

La déformation des roches

Contraintes et déformation TD04

Vincent Wicker

Doctorant CRPG - UL Nancy

1. Définitions

La réponse d'une roche à une force appliquée définit la contrainte (stress) et la réorganisation géométrique qu'elle engendre au sein du corps rocheux définit la déformation (strain).

Force = action capable de modifier le mouvement ou la forme d'un corps

On distingue les forces de volume agissant sur la masse du corps (gravité,...) des forces de surface (forces de contact).

Contraintes = Forces de volumes et de contact responsables de la déformation des objets géologiques

La contrainte est le rapport d'une force sur une surface.

Etat de pression interne des roches.

1. Définitions

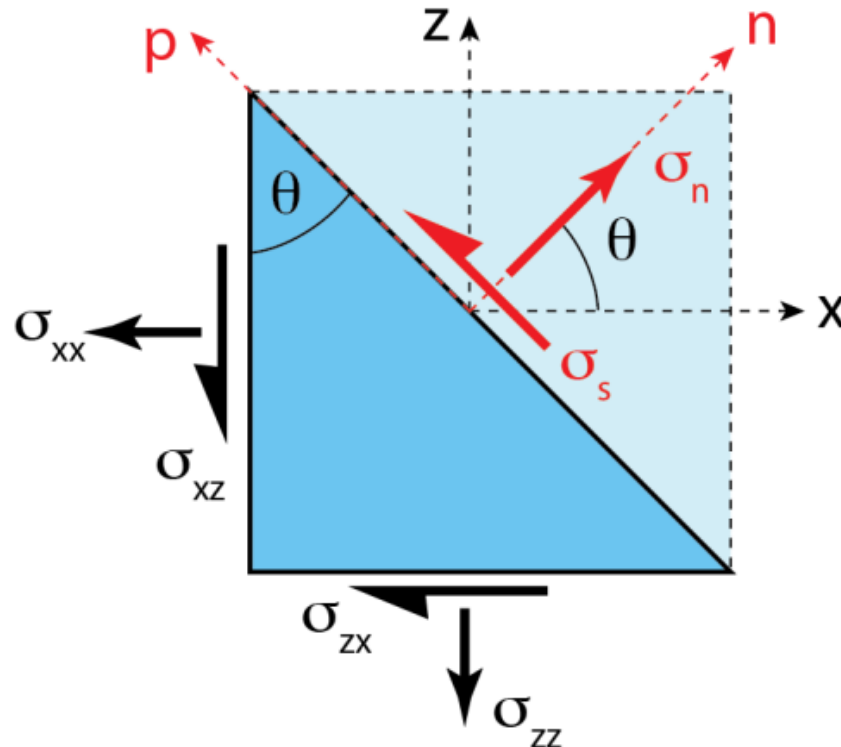
Contraintes = Forces de volumes et de contact responsables de la déformation des objets géologiques

La contrainte est le rapport d'une force sur une surface.

Etat de pression interne des roches.

Une traction qui s'exerce sur un plan se décompose en :

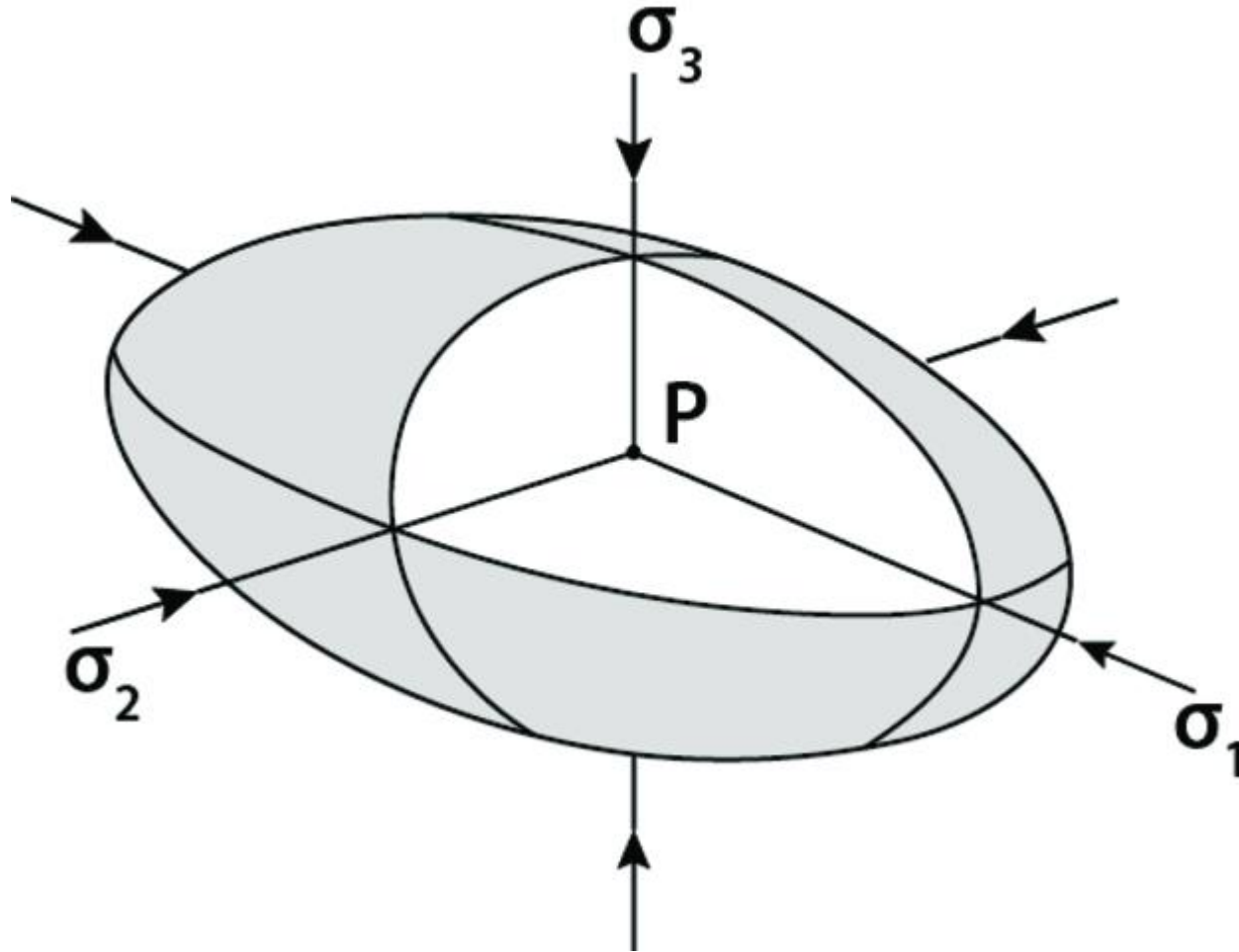
- une contrainte normale (normal stress) σ_n – perpendiculaire au plan
- une contrainte tangentielle de cisaillement σ_s – parallèle au plan



1. Définitions

Représentation des contraintes en 3D : l'ellipsoïdes des contraintes

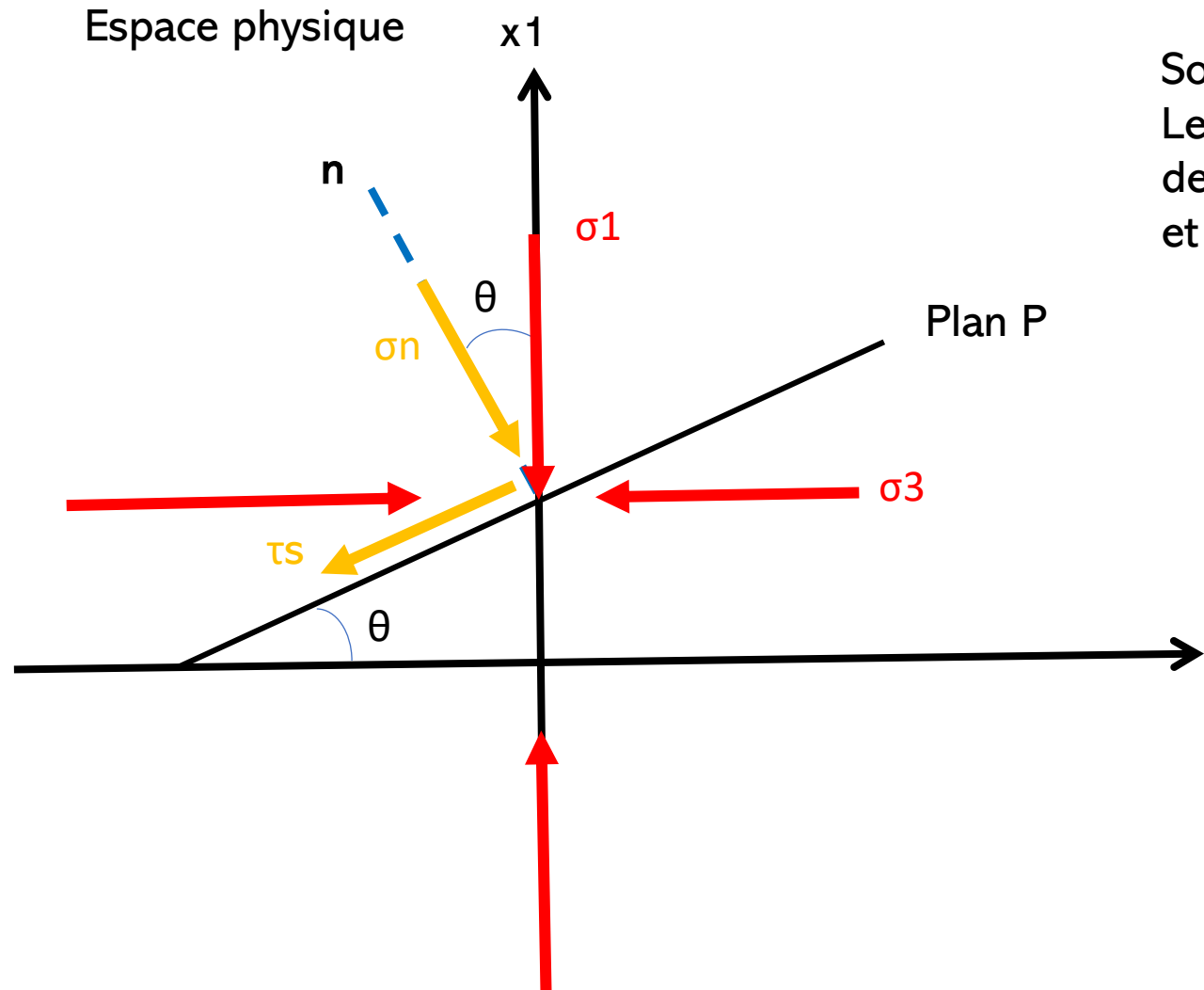
On définit alors : (a) le grand axe; (b) l'axe intermédiaire; (c) le petit axe, parallèles aux contraintes principales σ_1 , σ_2 et σ_3 avec $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$



La contrainte différentielle est la différence de contrainte maximale : $\sigma_1 - \sigma_3$

2. Contraintes et cercle de Mohr

Comment déterminer le vecteur contrainte sur un plan incliné ?



Soit un plan P de glissement de surface dS ...

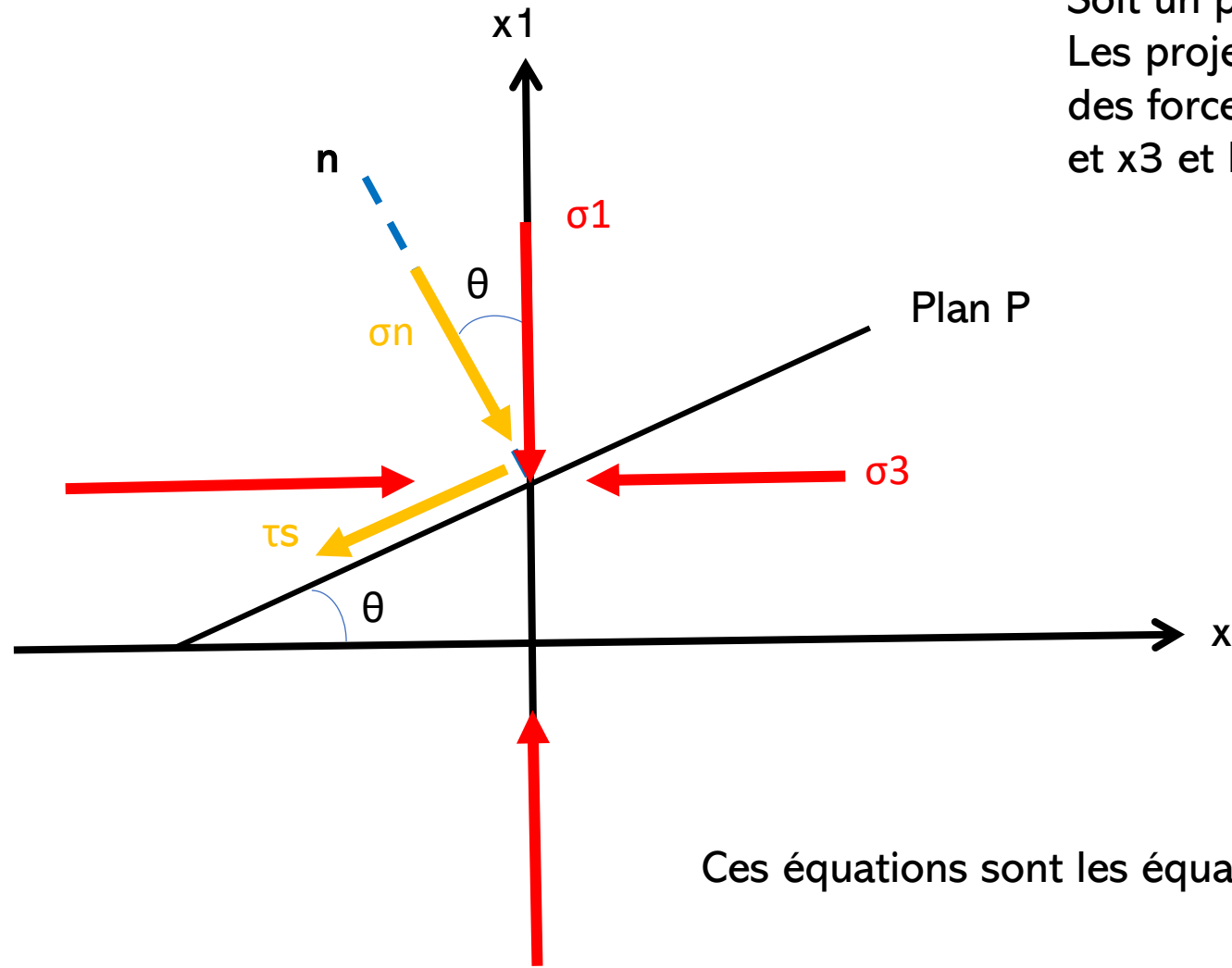
Les projections de la surface dS sur les axes x_1 et x_3 , l'analyse des forces s'exerçant sur le plan incliné dans les directions x_1 et x_3 et la résolution de ces forces permet de déterminer :

$$\sigma_n = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\theta$$

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\theta$$

2. Contraintes et cercle de Mohr

Espace physique



Soit un plan P de glissement de surface dS ...

