

CH. 3- Comportement Mécanique Des Roches

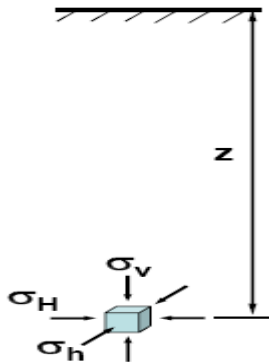
3.1. Contraintes in-situ

3.1.1. Contrainte verticale et horizontale

En profondeur, la contrainte verticale dans la roche est la contrainte de couverture générée par le poids des matériaux.

Le poids spécifique moyen des roches est de 2,7. La valeur de la contrainte en profondeur peut donc être estimée par:

$$\sigma_v \text{ (MPa)} \approx 0,027 \cdot z \text{ (m)}$$



Les contraintes horizontales dans la roche sont principalement tectoniques. Elles sont généralement supérieures aux contraintes verticales. La contrainte horizontale maximale a la même direction que le mouvement de convergence des plaques tectoniques. Les contraintes tectoniques varient fortement en termes d'intensité, et peuvent être exceptionnellement fortes.

3.2. Mesure des contraintes In Situ

La mesure des contraintes in situ montre que la contrainte verticale vaut à peu près $0,027z$, poids des couches de couverture.

Le rapport entre la contrainte horizontale moyenne $(\sigma_H + \sigma_h)/2$ et la contrainte verticale σ_v varie de 0,5 à 3,0, généralement limitée entre $(100/z + 0,3)$ et $(1500 / z + 0,5)$.

La contrainte horizontale maximum peut atteindre 10 fois la contrainte verticale.

Dans la roche, la contrainte horizontale est normalement la contrainte principale majeure, alors que la contrainte verticale ou l'autre contrainte horizontale représentent les contraintes principales mineures.

C'est-à-dire : $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$ ou $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$.

3.3. – Les propriétés mécaniques des roches.

Les propriétés mécaniques des roches se divisent en deux catégories :

- les résistances à des sollicitations mécaniques : traction, compression uniaxiale ou triaxiale, définissant des seuils ou **critères de rupture** ;
- les **déformabilités** sous l'effet des sollicitations mécaniques : modules instantanés ou différés.

Au delà de ces propriétés, qui s'expriment par des données chiffrées, on préférera parler de comportement, un terme plus général. Le terme de « loi de comportement » désigne d'une manière générale l'expression mathématique de la relation entre les contraintes et l'histoire des déformations subies par l'échantillon. Dans ce chapitre, il ne sera fait référence qu'à des lois de comportement élémentaires, élasticité et plasticité.

3.4. – Résistance mécanique.

3.4.1. Les essais de base

Les essais de base mettent en jeu trois types de sollicitations :

- traction : traction indirecte (ou essai brésilien) ;
- compression uniaxiale (ou monoaxiale ou simple) ;
- compression triaxiale (isotrope et déviatorique).

Il existe un certain nombre de recommandations, en particulier éditées par la SIMR (Société Internationale de Mécanique des Roches) dont certaines préconisent le choix de dimensions des éprouvettes à essayer. L'AFNOR a édité très récemment des normes fixant les caractéristiques des éprouvettes et les conditions expérimentales pour les essais de base. Dans ce paragraphe on se limitera aux propriétés de résistance.

3.2.2. - Essai de traction indirecte.

Les roches ont généralement une faible résistance à la traction, due aux microfissures préexistantes. L'existence de ces microfissures peut également être la cause de la rupture soudaine de la roche en traction sous une faible contrainte.

La résistance à la traction de la roche peut être obtenue à partir de plusieurs types d'essais.

La résistance à la traction directe est obtenue par traction jusqu'à la rupture d'une éprouvette cylindrique dont les extrémités ont été collées sur des têtes métalliques.

La résistance à la traction peut être déterminée par un essai de traction indirect connu sous le nom d'essai brésilien.

La résistance maximale à la traction peut être limitée par celle de l'interface colle-éprouvette, ce qui est le cas pour les roches de résistance à la traction supérieure à 15 MPa.

