

## Chapitre 1 Formation des roches

### 1 Origine des roches

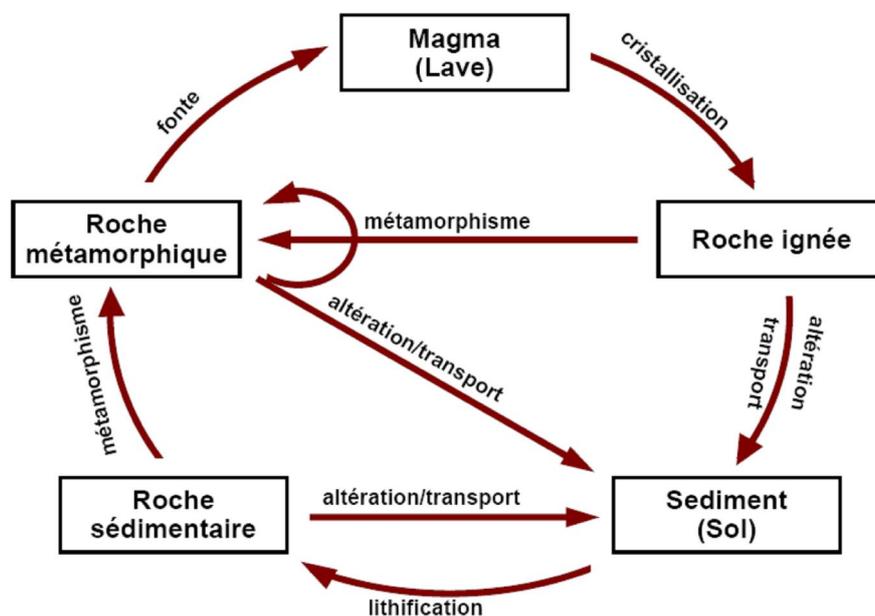
La roche est un géomatériau naturel qui est une substance solide composée de minéraux.

Les géologues distinguent 3 grandes catégories de roches selon leur origine:

- les roches *ignées* (ou *magmatiques*) du magma,
- les roches *sédimentaires* de la lithification (ou diagenèse) des sédiments
- les roches *métamorphiques* par métamorphisme

Toutes les roches sont formées de minéraux. Quelques roches sont constituées d'un seul minéral, mais la plupart sont formées par un groupe de minéraux.

Le rôle des différents processus géologiques dans la formation des roches est illustré par le cycle de la roche.



#### 1.1 Roches Ignées

Les roches ignées ou magmatiques sont formées lorsque la roche fondue (magma) se refroidit et se solidifie, avec ou sans cristallisation.

Elles peuvent être formées:

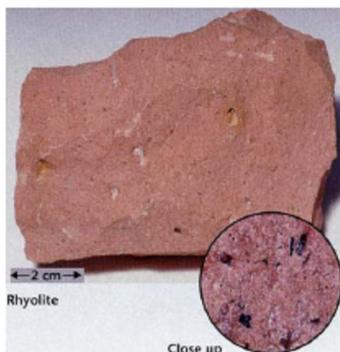
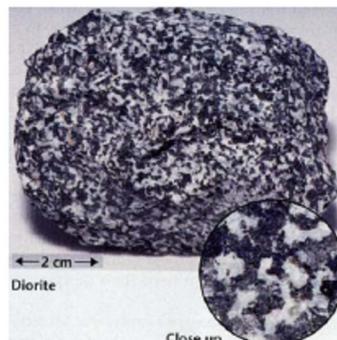
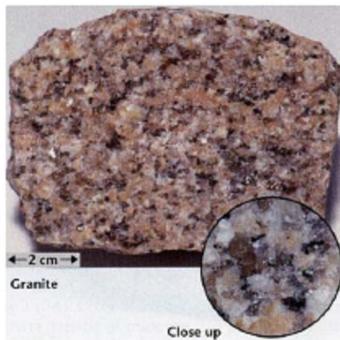
- (i) en profondeur comme des roches intrusives (plutoniques), ou

(ii) à la surface comme des roches extrusives (volcaniques).

