

Caractérisation et comportement des discontinuités

MÉCANIQUE DES
ROCHES ET
OUVRAGES
SOUTERRAINS

Prof. M. VIOLAY

Caractérisation et comportement des discontinuités

1. Caractérisation des discontinuités
2. Comportement sous sollicitation en cisaillement
3. Comportement sous sollicitation normale
4. Ecoulement dans les joints

Caractérisation et comportement des discontinuités

1. Caractérisation des discontinuités

- 1.1. **Nombre de familles**
- 1.2. **Orientation**
- 1.3. **Espacement**
- 1.4. **Persistance**
- 1.5. **Rugosité**
- 1.6. **Ouverture et remplissage**
- 1.7. **Degré d'altération**

2. Comportement sous sollicitation en cisaillement

3. Comportement sous sollicitation normale

4. Ecoulement dans les joints

1. Caractérisation des discontinuités (0 tensile strength)



Les discontinuités sont regroupées en familles.

Chaque famille est caractérisée par :

- Orientation
- Espacement
- Persistance
- Rugosité
- Ouverture
- Degré d'altération
- Matériau de remplissage

+ eau

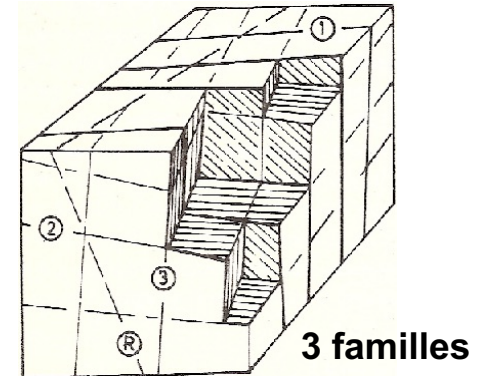
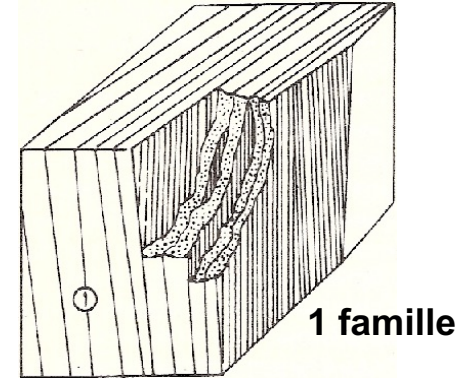
1.1 Nombre de familles de discontinuités



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

Typiquement:

- 1 famille de joints découpe le massif rocheux en plaques;
- 2 familles perpendiculaires découpent le massif rocheux en colonnes;
- 3 familles découpent le massif rocheux en blocs;
- plus de 3 familles découpent la roche en blocs de formes variées et de coins.



1.1 Nombre de familles de discontinuités

Description suggérée par l'ISRM (Int. Society of R.M.)

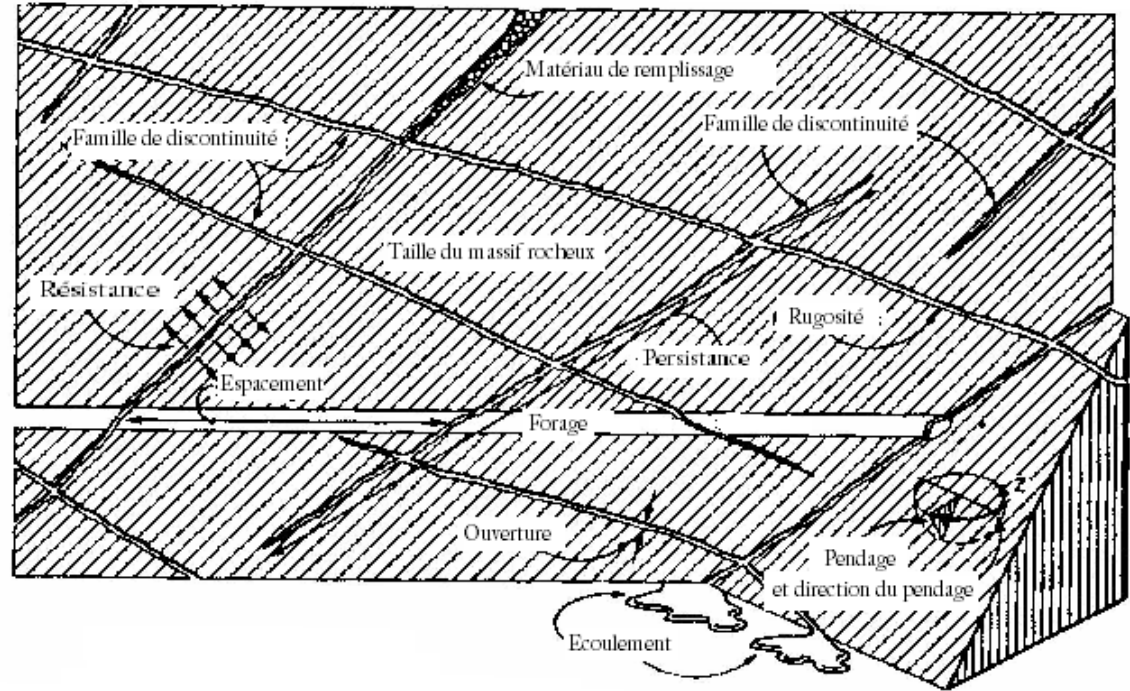
I	Massive, fractures aléatoires occasionnelles
II	Une famille de joints
III	Une famille de joints plus fractures aléatoires
IV	Deux familles de joints
V	Deux familles de joints plus fractures aléatoires
VI	Trois familles de joints
VII	Trois familles de joints plus fractures aléatoires
VIII	Quatre familles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

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

1.1 Nombre de familles de discontinuités

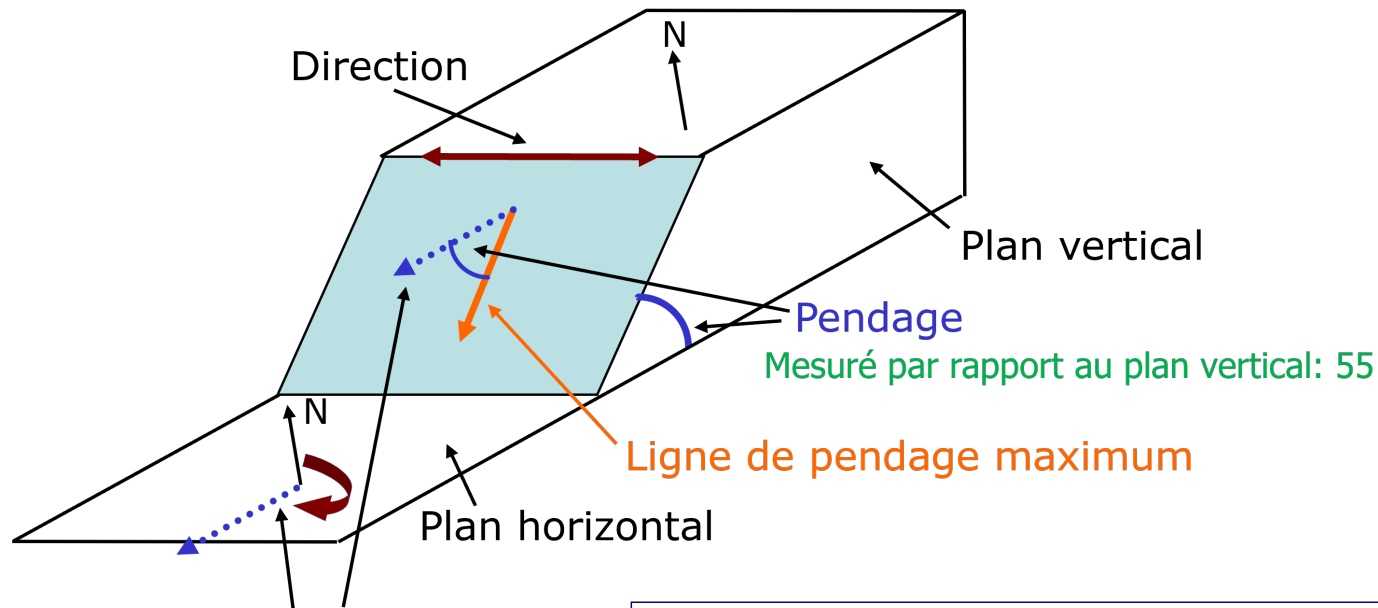


- Orientation
- Espacement
- Persistance
- Rugosité
- Ouverture
- Degré d'altération
- Matériau de remplissage



+ eau

1.2 Orientation des discontinuités



Orientation: α, β 220/55

Azimut de pendage / pendage

Représentation par projection stéréographique

1.3 Espacement des discontinuités



Espacement des joints, fréquence, RQD (Rock quality designation), taille des blocs

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

L'espacement des joints contrôle la taille des blocs individuels. Cela contrôle le mode de rupture, les caractéristiques de résistance, de déformabilité et de perméabilité du massif.

1.3 Espacement des discontinuités

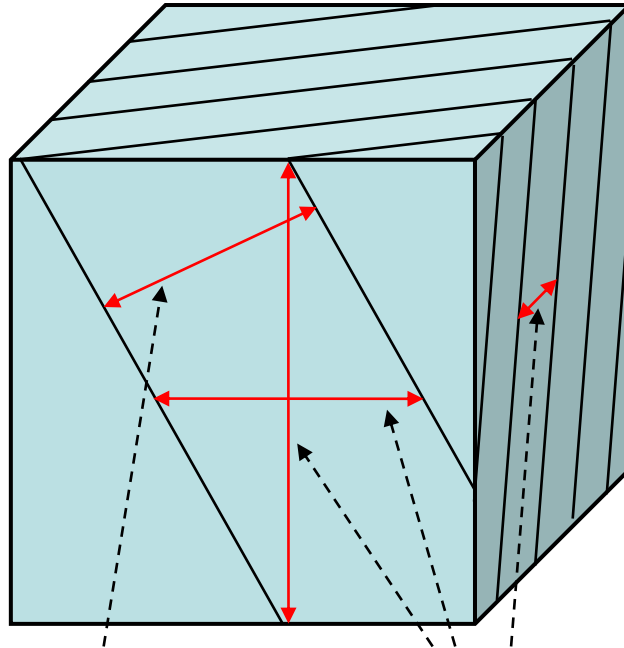


Espacement des joints

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

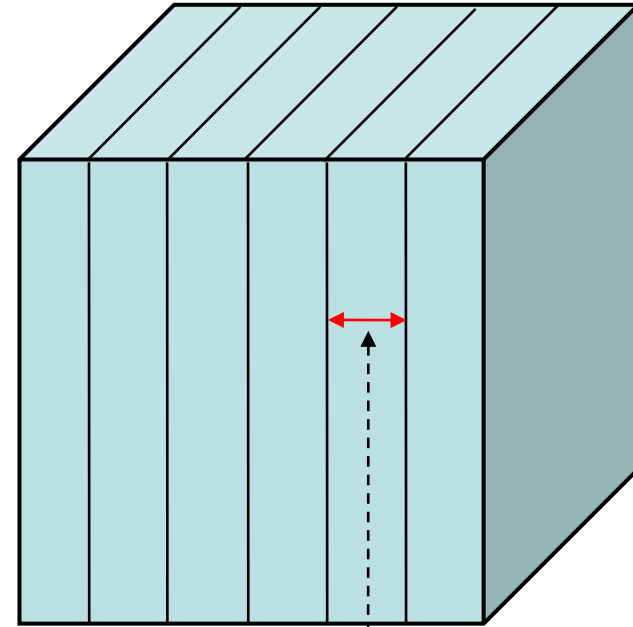
On mesure souvent l'espacement apparent. Cette mesure varie selon les différentes faces et directions de relevé. Par exemple, dans un massif rocheux fissuré verticalement, les mesures selon la direction verticale donneront un espacement bien plus important que selon la direction horizontale.

1.3 Espacement des discontinuités



Espacement
apparent sur
le plan

Espacement
apparent dans
les directions
 x, y et z .



Espace
ment
réel.

1.3 Espacement des discontinuités

Classification de l'espacement suggérée par l'ISRM

Description	Espacement des joints [m]
Extrêmement serré	< 0.02
Très serré	$0.02 - 0.06$
Serré	$0.06 - 0.2$
Moyen	$0.2 - 0.6$
Large	$0.6 - 2$
Très large	$2 - 6$
Extrêmement large	> 6

On sera attentif à corriger les espacements apparents mesurés sur le terrain afin de déterminer l'espacement réel des discontinuités.

1.3 Espacement des discontinuités



Fréquence des Joints

La fréquence des joints (λ), est définie comme le nombre de joints par mètre linéaire. C'est donc simplement l'inverse de l'espacement des joints (s_j):

$$\lambda = 1 / s_j \text{ [# / m]}$$

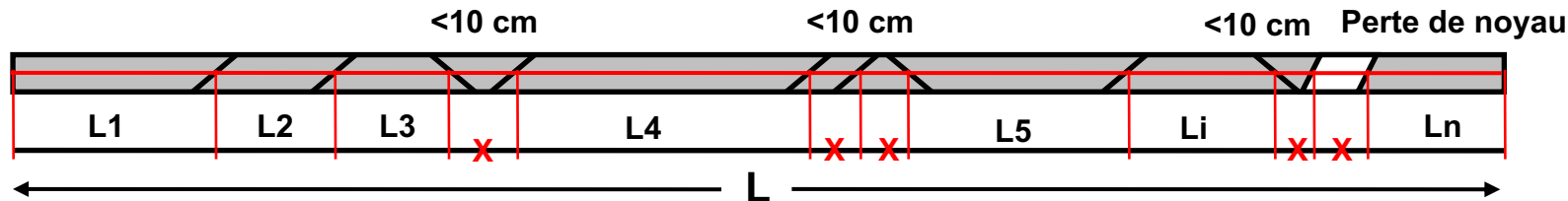
1.3 Espacement des discontinuités



RQD

L'indice 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:

