

INTERACTION SOL STRUCTURES (ISS)

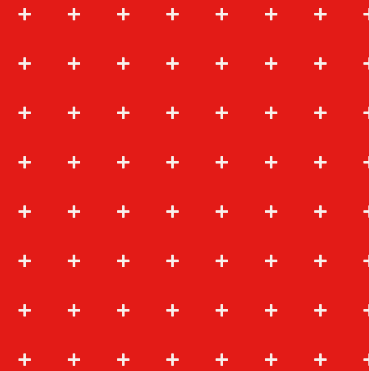
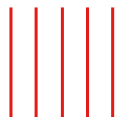
MÉCANIQUE DES ROCHES

CARACTÉRISATION MÉCANIQUE
DES ROCHES ET MASSIFS ROCHEUX

Professeur Ali DAOUADJI

Département GCU

Laboratoire GEOMAS

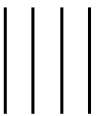


A photograph of a modern, multi-story building with a grid-like facade of windows. In the foreground, there is a grassy area with some trees and a few people. A large, semi-transparent '01' is overlaid on the left side of the image.

01

FINALITÉS

**LA MÉCANIQUE DES ROCHES,
POURQUOI ?**



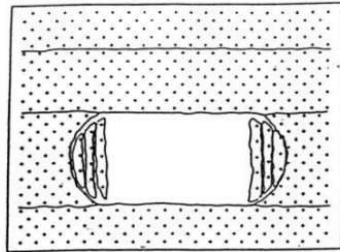
FINALITÉ: STABILITÉ DES VERSANTS

- Versants naturels, talus rocheux anthropiques (routes, mines), falaises
- Les différentes configurations potentiellement instables et les mécanismes d'instabilités associés
- Mobilisent :
 - La résistance en compression
 - La résistance en flexion
 - La résistance en traction
 - Le frottement le long des discontinuités

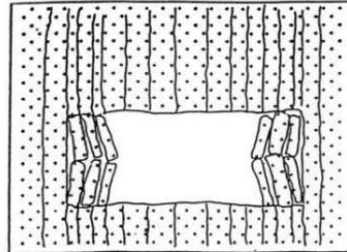
Configurations potentiellement instables	Mécanisme d'instabilité
	Glissement plan
	Glissement dièdre ou plan
	Glissements rotationnel (et fractionné)
	Rupture de surplomb
	Basculement de colonne ou de blocs
	Rupture de colonne en pied
	Rupture de banc (par flambage ou sur fracture)

FINALITÉ: STABILITÉ DES OUVRAGES SOUTERRAINS

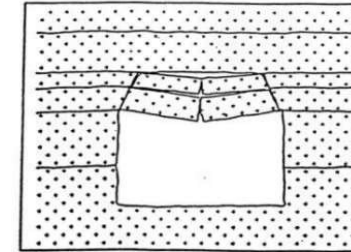
Rupture par Défaut de résistance



Excès de compression sur les parements

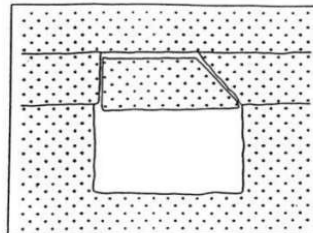


Flambage des parements

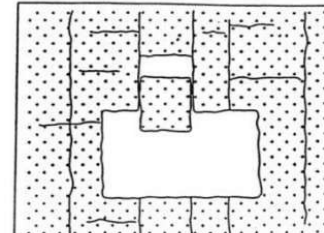


Flexion ou flambage

Rupture le long des discontinuités



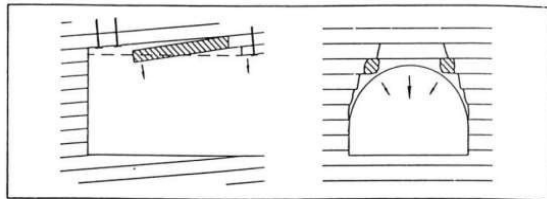
Chute libre



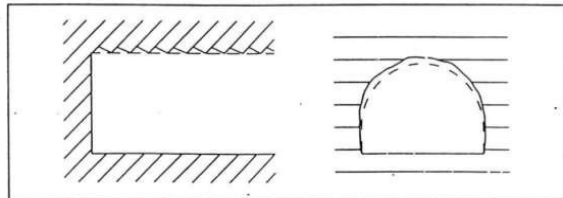
Rupture en tiroir



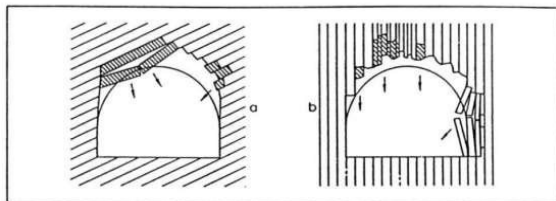
FINALITÉ: STABILITÉ DES OUVRAGES SOUTERRAINS



1 - Pendage subhorizontal : hors-profils et risques d'effondrement de la voûte (boulonnage)



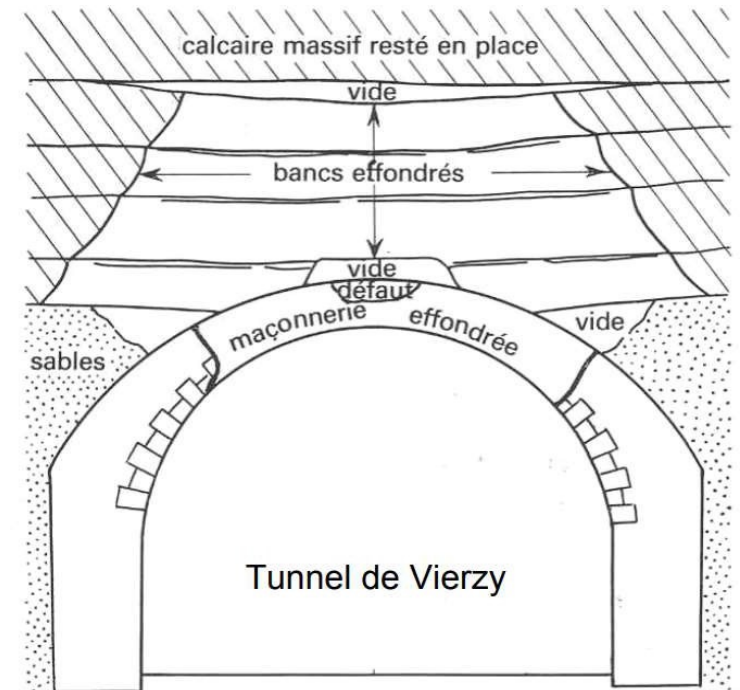
3 - Galerie en travers-bancs : d'autant moins de hors-profils que le pendage est plus proche de la verticale



Pendage subhorizontal

Galerie en travers-bancs

Galerie en direction



- Ouvrages neufs et anciens

FINALITÉ: STABILITÉ DES OUVRAGES SOUTERRAINS



Figure 2
Vue d'une zone d'extraction d'une carrière souterraine (carrière de Bourré - Loir-et-Cher)
(les coins, le maillet et la charrie permettant l'extraction sont remplacés à des fins pédagogiques)

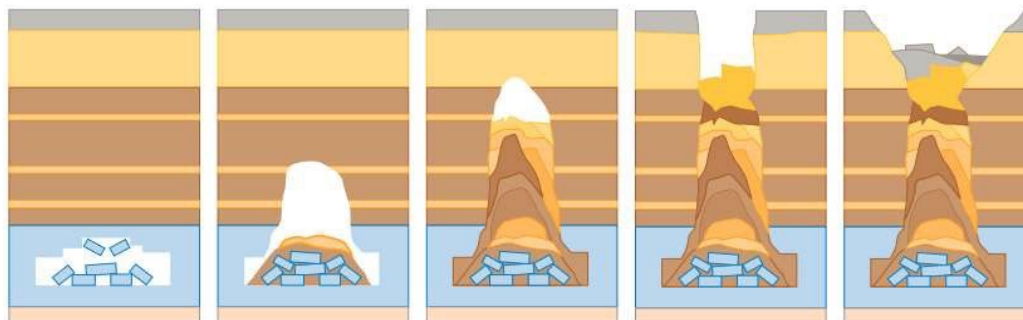


Figure 58
Schéma d'évolution d'un fontis

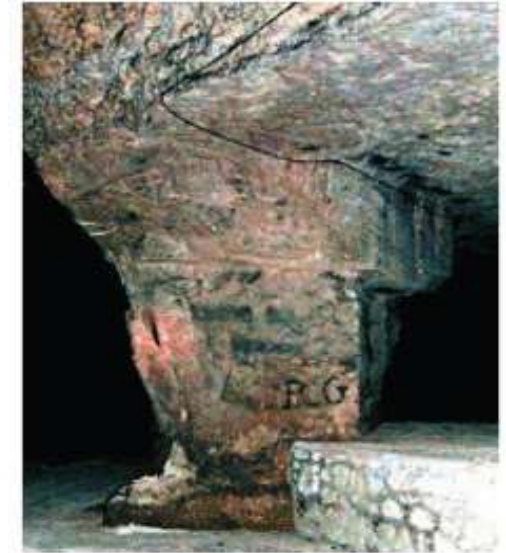
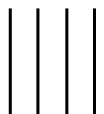


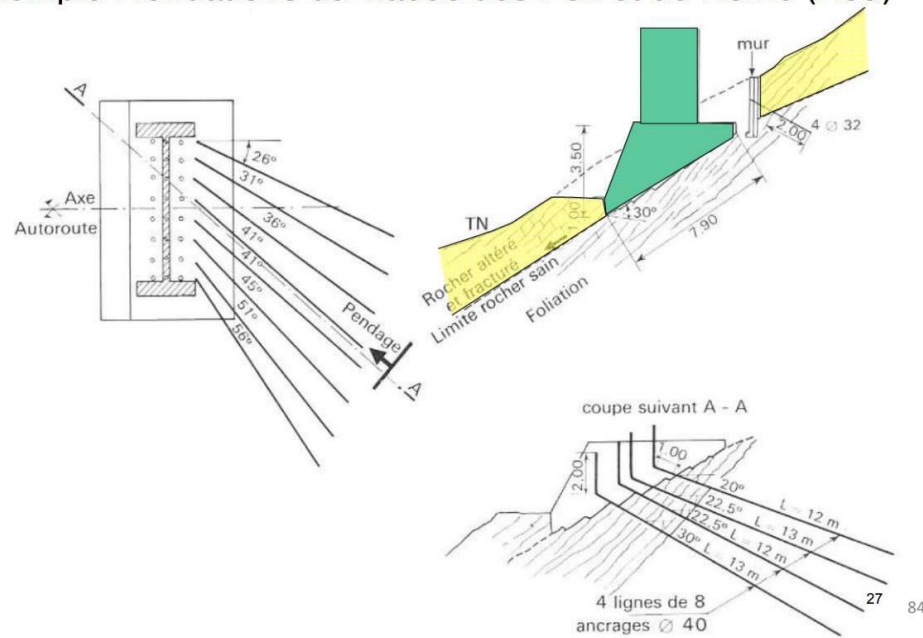
Figure 14
Exploitation par chambres et piliers de calcaires jurassiques à Bourges (Cher)





FINALITÉ : STABILITÉ DES OUVRAGES FONDÉS AU ROCHER

Exemple : fondations du viaduc des Pox et de Rome (A89)



FINALITÉ : STABILITÉ DES OUVRAGES FONDÉS AU ROCHER

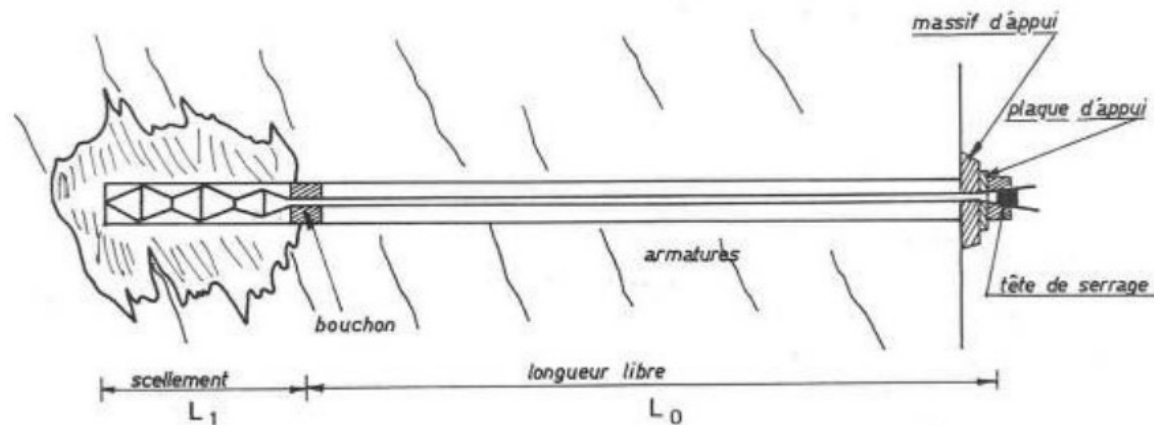
- Barrages (glissement à la base, rupture dans le massif)



Barrage de Malpasset

FINALITÉ : STABILITÉ DES OUVRAGES FONDÉS AU ROCHER

- Dispositifs d'ancrage au rocher (fixation de structures, fixation de blocs instables, confortement de galerie..)



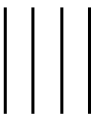
- Rupture possible à l'interface coulis/roche et dans le massif rocheux



02

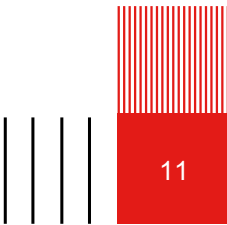
MÉCANIQUE DES ROCHES

UNE QUESTION D'ÉCHELLE

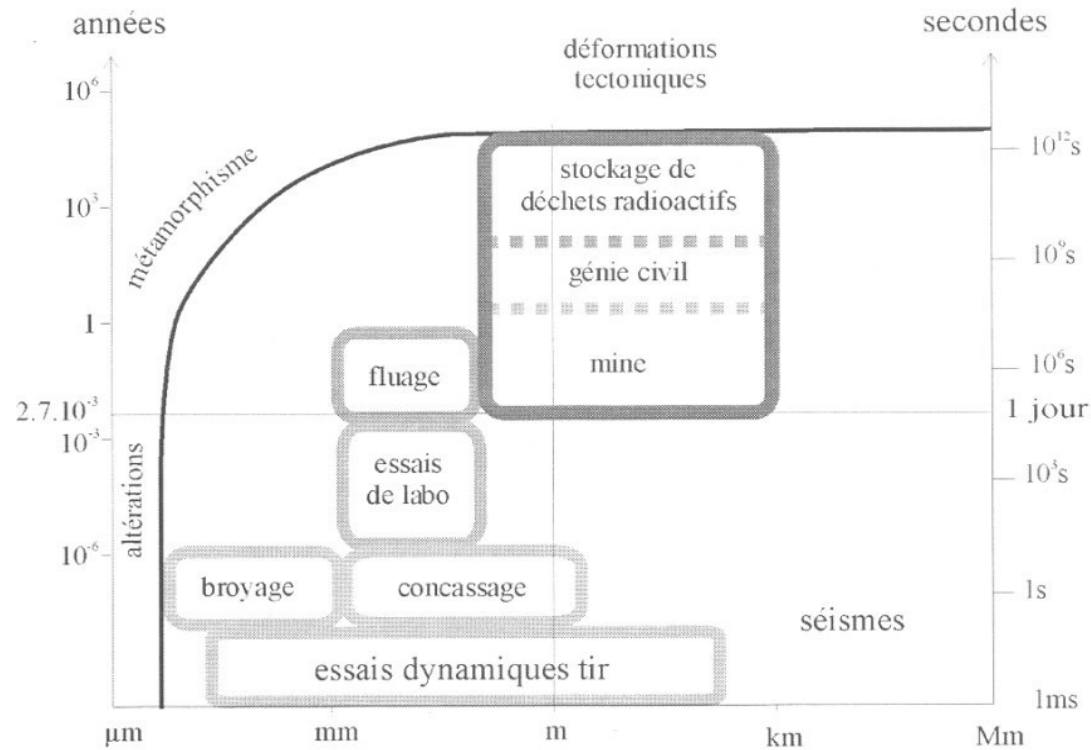


ECHELLES SPATIALES

- Échelle Micro : 'grain' de roche
- Echelle Méso : éprouvette de labo (cailloux voire bloc)
- Echelle Macro : falaise, massif,



ECHELLES SPATIALES ET TEMPORELLE

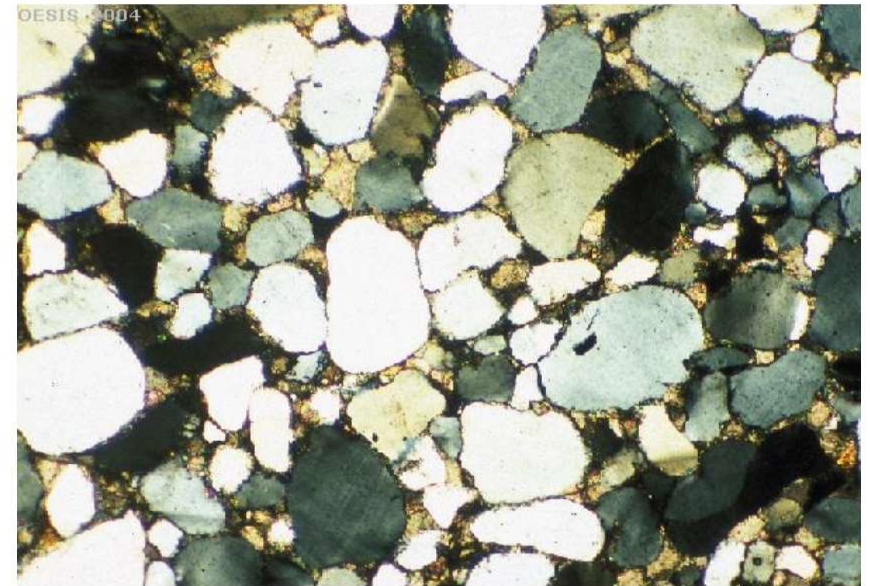


Domaines d'application de la mécanique des roches sur un diagramme distance-temps

ROCHE : MATÉRIAU HÉTÉROGÈNE, DISCONTINU, ANISOTROPE... (ÉCH. MICRO)



Granite gris du Sidobre (poli). Blancs : **feldspaths** (microcline 12% et plagioclases 39%) ; gris : **quartz** 39% ; noir : **biotite** 10%. Bon exemple de structure holocristalline. Ce granite est en réalité une



This **sandstone** is made of quite well rounded grains of **quartz**, cemented together by **calcium carbonate**. Cambrian, NW Scotland. Field of view **3.5 mm**, polarising filters.



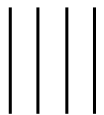
ROCHE : MATÉRIAU HÉTÉROGÈNE, DISCONTINU, ANISOTROPE... (ÉCH. MICRO)



Gabbro : on voit bien les **pyroxènes** aux teintes vives (**fissurés**) et les **plagioclases** en pyjama rayé.



Grès des Vosges. Vue au microscope électronique (photothèque IFP)



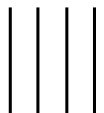
ROCHE : MATÉRIAU HÉTÉROGÈNE, DISCONTINU, ANISOTROPE... (ÉCH. MICRO)



Gneiss du Velay. Orthogneiss provenant du métamorphisme de granites monzonitiques porphyroïdes (528 Ma, Cambrien supérieur). Ils constituent le toit du granite du Velay. Ce sont de gneiss oeilés, **foliés** à porphyroclastes de feldspath potassique, quartz, biotite, plagioclases, feldspath potassique, sillimanite. Les porphyroclastes sont des phénocristaux magmatiques hérité du granite. De la muscovite tardive apparaît sur les feldspaths potassiques.



Amphibolite. This rock was originally a basic igneous rock (basalt or dolerite). When metamorphosed, the heating and compression changed the original minerals to **hornblende** (green) and **feldspar** (colourless), and gave the rock a **banding** of minerals. Field of view 2 mm.



CONSÉQUENCES SUR LES CARACTÉRISTIQUES MESURÉES AU LABORATOIRE (ÉCH. MÉSO)

- Influence de l'orientation du plan de foliation par rapport à l'axe de la carotte sur la vitesse des ondes P
 - Cas d'un gneiss
- > forte anisotropie

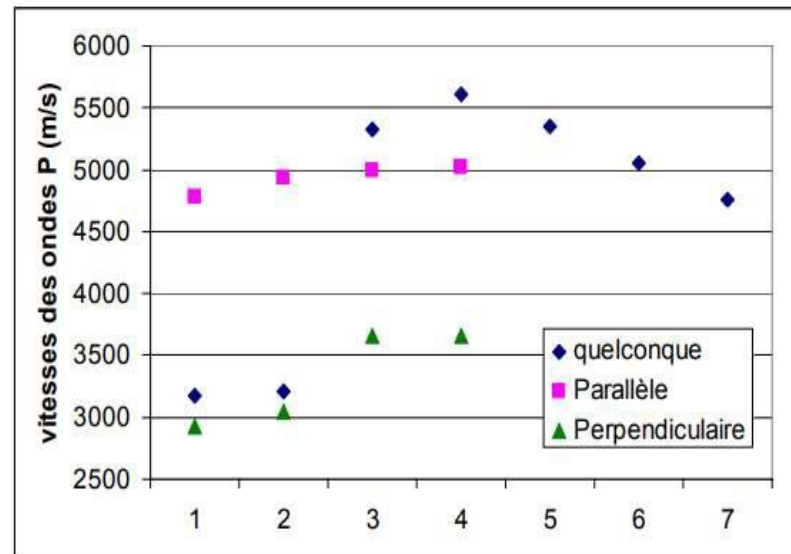
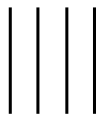
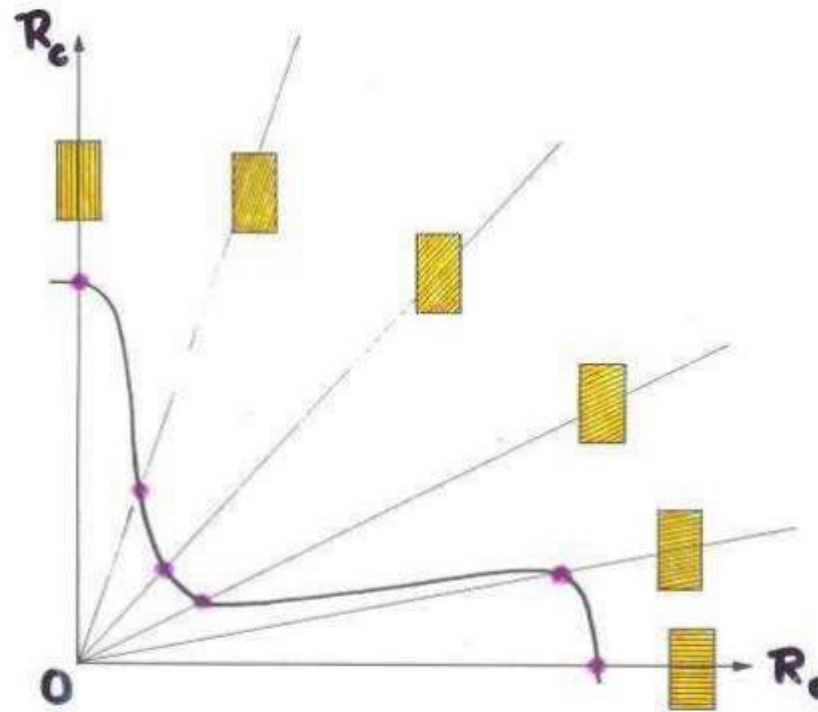


Figure 11 : Vitesses des ondes P en fonction de l'orientation de la foliation de la roche par rapport à l'axe de la carotte



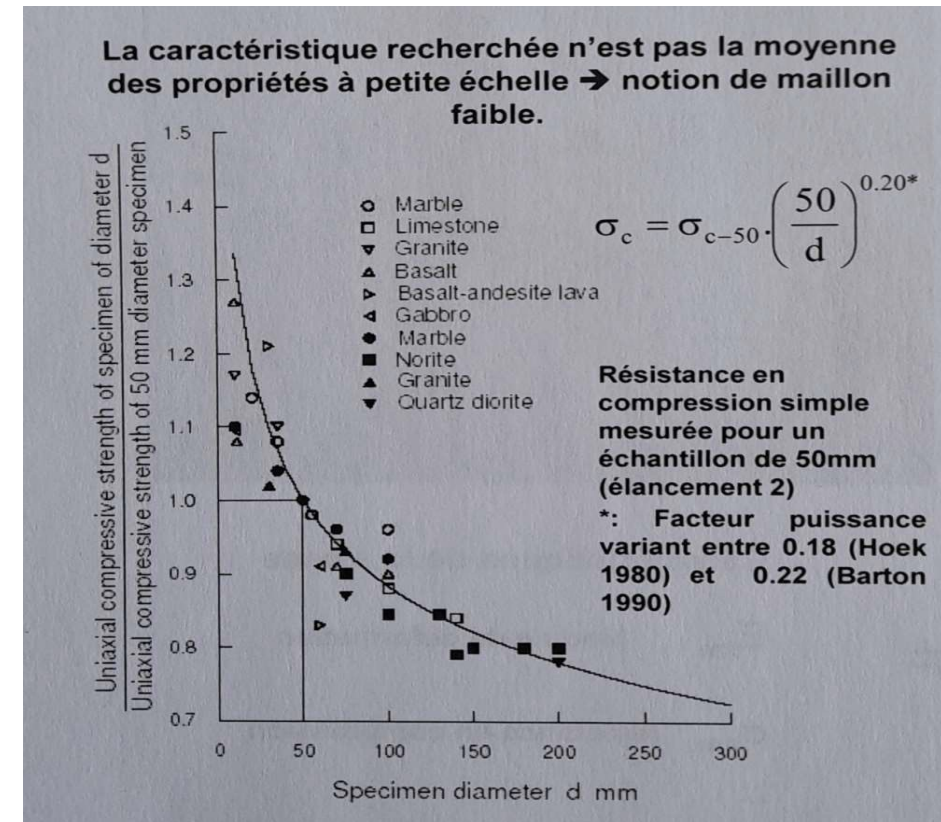
CONSÉQUENCES SUR LES CARACTÉRISTIQUES MESURÉES AU LABORATOIRE (ÉCH. MÉSO)

- Influence de l'orientation du plan de foliation par rapport à l'axe de chargement en compression sur la résistance d'une éprouvette cylindrique
- Cas d'un schiste
-> forte anisotropie



CONSÉQUENCES SUR LES CARACTÉRISTIQUES MESURÉES AU LABORATOIRE (ÉCH. MÉSO)

- Résistance sous compression
- Influence du diamètre de l'éprouvette
- Liée au 'taux de défauts'



FALAISE : DISCONTINUITÉS, ETC. (ÉCH. MACRO)

- Massif découpé en blocs de forme et taille variables

MODÈLES STRUCTURAUX DE MASSIFS ROCHEUX

(Wittke, 1990)

Matériau rocheux:
continu, homogène,
isotrope ou anisotrope

Discontinuités

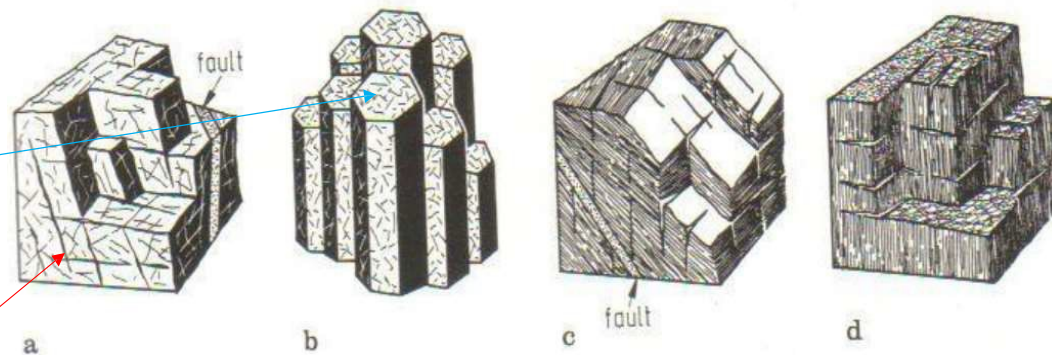


Fig. 2.37. Structural models of rock: a) random grain fabric, general three-dimensional system of discontinuities; b) random grain fabric, linear system of discontinuities; c) planar grain fabric, general three-dimensional system of discontinuities; d) linear grain fabric, general three-dimensional system of discontinuities.

FALAISE : DISCONTINUITÉS, ETC. (ÉCH. MACRO)



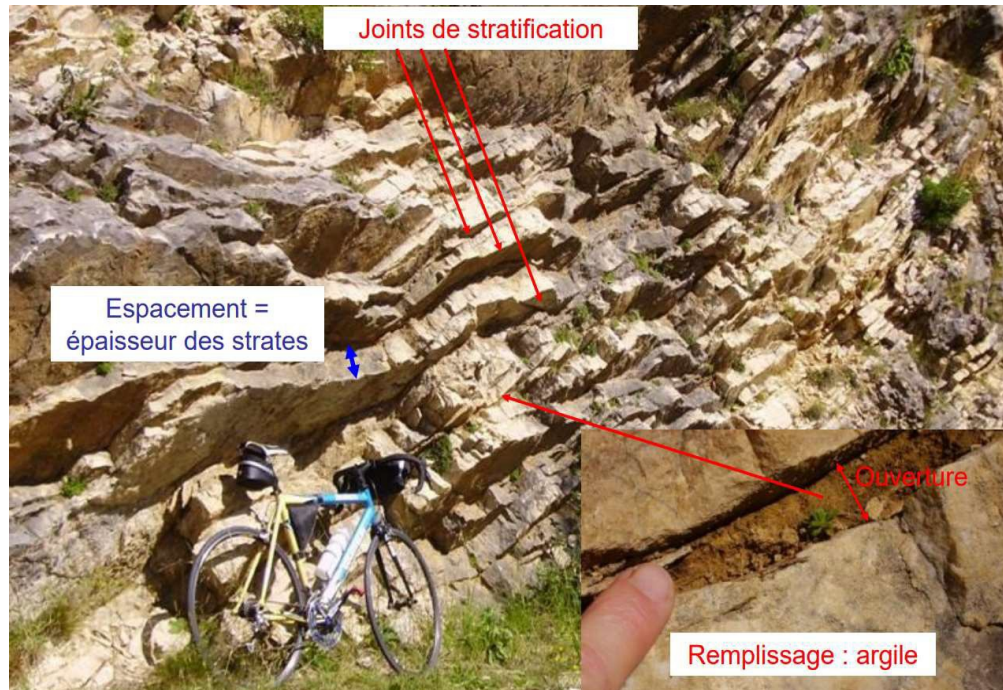
Fractures dans du granite (Oisans)



Joints de schistosité dans des marnes
("Terres noires", Draix)



FALAISE : DISCONTINUITÉS, ETC. (ÉCH. MACRO)



FALAISE : DISCONTINUITÉS, ETC. (ÉCH. MACRO)



Figure 8 : vues d'affleurements rocheux : orthotrope a); orthotrope de révolution b)





EFFET D'ÉCHELLE : NOTION DE VER

- Effet d'échelle se traduit par une réduction des caractéristiques mécaniques, surtout liée à la fracturation du massif
- VER : volume au-delà duquel les caractéristiques du milieu ne dépendent pas de sa taille
- A définir en vue de l'étude de stabilité mécanique pour retenir une approche discrète ou continue (modèle analytique, numérique)

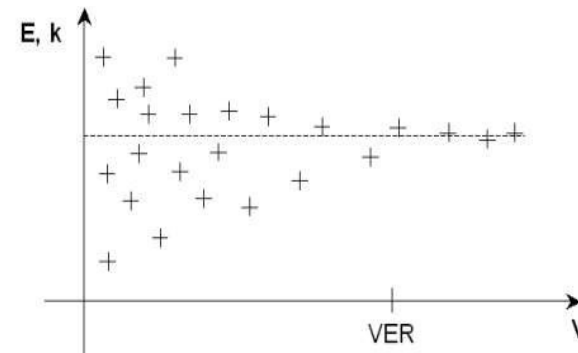
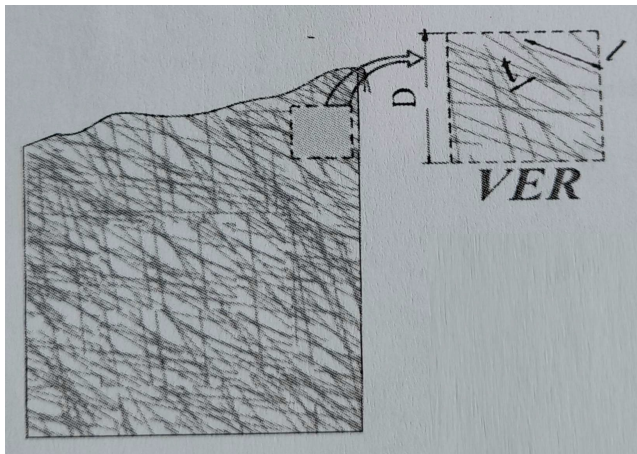


FIG. 2.8 – Dispersions des mesures et Volume Élémentaire Représentatif.

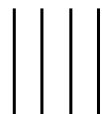


EFFET D'ÉCHELLE : NOTION DE VER

- Cas des ouvrages souterrains: le caractère continu/discret dépend du rapport entre diamètre de l'excavation et dimension des blocs (CF)
 - $CF < 5$: roche massive = continu
 - $5 < CF < 50$ à 500 : massif fracturé : discontinu
(VER volume perturbé par l'ouvrage)
 - $CF > 50$ à 500 : roche fortement fracturée = continu équivalent*

Classes AFTES		Taille moyenne du bloc	D<5m	5<D<20m	D>20m
N1	ID1	>3m	CONTINU		
N1-N2			DISCONTINU		
N2		ID1-ID2			
N3-N4	ID3-ID4	20cm à 1m	TRANSITION		
N3-N4-N5	ID5	<20cm	TRANSITION	CONTINU	
N2					
N1					

TAB. 2.2 – Limites entre milieux continus et discontinus pour $2\sigma_0/R_C < 1$ et les classes AFTES [10].





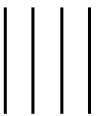
CHANGEMENT D'ÉCHELLE EN PRATIQUE

- Les caractéristiques de la roche sont mesurées au laboratoire
- Les caractéristiques du massif sont déterminées (discontinuités, etc)
- Le massif est évalué, sur la base de classifications, en vue (et/ou):
 - de déterminer le type de soutènement à mettre en œuvre dans les tunnels (RMR, Q..)
 - d'estimer la résistance mécanique du massif, sa déformabilité (GSI, RQD..)



03

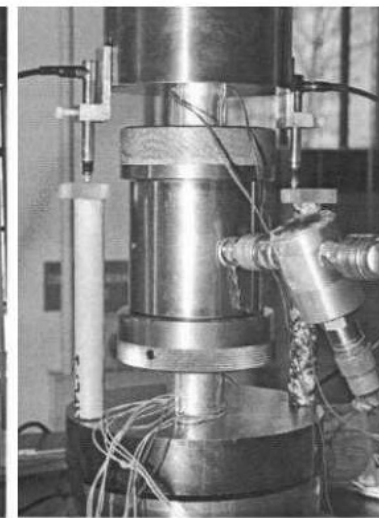
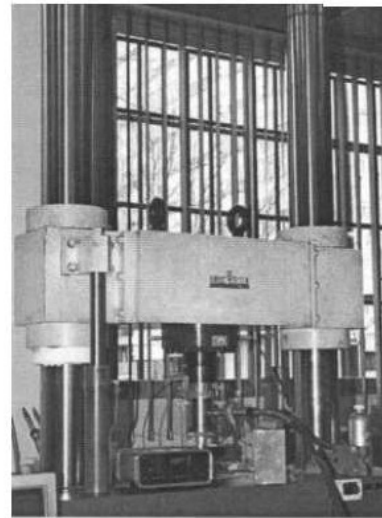
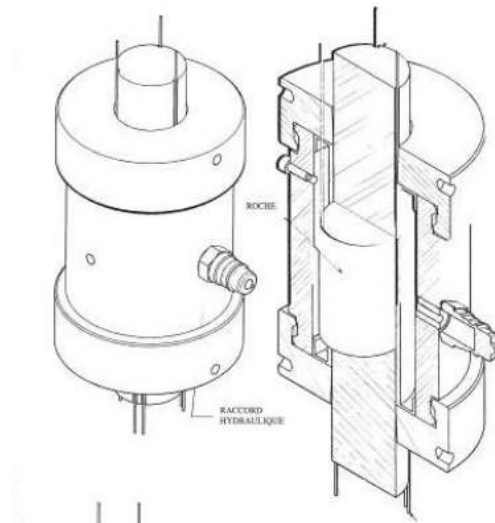
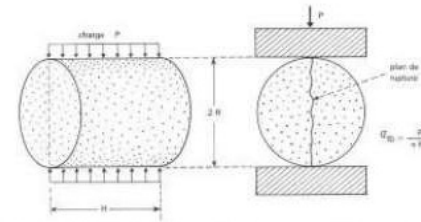
CARACTÉRISATION DE LA ROCHE



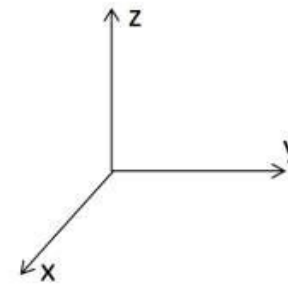
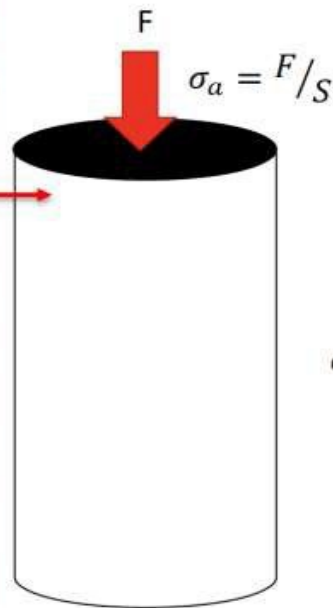
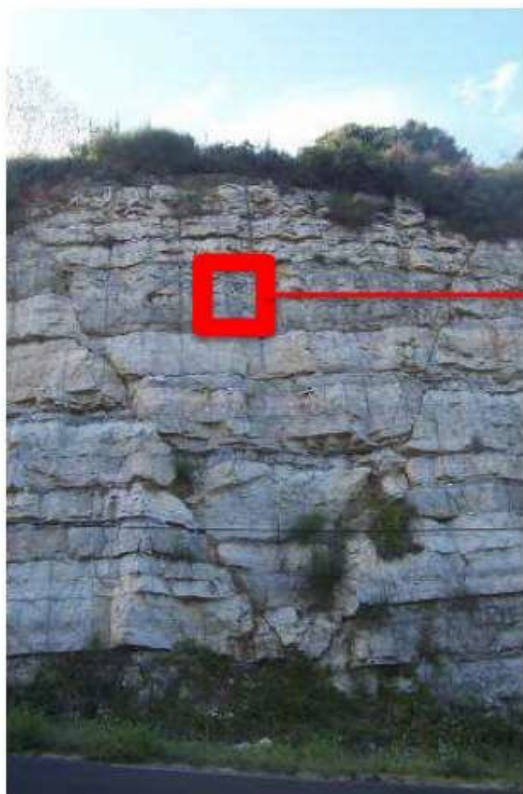
ESSAIS DE LABORATOIRE SUR LES ROCHES

- **Appareils d'essais en laboratoire**

- Essais de compression simple
- Essais triaxiaux à haute pression
- Essai brésilien
- Essai Franklin
- Essai de fragmentation dynamique
- Essai d'altération

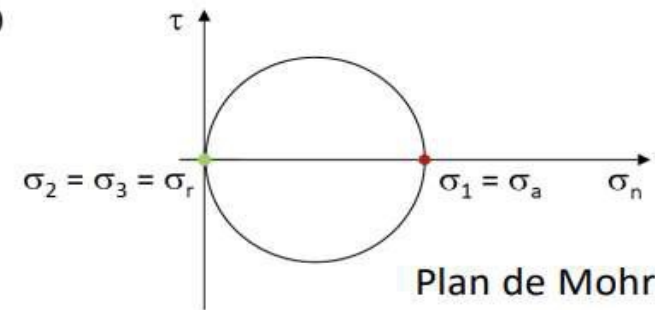


ESSAI DE COMPRESSION SIMPLE



$$[\sigma_{(x,y,z)}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\sigma_a \end{bmatrix}$$

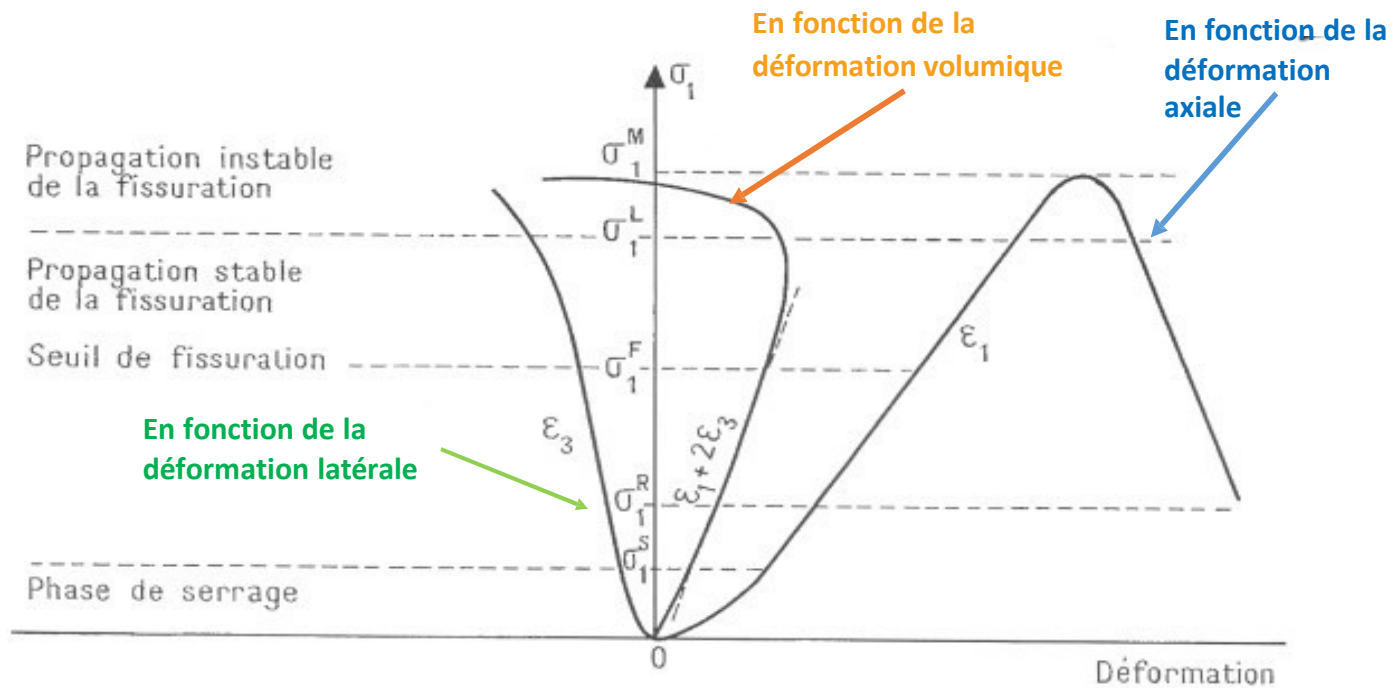
$$\sigma_r = 0$$



ESSAI DE COMPRESSION SIMPLE

Réponse type

- Evaluation de la réponse en termes de contraintes en fonction des déformations axiales, latérales et volumiques



ESSAI DE COMPRESSION SIMPLE

- Phase de serrage

Fermeture des fissures orthogonales à l'axe de chargement

Volume diminue

- Phase quasi-linéaire

Calcul de

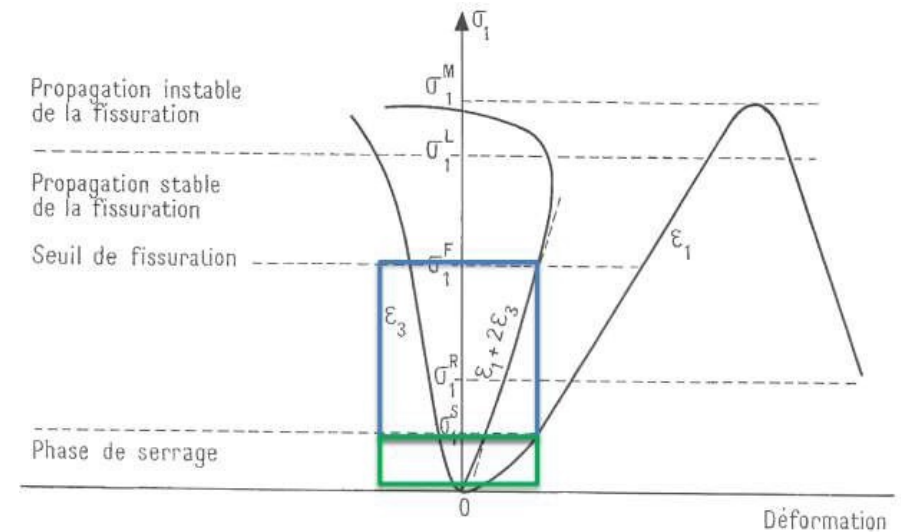
E : module d'Young

ν : coef. de poisson

$$\sigma_a = E \cdot \varepsilon_a$$

$$\nu = -\frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_a}$$

E : 0,1 à 100 GPA, ν =0,2 à 0,3



ESSAI DE COMPRESSION SIMPLE

- Puis, seuil de fissuration

Micro-fissurations au centre de l'éprouvette

Contrainte-déformation axiale linéaire

Volume diminue moins, et commence à augmenter

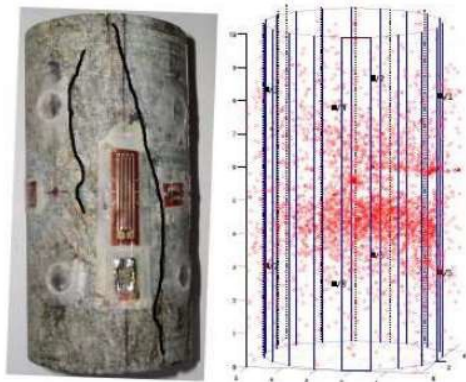
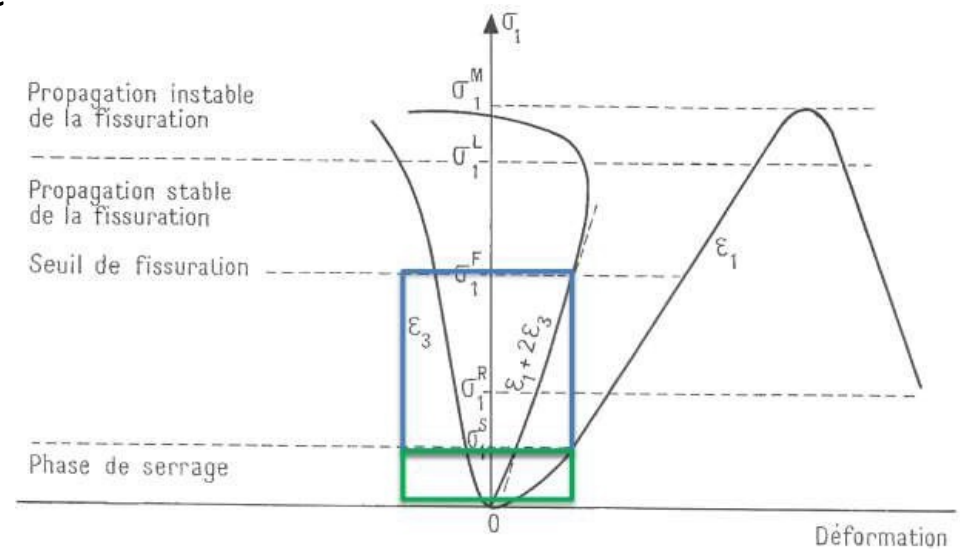


Figure 20 : Fracturation macroscopique sub-v verticale post-rupture de l'échantillon R633 (foliation sub-parallèle à σ_1) et localisation des hypocentres



ESSAI DE COMPRESSION SIMPLE

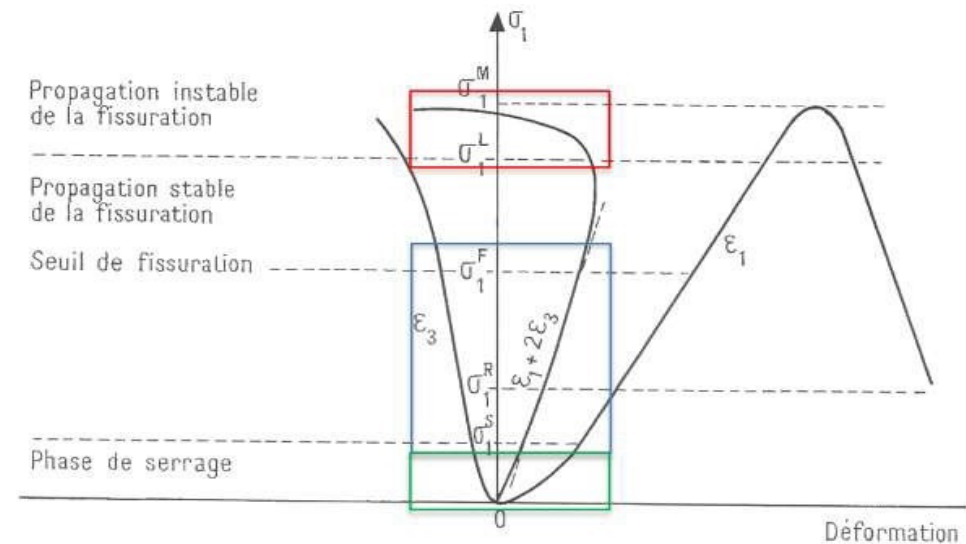
- Puis, **phase non-linéaire pré-pic**

Manifestation macroscopique de la coalescence de fissures (propagation instable) qui contribueront à former les futures fractures macroscopiques qui scinderont l'éprouvette

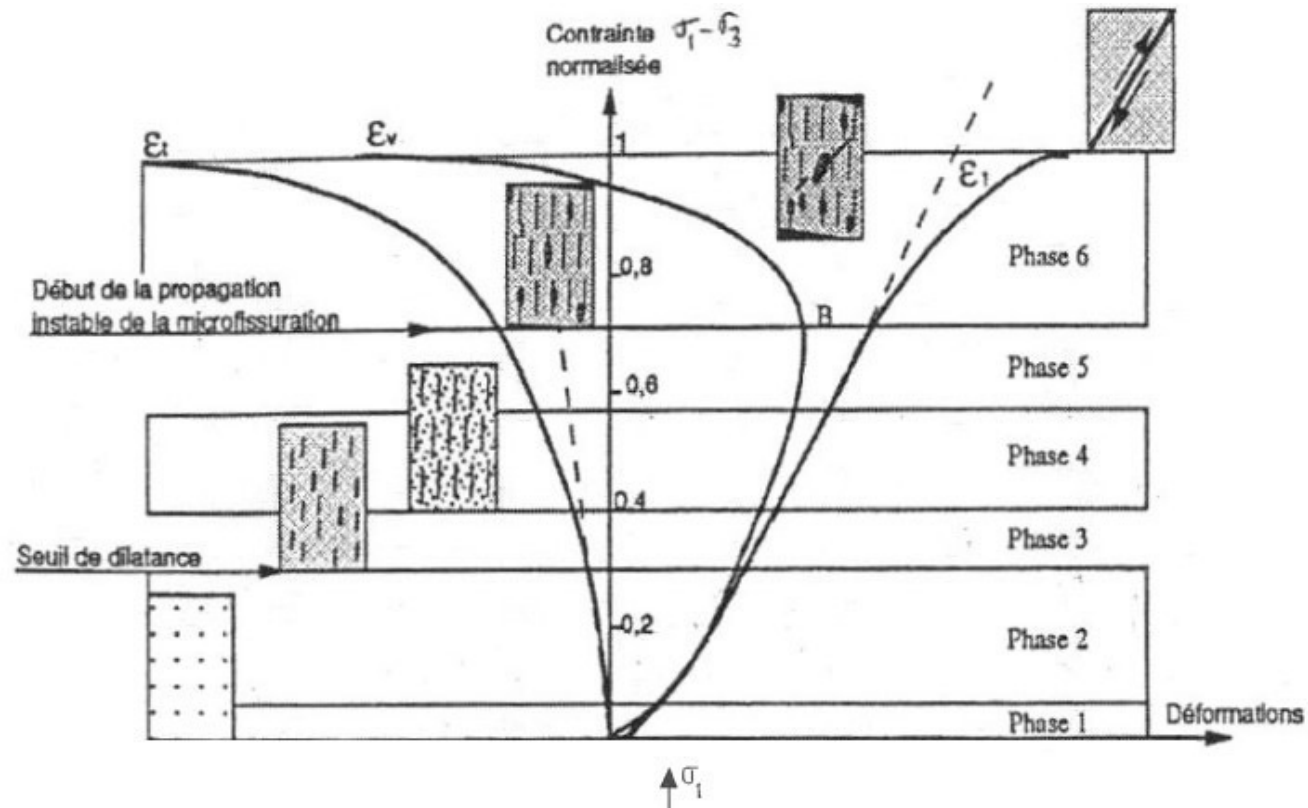
Forte augmentation du volume

- Puis pic

Résistance maximale en compression simple

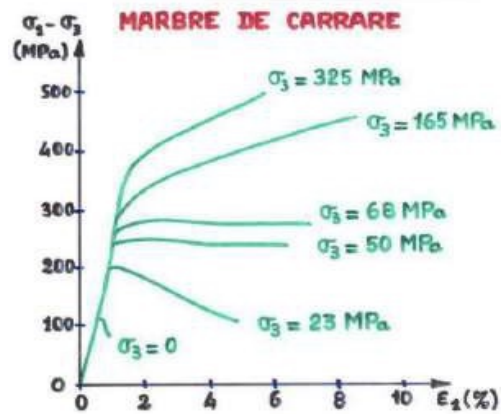
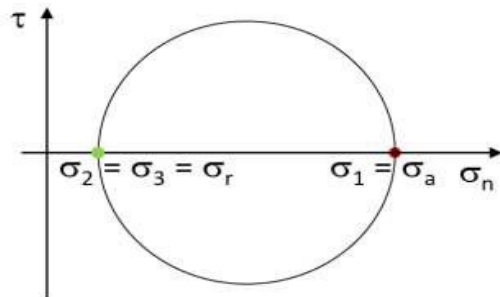
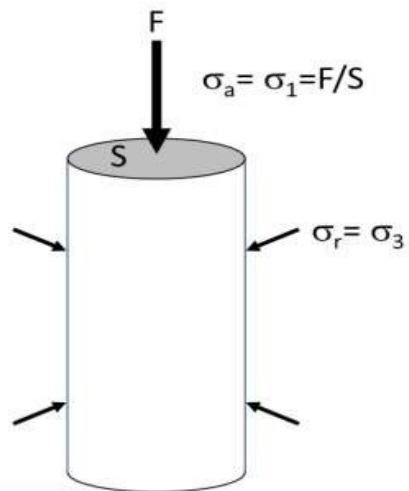


ESSAI DE COMPRESSION SIMPLE

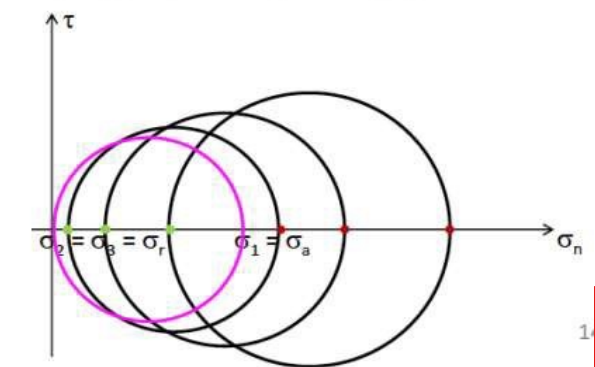


Forte dépendance à la fissuration

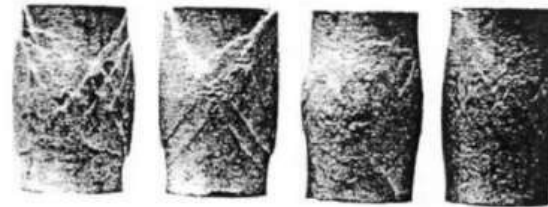
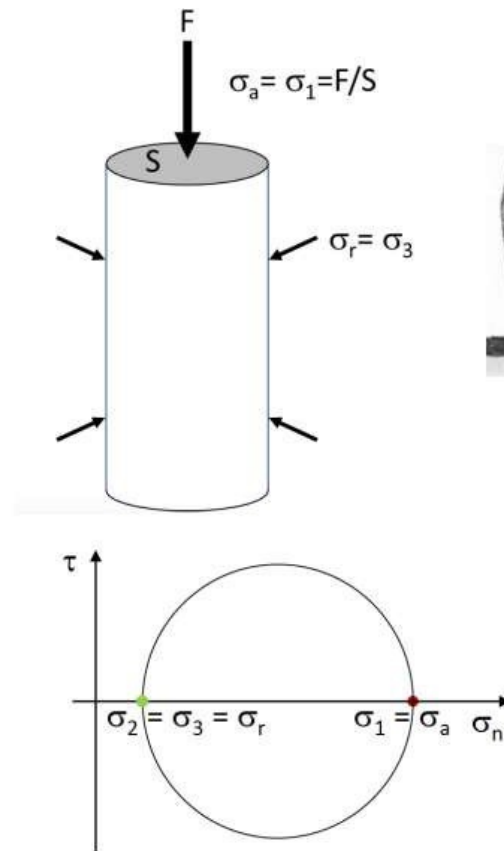
ESSAI TRIAXIAL



État de contrainte dans le Plan Mohr :
 limite élastique
 Plasticité (ductilité)
 rupture



ESSAI TRIAXIAL

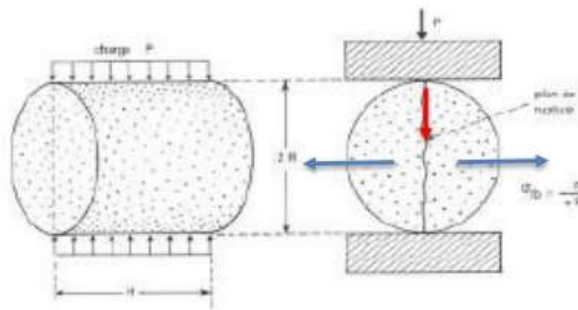


Différents faciès de rupture d'échantillons de roche



AUTRES ESSAIS

- Essai brésilien (traction indirecte)



D : diamètre initial de l'éprouvette

H est la hauteur initiale de l'éprouvette

$F_{\max}$: force maximale de compression appliquée selon deux génératrices diamétralement opposées de l'éprouvette cylindrique

État de contrainte

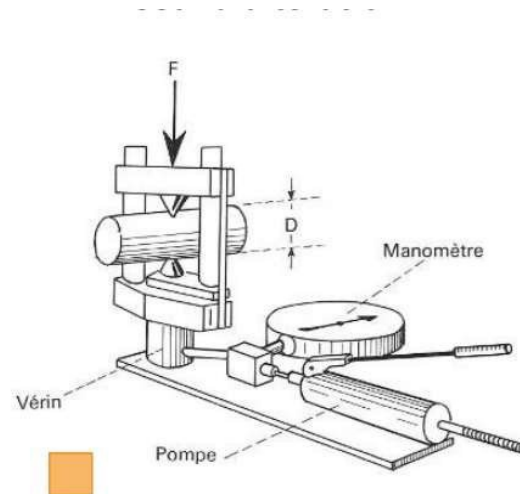
L'état de contrainte au centre de l'éprouvette, lors de la rupture est **une traction horizontale** perpendiculaire au plan diamétral

$$\sigma_{t(\text{brésilien})} = \sigma_x = \frac{2 \cdot F_{\max}}{\pi \cdot D \cdot H}$$

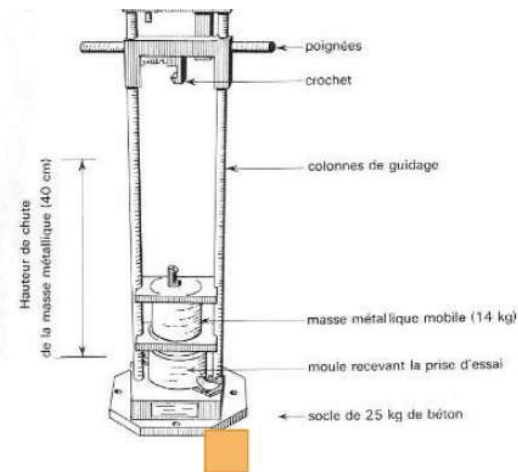
une compression verticale :

$$\sigma_y = \frac{6 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot H} = -3 \cdot \sigma_x$$

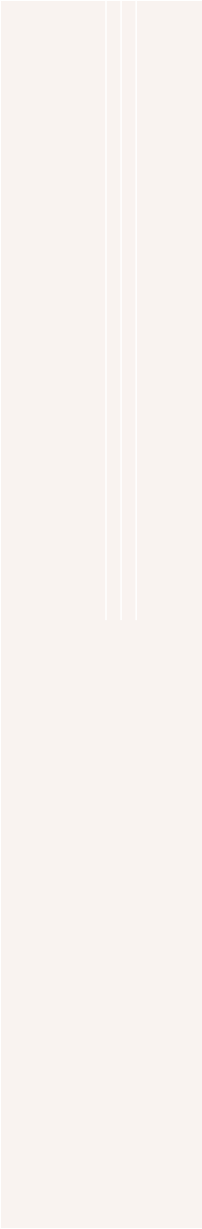
AUTRES ESSAIS



Essai Franklin: mesure de F_{max} pour une éprouvette de diam = 50 mm.
L'indice $Is,50$ indique la résistance de la roche.
Essai facile à réaliser et permet de choisir le matériel (type, usure, etc).
La résistance à la compression $\Sigma c = F_{max} / D^2$



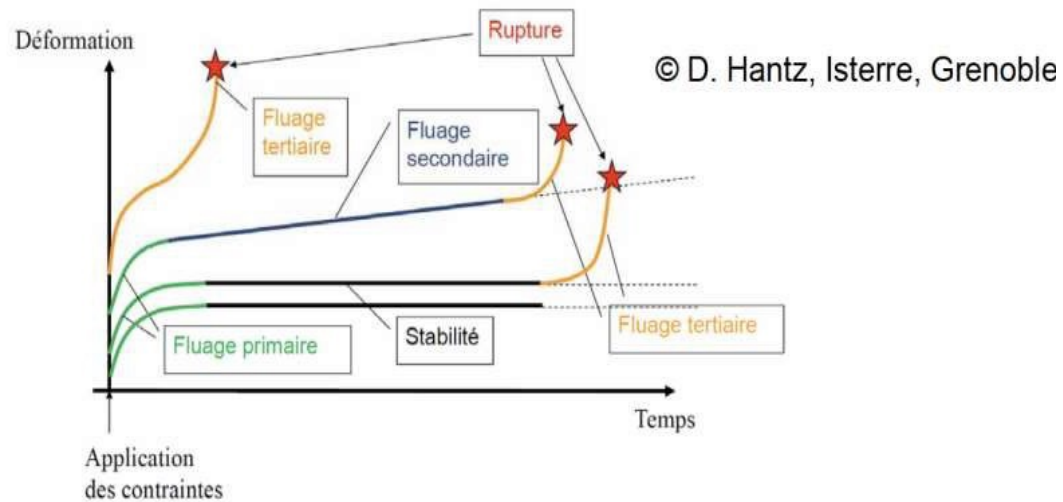
Essai de fragmentation dynamique. Le nombre de coups fonction de la dimension des grains:
4/6.3 : 16 coups
6.3/10: 22 coups
10/14: 28 coups
Tamisage au tamis 1.6 mm avant et après essai.



EFFET DU TEMPS SUR LE COMPORTEMENT DE LA ROCHE

- La déformation et la résistance des roches dépend de la durée d'application de la charge
 - Essais de compression et triaxiaux = rapides
 - Au sein des massifs, les contraintes s'appliquent pendant des milliers voire des milliers d'années
 - Les variations de contrainte résultent principalement de l'action de l'homme (variations rapides) ou sont naturelles (tectonique...) et se maintiennent dans le temps
- L'effet du temps se mesure par
 - Essai de fluage (mesure de déformation sous contrainte constante)
 - Essai de relaxation (mesure de contrainte sous déformation constante)

EFFET DU TEMPS : FLUAGE



On distingue 3 étapes de fluage au cours du temps

- Fluage primaire ou transitoire, la vitesse de fluage diminue rapidement avec le temps
- Fluage secondaire ou stationnaire, la vitesse de fluage est constante (analogie avec la viscosité des fluides)
- Ensuite le fluage peut soit s'amortir, soit se poursuivre à une vitesse constante soit croître rapidement (fluage tertiaire)

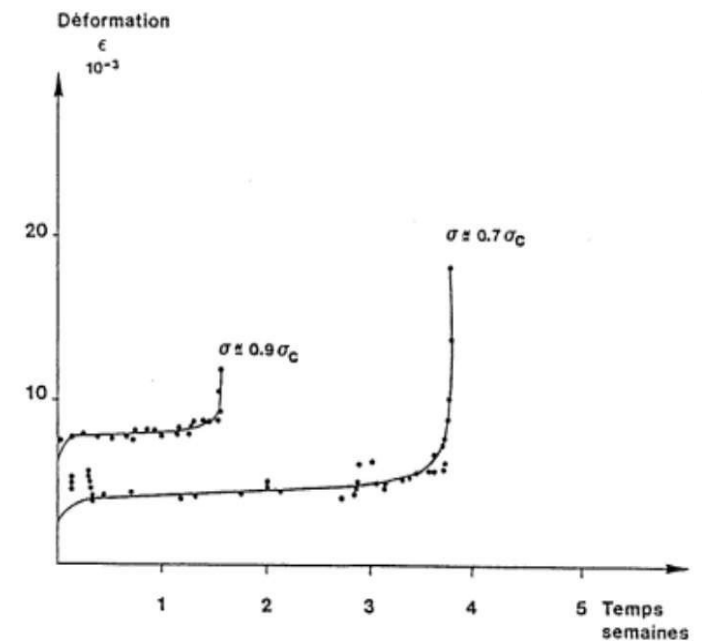
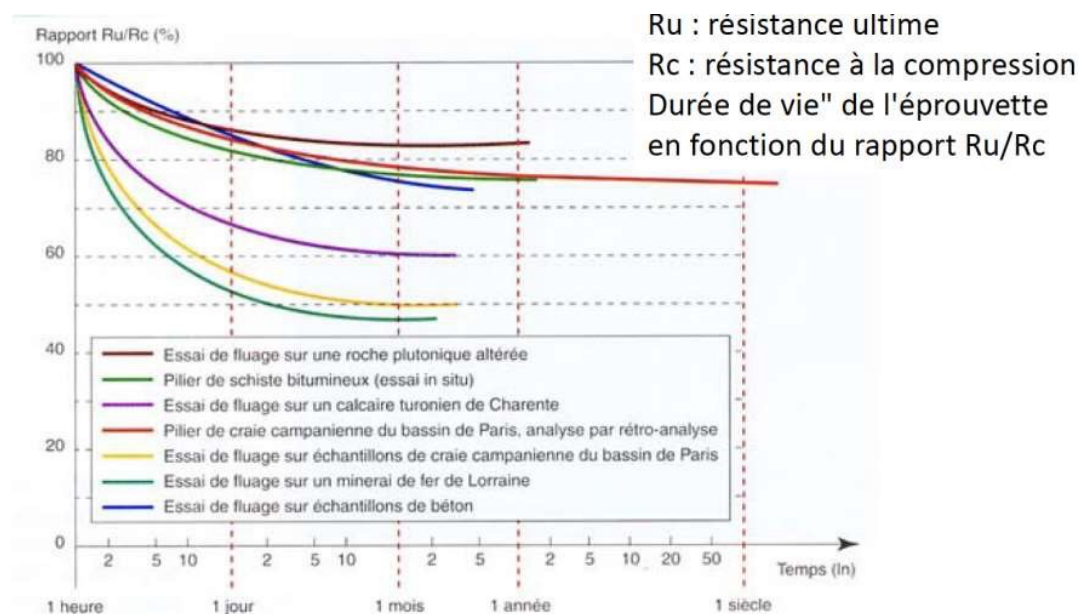


Figure1-8 : Essais de fluage uniaxial (Monjoie et Schroeder, 1990)

EFFET DU TEMPS : FLUAGE

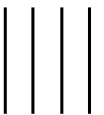


Résistance à terme de différentes roches en fonction du temps (document INERIS)

20

04

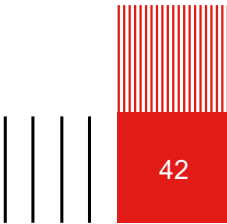
CARACTÉRISATION DES DISCONTINUITÉS





DISCONTINUITÉS (« JOINTS »)

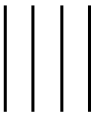
- Les discontinuités sont disposées généralement par familles, par ex des discontinuités parallèles.
- Le nombre de familles de discontinuités peut aller jusqu'à 5.
- Typiquement :
 - 1 famille découpe le massif rocheux en plaques,
 - 2 familles perpendiculaires découpent la roche en colonnes
 - 3 familles découpent la roche en blocs.
 - Plus de 3 familles découpent la roche en blocs de formes variées et de coins.





LES TYPES DE DISCONTINUITÉS

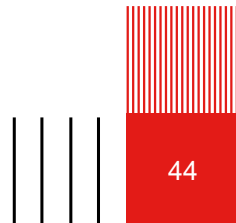
- **Plans de stratification** : entre strates dans les massifs sédimentaires. Leur extension peut être très grande
- **Contacts lithologiques** : Entre deux matériaux différents.
- **Plans de schistosité** : Débit des roches en feuillets parallèles. Lié aux contraintes tectoniques. Extension est plus ou moins grande
- **Diaclases** : discontinuités séparant deux compartiments sans mouvement relatif. Elles peuvent s'organiser en familles directionnelle
- **Failles** : mouvement relatif entre les deux compartiments : faille normale, inverse et de décrochement fonction du champ de contrainte. Leur extension est très variable (métrique à pluri-kilométrique)
- **Couloirs de fracturation** : Assemblage de petites discontinuités de faible extension et d'orientations variées formant une structure continue





PARAMÈTRES CARACTÉRISANT LES DISCONTINUITÉS

- **Orientation** : Position du plan de la discontinuité dans l'espace. Permet le classement en familles directionnelles.
- **Espacement** : distance entre deux discontinuités les plus proches d'une même famille mesurée perpendiculairement à celles-ci.
- **Extension** : L'extension ou taille des discontinuités correspond à la surface totale de la discontinuité dans l'espace.
- **Rugosité et ondulation de la surface de discontinuité** : A toutes les échelles, ces paramètres contrôlent la résistance au cisaillement de la discontinuité et la mobilisation ou non du phénomène de dilatance ;
- **Altération des épontes** : Agit sur la déformabilité, sur la possibilité de mobiliser de la dilatance et donc sur la résistance au cisaillement.
- **Ouverture** : distance entre épontes comptée perpendiculairement au plan de discontinuité ;
- **Remplissage**
- **Présence d'eau**



CARACTÉRISATION GÉOMÉTRIQUE DES DISCONTINUITÉS

EXTENSION DES DISCONTINUITÉS (PERSISTANCE)

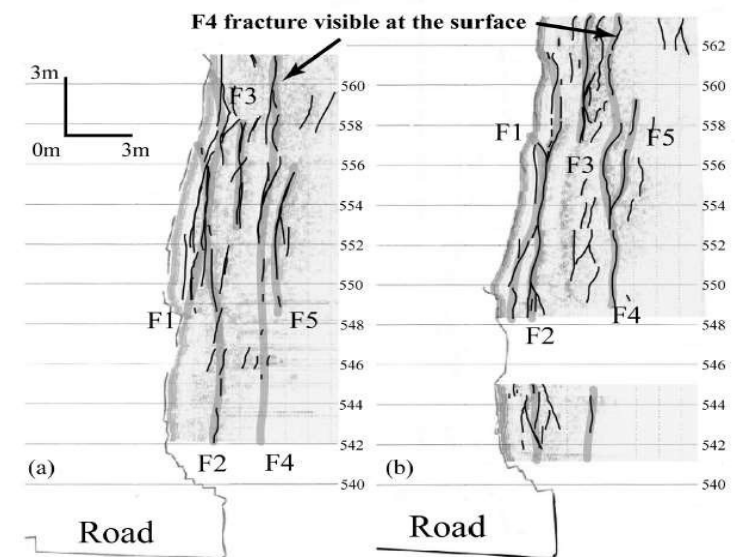
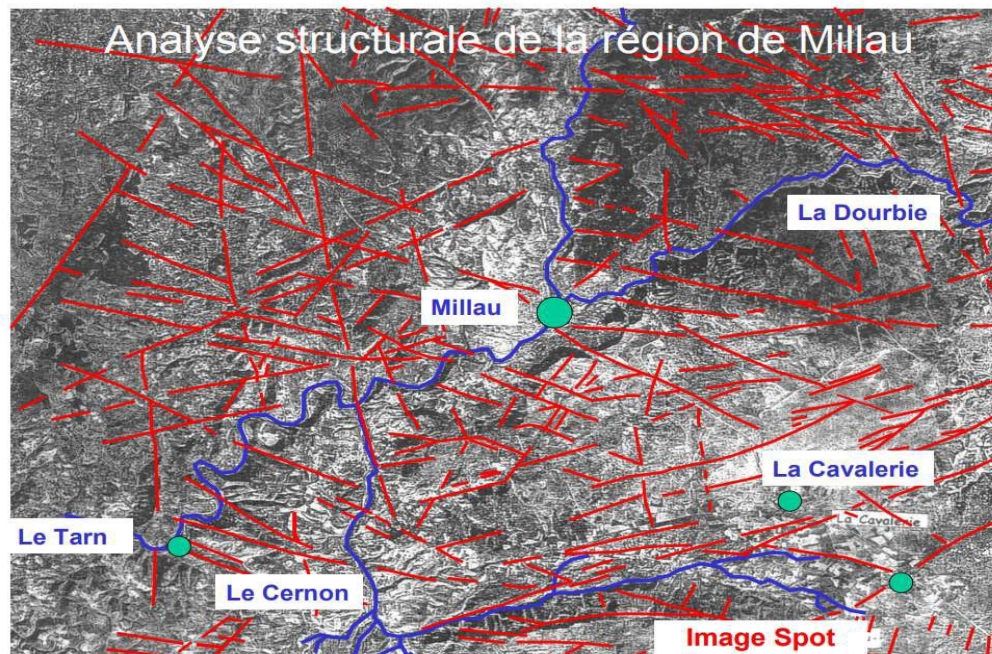
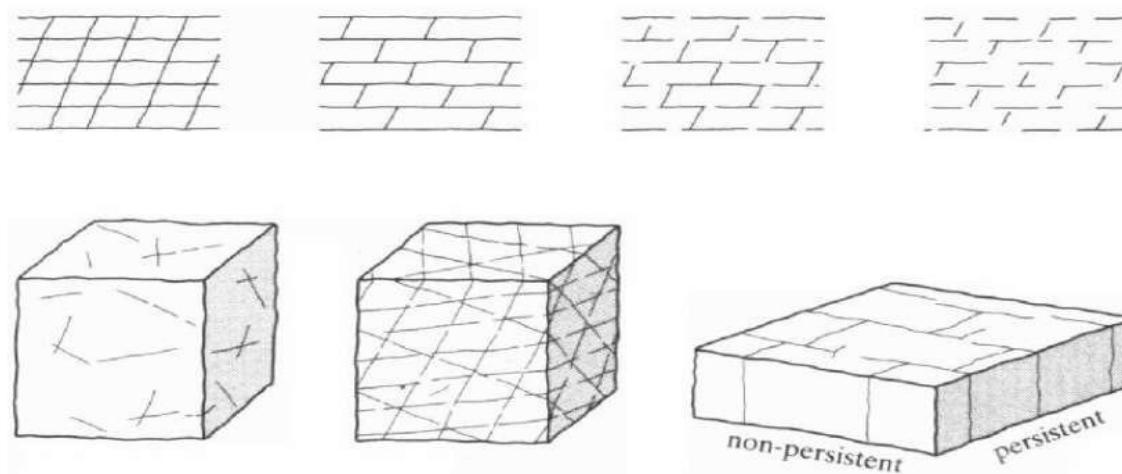


Figure 1.16. Gorge de la Bourne. Interpretation of P1 (a) and P2 (b) GPR profiles. Black thick lines represent the GPR fracture, gray line correspond to the interpreted structural model

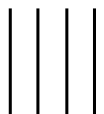
Exemples : plusieurs dizaines de km à quelques dizaines de cm

CARACTÉRISATION GÉOMÉTRIQUE DES DISCONTINUITÉS

EXTENSION DES DISCONTINUITÉS (PERSISTANCE)



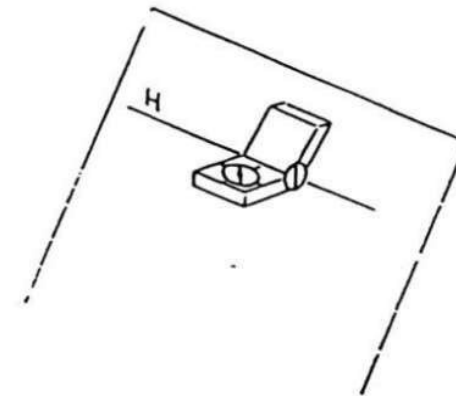
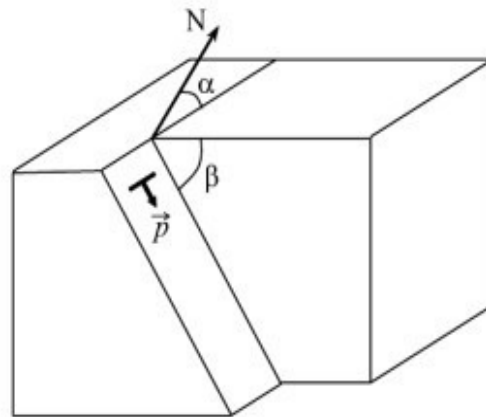
Description suggérée par l' ISRM	Longueur de la trace (m)
Persistance très faible	< 1
Persistance faible	1 – 3
Persistance moyenne	3 – 10
Persistance élevée	10 – 20
Persistance très élevée	> 20



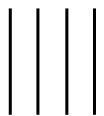
CARACTÉRISATION GÉOMÉTRIQUE DES DISCONTINUITÉS

Orientation des discontinuités

- Azimut : angle de la projection horizontale du vecteur $\vec{p}$ avec le Nord en tournant vers l'Est. Il vaut $\alpha + 90^\circ$;
- Pendage : angle β que fait $\vec{p}$ avec le plan horizontal.



*Mesure de la direction et du pendage
(convention internationale)*

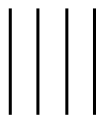
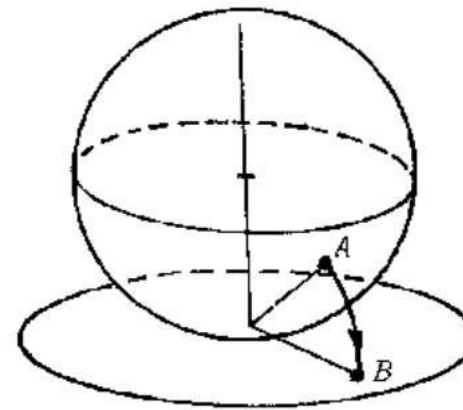
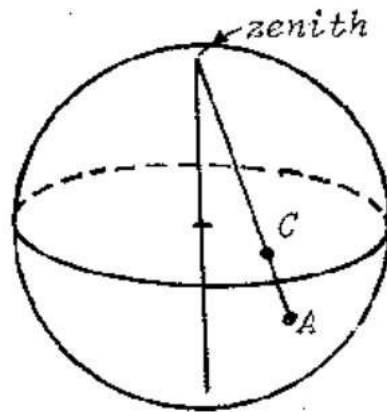


CARACTÉRISATION GÉOMÉTRIQUE DES DISCONTINUITÉS

ORIENTATION DES DISCONTINUITÉS

LES DEUX PROJECTIONS UTILISEES EN INGENIERIE DES ROCHES

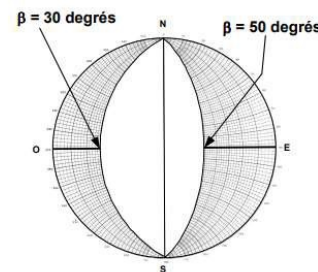
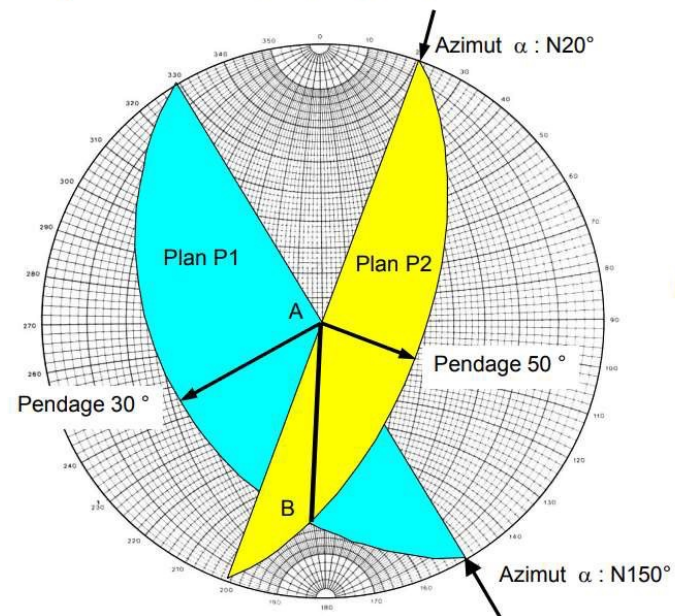
Projection stéréographique (Wülff) Projection équivalente (Schmidt)



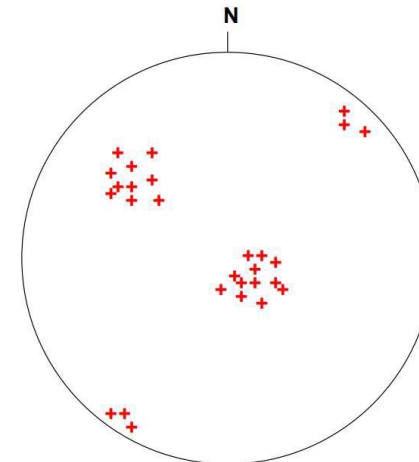
CARACTÉRISATION GÉOMÉTRIQUE DES DISCONTINUITÉS

ORIENTATION DES DISCONTINUITÉS

Projection stéréographique (4) : canevas de Wulff - Exemple

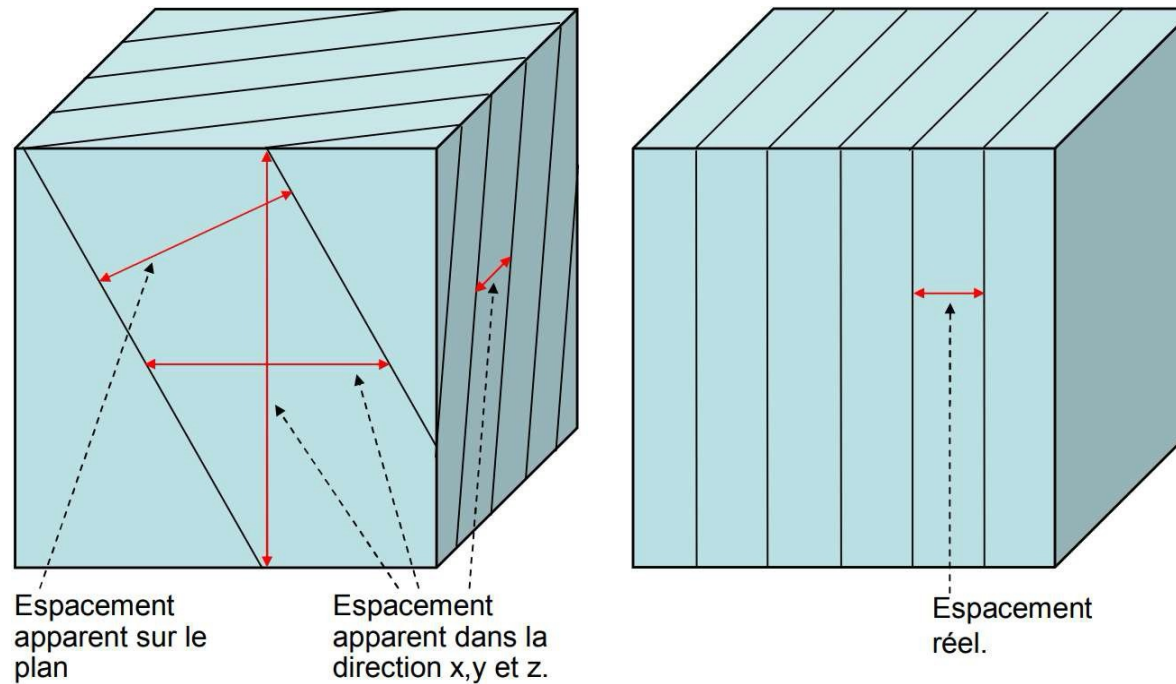


REPRESENTATION DE PLUSIEURS PLANS
PAR LEURS NORMALES INFERIEURES

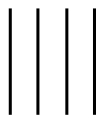


CARACTÉRISATION GÉOMÉTRIQUE DES DISCONTINUITÉS

ESPACEMENT



- On en déduit la fréquence des discontinuités λ (nbre par m. linéaire)

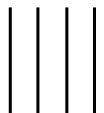


CARACTÉRISATION GÉOMÉTRIQUE DES DISCONTINUITÉS



Espacement

- Analyse de l'espacement des discontinuités :
 - Diagramme intégral de carottage
 - Indice RQD (Rock Quality Designation)
 - Fréquence des discontinuités - FD = nombre de discontinuités par mètre
 - Intervalle moyen entre discontinuées - ID

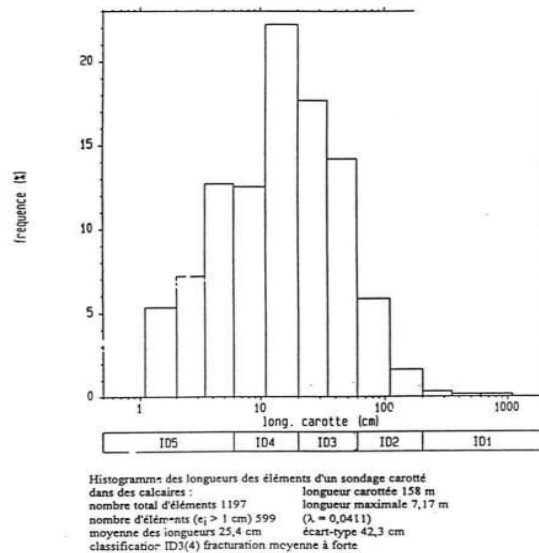


CARACTÉRISATION GÉOMÉTRIQUE DES DISCONTINUITÉS

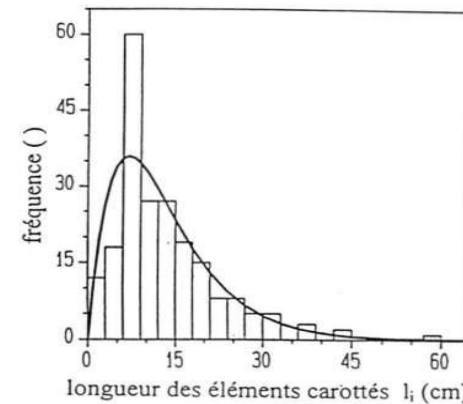
DIAGRAMME INTÉGRAL

Analyse statistique :

Analyse de l'espacement des discontinuités (Représentation)



Histogramme des longueurs de carottes (loi normale)



Histogramme des longueurs de carottes (loi log-Normale)

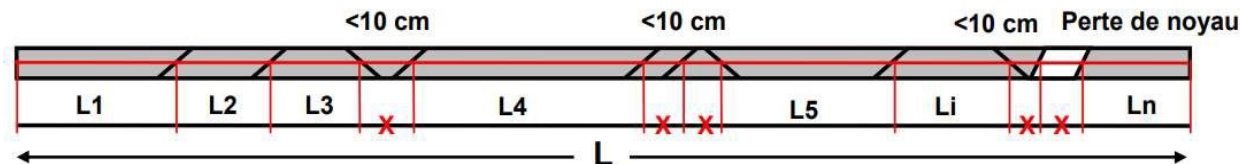


CARACTÉRISATION GÉOMÉTRIQUE DES DISCONTINUITÉS

Indice RQD

- Indice RQD - Rock Quality Designation
- Pourcentage des éléments de carotte de roches ayant une longueur supérieure ou égale à 10 cm sur la longueur totale du forage
- Décrit le degré de fracturation de la roche

$$\text{RQD} = \sum L_i / L \times 100\%, \quad L_i > 10 \text{ cm}$$



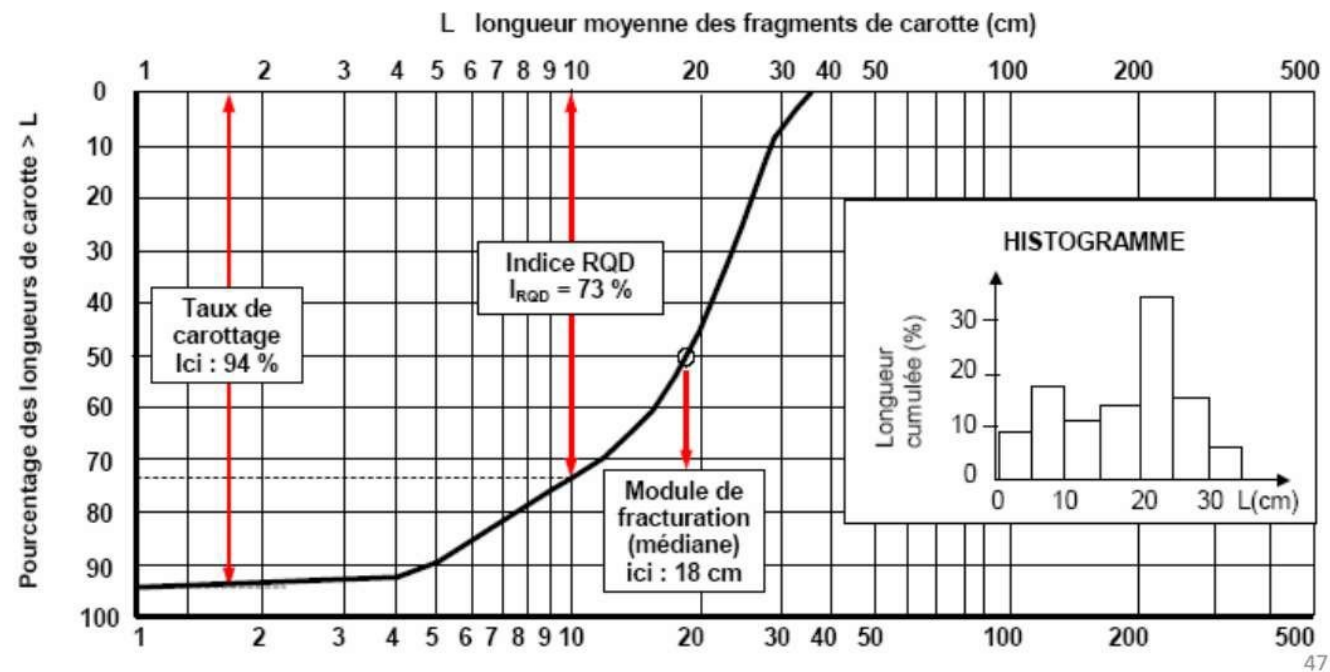
$$\text{RQD} = (L_1 + L_2 + \dots + L_n) / L \times 100\%$$



CARACTÉRISATION GÉOMÉTRIQUE DES DISCONTINUITÉS

Indice RQD

- 'courbe granulométrique'



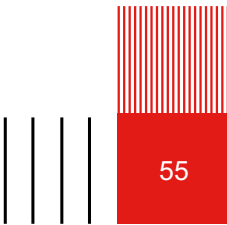
CARACTÉRISATION GÉOMÉTRIQUE DES DISCONTINUITÉS

Indice RQD

Si aucun prélèvement n'est disponible et que les discontinuités sont visibles en surface, alors Palmström (1982) propose d'estimer le RQD en fonction du nombre de discontinuités par unité de volume. Pour les massif rocheux (sans présence d'argile):

$$RQD = 115 - 3.3 J_v$$

J_v : nombre de discontinuités par unité de volume



CARACTÉRISATION GÉOMÉTRIQUE DES DISCONTINUITÉS



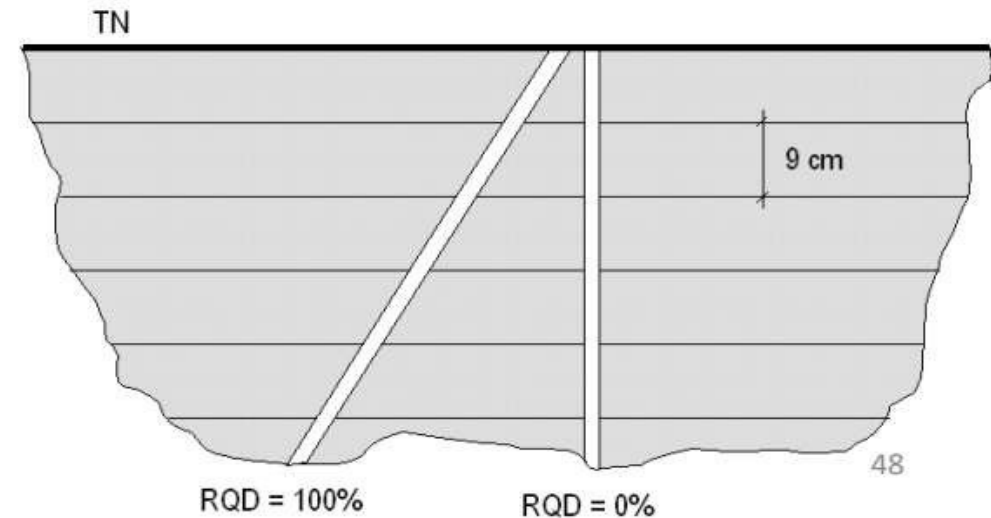
Indice RQD

- Limitation du RQD :

Configuration géologique illustrant les limites du RQD. Le terrain est stratifié et les bancs font 9 cm d'épaisseur. Il faut donc donner la direction de creusement

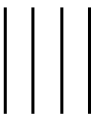
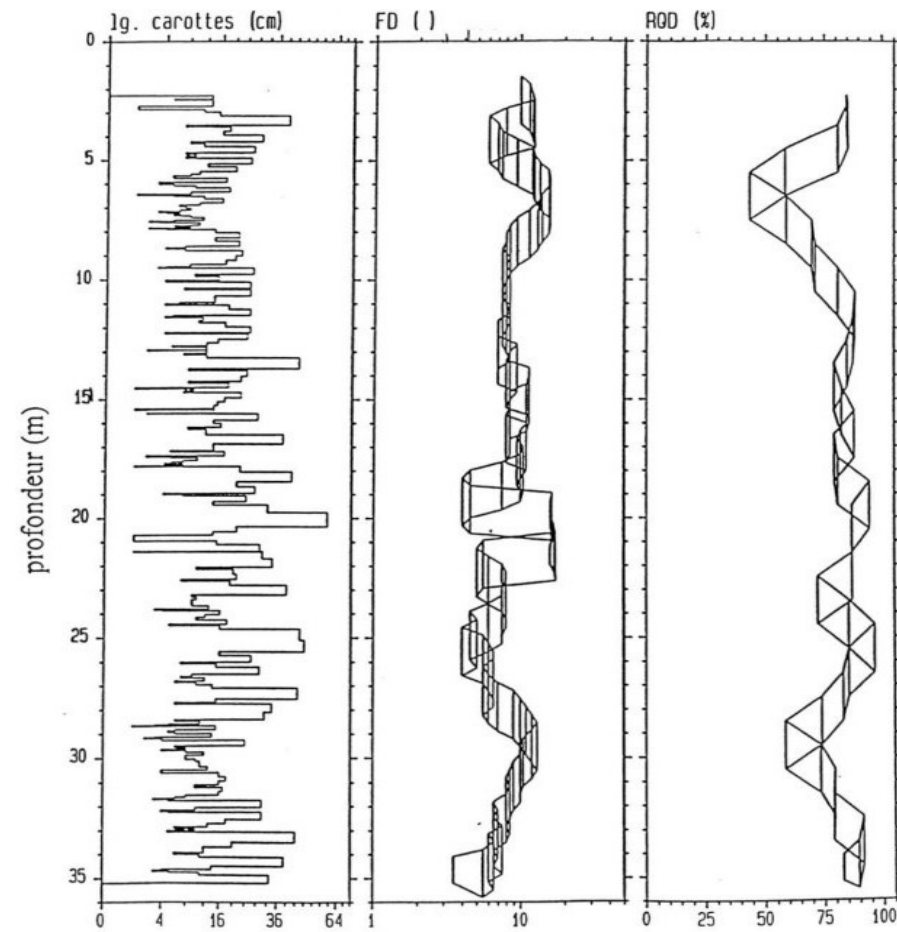
- Introduction de :

- FD = nombre de discontinuités par mètre
- ID : Intervalle moyen entre discontinuités



CARACTÉRISATION GÉOMÉTRIQUE DES DISCONTINUITÉS

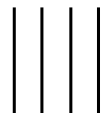
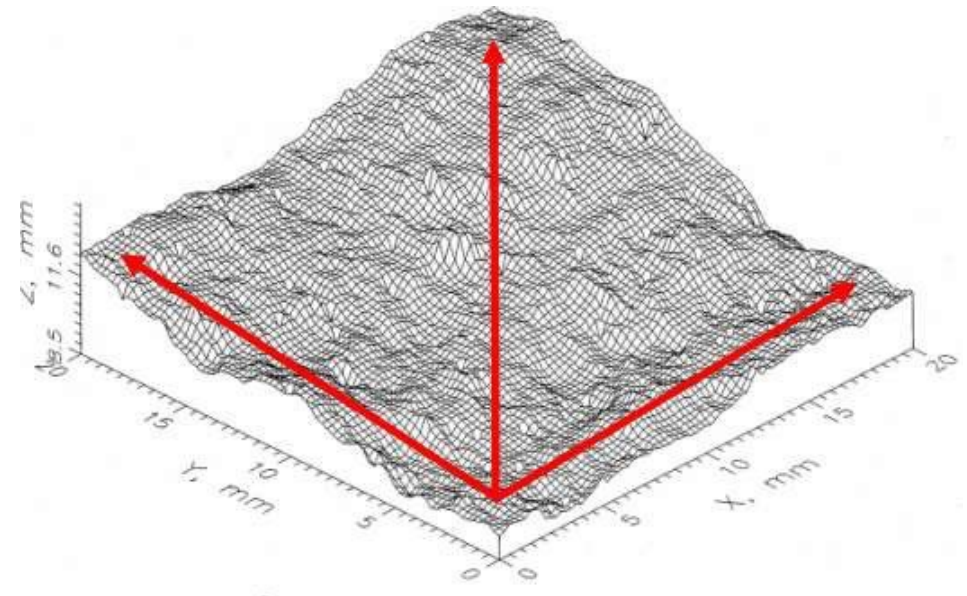
INDICES RQD ET FD



CARACTÉRISATION GÉOMÉTRIQUE DES DISCONTINUITÉS RUGOSITÉ



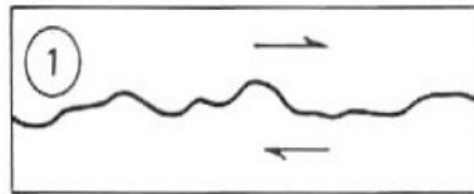
26



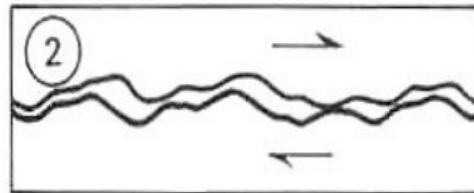
CARACTÉRISATION GÉOMÉTRIQUE DES DISCONTINUITÉS

RUGOSITÉ ET IMBRICATION

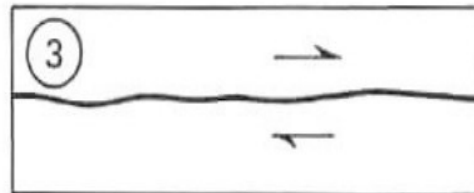
Fissure rugueuse, aspérités fortement imbriquées



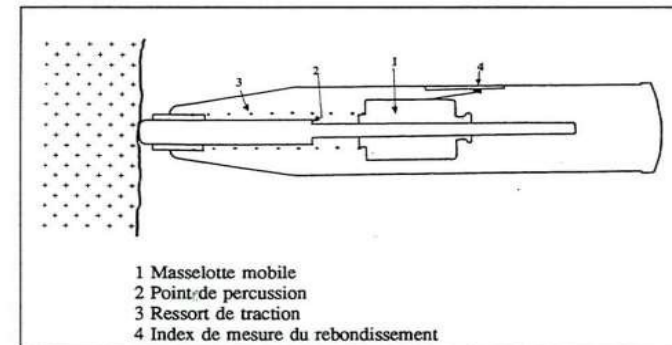
Fissure rugueuse, épontes décalées



Surface altérée à très faible rugosité



- JRC : « Joint Roughness Coefficient » : morphologie du joint
- JCS : « Joint Compressive Strength » : résistance en compression simple des épontes ; elle est souvent estimée indirectement in situ au moyen d'un scléromètre (ou marteau de Schmidt)



CARACTÉRISATION MÉCANIQUE DES DISCONTINUITÉS

FACTEURS AYANT UNE INFLUENCE

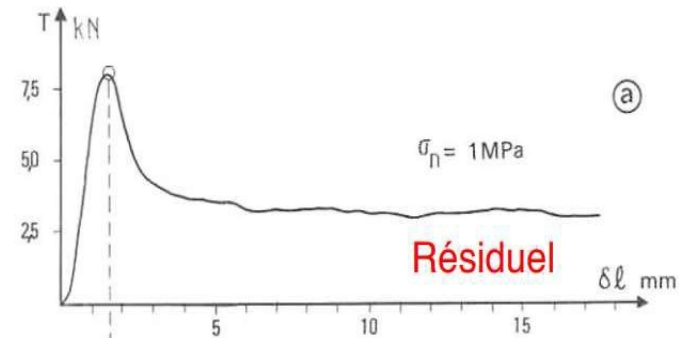
- Géométrie des surfaces en contact (rugosité, irrégularités)
- Nature des roches et degré d'altération
- Épaisseur et nature du matériau de remplissage
- Niveau des contraintes normales
- Présence d'eau (discontinuité ou remplissage)
- Amplitude du mouvement tangentiel
- Mouvements antérieurs éventuels
- Orientation du cisaillement



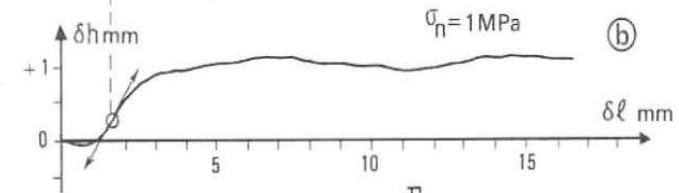
CARACTÉRISATION MÉCANIQUE DES DISCONTINUITÉS

ESSAIS DE CISAILLEMENT DIRECT

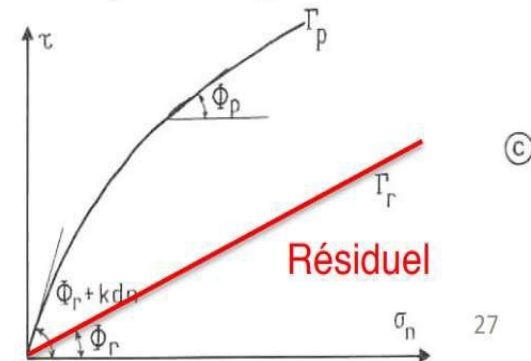
Contrainte de cisaillement τ – déplacement δl



Déplacement normal δh - déplacement δl

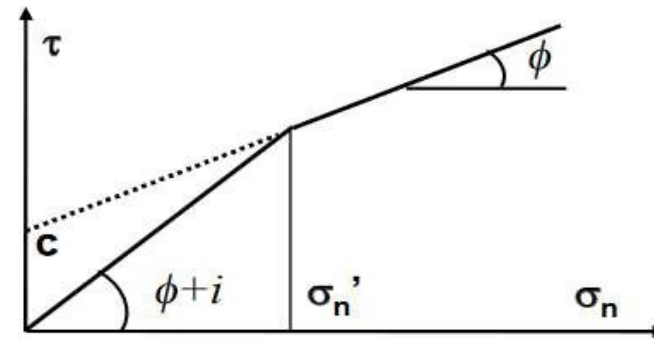
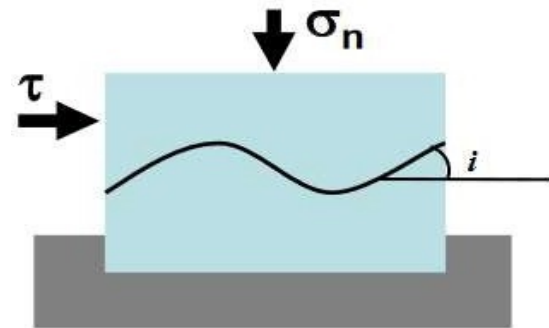
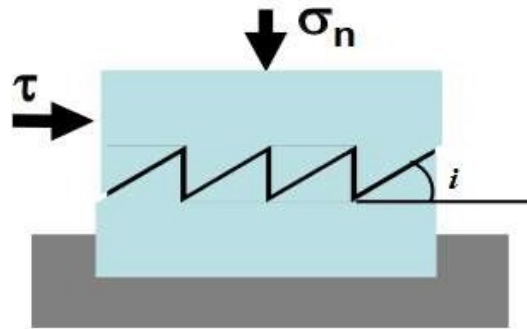


Critère de rupture (plan σ - τ)



CARACTÉRISATION MÉCANIQUE DES DISCONTINUITÉS

ESSAIS DE CISAILLEMENT DIRECT



Modèle de résistance au cisaillement bilinéaire

$$\tau = \sigma_n \tan (\phi+i) \quad \text{when } \sigma_n \leq \sigma_n'$$

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi \quad \text{when } \sigma_n \geq \sigma_n'$$



05

CLASSIFICATION DES MASSIFS ROCHEUX

CLASSIFICATION DES MASSIFS ROCHEUX

➤ RQD : fracturation des carottes

➤ Q System

➤ RMR ,

➤ GSI

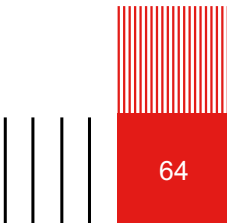
➤ RMR'

➤ SMRS

➤ Recommandations AFTES

Visent à:

- déterminer le type de soutènement à mettre en œuvre dans les tunnels
- estimer la résistance mécanique du massif, sa déformabilité





CLASSIFICATION DES MASSIFS ROCHEUX

RQD ET ID

RQD (%)	QUALITE GLOBALE DU MASSIF ROCHEUX (D'après D. Deere)
90 à 100	Excellente
75 à 90	Bonne
50 à 75	Moyenne
25 à 50	Mauvaise
0 à 25	Très mauvaise

Pourcentage des éléments de carotte de roches ayant une longueur supérieure ou égale à 10 cm sur la longueur totale du forage

ID: longueur moyenne entre discontinuités sur une carotte

INDICE ID D'INTERVALLE ENTRE DISCONTINUITES	TERMES DESCRIPTIFS DE LA DENSITE DE DISCONTINUITES
> 200 cm	Densité de discontinuités très faible
60-200 cm	Densité de discontinuités faible
20-60 cm	Densité de discontinuités moyenne
6-20 cm	Densité de discontinuités forte
<6 cm	Densité de discontinuités très forte



CLASSIFICATION DES MASSIFS ROCHEUX

RMR

- RMR: Rock Mass Rating (Bieniawski, 1989)

Nombreuses modifications et extensions de l'auteur et contributions d'autres

Appliqué à des domaines de plus en plus variés

- exploitations minières
- creusement de tunnels
- calcul de fondations de barrages
- stabilité des pentes, etc.

Repose sur l'évaluation de 6 paramètres qualitatifs ou quantitatifs



CLASSIFICATION DES MASSIFS ROCHEUX

RMR

Repose sur l'évaluation de 6 paramètres qualitatifs ou quantitatifs :

1. La résistance à la compression simple de la roche saine σ_c
2. L'indice RQD du massif rocheux
3. L'espacement moyen des discontinuités
4. L'état général des discontinuités (ouverture, persistance, rugosité...)
5. Les conditions hydrogéologiques du massif rocheux
6. L'orientation des discontinuités par rapport aux directions représentatives du problème traité

Classe	RMR	Description
1	81 - 100	Très bonne qualité
2	61 - 80	Bonne qualité
3	41 - 60	Moyenne qualité
4	21 - 40	Mauvaise qualité
5	< 20	Très mauvaise qualité

5 classes de qualité de massif rocheux en fonction du RMR

A partir du tableau suivant (sur 2 pages), on relève la note par item (A1 à A5, B, C, D, E et F) et la somme donne le RMR.

Un exemple d'utilisation



CLASSIFICATION DES MASSIFS ROCHEUX

RMR

A. CLASSIFICATION PARAMETERS AND THEIR RATINGS									
Parameter			Range of values						
1	Strength of intact rock material	Point-load strength index	>10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa	For this low range - uniaxial compressive test is preferred		
		Uniaxial comp. strength	>250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	< 1 MPa
	Rating		15	12	7	4	2	1	0
2	Drill core Quality <i>RQD</i>		90%-100%	75%-90%	50%-75%	25%-50%	< 25%		
	Rating		20	17	13	8	3		
3	Spacing of discontinuities		> 2 m	0.6-2 m	200-600 mm	60-200 mm	< 60 mm		
	Rating		20	15	10	8	5		
4	Condition of discontinuities (See E)		Very rough surfaces Not continuous No separation Unweathered wall rock	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Slightly weathered walls	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Highly weathered walls	Slickensided surfaces or Gouge < 5 mm thick or Separation 1-5 mm Continuous	Soft gouge >5 mm thick or Separation > 5 mm Continuous		
	Rating		30	25	20	10	0		
5	Ground water	Inflow per 10 m tunnel length (l/m)	None	< 10	10-25	25-125	> 125		
		(Joint water press)/ (Major principal σ)	0	< 0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	> 0.5		
		General conditions	Completely dry	Damp	Wet	Dripping	Flowing		
	Rating		15	10	7	4	0		
B. RATING ADJUSTMENT FOR DISCONTINUITY ORIENTATIONS (See F)									
Strike and dip orientations			Very favourable	Favourable	Fair	Unfavourable	Very Unfavourable		
Ratings	Tunnels & mines		0	-2	-5	-10	-12		
	Foundations		0	-2	-7	-15	-25		
	Slopes		0	-5	-25	-50			

CLASSIFICATION DES MASSIFS ROCHEUX

RMR

C. ROCK MASS CLASSES DETERMINED FROM TOTAL RATINGS					
Rating	100 ← 81	80 ← 61	60 ← 41	40 ← 21	< 21
Class number	I	II	III	IV	V
Description	Very good rock	Good rock	Fair rock	Poor rock	Very poor rock
D. MEANING OF ROCK CLASSES					
Class number	I	II	III	IV	V
Average stand-up time	20 yrs for 15 m span	1 year for 10 m span	1 week for 5 m span	10 hrs for 2.5 m span	30 min for 1 m span
Cohesion of rock mass (kPa)	> 400	300-400	200-300	100-200	< 100
Friction angle of rock mass (deg)	> 45	35-45	25-35	15-25	< 15
E. GUIDELINES FOR CLASSIFICATION OF DISCONTINUITY conditions					
Discontinuity length (persistence)	< 1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	> 20 m
Rating	6	4	2	1	0
Separation (aperture)	None	< 0.1 mm	0.1-1.0 mm	1-5 mm	> 5 mm
Rating	6	5	4	1	0
Roughness	Very rough	Rough	Slightly rough	Smooth	Slickensided
Rating	6	5	3	1	0
Infilling (gouge)	None	Hard filling < 5 mm	Hard filling > 5 mm	Soft filling < 5 mm	Soft filling > 5 mm
Rating	6	4	2	2	0
Weathering	Unweathered	Slightly weathered	Moderately weathered	Highly weathered	Decomposed
Ratings	6	5	3	1	0
F. EFFECT OF DISCONTINUITY STRIKE AND DIP ORIENTATION IN TUNNELLING**					
Strike perpendicular to tunnel axis			Strike parallel to tunnel axis		
Drive with dip-Dip 45-90°	Drive with dip-Dip 20-45°		Dip 45-90°	Dip 20-45°	
Very favourable	Favourable		Very favourable	Fair	
Drive against dip-Dip 45-90°	Drive against dip-Dip 20-45°		Dip 0-20-Irrespective of strike°		
Fair	Unfavourable		Fair		

*Some conditions are mutually exclusive. For example, if infilling is present, the roughness of the surface will be overshadowed by the influence of the gouge. In such cases use A.4 directly.

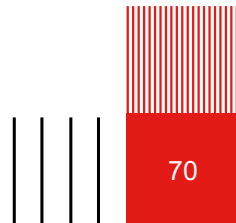
**Modified after Wickham et al. (1972).

CLASSIFICATION DES MASSIFS ROCHEUX

RMR

A tunnel is to be driven through a slightly weathered granite with a dominant joint set dipping at 60° against the direction of the drive. Index testing and logging of diamond drilled core give typical Point-load strength index values of 8 MPa and average *RQD* values of 70%. The joints, which are slightly rough and slightly weathered with a separation of < 1 mm, are spaced at 300 mm. Tunnelling conditions are anticipated to be wet.

le	Item	Value	Rating
A.1	Point load index	8 MPa	12
A.2	<i>RQD</i>	70%	13
A.3	Spacing of discontinuities	300 mm	10
E.4	Condition of discontinuities	Note 1	22
A.5	Groundwater	Wet	7
B	Adjustment for joint orientation	Note 2	-5
Total			59



CLASSIFICATION DES MASSIFS ROCHEUX

RMR



Note 1. For slightly rough and altered discontinuity surfaces with a separation of < 1 mm, Table 4.4.A.4 gives a rating of 25. When more detailed information is available, Table 4.4.E can be used to obtain a more refined rating. Hence, in this case, the rating is the sum of: 4 (1-3 m discontinuity length), 4 (separation 0.1-1.0 mm), 3 (slightly rough), 6 (no infilling) and 5 (slightly weathered) = 22.

Note 2. Table 4.4.F gives a description of 'Fair' for the conditions assumed where the tunnel is to be driven against the dip of a set of joints dipping at 60° . Using this description for 'Tunnels and Mines' in Table 4.4.B gives an adjustment rating of -5.

CLASSIFICATION DES MASSIFS ROCHEUX

RMR - UTILISATION

Rock mass class	Excavation	Rock bolts (20 mm diameter, fully grouted)	Shotcrete	Steel sets
I - Very good rock RMR: 81-100	Full face, 3 m advance.	Generally no support required except spot bolting.		
II - Good rock RMR: 61-80	Full face , 1-1.5 m advance. Complete support 20 m from face.	Locally, bolts in crown 3 m long, spaced 2.5 m with occasional wire mesh.	50 mm in crown where required.	None.
III - Fair rock RMR: 41-60	Top heading and bench 1.5-3 m advance in top heading. Commence support after each blast. Complete support 10 m from face.	Systematic bolts 4 m long, spaced 1.5 - 2 m in crown and walls with wire mesh in crown.	50-100 mm in crown and 30 mm in sides.	None.
IV - Poor rock RMR: 21-40	Top heading and bench 1.0-1.5 m advance in top heading. Install support concurrently with excavation, 10 m from face.	Systematic bolts 4-5 m long, spaced 1-1.5 m in crown and walls with wire mesh.	100-150 mm in crown and 100 mm in sides.	Light to medium ribs spaced 1.5 m where required.
V - Very poor rock RMR: < 20	Multiple drifts 0.5-1.5 m advance in top heading. Install support concurrently with excavation. Shotcrete as soon as possible after blasting.	Systematic bolts 5-6 m long, spaced 1-1.5 m in crown and walls with wire mesh. Bolt invert.	150-200 mm in crown, 150 mm in sides, and 50 mm on face.	Medium to heavy ribs spaced 0.75 m with steel lagging and forepoling if required. Close invert.

Recommandations pour la mise en œuvre du soutènement d'un tunnel sur la base du RMR

CLASSIFICATION DES MASSIFS ROCHEUX

INDICE DE BARTON, Q-SYSTEM

$$Q = \frac{RQD}{J_{number}} * \frac{J_{roughness}}{J_{alteration}} * \frac{J_{water}}{SRF}$$

Varie de 0,001 à 1000	"Taille" des blocs	Résistance entre les blocs	Contraintes actives
-----------------------	-----------------------	----------------------------------	------------------------

- RQD
- J_n : le nombre de familles de joints exprimés
- J_r : la rugosité des joints (on retient le joint le plus défavorable)
- J_a : le degré d'altération des joints ou de leur remplissage (on retient le joint le plus altéré)
- J_w : les arrivées d'eau potentielles (débit et pression)
- SRF : "Stress Reduction Factor" qualifiant les conditions de contraintes en place (s'applique seulement en souterrain)

Valeurs fournies par des tables

CLASSIFICATION DES MASSIFS ROCHEUX

Q SYSTEM

Intervalles de valeurs du coefficient Q	Qualité du massif
400 - 1000	Exceptionnellement bonne
100 - 400	Extrêmement bonne
40 - 100	Très bonne
10 - 40	Bonne
4 - 10	Moyenne
1 - 4	Mauvaise
0.1 - 1	Très mauvaise
0.01 – 0.1	Extrêmement mauvaise
0.001 – 0.01	Exceptionnellement mauvaise

Permet aussi de déterminer les caractéristiques mécaniques du massif





006

RÉSISTANCE D'UN MASSIF ROCHEUX

RÉSISTANCE D'UN MASSIF ROCHEUX

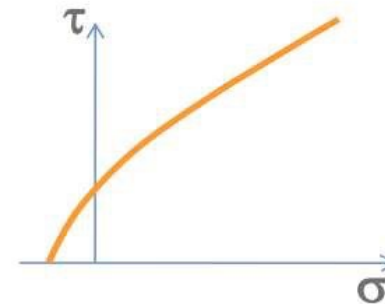
- ✓ Les travaux les plus importants dans ce domaine sont ceux de Hoek et Brown (synthétisés dans Hoek, Kaiser et Brown, 1997). Le critère de rupture adopté est un critère généralisé de la forme :

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_c (m_b \sigma'_3 / \sigma'_c + s)^a$$

a , s , et m_b sont des constantes caractéristiques

Pour la **roche intacte** Hoek et Brown proposent :

- $m_b = m_i$ Constante caractéristique de la roche intacte.
Des relations entre m_b et m_i sont obtenues par essais triaxiaux.
Le tableau suivant présente des valeurs moyennes.
- $s = 1$
- $a = 1/2$ Critère parabolique



Pour le **massif rocheux** Hoek et Brown proposent :

- **Pour $GSI > 25$**
 - $m_b = m_i \exp^{(GSI - 100)/28}$
 - $s = \exp^{(GSI - 100)/9}$
 - $a = 0,5$
- **Pour $GSI < 25$**
 - $s = 0$
 - $a = 0,65 (GSI/200)$

Avec :

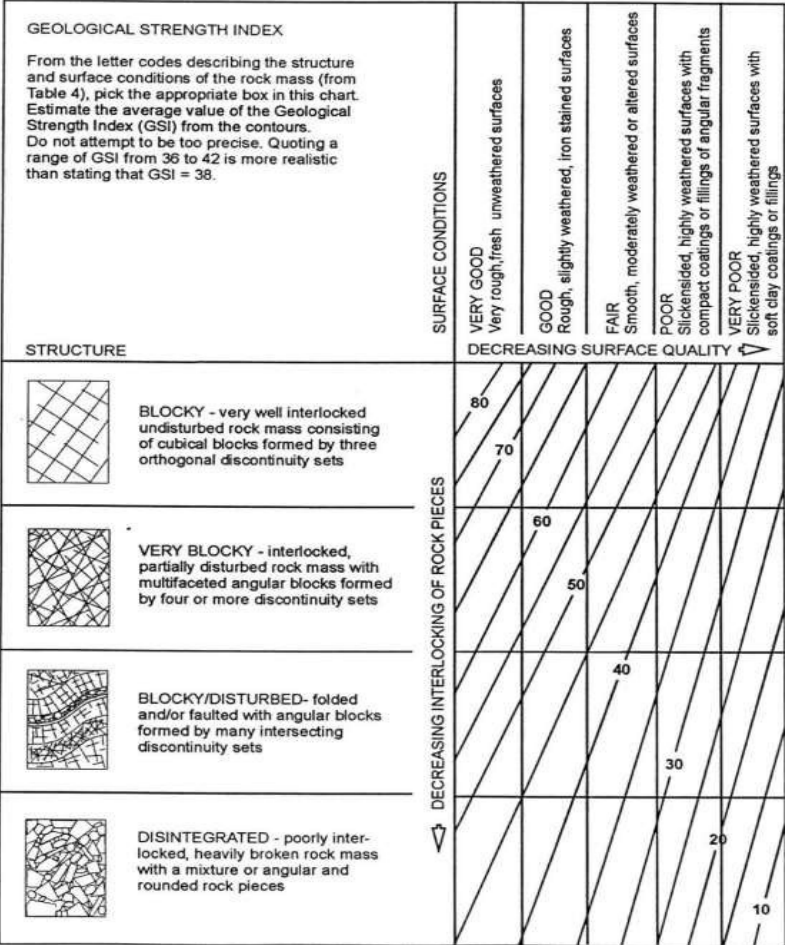
m_i caractéristique de la roche intacte

GSI , indice dérivant du RMR en considérant un massif sec et que les joints ont une orientation favorable



RÉSISTANCE D'UN MASSIF ROCHEUX

Estimation du GSI sur la base de la géologie et de la fracturation



RÉSISTANCE D'UN MASSIF ROCHEUX

Table 8.3: Values of the constant m_i for intact rock, by rock group. Note that values in parenthesis are estimates.

Rock type	Class	Group	Texture			
			Course	Medium	Fine	Very fine
SEDIMENTARY	Clastic		Conglomerate (22)	Sandstone 19 ← Greywacke (18) →	Siltstone 9	Claystone 4
		Non-Clastic	Organic	← Chalk 7 → ← Coal (8-21) →		
	Carbonate		Breccia (20)	Sparitic Limestone (10)	Micritic Limestone 8	
	Chemical			Gypstone 16	Anhydrite 13	
	METAMORPHIC	Non Foliated		Marble 9	Hornfels (19)	Quartzite 24
Slightly foliated		Migmatite (30)	Amphibolite 31	Mylonites (6)		
Foliated*		Gneiss 33	Schists (10)	Phyllites (10)	Slate 9	
IGNEOUS	Light		Granite 33		Rhyolite (16)	Obsidian (19)
			Granodiorite (30)		Dacite (17)	
	Dark		Diorite (28)		Andesite 19	
		Gabbro 27	Dolerite (19)	Basalt (17)		
		Norite 22				
	Extrusive pyroclastic type		Agglomerate (20)	Breccia (18)	Tuff (15)	

*These values are for intact rock specimens tested normal to foliation. The value of m_i will be significantly different if failure occurs along a foliation plane (Hoek, 1983).

Valeurs de m_i

RÉSISTANCE D'UN MASSIF ROCHEUX

Estimation de m_b ,
 m_i , s et a , à partir
du RMR

GENERALISED HOEK-BROWN CRITERION		SURFACE CONDITION					
$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_c} + s \right)^a$ σ_1' = major principal effective stress at failure σ_3' = minor principal effective stress at failure σ_c = uniaxial compressive strength of <i>intact</i> pieces of rock m_b, s and a are constants which depend on the composition, structure and surface conditions of the rock mass		VERY GOOD Very rough, unweathered surfaces	GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces	FAIR Smooth, moderately weathered or altered surfaces	POOR Slackensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings containing angular rock fragments	VERY POOR Slackensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings	
STRUCTURE							
	BLOCKY -very well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three orthogonal discontinuity sets	m_i/m_b s a E_{in} v GSI	0.60 0.190 0.5 75,000 0.2 85	0.40 0.062 0.5 40,000 0.2 75	0.26 0.015 0.5 20,000 0.25 62	0.16 0.003 0.5 9,000 0.25 48	0.08 0.0004 0.5 3,000 0.25 34
	VERY BLOCKY-interlocked, partially disturbed rock mass with multifaceted angular blocks formed by four or more discontinuity sets	m_i/m_b s a E_{in} v GSI	0.40 0.062 0.5 40,000 0.2 75	0.29 0.021 0.5 24,000 0.25 65	0.16 0.003 0.5 9,000 0.25 48	0.11 0.001 0.5 5,000 0.25 38	0.07 0 0.53 2,500 0.3 25
	BLOCKY/SEAMY-folded and faulted with many intersecting discontinuities forming angular blocks	m_i/m_b s a E_{in} v GSI	0.24 0.012 0.5 18,000 0.25 60	0.17 0.004 0.5 10,000 0.25 50	0.12 0.001 0.5 6,000 0.25 40	0.08 0 0.5 3,000 0.3 30	0.06 0 0.55 2,000 0.3 20
	CRUSHED-poorly interlocked, heavily broken rock mass with a mixture of angular and rounded blocks	m_i/m_b s a E_{in} v GSI	0.17 0.004 0.5 10,000 0.25 50	0.12 0.001 0.5 6,000 0.25 40	0.08 0 0.5 3,000 0.3 30	0.06 0 0.55 2,000 0.3 20	0.04 0 0.60 1,000 0.3 10

ENPC - OCTUJ

Note 1: The in situ deformation modulus E_{in} is calculated from Equation 4.7 (page 47, Chapter 4). Units of E_{in} are MPa.

SOURCES UTILISÉES

- Mécanique des Roches et Travaux Souterrains, BG Consulting, 8^{ème} édition
- Description du massif rocheux et du matériaux rocheux. D. Ha ntz, 2012.
- Mécanique des roches appliquée aux ouvrages souterrains. Méthodes spécifiques d'analyse. ENPC. 2021
- Le diagnostic de stabilité des carrières souterraines abandonnées. Guide méthodologique. Ifsttar.
- Apport de la mécanique des roches fondamentale. F. Pellet, 2018
- Mécanique des roches – Courses lectures, EPFL 2008
- Cours de F. Laigle, Master GAIA, Chambéry. 2021

Ce cours a été élaboré avec S. LAMBERT de l'INRAe