C'est pourquoi un essai de traction indirecte, l'essai brésilien, a été emprunté au domaine du béton. L'éprouvette d'élanement (hauteur/diamètre) minimal égal à un, subit une compression suivant deux génératrices opposées. Cette compression s'exerce par l'intermédiaire de pièces métalliques (figure 3-1) ou en interposant un carton d'épaisseur millimétrique, pour « gommer » les irrégularités éventuelles des génératrices du cylindre. La vitesse de mise en charge recommandée par la SIMR est de 200 N/s. La résistance à la traction est calculée par :

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi DL}$$

Avec : σ_t : résistance à la traction, P : effort à la rupture, D : diamètre de l'éprouvette, L : longueur de l'éprouvette.

L'état de contrainte au centre de l'éprouvette, au moment de la rupture, est représenté par une contrainte de compression verticale σ_y égale à :

$$\sigma_y = \frac{6P}{\pi DL} \quad \text{et} \quad \sigma_x = \frac{2P}{\pi DL}$$

L'essai brésilien n'est un essai de traction que pour les matériaux fragiles : les roches, le béton, le verre. La rupture doit impérativement se produire à partir du centre, sous forme d'une fracture unique verticale. Il peut y avoir des difficultés expérimentales dans le cas de roches fortement anisotropes et pour les roches ductiles (sel, argiles..).

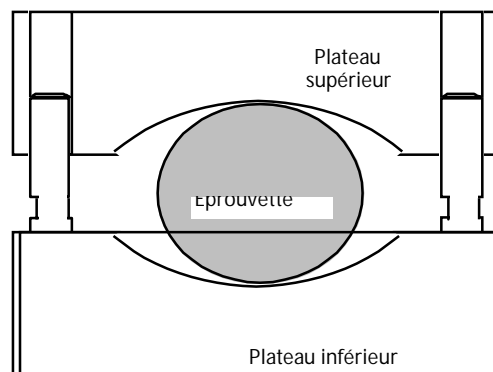


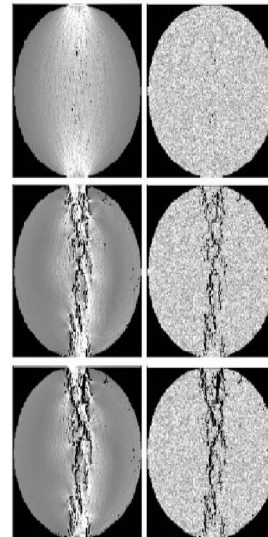
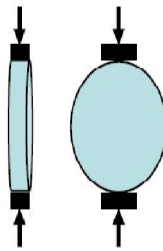
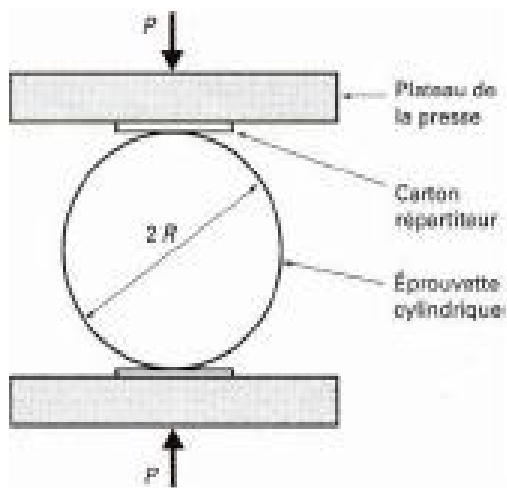
Figure 3-5 : Dispositif pour essai brésilien

La résistance intrinsèque des matériaux peut s'exprimer de différentes manières.

L'essai brésilien, est réalisé en comprimant entre les plateaux de la presse une éprouvette cylindrique le long de deux génératrices opposées: la rupture est obtenue par traction au centre de l'éprouvette. On évite ainsi les difficultés de collage des têtes et la dispersion des valeurs est moins grande que dans l'essai direct.

Si P est l'effort fourni par la presse au moment de la rupture, R le rayon de l'éprouvette et H sa hauteur, la résistance à la traction indirecte est donnée par :

$$\sigma_t = P / \pi RH$$



Mécanisme de rupture dans un essai brésilien

3.2.3. Compression uniaxiale

La résistance à la compression uniaxiale est la contrainte ultime d'un échantillon de roche cylindrique sous chargement axial. C'est la plus importante des propriétés mécaniques de la roche, utilisée en dimensionnement, analyse et modélisation.