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



$$RQD = (L_1 + L_2 + \dots + L_n) / L \times 100\%$$

1.3 Espacement des discontinuités

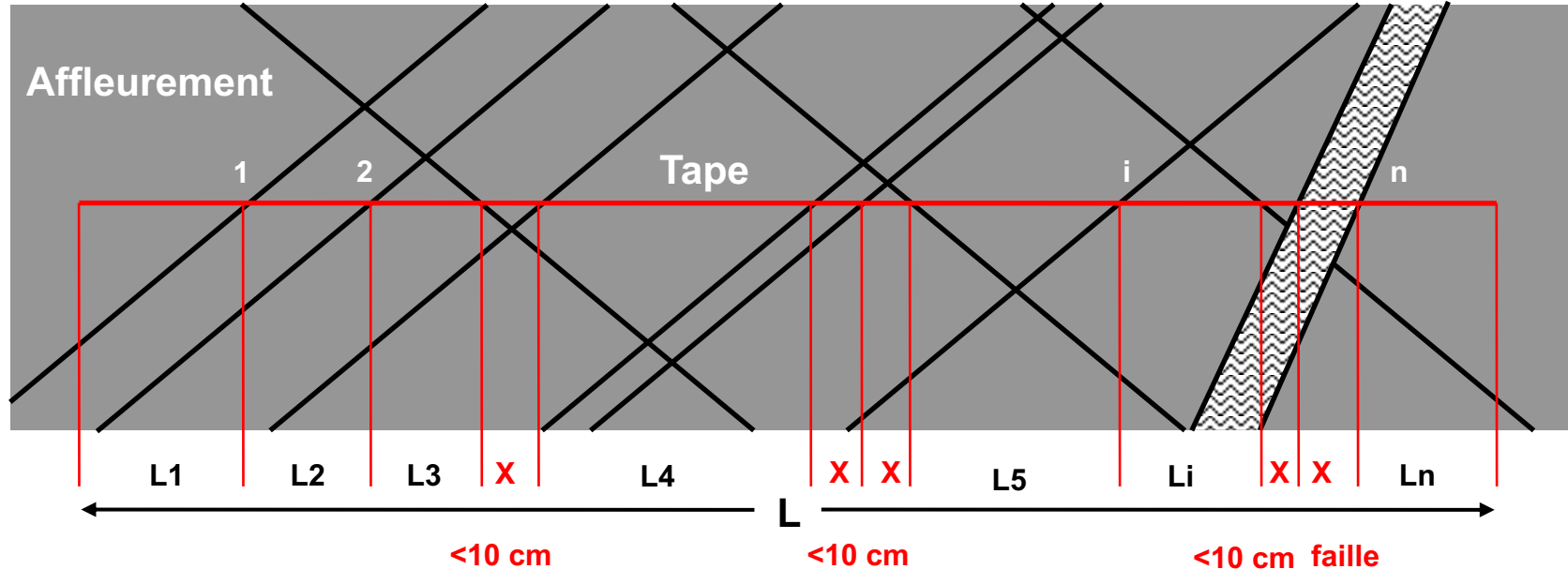


1.3 Espacement des discontinuités

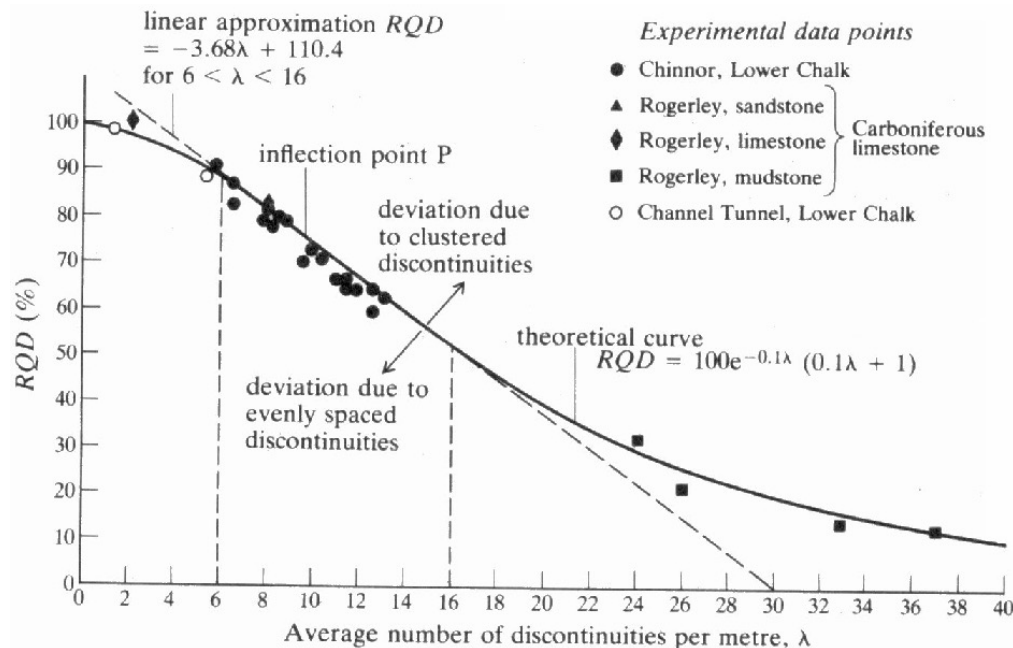


$$RQD = (L1 + L2 + \dots + Ln) / L \times 100\%$$

$$\lambda = \text{nombre de joints} / \text{longueur} = n / L$$



1.3 Espacement des discontinuités



RQD peut être corrélé à la fréquence des joints λ [# / m]:

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

Pour $6 < \lambda < 16$, on peut approximer par : $RQD = 110.4 - 3.68\lambda$

1.3 Espacement des discontinuités

Commentaire sur le RQD

Le RQD a été initialement proposé pour tenter de décrire la qualité du massif rocheux (Deere 1968).

RQD	Densité de fracturation	Qualité du massif
90 – 100%	Nulle à très faible	Excellente
75 – 90%	Faible	Bonne
50 – 75%	Moyenne	Moyenne
25 – 50%	Forte	Mauvaise
0 – 25%	Très forte	Très mauvaise

En réalité, cet indice donne seulement une idée du degré de fracturation (il varie avec l'orientation...), mais pas des autres propriétés, telles que la résistance de la roche et l'altération des joints.

1.3 Espacement des discontinuités



Taille des blocs - nombre de joints par unité de volume

L'espacement des joints définit aussi la taille des blocs. Si un massif rocheux contient un plus grand nombre de joints, alors leur espacement moyen sera plus faible et la taille des blocs plus petite.

Le RQD peut être relié au nombre de joints par unité de volume J_v par :

- $J_v < 4.5$ $RQD = 100\%$,
- $4.5 < J_v < 30$ $RQD = 115 - 3.3 J_v$
- $J_v > 30$ $RQD = 0\%$.

1.3 Espacement des discontinuités



Classification de la taille des blocs suggérée par l'ISRM

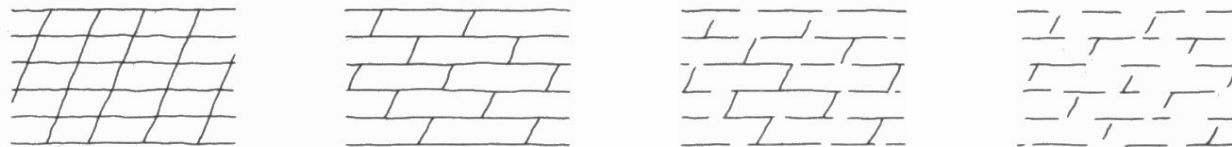
Description	densité de joints J_v [#/m ³]
Blocs très grands	< 1
Grands blocs	1 – 3
Blocs moyens	3 – 10
Petits blocs	10 – 30
Très petits blocs	> 30
Roche broyée	> 60

1.4 Persistance des discontinuités



La persistance est l'extension spatiale ou la longueur d'une discontinuité.

Elle peut être directement mesurée en observant les longueurs des traces des discontinuités sur les affleurements.



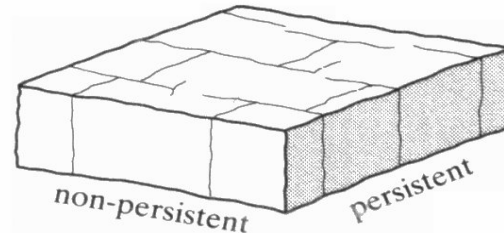
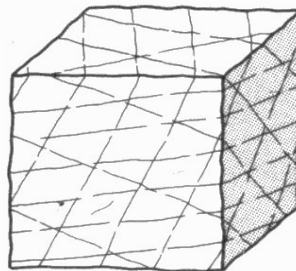
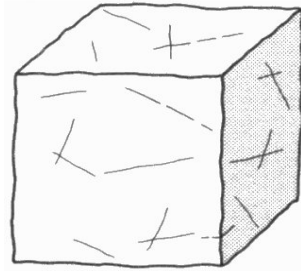
La persistance des systèmes de joints influence la stabilité des talus rocheux de grande dimension, des fondations de barrage et des excavations de tunnels.

1.4 Persistance des discontinuités



Classification de la persistance suggérée par l'ISRM

Description	Longueur de la trace [m]
Très faible	< 1
Faible	1 – 3
Moyenne	3 – 10
Forte	10 – 20
Très forte	> 20



1.5 Rugosité des discontinuités



Rugosité et imbrication de la surface d'un joint

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

La condition de contact régit l'ouverture de l'interface. L'interface peut être remplie avec des matériaux intrusifs ou d'altération ou d'abrasion (gouge).



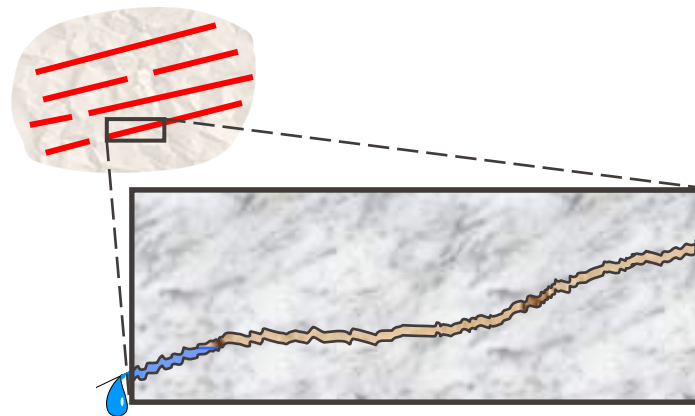
1.5 Rugosité des discontinuités

Rugosité d'un joint

La rugosité de la surface d'un joint est une mesure des irrégularités et des ondulations de la surface du joint par rapport à son plan moyen.

La rugosité de la surface du joint est caractérisée par:

- des ondulations à grande échelle, responsables du phénomène de dilatance;
- des irrégularités à petite échelle (ou aspérités) qui augmentent la résistance au cisaillement.

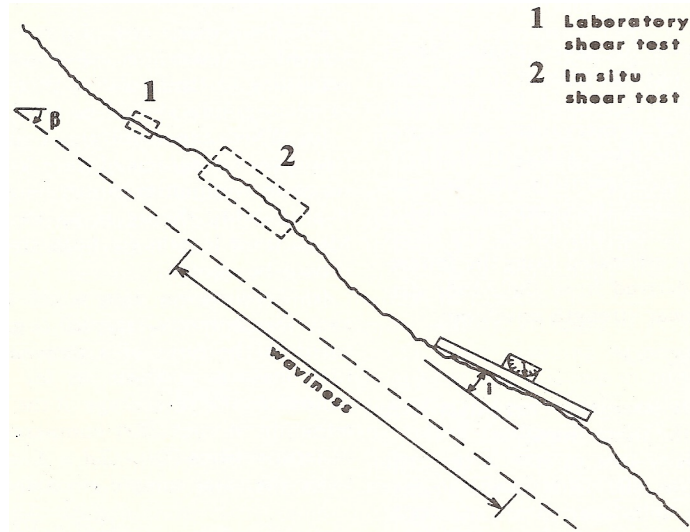


1.5 Rugosité des discontinuités



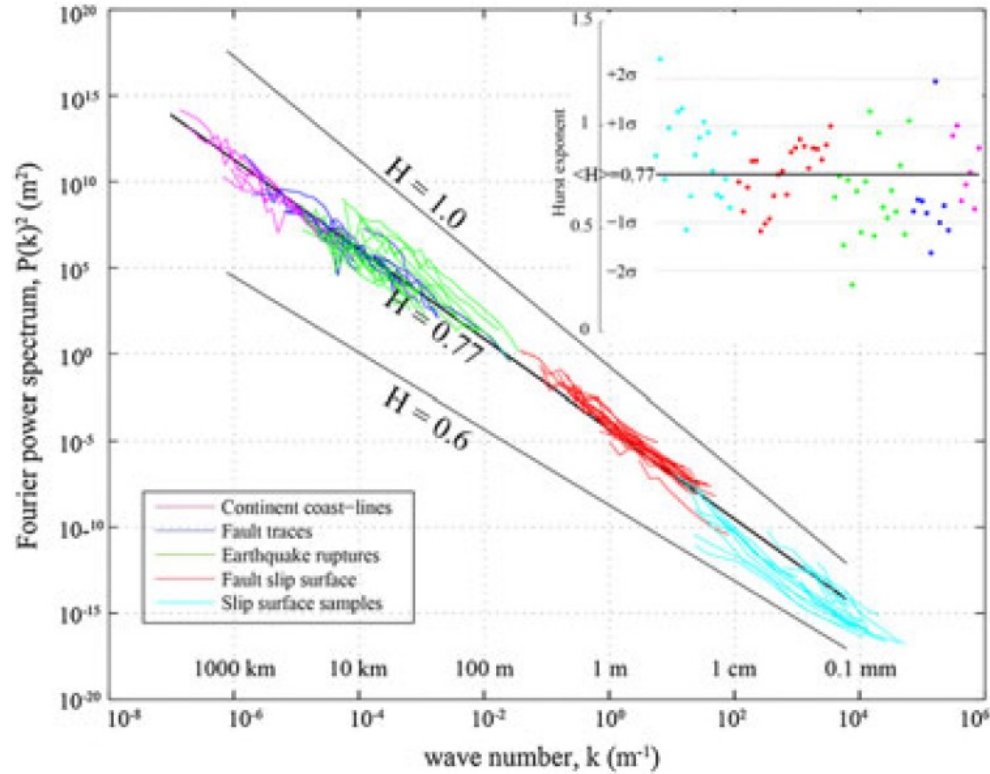
Rugosité d'un joint

C'est le facteur principal qui régit la direction de glissement, la résistance au cisaillement, et donc la stabilité de blocs susceptibles de glisser.



- des ondulations à grande échelle, responsables du phénomène de dilatance;
- des irrégularités à petite échelle (ou aspérités) qui augmentent la résistance au cisaillement.

1.5 Rugosité des discontinuités



Renard (2013)

1.5 Rugosité des discontinuités



Rugosité d'un joint

La rugosité n'est pas une mesure quantitative. Comme le suggère l'ISRM, elle devrait être décrite:

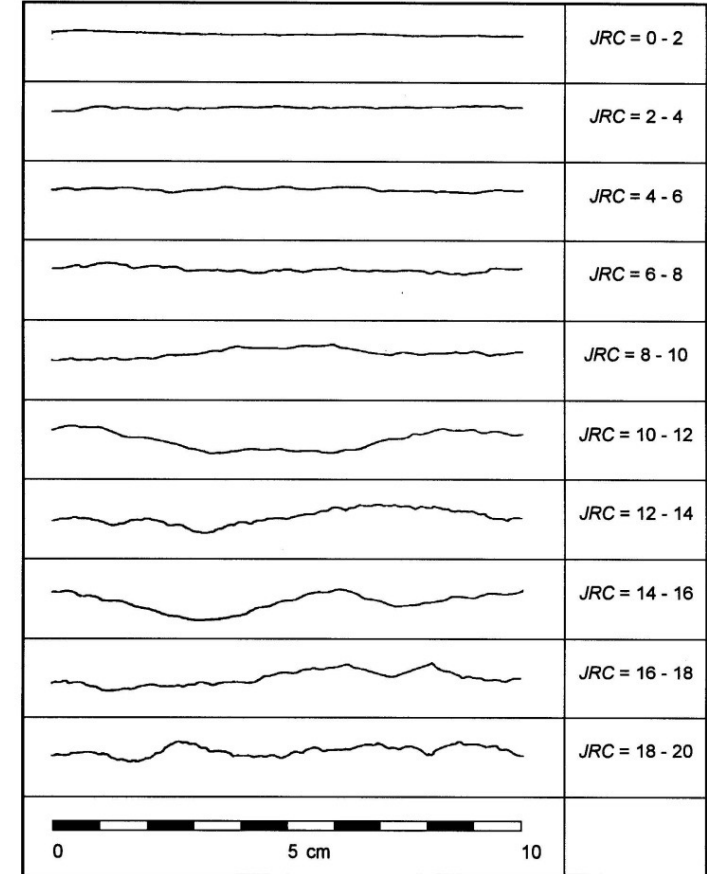
- d'abord à l'échelle métrique (marche, ondulé, plan)
- puis à l'échelle centimétrique (rugueux, aplani, lisse)

Le coefficient de rugosité du joint (Joint Roughness Coefficient JRC) est un indice **quantitatif** de la rugosité, variant de 0 pour une surface plane et lisse à 20 pour une surface très rugueuse. La rugosité du joint est liée à une échelle géométrique.