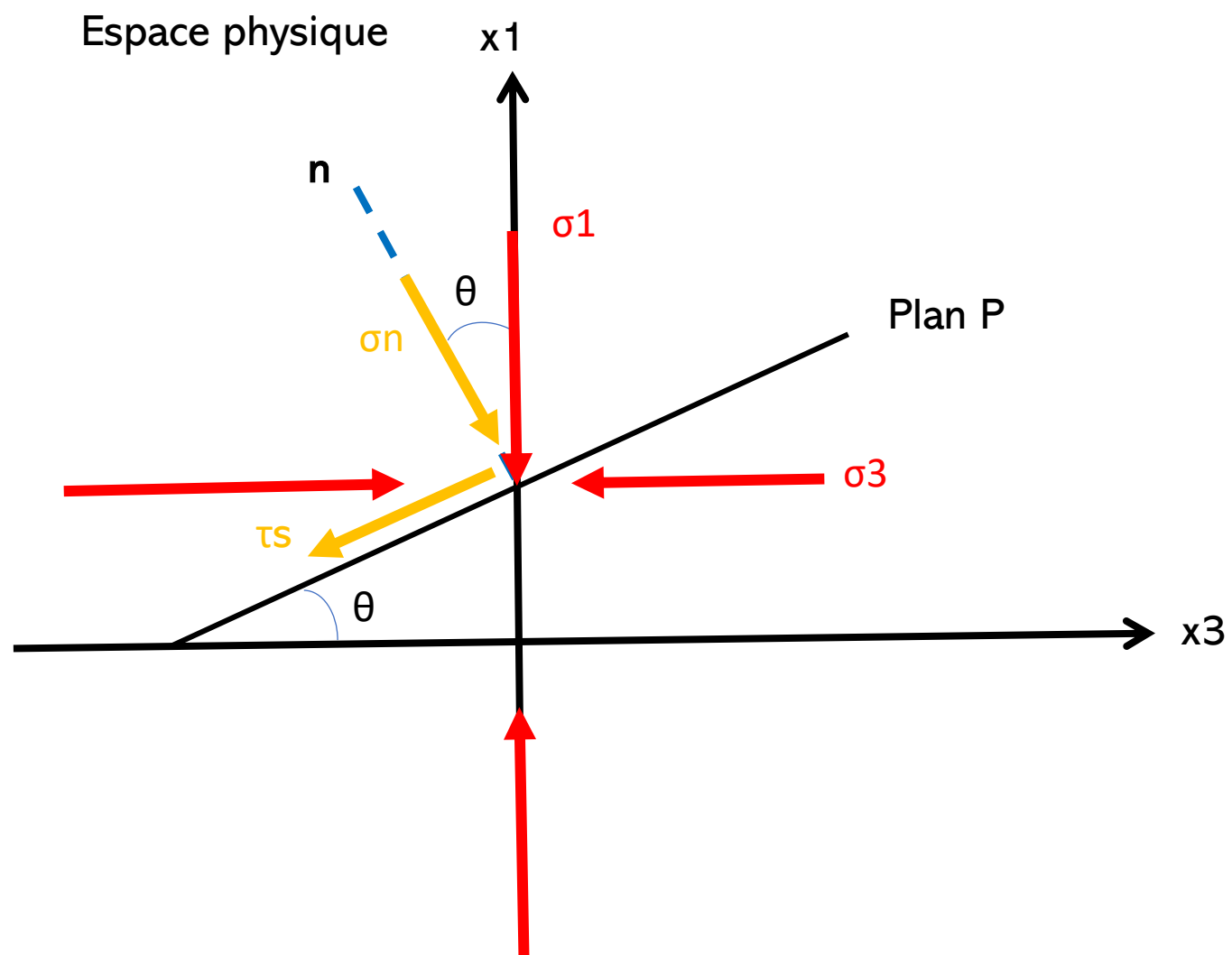
Les projections de la surface dS sur les axes x_1 et x_3 , l'analyse des forces s'exerçant sur le plan incliné dans les directions x_1 et x_3 et la résolution de ces forces permet de déterminer :

$$\sigma_n = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\theta$$

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\theta$$

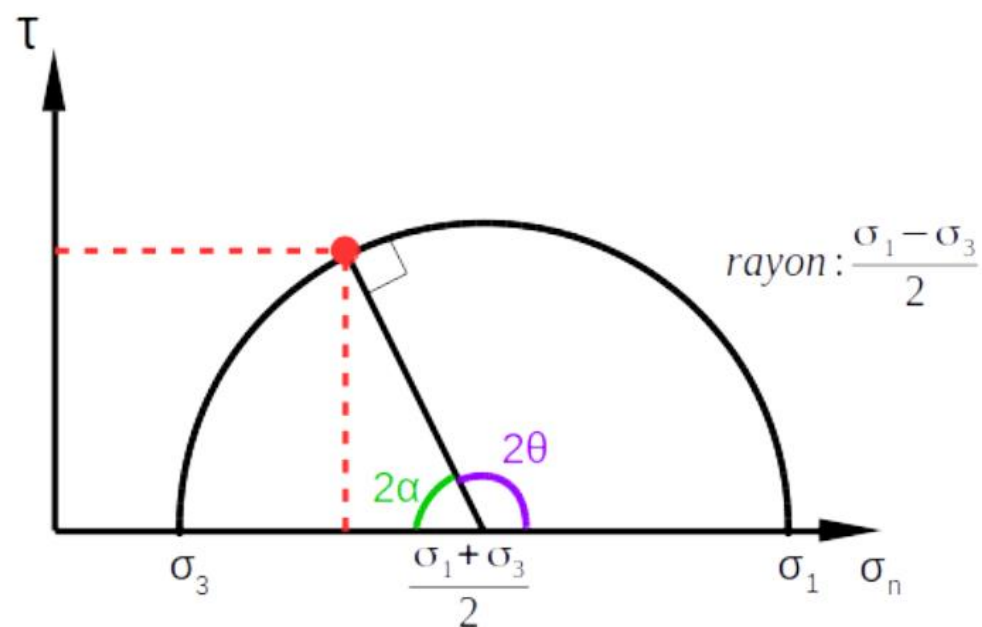
Ces équations sont les équations d'un cercle : le cercle de Mohr

2. Contraintes et cercle de Mohr

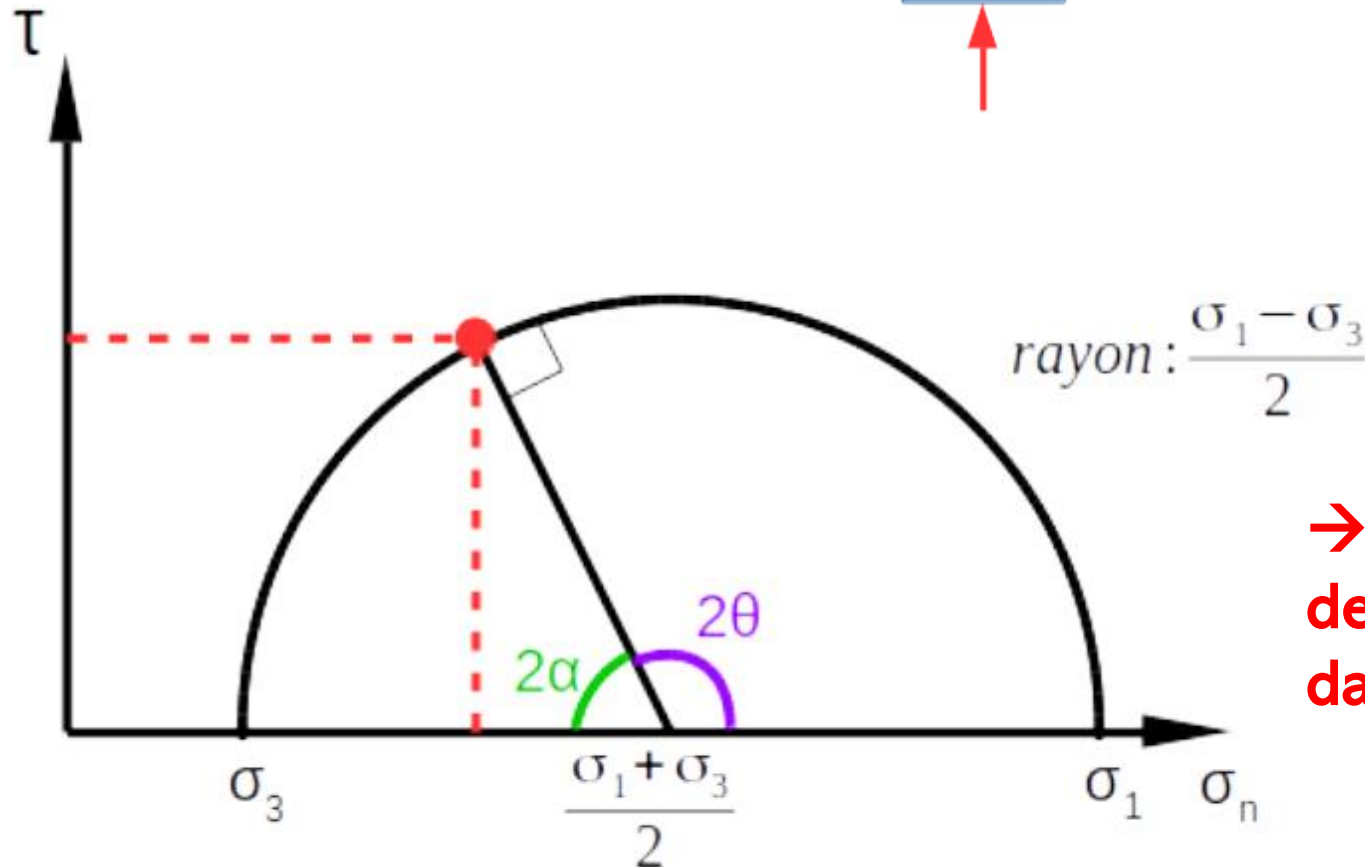
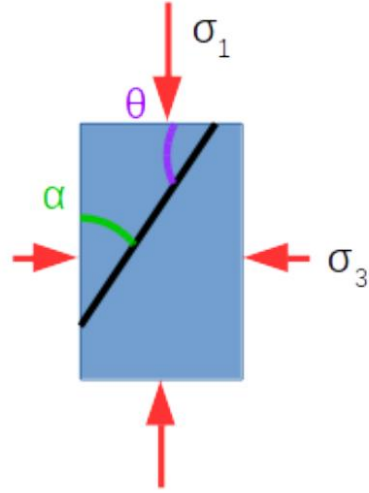


$$\sigma_n = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\theta$$

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\theta$$



2. Contraintes et cercle de Mohr

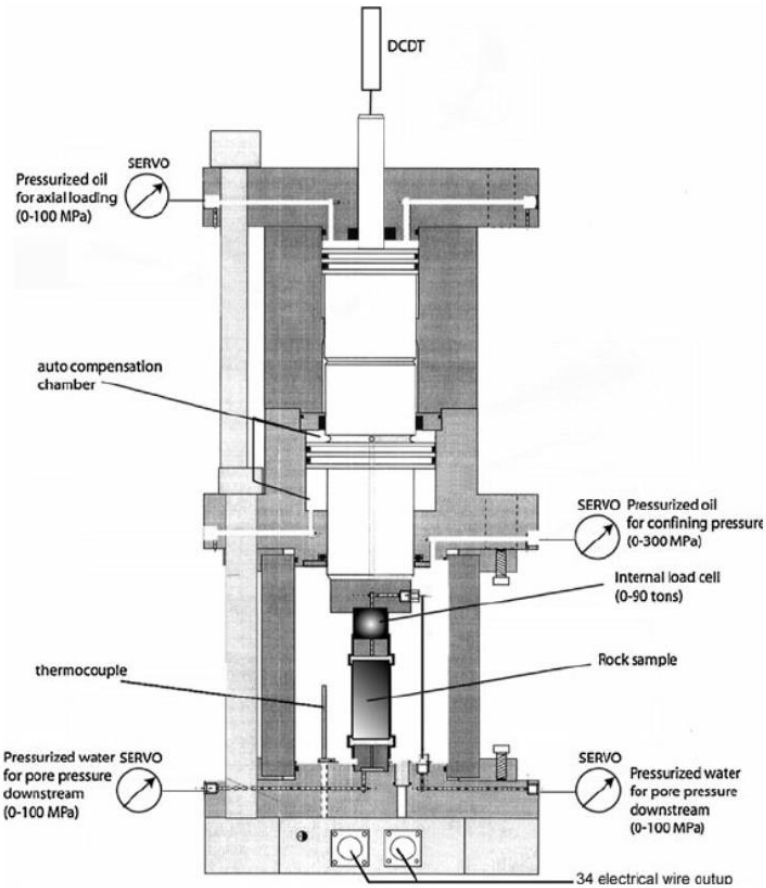


- Le rayon du cercle vaut $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$
- Le centre du cercle vaut $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$
- Connaissant les valeurs de l'angle θ et des contraintes σ_1 et σ_3 , les valeurs des contraintes σ et τ peuvent être déterminées pour tout plan dans un espace (σ, τ) .
- Les mesures dans l'espace physique sont doublées dans la construction du cercle de Mohr

→ Permet de représenter la disposition de l'état des contraintes pouvant exister dans la croûte à un moment donné !!

