

Caractérisation des roches consolidées et altération des roches



Ressources (géomatériaux, eau, chaleur, etc.)



Espace souterrain (transport, stockage)



Roches (indurées): matériaux géologiques ayant une cohésion et une résistance à la compression simple supérieures à quelques MPa

Types généraux :

- roches sédimentaires organiques et chimiques
- roches sédimentaires détritiques
- roches magmatiques
- roches faiblement métamorphisées (ex. marbre, quartzite)
- roches fortement métamorphisées (ex. gneiss)

NB: Caractéristiques mécaniques des roches fortement influencées par l'état d'altération de la roche !

Propriétés importantes des roches indurées

- Densité/poids spécifique, porosité, minéralogie,...
- Résistance à la compression, module de Young, coefficient de Poisson
- Résistance au cisaillement
- Perméabilité
- Abrasivité
- Durabilité
- Gonflement, gaz, radioactivité, décompression violente, etc.

NB: ces propriétés sont utilisées dans le cadre de notre projet de semestre

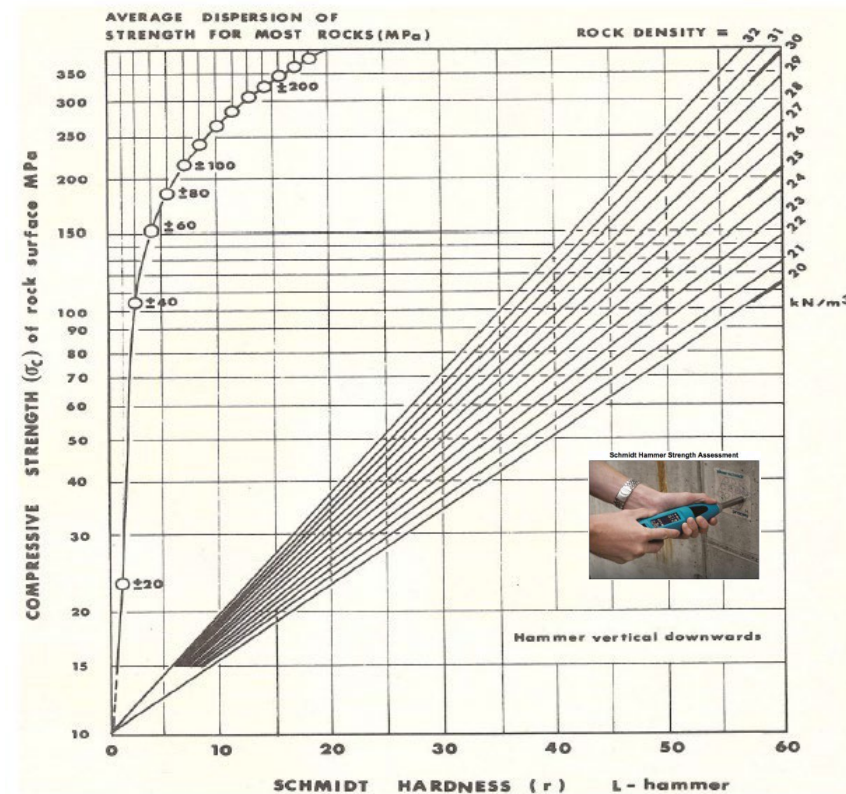
Caractérisation des roches consolidées/paramètres/densité, porosité



Table 3.2 TYPICAL VALUES FOR UNIT WEIGHT AND POROSITY OF ROCKS

Rock	Unit weight (kN/m ³)	Porosity (%)
Andesite	22–23.5	10–15
Amphibolite	29–30	–
Basalt	27–29	0.1–2
Chalk	17–23	30
Coal	10–20	10
Diabase	29	0.1
Diorite	27–28.5	–
Dolomite	25–26	0.5–10
Gabbro	30–31	0.1–0.2
Gneiss	27–30	0.5–1.5
Granite	26–27	0.5–1.5 (0.9)
Greywacke	28	3
Gypsum	23	5
Limestone	23–26	5–20 (11)
Marble	26–28	0.3–2 (0.6)
Mudstone	22–26	2–15
Quartzite	26–27	0.1–0.5
Rhyolite	24–26	4–6
Salt	21–22	5
Sandstone	23–26	5–25 (16)
Schist	25–28	3
Shale	25–27	0.1–1
Tuff	19–23	14–40

Source: Vallejo & Ferrer, 2011



Avec:

Poids volumique γ (kN/m³) = masse volumique (kg/m³) * g (m/s²)

Porosité (%) = Volume de vides (V_v) / Volume total (V_t) * 100

Caractérisation des roches consolidées/paramètres/résistance en compression

ISRM = Internal Society for Rock Mechanics

Table 3.7 SOIL AND ROCK STRENGTH CLASSIFICATION FROM FIELD INDICES

Class	Description	Field identification	Approx. range to uniaxial compressive strength (MPa)
S ₁	Very soft clay	Easily squeezed between fingers	<0.025
S ₂	Soft clay	Easily penetrated several centimetres by thumb.	0.025–0.05
S ₃	Firm clay	Can be penetrated several centimetres by thumb with moderate effort.	0.05–0.1
S ₄	Stiff clay	Readily indented by thumb but penetrated only with great difficulty.	0.1–0.25
S ₅	Very stiff clay	Readily indented by thumbnail.	0.25–0.5
S ₆	Hard clay	Indented with difficulty by thumbnail.	>0.5
R ₀	Extremely weak rock	Indented by thumbnail.	0.25–1
R ₁	Very weak rock	Crumbles under firm blows with point of geological hammer and can be peeled by a pocket knife.	1–5
R ₂	Weak rock	Can be peeled by a pocket knife with difficulty, shallow indentations made by firm blow with point of geological hammer.	5–25
R ₃	Moderately strong rock	Cannot be scrapped or peeled with a pocket knife, specimen can be fractured with single firm blow of geological hammer.	25–50
R ₄	Strong rock	Specimen requires more than one blow of geological hammer to fracture it.	50–100
R ₅	Very strong rock	Specimen requires many blows of geological hammer to fracture it.	100–250
R ₆	Extremely hard rock	Specimen can only be chipped with geological hammer.	>250

soils

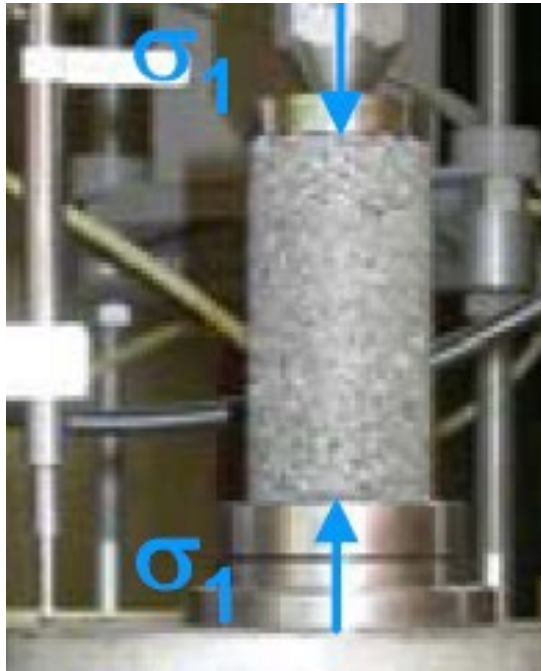
roches

(ISRM, 1981).

EPFL Caractérisation des roches consolidées/paramètres/résistance en compression

Essai de compression simple ($\sigma_{d,G}$)

Résistance de la roche à l'application d'une pression uniaxiale (compression simple), sans pression de confinement [MPa] $\Rightarrow \sigma_1 \neq 0$ et $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$



1MPa = 1MN/m² = 1N/mm²

- \Rightarrow Pression que peut supporter une roche sans s'écraser
- \Rightarrow Caractérisation de la résistance mécanique du rocher (sous faible couverture), choix de la méthode d'excavation

Catégories (Franklin & Bosch, 1972) :

> 160	extremely high strength
50-160	very high strength
16-50	high strength
5-16	medium strength
1.6-5	low strength
0.5-1.6	very low strength
<0.5	extremely low strength

Attaque
ponctuelle
possible

■ Pour notre projet de tunnel: en lien avec forabilité du massif rocheux, tenue de l'ouvrage, convergence de l'ouvrage

Caractérisation des roches consolidées/paramètres/ résistance en compression/ test sur éprouvette de roche

Essai de compression simple ($\sigma_{d,G}$) – méthode de mesure



1 - Carottage d'une éprouvette de roche à un diamètre standardisé (longueur = env. diam. x 2)

Exemple: grès de Rothbach:

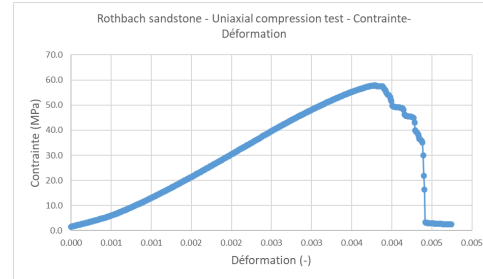
- Diam: 55.5 mm
- Hauteur: 111.6 mm
- Surface = 2419.242 mm²



2 - Compression de l'éprouvette sous une presse avec un taux de déformation donné (p.ex. $v = 0.12$ mm/min).

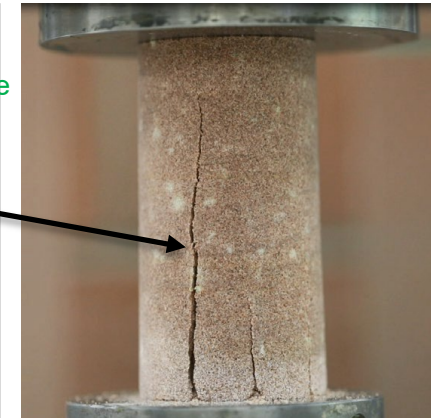
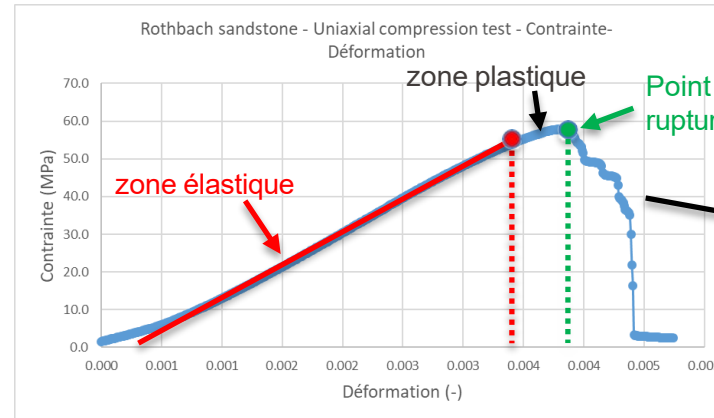
Lors du test, deux paramètres sont mesurés:

- la charge F (force appliquée sur l'éprouvette en Newton).
- la déformation verticale de l'éprouvette (mm).



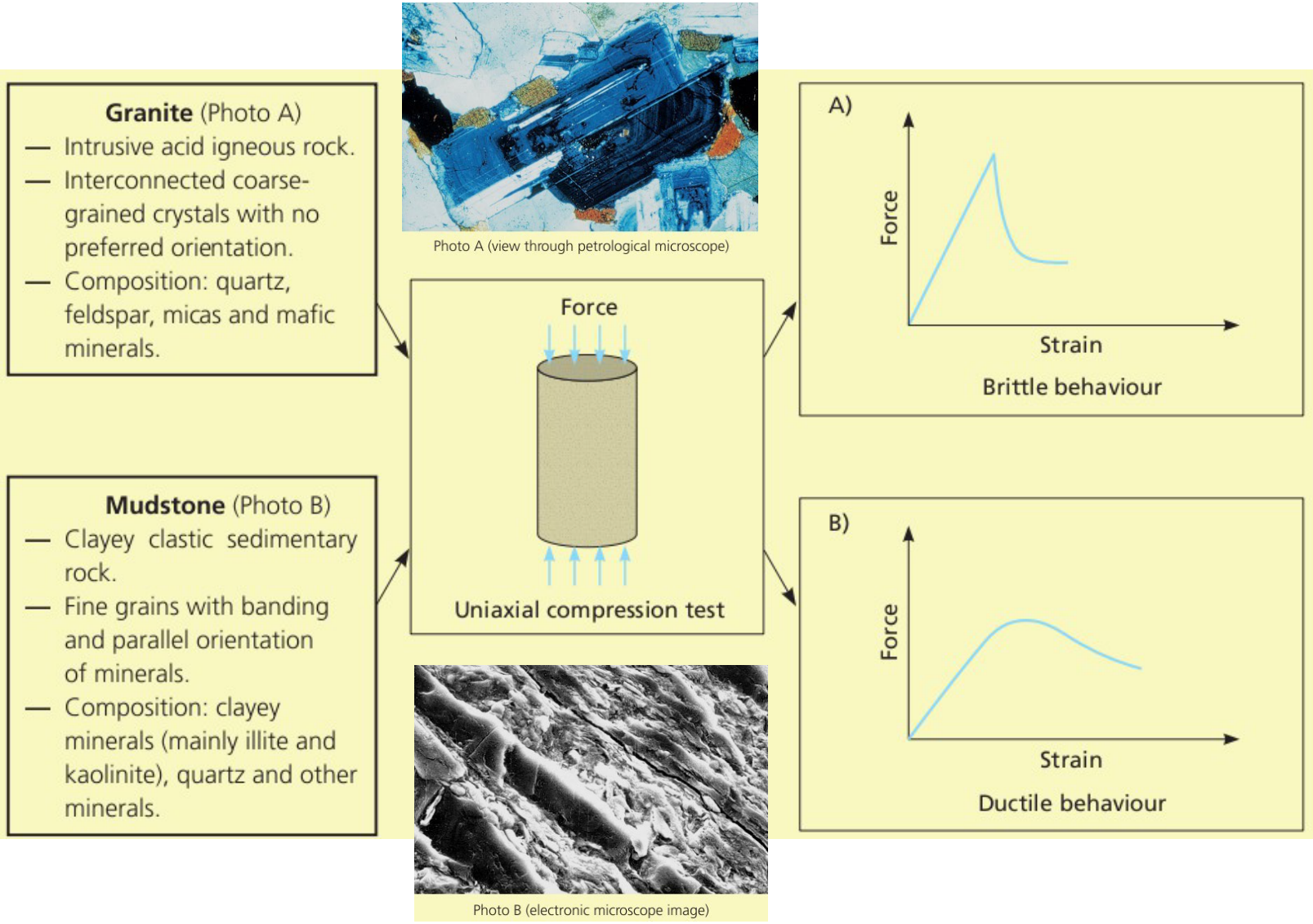
Graphie:

