

Géologie

**MÉCANIQUE DES
ROCHES ET
OUVRAGES
SOUTERRAINS**

- 1.** Introduction
- 2.** Formation de la roche
- 3.** Les discontinuités de la roche
- 4.** La roche et les massifs rocheux
- 5.** Inhomogénéité et anisotropie
- 6.** Contraintes In Situ
- 7.** Eau souterraine
- 8.** Roches spéciales

Qu'est-ce que la mécanique des roches ?

La mécanique des roches est une discipline qui utilise les principes de *mécanique* pour décrire le comportement des *roches*.



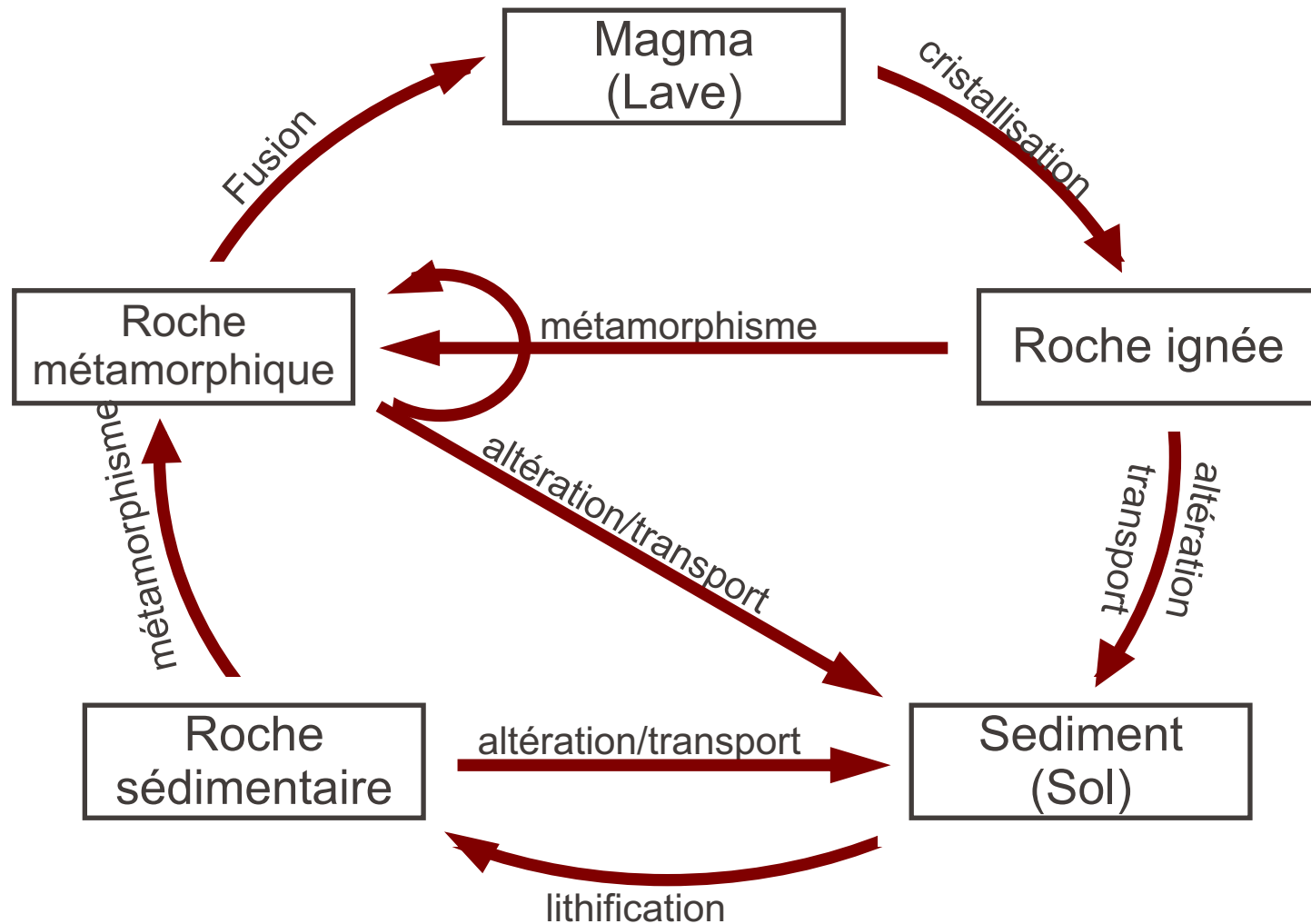
En quoi la mécanique des roches est-elle spécifique ?

La roche à l'échelle d'ingénierie est **Discontinue**, **Inhomogène**, **Anisotrope**, et **Non-linéairement Elastique** (vs CHILE).



2. Formation des roches – origine des roches

- Les roches sont des matériaux naturels (solides) et formés, essentiellement ou en totalité, par un assemblage de minéraux, comportant parfois des fossiles (roches sédimentaires), du verre (volcanisme, friction) ou des agrégats d'autres roches.
- La formation des roches dépend de 3 origines : les roches ignées, les roches sédimentaires de la lithification des sédiments et les roches métamorphiques par métamorphisme, comme illustré par le cycle de la roche.



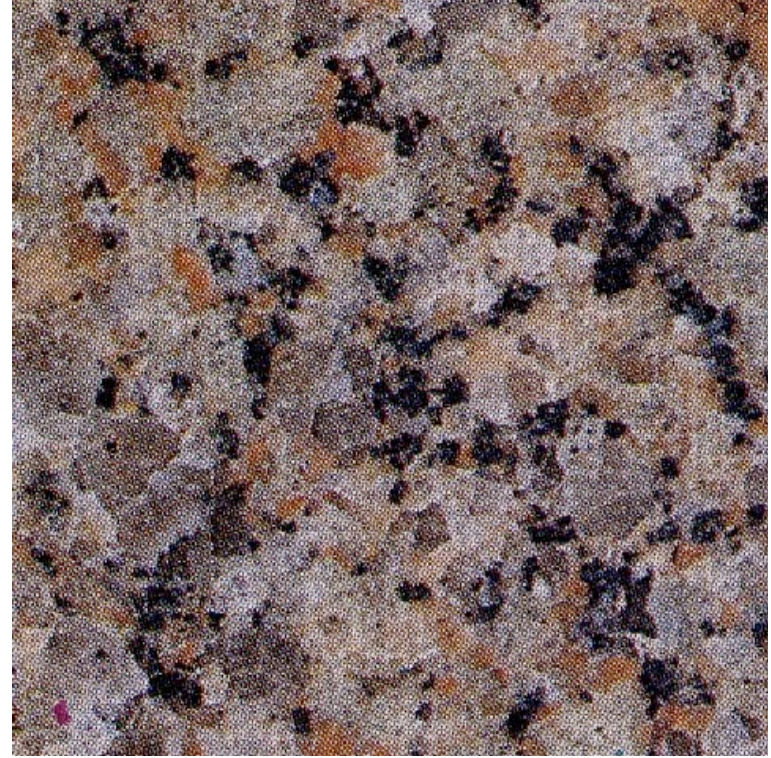
2. Formation de la roche – minéraux

- Les roches sont principalement composées de minéraux.
- Les silicates sont d'importants constituant des roches : feldspaths, le quartz, l'olivine, le pyroxène, l'amphibole, le grenat et le mica.
- Les minéraux ont différentes propriétés ; leur structure cristalline, leur dureté et leur clivage, qui influencent les propriétés de la roche.

