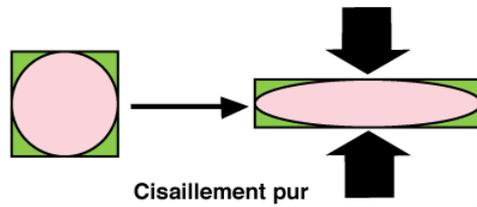
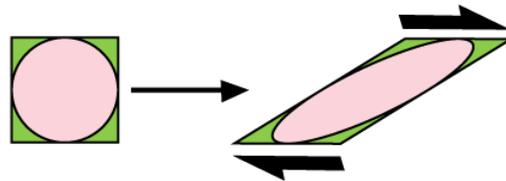


**La déformation cassante
par aplatissage et cisaillement simple:**

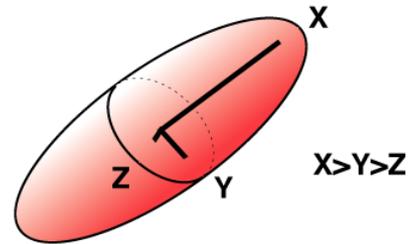
Approche expérimentale



Cisaillement pur



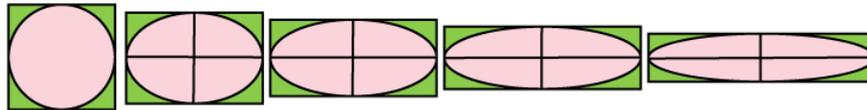
Cisaillement simple



Ellipsoïde de la déformation finie

EVOLUTION DES AXES PRINCIPAUX DE LA DEFORMATION

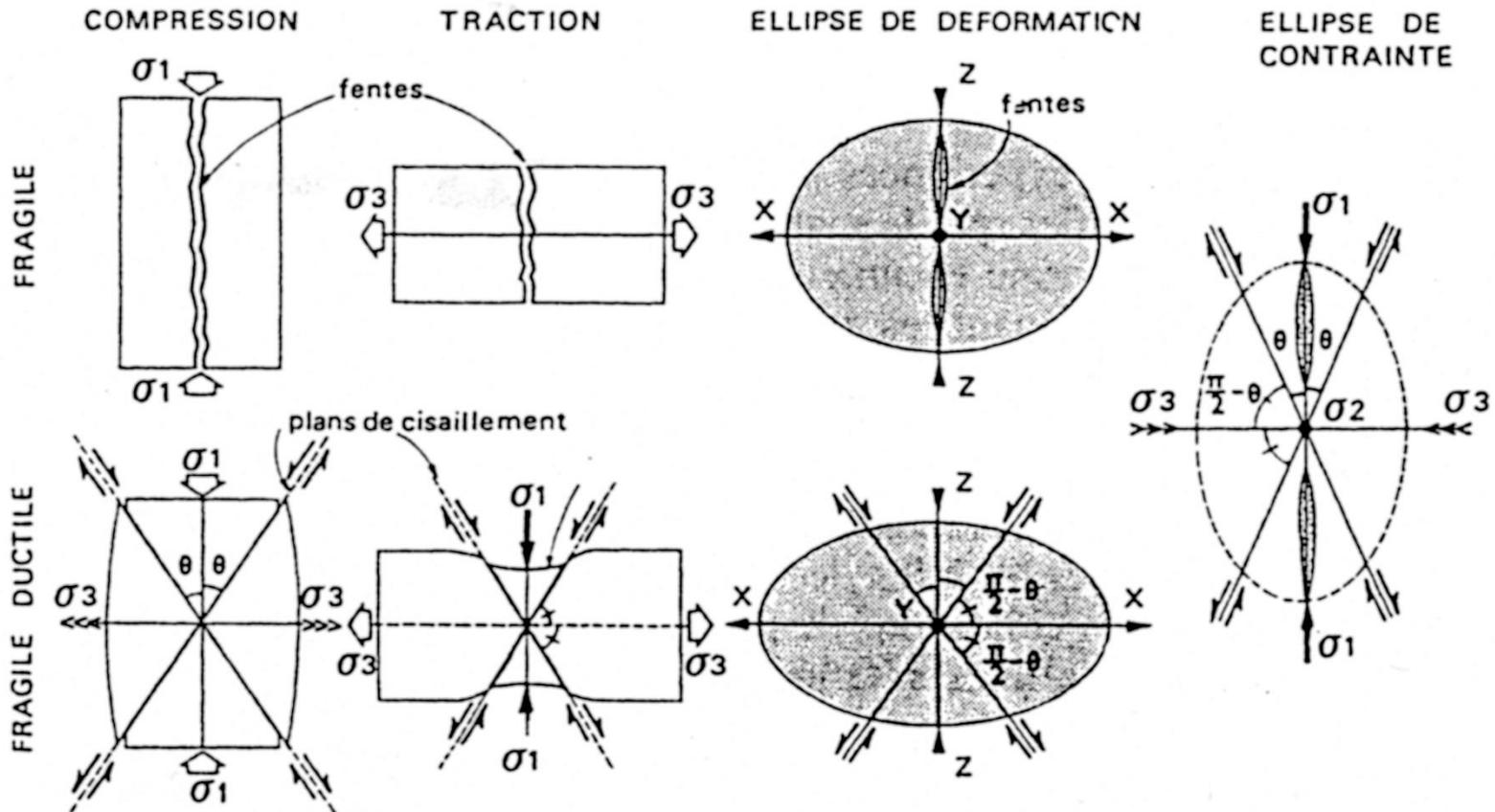
cisaillement pur, déformation coaxiale



cisaillement simple, déformation non coaxiale



Déformation cassante- Contraintes



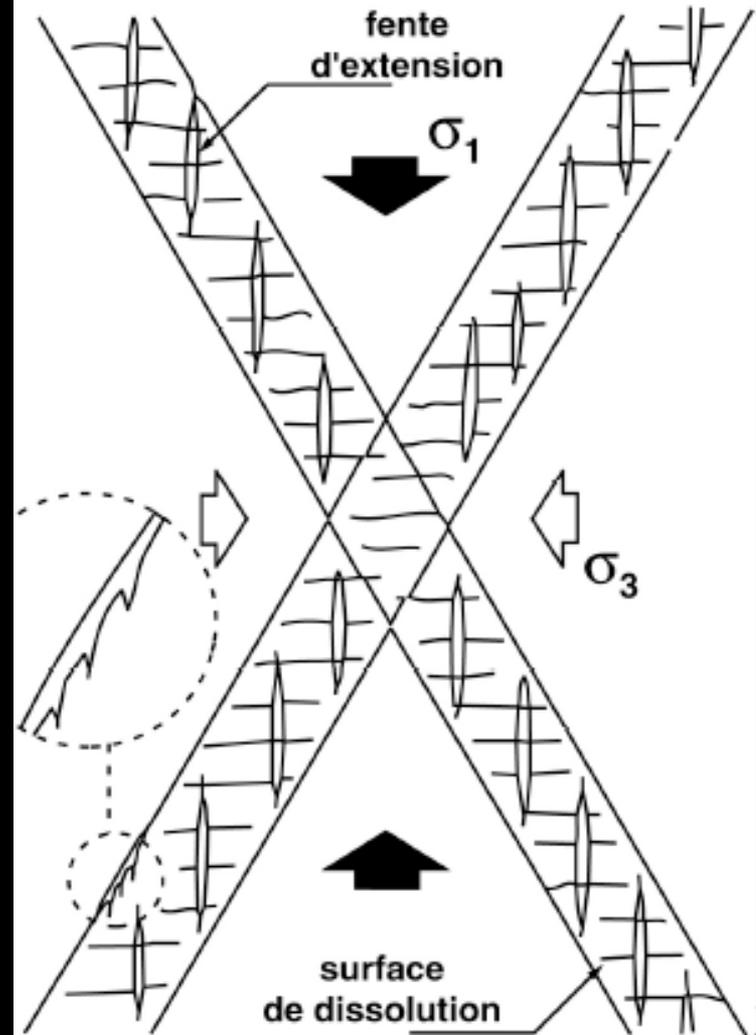
Géométrie des plans de fractures néoformés au cours des essais mécaniques.

(In Mercier et Vergely, Tectonique, Dunod, 1992)



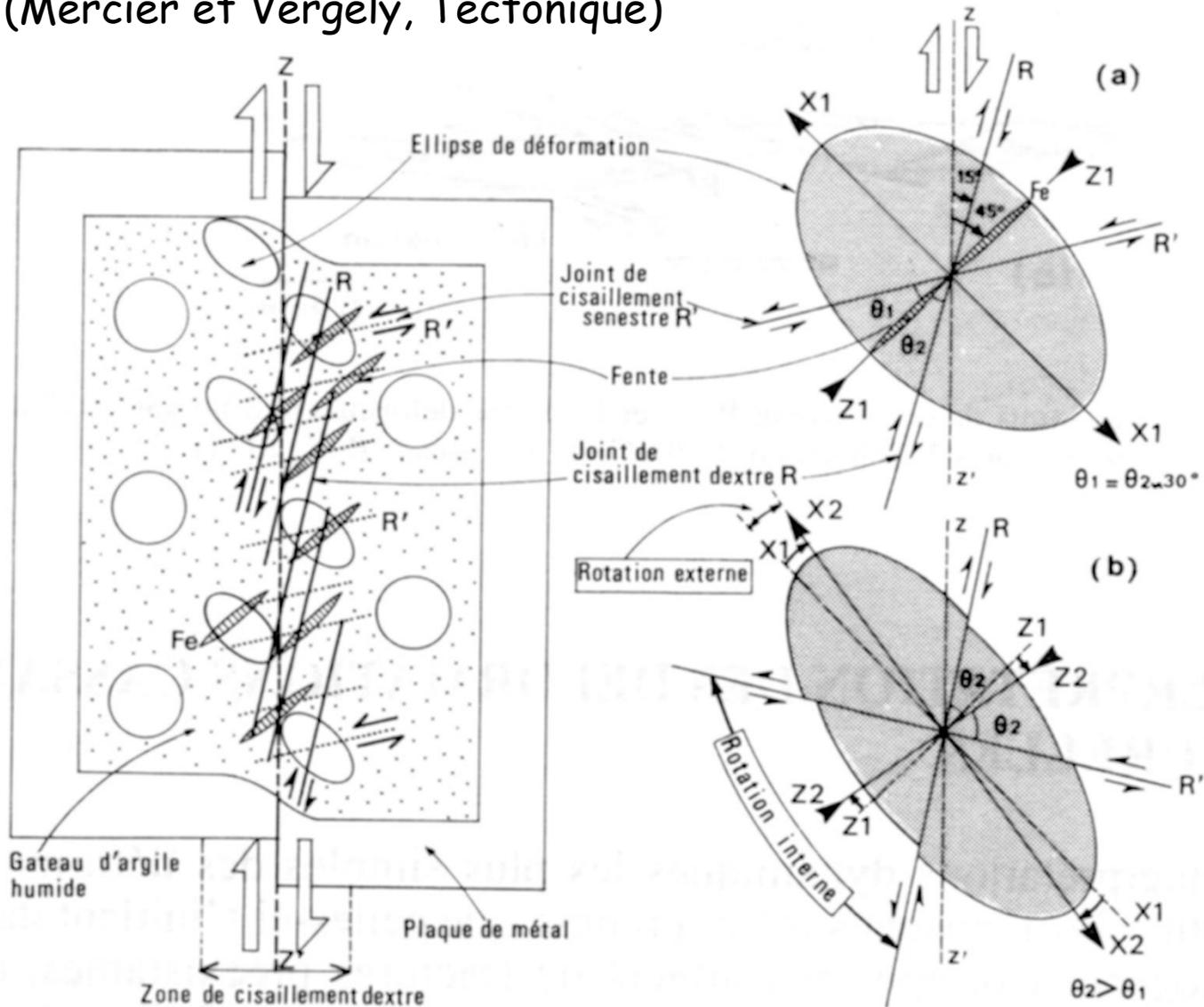


Disposition en échelons

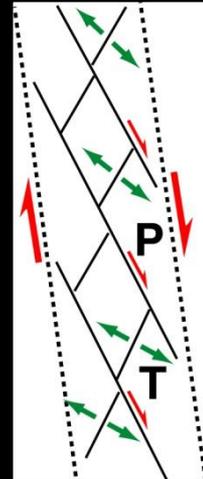
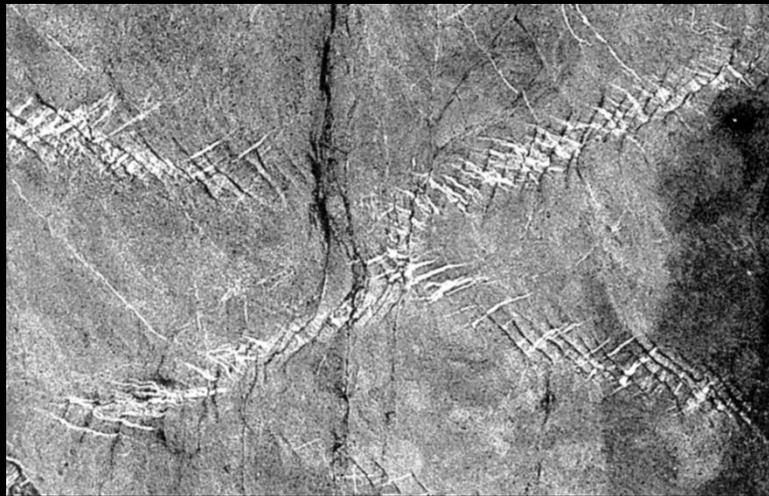
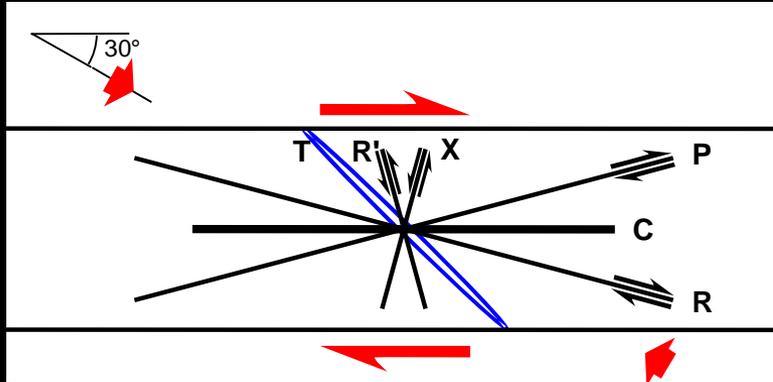


Déformation cassante- Contraintes

(Mercier et Vergely, Tectonique)



Déformation cassante- Contraintes



Les contraintes :
un fil directeur pour l'interprétation mécanique
simple des structures cassantes

Relations contraintes - déformations - déplacements : l'oeuf (contrainte) et la poule (déplacement)

L'objectif des études géologiques est fondamentalement la compréhension de la géométrie et de la genèse d'une structure. La première étape est la description de la déformation finie et, autant que possible, la reconnaissance de marqueurs de la déformation incrémentale permettant de reconstituer le chemin de la déformation.