1.5 Rugosité des discontinuités

Estimation du JRC

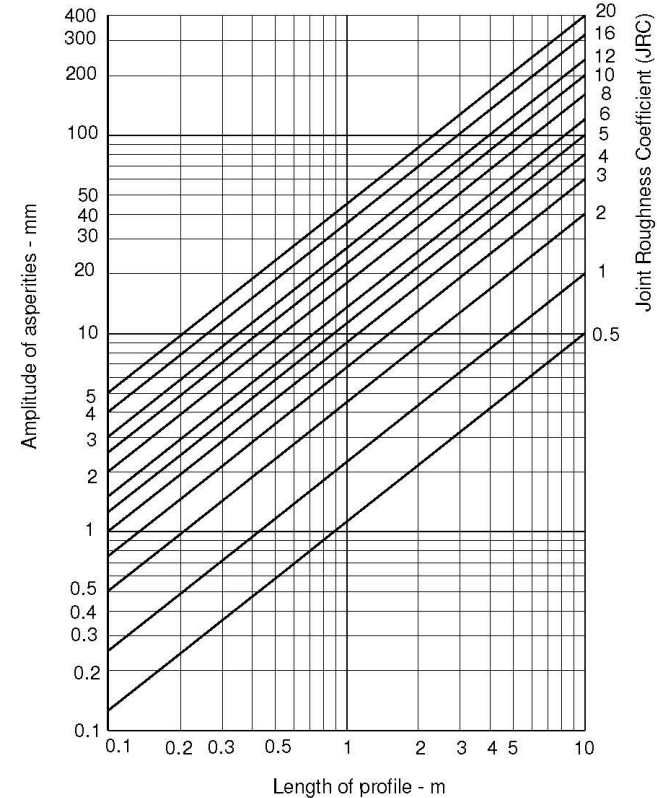
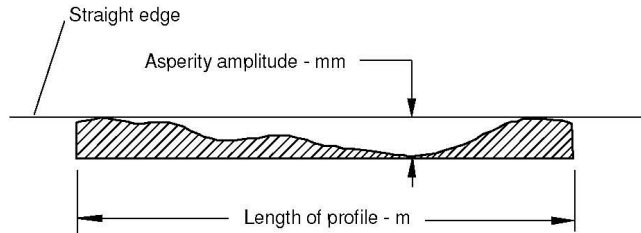
- Utilisation du peigne de Barton pour relever la rugosité du profil
- Comparaison du profil relevé avec des profils standards
- Détermination de la valeur de JRC correspondant au profil relevé



1.5 Rugosité des discontinuités

Estimation du JRC (joint roughness coeff)

- Choix d'un profil
- Mesure de la longueur du profil
- Mesure de l'amplitude maximale des aspérités sur le profil en question
- Détermination de la valeur correspondante de JRC dans l'abaque

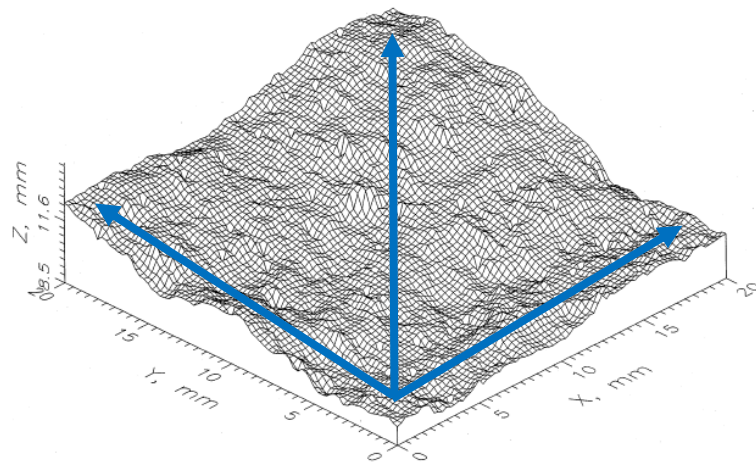


1.5 Rugosité des discontinuités



Rugosité d'un joint en 3D

En réalité, les profils de surface des joints ont des caractéristiques en 3D. Les descriptions de l'ISRM et le JRC étant basées sur des profils linéaires, il est donc suggéré d'en considérer plusieurs pour décrire et quantifier le JRC.



noter les variations des profils linéaires dans les diverses directions

La surface du joint est un profil rugueux qui peut être décrit par une méthode statistique et fractale.

1.5 Rugosité des discontinuités

Imbrication des joints

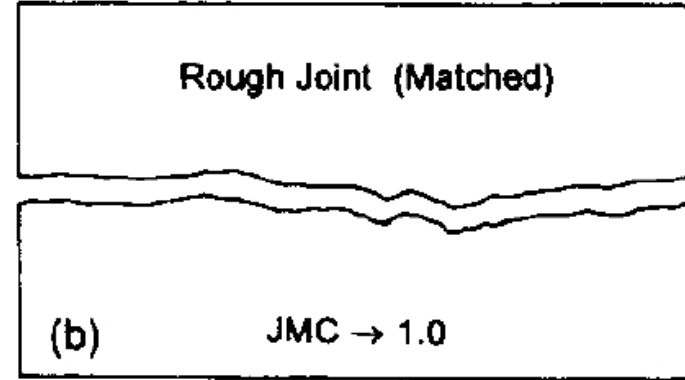
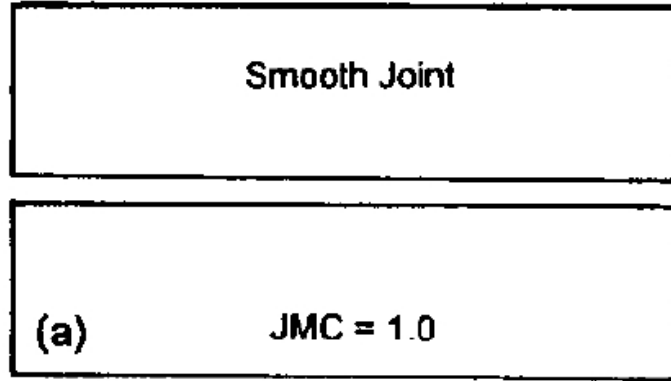
Un joint est l'interface de deux surfaces. En plus des profils, les propriétés du joint sont contrôlées par le positionnement relatif des deux surfaces.

Par exemple, des joints entièrement en contact et parfaitement imbriqués ont peu de possibilités de mouvement et il est aussi difficile de les cisailer.

En comparaison, le mouvement peut facilement avoir lieu pour des joints de même rugosité, mais avec des contacts ponctuels.

Les joints sont ainsi différenciés comme imbriqués ou pas.

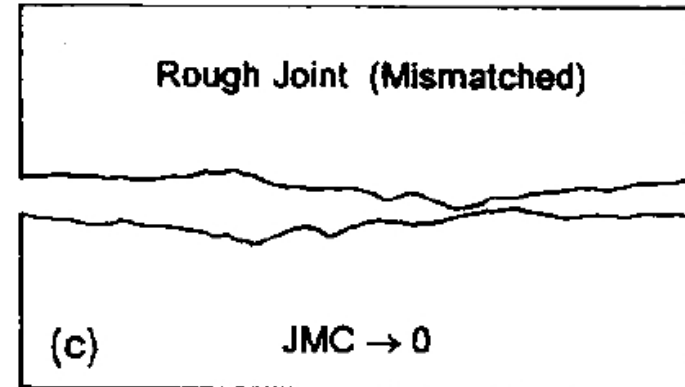
1.5 Rugosité des discontinuités



Un coefficient d'imbrication des joints (JMC, *Joint matching coefficient*) a été suggéré:

JMC vaut 1 pour un joint parfaitement imbriqué et avec les deux surfaces entièrement en contact.

JMC vaut 0 pour un joint non-imbriqué et avec les deux surfaces en contact à quelques endroits seulement.



1.6 Ouverture et remplissage des joints



Ouverture et remplissage du joint

Dans un joint naturel, il est très rare que les deux surfaces soient complètement en contact. Il existe normalement une ouverture ou un espace entre ces deux surfaces.

La distance perpendiculaire séparant les épontes (« parois » du joint) est appelée l'ouverture. Elle peut être remplie:

- d'air ou d'eau (joint ouvert)
- ou avec des matériaux de remplissage (joint rempli).

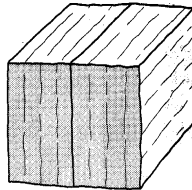
Les joints ouverts ou remplis avec de grandes ouvertures montrent une faible résistance au cisaillement.

1.6 Ouverture et remplissage des joints

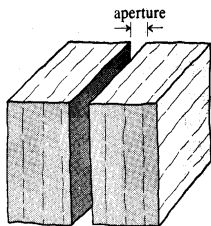
Classification de l'ouverture selon l'ISRM

Description	Ouverture
Très serré	$< 0.1 \text{ mm}$
Serré	$0.1 - 0.25 \text{ mm}$
Partiellement ouvert	$0.25 - 0.5 \text{ mm}$
Ouvert	$0.5 - 2.5 \text{ mm}$
Largement ouvert	$2.5 - 10 \text{ mm}$
Très largement ouvert	$1 - 10 \text{ cm}$
Extrêmement ouvert	$10 - 100 \text{ cm}$
Caverneux	$> 1 \text{ m}$

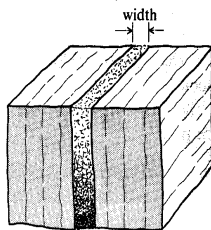
Closed discontinuity



Open discontinuity



Filled discontinuity



1.6 Ouverture et remplissage des joints



Ouverture et remplissage du joint

En termes d'écoulement et de perméabilité, l'ouverture peut être l'ouverture réelle mesurée ou une ouverture hydraulique équivalente.

Le remplissage est le matériel présent dans les discontinuités rocheuses, entre les deux épontes.

Les propriétés du matériel de remplissage affectent généralement la résistance au cisaillement, la déformabilité et la perméabilité des discontinuités.

1.7 Degré d'altération des discontinuités



L'altération résulte de deux processus:

- Une désintégration mécanique
- Une décomposition chimique

Le degré d'altération des épontes d'une discontinuité s'estime en comparant la résistance à la compression simple des parois du joint (JCS $\equiv$ Joint Compressive Strenght) avec la résistance à la compression simple de la roche intacte ($UCS = \sigma_{ci}$).

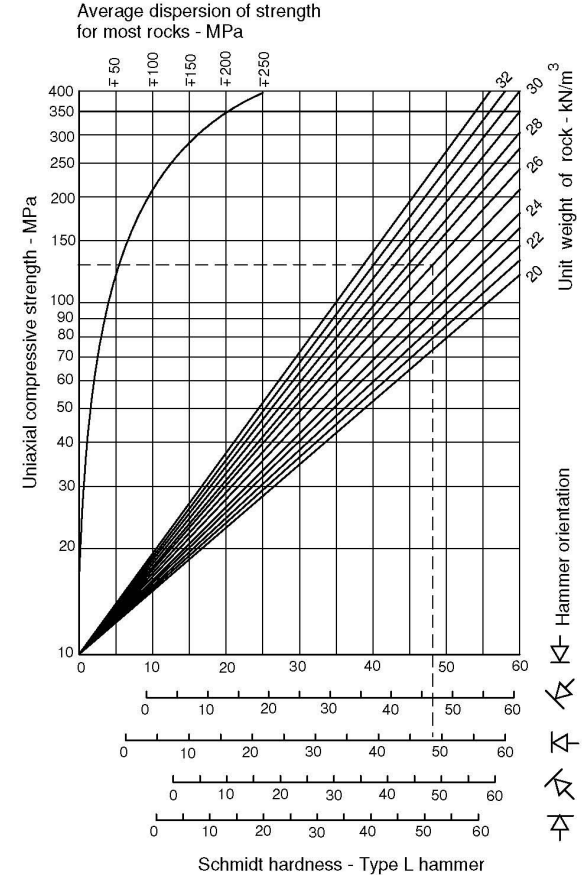
- | | |
|----------------------|-------------------------|
| ❖ joint frais: | $JCS = \sigma_{ci}$ |
| ❖ joint peu altéré: | $JCS = 0.5 \sigma_{ci}$ |
| ❖ joint très altéré: | $JCS = 0.1 \sigma_{ci}$ |

1.7 Degré d'altération des discontinuités

Le marteau de Schmidt (scléromètre) est utilisé in situ pour estimer la résistance à la compression des parois du joint (JCS). Elle s'obtient par un certain nombre de mesures du degré de dureté de Schmidt (! fonction de l'orientation de l'appareillage lors de la mesure !) combinées avec le poids volumique de la roche.



