

Université de Biskra

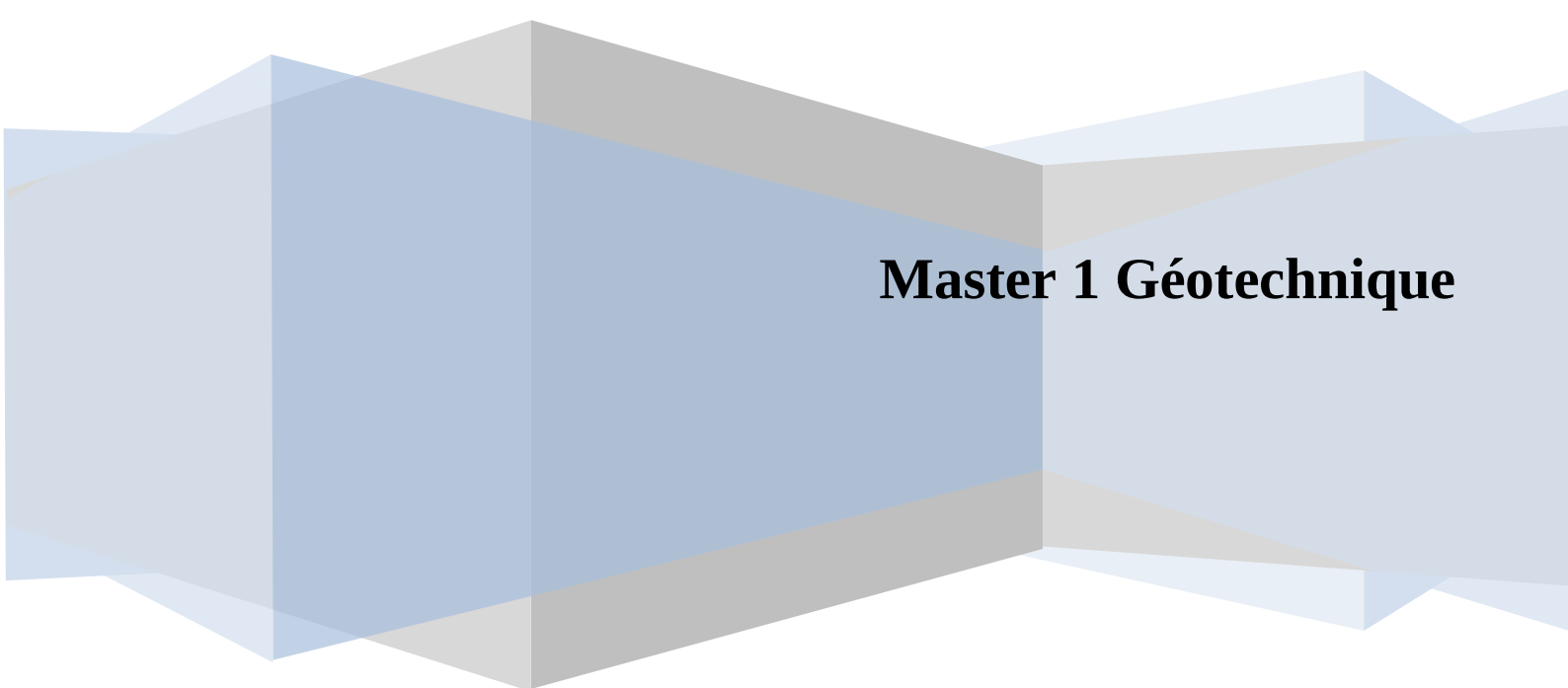
Département de Génie Civil et d'Hydraulique

Cours de Mécanique des roches

Rock Mechanics Course

3ème partie

Propriétés des discontinuités



Master 1 Géotechnique

Propriétés géométriques des discontinuités

Types de discontinuités rocheuses

Tout massif rocheux, quelque soit son histoire et sa localisation, possède des discontinuités. Celles-ci peuvent être prononcées, invisibles, cimentées ou bien ouvertes, mais elles existent. Elles possèdent en commun les caractéristiques suivantes : faible résistance au cisaillement, résistance à la traction négligeable et grande conductivité hydraulique, tout ceci en comparaison de la matrice rocheuse environnante. En géologie on les regroupe par catégories :

- **Les diaclases** : ce sont des fractures de la roche, issues d'une rupture par compression, traction ou cisaillement liée aux mouvements tectoniques [la tectonique est une discipline qui traite de la structure de l'écorce terrestre, de ses dislocations et plissements]. Les deux parties de la roche qui se sont constituées n'ont cependant pas bougé ;
- **Les failles** : ce sont des fractures identiques aux diaclases mais qui ont entraîné un mouvement relatif des deux parties de la roche encaissante. Un glissement a donc eu lieu le long de cette faille. Leur longueur varie d'une dizaine de centimètres à plusieurs centaines de kilomètres ;

Propriétés géométriques des discontinuités

Types de discontinuités rocheuses

- **Les joints sédimentaires** : dans les roches sédimentaires [Roches qui sont l'aboutissement de phénomènes physiques (transport et accumulation), chimiques (précipitation) ou biologiques (construction). Ce sont les calcaires, les gypses, les grès, les conglomérats, le charbon...], ce sont les joints séparant deux couches d'époques et de conditions de dépôt différentes. Chaque couche – ou strate – constitue une "dalle" susceptible de se séparer de ses voisines ;
- **La schistosité** : dans les roches métamorphiques, [Roches issues de la transformation d'autres roches sous forte compression et/ou forte température. Ce sont les schistes, les gneiss, les marbres...] la forte compression a perturbé et transformé l'organisation des minéraux internes. Ceux-ci se sont alignés selon une direction orthogonale à la compression et ont entraîné la formation de plans de rupture préférentiels. L'ardoise, qui est fendue selon cette schistosité, en est une bonne illustration.

Les discontinuités sont généralement des lieux de grande déformabilité, où la rupture est plus facile et où l'eau circule plus facilement. Elles transforment l'état de contrainte du massif à leur proximité.