- la contrainte en MPa (axe Y) est la force F exercée sur l'éprouvette en $KN * 1000$ divisée par la surface de l'éprouvette en mm^2 . Exemple dans notre cas : $F = 6.23043584823608$ kN => contrainte = 2.575 Mpa.
- La déformation (sans dimension) = déplacement (mm)/hauteur de l'éprouvette (mm)



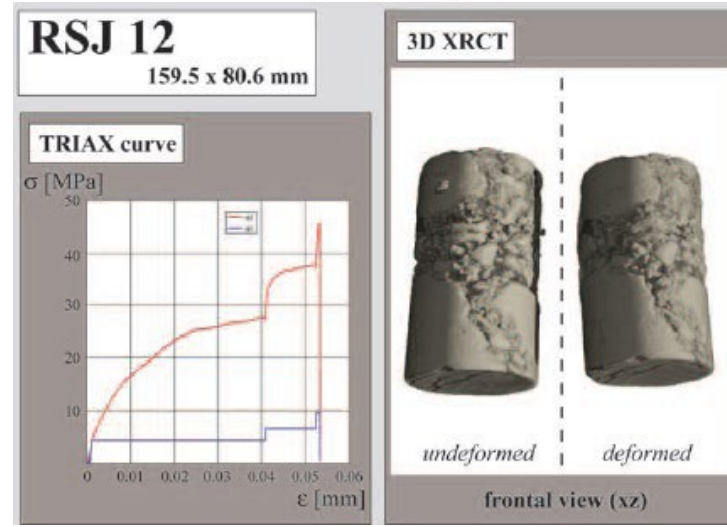
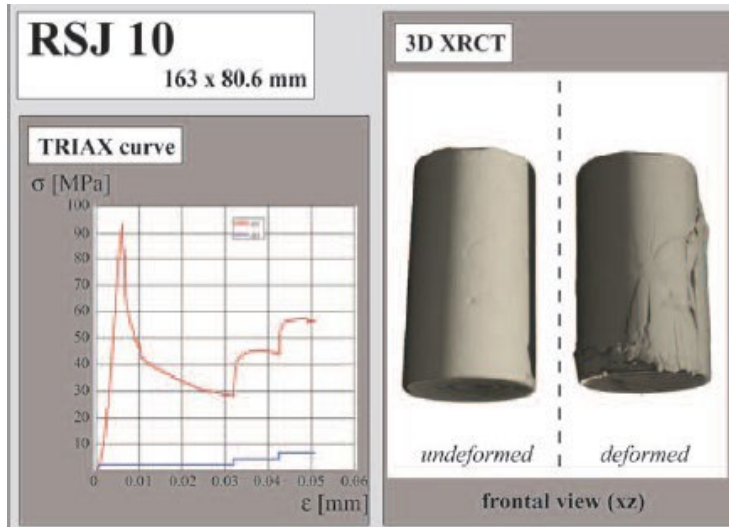
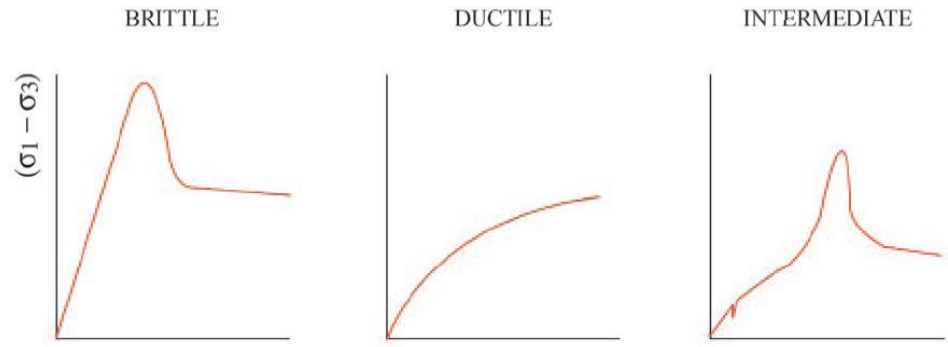
4 – D'abord, la déformation est proportionnelle à la contrainte (loi de Hook $\sigma = E\varepsilon$ zone de déformation élastique. Après cette zone de déformation élastique (réversible), la déformation devient de type plastique (irréversible). Le point limite d'élasticité est le point représentant la limite entre zones élastique et plastique. [point rouge sur la courbe]. **La résistance en compression** correspond au point de la courbe situé juste avant la rupture de l'échantillon [point vert sur la courbe]. La chute de la contrainte est produite par la rupture de la roche.

Caractérisation des roches consolidées/paramètres/résistance en compression/ déformation



Source: Vallejo & Ferrer, 2011

Caractérisation des roches consolidées/paramètres/ résistance en compression/déformation/altération/ exemple



Source: Christie, 2009

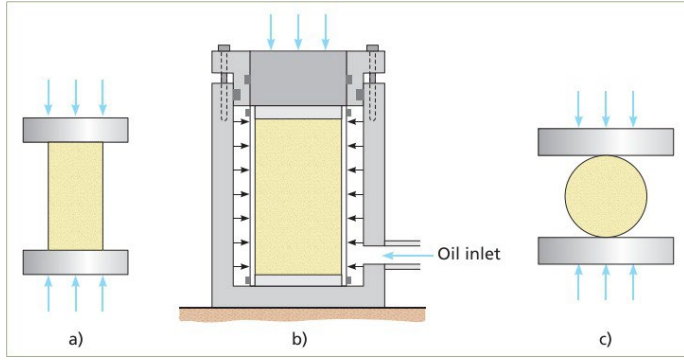
NB: les échantillons de roche RSJ10 et RSJ 12 appartiennent à la même formation carbonatée (calcaire). σ = stress (contrainte), ϵ = strain (déformation). On triaxial curves: σ_1 in red, σ_3 in blue.



Caractérisation des roches consolidées/paramètres/résistance en compression et à la traction

Table 3.6 STRENGTH VALUES FOR FRESH INTACT ROCK

Fresh rock	Uniaxial compressive strength (MPa)		Tensile strength (MPa)
	Average values	Range of values	
Andesite	210-320	100-500	7
Amphibolite	280	210-530	23
Anhydrite	90	80-130	6-12
Basalt	80-200	60-350	5-25
Diabase	240-350	130-365	55
Diorite	180-245	120-335	8-30
Dolerite	200-300	100-350	15-35
Dolomite	60-200	50-350	5-25
Gabbro	210-280	180-300	14-30
Gneiss	60-200	50-250	5-20
Granite	70-200	50-300	7-25
Greywacke	100-150	80-220	5.5-15
Gypsum	25	10-40	1-2.5
Limestone	60-140	50-200	4-30
Marble	120-200	60-250	6-20
Marl	30-70	20-90	-
Mudstone	20-40	10-90	1.5-10 0.5-1*
Quartzite	200-320	100-500	10-30
Salt	12	5-30	-
Sandstone	55-140	30-235	5-20
Schist	30-60	20-160	2-5.5
Shale	40-150	30-200	7-20
Siltstone	-	35-250	2.7
Tuff	-	10-46	1-4



Test en compression uniaxiale (UCS)

Test en compression triaxiale

Test en traction

Catégories UCS selon MPa (Franklin & Bosch, 1972)	
> 160	extremely high strength
50-160	very high strength
16-50	high strength
5-16	medium strength
1.6-5	low strength very
0.5-1.6	low strength
<0.5	extremely low strength



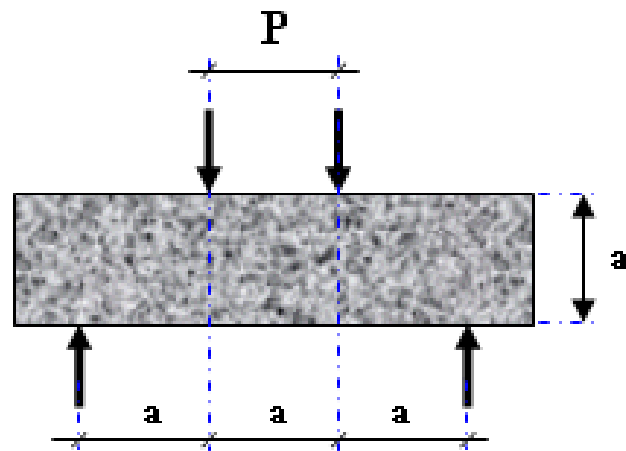
➡ ~ béton std.

EPFL Caractérisation des roches consolidées/paramètres/ résistance à la traction

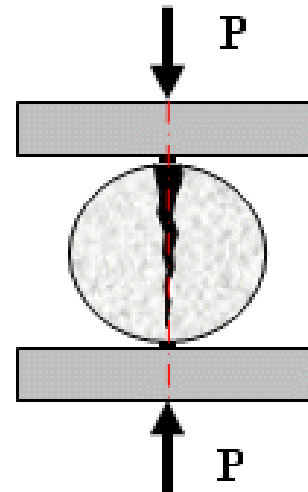
Résistance en traction (σ_m ou R_m)

→ Bien moindre que la résistance à la compression. Rapport compression/traction entre 8:1 à 25:1 [MPa]

Méthode de mesures différentes selon le type de matériel:

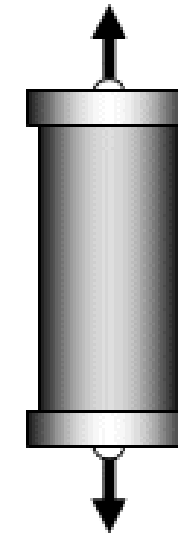


A. Essai de traction
par flexion
(ici à 4 points)



B. Essai de traction
par fendage

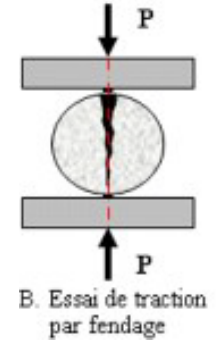
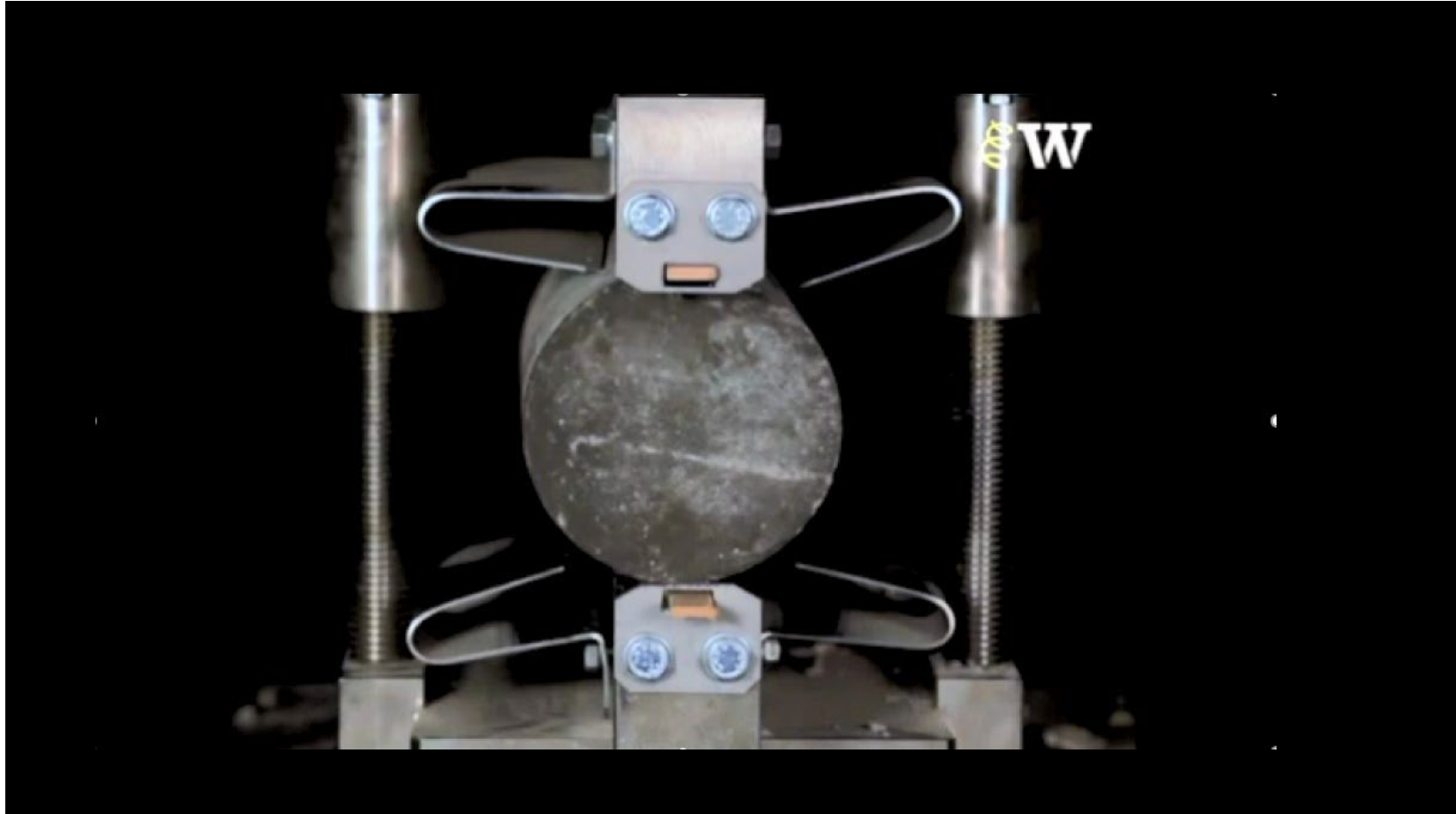
↑
Essai B = essai brésilien



C. Essai de traction
direct

EPFL Caractérisation des roches consolidées/paramètres/ résistance à la traction

Résistance en traction (σ_m ou R_m)
Essai brésilien sur béton



Caractérisation des roches consolidées/paramètres/ module d'élasticité et coefficient de poisson

Table 3.15 GUIDE TO ELASTIC CONSTANTS FOR ROCKS

Intact rock	Static elasticity modulus, E (GPa)	Dynamic elasticity modulus, E _d (GPa)	Poisson ratio, ν
Andesite	30-40		0.23-0.32
Amphibolite	13-92	46-105	
Anhydrite	1.5-76		
Basalt	32-100	41-87	0.19-0.38 (0.25)
Diabase	69-96	60-98	0.28
Diorite	2-17	25-44	
Dolomite	4-51	22-86	0.29-0.34
Gabbro	10-65		0.12-0.20
Gneiss	17-81 (53-55)	25-105	0.08-0.4 (0.20-0.30)
Granite	17-77	10-84	0.1-0.4 (0.18-0.24)
Greywacke	47-63	23-107	
Gypsum	15-36		
Limestones	15-90 (29-60)	8-99	0.12-0.33 (0.25-0.30)
Marble	28-72		0.1-0.4 (0.23)
Marl	4-34	10-49	
Mica-schist	1-20		
Mudstone	3-22	10-70	0.25-0.29
Quartzite	22-100 (42-85)		0.08-0.24 (0.11-0.15)
Salt	5-20		0.22
Sandstones	3-61	5-56	0.1-0.4 (0.24-0.31)
Schist	6-39 (20)		0.01-0.31 (0.12)
Shale	5-30		
Siltstone	53-75	7-65	0.25
Tuff	3-76		0.24-0.29

Maximum and minimum values. Average values in brackets.
Data taken from Rahn (1986), Johnson and De Graff (1988), Goodman (1989), Walthan (1999) and Duncan (1999).