Scléromètre PCE



Caractérisation et comportement des discontinuités

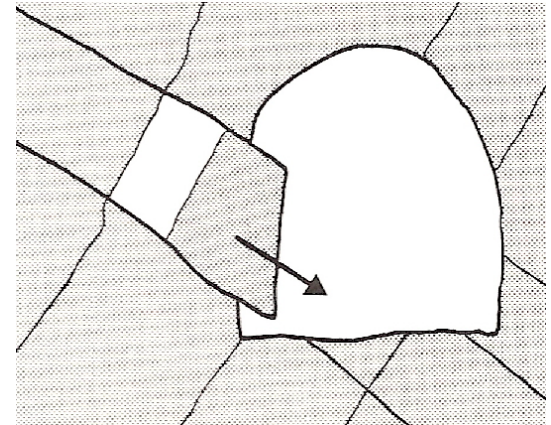
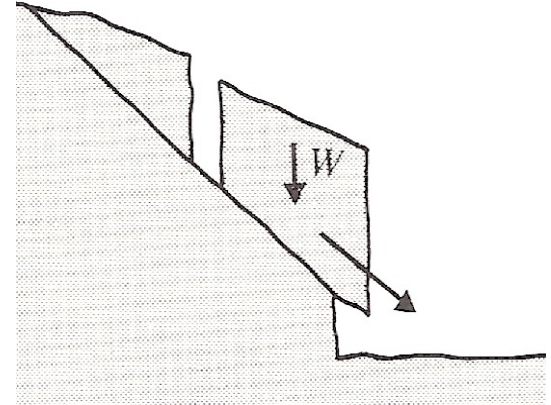
1. Caractérisation des discontinuités
2. **Comportement sous sollicitation en cisaillement**
 - 2.1. Joint lisse
 - 2.2. Joint rugueux idéalisé
 - 2.3. Joint rugueux réel
 - 2.4. Facteurs influents
 - 2.5. Essais
3. Comportement sous sollicitation normale
4. Ecoulement dans les joints

2. Degré d'altération des discontinuités

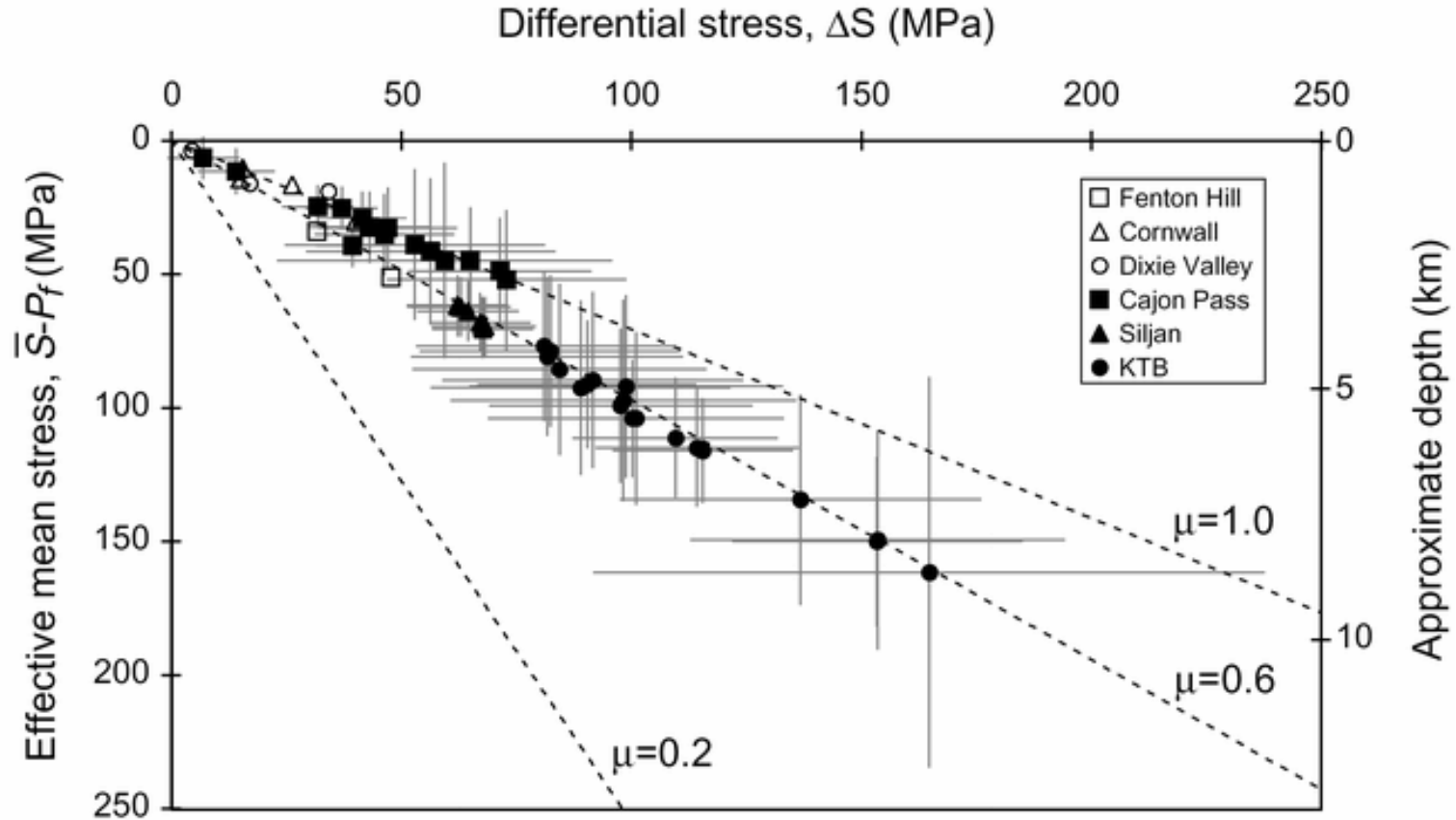
Résistance au cisaillement des joints

Le comportement au cisaillement des joints est une des questions les plus importantes en mécanique des roches et dans ses applications au domaine du génie civil.

Les conditions de glissement de blocs rocheux le long de discontinuités existantes dans des talus ou des excavations sont régies par la résistance au cisaillement développée sur ces discontinuités.



2. Degré d'altération des discontinuités

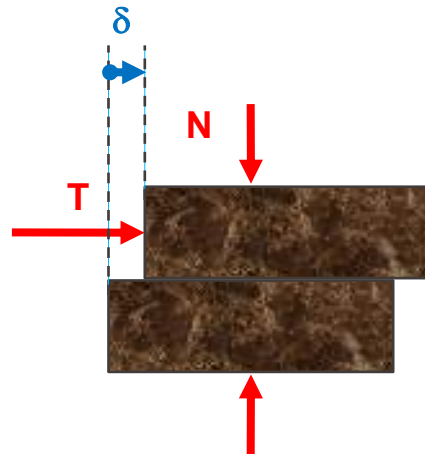


Townend and Zoback, Geology, 2000

2.1 Cisaillement d'un joint lisse

Joint de surface plane et lisse

Augmentation rapide de la contrainte de cisaillement τ avec le déplacement δ jusqu'à une valeur seuil; ensuite la contrainte de cisaillement demeure constante à cette valeur seuil. Il n'y a pas de dilatance lors du cisaillement.



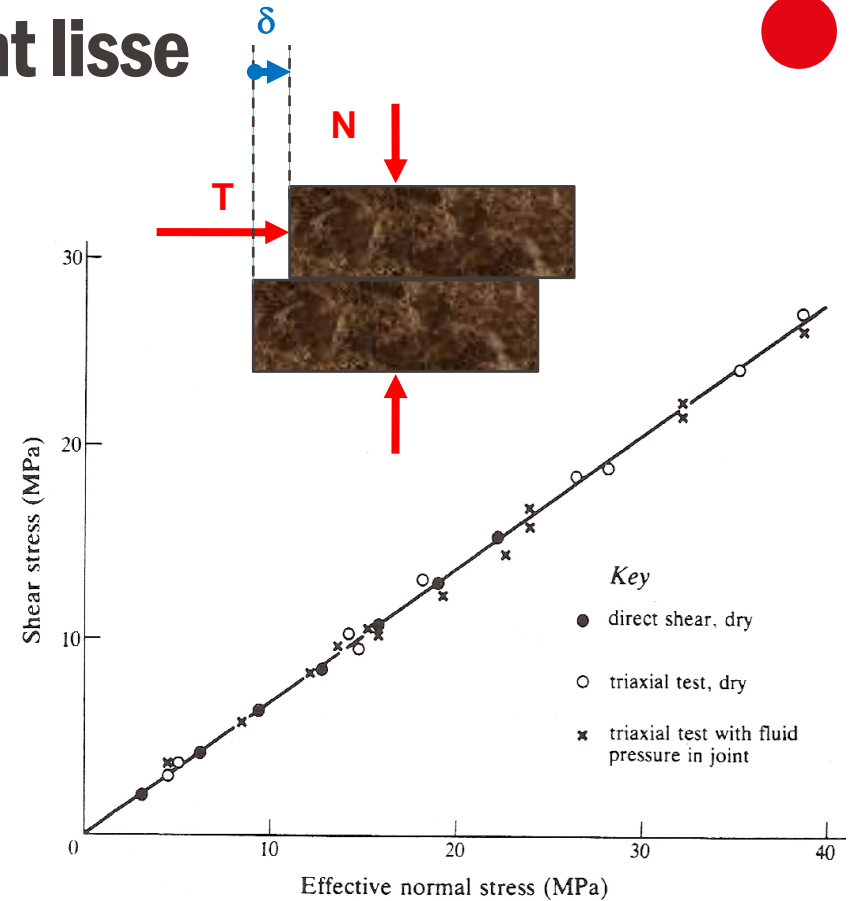
2.1 Cisaillement d'un joint lisse

Le cisaillement d'un joint lisse est régi par la théorie du frottement:

$$\tau = \sigma_n \tan \phi$$

$\phi = \phi_b$ est souvent appelé l'angle de frottement de base (obtenu sur des épontes sciées en laboratoire).

Pour la plupart des roches, ϕ_b varie entre 25 et 35°.



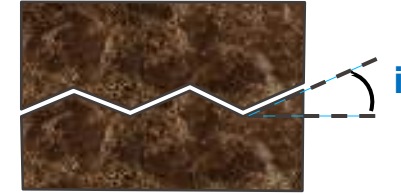
Essais sur des surfaces lisses de quartzite

2.2 Cisaillement d'un joint rugueux idéalisé



Joint “en dents de scie” (Patton, 1966)

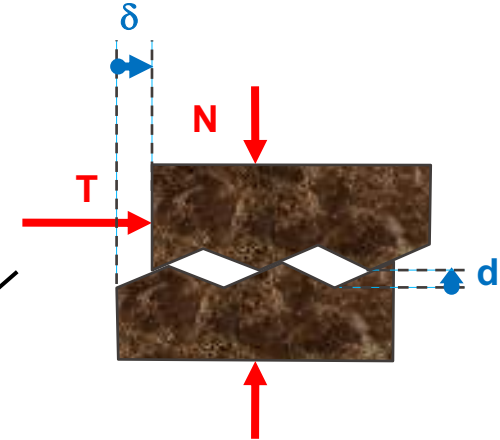
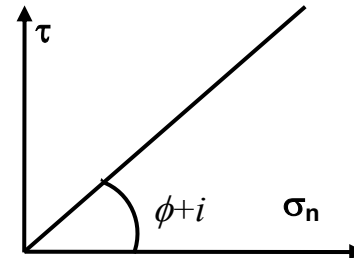
aspérités régulières (symétrique)
d'inclinaison i [°]



Contrainte normale σ_n faible

La résistance au cisaillement est donnée par la condition de glissement sur un plan lisse incliné de i ° :

$$\tau = \sigma_n \tan (\phi + i)$$

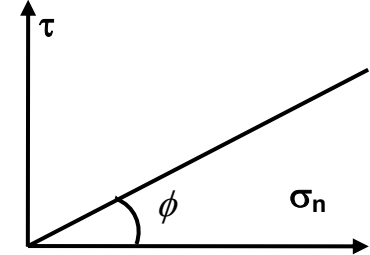
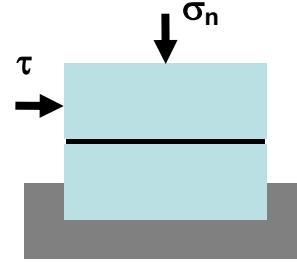


2.2 Cisaillement d'un joint rugueux idéalisé



Glissement sur un plan lisse horizontal

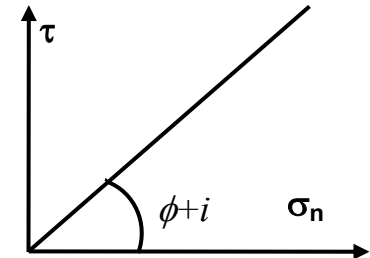
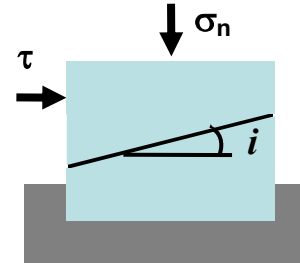
$$\tau = \sigma_n \tan \phi$$



Glissement sur un plan lisse incliné

Sur la surface de contact

- la contrainte normale vaut:
 $\sigma_n \cos(i) + \tau \sin(i)$
- la contrainte de cisaillement vaut:
 $\tau \cos(i) - \sigma_n \sin(i)$



Il y a glissement si:

$$\tau \cos(i) - \sigma_n \sin(i) = [\sigma_n \cos(i) + \tau \sin(i)] \tan \phi$$

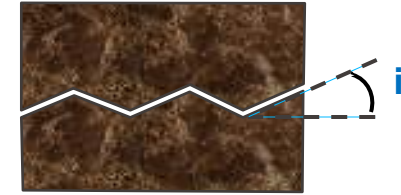
$$\tau - \sigma_n \tan(i) = [\sigma_n + \tau \tan(i)] \tan \phi$$

$$\tau = \frac{\sigma_n [\tan \phi + \tan(i)]}{1 - \tan \phi \tan(i)} \quad \rightarrow \quad \tau = \sigma_n \tan (\phi + i)$$

2.2 Cisaillement d'un joint rugueux idéalisé



Joint “en dents de scie” (Patton, 1966)
aspérités régulières d'inclinaison i [°]

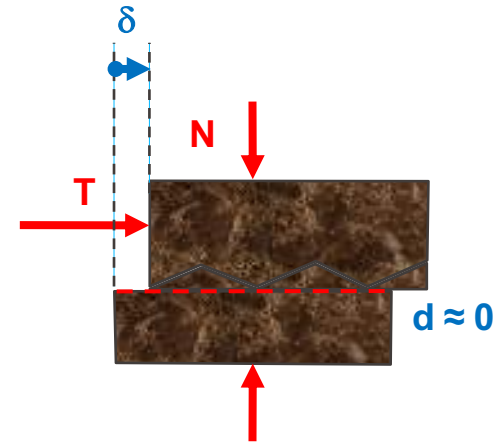


Contrainte normale σ_n élevée

La rupture se produit à travers les aspérités. Dans une telle situation, la résistance au cisaillement dépend de la résistance du matériau constitutif des aspérités.

$$\tau = \sigma_n \tan \phi + c^*$$

c^* : cohésion d'imbrication



Rock Friction

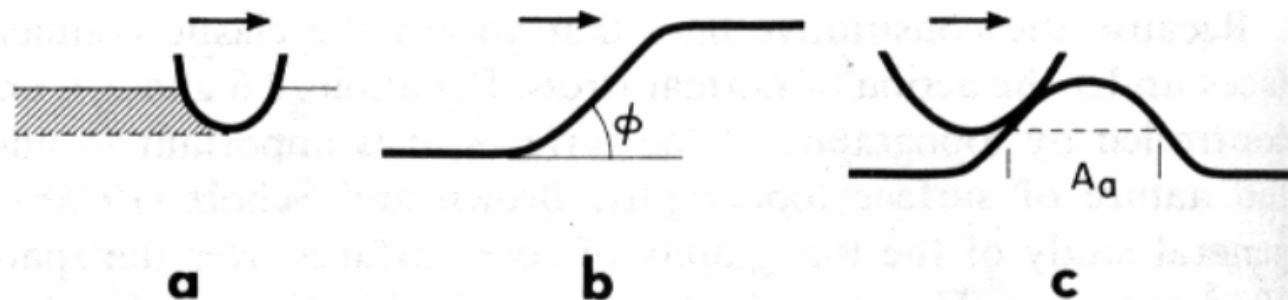
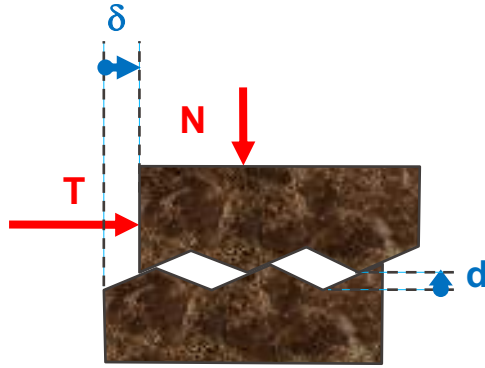


Fig. 2.4 Several types of asperity interactions: (a) ploughing; (b) riding up; (c) interlocking.