Propriétés géométriques des discontinuités

Types de discontinuités rocheuses

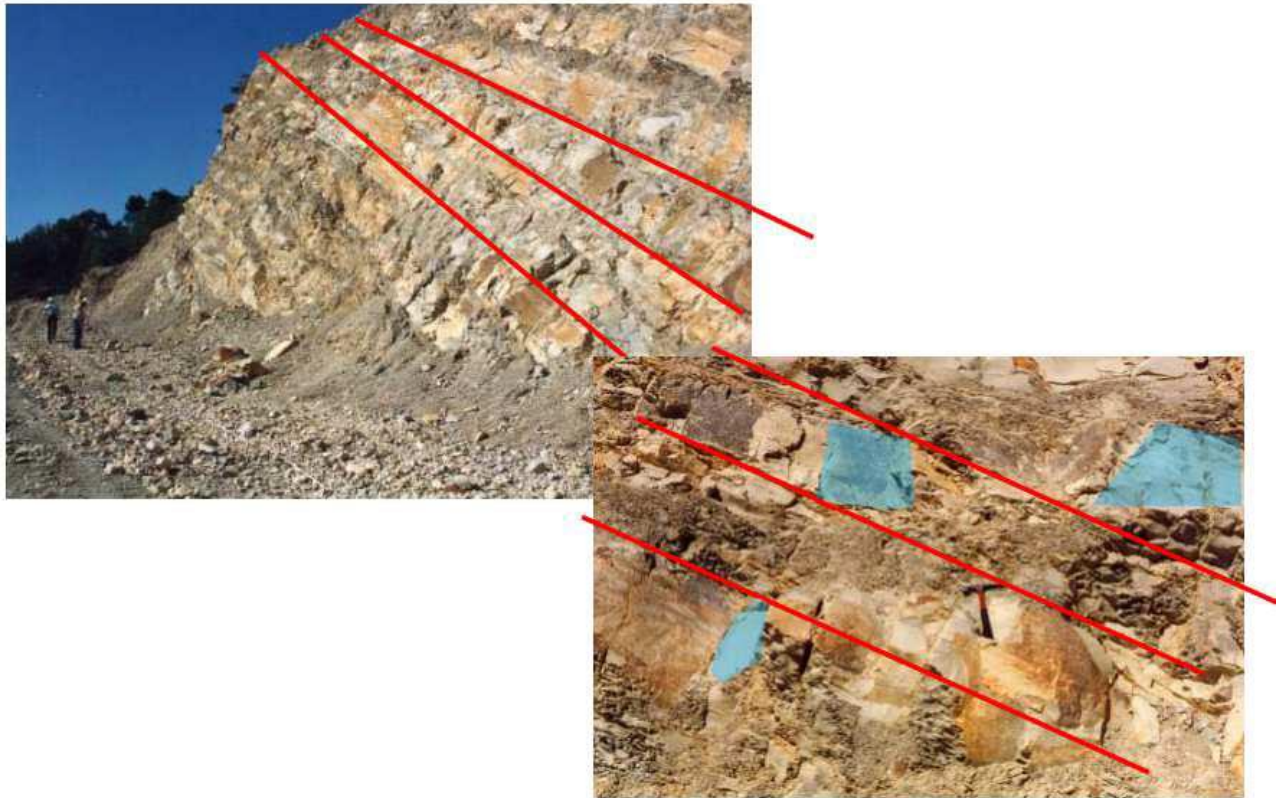


Figure 1. Matrice rocheuse, discontinuités, massif rocheux



Filon de Kersantite dans du granite (Trébeurden) © VMS

Figure 2. Exemple de discontinuité

Propriétés géométriques des discontinuités

Principales caractéristiques géométriques des discontinuités

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

Propriétés géométriques des discontinuités

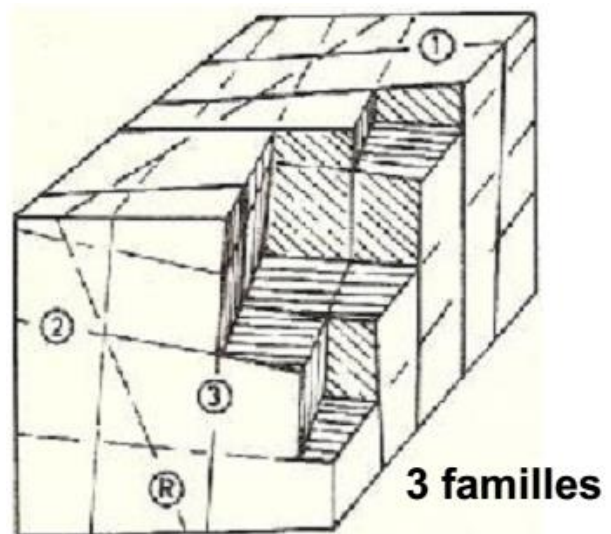
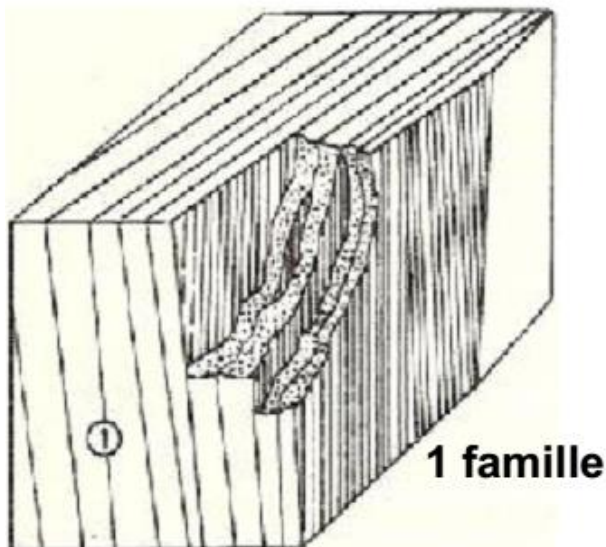
Nombre de familles de joints

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

Typiquement, une famille de joint découpe le massif rocheux en plaques, 2 familles perpendiculaires découpent la roche en colonnes et 3 en blocs. Plus de 3 familles découpent la roche en blocs de formes variées et de coins.

Les propriétés mécaniques du massif rocheux sont influencées par les familles de joints.

Plus le nombre de familles de joints est grand, plus les possibilités de glissements potentiels sur les joints sont grandes.

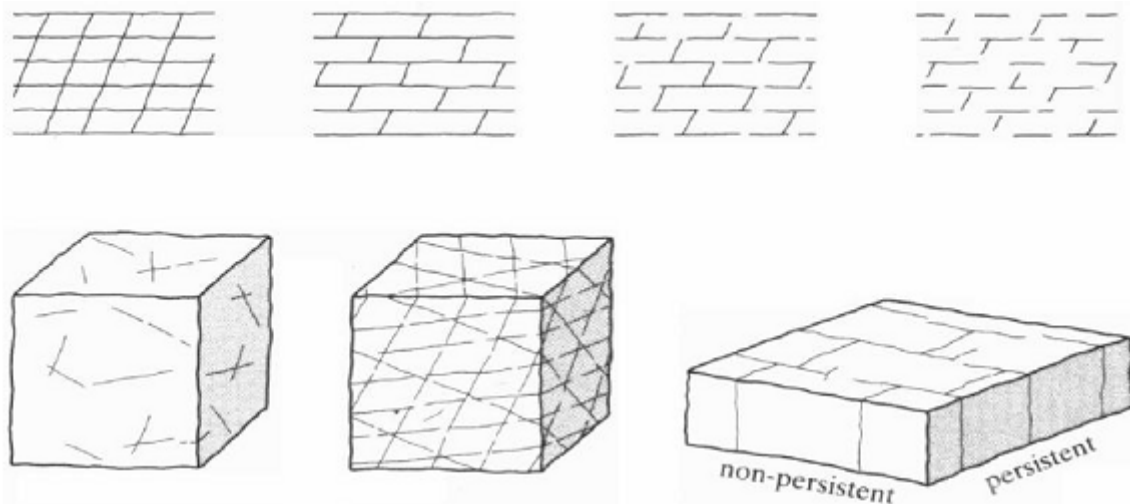


Propriétés géométriques des discontinuités

Persistance du joint

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

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



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

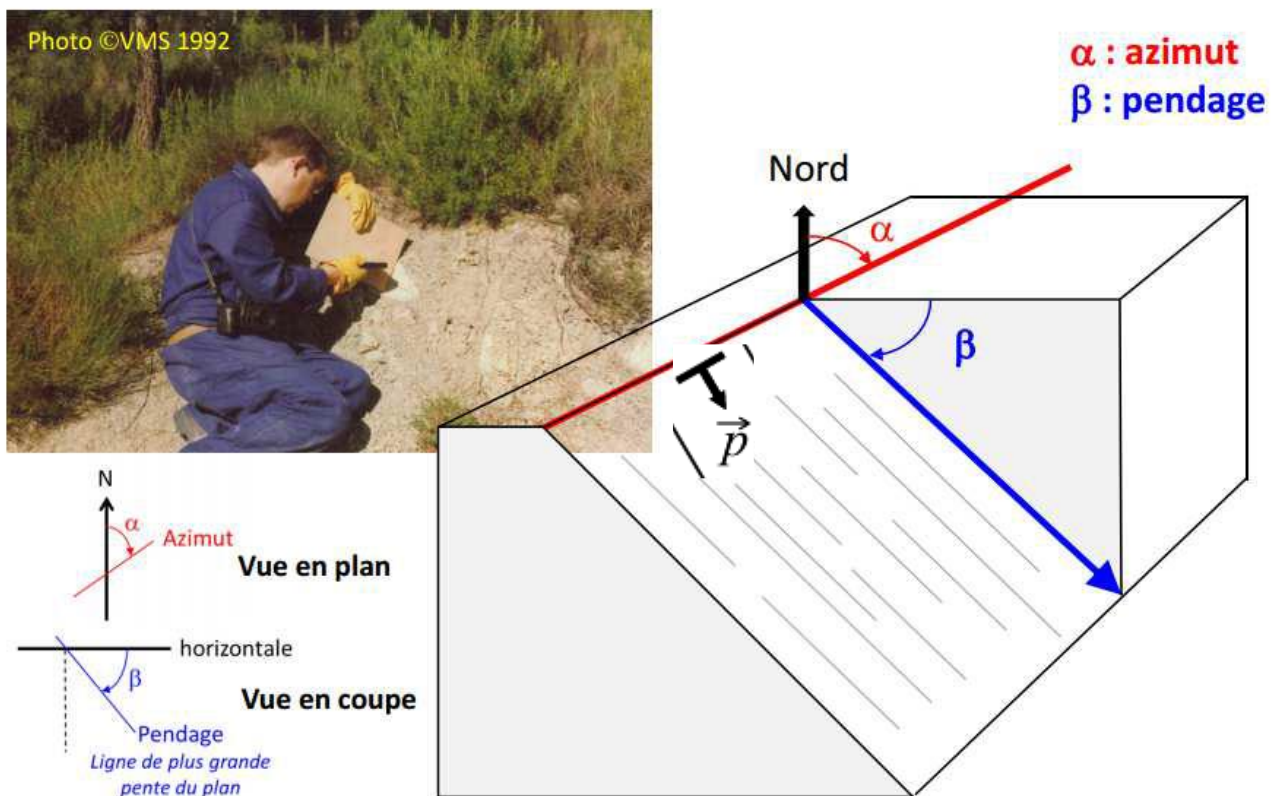
Propriétés géométriques des discontinuités

