

## Journée Technique Galeries en charge

Paris - Juin 2024

Caractérisation géologique/géomécanique des galeries en charge

J Perello



# Plan de l'exposé

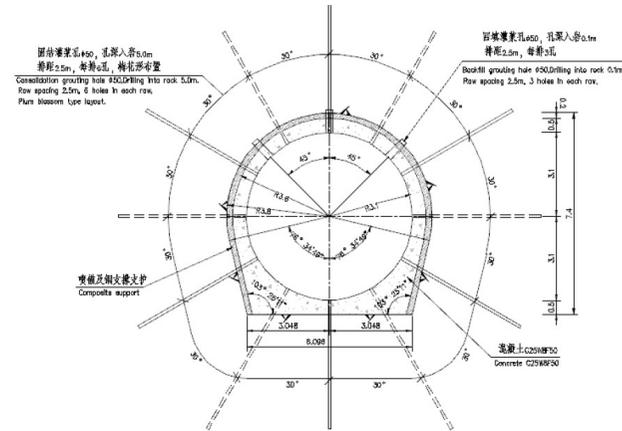
1. Expériences récentes ARTELIA
2. Paramètres géologiques et géomécaniques : aspects propres aux galeries en charge
3. Reconnaissances / Caractérisation
4. Conclusions

# 1. Expériences récentes ARTELIA

## Tunnels en charge des aménagements hydroélectriques

### Missions impliquant un travail de conception et de suivi de travaux

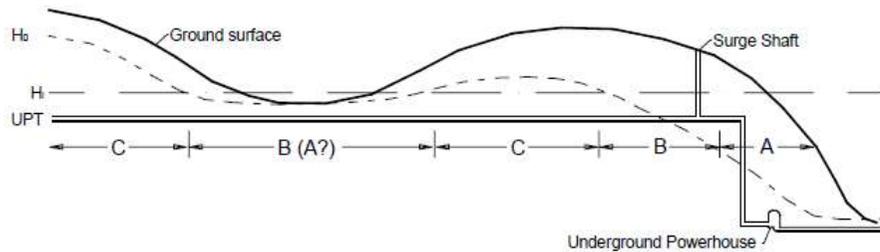
1. Centrale Pompage Turbinage Gilboa 300 MW (Etudes EXE, Israel 2014-2016)
2. Tunnel d'amenée Delsitanisagua 180 (AMO, Equateur 2014-2016) [SYNOHYDRO-XIBEI ENGINEERING]
3. Tunnel d'amenée Nam Ngum 3 480 MW (AMO, Laos 2017-2024) [SYNOHYDRO-NORTH ENGINEERING]
4. Tunnel d'amenée Nam Ngum 4 240 MW (AMO, Laos 2017-2024) [CHMC-SYNOHYDRO-KUNMING ENG.-KIDI]



Projet	Charge statique max. (MPa)
GILBOA PSP	5,2
DELSITANISAGUA	1,0
NN3	3,5
NN4	3,1

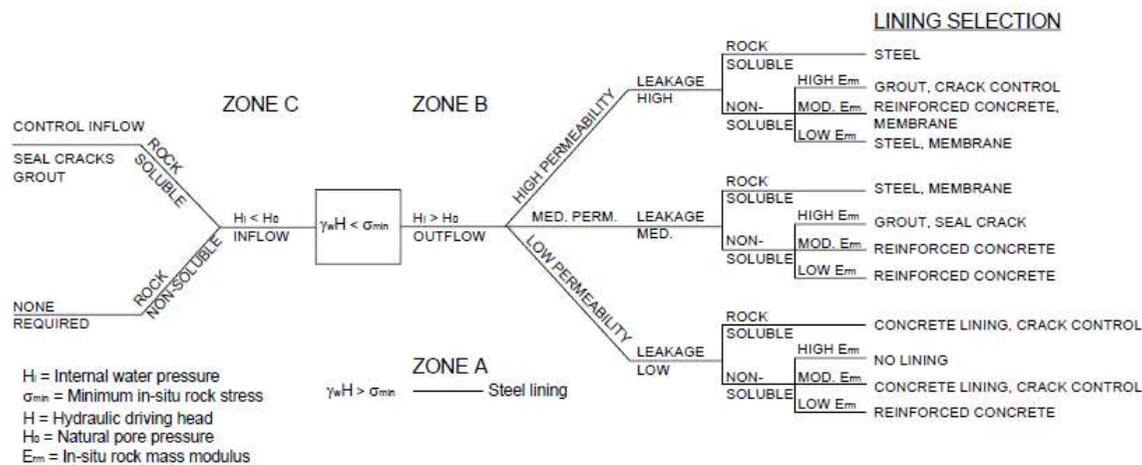
## 2. Paramètres géologiques et géomécaniques

