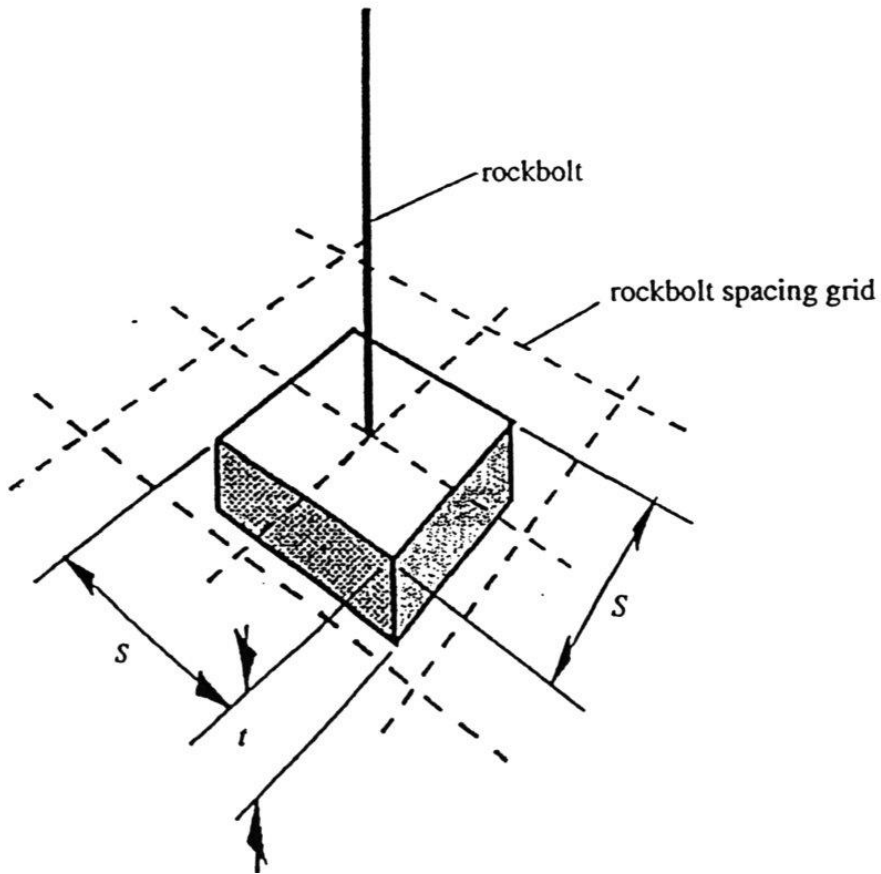
Avantages :

- Rapidité de mise en œuvre ;
- mise en tension immédiate possible

Inconvénients :

- Résistance d'ancrage limitée ;
- Fonction support assurée par la plaque d'appui ;

3\ Stabilité \ 3.3 – Principes de dimensionnement du boulonnage



Notations :

T : Epaisseur du bloc

S_1 et S_2 : largeur, longueur du bloc

γ : poids volumique de la roche

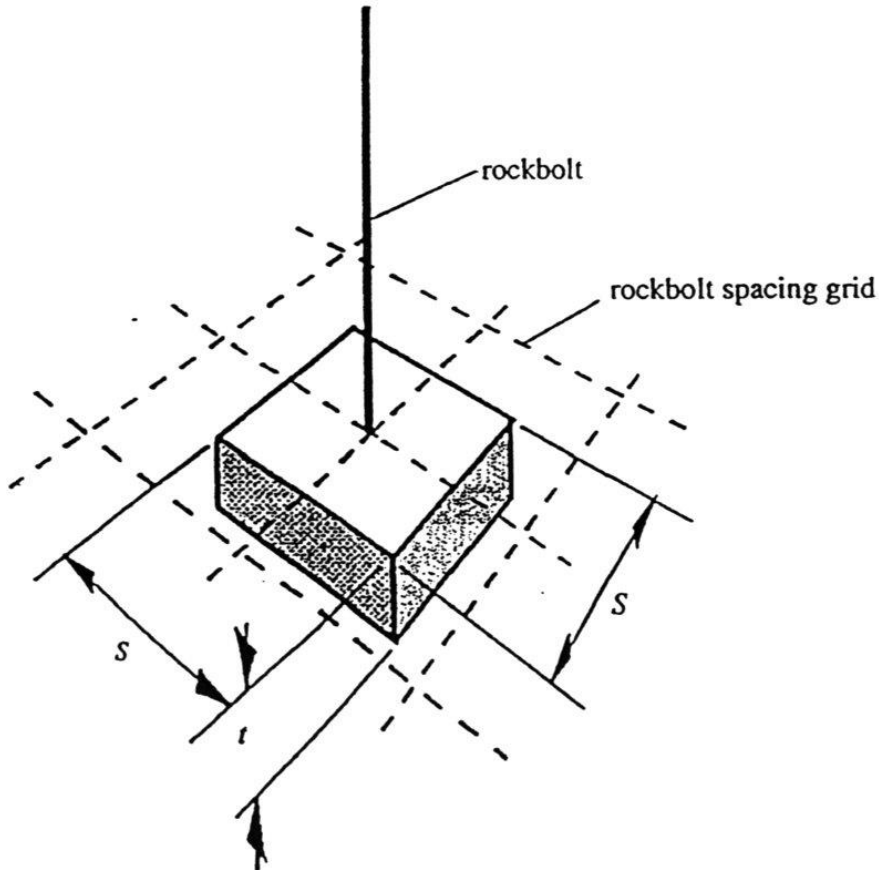
Principe de dimensionnement :

Cas idéalisé : 1 boulon par bloc instable

Poids du bloc $W = \gamma t s_1 s_2$

Capacité du boulon : $1,3 \cdot W$

Application :



Données de fracturation pour le massif :

Deux familles de fracture :

- F1 : N 45 E 90 Espacement : 1.5 m
- F2 : N 135 E 90 Espacement : 1.8 m

Stratigraphie subhorizontale d'espacement 0.8 m

Données mécaniques :

Poids volumique du rocher : $\gamma = 26 \text{ kN/m}^3$

Frottement coulis / roche (q_s) : 250 kPa

Sujet :

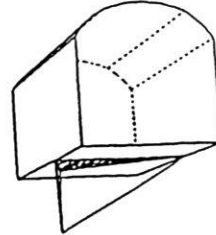
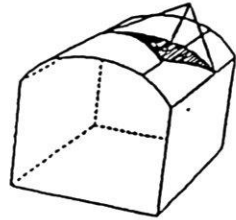
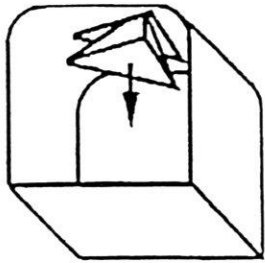
Question 1 : densité du boulonnage nécessaire ?

Question 2 : dimensionner les diamètre et longueur des boulons.