Orientation du plan d'une discontinuité

L'orientation d'une discontinuité contrôle la possibilité de conditions instables ou de déformations excessives. L'orientation mutuelle des continuités détermine la forme des blocs rocheux.

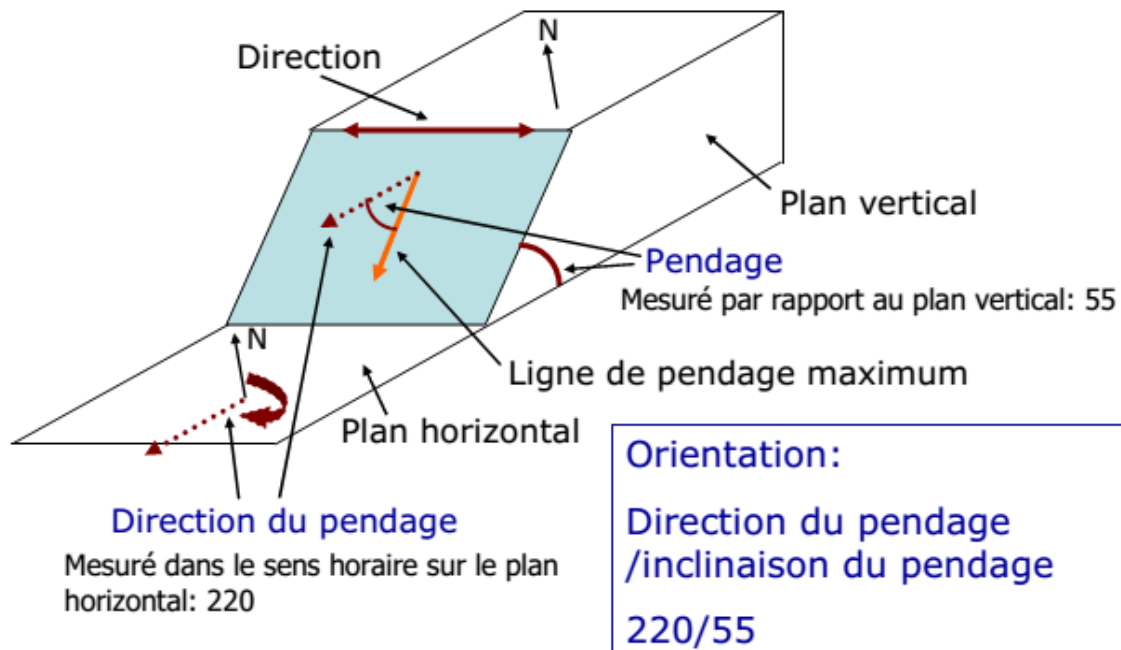
Une discontinuité est, au moins localement, plane. On définit complètement ce plan par deux angles : le pendage (angle β entre l'horizontale et la droite de plus grande pente, en précisant le sens par rapport à la direction de l'horizontale) et la direction du pendage (azimut α de l'horizontale du plan).

- Azimut : angle de la projection horizontale du vecteur $\vec{p}$ avec le Nord en tournant vers l'Est. Il vaut $\alpha + 90^\circ$;
- Pendage : angle β que fait $\vec{p}$ avec le plan horizontal.



Propriétés géométriques des discontinuités

Orientation du plan d'une discontinuité



Un plan répertorié 210/60 selon l'AFTES signifie donc : sa direction est de 120° par rapport au Nord en tournant vers l'Est (210-90) et le pendage est de 60° vers l'ouest. Le même plan sera répertorié N120E - 60W pour la notation géologique traditionnelle.

Rappel: Les fractures résultent d'une histoire géologique (mise en place des roches) et tectonique (déformations, rupture pendant et après leur mise en place).



Figure 4. Orientation des fractures

Propriétés géométriques des discontinuités

Espacement des discontinuités, fréquence, taille des blocs, et RQD

Le degré de fracture d'un massif rocheux est contrôlé par le nombre de discontinuités à l'intérieur du massif. Plus de joints signifie un espacement moyen entre les joints plus faible. L'espacement des discontinuités contrôle la taille des blocs individuels. Cela contrôle le mode de rupture et l'écoulement. Par exemple, un espacement étroit donne une faible cohésion du massif et une rupture circulaire, voire même d'écoulement.

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

Classification de l'espacement des joints

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

Propriétés géométriques des discontinuités

Fréquence des joints

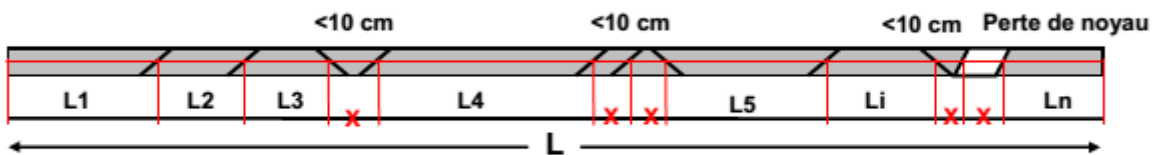
La fréquence des joints (λ) est définie comme le nombre de joints par mètre linéaire. C'est donc simplement l'inverse de l'espacement des joints (s_j).

$$\lambda = \frac{1}{s_j}$$

RQD

L'indice RQD (Rock Quality Designation) est défini comme le rapport en pourcentage entre la longueur cumulée des carottes de roches qui ont une longueur égale ou supérieures à 10 cm et la longueur totale de carotte considérée:

$$RQD = \Sigma Li / L \times 100\%, \quad Li > 10 \text{ cm}$$



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

Propriétés géométriques des discontinuités

Tableau 1. Qualité de la roche en fonction de RQD

0 – 25%	25% - 50%	50% - 75%	75% - 90%	90% - 100%
Très mauvaise	Mauvaise	Moyenne	Bonne	Excellente

Un *RQD* de 80 à 100% signifie donc que l'on a affaire à une roche peu ou pas fracturée.

Attention : Cet indicateur peut être trompeur : pour un même massif stratifié, on pourra conclure à un *RQD* de 0% ou de 100% au même endroit selon l'inclinaison du forage (Figure 5) ! Il est donc important de repérer la direction et l'inclinaison des forages, puis de corrélérer les résultats entre eux.