2.2 Cisaillement d'un joint rugueux idéalisé



Contrainte
normale
 σ_n faible

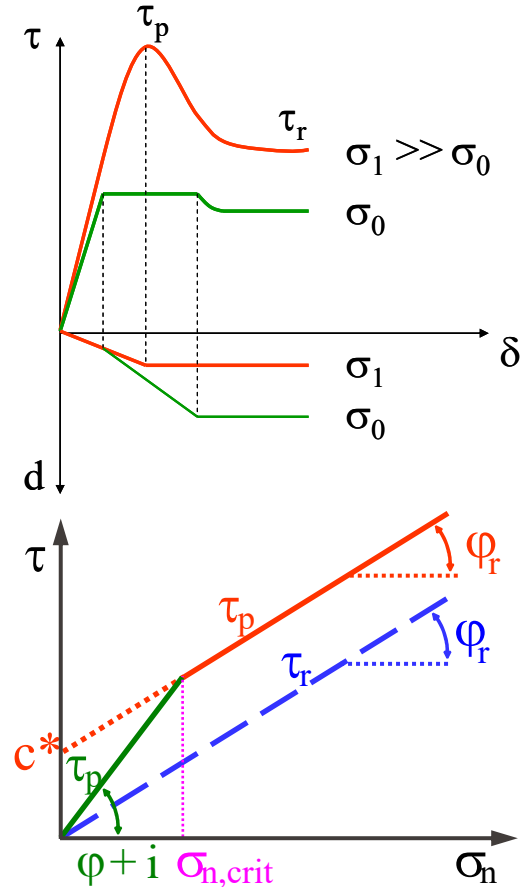
Augmentation rapide de la contrainte de cisaillement jusqu'à une valeur de pointe:

$$\tau_p = \sigma_n \tan(\phi + i)$$

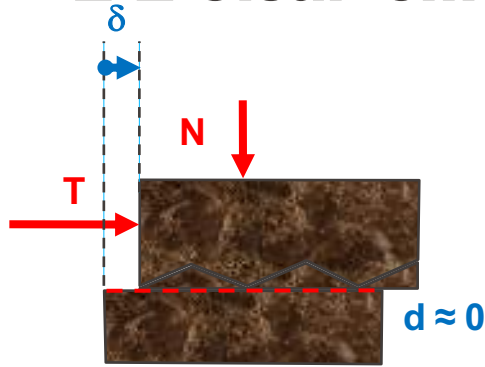
Ensuite stabilisation de la contrainte de cisaillement à une valeur résiduelle lorsque la déformation se poursuit.

$$\tau_r = \sigma_n \tan \phi_r$$

Le glissement s'accompagne d'un soulèvement le long des aspérités (dilatance).



2.2 Cisaillement d'un joint rugueux idéalisé



*Contrainte
normale
 σ_n élevée*

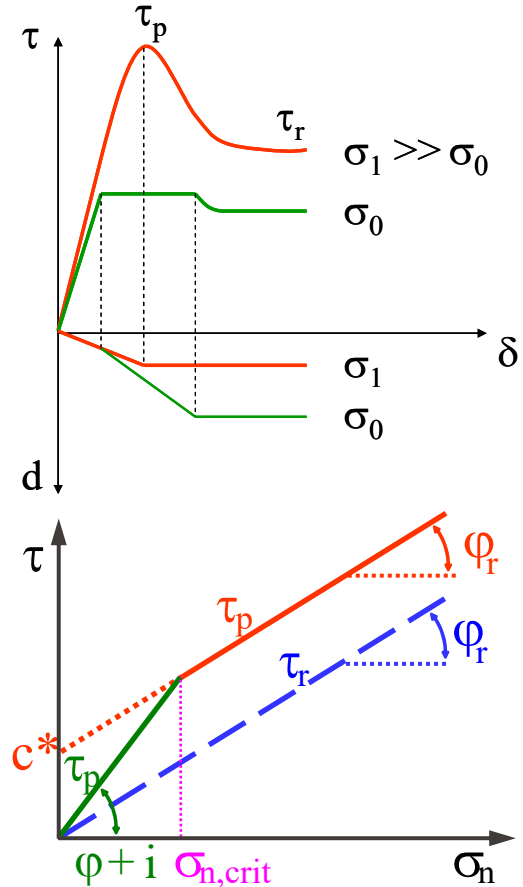
Augmentation rapide de la contrainte de cisaillement jusqu'à une valeur de pointe:

$$\tau_p = \sigma_n \tan \phi_r + c^*$$

Ensuite stabilisation de la contrainte de cisaillement à une valeur résiduelle lorsque la déformation se poursuit.

$$\tau_r = \sigma_n \tan \phi_r$$

Comme il y a cisaillement des aspérités, il y a peu de soulèvement (peu de dilatance)



2.2 Cisaillement d'un joint rugueux idéalisé

Modèle bilinéaire pour la résistance au cisaillement

La résistance au cisaillement (valeur de pic) pour un joint rugueux peut être atteinte de 2 manières:

- un glissement montant le long des aspérités à faible contrainte normale

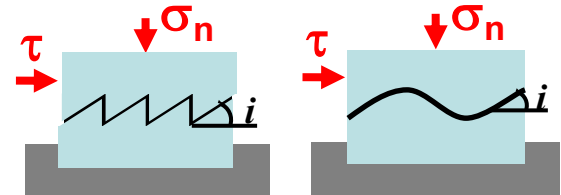
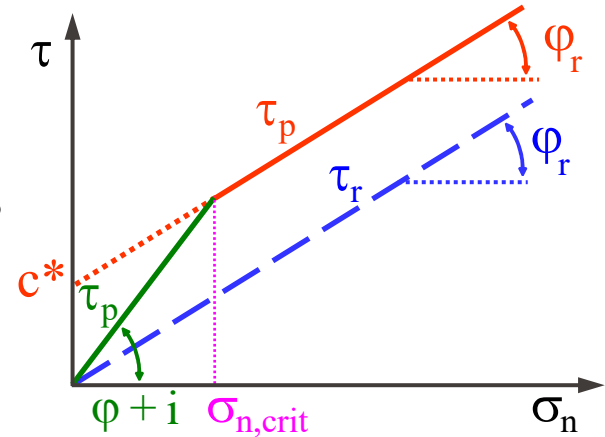
$$\tau_p = \sigma_n \tan (\phi + i) \quad \sigma_n < \sigma_{n,crit}$$

- un cisaillement à travers les aspérités sous une contrainte normale élevée

$$\tau_p = \sigma_n \tan \phi_r + c^* \quad \sigma_n > \sigma_{n,crit}$$

La résistance au cisaillement résiduelle est dans les 2 cas donnée par:

$$\tau_r = \sigma_n \tan \phi_r$$



2.3 Cisaillement d'un joint rugueux réel

Joint avec une surface irrégulière

aspérités avec une inclinaison variable

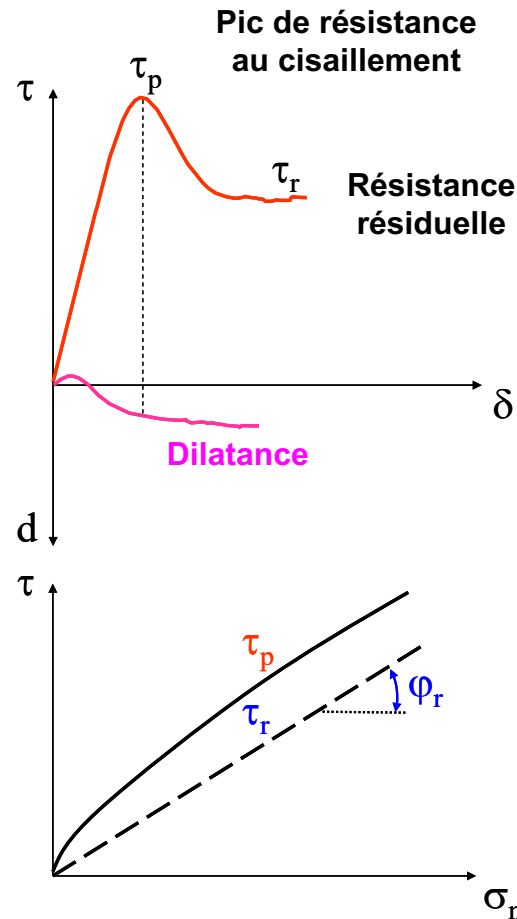


Comportement observé :

- rupture progressive des aspérités
- résistances de pointe et résiduelle
- développement d'une dilatance

Résistance au cisaillement de pointe :

- pas de limite claire entre le glissement le long des aspérités et le cisaillement à travers les aspérités)
- Critère de résistance non linéaire



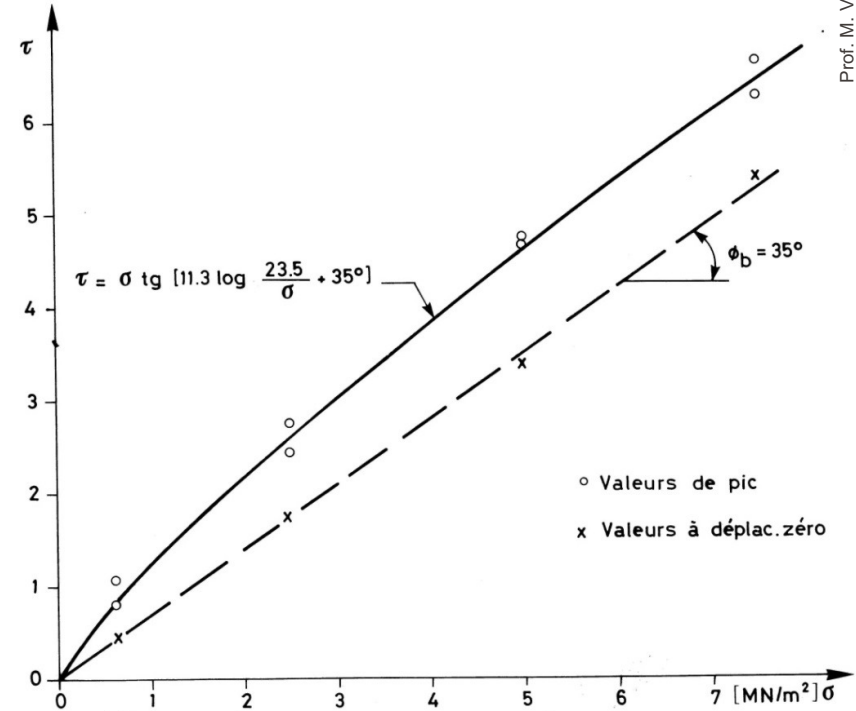
2.3 Cisaillement d'un joint rugueux réel



Le critère pour la résistance de pic est non linéaire:

- A faible contrainte normale, l'angle de frottement pour les joints rugueux peut atteindre 70° .
- A forte contrainte normale, l'angle de frottement s'approche de ϕ_b (base).
- Entre les deux, il diminue progressivement avec l'augmentation de la contrainte normale.

Le critère pour la résistance résiduelle est linéaire.



Essais de cisaillement direct sur du Gneiss. Les cercles représentent la valeur de pic de la résistance au cisaillement, tandis que les croix sont relatives à la valeur résiduelle.

2.3 Cisaillement d'un joint rugueux réel

Modèle empirique de Barton (1973)

La résistance au cisaillement de pic τ_p pour un joint rugueux réel peut être exprimée par la relation empirique :

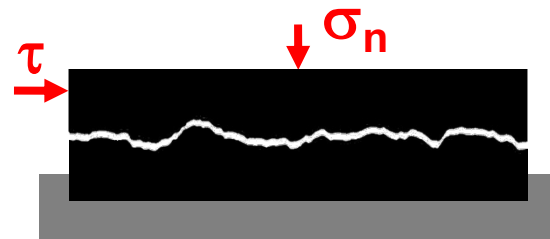
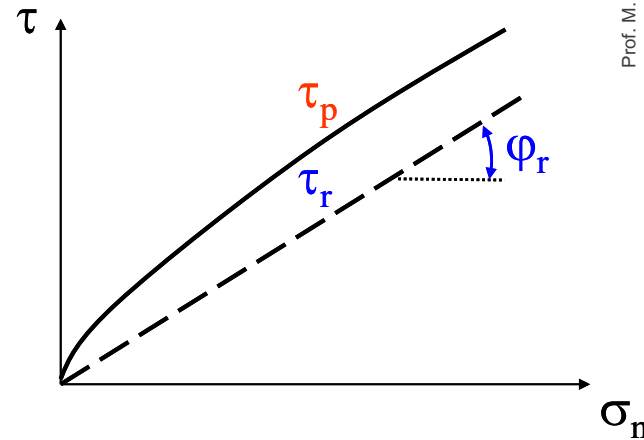
$$\tau_p = \sigma_n \tan \left(\text{JRC} \cdot \log_{10} \frac{\text{JCS}}{\sigma_n} + \phi_r \right)$$

avec:

- JRC = Coefficient de rugosité du joint
- JCS = Résistance à la compression du joint

La résistance au cisaillement résiduelle τ_r est donnée par:

$$\tau_r = \sigma_n \tan \phi_r$$



2.3 Cisaillement d'un joint rugueux réel



Commentaires sur le critère de résistance de Barton

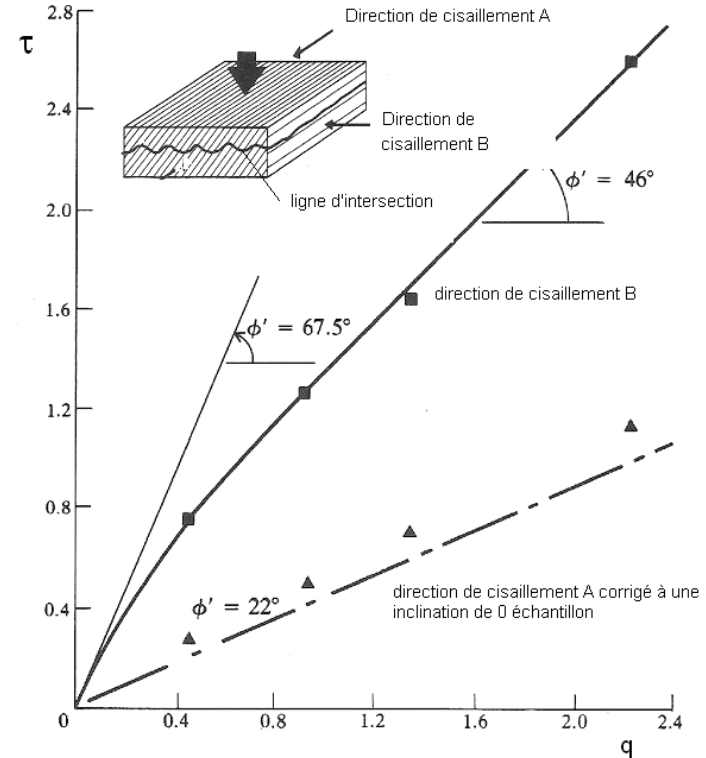
$$\tau_p = \sigma_n \tan \left(\text{JRC} \cdot \log_{10} \frac{\text{JCS}}{\sigma_n} + \phi_r \right)$$

- critère largement accepté et répandu en mécanique des roches.
- le 1^{er} terme de la parenthèse représente l'angle de dilatance (contribution de la dilatance à la résistance au cisaillement).
- plus les joints sont rugueux et imbriqués, plus le JRC est élevé, plus la dilatance est importante et dès lors la résistance au cisaillement τ_p également. A l'inverse, si $\text{JRC} = 0$ (joint lisse), la dilatance est nulle et $\tau_p = \tau_r = \sigma_n \tan \phi_r$
- si la surface du joint est altérée, la valeur de JCS est faible (et JRC dans une moindre mesure) et dès lors τ_p est plus faible.
- Lorsque σ_n s'approche de JCS, l'équation devient: $\tau_p = \sigma_n \tan \phi_r$

Direction de cisaillement

Le profil de la surface des joints est une caractéristique 3D, tandis que le cisaillement se fait selon une direction.