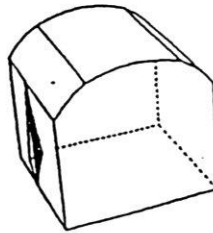
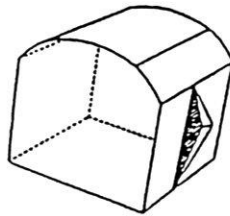
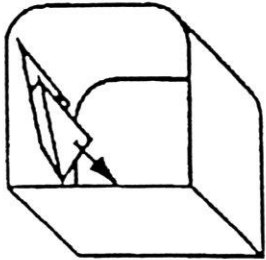
Rappel des notations :

T : Epaisseur du bloc

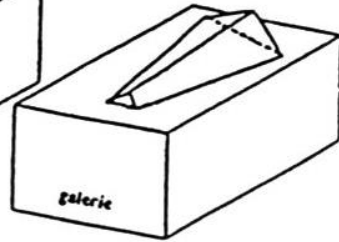
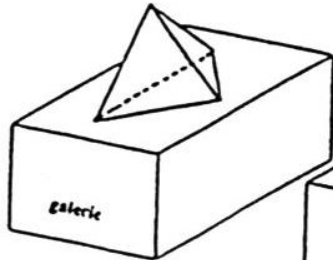
S_1 et S_2 : largeur, longueur du bloc



Chute de dièdre

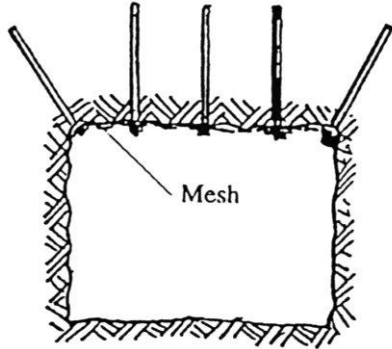


Glissement de dièdre

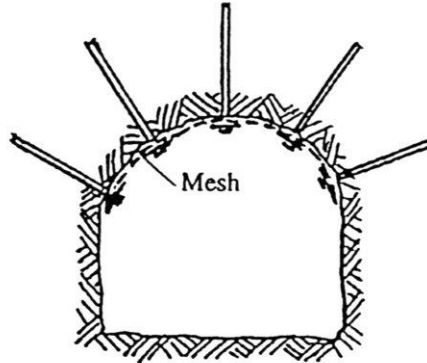


Formes usuelles de blocs

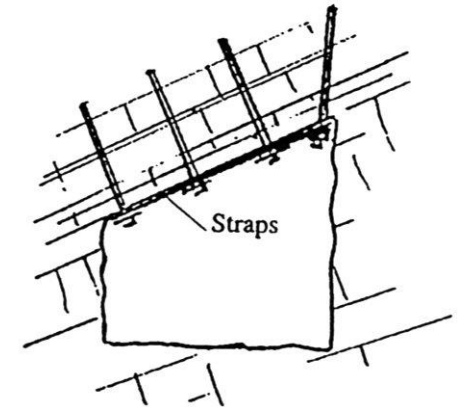
3\ Stabilité \ 3.3 – Principes de dimensionnement du boulonnage



Excavation classique rectangulaire



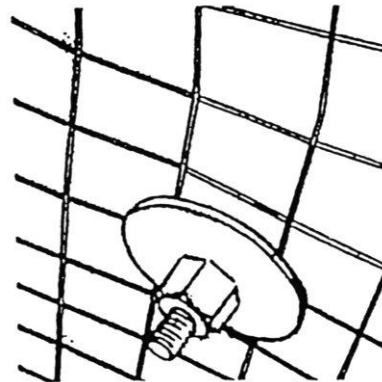
Excavation classique avec voûte



Géométrie conditionnée
par la structure du massif

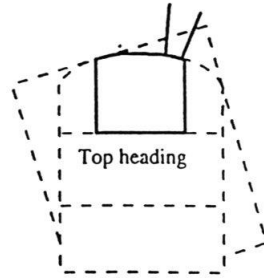
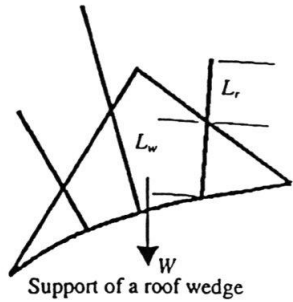


Renforcement avec grillage et
plaque d'appuis des boulons



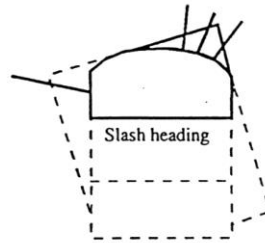
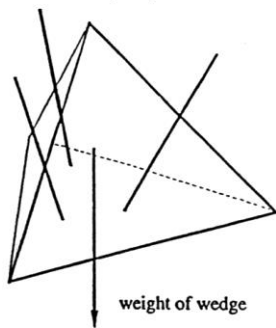
Renforcement avec treillis soudé dans la
géométrie et les dimensions le permettent

3\ Stabilité \ 3.3 – Principes de dimensionnement du boulonnage

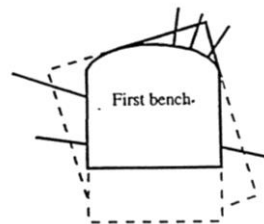
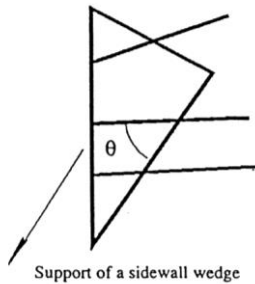