2. Formation de la roche



Un cristal de quartz bien développé



Quartz dans un granite

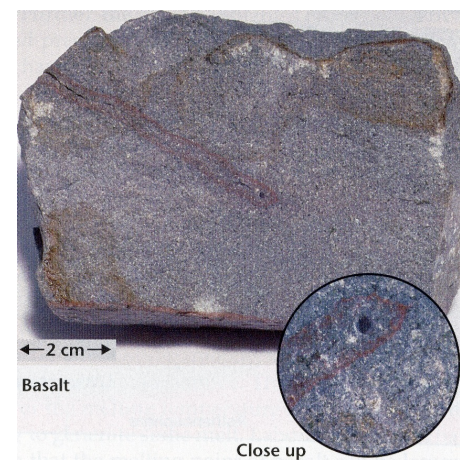
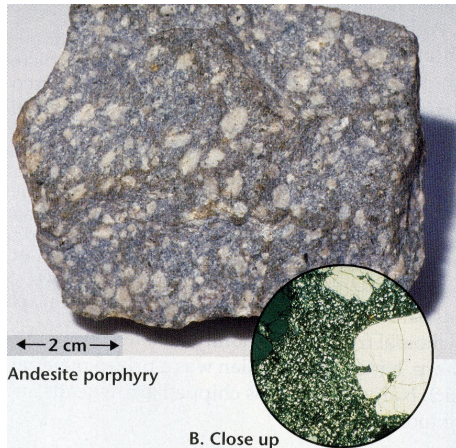
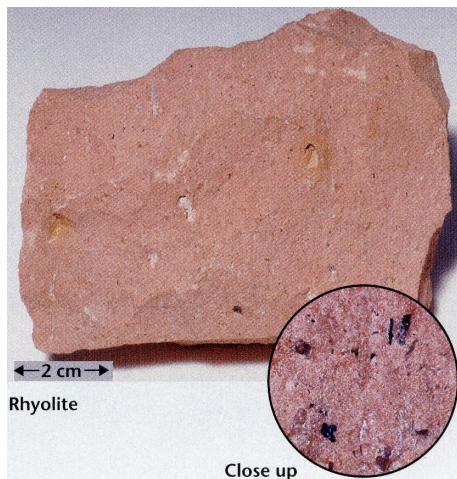
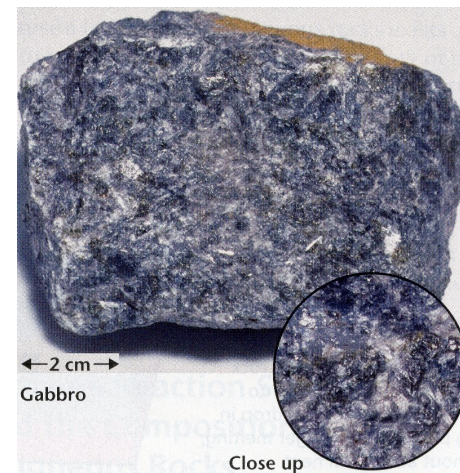
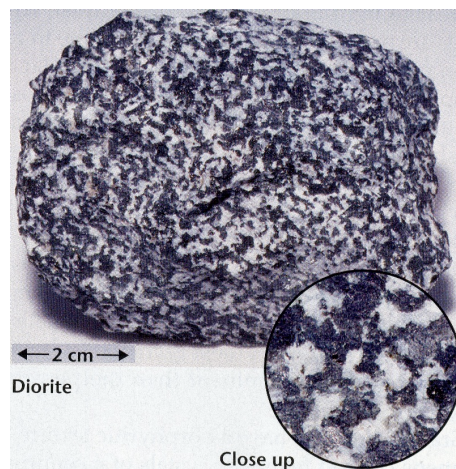
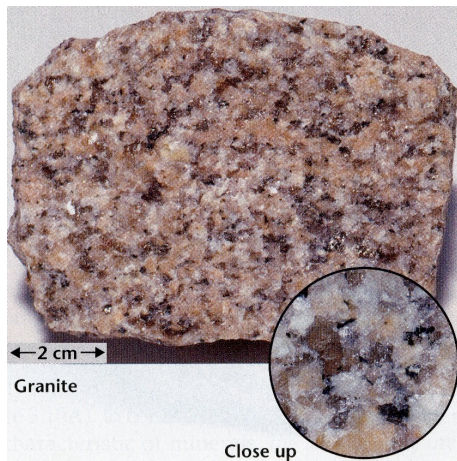
2. Formation de la roche – roches ignées

- Les roches ignées sont formées lorsque la roche fondue (ou partiellement fondue) se refroidit et se solidifie, avec ou sans cristallisation.
- Elles peuvent être formées (i) en profondeur comme des roches **intrusives** (plutoniques), ou (ii) à la sur-face comme des roches **extrusives** (volcaniques). Les roches intrusives ont généralement un grain grossier et les extrusives un grain fin.

Elles peuvent aussi avoir différents arrangements minéralogiques.

	Granitique (acide)(felsique)	Andésitique (intermédiaire)	Basaltique (basique)(mafique)	Ultramafique (ultrabasique)
Intrusive (grain grossier)	Granite	Diorite	Gabbro	Péridotite
Extrusive (grain fin)	Rhyolite	Andésite	Basalte	Aucune
Pourcentage de silice	>65% de silice	50-65% de silice	40-50% de silice	<40% de silice
Composition minérale principale	Quartz Orthose N-Plagioclase	Amphibole Plagioclase Biotite	Ca-Plagioclase Pyroxène	Olivine Pyroxène
Composition minérale mineure	Muscovite Biotite Amphibole	Pyroxène	Olivine Amphibole	Ca-Plagioclase
Couleur	Claire			Foncée

2. Formation de la roche



2. Formation de la roche - roches sédimentaires

- Les roches sédimentaires sont formées de trois façons principales :
 - I. par le dépôt de résidus dû à l'altération d'autres roches (roches sédimentaires « **détritique** ») ;
 - II. par le dépôt résultant d'une activité **biogénique** ; et
 - III. par la précipitation d'une solution (**évaporite**).

Les roches à sédiments clastiques sont généralement classées selon leur granulométrie

2. Formation de la roche – roches sédimentaires

- Roches sédimentaires détritiques

Roches détritiques

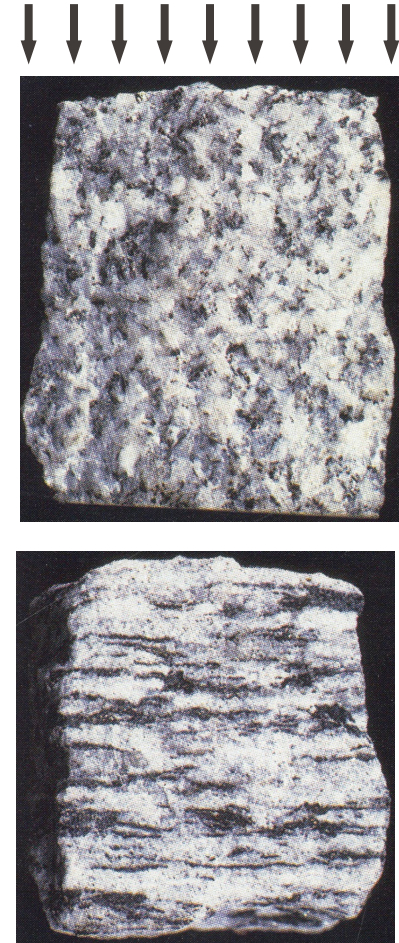
La classification est basée sur la taille et la nature des grains
(Classification de Grabau)