Le profil variant d'une direction à l'autre, la résistance au cisaillement diffère donc également.



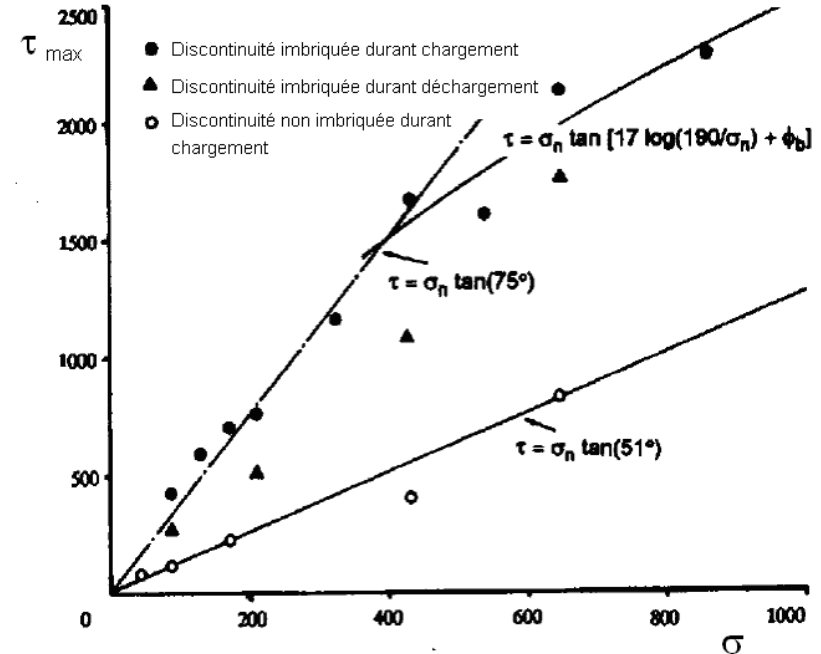
Effet de la direction de cisaillement sur la résistance d'un joint dans de l'ardoise

Imbrication et non-imbrication

Les joints naturels subissent l'érosion et l'altération. Cela change le degré d'imbrication des surfaces des joints.

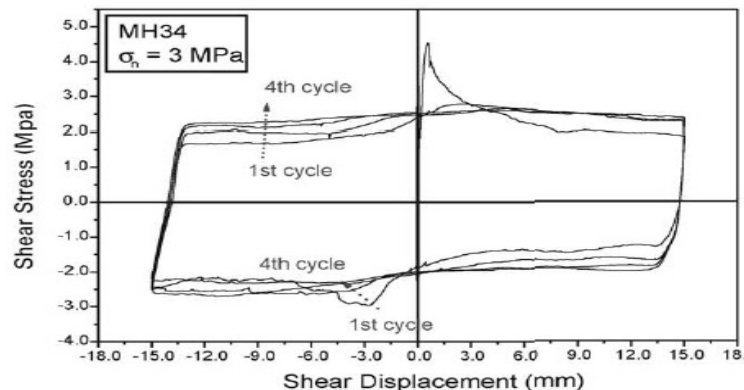
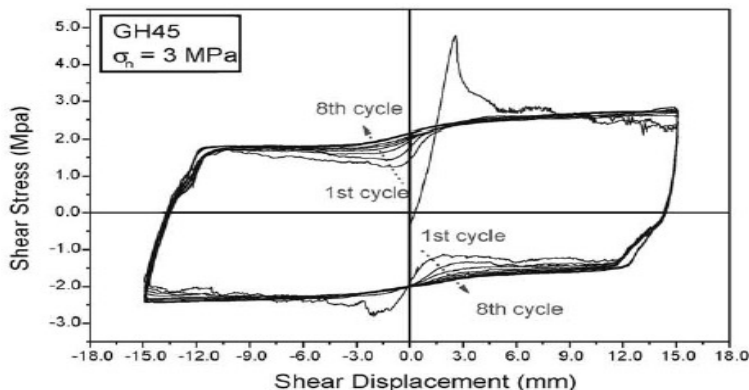
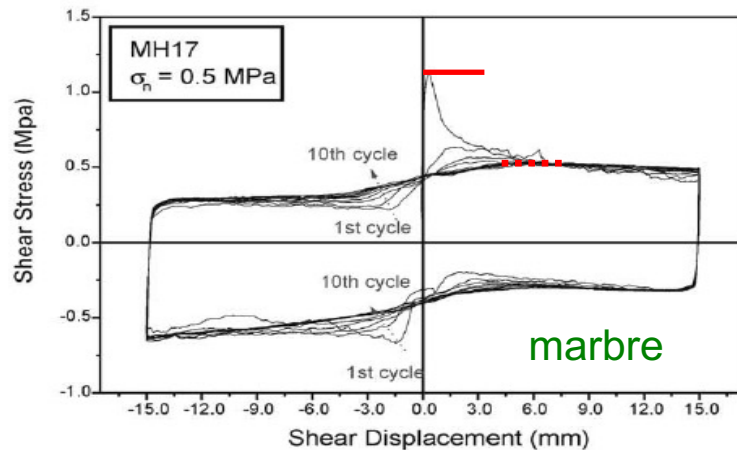
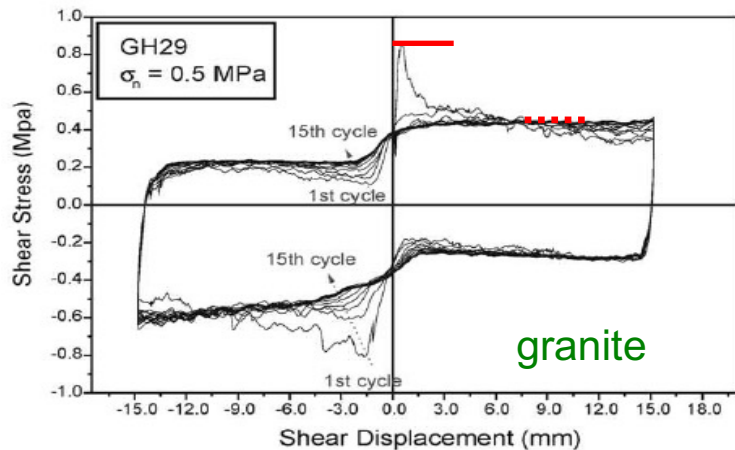
Les joints mal imbriqués ont généralement une résistance au cisaillement beaucoup plus faible que les joints imbriqués.

Ceci est aussi évident lors de sollicitations cycliques de cisaillement (usure du joint et réduction de l'imbrication).



Résistance au cisaillement de joints imbriqués et non-imbriqués dans un granite

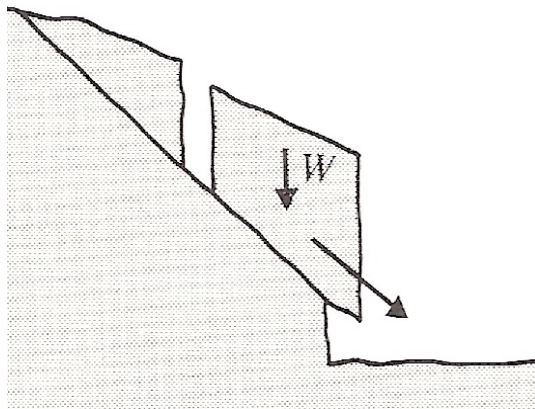
2.4 Facteurs influençant le cisaillement



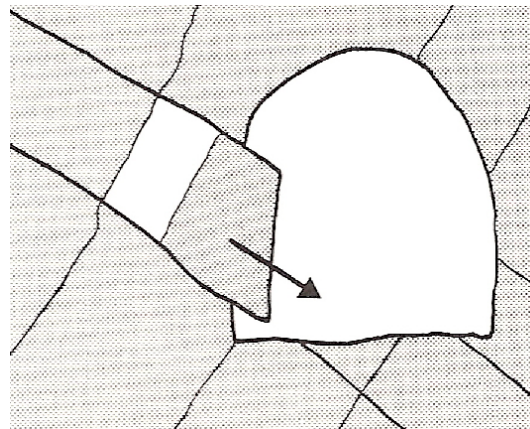
2.4 Facteurs influençant le cisaillement

Dilatance libre ou empêchée

Selon que la dilatance subie par le joint lors du cisaillement soit libre ou empêchée, la contrainte normale sur le joint demeure constante ou s'accroît. Ceci peut modifier considérablement la résistance au cisaillement.



cisaillement soumis à une charge normale constante générée par le poids des blocs.



cisaillement soumis à une rigidité constante due aux effets de la dilatance empêchée.

Eau et pression d'eau

Lorsqu'un joint est humide, il a généralement un angle de frottement un peu plus faible qu'un joint sec. La résistance au cisaillement est alors calculée en utilisant un angle de frottement humide (et drainé).

Si un joint est soumis à une pression d'eau, la contrainte normale dans l'équation de la résistance au cisaillement est la contrainte normale effective:

$$\sigma'_n = \sigma_n - pp$$

avec

σ'_n

contrainte normale effective

σ_n

contrainte normale totale

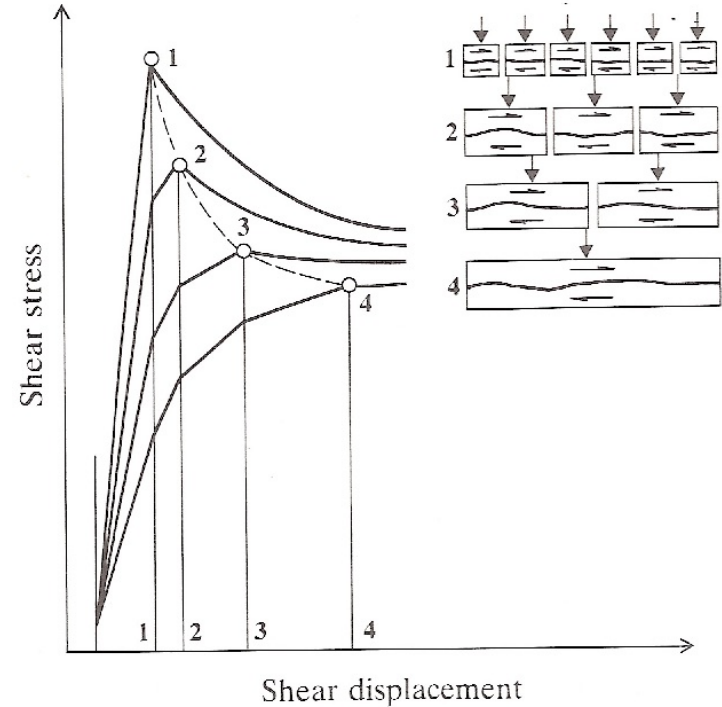
pp

pression interstitielle.

Effet d'échelle

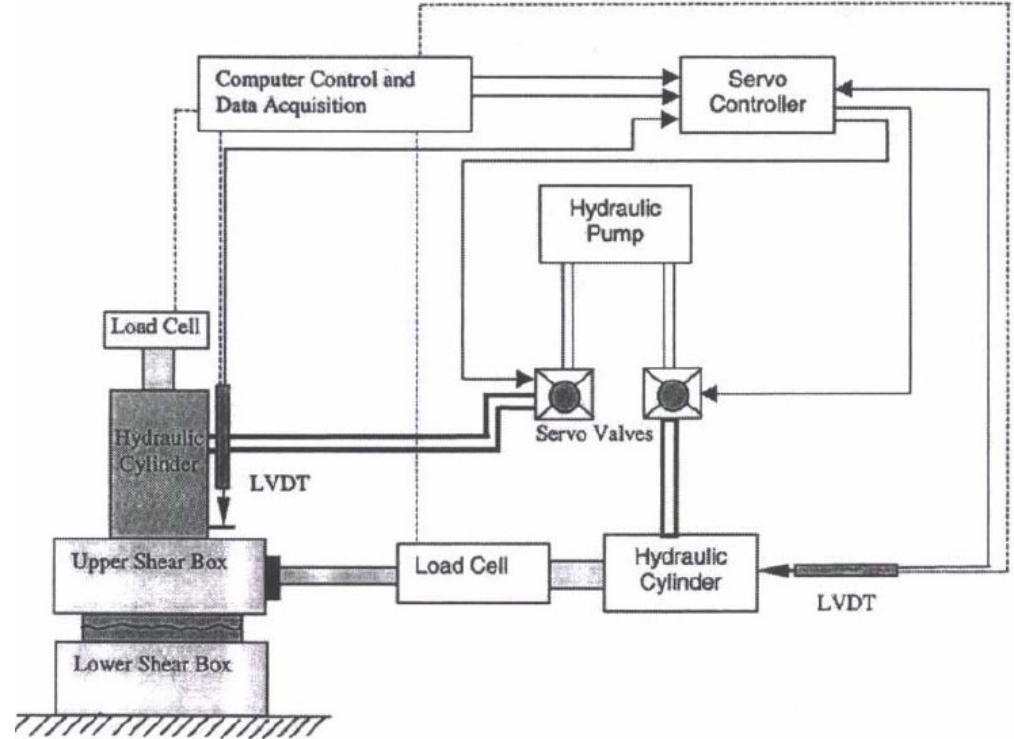
La résistance au cisaillement d'un joint rugueux dépend de l'échelle. À mesure que l'échelle augmente, les aspérités les plus raides se cisailent et l'angle de dilatance diminue.

De même, la part de résistance liée à la dilatance diminue avec une augmentation de l'échelle, car la résistance à la compression des épontes (JCS) diminue avec l'augmentation de la taille.