Première phase d'excavation :
chute de toit

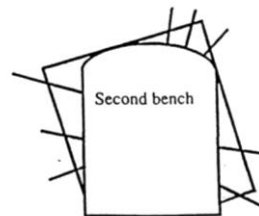
rockbolt capacity



Seconde phase d'excavation :
chute de toit et glissement en piédroit

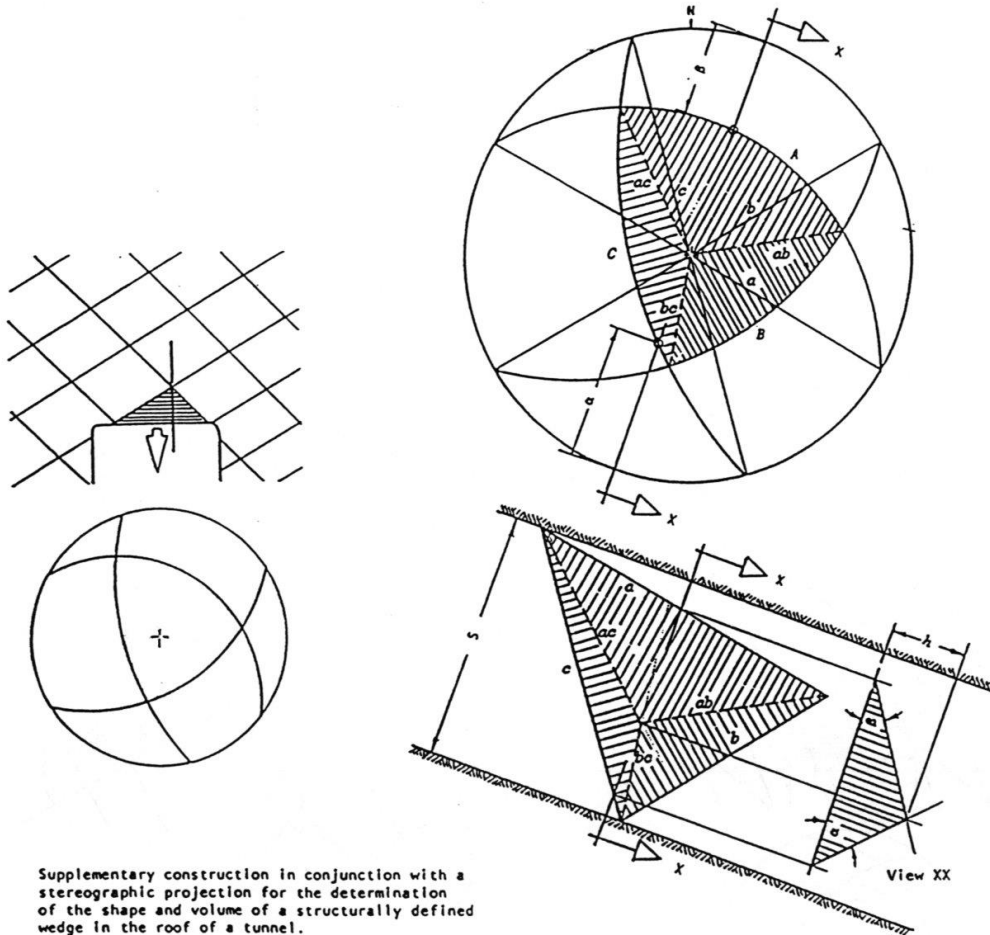


Phases d'excavation suivantes :
glissement en piédroits



Dièdres : effet des familles de fractures

Blocs potentiellement instables au toit d'une galerie : Chute libre (Hoek et Brown, 1980)

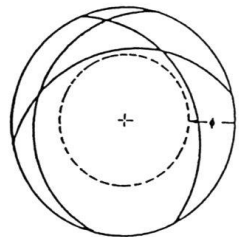


Stéréogramme de Wulff

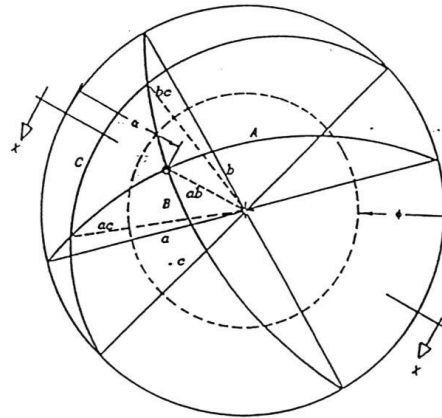
Vues en plan et en coupe

Dièdres : effet des familles de fractures

Blocs potentiellement instables au toit d'une galerie : glissement (Hoek et Brown, 1980)

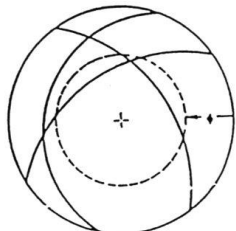
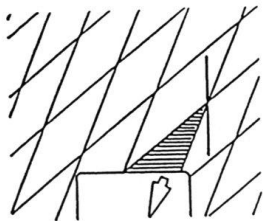


Stable wedge conditions

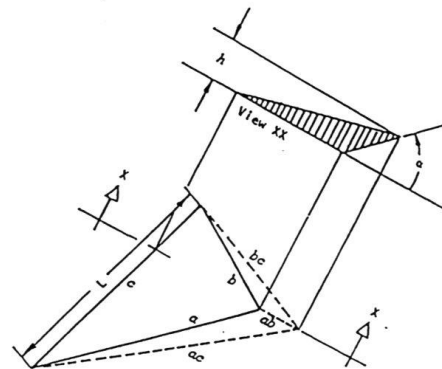


Glissement selon intersection des plans A et B

Angle phi : frottement sur les discontinuités



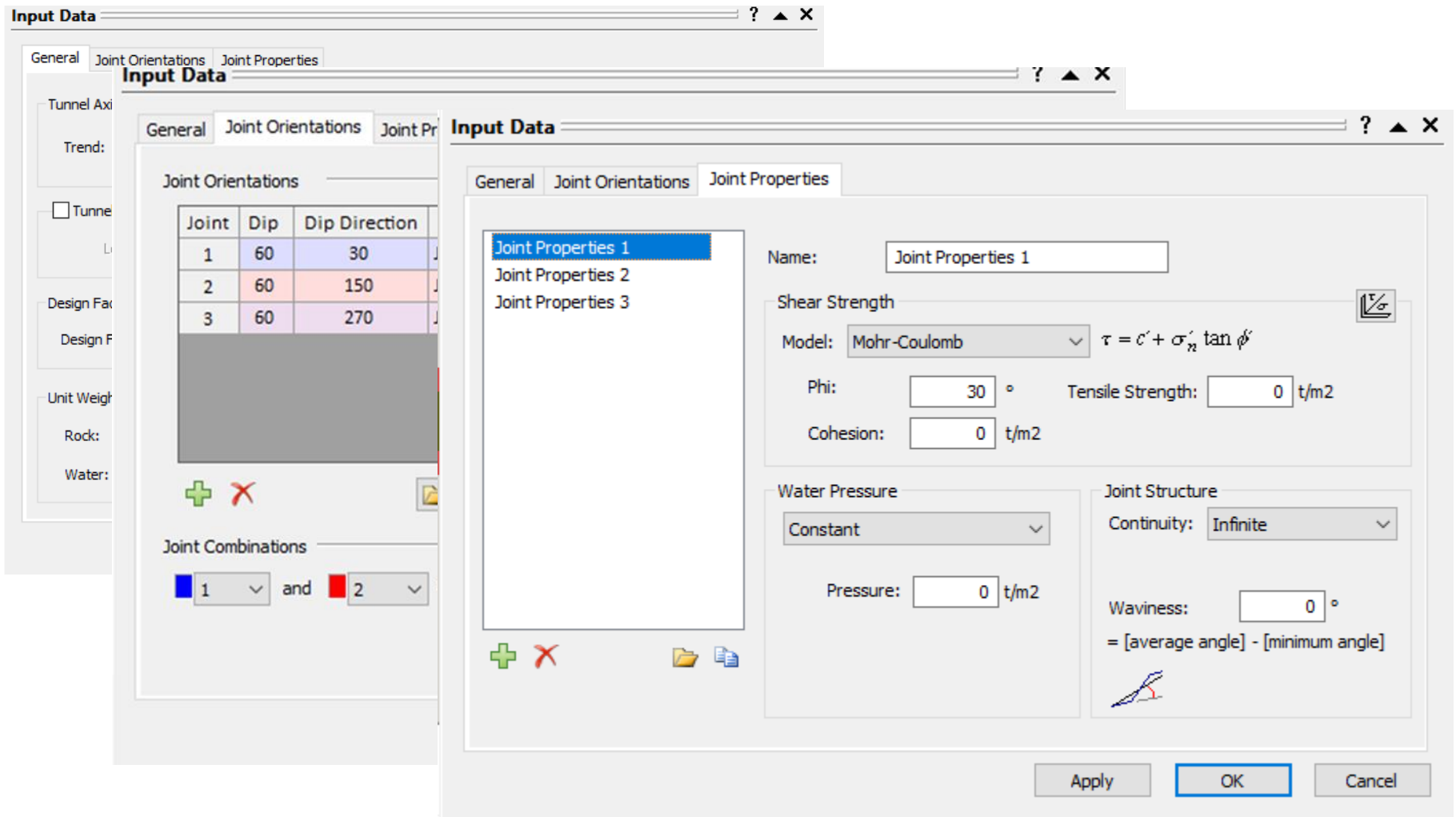
Conditions for sliding failure of roof wedges



Vues en plan et en coupe permettant de déterminer les volumes des blocs

Figure 89: Construction of true plan view and determination of the height of a wedge where failure takes place as a result of sliding along the line of intersection of planes A and B.