Elasticité – Module d'Elasticité (E)

→ Coefficient de proportionnalité entre la déformation élastique et la contrainte appliquée:

$$E = \Delta\sigma_z / \Delta\varepsilon_z \text{ [GPa]}$$

Elasticité - Coefficient de Poisson (ν)

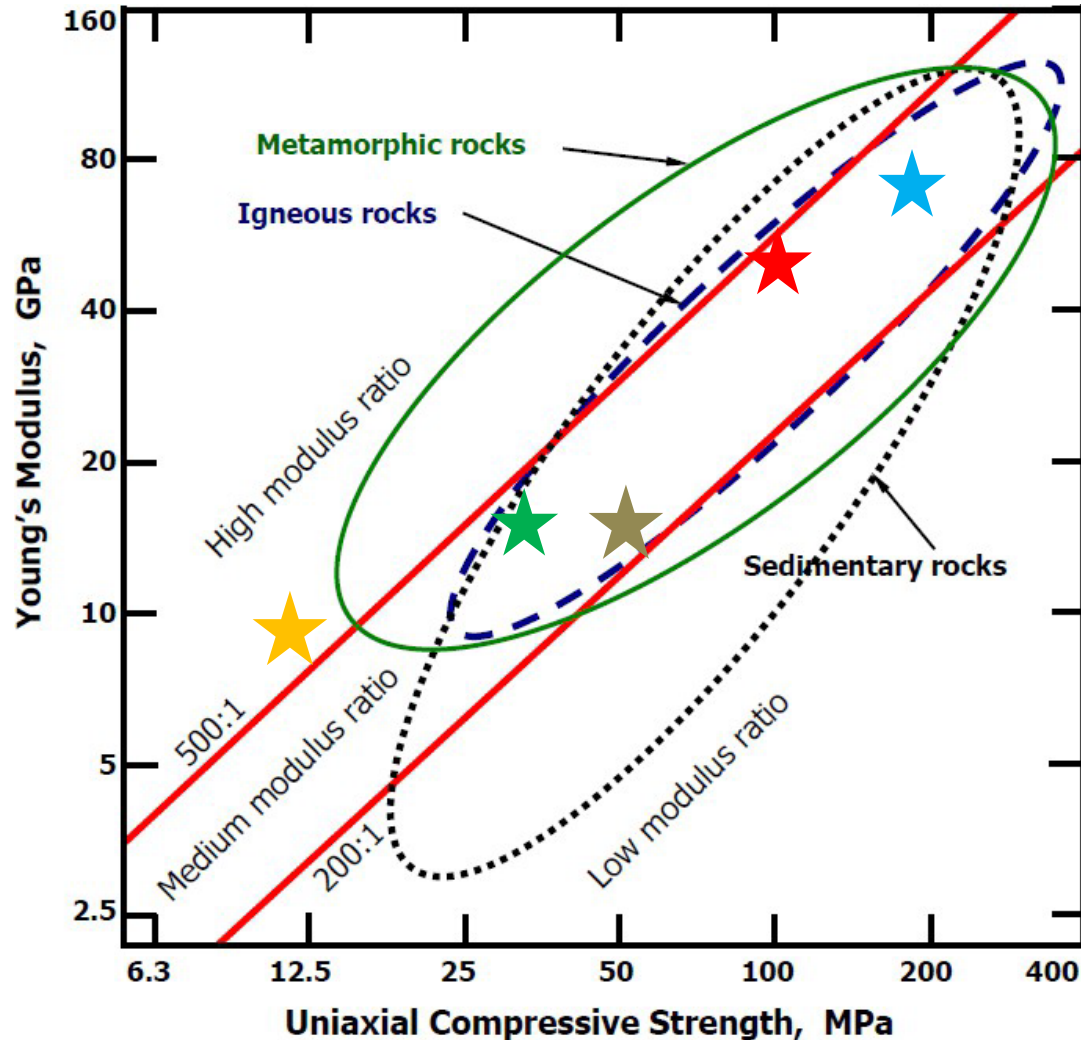
→ Rapport de proportionnalité entre la déformation radiale et axiale :

$$\nu = \varepsilon_r / \varepsilon_{ax} \text{ [-]}$$



Argile (test en compression)

Caractérisation des roches consolidées/paramètres/ module d'élasticité



Source: J. Zhao, EPFL LMR 2007

Module de Young ou module d'élasticité
(longitudinale) ou module de traction

$$E = \Delta\sigma_z / \Delta\varepsilon_z \text{ [GPa ou autre unité de pression]}$$

Mesure de E : essai de traction

Si module de Young est élevé => matériau rigide

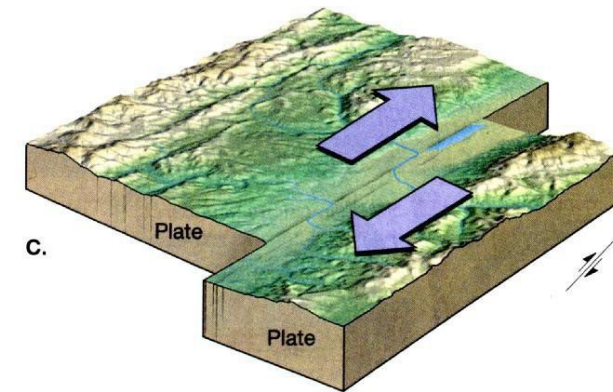
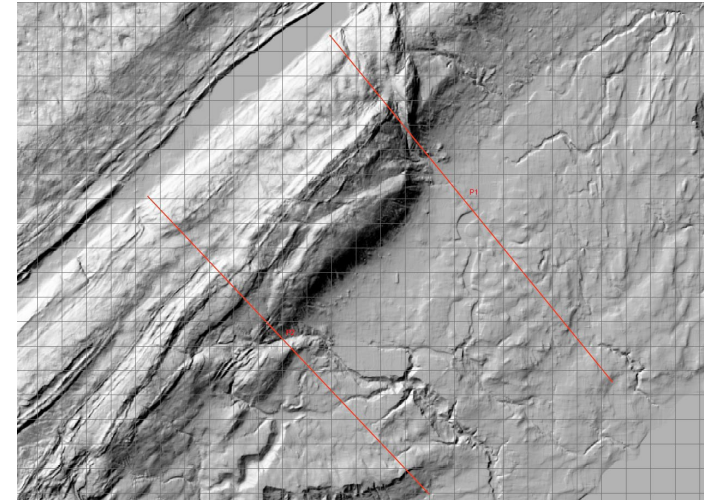
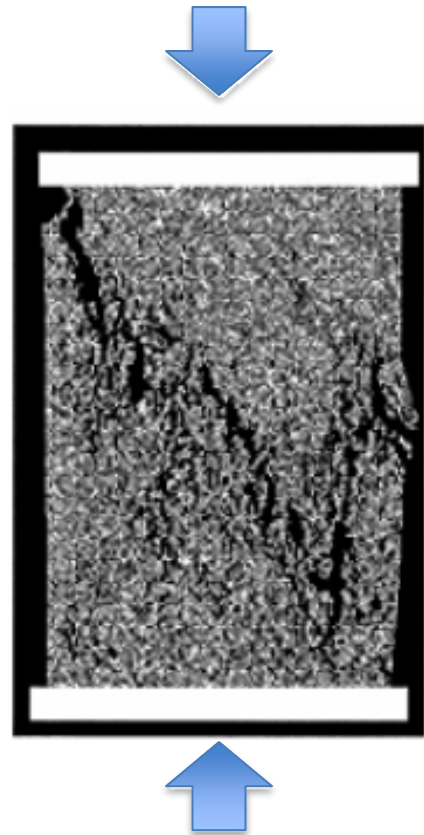
Exemples de modules de Young E (GPa):

- Calcaire: 20 à 70 ★
- Granite: 60 ★
- Graphite: 30
- Diamant: 1000
- Béton: 20 à 50
- Brique : 14 ★
- Caoutchouc: 0.001 à 0.1
- Kevlar: 34.5
- Marne: 4-34 ★
- Roche saline: 5-20 ★

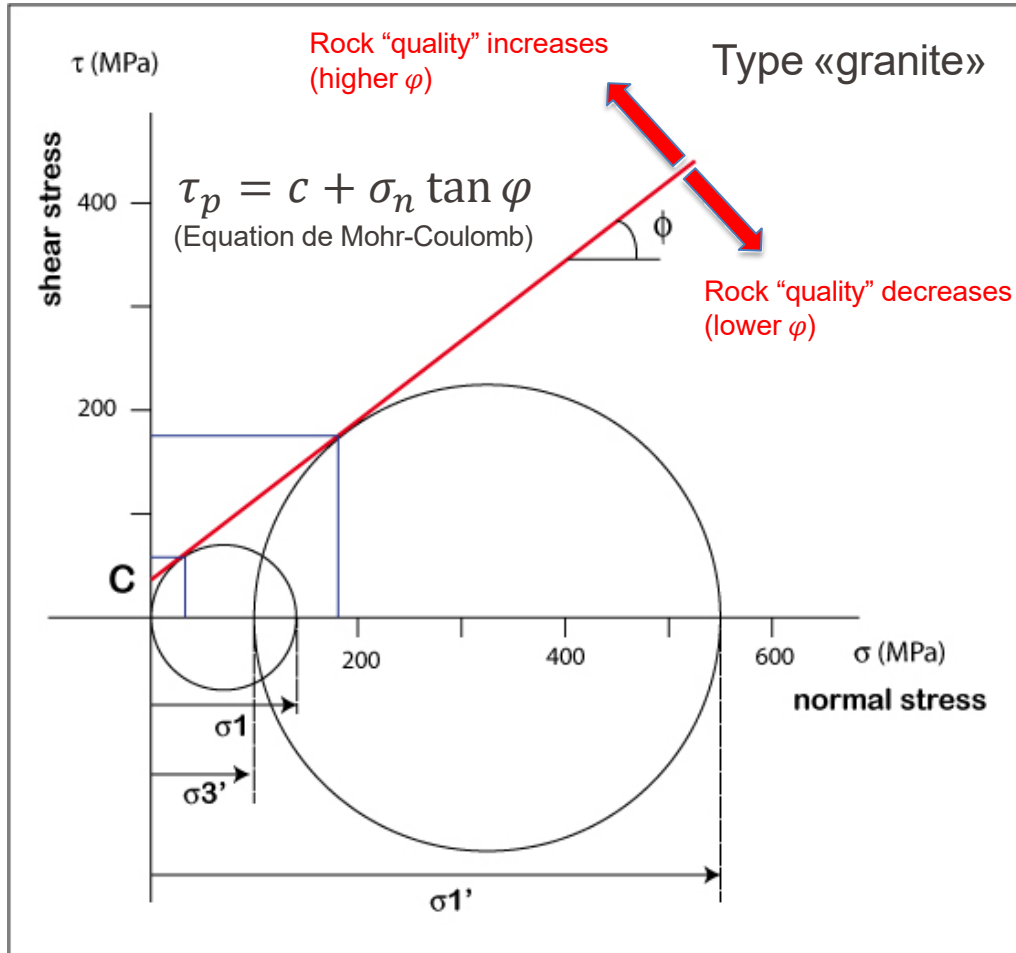
$$\text{Modulus ratio} = \frac{E}{\sigma}$$

EPFL Caractérisation des roches consolidées/paramètres/ résistance au cisaillement

Cisaillement (shear)



Caractérisation des roches consolidées/paramètres/ résistance au cisaillement/détermination sur roches



Test 1 (uniaxial):

$$\sigma_1 = 140 \text{ MPa}$$

$$\sigma_3 = 0 \text{ MPa}$$

Test 2 (triaxial):

$$\sigma_1' = 550 \text{ MPa}$$

$$\sigma_3' = 100 \text{ MPa}$$

Données lues sur graphe:

Cohésion , **$c = 35 \text{ MPa}$**

Angle de frottement interne: **$\varphi = 37^\circ$**

Cisaillement:

Test 1: **$\tau_f = 58 \text{ MPa}$**

Test 2: **$\tau_f = 180 \text{ MPa}$**

Contrainte normale:

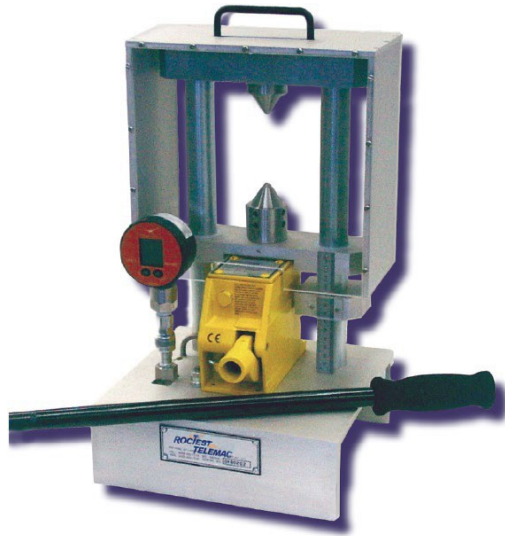
Test 1: **$\sigma_n = 30 \text{ MPa}$**

Test 2: **$\sigma_n = 190 \text{ MPa}$**

Caractérisation des roches consolidées/paramètres/résistance au poinçonnement

Essai de poinçonnement (Point load index)

- Indice de poinçonnement parallèle à la schistosité (I_p) [MPa]
- Indice de poinçonnement normal à la schistosité (I_s) [MPa]
- Évaluation de la résistance au poinçonnement de la roche (charge concentrée sur une petite superficie)
- Praticabilité de l'excavation, tenue de l'ouvrage à des charges concentrées, anisotropie de résistance de la roche



Catégories (Franklin & Bosch, 1972) :

> 10	extremely high strength
3-10	very high strength
1-3	high strength
0.3-1	medium strength
0.1-0.3	low strength
0.03-0.1	very low strength extremely
<0.03	low strength

Granite	5 – 15
Gabbro	6 – 15
Andesite	10 – 15
Basalte	9 – 15
Grès	1 – 8
Mudstone	0.1 – 6
Calcaire	3 – 7
Gneiss	5 – 15
Schiste	5 – 10
Ardoise	1 – 9
Marbre	4 – 12
Quartzite	5 – 15

Méthode de mesure: l'échantillon de roche est placé entre deux pointes coniques qui sont amenées juste en contact. La distance D_e entre les deux pointes est lue sur le réglet. La charge est augmentée jusqu'à la rupture de l'échantillon dans une période déterminée (par exemple comprise entre 10 et 60 secondes). La charge de rupture « P » est indiquée par le manomètre.