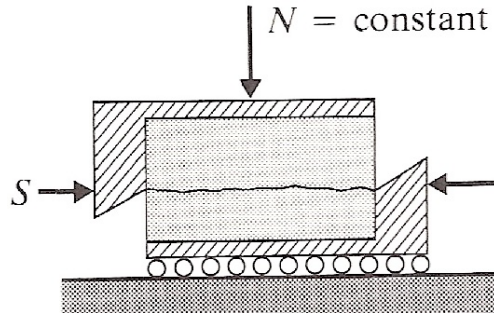
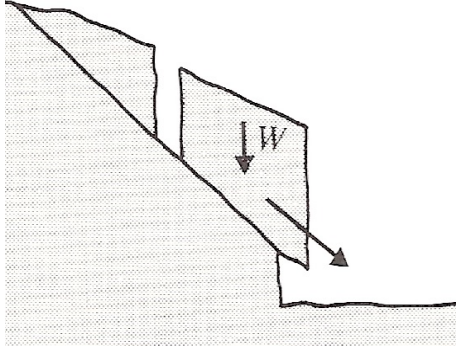
Influence de l'échelle d'un bloc sur la résistance au cisaillement d'une discontinuité

2.4 Facteurs influençant le cisaillement

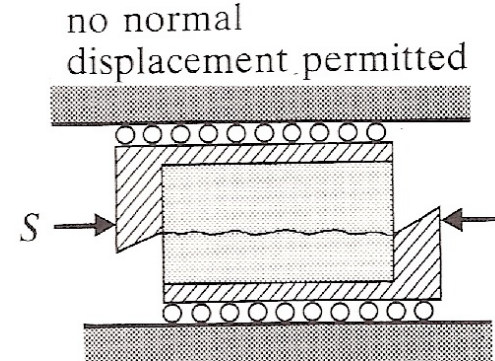
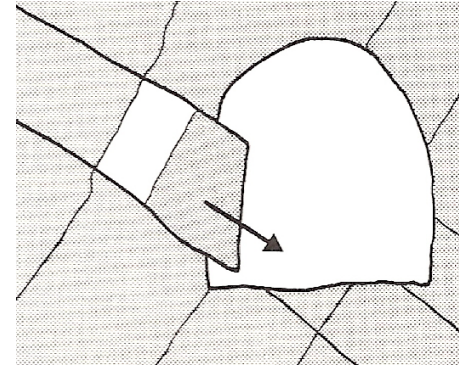


Équipement typique d'essais servo-contrôlés de cisaillement direct sur joints rocheux

2.5 Essais de laboratoire



*Essai de cisaillement sous
contrainte normale constante*

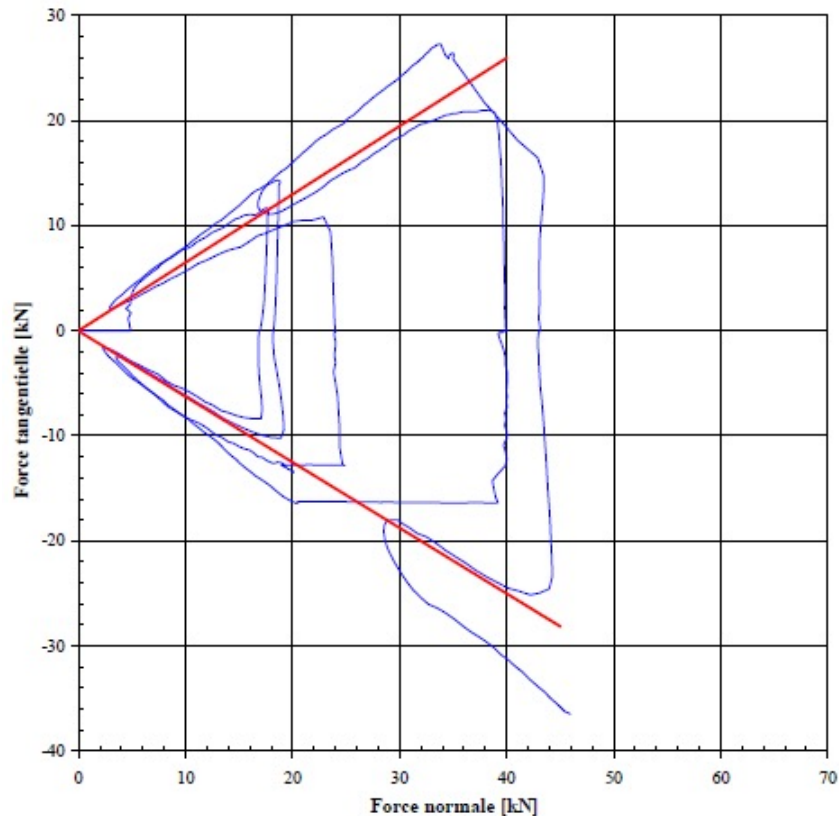


*Essai de cisaillement
sous rigidité constante*



Les deux parties de l'échantillon situées de part et d'autre de la discontinuité sont scellées au mortier dans des boîtes métalliques.

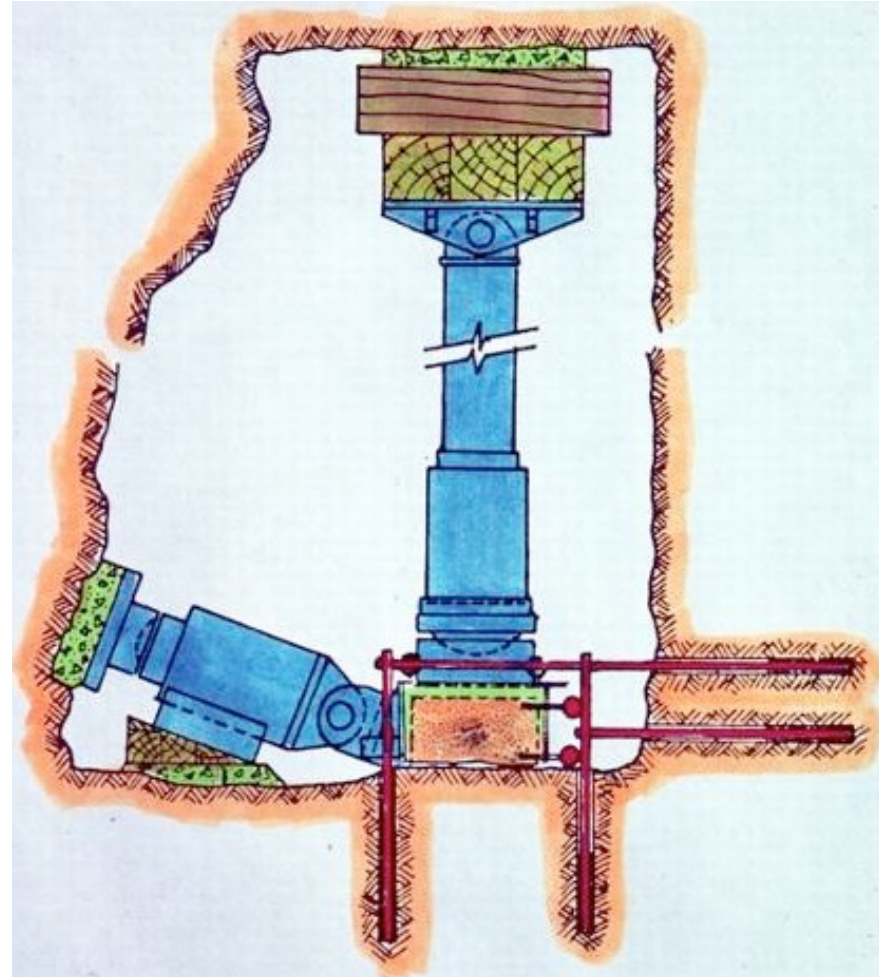
Durant l'essai on impose un déplacement relatif des deux boîtes à vitesse constante en enregistrant les forces normale et tangentielle engendrées au cours du cisaillement.



Résultat typique d'essai de cisaillement sur joint rocheux dans l'appareil « Lombardi ».

2.5 Essais in situ

Dispositif type d'essai
de cisaillement
in situ



Caractérisation et comportement des discontinuités

1. Caractérisation des discontinuités
2. Comportement sous sollicitation en cisaillement
- 3. Comportement sous sollicitation normale**
 - 3.1. Joint en contact parfait**
 - 3.2. Joint à contact partiel idéalisé**
 - 3.3. Joint réel**
4. Ecoulement dans les joints

3.1 Loi $\sigma - \varepsilon$ d'un joint en contact parfait



Pour une **interface complètement soudée** entre deux matériaux différents, on trouve une continuité aussi bien de la contrainte que du déplacement. La discontinuité est due au changement de matériau à l'interface.

Pour une **discontinuité en contact parfait**, la contrainte normale et le déplacement normal sont continus et peuvent donc être traités selon une approche de milieu continu. Par contre, sur le plan de rupture, glissement ou cisaillement peuvent se produire. En particulier, pour une interface lisse en contact total, l'interface représente un plan faible de cisaillement.

3.2 Loi $\sigma - \varepsilon$ d'un joint en contact partiel



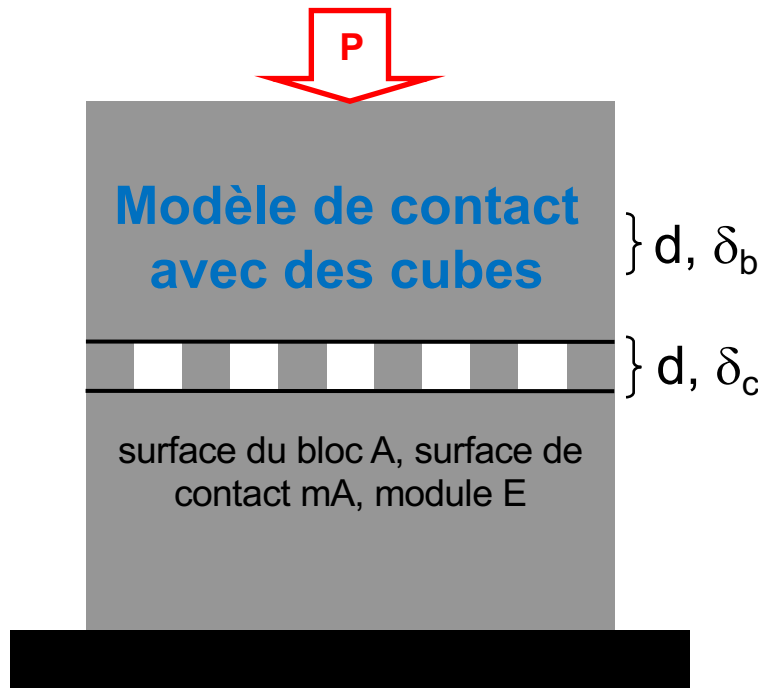
Pour les fissures à contact partiel, il y a des vides entre les deux parois. Contraintes et déplacements sont discontinus.

- La contrainte normale sur les parois de la fracture est nulle, mais il y a des concentrations de contraintes aux points de contact. Le champ de contraintes n'est donc plus le même que dans un matériau continu.
- Le déplacement normal peut être beaucoup plus grand dans la fissure que dans le matériau.

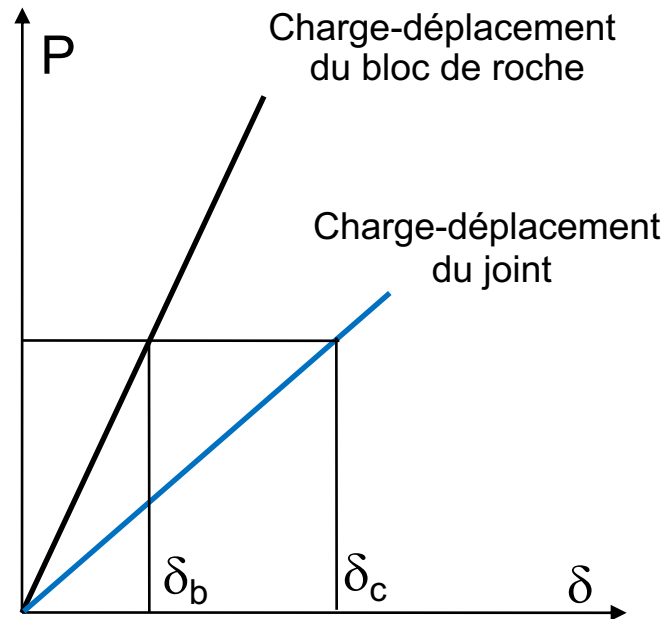
La relation contrainte-déplacement peut être idéalisée au moyen de 2 modèles:

- Modèle de contact avec des cubes
- Modèle de contact avec des prismes

3.2 Loi d'un joint à contact partiel idéalisé



- Le matériau du bloc de roche et du joint est le même
- La surface de contact ne change pas. Elle vaut mA avec $0 < m < 1$



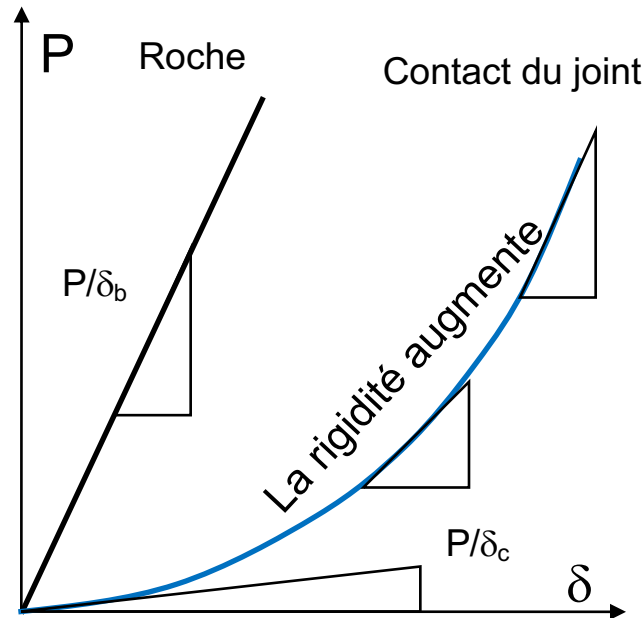
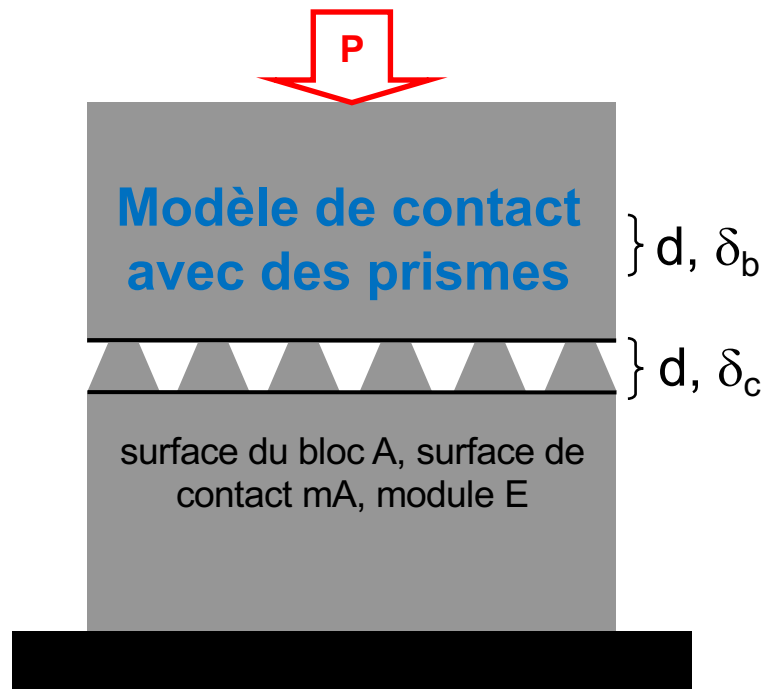
$$\delta_b = (P d) / (A E)$$

$$\delta_c = (P d) / (m A E)$$

$$\delta_c = \delta_b / m$$

$$P/\delta_c = m P/\delta_b$$

3.2 Loi d'un joint à contact partiel idéalisé



- Le matériau du bloc de roche et du joint est le même
- La surface de contact augmente avec la fermeture du contact. Elle vaut mA avec $n < m < 1$

En condition initiale:
 $P/\delta_c = n P/\delta_b$

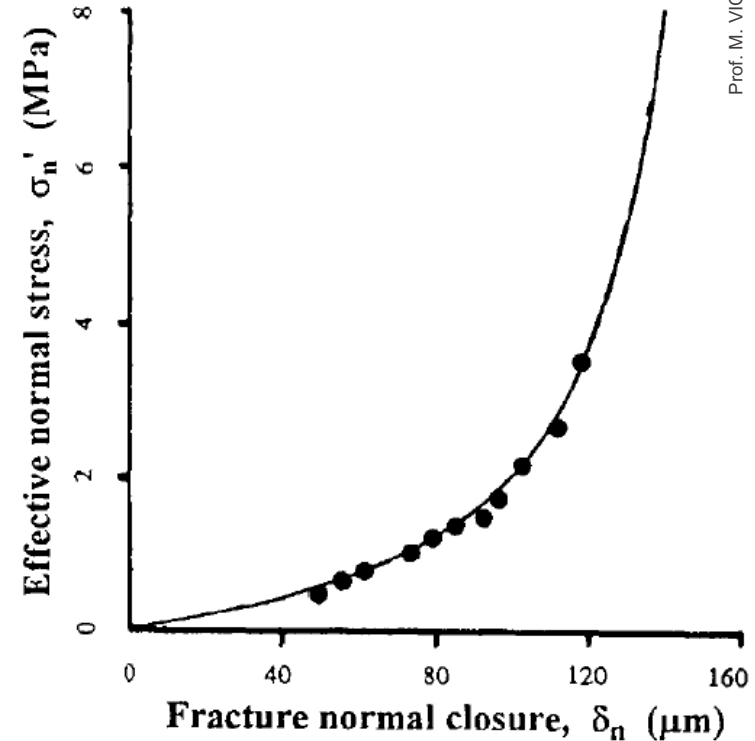
À la fermeture complète:
 $P/\delta_c = P/\delta_b$

3.3 Loi $\sigma - \varepsilon$ d'un joint réel

Sous une augmentation de contrainte normale, un joint naturel va progressivement se fermer et les zones de contact grandissent.