Diamètre des grains	Roche meuble	Roche consolidée
> 2 mm	Galets Graviers	Rudites (conglomérats)
		Brèches Fragments anguleux
		Poudingues Fragments arrondis
62.5 µm à 2 mm	Sables	Arénites
		Grès Quartz
		Molasse Quartz + Calcite
		Arkose Quartz+Feldspath
		Litharénites Roche
<62.5 µm	Boues et vases	Calcarénites Calcaire
		Ferriarénites Ferrugineux
		Lutites (pélites)
<62.5 µm	Boues et vases	Siltites Argile+Quartz
		Argillites Argile
		Marnes Argile+Calcite

2. Formation de la roche – roche métarmorphiques

La roche métamorphique est une nouvelle roche transformée à partir d'une roche existante, par métamorphisme - changements dus à la chaleur et à la pression (état solide).

Les roches métamorphiques peuvent avoir une structure feuilletée ou non. La foliation est due à une réorientation de certains minéraux, créant un plan de clivage ou un alignement visible des minéraux.



Roche	Texture	Degré métamorphique	Roche parente originale
Ardoise	Feuilletée	Degré bas	Schiste argileux (minéraux d'argile)
Phyllite	Feuilletée	Degré bas à intermédiaire	Schiste argileux
Micaschiste	Feuilletée	Degré bas à intermédiaire	Schiste argileux
Schiste de chlorite	Feuilletée	Degré bas	Basalte
Gneiss	Feuilletée	Degré élevé	Granit, schiste, andésite
Marbre	Non-feuilletée	Degré bas à élevé	Calcaire, dolomie
Quartzite	Non-feuilletée	Degré intermédiaire à élevé	Grès quartzeux



Slate



Phyllite

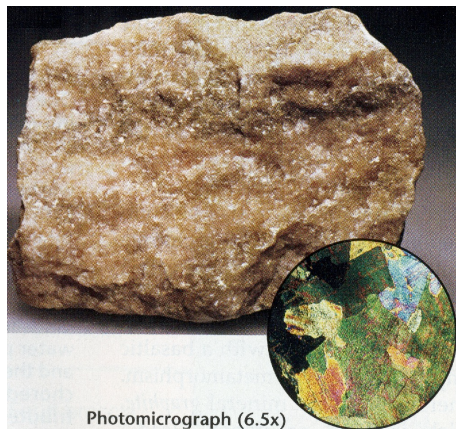


Schist



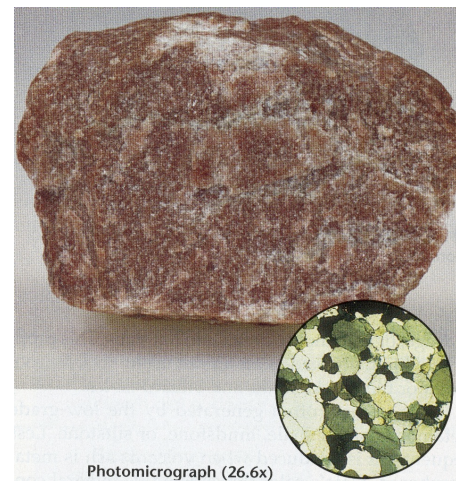
Gneiss

Low —————> High
État de métamorphisme



Photomicrograph (6.5x)

Marbre



Photomicrograph (26.6x)

Quartzite

2. Formation de la roche – textures de la roche

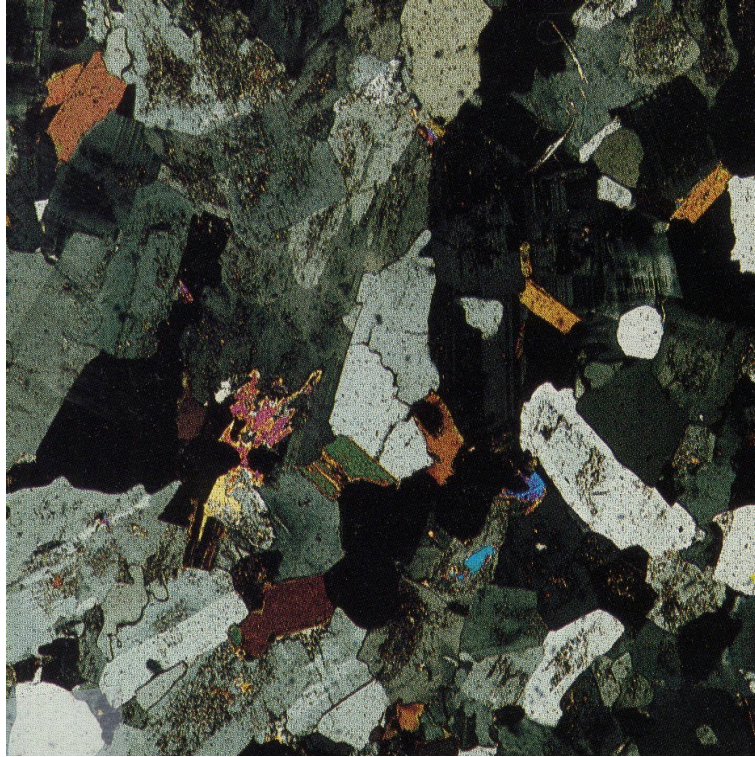
Les roches sédimentaires, ignées et métamorphiques ont différentes textures dues à leur différentes origines.

Les deux formes principales de texture sont clastiques et imbriquées.

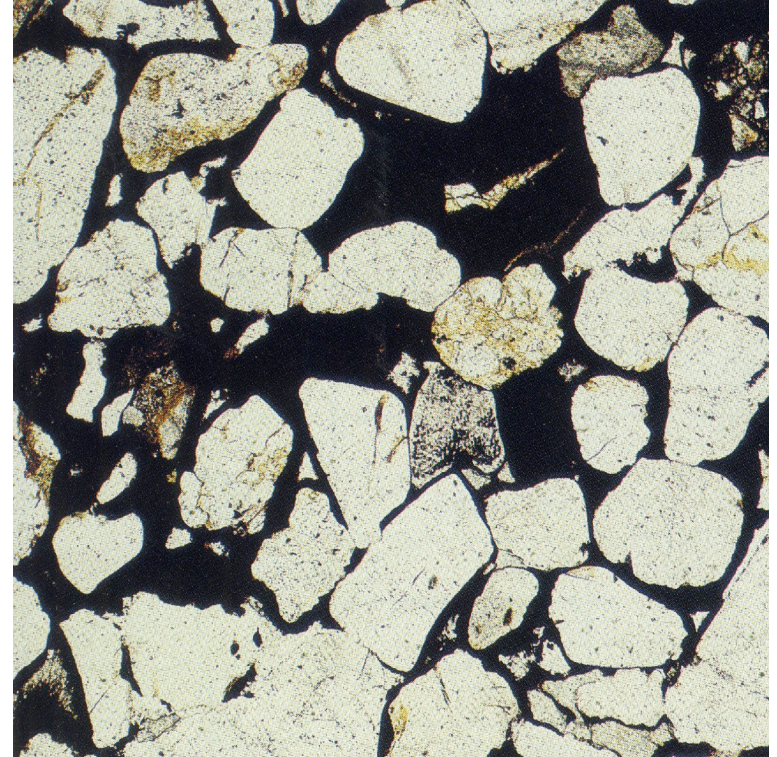
La résistance de la roche est une résistance structurelle de la composition des minéraux.