Dureté (échelle de Mohs)

→ Dureté des roches très influencée en pratique par la teneur en SiO₂ des lithologies

Dureté	Minéral	Composition chimique	Structure cristalline
1	Talc, friable sous l'ongle	Mg ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	monoclinique
2	Gypse, rayable avec l'ongle	CaSO ₄ ·2H ₂ O	monoclinique
3	Calcite, rayable avec une pièce en cuivre	CaCO ₃	rhomboédrique
4	Fluorite, rayable (légèrement) avec un couteau	CaF ₂	cubique
5	Apatite, rayable au couteau	Ca ₅ (PO ₄) ₃ (OH-, Cl-, F-)	hexagonale
6	Orthose, rayable à la lime, par le sable	KAlSi ₃ O ₈	monoclinique
7	Quartz, raye une vitre	SiO ₂	hexagonal
8	Topaze, rayable par le carbure de tungstène	Al ₂ SiO ₄ (OH-, F-) ₂	orthorhombique
9	Corindon, rayable au carbure de silicium	Al ₂ O ₃	rhomboédrique
10	Diamant, rayable avec un autre diamant	C	cubique



Source illustr.: Wikipédia_échelle de dureté de Mohs

Méthode de mesure: comptage sur lame mince, sur roche, sur résidu insoluble (calcaires), sur poudre de roche (Rx), sur grain (si matériel non consolidé).

Essai d'abrasivité de type CERCHAR

- Indice d'abrasivité d'une roche [unités CAI]
- Potentiel d'abrasion d'une roche
- Critère de classification des roches dures, choix des outils d'excavation, rendement des outils, taux de remplacement et coûts associés.

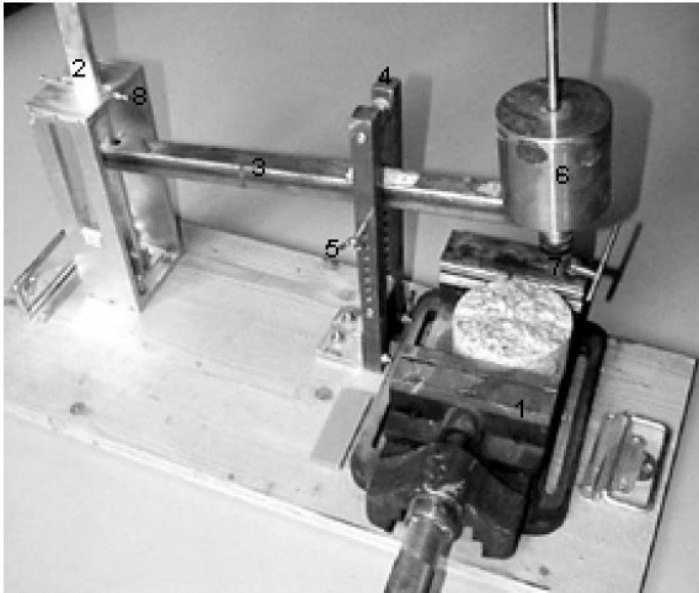


photo de l'appareillage

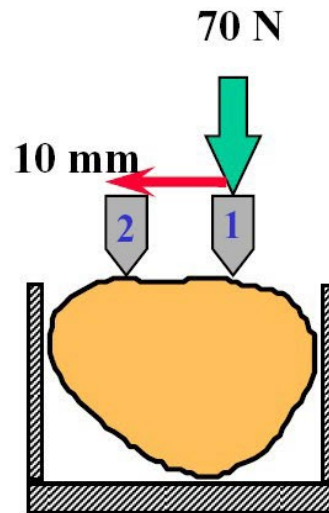
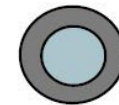
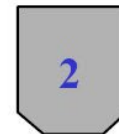
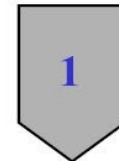


Schéma de principe de l'essai

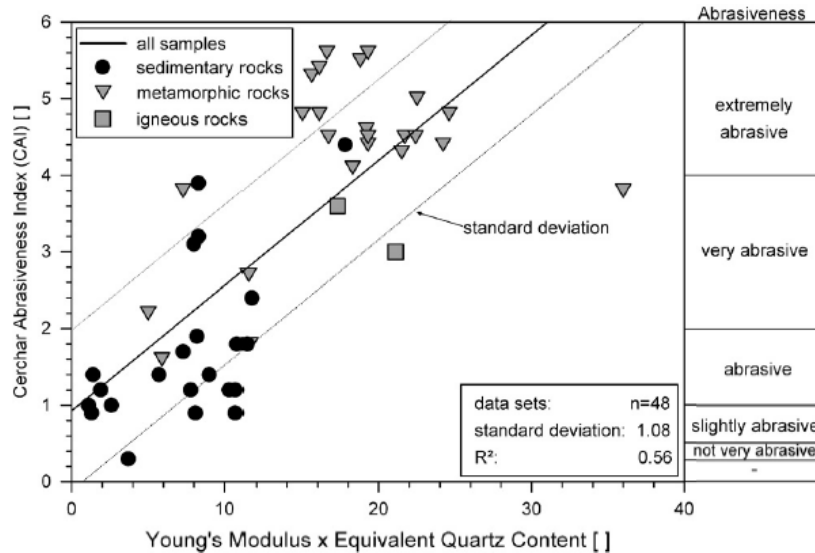
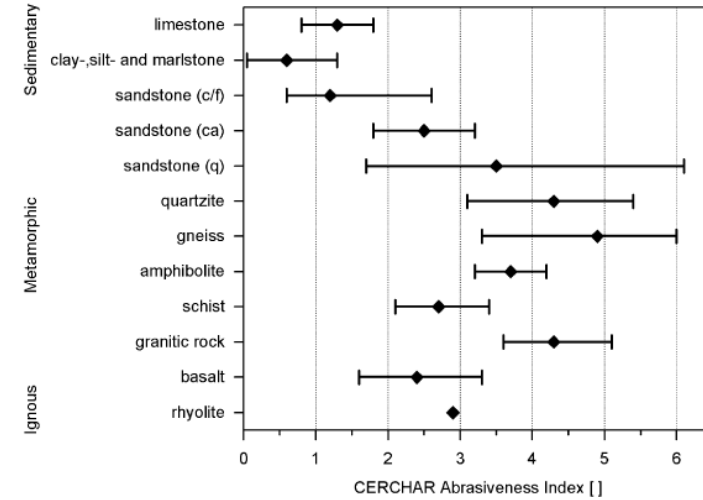


Méthode de mesure par essai de rayure avec pointe: une pointe conique en acier (qualité et géométrie normalisées) sur laquelle s'exerce une charge statique de 70 N est déplacée sur la surface (brute) de l'échantillon, sur une distance de 10 mm. L'abrasion de la pointe, représentée par l'augmentation de son diamètre (voir figure), est mesurée après essai. L'indice de Cerchar est exprimé en 1/10 de mm.

Essai d'abrasivité de type CERCHAR

Index ICA	Echelle d'abrasivité
<0.3	pas abrasif
0.3 - 0.5	très peu abrasif
0.5 - 1.0	peu abrasif
1.0 - 2.0	abrasif
2.0 - 4.0	très abrasif
4.0 - 6.0	extrêmement abrasif
6.0 - 7.0	quartz

R. Plinninger et al. / International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 40 (2003) 259-263



After Plinninger & al, 2002

Granite	4.5 – 5.3
Diorite	4.2 – 5.0
Andésite	2.7 – 3.8
Basalte	2.0 – 3.5
Grès	1.5 – 3.5, 2.8 – 4.2
Schiste argileux	0.6 – 1.8
Calcaire	1.0 – 2.5
Gneiss	3.5 – 5.3
Ardoise	2.3 – 4.2
Quartzite	4.3 – 5.9

After Zhao J., 2007

Caractérisation des roches consolidées/paramètres/dureté et abrasivité

Influence sur le creusement des tunnels

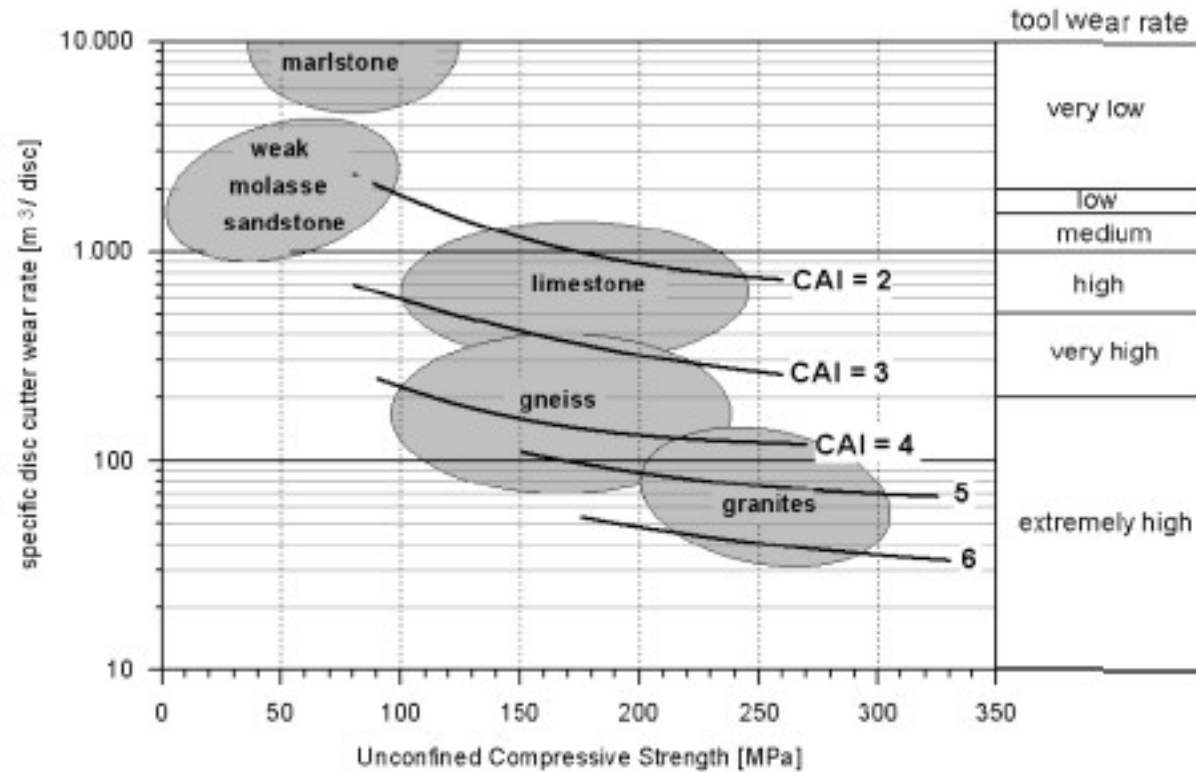


Fig. 10: Correlation of TBM cutter life [m³/disc], UCS and CAI for some common rock types (Maidl, Schmid, Ritz & Herrenknecht, 2001)

EPFL Caractérisation des roches consolidées/paramètres/ gonflement

Durabilité d'une roche: résistance de la roche a un processus d'affaiblissement ou de désintégration

Source: Vallejo & Ferrer, 2011



Figure 3.8 Slake durability test apparatus.

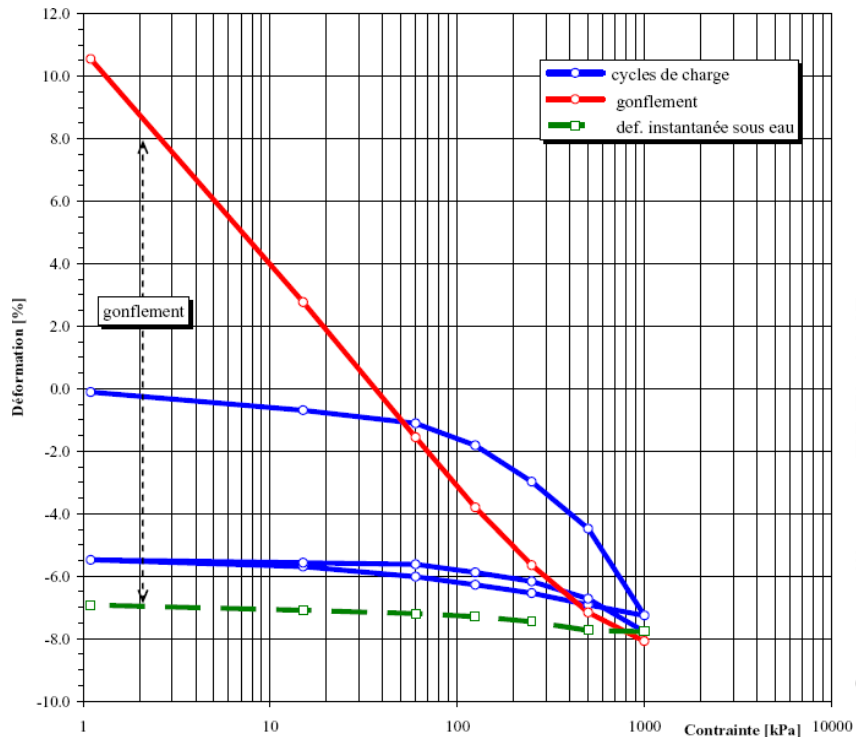
Table 3.5 DURABILITY CLASSIFICATION BASED ON THE I_{D1} INDEX		
Durability	% weight retained after 1 cycle	
	(1)	(2)
Extremely high	–	>95
Very high	>99	90–95
High	98–99	75–90
Medium-high	95–98	–
Medium	85–95	50–75
Low	60–85	25–50
Very low	<60	<25

(1) Gamble, 1971 (in: Goodman, 1989)
(2) Frankling and Chandra, 1972 (in: Johnson and De Graff, 1988)

→ Slake durability index I_D (%) = poids sec après 1 ou 2 cycles / poids initial de l'échantillon

Contrainte, Déformation de gonflement maximale (s)

- Déformation des matériaux par saturation
- Caractérisation de la déformation des matériaux en contact avec l'eau (essentiellement argiles)
- changement des caractéristiques mécaniques, soulèvement du radier, instabilité de l'ouvrage, convergence.