3. Etude expérimentale de la déformation

- Presse triaxiale de haute pression, l'échantillon est placé dans un étui d'isolement et soumis à une pression de charge et une pression de confinement
- La pression de pore est une pression fluide générée par de l'eau qui percole à travers les espaces intergranulaires



3. Etude expérimentale de la déformation

→ Variation de la pression de charge (σ_1) appliquée sur les extrémités d'un petit cylindre et variation de la pression de confinement appliquée autour du cylindre jusqu'à la rupture

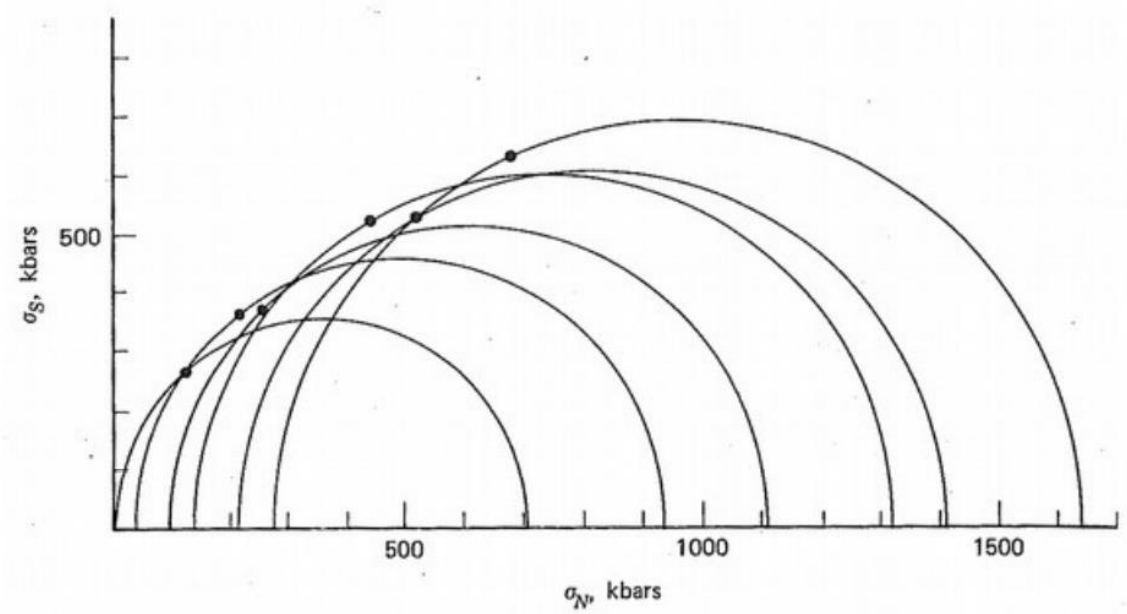
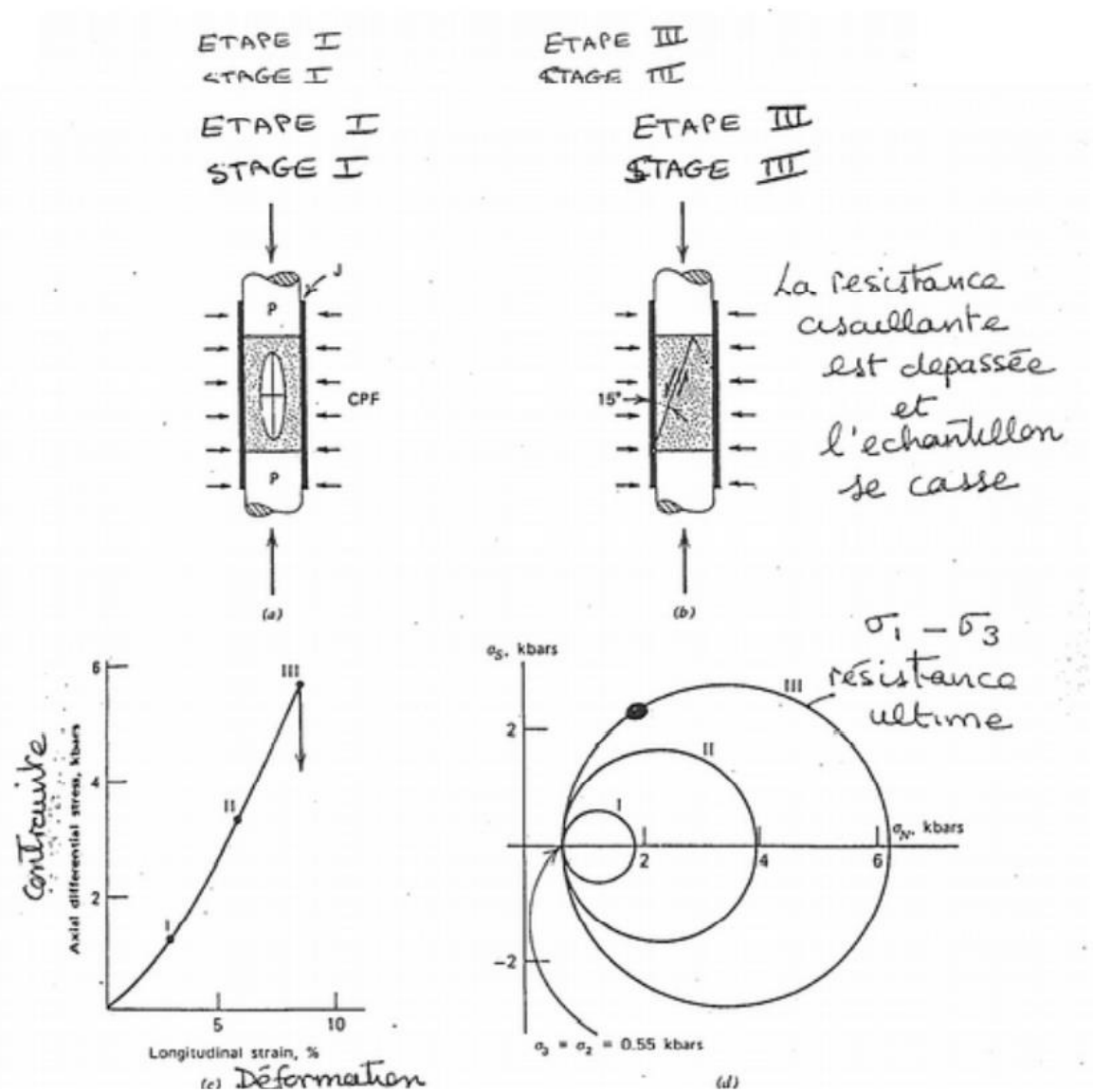


FIGURE 7.22 Mohr circles at failure for Wombeyan marble tested at six confining pressures, ranging from zero to 270 bars, room temperature. The dot on each circle corresponds to the plane on which faulting occurred. [Data from Paterson (1958).]

3. Etude expérimentale de la déformation

→ Variation de la pression de charge (σ_1) appliquée sur les extrémités d'un petit cylindre et variation de la pression de confinement appliquée autour du cylindre jusqu'à la rupture

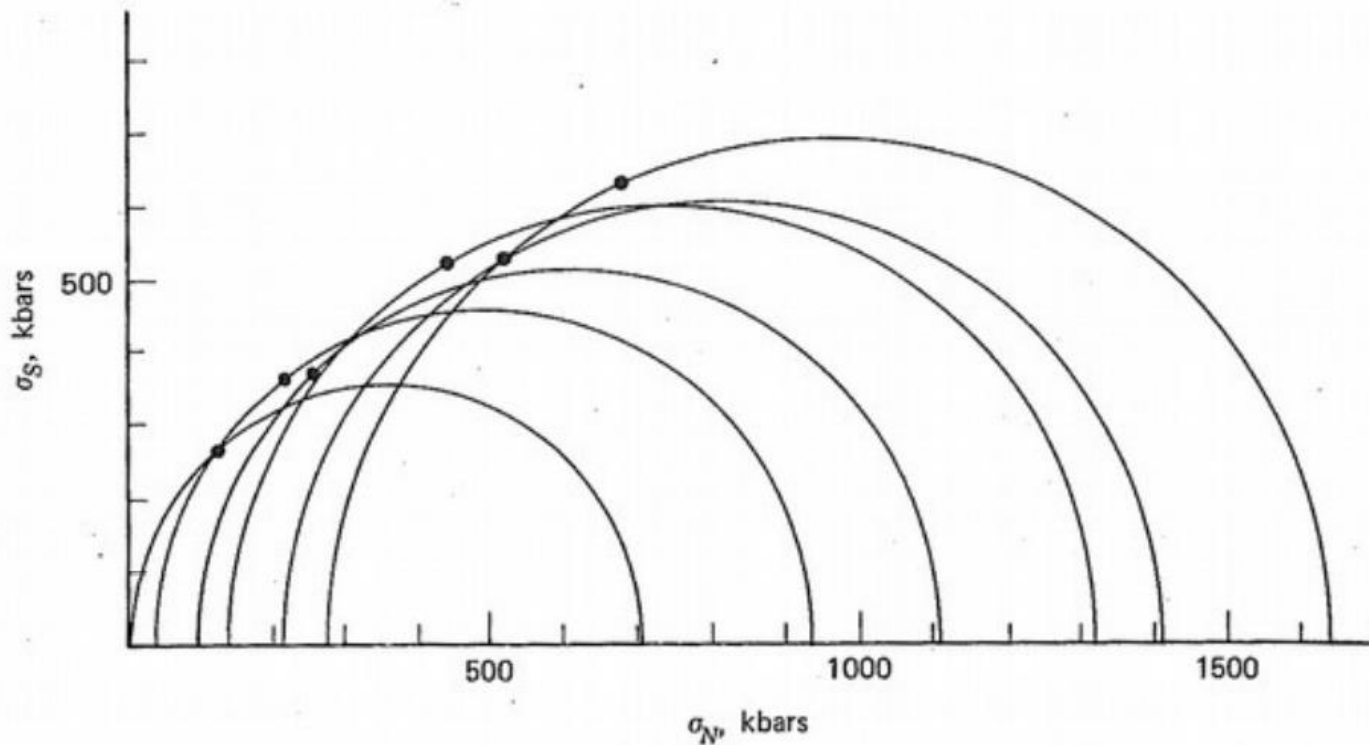
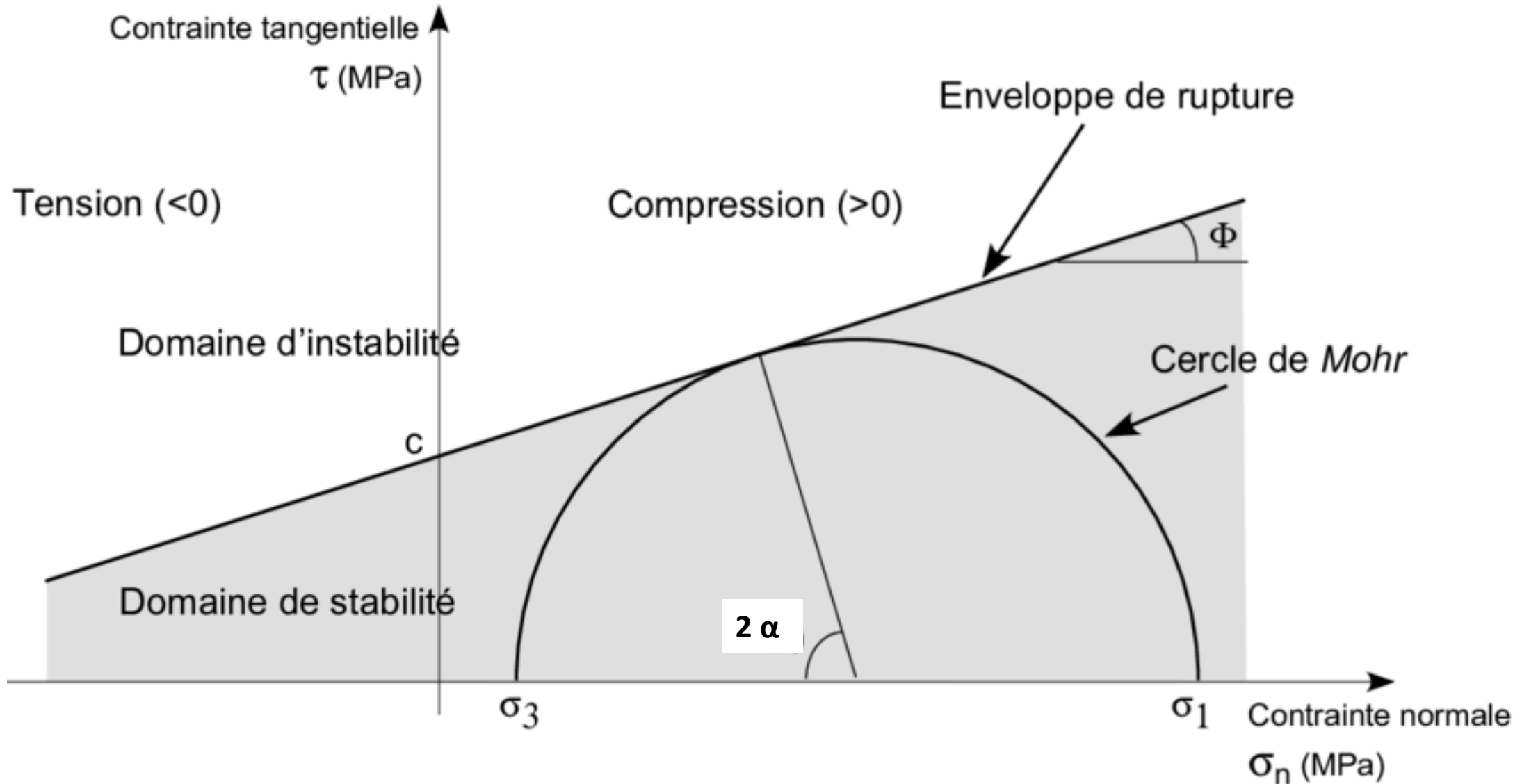


FIGURE 7.22 Mohr circles at failure for Wombeyan marble tested at six confining pressures, ranging from zero to 270 bars, room temperature. The dot on each circle corresponds to the plane on which faulting occurred. [Data from Paterson (1958).]