Paramètres du massif gouvernant l'interaction massif-galerie



Paramètres géologiques en jeu vis-à-vis du choix de revêtement :

1. Etat de contraintes (en particulier Sig3)
2. Profondeur de la nappe
3. Perméabilité du massif
4. Sensibilité du massif à l'eau
5. Module de déformation du massif

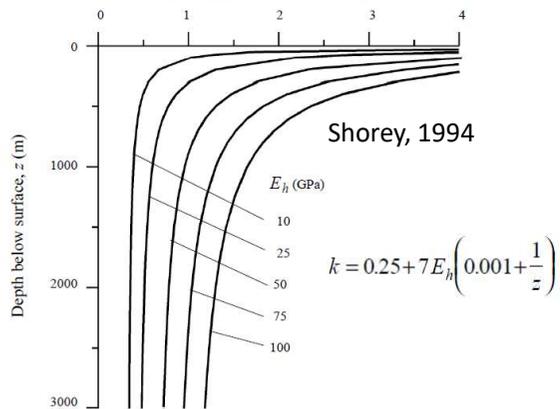
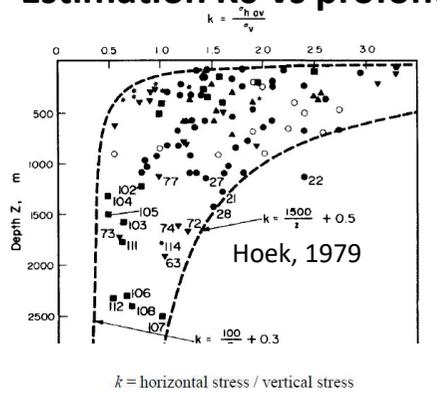


Merritt 1999 modifié par Rancourt 2010

### 3. Reconnaissances / caractérisation

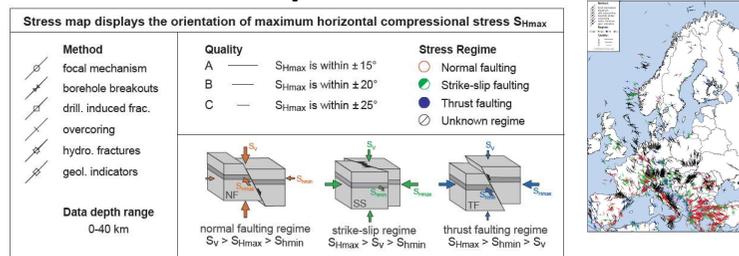
Estimation de l'état de contraintes in-situ : Etudes Préliminaires – PRO

#### Estimation K0 vs profondeur



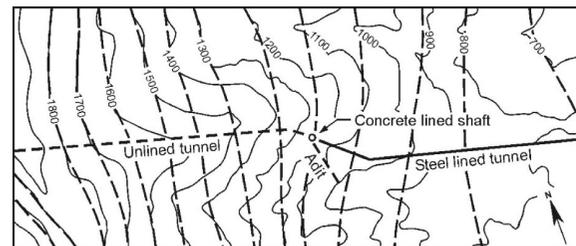
**Estimation (milieu élastique état de contrainte œdométrique)**  
 $K_0 = \nu / (1-\nu) = 0,43$  ;  $\nu = 0,3$  (peu adapté aux chaînes de montagnes)

#### World stress map



#### Vérification des conditions topographiques

Révision de la « couverture effective » en cas de profils de type « ridge »



