

# Résistance au cisaillement des massifs rocheux

## Critères de conception des barrages poids



Michel LINO

Président du CFBR

Conférence Jean Mandel

Paris, 14 janvier 2020

# Sommaire

- L'approche standard actuelle du calcul des barrages poids et ses limites
- Retour d'expérience des ruptures de barrages poids
- Pratiques actuelles de la profession (Hoek & Brown, Barton...)
- Nouvelles approches et résultats de recherches récentes
- Barrage-poids sur fondation de faible caractéristique mécanique : le barrage symétrique en remblai dur

« Pour éviter les imperfections pratiques actuelles, il faut d'abord traduire d'une façon correcte les données du géologue en termes physiques et mécaniques. Puis, il faut envisager les hypothèses mécaniques les plus défavorables qui puissent résulter des conditions géologiques existantes. Enfin, il faut supposer pour le projet de l'ouvrage les possibilités les plus défavorables. Ces opérations mentales représentent l'effort de beaucoup le plus important, le plus difficile et le plus négligé dans le domaine de l'étude des fondations de barrages » (Terzaghi, 1929).

### Pierre Londe : bulletin CIGB

Il n'est pas de congrès de mécanique des roches où il ne soit parlé de barrages et, réciproquement, lors de chaque congrès des grands barrages, une de ses quatre questions se rapporte – directement ou indirectement – aux roches. C'est dire combien la mécanique des roches trouve des applications dans la construction des barrages, et combien l'expérience recueillie dans le domaine des barrages inspire la mécanique des roches.

La question principale qui se pose devant un massif rocheux destiné à servir de fondation reste d'évaluer sa résistance au cisaillement. Il n'existe pas de consensus quant à la méthode à suivre.

- L'approche standard actuelle du calcul des barrages poids et ses limites

- Retour d'expérience des ruptures de barrages poids
- Pratiques actuelles de la profession (Hoek & Brown, Barton...)
- Nouvelles approches et résultats de recherches récentes
- Barrage-poids sur fondation de faible caractéristique mécanique : le barrage symétrique en remblai dur

# Le modèle standard de calcul des barrages-poids

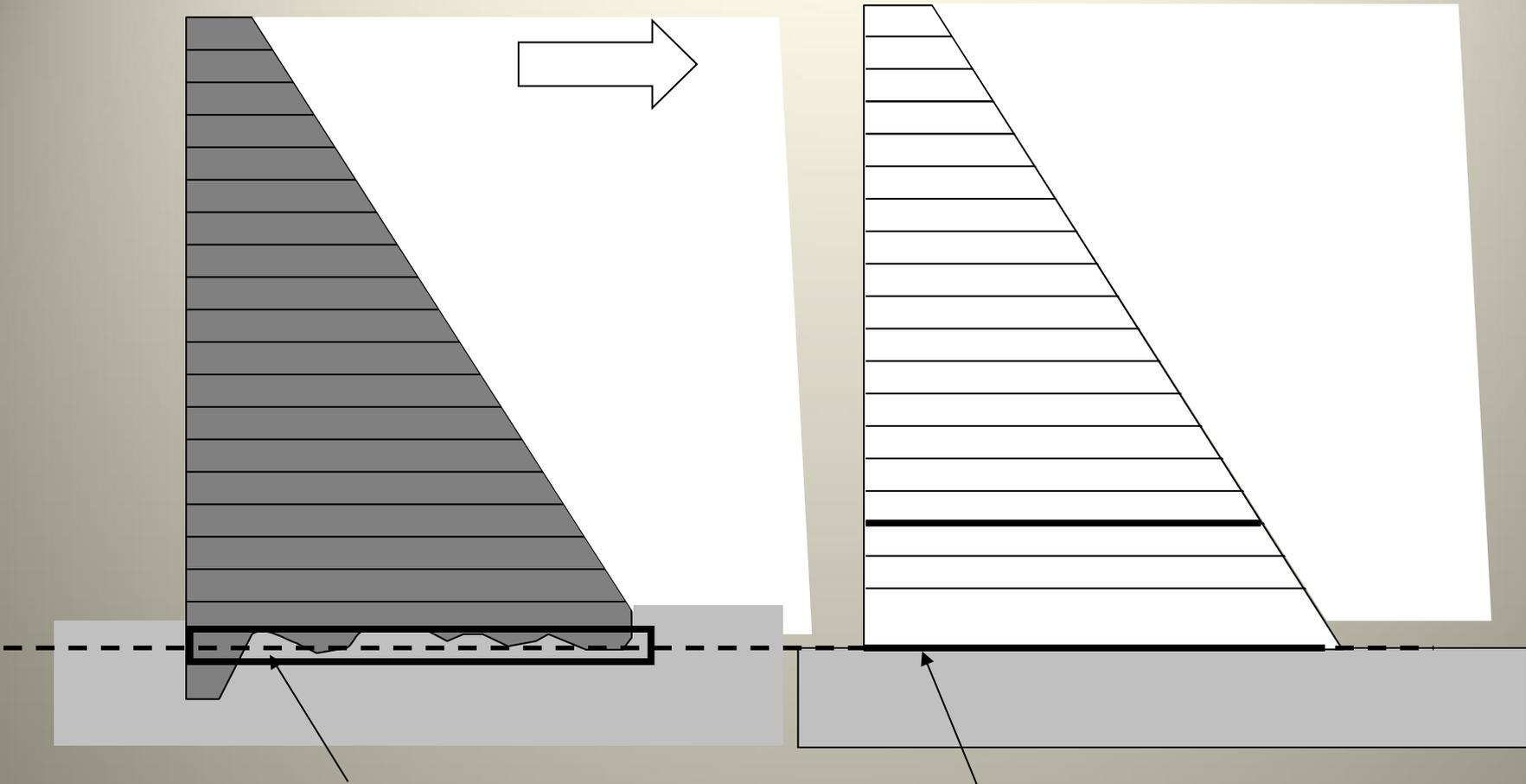
Le calcul standard des barrages-poids postule un fonctionnement en corps rigide, et un schéma de rupture strictement amont-aval sur des plans horizontaux.

Cela permet des calculs d'une grande simplicité.

L'histoire a montré la robustesse de ces calculs et des critères associés : les ruptures sont peu nombreuses, surtout depuis que les barrages-poids sont construits en béton.

Avec l'apparition du BCR dans les années 80, le barrage poids est devenu un des types de barrages les plus construits dans le monde.

# Le modèle standard de calcul des barrages-poids



Localisation possible de la "ligne de rupture »

les parafoilles et autres redans ... sont négligés dans le calcul

Ligne de rupture potentielle le long de l'interface.

La ligne passe globalement en dessous du béton du barrage.

# Le modèle standard de calcul des barrages-poids



Barrage de Pont et Massène  
En Côte d'Or

# Le modèle standard de calcul des barrages-poids

Malgré son apparente simplicité, cette évaluation de la stabilité des barrages-poids cache de nombreuses subtilités, parmi lesquelles l'évaluation de la résistance au cisaillement de l'interface.

Les Recommandations CFBR pour la justification des barrages poids (2012) fixent les principes à retenir pour cette évaluation.



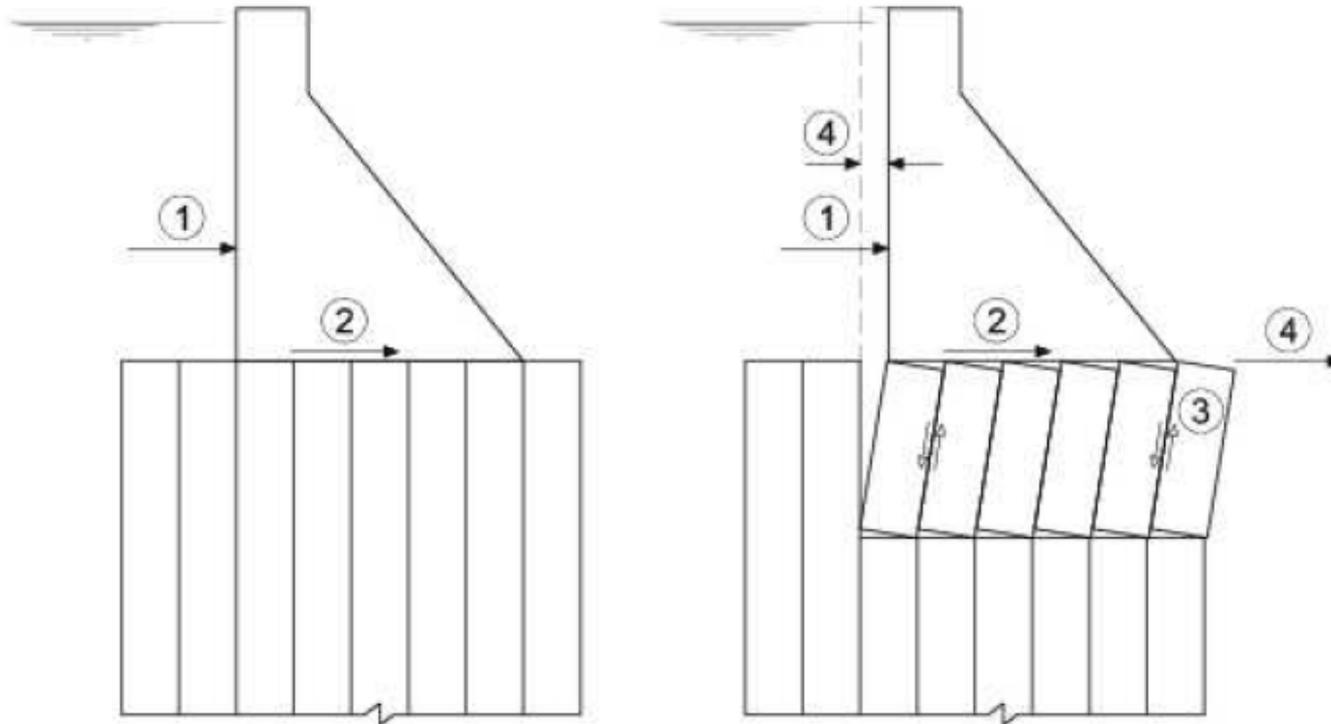
Groupe de Travail « Justification  
des barrages-poids »

**Recommandations pour la  
justification de la stabilité  
des barrages-poids**

octobre 2012

# Le modèle standard de calcul des barrages-poids

## G. Lombardi : quelque pièges à éviter!



① poussée de l'eau ② effort sur la fondation

③ glissement dans les joints de la roche ④ déplacement du barrage

La résistance au glissement sur la surface de fondation est supérieure à celle dans les couches faibles (par ex. argileuses) de la masse rocheuse.

Figure 7: La direction de l'effort tranchant et celle des glissements ne coïncident que rarement. Effort tranchant horizontal; glissement vertical dans la roche stratifiée.

# Le modèle standard de calcul des barrages-poids

## G. Lombardi : quelque pièges à éviter!



$\varphi$  = angle de friction admis de  $37^\circ$  en faisant référence à la limite de USACE

2-D = calcul bi-dimensionnel de la section principale, sans considérer ni les joints de contraction, ni les discontinuités de la masse rocheuse.

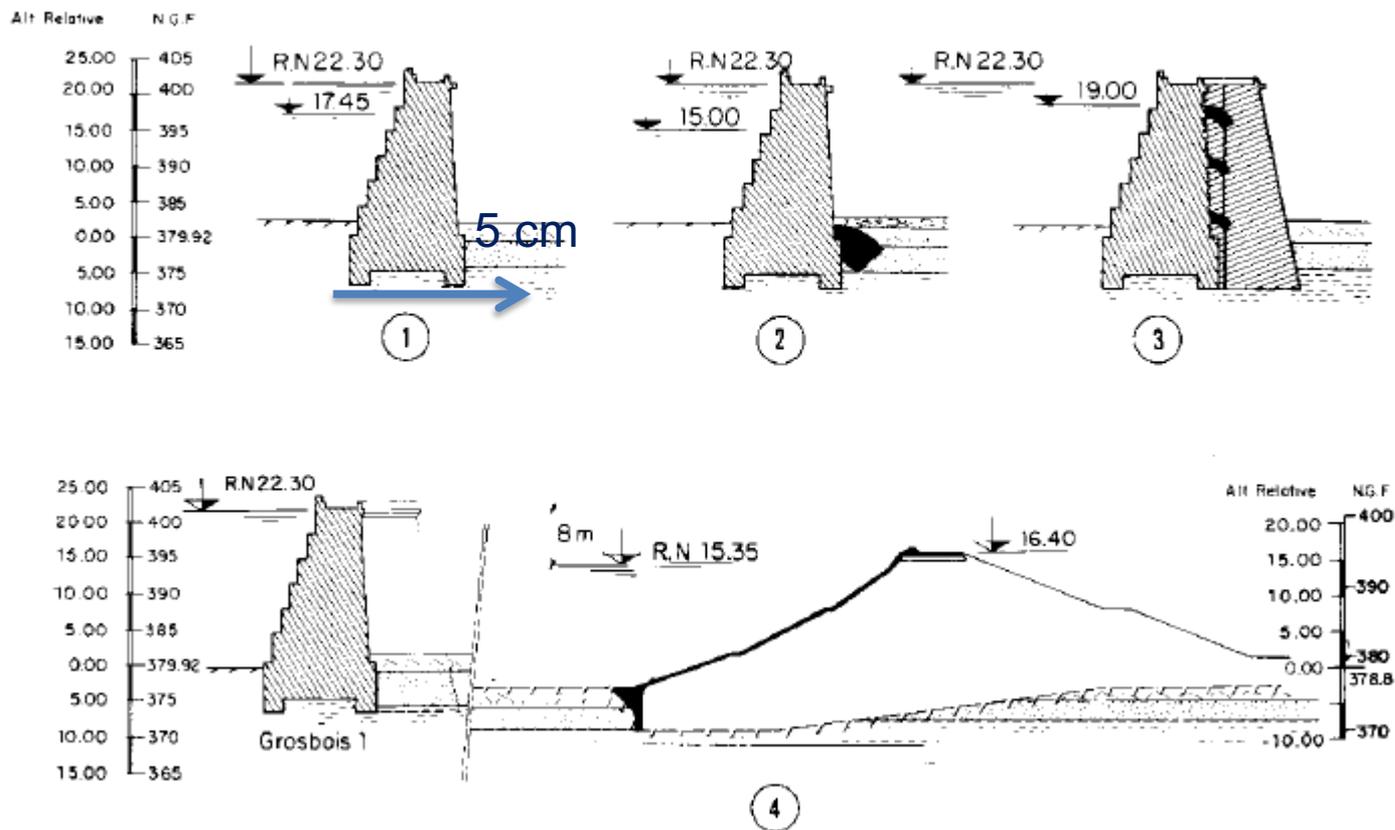
Figure 1: Calcul "extrêmement simple" d'un barrage gravité de 200 m de hauteur.

