

Stabilité des parois rocheuses



Christian Schroeder ULB - CES Consult
christian.schroeder@ulb.ac.be ces-consult@skynet.be

Journée d'étude SBGIMR – 10/03/2015
Les techniques de clouage des parois



La problématique de la stabilité des parois rocheuses et de leur confortement par clouage ou boulonnage diffère notablement de celle des terrains meubles.

D'une part, les *massifs rocheux* sont des milieux essentiellement *discontinus*. Ils consistent en assemblages de *matériaux rocheux*, de même nature ou de natures différentes, divisée en blocs de formes plus ou moins variées par des *discontinuités* diverses.

D'autre part, le renforcement des parois rocheuses est le plus souvent réalisé en *remédiation* à une situation d'instabilité (mitigation).

La stabilisation de *talus de déblais* en roches cohérentes est en général peu pratiquée. Si le talus est dimensionné pour le long terme, il est supposé résister. Dans le cas du court terme (chantier), il est souvent estimé qu'il est possible de se passer de renforcement, sauf cas de massifs constitués de "roches tendres", à la limite des sols (marnes par exemple) ou dans les cas de massifs tellement fracturés qu'ils peuvent être traités comme des sols (à gros grains!).



L'étude du comportement mécanique des massifs rocheux (le cas échéant intégrant les inclusions) doit donc principalement porter sur:

- la nature et les propriétés mécaniques des **matériaux rocheux** les constituant;
- les caractéristiques des **discontinuités** présentes:
 - géométrie (orientation, fréquence...);
 - comportement mécanique (remplissage, rugosité, altération...).

Les caractéristiques des *matériaux rocheux* sortent du cadre de cette journée
En revanche, les points suivants seront abordés:

1. rappel sur les différentes discontinuités et leurs principales caractéristiques;
2. approche du renforcement des parois rocheuses:
 - les rôles des inclusions;
 - types d'inclusions et de dispositifs externes;
3. aperçu des méthodes de calcul
 - cas d'un petit nombre ($< 4 - 5 - 6$) de familles de discontinuités;
 - massifs intensément fracturés:
 - méthodes empiriques (RMR - Q);
 - critère de Hoek & Brown.



1. Les discontinuités (souvent appelées simplement "joints")

- tectonique *cassante* (par opposition aux déformations *souples*, *plastiques* ou *visqueuses*),
- tectonique de compression ou d'extension (de cisaillement);

Importance de distinguer les types de discontinuités en fonction de leur genèse et de la nature des épontes => conséquences sur les propriétés mécaniques et hydrauliques

- classification des discontinuités en fonction de l'amplitude du déplacement (rejet) des lèvres (épontes)
(N.B. quelle que soit l'échelle, les phénomènes sont similaires)

pas de rejet (ou de qq mm à 1 cm) : **joint**

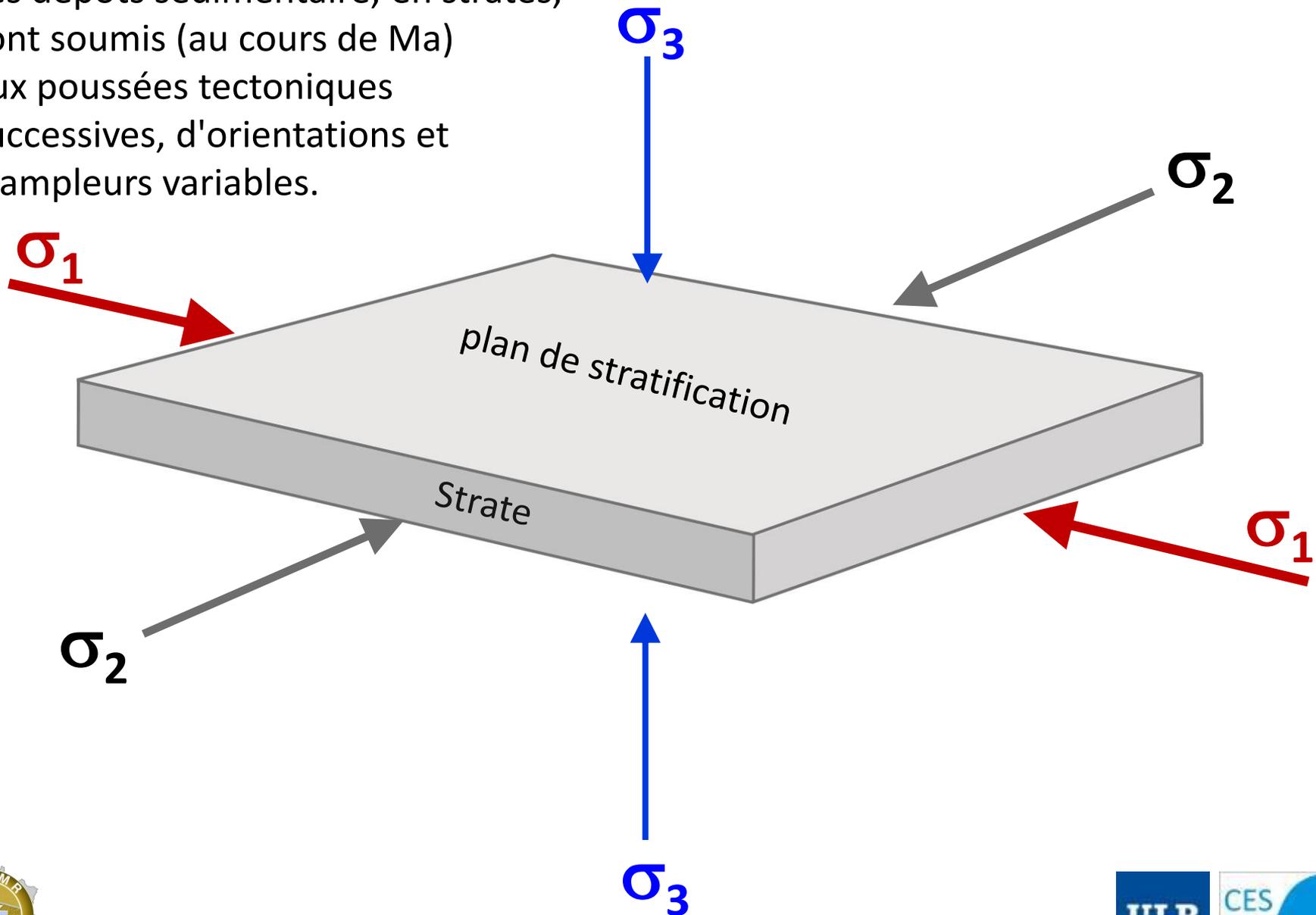
rejet de qq cm à 1 m : **fracture** (ou faille)

