



# Application des méthodes de conception des galeries hydrauliques

Christophe VIBERT

**TRACTEBEL Engineering**  
**GDF SUEZ**



**COYNE ET BELLIER**

Bureau d'Ingénieurs Conseils

## Plan de l'exposé

- Rappel des objectifs de projet
  - Importance des caractéristiques du massif rocheux
    - Interaction galerie / massif
  - Problèmes spécifiques aux galeries en charge
    - Fracturation hydraulique
    - Contrôle des fuites
    - Stabilité à long terme
    - Considérations environnementales
  - Conclusion sur le projet de galerie en charge
- Alternatives au blindage comme revêtement étanche?

# Objectifs de projet

- Objectifs de performance

- Tunnels de transfert (alimentation en eau, irrigation)

  - Transfert d'un débit requis, si possible régularisé

- Galeries en charge pour usines hydroélectriques

  - Stabilité à long terme requise sous très fortes charges, pour production d'énergie

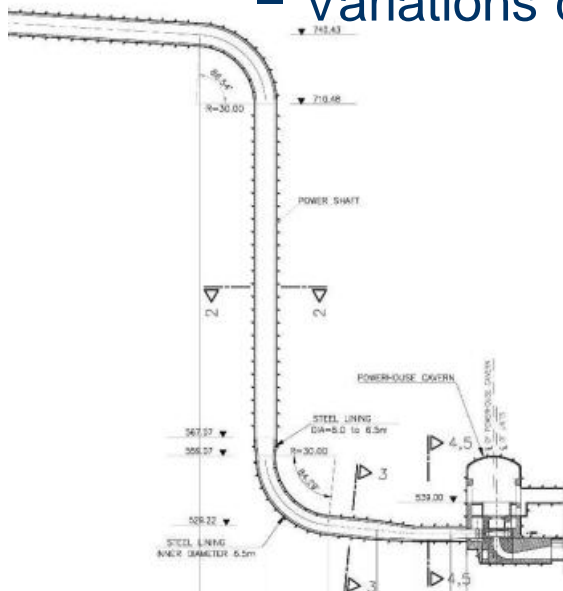
## **Demande en énergie renouvelable en croissance constante dans le monde**

- Projets de plus en plus audacieux (fortes charges, massifs rocheux de caractéristiques peu favorables)

(Chine, Inde, Pakistan, Iran, pays andins, etc..)

# Objectifs de projet

- Aménagements hydroélectriques
  - Les nécessités de l'exploitation incluent des variations brusques de pression dans les galeries (fermeture rapide du circuit, coup de bélier, inversion des turbines-pompes)
    - Pression statique, en opération normale
    - Variations dynamiques de pression; conditions transitoires



# Objectifs de projet

## La plupart du temps

- Coût minimum des travaux
- Mise en service aussi rapide que possible
- Garantie de performance à long terme
  - Souvent plus de 100 ans
  - Toute interruption de la production signifie manque à gagner pour le Client, pour des montants souvent considérables

Les considérations qui suivent se basent sur l'expérience de plusieurs projets dans différentes régions du monde

## Connaissance du massif rocheux

- Nécessaire pour la conception de l'excavation

Le projet, pour ce qui est de l'excavation, est pour l'essentiel, similaire à l'excavation d'un tunnel en général

- Le plus souvent tunnels profonds et puits
  - La pression interne peut atteindre 10 MPa ou plus sur certains projets



## Connaissance du massif rocheux

### Excavation

- La plupart des difficultés majeures sont celles rencontrées pour les tunnels profonds:
  - Venues d'eau sous très forte pression
  - Convergences excessives
  - Ecaillage et rockbursts
  - Gaz et température



## Connaissance du massif rocheux

- Ne sont considérées dans la suite que les problématiques spécifiques aux galeries hydrauliques en charge





Absence de revêtement étanche

Conséquences du remplissage d'une galerie hydraulique sur le massif rocheux

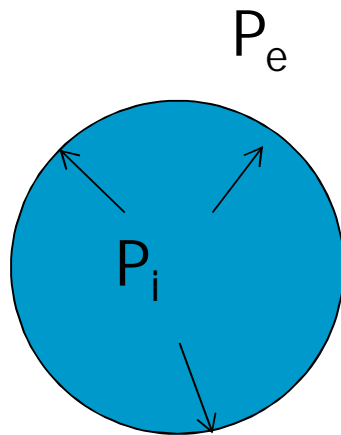
– Pression d'eau  $P_e$  à l'extérieur de la galerie ( $P_e < P_i$ )

– Galerie non revêtue

– La pression d'eau extérieure croît jusqu'à s'équilibrer avec celle de la galerie  $P_e = P_i$

– Revêtement de béton non armé

– Doit être considéré comme perméable (formation de fissures longitudinales);  $P_e \approx P_i$  à plus ou moins long terme après le remplissage

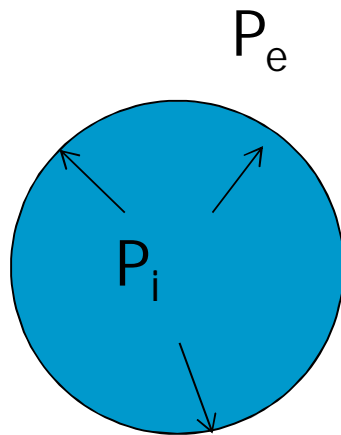


Absence de revêtement étanche

Conséquences du remplissage d'une galerie hydraulique sur le massif rocheux

— Revêtement de béton armé

- Distribue les fissures du revêtement et diminue leur largeur:  $P_e < P_i$  (pertes de charges à travers le revêtement)



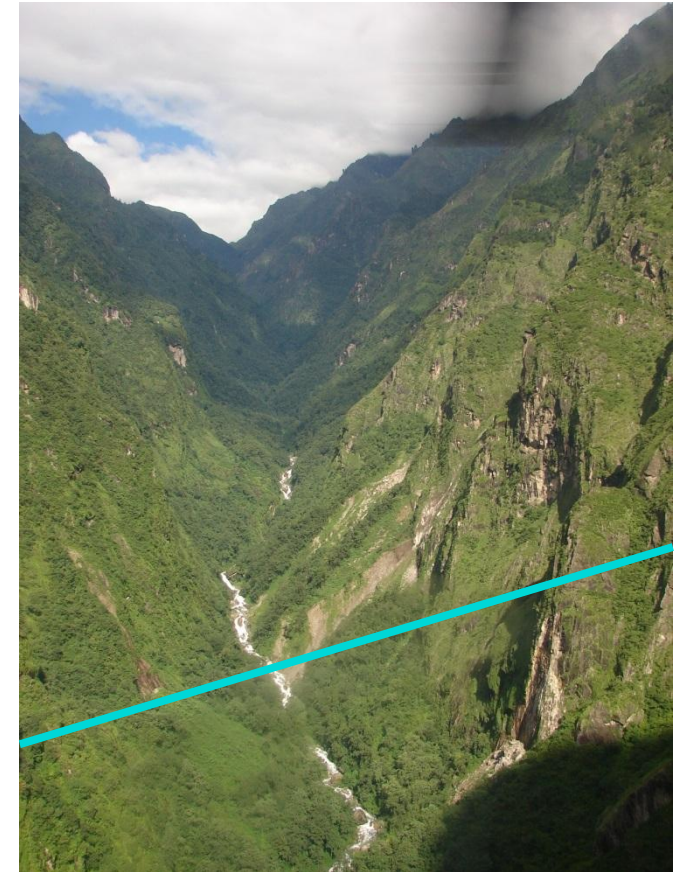
Dans tous les cas:

Si la pression extérieure  $P_e$  dépasse la valeur de la contrainte principale mineure dans le massif, il y a risque de fracturation hydraulique (ou « claquage »)

## Problèmes spécifiques (1)

- Risque de fracturation hydraulique (« claquage »)
  - Ouverture de fissures pré-existantes
    - Fait référence à l'ouverture et à la propagation de fissures pré-existantes sous l'effet de la pression d'eau (hydrojacking)
  - Création de nouvelles fractures
    - Lorsque de nouvelles fractures sont générées sous l'effet des contraintes de traction générées par la pression d'eau (hydrofracturing)

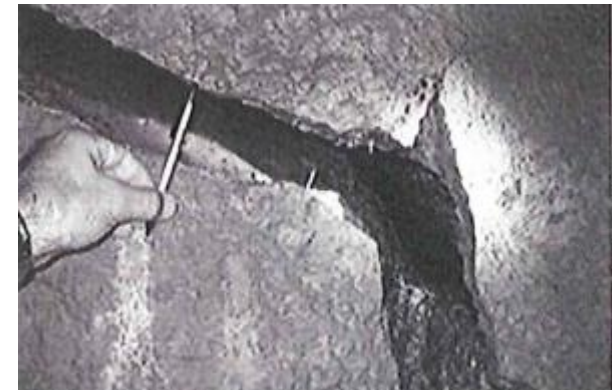
- Risque de fracturation hydraulique
  - Peut survenir partout où la pression générée par le remplissage d'une galerie en charge excède la contrainte principale mineure du champ des contraintes
    - Donc d'abord partout où la couverture rocheuse décroît (abords d'un versant, proximité ou passage sous une vallée, extrémité des conduites, etc.)



# Fracturation hydraulique

- L'écoulement d'eau sous pression ouvre les fissures du le massif rocheux
  - Fuites très importantes et saturation du massif par ouverture / propagation des fissures
    - Peut provoquer des instabilités de pente (glissements de terrain, coulée de débris, etc.)
    - Impacte directement la production d'énergie
    - Production stoppée pour réparations
      - Lourdes pertes financières
- Des accidents ont eu lieu..  
....et ont toujours lieu!

Photo: M.A. Kanji



# Prévention de la fracturation hydraulique



## Revêtement étanche

- Blindage acier
  - Malgré son coût élevé, préféré dans la plupart des cas
- Membranes étanches ou autres alternatives?

Revêtement dimensionné pour résister à la totalité de la pression interne, avec ou sans participation du massif rocheux

# Prévention de la fracturation hydraulique

En absence de revêtement étanche....

- Vérification de l'état des contraintes in-situ
  - Pour la prévention de la fracturation hydraulique, la contrainte principale mineure doit être partout supérieure à la pression d'eau dans le tunnel
    - Pour toutes les conditions de fonctionnement de l'aménagement (normales, transitoires)

## Règles empiriques

- Estimation du champ de contraintes naturelles
    - A partir de la topographie
      - Sélection d'un tracé tel que la couverture rocheuse au-dessus du tunnel garantit des contraintes suffisantes
- Ce qui n'est plus possible à proximité des pentes ou des usines hydroélectriques, ou sous les tronçons de faible couverture
- Il faudra identifier, puis déterminer la longueur des sections à étancher pour éviter le risque de fracturation hydraulique



# Règles empiriques

## – Principales règles empiriques

- Règles dite « norvégiennes » (1971 et ensuite)
  - Fruit de l'expérience norvégienne; coefficients de sécurité à choisir
- Critère de Don Deere (1983)
  - Provenant de l'analyse en retour de cas de fracturation hydraulique observés en particulier dans des chaînes de montagne actives (Andes, etc.)
- Autres (Snowy Mountains, etc.)

## Règles empiriques

- Règle dite « norvégienne »

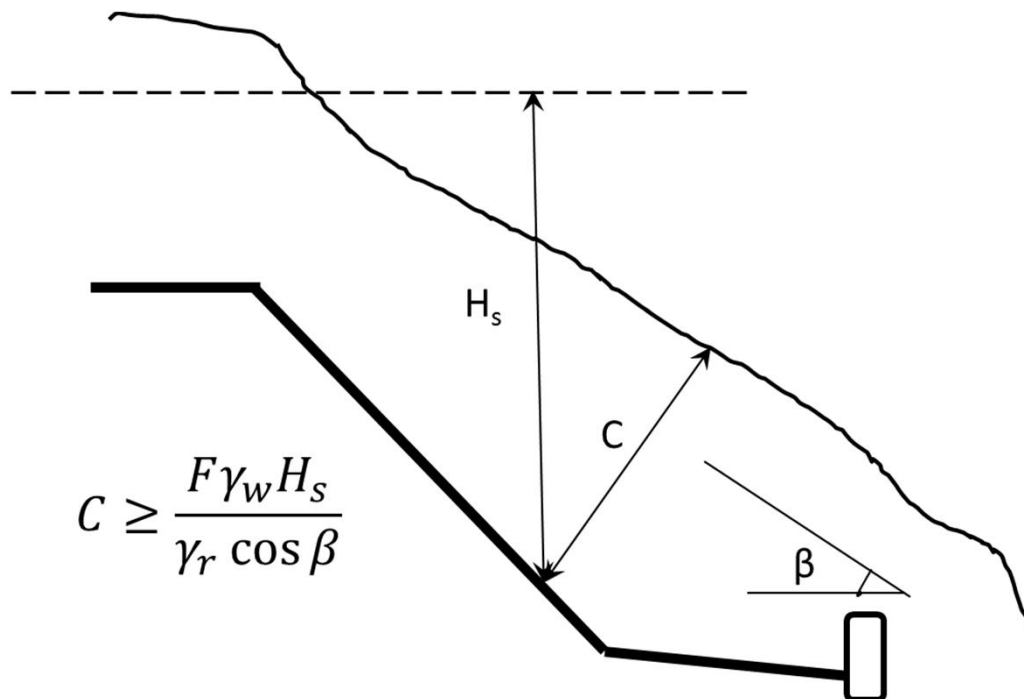
- Expérience norvégienne

- Coefficient de sécurité F

En général:

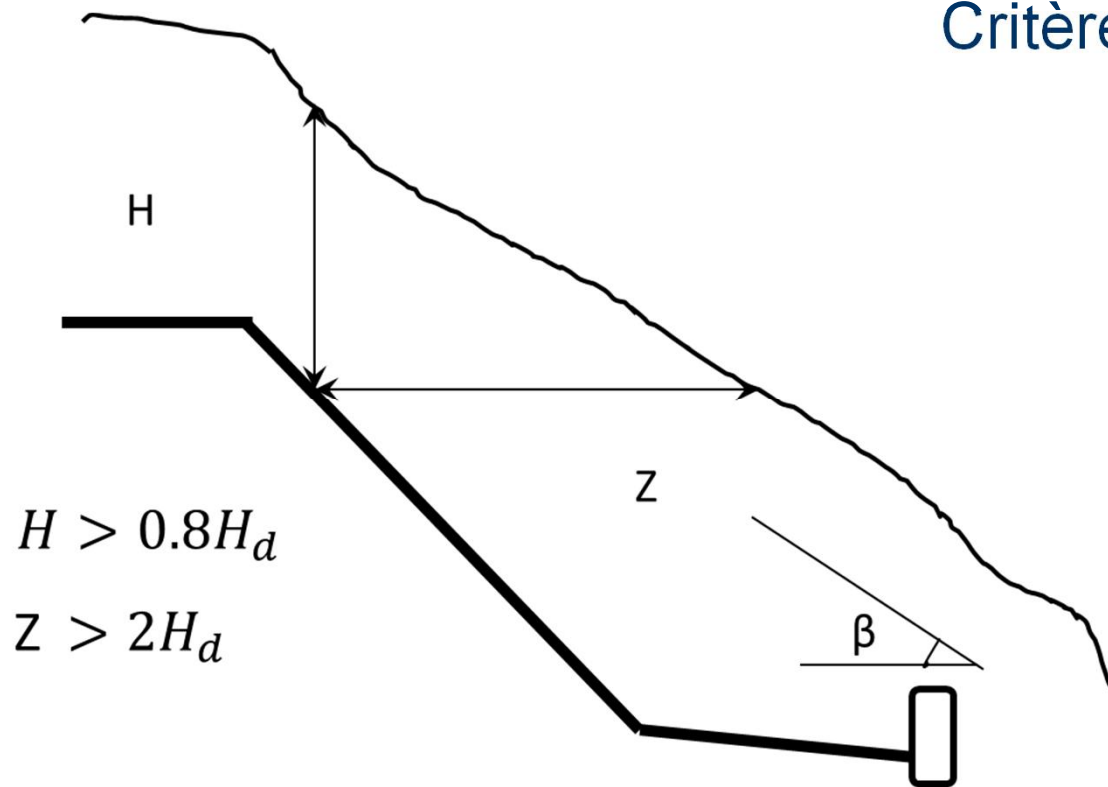
- F=1.3 pour la pression normale de fonctionnement

- F=1.1 pour les conditions transitoires



## Règles empiriques

- Le critère de couverture de Don Deere

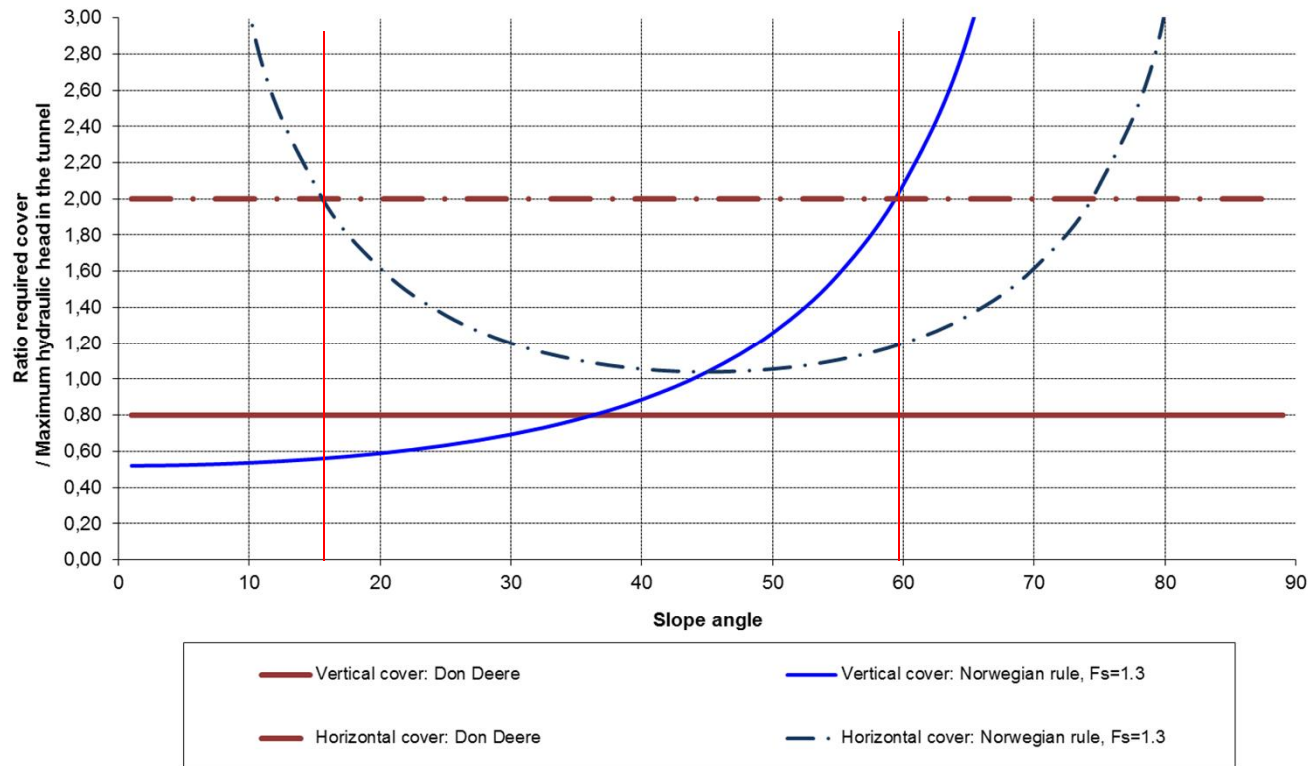


### Critère de Don Deere

- Retour d'expérience de fracturation hydraulique dans chaîne de montagnes actives
- $H_d$  pression d'eau maximale dans le tunnel

# Règles empiriques

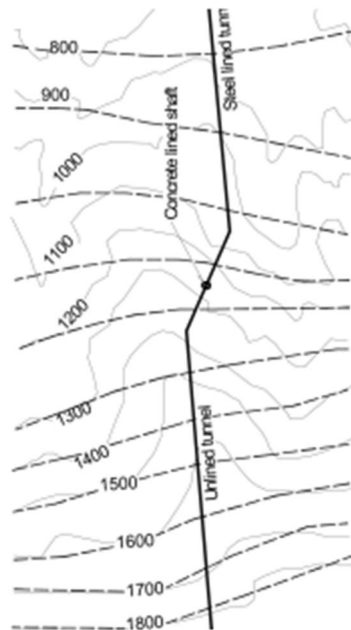
Comparison of different rules for cover of hydraulic tunnels



Critère de Don Deere plus exigeant dans la gamme habituelle d'angle d'inclinaison des pentes