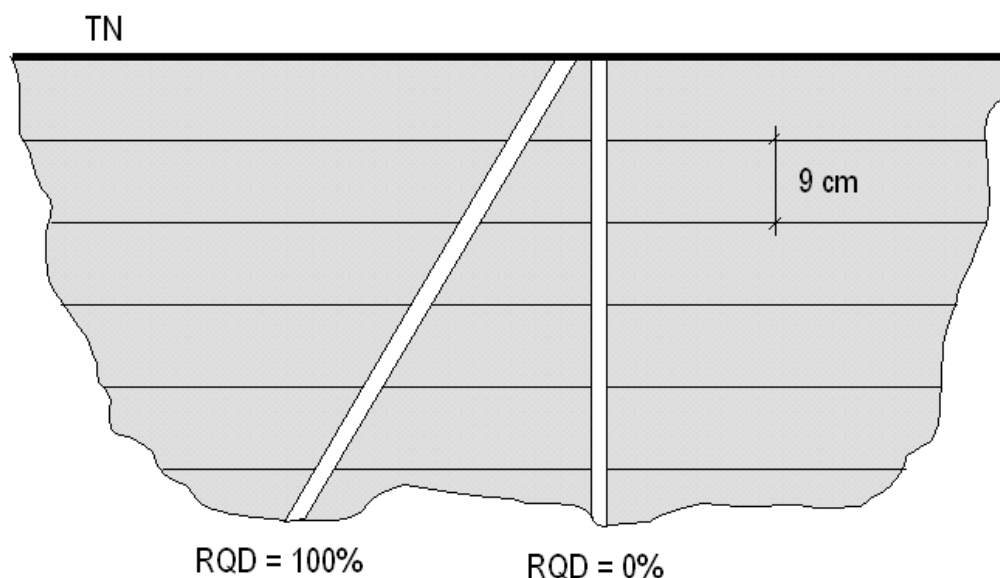
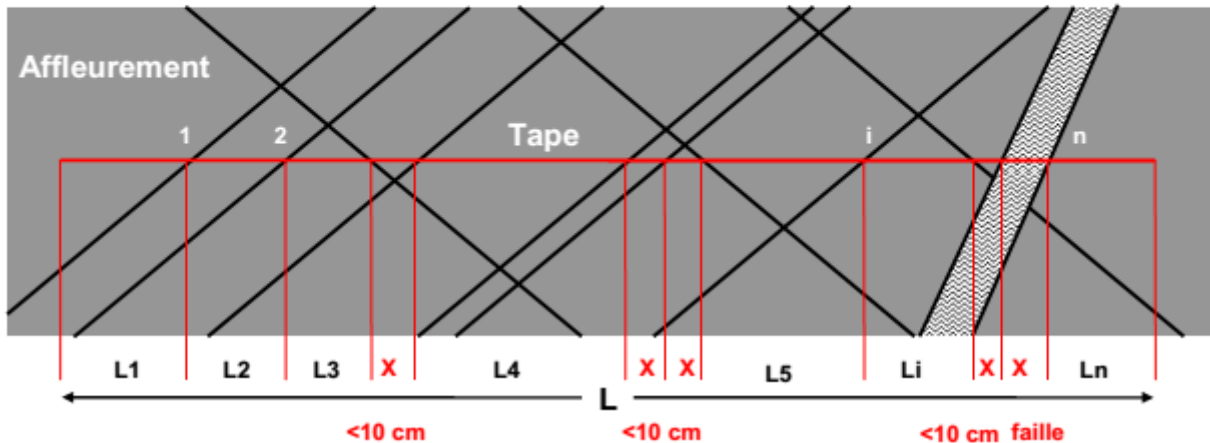


Figure 5. Configuration géologique illustrant les limites du RQD. Le terrain est stratifié et les bancs font 9 cm d'épaisseur.

Propriétés géométriques des discontinuités

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

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



RQD peut être corrélé à la fréquence de joint (λ):

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

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

Propriétés géométriques des discontinuités

La taille des blocs et le 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.

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

$RQD = 115 - 3.3 J_v$, pour J_v entre 4.5 et 30.

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

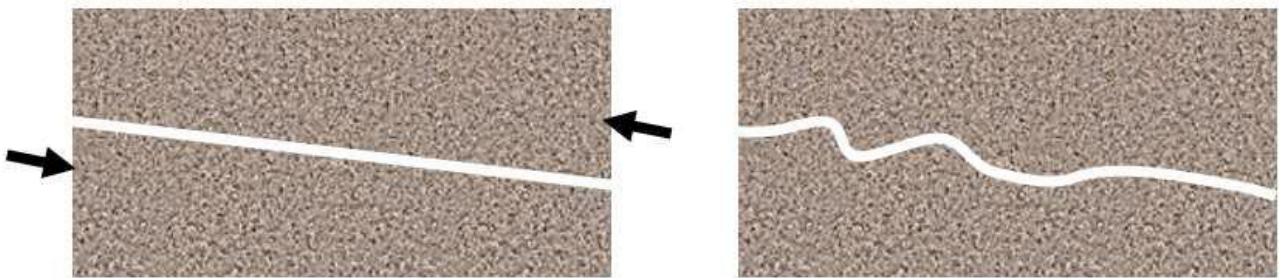
Désignations de la taille des blocs proposées par l'ISRM

Désignation	Nombre de joints par unité de volume, joints/m ³
Blocs très grands	< 1
Grands blocs	1 – 3
Blocs moyens	3 – 10
Petits blocs	10 – 30
Blocs très petits	> 30
Roche broyée	> 60

Propriétés géométriques des discontinuités

Rugosité et imbrication à la surface du joint

Un joint est une interface de deux surfaces en contact. Les surfaces peuvent être lisses ou rugueuses; elles peuvent être en bon contact et imbriquées (imbrication d'une éponte dans l'autre), ou en mauvais contact et ne pas s'imbriquer.



Éponte "supérieure"

Éponte "inférieure"



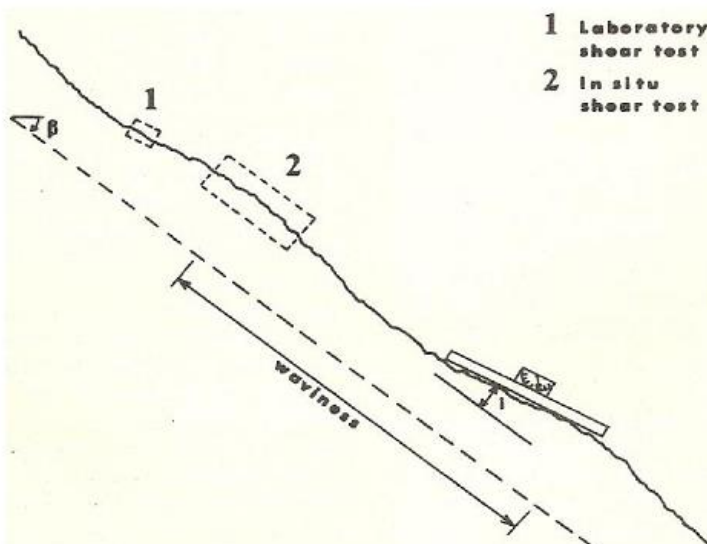
Propriétés géométriques des discontinuités

Rugosité du joint

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

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

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



Profilomètre laser

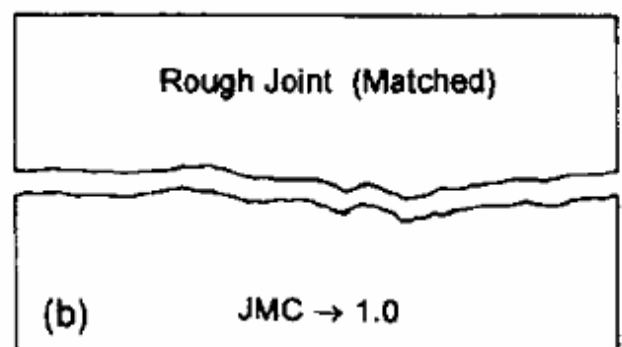
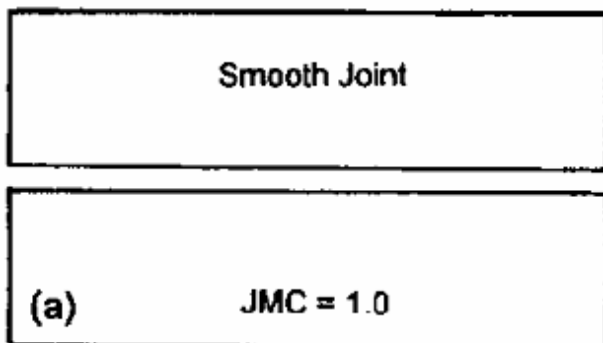