Exemple : codes de calcul (Unwedge®)



The screenshot displays the 'Input Data' dialog box in the Unwedge software, showing the configuration for joint orientations and properties.

Joint Orientations Table:

Joint	Dip	Dip Direction
1	60	30
2	60	150
3	60	270

Joint Properties 1 Configuration:

- Name: Joint Properties 1
- Shear Strength Model: Mohr-Coulomb ($\tau = c' + \sigma'_n \tan \phi'$)
- Phi: 30 °
- Tensile Strength: 0 t/m²
- Cohesion: 0 t/m²
- Water Pressure: Constant
- Pressure: 0 t/m²
- Joint Structure Continuity: Infinite
- Waviness: 0 °
- Waviness formula: = [average angle] - [minimum angle]

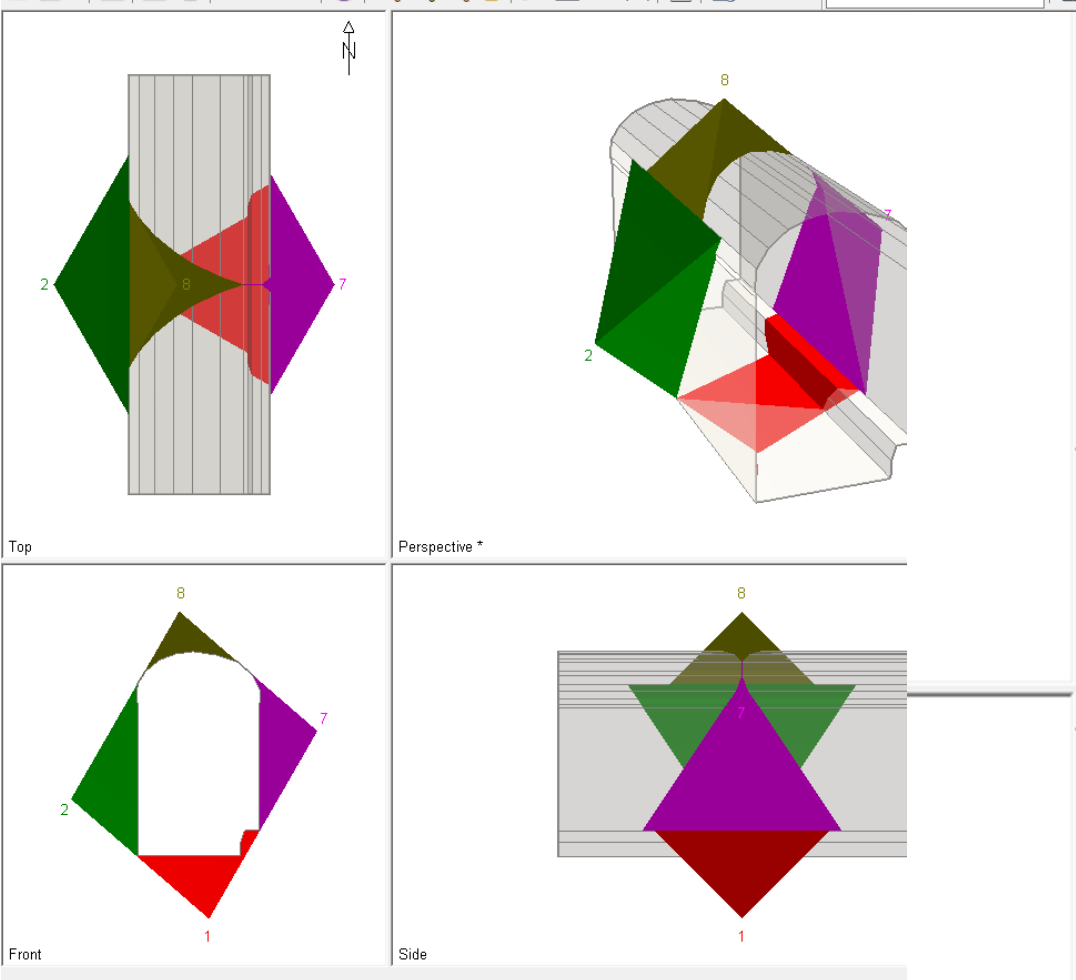
Buttons: Apply, OK, Cancel

Exemple : codes de calcul (Unwedge®)

Unwedge - [Cavern.weg - 3D Wedge View]