Les roches intrusives ont généralement un grain grossier et les roches extrusives un grain fin. Elles peuvent aussi avoir différentes sortes de minéraux.

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

#### Classification des roches ignées les plus courantes



#### Exemples de roches ignées

## 1.2 Roches sédimentaires

Les roches sédimentaires se forment à partir des autres roches.

Le processus de formation d'une roche sédimentaire est composé des étapes suivantes:

- Altération des matériaux à partir d'autres roches (roches mères)
- Transport des matériaux
- Sédimentation
- Lithification (Diagénèse )

La lithification est un processus de transformation d'un sédiment meuble en roche consolidée par compaction et cimentation.

Toutes les roches se désintègrent lentement à la suite de l'altération mécanique ou chimique. L'altération mécanique représente la désintégration de la roche en particules sans produire de changement dans la composition chimique des minéraux dans la roche. L'altération chimique est la désintégration de la roche par réaction chimique.

Les roches clastiques sont formées de fragments de matériaux dérivés d'autres roches et sont généralement classées selon leur granulométrie.

Taille des particules	Commentaires	Nom de la roche
> 2 mm	Fragments de roche arrondis	Conglomérat
	Fragments de roche angulaires	Brèche
1/16 – 2 mm	Quartz avec d'autres minéraux	Grès
> 1/16 mm	Se sépare en fines couches	Schiste
	Se casse en blocs	Mudstone

### Classification des plus courantes roches sédimentaires clastiques

Du calcaire à l'argile et selon le pourcentage de calcite ou carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) les appellations suivantes sont utilisées:

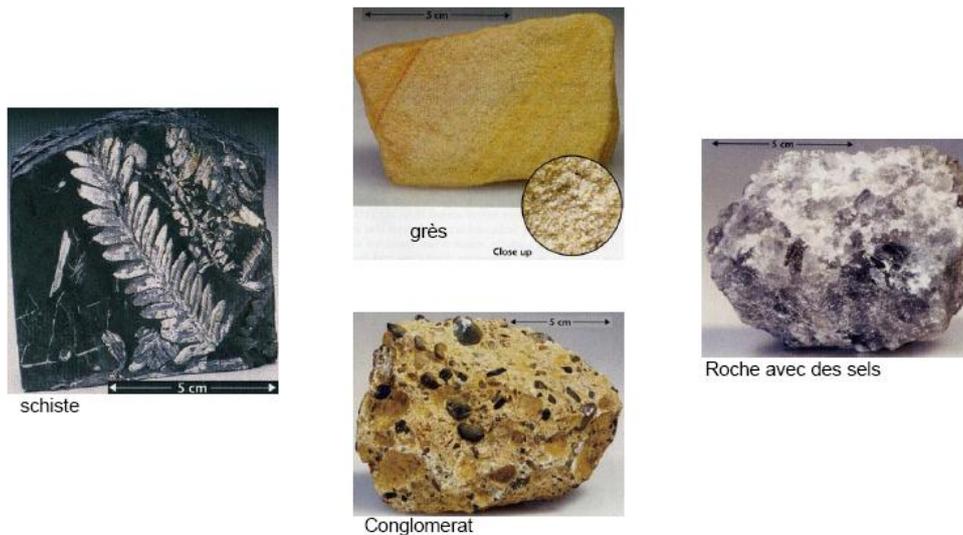
>90% : Calcaire

70-90% : Calcaire marneux

30-70% : Marne

10-30% : Marne argileuse

< 10% : Argile



Exemple de roches sédimentaires

### 1.3 Roches métamorphiques

La roche métamorphique est une nouvelle roche transformée à partir d'une roche existante, par métamorphisme - changements dus à l'augmentation de la température et à la pression. La roche existante peut être une roche sédimentaire, une roche ignée ou une autre roche métamorphique plus ancienne.

