EXERCICES PRATIQUES DU MODULE 3

LES ESSAIS MECANIQUES ET LE COMPORTEMENT DES ROCHES

CORRIGÉ

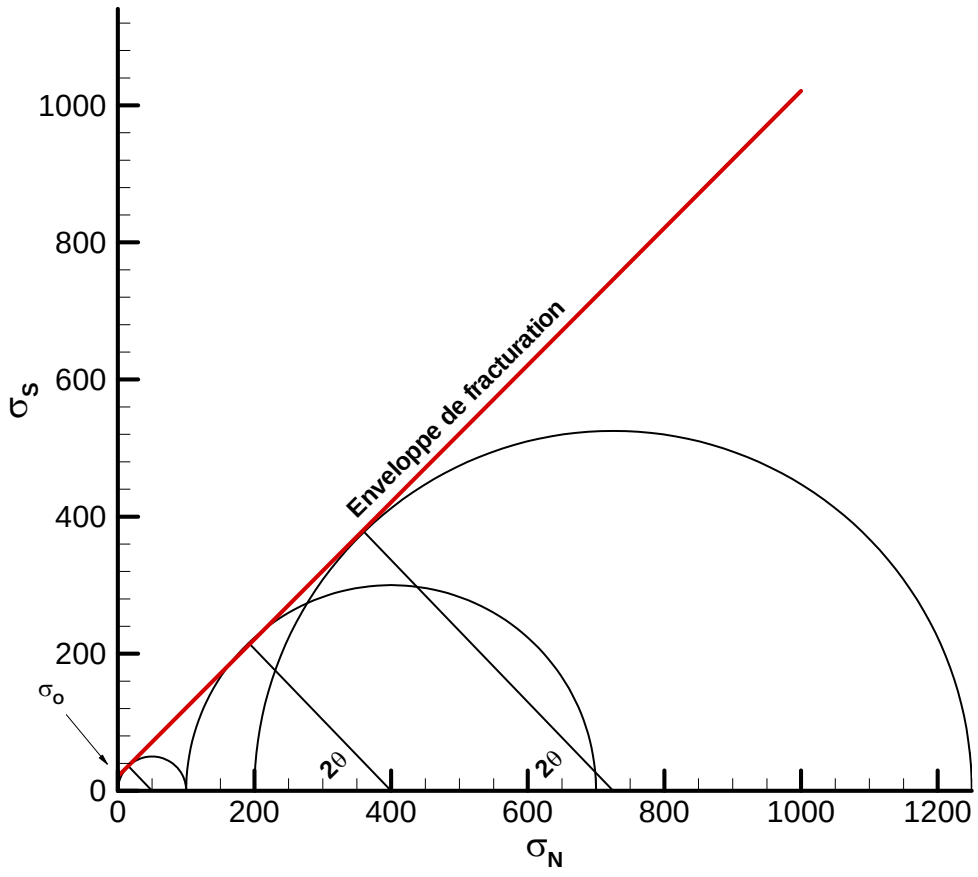
EXERCICE 1 - Déformation fragile.

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

σ_d *MPa*	σ_3 *MPa*	$\sigma_1 = \sigma_d + \sigma_3$ *MPa*	$\sigma_{moyen} = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$ *MPa*
100	0	100	50
600	100	700	400
1050	200	1250	725

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?

L'enveloppe forme une droite.



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.

Le coefficient de friction interne correspond à tan ϕ. On peut mesurer l'angle ϕ directement sur la figure et calculer la valeur tangente correspondante. On obtient un angle $\phi \cong 45°$, donc le coefficient de friction interne correspond à tan ϕ = tan 45° = 1.

Pour ce qui est de la cohésion, on peut également la déterminer graphiquement, car elle correspond à l'ordonnée à l'origine de l'enveloppe de rupture dessinée à la question précédente. La valeur de cohésion ainsi obtenue est $\sigma_C \cong 21$ MPa.

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?

Il s'agit de tracer, pour chaque cercle, une ligne dont l'origine est le centre du cercle, et dont l'orientation est perpendiculaire à l'enveloppe de rupture. Ces lignes forment des rayons tels que présentés sur la figure de la question 2. On calcul alors l'angle 2θ avec un rapporteur d'angle. L'angle θ correspond à cette valeur divisé par 2. Pour chacun des cercles, on obtient environ θ = 22-23°. Ces orientations sont conformes avec le pendage indiqué à la figure 2 (23°).

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).

Pour répondre à cette question, on doit regarder les courbes de déformation de la figure 1 à la page 10 de votre document.