# 3. Reconnaissances / caractérisation

## Mesure de l'état de contraintes : AVP-PRO-EXE

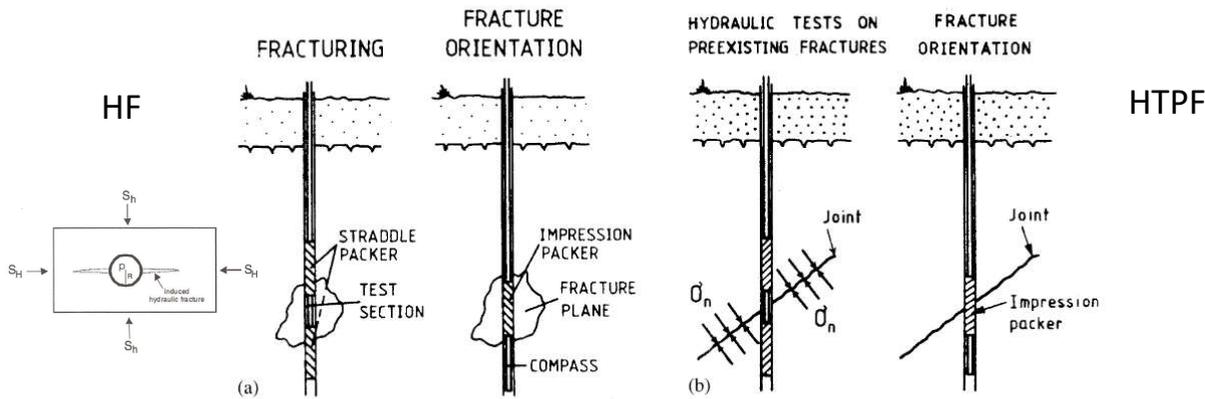
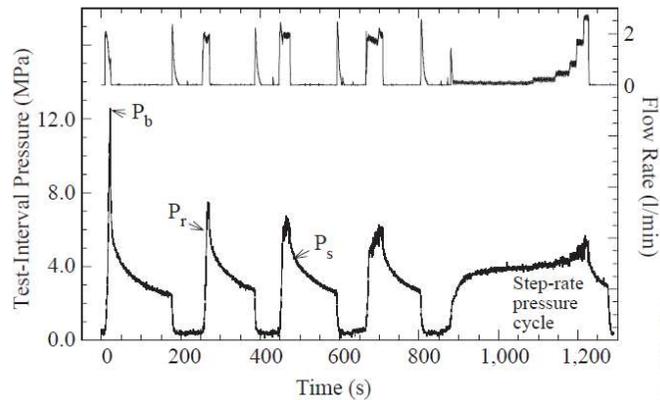


Fig. 3. Down-hole principle during (a) hydraulic fracturing and (b) HTPF measurements.

Ljunggreen, 2003



$$\sigma_h = P_s$$

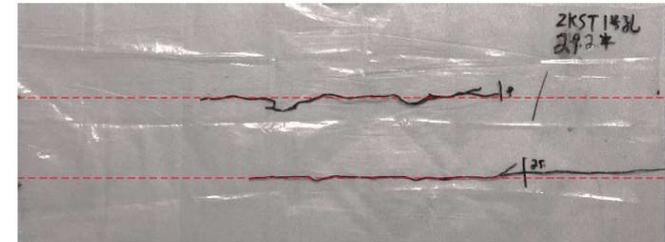
$$\sigma_H = T + 3\sigma_h - P_b$$

$$\sigma_H - P_o = T + 3(\sigma_h - P_o) - (P_b - P_o)$$

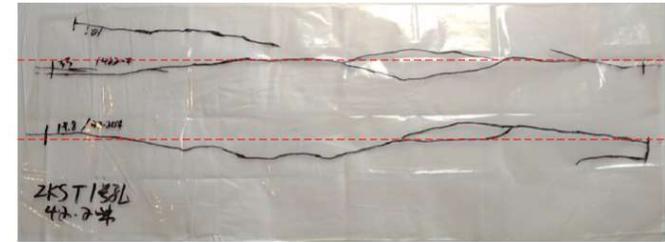
$$\sigma_H - P_o = 3(\sigma_h - P_o) - (P_r - P_o)$$

shut-in pressure ( $P_s$ ) is the pressure needed to equilibrate the fracture-normal stress, which in this case is  $\sigma_h$