# Application des règles empiriques

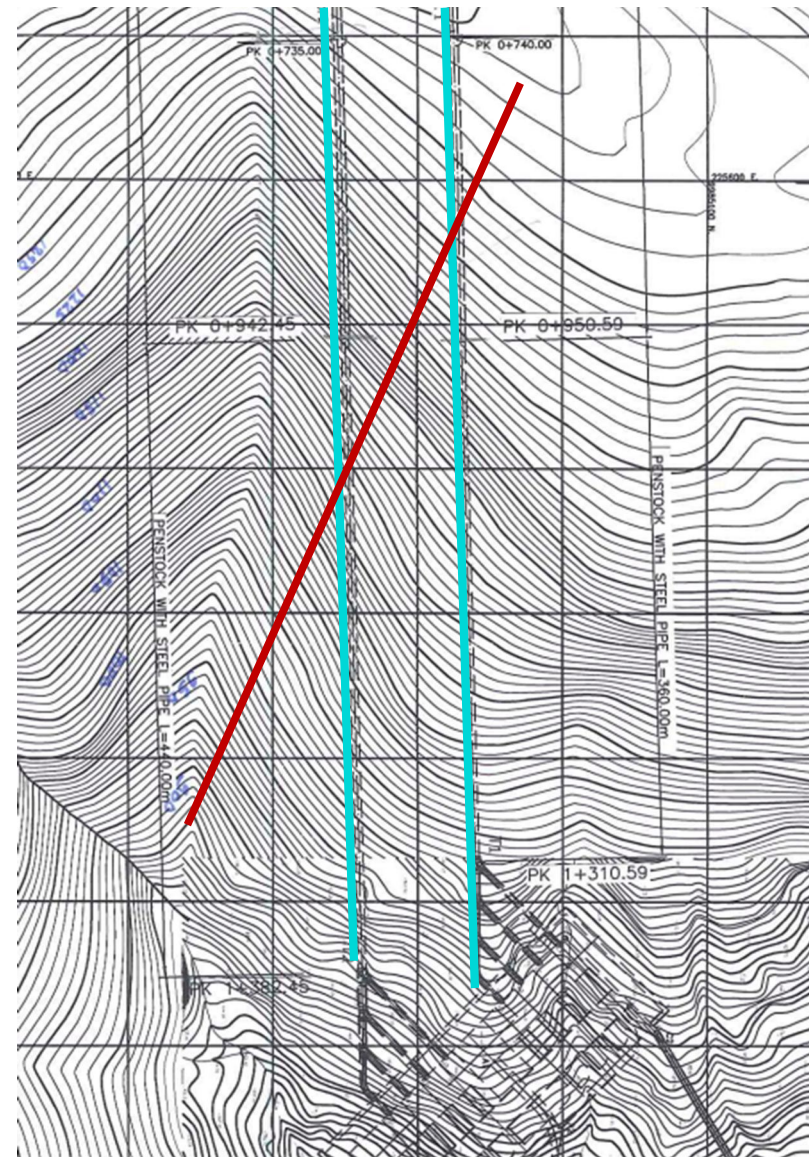
- Profil 2D: Conditions d'application correctes



- Lissage de la topographie

- Eliminer les parties d'évidence décomprimées, qui ne participent pas au confinement, tels que crêtes, éperons et promontoires,
- Colluvions et alluvions ne doivent généralement pas être pris en compte, tout spécialement s'ils peuvent être affectés par des instabilités
- Une attitude défavorable des joints peut amener à accroître les coefficients de sécurité requis

- Les règles empiriques considèrent des sections 2D: elles doivent être vérifiées dans toutes les directions autour du point considéré
  - Sélection des profils 2D les plus défavorables pour l'application des règles (et non seulement suivant le profil en long du tunnel!)



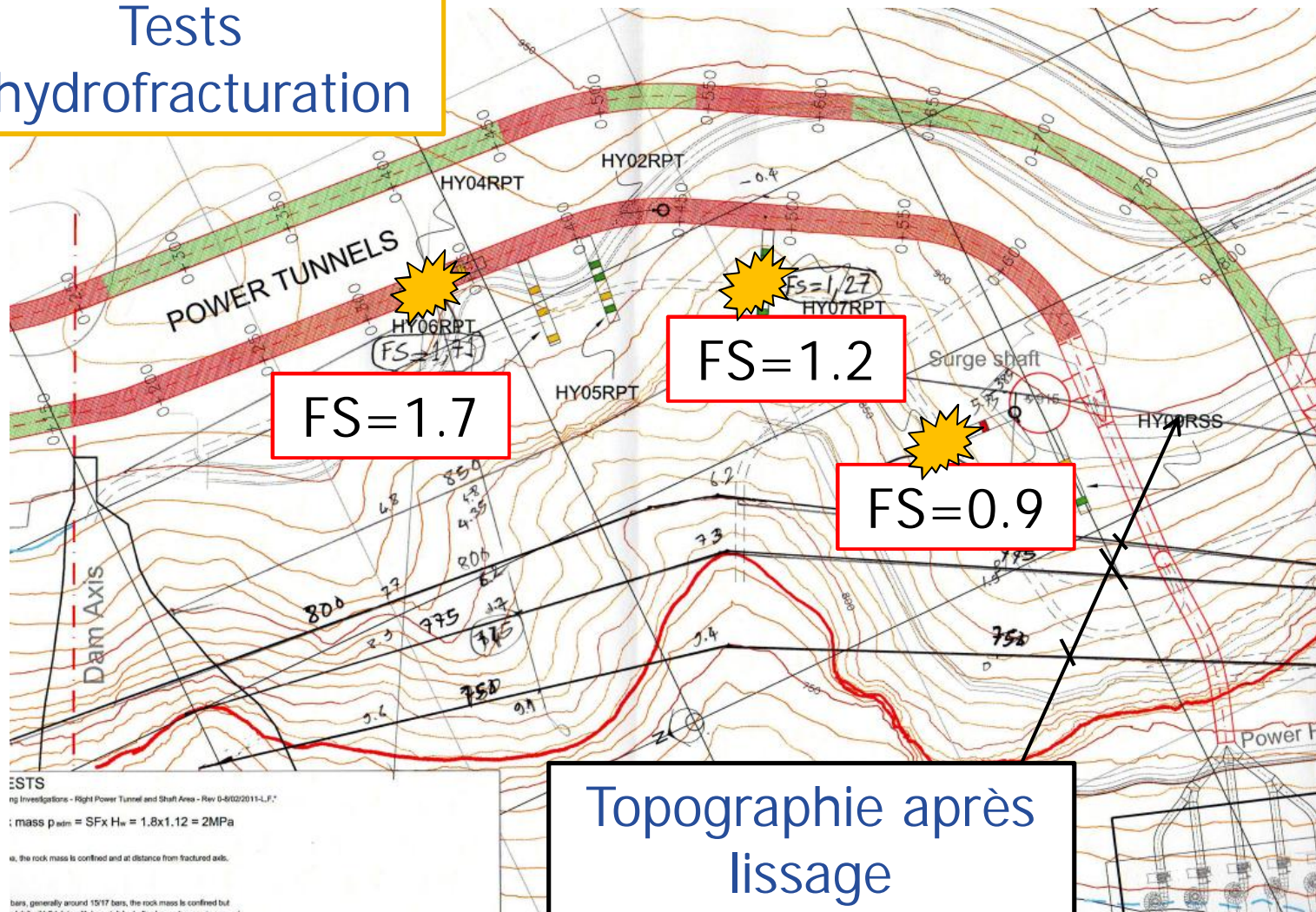
## Exemple d'application



Galeries  
en  
charge  
très  
proches  
du  
versant

# Exemple d'application

Tests  
d'hydrofracturation







Raison probable:

- Présence de joints subverticaux persistants, pendage vers la rivière



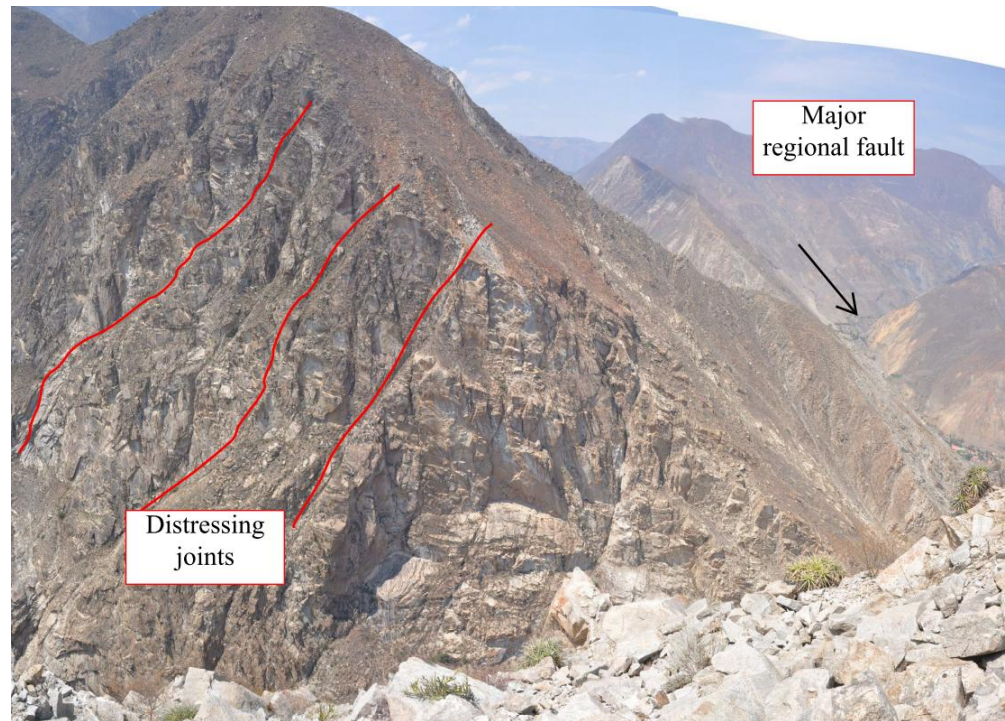
## Utilisation des règles empiriques

- Les conditions d'application doivent être correctes
- Critère dit « norvégien »:
  - Les coefficients de sécurité « habituels » de 1.3 et 1.1 peuvent se révéler insuffisants en cas de conditions géotechniques défavorables
  - Les coefficients de sécurité devront alors être augmentés

# Utilisation des règles empiriques

- Critère de Don Deere

Prudent, mais en général recommandé pour les zones tectoniquement actives, dans la plupart des massifs rocheux

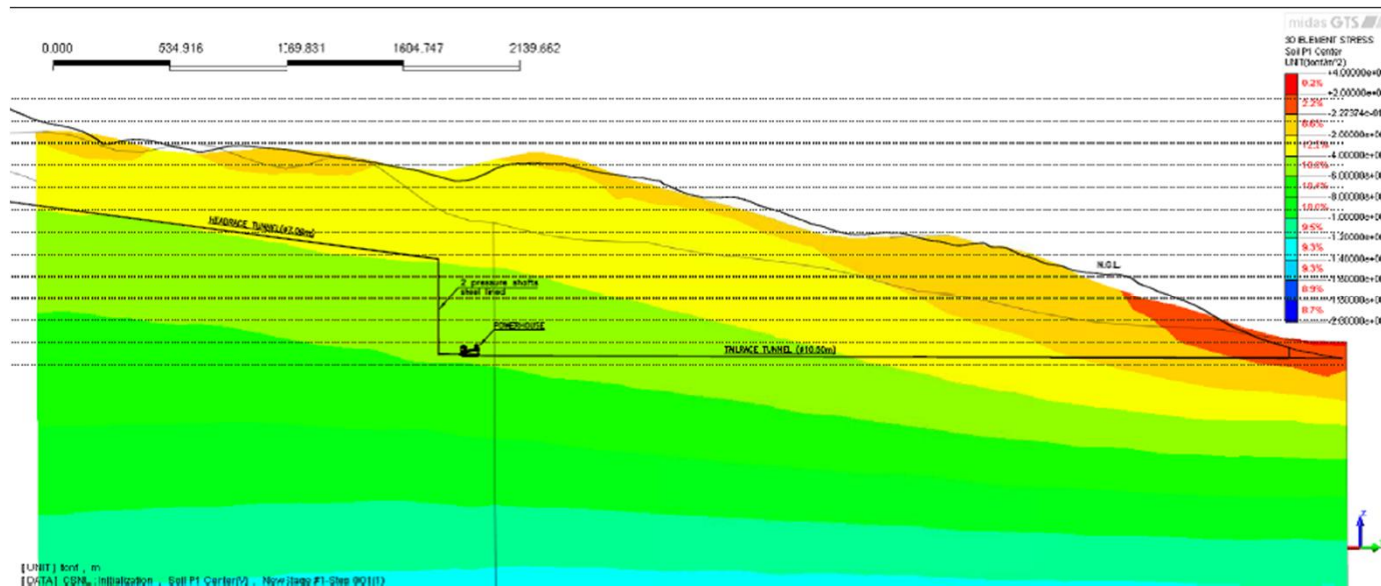


## Modélisation numérique des contraintes

Pour l'estimation des contraintes in-situ

### —Modélisation 2D

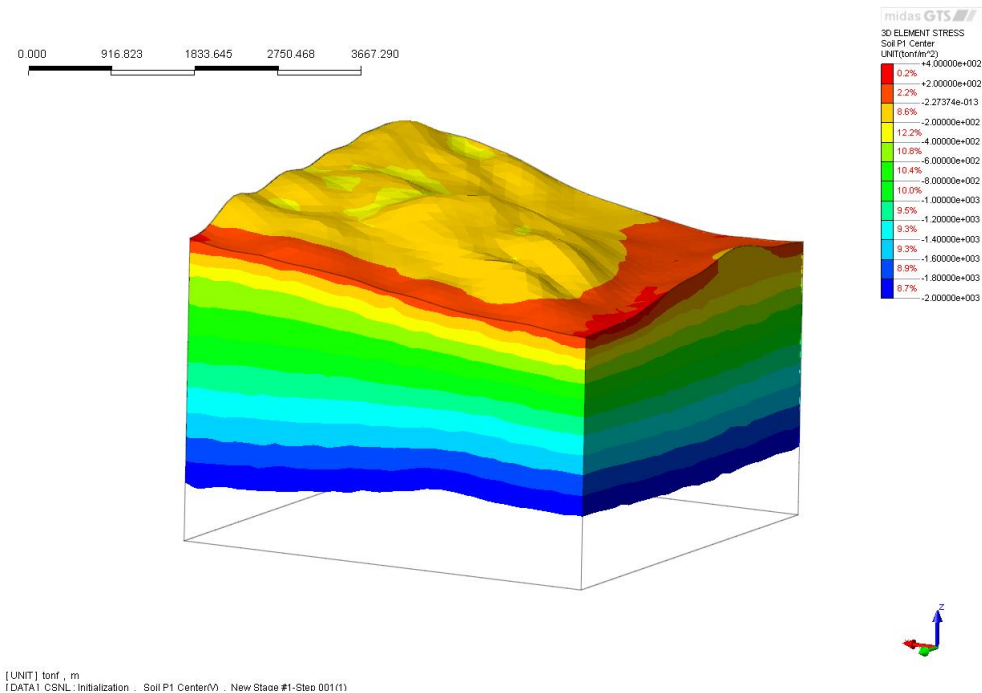
- Les mêmes précautions que pour les règles empiriques sont à appliquer quant au choix des profils 2D représentatifs