- En reportant les mesures sur l'axe horizontal σ_1 il est possible de construire le diagramme de Mohr de l'échantillon
- Couple (σ_3 , σ_1) à la rupture/cassure de l'échantillon
- On obtient ainsi un ensemble de cercle à la rupture
- L'enveloppe de rupture est tangente à l'ensemble des cercles

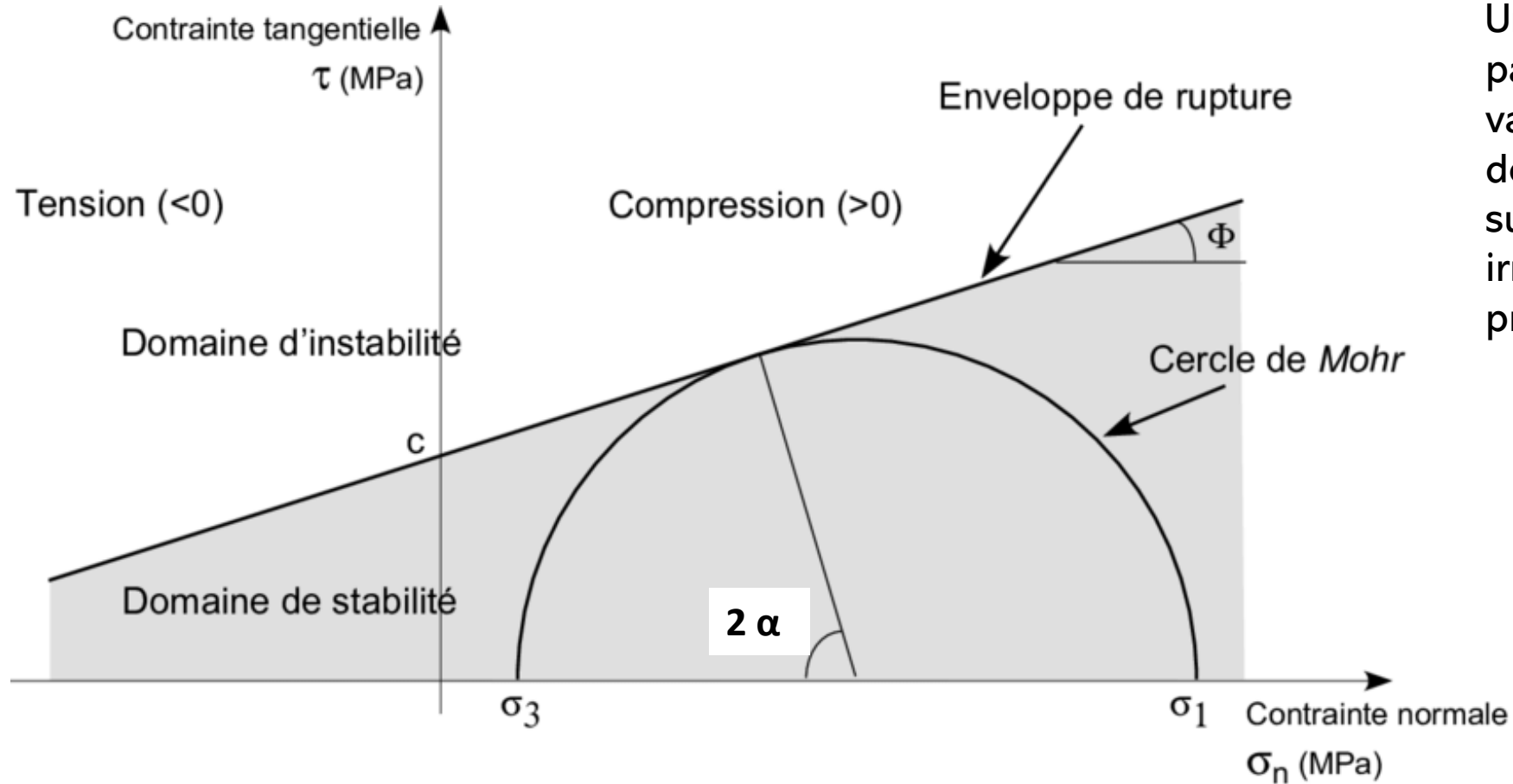
4. Le Cercle de Mohr – l'enveloppe de la rupture

→ L'enveloppe de rupture détermine deux secteurs, une région non déformée et une région déformée



4. Le Cercle de Mohr – l'enveloppe de la rupture

→ L'enveloppe de rupture détermine deux secteurs, une région non déformée et une région déformée



Un cercle de Mohr qui ne croise pas l'enveloppe → pour les valeurs de sigma 1 et sigma 3 données → l'échantillon ne subit pas de déformation irréversible, la rupture ne se produit pas

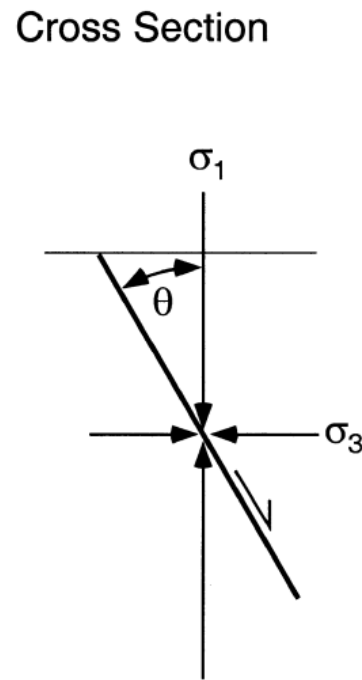
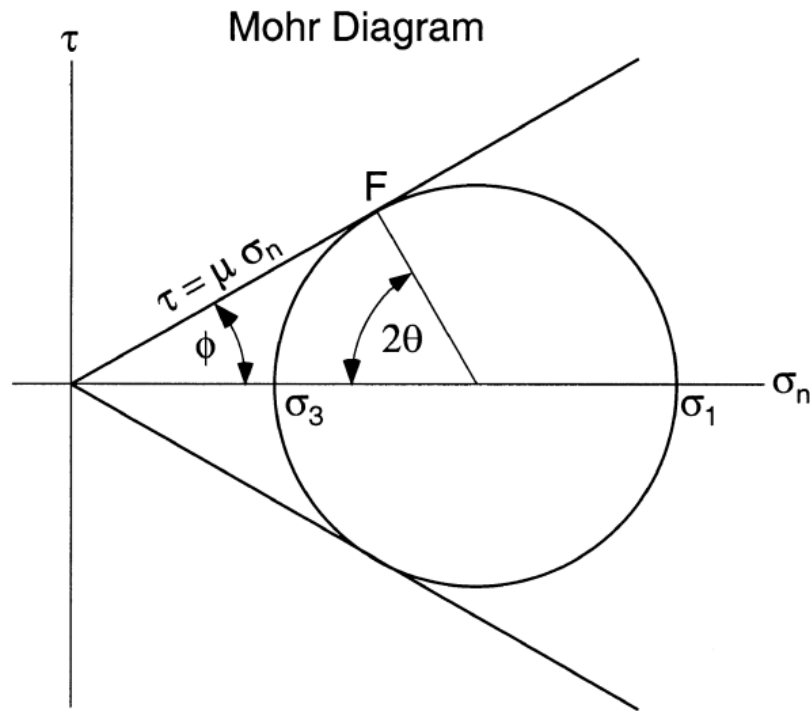
5. Le Cercle de Mohr – Le critère de rupture de Mohr-Coulomb

Fondements de la résistance des matériaux (1773), Charles Augustin de Coulomb

Question : Quand commence la rupture ?

La rupture commence lorsque la contrainte cisillante sur un plan atteint une valeur critique

Cette valeur critique correspond à la résistance du matériau, résistance au cisaillement τ_s



$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\theta$$

La résistance au cisaillement τ_s est maximale quand
????

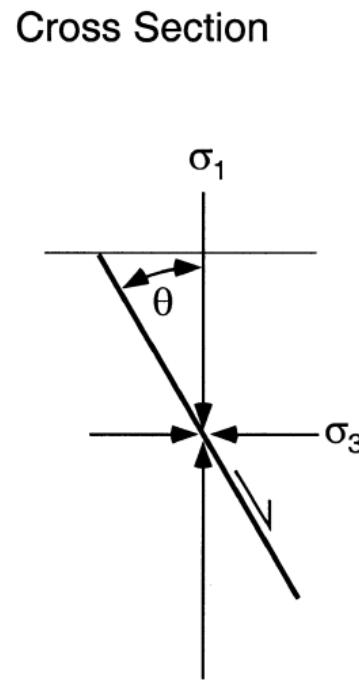
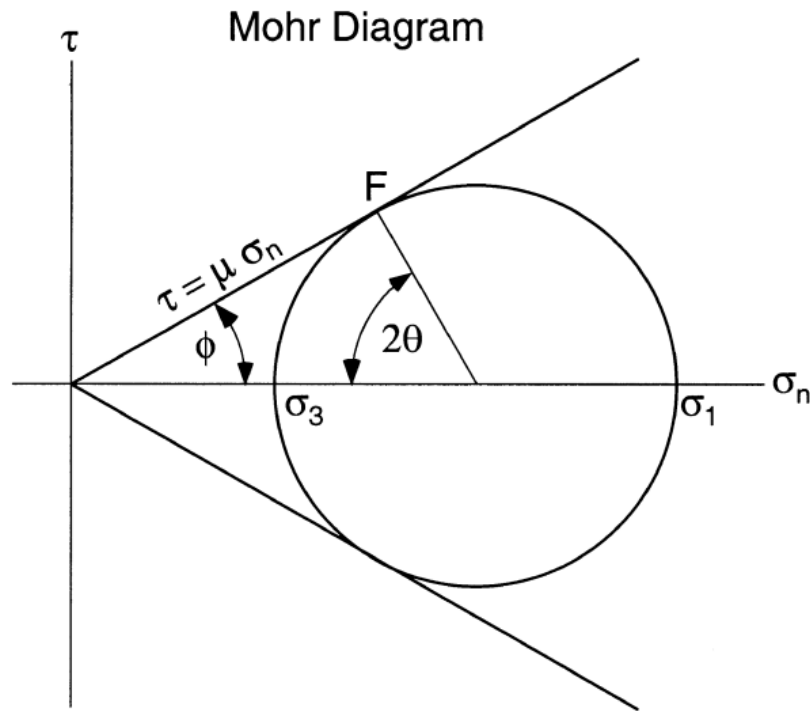
5. Le Cercle de Mohr – Le critère de rupture de Mohr-Coulomb

Fondements de la résistance des matériaux (1773), Charles Augustin de Coulomb

Question : Quand commence la rupture ?

La rupture commence lorsque la contrainte cisailante sur un plan atteint une valeur critique

Cette valeur critique correspond à la résistance du matériau, résistance au cisaillement τ_s



$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\theta$$

La résistance au cisaillement τ_s est maximale quand
????

Quand $\theta = 45^\circ$!!

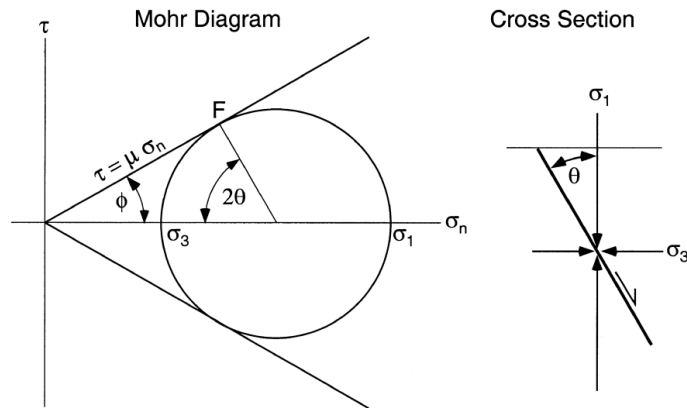
5. Le Cercle de Mohr – Le critère de rupture de Mohr-Coulomb

Fondements de la résistance des matériaux (1773), Charles Augustin de Coulomb

Question : Quand commence la rupture ?

La rupture commence lorsque la contrainte cisailante sur un plan atteint une valeur critique

Cette valeur critique correspond à la résistance du matériau, résistance au cisaillement τ_s



$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\theta$$

La résistance au cisaillement τ_s est maximale quand ????

Quand $\theta = 45^\circ$!!