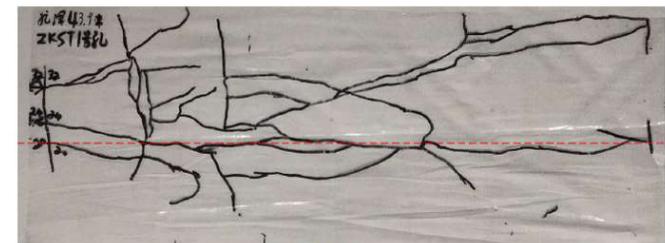
$$\sigma_h = P_s \tag{1a}$$



Test interval depth: ZKST1 - 29.2m



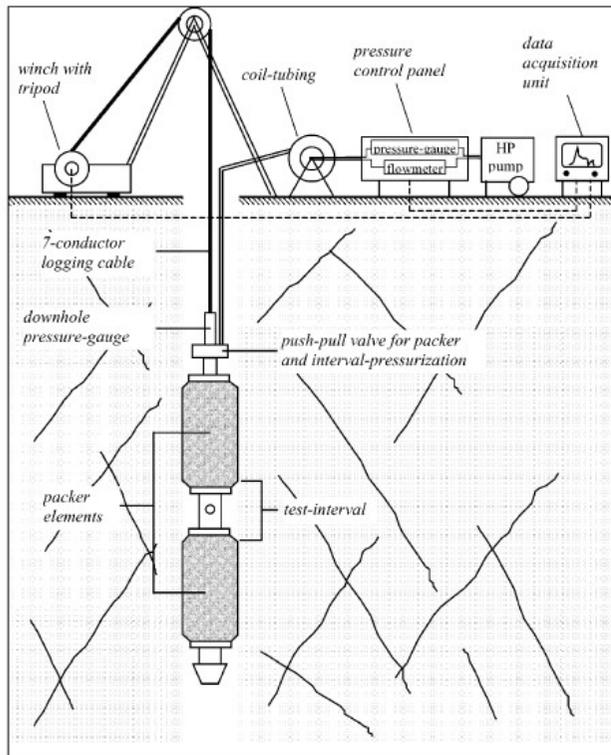
Test interval depth: ZKST1 - 42.2m



### 3. Reconnaissances / caractérisation

#### Mesure de l'état de contraintes : AVP-PRO-EXE

Ljunggreen, 2003



Ljunggreen, 2003

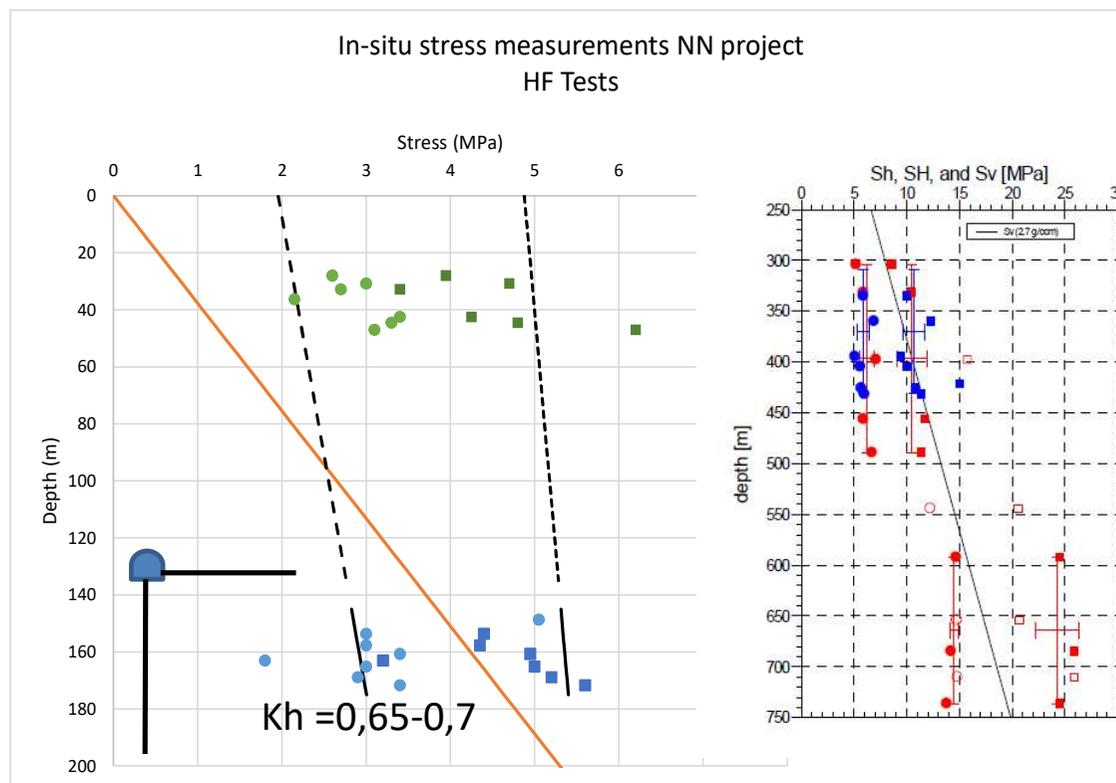
TABLE 7  
Stress measurement methods and key issues related to their applicability