Source illustr.: EPFL-LMR

Méthode de mesure par essai Huder-Amberg: cycle initial de charge – décharge – recharge aux conditions de saturation à réception – immersion de l'échantillon en contrainte maximale, puis décharge par paliers. A chaque palier, attente de la stabilisation du gonflement. Construction de la courbe de gonflement (contrainte déformation). Le potentiel de gonflement est déterminé par la différence entre la courbe de gonflement et la courbe de déformation instantanée sous eau.

Altération des roches

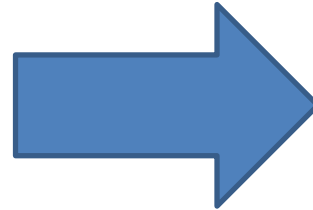
Altération (définition dans ce cours)

Tout processus physique, chimique ou biologique, naturel ou artificiel, amenant à une modification de la composition, de la structure ou d'une ou plusieurs propriété(s) d'un sol ou d'une roche.



Anhydrite (CaSO_4) Densité: 2.9

Hydratation



Gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) Densité 2.3

→ Dans tous les domaines de la géologie de l'ingénieur en massif rocheux, le degré de fracturation de la roche est souvent la forme d'altération la plus importante à prendre en compte

Altération des roches/exemple

Exemple : chute de blocs et

Termeno (Tyrol, Italie)



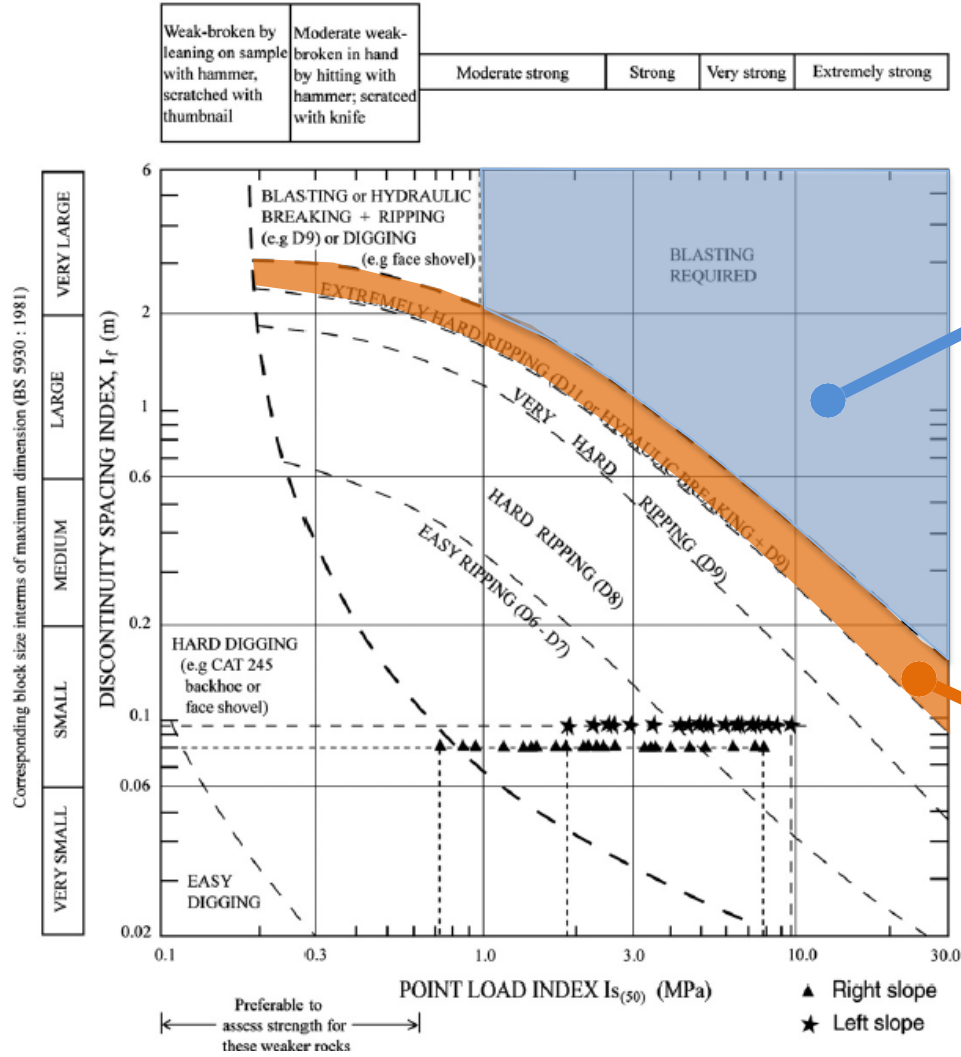
Source: Tuxboard

Brazatortas (Madrid, Espagne)



Source: M. Ferrer

Altération des roches/degré de fracturation/ excavation du rocher



Altération des roches/fracturation/types de rupture

Rupture par glissement couche sur couche



Rupture par glissement sur dièdre (coin)



Rupture par basculement

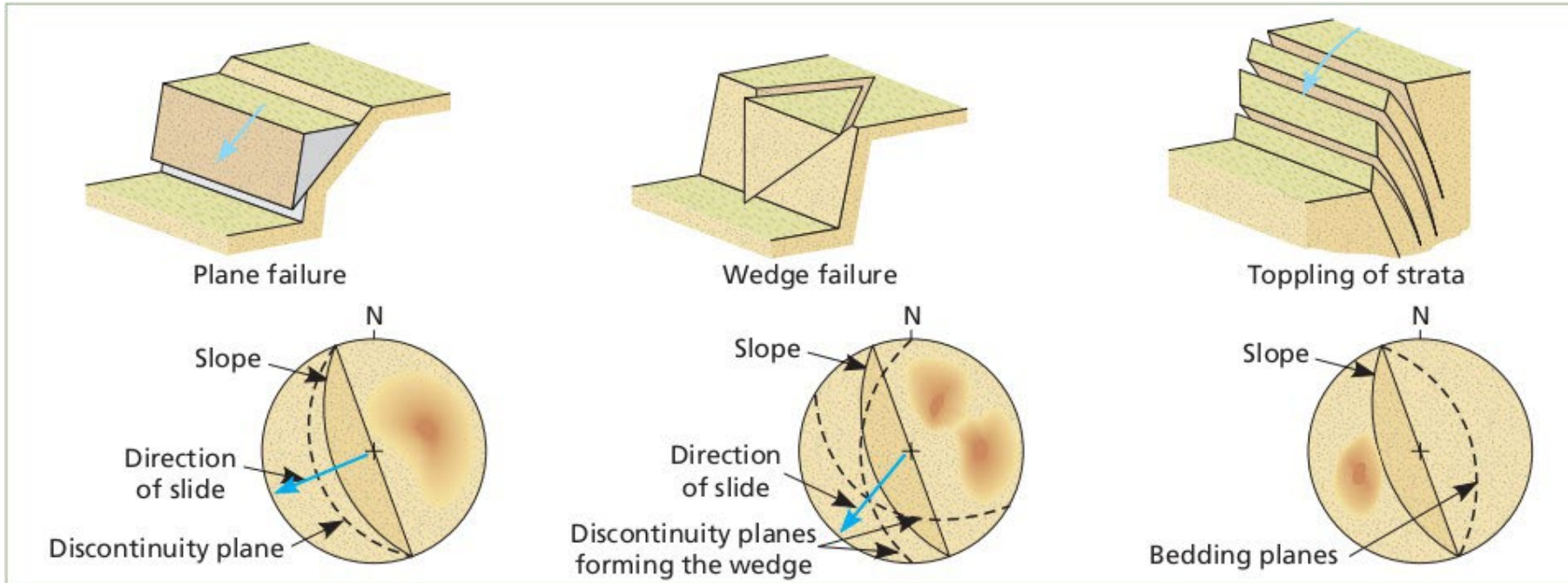


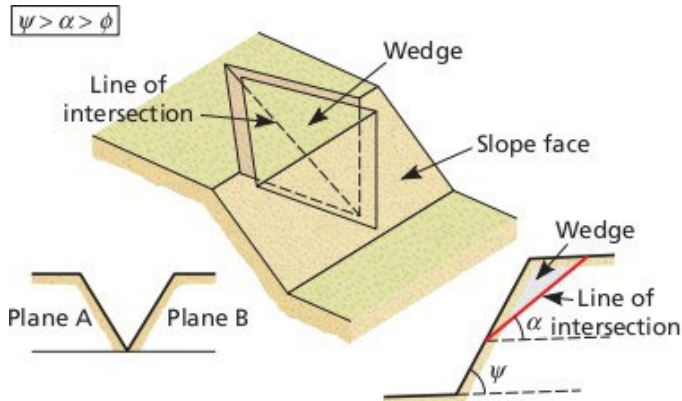
Figure 9.15 Stereographic representation of discontinuity planes in relation to slope orientation for common types of failure in rock masses (modified from Hoek and Bray, 1981).

Source: Vallejo & Ferrer 2011

Altération des roches/fracturation/types de rupture/ exemple

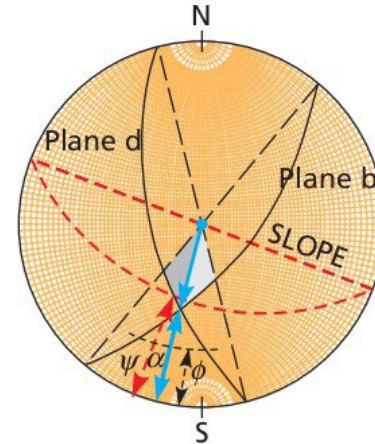


Wedges in a rock mass with four sets of discontinuities in relation to a slope with orientation 110°/45°S.



ψ : inclinaison de la pente
 ϕ : angle de friction
 α = inclinaison de la ligne d'intersection des plans du dièdre

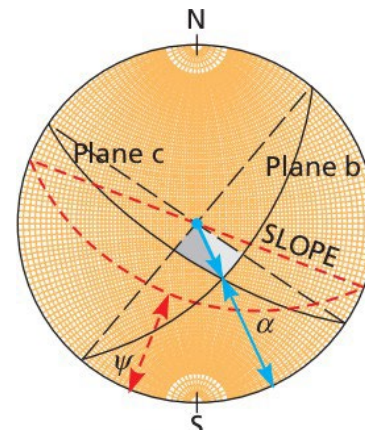
Wedge D



Wedge D: $\psi > \alpha > \phi$

Glissement possible ou impossible dans ce cas de figure ?

Wedge B



Wedge B: $\psi < \alpha$

Glissement possible ou impossible dans ce cas de figure ?

Altération des roches/fracturation/orientation des discontinuités/tunneling

Analyse des discontinuités dans le cas d'un tunnel

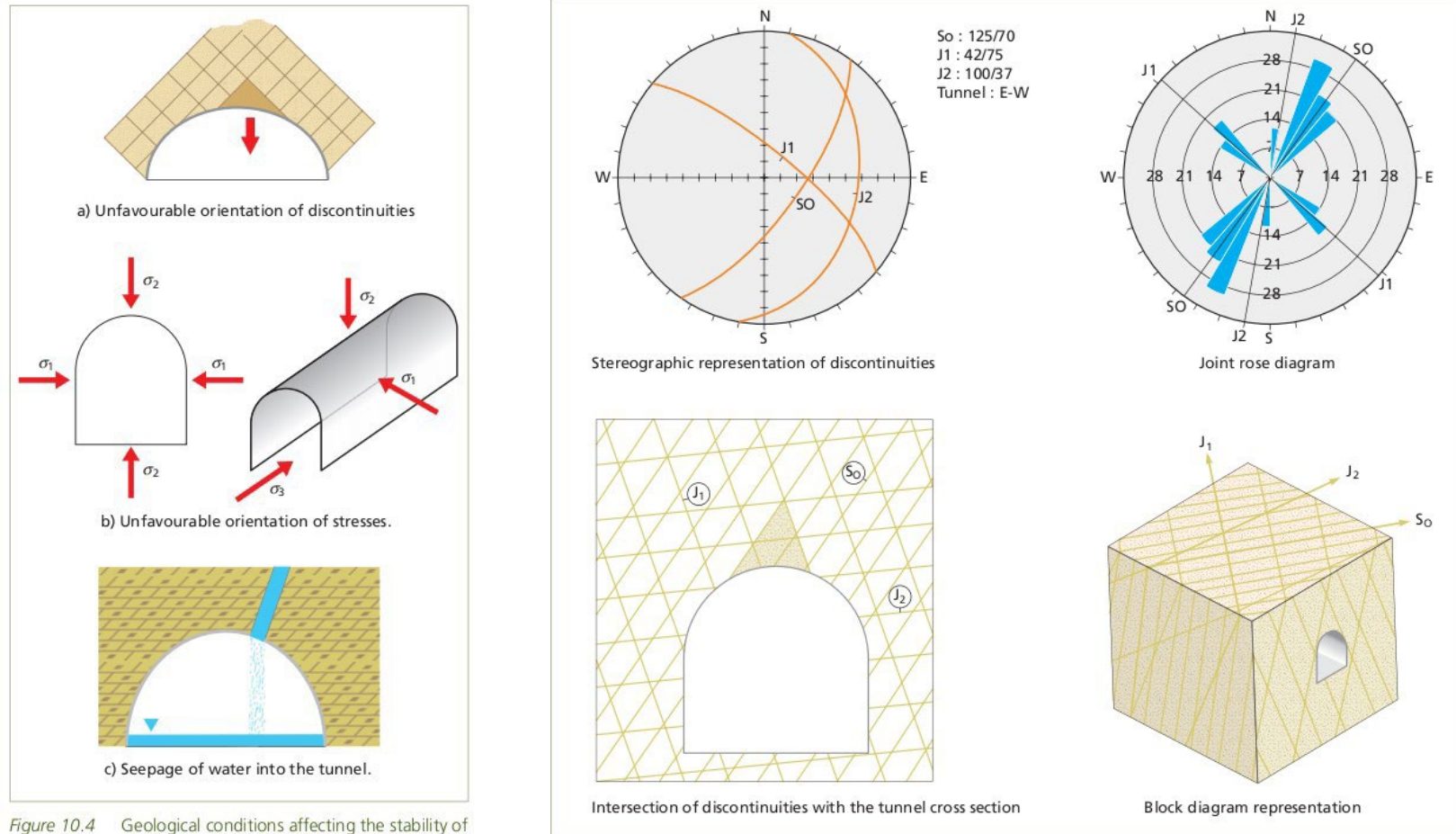


Figure 10.4 Geological conditions affecting the stability of rock tunnel excavations.