Cela est régi par :

- i. La résistance des minéraux, et
- ii. la liaison entre les minéraux.



texture imbriquée d'un granit



texture clastique d'un grès

2. Formation de la roche – textures de la roche

- Les microstructures imbriquées des roches ignées et métamorphiques mènent généralement à un matériel rocheux à haute résistance, tandis que les microstructures des roches sédimentaires mènent souvent à un matériel rocheux à basse résistance, particulièrement lorsque la cimentation est faible.
- Toute faiblesse existante dans une matrice de matériel de rocheux (microfissures, pores, grains faibles et cimentation) affaiblissent aussi le matériel rocheux.

3. Les discontinuités de la roche

– les joints de la roche

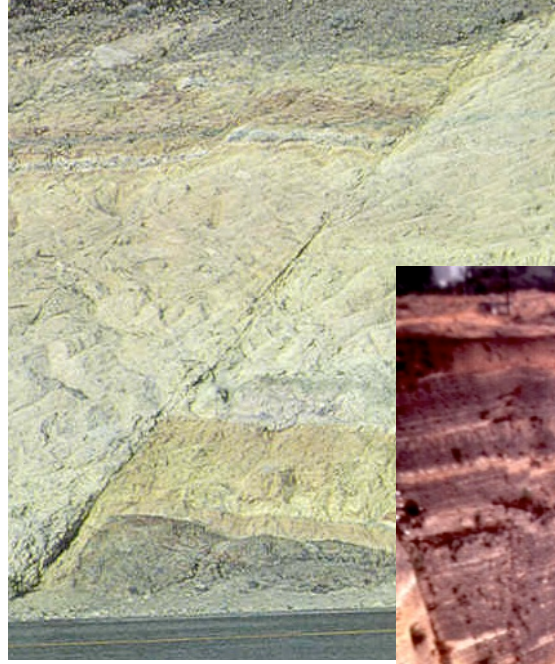
- Les joints sont les principales discontinuités des roches. Ils sont normalement disposés en systèmes parallèles.
- Ils sont généralement considérés comme éléments du massif rocheux. L'espacement des joints est généralement de l'ordre que quelques centimètres à quelques dizaines de centimètres. Pour l'ingénierie, les joints sont des éléments constants du massif rocheux.



Joint

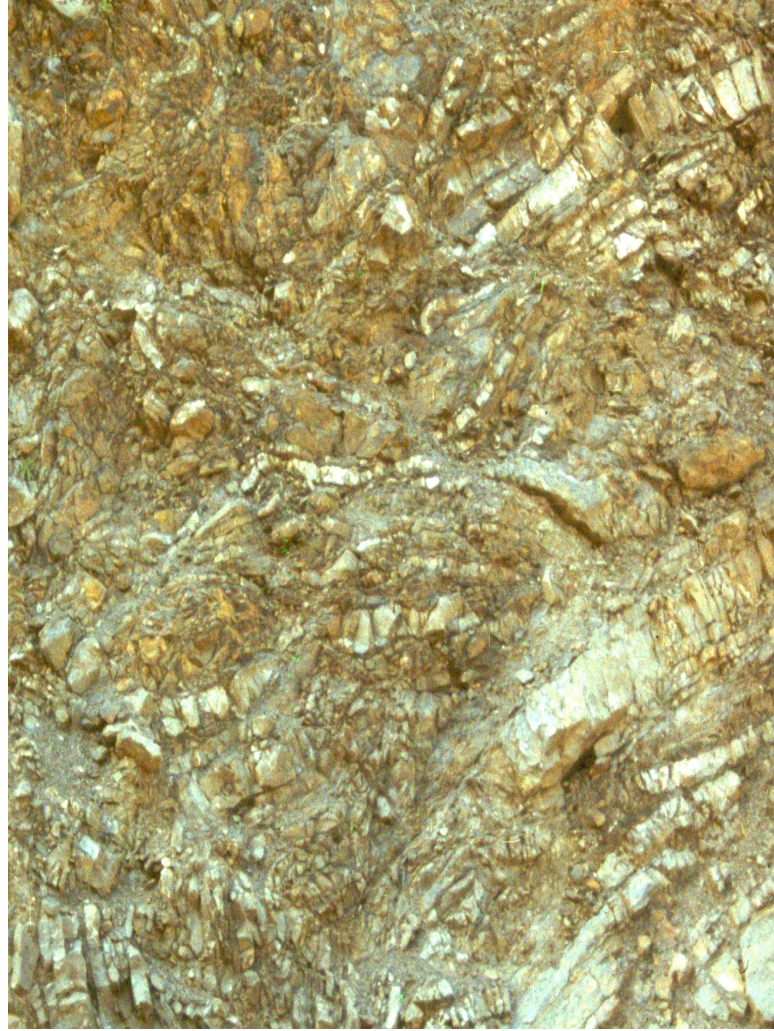
3. Les discontinuités de la roche – les failles

- Les failles sont des fractures planes de la roche qui mettent en évidence **un mouvement relatif**. Les failles ont différentes échelles, les plus grandes sont à la frontière des plaques tectoniques (faille de San Andreas). Les failles ne consistent généralement pas en une fracture simple et nette, elles forment souvent des zones de failles.
- Les failles de grande échelle, zone de failles et de cisaillement, sont grandes et avec une influence localisée. Elles sont souvent traitées séparément du massif rocheux.



3. Les discontinuités de la roche – les plis

- Le pli est le résultat de la flexion d'une strate rocheuse sous l'effet d'une force tectonique ou d'un mouvement.
- Les plis ne sont généralement pas considérés comme éléments du massif rocheux. Ils sont souvent associés à un haut degré de fracturation et à des roches relativement faibles et tendres.



3. Les discontinuités de la roche – les plans de stratification

- La stratification est l'interface entre les couches de roche sédimentaire.
- Elles sont *une influence géologique isolée* des activités mécaniques. elles créent une interface de deux matériaux rocheux. Cependant, certains plans de stratification peuvent aussi devenir des zones potentielles d'altération et de poches d'eau souterraines.



4. La roche et les massifs rocheux

La roche à l'échelle de l'ingénieur

- Pour les travaux de génie civil, p.ex. **fondations, glissements de terrain et tunnels**, l'échelle des projets se situe généralement entre quelques dizaines de mètres et quelques centaines de mètres
- La roche à l'échelle de l'ingénierie est généralement une masse en place. Cette masse, que l'on nomme souvent massif rocheux constitue tout le rocher in situ. **Il est formé de la roche intacte et des discontinuités (joints, failles, etc).**



4. La roche et les massifs rocheux - composition des massifs rocheux

- Un massif rocheux contient (i) du matériau rocheux sous forme de blocs de roche intacte de tailles variées, et (ii) des discontinuités qui coupe le massif sous forme de fractures, joints, failles, plans de stratification et dykes.