Lorsque la pression de confinement augmente, la contrainte différentielle au moment de la rupture augmente également.

Il en est de même pour la rigidité. La rigidité correspond à la pente de la courbe lors de son comportement élastique. Cette pente représente le module de Young. Plus le module de Young (la pente), est élevé, plus l'échantillon est rigide. Pour une roche rigide, une contrainte différentielle plus élevée est nécessaire pour causer la même déformation que dans une roche moins rigide. Voir la figure 3.50 de Davis and Reynolds.

Plus la pression de confinement augmente, plus l'échantillon devient ductile. En effet, à de faibles pressions de confinement, on n'observe uniquement un comportement élastique. Le comportement plastique, donc la déformation ductile, n'apparait qu'à une contrainte différentielle de 200 MPa.

EXERCICE 2 - Déformation ductile-fragile.

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?

   Les courbes obtenues à des pressions de confinement effectives faibles (0, 50 et 100 MPa) ont des formes similaires. Elles exhibent un comportement élastique d'abord, suivie par une rupture, et un comportement plastique quasi-idéale pour le reste de l'essai. En effet, la contrainte différentielle reste plutôt constante lors de la déformation progressive des échantillons suite à leur rupture.

   Les courbes obtenues à des pressions de confinement effectives plus élevées (150 et 200 MPa), démontrent un comportement élastique, suivi d'un comportement plastique. Dans la courbe à P_c^* = 150 MPa, on observe un amollissement suivi d'un durcissement. Après avoir atteints la résistance ultime, ces deux échantillons subissent un amollissement.

   Le seuil d'élasticité est différent pour les échantillons soumis à des P_c^* de 0, 50 et 100 MPa ; il augmente avec la pression effective. Toutefois, le seuil d'élasticité demeure constant pour les échantillons soumis à des P_c^* de 100, 150 et 200 MPa.

   La résistance ultime est différente pour chacun des échantillons et augmente lorsque la pression de confinement effective augmente.

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?

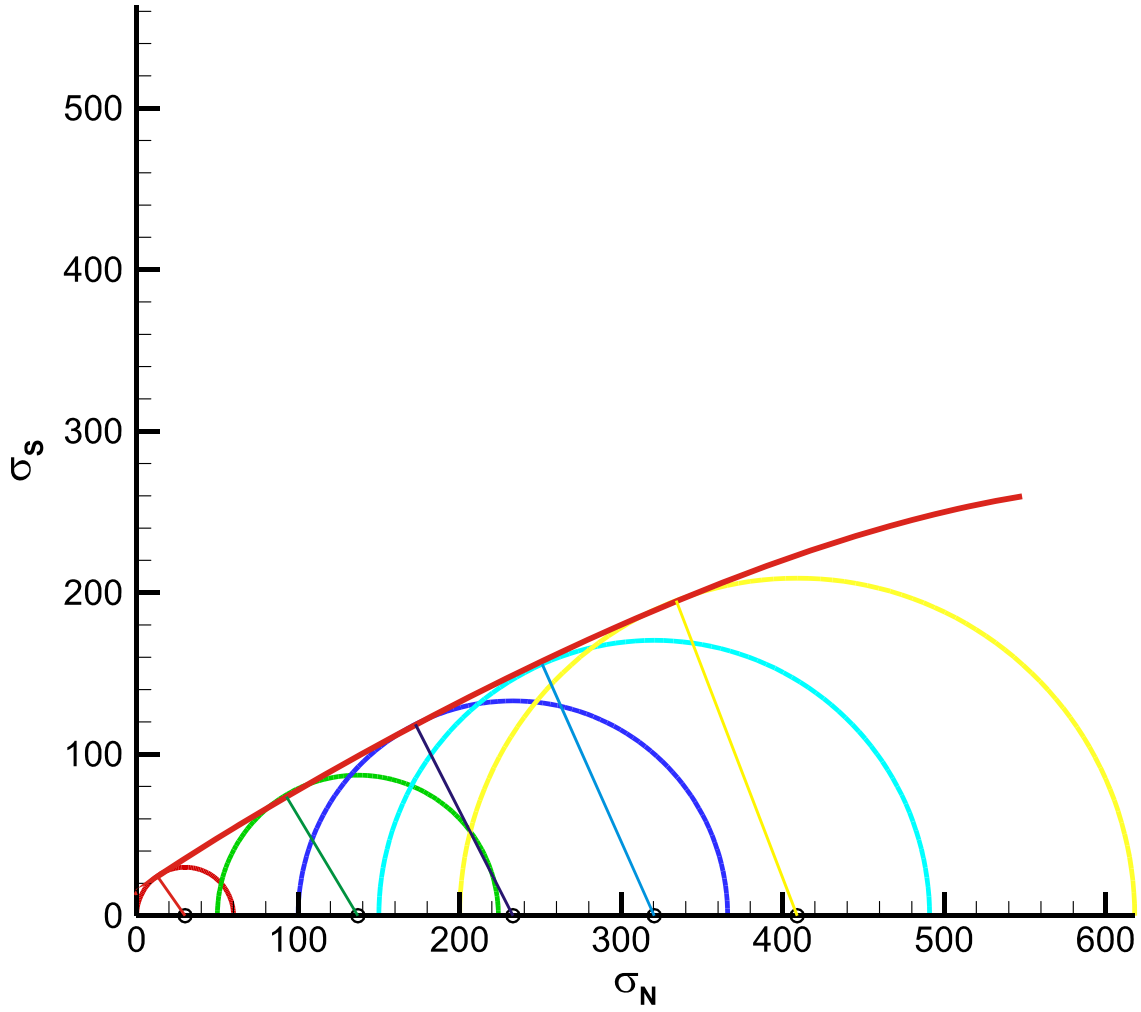
   Les échantillons soumis à des P_c^* de 0, 50 et 100 MPa subissent une déformation de moins de 5 % avant la rupture. Il s'agit donc d'une déformation principalement fragile. Dans le cas des échantillons soumis à des P_c^* de 150 et 200 MPa, il y a rupture lorsque l'échantillon a subit plus de 10% de déformation, donc la déformation est plutôt ductile. La transition ductile-fragile se situe donc à des pressions de confinement effectives situées entre les valeurs de 100 et 150 MPa.