Or, les résultats expérimentaux montrent que c'est pour un angle de $\theta=30^\circ$ que la contrainte cisailante est maximale!

→ En 1883, Navier émet donc l'hypothèse que la contrainte σ_n , normale au plan de cisaillement s'oppose au glissement et accroît la résistance au cisaillement. Une friction interne intervient. Navier introduit le coefficient de friction interne μ_i

5. Le Cercle de Mohr – Le critère de rupture de Mohr-Coulomb

Fondements de la résistance des matériaux (1773), Charles Augustin de Coulomb

Question : Quand commence la rupture ?

La rupture commence lorsque la contrainte cisailante sur un plan atteint une valeur critique

Cette valeur critique correspond à la résistance du matériau, résistance au cisaillement τ_s

Or, les résultats expérimentaux montrent que c'est pour un angle de $\theta=30^\circ$ que la contrainte cisailante est maximale!

→ En 1883, Navier émet donc l'hypothèse que la contrainte σ_n , normale au plan de cisaillement s'oppose au glissement et accroît la résistance au cisaillement. Une friction interne intervient. Navier introduit le coefficient de friction interne μ_i

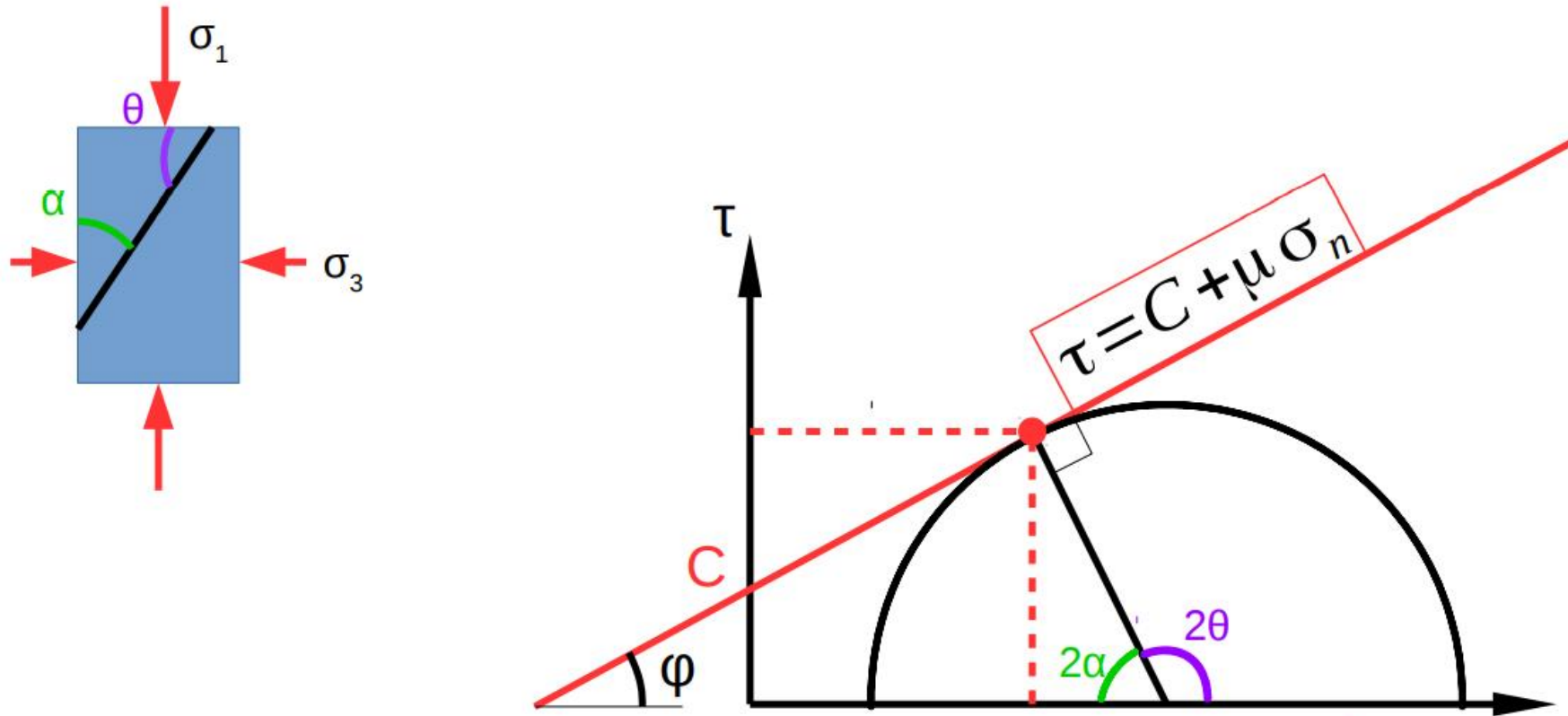
→ La résistance au cisaillement est donc la somme de la résistance intrinsèque au cisaillement C et du coefficient de friction interne μ_i multiplié par la contrainte normale

Il en découle la relation de Coulomb-Navier :

$$\tau_s = C + \mu \sigma_n$$

avec $\mu = \tan(\phi)$; ϕ étant l'angle de friction interne et μ le coefficient de friction interne

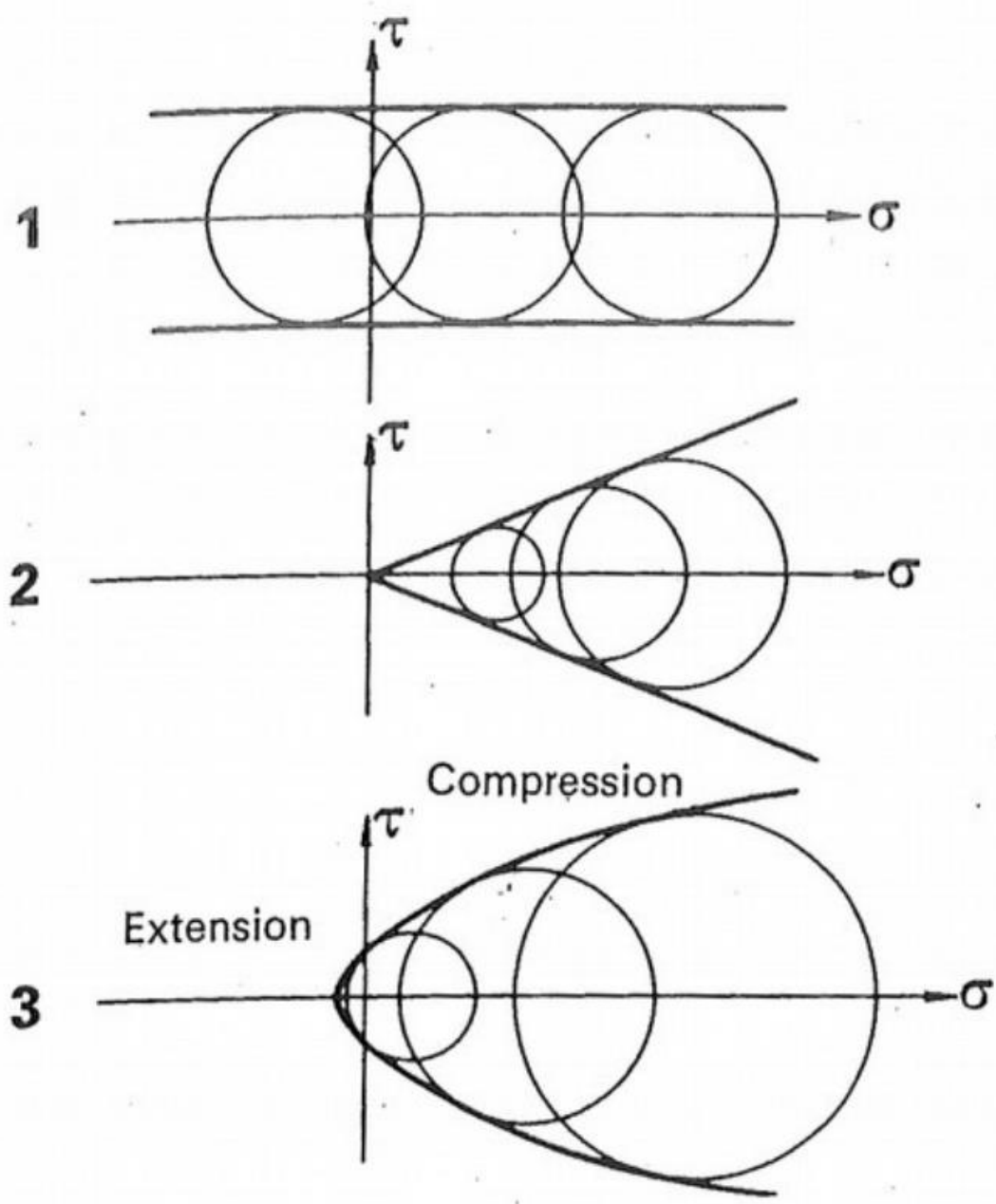
6. Le Cercle de Mohr – Relation entre les angles



Prédiction de l'angle de fracture α

remarque : $2\alpha + \phi = 90^\circ$

6. Coefficient de friction interne et angle de friction interne

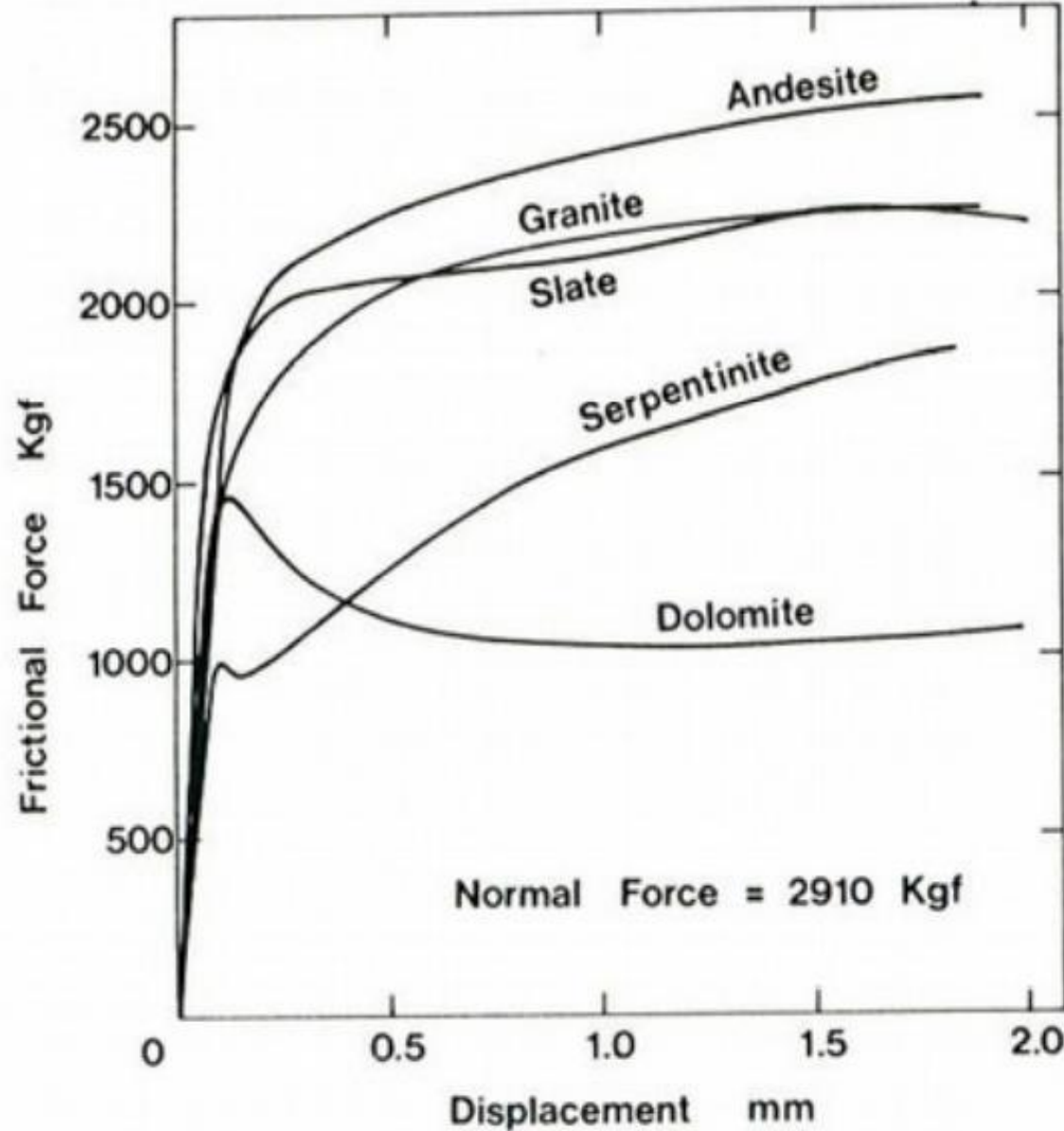


Argile

Sable

Roche standard ...