Massif rocheux = Matrice rocheuse + Discontinuités



Discontinuités

Roche



4. La roche et les massifs rocheux

Rôle des joints rocheux dans le comportement d'un massif rocheux

- Coupe la roche en plaques, blocs et coins, libres de tomber et de bouger ;
- Agissent comme plan de faiblesse pour le glissement ;
- Facilite l'écoulement d'eau et crée des réseaux d'écoulement;
- Entraîne de grandes déformations;
- Change la distribution et l'orientation des contraintes.

Le comportement d'un massif rocheux est largement régi par la présence de joints.

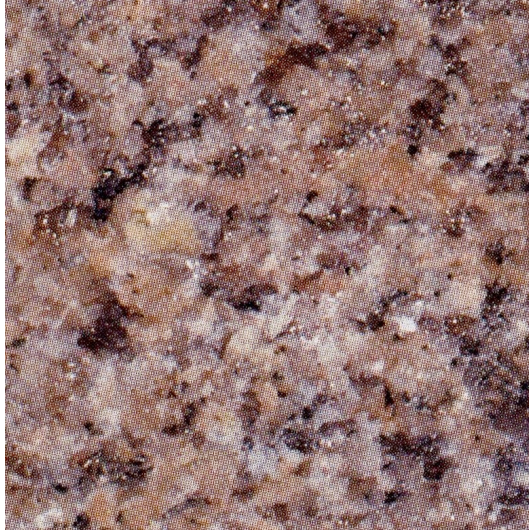


5. Inhomogénéité et anisotropie - inhomogénéité des roches

- L'inhomogénéité représente une propriété variant selon les zones. Beaucoup de matériaux de construction ont des degrés d'inhomogénéité divers. Les roches sont formées par la nature et montrent de grandes inhomogénéités dues à :
 - I. minéraux différents constituant la roche
 - II. liaisons différentes entre les minéraux
 - III. L'existence de pores
 - IV. L'existence de microfissures

5. Inhomogénéité et anisotropie - inhomogénéité des roches

Texture de quelques roches communes



Granite



Grès



Gneiss

5. Inhomogénéité et anisotropie - inhomogénéité des roches

- L'inhomogénéité est la cause de l'initiation de la fissuration menant à la rupture de la matrice rocheuse.
- Si certains éléments de la matrice rocheuse sont très faibles, ils commencent à se rompre plus tôt et entraînent souvent une baisse de la résistance totale de la roche.

5. Inhomogénéité et anisotropie - **inhomogénéité des massifs rocheux**

- L'inhomogénéité des massifs rocheux est principalement due à l'existence des discontinuités.
- Les massifs rocheux peuvent aussi être inhomogènes en raison d'un mélange de plusieurs types de roches, d'interstratification et d'intrusions.



5. Inhomogénéité et anisotropie -

Anisotropie

- L'anisotropie est définie comme une propriété différente selon la direction. L'anisotropie s'observe aussi bien dans les roches que les massifs rocheux.
- L'ardoise est une roche fortement anisotrope. Les phyllithes et les schistes métamorphiques et les argilites sédimentaires montrent aussi de l'anisotropie



5. Inhomogénéité et anisotropie -

Anisotropie

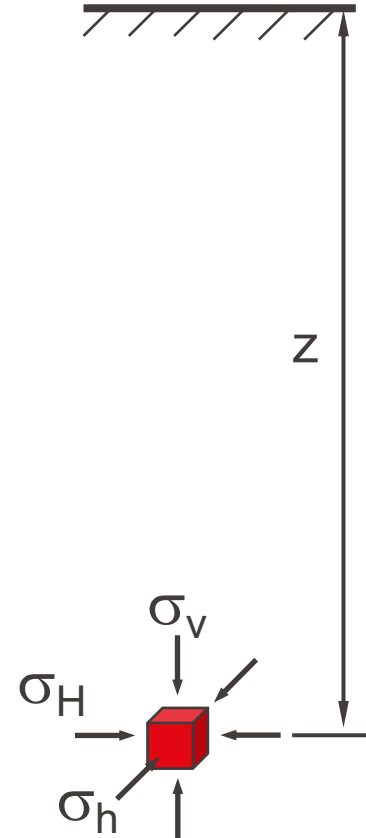
- L'anisotropie des massifs rocheux est contrôlée par :
 - i. les joints, et
 - ii. les couches sédimentaires.



6. Contraintes In Situ – contrainte verticale et couverture

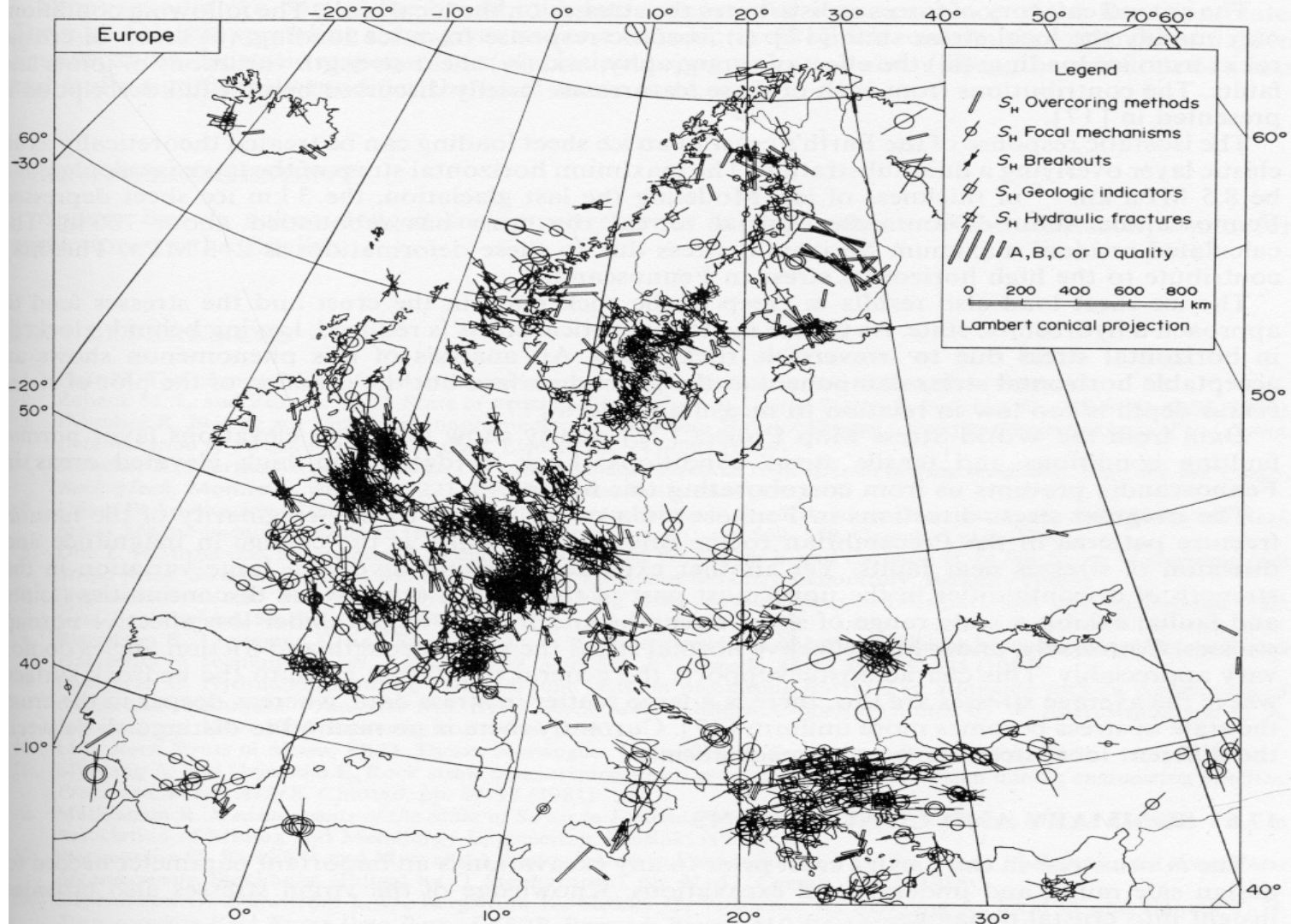
- En profondeur, la contrainte dans la roche est la contrainte de couverture de générée par le poids des matériaux.
- Le poids spécifique moyen des roches est de 2.7. La valeur de la contrainte en profondeur peut donc être estimée par