La courbe contrainte normale – déplacement n'est donc pas linéaire et la rigidité normale, pente de la courbe, n'est pas constante.

Sous forte contrainte normale, le joint est complètement fermé; le déplacement est alors uniquement dû à la déformation de la roche.



courbe contrainte-déplacement d'un joint naturel dans un granite, montrant le caractère non linéaire de la rigidité de joint.

3.3 Loi $\sigma - \varepsilon$ d'un joint réel



Équations de la rigidité normale

- Équation hyperbolique
(Goodman)

$$\frac{\sigma_n - \sigma_{ni}}{\sigma_{ni}} = A \left(\frac{d_n}{d_{\max} - d_n} \right)^t$$

σ_n = contrainte normale

σ_{ni} = contrainte normale initiale

d_n = déplacement normal

$d_{\max}$ = fermeture maximale possible

A et t = constantes déterminées expérimentalement

- Équation logarithmique
(Zhao-Brown)

$$\frac{d_{\max} - d_n}{d_{\max} - d_{ni}} = 1 - A \ln(\sigma_n / \sigma_{ni})$$

d_{ni} = déplacement à une contrainte normale de référence

σ_{ni} = contrainte normale initiale

A = constante variant entre 0.16 et 0.21.

3.3 Loi $\sigma - \varepsilon$ d'un joint réel

Équations de la rigidité normale

- Équation hyperbolique joints naturels imbriqués

σ_n = contrainte normale

d_n = déplacement normal

$d_{\max}$ = fermeture maximale possible

k_{ni} = rigidité normale de la fissure à contrainte initiale

$$\sigma_n = \frac{k_{ni} d_n}{1 - (d_n/d_{\max})}$$

$$d_n = \frac{\sigma_n}{k_{ni} + (\sigma_n/d_{\max})}$$

- Équation semi-logarithmique joints mal imbriqués

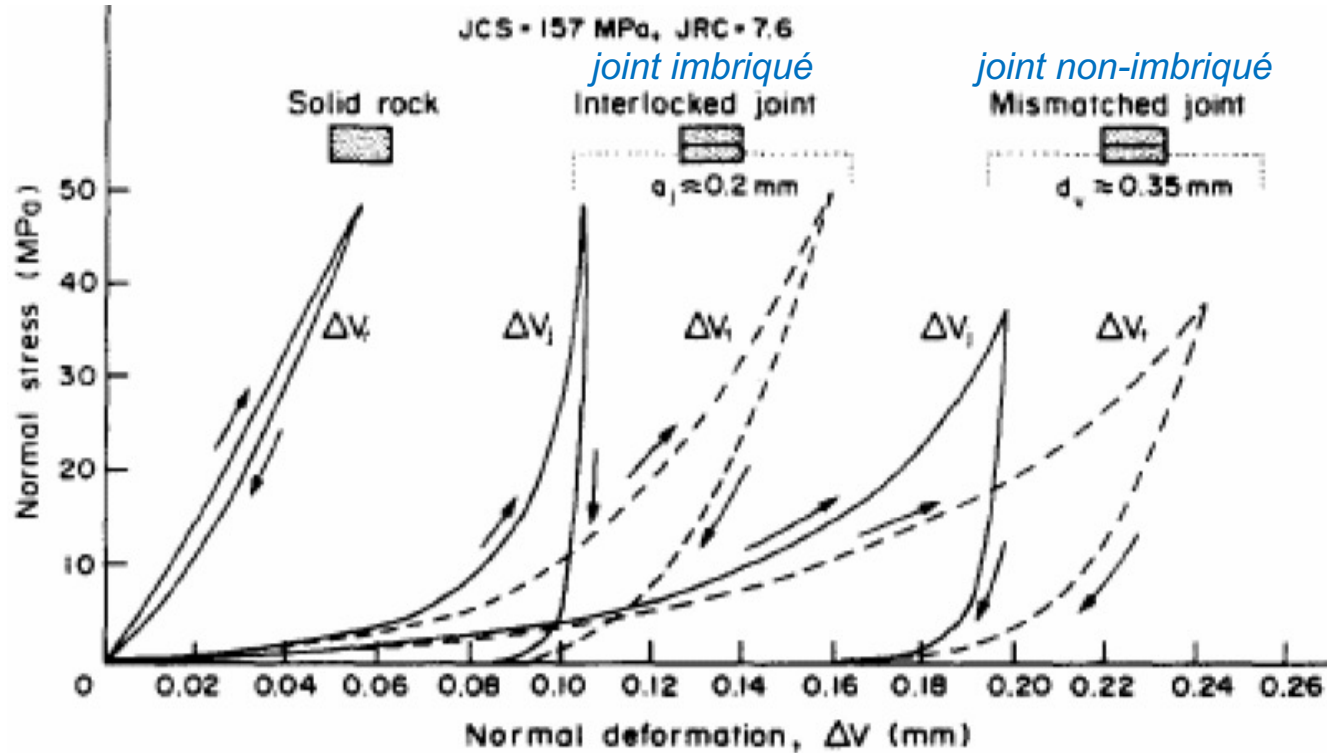
σ_n = contrainte normale

d_n = déplacement normal

p et q = constantes du matériau

$$\log \sigma_n = p + q d_n$$

3.3 Loi $\sigma - \varepsilon$ d'un joint réel



Différence de déformation normale entre joints imbriqués et non-imbriqués

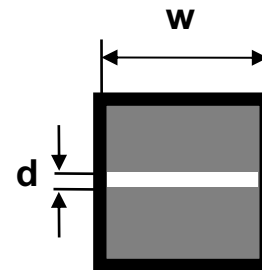
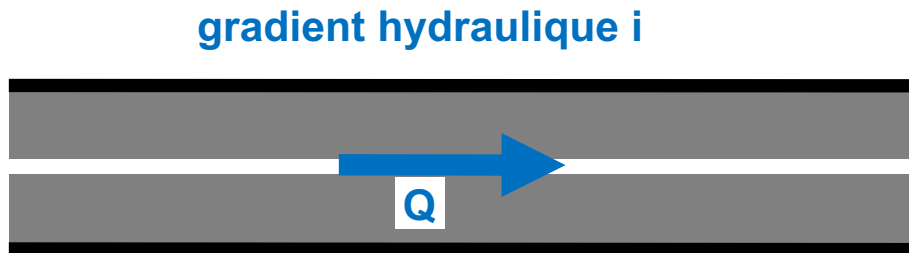
Caractérisation et comportement des discontinuités

1. Caractérisation des discontinuités
2. Comportement sous sollicitation en cisaillement
3. Comportement sous sollicitation normale
- 4. Ecoulement dans les joints**
 - 4.1. Joints lisses parallèles**
 - 4.2. Joints réels**
 - 4.3. Facteurs influents**

4.1 Écoulement dans un joint lisse parallèle

Théorie des plans parallèles

Pour l'écoulement d'un fluide visqueux entre deux plans parallèles proches (p. ex., joints rocheux), la loi de Darcy est applicable pour autant que l'écoulement soit laminaire.



Pour un écoulement laminaire entre des plans parallèles (ouverture d) :

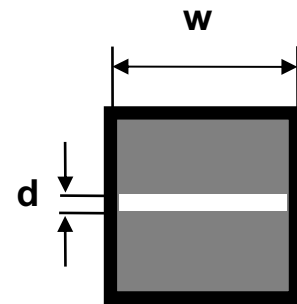
- Perméabilité intrinsèque K [m^2] : $K = d^2 / 12$
- Coefficient de perméabilité k [m/s] : $k = g d^2 / 12 \nu$

4.1 Écoulement dans un joint lisse parallèle

Théorie des plans parallèles

Coefficient de perméabilité k [m/s] : $k = g d^2 / 12 \nu$

- $g = 9.81 \text{ m/s}^2$
- $\nu = \text{viscosité cinématique [m}^2\text{/s]} : \nu = \eta / \rho$
- $\eta = \text{viscosité dynamique [kg/m}\cdot\text{s]}$
- $\rho = \text{masse volumique [kg/m}^3]$



Si A est la surface d'écoulement, et $A = w d$, le débit vaut :

$$Q = A i g d^2 / 12 \nu \quad \text{et} \quad Q = w i g d^3 / 12 \nu$$

L'équation est connue comme la "loi cubique d'écoulement" pour l'écoulement de fluides entre des plans parallèles. Elle est souvent utilisée pour l'écoulement dans des joints rocheux.

4.2 Écoulement dans les joints réels

La théorie des plans parallèles s'applique pour des plans parallèles lisses idéaux et un écoulement laminaire. Or, les joints ont des surfaces rugueuses et ne sont pas lisses.

Il se trouve qu'il est néanmoins possible d'appliquer l'équation aux joints rugueux sous certaines modifications, pour tenir compte des déviations par rapport aux conditions idéales, e.g. les effets de la rugosité des joints et des chemins d'écoulement.

Pour les joints réels, on utilise une ouverture hydraulique équivalente d_e au lieu de l'ouverture entre plans lisses.

$$d_e = f d$$



- d : ouverture réelle (géométrie moyenne) du joint
- f : facteur (≤ 1) fonction de l'écart avec les conditions idéales

4.2 Écoulement dans les joints réels



$$d_e = f d$$



Pour un joint donné, si le profil de la surface du joint reste le même, f est constant pour différentes ouvertures

Les joints à forte rugosité ont un faible f . Les joints plus rugueux s'écartent donc davantage de la théorie des plans parallèles lisses.

L'ouverture hydraulique (d_e), l'ouverture réelle (d) et la rugosité du joint (JRC) peuvent être reliées ainsi :

$$d_e = JRC^{2.5} / (d/d_e)^2$$

(Barton and Choubey, 1977)

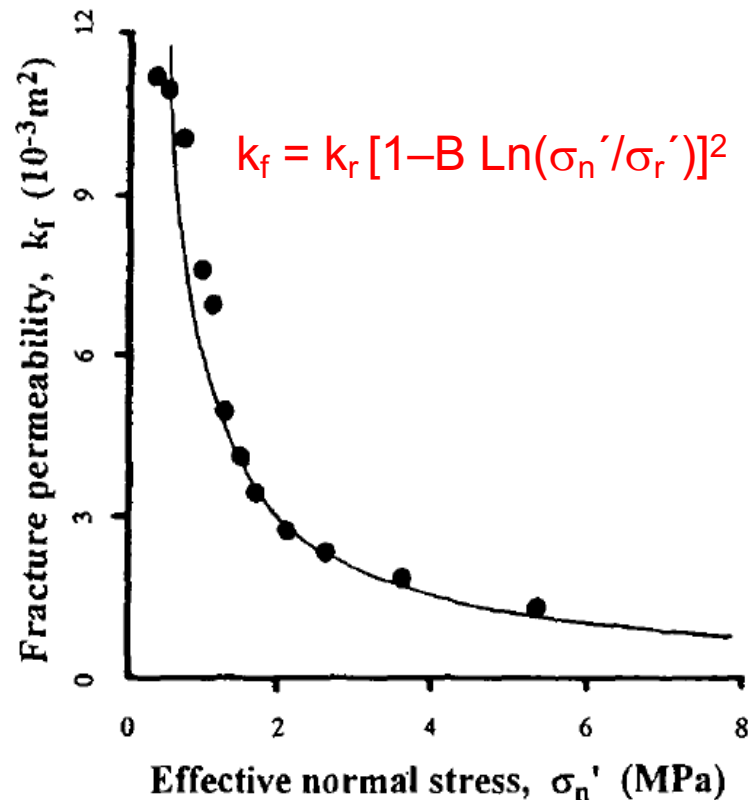
4.3 Facteurs influençant l'écoulement

La perméabilité des joints et l'ouverture hydraulique changent avec la **contrainte normale effective**.

La perméabilité des joints rocheux k_f se réduit asymptotiquement et tend vers zéro avec l'augmentation de la contrainte normale effective σ_n' :

$$k_f = k_r [1 - B \ln(\sigma_n' / \sigma_r')]^2$$

- k_r : perméabilité à une contrainte normale effective de référence σ_n'
- B paramètre fonction de la surface



Evolution de la perméabilité d'un joint rocheux avec la contrainte normale effective appliquée.

4.3 Facteurs influençant l'écoulement

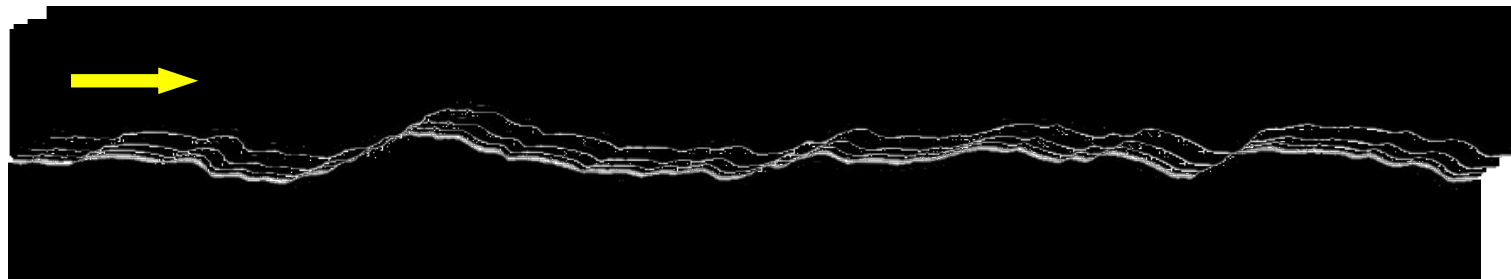


Cisaillement, ouverture et perméabilité

Pour un joint initialement imbriqué et fermé soumis à une faible contrainte normale, le cisaillement débute par la séparation de la surface du joint et la création d'une ouverture plus grande et d'une perméabilité élevée. Au début du cisaillement, une dilatance se produit due au glissement le long des aspérités.

Les effets de cette dilatance peuvent être moins marqués si le joint est sous forte contrainte normale. En effet, dans ce cas, les aspérités se rompent et des particules broyées peuvent s'accumuler dans le joint. Ceci peut entraîner une augmentation de la perméabilité, mais pas de manière aussi significative que dans le cas d'un glissement le long des aspérités.

4.3 Facteurs influençant l'écoulement



Changement d'ouverture avec le cisaillement, dû au glissement le long des aspérités. Ce changement de l'ouverture entraîne un changement significatif de la perméabilité.