





## Avant l'établissement du CFMR

Très nombreux barrages  
construits dès la fin de la guerre

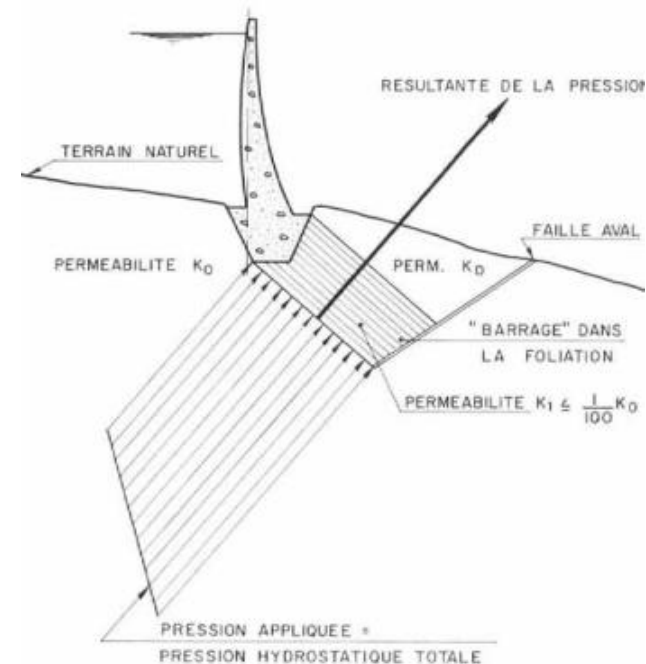
- Aménagement de la Truyère
- Castillon, H=101m, 1948
  - Bétonnage et renforcement par acier de précontrainte, injections
- Bort-les-Orgues, H=119m, 1952
- Tignes, H=180m, 1952,
- etc.
  - La plupart barrages-voûte étudiés par Coyne et Bellier pour EDF

On fait déjà de la mécanique des roches...



## Rôle des sous-pressions dans la stabilité d'une fondation

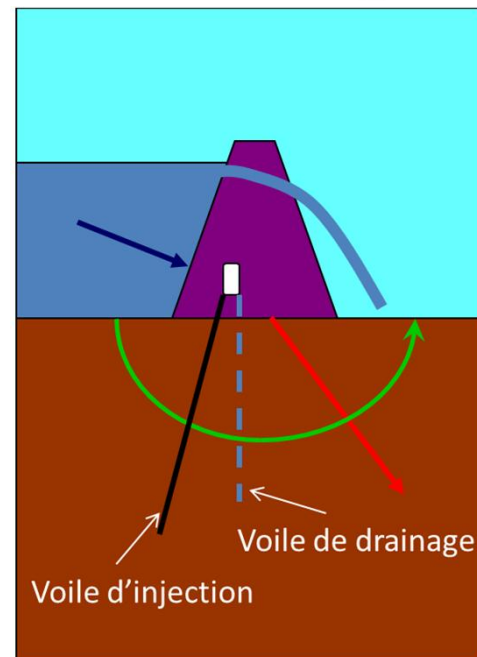
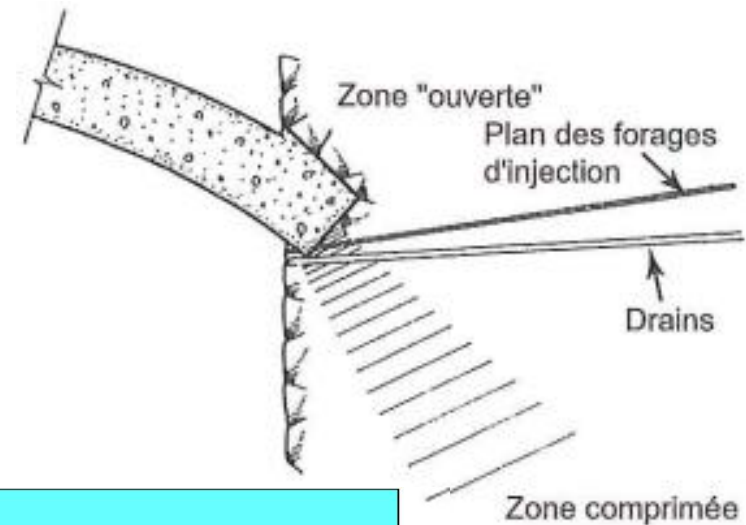
- Catastrophe de Malpasset  
(2 décembre 1959)
  - Impossible de ne pas la rappeler: prise de conscience de l'importance du contrôle des pressions interstitielles (« sous-pressions ») dans la stabilité des fondations
  - Les causes: voir publications de Londe P., Habib P., Duffaut P., Carrère A., etc.
- La fondation est partie intégrante de l'ouvrage
  - Mais l'homme n'en maîtrise pas les propriétés