Propriétés géométriques des discontinuités

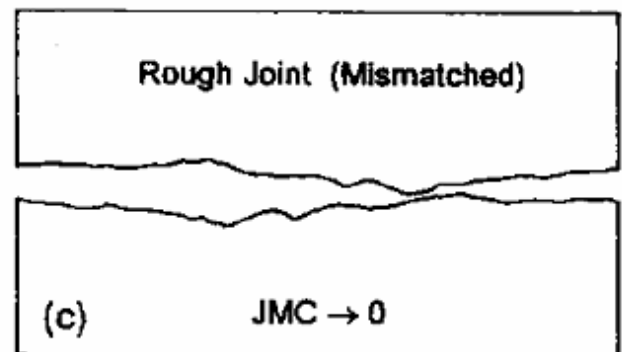
Imbrication des joints

Un joint est l'interface de deux surfaces. Les propriétés d'un joint sont également contrôlées par le positionnement relatif de deux surfaces, en plus des profils. 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 à des joints de même rugosité avec des contacts ponctuels où le mouvement peut facilement avoir lieu.

Souvent, les joints sont différenciés comme imbriqués ou pas. Un coefficient d'imbrication des joints (JMC) a été suggéré.



JMC vaut 1 pour un joint parfaitement imbriqué et avec ses deux surfaces entièrement en contact.
JMC vaut 0 pour un joint non-imbriqué et avec les deux surfaces en contact à quelques endroits seulement.

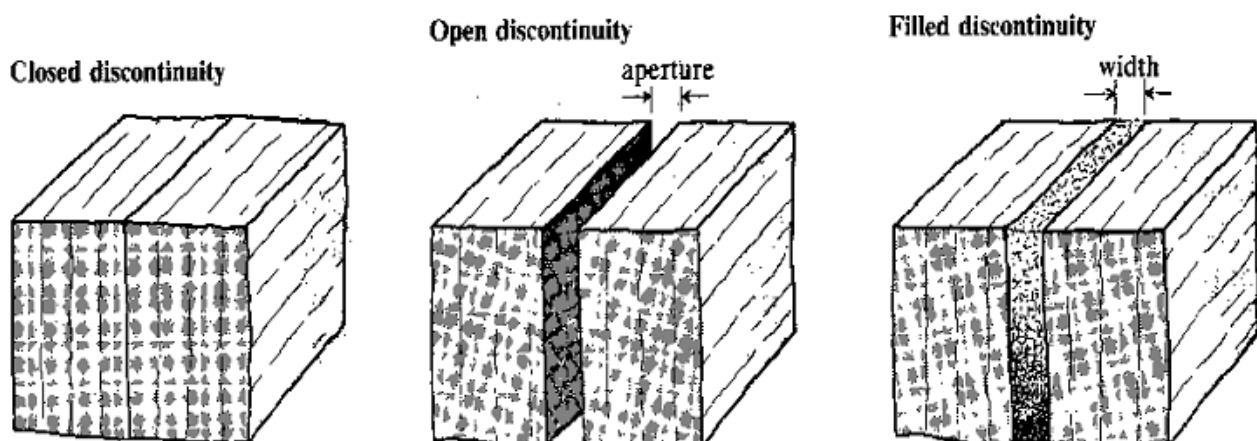


Propriétés géométriques des discontinuités

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 les deux surfaces. La distance perpendiculaire séparant les parois adjacentes des roches est appelé « ouverture ». L'ouverture est la largeur de la discontinuité (de quelques mm à plusieurs mètres). L'ouverture du joint est soit remplie d'air et/ou d'eau (joint ouvert), soit avec des matériaux de remplissage (joint rempli). Le remplissage peut être solide et résistant (filon de quartz) ou bien être un vrai lubrifiant (argile humide).

Les joints ouverts ou remplis avec de grandes ouvertures montrent une faible résistance au cisaillement. En général, les propriétés du matériel de remplissage affectent la résistance au cisaillement, la déformabilité et la perméabilité des discontinuités.



Propriétés mécaniques des discontinuités

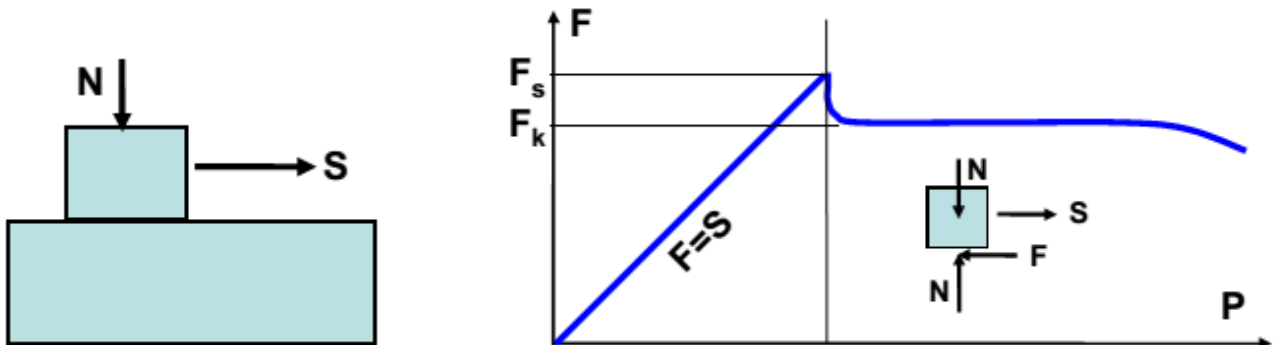
Cisaillement et frottement entre les plans de contact

Une fois la répartition et la géométrie des discontinuités identifiées, il faut s'intéresser à leurs caractéristiques mécaniques.

Les paramètres essentiels du comportement mécanique d'une discontinuité sont sa résistance au cisaillement et sa déformabilité.

Le phénomène le plus commun de cisaillement d'une discontinuité est le glissement entre deux surfaces de contact. La théorie du frottement fournit un rapport entre l'angle de frottement φ , la force normale (N) et force de cisaillement (S), tel que:

$$S = N \tan \varphi$$



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

Propriétés mécaniques des discontinuités

Cisaillement et frottement entre les plans de contact

Si la surface de contact est inclinée d'un angle (i), la force normale est $N \cos(i) + S \sin(i)$, la force de cisaillement est $S \cos(i) - N \sin(i)$.

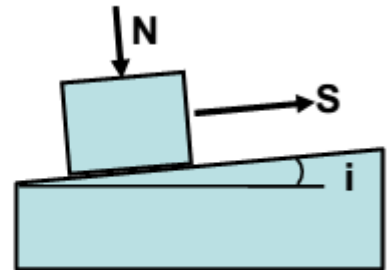
Par la théorie du frottement :