Method	2D/3D	Advantages	Limitations	Suitable for
Overcoring	2D/3D	Most developed technique in both theory and practice	Scattering due to small rock volume. Requires drill rig	Measurements, depth down to 1000m
Doorstopper	2D	Works in jointed and high stressed rocks	Only 2D. Requires drill rig	For weak or high stressed rocks
Hydraulic fracturing	2D	Measurements in existing hole. Low scattering in the results. Involves a fairly large rock volume. Quick	Only 2D. The theoretical limitations in the evaluation of $\sigma_H$ . Disturbs water chemistry	Shallow to deep measurements. To obtain stress profiles
HTPF	2D/3D	Measurements in existing hole. Can be applied when high stresses exist and overcoring and hydraulic fracturing fail	Time-consuming. Requires existing fractures in the hole with varying strikes and dips	Since the method is time consuming, it is of most interest in situations where both overcoring and hydraulic fracturing fail
Core discing	2D	Existing information, which is obtained already at the drilling stage	Only quantitative estimation	Estimation of stress at early stage
Borehole breakouts	2D	Existing information obtained at an early stage. Relatively quick	Restricted to information on orientation. Theory needs to be further developed to infer the stress magnitude	Occurs mostly in deep holes
Focal mechanisms	2D	For great depths	Information only from great depths	
Kaiser effects	2D/3D	Simple measurements	Relatively low reliability	Rough estimations
ASR/DSCA/RACOS	2D/3D	Usable for great depths	Complicated measurements on the micro-scale, sensitive to several factors	Estimation of stress state at great depth
Back calculation	2D	Quick and simple. High certainty due to large rock volume	Theoretically not unique solution	Can only be used during construction of the rock cavern
Analysis of geological data	2D/3D	Low cost	Very rough estimation, low reliability	At early stage of project

### 3. Reconnaissances / caractérisation

#### Mesure de l'état de contraintes

1. Difficulté à estimer  $\sigma_3$  en absence d'essais (phases amont). Dimensionnement et évaluation du risque d'hydrofracturation avec règles de couverture et/ou  $K_0$  prudents.
2. Essais in-situ classiquement réalisés après démarrage des excavations (essais d'eau ISRM).
3.  $K_0$  varie en profondeur avec une forte variabilité à faible-moyenne profondeur (<500 m)
4. Essais HF permettent de créer une nouvelle fissure avec « une meilleur visibilité de  $\sigma_3$  ».
5. Réalisation d'essais à différentes profondeurs => caractérisation plus complète.



### 3. Reconnaissances / caractérisation

#### Perméabilité Nappe / Caractérisation hydrogéologique

La perméabilité du massif contrôle

1. Flux vers l'intérieur. Pression externe d'une nappe.

Le rayon d'influence de la galerie

$K_r < K_c$  alors  $R = 10 \cdot r_i$

$K_r > 100 K_c$  alors  $R = 100 \cdot r_i$

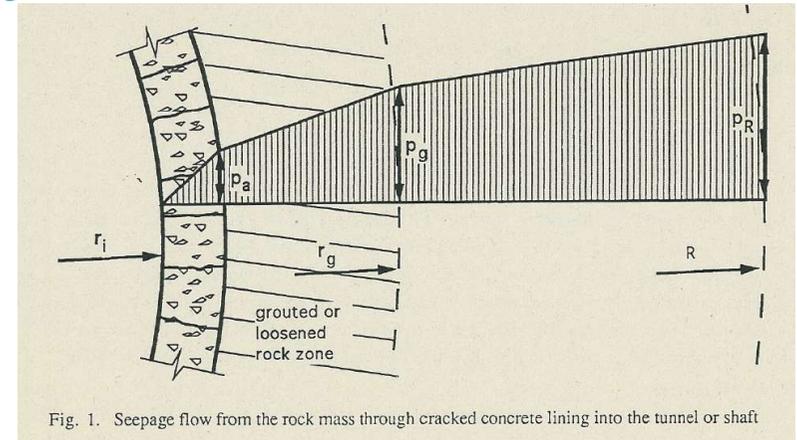


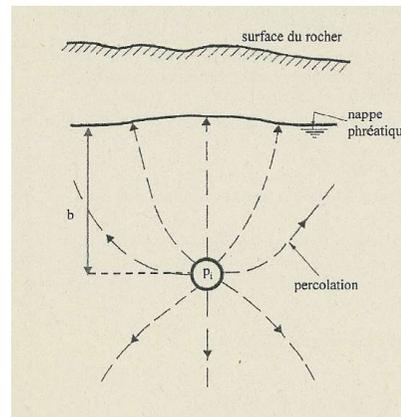
Fig. 1. Seepage flow from the rock mass through cracked concrete lining into the tunnel or shaft