Source: Vallejo & Ferrer 2011

Altération des roches/fracturation/discontinuités/ relevé de fracturation/RQD (avec exercice)

Rock Quality Designation (RQD) - Deere et al. 1967

Permet l'analyse quantitative de l'état de fracturation d'une carotte de roche

Mesure: sur un carottage en rocher, mesure de la longueur cumulée des pièces dont la longueur est supérieure à 10 cm.

RQD (%) est le rapport de longueur de ces pièces à la longueur totale.

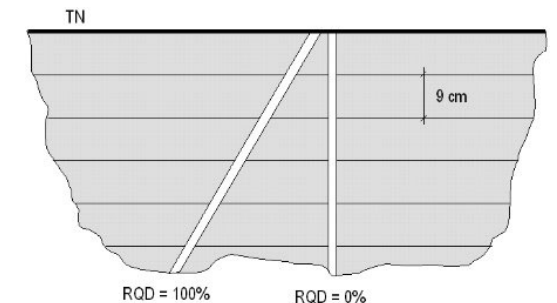
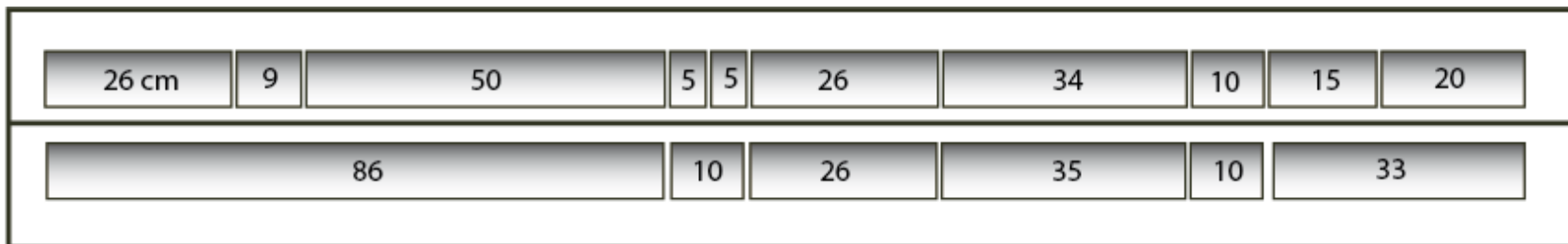
Classification:

Source: Deere et al. (1967)

RQD (%)	Qualification du rocher
0 - 25	very poor
25 - 50	poor
50 - 75	fair
75 - 90	good
90 - 100	excellent

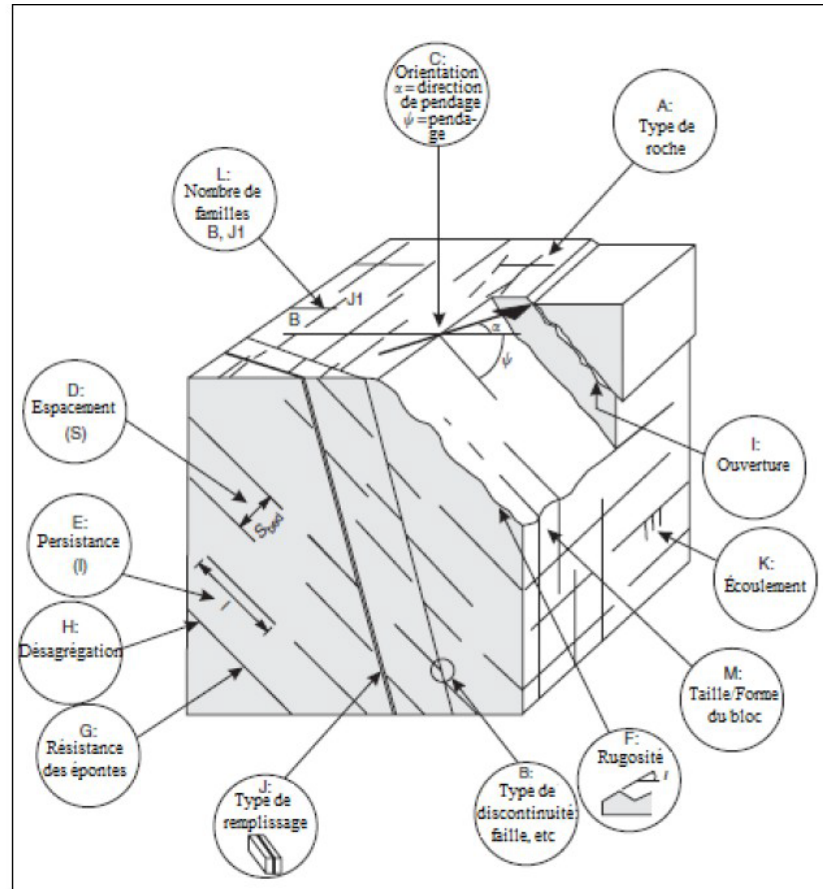


RQD (%) = ?



Source: Bonnard et Gardel, 2012

Altération des roches/fracturation/discontinuités/ analyse du massif rocheux/paramètres



4: Caractéristiques des discontinuités dans un massif rocheux; traduit de Wyllie et Mah (2004)

Les mesures liées aux discontinuités d'un massif rocheux:

- Type de roche
- Orientation /pendage des plans de fracture
- Famille de fractures
- Espacement des fractures
- Persistance des fractures
- Désagrégation des fractures
- Résistance des épontes
- Remplissage des fractures
- Type de discontinuités
- Rugosité
- Taille/forme des blocs (relevé de fracturation)
- Ecoulements liés à la fracture
- Ouverture des fractures

Altération des roches/fracturation/caractérisation

Rock tunnelling quality index « Q » (Barton et al.1974)

Rock Tunnelling Quality Index, Q (or Norwegian Q system), Barton et al., 1974

facteur de taille des blocs facteur de rugosité/friction des surfaces facteur de contrainte

$$Q = \left(\frac{RQD}{J_n} \right) \times \left(\frac{J_r}{J_a} \right) \times \left(\frac{J_w}{SRF} \right)$$

RQD = Rock Quality Designation	100 - 10
J _n = Joint set number	1 - 20
J _r = Joint roughness factor	4 - 1
J _a = Joint alteration and clay fillings	1 - 20
J _w = Joint water inflow or pressure	1 - 0.1
SRF = stress reduction factor	1 - 20

Altération des roches/fracturation/systèmes de qualification du rocher/exemple du Q-index/ exemple

Plusieurs systèmes d'évaluation de la qualité du rocher coexistent:

- Rock tunnelling quality index « **Q** » (Barton et al. 1974)
- Rock Mass Rating index « **RMR** » (Bieniawski 1976, 1989)
- etc.

Rock Mass Rating (RMR), Bieniawski (1976, 1989)

- Classifies rock according to 6 parameters:
 - UCS
 - RQD
 - Spacing of discontinuities
 - Condition of discontinuities
 - Groundwater conditions
 - Discontinuity orientation

Altération des roches/fracturation/systèmes de qualification du rocher/exemple du Q-index/ exemple

Table 3.27 ROCK MASS QUALITY ACCORDING TO THE RMR INDEX

Class	Quality	RMR rating	Cohesion (MPa)	Friction angle
I	Very good	100–81	>0.4	>45°
II	Good	80–61	0.3–0.4	35°–45°
III	Fair	60–41	0.2–0.3	25°–35°
IV	Poor	40–21	0.1–0.2	15°–25°
V	Very poor	<20	<0.1	<15°

Class I (RMR = 81-100) and Class II (RMR= 61-80) rock masses



Cretaceous dolomite. Very good quality. Two main sets of discontinuities.



Granite. Good quality. Several sets of weathered discontinuities.

Altération des roches/fracturation/systèmes de qualification du rocher/exemple du Q-index/ exemple

Class III rock masses (RMR= 41-60)



Ordovician slate. Fair quality. High fracturing degree. Weathering degree: III.



Ordovician quartzite. Fair quality. High fracturing degree. Very hard intact rock.

Class IV (RMR= 21-40) and Class V (RMR ≤ 20) rock masses



Ordovician quartzite. Poor quality. Weathered and heavily jointed rock mass.

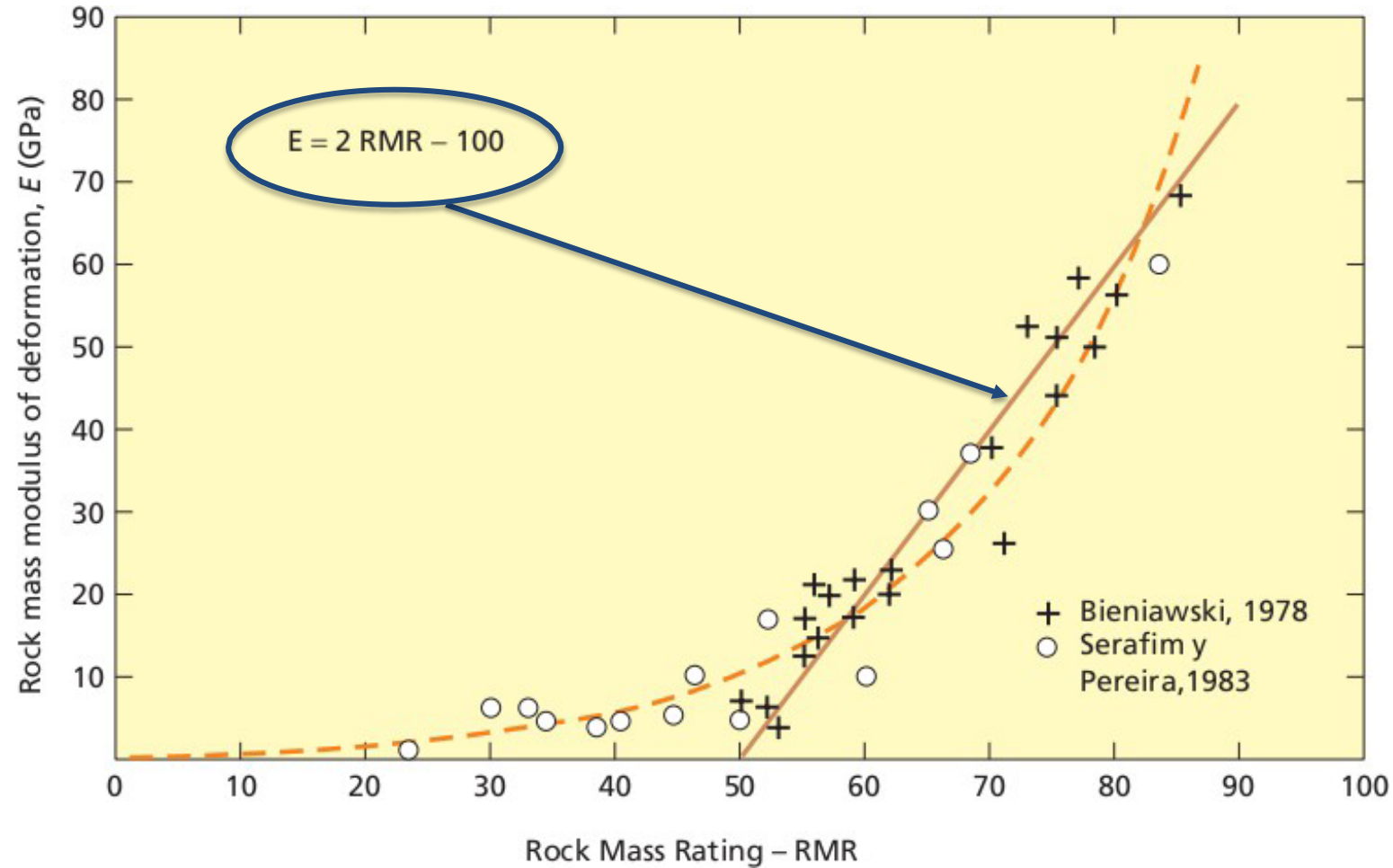


Palaeozoic slate. Very poor quality. Heavily jointed. Degree of weathering: V.