## Traitement de la fondation, partie intégrante de l'ouvrage

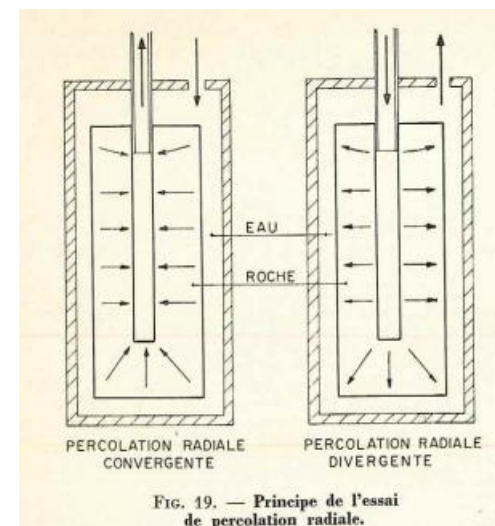
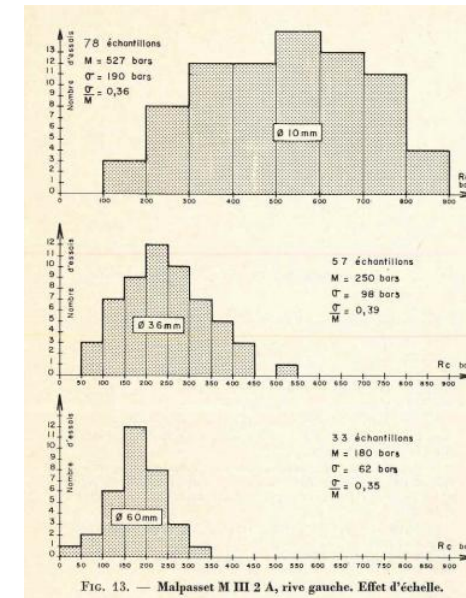
- Le traitement de la fondation doit pouvoir assurer le contrôle de sous-pressions dans la fondation du barrage
- Rideau d'injection amont
  - Etanchéité
- Rideau de drainage aval
  - Limiter les sous-pressions sous l'ouvrage à un niveau acceptable pour sa stabilité
    - Aujourd'hui traitement effectué pour quasiment tout type de barrage



# Progrès effectués dans l'analyse des fondations rocheuses

➤ Avancées considérables suite à la catastrophe de Malpasset

- Mise en évidence du rôle fondamental de l'intensité de fissuration dans « l'effet d'échelle » (Bernaix J., Londe P.)
- Variation de la perméabilité des roches en fonction de l'état de contraintes: perméamètre radial (Habib P.)
- Distribution des contraintes dans le massif (Maury V.)
- « Petite Sismique »: carte d'identité du massif (Schneider B.)