$$\sigma_V(\text{MPa}) \cong 0.027 z(\text{m})$$



6. Contraintes In Situ – contrainte horizontale et contrainte tectonique

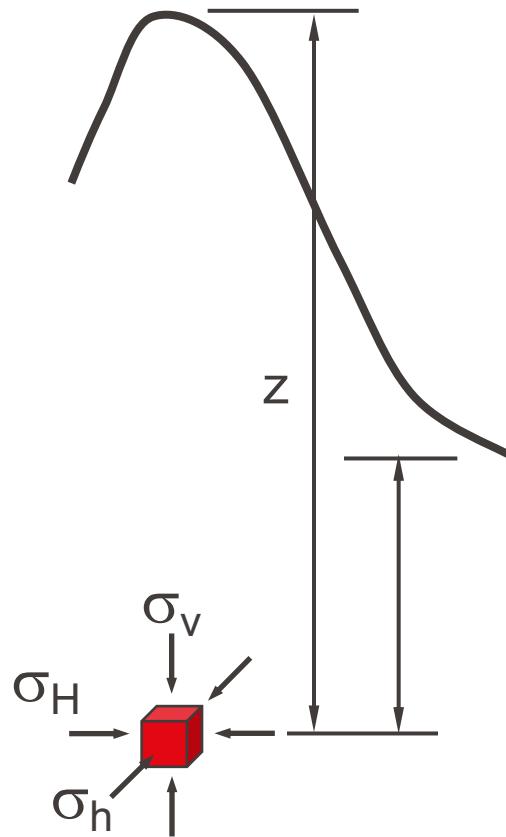
- Les contraintes horizontales dans la roche sont principalement tectoniques.
- Les contraintes horizontales dans les roches sont généralement supérieures à la contrainte verticale. La contrainte horizontale maximale suivant dans la même direction que le mouvement de convergence des plaques tectoniques. Les contraintes tectoniques varient fortement en terme d'intensité, et peuvent être exceptionnellement fortes.



6. Contraintes In Situ - variations

Le champ des contraintes in situ peut aussi être modifié par des facteurs et processus géologiques :

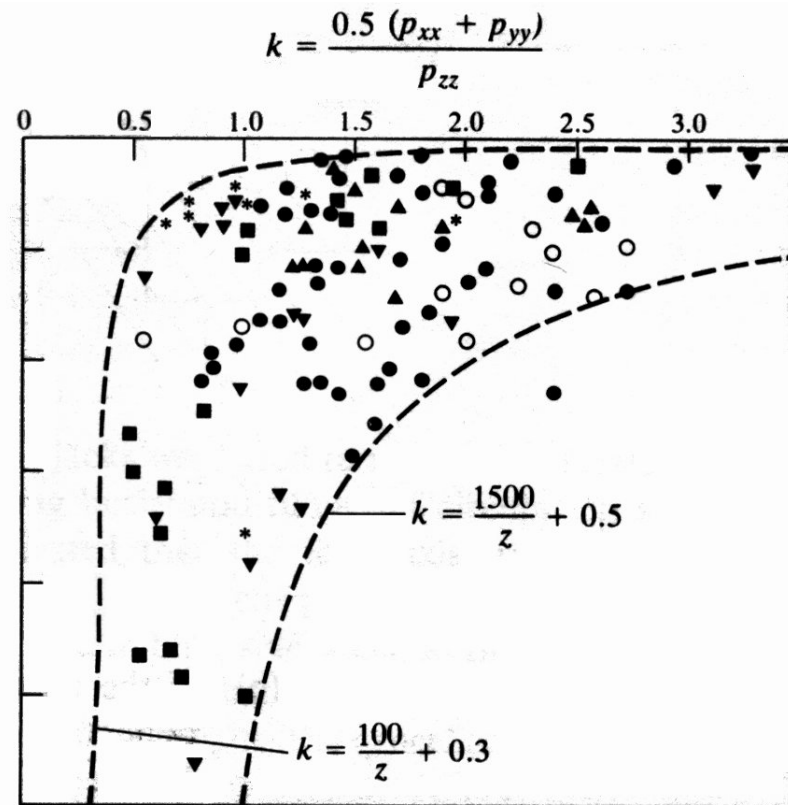
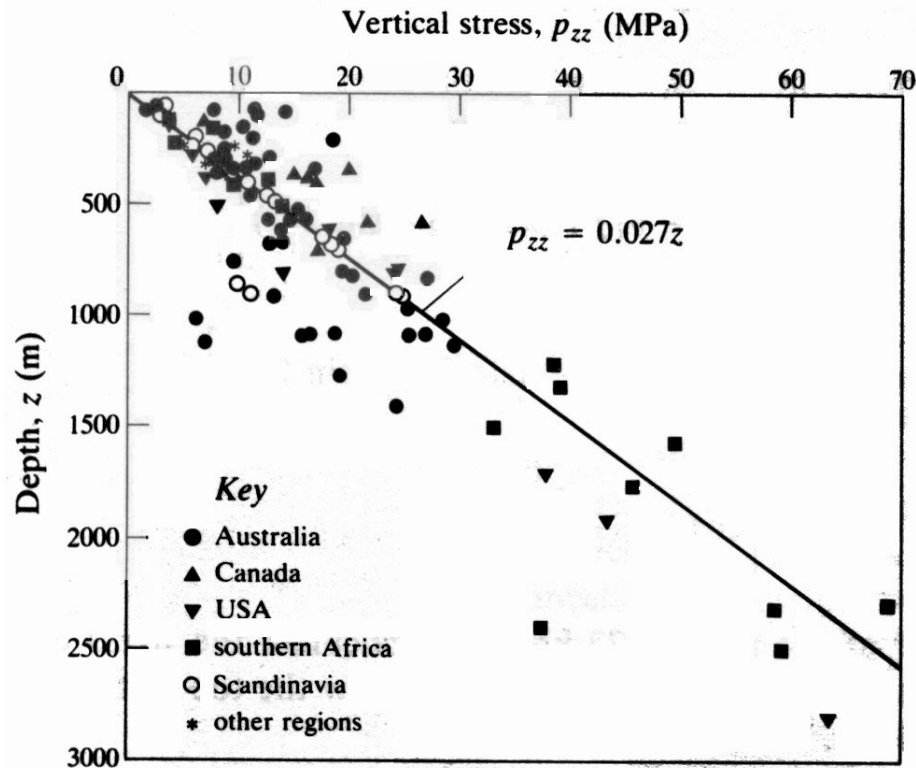
- La surface topographique
- L'érosion
- Les intrusions
- Les failles et la création de failles.