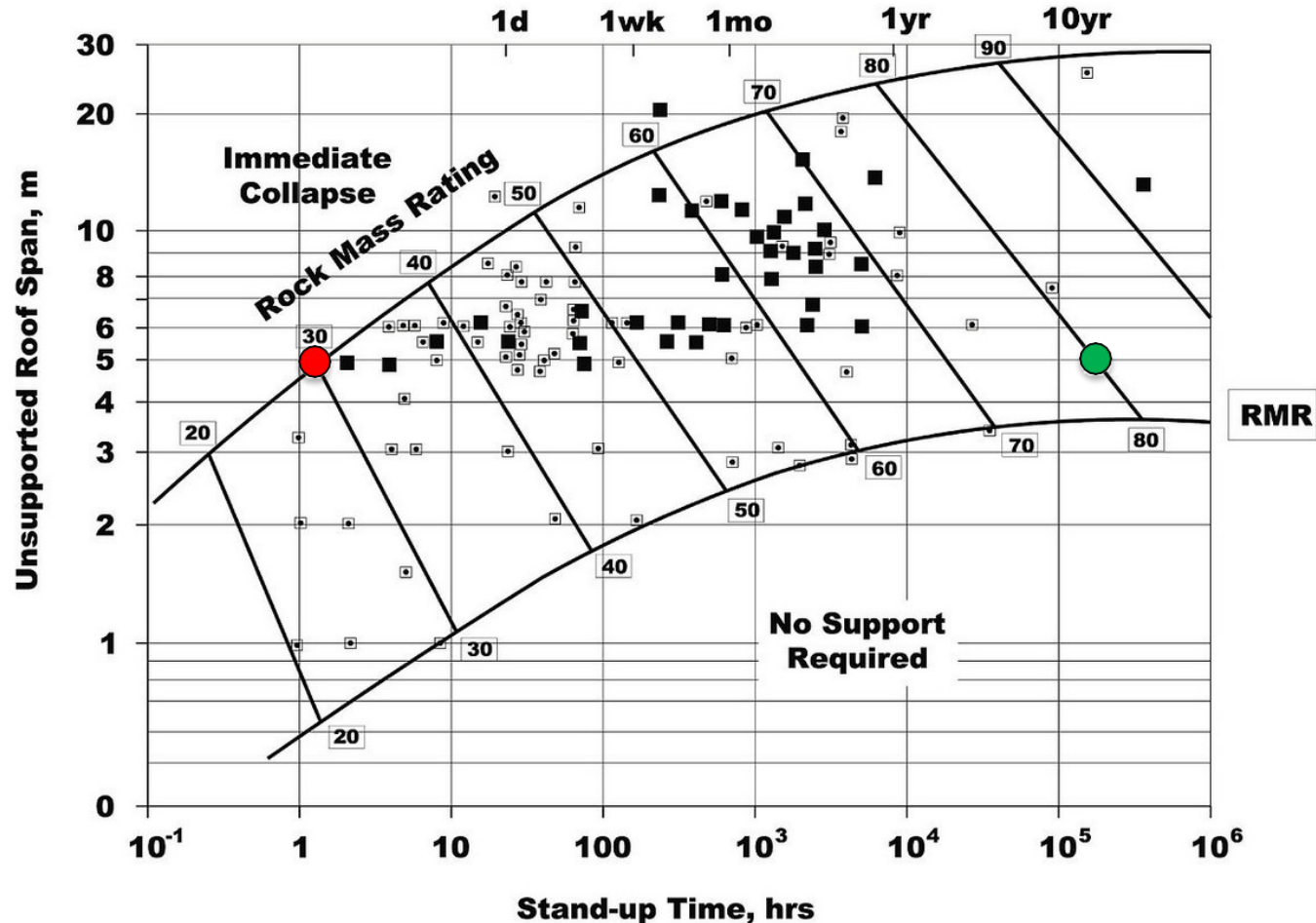
RMR - ILLUSTRATION

Altération des roches/fracturation/systèmes de qualification du rocher/RMR - Module d'élasticité

Relation expérimentale RMR – Module E



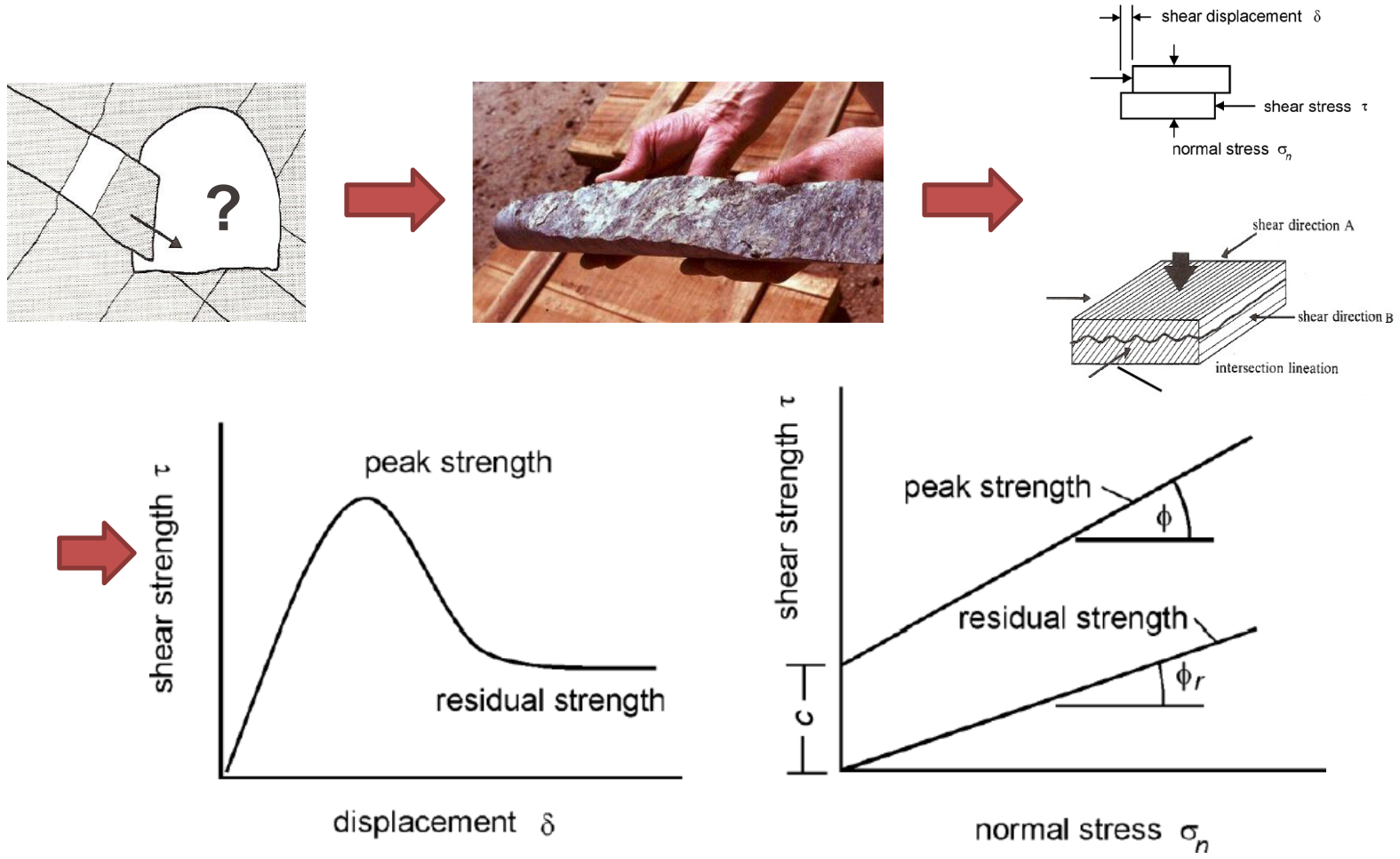
Altération des roches/fracturation/systemes de qualification du rocher/RMR - Tenue des tunnels



Expérimentale relation entre l'index de qualité « RMR » et la durée de tenue (stand up times) de tunnels non revêtus

Altération des roches/fracturation/angle de frottement résiduel

Exemple de détermination de l'angle de frottement résiduel (ϕ_r) d'un joint rugueux



Source : EPFL-LMR (J. Zhao)