Les roches métamorphiques sont classées selon leur texture et l'assemblage des minéraux. Ils peuvent avoir une structure feuilletée ou non.

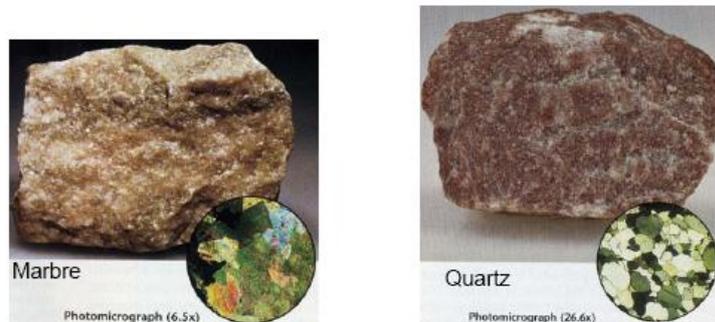
La foliation, qu'on trouve uniquement dans les roches métamorphiques, est due à une réorientation des minéraux de mica ou chlorite, due aux pressions importantes, créant un plan de clivage ou un alignement visible des minéraux. L'ardoise qui provient du schiste est un exemple de roche métamorphique à structure feuilletée.



Principe de formation des roches métamorphiques par augmentation de pression

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

Classification des roches métamorphiques les plus courantes



Exemple de roches métamorphiques

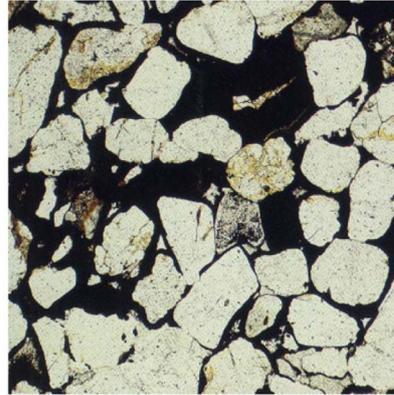
## 2 Les textures des roches

La texture indique généralement l'origine des roches, leurs modes de formation et leurs apparences. 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 texture clastique est typiquement rencontrée dans les roches sédimentaires. La texture imbriquée caractérise les roches ignées et métamorphiques.



Structure imbriquée d'un granit



Structure clastique d'un grès

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

Elle est régie par :

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

Les microstructures imbriquées des roches ignées et métamorphiques mènent généralement à un matériau rocheux à haute résistance, tandis que les microstructures clastiques des roches sédimentaires mènent souvent à un matériau rocheux à basse résistance, particulièrement lorsque la cimentation est faible.

Toute faiblesse existante dans une matrice de matériau rocheux (microfissures, pores, grains faibles et cimentation) a aussi une grande influence sur la résistance du matériau rocheux. Quand une roche est sujette à une contrainte, les points faibles commencent à se rompre (fissuration), puis les fissures se propagent entraînant ainsi la rupture de la roche.

### 3 Roches spéciales

#### 3.1 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.

L'altération est progressive, entre la roche fraîche et le matériau complètement altéré (sols), la roche peut être légèrement, modérément ou fortement altérée.

Les roches altérées ont encore une structure et une 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, en raison de l'affaiblissement des liaisons entre minéraux.

#### 3.2 Roches molles et sols durs

Les roches sédimentaires sont formées de sédiments (sols ) au travers d'un long processus de compaction et de cimentation (lithification). 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.

Selon le degré de solidification, de tels matériaux peuvent être décrits et traités en conséquence, avec les principes de la mécanique des sols ou les principes de la mécanique des roches.

### 3.3 Roche gonflante

Certaines roches ont le pouvoir de gonfler; lorsqu'elles sont exposées à l'eau elle gonflent.