File Edit View Boundaries Analysis Support Statistics Tools Window Help

3D Wedge View



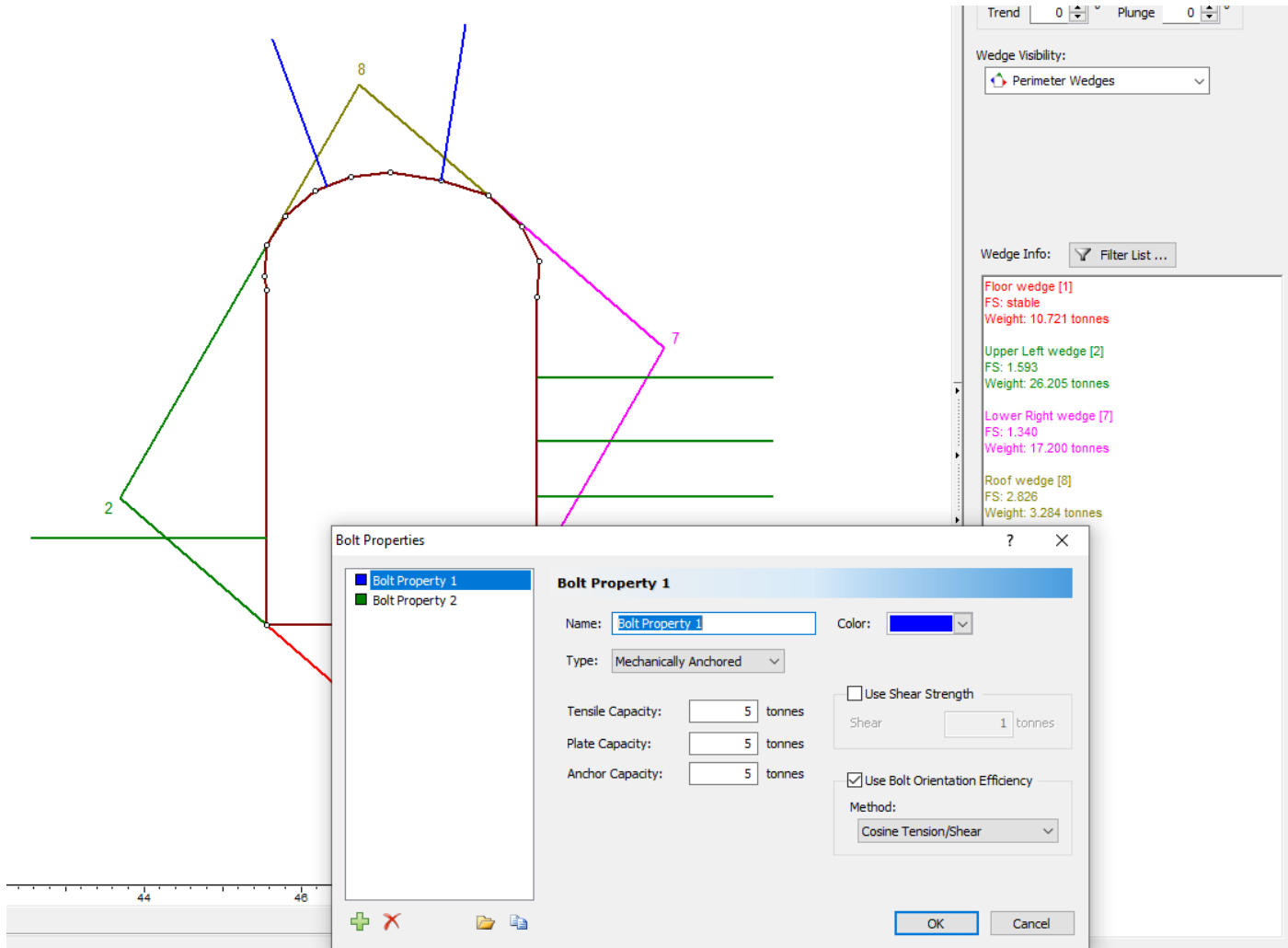
Top Perspective * Front Side

Wedge Info:

- Floor wedge [1]
FS: stable
Weight: 10.721 tonnes
- Upper Left wedge [2]
FS: 1.008
Weight: 26.205 tonnes
- Lower Right wedge [7]
FS: 0.333
Weight: 17.200 tonnes
- Roof wedge [8]
FS: 0.000
Weight: 3.284 tonnes

For Help, press F1 J1: 60/030 J2: 60/150 J3: 60/270 (z,y)= -9,616, 58,514

Exemple : codes de calcul (Unwedge®)



The diagram shows a dome structure with several wedges used for stability analysis. Wedge 2 is green, wedge 7 is pink, and wedge 8 is yellow. The software interface includes a 'Wedge Info' panel on the right and a 'Bolt Properties' dialog box in the foreground.

Wedge Info:

- Floor wedge [1]
FS: stable
Weight: 10.721 tonnes
- Upper Left wedge [2]
FS: 1.593
Weight: 26.205 tonnes
- Lower Right wedge [7]
FS: 1.340
Weight: 17.200 tonnes
- Roof wedge [8]
FS: 2.826
Weight: 3.284 tonnes

Bolt Properties:

Bolt Property 1

Name: Bolt Property 1 Color: Blue

Type: Mechanically Anchored

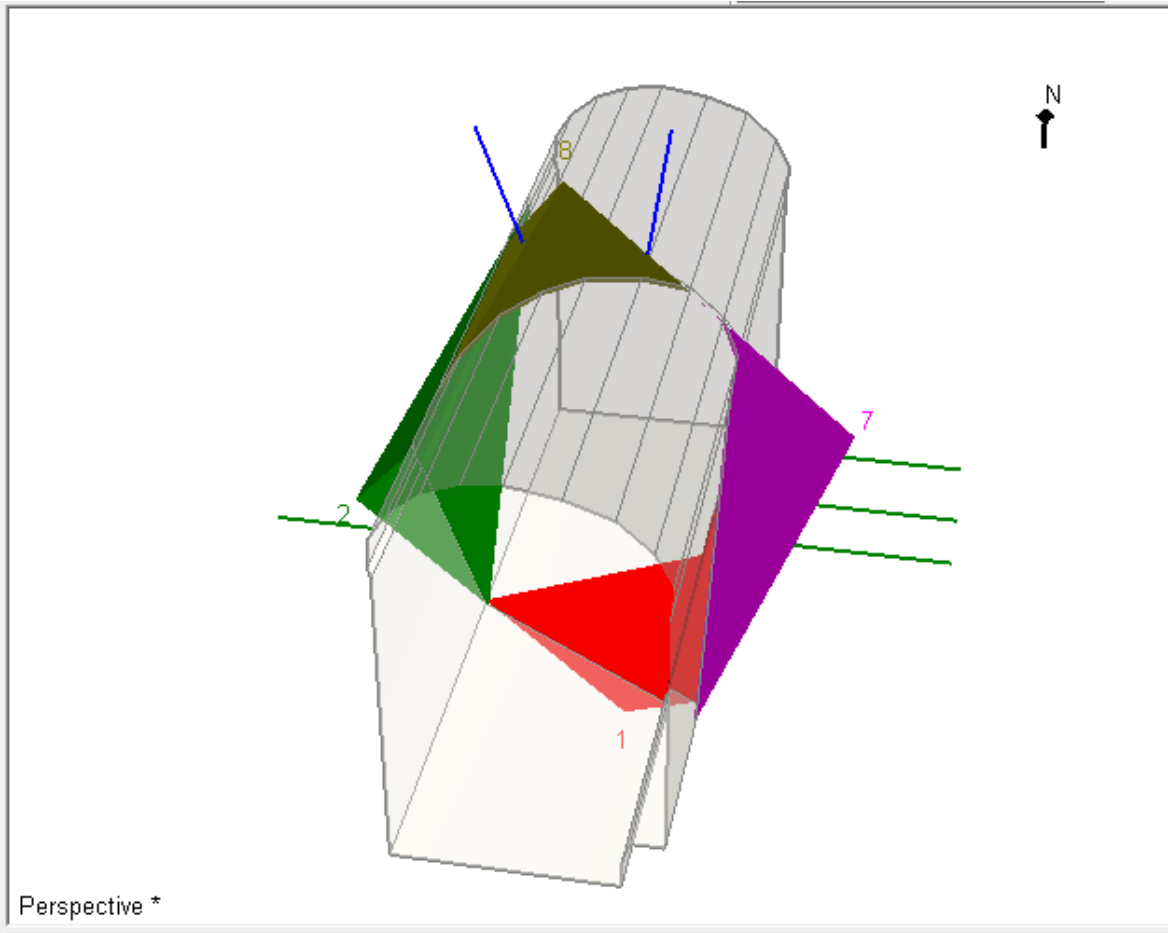
Tensile Capacity: 5 tonnes
Plate Capacity: 5 tonnes
Anchor Capacity: 5 tonnes