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

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

$$S = \frac{N [\tan\phi + \tan(i)]}{1 + \tan\phi \tan(i)},$$

$$S = N \tan(\phi + i)$$

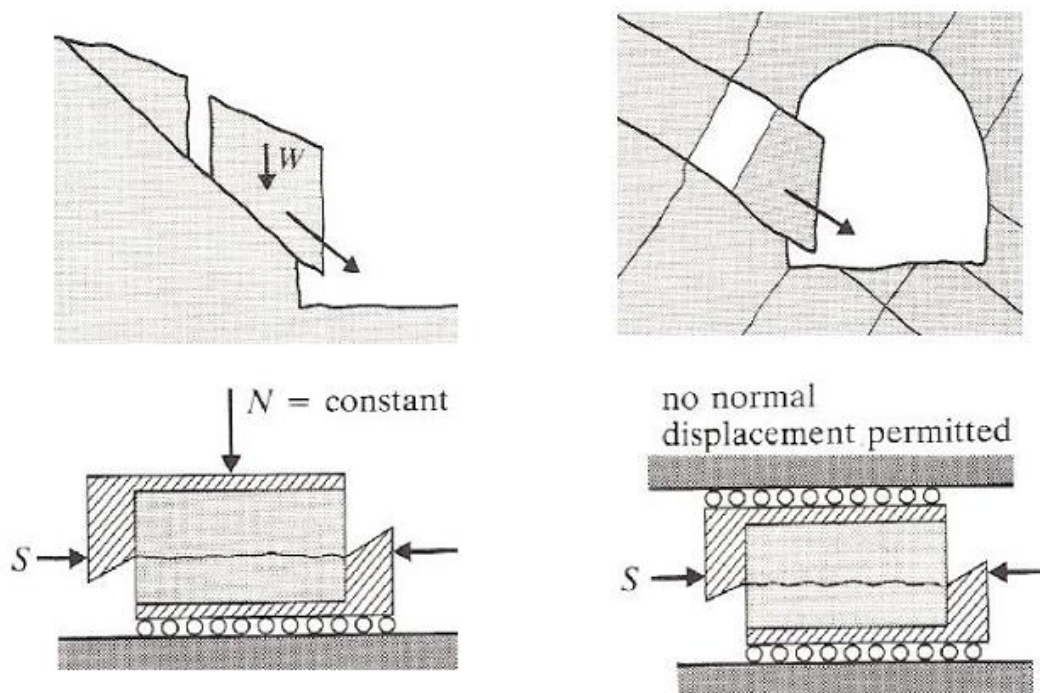


Propriétés mécaniques des discontinuités

Résistance au cisaillement des joints

Le comportement au cisaillement des joints est probablement un des paramètres les plus importants en mécanique des roches et en génie civil.

Les conditions de glissement de blocs rocheux le long de joints existants et de failles dans des pentes de terrain ou des excavations sont régies par les résistances au cisaillement développées sur les discontinuités.



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

Propriétés mécaniques des discontinuités

Résistance au cisaillement des joints

Pour caractériser le comportement d'une fracture de roches, il faut réaliser des essais en laboratoire. Le plus courant est l'essai de cisaillement. Cet essai permet de se rapprocher plus aux sollicitations in-situ.



Figure 8. Essai de cisaillement sur discontinuité

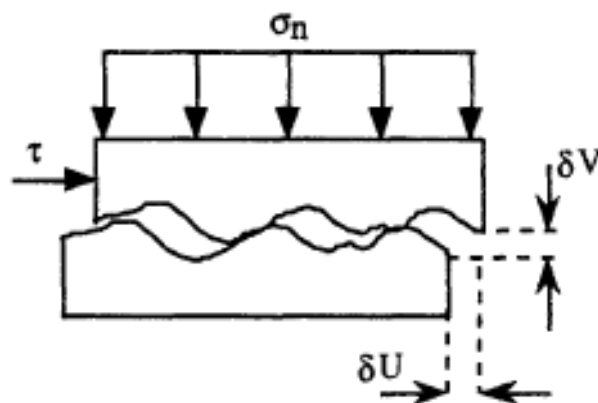


Figure 9. Cisaillement de deux blocs rocheux.

Propriétés mécaniques des discontinuités

Résistance au cisaillement de joints lisses

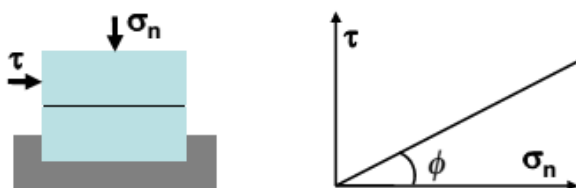
Le cisaillement d'un joint lisse est régi par la théorie du frottement :

$$\tau = \sigma_n \tan \phi_b$$

ϕ_b : est souvent appelé angle de frottement de base. Pour la plupart des roches, il vaut environ 25~35°.

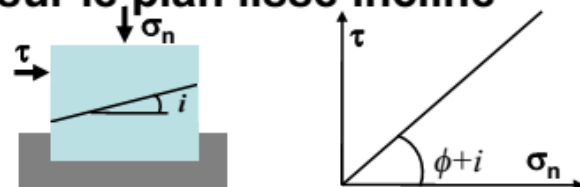
Modèle de frottement linéaire – cisaillement sur un plan lisse horizontal

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



Modèle de frottement linéaire avec angle de dilatance – cisaillement sur le plan lisse incliné

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



Propriétés mécaniques des discontinuités

Résistance au cisaillement de joints rugueux

Trois paramètres fondamentaux régissant le comportement au cisaillement de joints rugueux :

- **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.

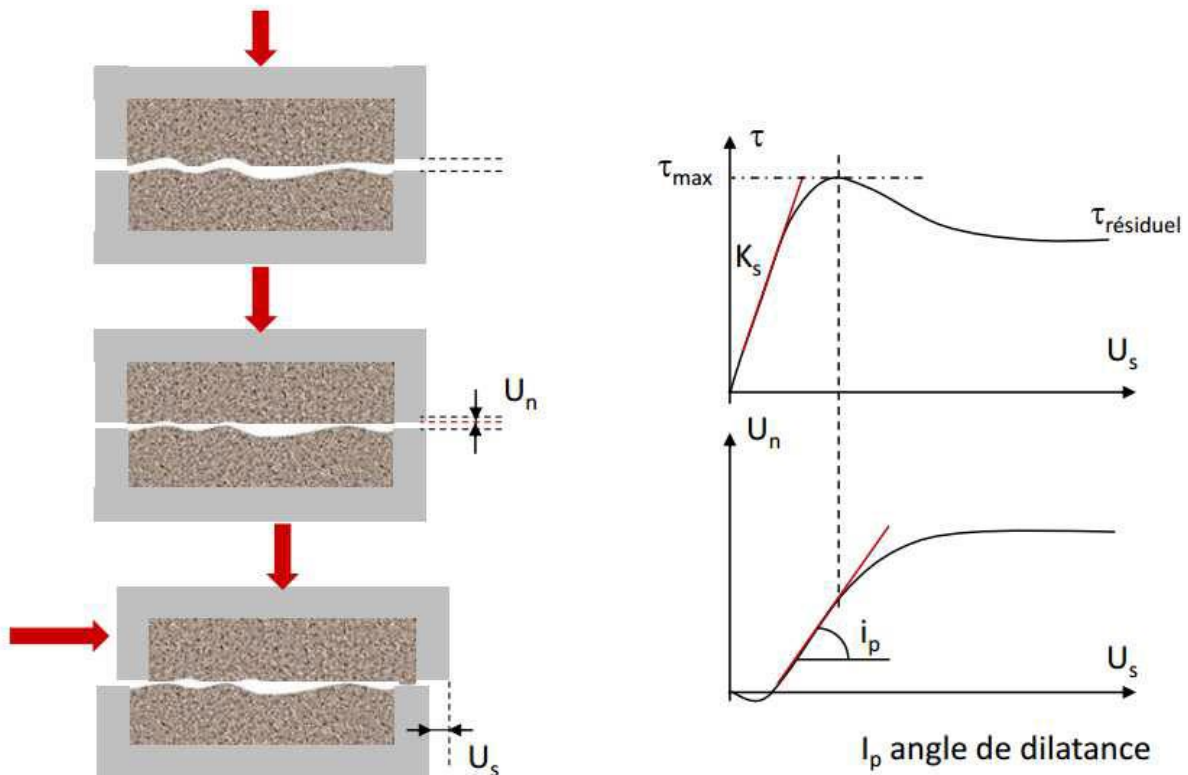


Figure 10. Résistance au cisaillement de joints

Propriétés mécaniques des discontinuités

Résistance au cisaillement de joints rugueux

Durant les essais, l'effort de cisaillement atteint rapidement un maximum (pic de résistance). Avec l'augmentation du cisaillement, l'effort de cisaillement se stabilise à un niveau résiduel (force résiduelle).

- La force résiduelle suit la loi linéaire de frottement:

$\tau = \sigma_n \tan \varphi_r$. φ_r : angle de frottement résiduel drainé, pour la plupart des roches, il vaut environ 25~35°, plus ou moins comme φ_b .

