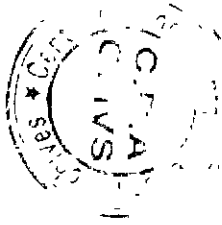


**ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES**  
**Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS /**  
**STABILITE DES APPUIS**

**ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES**  
**GEOLOGIE / TRAITEMENT DES FONDATIONS**  
**STABILITE DES APPUIS**  
**4 novembre 2010**



**Partie 2 / 2**

- ❖ Rappels de géologie
- ❖ Les classifications de massifs rocheux
- ❖ Injections

**ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES**  
**Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS /**  
**STABILITE DES APPUIS**

**L'ANALYSE GEOLOGIQUE COMME PREMIERE**  
**ETAPE INDISPENSABLE A LA COMPREHENSION**  
**DU COMPORTEMENT D'UNE FONDATION DE**  
**BARRAGE**

Rappels de géologie

**ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES**  
**Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS /**  
**STABILITE DES APPUIS**

## Fondations rocheuses

### Quelques définitions

- La matrice rocheuse  
Roche intacte, sans fracture apparente (testée en laboratoire)
- Les discontinuités  
Stratification, diaclases, schistosité, etc. (joints)  
Les failles
- Le massif rocheux  
L'ensemble matrice rocheuse + discontinuités à l'échelle de l'ouvrage

**ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES**  
**Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS /**  
**STABILITE DES APPUIS**

Massif  
rocheux  
(très)  
fracturé



Calcaires, Monts Zagros, Iran

# ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES

## Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS / STABILITE DES APPUIS

### Fondations rocheuses

#### 1. Roches magmatiques

- Roches plutoniques

Cristallisation lente en profondeur

Exemple:

Granite, diorite,  
rhyolite, etc..

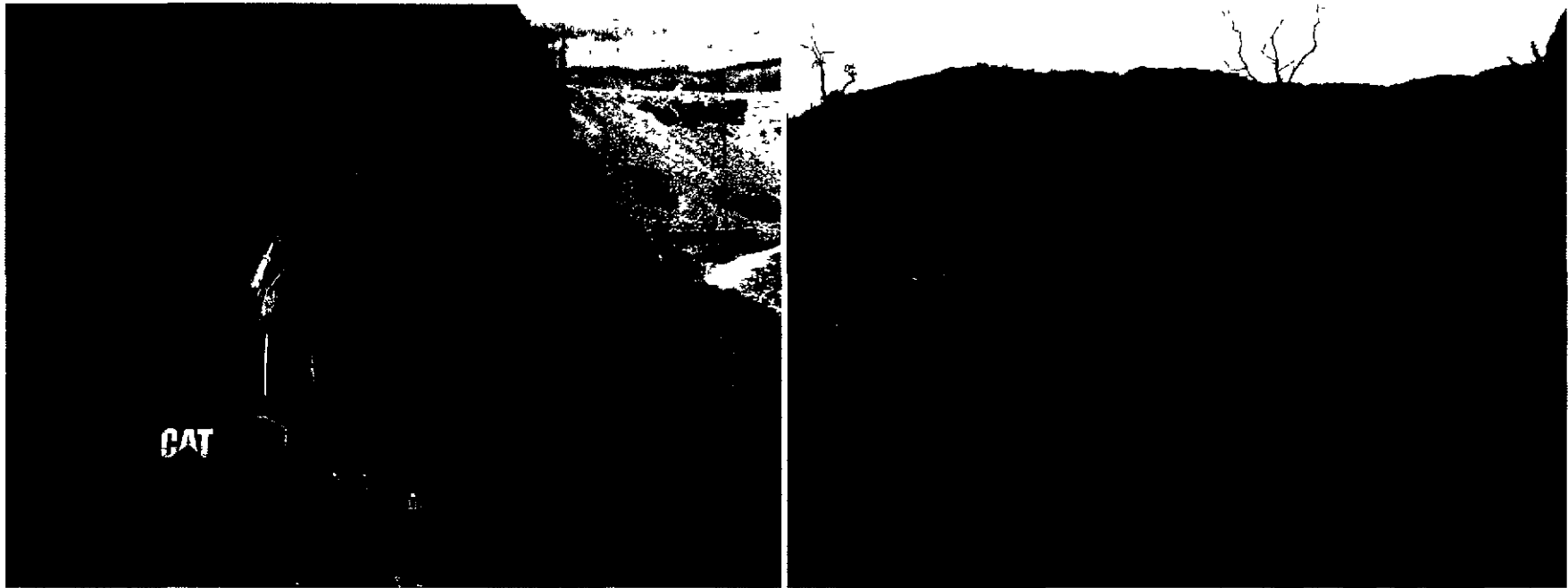
Granites, Rio Guayllabamba,  
Equateur



# ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES

## Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS / STABILITE DES APPUIS

- Roches éruptives  
Epanchement et cristallisation en surface ou à très faible profondeur  
Exemple: basaltes, andésite



Coulée et « orgues » basaltiques, Gibe III, Ethiopie

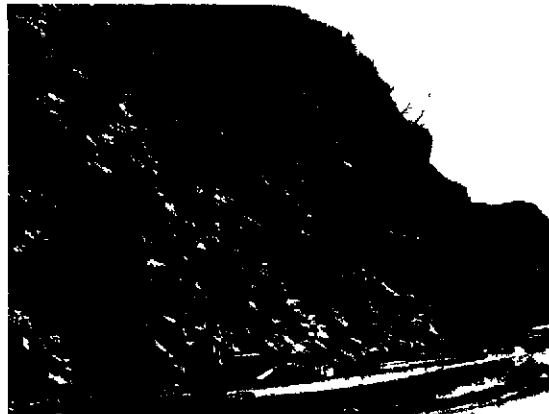
# ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES

## Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS / STABILITE DES APPUIS

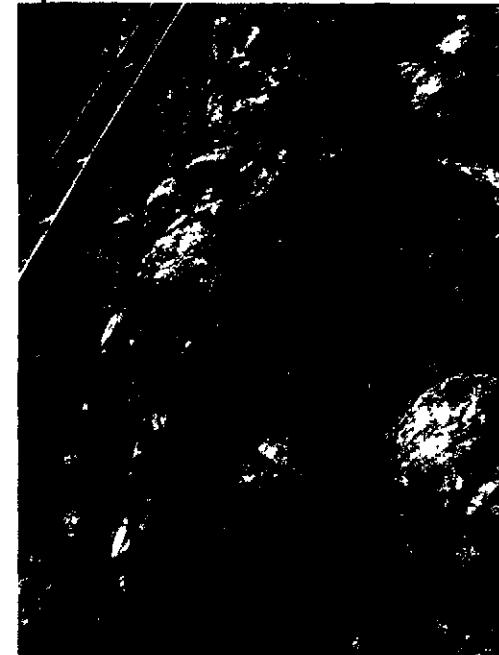
Les roches magmatiques se caractérisent par leur composition minéralogique (teneur en quartz et teneur en ferromagnésiens)

Les matrices rocheuses les plus résistantes (>100 MPa) sont souvent des roches magmatiques

Mais processus d'altération...



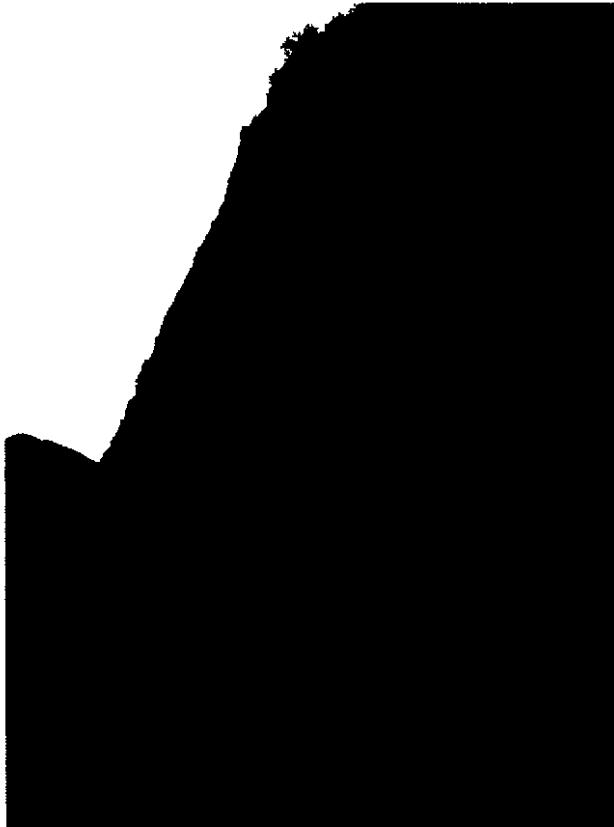
Trachytes de Gibe III, Ethiopie



**ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES**  
**Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS /**  
**STABILITE DES APPUIS**

Degrés de métamorphisme divers

Schistes



Fondation barrage de Mazar, Equateur

Quartzites



Fondation barrage de Dul, Jammu &  
Kashmir, Inde



**ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES**  
**Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS /**  
**STABILITE DES APPUIS**

Et les mélanges....



Alternances grès-marnes, Cuzco, Pérou

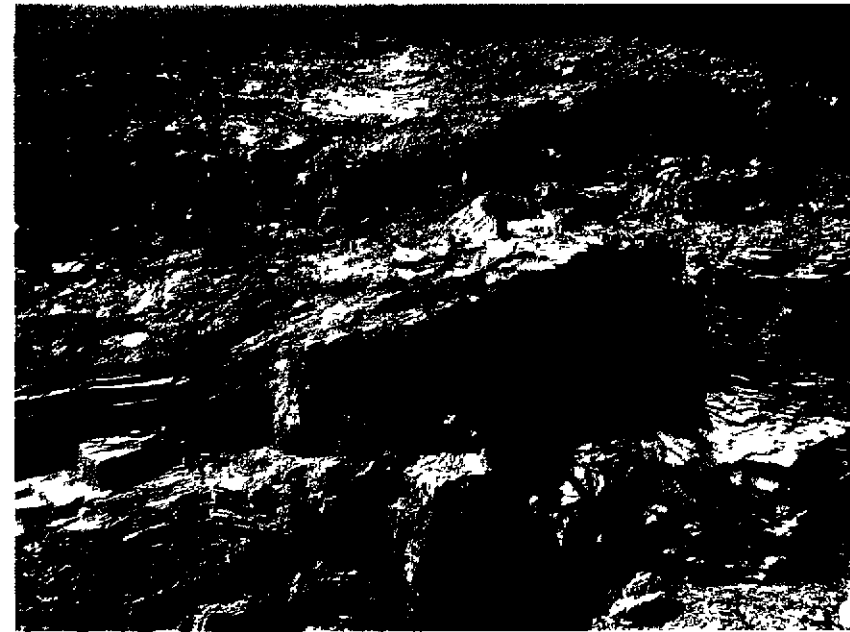
# ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES

## Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS / STABILITE DES APPUIS

### Les discontinuités ou joints

Tout type de cassure de la roche

- Stratification, diaclase
- Schistosité, foliation
- Joints de refroidissement
- Etc.



Calcaires, Monts Zagros, Iran

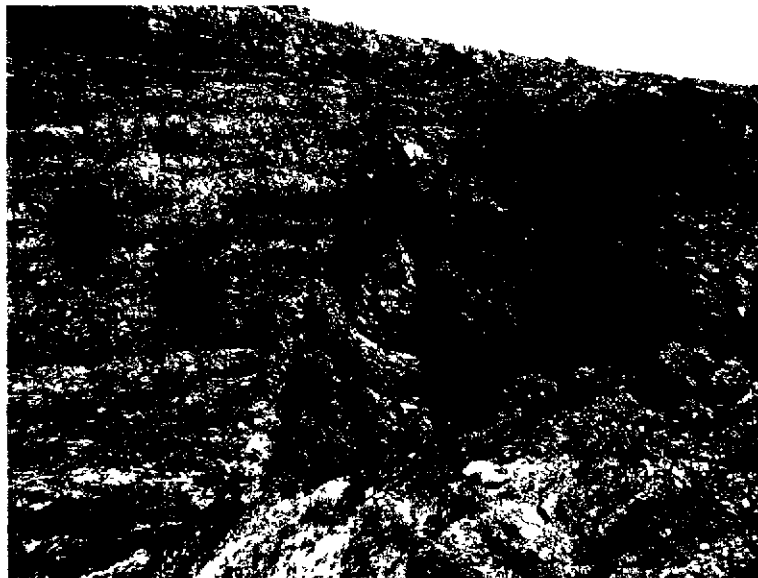
# ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES

## Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS / STABILITE DES APPUIS

### Failles et contexte tectonique

Faille: cassure de la fondation le long de laquelle un déplacement relatif des deux compartiments séparés par la faille a eu lieu au cours de l'histoire géologique

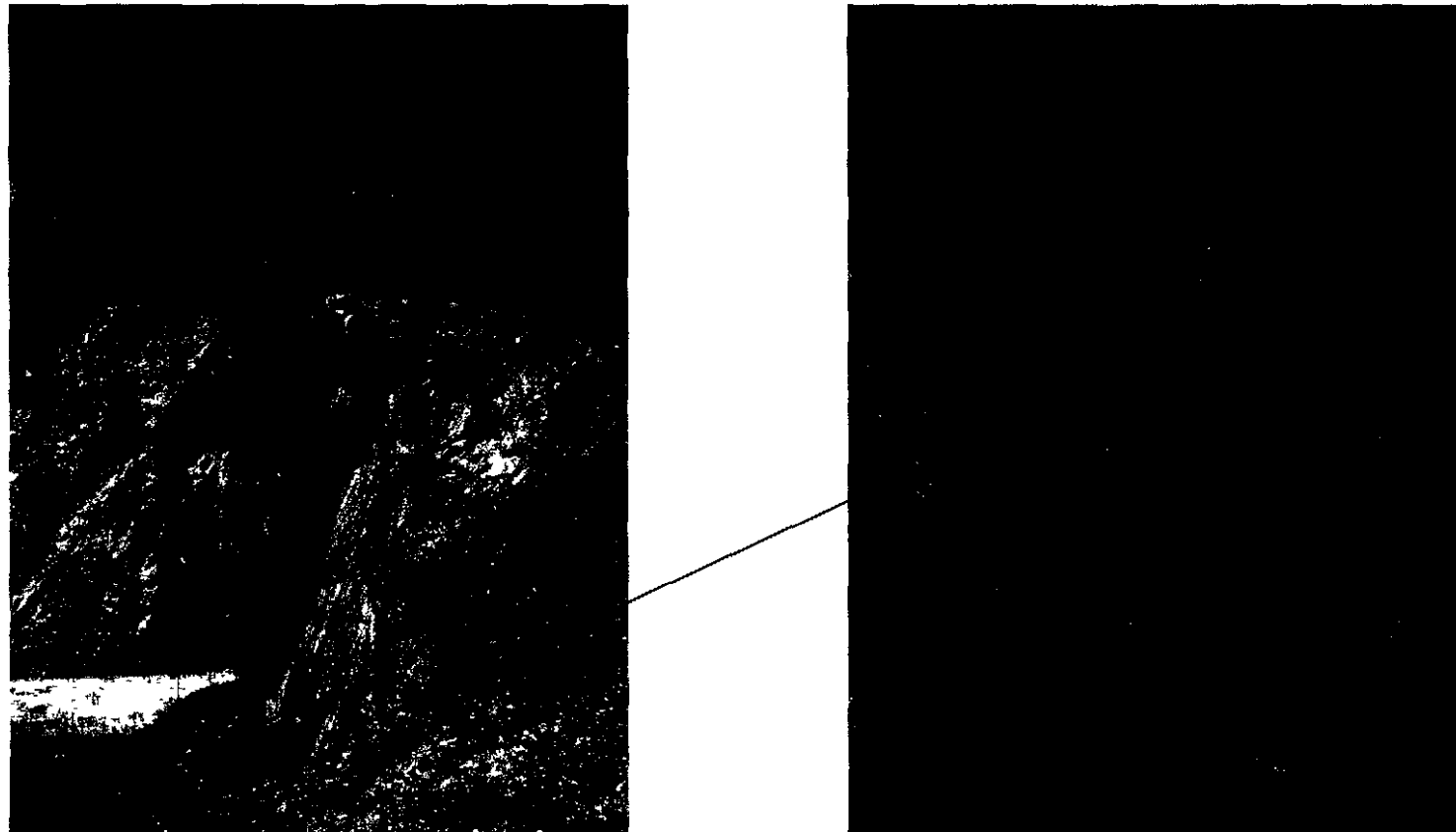
- S'emploie si la cassure est continue à l'échelle de la fondation (sinon discontinuité)



Calcaires, Monts Zagros, Iran

**ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES**  
**Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS /**  
**STABILITE DES APPUIS**

Les failles sont le produit de la tectonique de la région



Monts Zagros, Iran

**ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES**  
**Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS /**  
**STABILITE DES APPUIS**

## Failles actives

Se dit de failles pouvant encore être le siège de mouvement

- En général, failles d'âge Quaternaire (<1,8 Ma)



Site de Dul Hasti, Jammu  
& Kashmir, Inde

# ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES

## Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS / STABILITE DES APPUIS

Déterminent le risque sismique au niveau d'un site

- Détermination des séismes de projet pour un barrage



Site de Dul Hasti, Jammu & Kashmir, Inde

Les indices...



Monts Zagros, Iran

**ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES**  
**Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS /**  
**STABILITE DES APPUIS**

## Caractérisation des fondations

Essentiellement à déterminer

- Minéralogie, densité, porosité
- Résistance du massif (force portante)  
A la fois sec et à l'état saturé
- Déformabilité du massif
- Perméabilité du massif
- Autres

Les moyens d'apprécier ces paramètres dépendront de la nature de la fondation (essais différents)

- Distribution granulométrique essentielle dans le cas des formations superficielles ou des roches meubles

**ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES**  
**Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS /**  
**STABILITE DES APPUIS**

## Ce qui doit attirer l'attention....

Caractéristiques des failles et discontinuités

L'altération des roches

- Altération par les agents météoriques
- Altération hydrothermale
- Présence de minéraux ou roches solubles
- Les karsts

Présence de limons ou sables lâches



**ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES**  
**Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS /**  
**STABILITE DES APPUIS**

**Failles et discontinuités importantes**

**Chemins de percolation privilégiés pour les fluides**

- Développement de l'altération

**Présence fréquente de remplissages**

- Argile, sable, roche broyée, brèche de faille, etc.

-----> **Surfaces de faiblesse du massif**



Province du Guangdong, Chine

**ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES**  
**Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS /**  
**STABILITE DES APPUIS**

## Failles et discontinuités importantes

Il est essentiel d'investiguer l'orientation et les caractéristiques de ces discontinuités

- Résistance au cisaillement
- ----> Peut mettre en jeu la stabilité des rives et l'étanchéité du réservoir



Essais de cisaillement sur joints, site de Gibe III, Ethiopie

# ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES

## Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS / STABILITE DES APPUIS

### Failles actives

- Eviter de construire des ouvrages au voisinage de failles actives (dans la mesure du possible)

Cas du barrage de Clyde (Nouvelle-Zélande)

Joint



# ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES

## Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS / STABILITE DES APPUIS

### Altération des roches

#### Altération chimique par les agents météoriques et eaux souterraines

- Progresse essentiellement le long du réseau 3D des discontinuités du massif (le plus souvent à partir de la surface)
- Peut atteindre dans certains cas des profondeurs de près de 100 mètres, voire plus



Site de Mazar,  
Equateur

**ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES**  
**Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS /**  
**STABILITE DES APPUIS**

## Altération des roches

### Altération hydrothermale

- Altération chimique par des circulations de fluides hydrothermaux (passées ou actuelles)
- Souvent plus agressive et « pénétrante » que l'altération par eau et agent météorique

Peut affecter la matrice rocheuse profondément jusqu'à formation de poches plurimétriques de roche totalement décomposée

# ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES

## Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS / STABILITE DES APPUIS



Site du barrage de Gibe III, Ethiopie

Y penser dans les régions volcaniques ou connues  
pour leurs thermes....

**ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES**  
**Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS /**  
**STABILITE DES APPUIS**

## Altération des roches

### Présence de minéraux ou roches solubles

Minéraux solubles: gypse, sel, etc.

- Peuvent être présents dans des formations sédimentaires (voir marnes triasiques)

Si de tels minéraux sont présents, ils doivent le rester en très faible quantité, isolés dans une matrice non soluble, sans gradient hydraulique conséquent

# ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES

## Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS / STABILITE DES APPUIS

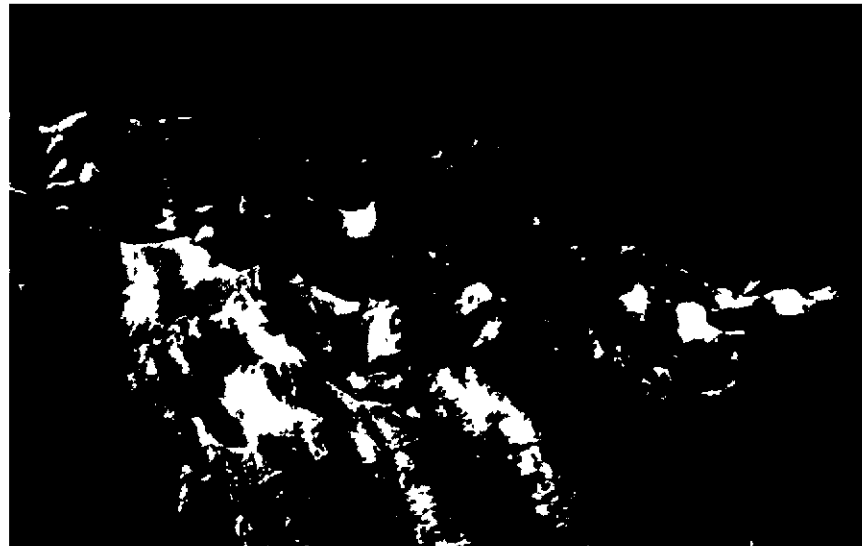
### Roches solubles

- Des cavités plurimétriques peuvent exister ou être générées dans de telles roches

Notamment anhydrite, gypse, sel, etc.

Exemple du barrage de Mossoul (Irak), construit sur du gypse soluble

Zone des  
gypses du Trias  
(Alpes  
Françaises)





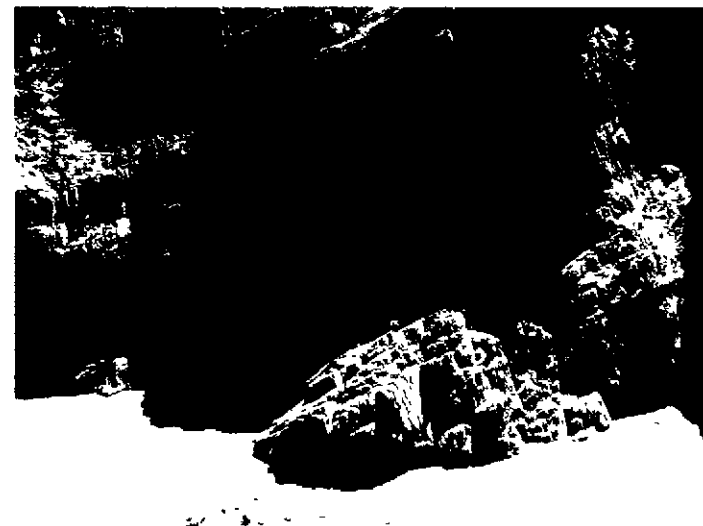
# ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES

## Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS / STABILITE DES APPUIS

### Les karsts

Forme d'altération affectant les roches calcaires

- Dissolution de la roche par eaux chargée en gaz carbonique
- Karsts: cavités de toutes dimensions s'agencant généralement suivant le réseau de discontinuités du massif  
Jusqu'à grottes et rivières souterraines



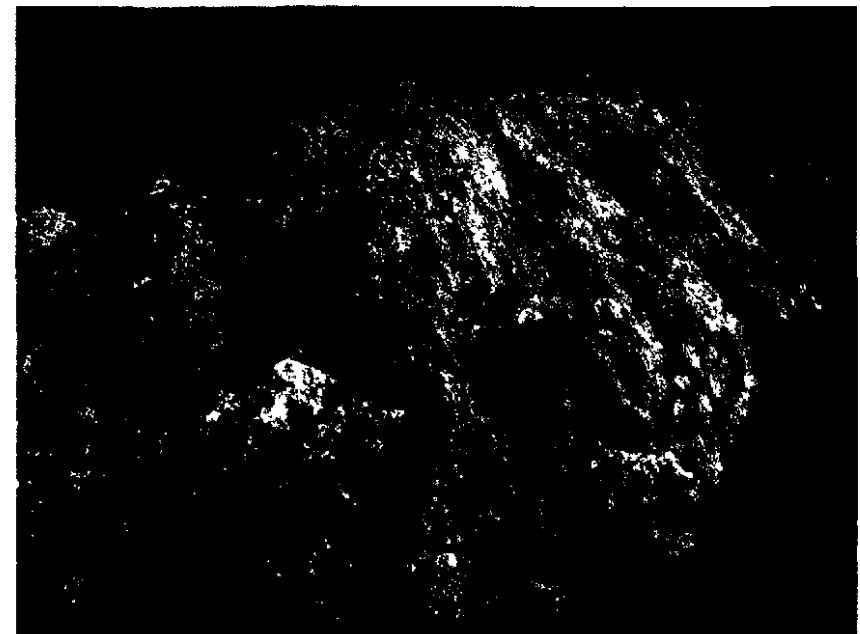
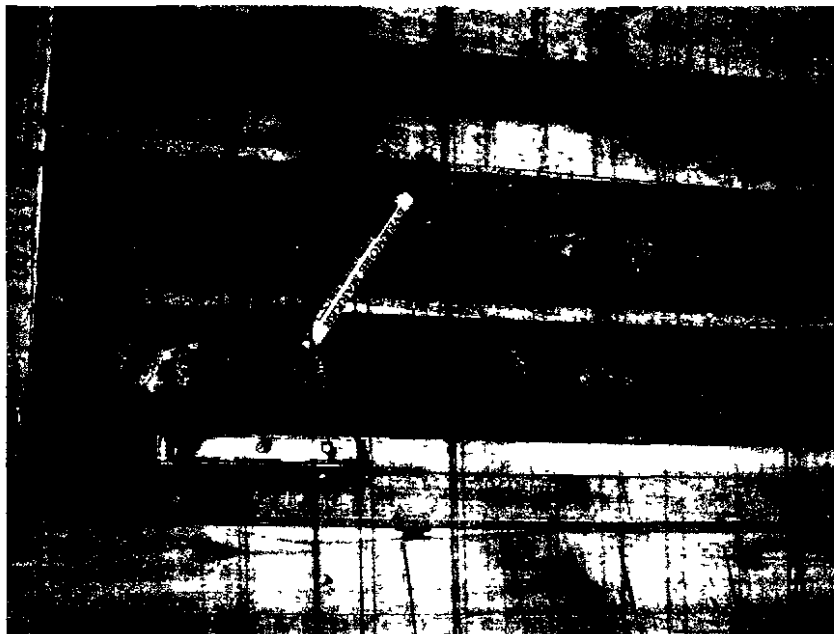
Calcaires karstiques, Monts Zagros, Iran

# ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES

## Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS / STABILITE DES APPUIS

Le phénomène de karstification peut être plus ou moins étendu

Les karsts peuvent avoir été remplis postérieurement



Calcaires karstiques, Monts Zagros, Iran

**ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES**  
**Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS /**  
**STABILITE DES APPUIS**

## Les karsts

La présence de karsts peut causer de gros problèmes d'étanchéité du réservoir et de la fondation

- Cas du barrage du Lar, en Iran  
Présence d'un réseau karstique remblayé  
Le réservoir n'a jamais pu être rempli complètement



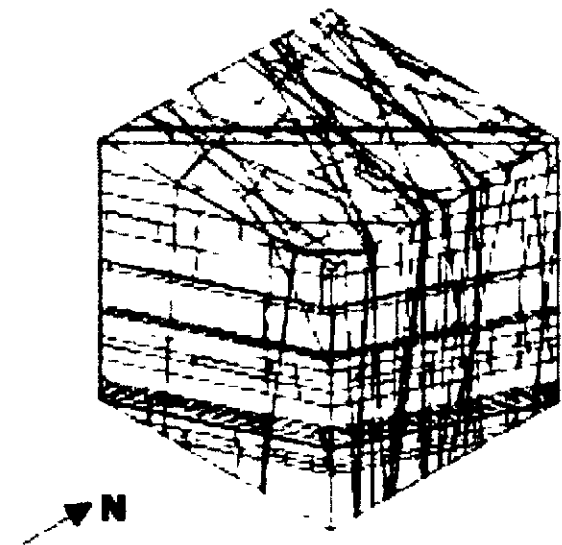
**ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES**  
**Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS /**  
**STABILITE DES APPUIS**

Investigation des massifs rocheux  
de fondation

Notions de mécanique des roches

**ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES**  
**Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS /**  
**STABILITE DES APPUIS**

**Un massif rocheux se caractérise par ses discontinuités  
constituant un réseau  
3D, qu'il faudra  
représenter :**



**ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES**  
**Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS /**  
**STABILITE DES APPUIS**

## Les classifications des massifs rocheux

A l'origine conçues pour les travaux souterrains,  
pour la détermination rapide d'un mode de  
soutènement

A partir de données d'entrée faciles à obtenir,  
en déduisent des caractéristiques qualitatives  
du massif rocheux

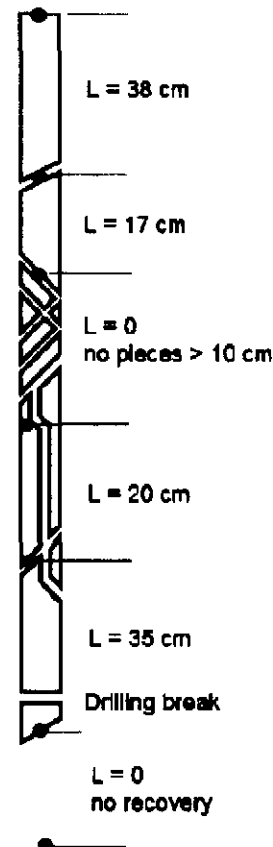
- Problème de l'effet d'échelle

# ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES

## Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS / STABILITE DES APPUIS

Un paramètre  
d'identification  
très utilisé:  
le RQD (Rock  
Quality  
Designation)

- Introduit par  
Don Deere



Total length of core run = 200 cms

$$RQD = \frac{\sum \text{Length of core pieces} > 10 \text{ cm length}}{\text{Total length of core run}} \times 100$$

$$RQD = \frac{38 + 17 + 20 + \dots}{200} \times 100 = 55 \%$$

Figure 1: Procedure for measurement and calculation of *RQD* (After Deere, 1989).

**ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES**  
**Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS /**  
**STABILITE DES APPUIS**

## Les classifications des massifs rocheux

### Les principales classifications existantes

- **Indice Q de Barton (1974)**  
A l'origine pour la détermination de soutènements en souterrain
- **RMR: Rock Mass Rating (notation de massif rocheux) de Bieniawski**  
**GSI: Geological Strength Index (index de résistance géologique) de Hoek, déduit du RMR**

**TRES LARGE UTILISATION AU NIVEAU INTERNATIONAL**



# **ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES**

## **Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS / STABILITE DES APPUIS**

### **Classification suivant indice Q de Barton**

Définition d'un indice Q, note globale caractérisant la qualité du massif rocheux

- Découle de l'expérience norvégienne du soutènement des ouvrages souterrains

#### **Données d'entrée**

- RQD
- Densité, rugosité, altération/remplissage des joints (discontinuités)
- Etat de saturation du massif
- Etat de contrainte du massif

**Résultat: note globale Q (de 0,001 à 1000)**

# **ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES**

## **Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS / STABILITE DES APPUIS**

### **Classification suivant indice Q de Barton**

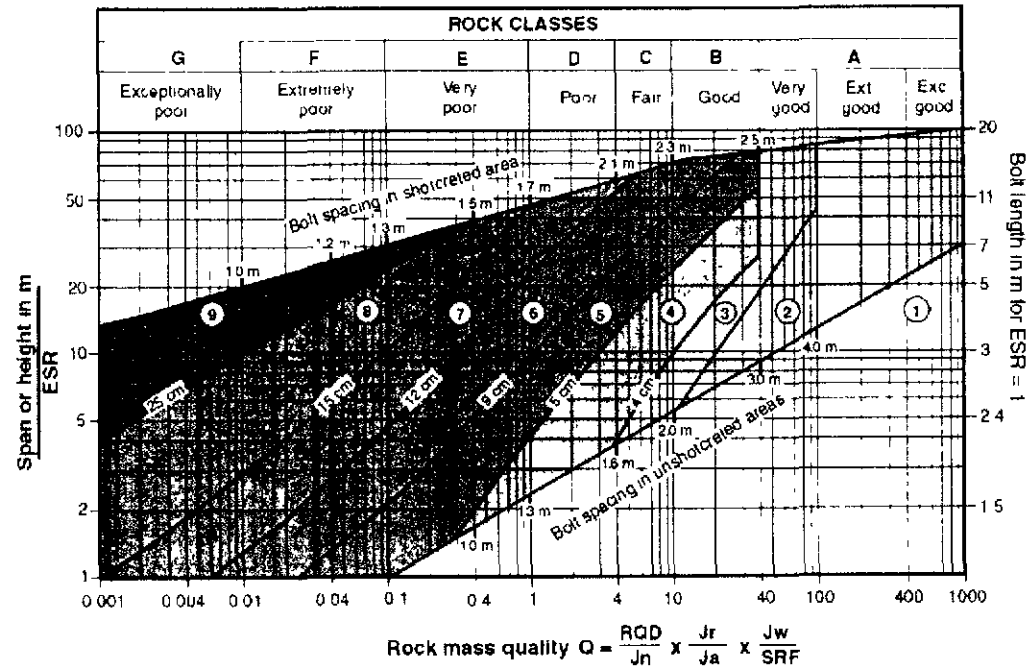
#### **Bien adaptée aux roches de Scandinavie**

- Roches plutoniques ou métamorphiques, à fracturation généralement peu dense et répartie de manière assez isotrope
- Ne tient pas compte de la résistance à la compression du massif
- S'applique mal aux roches fracturées du type schistes ou aux roches tendres

**Surtout utilisée pour le pré-dimensionnement de soutènements d'ouvrages souterrains**

# ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES

## Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS / STABILITE DES APPUIS



### REINFORCEMENT CATEGORIES

- |  |   |
|--|---|
| 1) Unsupported<br>2) Spot bolting<br>3) Systematic bolting<br>4) Systematic bolting (and unreinforced shotcrete 4 - 10 cm)<br>5) Fibre reinforced shotcrete and bolting 5 - 9 cm | 6) Fibre reinforced shotcrete and bolting, 9 - 12 cm<br>7) Fibre reinforced shotcrete and bolting 12 - 15 cm<br>8) Fibre reinforced shotcrete > 15 cm reinforced ribs of shotcrete and bolting<br>9) Cast concrete lining |
|--|---|

Figure 3. Estimated support categories based on the tunnelling quality index  $Q$  (After Grimstad and Barton, 1993, reproduced from Palmstrom and Broch, 2006)

# ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES

## Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS / STABILITE DES APPUIS

### RMR (Rock Mass Rating) de Bieniawski

Définition d'un Rock Mass Rating (RMR), note globale caractérisant la qualité du massif rocheux (1976, révisé en 1989)

La note est la somme arithmétique de « points » attribués aux principales caractéristiques du massif rocheux

- |   |               |
|---|---------------|
| • Résistance à la compression simple    | Sur 15 points |
| • RQD                                   | Sur 20 points |
| • Espacement des discontinuités         | Sur 20 points |
| • Condition des discontinuités (global) | Sur 30 points |
| • Venues d'eau                          | Sur 15 points |

TOTAL 100 points

# ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES

## Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS / STABILITE DES APPUIS

Table 4: Rock Mass Rating System (After Bieniawski 1989).

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 tests <sup>a</sup> 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 RQD		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	Slightly rough surfaces	Slightly rough surfaces	Stickensided surfaces	Soft gouge >5 mm thick		
			Not continuous	Separation < 1 mm	Separation < 1 mm	or Gouge < 5 mm thick	or Separation > 5 mm		
		No separation	Slightly weathered walls	Highly weathered walls	or Separation 1-5 mm	Continuous			
		Unweathered wall rock			Continuous				
Rating			30	25	20	10	0		
5	Groundwater	Inflow per 10 m tunnel length (l/m)	None	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125		
		(Joint water pressure)	0	< 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5		
		(Major principal stress)							
		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			
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		

**ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES**  
**Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS /**  
**STABILITE DES APPUIS**

RMR (Rock Mass Rating) de Bieniawski

Classement en fonction du RMR total (après correction suivant orientation des joints), du massif rocheux dans l'une des cinq classes suivantes

- |                                    |                         |
|------------------------------------|-------------------------|
| • Classe I: RMR 81-100<br>rocher   | Très bon                |
| • Classe II: RMR 61-80             | Bon rocher              |
| • Classe III: RMR 41-60<br>moyen   | Rocher                  |
| • Classe IV: RMR 21-40<br>médiocre | Rocher                  |
| • Classe V: RMR 0-20               | Rocher très<br>médiocre |

**ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES**  
**Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS /**  
**STABILITE DES APPUIS**

## RMR (Rock Mass Rating) de Bieniawski

En fonction des catégories de rocher obtenues,  
Bieniawski en déduit:

- Des recommandations pour les ouvrages souterrains
- Un ordre de grandeur de la cohésion  $C$  et de l'angle de frottement  $\varphi$  pour le massif rocheux

S'appliquerait pour un massif rocheux à  
**densité de fracturation homogène et**  
**isotrope**

**ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES**  
**Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS /**  
**STABILITE DES APPUIS**

## Attention...

Le RMR de 1989 utilisé actuellement  
légèrement du RMR de 1976 (note eau)

– Prendre garde dans les études ou corrélations  
antérieures à 2000

- Adopter notation  $RMR_{76}$  et  $RMR_{89}$

Pour les applications du RMR en déduisant des  
caractéristiques mécaniques de calcul

– Le RMR massif sec doit être utilisé

- Adopter notation  $RMR'_{76}$  ou  $RMR'_{89}$



# ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES

## Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS / STABILITE DES APPUIS

Les différentes caractéristiques propres à la matrice, aux discontinuités et le RQD se trouvent fondues en une seule note

Ne tient pas compte:

- De l'état de contraintes du massif
- De l'altération du massif, ou de présence de karsts
- Des possibles comportements différés (fluage, gonflement)
- De l'anisotropie du massif

**A utiliser avec précaution!**

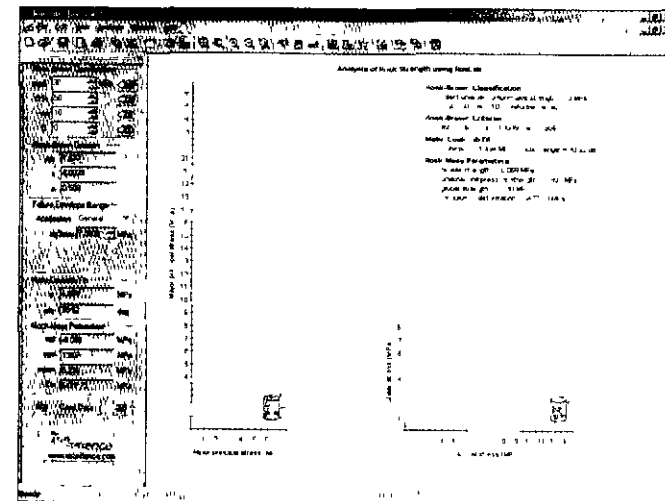
# ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES

## Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS / STABILITE DES APPUIS

### Critère de rupture de Hoek et Brown pour la matrice rocheuse

- Critère de rupture de forme parabolique établi pour la roche intacte, à partir d'une très grande base de données d'essais
  - Coefficient  $m_i$  pour la roche intacte

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \cdot \left( m_i \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + 1 \right)^a$$



**ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES**  
**Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS /**  
**STABILITE DES APPUIS**

## GSI et critère de rupture de Hoek pour le massif rocheux

- Pour le massif rocheux, le critère parabolique est défini par les paramètres  $m$  et  $s$

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \cdot \left( m \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

- Matrice rocheuse:  $m=m_i$ ,  $a=0,5$  et  $s=1$  (cas général)
- Paramètres  $m$  et  $s$  déduit du GSI (Geological Strength Index) calculé à partir:
  - Soit du RMR de Bieniawski,
  - Soit déterminé par charte graphique

# **ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES**

## **Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS / STABILITE DES APPUIS**

Plus qu'une classification, le GSI se veut aussi un outil permettant de déterminer les caractéristiques géomécaniques du massif

La pression d'eau et les contraintes in-situ doivent être estimées par ailleurs

Déduction d'une cohésion et d'un angle de frottement équivalent (attention à la gamme de contrainte normale!)

Estimation du module de déformation du massif

- Attention à toutes les corrélations entre Q, RMR et GSI, qui mêlent RMR<sub>76</sub> et RMR<sub>89</sub>!

**ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES**  
**Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS /**  
**STABILITE DES APPUIS**

**Analyse critique des classifications de massifs  
rocheux**

- Regroupent en une seule note des phénomènes bien distincts
  - Note qui dépend également de l'appréciateur, en particulier si certaines données ne sont pas disponibles
  - Des massifs très différents peuvent se retrouver avoir des notes comparables -----> domaines d'application

**La méthode n'est valable que pour un massif ayant  
une densité de fracturation homogène et isotrope**

# ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES

## Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS / STABILITE DES APPUIS

Relation empirique de  
Barton

$$\tau = \sigma_n \tan \left( \phi_r + JRC \log_{10} \left( \frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right)$$

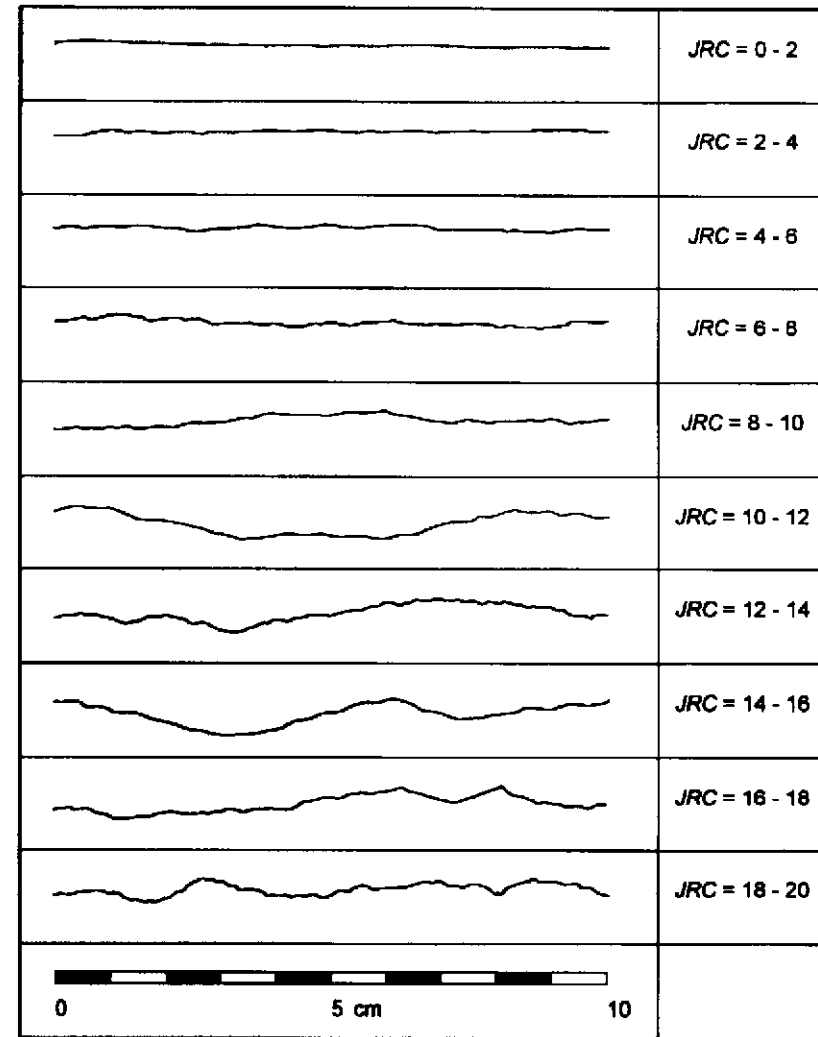


Figure 5 Roughness profiles and corresponding *JRC* values (After Barton and Choubey 1977)

**ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES**  
**Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS /**  
**STABILITE DES APPUIS**

## En pratique

Résistance au cisaillement dans la fondation:  
joint rocher-rocher ou fondation-rocher

- Application de coefficients de sécurité sur cohésion et angle de frottement
- Postérieurement, application de coefficients de sécurité prenant en compte l'incertitude sur les méthodes de calcul

**ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES**  
**Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS /**  
**STABILITE DES APPUIS**

## La documentation

- Publications de Bieniawski, Barton et Hoek et al.  
(Practical Rock Engineering)



**ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES**  
**Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS /**  
**STABILITE DES APPUIS**

## Principe des injections

Injecter à partir d'un forage des coulis de ciment ou autres produits destinés à faire prise dans les fissures (ou vides) du massif de fondation

- Suspensions
- Liquides



Injections sous noyau d'argile au barrage de Tine (Tunisie)

**ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES**  
**Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS /**  
**STABILITE DES APPUIS**

## Objectifs des injections

Etanchéité (diminution de perméabilité) de la fondation

- Rideaux d'injection profonds sous les barrages, destinés à contrôler la dispersion des pressions d'eau sous l'ouvrage

Injections de consolidation, ou injections de contact

- Destinées à améliorer restituer les propriétés mécaniques du massif à la zone de contact avec l'ouvrage, souvent ébranlée par les tirs d'explosifs

## Rhéologie des suspensions

### Rhéologie dynamique dite de fluide de Bingham

- Expression de la contrainte de cisaillement dynamique
  - Terme de viscosité dynamique
    - » Influe sur la vitesse de progression du coulis
  - Terme fixe de cohésion dynamique
    - » déterminera la distance de pénétration maximale

$$\tau = c + \eta \frac{dV}{dx}$$

# ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES

## Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS / STABILITE DES APPUIS

### Stabilité des suspensions

Suspension stable = taux de décantation  $< 2$  à  $5\%$

- Les injections utilisent en principe des coulis stables
  - Créer les meilleures conditions possibles pour obtenir la prise dans les fissures
- Cas des coulis de ciment (sans adjuvants)
  - Stabilité si  $C/E > 1,5$  en poids (ou  $E/C < 2/3$ )
  - Utilisation de coulis instables possible dans cas particuliers
- Les suspensions instables ne peuvent pas être représentées par le fluide de Bingham (essorage)

**ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES**  
**Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS /**  
**STABILITE DES APPUIS**

## L'essorage

Phénomène se produisant lors de l'injection de roches poreuses ou non-saturées

- L'eau du coulis est absorbée par les épontes rocheuses
- Utilisation d'additifs (bentonite)
- Injection d'eau préalable

**ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES**  
**Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS /**  
**STABILITE DES APPUIS**

## Les coulis de ciment (1)

### Suspension de ciment et d'eau

- La taille des grains de ciment doit être compatible avec celle des fissures à injecter
  - Règle de Cambefort
- La résistance du coulis après prise doit pouvoir supporter la pression d'eau
- Le coulis doit être stable
  - $C/E > 1,5$
  - Eviter l'essorage
    - » Des coulis instables peuvent être utilisés dans certains cas (pratique anglo-saxonne), en l'absence de risque d'essorage)

**ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES**  
**Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS /**  
**STABILITE DES APPUIS**

## Les matériaux (1)

### Le ciment

- Type de ciment à adapter en fonction des conditions
- Un paramètre important: la finesse Blaine
  - Surface développée des grains / poids, en  $\text{cm}^2/\text{g}$
  - En général, finesse Blaine  $> 3000\text{cm}^2/\text{g}$
  - Préférer toutefois des données plus précises sur la granulométrie des ciments proposés

L'utilisation de ciments surmoulus ( $8.000\text{cm}^2/\text{g}$  ou plus), ou même de micro-ciments permettra de diminuer la taille des grains

# ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES

## Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS / STABILITE DES APPUIS

### Les matériaux (2)

#### Additifs et adjuvants

- La bentonite
  - Argile très plastique ayant une capacité de gonflement à l'eau de 1 à 6; plus pour bentonites permutées
  - Permet de retenir l'eau (stabilisation, anti-essorage)
- Fluidifiants ou défloculants
- Peptisants (amélioration résistance à l'essorage)
- Super plastifiants (water-retaining, à la fois fluidifiants, défloculants et dispersants)
  - Sans effet sur l'essorage
  - Mais sans effet sur la cohésion

Noter que la tendance actuelle est de privilégier l'emploi de superplastifiants à la bentonite



**ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES**  
**Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS /**  
**STABILITE DES APPUIS**

## Conclusions pour le projet d'injection...

La conception des coulis et le projet sera un compromis avec:

- Les conditions géologiques du site
  - Epaisseur des fissures à injecter
  - Possibilité d'essorage
- Le projet de barrage
  - Exigences de résistance des coulis
- Le ciment disponible
- Les adjuvants et leur compatibilité

**ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES**  
**Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS /**  
**STABILITE DES APPUIS**

## Panneaux d'essai

### Panneaux d'essai réalisés sur site

- Pour fixer les caractéristiques finales du coulis
- Pour déterminer les procédures d'injection les plus efficaces
  - Compromis entre C/E convenable et viscosité acceptable
  - Déterminations des critères d'injection (pression, volume))

**ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES**  
**Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS /**  
**STABILITE DES APPUIS**

## Les coulis spéciaux

Coulis à base de micro-ciment ou fumées de silice

- Finesses Blaine de 15.000 à 120.000 cm<sup>2</sup>/g

Coulis cellulaires ou mousses

- Produits expansifs par dégagement gazeux au sein du coulis (ajout de tensioactifs)
  - Vérifier leur résistance finale!

Coulis pour remplissage de cavités

- Ajout sable ou cendres volantes

# ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES

## Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS / STABILITE DES APPUIS

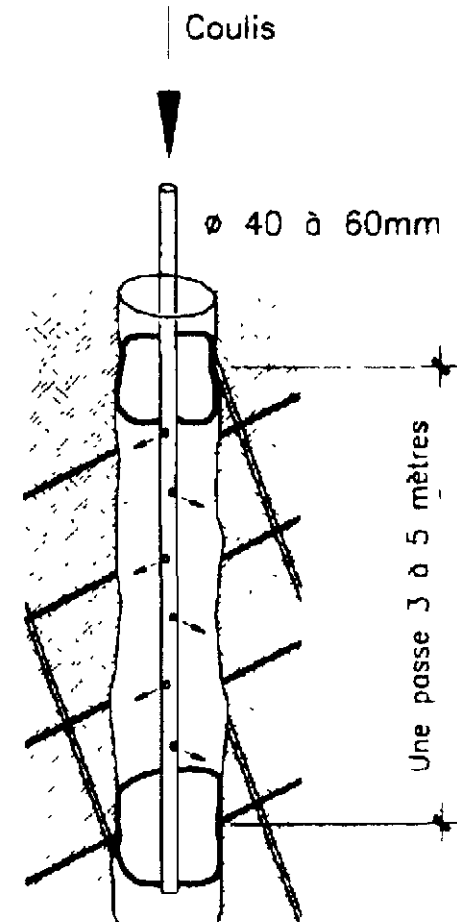
### Comment procède-t-on?

#### Dans le rocher

- Injection dans forages par passes successives
  - Utilisation de packers
  - Longueur des passes de 3 à 5 mètres

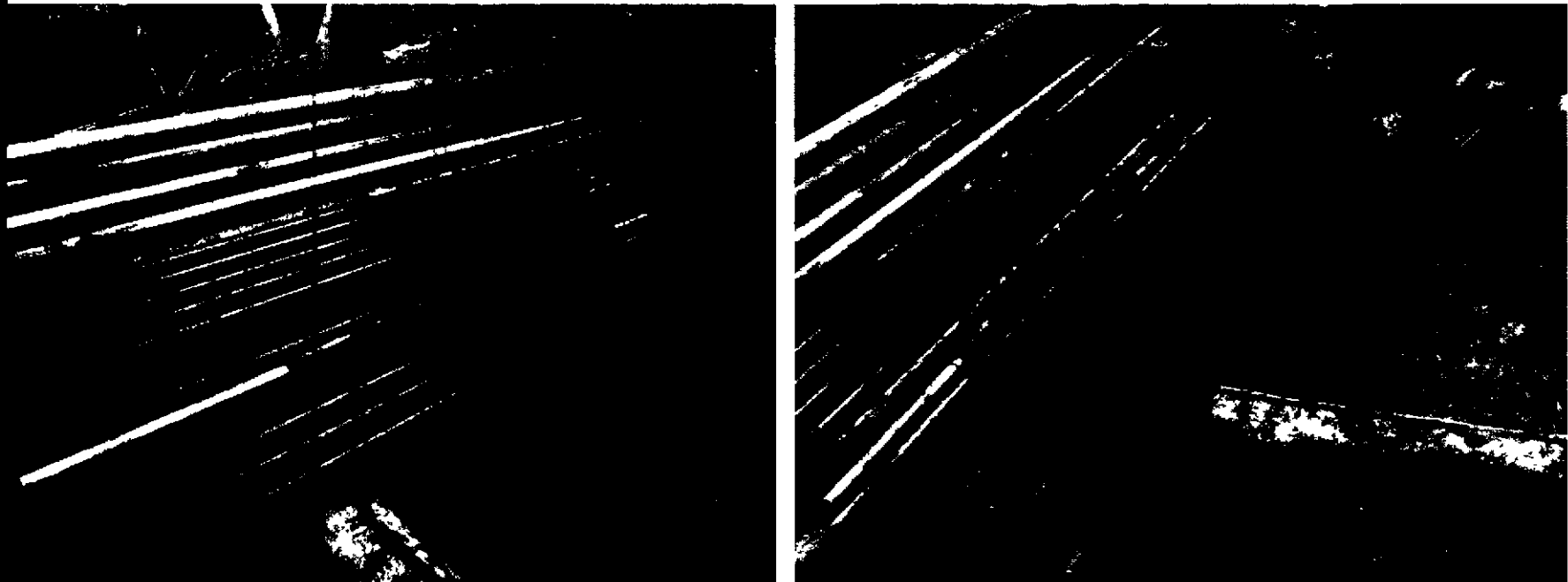
Les packers doivent être suffisamment longs pour éviter les contournements

- Fondation de barrages
  - En principe injection en remontant
  - Injection en descendant dans certains cas particuliers



**ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES**  
**Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS /**  
**STABILITE DES APPUIS**

## Les packers



Principe du packer: le packer est gonflé jusqu'à venir obturer complètement le trou de forage dans lequel il est introduit (à gauche packer dégonflé, à droite, packer gonflé)

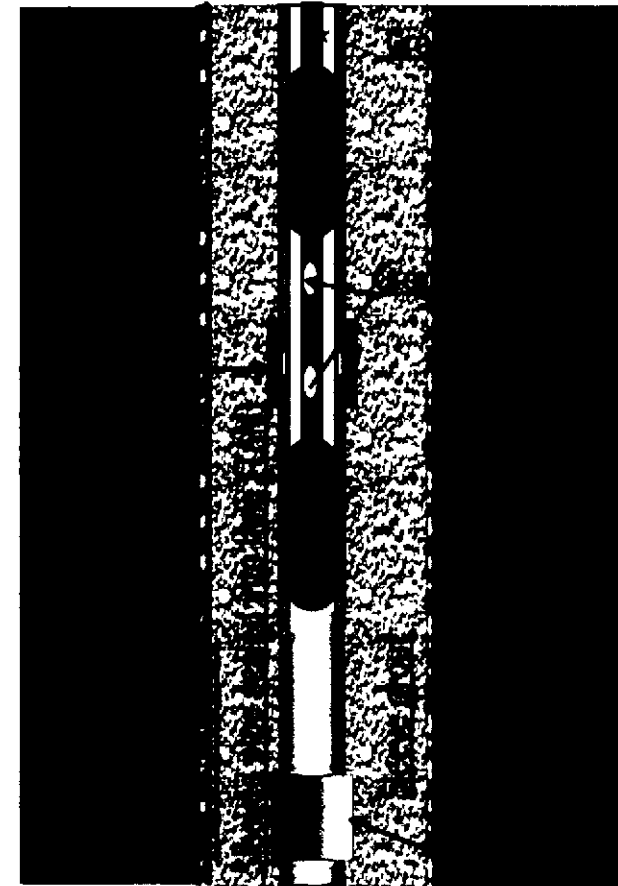
# ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES

## Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS / STABILITE DES APPUIS

### Le tube à manchettes

#### Utilisé en forage

- Problèmes de tenue de trou
  - Des manchettes sont disposées le long du tube
  - L'injection « claque » le coulis de gaine
  - Possibilité de répéter l'injection après retrait de l'outil et lavage du trou



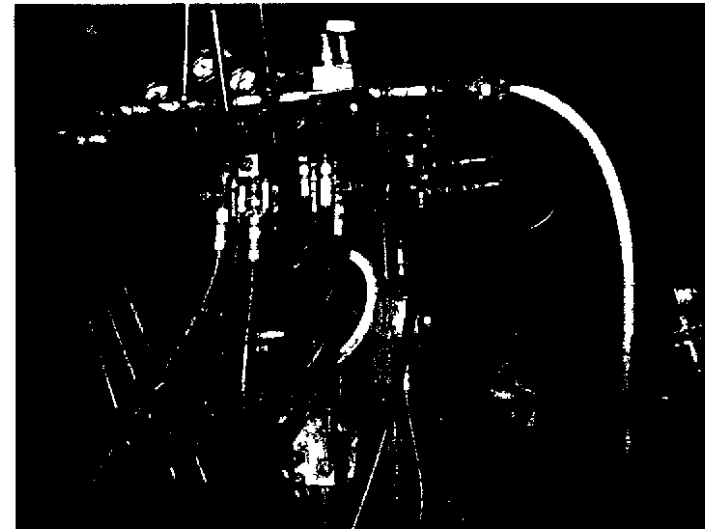
# ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES

## Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS / STABILITE DES APPUIS

### Les paramètres d'injection

Sont essentiellement mesurés:

- La pression  $P$  d'injection
  - Pression au moins mesurée en tête de trou!
- Le volume  $V$  de coulis injecté par mètre linéaire de forage



A gauche, galerie d'injection du barrage de Upper Gotvand (Iran); à droite, centrale  
d'injection au barrage de Dul (Inde)

# ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES

## Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS / STABILITE DES APPUIS

### Les méthodes d'injection

#### Pression de refus

- Peut n'être jamais atteinte
  - Absorption de grandes quantités de coulis
- Peut provoquer la fracturation hydraulique de la roche
  - Cette fracturation hydraulique peut dans certains cas être recherchée

#### Méthode GIN de Lombardi

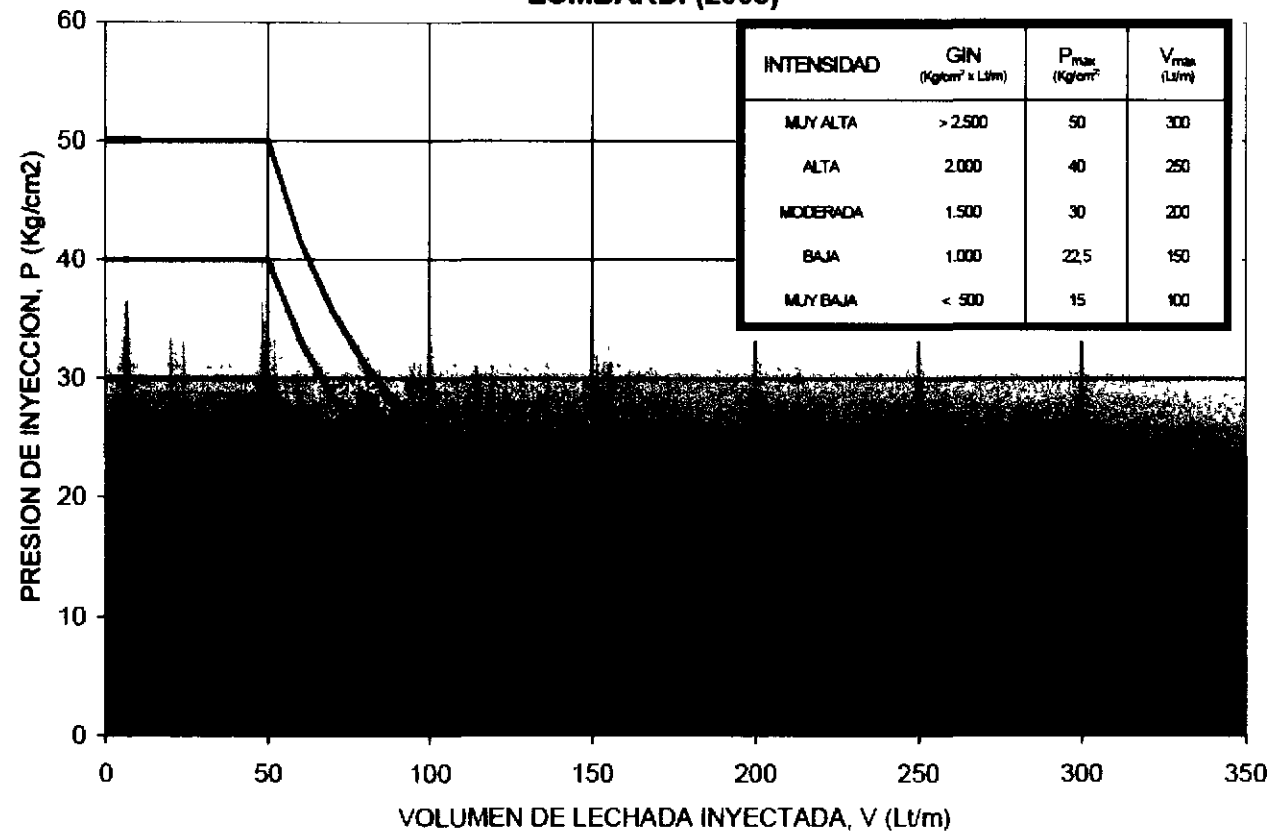
- Consiste à limiter le produit P.V (pression x volume/ml)
  - La valeur du produit PV est déduite des essais (panneaux d'injection)



# ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES

## Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS / STABILITE DES APPUIS

**SET DE CURVAS GIN  
PARA DISTINTAS INTENSIDADES  
LOMBARDI (2003)**



**ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES**  
**Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS /**  
**STABILITE DES APPUIS**

## Rideau d'injection

Les rideaux peuvent être monofilaires, bifilaires ou comporter plusieurs files de forages

- Injections primaires
  - Désigne la première série de forages injectés
    - » Espacement usuel de l'ordre de 8 à 12 mètres
- Les primaires sont suivies par les secondaires, tertiaires, etc.
  - Trous forés entre les précédents

**ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES**  
**Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS /**  
**STABILITE DES APPUIS**

## Suivi des injections

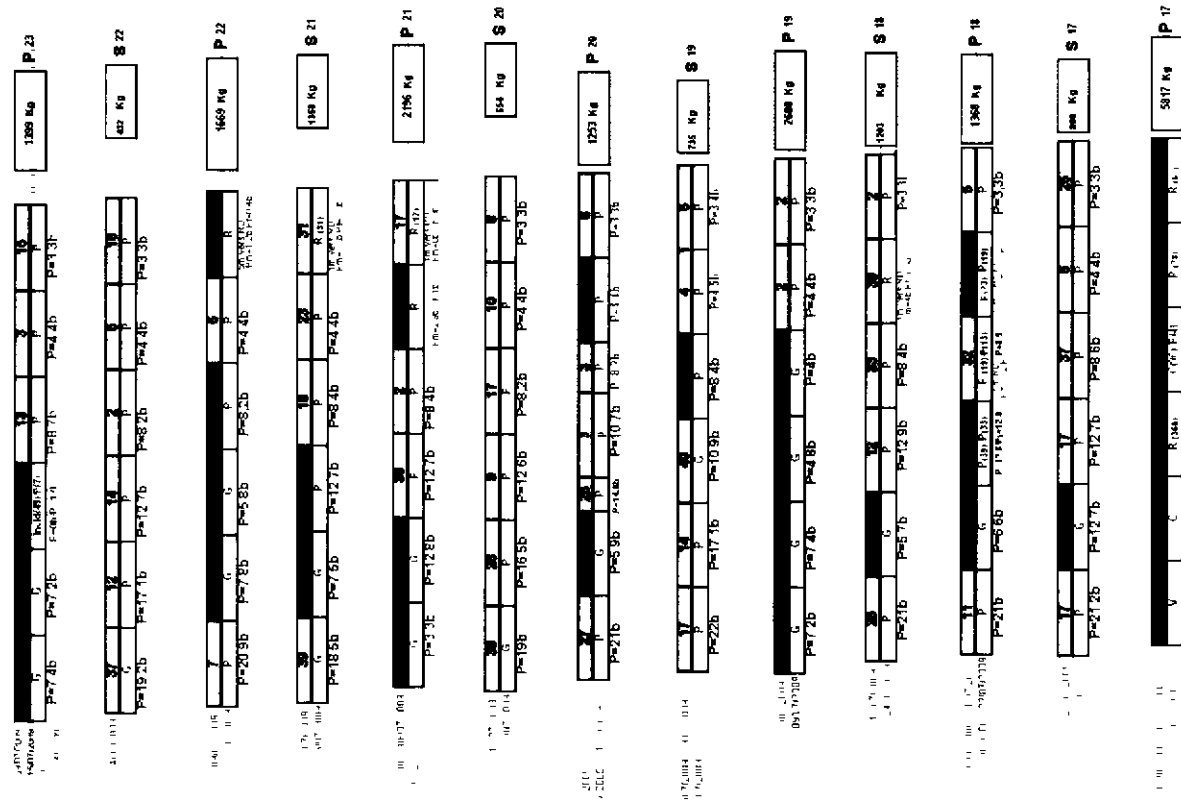
L'observation des pressions  $P$  et volumes  $V$  permet de vérifier l'efficacité de l'injection

Report des valeurs pour chaque passe

- Idéalement, les volumes absorbés diminuent, tandis que (cas de la méthode GIN) les pressions augmentent avec les différents stades d'injection
  - Bilan nécessaire des primaires, secondaires, etc.

# ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES

## Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS / STABILITE DES APPUIS



# **ECONOMIE ET CONCEPTION DES BARRAGES**

## **Séance N°6 : GEOLOGIE / TRAITEMENTS DE FONDATIONS / STABILITE DES APPUIS**