6. Contraintes In Situ – mesures des contraintes

- 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 varie de 0.5 à 3.0.
- À des profondeurs usuelles pour le génie civil (<1000 m), les variations de la contrainte horizontale sont grandes.

6. Contraintes In Situ



6. Contraintes In Situ

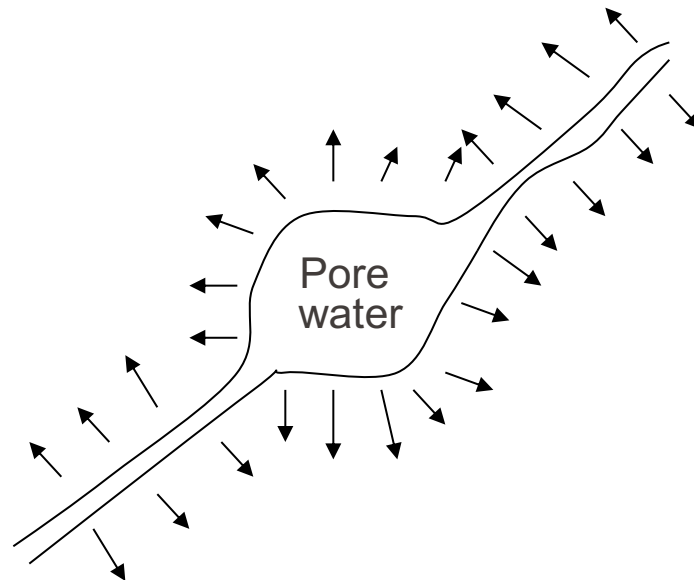
- Dans la roche en GC, la contrainte horizontale est normalement la contrainte principale, alors que la contrainte verticale ou l'autre contrainte horizontale représentent les contraintes principales mineures.

$$\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v \text{ OU } \sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$$

- La contrainte verticale peut être estimée à partir de la couverture. Si les directions et les intensités des contraintes horizontales sont nécessaires, des mesures des contraintes doivent être effectuées in situ.

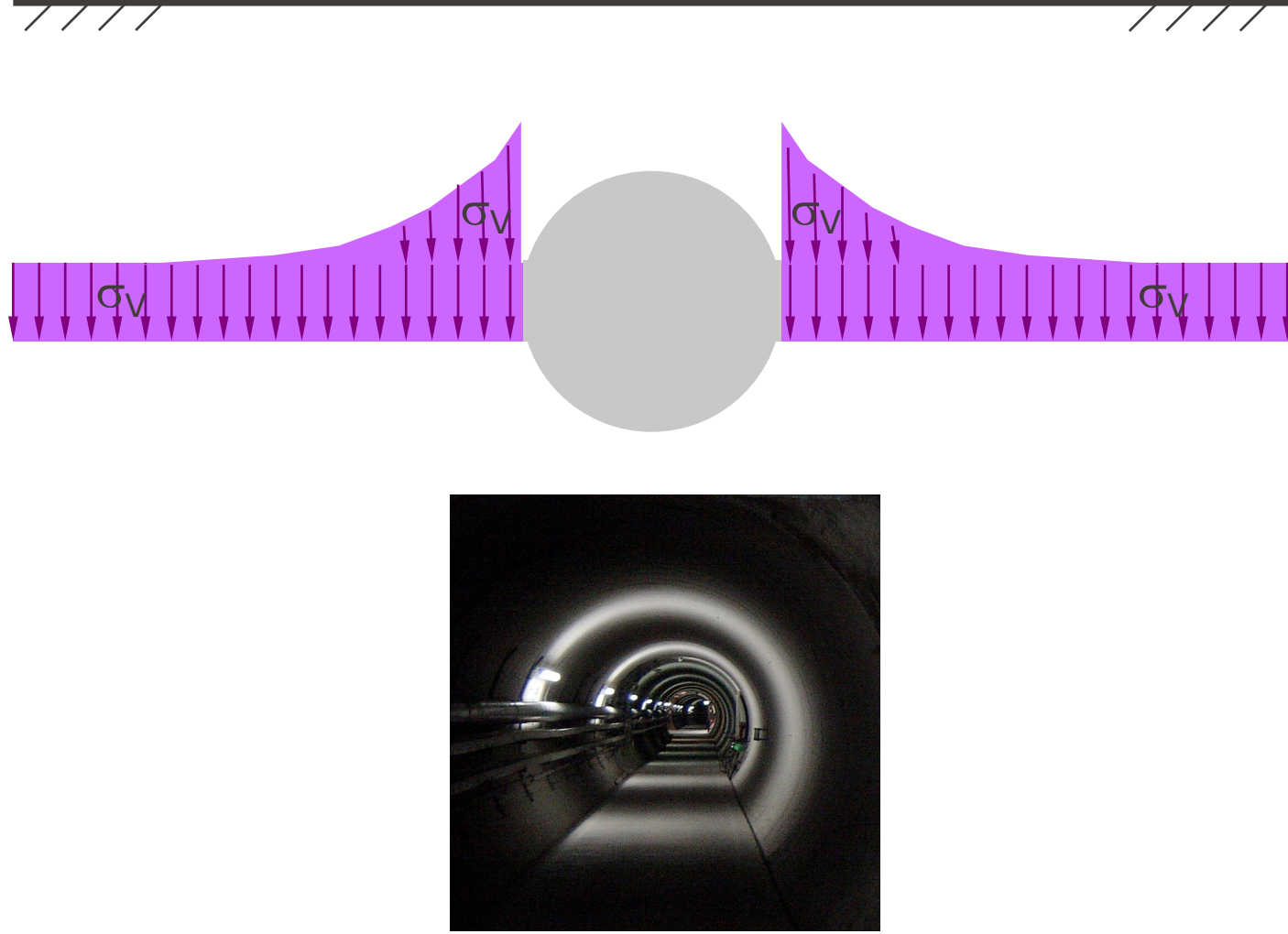
6. Contraintes In Situ – contraintes effectives

- Dans les roches poreuses, p. ex. : le grès, la contrainte effective doit être calculée comme la contrainte totale – la pression des pores
- Dans les massifs rocheux fissurés, la distribution de l'eau n'est plus la même et les champs de contraintes ne sont plus uniformes. Donc, le principe de la contrainte effective n'est plus applicable.



6. Contraintes In Situ – re-distribution des contraintes

- La construction en rocher est une activité qui perturbe le champ de contrainte original, qui est déjà à l'équilibre.
- La mécanique des roches traite de la redistribution des contraintes et des contraintes redistribuées, ainsi que la réponse à court terme de la roche durant la redistribution des contraintes et le comportement à long terme dans le champ de contraintes redistribuées.