Caractéristiques géotechniques des roches



Magmatiques



Granite



Minéralogie

- Quartz (abrasif)
- Orthose
- Plagioclases
- Biotite

Structure

- Cristalline

Texture

- Massif

- Porosité : faible

- Perméabilité : faible

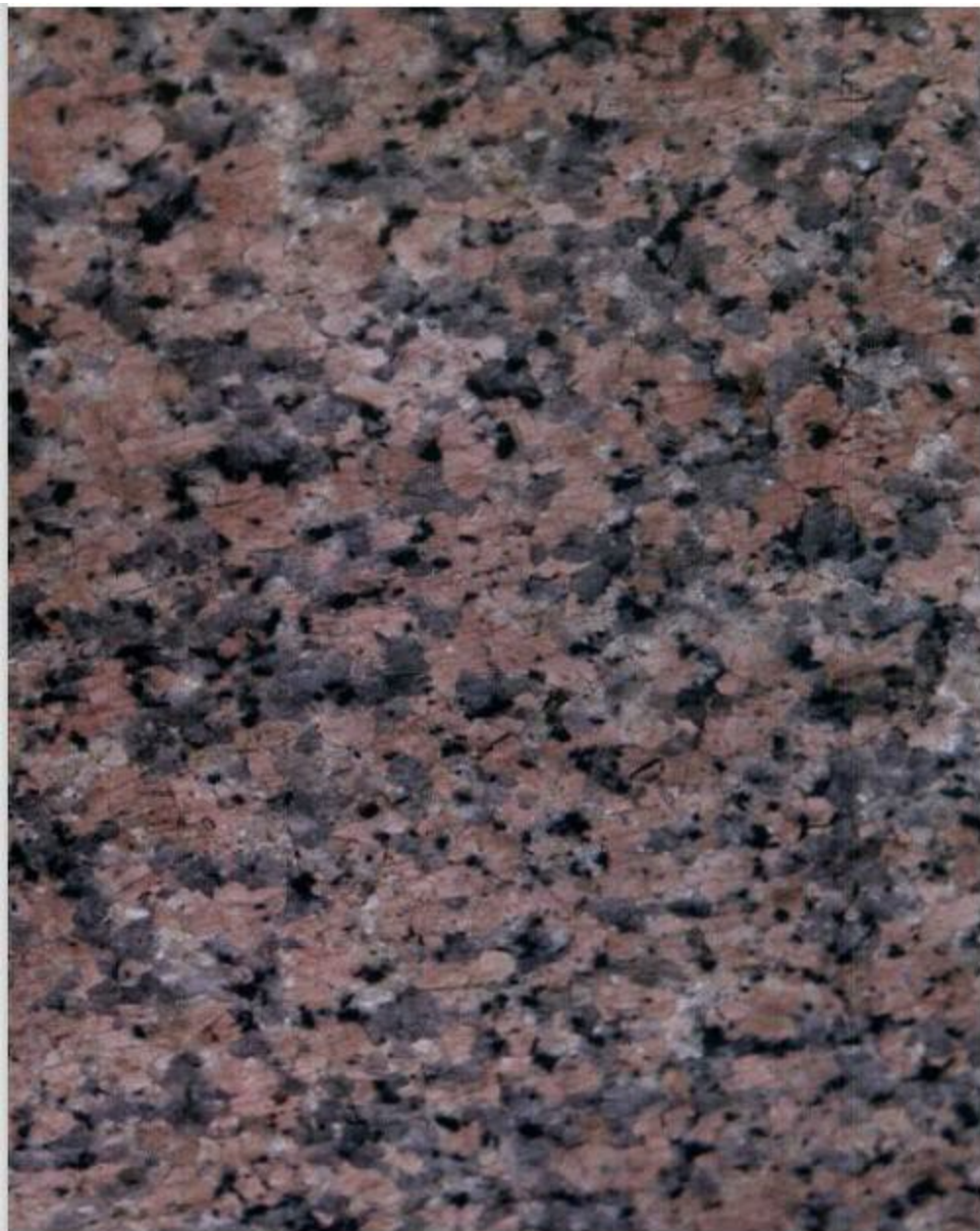
Caractéristiques techniques

- Densité : 2,7 t/m³
- Résistance à la compression : 150 Mpa

Utilisation

- Roche ornementale

Granite alcalin



Minéralogie

- Quartz (abrasif)
- Orthose
- Plagioclases
- Biotite

Structure

- Cristalline

Texture

- Massif

- Porosité : faible

- Perméabilité : faible

Caractéristiques techniques

- Densité : 2,7 t/m³
- Résistance à la compression : 150 Mpa

Utilisation

- Roche ornementale

**Minéralogie**

- Orthose
- Plagioclases
- Biotite

Structure

- Cristalline

Texture

- Massif

• Porosité : faible

• Perméabilité : faible

Caractéristiques techniques

• Densité : 2,8 t/m³

• Résistance à la compression : 150 Mpa

Utilisation

- Roche ornementale

Diorite



Minéralogie

- Plagioclases
- Amphiboles

Structure

- Cristalline

Texture

- Massif

- Porosité : faible

- Perméabilité : faible

Caractéristiques techniques

- Densité : 2,9 t/m³
- Résistance à la compression : 200 Mpa

Utilisation

- Roche ornementale

Gabbro



Minéralogie

- Plagioclases
- Pyroxènes

Structure

- Cristalline

Texture

- Massif

- Porosité : faible

- Perméabilité : faible

Caractéristiques techniques

- Densité : 2,7 t/m³
- Résistance à la compression : 150 MPa

Peridotite



Minéralogie

- Olivine
- Pyroxènes
- Plagioclase

Structure

- Cristalline

Texture

- Massif

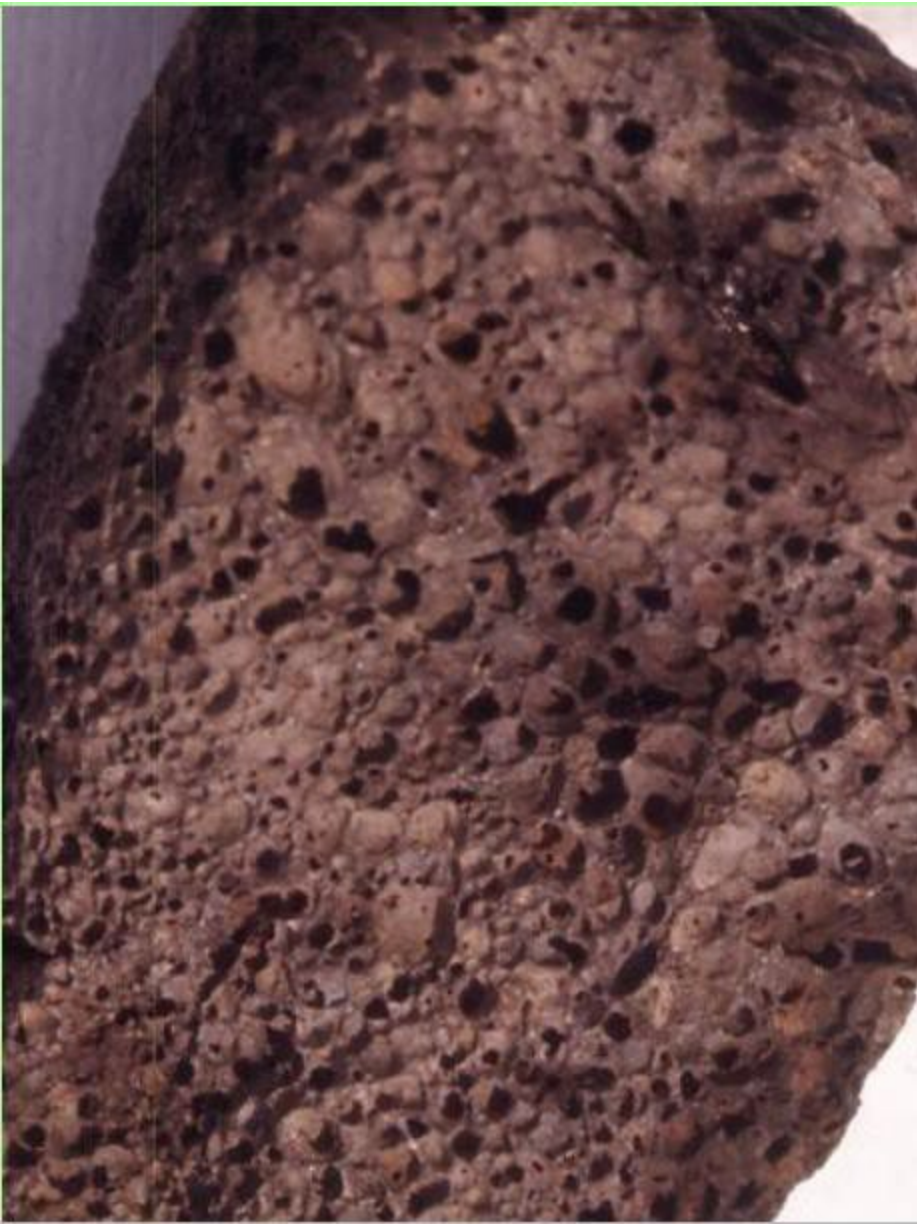
- Porosité : faible

- Perméabilité : faible

Caractéristiques techniques

- Densité : $2,7 \text{ t/m}^3$
- Résistance à la compression : 150 MPa

Basalte vacuolaire



Minéralogie

- Plagioclases
- Pyroxènes

Structure

- Porphyrique

Texture

- Vacuolaire

• Porosité : élevée

• Perméabilité : faible

Caractéristiques techniques

• Densité : 2,0 t/m³

• Résistance à la compression : 50 MPa



Minéralogie

- Non définissable

Structure

- Porphyrique

Texture

- Stratifiée

- **Porosité** : élevée

- **Perméabilité** : élevée (fonction de l'interconnexion des pores)

Caractéristiques techniques

- **Densité** : 2,4 t/m³

- **Résistance à la compression** : 70 MPa

Basalte



Minéralogie

- Plagioclases
- Pyroxènes
- Olivine

Structure

- Porphyrique

Texture

- Massif

- Porosité : faible

- Perméabilité : faible

Caractéristiques techniques

- Densité : 3,0 t/m³
- Résistance à la compression : 300 MPa

Rhyolite



Minéralogie

- Quartz (abrasif)
- Orthose
- Plagioclases
- Biotite

Structure

- Porphyrique

Texture

- Massif

- Porosité : faible

- Perméabilité : faible

Caractéristiques techniques

- Densité : 2,7 t/m³
- Résistance à la compression : 200 MPa

EPFL Trachyte



Minéralogie

- Orthose
- Plagioclases
- Biotite

Structure

- Porphyrique

Texture

- Massif

• **Porosité** : faible à moyenne

• **Perméabilité** : faible

Caractéristiques techniques

• **Densité** : 2,7 t/m³

• **Résistance à la compression** : 100 MPa

Sédimentaires

Conglomerats



Minéralogie

- Fragments dérivants des autres roches
- Ciment calcitique

Texture

- Clastique

• **Porosité** : moyenne

• **Perméabilité** : moyenne (fonction du degré de cimentation)

Caractéristiques techniques

• **Densité** : 2,4 t/m³

• **Résistance à la compression** : 70 MPa (fonction du degré de cimentation)

Arenite/ gres



Minéralogie

- Quartz
- (Calcite (fossiles))

Texture

- Stratifiée
- Poreuse

- **Perméabilité** : moyenne (fonction du degré de cimentation)

Caractéristiques techniques

- **Densité** : 2,4 t/m³

- **Résistance à la compression** : 20 - 70 MPa (fonction du degré de cimentation)

Argilite

Minéralogie

- Argile

Texture

- Stratifiée
- Porosité haute

- Perméabilité : faible

Caractéristiques techniques

- Densité : 2,43 t/m³
- Résistance à la compression : 5-50 MPa
- Possibilité de gonflement





Minéralogie

- Argile
- Quartz
- Alternativement, calcite.

Texture

- Stratifiée
- Porosité haute

- **Perméabilité** : variable

Caractéristiques techniques

- **Densité** : 2,3 t/m³
- **Résistance à la compression** : 5-100 MPa
- **Possibilité de gonflement**

CalcaArenite



Minéralogie

- Calcite (fossiles)

Texture

- Stratifiée
- Porosité

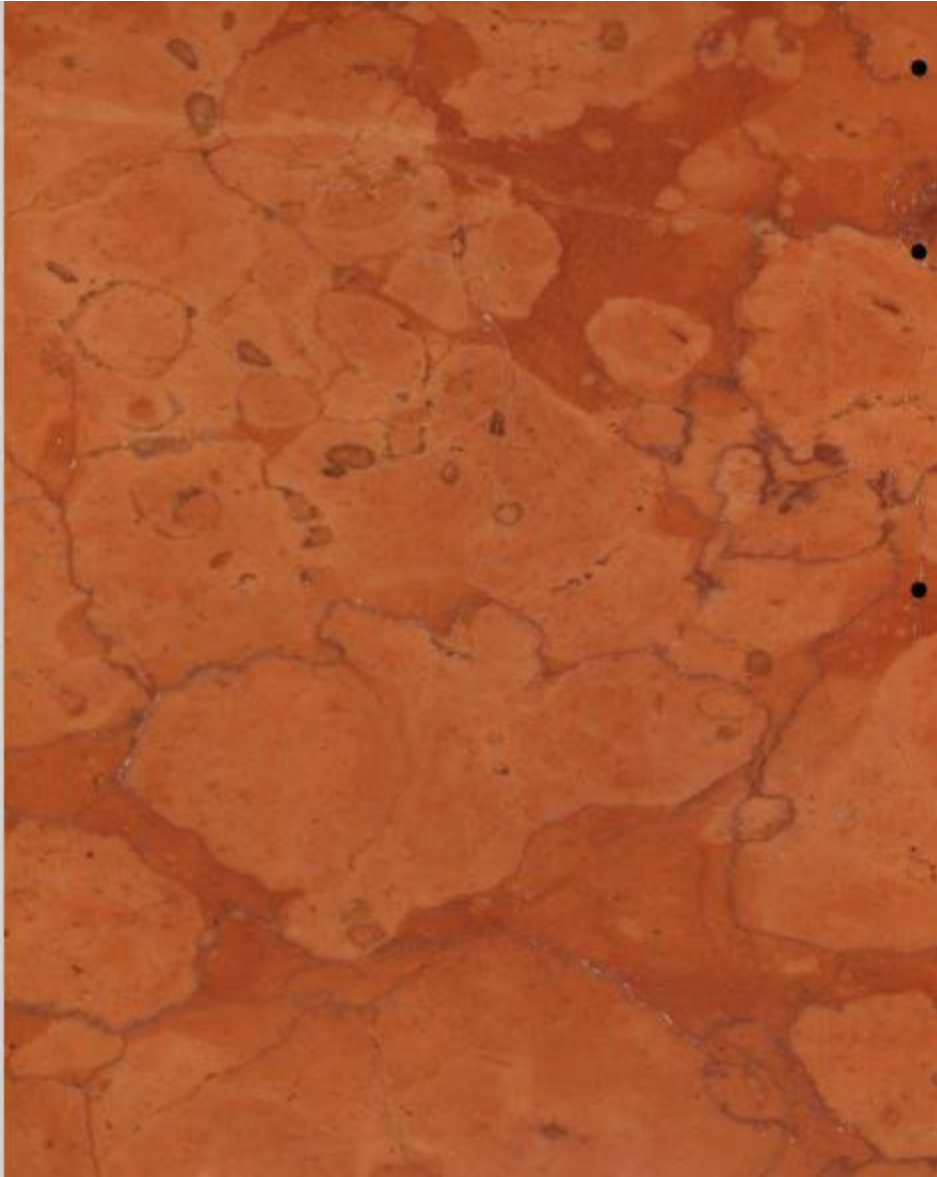
- **Perméabilité** : moyenne (fonction du degré de cimentation)

Caractéristiques techniques

- **Densité** : 2,4 t/m³

- **Résistance à la compression** : 70 MPa (fonction du degré de cimentation)

Calcaire (rouge)



Minéralogie

- Calcite (fossiles)

Texture

- Massif

- Porosité : faible

- Perméabilité : faible (fonction du degré de fracturation)

Caractéristiques techniques

- Densité : 2,6 t/m³
- Résistance à la compression : 100 MPa



Minéralogie

- Calcite
- Argiles
- Quartz

Texture

- Massif

• Porosité : faible

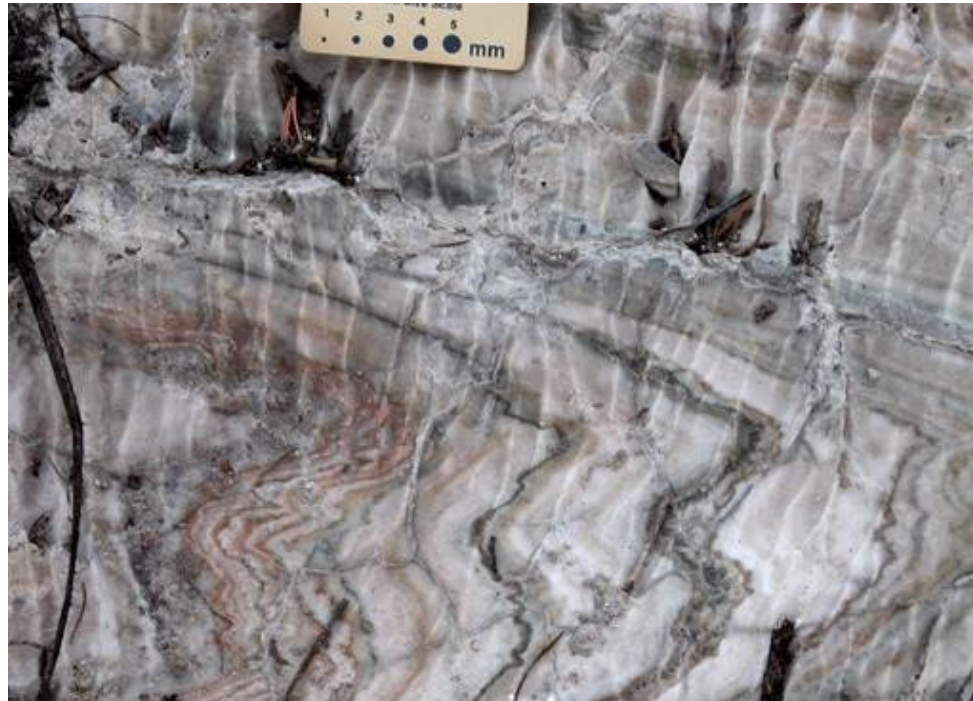
• Perméabilité : faible (fonction du degré de fracturation)

Caractéristiques techniques

• Densité : 2,6 t/m³

• Résistance à la compression : 30-70 MPa

Gypse (evaporite)



Mineralogie:
Gypse

Porosité
• Variable

Perméabilité
• Variable

Dépend du degré de dissolution

Caractéristiques techniques

• Densité : 2,2 t/m³
• Résistance : 50 Mpa

• Possibilité de gonflement

Metamorphiques

Phyllite



Minéralogie

- Muscovite
- Quartz

Texture

- Anisotrope
- Schisteuse

Faible porosité

Faible perméabilité

Caractéristiques techniques

- Densité : 2,7 t/m³
- Résistance à la compression : 70 MPa

Schiste calcitique



Minéralogie

- Calcite
- Muscovite

Texture

- Anisotrope
- Schisteuse

Faible porosité

Faible perméabilité

Caractéristiques techniques

- Densité : 2,7 t/m³
- Résistance à la compression : 70 MPa



Minéralogie

- Quartz
- Feldspath
- Muscovite

Texture

- **Anisotrope**
- **Schisteuse**

Faible porosité

Faible perméabilité

Caractéristiques techniques

- **Densité** : 2,7 t/m³
- **Résistance à la compression** : 150 Mpa

Utilisation

- Roche ornementale

**Minéralogie**

- Calcite

Texture

- Isotrope
- Massif

Faible porosité**Faible perméabilité****Caractéristiques techniques**

- Densité : 2,7 t/m³
- Résistance à la compression : 150 Mpa

Utilisation

- Roche ornementale

Quarzite



Minéralogie

- Quartz

Texture

- Isotrope
- Massif

Faible porosité

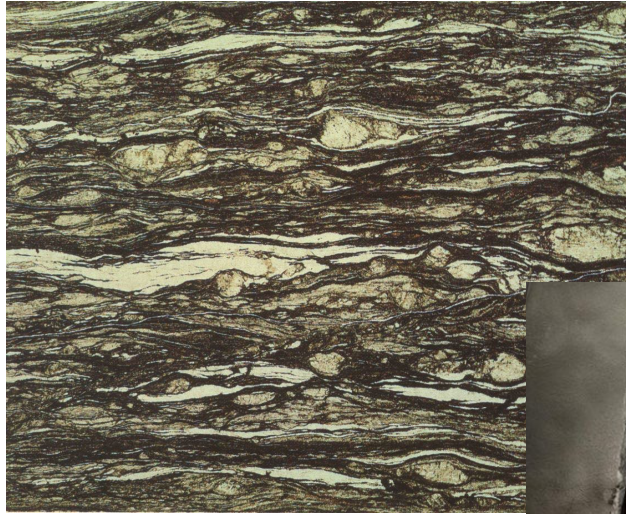
Faible perméabilité

Caractéristiques techniques

- **Densité** : 2,7 t/m³
- **Résistance à la compression** : 150 Mpa

Utilisation

- Roche ornementale



Caractérisation des roches consolidées et altération des roches