Use Shear Strength
Shear: 1 tonnes

Use Bolt Orientation Efficiency
Method: Cosine Tension/Shear

Buttons: OK, Cancel

Exemple : codes de calcul (Unwedge®)



Perspective *

Tunnel Axis Orientation
Trend ° Plunge °

Wedge Visibility:

Pattern Bolt Visibility:

Wedge Translation:

Wedge Info:

- Floor wedge [1]
FS: stable
Weight: 10.721 tonnes
- Upper Left wedge [2]
FS: 1.593
Weight: 26.205 tonnes
- Lower Right wedge [7]
FS: 1.340
Weight: 17.200 tonnes
- Roof wedge [8]
FS: 2.826
Weight: 3.284 tonnes

p.1 **Le comportement d'un massif rocheux**

p.2 **Les discontinuités**

p.3 **Stabilité des blocs et dièdres – Boulonnage**

p.4 **Caractéristiques mécaniques du massif rocheux**

4.1 Paramètres caractéristiques

4.2 Résistance d'un massif rocheux

4.3 Déformabilité d'un massif rocheux

4\ Caractéristiques mécaniques du massif rocheux \

4.1 – Paramètres caractéristiques du massif rocheux

- **Indice de fracturation : ID, RQD**
- **Degrés d'altération**
 - Rocher sain
 - Altération limitée aux surfaces de discontinuités principales : Sain dans la masse
 - Altération faible dans la masse rocheuse mais bien développée sur les discontinuités.
 - Altération bien visible dans toute la masse rocheuse mais matériau non friable.
 - Forte altération dans toute la masse rocheuse.
 - Roche complètement décomposée : la texture et les fissures importantes sont toujours visibles.
 - Roche complètement décomposée : texture et fissuration non reconnaissables.

- **Indice de continuité du massif : ICM**

L'indice ICM est défini par le rapport de la vitesse V_{p_M} des ondes P mesurée sur une base de longueur L (longueurs les plus courantes des bases de sismique réfraction : 60 m, 120 m 240 m), à la vitesse V_p mesurée sur un échantillon.

$$ICM = V_{p_M} / V_p$$

VALEUR DE IC_M	TERME DESCRIPTIF DE CONTINUITÉ DU MASSIF
> 90 %	Continuité du massif très élevée
90 % à 75 %	Continuité du massif élevée
75 % à 50 %	Continuité du massif moyenne
50 % à 25 %	Continuité du massif faible
< 25 %	Continuité du massif très faible

4\ Caractéristiques mécaniques du massif rocheux \

4.1 – Paramètres caractéristiques du massif rocheux

Paramètres du projet :

- Individualisation de sous ensembles (tronçons) homogènes
 - ✓ caractéristiques mécaniques du matériau (en conservant une pétrographie identique) ;
 - ✓ degré d'altération ;
 - ✓ conditions hydrogéologiques ;
 - ✓ épaisseur de la couverture ;
 - ✓ densité de discontinuités ;
 - ✓ autres.....
- Caractérisation géomécanique de chaque tronçon :
 - ✓ Matrice rocheuse
 - ✓ Identification, Perméabilité
 - ✓ Caractéristiques mécaniques : module de Young E , coefficient de Poisson ν , potentiel de gonflement σ_g , C_g , résistance à la compression simple (R_c), résistance à la traction (R_{tb}) etc. cohésion C et angle de frottement ϕ .
 - ✓ Discontinuités :
 - *Densité, RQD, ID, etc.*
 - *Orientation*
 - *Espacement, Extension*
 - *Rugosité et l'ondulation des surfaces, l'altération des épontes, l'ouverture, le remplissage et la présence d'eau dans le massif rocheux*

- **Définition du problème**

- ✓ **Evaluer la résistance ultime d'un massif rocheux à l'échelle d'un ouvrage souterrain est une tâche très délicate.**
- ✓ **Aucun essai in situ, sinon un essai de rupture en vraie grandeur, ne peut fournir de résultat exploitable.**
- ✓ **Dans ces conditions, la seule approche consiste à minorer les propriétés de la matrice rocheuse, mesurée sur échantillons, en fonction de la fracturation du massif rocheux.**

• Utilisation des classifications du massif rocheux

- ✓ RMR de Bieniawski (Rock Mass rating) variant de 0 à 100
 - *A1 : Strength of intact rock material ;*
 - *A2 : Drill core quality ;*
 - *A3 : Spacing of discontinuities ;*
 - *A4 : Conditions of discontinuities : extension, ouverture, rugosité, remplissage et altération des épontes ;*
 - *A5 : Groundwater conditions*
 - *- B : Adjustment for joint orientation : azimut et pendage des discontinuités par rapport à l'orientation de l'ouvrage souterrain.*

- ✓ Q de Barton variant de 0,001 à 1000
 - *RQD : Rock Quality Designation, suivant la définition de D. Deere (1964) ;*
 - *Jm : le nombre de familles de joints exprimés ;*
 - *Jr : la rugosité des joints (on retient le joint le plus défavorable) ;*
 - *Ja : le degré d'altération des joints ou de leur remplissage (on retient le joint le plus altéré) ;*
 - *Jw : les arrivées d'eau potentielles (débit et pression) ;*
 - *SRF : "Stress Reduction Factor" qualifiant les conditions de contraintes en place conditionnées par l'état de contrainte tectonique*

• Utilisation des classifications du massif rocheux

- ✓ GSI de Hoek (Geological Strength Index) ou RMR'.

Il est calculé comme le RMR pour les 4 premiers critères :

- ✓ *Résistance,*
- ✓ *RQD,*
- ✓ *Espacements des joints,*
- ✓ *Conditions de joints*

mais en retenant systématiquement une valeur pour les critères suivants de :

- ✓ *15 pour l'eau (c'est le comportement du massif hors d'eau qui est considéré)*
- ✓ *une valeur de 0 pour la note d'ajustement relative à l'orientation des discontinuités*

4\ Caractéristiques mécaniques du massif rocheux \

4.2 – Résistance d'un massif rocheux

• Critère de rupture : roche intacte – massif rocheux fracturé

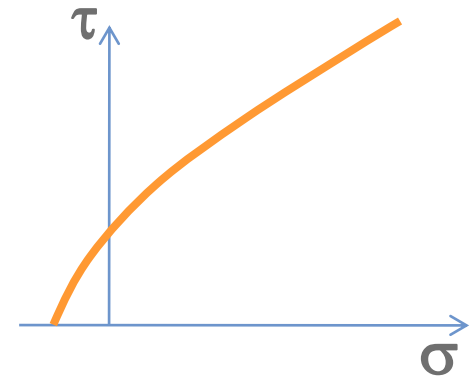
- ✓ Les travaux les plus importants dans ce domaine sont ceux de Hoek et Brown (synthétisés dans Hoek, Kaiser et Brown, 1997). Le critère de rupture adopté est un critère généralisé de la forme :

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_c (m_b \sigma'_3 / \sigma'_c + s)^a$$

a , s , et m_b sont des constantes caractéristiques

Pour la **roche intacte** Hoek et Brown proposent :

- $m_b = m_i$ Constante caractéristique de la roche intacte.
Des relations entre m_b et m_i sont obtenues par essais triaxiaux.
Le tableau suivant présente des valeurs moyennes.
- $s = 1$
- $a = 1/2$ Critère parabolique



Pour le **massif rocheux** Hoek et Brown proposent :

– Pour **GSI > 25**

- $m_b = m_i \exp^{(GSI - 100)/28}$
- $s = \exp^{(GSI - 100)/9}$
- $a = 0,5$

– Pour **GSI < 25**

- $s = 0$
- $a = 0,65 - (GSI/200)$

Avec :

m_i caractéristique de la roche intacte

GSI, indice dérivant du RMR en considérant un massif sec et que les joints ont une orientation favorable

4\ Caractéristiques mécaniques du massif rocheux \

4.2 – Résistance d'un massif rocheux

- Critère de rupture :
roche intacte –
massif rocheux
fracturé

✓ Valeurs de m_i

Table 8.3: Values of the constant m_i for intact rock, by rock group. Note that values in parenthesis are estimates.