## Les réalisations de la mécanique des roches française

### Le traitement des diaclases de Monteynard

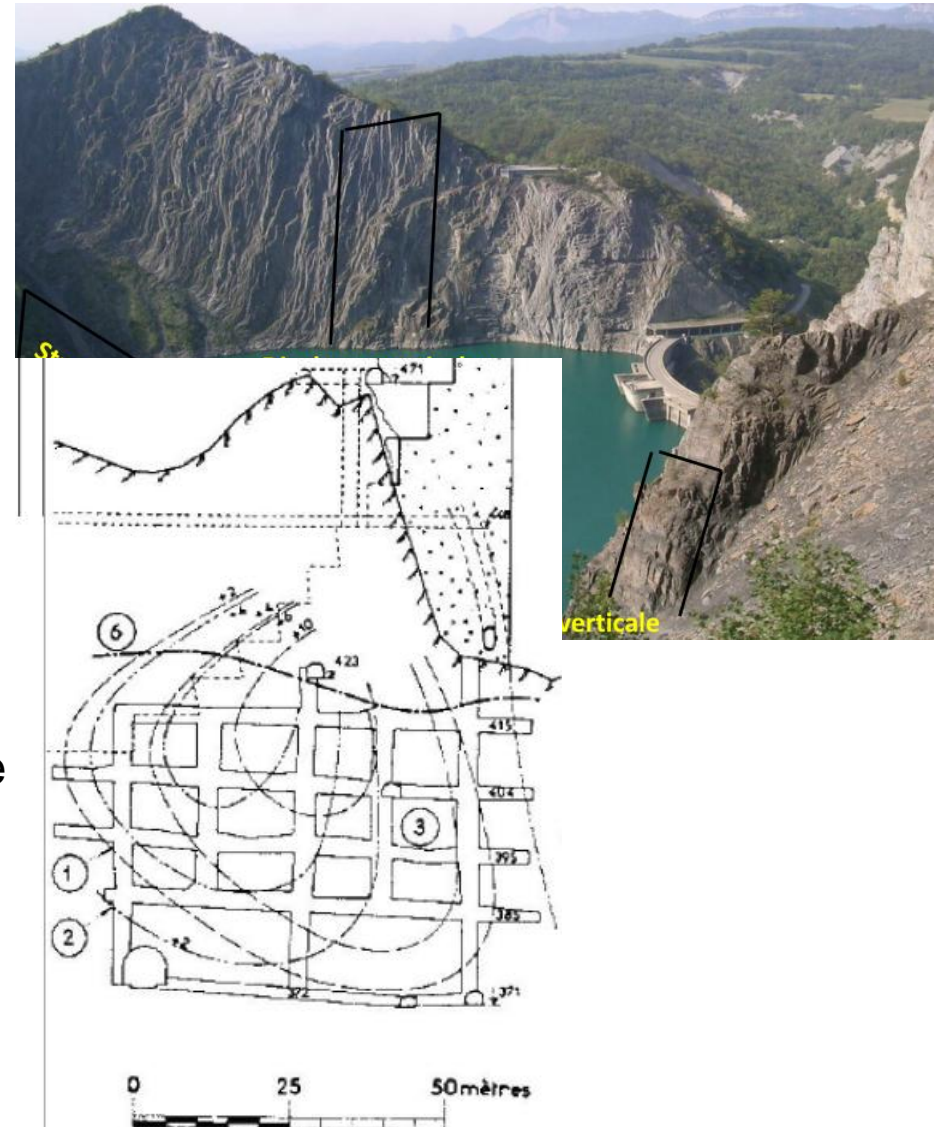
Barrage-voûte de 153m sur le Drac,  
mis en service en 1962

#### ➤ Famille de diaclases verticales amont-aval

- Remplissage de débris rocheux  
dans matrice argileuse
  - Argile rousse plastique pour la  
célèbre « Julie la Rousse »

#### ➤ Traitement par injections en deux phases

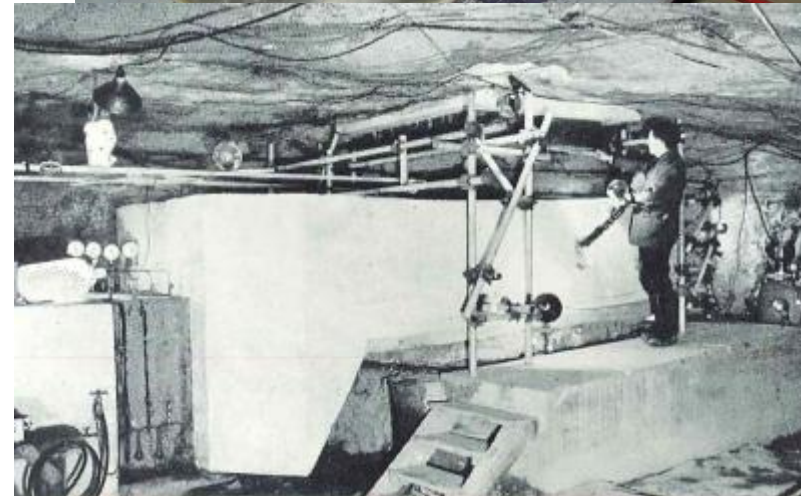
- Pendant la construction, et après le  
clavage de la voûte
- Renforcement par puits et galeries  
verticaux remplis de béton et avec  
injections pour « Julie la Rousse »
- Auscultation durant remplissage