6. Coefficient de friction interne et angle de friction interne



μ dépend de la roche étudiée

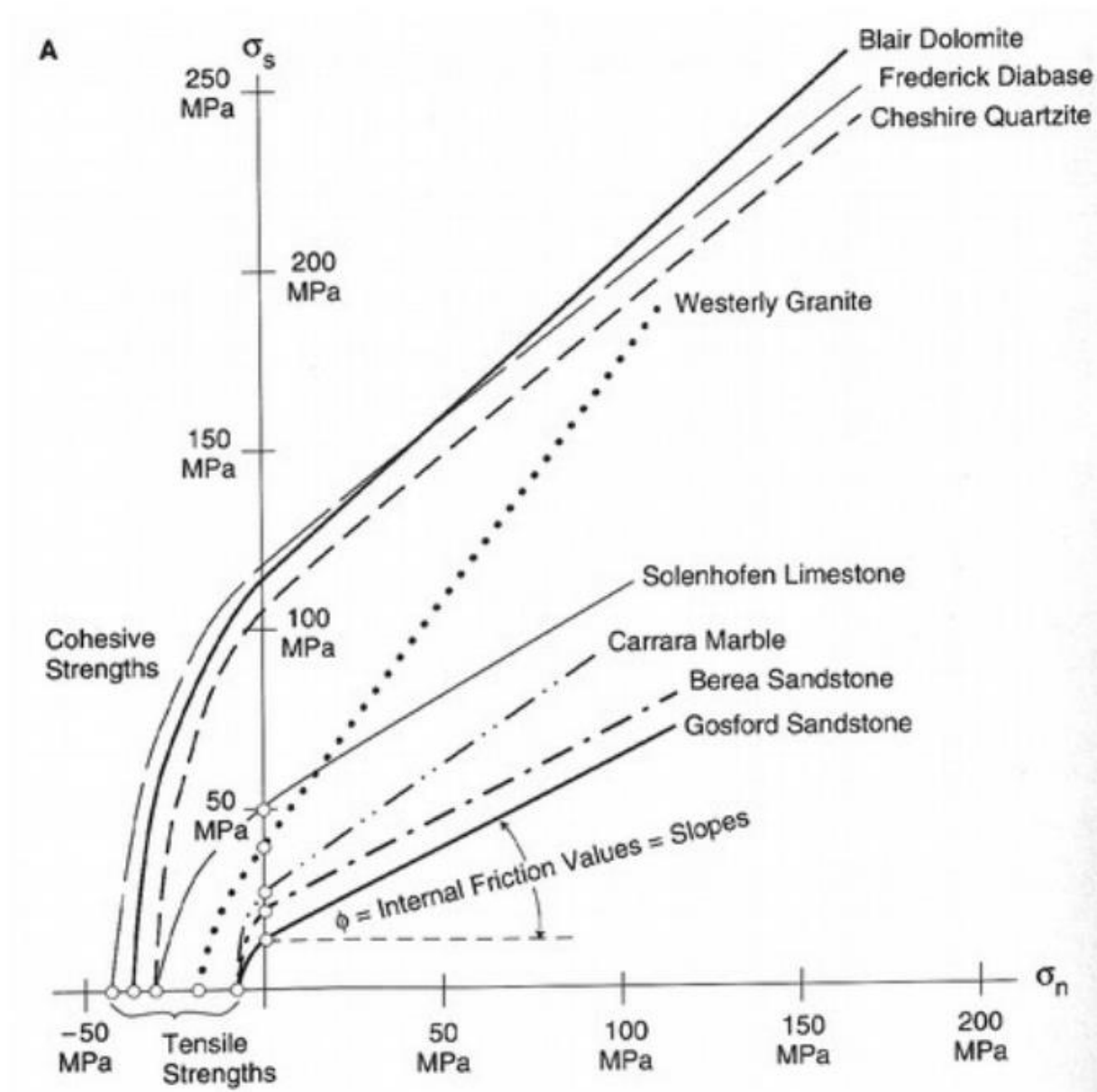
Loi d'Amonton :

$$F = \mu \times F_n$$

F_n force normale

F Frictional force

6. Coefficient de friction interne et angle de friction interne



6. Coefficient de friction interne et angle de friction interne

Et les angles de rupture et de friction dépendent de la nature du matériau ...
Diffraction de la fracturation

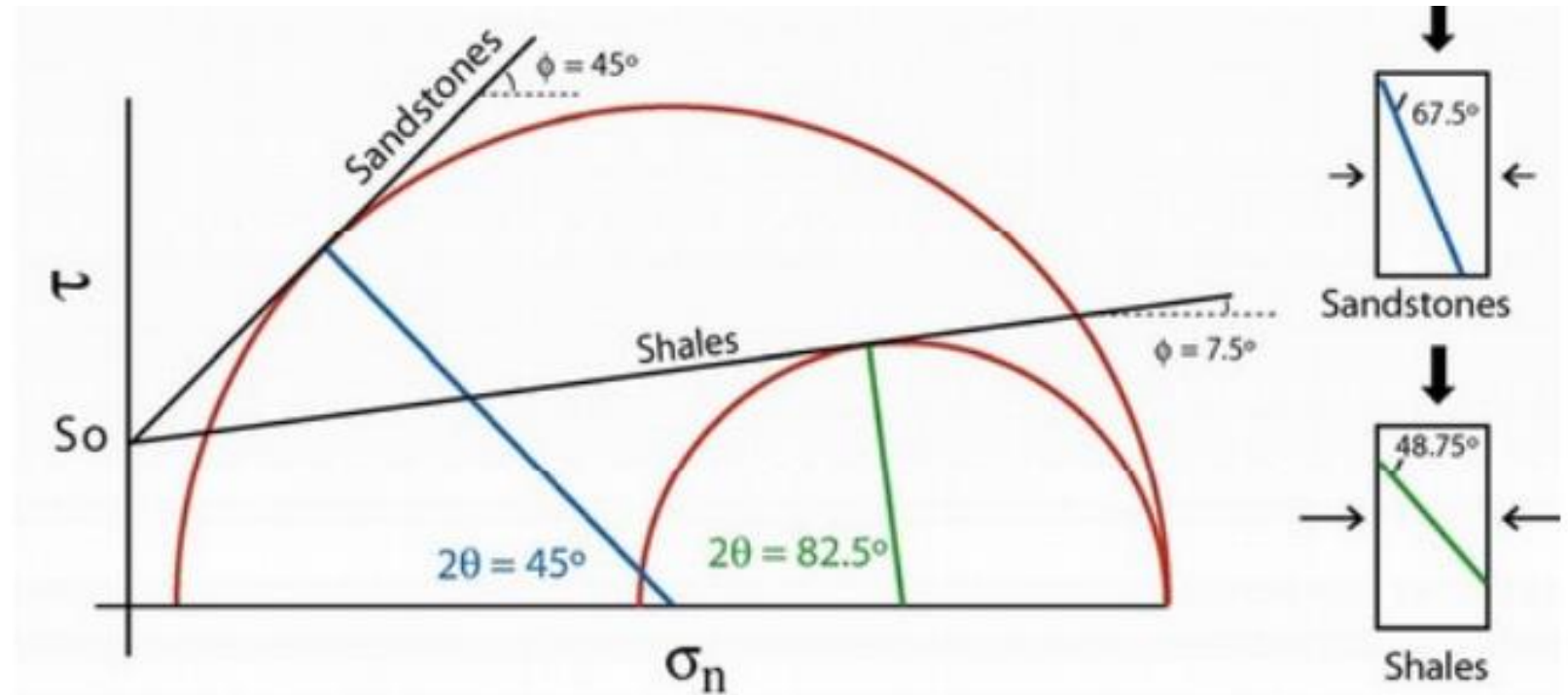


6. Coefficient de friction interne et angle de friction interne

Angle de rupture et friction

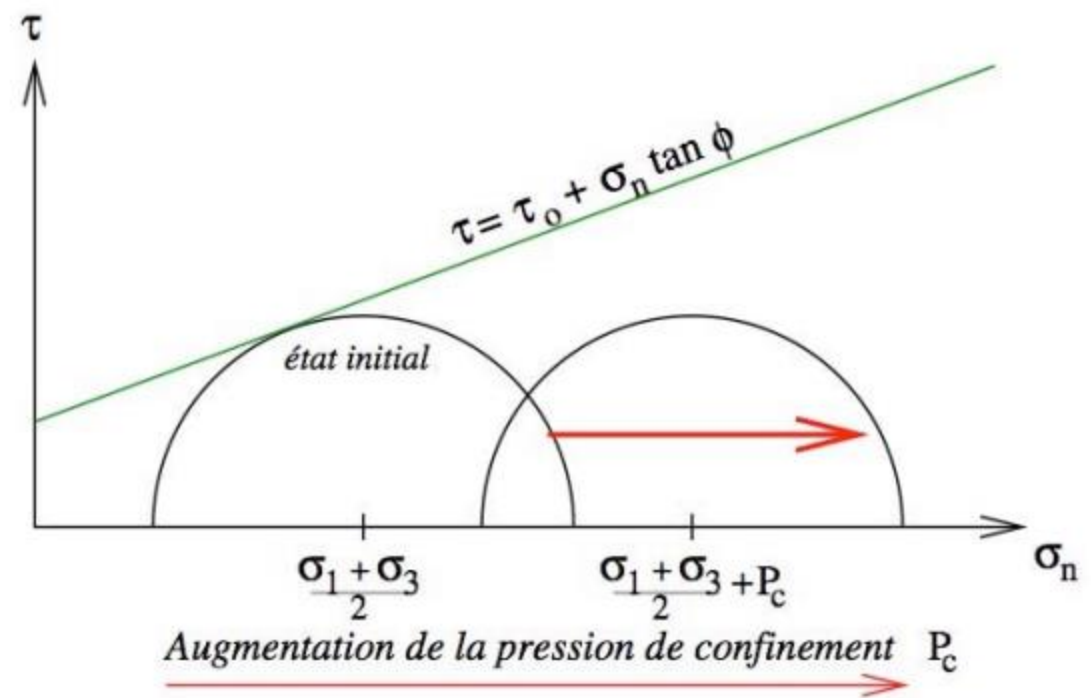
Sandstones: $\phi = 25 - 45^\circ$, $S_o = 3.29$ E6 à 1.59 E8 Pa,

Shales: $\phi = 7.5 - 56^\circ$, $S_o = 5.98$ E6 à 2.31 E8 Pa.

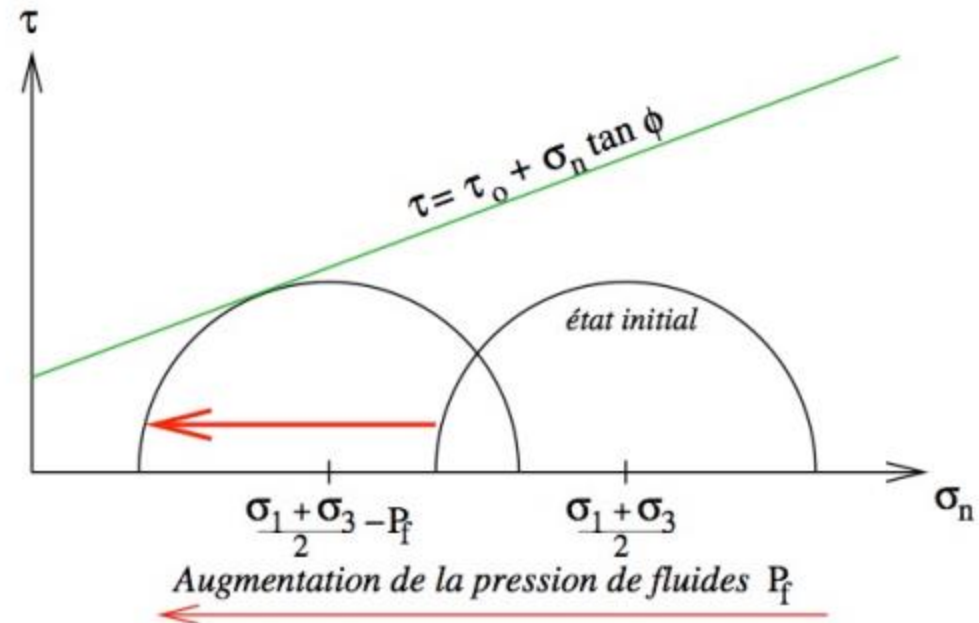


7. Rôle des fluides

L'augmentation de la **pression de confinement** éloigne des conditions de rupture.
= enfouissement

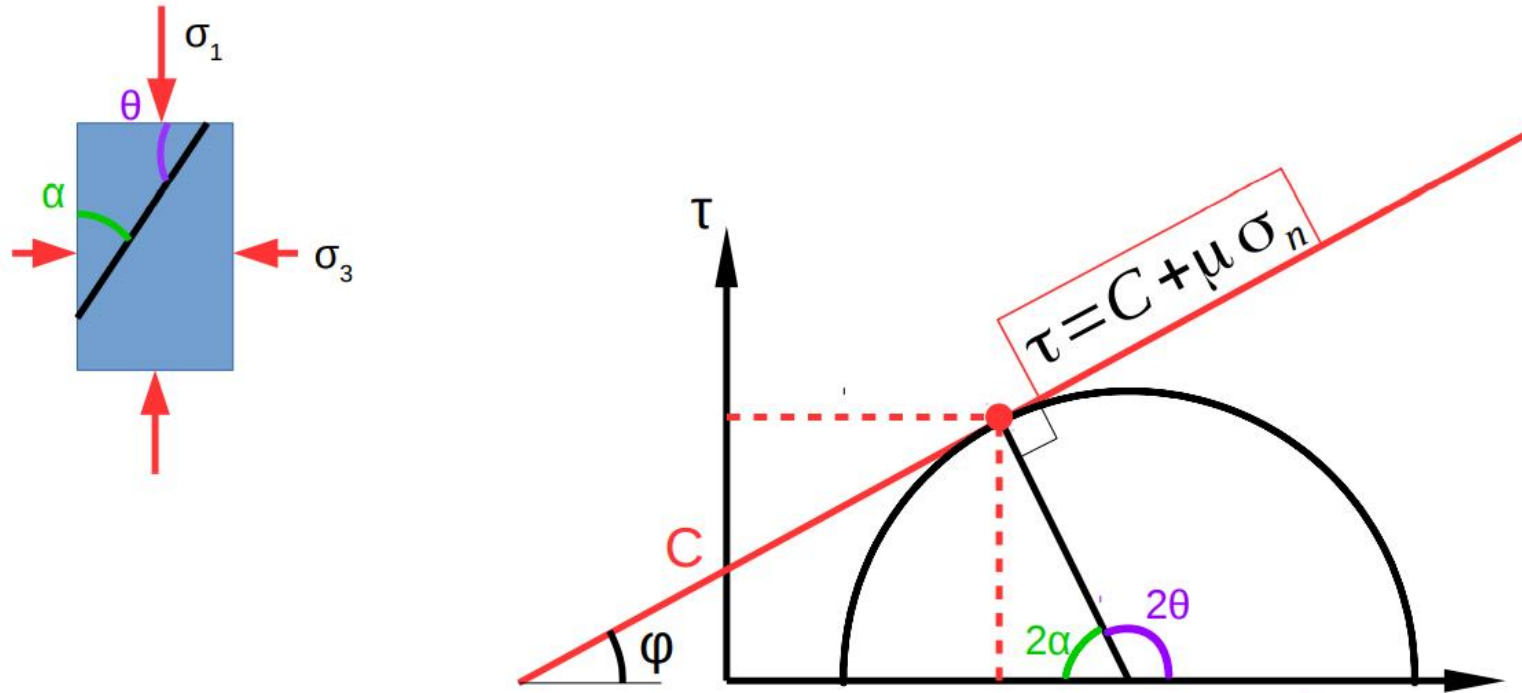


L'augmentation de la **pression de fluides** rapproche des conditions de rupture
= fracturation hydraulique



8. Implications pour la nature des failles

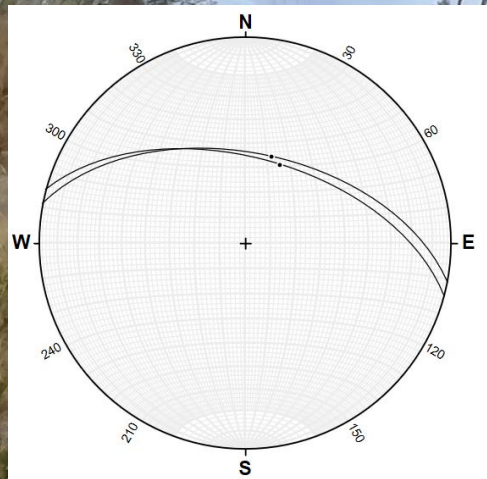
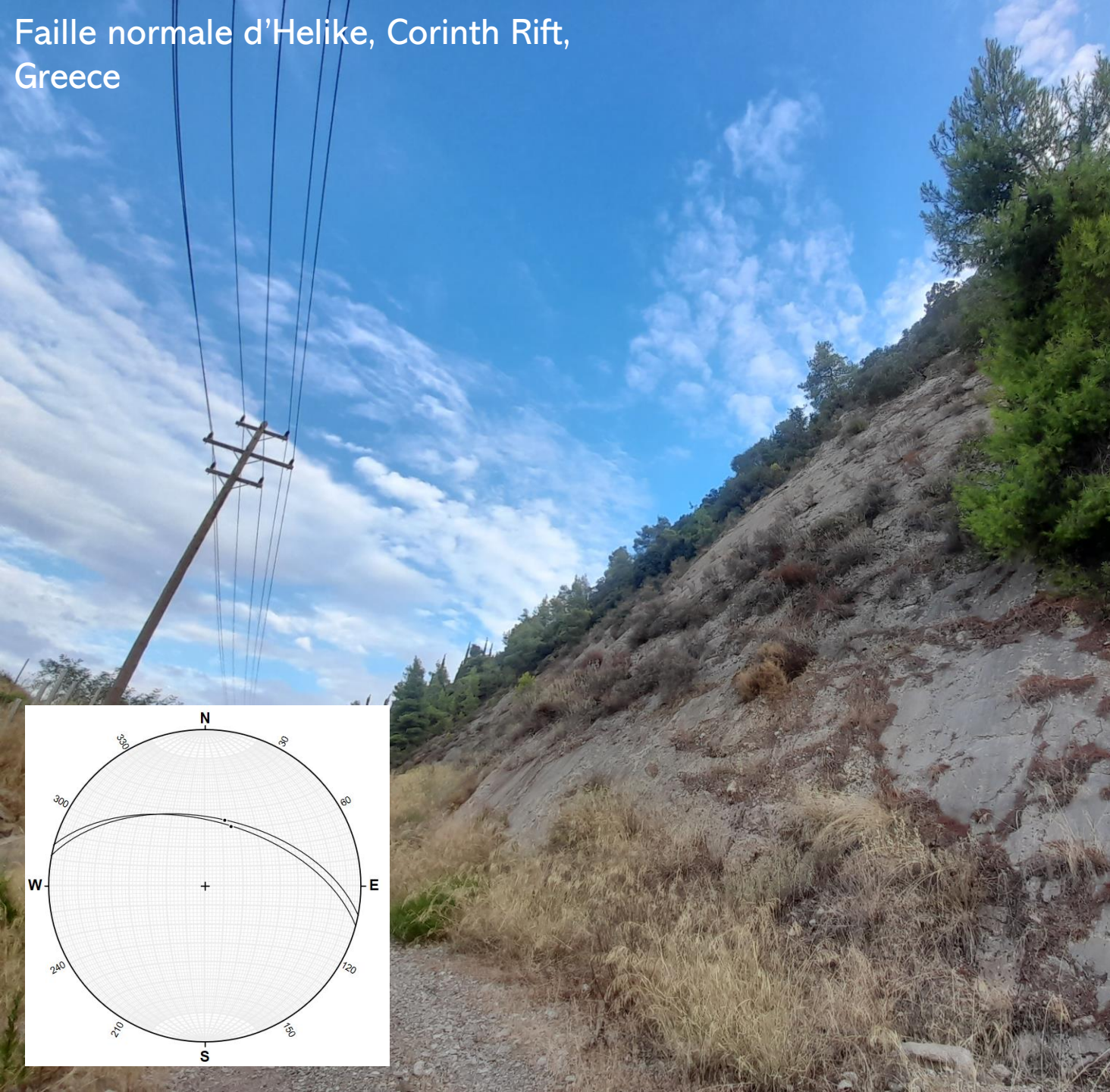
A quel angle se développent les failles inverses et les failles normale dans la croûte cassante ?



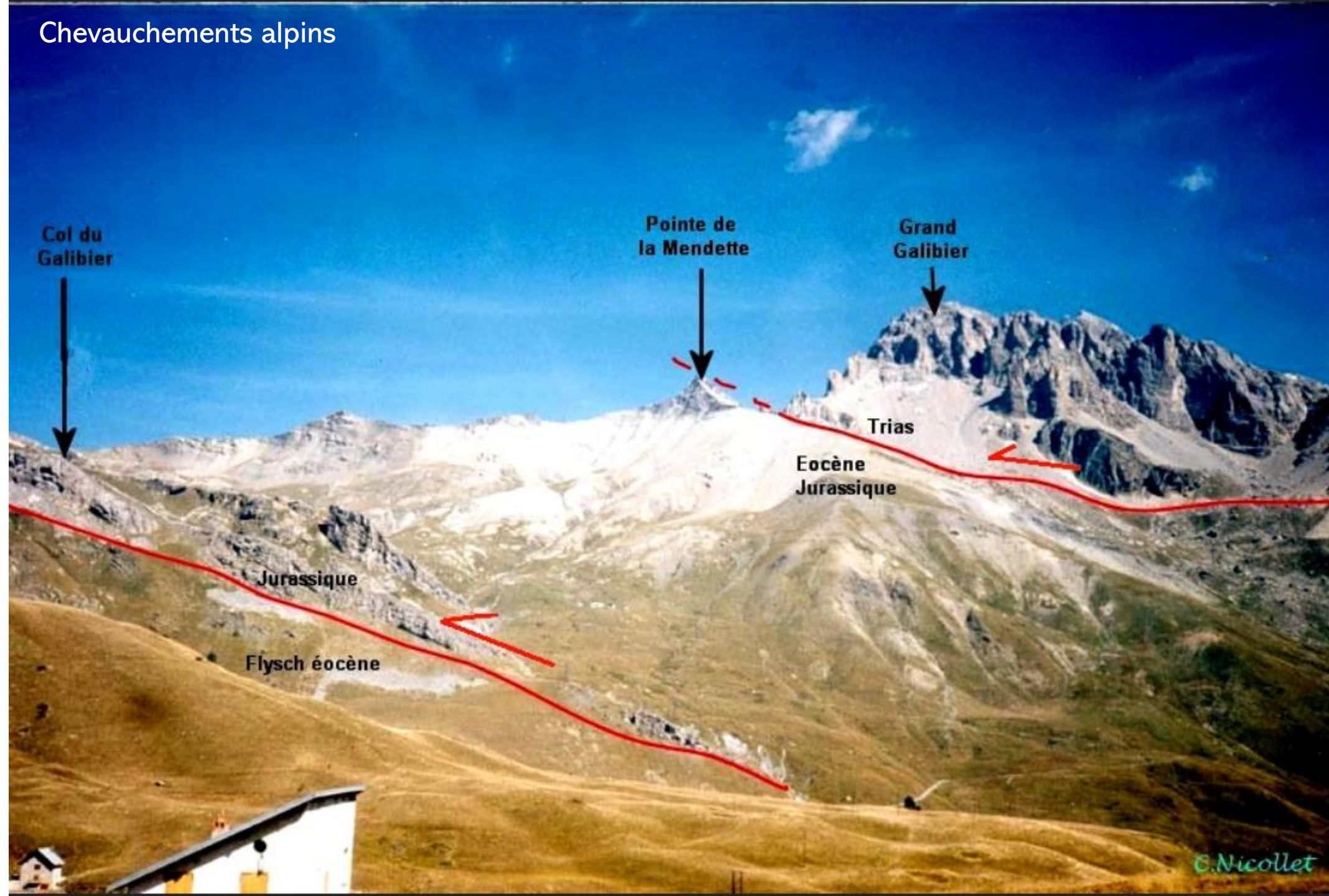
Prédiction de l'angle de fracture α

remarque : $2\alpha + \phi = 90^\circ$

Faille normale d'Helike, Corinth Rift, Greece



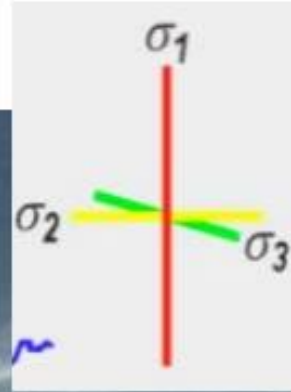
Chevauchements alpins



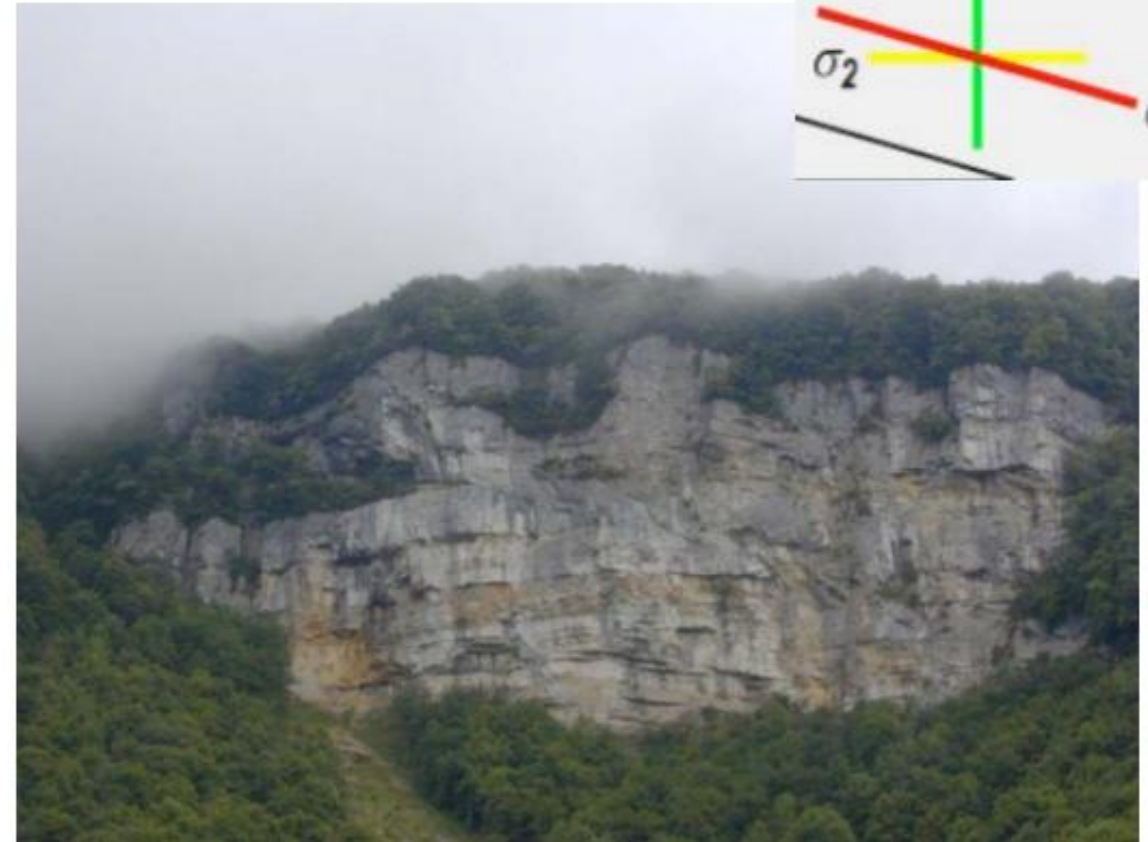
8. Implications pour la nature des failles

Donc en théorie...

Failles normales
= pendage de 60°



Failles inverses
= pendage de 30°



Nature de cette faille ??



Nature de cette faille ??





Faille normale de **faible angle** de
Mykonos - Grèce



Nature de cette faille ??

Faille normale de faible angle de
Mykonos - Grèce



Nature de cette faille ??

Faille normale de
faible angle de
Mykonos - Grèce



Nature de cette faille ??

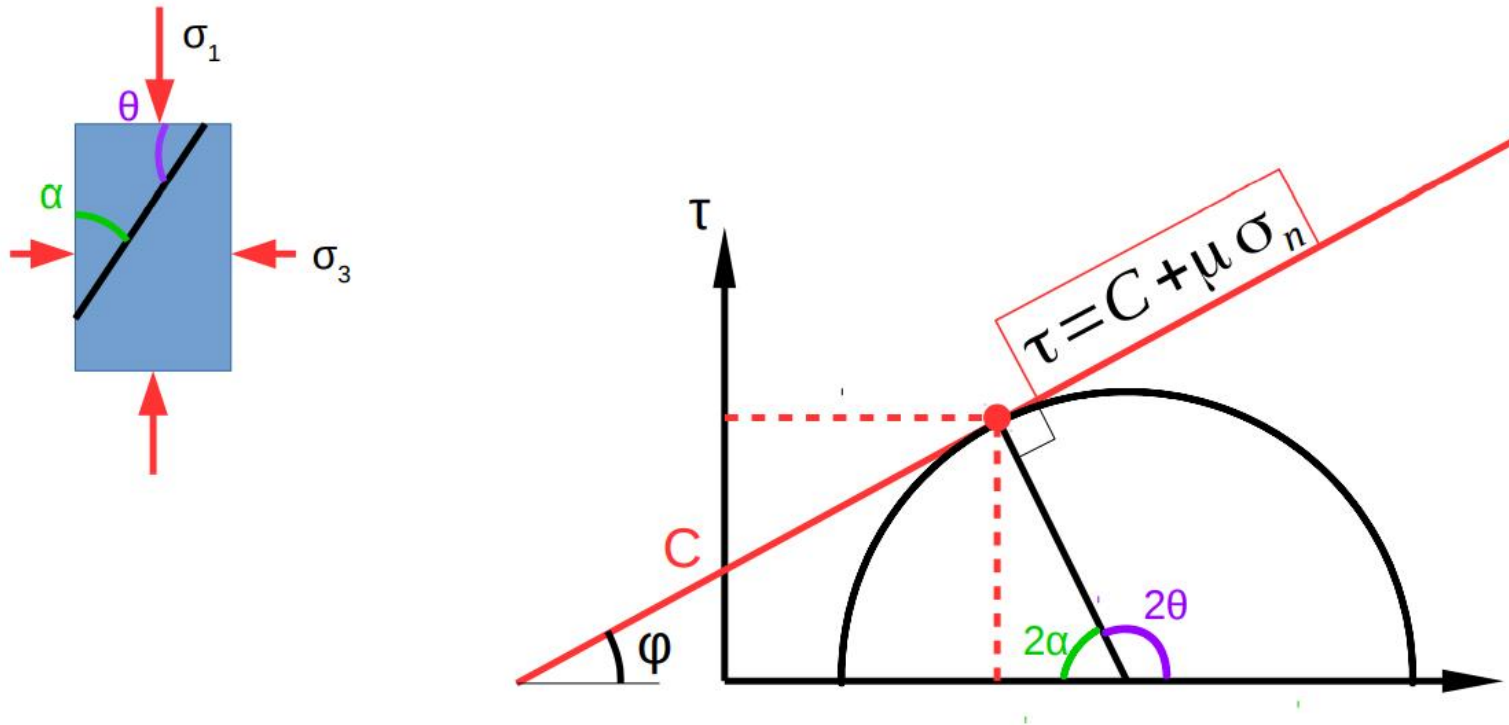
Faille normale de
faible angle de
Mykonos - Grèce



8. Implications pour la nature des failles

Exemples naturels de failles normales de faible angle !

Comment est-ce possible ?



Prédiction de l'angle de fracture α

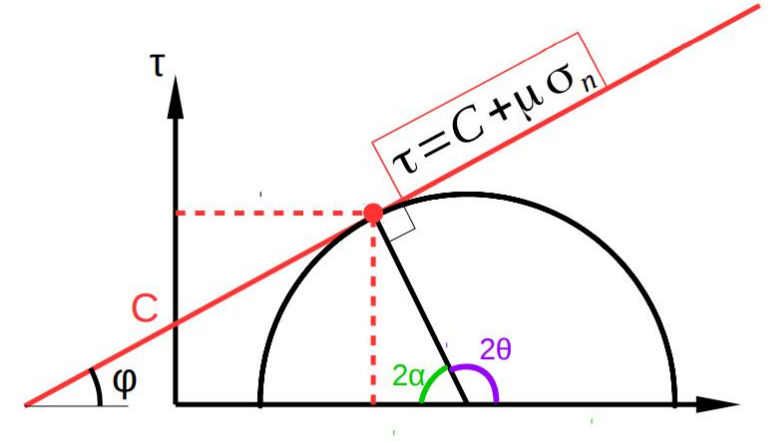
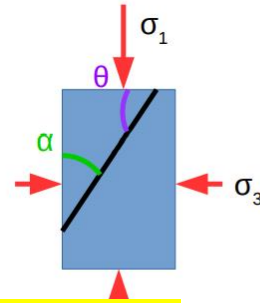
remarque : $2\alpha + \phi = 90^\circ$

8. Implications pour la nature des failles

Exemples naturels de failles normales de faible angle !

Comment est-ce possible ?

- Réactivation de failles inverses ou chevauchements pré-existants
- Rotation de faille normale de fort angle
- Effet de la rhéologie des roches de failles (cohésion, friction interne)
- Rôle des hétérogénéités rhéologiques crustales



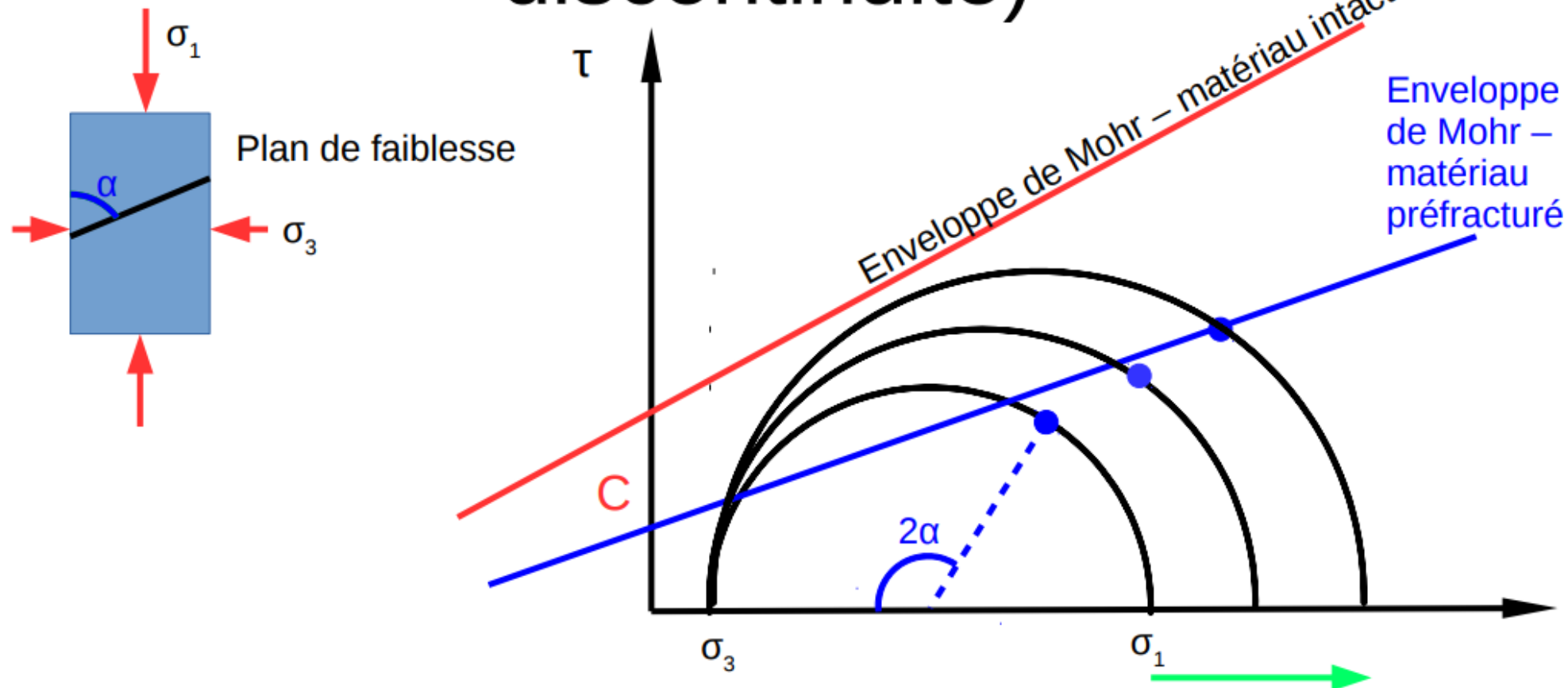
Prédiction de l'angle de fracture α

remarque : $2\alpha + \phi = 90^\circ$

→ notion d'héritage structural

→ Implications pour l'étude des failles, des fractures dans un massif rocheux... toujours prendre en considération l'étude de l'héritage structural de ce massif (fractures et plans de faiblesses existants)

Plan de faiblesse (schistosité, discontinuité)



Exemple : σ_3 fixé, σ_1 croissant. Plan de faiblesse stable jusqu'à atteindre les conditions de rejeu de la faille (critère bleu). Dans ce scénario, les conditions ne permettent de créer une nouvelle fracture (critère de fracturation Mohr-Coulomb en rouge non atteint).

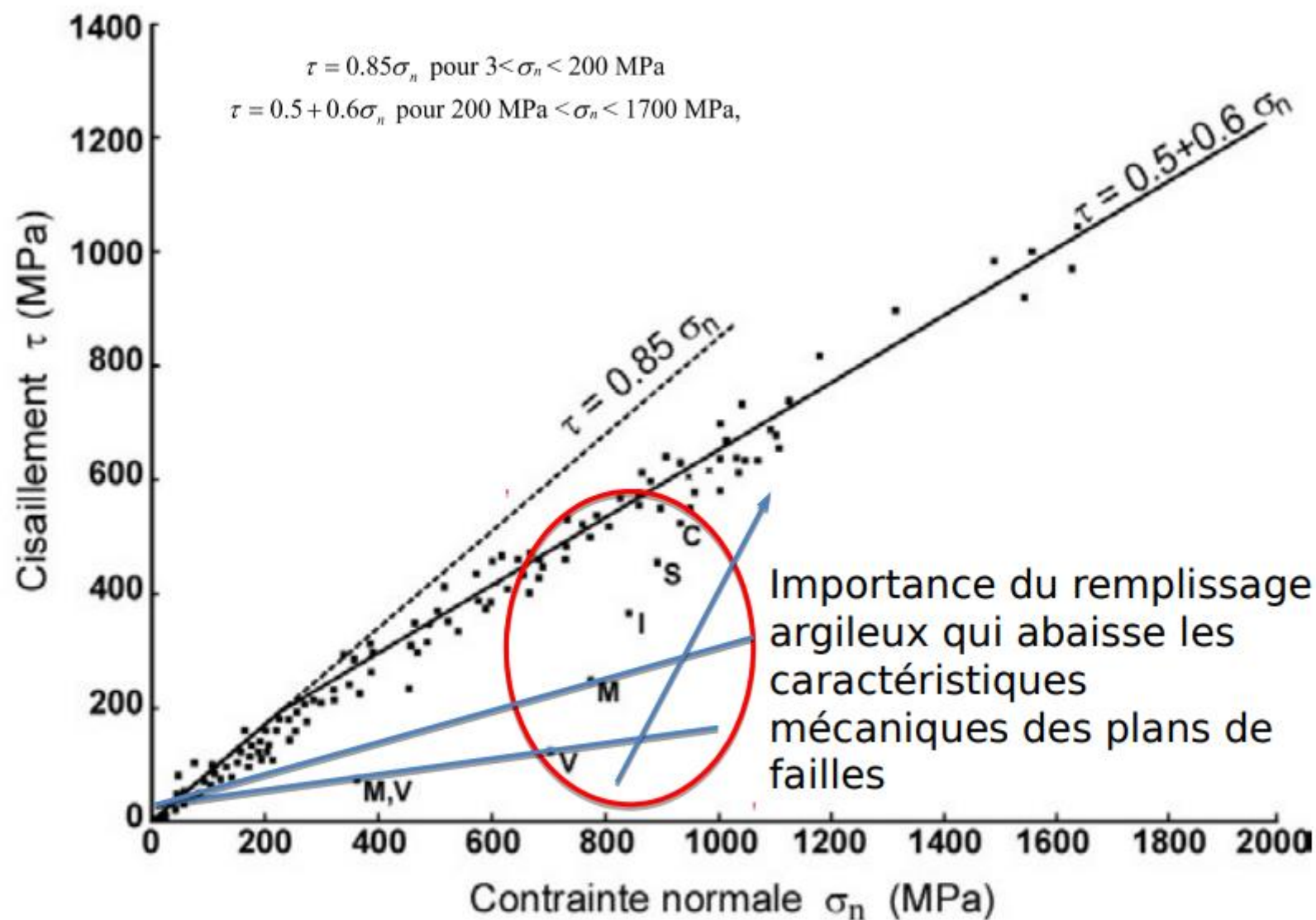


Figure II.17 : Friction maximum pour différents types de roches (d'après Byerlee, 1978).. Certains matériaux présentent une friction notablement plus faible : M = montmorillonite ; V = vermiculite ; I = illite ; S = serpentinite ; C = chlorite.

Sources

- **Géosciences: la dynamique du système Terre**

Livre de Romain Bousquet