Rock type	Class	Group	Texture			
			Course	Medium	Fine	Very fine
SEDIMENTARY	Clastic		Conglomerate (22)	Sandstone 19	Siltstone 9	Claystone 4
			← Greywacke (18) →			
	Non-Clastic	Organic	← Chalk 7 →			
			← Coal (8-21) →			
	Carbonate	Breccia (20)	Sparitic Limestone (10)	Micritic Limestone 8		
	Chemical		Gypstone 16	Anhydrite 13		
METAMORPHIC	Non Foliated		Marble 9	Hornfels (19)	Quartzite 24	
	Slightly foliated		Migmatite (30)	Amphibolite 31	Mylonites (6)	
	Foliated*		Gneiss 33	Schists (10)	Phyllites (10)	Slate 9
IGNEOUS	Light		Granite 33		Rhyolite (16)	Obsidian (19)
			Granodiorite (30)		Dacite (17)	
	Dark		Diorite (28)		Andesite 19	
			Gabbro 27	Dolerite (19)	Basalt (17)	
		Norite 22				
	Extrusive pyroclastic type		Agglomerate (20)	Breccia (18)	Tuff (15)	





*These values are for intact rock specimens tested normal to foliation. The value of m_i will be significantly different if failure occurs along a foliation plane (Hoek, 1983).

4\ Caractéristiques mécaniques du massif rocheux \

4.2 – Résistance d'un massif rocheux

• Critère de rupture : roche intacte – massif rocheux fracturé

Tableau de détermination des paramètres : m_b , m_i , s , a à partir du RMR

GENERALISED HOEK-BROWN CRITERION		SURFACE CONDITION	VERY GOOD Very rough, unweathered surfaces	GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces	FAIR Smooth, moderately weathered or altered surfaces	POOR Slackensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings containing angular rock fragments	VERY POOR Slackensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings
$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_c} + s \right)^a$ <p> σ_1' = major principal effective stress at failure σ_3' = minor principal effective stress at failure σ_c = uniaxial compressive strength of <i>intact</i> pieces of rock m_b, s and a are constants which depend on the composition, structure and surface conditions of the rock mass </p>							
STRUCTURE							
	BLOCKY -very well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three orthogonal discontinuity sets	m_b/m_i s a E_m v GSI	0.60 0.190 0.5 75,000 0.2 85	0.40 0.062 0.5 40,000 0.2 75	0.26 0.015 0.5 20,000 0.25 62	0.16 0.003 0.5 9,000 0.25 48	0.08 0.0004 0.5 3,000 0.25 34
	VERY BLOCKY -interlocked, partially disturbed rock mass with multifaceted angular blocks formed by four or more discontinuity sets	m_b/m_i s a E_m v GSI	0.40 0.062 0.5 40,000 0.2 75	0.29 0.021 0.5 24,000 0.25 65	0.16 0.003 0.5 9,000 0.25 48	0.11 0.001 0.5 5,000 0.25 38	0.07 0 0.53 2,500 0.3 25
	BLOCKY/SEAMY -folded and faulted with many intersecting discontinuities forming angular blocks	m_b/m_i s a E_m v GSI	0.24 0.012 0.5 18,000 0.25 60	0.17 0.004 0.5 10,000 0.25 50	0.12 0.001 0.5 6,000 0.25 40	0.08 0 0.5 3,000 0.3 30	0.06 0 0.55 2,000 0.3 20
	CRUSHED -poorly interlocked, heavily broken rock mass with a mixture of angular and rounded blocks	m_b/m_i s a E_m v GSI	0.17 0.004 0.5 10,000 0.25 50	0.12 0.001 0.5 6,000 0.25 40	0.08 0 0.5 3,000 0.3 30	0.06 0 0.55 2,000 0.3 20	0.04 0 0.60 1,000 0.3 10

4\ Caractéristiques mécaniques du massif rocheux \

4.2 – Résistance d'un massif rocheux

Critère de rupture : roche intacte – massif rocheux fracturé

Exemples de
caractéristiques mécaniques

- Massif rocheux de qualité moyenne

Intact rock strength	σ_{ci}	80 MPa
Hoek-Brown constant	m_i	12
Geological Strength Index	GSI	50
Friction angle	ϕ'	33°
Cohesive strength	c'	3.5 MPa
Rock mass compressive strength	σ_{cm}	13 MPa
Rock mass tensile strength	σ_{tm}	-0.15
Deformation modulus	E_m	9000 MPa
Poisson's ratio	ν	0.25
Dilation angle	α	$\phi'/8 = 4^\circ$
<i>Post-peak characteristics</i>		
Broken rock mass strength	σ_{fcm}	8 MPa
Deformation modulus	E_{fm}	5000 MPa

- Massif rocheux de mauvaise qualité

Intact rock strength	σ_{ci}	20 MPa
Hoek-Brown constant	m_i	8
Geological Strength Index	GSI	30
Friction angle	ϕ'	24°
Cohesive strength	c'	0.55 MPa
Rock mass compressive strength	σ_{cm}	1.7 MPa
Rock mass tensile strength	σ_{tm}	-0.01 MPa
Deformation modulus	E_m	1400 MPa
Poisson's ratio	ν	0.3
Dilation angle	α	zero
<i>Post-peak characteristics</i>		
Broken rock mass strength	σ_{fcm}	1.7 MPa
Deformation modulus	E_{fm}	1400 MPa

- Massif rocheux de très bonne qualité

Intact rock strength	σ_{ci}	150 MPa
Hoek-Brown constant	m_i	25
Geological Strength Index	GSI	75
Friction angle	ϕ'	46°
Cohesive strength	c'	13 MPa
Rock mass compressive strength	σ_{cm}	64.8 MPa
Rock mass tensile strength	σ_{tm}	-0.9 MPa
Deformation modulus	E_m	42000 MPa
Poisson's ratio	ν	0.2
Dilation angle	α	$\phi'/4 = 11.5^\circ$
<i>Post-peak characteristics</i>		
Friction angle	ϕ'_f	38°
Cohesive strength	c'_f	0
Deformation modulus	E_{fm}	10000 MPa