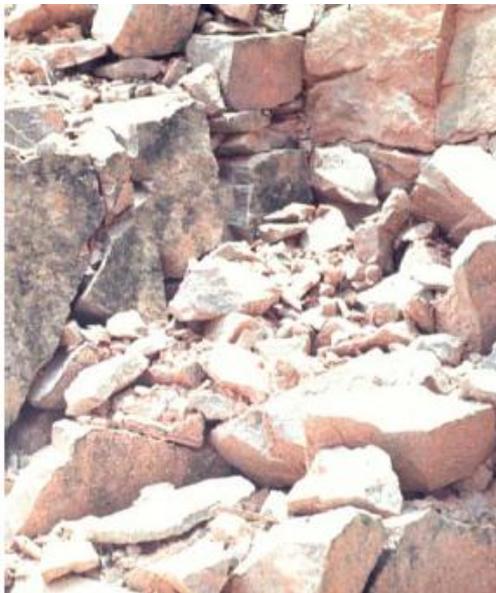
Cela est principalement dû au comportement gonflant des minéraux composant la roche, typiquement le minéral d'argile montmorillonite. Les roches et les sols qui contiennent une forte quantité de minéraux de montmorillonite auront des caractéristiques de gonflement et de retrait.

En pratique, le gonflement est un problème complexe qui est susceptible de produire des déformations excessives quand la roche lui est exposée.

### 3.4 Roches fracturées et broyées

En raison des différents processus géologiques, les roches peuvent être hautement fracturées et des fois broyées.

Les caractéristiques des roches fracturées et broyées sont assez différentes de celles des 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.



Exemples de roches hautement fracturées et broyées

## 4 La roche et les massifs rocheux

Pour les travaux de génie civil, tels que les fondations au rocher, les glissements de terrain et les excavations souterraines, 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 (matrice rocheuse) et des discontinuités (joints, failles, etc)

Massif rocheux = Matrice rocheuse + Discontinuités



Echelle considérée en mécanique des roches



Massifs rocheux typiques

## 5 Discontinuités du massif rocheux

Tout massif rocheux, quel que 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.

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

- Coupent la roche en plaques, blocs et coins, libres de tomber et de bouger ;
- Agissent comme plan de faiblesse pour le glissement ;
- Facilitent l'écoulement d'eau et crée des réseaux d'écoulement;
- Entraînent de grandes déformations;
- Changent la distribution et l'orientation des contraintes;

Par conséquent, le comportement d'un massif rocheux est largement régi par la présence de joints. En géologie les joints sont regroupés par catégories.



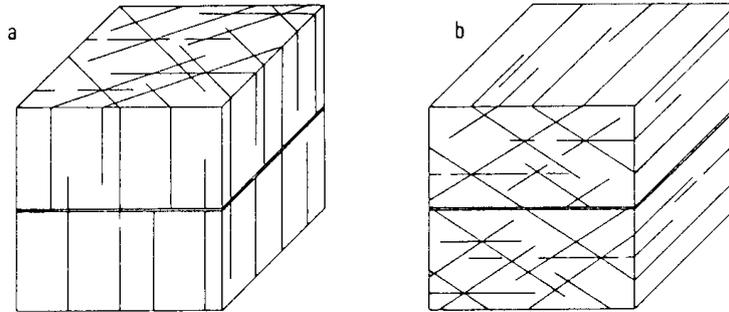
Problèmes typiques associés avec les joints rocheux