Une première optique consiste à dire que toute déformation (et tout déplacement) résulte de forces : les contraintes sont alors les paramètres "extrinsèques" indépendants appliqués aux systèmes géologiques dont les déplacements constituent la réponse (paramètres dépendants).

L'autre approche consiste à considérer que les déplacements et les vitesses de déplacement sont les paramètres extrinsèques appliqués qui contrôlent la déformation, et que les contraintes sont la réponse du matériau, dans le sens où elles adoptent les orientations et les grandeurs qui se conforment aux conditions de déplacements imposées (Tikoff et Wojtal, 1999).

Quand la déformation coaxiale prévaut, c'est-à-dire que les axes de la déformation infinitésimale, assimilables aux axes de contraintes, sont parallèles aux axes de la déformation finie,
cette discussion est sans objet.

Qualitativement, les systèmes coaxiaux, quelle que soit l'échelle considérée, sont relativement indépendants des conditions aux limites, puisque la définition des axes de contraintes conduit nécessairement aux axes de déformation et vice-versa.

L'analyse dynamique fondée sur l'étude des failles (ou des macles de la calcite) repose sur la coaxialité et la "proportionalité" des axes principaux et des magnitudes du tenseur de déformation incrémental et de ceux du tenseur des contraintes, ce qui implique l'isotropie du matériau.

Quand la déformation non-coaxiale prévaut, les axes principaux de déformation infinitésimale (ou des taux de déformation) ne sont pas parallèles aux axes de la déformation finie, et les directions de déplacement ne sont parallèles ni aux axes de contraintes, ni aux axes de déformation.

C'est par exemple le cas des grandes zones de cisaillement.

La non-coaxialité est souvent associée à une forte anisotropie rhéologiques et/ou mécanique du domaine et à des déplacements locaux importants, qui reflètent des variations des orientations et des grandeurs des contraintes.

Décrire les contraintes en terme d'orientation ne suffit alors pas pour caractériser et contraindre la déformation (Tikoff et Wojtal, 1999) et il faut s'intéresser aux déplacements.

Déformation ou contrainte ?

Le raisonnement en termes de contraintes repose donc, entre autres, sur (1) le caractère isotrope du matériau, et (2) la coaxialité entre axes principaux de la déformation finie et axes de contraintes, qui est liée au caractère non rotationnel et faible de la déformation.

On peut alors décrire non seulement l'orientation de l'ellipsoïde de la déformation finie

(NB : mais pas sa forme, car sa détermination requiert la mesure de tous les déplacements le long des failles qui affectent le milieu rocheux considéré, ce qui est quasi-impossible en pratique),
mais également interpréter mécaniquement les systèmes de fractures naturels, et reconstituer pro parte l'ellipsoïde des contraintes.

Au contraire,

l'analyse de marqueurs de la déformation ductile permet la description de l'ellipsoïde de la déformation finie (en orientation et quelquefois en grandeur), mais les forts % de la déformation et son caractère souvent rotationnel interdisent l'interprétation des structures en termes de contraintes.

Dans les avant-pays de chaînes de montagnes, comme au cours des stades tardifs de l'évolution tectonique des domaines internes des chaînes de montagnes, la déformation est souvent peu importante et s'est effectuée pour l'essentiel dans le domaine cassant.

Dans ce contexte, on peut admettre que la déformation moyenne est coaxiale et peu intense, et la théorie de l'élasticité linéaire dans un milieu isotrope et homogène rend compte de la fracturation. Les structures cassantes sont alors aisément interprétables en termes de paléocontraintes.

Ce type de raisonnement permet de définir des conditions aux limites relativement simples, avec des perturbations locales de contraintes (en direction et/ou en grandeur) le long d'accidents préexistants ou par suite d'hétérogénéités, au sein d'un champ de paléocontraintes homogène.

Le raisonnement en termes de paléocontraintes est donc un outil intégrateur puissant qui fournit un modèle explicatif unitaire pour la déformation cassante observée; il permet de donner une cohérence globale aux observations microtectoniques dans le domaine fragile à travers un modèle mécanique simple.

Les contraintes :
un fil directeur pour l'interprétation mécanique
simple des structures cassantes (1)

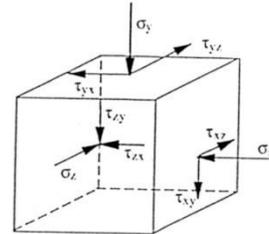
Tenseur de contraintes, contraintes principales

ÉTAT DE CONTRAINTE EN UN POINT

L'état de contrainte au point P dans la figure peut être défini en utilisant l'équation pour toutes les surfaces ΔS passant par le point P. On considère les vecteurs contrainte $\sigma_{(e1)}$, $\sigma_{(e2)}$ et $\sigma_{(e3)}$ agissant sur trois surfaces orthogonales, normales respectivement aux axes x, y et z. Ces trois surfaces servent de repère pour définir les trois composantes de l'élément de contrainte au point P.

Les neuf composantes des vecteurs $\sigma_{(e1)}$, $\sigma_{(e2)}$ et $\sigma_{(e3)}$ sont les composantes d'un tenseur cartésien du second ordre appelé le tenseur des contraintes σ_{ij} . Ces composantes correspondent à trois contraintes normales σ_x , σ_y , σ_z et six contraintes tangentielles τ_{xy} , τ_{yx} , τ_{xz} , τ_{zx} , τ_{yz} et τ_{zy} .

$$\begin{aligned}\sigma_{(e1)} &= -\sigma_x e_1 - \tau_{xy} e_2 - \tau_{xz} e_3 \\ \sigma_{(e2)} &= -\tau_{yx} e_1 - \sigma_y e_2 - \tau_{yz} e_3 \\ \sigma_{(e3)} &= -\tau_{zx} e_1 - \tau_{zy} e_2 - \sigma_z e_3\end{aligned}$$



Le tenseur des contraintes s'écrit :

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{pmatrix} \quad \text{symétrique.}$$

Trouver les contraintes principales et les directions des contraintes principales est équivalent à trouver les valeurs propres, et les vecteurs propres correspondants, du tenseur des contraintes σ_{ij} . Puisque ce tenseur est symétrique, les valeurs propres sont réelles.

Les valeurs propres de σ_{ij} sont les valeurs de la contrainte normale σ telles que le déterminant de $\sigma_{ij} - \sigma \delta_{ij}$ s'annule :

$$\begin{vmatrix} \sigma_x - \sigma & \tau_{xy} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_y - \sigma & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z - \sigma \end{vmatrix} = 0$$

σ doit vérifier le polynôme cubique suivant :

$$\sigma^3 - I_1 \sigma^2 + I_2 \sigma - I_3 = 0$$

Où I_1 , I_2 , I_3 sont indépendants du repère et sont appelés premier, second et troisième invariants du tenseur des contraintes, et sont égaux à :

$$I_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$$

$$I_2 = \sigma_y \sigma_z + \sigma_x \sigma_z + \sigma_x \sigma_y - \tau_{yz}^2 - \tau_{xz}^2 - \tau_{xy}^2$$

$$I_3 = \sigma_x \sigma_y \sigma_z + 2\tau_{xy} \tau_{xz} \tau_{yz} - (\sigma_x \tau_{yz}^2 + \sigma_y \tau_{xz}^2 + \sigma_z \tau_{xy}^2)$$

Les trois racines de l'équation (A-18) sont les contraintes principales et sont notées σ_1 , σ_2 , σ_3 . Pour chaque contrainte principale σ_k , les cosinus directeurs n_{1k} , n_{2k} et n_{3k} sont solutions de :

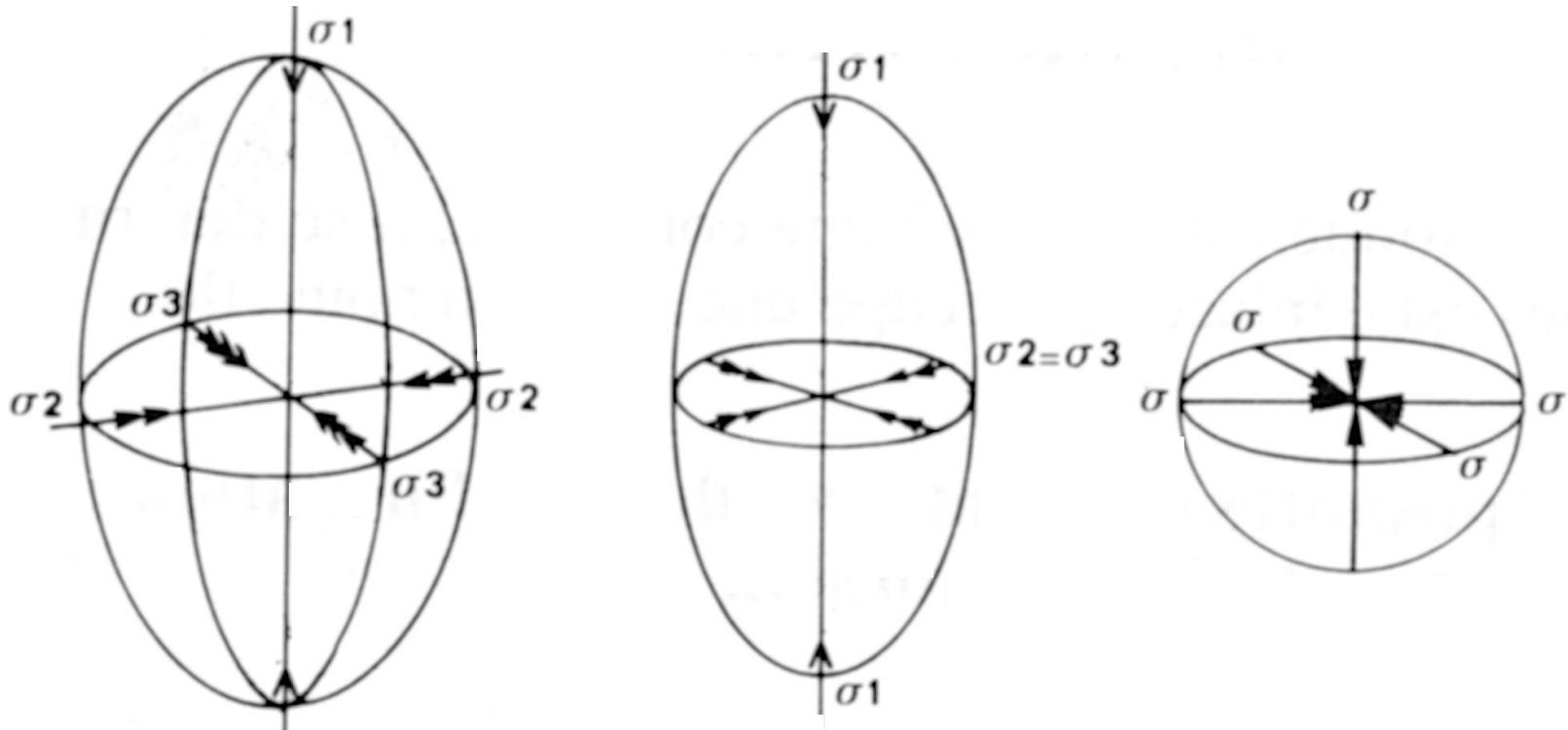
$$\begin{pmatrix} \sigma_x - \sigma_k & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y - \sigma_k & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z - \sigma_k \end{pmatrix} \begin{pmatrix} n_{1k} \\ n_{2k} \\ n_{3k} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

avec les conditions de normalités $n_{1k}^2 + n_{2k}^2 + n_{3k}^2 = 1$

Les contraintes :
un fil directeur pour l'interprétation mécanique
simple des structures cassantes (2)

Ellipsoïde des contraintes

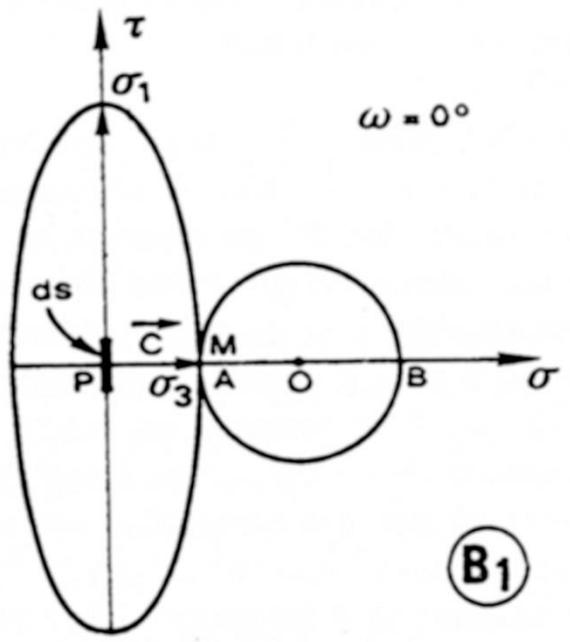
Déformation cassante- Contraintes



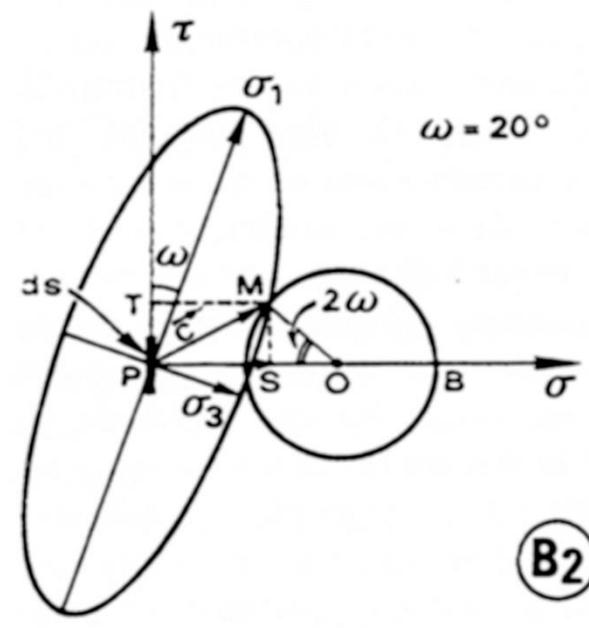
Les contraintes :
un fil directeur pour l'interprétation mécanique
simple des structures cassantes (3)

