**EXERCICES PRATIQUES DU MODULE 3**

**LES ESSAIS MECANIQUES ET LE COMPORTEMENT DES ROCHES**

## PARAMÈTRES INFLUENÇANT LE COMPORTEMENT RHÉOLOGIQUE DES ROCHES

La rhéologie est la science des lois de comportement des matériaux, qui lient, à un instant donné, les contraintes aux déformations. Le comportement rhéologique des roches s'étudie par le biais d'essais mécaniques au laboratoire, essais qui se déroulent soit en compression simple ou en cellule triaxiale. Lors de ces essais, des échantillons cylindriques ou cubiques sont soumis à un état de contrainte connu tout en y faisant varier différents paramètres tels que la température, la pression de confinement, la vitesse de déformation, la pression fluide et la chimie des fluides environnants. Ces essais nous permettent de simuler en laboratoire la **déformation fragile**, qui se traduira par le développement d'un plan de discontinuité dans l'échantillon, une fracture par exemple, accompagné ou non de glissement sur le plan de discontinuité, ou la **déformation ductile**, qui sera accommodée par la distorsion et/ou la dilatation du matériau sans rupture ni perte de cohésion.

En géologie structurale, il est important de comprendre le déroulement de ces expériences, de pouvoir lire et interpréter les résultats et d'apprécier l'effet de certains paramètres sur la déformation (vitesse de déformation, T, P, etc.). En fait, ces expériences tentent de simuler les déformations de la croûte terrestre pour mieux comprendre les processus physiques à l'origine du développement des différentes structures géologiques, telles que les failles et les plis.

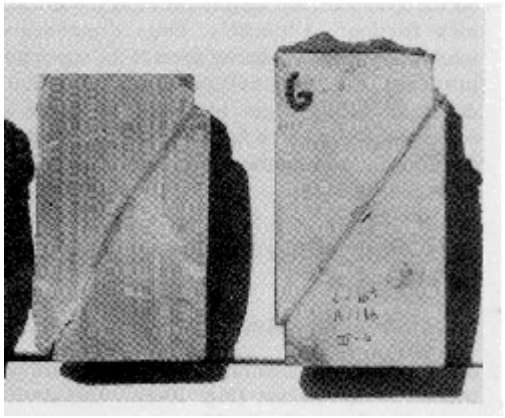


**Figure 1** Échantillons déformés. L'échantillon de gauche est caractérisé par une déformation fragile et le développement d'un plan de rupture. L'échantillon de droite contient une fracture préexistante (trait de scie) qui a rejoué pendant l'essai.

## LES ESSAIS MÉCANIQUES ET EXPÉRIMENTAUX

### Appareillage

Dans la plupart des cas, on utilise une presse ou une cellule triaxiale (figure 2) pour effectuer les essais. Le terme "triaxial" signifie que les trois contraintes principales, $\sigma_1$, $\sigma_2$ et $\sigma_3$, sont variables et peuvent être contrôlées pendant l'essai. En général, la contrainte axiale, parallèle à l'axe long de l'échantillon, correspond à $\sigma_1$ (en compression). Une pression de confinement

($P_c$) sera générée tout autour de l'échantillon ($\sigma_2 = \sigma_3$) par un fluide sous pression; la $P_c$ est inférieure à $\sigma_1$ et correspond donc à $\sigma_2$ et $\sigma_3$. Dans certains cas, l'échantillon sera soumis à une extension axiale, où la pression de confinement sera supérieure à la contrainte verticale axiale et donc $P_c = (\sigma_1 = \sigma_2)$ (en compression) et la contrainte axiale deviendra $\sigma_3$ (en extension).

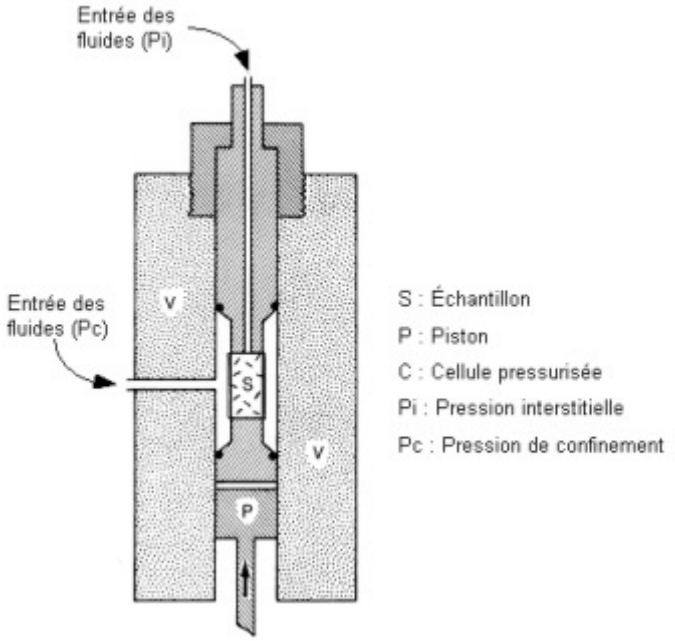



**Figure 2** Cellule triaxiale.

Dans tous les cas, la contrainte différentielle correspond à la contrainte axiale $\sigma_1$, moins la pression de confinement, $\sigma_3$ et on aura:

$$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$$

Il est possible aussi d'injecter un fluide dans l'échantillon en cours d'essai pour faire varier la pression interstitielle du matériau. À ce moment, la pression interstitielle des fluides ($P_f$) ne sera pas nulle, et les contraintes deviendront des contraintes effectives (la contrainte axiale effective ($\sigma_1$) et la pression de confinement effective ($\sigma_3$). Les contraintes effectives pourront être calculées à partir des relations suivantes:

$$\sigma_1^* = \sigma_1 - P_f$$

$$\sigma_3^* = \sigma_3 - P_f$$

et dans ce cas, $\sigma_d = \sigma_1^* - \sigma_3^*$

D'autres paramètres peuvent être contrôlés pendant les essais soit la vitesse de déformation (en variant la vitesse du piston), la température (avec une fournaise autour de l'échantillon), la pression de confinement (pression du fluide autour de l'échantillon), la pression interstitielle des fluides (injections de fluides). Deux types d'essais sont couramment utilisés,

soit l'essai à vitesse de déformation constante, contrôlée par la vitesse du piston, et l'essai à contrainte constante.

## LE COMPORTEMENT DES MATÉRIAUX

Pour mieux comprendre le comportement des roches lors de la déformation, l'on doit revoir d'abord les comportements idéaux et ensuite préciser le comportement réel des roches.

### Les corps élastiques: la loi de Hooke, le module de Young et le coefficient de Poisson

Lorsque soumis à une contrainte, les **corps élastiques** se caractérisent par une réponse instantanée et réversible. Pensez justement à un élastique que l'on étire (contrainte) et qui revient à sa forme initiale dès qu'on le relâche (aucune contrainte). La déformation subie par un corps élastique sera automatiquement rétablie une fois les contraintes disparues. Si la déformation est proportionnelle à la contrainte, l'élasticité sera dite **hookéenne** et dans ce cas la déformation linéaire (e) sera définie par:

$$e = \sigma/E$$

où E = Module de Young
et e = l'étirement

En cisaillement simple, la déformation cisaillante ($\gamma$) d'un corps sera proportionnelle à la contrainte tangentielle ($\sigma_c$):

$$\gamma = \sigma_S / G$$

où G est le module de cisaillement, qui représente la résistance au cisaillement des corps élastiques. Le module d'incompressibilité (K) représente la résistance des corps élastiques aux changements de volume:

$$K = \Delta P/\Delta V$$

où $\Delta P$ = variation de pression hydrostatique et $\Delta V$= la dilatation

Un corps élastique hookéen isotrope se raccourcira de $e_z$ sous l'effet d'une contrainte axiale $\sigma_z$ (selon l'axe z) et s'allongera de $e_x$ dans une direction perpendiculaire à $\sigma_z$. Le coefficient de Poisson correspond au rapport entre l'étirement $e_z$ et l'étirement $e_x$:

$$\nu = e_x/e_z$$

À titre d'exemple, le coefficient de Poisson de la plupart des roches varie de 0.01 pour les schistes à 0.25 pour les calcilutites (calcaire à grains fins). L'effet Poisson correspond aux contraintes horizontales engendrées par les contraintes verticales sur un volume rocheux en sous surface.

**Les corps plastiques**

Lorsque soumis à une contrainte, les **corps plastiques** se caractérisent par une déformation irréversible. Il se produira un fluage plastique, c'est-à-dire un écoulement de la matière qui sera dépendante du temps. Si le fluage se produit à vitesse constante, on dira qu'il est stationnaire. Dans ce cas, la vitesse de déformation ($\dot{\varepsilon}$) sera proportionnelle à la contrainte:

$$\dot{\varepsilon} = \alpha\sigma$$

où $\alpha$= la fluidité
et $1/\alpha = \mu$, la viscosité

La viscosité est une constante qui dépend du matériau et est fonction de la température, de la pression et de la vitesse de déformation.

**Le comportement visqueux: fluide newtonien**

Le comportement visqueux newtonien des liquides et de certains solides correspond au comportement d'un matériau pour lequel la viscosité est indépendante de la contrainte tandis que la vitesse de fluage ($\dot{\varepsilon}$) est proportionnelle à la contrainte.

$$\sigma_d = \mu\,\dot{\varepsilon}$$

**LE COMPORTEMENT RHÉOLOGIQUE DES ROCHES**

**Diagramme contrainte vs déformation**

Les données expérimentales sur la déformation des roches en cellules triaxiales sont portées sur des graphiques de contrainte vs déformation (figure 3), l'axe vertical étant la contrainte différentielle ($\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$) et l'axe horizontal étant la déformation exprimée par la déformation linéaire de l'échantillon (e, S ou $\lambda$). Ici, on utilisera la variable $\varepsilon$ qui représente tout simplement la valeur absolue de l'allongement exprimé en pourcentage. Ainsi, $\varepsilon = |e| \times 100\%$. On utilise la valeur absolue puisque les échantillons subissent un raccourcissement et on veut éviter d'utiliser des valeurs négatives. On parle alors de % de raccourcissement.