### 5.2 Les joints et les diaclases

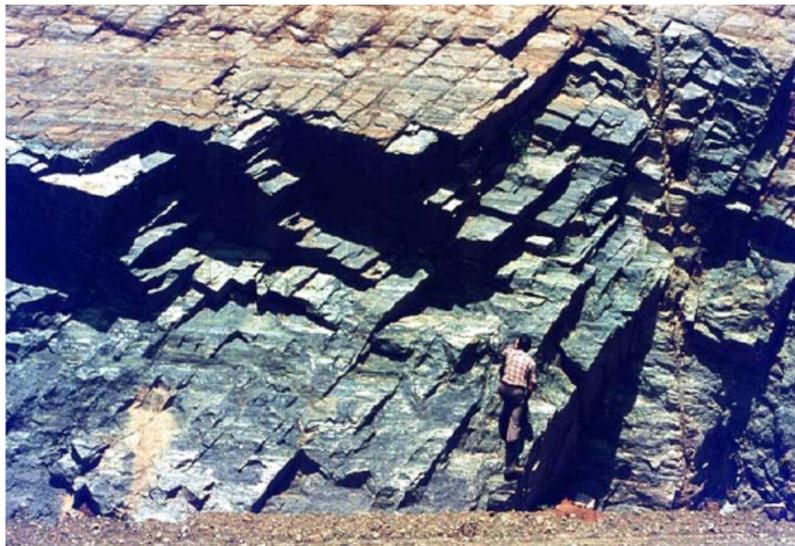
Les joints et les diaclases sont les principales discontinuités des roches. Ce sont des fractures de la roche, issues d'une rupture par compression, traction ou cisaillement liée aux mouvements tectoniques. Les deux parties de la roche qui se sont constituées n'ont cependant pas bougé. Ils sont normalement disposés en systèmes parallèles. Ils sont généralement considérés comme éléments du massif rocheux.

Le terme de diaclase désigne les discontinuités de ce type, perpendiculaires à la schistosité ou à la stratification (voir figure).

Elles sont généralement disposées en réseaux de deux, trois ou quatre familles directionnelles. Elles sont souvent planes et peu rugueuses et leur extension varie de quelques décimètres jusqu'à quelques décamètres parfois. L'espacement des joints est généralement de l'ordre que quelques centimètres à quelques dizaines de centimètres.



Exemples de réseaux de diaclases (a) et de joints (b). Le double trait correspond à la stratification



Exemple de joints observés (un ensemble dominant)



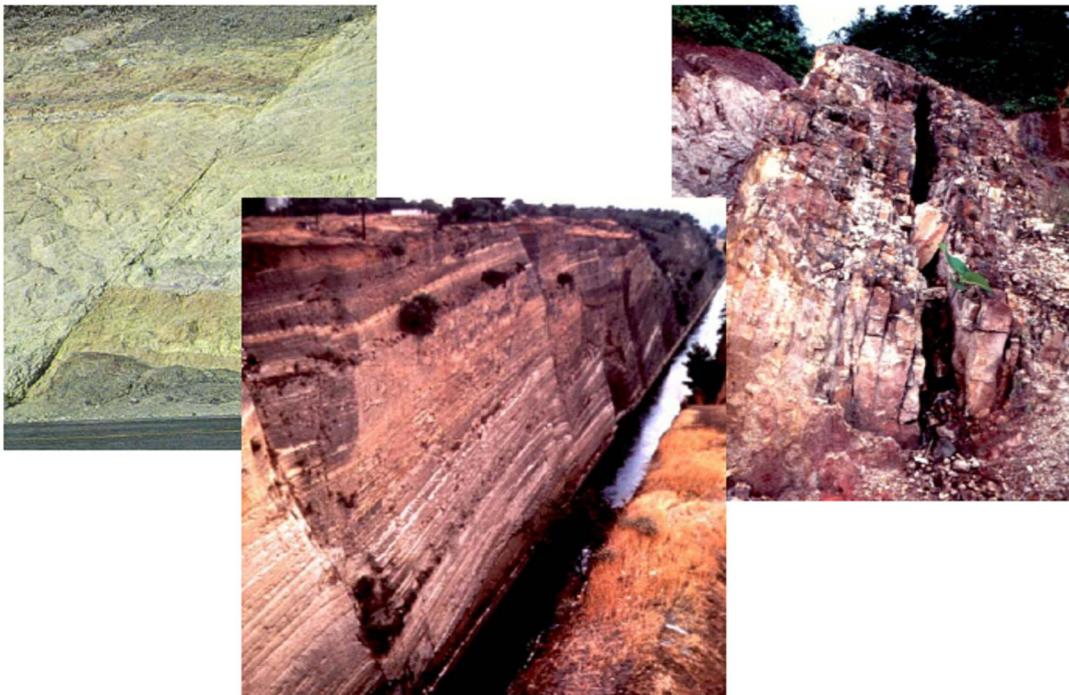
Exemple de joints (deux ensembles dominants)