En parallèle avec la mesure de la charge, on mesure aussi les déformations axiales et radiales.

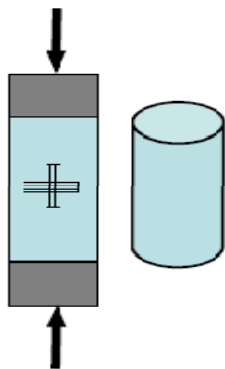
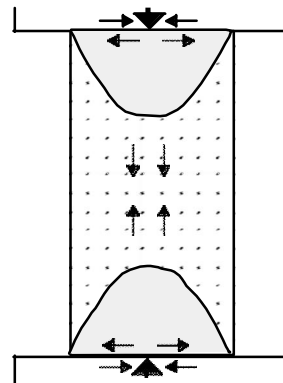
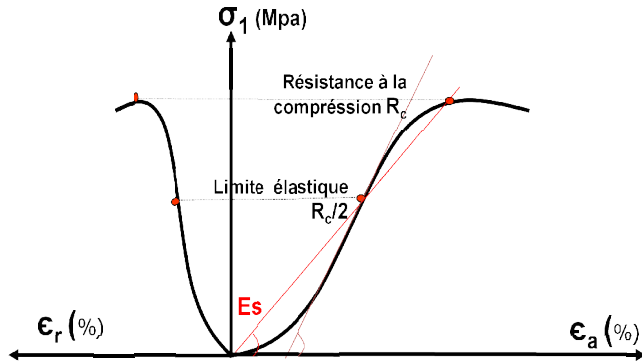


Figure 3-5 : Frettage d'une éprouvette en





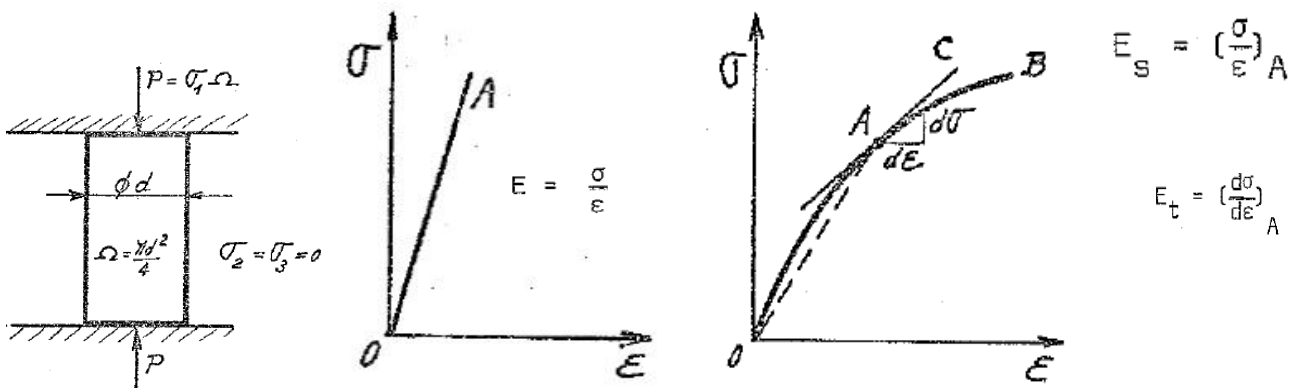
Caractéristiques élastiques

Module de Young tangeant. E_t

Module de Young sécant. E_s

Coefficient de Poisson. $\nu = \epsilon_r / \epsilon_a$

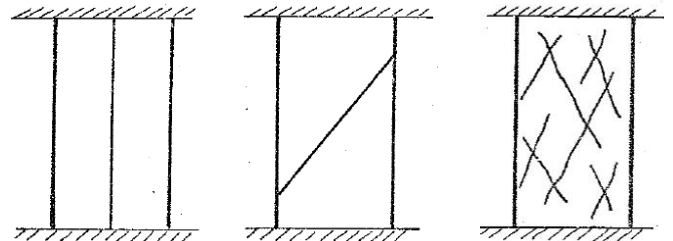
Détermination du module de Young et du coefficient de Poisson dans un essai de compression simple



Modes de rupture

Trois modes de ruptures ont été décelés au cours d'un essai de compression uniaxiale :

- Rupture par clivage
- Rupture par cisaillement
- Rupture par apparition de fissures