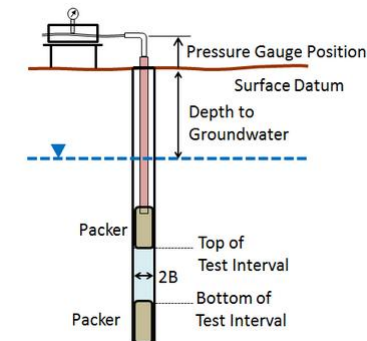
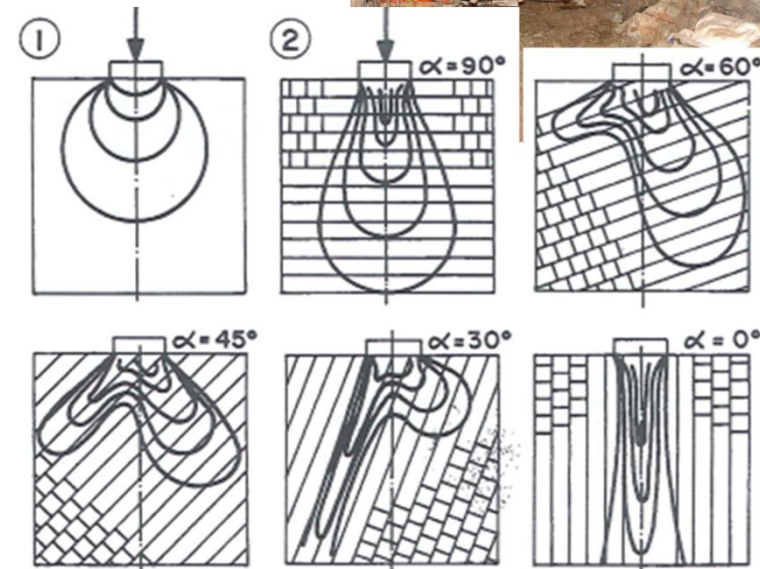
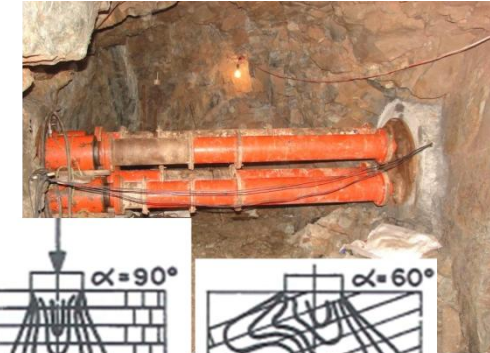
## Les investigations: indispensables pour toute fondation de barrage

- Résistance de la matrice rocheuse
  - Essais de résistance à la compression uniaxiale, essai brésilien de traction, essai triaxial (échantillons secs, et aussi **saturés!**)
  - « Effet d'échelle » inévitable dans le domaine de contrainte des fondations de barrages
- Essais en nombre suffisant!!
- Résistance au cisaillement des discontinuités
  - Essais de cisaillement direct sur discontinuités (sur carottes et in-situ)



## Les investigations indispensables pour les fondations de barrage

- Investigation de la déformabilité du massif de fondation
  - Essais au vérin (ou essais à la plaque)
  - Dilatomètre, pressiomètre
- Investigation de la perméabilité du massif
  - Massifs rocheux fracturés: essais Lugeon
    - Absorption sous 1MPa de pression effective dans la tranche d'essai
    - Valeur de quelques unités-Lugeon pour les grands barrages
- Auscultation du barrage et de sa fondation