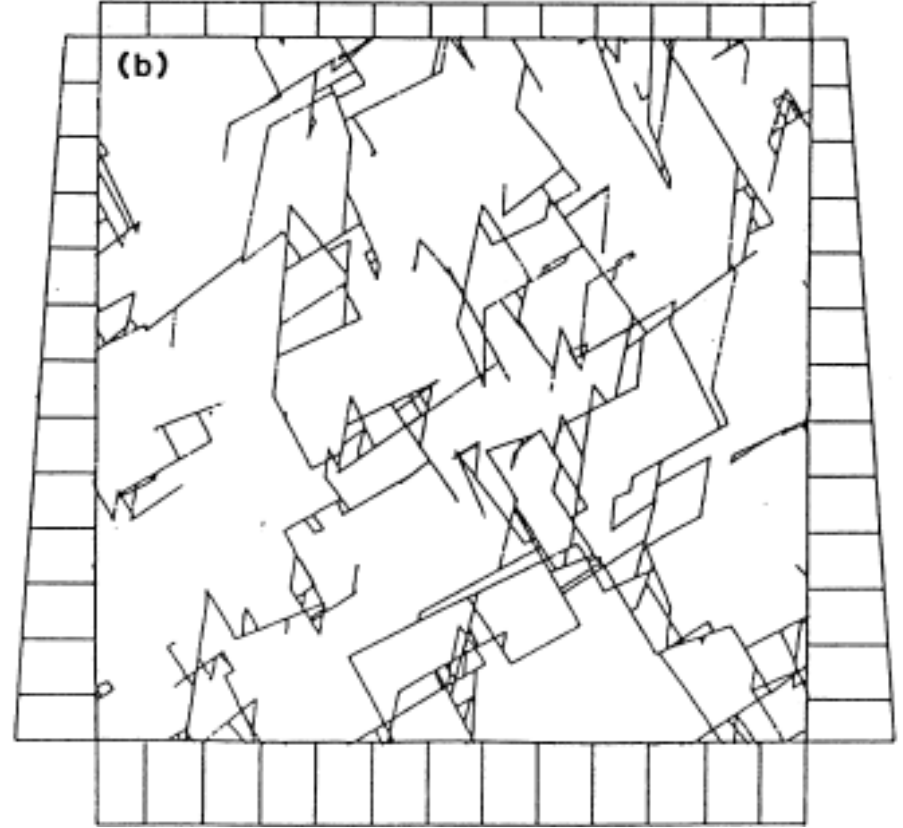
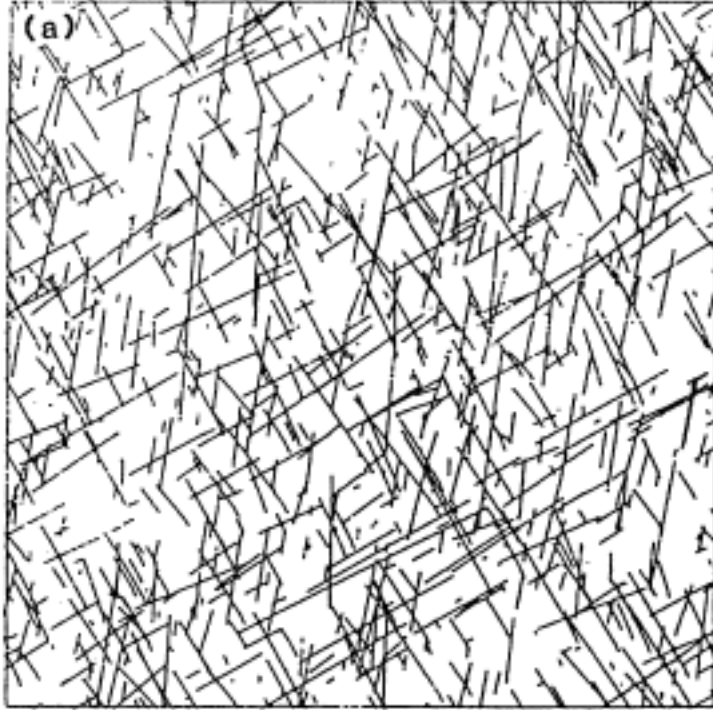
7. Eau souterraine – écoulement dans les roches

- Les plupart des roches ignées et métamorphiques sont très denses et de texture imbriquées. Les roches ont de ce fait une très faible perméabilité et porosité.
- Certaines roches clastiques sédimentaires, typiquement le grès, peuvent être poreuses et perméables.

7. Eau souterraine – écoulement dans un réseau de fissures

- Les massifs rocheux sont fissurés. Les fissures fournissent les chemins d'écoulement et celui-ci est régi par les ouvertures.
- L'écoulement dans une roche fissurée est influencé par la connectivité du système ou réseau de fissures. Bien qu'un massif rocheux peut être fortement fissuré, seul un faible pourcentage des fissures sont interconnectées. Sur le terrain, on constate souvent que quelques fissures présentent un écoulement d'eau, alors que les autres sont sèches.

7. Eau souterraine



7. Eau souterraine –

Les effets de l'eau souterraine et des pressions

L'eau souterraine est importante en mécanique des roches :

- i. L'eau souterraine contribue à la modification du champ de contrainte;
- ii. L'eau modifie les paramètres de la roche, p.ex., le frottement;
- iii. Quand l'eau est présente, cela augmente la complexité de la construction en rocher, p. ex., il est plus difficile de percer un tunnel avec des infiltrations d'eau et une forte pression d'eau.

8. Roches spéciales – Altération et roches altérées

Toutes les roches se désagrègent lentement suite à :

- i. Une altération mécanique: destruction de la roche en particules sans changer la composition chimique de ses minéraux.
- ii. Une altération chimique: destruction de la roche par réaction chimique, principalement par l'eau et l'air.

8. Roches spéciales

Granite frais



Granite altéré



8. Roches spéciales – Altération et roches altérées

- L'érosion est progressive, entre de la roche fraîche et du matériel totalement altéré (sols), la roche peut être légèrement, modérément ou fortement altérée. Ces roches altérées sont encore intactes et ont encore une structure et texture de roche. Cependant, en raison de l'altération, leurs propriétés ont été affectées et altérées.
- L'altération réduit sensiblement la résistance de la roche.

8. Roches spéciales – Roches molles et sols durs

- Les roches sédimentaires sont formées de sédiments (sols) au travers d'un long processus de compaction et de cimentation. Le procédé peut être arrêté avant que les sédiments aient été complètement solidifiés. Les matériaux pourraient être alors fortement consolidés, mais pas entièrement solidifiés. Typiquement ces matériaux ont une faible résistance et une déformabilité élevée, et lorsqu'ils sont placés en contact avec de l'eau, ils peuvent être souvent dissous. Une fois secs, ils se comportent comme une roche faible et dans l'eau, ils s'effondrent.

8. Roches spéciales – Roches molles et sols durs



8. Roches spéciales – roches gonflantes

- Certaines roches ont le pouvoir de gonfler; lorsque la roche est exposée à l'eau (directement en contact avec l'eau ou à l'air), elle gonfle. Cela est principalement dû au comportement gonflant des minéraux composant la roche, typiquement le minéral d'argile montmorillonite. Les roches et les sols qui contiennent une forte quantité de minéraux de montmorillonite auront des caractéristiques de gonflement et de retrait.



8. Roches spéciales – Roches fracturées

- Les caractéristiques des roches fracturées et broyées sont assez différentes de celles de roches massives. Elles se comportent comme des matériaux granulaires ou sous forme de blocs dont les propriétés mécaniques dépendent de leur géométrie et du frottement. Lorsque de tels matériaux sont rencontrés en construction, ils doivent être considérés séparément.

8. Roches spéciales – Roches fracturées