Représentation de Mohr

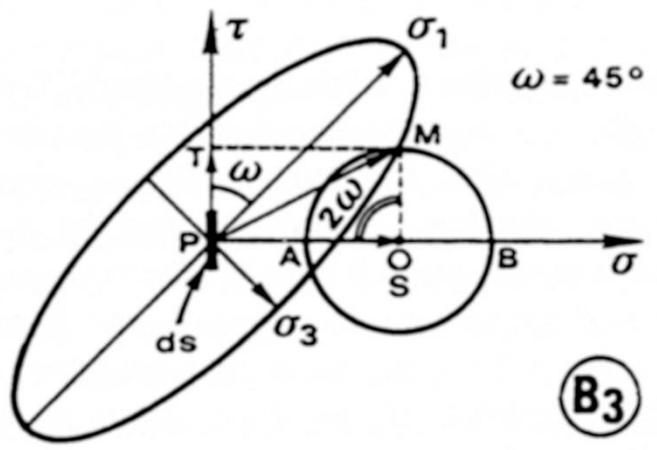
Déformation cassante- Contraintes



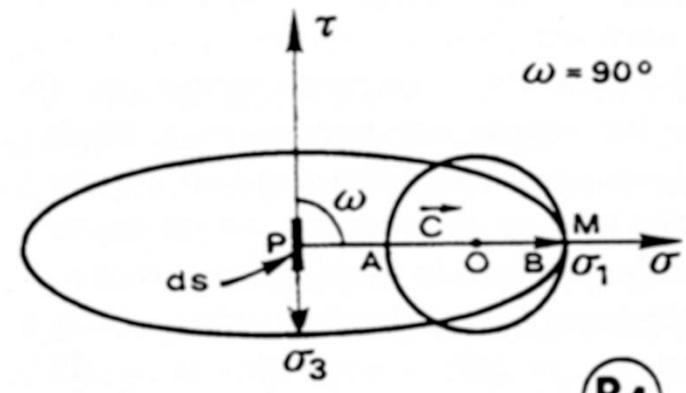
B₁



B₂

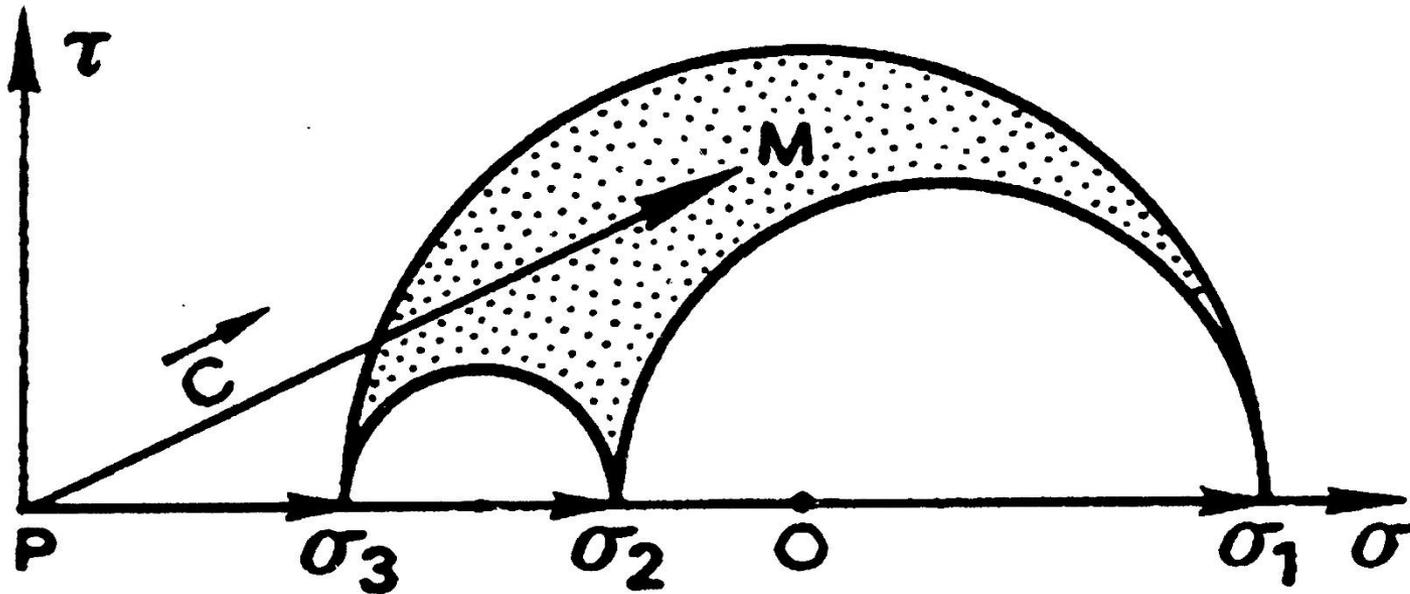


B₃

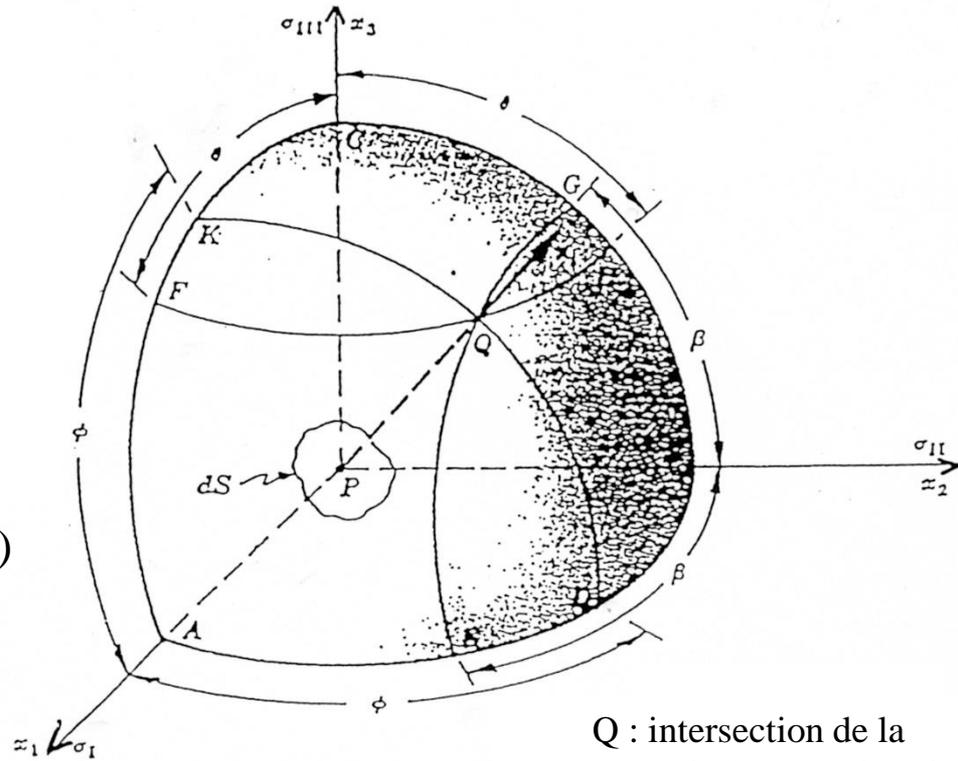


B₄

Déformation cassante- Contraintes

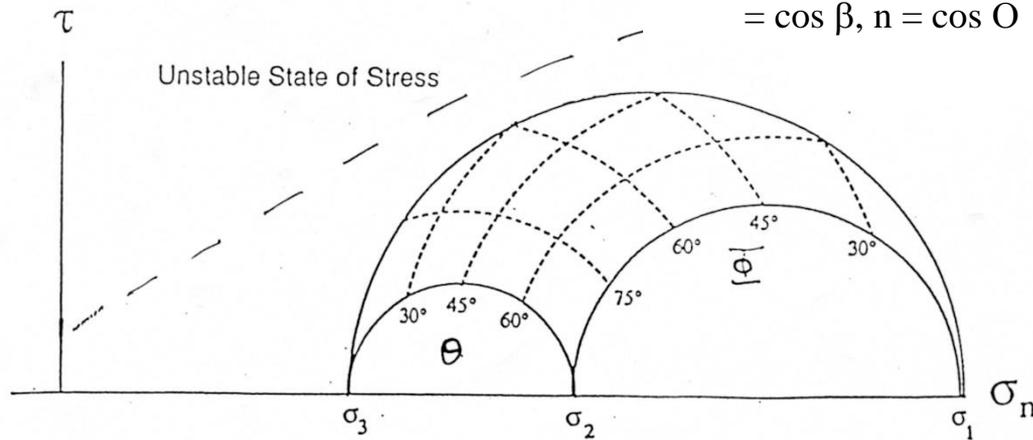


$\Phi = \text{angle } (n, \sigma_1)$
 $\beta = \text{angle } (n, \sigma_2)$
 $O = \text{angle } (n, \sigma_3)$

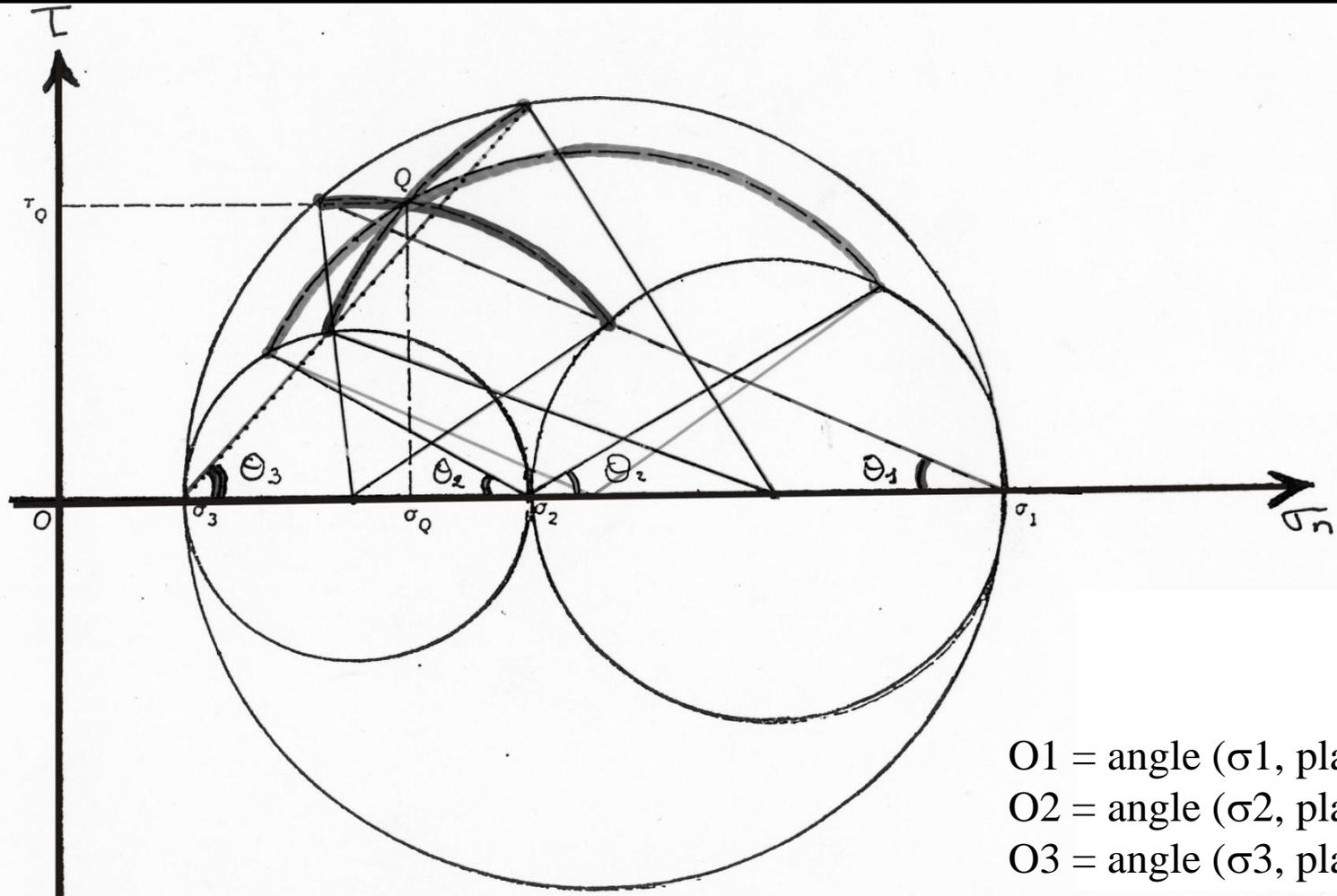


Q : intersection de la normale à P avec la sphère

n (l,m,n) avec $l = \cos \Phi$, $m = \cos \beta$, $n = \cos O$



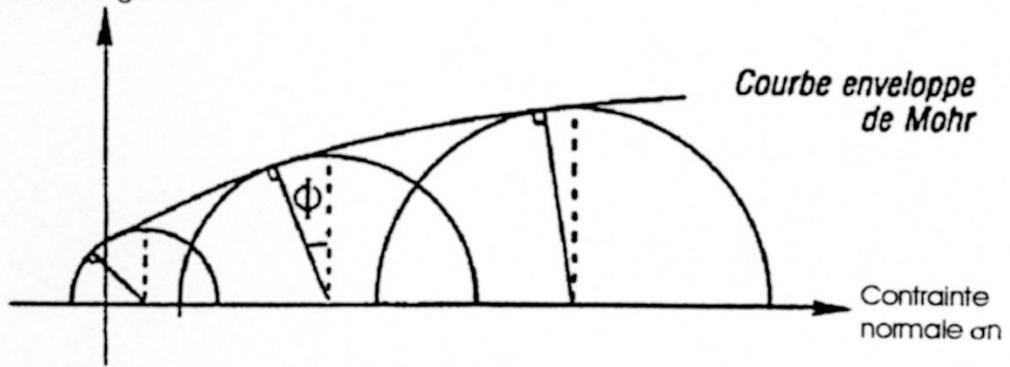
Déformation cassante- Contraintes



Les contraintes :
un fil directeur pour l'interprétation mécanique
simple des structures cassantes (4)

Interprétation de la néorupture
dans le diagramme de Mohr,
courbe de rupture intrinsèque

Contrainte tangentielle τ



*Courbe enveloppe
de Mohr*

Contrainte
normale σ_n

Les contraintes :
un fil directeur pour l'interprétation mécanique
simple des structures cassantes (5)

Critères de rupture,
Griffith, Mohr-Coulomb

Le critère de Griffith

Le critère de Griffith correspond à une condition limite pour l'apparition de fractures dans une roche, dont la courbe de rupture correspondante est une parabole d'équation

$$\tau^2 + 4 R_t \cdot \sigma_n - 4 R_t^2 = 0$$

où τ et σ_n sont respectivement la contrainte tangentielle et la contrainte normale appliquées aux plans de cassure à orientation critique, et R_t la résistance à la traction simple de la roche.