### 5.3 Les failles

Les failles sont des fractures planes de la roche qui mettent en évidence un mouvement relatif. Les failles ont différentes échelles, leur longueur varie d'une dizaine de centimètres à plusieurs centaines de kilomètres.

Les failles ne consistent généralement pas en une fracture simple et nette, elles forment souvent des zones de failles.

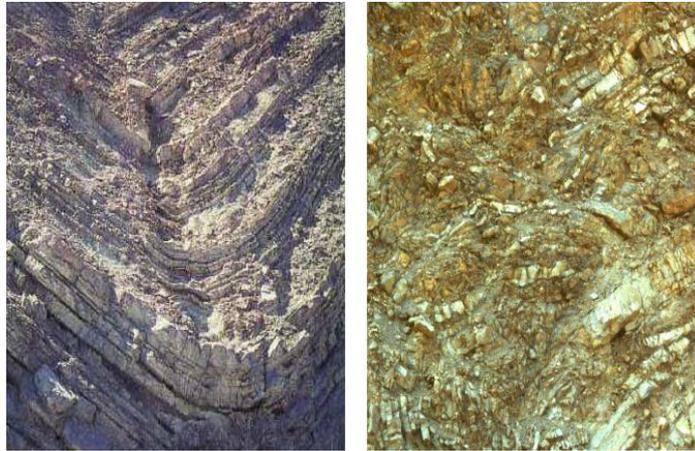
Les failles de grande échelle, zone de failles et de cisaillement, sont grandes et avec une influence localisée. Elles sont souvent traitées séparément du massif rocheux.



#### 5.4 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.



Plis dans une formation sédimentaire

#### 5.5 Les plans de stratification (ou joints sédimentaires)

Du moment que les roches sédimentaires sont formées en couches (strates), les interfaces entre couches ont reçu le nom de plans de stratification. Un plan de stratification représente donc une discontinuité séparant différentes roches.

Certains plans de stratification peuvent aussi devenir des zones potentielles d'altération et de poches d'eau souterraines.



Des plans de stratification typiques

## 5.6 La schistosité

Dans les roches métamorphiques, 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.



Echantillon de micaschiste  
rupture sur plan de schistosité

## 6 Eau souterraine

### 6.1 L'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.

### 6.2 Ecoulement 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.

### 6.3 Les effets de l'eau souterraine et des pressions

L'eau souterraine est importante en mécanique des roches:

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

## 7 Hétérogénéité et anisotropie

### 7.1 Hétérogénéité des roches

L'hétérogénéité représente une propriété variant selon les zones. Beaucoup de matériaux de construction ont des degrés d'hétérogénéité divers. Les roches sont formées par la nature et montrent de grandes hétérogénéités dues à:

- (i) Différents minéraux constituant la roche
- (ii) Différentes liaisons entre les minéraux
- (iii) L'existence de pores
- (iv) L'existence de microfissures



Texture de quelques roches

L'hétérogénéité 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.

### 7.2 Hétérogénéité des massifs rocheux

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



Formation sédimentaire avec des plans de stratification et des couches

### 7.3 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 phyllites et les schistes métamorphiques et les argilites sédimentaires montrent aussi de l'anisotropie.

L'anisotropie des massifs rocheux est contrôlée par

(i) les joints, et

(ii) les couches sédimentaires.



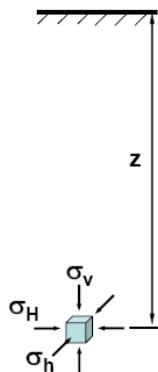
## 8 Contraintes in-situ

### 8.1 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:

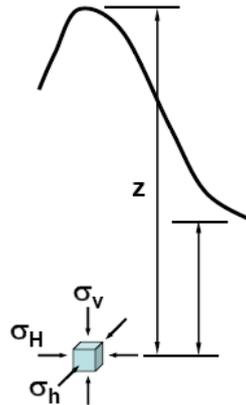
$$\sigma_v \text{ (MPa)} \approx 0,027 z \text{ (m)}$$



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.

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.



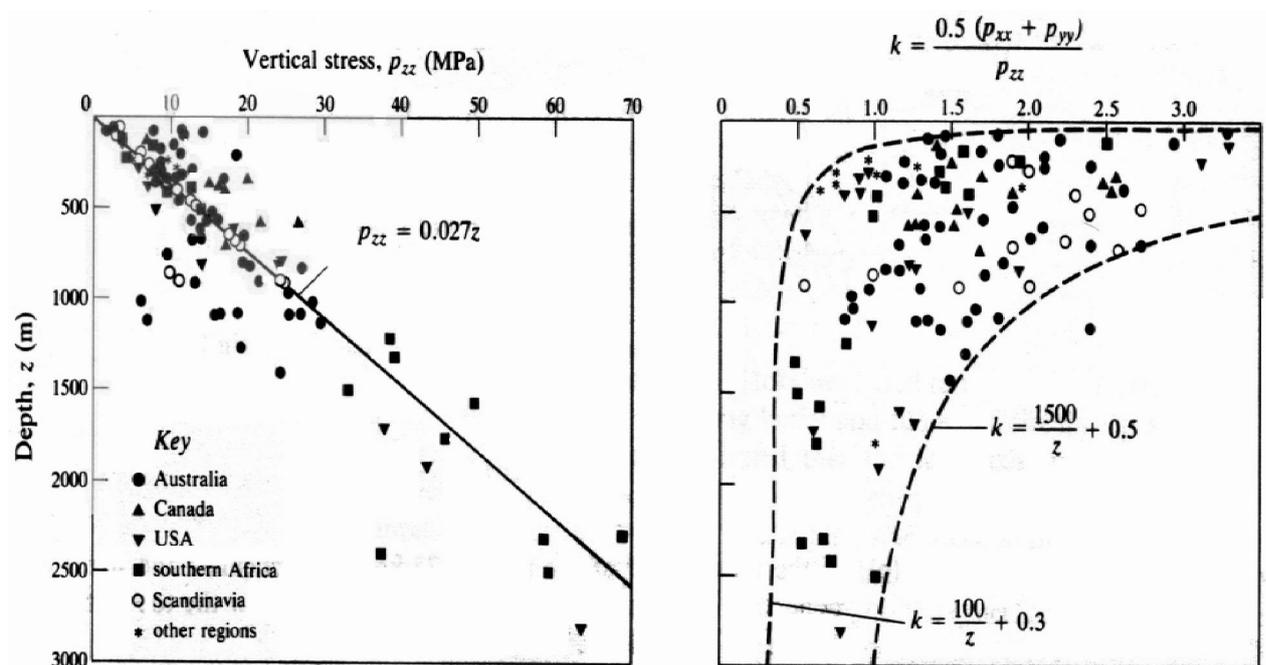
## 8.2 Mesure des contraintes In Situ

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  $\sigma_v$  varie de 0,5 à 3,0, généralement limitée entre  $(100/z + 0,3)$  et  $(1500/z + 0,5)$ .

À des profondeurs usuelles pour le génie civil ( $<1000\text{m}$ ), les variations de la contrainte horizontale sont grandes.

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  $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$

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

### 8.3 Contrainte effective

Le principe des contraintes effectives utilisé en mécanique des sols a une application limitée dans le cas de la mécanique des roches.

Dans les roches poreuses, tel que le grès, la contrainte effective doit être calculée comme la contrainte totale – la pression des pores.

Cependant, 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.