- La résistance au cisaillement maximale ne suit pas la loi linéaire de frottement, on peut remarquer que l'on retrouve la forme classique de critère de rupture en "parabole" dans le plan de Mohr. La pente résistance au cisaillement maximale/effort normal diminue avec l'augmentation de l'effort normal.

À faible effort normal, l'angle de frottement pour les joints rugueux peut atteindre 70°. À fort effort normal, l'angle de frottement s'approche de φ_b .

Propriétés mécaniques des discontinuités

Résistance au cisaillement de joints rugueux

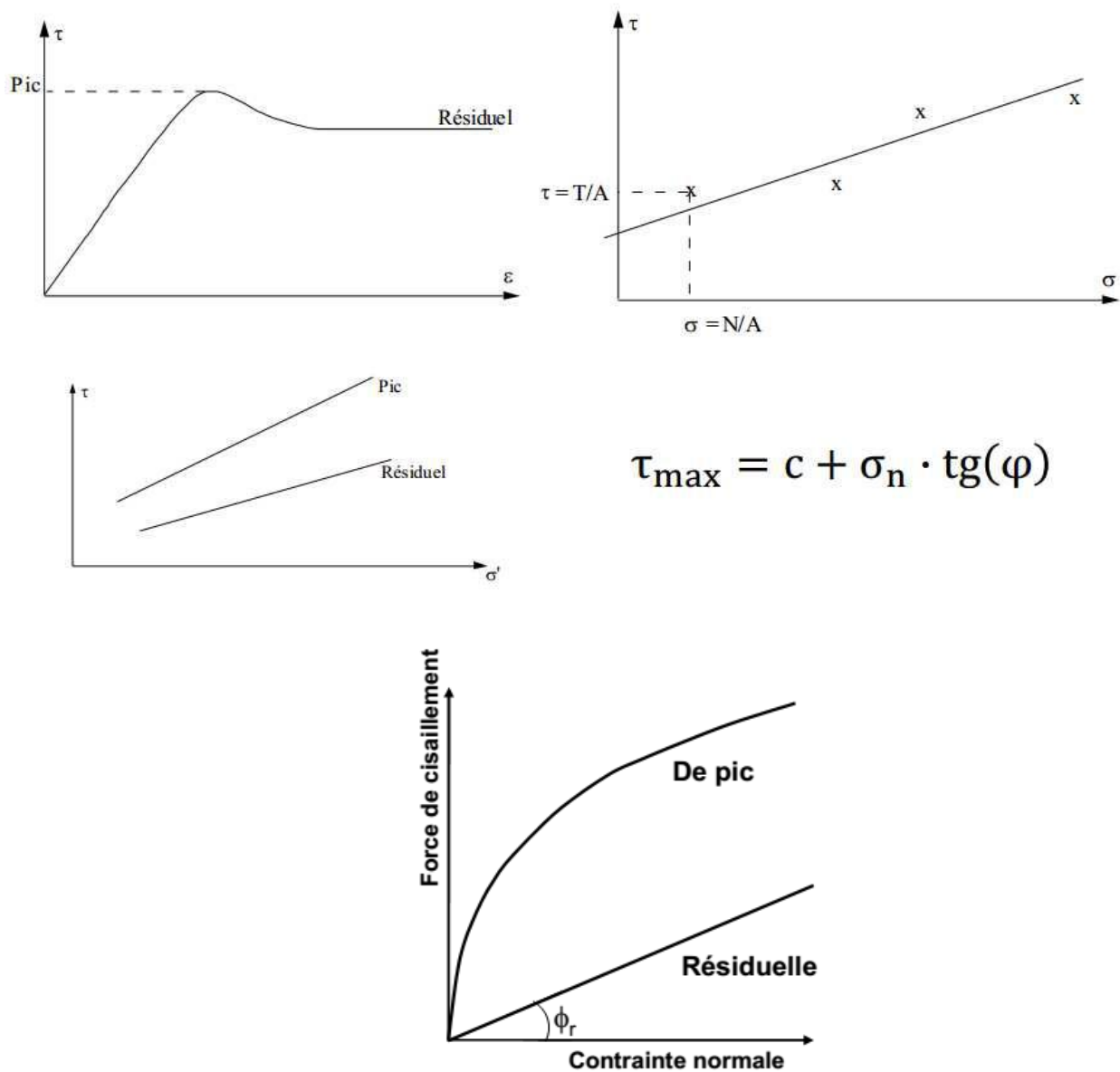


Figure 12. Comportement « Pic » et radoucissement de discontinuités

Propriétés mécaniques des discontinuités

Modèle bilinéaire de résistance au cisaillement

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

Ainsi, la résistance au cisaillement pour une rupture rugueuse peut montrer deux phénomènes :

– Cas des contraintes normales faibles :

A faible effort normal (σ_n n'est pas suffisante pour briser les aspérités) le glissement s'effectue sur le plan i (angle d'inclinaison de aspérité). Dans ce cas, le déplacement horizontal s'accompagne d'un déplacement vertical, qu'on désigne sous le terme de dilatance. L'écriture de critère de Mohr Coulomb sur le plan incliné i donne : $\varphi_{\text{mesuré}} = \varphi + i$

– Cas des contraintes normales fortes :

Si l'effort normal est important (σ_n suffisante pour rompre les aspérités) la dilatance est empêchée et il faut cisailer les aspérités avant de pouvoir enregistrer un déplacement significatif, i tend vers zéro donc : $\varphi_{\text{mesuré}} = \varphi$

Propriétés mécaniques des discontinuités

Modèle bilinéaire de résistance au cisaillement

Ceci mène à un modèle bilinéaire de résistance au cisaillement.

$$\begin{cases} \tau = \sigma_n \tan(\varphi + i) & \text{pour } \sigma_n \leq \sigma'_n \\ \tau = c + \sigma_n \tan \varphi & \text{pour } \sigma_n \geq \sigma'_n \end{cases}$$

Avec : φ : l'angle de frottement intrinsèque pouvant varier de 20° à 40° selon le degré d'humidité et d'argilosité des éponges.

i : est appelé angle de dilatance.

σ'_n : est l'effort normal critique où le cisaillement des aspérités peut débiter.

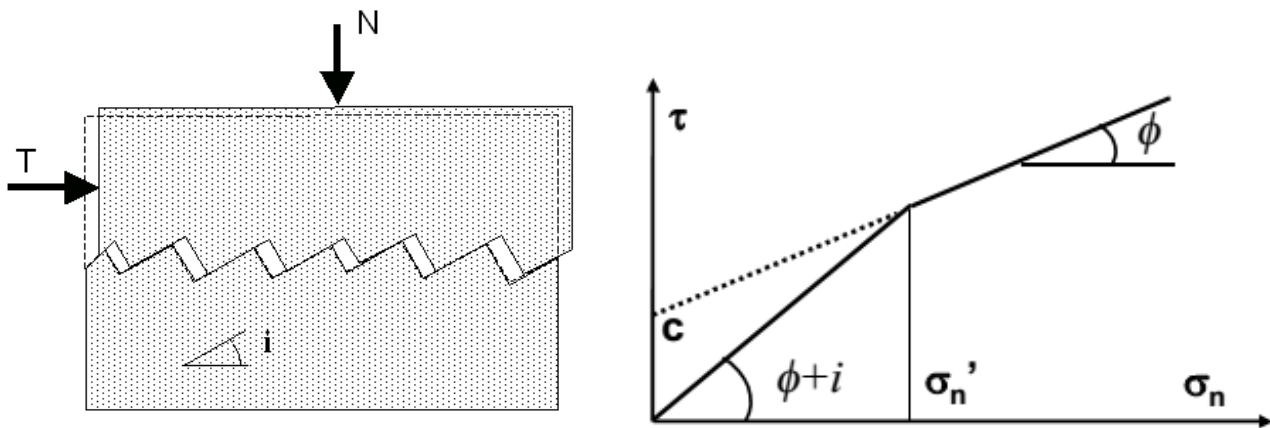


Figure 13. Essai de cisaillement sur discontinuité.