2. Flux vers l'extérieur. Débit de fuite associé à la pression interne

Schleiss, divers

$$q = \frac{2 \cdot \pi \cdot k_R \left( -b + \frac{p_i}{\rho \cdot g} \right)}{\ln \left( \frac{b}{r_i} \left( 1 + \sqrt{1 - \left( \frac{r_i}{b} \right)^2} \right) \right)}$$

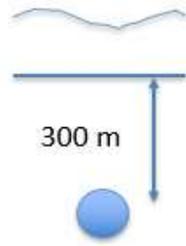
- avec: q: fuites d'eau par une longueur de 1 m de la galerie  
 $k_R$ : perméabilité du rocher  
 $p_i$ : pression intérieure  
 $r_i$ : rayon intérieur (rayon d'excavation)  
 b: profondeur de la galerie par rapport à la nappe phréatique



# 3. Reconnaissances / caractérisation

## Perméabilité / Caractérisation hydrogéologique

3. Le rapport  $K_c/K_r$  contrôle la pression exercée par la nappe

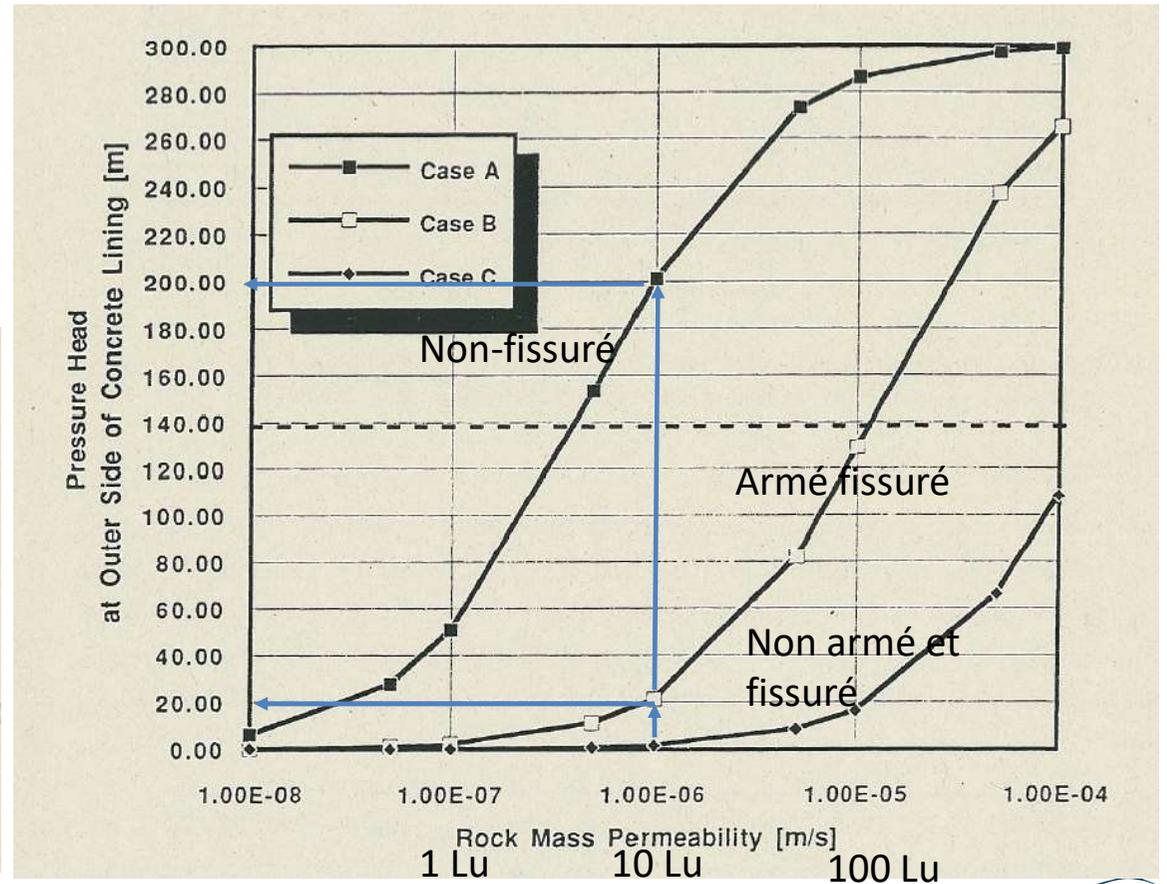


Schleiss, divers

Geometry:  $r_i = 5.0$  m;  $r_a = 5.5$  m;  $r_g = 6.5$  m (loosened rock zone) and  $r_g = 8.5$  m (grouted rock zone)  
 Rock parameters:  $k_r = 10^{-4}$  m/s to  $10^{-8}$  m/s; loosened rock zone  $k_g = 10 k_r$  but with minimum value  $k_g = 10^{-5}$  m/s; grouted rock zone  $k_g = 10^{-7}$  m/s (for best grouting practically achievable)