# Modélisation numérique des contraintes

## —Modélisation 3D

- Permet généralement une évaluation relativement fiable de la valeur des contraintes in-situ
  - Pourvu que les particularités géologiques pouvant influencer le champ de contraintes sont incluses dans le modèle

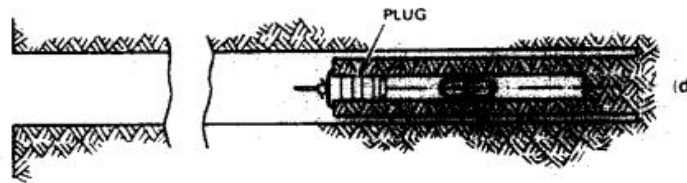


Différentes méthodes d'initialisation des contraintes

# Mesure des contraintes in-situ

– Pour l'estimation du risque de fracturation hydraulique

- Techniques de surcarottage
  - Généralement, non compatibles avec le degré de précision requis
    - Dispersion des résultats



## Mesure des contraintes in-situ

- Tests de « claquage » ou fracturation hydraulique en sondages

- Sondages forés dans les trois directions de l'espace

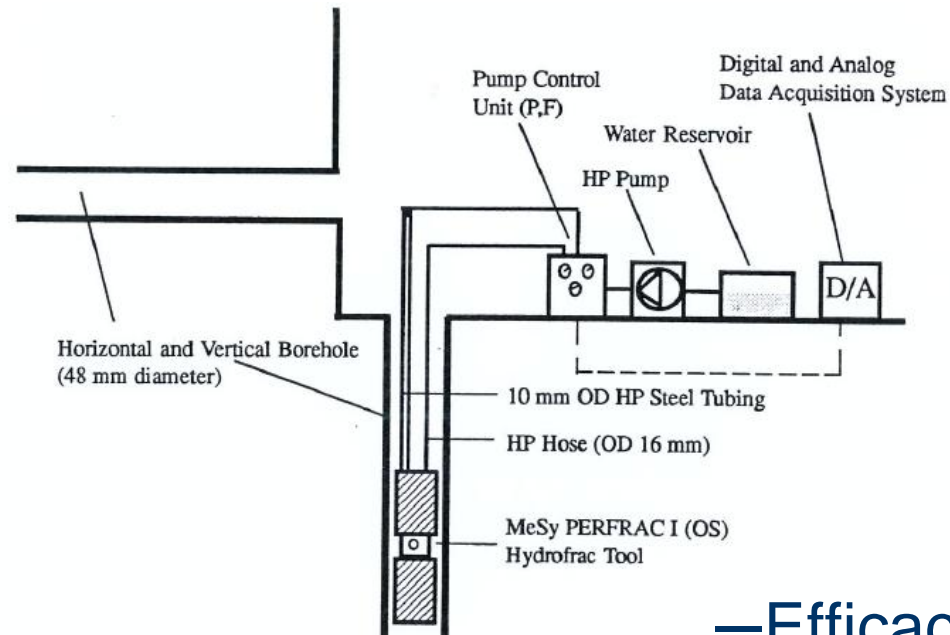
Sélection des directions de forages en fonction des caractéristiques géotechniques (géologie, attitude des discontinuités, etc.)

- Soit estimation « directe » de la contrainte s'exerçant sur une direction de fracture donnée (méthode HTPF ou création de fracture)

- Evaluation des directions et de la valeur des contraintes principales

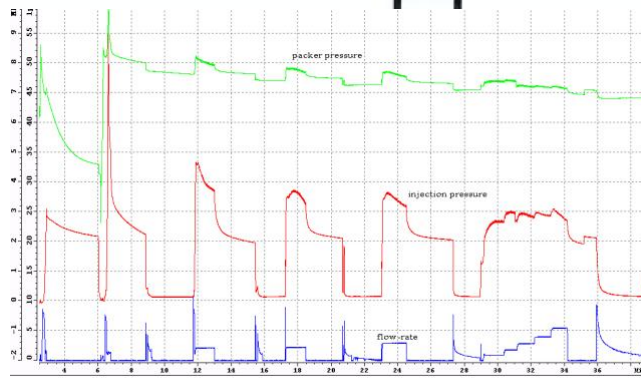
- Soit essais de « claquage » du massif rocheux

# Tests de fracturation hydraulique



— Efficaces, si bien réalisés

- Détermination de la pression de fermeture (shut-in pressure)
- Ces mesures permettent de vérifier et d'ajuster les hypothèses (méthodes empiriques, modélisation numérique)



P-Test Frac 1. Refrac 2. Refrac 3. Refrac Step-Rate Test

VIBERT Christophe – 20 mars 2014 - CFMR-AFTES



## Problèmes spécifiques (2)

- Contrôle des fuites
  - Fuites excessives = moins d'énergie produite = pertes financières
  - Le projet doit permettre de contrôler la distribution des pressions d'eau dans le massif



Degré de nécessité également suivant conditions de site (couches imperméables, risques de glissements de terrains, etc...)

# Contrôle des fuites

## Données d'entrée nécessaires

- Conditions hydrogéologiques du site
  - Reconnaissance des différents aquifères
    - Pas de fuites à craindre si le niveau de la nappe souterraine après construction est tel que la pression d'eau autour du tunnel est toujours supérieure à la pression interne
    - Identification des tronçons où des fuites peuvent survenir
- Conductivités hydrauliques des massifs rocheux impactés par l'ouvrage

# Contrôle des fuites

## Conception des galeries en charge pour le contrôle des fuites

- Béton non armé: inefficace
  - Se déforme sous l'effet de la pression interne et des variations de pressions: fissures longitudinales souvent concentrées
  - Le revêtement de béton non armé doit être considéré comme totalement perméable
- Revêtement de béton armé
  - Largeur des fissures réduite (les armatures limitent la déformation et « distribuent » les déformations)
- Injections d'étanchéité autour du tunnel

## Contrôle des fuites

- L'efficacité des injections d'étanchéité dépend directement du rapport entre conductivités hydrauliques du massif non injecté et du massif injecté

$q_r$ : débit de fuite avec zone injectée de rayon extérieur  $c$

$Q$ : débit de fuite sans injection

$$\frac{q_r}{q} = 1 + \left( \frac{K}{k} - 1 \right) \frac{\ln\left(\frac{c}{a}\right)}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)}$$