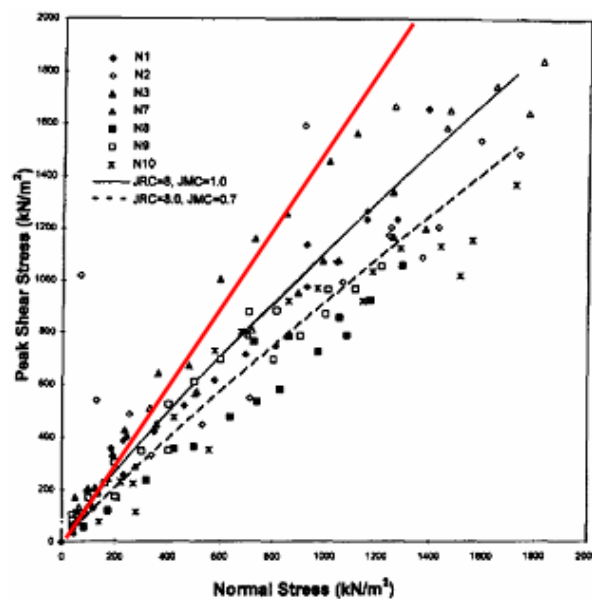
En définitive, les discontinuités naturelles peuvent présenter deux types de cohésion c :

- **Cohésion réelle** : due au remplissage argileux ou à des cimentations entre éponges.
- **Cohésion apparente** : sous fortes contraintes, il faut rompre les aspérités avant de mesurer un déplacement. Cela se traduit par une cohésion qui n'est qu'apparente.

Propriétés mécaniques des discontinuités

Modèle empirique de résistance au cisaillement JRC-JCS

En réalité, il n'y a pas de limite claire entre le cisaillement le long des aspérités et le cisaillement à travers les aspérités. Avec une augmentation de l'effort normal, le cisaillement à travers les aspérités augmente progressivement. Par conséquent, la relation effort de cisaillement / effort normal est représentée par une courbe.



Basé sur de nombreux résultats d'essais et sur l'observation des dommages progressifs des aspérités, Barton (1973) a proposé que les résistances de pic au cisaillement des joints puissent être représentées par la relation empirique :

$$\tau = \sigma_n \tan \left[JRC \log_{10} (JCS / \sigma_n) + \phi_r \right]$$

σ_n : contrainte normale appliquée sur la discontinuité ;

JRC : coefficient de rugosité des joints varie de 0 pour une surface plane et lisse à 20 pour une surface très rugueuse ;

JCS : « Joint Compressive Strength » : résistance à la compression simple des épontes ;

ϕ_r : angle de frottement résiduel drainé.

Propriétés mécaniques des discontinuités

Déformabilité d'une discontinuité

➤ 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.

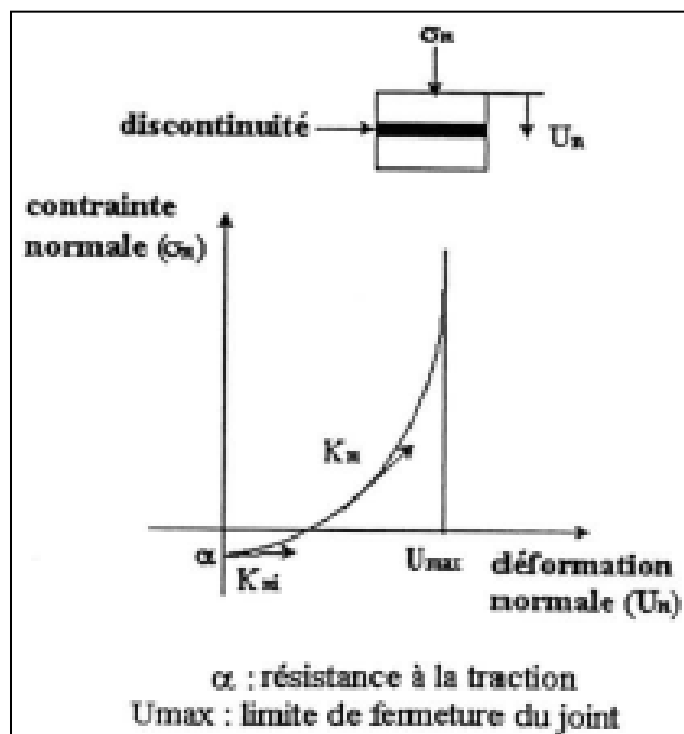


Figure 14. Relation contrainte normale/déformation normale

Propriétés mécaniques des discontinuités

➤ Rigidité tangentielle

La pente de la courbe donne la rigidité tangentielle K_s qui est définie par la relation :

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

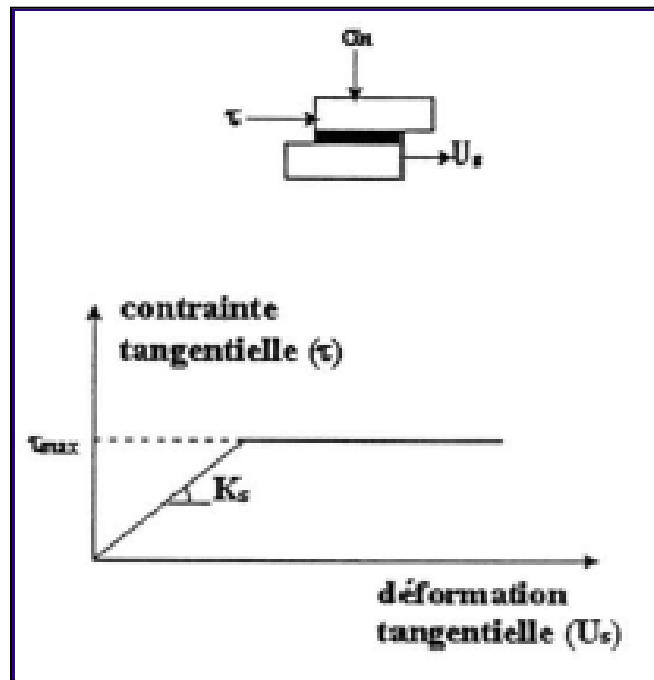


Figure 15. Relation contrainte tangentielle/déformation tangentielle

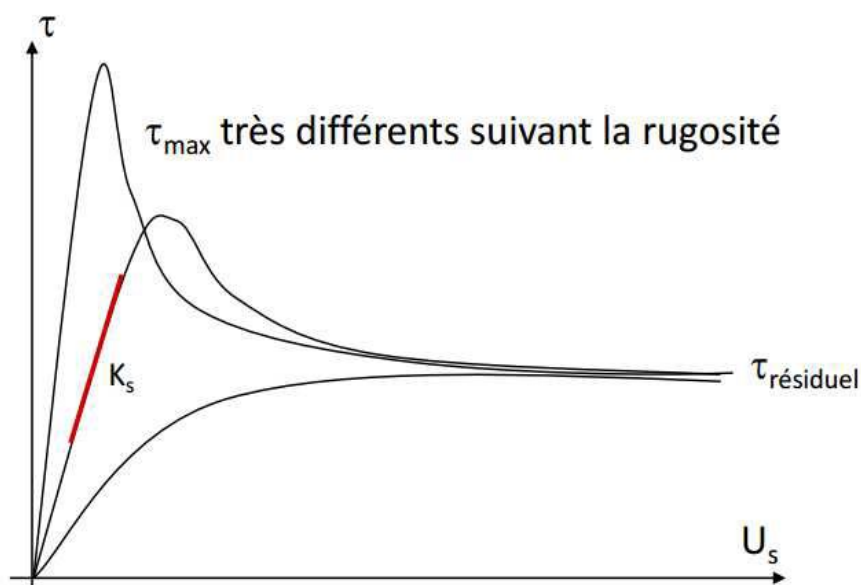


Figure 16. Influence de la rugosité lors d'un essai de cisaillement
 K_s : raideur tangentielle 10 à 100 fois plus faible que la raideur normale