Les résistances à la compression uniaxiale sont, comme tous les essais sur matériaux rocheux, dispersés. Ceci résulte du caractère discontinu de la roche. Toutefois, cet essai simple et peu coûteux peut donner de nombreuses informations sur le matériau rocheux, à savoir :

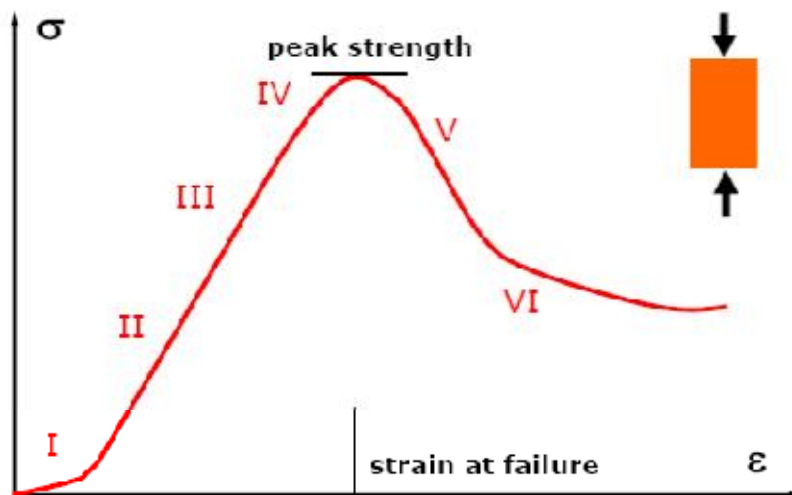
- Le classement de sites par l'examen des valeurs moyennes de résistances ;
- L'hétérogénéité d'un site par la variation d'une zone à l'autre ;
- L'anisotropie du matériau par la différence de résistance suivant plusieurs directions ;
- Une indication de fracturation du matériau par la dispersion des résultats



Echantillons de roches pour essai au laboratoire



Essai de compression uniaxiale



Courbe contrainte – déformation typique d'un matériau rocheux

La résistance au pic est la contrainte maximale qu'un échantillon de roche intact est en mesure de supporter dans un essai de compression au laboratoire. Une fois dépassé le pic de résistance, l'échantillon peut présenter encore une capacité de résistance. La résistance minimale ou résiduelle est obtenue généralement après une déformation postérieure au pic importante.

La courbe contrainte – déformation complète peut être divisée en 6 sections représentant 6 stades que le matériau rocheux subit.

- Stade I : La roche est initialement chargée. En liaison avec la déformation, les microfissures existantes se ferment, entraînant une non-linéarité initiale de la courbe.

- Stade II : La roche a un comportement linéairement élastique avec une courbe contrainte-déformation linéaire, axialement et radialement. Les microfissures sont susceptibles d'apparaître à la fin de ce stade, à approximativement 35-40% de la résistance au pic.

- Stade III : La roche se comporte presque linéairement. La courbe de contrainte-déformation axiale est quasi linéaire et est presque réversible. Il y a une légère augmentation de la déformation latérale due à la dilatation. La propagation de la microfissuration s'effectue d'une manière stable durant ce stade. Les microfissures qui en résultent sont indépendantes les unes des autres et sont distribuées à travers l'éprouvette. La limite supérieure de ce stade se produit à 80% de la résistance au pic approximativement.

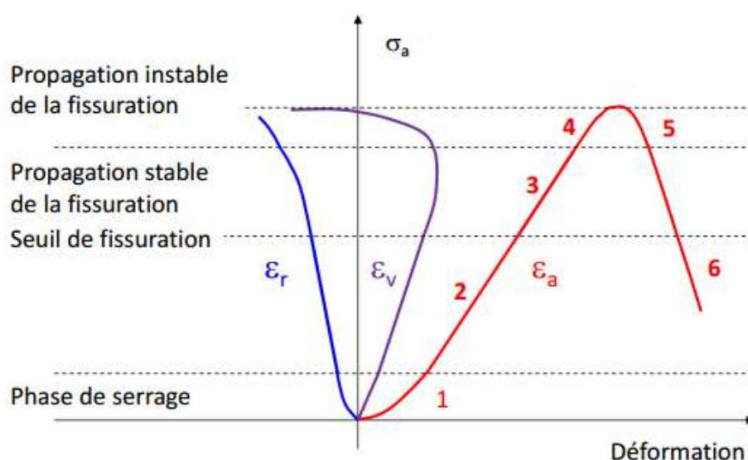
Stade IV : La roche subit une rapide accélération de la microfissuration et de l'augmentation du volume.