L'injection ne sera réellement efficace que dans les zones de forte perméabilité

## Stabilité à long terme

Le tunnel doit rester stable et opérationnel durant toute la durée de vie de l'aménagement

- Situations les plus critiques
  - Remplissage et vidange
  - Variations rapides de pression durant les phénomènes transitoires (contraintes d'exploitation)

## Données nécessaires

- Etudier en particulier, en plus des caractéristiques « courantes » pour garantie de stabilité
  - L'érodibilité du massif, des remplissages de joints, zones de cisaillement, etc.
  - Minéralogie, caractère gonflant ou perte de résistance avec saturation de la roche

## Stabilité à long terme

- Galeries en charge non revêtues
  - Solution attractive
    - Le massif rocheux doit obligatoirement satisfaire à un certain nombre de conditions
      - Rocher dur et massif
      - Faible degré de fracturation
      - Absence de matériel érodable dans les joints
        - Les zones de faille individuelles sont alors à traiter par excavation et bétonnage / ancrages / injections de consolidation
- Revêtement de béton projeté (est souvent supposé perméable à long terme: fissuration excessive sous fortes charges)

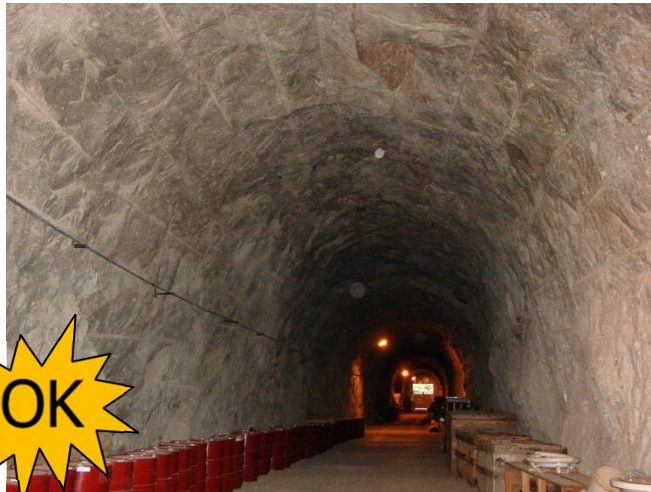
## Galeries non revêtues?

La réalisation de galeries ou puits en charge non revêtus exige du massif rocheux un nombre limité de failles ou caractéristiques géotechniques défavorables sur tout leur tracé

- Fréquence et caractéristiques des discontinuités

La caractérisation des unités est essentielle

- Rocher massif et compact, fracturation limitée ou cimentée (granites, gneiss,...)



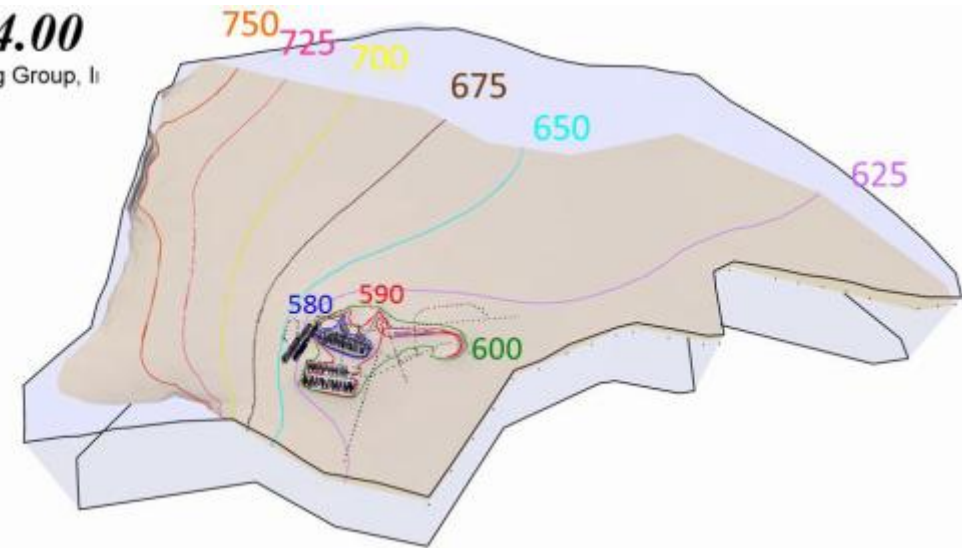
# Considérations environnementales

• Souci de maintenir ou de restaurer le niveau des nappes souterraines

- Durant la construction
- Pendant l'exploitation

Exigences amenées à être de plus en plus strictes

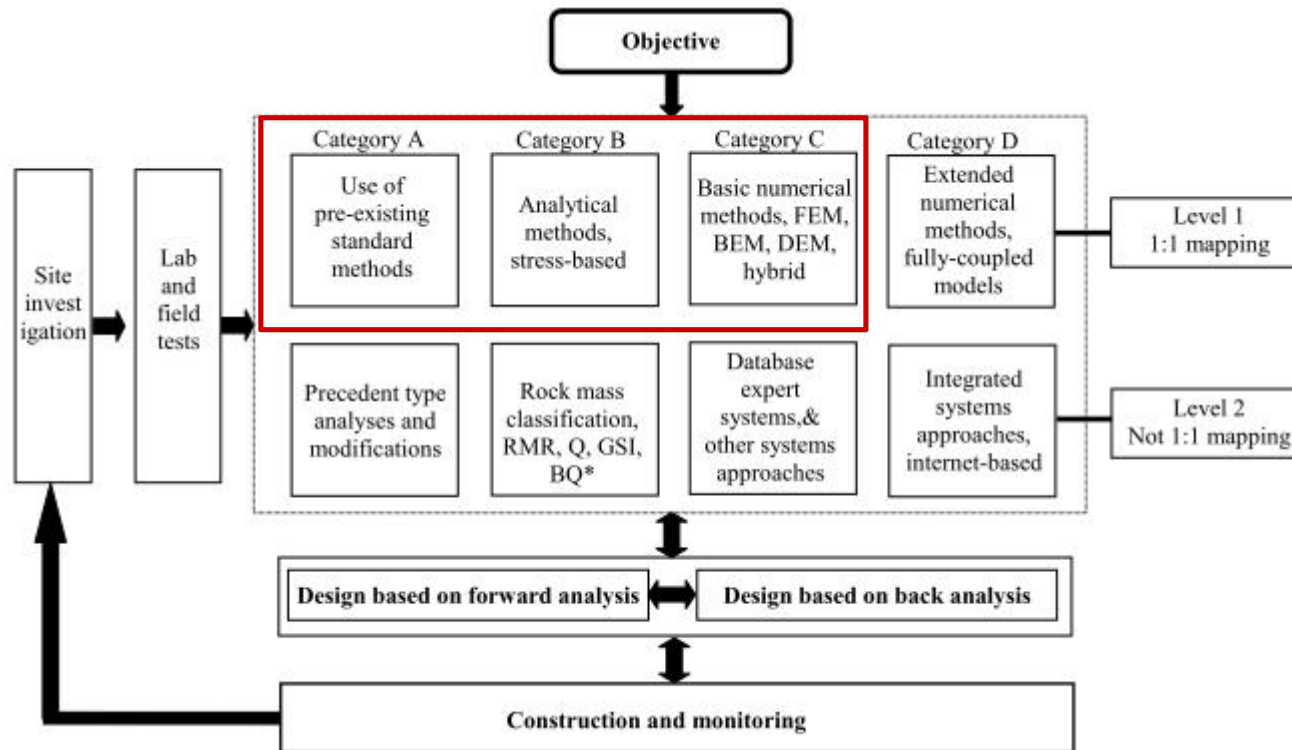
3D 4.00  
onsulting Group, li



La réalisation de modèles hydrogéologiques 3D correctement calibrés est recommandée



# Organigramme méthodologie de projet

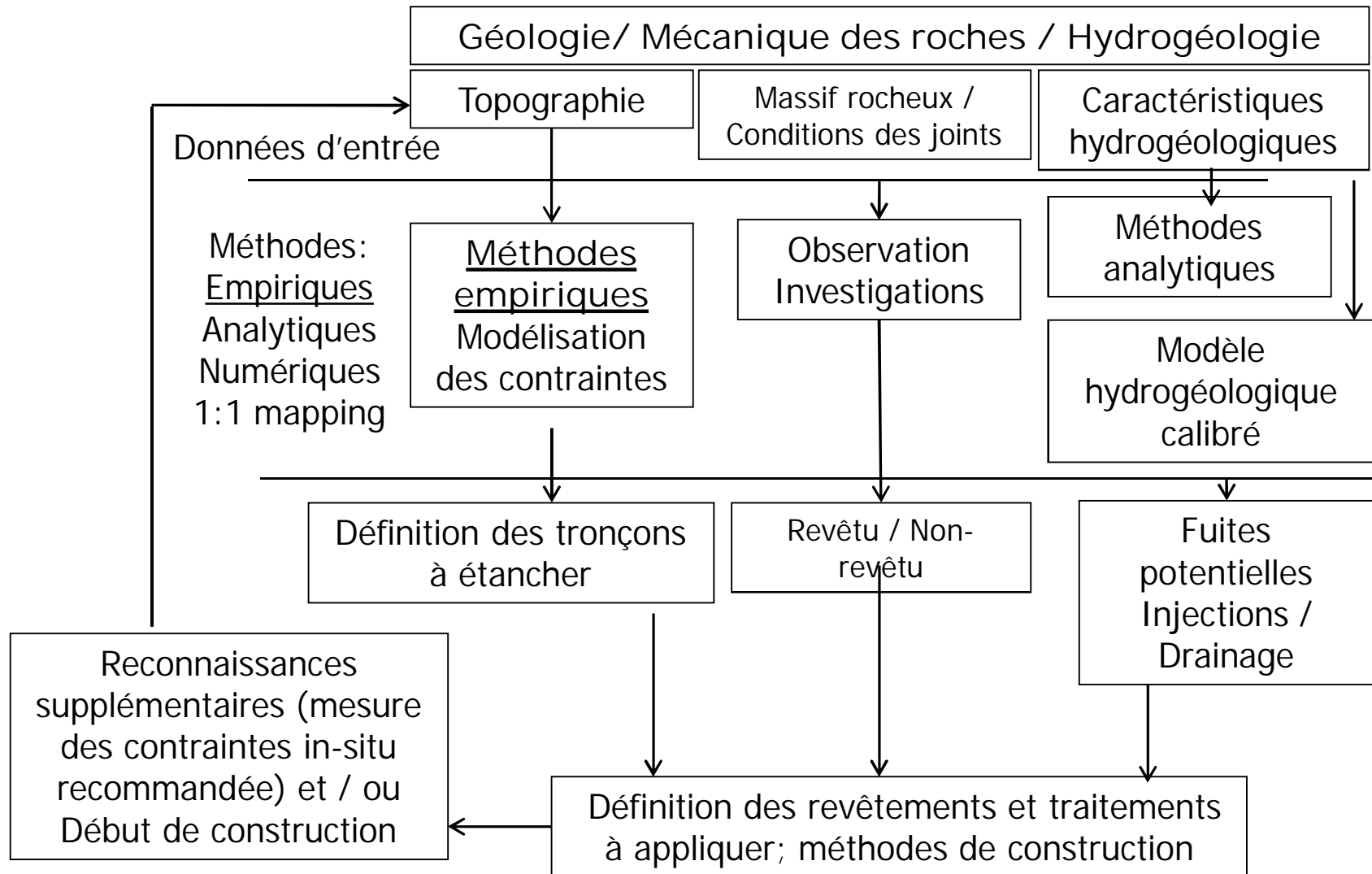


Hudson & Feng, 2010

On préférera le niveau "1:1 mapping"

Investigations géologiques/géotechniques  
détaillées requises

# Suggestion d'approche pour la conception



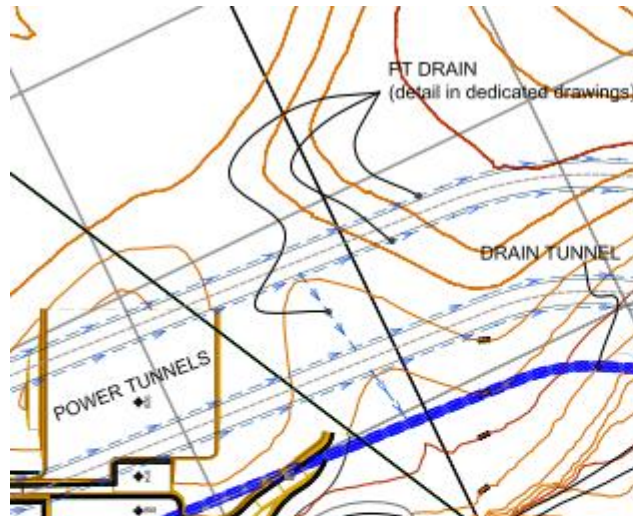
## Pourquoi recommander les méthodes empiriques en avant-projet?

→ Parce qu'elles exigent de réfléchir sur la topographie, la géométrie, et les contraintes naturelles en relation avec la géologie et la mécanique des roches, l'utilisation de ces méthodes reste précieuse pour juger de la pertinence des modèles numériques et des mesures de contrainte à effectuer dans les stades ultérieurs du projet

## Alternative fiable au blindage?

- Différents types de membranes étanches (PVC ou autres) existent
  - Retour d'expérience encore insuffisant
  - Souvent pas plus de 100m de charge (1 MPa)
  - Exemples de membrane projetée (Machadinho, Brésil, 1,2MPa de pression interne, 120 m de charge)
- Béton armé?
  - La largeur des fissures ne devrait alors jamais dépasser, pendant toute la vie de l'ouvrage, 0,1 à 0,3mm (ou moins, suivant pression)

# Béton armé + drainage



## Alternative fiable au blindage?

- Béton précontraint
  - Peu d'expériences sous fortes charges
  - Problème de la pérennité de la précontrainte
- Revêtement de béton précontraint par injections à haute pression à l'extrados
  - Plusieurs exemples en Autriche,
  - Tunnel de Niagara Falls (environ 1 MPa de pression interne)

**La pérennité de la précontrainte est étroitement liée aux caractéristiques de déformation et de fluage à long terme du massif**



En vous remerciant pour  
votre attention