# Sommaire

- L'approche standard actuelle du calcul des barrages poids et ses limites
- Retour d'expérience des ruptures de barrages poids
- Pratiques actuelles de la profession (Hoek & Brown, Barton...)
- Nouvelles approches et résultats de recherches récentes
- Barrage-poids sur fondation de faible caractéristique mécanique : le barrage symétrique en remblai dur

# REX Confortement du barrage de Grosbois (1838)

Q. 59-R. 45

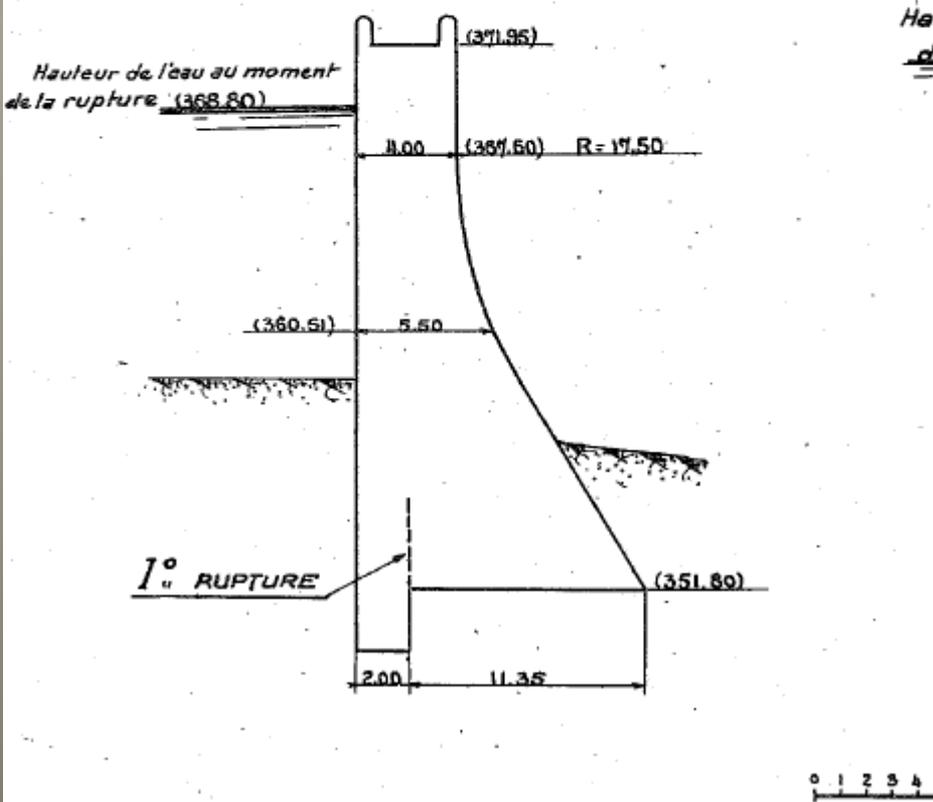


**Fondation sur des marnes altérées**

Analyse a posteriori :  $\phi'$  marnes =  $20,3^\circ$   $c' = 0$   
confirmé par des essais de laboratoire en 1977

## DIGUE DE BOUZEY

PROFIL-TYPE AVANT 1<sup>ère</sup> RUPTURE



Barrage poids de 20 m de hauteur en maçonnerie

Fondation : grès à pendage horizontal « fissurés et poreux » avec des passages d'argile

2 ruptures dont la deuxième catastrophique

Le 14 Mars 1884, la digue se déplaça brusquement sur une longueur de 135 mètres, en même temps le débit des sources à l'aval, qui était resté sensiblement stationnaire, s'éleva de 75 litres à 230 litres.

A ce moment la hauteur de l'eau était dans le réservoir d'environ  $12^m$  (2 m 70 en contre-bas de la retenue définitive) et les sources émergeaient à l'aval au niveau du terrain naturel où elles formaient une nappe.

La digue s'était avancée vers l'aval en se séparant du mur de garde. Aucun mouvement de tassement ne s'y était produit.

L'alignement rectiligne du couronnement s'était déformé suivant une ligne brisée dont la flèche atteignait  $0^m 34$  au centre de l'inflexion.

Il existait à la base de l'ouvrage, du côté amont, une grande fracture horizontale qui le séparait du mur de garde et qui s'étendait sur une longueur de 93 mètres.

Le sol de fondation était brayé et disloqué sur 2 à 3 mètres de hauteur, sous la digue. On y trouva deux crevasses, qui donnaient passage à des sources, ainsi que des dépôts d'argile de

forme lenticulaire qui n'avaient en général que quelques millimètres d'épaisseur, et on rencontra en amont de la digue, en contre-bas de la fondation du mur de garde, des couches tendres, fissurées et perméables.

Ecole Nationale des Ponts et Chaussées 143 A

---

Leçons sur les Grands Barrages.

---

M<sup>r</sup> Coyne.

Inspecteur Général des Ponts et Chaussées

---

Année 1943

---

## Le barrage

- barrage de 13,1 m de hauteur au-dessus du terrain naturel, en béton cyclopéen.
- fondé sur des grès lités horizontalement, avec intercalations de marnes et de grès peu cimentés.
- Le barrage est muni d'une bêche de profondeur 1,20 m prolongée par des ancres passifs de longueur 7,60 m. Le béton est de qualité hétérogène.

## La rupture

- Des fissures verticales (retrait) apparaissent dès la construction, avant mise en eau.
- Au premier remplissage, des écoulements (« in large quantities ») apparaissent à l'aval du barrage.
- le 23 janvier 1910, la partie centrale du barrage glisse de 50 cm environ vers l'aval.
- La retenue amont est abaissée par création à l'explosif d'une échancrure. Le barrage n'est pas conforté ;
- une crue l'emporte en 1911.



Figure AP-3. Photo showing downstream area after dam failure (after Potter County Leader 9-24-1986)

## Le Barrage

- poids en béton, de hauteur 62,50 m ; légèrement arqué.
- parement amont subvertical., fruit moyen du parement aval 0,75 H/1V.
- fondé en rive gauche, vallée et moitié de la rive droite sur des schistes, souvent fortement cisailés parallèlement à la pente gauche.
- En haut de rive droite, il est fondé sur des conglomérats rougeâtres.
- Pas de drainage des rives
- Pas de bêche d'étanchéité, pas de rideau d'injection

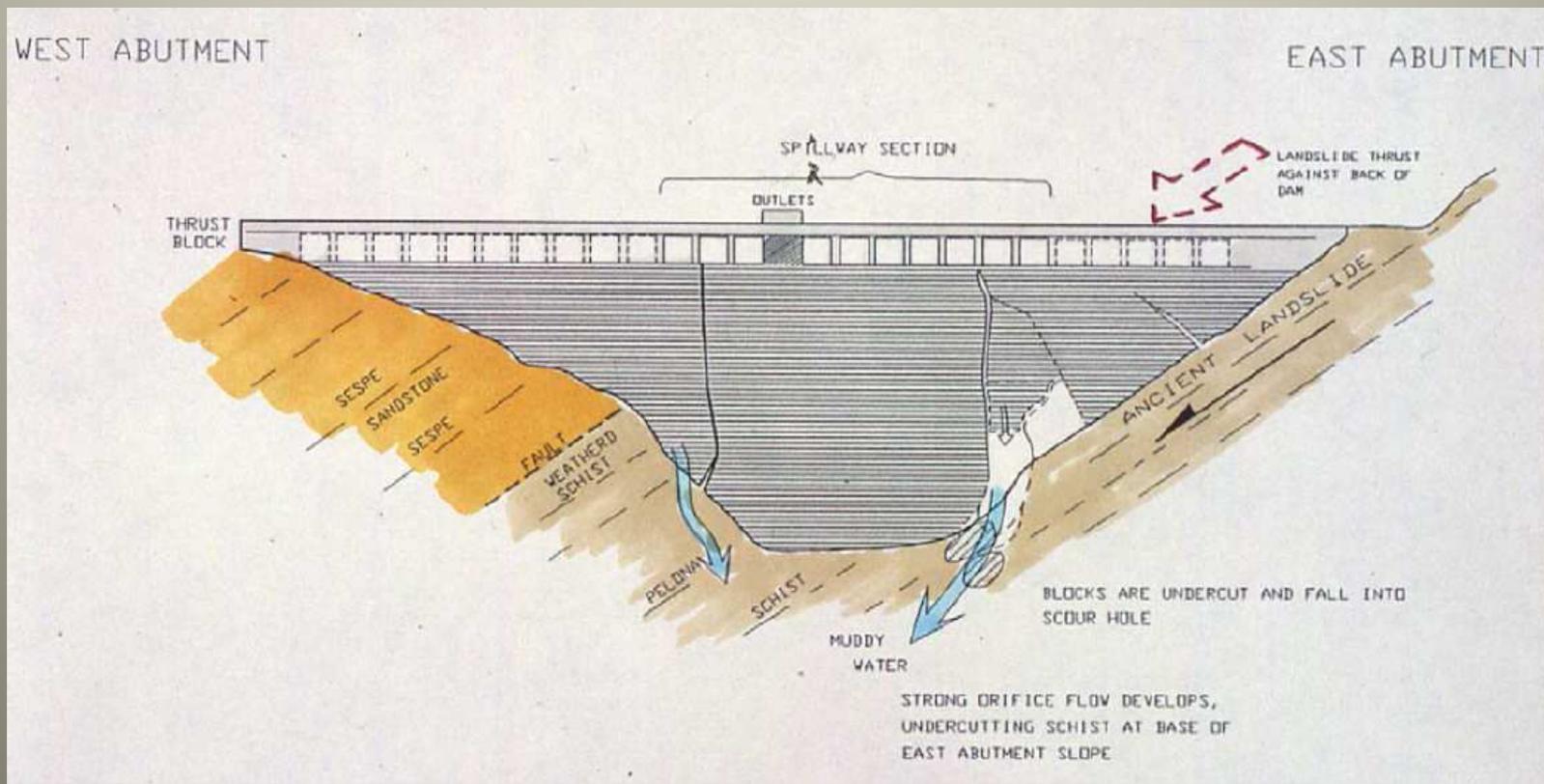
## La rupture

- La rupture s'est produite au premier remplissage. La hauteur d'eau maximale (seuil du déversoir) a été atteinte une semaine avant la rupture. De faibles fuites sont constatées dans le corps du barrage, mais les écoulements en fondation sont plus importants. Ces écoulements s'intensifient rapidement quelques heures avant la rupture.
- Nombreuses victimes

## Les causes

Deux causes principales liées à la géologie du site:

- la rive gauche, qui est un paléo-glissement, qui a été réactivé lors de la rupture et, semble-t-il, avant la rupture proprement dite ;
- les conglomérats gypsifères de la rive droite, possiblement sensibles à des phénomènes de contraction sous submersion.



## Le barrage

- barrage poids de hauteur 50 m, en BCR peu dosé (spécifié à 80 kg/m<sup>3</sup>).
- masque amont en BCV, d'épaisseur très variable, et quasi-nulle par endroits.

## La fondation

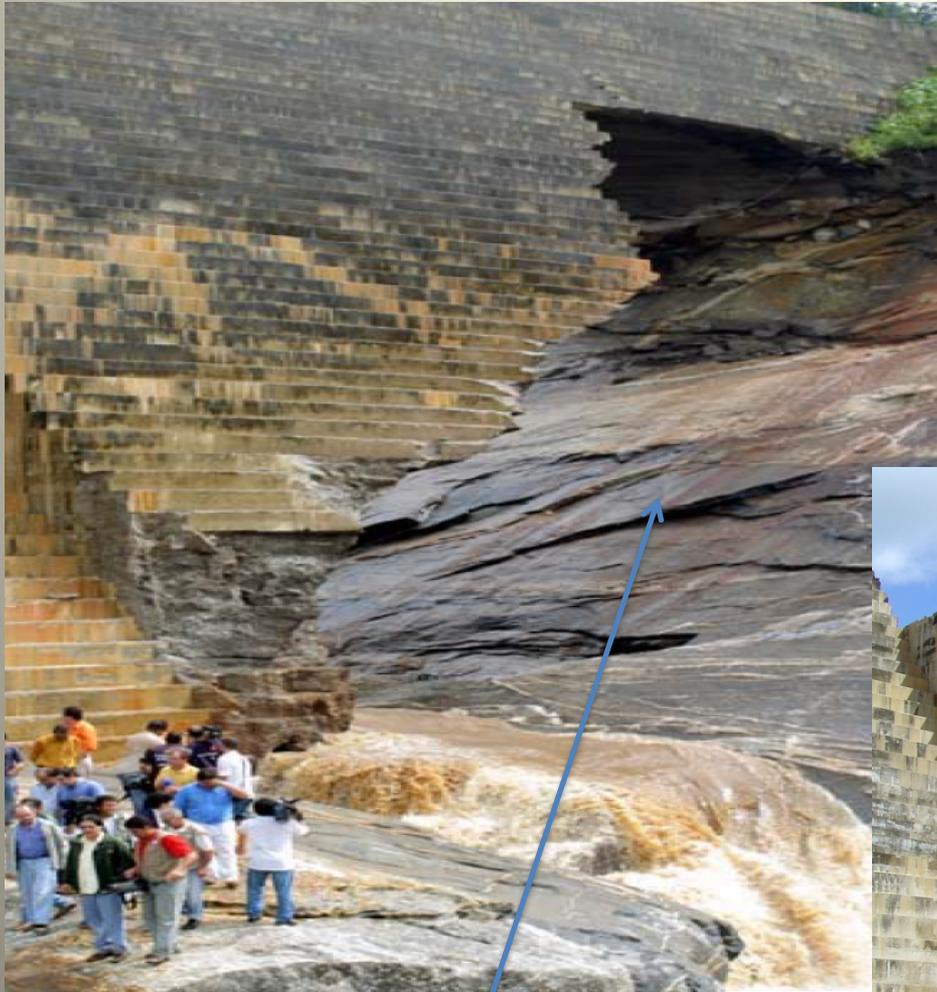
- Le rocher de fondation est schisteux en rive gauche et granitique en vallée ;
- voile d'étanchéité monolinéaire et un plan de forages de drainage.

Lors de la mise en eau, des artésianismes significatifs se sont développés sur cette rive. La galerie a été inondée ; plusieurs drains ont été qualifiés de « ne fonctionnant pas ».

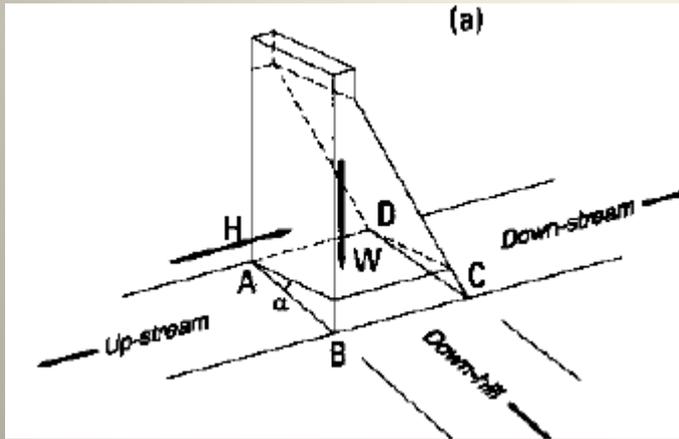
## La rupture

- Pendant le 1er remplissage – 5.5 m sous la RN
- Rupture brutale de nuit ; 5 victimes et lourdes pertes économiques
- Principale cause : un accident géologique dans la fondation non correctement identifié et pris en compte dans la conception



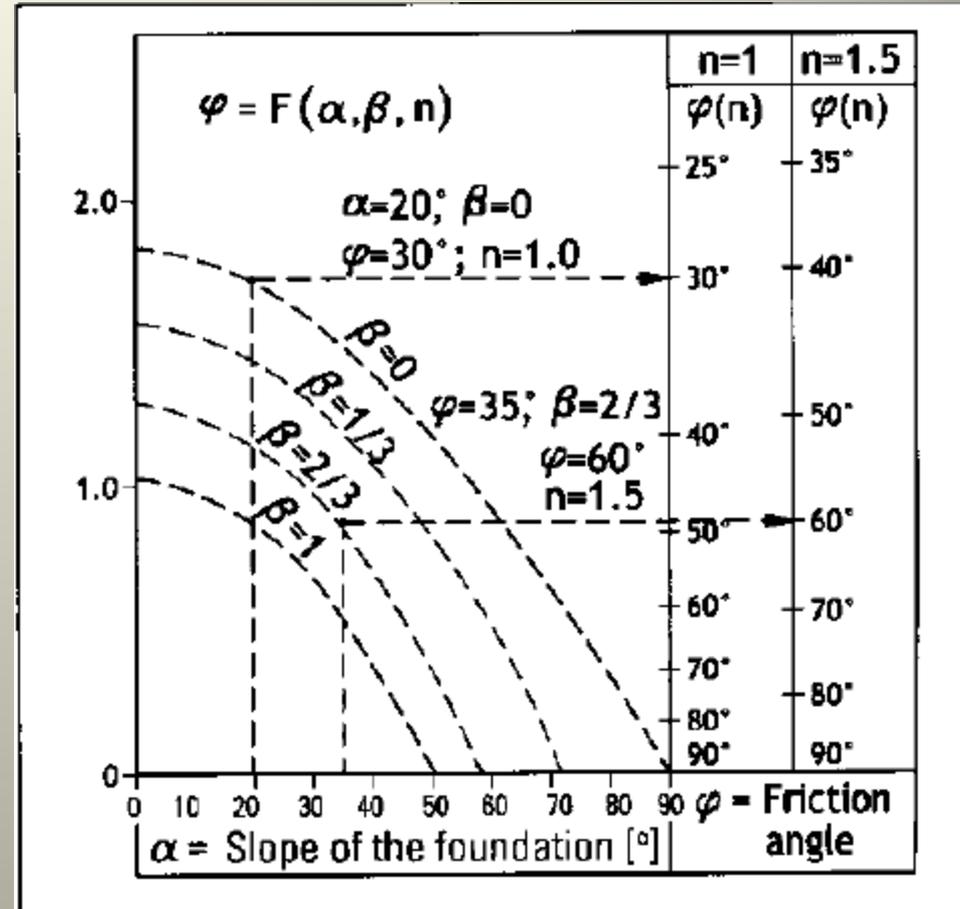


Rupture sur une surface de glissement dans la fondation



2 effets défavorables :

- L'effort normal dû au poids sur la surface inclinée est plus faible
- La sous-pression s'exerce sur une plus grande surface (même composante horizontale?)



Influence de la pente de la rive ( $\alpha$ ) et du coefficient de drainage ( $\beta$ )

G. Lombardi – 2007

La synthèse des ruptures suffisamment documentées met en évidence le fait que les accidents ne se sont produits que dans des circonstances spécifiques :

- Des fondations rocheuses avec alternance de grès et intercalations de roches argileuse (marnes, argilites, siltites), à pendage subhorizontal : Austin, Bouzey I, Grosbois
- La rupture de plots de rive le long d'une surface inclinée, globalement parallèle à la rive, et profitant d'un plan de faiblesse en fondation (Camara, Saint-Francis, *Xuriguera*, *Cheurfas I*)

# Sommaire

- L'approche standard actuelle du calcul des barrages poids et ses limites
- Retour d'expérience des ruptures de barrages poids
- Pratiques actuelles de la profession (Hoek & Brown, Barton...)
- Nouvelles approches et résultats de recherches récentes
- Barrage-poids sur fondation de faible caractéristique mécanique : le barrage symétrique en remblai dur

Quels sont les outils dont dispose l'ingénieur barragiste pour traiter le difficile problème de la résistance au cisaillement des fondations rocheuses de barrage?

Quels outils pour faire le lien entre l'analyse géologique et structurale et les calculs de stabilité de l'ingénieur?

Deux approches principales de mécanique des roches :

- L'approche « homogénéisée » de Hoek and Brown
- La résistance des joints rocheux de Barton lorsqu'ils sont bien identifiés

# Résistance au cisaillement des fondations rocheuses

## Le critère de Hoek & Brown

Pour la résistance du massif rocheux, lorsqu'il est suffisamment fracturé pour être isotrope et « homogénéisable »

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

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right)$$

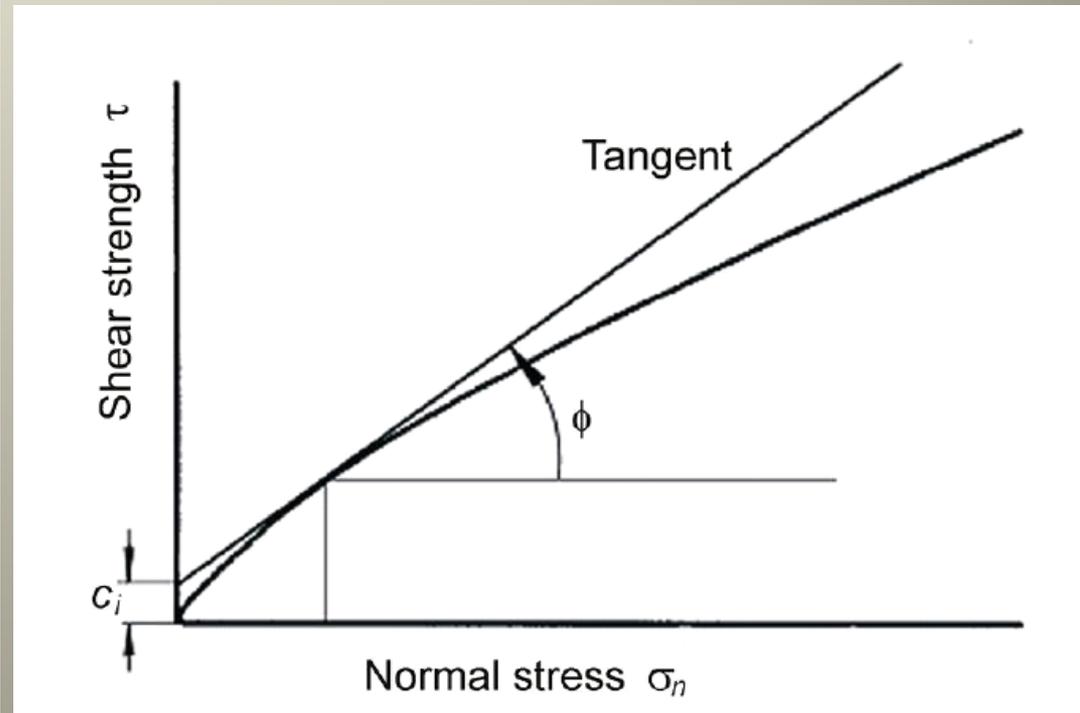
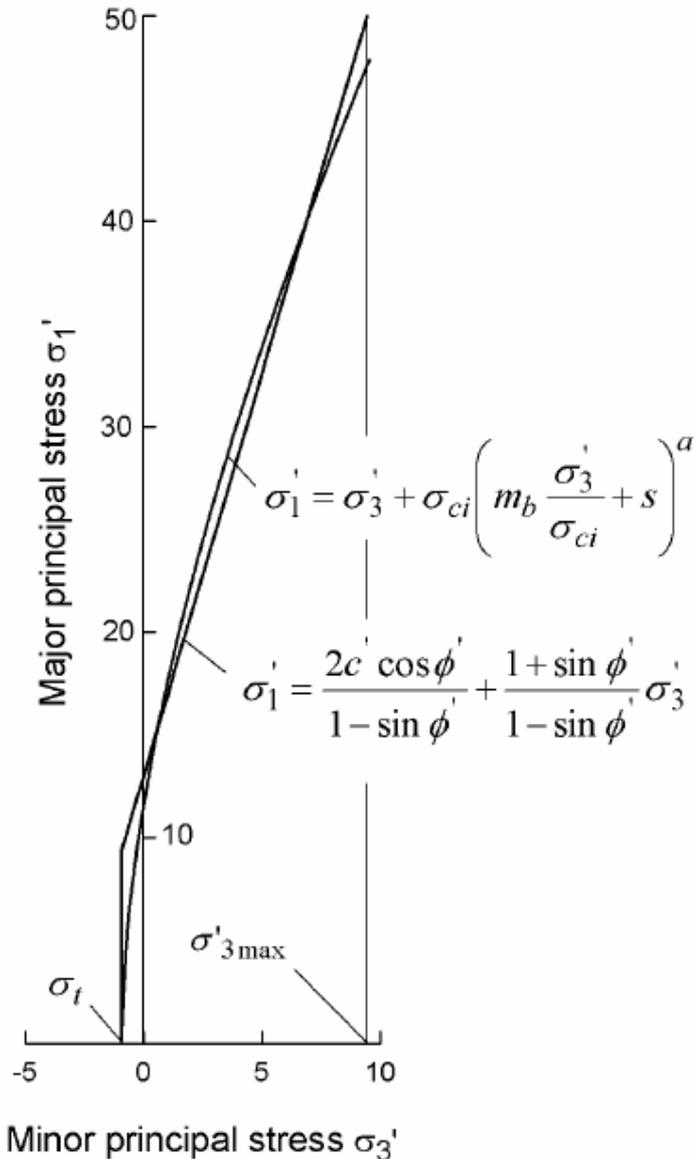
$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left( e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right)$$

Les paramètres physiques à mesurer sont :

- GSI, qui caractérise l'état de fracturation
- $m_i$ , pour la nature du rocher
- $\sigma_{ci}$ , la résistance à la compression de l'échantillon intact
- D, pour la dégradation générée par les travaux d'excavation

# Résistance au cisaillement des fondations rocheuses

## Le critère de Hoek & Brown



# Résistance au cisaillement des fondations rocheuses

## Le critère de Hoek & Brown

Méthode mise au point progressivement (1970-2003) par Hoek et des collègues :

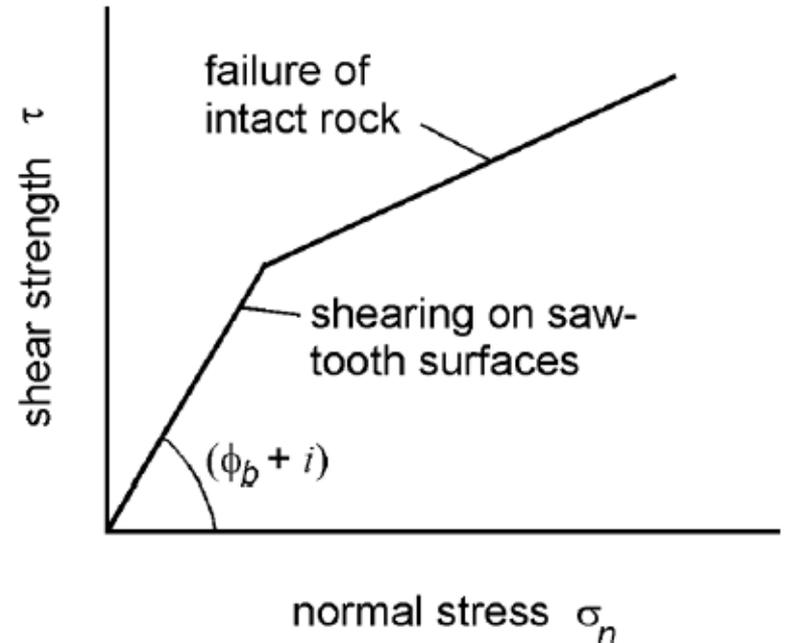
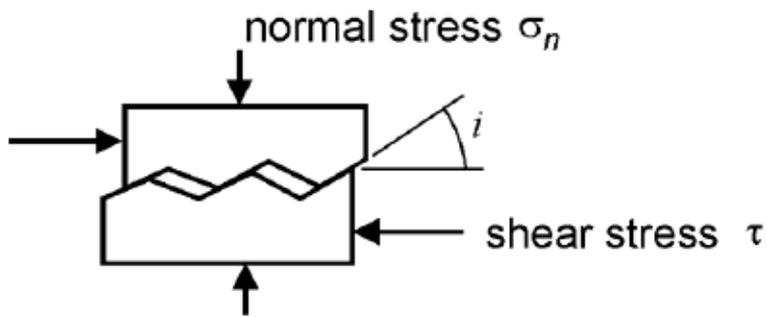
- d'abord à partir d'études théoriques et des essais sur modèles ;
- puis en croisant avec des observations in situ sur de nombreux cas (carrières, tunnels).

C'est une approche :

- simplificatrice (tout massif rocheux, incluant ses hétérogénéités, est représenté par une formule universelle à 3 paramètres)
- subjective (pour un même massif rocheux, l'appréciation du GSI par l'observateur peut largement varier)
- mais on ne sait pas faire mieux. C'est le meilleur « pont » disponible entre l'appréciation géologique et le calcul de l'ingénieur.

# Résistance au cisaillement des joints

## Le modèle de Patton (1966)



$$\tau = \sigma_n \operatorname{tg}(\phi_b + i)$$

# Résistance au cisaillement des joints

## Le modèle de Patton (1966)



# Résistance au cisaillement des joints

## Le critère de Barton (1971 - 2014)

- Méthode mise au point progressivement par Barton : à partir d'essais de laboratoire, puis en incorporant progressivement les effets d'échelle.
- Approche bien calibrée à l'échelle de l'échantillon de laboratoire, et pour le passage à plus grande échelle lorsque les seules aspérités sont celles de l'échantillon de laboratoire.
- Un abaque pour intégrer les aspérités de grande extension. *Selon [Barton 2014], cela n'a cependant pas encore été suffisamment étudié.*
- $\phi_b$  et JRC difficiles à apprécier, car le lien entre l'essai de labo (petite échelle, échantillons spécifique) et le comportement du joint sur site (à grande échelle, avec remplissage) n'est pas direct.

# Résistance au cisaillement des joints

## Le critère de Barton (1971 - 2014)

Pour la résistance au cisaillement le long de joints

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

Les paramètres physiques à mesurer sont :

- $\phi_b$  l'angle de frottement de base
- JRC le coefficient de rugosité
- JCS la résistance à la compression de l'échantillon intact

# Résistance au cisaillement des joints

## Le critère de Barton (1971 - 2014)

### Influence de l'altération des joints

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

à partir de 130 essais sur les joints d'altération variable

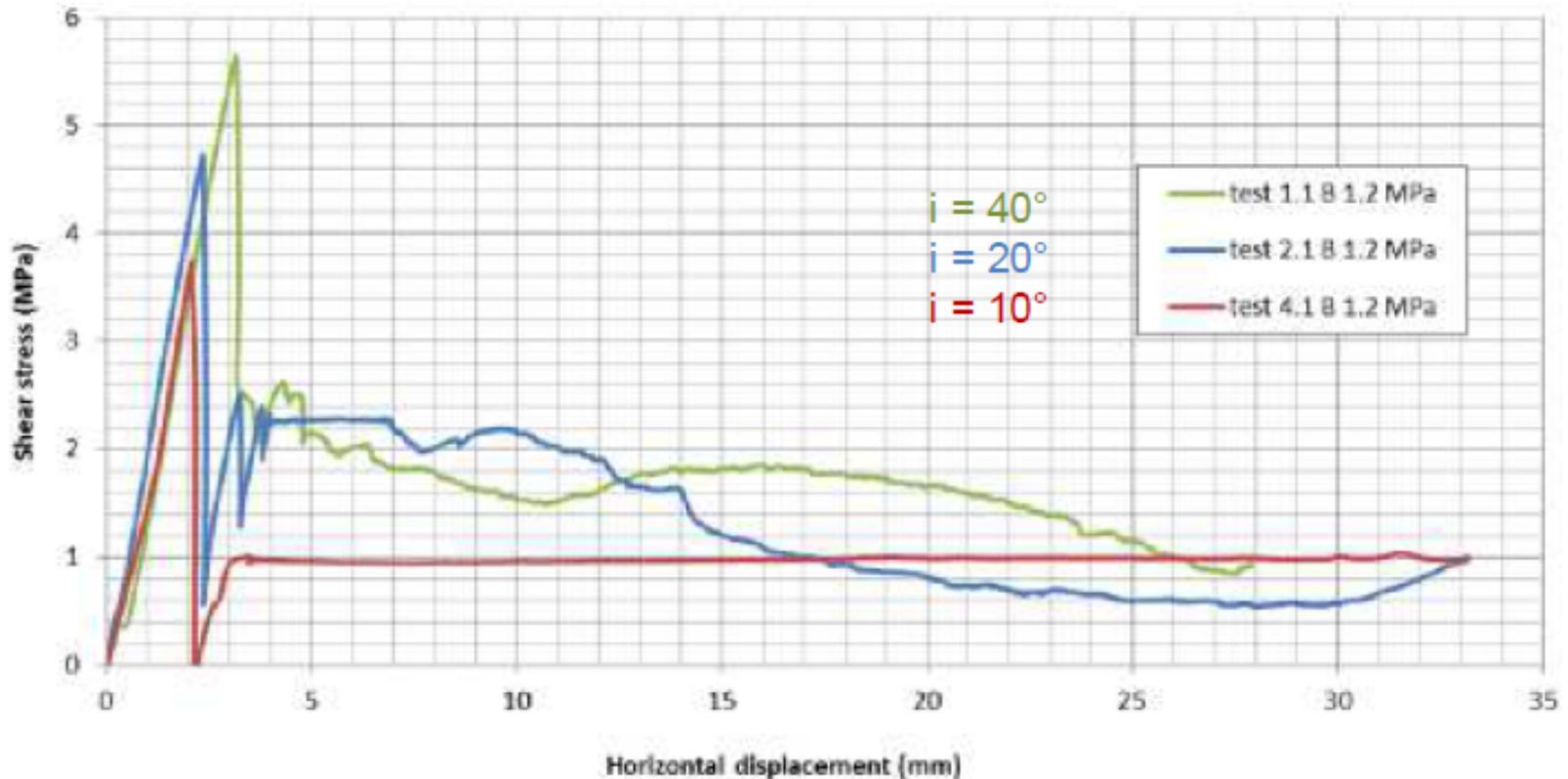
Les paramètres physiques à mesurer sont :

- $\phi_r$  l'angle de frottement résiduel
- JRC le coefficient de rugosité
- JCS la résistance à la compression de l'échantillon intact

$$\phi_r = (\phi_b - 20) + 20(r / R)$$

# Résistance au cisaillement des joints

## Le critère de Barton (1971 - 2014)



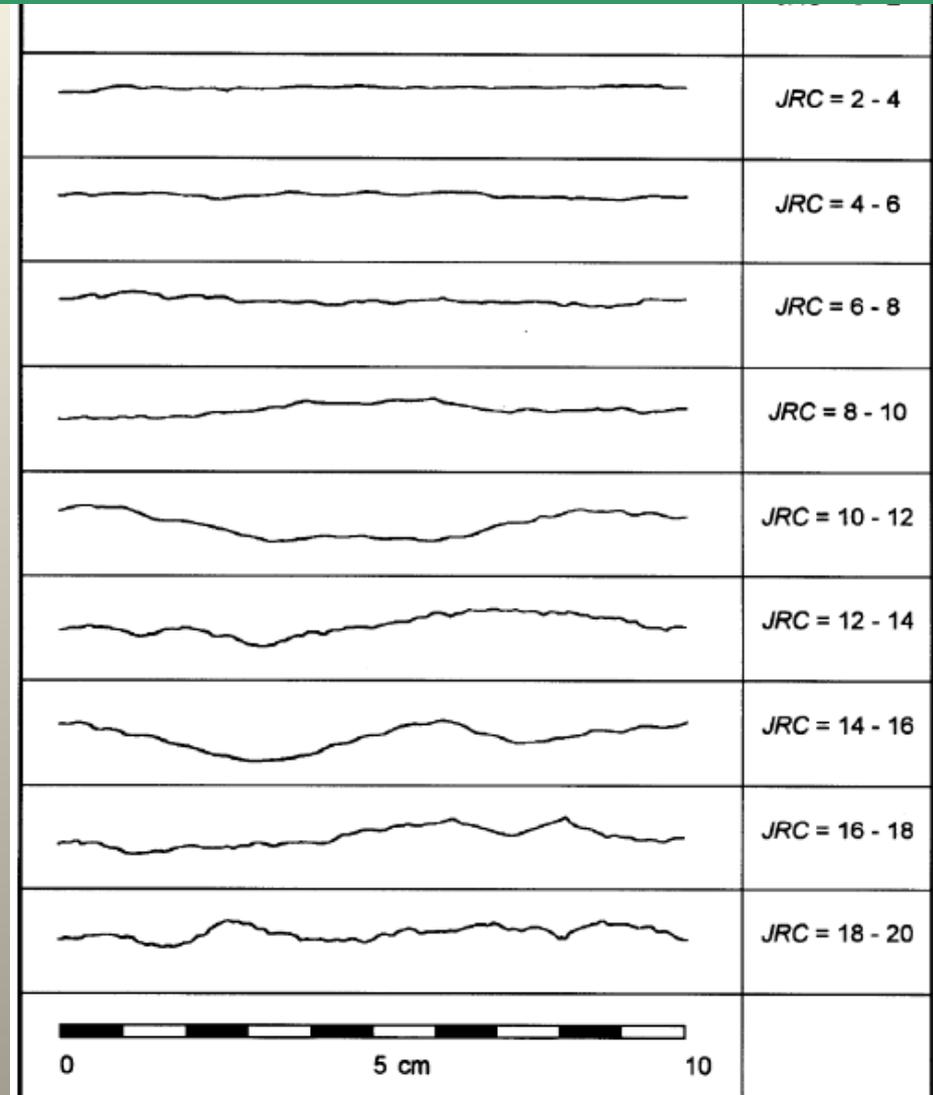
Influence de la rugosité sur le cisaillement d'une interface  
béton-roche (Gutiérrez, 2013)

Auteurs: Hussein Mouzannar, Marion Bost,  
Patrick Joffrin (IFSTTAR)

# Résistance au cisaillement des joints

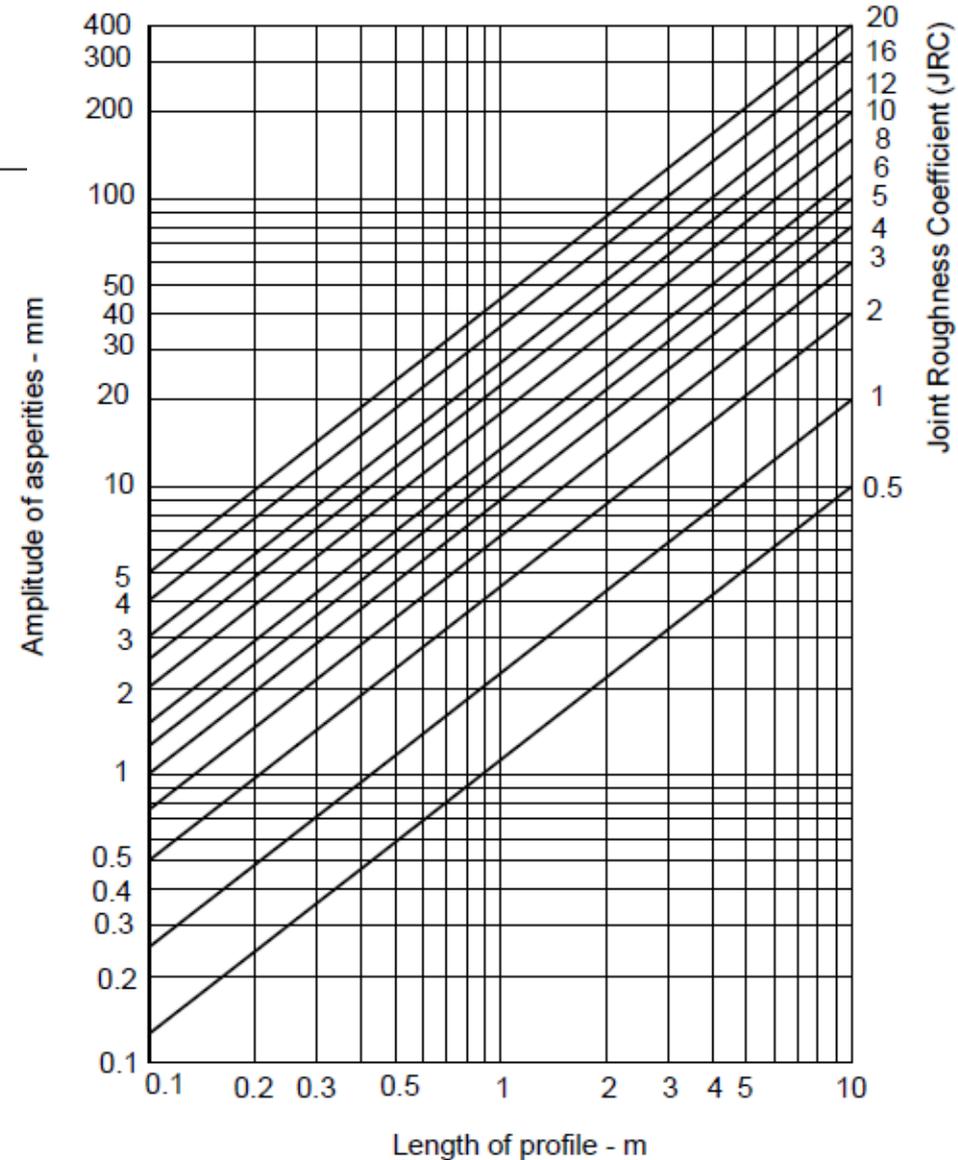
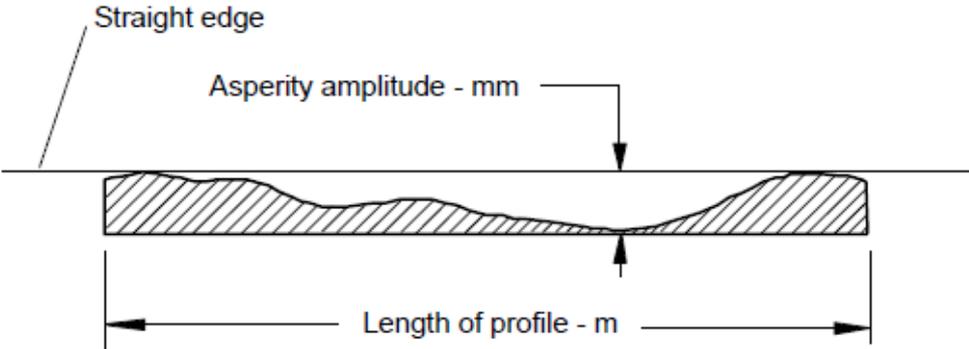
## Le critère de Barton & Choubet (1977)

JRC fonction du profil de rugosité  
(d'après Barton & Choubet 1977)



# Résistance au cisaillement des joints

## Le critère de Barton & Choubet (1977)



Méthode alternative pour déterminer JRC (d'après Barton 1982)

# Résistance au cisaillement des joints

## Joints avec matériau de remplissage

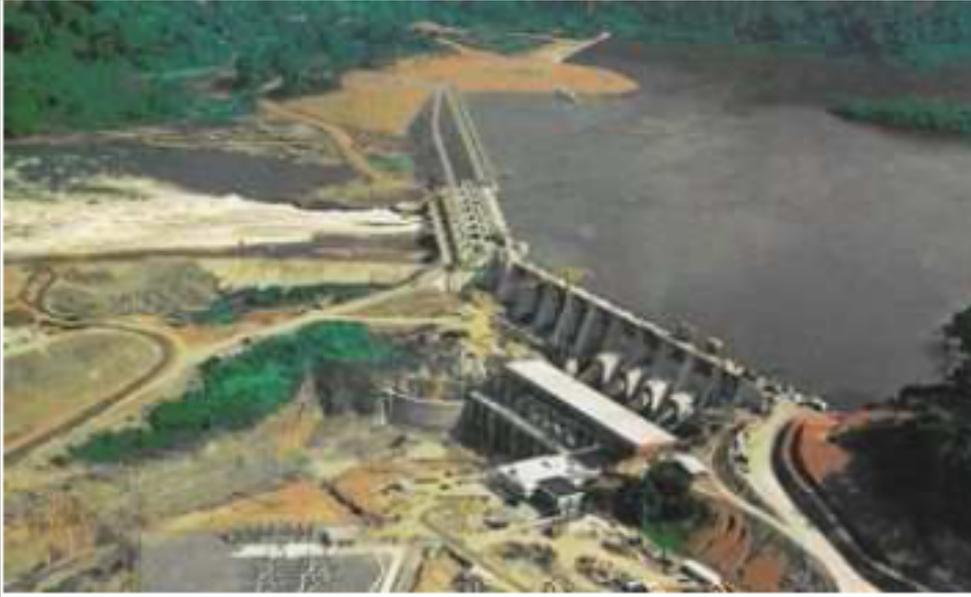
		$c'$ (MPa)	$\phi^\circ$	$c'$ (MPa)	$\phi^\circ$
Basalt	Clayey basaltic breccia, wide variation from clay to basalt content	0.24	42		
Bentonite	Bentonite seam in chalk	0.015	7.5		
	Thin layers	0.09-0.12	12-17		
	Triaxial tests	0.06-0.1	9-13		
Bentonitic shale	Triaxial tests	0-0.27	8.5-29		
	Direct shear tests			0.03	8.5
Clays	Over-consolidated, slips, joints and minor shears	0-0.18	12-18.5	0-0.003	10.5-16
Clay shale	Triaxial tests	0.06	32		
	Stratification surfaces			0	19-25
Coal measure rocks	Clay mylonite seams, 10 to 25 mm	0.012	16	0	11-11.5
Dolomite	Altered shale bed, $\pm 150$ mm thick	0.04	1(5)	0.02	17

Résistance au cisaillement de joints remplis et du matériaux de remplissage (d'après Barton 1974)

Mesurer  $c'$ ,  $\phi'$  du matériau de remplissage au laboratoire

# Jointes avec matériau de remplissage

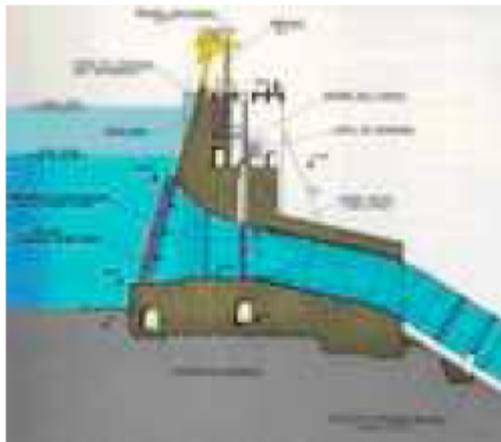
## Le barrage de Songloulou au Cameroun



Le barrage de Songloulou a été construit entre 1976 et 1981 sur un seuil rocheux oblique au fleuve Sanaga.

Rocher composé de gneiss dur calcoalcalin ou micaschiste plagioclastique à cause de sa composition et de sa foliation très développée s'approchant d'un schiste dans certaines bandes de gneiss.

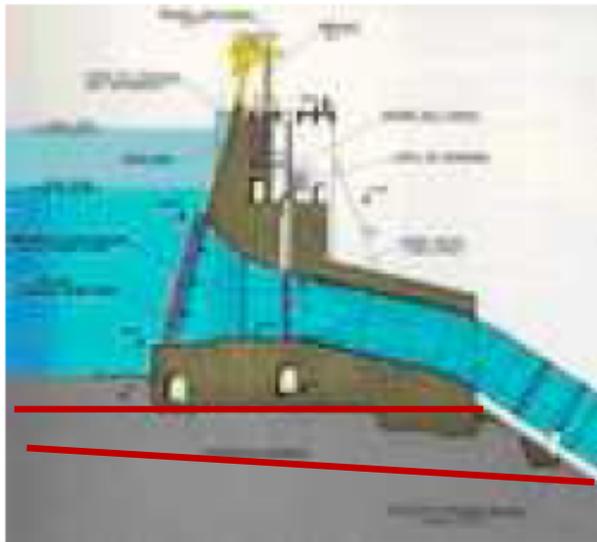
Barrage de prise d'eau



# Joint avec matériau de remplissage

## Le barrage de Songloulou au Cameroun

Barrage de prise d'eau



- **Pendant les travaux, un joint subhorizontal de 2 à 3 cm d'épaisseur a été mis en évidence sous la dalle de fondation du plot 3.**
- Matériau de remplissage : gneiss broyé, très riche en mica, mélangé à des traces d'argile et oxyde de fer
- Suite à essais in situ et triaxiaux au laboratoire, Il a été admis que des plans de glissement à faible résistance au frottement ( $\phi=25^\circ$ ) et sans cohésion pouvait exister sous le barrage

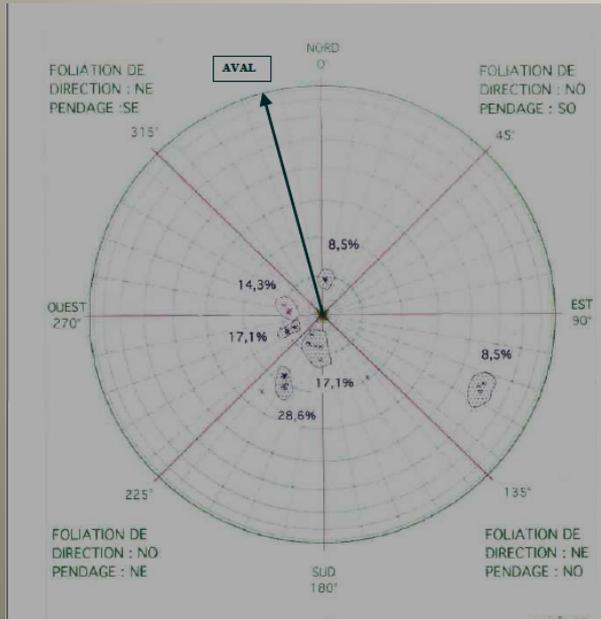
→ Ancrage d'aciers passifs de diamètre 32 ou 40 mm inclinés  $45^\circ$

# Jointes avec matériau de remplissage

## Le barrage de Songloulou au Cameroun

L'expertise géologique réalisée en 1991 par HydroQuébec International confirme ces résultats.

Entre les deux failles orientées de  $30^\circ$  par rapport à l'axe de la crête du barrage de prise, la foliation crée des dalles de gneiss de pendage 5 à  $20^\circ$  vers l'aval, qui se redressent à l'horizontale à l'approche de la faille aval. Certains de ces joints de foliation sont ouverts de un à quelques millimètres, le principal étant situé à une profondeur de un à deux mètres au droit des plots 3 et 4.



Essai in situ :  $\phi' = 31^\circ$

Essais de labo

essai consolidé drainé sur le matériau de remplissage :

1<sup>er</sup> échantillon :  $\Phi' = 35,5^\circ$  et  $c = 0$  kPa,

2<sup>ème</sup> échantillon :  $\Phi' = 22,5^\circ$  et  $c = 50$  kPa en résistance de pointe,

2<sup>ème</sup> échantillon :  $\Phi' = 21,5^\circ$  et  $c = 50$  kPa en résistance résiduelle.

# Jointes subhorizontales ouvertes sans remplissage

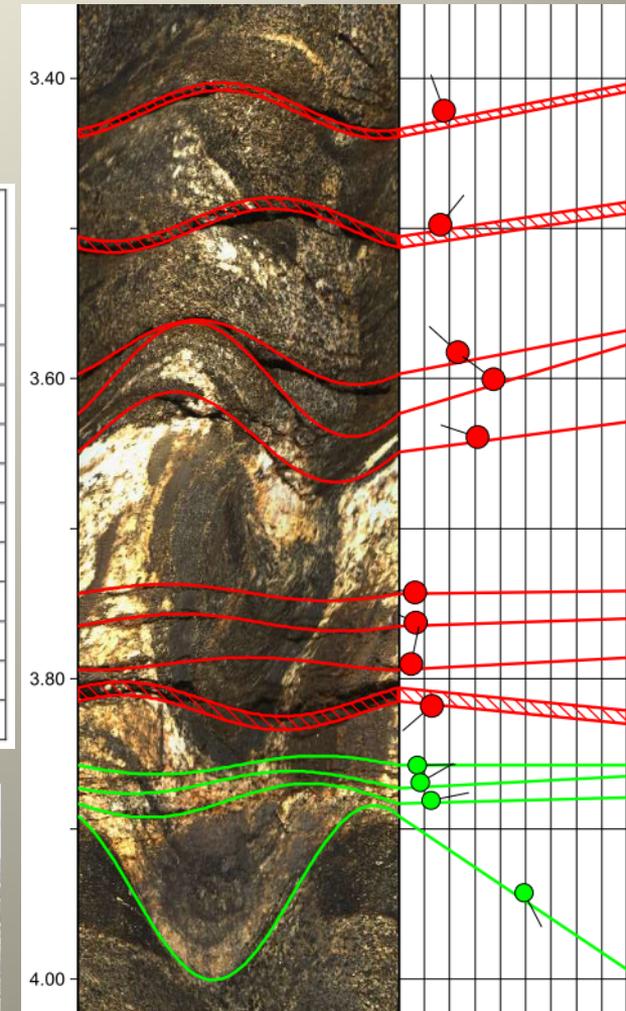
Présence de joints ouverts subhorizontaux sous un barrage poids: estimation de  $\phi$  par une approche de type Barton



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

$$\tau = \sigma_n * \tan(\varphi_b + i) + c$$

Contrainte normale effective kPa maximale	$\phi'$ (°) joint
100	44.2
200	41.8
300	40.4
400	39.4
500	38.6
600	38.0
700	37.5
800	37.0
900	36.6
1000	36.2
1100	35.9



# Sommaire

- L'approche standard actuelle du calcul des barrages poids et ses limites
- Retour d'expérience des ruptures de barrages poids
- Pratiques actuelles de la profession (Hoek & Brown, Barton...)
- Nouvelles approches et résultats de recherches récentes
- Barrage-poids sur fondation de faible caractéristique mécanique : le barrage symétrique en remblai dur

# Evaluation du critère de B & C

## Méthodologie utilisée pour évaluer le critère de Barton et Choubey

$$\tau_p = \sigma_n \times \tan \left\{ \phi_r + JRC \times \log \left( \frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right\}$$

**JRC: Joint Roughness Coefficient**

- Abaques de Barton
- Profilométrie laser

**$\phi_b$ : Angle de frottement basique**

- Tilt test sur carottes de forage ou essai de cisaillement sur surface lisse

**$\phi_r$ : Angle de frottement résiduel**

- Angle de frottement basique et marteau Schmidt

**JCS: Joint Compressive Strength**

- Essai de compression uniaxiale ou marteau Schmidt

Profilomètre laser



Marteau Schmidt



Auteurs: Hussein Mouzannar, Marion Bost,<sup>5</sup>  
Patrick Joffrin (IFSTTAR)



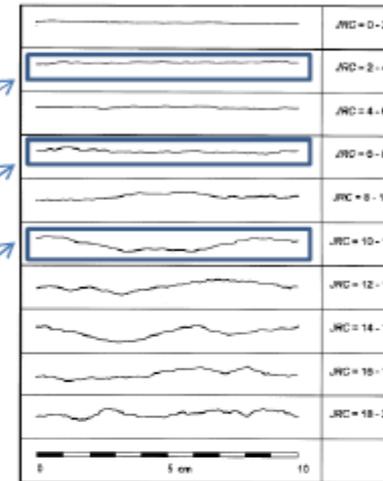
# Evaluation du critère de B & C

## Résultats : Paramètres du modèle de Barton-Choubey

JRC (*Joint Roughness Coefficient*)

Numérisation par profilomètre :

Type de surface	(n)	Moy.
Joints à faible rugosité (surface plane)	(10)	<b>4</b> c.v. 29
Joints rugueux surface peu ondulée)	(12)	<b>8</b> c.v. 18
Joints rugueux (surface ondulée)	(13)	<b>11</b> c.v. 12



Abaque B.C.

JCS (*Joint Compressive Strength*)

Essais : marteau Schmidt

Type de surface	(n)	Moy. (MPa)
Joints non altérés	(15)	<b>205</b> (174-216) c.v. 6 %
Joints altérés	10	<b>107</b> (43-180) c.v. 37 %

$\phi_r$  : Angle de frottement résiduel

Essais : marteau Schmidt, tilt test

Angle frottement	(n)	Moy. (°)
$\Phi_b$ (tilt test)	(19)	<b>33</b> (28-35) c.v. 6 %
$\Phi_r$	(10)	<b>28</b> (22-31) c.v. 12 %

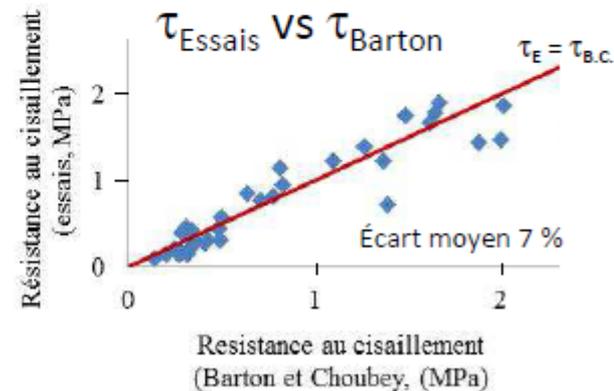
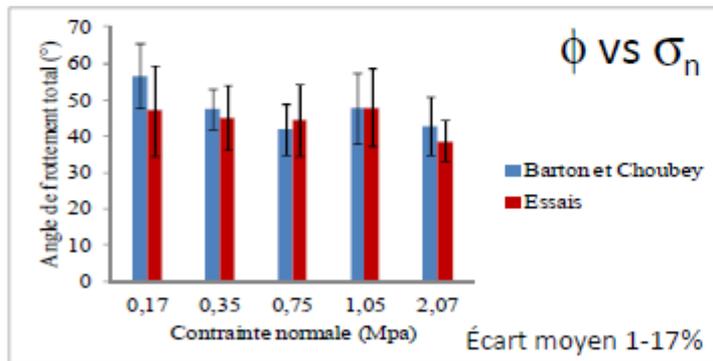
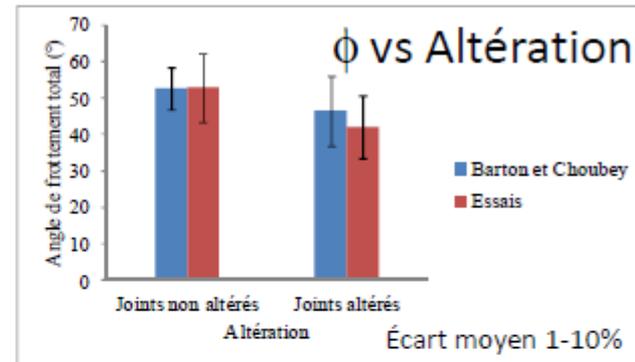
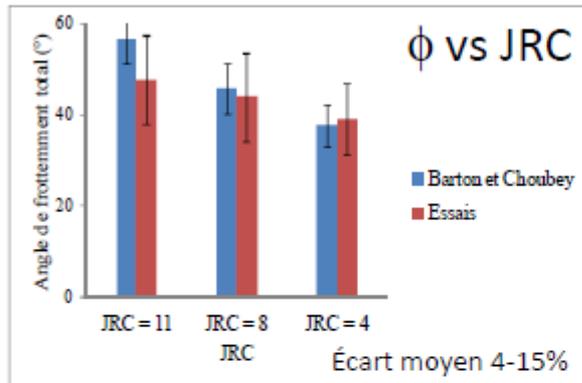


Auteurs: Hussein Mouzannar, Marion Bost,<sup>15</sup>  
Patrick Joffrin (IFSTTAR)



# Evaluation du critère de B & C

## Analyse comparative entre les essais de cisaillement et le modèle de Barton et Choubey



Auteurs: Hussein Mouzannar, Marion Bost,<sup>5</sup>  
Patrick Joffrin (IFSTTAR)



UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE



9

## Conclusion de l'étude expérimentale

- La méthodologie expérimentale appliquée au barrage La Tuque basée sur le modèle de Barton et Choubey procure une estimation satisfaisante de la résistance au cisaillement des joints avec un écart moyen de 7%.
- Le modèle de Barton permet d'évaluer la résistance de joints altérés difficiles d'échantillonnage et d'essais de cisaillement.
- Les paramètres du modèle de Barton et Choubey se prêtent bien à une analyse statistique permettant une quantification de l'incertitude dans les études de stabilité



Auteurs: Hussein Mouzannar, Marion Bost,<sup>5</sup>  
Patrick Joffrin (IFSTTAR)



UNIVERSITÉ DE  
SHERBROOKE

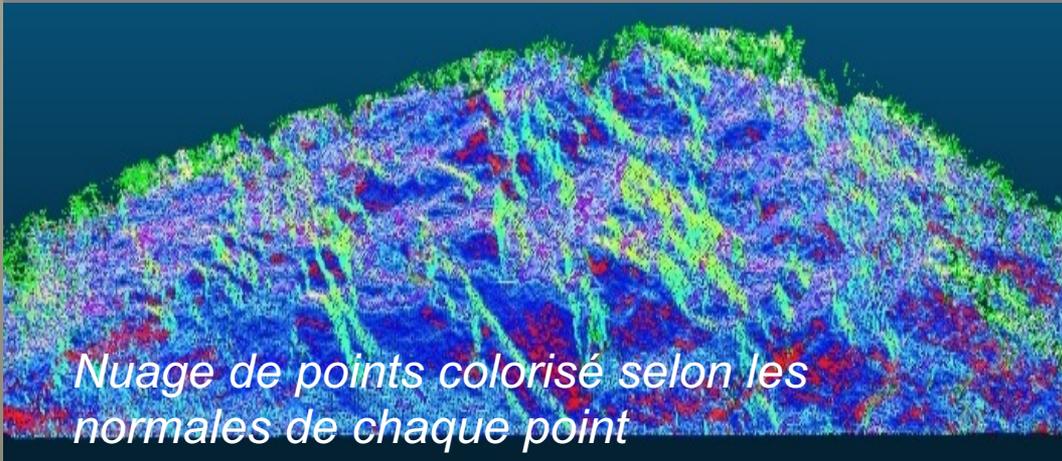


10

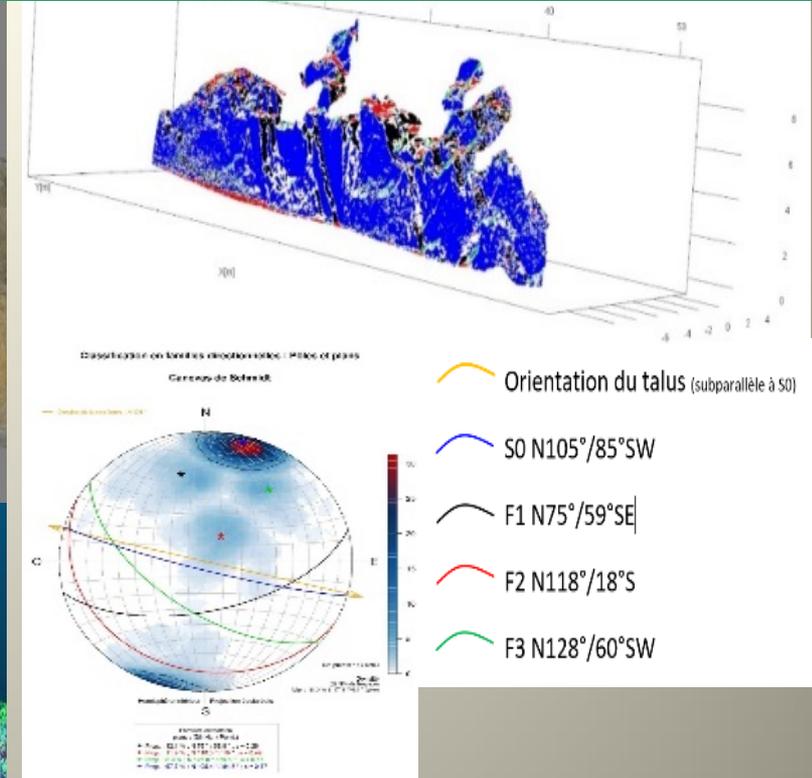
# Apport des nouvelles technologies



*Nuage de points géo référencé et colorisé ;*



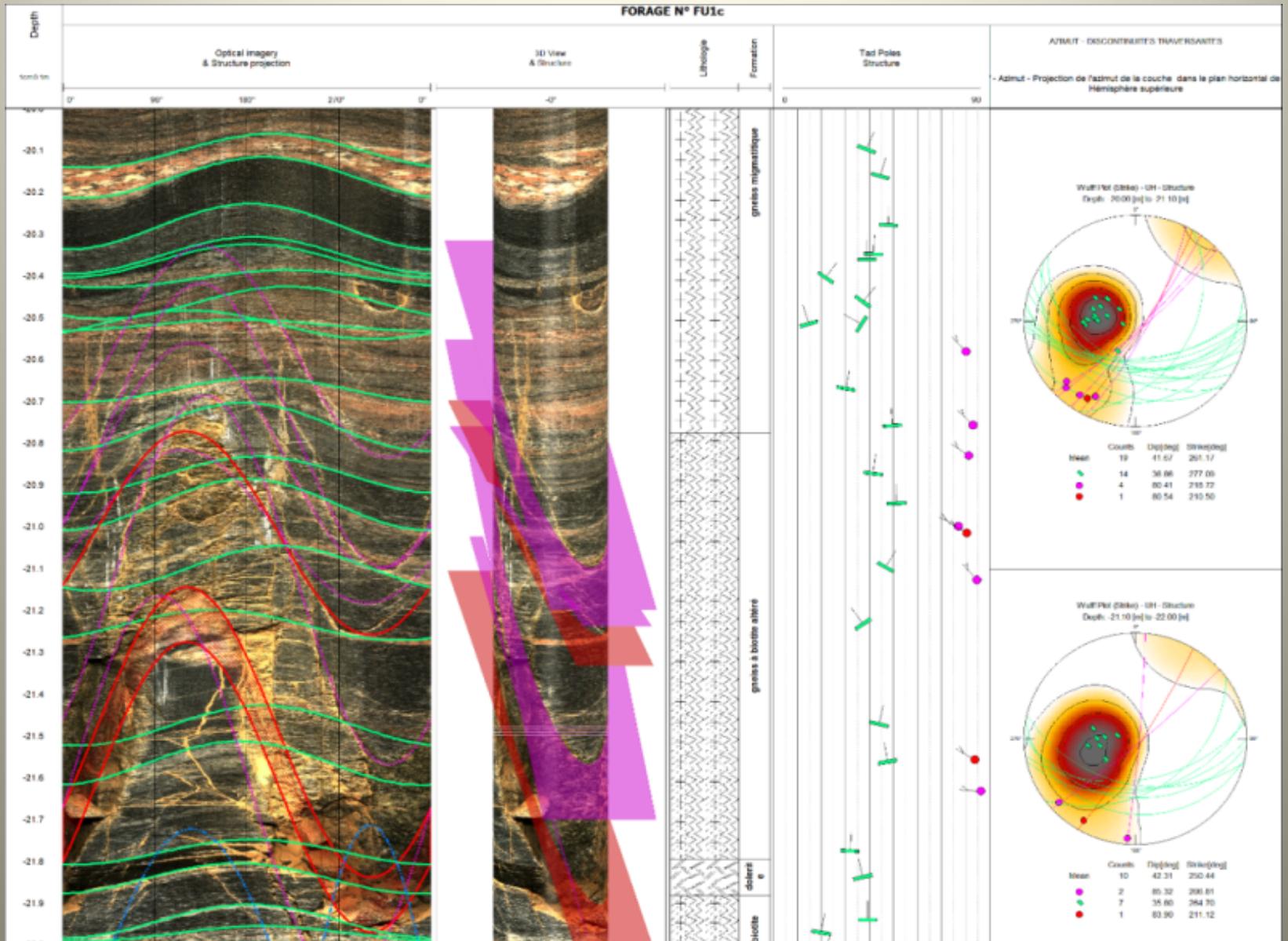
*Nuage de points colorisé selon les normales de chaque point*



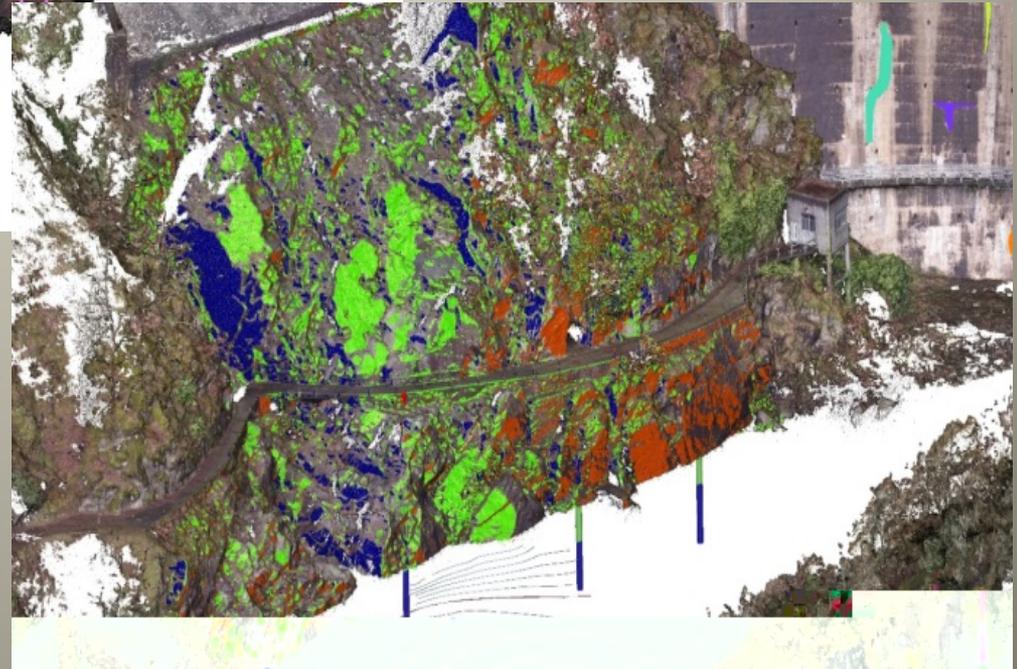
*Classification en familles directionnelles pour les failles et diaclases – Pôles et Plans, canevas de Schmidt et de Wulf*

**Levé et analyse structurale numérique sur le site de Jouques d'un affleurement de calcaires argileux grumeleux du Berriasien, réalisés à partir de la maquette numérique**

# Apport des nouvelles technologies



# Apport des nouvelles technologies



*Barrage de Marège  
Maquette numérique complète avec  
intégration de tous les relevés  
stratigraphiques.*

# Sommaire

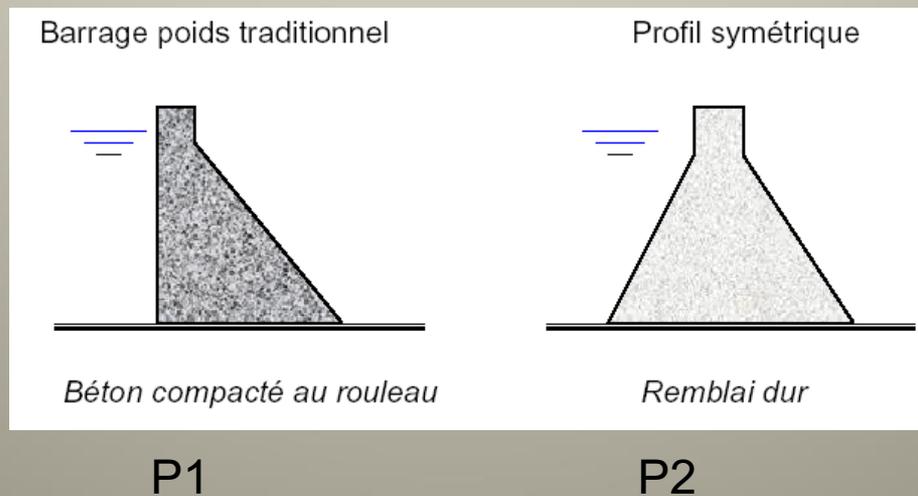
- L'approche standard actuelle du calcul des barrages poids et ses limites
  - Retour d'expérience des ruptures de barrages poids
  - Pratiques actuelles de la profession (Hoek & Brown, Barton...)
  - Nouvelles approches et résultats de recherches récentes
- Barrage-poids sur fondation de faible caractéristique mécanique : le barrage symétrique en remblai dur

Une solution pour construire un barrage-poids sur une fondation de (trop...) faibles caractéristiques mécaniques...

Proposée en 1991 par **Pierre Londe** et Michel Lino : le barrage symétrique en remblai dur.

## Le concept

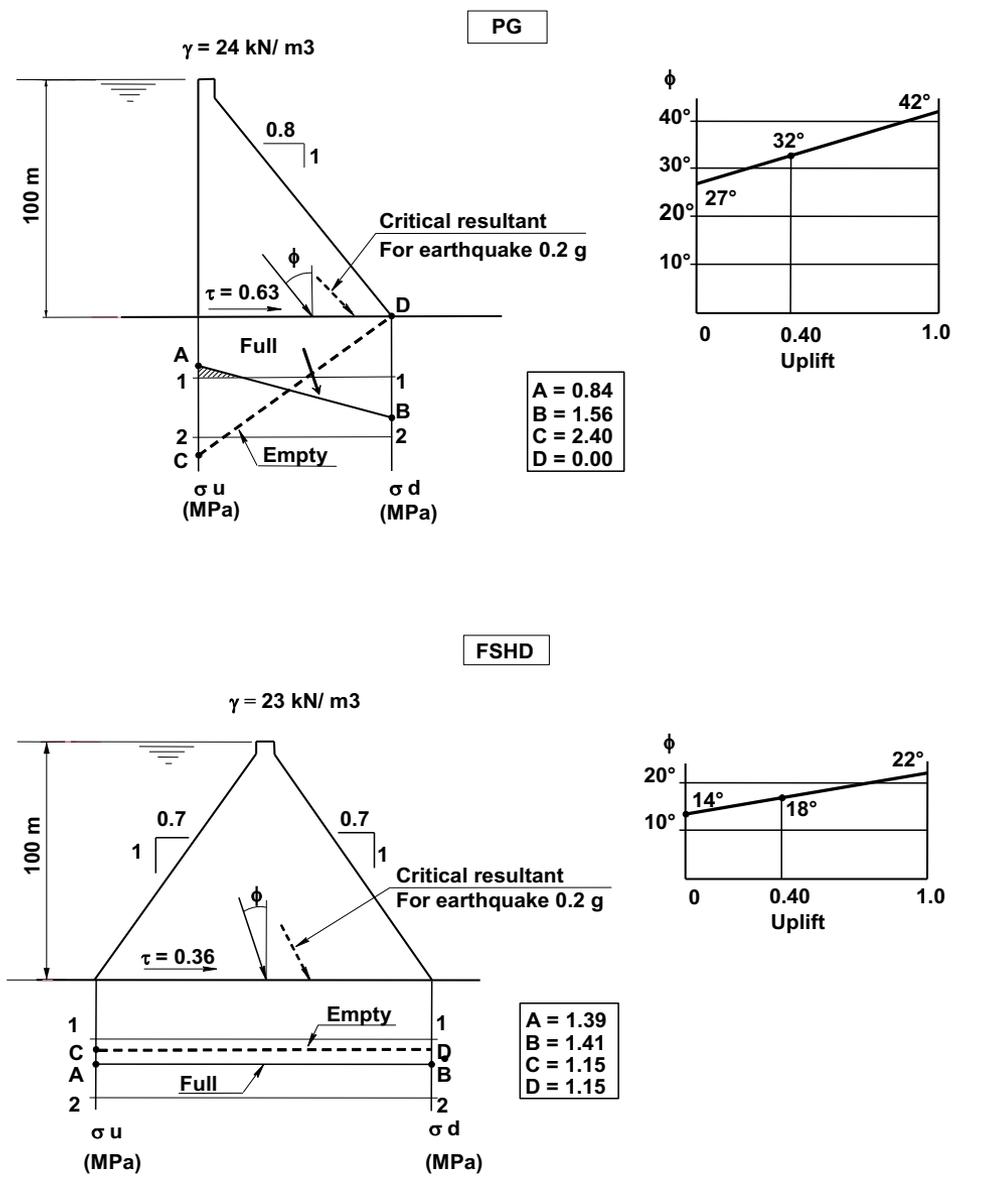
- évolution du barrage poids en BCR
- une forme : profil poids symétrique
- un matériau : BCR faiblement dosé
- une mise en oeuvre simplifiée
- un masque étanche sur le parement amont



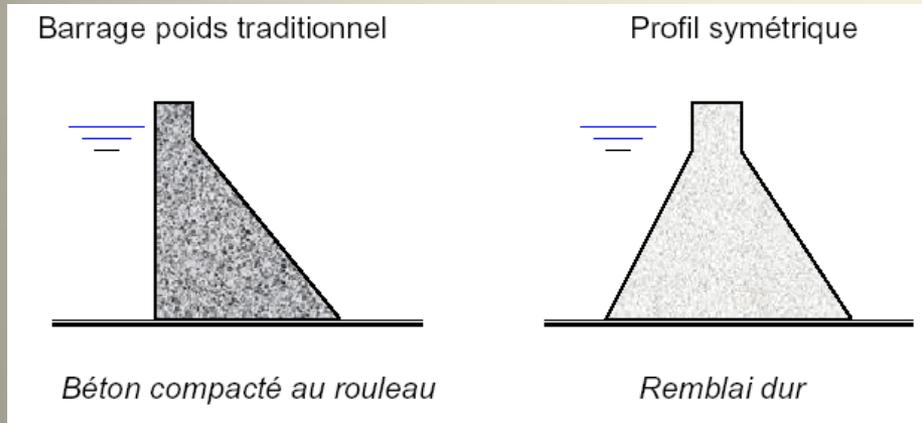
# BARRAGE SYMETRIQUE EN REMBLAI DUR

## Un comportement mécanique optimisé

- contraintes normales et tangentielles fortement réduites
- état de contrainte favorable sur la fondation (compression)
- faible variation des contraintes en exploitation
- 75% des tassements acquis en fin de construction

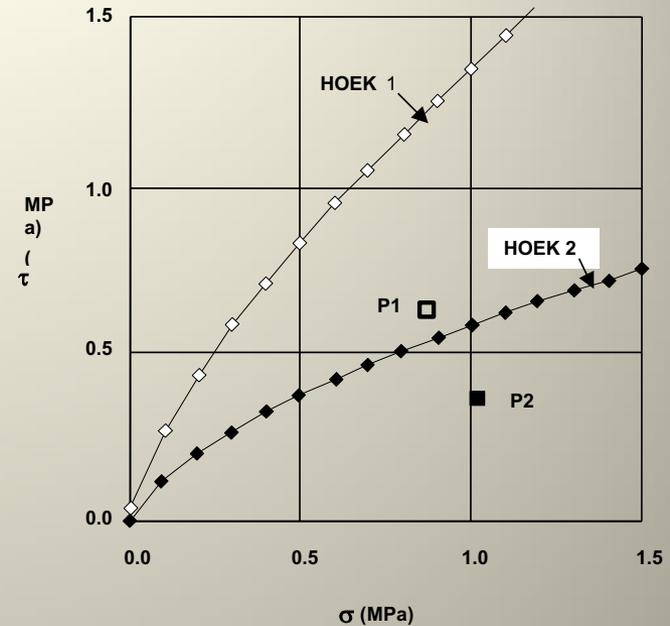


# BARRAGE SYMETRIQUE EN REMBLAI DUR



P1

P2



**Hoek 1 : Rocher de bonne qualité**  
*un barrage poids traditionnel est techniquement faisable (point caractéristique P1)*

**Hoek 2 : Rocher de médiocre qualité**  
*un barrage poids traditionnel n'est techniquement pas faisable ; un barrage symétrique est faisable (point caractéristiques P2)*

- Plus de cinquante réalisations sur les cinq continents
- Plusieurs barrages de plus de 100 m de hauteur
- Bulletin de la CIGB en cours de finalisation

# BARRAGE SYMETRIQUE EN REMBLAI DUR

## Quelques réalisations remarquables



Cindere en Turquie (h=107 m)



Tobetsu au Japon (h=52 m)



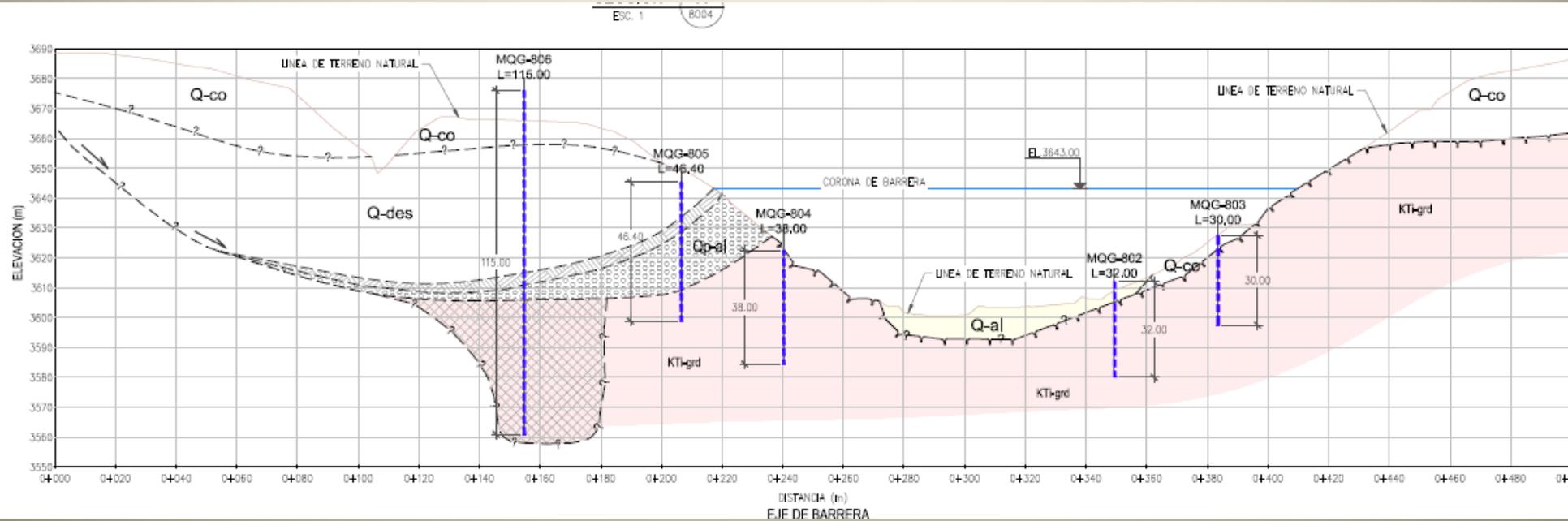
Shoukubao en Chine (h=62 m)



Saf saf en Algérie (h=40 m)

# BARRAGE SYMETRIQUE EN REMBLAI DUR

## Un exemple récent en Amérique du Sud



- Fondation de roches volcaniques fissurées et altérées
- Présence d'un horizon d'alluvions fossiles dans la rive gauche
- Zone fortement sismique

# BARRAGE SYMETRIQUE EN REMBLAI DUR

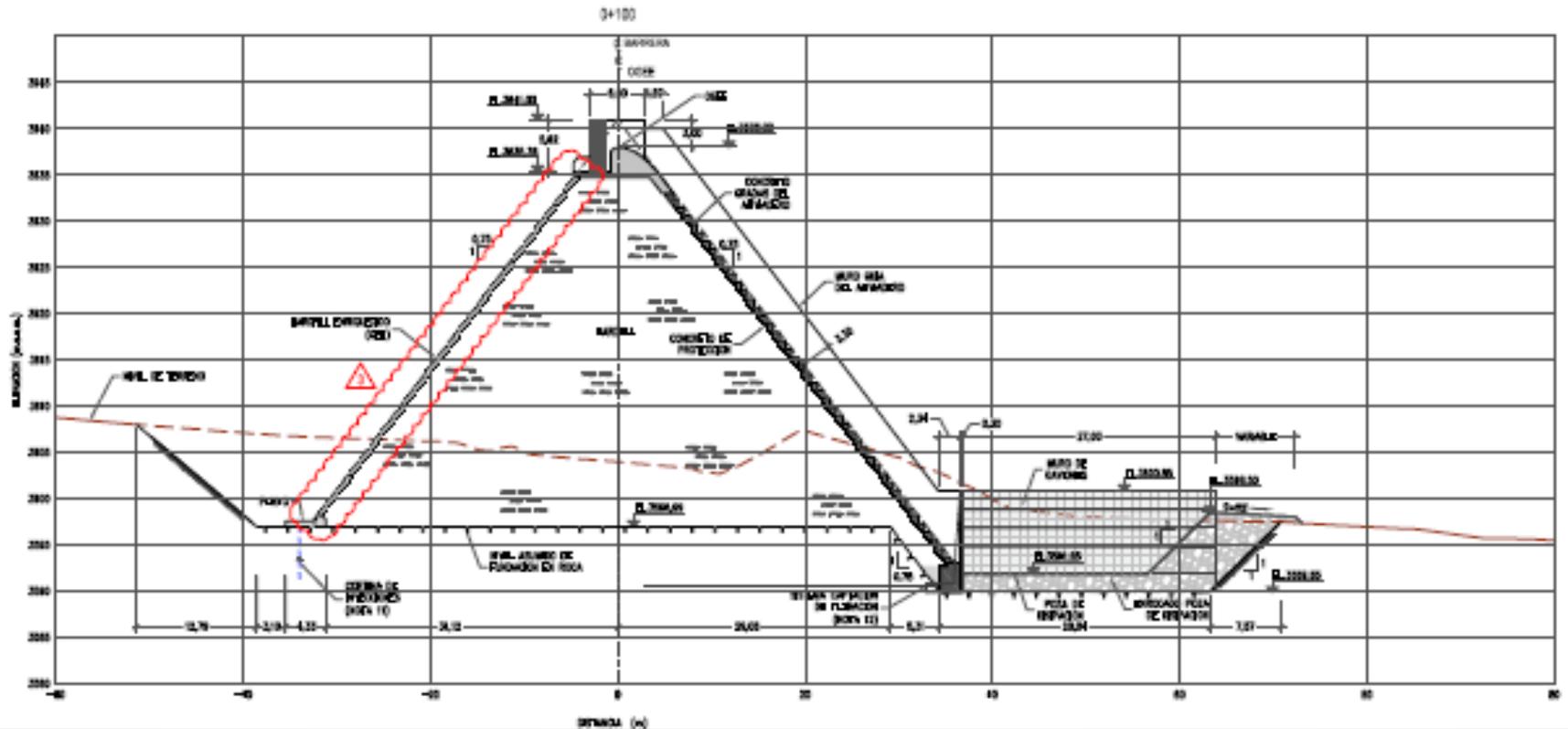
## Un exemple récent en Amérique du Sud



General view of the left bank and fossil alluvium layer in the dam footprint

# BARRAGE SYMETRIQUE EN REMBLAI DUR

## Un exemple récent en Amérique du Sud





# BARRAGE SYMETRIQUE EN REMBLAI DUR

## Un exemple récent en Amérique du Sud



# BARRAGE SYMETRIQUE EN REMBLAI DUR

Un exemple récent en Amérique du Sud



- La justification de la stabilité des barrages poids est plus complexe que ne le laisse supposer le modèle standard de calcul
  - Estimation délicate de la résistance au cisaillement du massif rocheux (effet d'échelle restant complexe à démêler...)
  - Ne pas négliger les effets tridimensionnels : stabilité des plots de rive, monolithisme, hétérogénéité de la fondation
- Importance capitale du modèle géologique qui précède le modèle géomécanique
- Se méfier
  - des joints subhorizontaux de faible résistance au cisaillement (pas forcément faciles à détecter dans les reconnaissances)
  - des surfaces de faiblesses parallèles à la rive

- Deux approches pour estimer la résistance au cisaillement à partir de l'observation géologique et de mesures sur échantillons
  - Hoek & Brown, lorsque le massif rocheux est suffisamment fracturé pour être isotrope et « homogénéisable »
  - Barton & Choubet, pour la résistance au cisaillement sur un joint
- Difficulté de réalisation d'essais in situ représentatifs (effet d'échelle)
- Le barrage symétrique en remblai dur : une solution validée par un REX de 30 ans pour rendre possible la construction d'un barrage rigide sur une fondation de faible résistance au cisaillement (et souvent déformable)

Je vous remercie de votre attention