4\ Caractéristiques mécaniques du massif rocheux \

4.2 – Résistance d'un massif rocheux



Critère de rupture : roche intacte – massif rocheux fracturé

Tableau d'estimation du GSI sur la base de la géologie et de la fracturation

GEOLOGICAL STRENGTH INDEX		SURFACE CONDITIONS				
<p>From the letter codes describing the structure and surface conditions of the rock mass (from Table 4), pick the appropriate box in this chart. Estimate the average value of the Geological Strength Index (GSI) from the contours. Do not attempt to be too precise. Quoting a range of GSI from 36 to 42 is more realistic than stating that GSI = 38.</p>		VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR	VERY POOR
		Very rough, fresh unweathered surfaces	Rough, slightly weathered, iron stained surfaces	Smooth, moderately weathered or altered surfaces	Slickensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings of angular fragments	Slickensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings
STRUCTURE		DECREASING SURFACE QUALITY ↘				
<p>BLOCKY - very well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three orthogonal discontinuity sets</p>	80	70				
<p>VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed rock mass with multifaceted angular blocks formed by four or more discontinuity sets</p>	60	50				
<p>BLOCKY/DISTURBED - folded and/or faulted with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets</p>			40			
<p>DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with a mixture of angular and rounded rock pieces</p>				30		
					20	
						10

• Mesures de déformabilité :

- ✓ Déformabilité par mesures indirectes :
De type géophysique selon vitesse de propagation des ondes
- ✓ L'essai pressiométrique (norme P94-110-1&2) : L'essai pressiométrique doit être réservé exclusivement aux sols ou éventuellement à quelques matériaux "tendres" (craies, marnes) à la limite des sols et des roches
- ✓ L'essais dilatométrique en forage (norme P 94-443) : Il permet de mesurer la déformabilité du massif au moyen d'un dilatomètre. Cet essai permet de réaliser des mesures de fluage.
- ✓ Essais au vérin à plaque rigide
- ✓ Mesures directes sur ouvrages + rétro-analyses

4\ Caractéristiques mécaniques du massif rocheux \

4.3 – Déformabilité d'un massif rocheux

■ Déformabilité par mesures directes :

- ✓ Essais au vérin à plaque rigide caractérise la déformabilité du massif par le module de déformation E_m déterminé par la tangente aux courbes « effort-déplacement » établies au cours de cycles de chargement successifs croissants.
- ✓ Dimensions habituelles des plaques : 0,38 m à 0,60 m d'où valeurs de déformabilité du massif à l'échelle de quelques m^3



4\ Caractéristiques mécaniques du massif rocheux \

4.3 – Déformabilité d'un massif rocheux

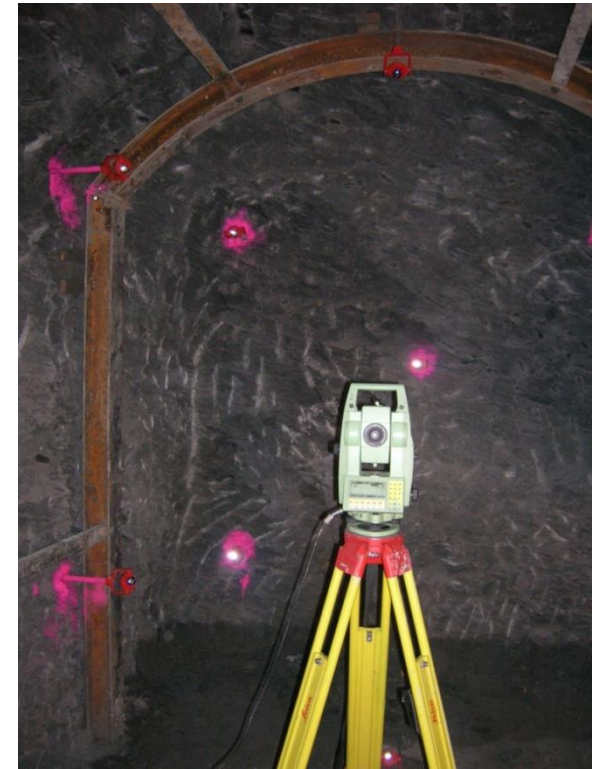
- ✓ Essais au vérin à plaque rigide :



4\ Caractéristiques mécaniques du massif rocheux \

4.3 – Déformabilité d'un massif rocheux

- ✓ Mesures sur ouvrages réels et estimation de la déformabilité par analyse en retour : Les analyses sont réalisées par modélisation 2D ou 3D avec calage des paramètres au moyen des mesures les plus courantes suivantes :
 - mesures du déplacement de la paroi de l'ouvrage (convergence) ;
 - mesures de déplacements de points situés dans le massif rocheux au moyen d'extensomètres en forages réalisés autour de l'ouvrage.
 - mesure de variations angulaires de points solidaires du massif rocheux (inclinométrie ou déflectométrie).



4\ Caractéristiques mécaniques du massif rocheux \

4.3 – Déformabilité d'un massif rocheux

■ Déformabilité par mesures de

- ✓ **Mesures sur ouvrages réels et estimation de la déformabilité en analyse en retour** : Les analyses sont réalisées en fonction des paramètres au moyen des mesures les plus courantes.
 - mesures du déplacement de la paroi de l'ouvrage
 - mesures de déplacements de points situés dans les forages réalisés autour de l'ouvrage.
 - mesure de variations angulaires de points solidaires (par exemple par déflectométrie).



- **Déformabilité**

- Massif : classifications géomécaniques sur E_m (GPa)

>30 **Massif très peu déformable**

10 – 30 **Massif peu déformable**

3 – 10 **Massif moyennement déformable**

1 - 3 **Massif déformable**

0,1 - 1 **Massif très déformable**

< 0,1 **Massif extrêmement déformable**

4\ Caractéristiques mécaniques du massif rocheux \

4.3 – Déformabilité d'un massif rocheux

- **Effets différés (module à long terme) dus :**
 - ✓ Au comportement rhéologique de la matrice rocheuse, de type visco-élastique ou visco-élasto-plastique (cas de certaines roches : évaporites, marnes, ...) ;
 - ✓ Au dépassement du seuil de comportement élastique avec développement de zones plastiques au pourtour de l'excavation ;
 - ✓ A des déformations différées liées à des phénomènes de consolidation consécutifs à la modification des écoulements, l'excavation jouant le rôle d'un drain.

$$E_m(t) = E_{m0} / [1 + \phi(t)]$$

- La fonction $\Phi(t)$ est une fonction monotone croissante comprise entre $\Phi(0) = 0$ et $\Phi(\infty) = \alpha$
- Roches de résistance faible à moyenne : $\alpha \approx 0.5$ à 1 (à valider par des données expérimentales)
- Roches de résistance plus élevée : $\alpha \approx 0,3$ à 0,5 (généralement adopté sans justification)



terrasol
Tour Central Seine
42 - 52, quai de la Rapée
75583 Paris cedex 12

Tél +33 1 82 51 68 00
info@terrasol.com

julian.marlinge@setec.com
fabien.binet@setec.com

www.terrasol.fr