rejet métrique à décamétrique (kilométrique) : **faille**

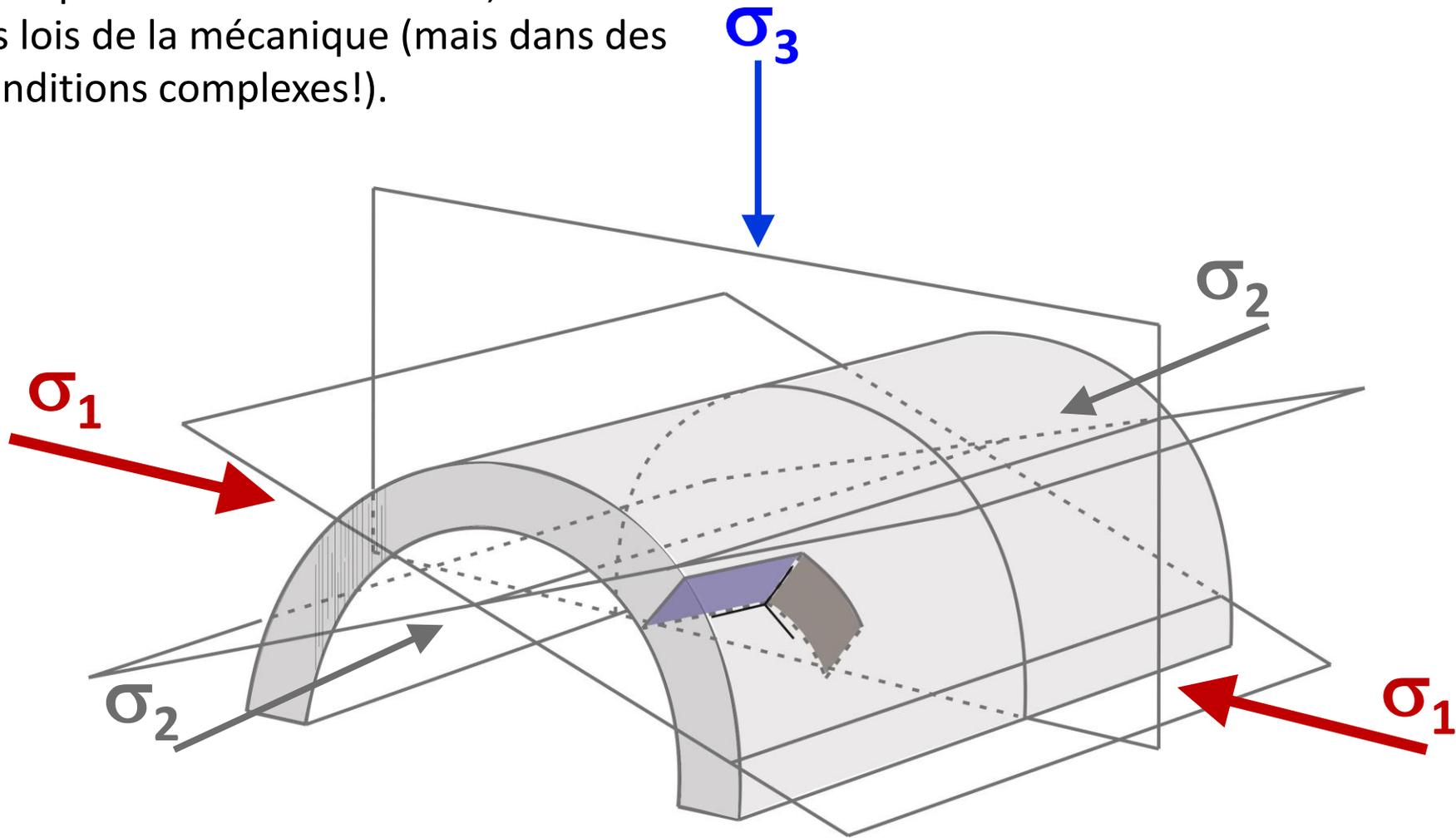
rejet de qq km à qq centaines de km : charriage



Les dépôts sédimentaire, en strates, sont soumis (au cours de Ma) aux poussées tectoniques successives, d'orientations et d'ampleurs variables.



Ils se plissent et se fracturent, en suivant les lois de la mécanique (mais dans des conditions complexes!).



Il en résulte un certain nombre de fractures, fissures, diaclases, schistosités et autres discontinuités.



Parfois, les discontinuités sont aisées à identifier et à quantifier...

diaclasses

stratification



Parfois, c'est moins évident...



Vraiment moins évident...



2. Aperçu du renforcement des parois rocheuses

Les discontinuités découpent le massif rocheux en "**blocs**" dont il faut assurer la stabilité. Cette fonction est en général remplie par des dispositifs de **stabilisation interne** par **inclusions** (clous , boulons...) couplés ou non à des éléments de **stabilisation externe** (béton projeté, filets...).

Rôles des inclusions :

- **rôle porteur** : les ancrages (boulons à ancrage ponctuel...) soutiennent mécaniquement le ou les blocs instables. Ils travaillent au cisaillement et/ou en traction
- **rôle restructurant** : comme dans le cas des sols cloués, les boulons (à ancrage réparti) ou autres dispositifs ont pour but de solidariser les blocs entre eux et de limiter (empêcher) tout mouvement susceptible de compromettre l'équilibre des blocs entre eux (en fait, un mouvement minime est nécessaire pour mobiliser la résistance).
- **rôle confinant**: pour mémoire (application aux tunnels - NATM)

Même si plusieurs rôles peuvent être joués simultanément, il y a en général un aspect principal au renforcement.