Ce critère n'est valable que lorsque la contrainte appliquée est en traction ou faiblement en compression. Il est en défaut dans le domaine des fortes compressions et conduit à des résultats théoriques très différents des données expérimentales. Ces divergences peuvent s'expliquer par la fermeture des fissures sous l'action de la contrainte latérale.

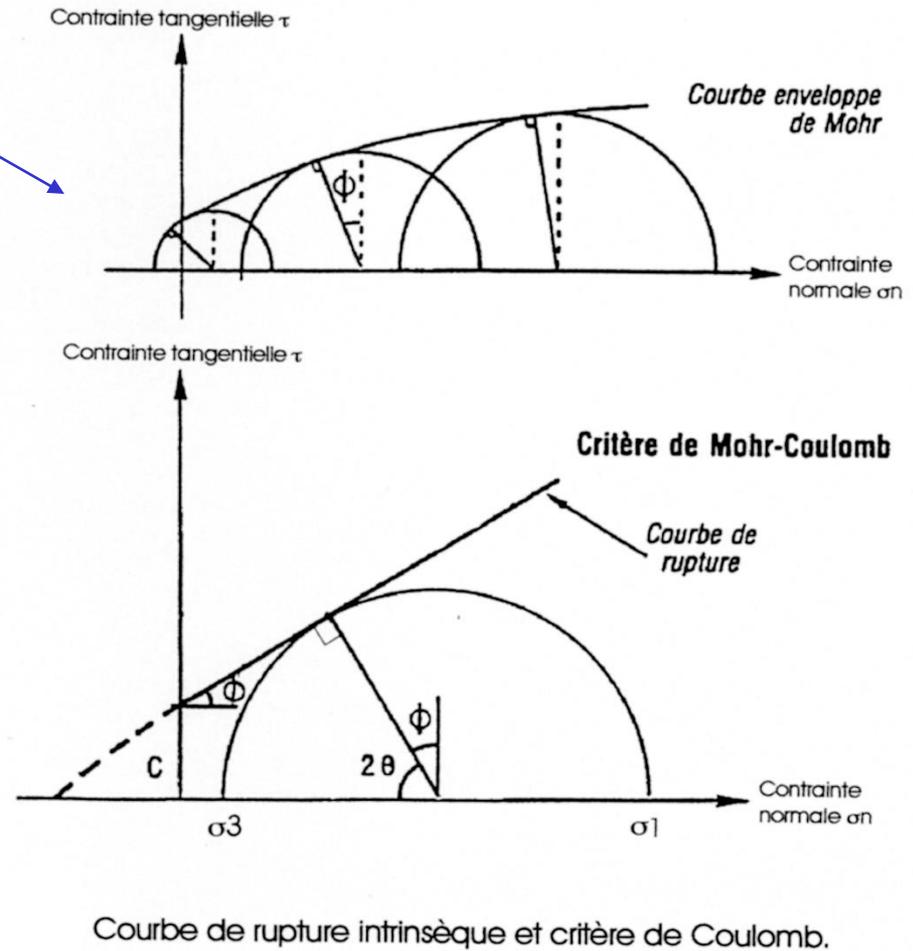
Le critère de Coulomb

Le critère de rupture de Coulomb est un critère très simple qui suppose que deux facteurs s'opposent à la rupture d'un matériau soumis à une contrainte cisailante:

- un terme fonction de l'angle de frottement interne ϕ de la roche et de la contrainte normale appliquée σ_n ;
- la cohésion τ_0 , qui représente la résistance au cisaillement lorsque $\sigma_n = 0$ (liaisons interatomiques).

Le critère de rupture s'écrit alors :

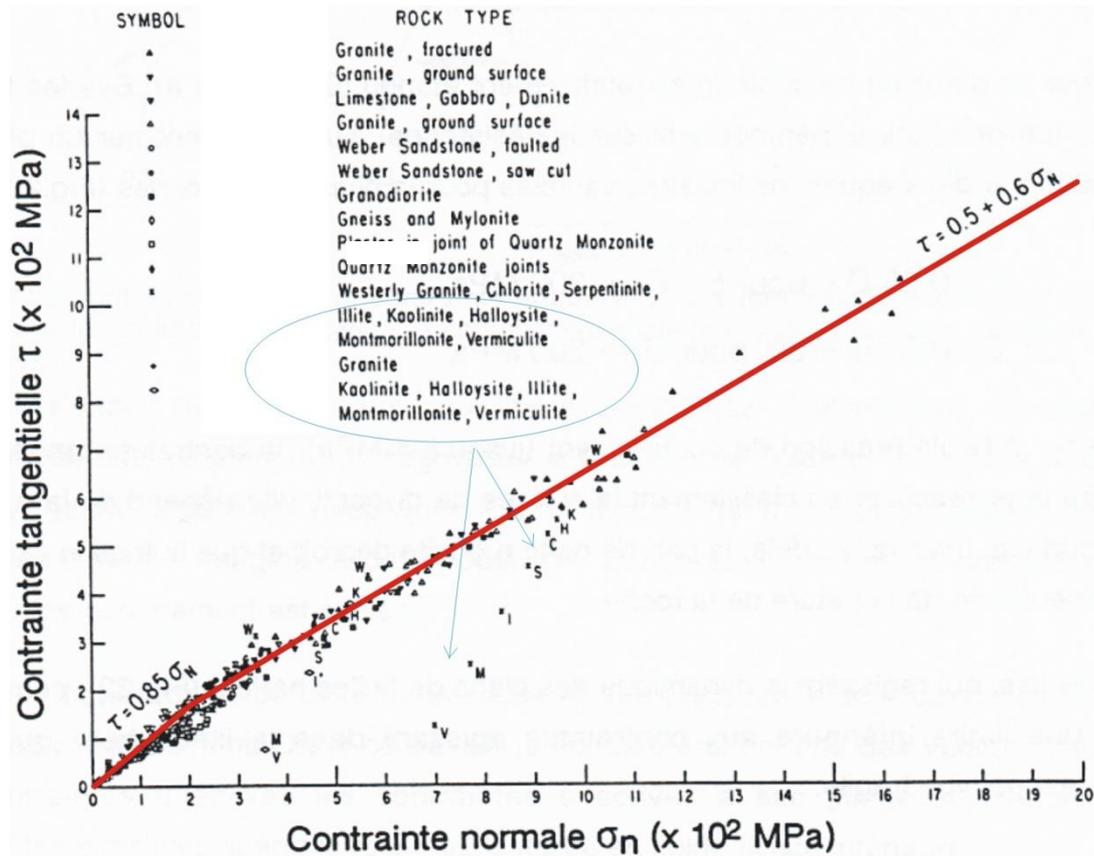
$$\tau = \tau_0 + \mu_i \cdot \sigma_n = \tau_0 + (\text{tg } \phi) \cdot \sigma_n$$



Les contraintes :
un fil directeur pour l'interprétation mécanique
simple des structures cassantes (6)

Friction et réactivation des discontinuités
préexistantes

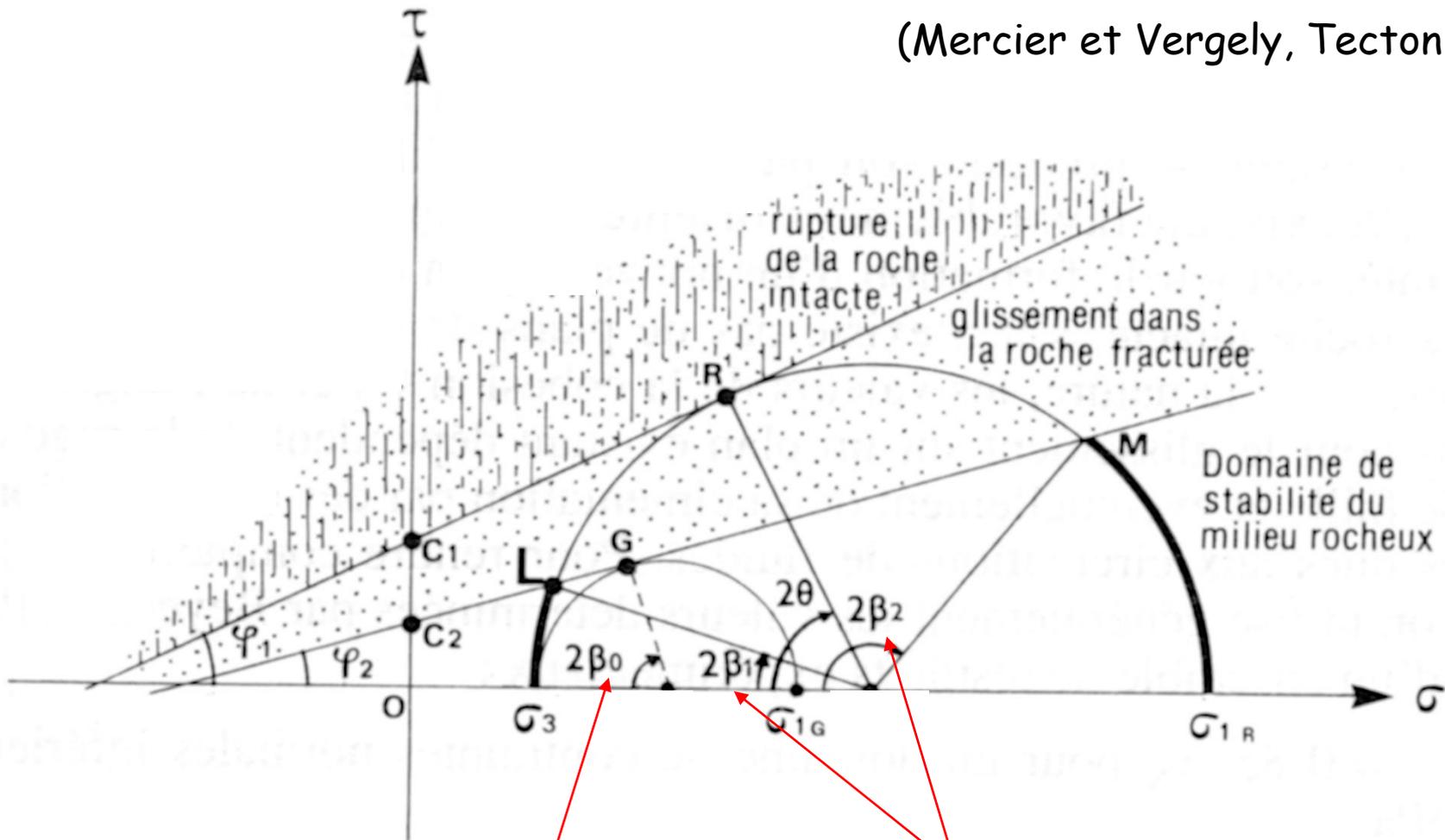
Déformation cassante- Friction



Courbes de friction (Byerlee)

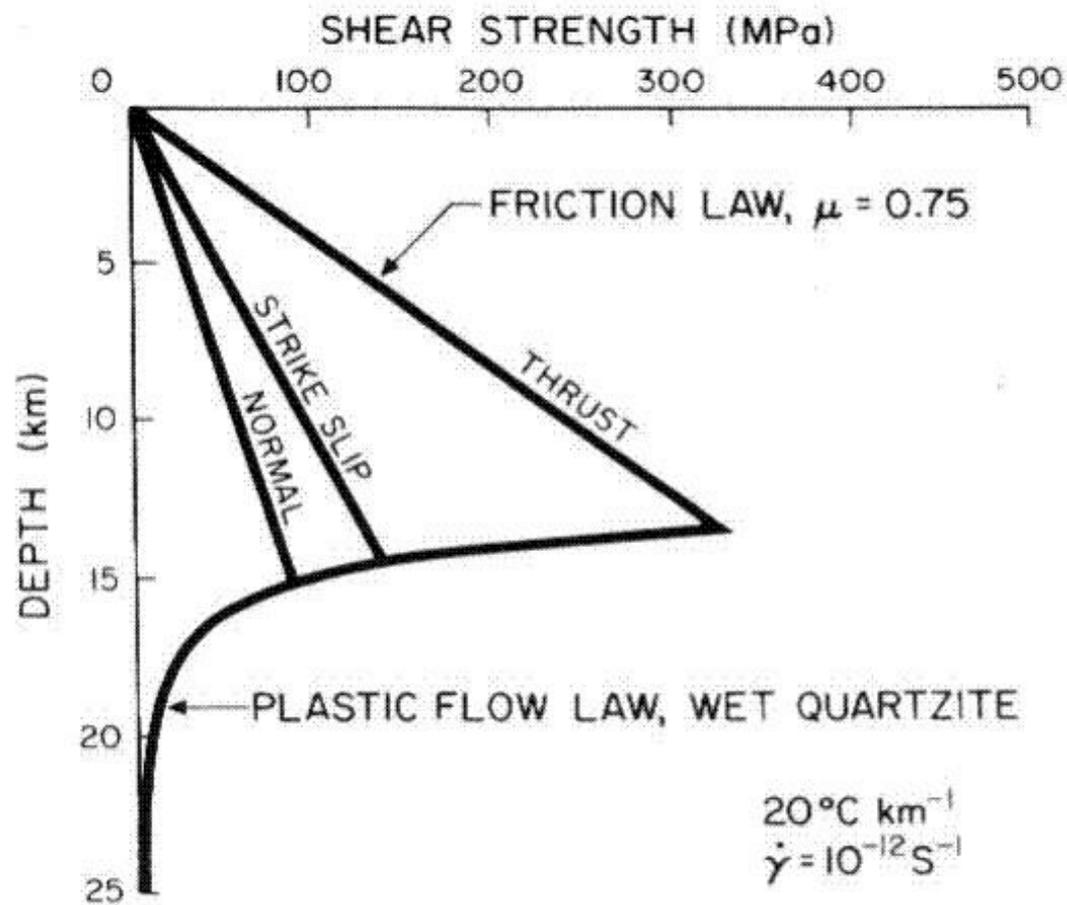
Déformation cassante- Friction

(Mercier et Vergely, Tectonique)



β_0 tel que $2\beta_0 + \phi_2 = \Pi/2$

Réactivation : plan tel que $(\sigma_1, \text{plan}) = \beta$, $\beta_1 < \beta < \beta_2$



Simple model of the strength of the lithosphere. In the upper part, optimally oriented faults are assumed with Coulomb friction and constant $\mu = 0.75$ and hydrostatic pore pressure. For the lower part, an experimentally determined flow law for wet quartzite (Jaoul, Tullis, and Kronenberg, 1984) has been extrapolated, assuming the strain rate and temperature gradient as indicated.