- Stade V : La roche a dépassé la contrainte de pic, mais est encore intacte, même si la structure interne est fortement perturbée. L'échantillon subit un radoucissement des déformations (rupture).

- Stade VI : La roche se rompt en plusieurs blocs plutôt qu'en une structure intacte. Ces blocs glissent les uns par rapport aux autres et le mécanisme de déformation prédominant est le frottement entre les blocs glissant.



Etats de la roche lors des stades de compressions



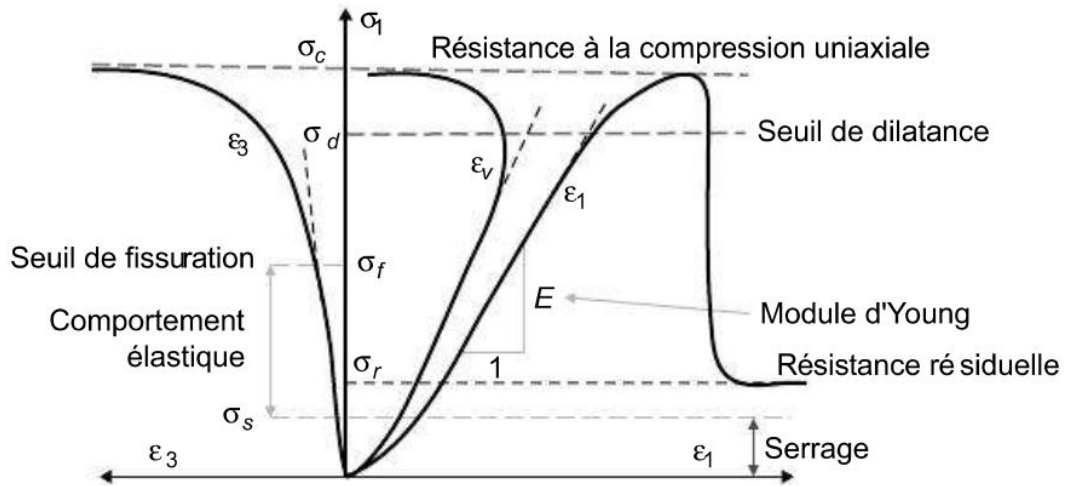


Figure 3.1 – Essai de compression uniaxiale.

Roche	Rés. comp. uniax. (MPa)	Rés. traction (MPa)
Granite	100 – 300	7 – 25
Dolerite	100 – 350	7 – 30
Gabbro	150 – 250	7 – 30
Basalte	100 – 350	10 – 30
Grès	20 – 170	4 – 25
Schiste	5 – 100	2 – 10
Dolomie	20 – 120	6 – 15
Calcaire	30 – 250	6 – 25
Gneiss	100 – 250	7 – 20
Ardoise	50 – 180	7 – 20
Marbre	50 – 200	7 – 20
Quartzite	150 – 300	5 – 20

Valeurs typiques de la résistance à la compression uniaxiale et la résistance à la traction de certaines roches

Les roches se rompent généralement sous faible déformation, typiquement autour de 0,2 à 0,4%. Les roches fragiles, telles que les roches cristallines, ont une déformation faible à la rupture, alors que les roches tendres comme les schistes et les argilites tendent à avoir une déformation relativement élevée à la rupture.

La plupart des roches, incluant les roches ignées cristallines, métamorphiques et sédimentaires, se comportent de manière fragile sous compression uniaxiale. Quelques roches tendres, principalement d'origine sédimentaire, ont un comportement ductile.