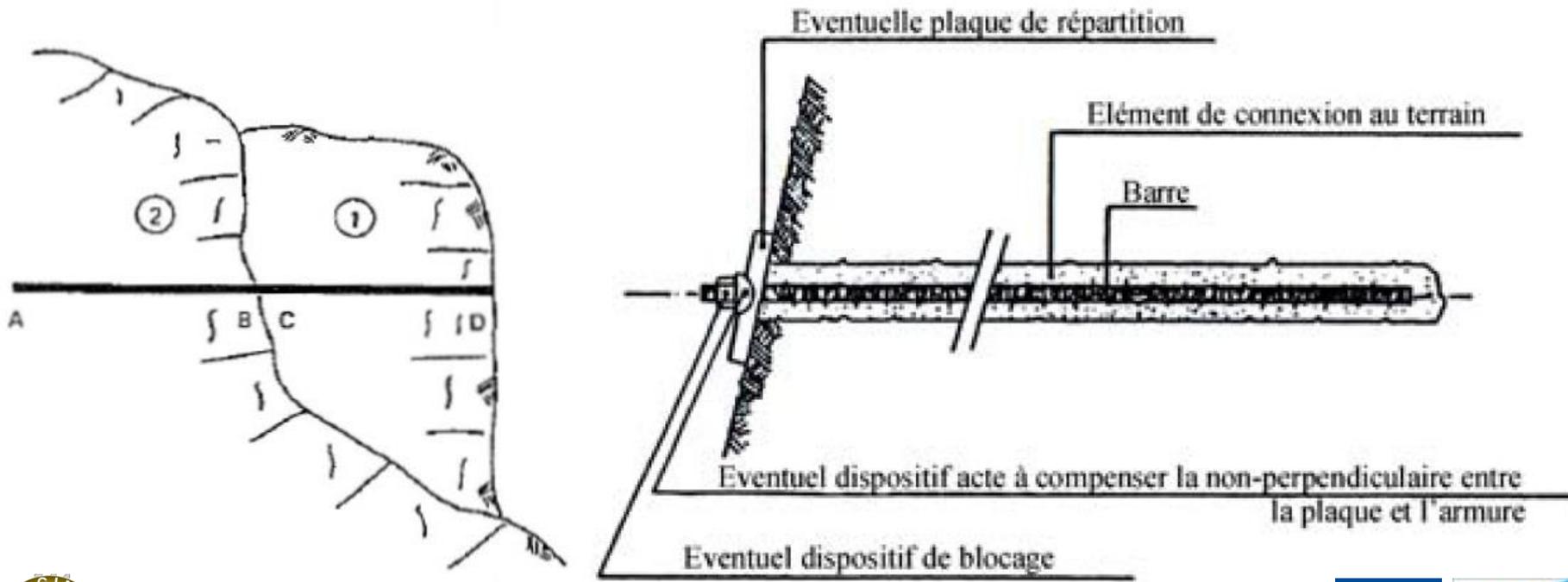


Types d'inclusions et dispositifs externes

- *Inclusions*

Clou d'ancrage - ancrage passif

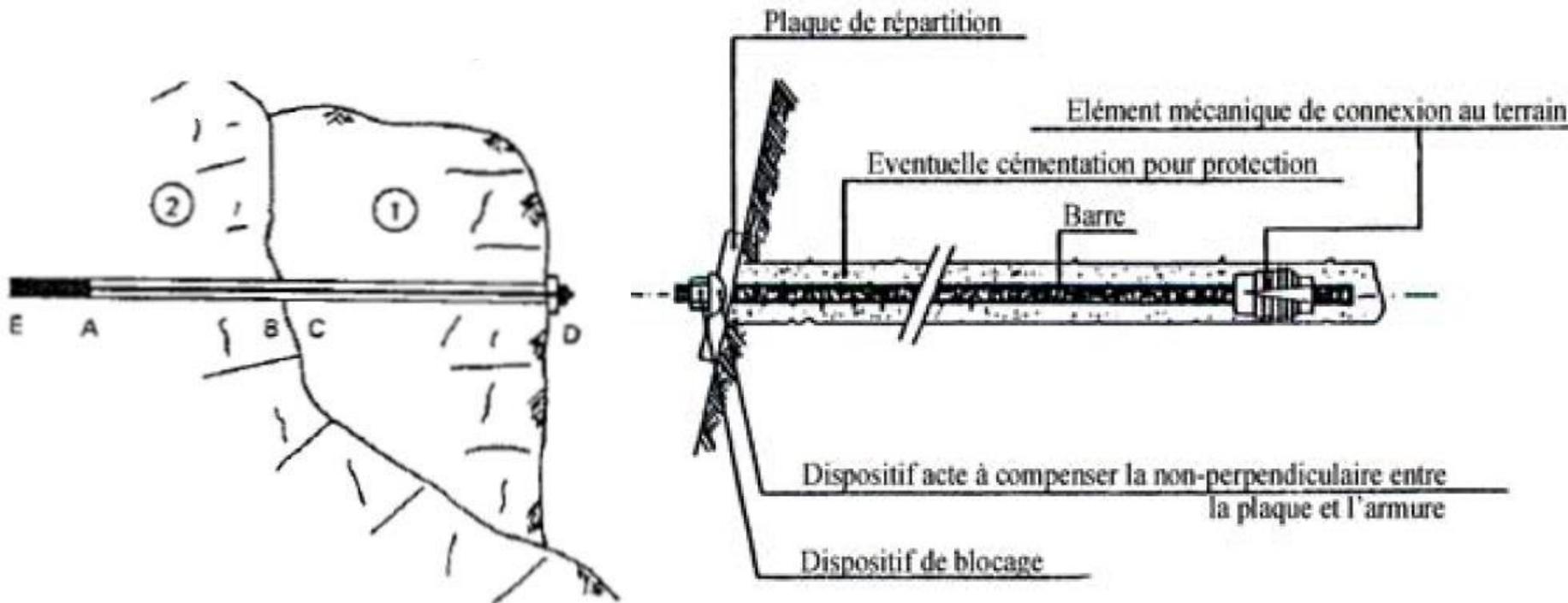
- scellement sur toute la longueur (de A à D) dowel
[injection (ciment, résine...), expansion ...]



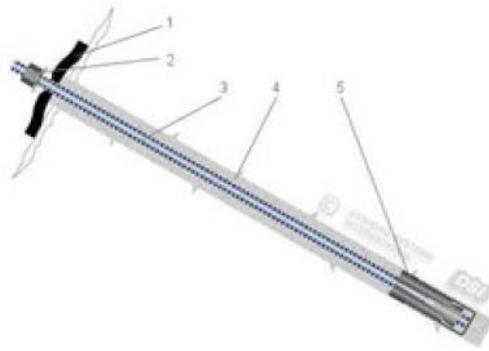
Boulon d'ancrage - ancrage actif

- mis en tension
- scellement "ponctuel" à l'extrémité (de E à A)
- (cimentation, cheville à expansion ...)
- longueur libre
- protection corrosion

bolt

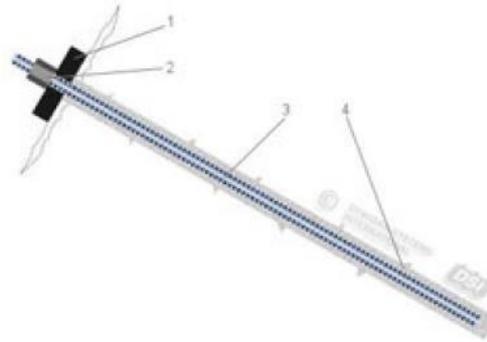


Boulon à cheville à expansion (avec ou sans coulis de ciment)



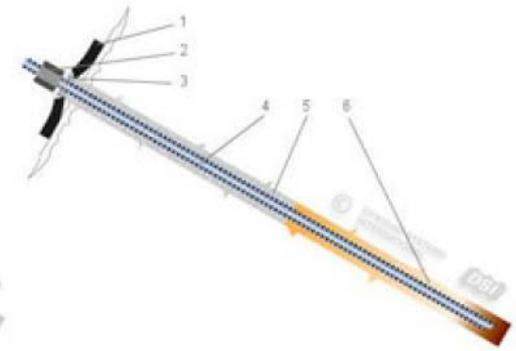
- 1 - plaque d'ancrage bombée
- 2 - écrou à embase sphérique
- 3 - barre nervurée
- 4 - coulis de ciment
- 5 - cheville à expansion

Clou SN



- 1 - plaque d'ancrage
- 2 - écrou
- 3 - barre nervurée
- 4 - coulis de ciment

Boulon à résine



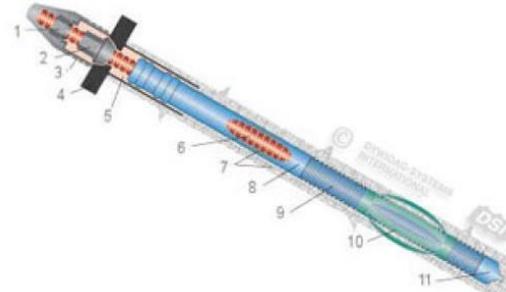
- 1 - plaque bombée
- 2 - écrou droit
- 3 - calotte sphérique
- 4 - barre nervurée
- 5 - coulis de ciment
- 6 - résine

Tirant provisoire



- 1 - écrou en plastique
- 2 - écrou à embase sphérique
- 3 - capot
- 4 - plaque d'ancrage
- 5 - gaine
- 6 - barre nervurée
- 7 - distanceur corbeille