Les contraintes :
un fil directeur pour l'interprétation mécanique
simple des structures cassantes (7)

L'importance de la pression de fluides

L'interprétation des structures cassantes naturelles en termes de contraintes



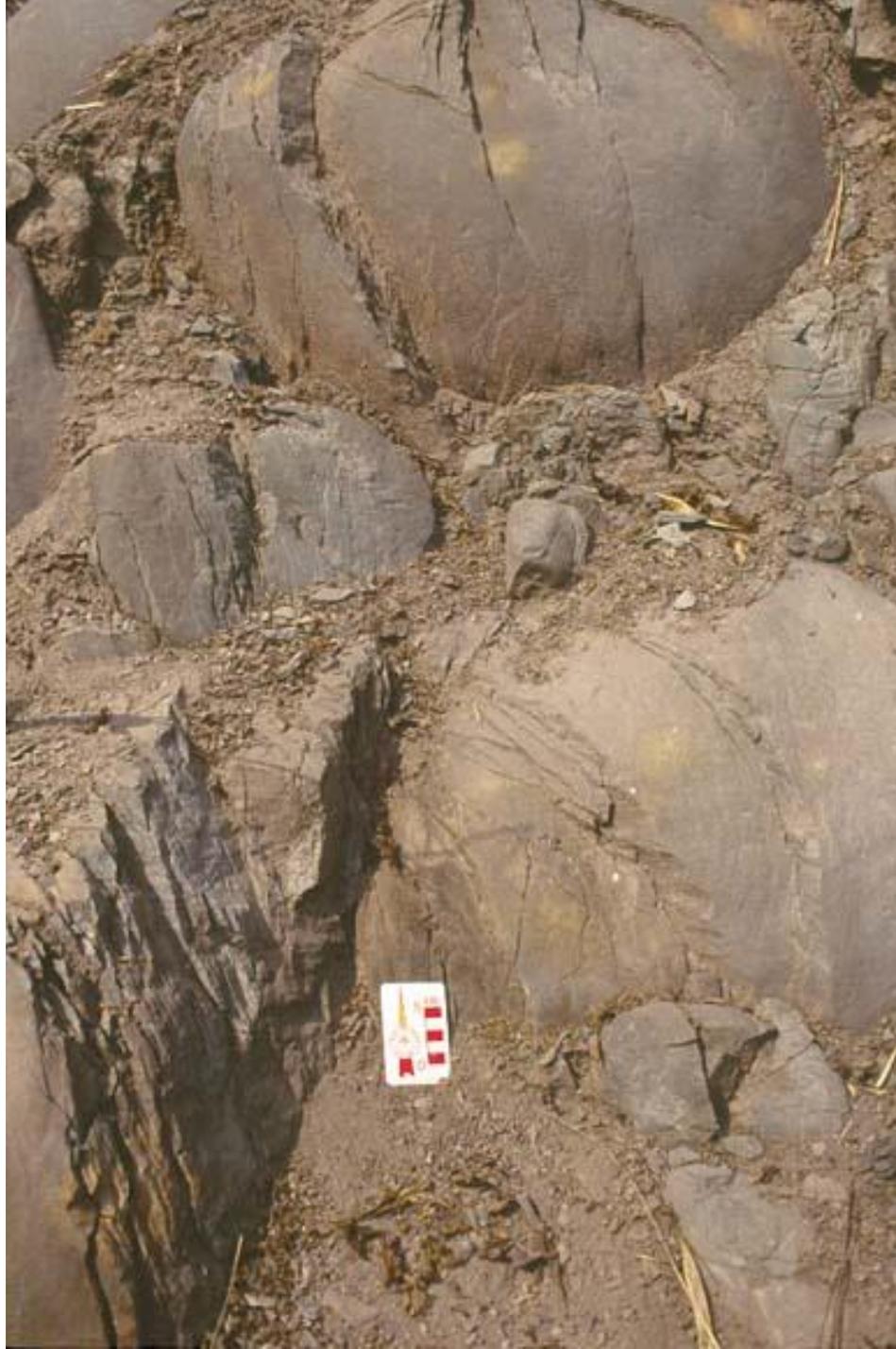


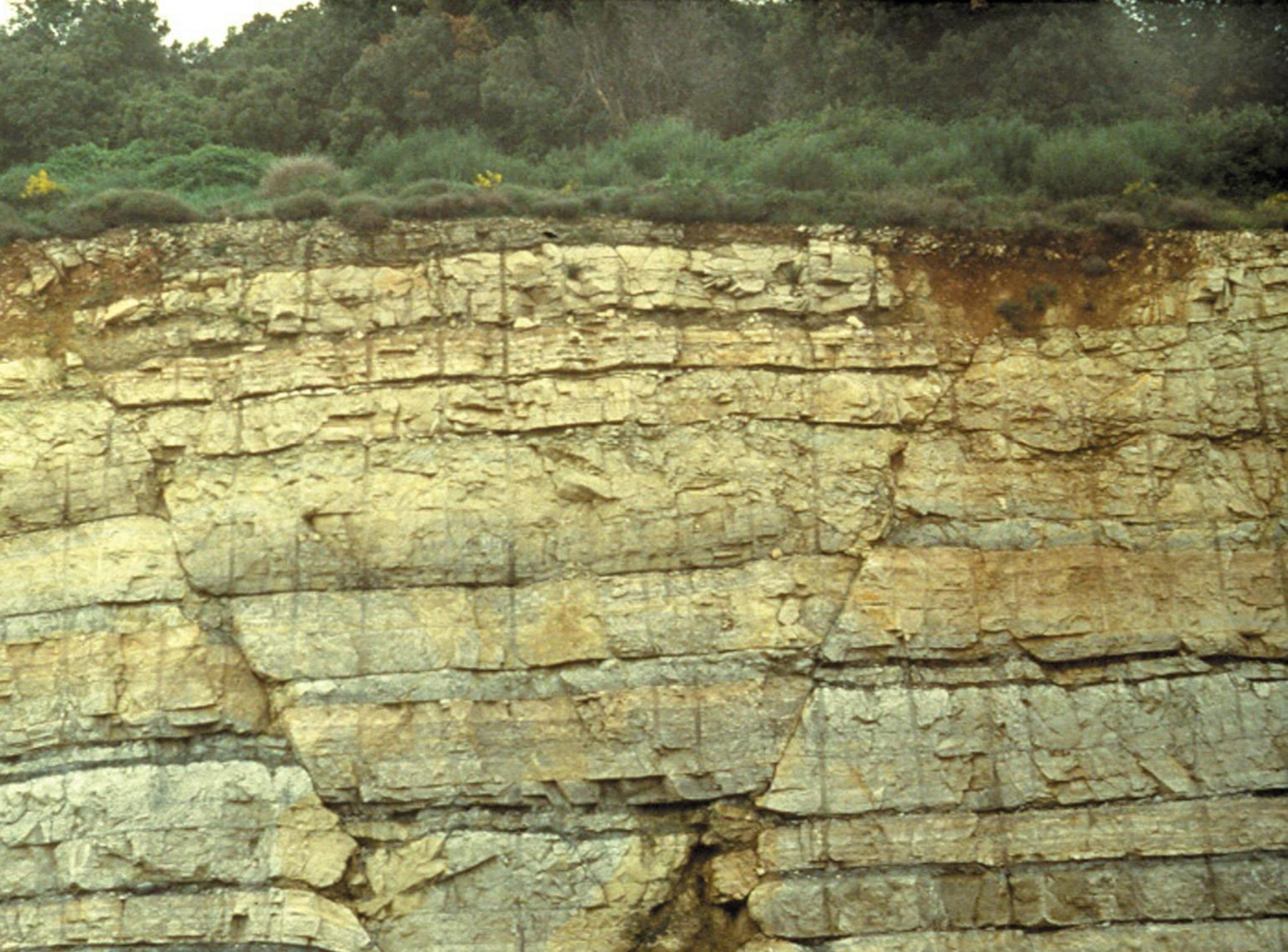








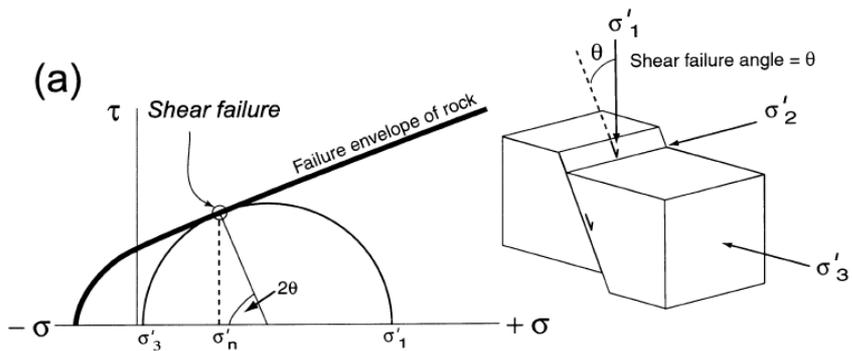




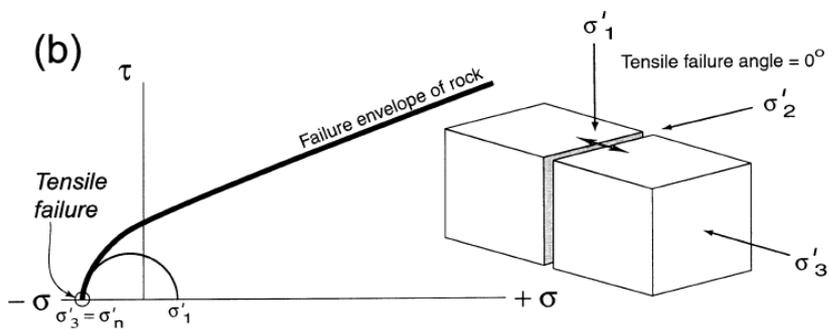




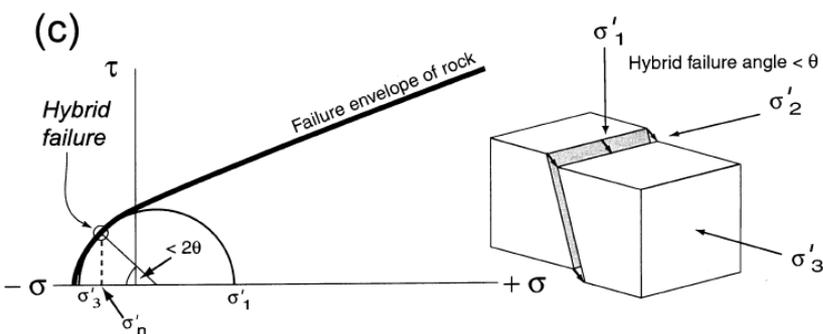




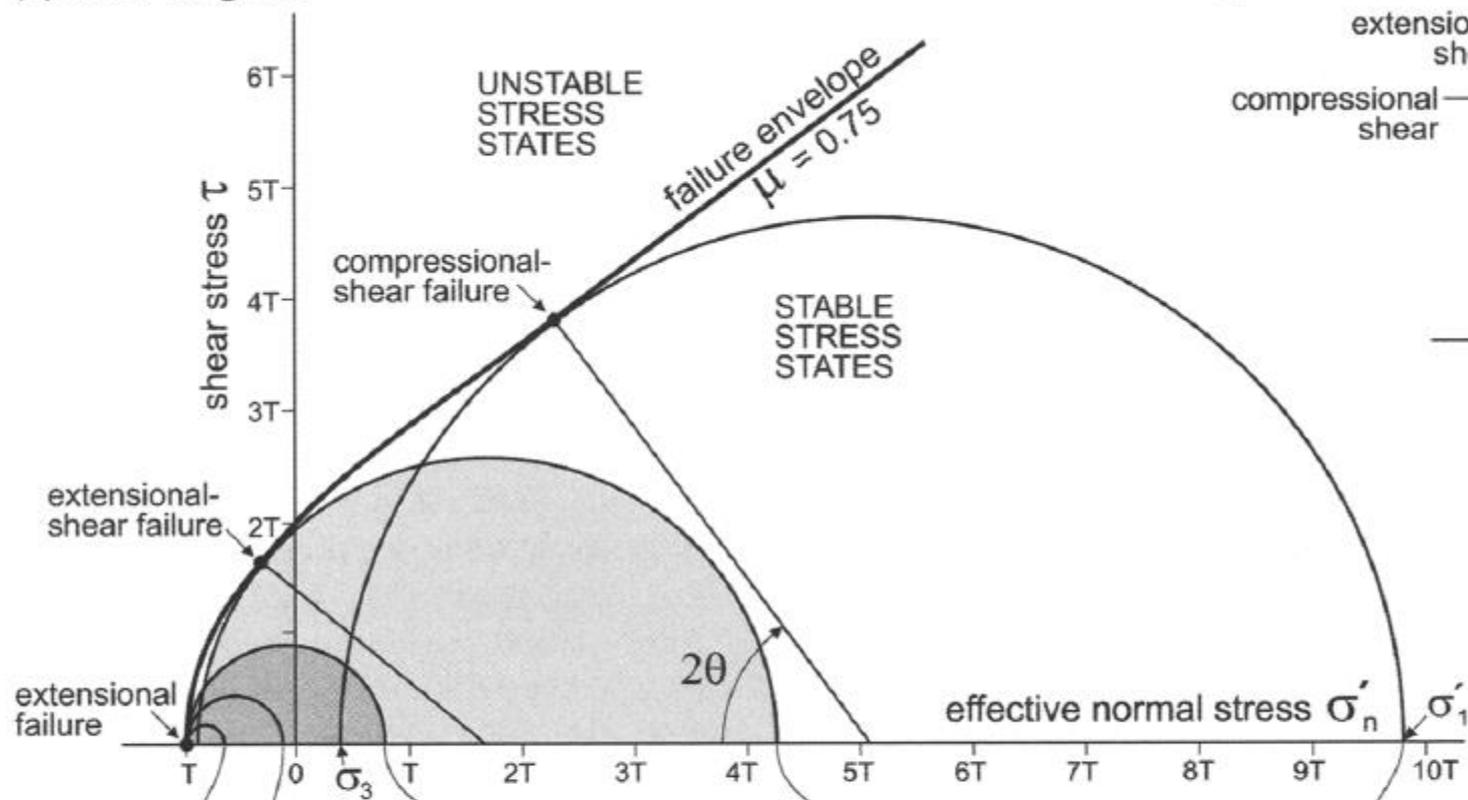
Mohr-Coulomb theory



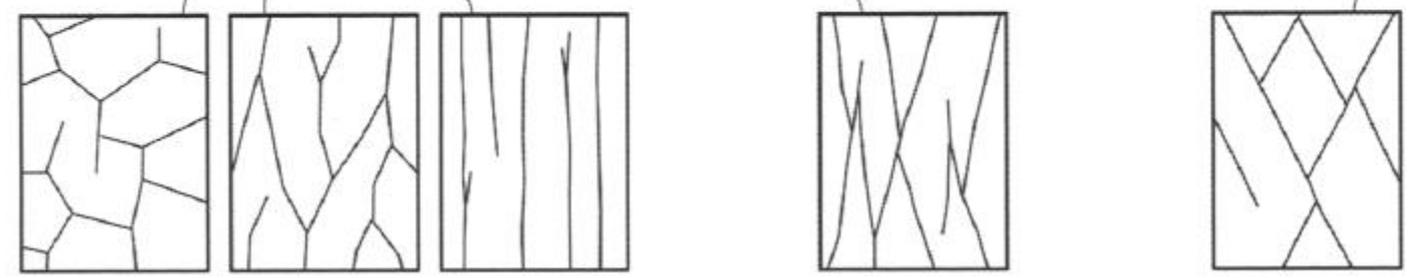
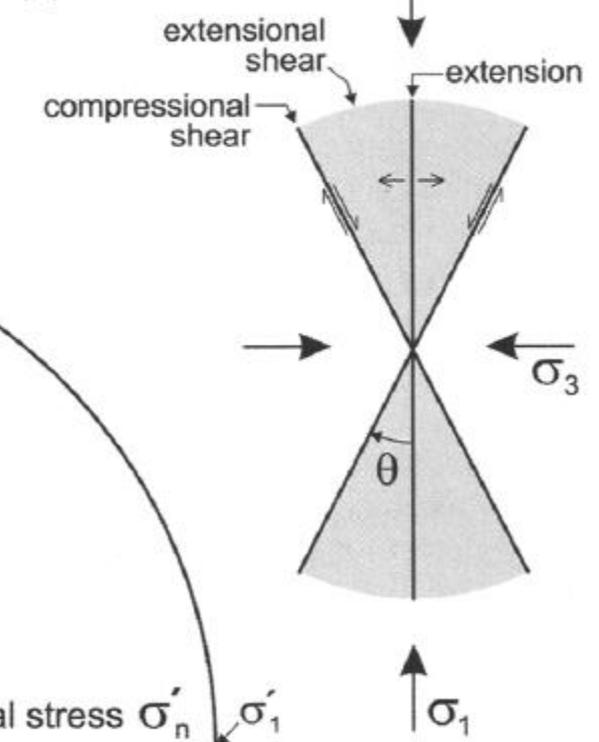
Griffith theory



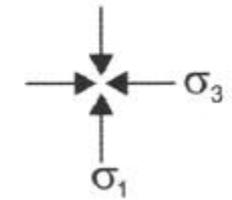
(a) Mohr diagram



(b) Failure modes



fracture patterns associated with each stress circle



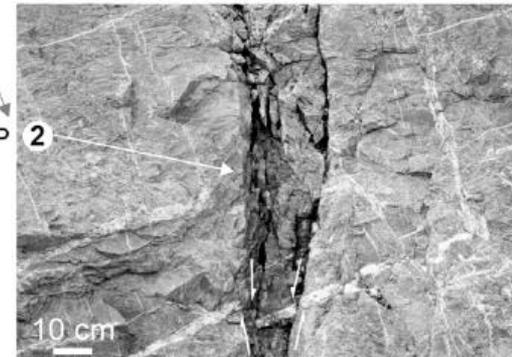
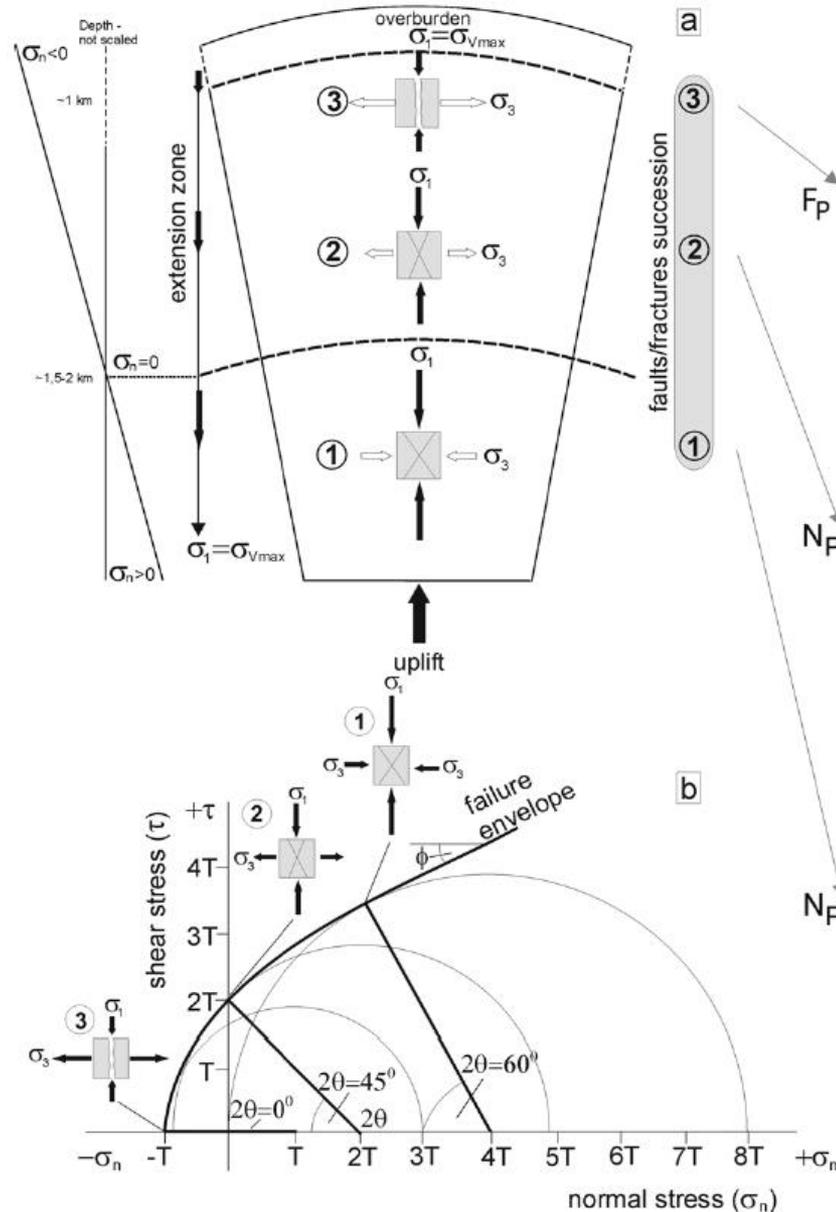
Application

Holy Cross Montains,
Pologne
Konon, 2004

Différentes phases
d'uplift ont été
déterminées
indépendamment.

Ici les chronologies de
fractures sont
compatibles avec une
diminution de la
profondeur...

Initiation de fractures
« hybrides » compatible

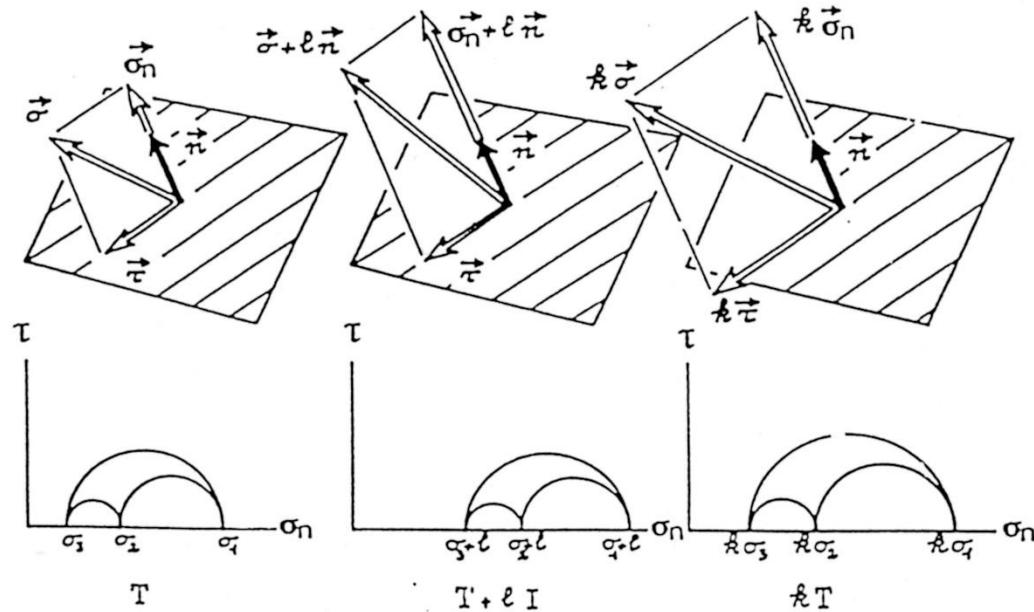


L'inversion des données de failles

This inversion method assumes that :

- (1) the analyzed body of rock is physically homogeneous and isotropic and if prefractured, is also mechanically isotropic, i.e., the orientation of fault planes is random.
- (2) the rock behaves as a rheologically linear material [Twiss and Unruh, 1998].
- (3) displacements on the fault planes are small with respect to their lengths and there is no ductile deformation of the material and thus no rotations of the fault planes.
- (4) a tectonic event is characterized by a single homogeneous stress tensor.
- (5) the slip responsible for the striation (s) occurs on each fault plane in the direction and the sense of the maximum resolved shear stress on each fault plane, the fault plane being the preexisting fracture.
- (6) the slip on each of the fault planes is independent of each other.

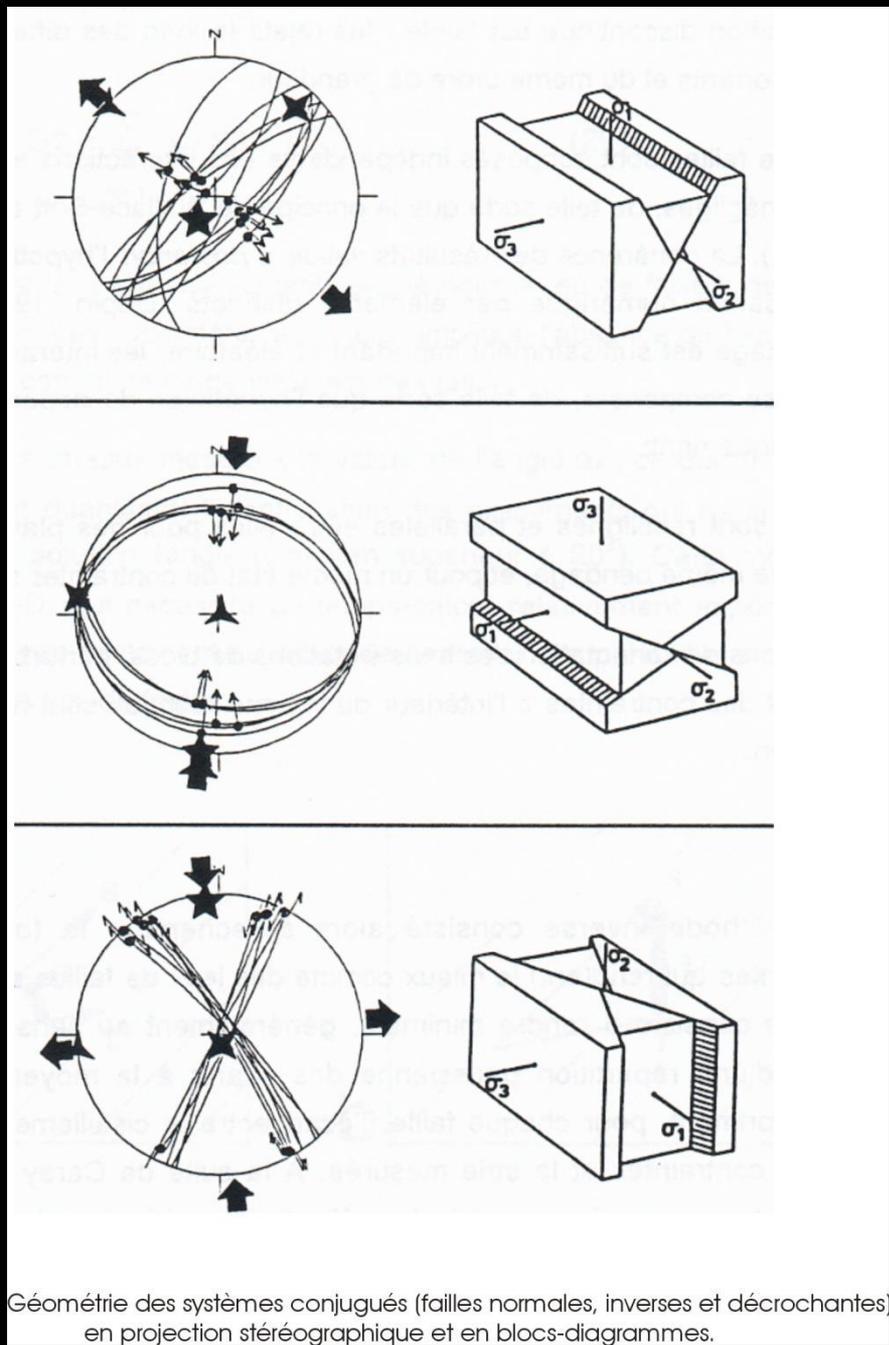
Notion de tenseur réduit (4 paramètres)



$$T = k T' + l I$$

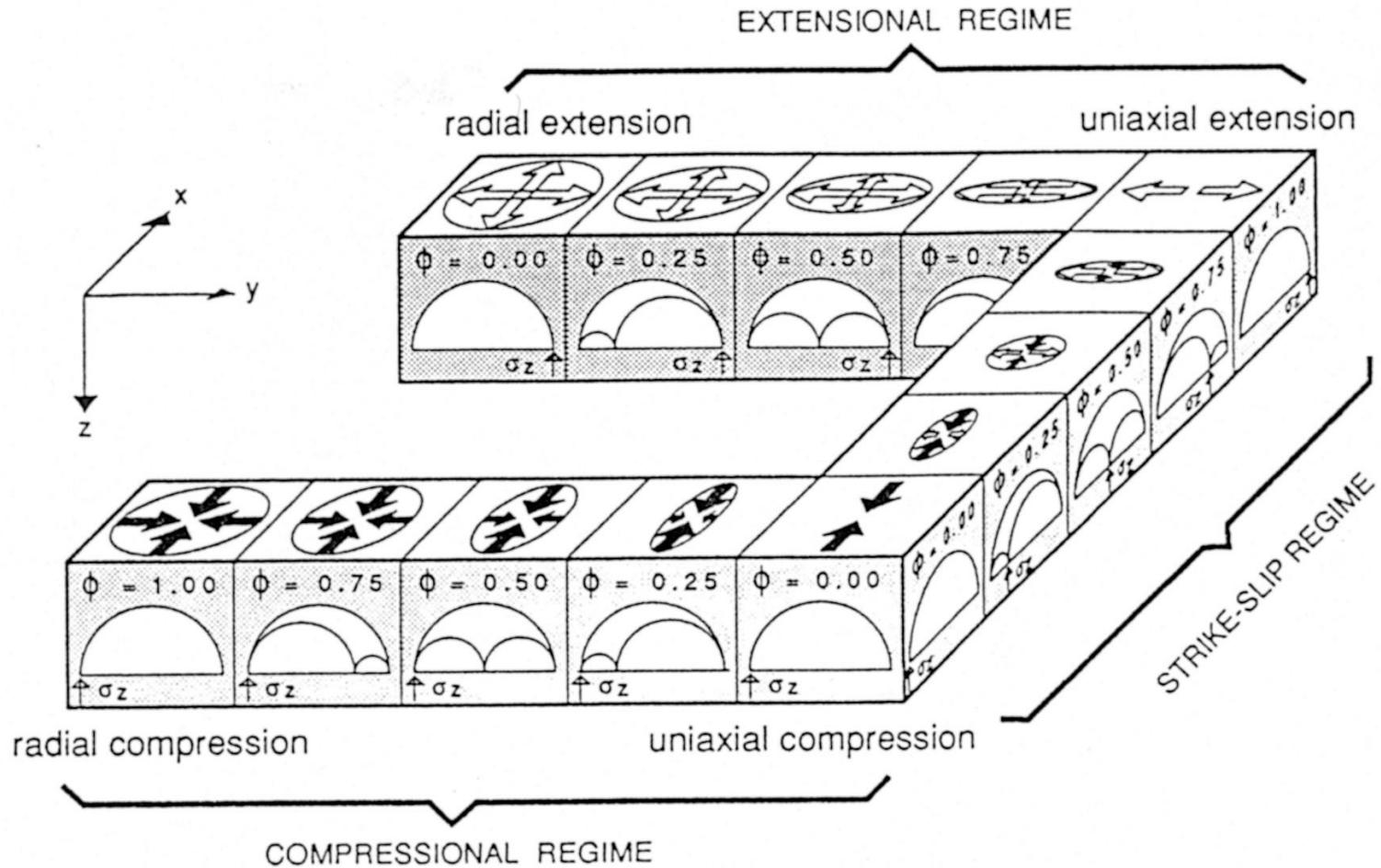
T : tenseur complet, et T' : tenseur réduit

$$k = (\sigma_1 - \sigma_3), \quad l = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$$



Géométrie des systèmes conjugués (failles normales, inverses et décrochantes) en projection stéréographique et en blocs-diagrammes.

Déformation cassante- Contraintes



(Ritz, 1994)

**Le principe de la séparation
des épisodes tectoniques superposés**

1. Compatibilité mécanique des structures
(en termes de tenseurs des contraintes)

2. Datation « sédimentaire » des structures
Age des terrains affectés
Tectonique syn-sédimentaire

3. Datation relative des structures
Recoupement de structures
Superposition de stries
Datation par rapport au plissement

De la chronologie des structures à la chronologie des épisodes tectoniques







Nikon



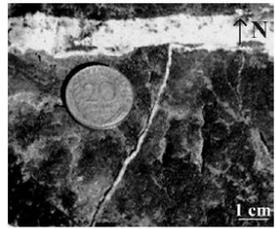




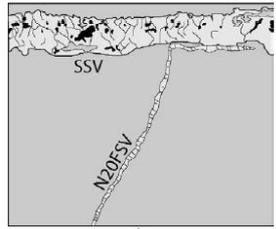
Chronologie de fractures



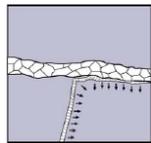
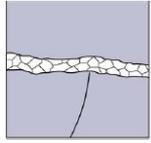
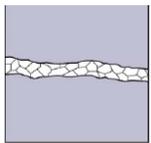




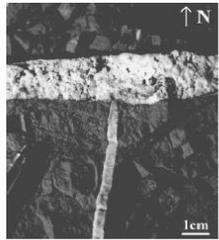
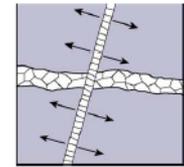
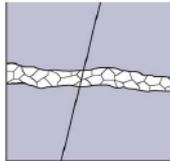
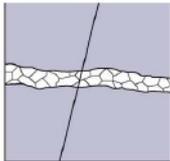
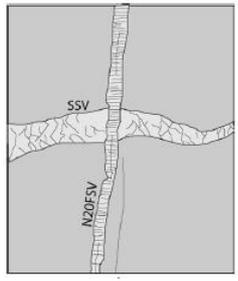
a



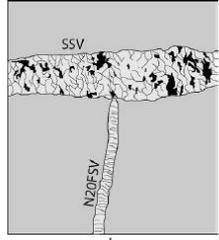
b



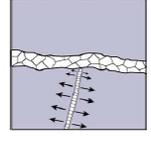
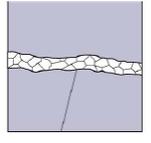
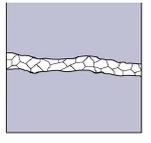
a



a



b

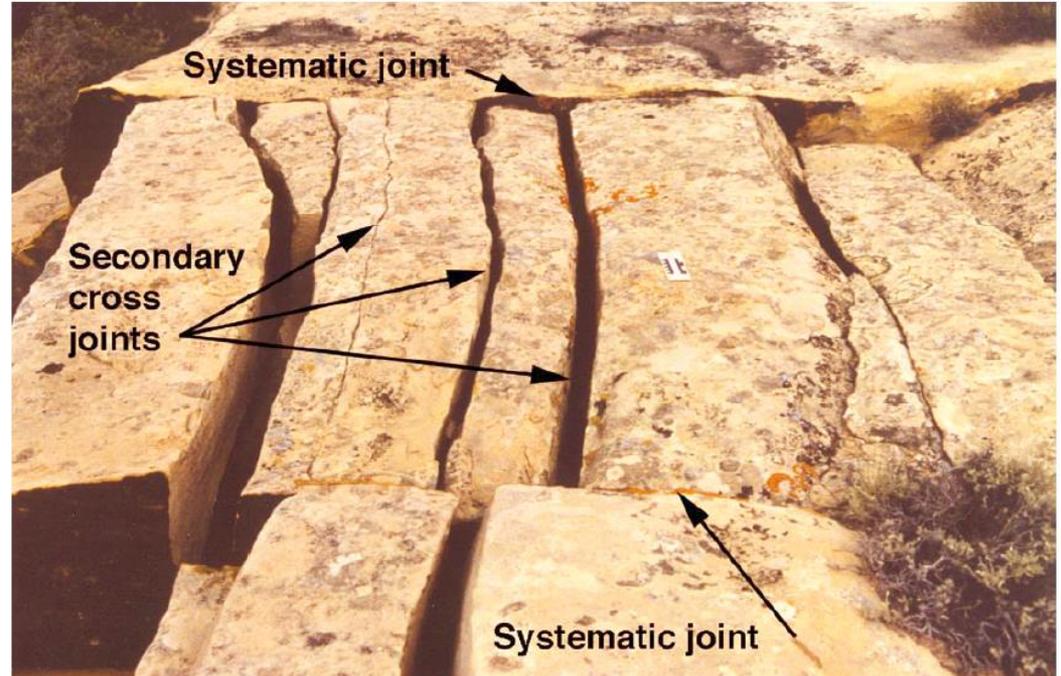


2

1

Chronologie de fractures

Chronologie – comment obtenir une disposition en fractures orthogonales



Chronologie des fractures

Il faut absolument faire une étude statistique !

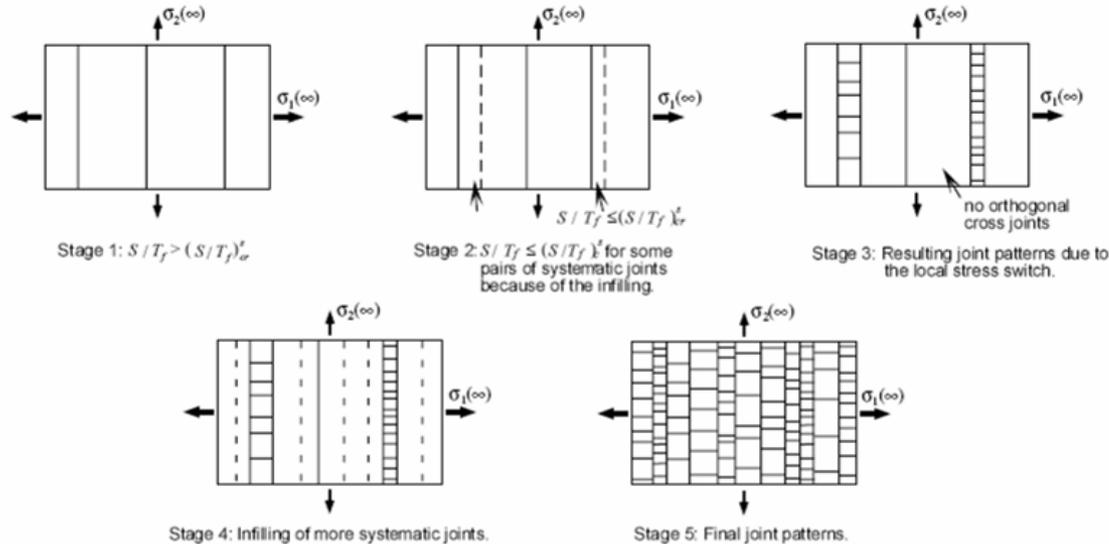
Attention aux fractures perpendiculaires !
La deuxième génération n'est pas forcément
reliée à un champ de contrainte régional (avec
permutation).

Perturbation de contraintes

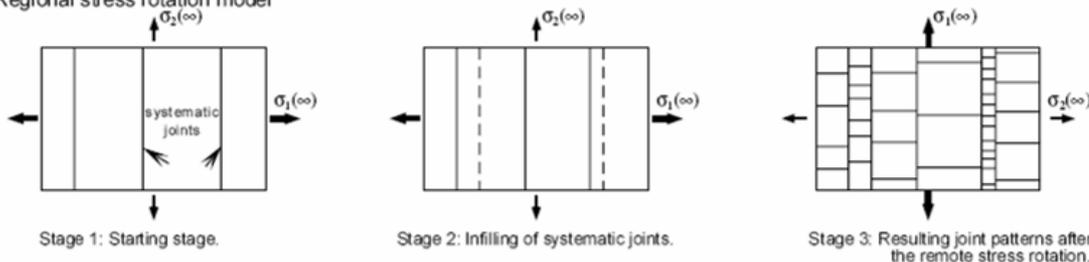
Autour d'une fracture, il existe une perturbation de contrainte qui créer notamment une zone peu favorable à la propagation d'un nouveau défaut : **la stress shadow**

Lorsque deux joints sont proches, les conditions deviennent défavorables pour créer un nouveau joint. Et si les contraintes le permettent, **la permutation locale de contraintes** sera à l'origine d'une fracture à **90° des précédentes**.

(a) Local stress switch model

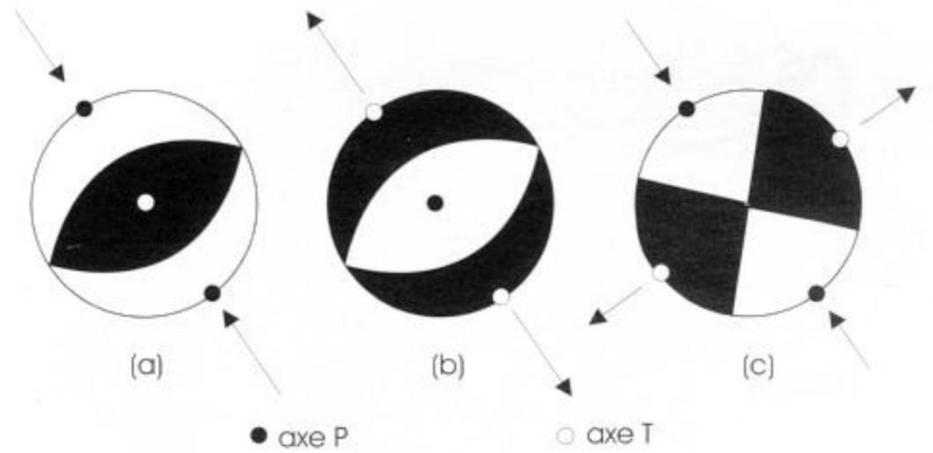
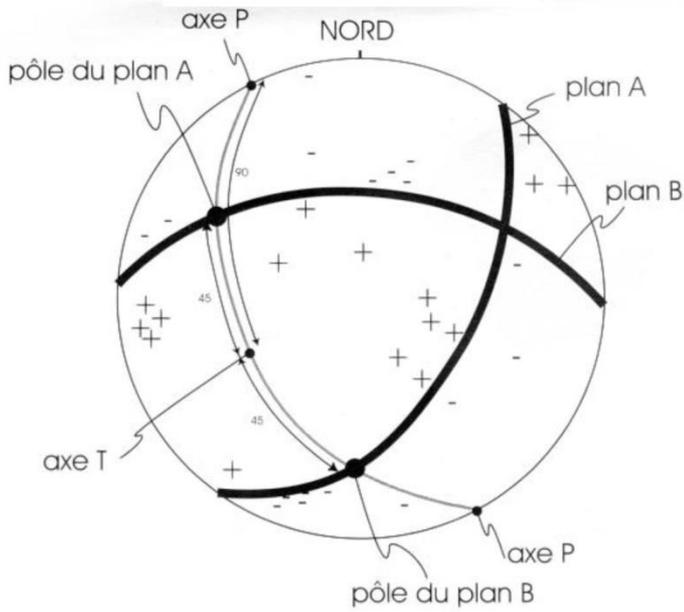
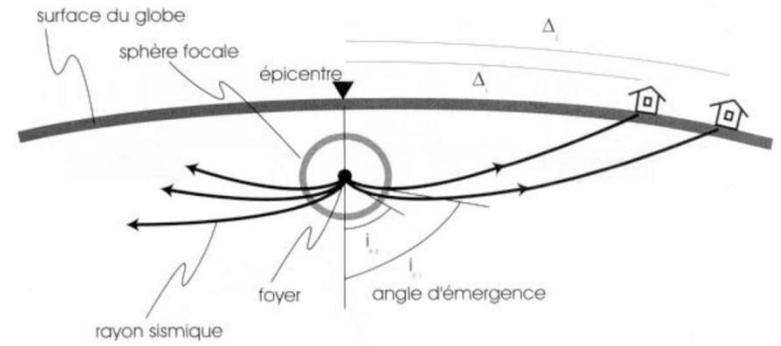
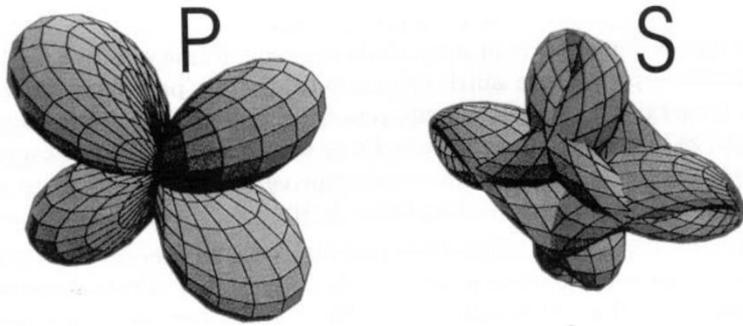


(b) Regional stress rotation model

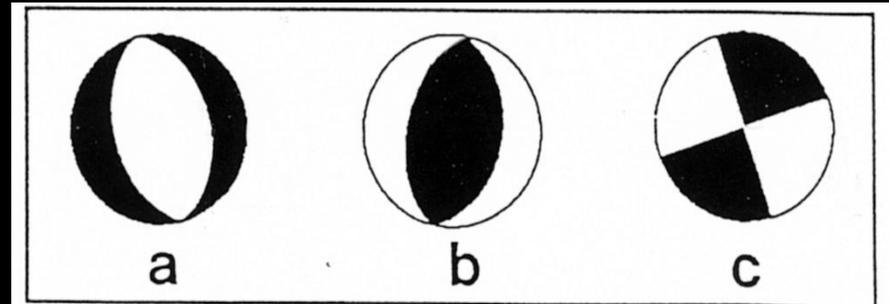
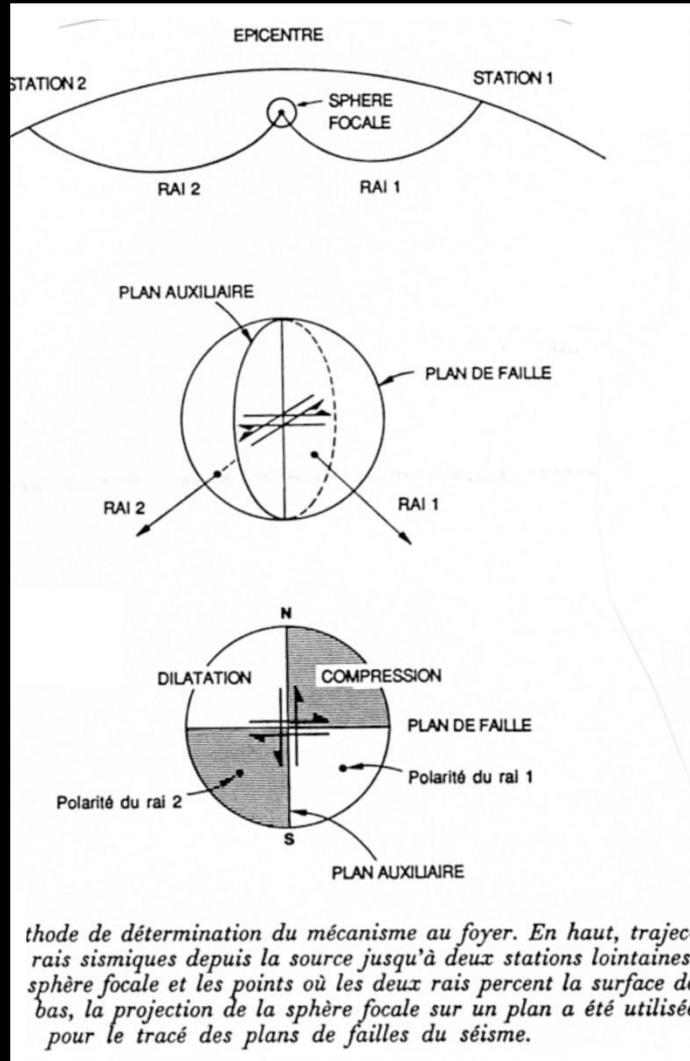


**Pas de signification
régionale**

L'interprétation des séismes

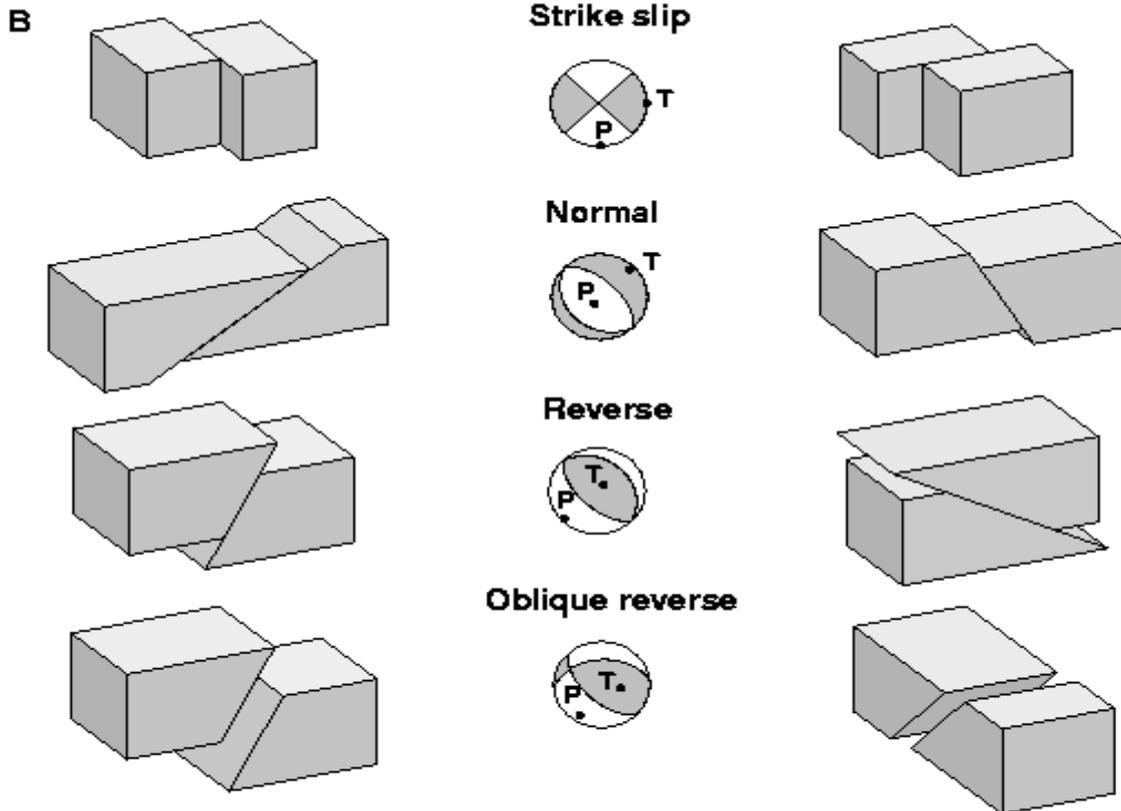
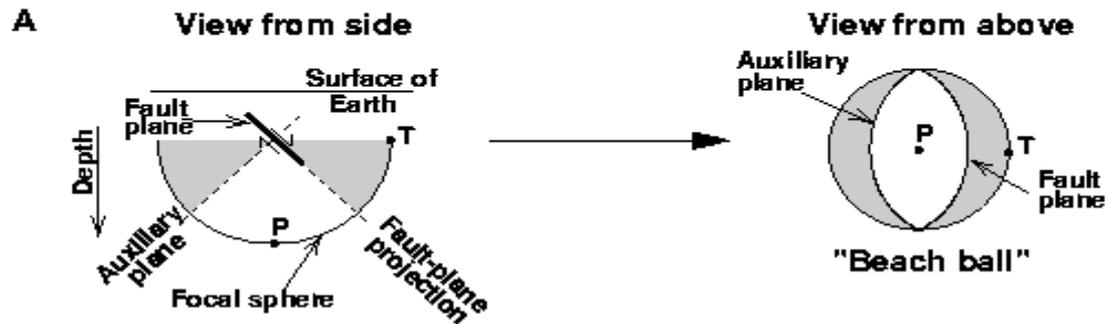


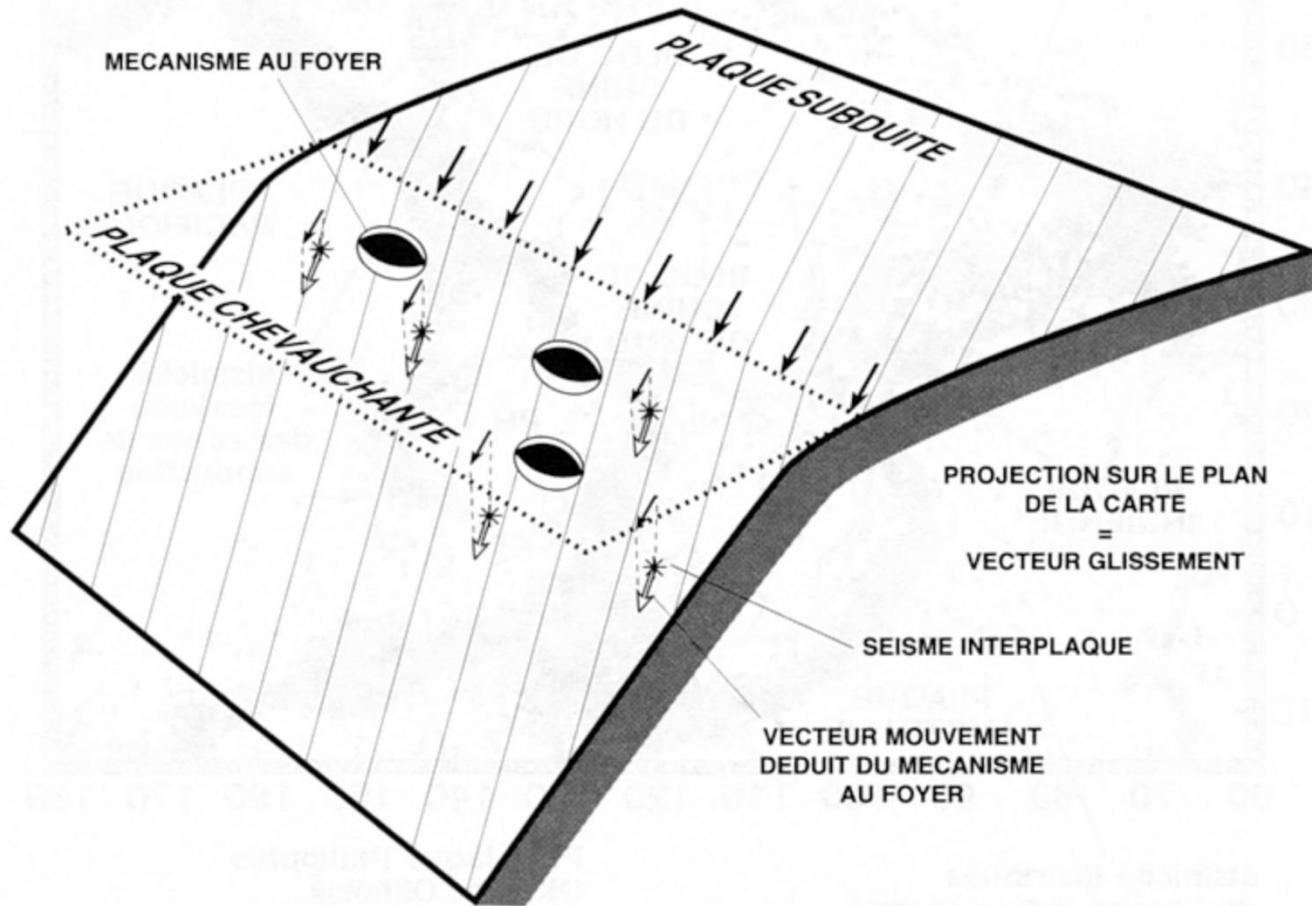
(Madariaga et Perrier)



Demi-sphère focale inférieure pour des séismes en faille normale (a), faille inverse (b) et faille à coulissage horizontal (c).

Schematic diagram of a focal mechanism





(Jolivet et Nataf)