- **Ordre de grandeur de la résistance d'une roche.**

Valeurs de résistance à la compression uniaxiale σ_c	Termes descriptifs de résistance
$\sigma_c > 200$ MPa	Résistance extrêmement élevée
100 MPa $< \sigma_c < 200$ MPa	Résistance très élevée
50 MPa $< \sigma_c < 100$ MPa	Résistance élevée
25 MPa $< \sigma_c < 50$ MPa	Résistance moyenne
5 MPa $< \sigma_c < 25$ MPa	Résistance faible
1 MPa $< \sigma_c < 5$ MPa	Résistance très faible
$\sigma_c < 1$ MPa	Résistance extrêmement faible

Classification des résistances des roches selon AFTES
(Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain)

Valeurs du module de Young	Termes descriptifs de raideur
$E > 50$ GPa	Matrice extrêmement raide
20 GPa $< E < 50$ GPa	Résistance très raide
5 GPa $< E < 20$ GPa	Matrice raide
1 GPa $< E < 5$ GPa	Matrice moyennement raide
$0,1$ GPa $< E < 1$ GPa	Matrice peu raide
$E < 0,1$ GPa	Matrice très peu raide

Classification des raideurs des roches selon AFTES
(Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain)

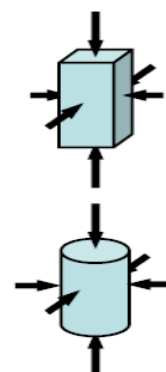
Coefficient de poisson ν

pour la plupart des roches, le coefficient de Poisson se situe entre 0,15 et 0,4

3.3. - Compression Triaxiale

En profondeur, la roche est soumise à des contraintes axiales et radiales (triaxiales), et la résistance à la compression est plus forte en conditions triaxiales.

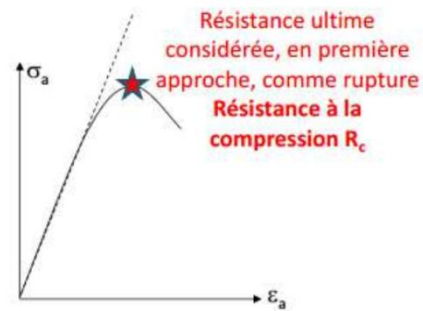
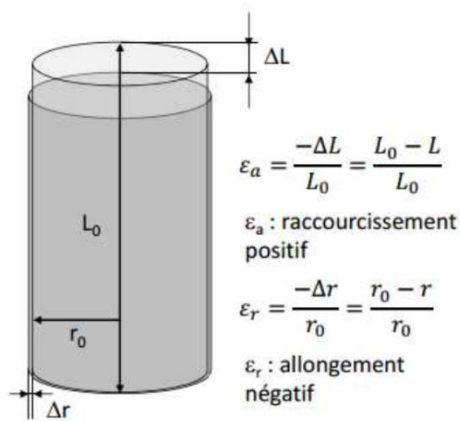
L'état de compression triaxiale vraie signifie 3 contraintes principales différentes. On admet souvent pour simplifier que les 2 contraintes radiales sont égales à la contrainte principale mineure (essai triaxial axisymétrique).





Appareillages hautes pressions spécifiques pour les roches

Résultats d'une série d'essais de compression triaxiale

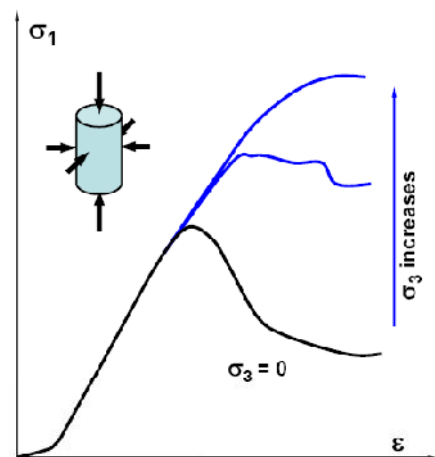


Le comportement de la roche en compression triaxiale change avec l'augmentation de la pression de confinement:

(a) La résistance maximale (au pic) augmente;

(b) Le comportement après le pic change graduellement de fragile à ductile.

Dans le domaine élastique, le comportement contrainte-déformation est le même qu'en compression uniaxiale.



3.4.- Le module de Young et le coefficient de Poisson.

Le module de Young (à 50% de la contrainte de rupture) et le coefficient de Poisson (à 50%

Les roches à haute résistance tendent également à avoir un grand module de Young, dépendant du type de roche et d'autres facteurs. Le module de Young est typiquement compris entre 8 et 80 GPa. Pour les roches extrêmement dures et résistantes, il est susceptible d'atteindre 100 GPa.

Pour la plupart des roches, le coefficient de Poisson se situe entre 0,15 et 0,4.