Tirant permanent



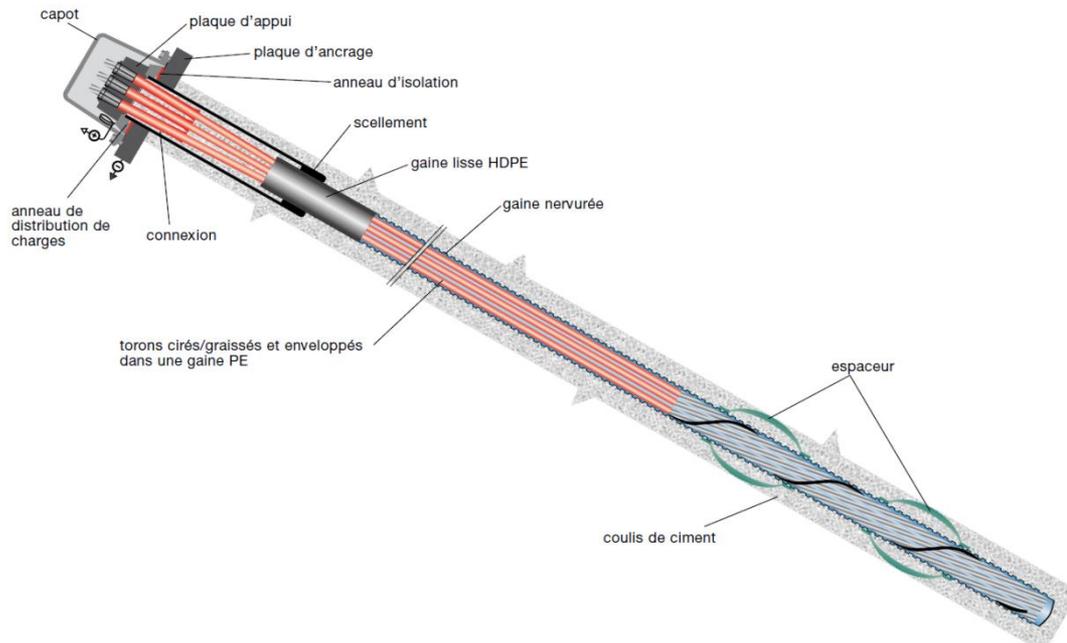
- 1 - écrou en plastique
- 2 - écrou à embase sphérique
- 3 - capot
- 4 - plaque d'ancrage
- 5 - produit souple anti-corrosion
- 6 - barre nervurée
- 7 - coulis de ciment
- 8 - gaine lisse
- 9 - gaine nervurée
- 10 - distanceur corbeille
- 11 - coiffe de pied

DSI DYWIDAG-SYSTEMS
INTERNATIONAL



Tirants d'ancrage DYWIDAG câble selon EN 1537

Tirant d'ancrage câble permanent électriquement isolé



Swellex - AtlasCopco



Système Titan™ ancrage autoforant avec injection



- *Dispositifs externes*

La technique d'ancrage est souvent associée à des dispositifs externes de surface (béton projeté, filets ...) et/ou à des mesures de soutènement (poutre et piliers en béton) qui ressortissent au domaine du génie civil.



Renforcement d'un tympan de tunnel
in Les méthodes d'analyse spécifiques à la mécanique des roches



Tunnel du Grousselerbiertg (G-D Luxembourg, 2002)

Photo C. Trève





Bas Oha (1998)

Tractebel Development Engineering

Exposé d'Alain Van Cotthem



Le passage d'une zone failleuse cause un manque d'adhérence entre les Swellex et la roche...



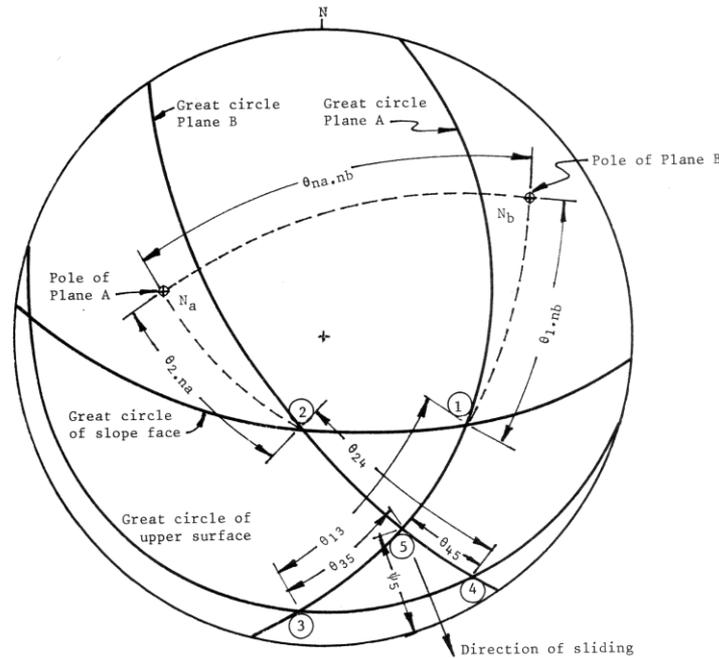
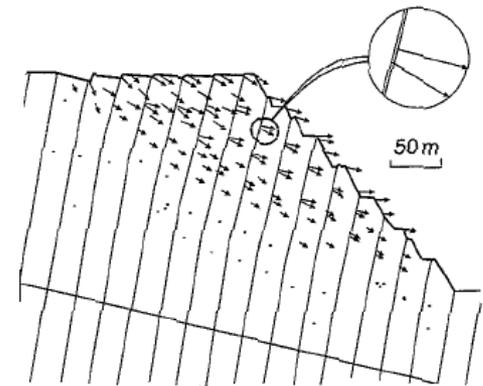
Tunnel de Soumagne, 2002
Photo C. Trève

Les ancrages peuvent aussi être associés à des dispositifs (filets et grillages plaqués) destinés à limiter l'extension et les conséquences des phénomènes d'altération superficielle du massif rocheux et à empêcher l'initiation des mouvements entre blocs.

(même si leur travail efficace requiert un minimum de déplacement)



3. Un aperçu des méthodes de calcul



$$F = \frac{3}{\gamma H} (c_A \cdot X + c_B \cdot Y) + (A - \frac{\gamma_w}{2\gamma} \cdot X) \tan \phi_A + (B - \frac{\gamma_w}{2\gamma} \cdot Y) \tan \phi_B$$

c_A and c_B are the cohesive strengths of planes A and B
 ϕ_A and ϕ_B are the angles of friction on planes A and B
 γ is the density of the rock
 γ_w is the density of water
 H is the total height of the wedge

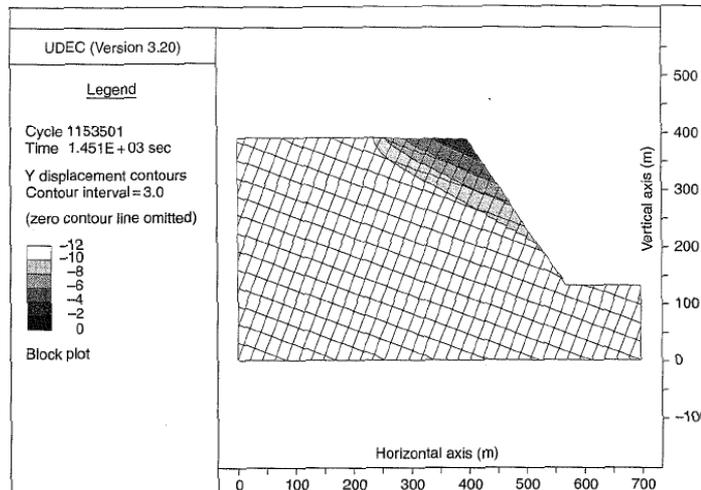
$$X = \frac{\sin \theta_{24}}{\sin \theta_{45} \cdot \cos \theta_{2,na}}$$

$$Y = \frac{\sin \theta_{13}}{\sin \theta_{35} \cdot \cos \theta_{1,nb}}$$

$$A = \frac{\cos \psi_a - \cos \psi_b \cdot \cos \theta_{na,nb}}{\sin \psi_5 \cdot \sin^2 \theta_{na,nb}}$$

$$B = \frac{\cos \psi_b - \cos \psi_a \cdot \cos \theta_{na,nb}}{\sin \psi_5 \cdot \sin^2 \theta_{na,nb}}$$

$\psi_a \quad \psi_b \quad \psi_5$

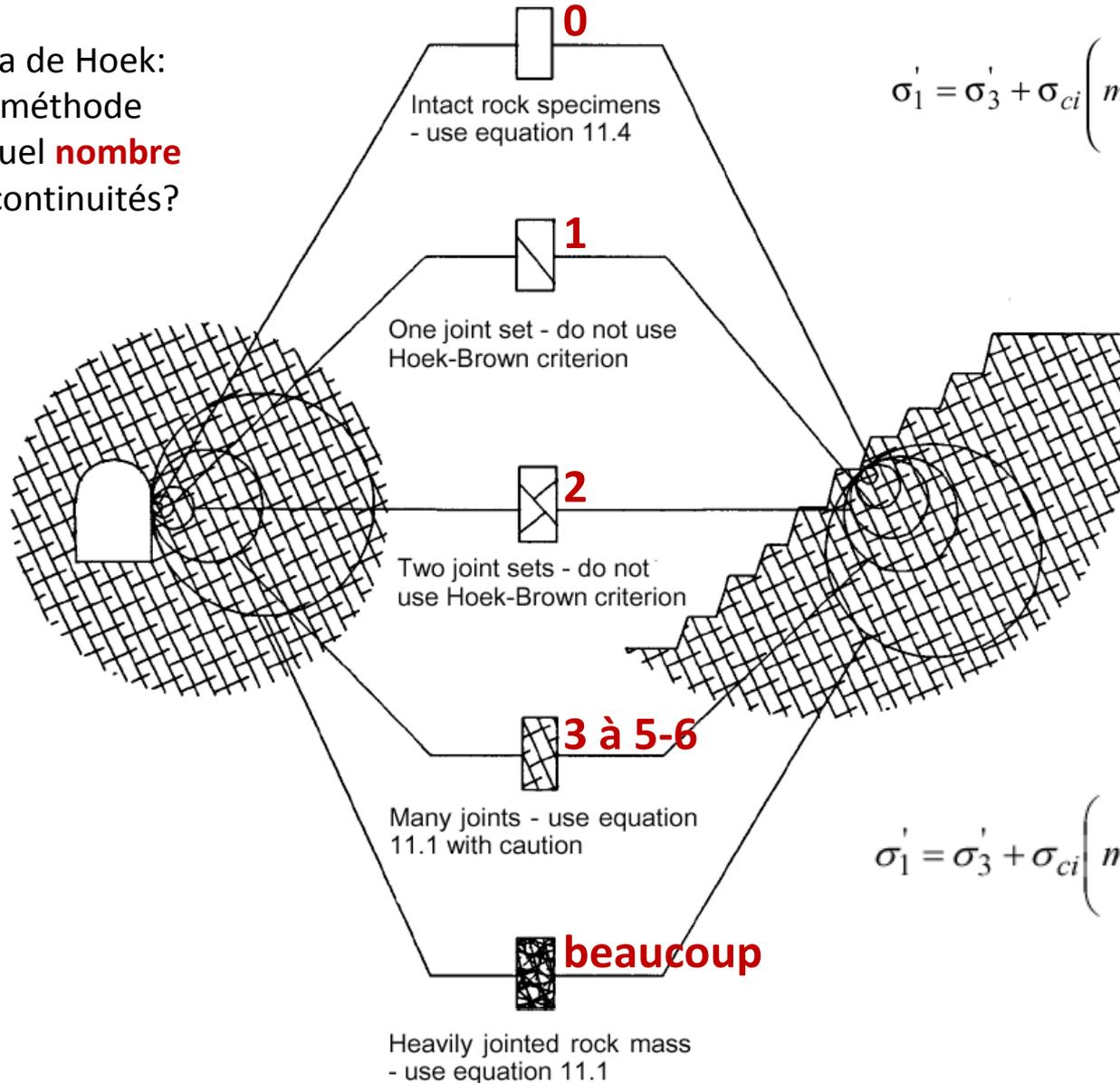


Le dimensionnement d'un renforcement, le mode de calcul, est fonction des résultats de l'analyse structurale et en particulier du ***nombre de familles de discontinuités***.

- si les blocs instables sont ***peu nombreux et bien identifiés***, le rôle porteur est prépondérant.
La solution est souvent (assez) aisément calculable
- dans le cas d'un ***petit nombre de familles de discontinuités***, (maximum 4 - 5 - 6...) dans les cas relativement simples, l'étude de stabilité peut encore se faire par une approche analytique (aidée ou non par les logiciels ad hoc):
 - glissements plans
 - glissements de coins
 - dans les cas plus complexes, des logiciels tels 3DEC® (ITASCA) peuvent être utilisés
- si les ***familles de discontinuités sont très nombreuses***, il faut passer à l'approche "clouage" - type sol- et utiliser un ***critère de rupture*** adapté.



Schéma de Hoek:
 quelle méthode
 pour quel **nombre**
 de discontinuités?



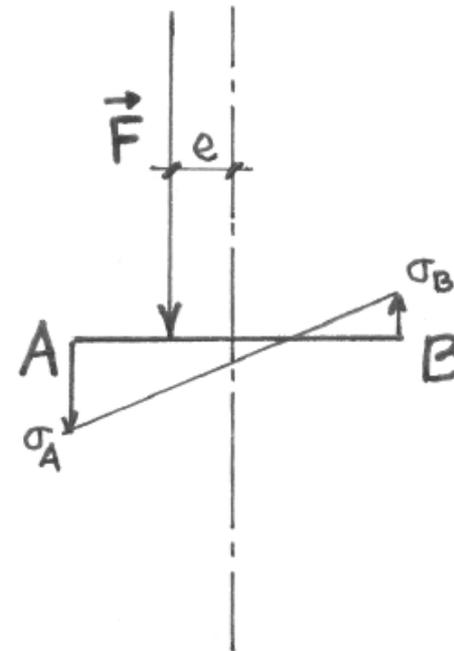
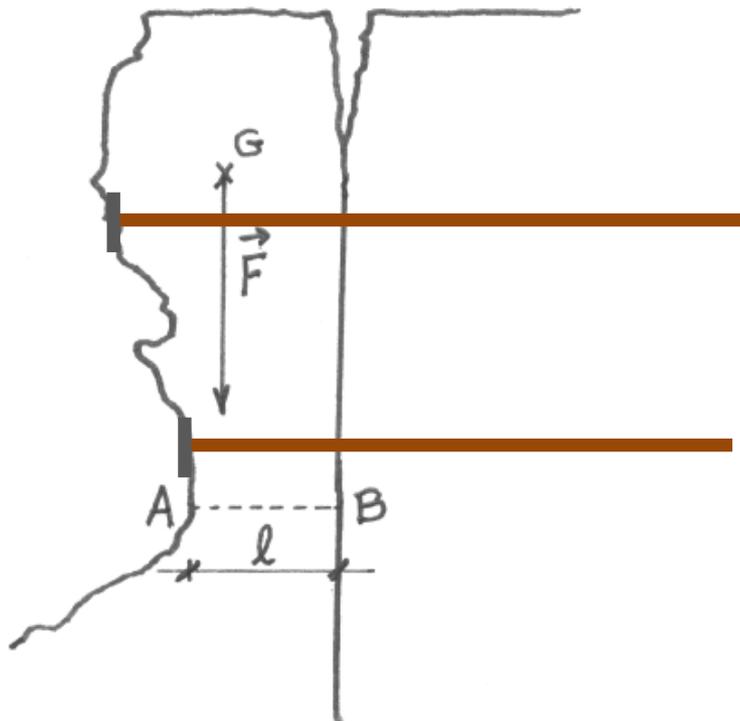
$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \left(m_i \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + 1 \right)^{0.5} \quad 11.4$$

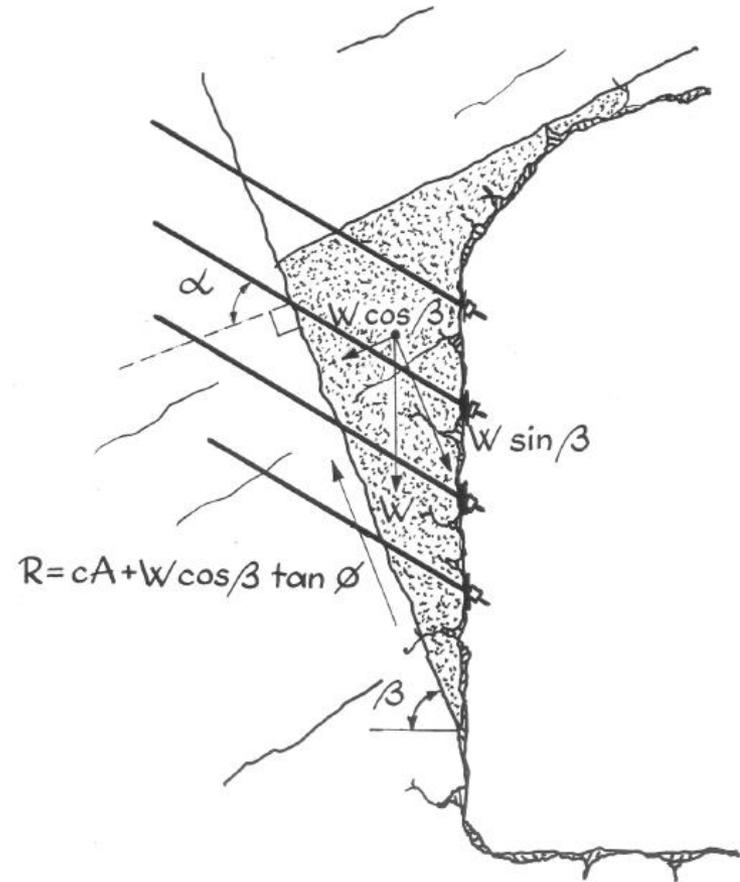
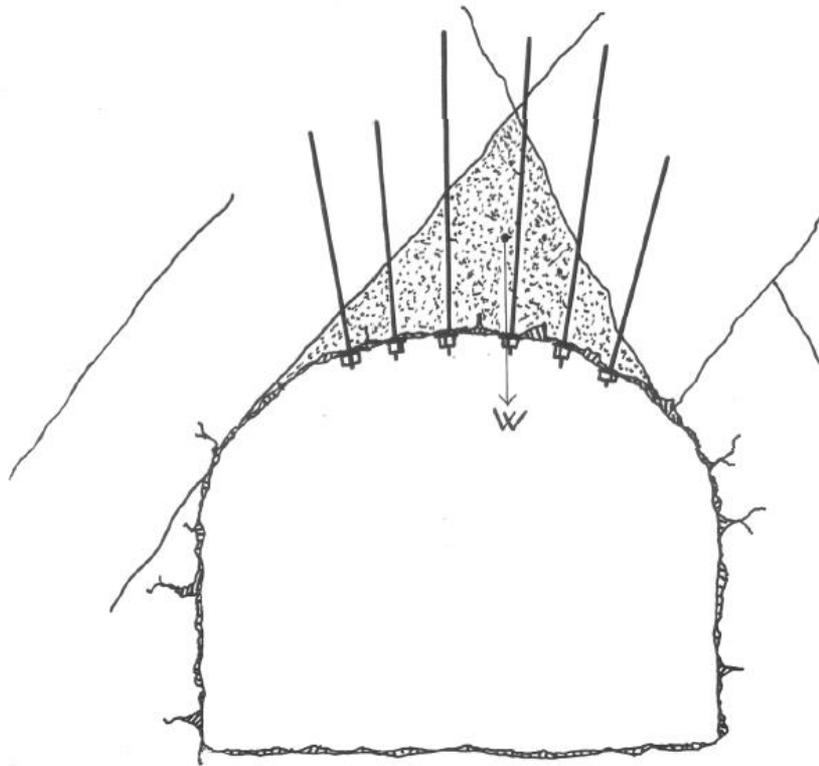
$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad 11.1$$



1. Un seul bloc avec discontinuités bien identifiées

Cas d'un bloc en surplomb





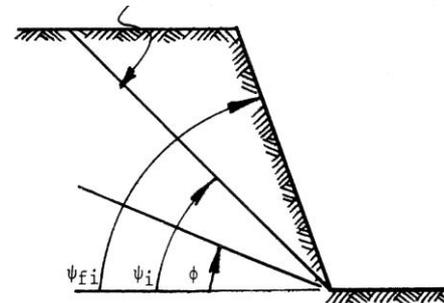
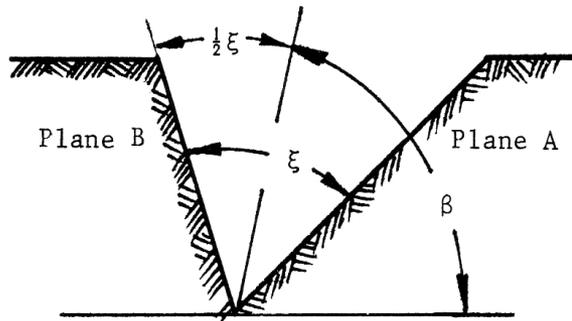
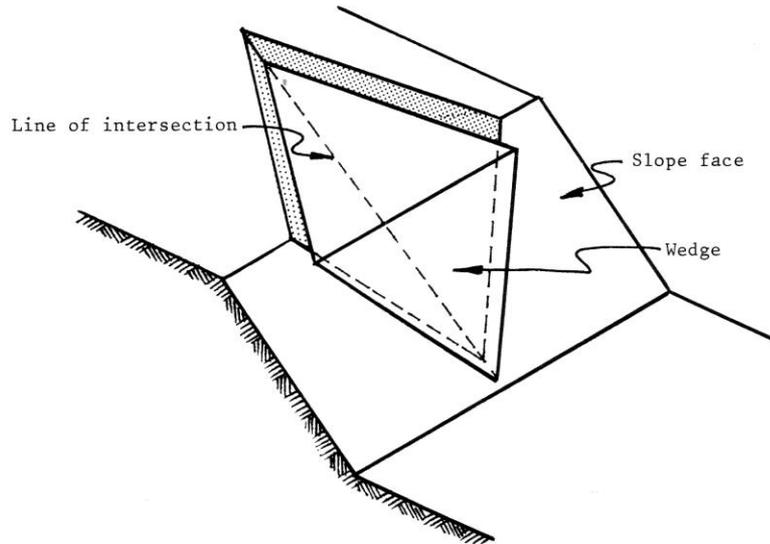
Stillborg, B. Professional User Handbook for Rock Bolting, Trans Tech Publications, 1994
 in Martin, F. Cours de travaux souterrains et de mécanique des roches CNS Cachan, 2012



2. Deux familles de discontinuités: glissement de "coin"

Milieu frottant, *sans cohésion ni pression interstitielle*

$$F = \frac{\sin\beta}{\sin\frac{1}{2}\xi} \cdot \frac{\tan\phi}{\tan\psi_i}$$



N.B.

- chaque discontinuité doit être analysée séparément en tant que glissement "plan"
- **si l'analyse structurale montre plus de 2 familles de discontinuités, l'étude porte sur les combinaisons 2 à 2 des membres de ces familles**



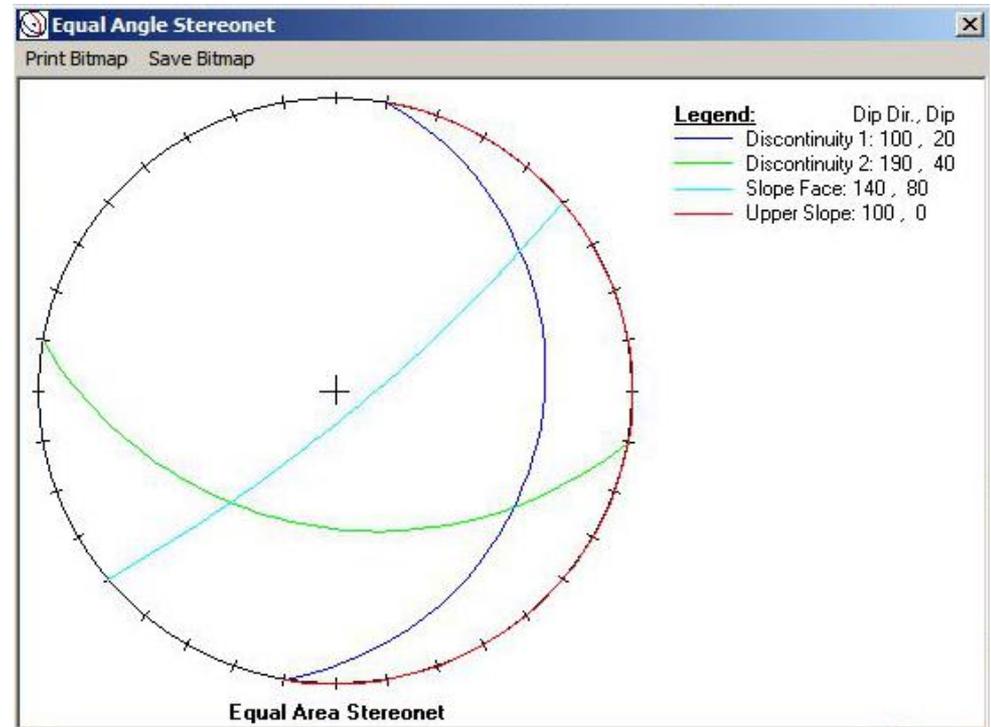
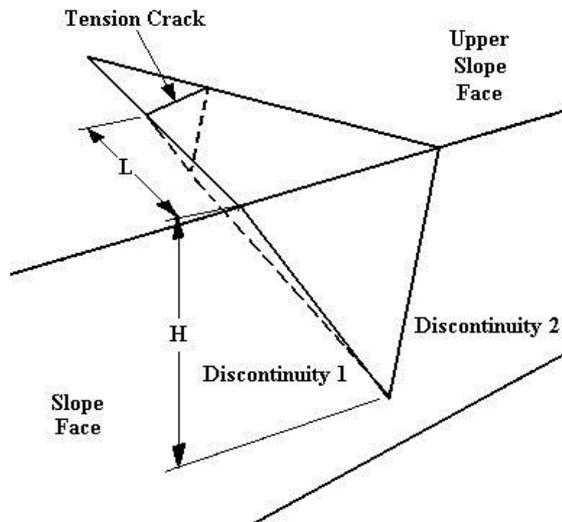
Dans le cas de discontinuités avec cohésion et/ou de pressions d'eau, les formules sont un peu plus lourdes... mais il existe des logiciels...

Orientations

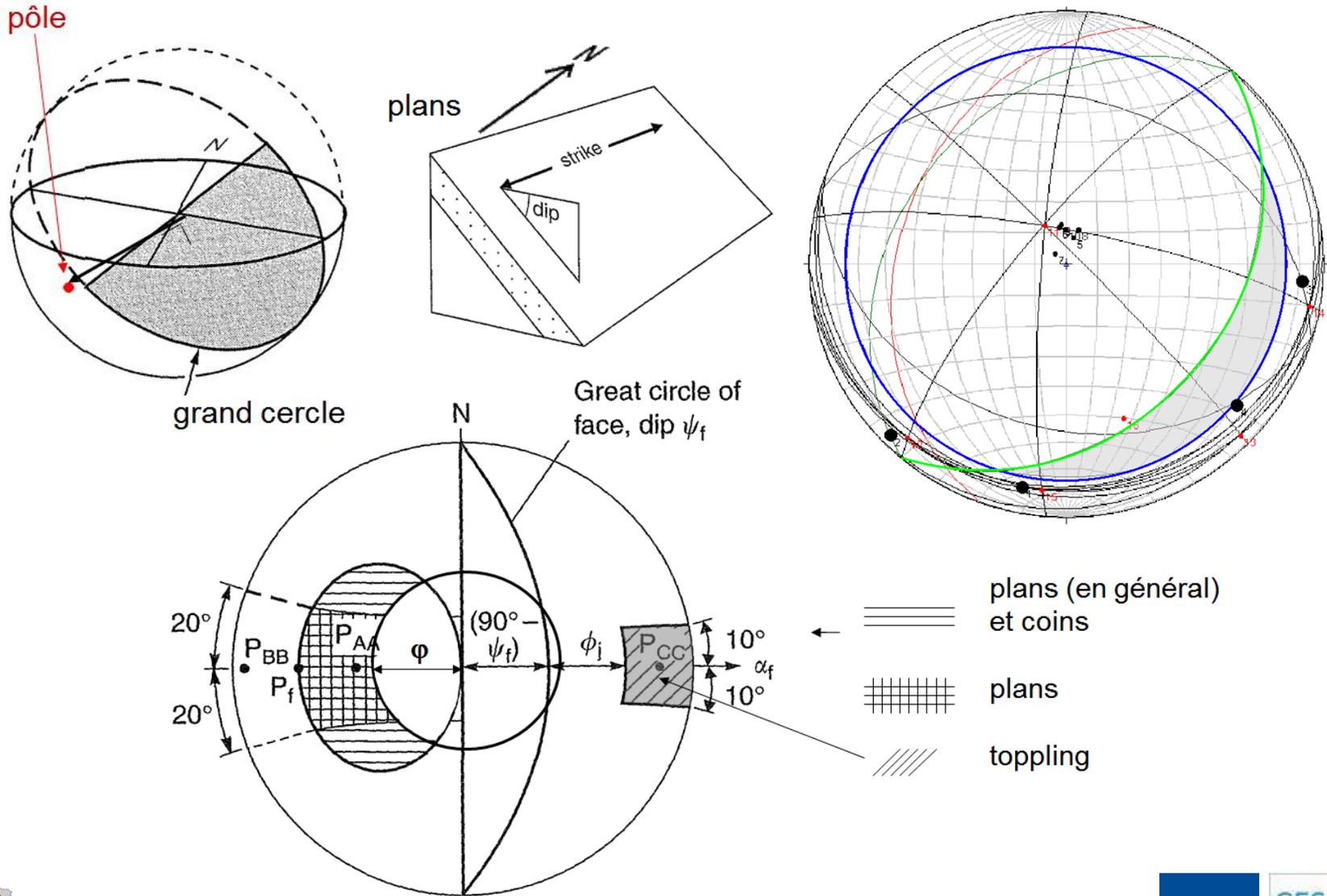
Talus : 140/80 ou 50E/80S
 Surface supérieure : 100/0 ou 10E/0
 Discontinuité 1 : 100/20 ou 10E/20E
 Discontinuité 2 : 190/40 ou 100E/40S

Exemple : Wedge[®] (E.B. Kroeger)

ou Swedge[®] (RocScience)



... et des techniques d'analyse par projections stéréographiques



Hoek, E. & Bray, J., 1981, Rock Slope Engineering 3rd ed. Institute Mining and Metallurgy, London



3. Nombreuses familles de discontinuités

Dans le cas d'un très grand nombre de familles de discontinuités, le massif rocheux peut être considéré comme un milieu continu, de la même manière qu'un sol.

Le problème est de déterminer les caractéristiques mécaniques à prendre en compte dans les méthodes appliquées aux sols.

Le V.E.R. est ici assez grand (en règle générale au minimum 5 x 5 x 5 blocs)
Il n'est donc (sauf exception) pas envisageable de mesurer directement les caractéristiques mécaniques du massif rocheux.

Celles-ci sont déterminées par des méthodes basées sur

- l'observation des discontinuités du massif rocheux (nombre de familles, état des joints...)
- les caractéristiques des matériaux rocheux composant le massif
- caractéristiques annexes (orientation de l'ouvrage, présence d'eau, endommagement...)



Ces méthodes suivent deux approches différentes :

- "classification" du massif rocheux en fonction de critères (Rc, RQD etc) débouchant sur un indice unique permettant le dimensionnement
 - RMR (Rock Mass Rating) (Bieniawski)
 - Q (Quality index) (Barton)

Les méthodes basées sur la classification s'appliquent surtout aux constructions souterraines, sauf une adaptation du RMR pour les talus rocheux, le SMR et ne seront pas abordées ici.*

- détermination des paramètres géomécaniques "habituels": la cohésion, c , et l'angle de frottement interne, φ , (parfois aussi le module de déformation, E) via un critère de rupture adapté au *massif rocheux* : le **critère de Hoek & Brown**

*Romana, M., 1993, A Géomechanical Classification for slopes : Slope Mass Rating, chapter 23 of "Comprehensive Rock Engineering" Pergamon Press



Critère de Hoek-Brown généralisé

Il s'agit d'un critère de rupture en soi mais permettant aussi de déterminer c et φ du massif rocheux (et E) à partir de ses caractéristiques géologiques.

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

- espace σ_1' σ_3'
- 2 paramètres mesurés : σ_{ci} et m_i (d'où sera déduit m_b) obtenus par application du critère à la roche intacte (le matériau rocheux) soumise à au moins essais 5 triaxiaux (en l'absence de ces essais, des tables donnent σ_{ci} et m_i en fonction de la lithologie)
- 3 constantes empiriques* m_b , s et a dépendant des **caractéristiques du massif rocheux** via deux paramètres : GSI et D (Geological Strength Index et Disturbance factor)

* empirique = basé sur l'expérience \neq arbitraire

H-B Failure criterion - 2002 edition E. Hoek - C. Carranza Torres - B. Corkum



A partir des paramètres du critère de H&B, il est possible de déterminer **c** et **φ** du critère de Mohr-Coulomb

- validité pour $\sigma_t < \sigma_3 < \sigma'_{3max}$
- ajustement des deux critères (H&B/M-C)

$$\phi' = \sin^{-1} \left[\frac{6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}} \right]$$

$$c' = \frac{\sigma_{ci} \left[(1+2a)s + (1-a)m_b\sigma'_{3n} \right] (s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a) \sqrt{1 + \left(6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1} \right) / ((1+a)(2+a))}}$$

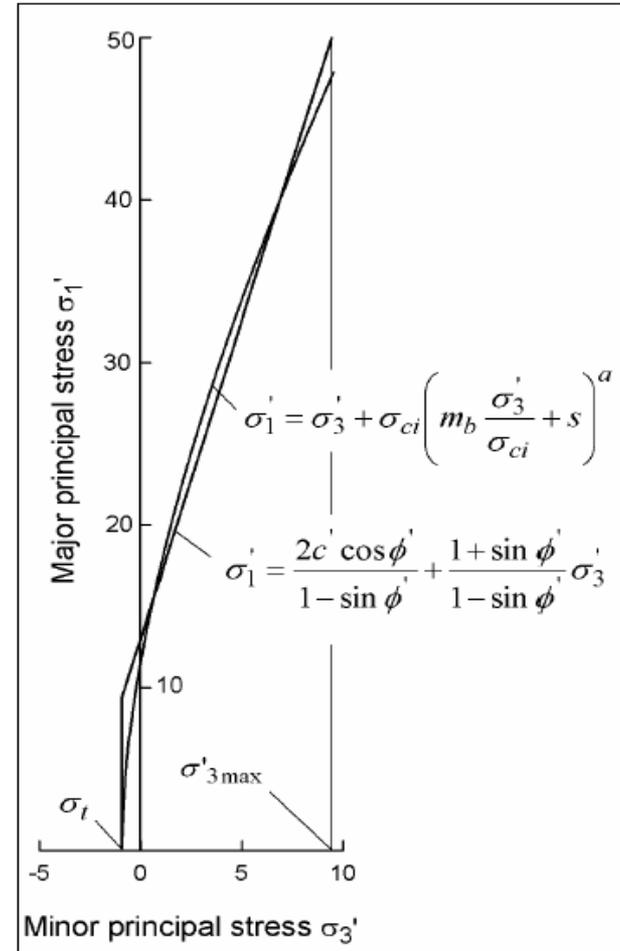
En pratique, un logiciel* donne directement

c', φ', σ'3max

à partir de

σci, mi, GSI et D

Il est aussi possible de calculer le module, E



* édité par RockScience: anciennement RocLab, remplacé par RocData®



et, in fine, en possession des paramètres mécaniques (c' , φ' , E),
il n'y a plus qu'à utiliser ses outils de calcul préférés...

Les producteurs de matériels (boulons, barrières...) disposent de logiciels,
parfois fort performants, et les mettent à la disposition des utilisateurs.
Par exemple, Ruvolum[®] développé par Geobrugg.

D'autres logiciels commerciaux orientés "milieux discontinus" existent,
tels *UDEC*[®] et *3DEC*[®], conçus par Itasca, basés sur la méthode des
éléments distincts.

Les outils de calcul orientés "sols" peuvent aussi être utilisés...

mutatis mutandis!