Regarding the permeability of the concrete lining, 3 different cases are considered:

- Case A: Uncracked concrete lining:  $k_c = 10^{-8}$  m/s
- Case B: Cracked, reinforced concrete lining:  $k_c = 10^{-8}$  m/s (uncracked concrete between cracks);  $2a_1 = 0.1$  mm (radial cracks due to shrinkage);  $d = 3.0$  m;  $2a_2 = 0$  mm (longitudinal cracks due to internal water pressure fully closed during dewatering)
- Case C: Cracked, unreinforced concrete lining:  $k_c = 10^{-8}$  m/s (uncracked concrete between cracks);  $2a_1 = 0.3$  mm;  $d = 6.0$  m;  $2a_2 = 0.3$  mm;  $n = 3$



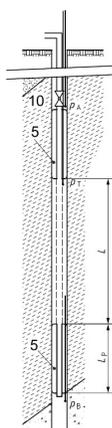
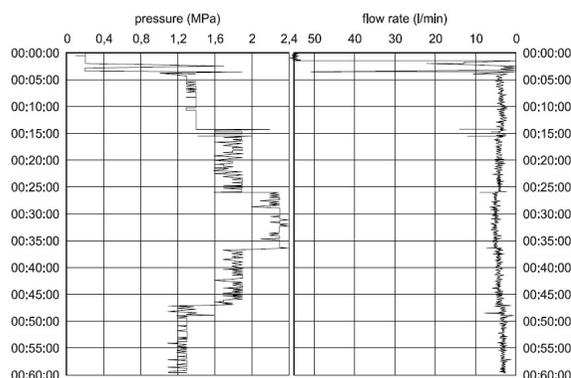
# 3. Reconnaissances / caractérisation

## Perméabilité / Caractérisation hydrogéologique – Essai Lugeon

### L'Essai Lugeon

1. Mesure de la perméabilité du massif par injection d'eau. Il s'agit de la mesure du débit qui s'écoule sous une pression effective de 1 MPa à travers les parois d'un forage. L'essai s'effectue en général sur une tranche de forage de 5 m de longueur généralement.

2. Application de 5 paliers de pression :



Lugeon Range	Classification	Hydraulic Conductivity Range (cm/sec)	Condition of Rock Mass Discontinuities	Reporting Precision (Lugeons)
<1	Very Low	$< 1 \times 10^{-5}$	Very tight	<1
1-5	Low	$1 \times 10^{-5} - 6 \times 10^{-5}$	Tight	$\pm 0$
5-15	Moderate	$6 \times 10^{-5} - 2 \times 10^{-4}$	Few partly open	$\pm 1$
15-50	Medium	$2 \times 10^{-4} - 6 \times 10^{-4}$	Some open	$\pm 5$
50-100	High	$6 \times 10^{-4} - 1 \times 10^{-3}$	Many open	$\pm 10$
>100	Very High	$> 1 \times 10^{-3}$	Open closely spaced or voids	>100

**Limitation principale : Effet d'échelle** => sollicitation d'un volume de massif relativement faible comparé à la taille du tunnel.

Possibilité de faire des essais « en grand » (Galerie Orлу, AFTES 1992 & 2014)

ISO 22282-3 Water tests in rocks

### 3. Reconnaissances / caractérisation

#### Sensibilité du massif à l'eau

1. Roches solubles (Evaporites, gypse, etc...)
2. Présence de minéraux argileux (argiles gonflantes)
3. Présence de minéraux sensibles à l'air (argiles dans des basaltes vacuolaires)
4. Reconnaissances :

Analyses pétrographiques (Microscope optique)