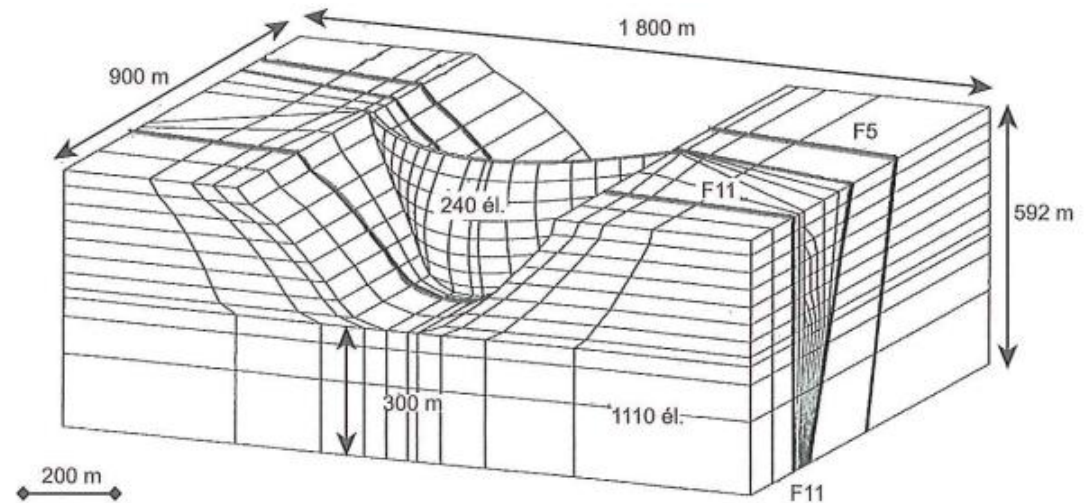
## L'analyse de la fondation: les données d'entrée

### ➤ Progrès impressionnants de la modélisation des massifs rocheux

- Milieu continu équivalent
- Blocs avec interfaces
- Poroplasticité
- etc.

### ➤ Modèles 3D barrage + fondation

- Problématique des données d'entrée des modèles
  - Définition par le « jugement de l'ingénieur »
  - Mais un minimum d'aide au jugement!



Modèle du barrage voûte de XIAOWAN (Chine) et de sa fondation avec 6 748 nœuds et 1 350 éléments isoparamétriques quadratiques

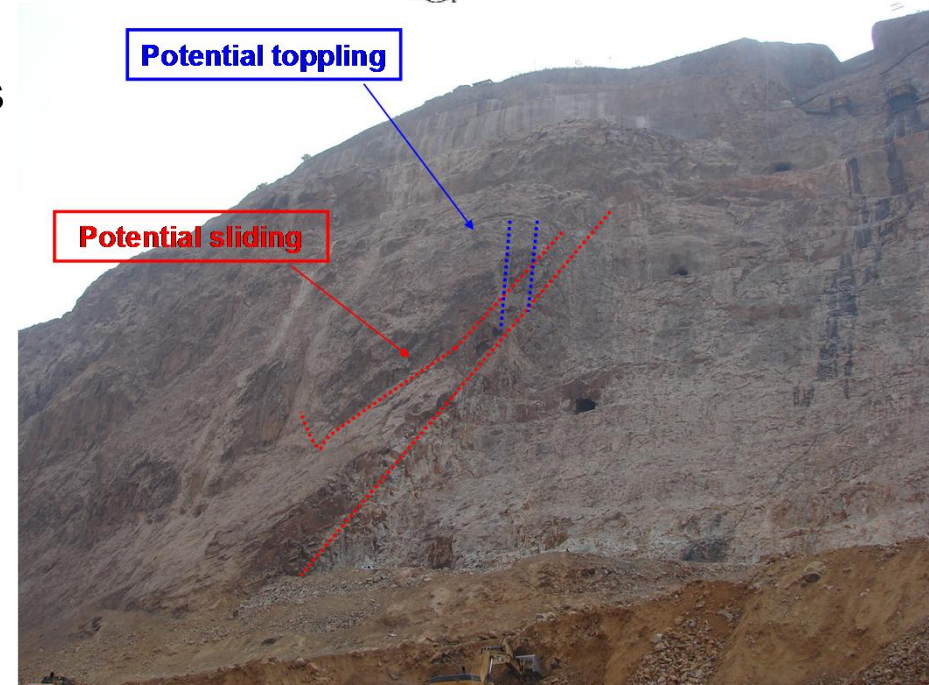
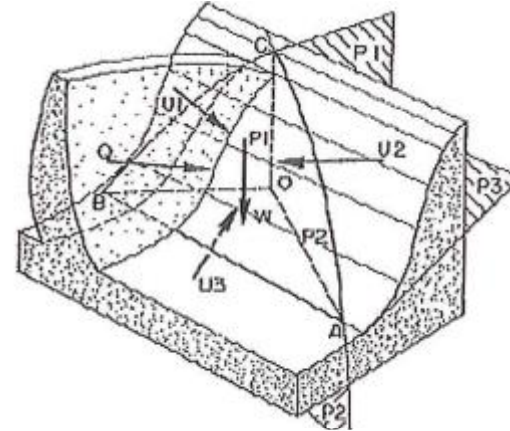
FIG. 11

Modèle de barrage avec fondation et représentation des grandes failles (d'après cours à l'École d'hydraulique de Grenoble, A. Carrère, 1995).  
Dam and foundation model with incorporation of main faults.



## La démarche de conception: améliorations possibles

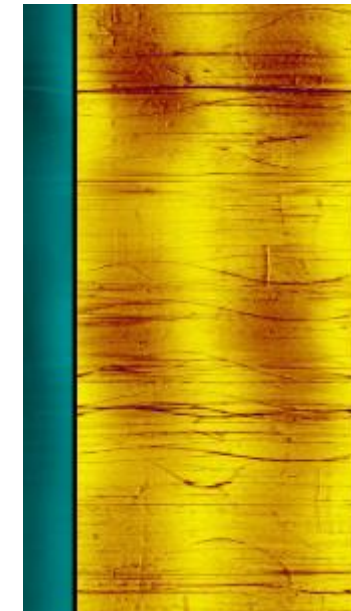
- Détermination des différents modes possibles de rupture d'une fondation
- Réflexion sur les paramètres commandant les ruptures possibles
  - Analyses de sensibilité
    - Variation des différents paramètres d'entrée et coefficients de sécurité partiels
    - Analyse probabiliste
    - Analyses en retour
- Moyens de traitement de la fondation





## Les directions de recherche

- Aide à la détermination des modes possibles de rupture d'une fondation
  - Cartographie précise des discontinuités
  - Géologie structurale, caméra en sondage, etc.
- Résistance au cisaillement des discontinuités à l'échelle de la fondation
  - Etudes de Patton, Bernaix, Barton sur la résistance au cisaillement
  - Dilatance et angle de frottement ultime encore difficile à estimer à partir des essais
- Si discontinuités ondulées, ou se relayant, difficulté d'estimation



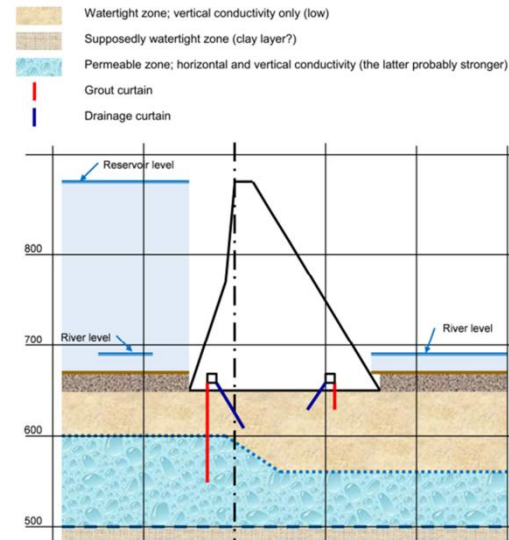


## Les directions de recherche

### ➤ Hydrogéologie

- Reconnaissance des aquifères, karsts ou roches solubles
- Les nouveaux défis des très grands barrages: fortes contraintes in-situ
- Phénomène de décompression des fouilles
- Ecaillage en toit de cavernes

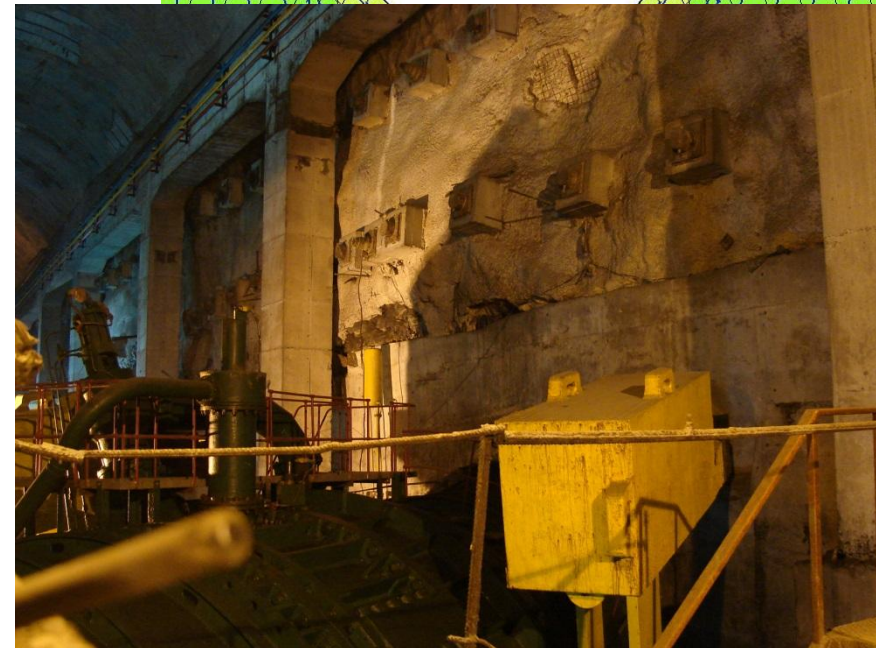
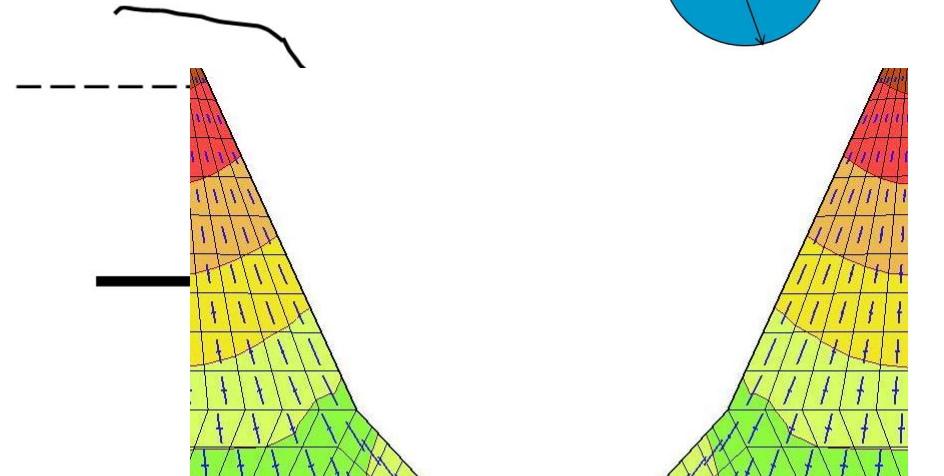
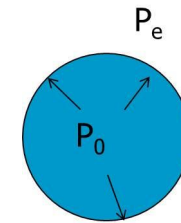
**Non-exhaustif !**



# Galeries hydrauliques et grandes cavernes souterraines

## ➤ Prévention de l'hydrofracturation

- Mesures des contraintes in-situ
  - Règles empiriques de couverture parfois mises en défaut
  - La verticale n'est pas toujours une direction de contrainte principale!
- Grandes cavernes souterraines
  - Difficultés d'application de la méthode observationnelle
  - Déformations en avant du front d'excavation non prises en compte
  - Dépend étroitement de la distance de mise en place des instruments au front





An aerial photograph of the CFMR dam, a large concrete structure with multiple spillways, situated in a deep valley. The reservoir behind the dam is a deep blue color. The surrounding landscape is hilly and covered with sparse vegetation. In the foreground, a muddy brown river flows through the valley. The text "RENDEZ-VOUS EN 2067 POUR LE CENTENAIRE DU CFMR" is overlaid in white at the top of the image.

RENDEZ-VOUS EN 2067 POUR LE  
CENTENAIRE DU CFMR

.....et un nouvel état des lieux!