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 σ_1 et σ_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.

   On doit d'abord calculer la pression effective σ_1^* et σ_3^*. On sait que $P_c^* = \sigma_3^* = \sigma_3 - P_f$. et que $\sigma_d = \sigma_1^* - \sigma_3^*$. Alors, on peut préparer le tableau suivant :

P_c^* (=σ_3^*)	σ_3	σ_d^*	$P_f = \sigma_3 - P_c^*$	$\sigma_1^* = \sigma_3^* + \sigma_d$
MPa	*MPa*	*MPa*	*MPa*	*MPa*
200	200	418	0	618
150	200	341	50	491
100	200	266	100	366
50	200	174	150	224
0	200	60	200	60

On peut ensuite tracer les cercles de Mohr avec les valeurs de σ_1^* et σ_3^*.



L'enveloppe de rupture (ou de Mohr) n'est plus une droite, mais une courbe. Cette enveloppe est caractéristique d'une déformation ductile plutôt que fragile.

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?

   On peut calculer l'angle 2θ directement pour chacun des cercles ave4c un rapporteur d'angle. On obtient les valeurs suivantes :

P_c^* *MPa*	2θ °	θ °
200	69	34.5
150	66	33.0
100	63	31.5
50	59	29.5
0	55	27.5

   L'angle θ entre le plan de rupture et σ_1 augmente lorsque la pression de confinement effective augmente. On ne peut toutefois pas comparer ces valeurs aux échantillons car ils ne sont pas disponibles.

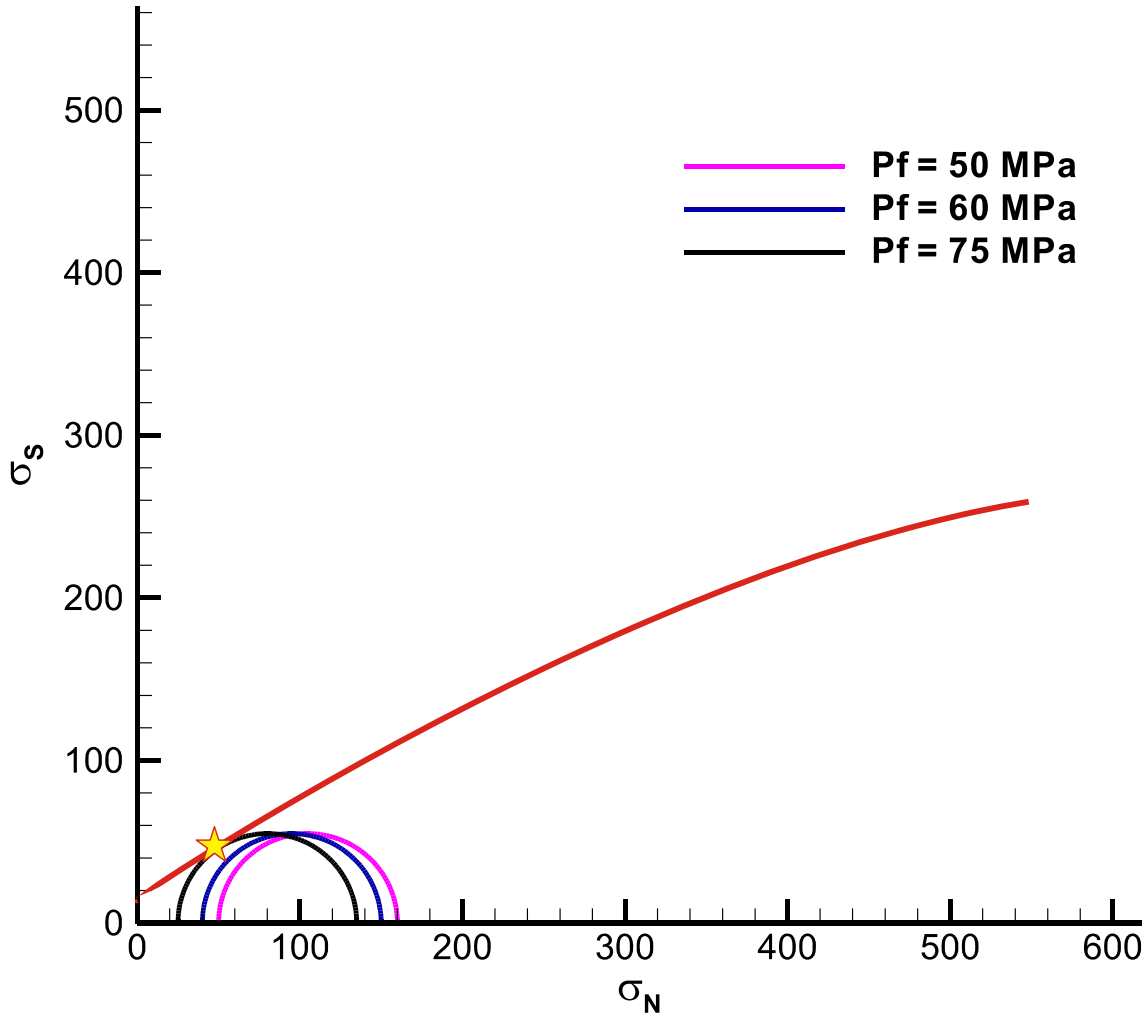
5. Un spécimen de grès de Berea est soumis à une pression de confinement de 100 MPa et une contrainte axiale de 210 MPa. D'après l'enveloppe construite à la question 2, y aura-t-il rupture du spécimen si on fixe la pression interstitielle à 50 MPa? à 60 MPa? à 75 MPa? Quel est l'effet de ces augmentations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

   On détermine d'abord les contraintes effectives auxquelles l'échantillon sera soumis :

P_f *MPa*	σ_1 *MPa*	σ_3 *MPa*	$\sigma_1^* = \sigma_1 - P_f$ *MPa*	$\sigma_3^* = \sigma_3 - P_f$ *MPa*	$\sigma_{moyen} = (\sigma_1^* + \sigma_3^*)/2$ *MPa*
50	210	100	160	50	105
60	210	100	150	40	95
75	210	100	135	25	80

   On dessine ensuite des cercles de Mohr sur le diagramme de la question 3, et on évalue la position de ces cercles par rapport à l'enveloppe de rupture. On constate alors que l'enveloppe de rupture est atteinte uniquement pour le cas où la pression des fluides est de 75 MPa.

   Lorsque la pression des fluides augmente, la contrainte différentielle demeure constante. Par contre, la contrainte moyenne devient plus faible.


Pf = 50 MPa
Pf = 60 MPa
Pf = 75 MPa
σS
σN
0
100
200
300
400
500
600

EXERCICE 3 - Déformation ductile.

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.

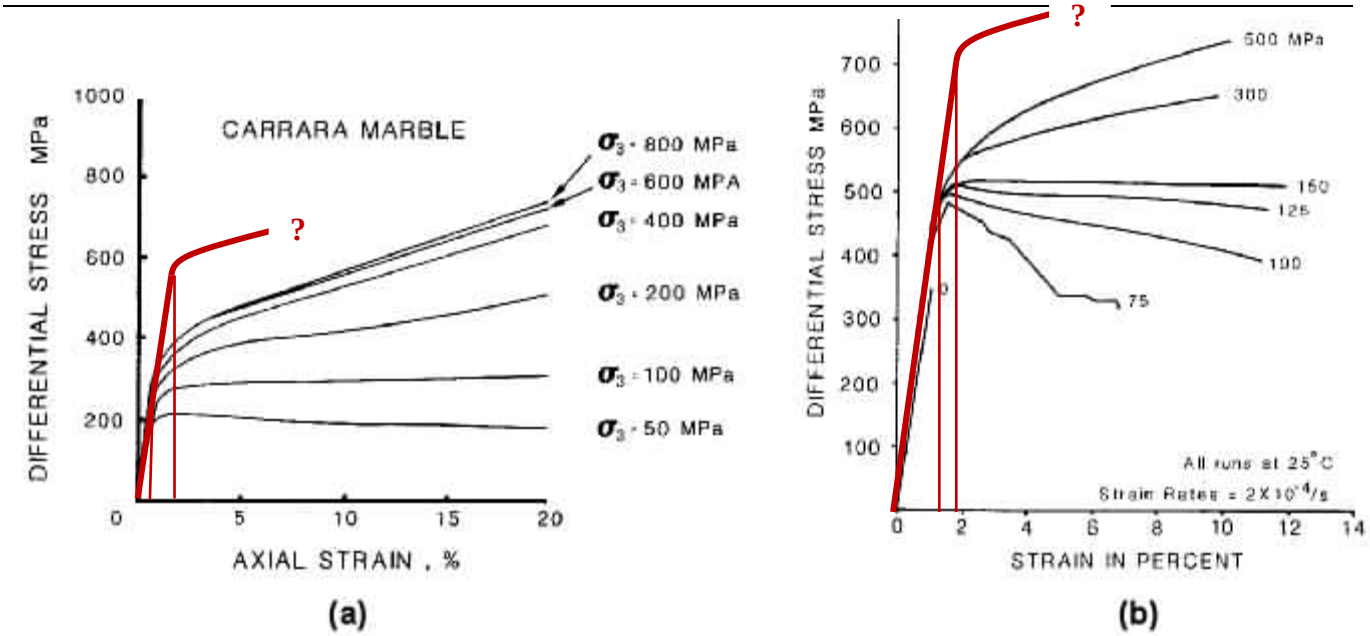
   - *Le seuil de plasticité augmente lorsque la pression de confinement augmente (figure 4a et 4b). Par contre, dans la figure 4b, le seuil de plasticité atteint un seuil pour les pressions de confinement au-delà de 150 MPa.*
   - *Le seuil de plasticité augmente lorsque la température augmente.*
   - *Le seuil de plasticité augmente lorsque la vitesse de déformation augmente.*

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.

   Sachant que le granite est moins ductile que le calcaire, le granite, lorsqu'il est soumis à la même pression de confinement que le calcaire, subit une déformation plus grande avant d'atteindre le seuil de plasticité. Par exemple, dans la figure 4a, si un granite était soumis à une pression de confinement de 200 MPa, le % de déformation au seuil de plasticité sera plus élevé que pour le calcaire. De plus, les deux matériaux ont la même pente lors de leur comportement élastique puisque ces deux matériaux ont un module de Young similaire (voir tableau 3.4 de Davis and Reynolds).

   Dans le cas de la figure 4b, on illustre le comportement du granite soumis à une contrainte de 150 MPa.

   Dans les deux cas, il est possible que le granite subisse une déformation fragile rapidement après avoir adopté le comportement plastique, ou qu'il continue de se déformer ductilement. Il n'est pas possible de le prévoir avec les informations disponibles.



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.

Sur la figure 4c, on peut identifier, sur la courbe de température = 400°C, quelle est la limite d'élasticité (ou le seuil de plasticité), soit la contrainte différentielle où un comportement plastique, et donc une déformation ductile peut être observé. Il s'agit d'une contrainte différentielle d'environ 300 MPa. On sait que la contrainte différentielle dans la croûte est donnée par : 2/3(ρgh) où ρ = 2700 kg/m^3, g est l'accélération gravitationnelle et h la profondeur en mètre. Ainsi, il est possible d'isoler la profondeur h et de déterminer sa valeur :

$h = 3\sigma_d / 2\rho g = 3 \times 300$ MPa $/ 2 \times 2700$ kg/m^3 $\times$ 9.8 m/s^2 $\cong$ 17 km.