Diffractométrie R-X

Slake tests – Durabilité cycles Saturation/Séchage

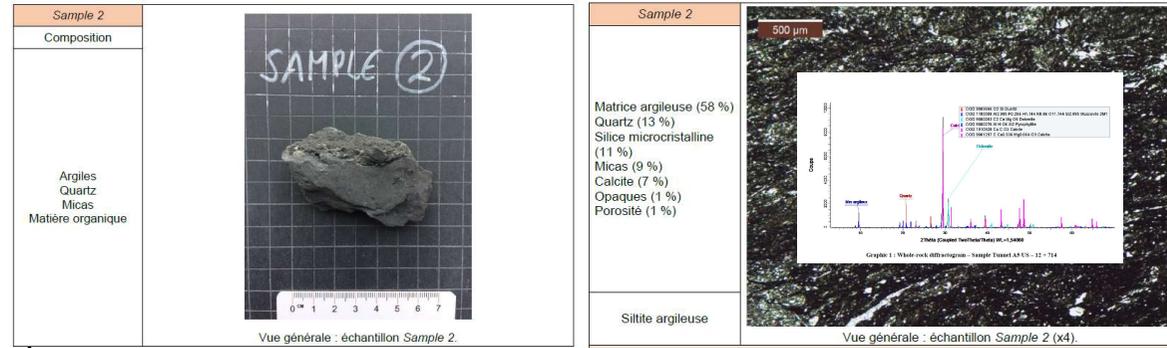


Figure 7. "Crazing" due to weathering in amygdaloidal basalts in the Transfer tunnel in Lesotho.

# 3. Reconnaissances / caractérisation

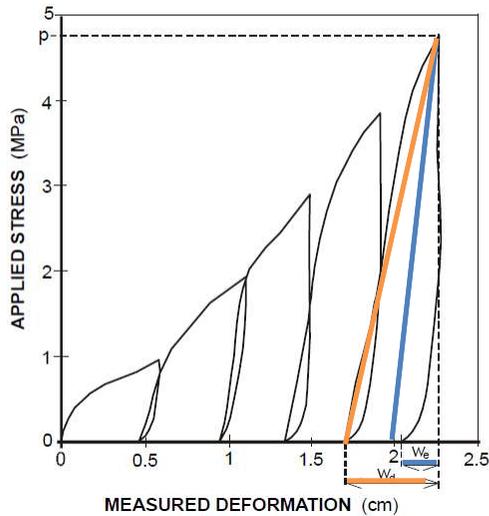
## Caractérisation du module / Définition du module

*Modulus of elasticity or Young's modulus (E)*: The ratio of stress to corresponding strain below the proportionality limit of a material. Values of E for various rocks are shown in Table A-1 in the Appendix.

Modulus of deformation of a rock mass (Em): The ratio of stress (p) to corresponding strain during loading of a rock mass, including elastic and inelastic behaviour ( $w_d$ ), as shown in Figure 1.

Modulus of elasticity of a rock mass (Eem): The ratio of stress (p) to corresponding strain during loading of a rock mass, including only the elastic behaviour ( $w_e$ ), see Figure 1.

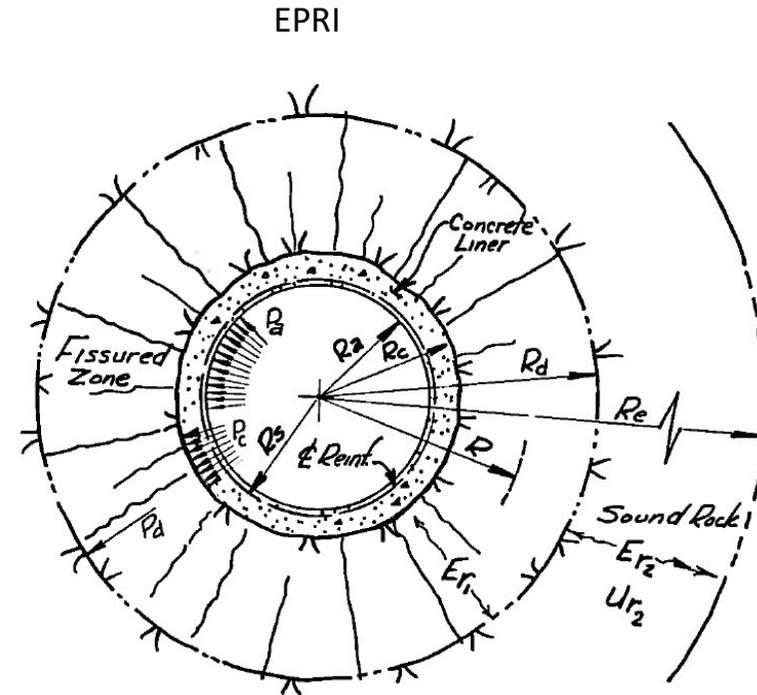
Palmstrom, 2001



1. Module de déformation (massif)
2. Module élastique (massif)
3. