



**Exemples de prise en compte pratique des joints et discontinuités des massifs rocheux dans la conception d'ouvrages hydroélectriques**



# AVERTISSEMENT

- ◆ **Montrer comment, suivant le contexte (nature de la mission, budget), l'ingénieur de projet peut être amené à aborder le problème de la prise en compte des joints et discontinuités**
- ◆ **L'exposé ne prétend pas exposer des « méthodes » qui seraient applicables telles quelles!!**
- ◆ **Méthodes dépendant étroitement du contexte géologique du site et des données disponibles**
- ◆ **Souvent la nécessité de telles approches est rendue nécessaire par le manque de données sur les massifs rocheux concernés**



# La mission « idéale »

- ◆ **Mission de base: situer et dimensionner les ouvrages**
  - Barrage,
  - Ouvrages souterrains (tunnels hydrauliques et tunnels d'accès, usine souterraine si requise)
  
- ◆ **Mission « idéale »**
  - L'ingénieur-conseil intervient dès le début des études
    - Reconnaissances de site
    - Définition des reconnaissances en fonction des conditions des massifs rocheux (en particulier discontinuités et joints)
    - Suivi des reconnaissances et essais de laboratoire
    - Exploitation des résultats
    - Application directe pour la conception des ouvrages



## Importance du contexte de l'intervention

- ♦ **La majorité des missions ne sont plus « idéales »**
  - Morcellement des études, changement d'intervenants, etc.
  
- ♦ **Dans la pratique, c'est souvent une mission bien précise qui est confiée à l'ingénieur**
  - Faisabilité, Avant-projet, Projet détaillé, Expertise technique etc.
  - Contexte contractuel très variable suivant les missions
  
- ♦ **Des massifs rocheux sont « livrés » pour analyse à l'ingénieur**
  - Sous forme de livraison d'un ensemble de données disponibles (reconnaisances, essais de laboratoire, etc.)



## Les tendances actuelles...

- ♦ **Les massifs rocheux « livrés » ont une densité de fracturation de plus en plus élevée!**
  - Les sites les plus favorables du point de vue géologie et mécanique des roches ont été les premiers équipés
  - Le nombre de projets de barrages sur fondations difficiles ou problématiques est en très nette hausse...

**D'où importance accrue de la connaissance des discontinuités et joints des massifs rocheux**

- ♦ **Dans le cadre d'un grand nombre d'interventions, les massifs sont « livrés » avec des données que le Client considère comme suffisantes...**
  - **Difficulté d'obtenir toutes les reconnaissances complémentaires qui seraient souvent souhaitables: faire avec!**



## Les conséquences de cette situation

- ♦ **L'ingénieur de projet dispose d'outils informatiques très performants (modélisation numérique, etc.) mais...**
  - Ces outils nécessitent des données d'entrée fiables pour obtenir des résultats fiables,
  - Situations variables, mais de plus en plus souvent, les données des reconnaissances et données disponibles ne permettent pas une description satisfaisante des discontinuités et joints du massif
- ♦ **Heureusement, les reconnaissances visuelles sur site restent un bon moyen d'apprécier le comportement de massifs rocheux!**
  - Fait néanmoins largement appel à l'expérience
  - Conséquence: difficile de présenter une justification « logique » du dimensionnement des ouvrages...
  - Alors que de plus en plus, les Clients demandent cette justification, comme s'il s'agissait d'une science exacte...



# Exemples d'enseignements



CO YNE ET BELLIER

Bureau d'Ingénieurs Conseils

CFMR-CFGI-ENPC ; C. VIBERT; 24 mai 2007; Discontinuités et joints

# Discontinuités et joints des massifs concernés: les données indispensables

## ◆ Données générales

- Dans chaque unité « homogène », identification des différentes familles de joints, orientation (projection stéréo), associée à une caractérisation géotechnique (espacement, persistance, altération des épontes, remplissage, etc.)
- Essais de laboratoire pour résistance au cisaillement des discontinuités, caractéristiques de la matrice de la roche, etc.

## ◆ A l'échelle des ouvrages

- La cartographie des principales discontinuités qui peuvent être individualisées comme des traits particuliers du massif, et l'estimation de leurs caractéristiques mécaniques est indispensable!! (calculs de stabilité des coins rocheux, dièdres, etc.)



# L'effet d'échelle: résistance au cisaillement des discontinuités

## ◆ Essais de laboratoire

- Résistance de pic et résistance résiduelle sont à déterminer
- Un nombre de discontinuités suffisamment représentatif doit avoir été testé

## ◆ Prise en compte de l'effet d'échelle

- Valeurs pour discontinuité à l'échelle d'un coin rocheux de toute façon à confirmer par observations de terrain
- Peut être empirique (JRC et JCS de Barton), en cas d'absence de remplissage (joint rocher-rocher)
  - Une part de jugement devra intervenir pour l'adoption de valeurs de projet, ainsi qu'une fourchette de variation
- En cas de présence de matériau de remplissage, l'effet d'échelle est atténué



## L'effet d'échelle: caractéristiques du massif rocheux dans son ensemble

### ◆ Caractérisation géotechnique des massifs

- Découpage en unités « homogènes », application des classifications de massifs rocheux (Q, RMR, GSI), qui prennent en compte l'effet des discontinuités de manière empirique, pour aboutir à des caractéristiques géomécaniques pour le massif rocheux
- Attention: les résultats obtenus par le biais de ces classifications (ex. critère de Hoek & Brown) ne doivent être considérés que comme indicatifs!!
- Ces classifications répondent à un vœu de justification des hypothèses voulu par les Clients

Exemple:  $c_{\text{massif}} = \alpha \cdot c_i$        $\varphi_{\text{massif}} = \beta \cdot \varphi_i$       avec des valeurs attribuées à  $\alpha$  et  $\beta$  sans aucune forme d'explication n'est plus accepté!



# Exemple de stabilité d'excavations (Equateur)

## ♦ Le contexte

- L'évacuateur de crues ne pouvant être placé sur le barrage (barrage en enrochements à masque amont), il sera placé sur la rive droite
- Les excavations à pratiquer ont une hauteur de 125 à 200 m
- Massifs rocheux concerné: schistes quartzitiques à chloritiques, à schistosité marquée, affecté par de très fréquentes bandes de cisaillement
- Travail effectué en Groupement: COYNE ET BELLIER n'a qu'un rôle d'assistance technique dans le projet

## ♦ Les données disponibles (20 ans d'âge)

- Campagne de sondages, les carottes ayant subi quelques désagréments...
- Projections stéréographiques, essais de laboratoire (résistance à la compression, essais brésiliens) et in-situ (dilatomètre, peu interprétable)







# Dimensionnement du confortement des excavations

- ◆ **Confortement systématique préconisé, par ancrages longs (10m) à maille resserrée (1,5m)**
  - Un confortement systématique est de toute façon indispensable, compte tenu de la schistosité et de la présence d'autres réseaux de discontinuités
  - La direction de la schistosité (perpendiculaire à l'excavation) et la disposition des autres discontinuités, fait surtout craindre des chutes de blocs (attention, chantier du barrage en dessous!!)

Ce dimensionnement résulte essentiellement d'observations de terrain

## Reconnaitances complémentaires

- Quelques sondages
- Campagne de sismique réfraction sur le versant



# Etude de la stabilité en grand du versant

- **Du fait de la présence de nombreuses discontinuités et joints, susceptibles de se relayer pour une rupture en grand du versant, des calculs de stabilité en grand des excavations sont à effectuer**

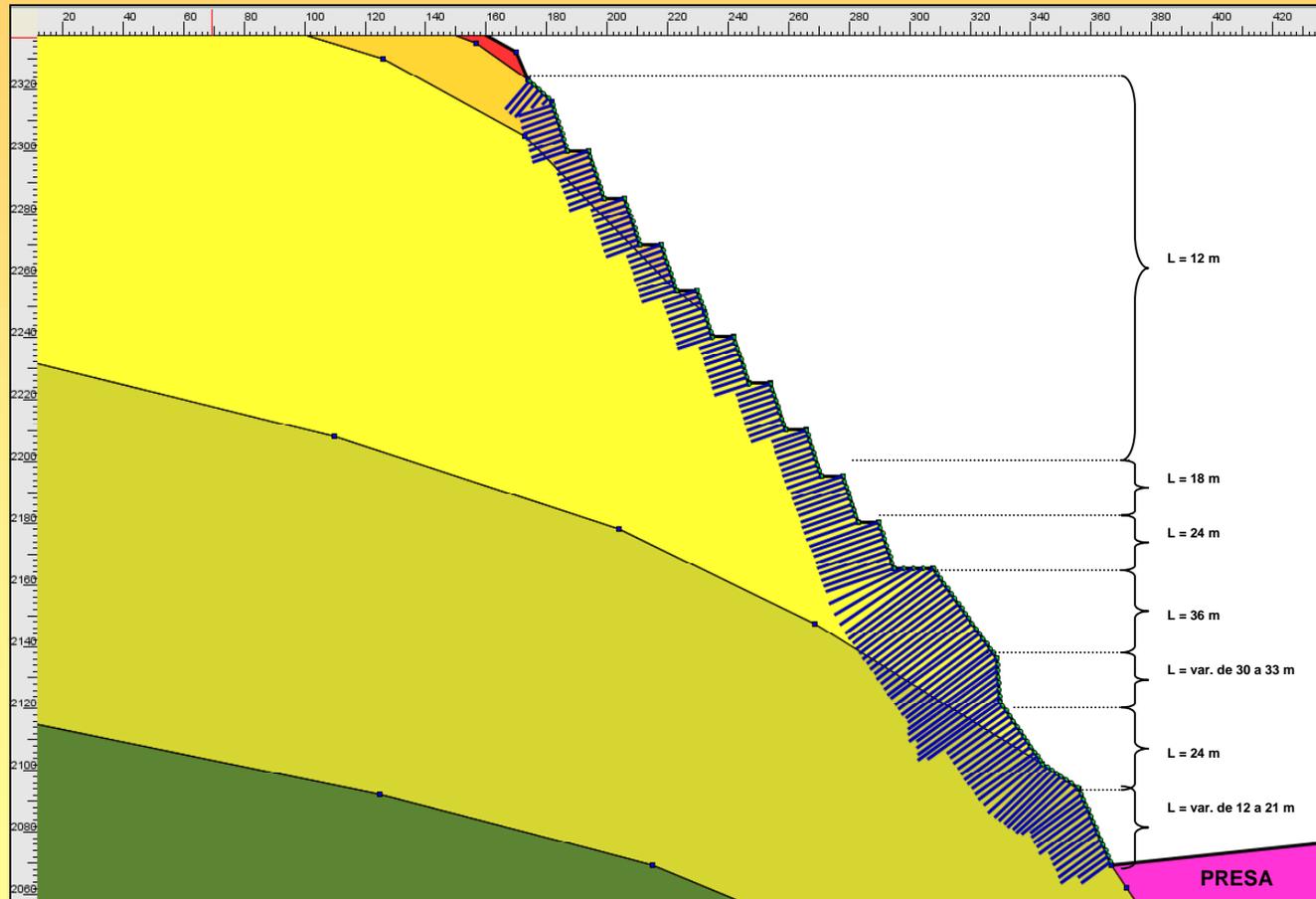
**Quelles données d'entrée?**

- **Décomposition du versant en plusieurs couches de caractéristiques différentes, sur la base des données des sondages d'il y 20 ans et du levé de la galerie**
  - **Définition des couches laborieuse (bandes de cisaillement subverticales)**
- **La prise en compte des discontinuités se fait sur la base d'une analyse du GSI, en comparant sondages et observation sur affleurements**
- **Hypothèse sur niveau de nappe phréatique**



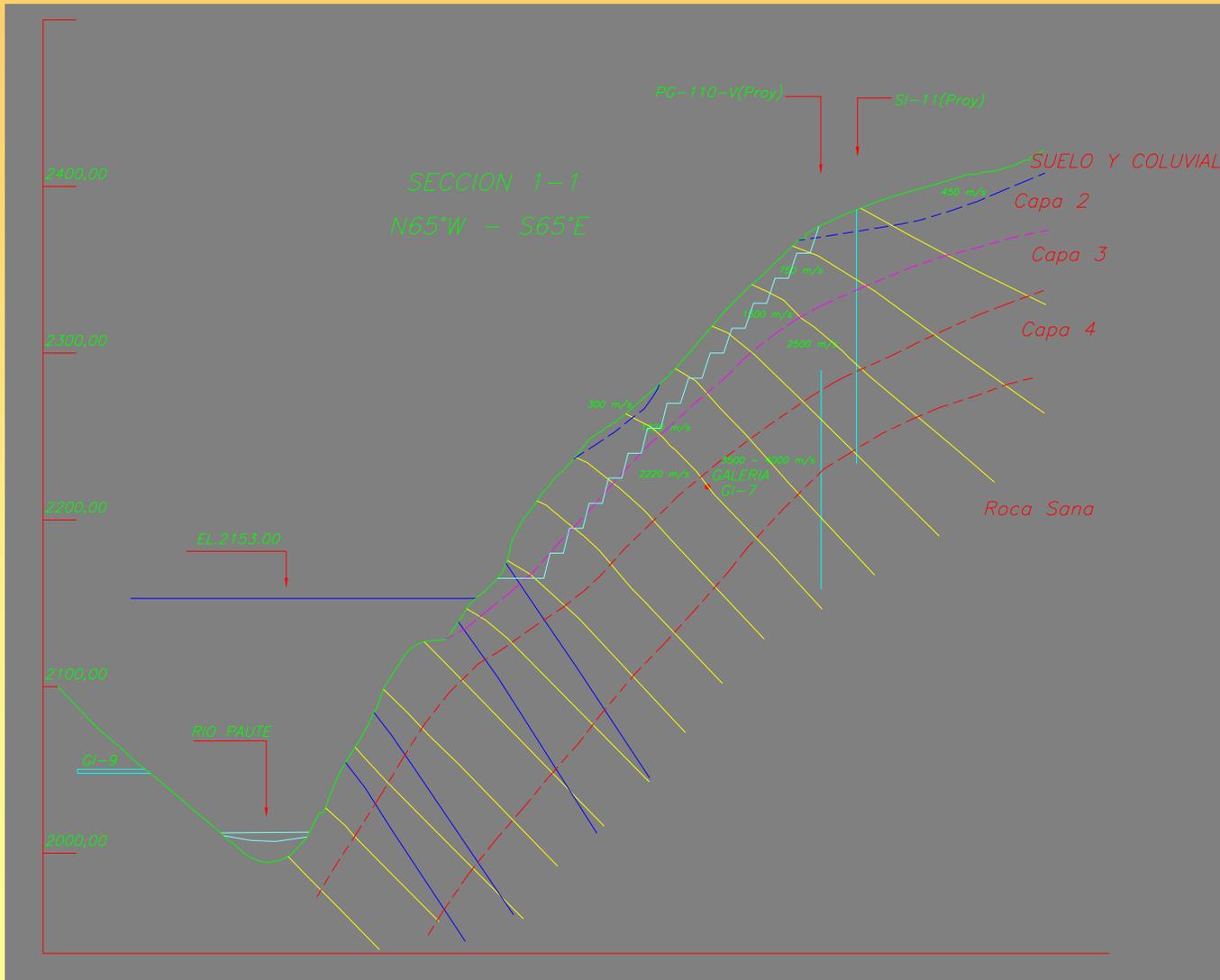
## Outil utilisé: analyse de stabilité classique

*Dans la situation la plus critique (fouilles les plus hautes, soumises à cet endroit à vidange rapide du réservoir), des ancrages systématiques de 50m de long sont nécessaires!*



Ultérieurement, les limites de couches sont alignées sur les résultats de la campagne de sismique réfraction (sans changement notable des caractéristiques mécaniques)

La stabilité est presque assurée avec les coefficients requis



# Etude de la stabilité en grand du versant

## ◆ Conclusion de ces calculs

- Nécessité d'une investigation plus précise de la zone concernée où des ancrages de grande longueur pourraient être requis

## ◆ Intervention du Board d'experts du projet

- Analyse UDEC et FLAC recommandée
- Problème: le budget!
- Accord avec le Client trouvé: calculs effectués par le Chef de File du Groupement

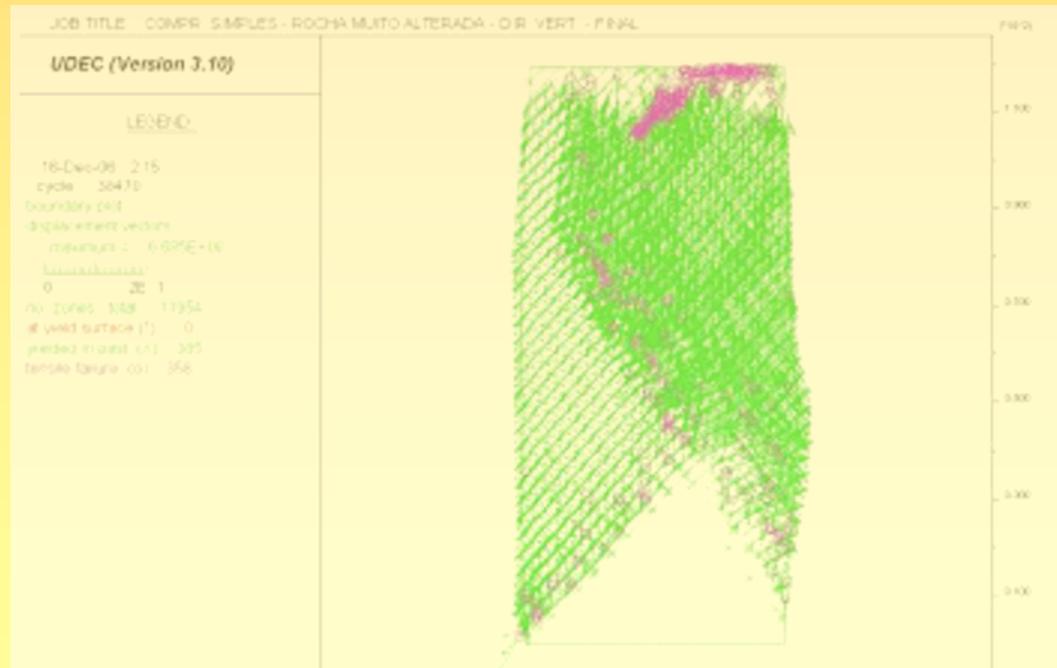
## ◆ Calcul UDEC (COYNE ET BELLIER n'est pas consulté)

- Nouveaux paramètres d'entrée requis pour les caractéristiques des blocs; très largement empiriques
- Les résultats rejoignent la nécessité d'un confortement de surface systématique (maille dépendant de l'espacement des discontinuités)



# Etude de la stabilité en grand du versant

- ◆ Calcul FLAC (COYNE ET BELLIER non consulté)
  - Les paramètres sont obtenus à partir des paramètres empiriques utilisés pour UDEC, en essayant d'ajuster cohésion et modules de déformation horizontaux et verticaux pour les différentes couches sur la modélisation numérique d'essais de résistance à la compression à l'échelle de 50x120m



# Etude de la stabilité en grand du versant

## ◆ Calcul FLAC (COYNE ET BELLIER non consulté)

### – Les paramètres

Matériau	Cohésion Apparente (MPa)	Angle de frottement Apparente (degrés)	Module de Elasticidade Vertical (MPa)*	Module de Elasticidade Horizontal (MPa)*	Module de Elasticidade Equivalente (MPa)	Coefficiente de Poisson	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )
Rocha sã	0,50	33	3.849	6.000	4.806	0,25	2.600
Rocha pouco alterada	0,46	33	3.000	4.800	3.795	0,25	2.500
Rocha medianamente alterada	0,43	33	3.231	2.880	3.050	0,25	2.400
Rocha muito alterada	0,35	33	1.632	1.600	1.616	0,30	2.200
Solo	0,05	20	35	35	35	0,30	2.000



## Etude de la stabilité en grand du versant

- ◆ **Conclusion des calculs UDEC et FLAC effectués par le Chef de File du Groupement**
  - **COYNE ET BELLIER non consulté sur les paramètres d'entrée du modèle, qui restent très largement empiriques**
  - **Conclusion à la stabilité des fouilles, mais l'eau n'a pas été prise en compte (tout spécialement le cas de vidange rapide pour la partie des fouilles située à l'amont du barrage)**
  - **Le soutènement préconisé en conclusion de ces calculs est le même que celui préconisé par les calculs à la rupture....(seule la maille des ancrages dépend de l'espacement adopté pour les discontinuités)**
  - **En outre, les conclusions des calculs à la rupture apparaissent finalement plus précises quant à la définition des situations critiques et des points restant à confirmer**



## Conclusion sur la méthode de prise en compte des discontinuités

- ◆ **Les analyses numériques nécessitent des données d'entrée bien représentatives, tant sur les paramètres des discontinuités elles-mêmes que sur ceux de la matrice rocheuse**
- ◆ **Introduire des données d'entrée définies de manière empirique dans des modèles numériques n'a de sens que:**
  - Si une analyse paramétrique peut-être réalisée,
  - S'il est possible de procéder à des essais complémentaires pour pouvoir se situer
- ◆ **En conclusion: se battre pour persuader le Client d'effectuer les essais et reconnaissances nécessaires...**



# Stabilité de dièdres rocheux (Ethiopie)

## ♦ Le contexte

- Mission de **COYNE ET BELLIER**: réviser les documents de projet présentés par l'Entrepreneur (aménagement « clés en mains »)
- Stabilité des excavations pratiquées pour les portails de tunnels de dérivation (diamètre 11 à 15m)

## ♦ Les données disponibles

- Quelques sondages carottés
- Projections stéréographiques, essais de laboratoire en nombre très limité (résistance à la compression, résistance au cisaillement)
- Données de terrain sous la forme de caractérisation des joints (espacement, continuité, ondulation, remplissage, etc.)
- Résultats de mesures sclérométriques sur les épontes de joints



# Estimation de la résistance au cisaillement des joints du massif

- ♦ L'Ingénieur-Conseil de l'Entrepreneur estime la résistance au cisaillement des joints par la méthode empirique de Barton

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

- Observations de terrain: obtention d'un JRC (Joint Roughness

$$JRC_n = JRC_o \left( \frac{L_n}{L_o} \right)^{-0.02 JRC_o}$$

$$JCS_n = JCS_o \left( \frac{L_n}{L_o} \right)^{-0.03 JCS_o}$$



## Questions soulevées par la méthode

- ♦ L'angle de base  $\phi_b$  ( $34^\circ$ ) est estimé à partir des tables de Barton, puis confirmée par trois essais de cisaillement
  - Problème: les essais de cisaillement ont été réalisés dans des échantillons de roche saine sciés, alors que la roche le long des épontes est altérée...
- ♦ Le mode de calcul de l'effet d'échelle, qui permet d'arriver à  $45^\circ$  d'angle de frottement n'est pas précisé
  - La longueur des joints sur le terrain par rapport à la longueur d'un échantillon n'est pas explicitée
- ♦ Il apparaît sur les relevés de terrain que des remplissages de rocher laminé et oxydé sont présents dans de nombreuses discontinuités



## Conclusions sur la méthode employée

- ◆ **Les formules de résistance au cisaillement données par les formules de Barton doivent être appliquées à bon escient**
  - L'effet d'échelle doit être explicité
  - Cisaillement rocher sur rocher (sans remplissage)
  - L'angle de base  $\varphi_b$  doit être représentatif du rocher des épontes
- ◆ **Une individualisation des joints principaux doit être faite sur le site**
  - Ne pas juger uniquement de la stabilité sur une projection stéréographique, dont la représentativité n'est pas toujours garantie
  - Le repérage sur site des principales discontinuités est indispensable dans ce cas



# Prise en compte des joints dans une fondation de barrage (Iran)

## ◆ Le contexte

- La mission est ici une mission classique de conception de barrage, en association avec un partenaire local
- Barrage en remblais de 170m de hauteur
  - Base de la fondation: formation alternant grès et pélites, la stratification consistant l'unique réseau de fractures continues
  - Appuis du barrage: conglomérats quaternaires
- Contexte géologique de tectonique récente

## ◆ Les données disponibles sur les discontinuités

- Nombreuses données disponibles sur la formation de grès et pélites
- Les essais datent de plusieurs années (conditions mentionnées souvent de manière incomplète), labo, in-situ



# Chevauchement tectonique majeur derrière la rive droite



CO YNE ET BELLIER

Bureau d'Ingénieurs Conseils

CFMR-CFGI-ENPC ; C. VIBERT; 24 mai 2007; Discontinuités et joints

-28-

# Schéma de la fondation (présence d'un anticlinal)

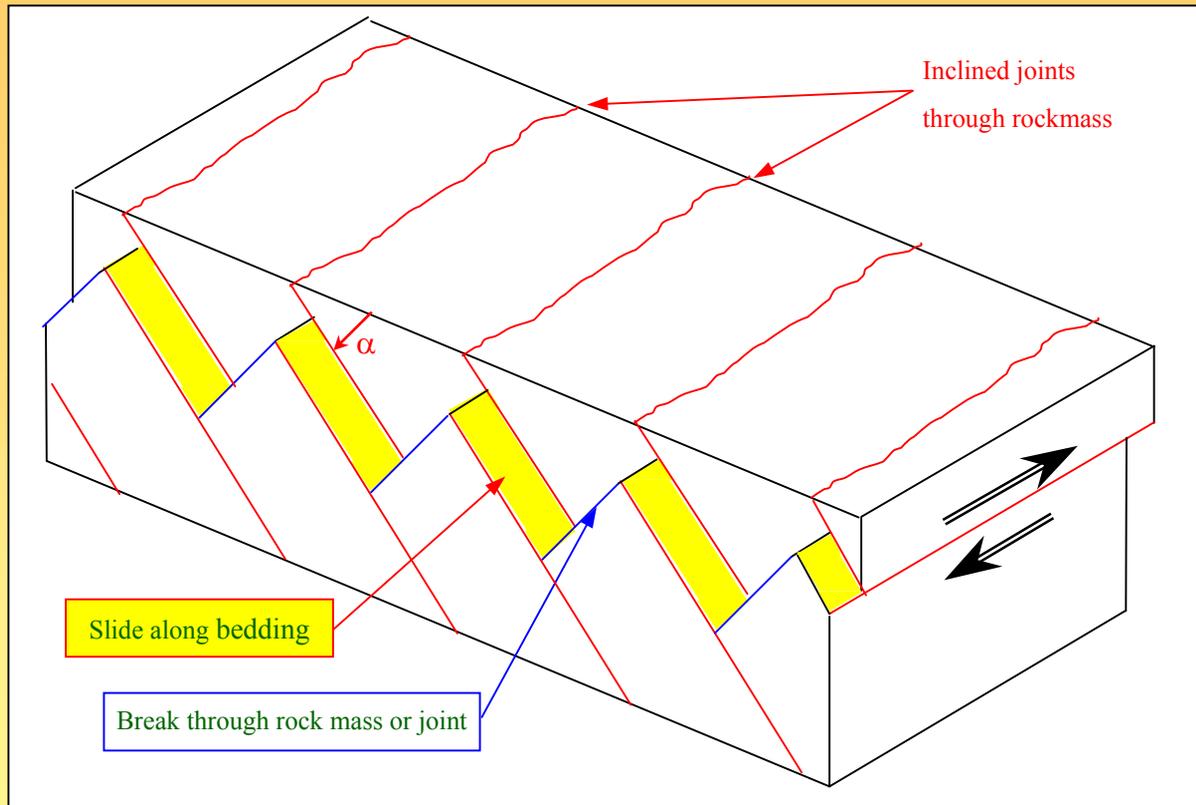


# Prise en compte des discontinuités pour le calcul de stabilité du barrage et de sa fondation

- ♦ **Géométrie des surfaces de rupture les plus probables dans la fondation**
  - Possibilité de glissements de l'amont vers l'aval dans la fondation, le long des plans de schistosité, relayés par d'autres discontinuités
  - Mais pas d'autre véritable réseau de joints
- ♦ **La résistance au cisaillement dans la fondation (sens amont-aval) est estimée par une combinaison:**
  - des données d'essais le long des plans de schistosité
  - pour les ponts rocheux, d'une résistance à la rupture déterminée de manière empirique (critère de Hoek & Brown en excluant la schistosité)



# Prise en compte des discontinuités pour le calcul de stabilité du barrage et de sa fondation



***La résistance au cisaillement équivalente ainsi obtenue dépend:***

- du pendage de la schistosité***
- de l'angle supposé de pendage de la rupture dans la roche***



# Prise en compte des discontinuités pour le calcul de stabilité du barrage et de sa fondation

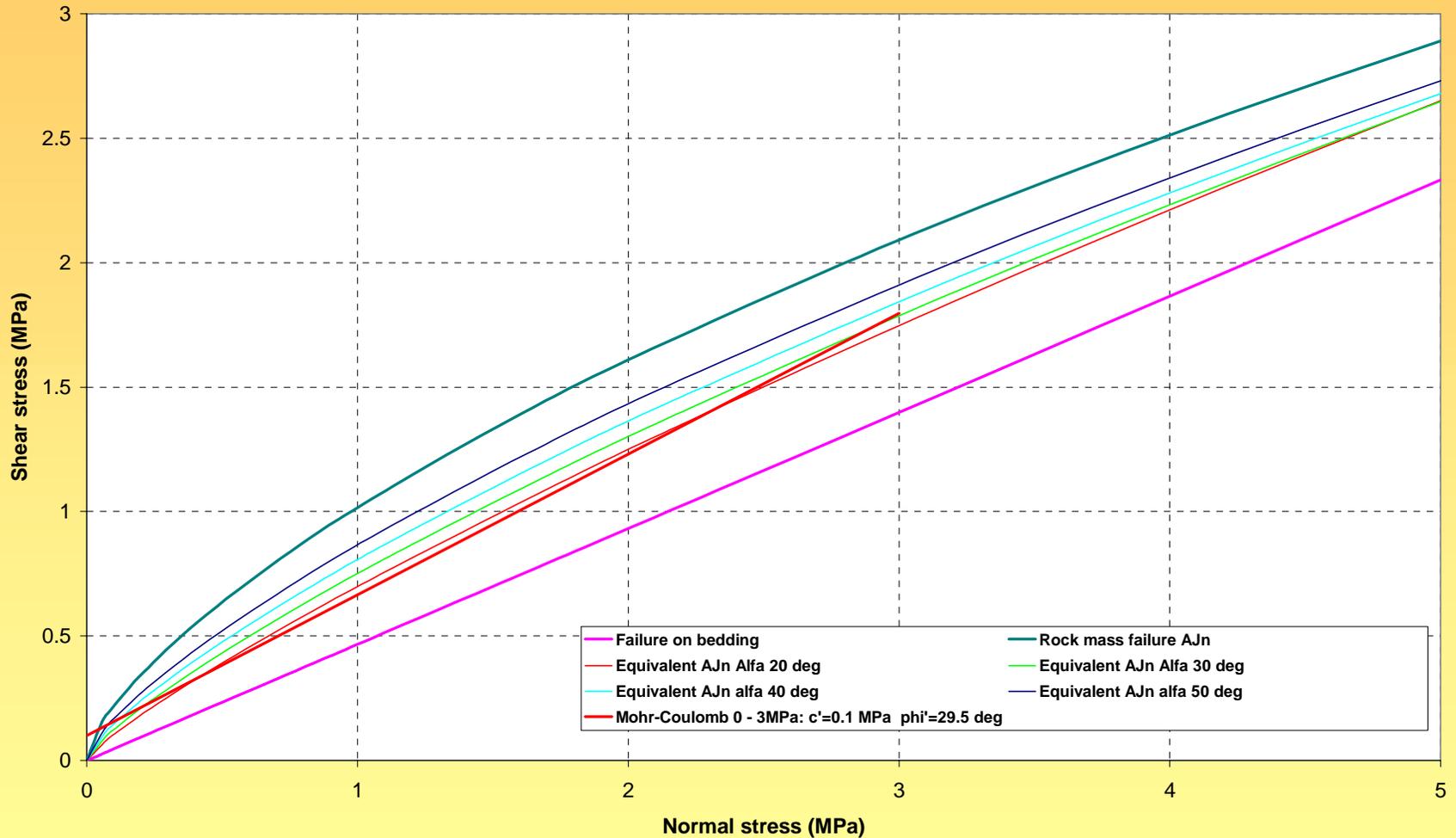
- L'angle d'inclinaison de la rupture dans la roche fracturée sera finalement choisi de manière à minimiser la résistance au cisaillement équivalente
  - La résistance au cisaillement des plans de schistosité est plus faible de celle calculée pour les ponts rocheux
- ♦ En conséquence, plus le pendage est faible, plus la résistance au cisaillement équivalente sera faible
- Paramètres adoptés pour les calculs de stabilité de l'ouvrage:

Normal stress range	0 – 3 MPa	0 – 5 MPa
Type of failure surface		
Circular or semi-circular	$c' = 0.34 \text{ MPa}$ $\varphi' = 31.2^\circ$	$c' = 0.5 \text{ MPa}$ $\varphi' = 26.7^\circ$
Sub-horizontal	$c' = 0.10 \text{ MPa}$ $\varphi' = 29.5^\circ$	

## 1. Poorly folded Aghajari formation



# Prise en compte des discontinuités pour le calcul de stabilité du barrage et de sa fondation



## Conclusion sur la méthode

- ◆ **Lorsque des outils de modélisation numérique plus sophistiqués ne sont pas disponibles:**
  - Les discontinuités et joints du massif peuvent peut-être modélisés de manière simple, en réfléchissant aux phénomènes de rupture les plus probables,
  - L'apport des méthodes empiriques du type Hoek & Brown, pourvu que les résultats soient validés sur la base de l'expérience est généralement positif
- ◆ **Dans le cas présent, des paramètres plus réalistes ont pu être déduits, de manière logique et aisément compréhensible par le Client**



## De telles méthodes sont-elles toujours souhaitables??

- ♦ **Le concepteur doit, dans des cas de plus en plus nombreux, faire avec les données qu'ont lui fournit**
  - Mission et budget sont généralement fixés
  - Obtenir des reconnaissances complémentaires n'est pas aisé
- ♦ **Les outils de modélisation très performants existent, mais les résultats dépendront de la représentativité des données d'entrée**
- ♦ **Dans de tels contextes, des approches plus simples « sur mesure » se sont révélées tout à fait valables**
  - Mais ces approches sont, le plus souvent, basés sur des méthodes empiriques à manier avec précaution, sous la surveillance d'un professionnel expérimenté...



MERCI POUR VOTRE  
ATTENTION!



CO YNE ET BELLIER

Bureau d'Ingénieurs Conseils