Les essais sur la déformation des roches ont permis d'observer que la plupart des roches se comportent de façon élastique jusqu'à ce que leur limite d'élasticité (ou seuil de plasticité) soit atteinte. L'échantillon subira alors soit (A) une rupture fragile accompagnée de perte de cohésion et d'une chute brusque de la contrainte, (B) une déformation ductile irréversible suivie d'une fracturation sans perte de cohésion ou (C) une déformation ductile irréversible (figure 3). Lorsque les roches sont déformées à température et pression ambiantes, la rupture se produit sans déformation ductile appréciable. Par contre, lorsqu'on augmente la température et/ou la pression, une part considérable de la déformation sera accommodée par une déformation ductile (distorsion), i.e. le domaine plastique sur un graphique $\sigma$ vs $\varepsilon$. Le comportement plastique peut être accompagné d'un durcissement ou d'un amollissement du matériau.

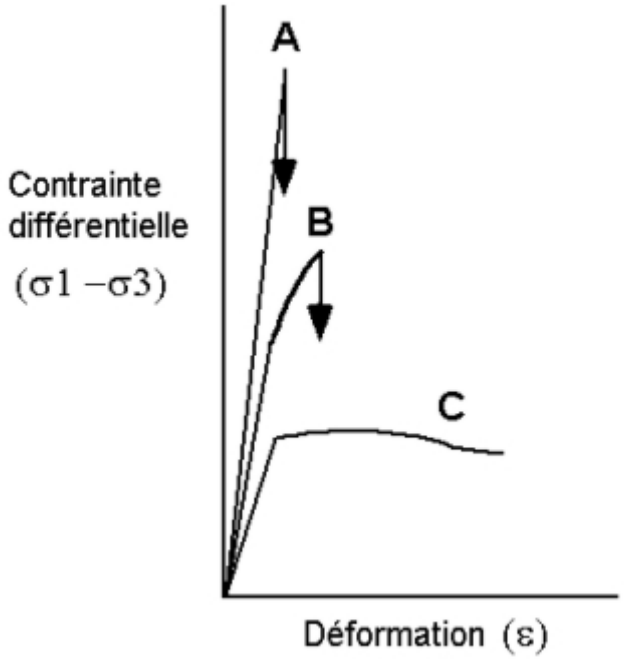



**Figure 3.** σ vs ε. Comportement élastique suivi de rupture fragile (A), d'une déformation ductile et rupture (B), et d'une déformation ductile accompagnée d'un amollissement (C).

Plusieurs caractéristiques physiques du matériau pourront être déterminées à l'aide de ces graphiques dont la limite d'élasticité de l'échantillon, la résistance ultime ainsi que le point de rupture. Aussi, le comportement rhéologique des différents matériaux pourra être déduit à partir de la forme de la courbe qui caractérise l'essai (figure 4).

Un **comportement élastique** se caractérisera par une droite sur un graphique σ vs ε (figure 4). La pente de la droite correspond au module de Young, qui décrit une des propriétés physiques de la roche, la rigidité. Cette droite nous indique que la déformation (ε) est directement proportionnelle à la contrainte (σ) selon la relation suivante:

$$\sigma = E\,\varepsilon$$

De même, un **comportement plastique** se caractérisera par une courbe sur un graphique σ vs e (figure 4). La déformation subie par un échantillon qui se comporte de façon élastique est réversible tandis que la déformation ductile en domaine plastique est irréversible.

Il existe plusieurs paramètres qui servent à décrire le comportement rhéologique d'une roche (figure 4):

- **Limite d'élasticité** ou seuil de plasticité: la valeur de la contrainte différentielle au point de courbure de la droite élastique qui marque le début du comportement plastique.
- **Limite au point de rupture**: la contrainte différentielle atteinte au moment de la rupture.

- **Résistance ultime**: la contrainte différentielle maximale encaissée par la roche pendant l'essai.
- **Ductilité**: le pourcentage de déformation ductile avant la rupture.

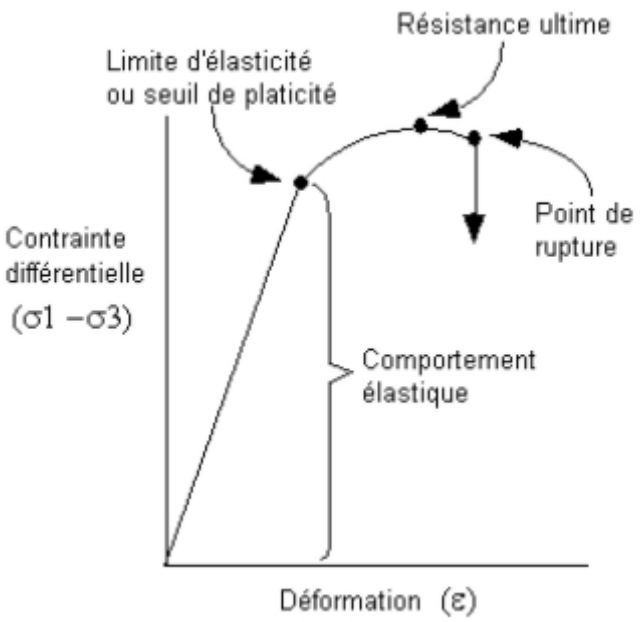



**Figure 4** Graphique σ vs ε.

**Le durcissement et l'amollissement**

Pour un comportement plastique, on dira qu'il y a eu **durcissement** du matériau lorsque les contraintes imposées doivent être de plus en plus élevées pour que la déformation ductile progresse. Sur un graphique σ vs ε, le durcissement se traduira par une pente positive de la courbe du domaine de comportement plastique (figure 5F). Aussi, on dit qu'il y a eu **amollissement** du matériau lorsque les contraintes doivent être relâchées pour que la déformation ductile progresse. L'amollissement se traduira par une pente négative de la courbe du domaine de comportement plastique sur un graphique σ vs ε (figure 5D). Un comportement plastique idéal est représenté par une droite horizontale sur un graphique σ vs ε (fig. 5E). Généralement, les essais procèdent toujours vers une rupture de l'échantillon, même après un certain pourcentage de déformation ductile.

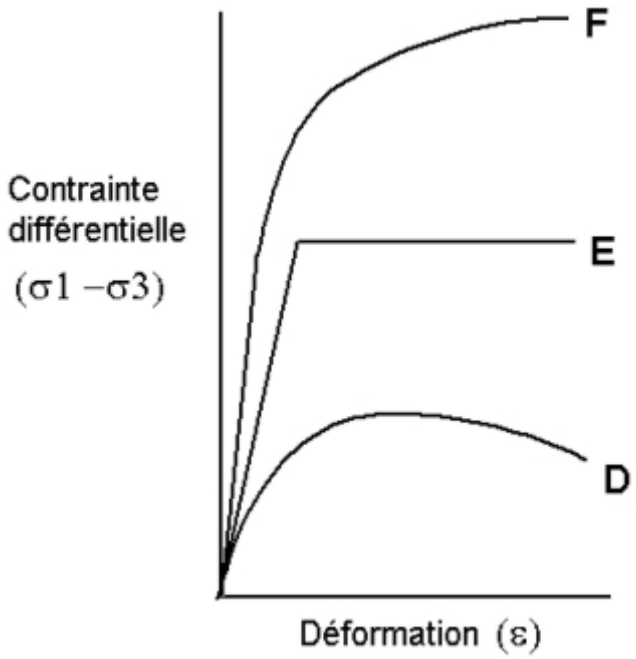



**Figure 5** σ vs ε. Courbe D: Amollissement, courbe E: Fluage plastique idéal, courbe F: Durcissement.

Mentionnons aussi qu'une roche sera dite **fragile** lorsqu'elle subira au plus 5% de déformation ductile avant la rupture, **fragile-ductile** lorsqu'elle subira entre 5 et 10% de déformation ductile avant rupture, et **ductile** lorsqu'elle subira plus de 10% de déformation ductile avant rupture.

## LE DIAGRAMME DE MOHR DES CONTRAINTES

Lors d'un essai en compression ou en traction, la rupture se manifeste par une chute de la contrainte différentielle et peut se traduire par (1) le développement d'une fracture ou (2) glissement sur un plan préexistant. Après plusieurs essais, il est possible de construire un graphique $\sigma_S$ vs $\sigma_N$, qui correspond au diagramme de Mohr des contraintes (figure 6). Ce diagramme permet de déterminer l'enveloppe de fracturation pour un matériau donné à l'aide des cercles qui représentent l'état de contrainte au moment de la rupture à chaque essai. Cette enveloppe sépare le domaine stable (sans rupture) du domaine instable (rupture) et permet de déterminer certains paramètres physiques de la roche, tels que sa cohésion ($\sigma_c$), son coefficient interne de friction (tan $\phi$) et son angle de friction interne ($\phi$).

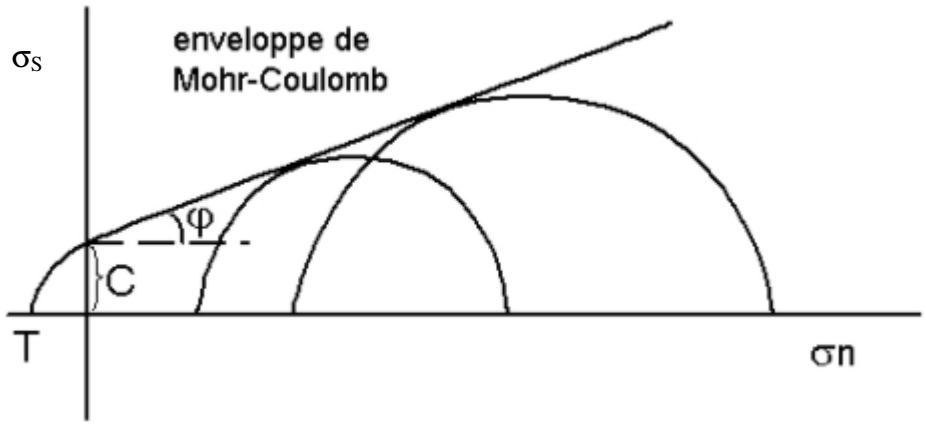



**Figure 6** Enveloppe de Mohr-Coulomb.

Pour un système de contraintes donné et pour un matériau donné, le **critère de Coulomb** permet de prédire la contrainte minimale à laquelle aura lieu la rupture ainsi que l'orientation du plan de fracture qui se développera.

La relation définie par le critère de Coulomb est la suivante:

$$\sigma_C = \sigma_O + \sigma_N \tan \phi$$

où

$\sigma_C$ = la contrainte tangentielle à la rupture
$\sigma_N$ = la contrainte normale à la rupture
$\sigma_O$ = la cohésion
$\tan \phi$ = le coefficient de friction interne

La résistance en traction et la cohésion ($\sigma_{N)}$ d'une roche sont données par le point d'intersection de l'enveloppe sur l'abscisse, T, et sur l'ordonnée, C, respectivement.

L'orientation du plan de fracture au moment de la rupture pour un matériau est donnée par le point d'intersection entre l'enveloppe et le cercle de l'état de contrainte. Il s'agit de tracer la droite reliant le point d'intersection et l'origine du cercle. L'angle mesuré entre l'abscisse et cette droite, mesuré du coté gauche du cercle, correspond à l'angle 2θ, où l'angle θ est l'angle entre le plan de rupture et la contrainte maximale $\sigma_1$ (Figure 7). Si l'angle est mesuré au dessus de l'abscisse (sens horaire), l'angle sera positif. Au contraire, si l'angle est mesuré au dessous de l'abscisse (sens antihoraire), l'angle est alors négatif.

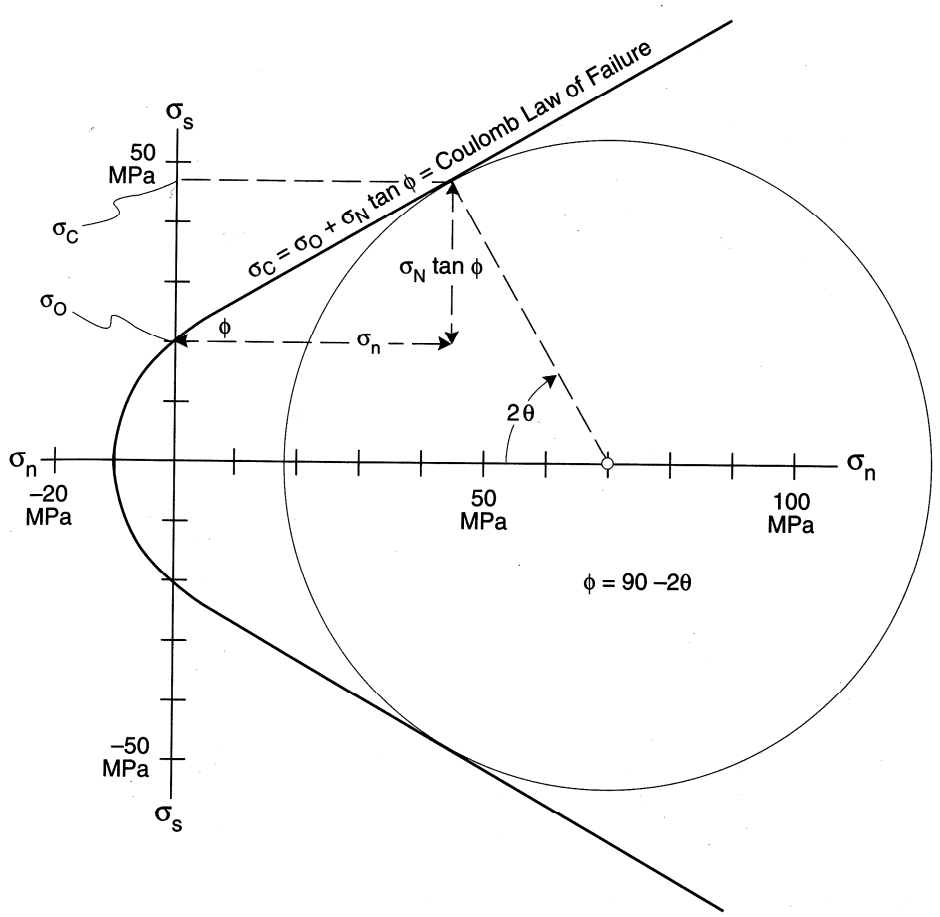



**Figure 7** Enveloppe de Mohr-Coulomb.

Les **enveloppes de fracturation** sur les diagrammes de Mohr sont déterminées expérimentalement et non pas théoriquement. Dans le domaine de la déformation cassante, l'enveloppe de Mohr correspondra à une droite et peu importe l'état de contrainte au moment de la rupture (les conditions variables de $\sigma_1$ et $\sigma_3$), l'orientation des plans de ruptures sera toujours la même par rapport à l'orientation des contraintes. Dans le domaine de la déformation ductile, l'enveloppe de Mohr correspondra à une courbe, et l'orientation des plans de rupture ou de glissement sera variable; pour des contraintes plus élevées, l'angle entre les plans de glissement et $\sigma_1$ sera plus fort.

## FACTEURS INFLUENÇANT LA RHÉOLOGIE DES ROCHES

- Le type de roche
- La pression hydrostatique (pression de confinement et pression des fluides)
- La température
- La vitesse de déformation
- Le temps

**EXERCICE 1 - Déformation fragile.**

Des essais en cellule triaxiale ont été entrepris sur des échantillons de grès de la Formation d'Oil Creek (un grès fin, massif, bien trié et cimenté), le but étant de déterminer l'enveloppe de Mohr et de caractériser le comportement rhéologique du grès. Pendant les essais, la contrainte axiale ($\sigma_1$) a été augmentée progressivement, tout en gardant la pression de confinement stable, de façon à augmenter la contrainte différentielle et causer la rupture du spécimen. Les essais ont été effectués à la température ambiante et avec une vitesse de déformation de $10^{-3}$/sec. Trois essais ont été entrepris en faisant varier la pression de confinement d'un essai à l'autre. Les résultats sont donnés sous forme graphique ($\sigma$ vs $\varepsilon$) à la figure 1.

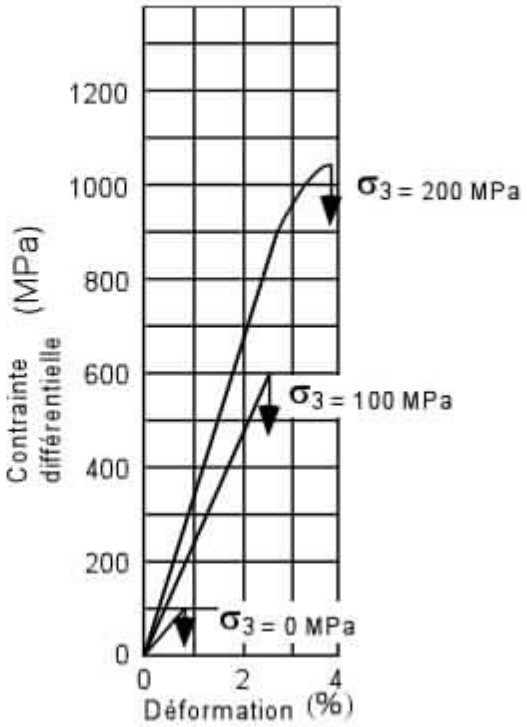



**Figure 1** Graphique contrainte/déformation pour le grès d'Oil Creek. $\sigma_3$ = pression de confinement.

1) Déterminez la contrainte différentielle et la contrainte moyenne au moment de la rupture pour chaque essai.

2) Construisez un diagramme de Mohr représentatif du comportement rhéologique du grès pour chaque essai (les trois essais sur le même diagramme). Tracer l'enveloppe de fracturation. Que pouvez-vous déduire de la forme de l'enveloppe?

3) À l'aide du critère de Coulomb ($\sigma_C = \sigma_O + \sigma_N \tan \phi$), calculez la cohésion et le coefficient de friction interne du grès.

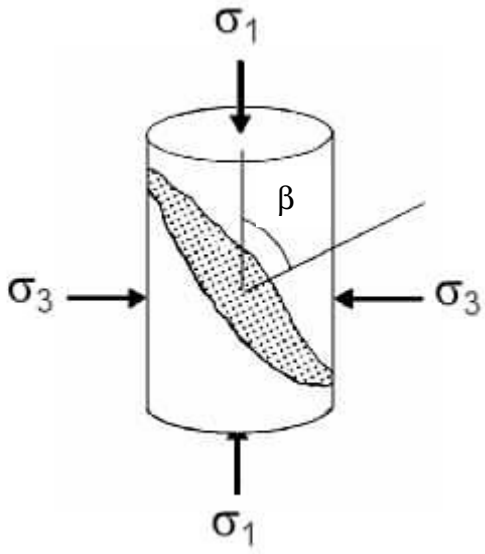



**Figure 2** Orientation des plans de rupture des spécimens déformés du grès d'Oil Creek. $\beta$ = 67° (donc $\theta$ = 90° - $\beta$ = 23°).

4) Déterminez l'orientation théorique du plan de rupture sur chacun des cercles de Mohr. Est-elle la même pour chaque essai? Ces orientations sont-elles conformes à celle observée sur le spécimen déformé et schématisé sur la figure 2?

5) Que se passe-t-il lorsque la pression de confinement augmente? (Commentez l'influence sur la résistance à la rupture du grès, la contrainte différentielle au moment de la rupture, la rigidité (E) et la ductilité du grès).

**EXERCICE 2 - Déformation ductile-fragile.**

Une série d'essais a été effectuée sur le grès Berea du Mississippien de l'état d'Ohio, un grès de granulométrie moyenne et pauvrement cimenté. Les essais portent sur la transition ductile-fragile. La procédure est la même que pour l'exercice 1, où la contrainte axiale ($\sigma_1$) a été augmentée progressivement au cours de chaque essai. Pour chaque essai, on a fait varier la pression interstitielle des fluides ($P_f$ = 0, 50, 100, 150 et 200 MPa) tout en gardant la pression de confinement constante à 200 MPa. Les résultats sont présentés à la figure 3. Les graphiques contrainte/déformation pour le grès de Berea diffèrent de ceux du grès de Oil Creek; les spécimens ne subissent pas de perte totale de cohésion une fois le seuil de plasticité atteint. Certains échantillons continueront de se déformer de façon ductile même s'il y a développement d'un plan de rupture. L'orientation des plans de rupture mesurés sur les échantillons est de 26° à 0 MPa, 27° à 50 MPa, 34° à 100 MPa, 36° à 150 MPa et 38° à 200 MPa (ces valeurs correspondent aux angles entre le plan de rupture et $\sigma_1$).

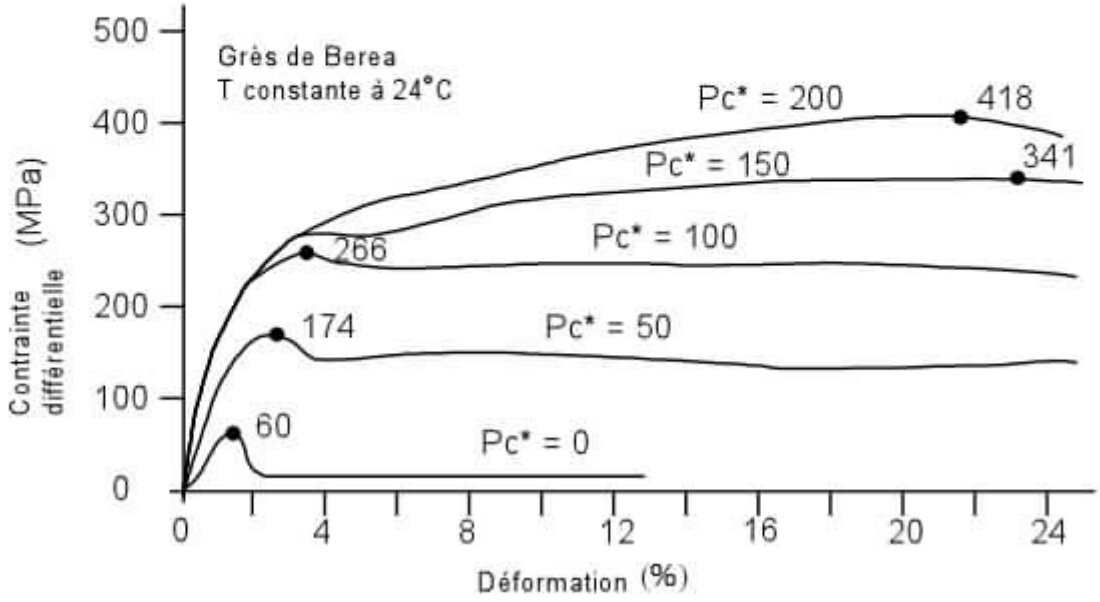



**Figure 3** Graphique contrainte/déformation pour le grès de Berea. $P_c^*$, pression de confinement effective.

1. Examinez les courbes de la figure 3. Décrivez et expliquez les différentes formes des courbes en fonction de la pression de confinement effective. Le seuil d'élasticité et la résistance ultime sont-ils différents d'une courbe à l'autre?

2. Si on utilise le point de résistance ultime pour définir le moment où il y a rupture de l'échantillon, déterminez quel type de déformation les roches subissent lors de la rupture pour chacun des essais. La transition ductile-fragile correspondrait alors à quelle valeur de pression de confinement effective?

3. Construisez un diagramme de Mohr et tracez le cercle caractérisant chaque essai. Utilisez le point de résistance ultime pour définir la contrainte différentielle au point de rupture et la pression effective pour $\sigma_1$ et $\sigma_3$ ($\sigma_i^* = \sigma_i - P_f$). Tracez l'enveloppe de Mohr. Comment cette enveloppe diffère-t-elle de celle de l'exercice 1? Expliquez la différence.

4. À l'aide du diagramme de Mohr, décrivez comment l'orientation du plan de rupture varie en fonction de la pression de confinement effective. Les valeurs calculées sur le diagramme de Mohr correspondent-elles à celles observées sur les spécimens déformés?

5. Un spécimen de grès de Berea est soumis à une pression de confinement de 100 MPa et une contrainte axiale de 210 MPa. D'après l'enveloppe construite à la question 2, y aura-t-il rupture du spécimen si on fixe la pression interstitielle à 50 MPa? à 60 MPa? à 75 MPa? Quel est l'effet de ces augmentations de $P_f$ sur la contrainte différentielle et la contrainte moyenne?

**EXERCICE 3 - Déformation ductile.**

La température, la pression de confinement et la vitesse de déformation sont des paramètres physiques importants pour déterminer le comportement fragile ou ductile d'un corps rocheux. Quatre séries d'essais ont été effectuées pour caractériser l'effet de ces paramètres sur le comportement de différents types de roches. Les résultats de ces essais sont présentés à la figure 4. Les graphiques 4a et 4b présentent les résultats de l'effet de la pression de confinement sur le comportement d'un marbre (4a) et d'un calcaire (4b) lors d'essais en cellule triaxiale à température et vitesse de déformation constantes (T= 25°C et $\dot{\varepsilon}$ = 4x10$^{-4}$/sec pour 4a et T = 25°C et $\dot{\varepsilon}$ = 2x10$^{-4}$/sec pour 4b). Le graphique 4c présente les résultats de l'effet de la température sur le comportement d'un calcaire lors d'essais en cellule triaxiale à pression de confinement et vitesse de déformation constante ($P_c$ = 300 MPa, $\dot{\varepsilon}$ = 2x10$^{-4}$/sec). Et finalement le graphique 4d présente les résultats de l'effet de la vitesse de déformation sur le comportement d'un marbre, à température et pression de confinement constante (T = 500°C, $P_c$ = 300 MPa).

1. À l'aide des graphiques de la figure 4, décrivez comment le seuil de plasticité varie en fonction de la température, la pression de confinement et la vitesse de déformation pour chaque série d'essais. À l'aide de la figure 4 expliquez quelles conditions favorisent la déformation ductile.

2. En sachant que le calcaire est généralement plus ductile que le granite, comment se comportera un granite soumis à des conditions expérimentales identiques à celles des essais 4a et 4b? Dessinez schématiquement les courbes contrainte vs déformation pour ces essais.

3. À quelle profondeur s'attendrait-on à observer une déformation ductile plutôt que fragile pour le Calcaire de Solenhofen? Considérez une température de 400°C. La contrainte différentielle dans la croûte supérieure est 2/3(ρgh) où ρ = 2700 kg/m$^3$, g est l'accélération gravitationnelle et h la profondeur en m. Utilisez la figure 4c.

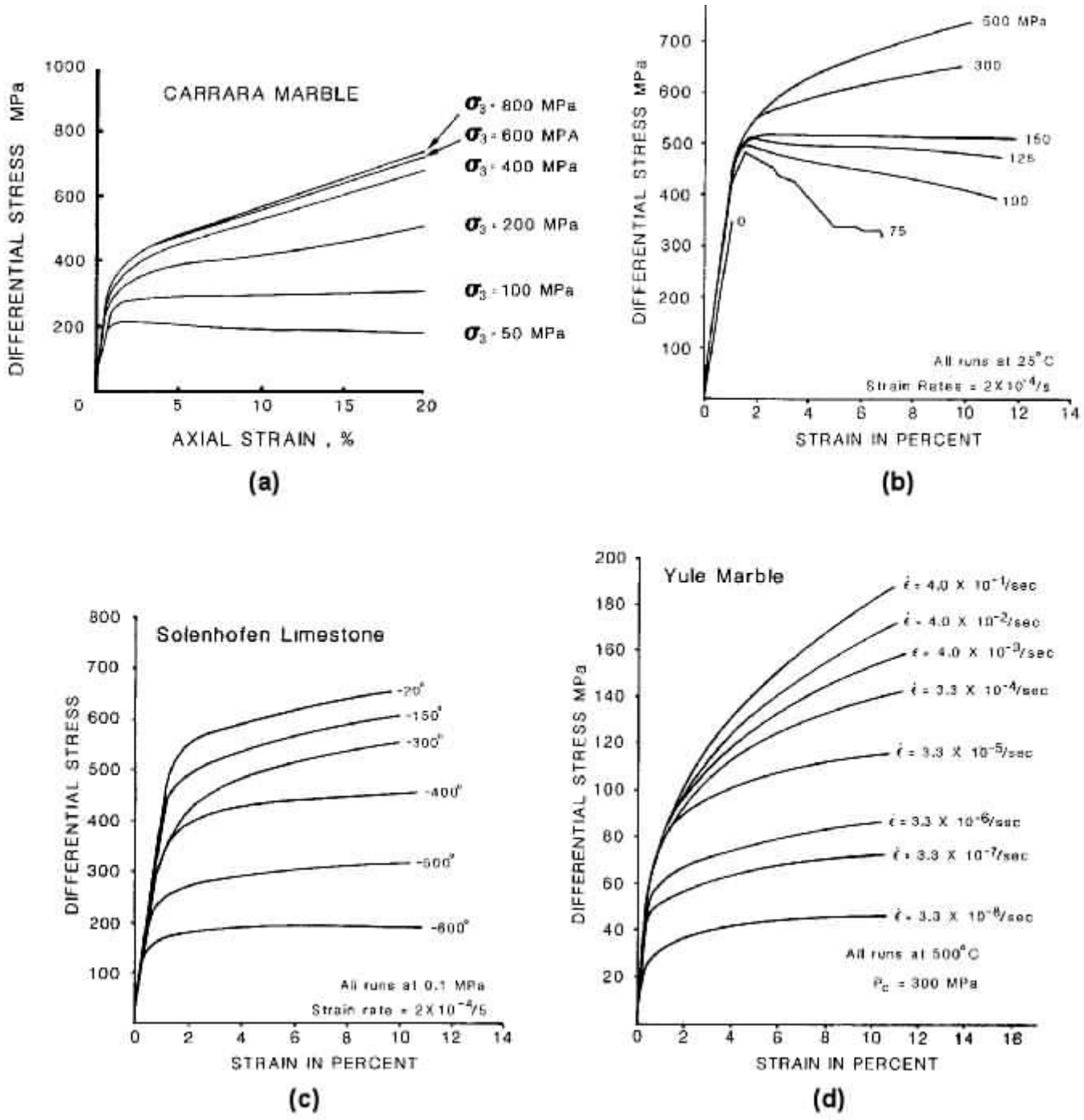



**Figure 4** Graphiques contrainte/déformation pour quatre types d'essais faisant varier des paramètres différents. (a) Essai sur le Marbre de Carrara, pression de confinement variable (T= 25°C, vitesse de déformation de $4x10^{-4}$/sec. (b) Essai sur le calcaire de Solenhofen, pression de confinement variable (T= 25°C, vitesse de déformation est de $2x10^{-4}$/sec). (c) Essai sur le calcaire de Solenhofen, T variable ($P_c$ = 300 MPa, vitesse de déformation= $2x10^{-4}$/sec. (d) Essai en traction sur le Marbre de Yule, vitesse de déformation variable (T = 500°C, $P_c$ = 300 MPa).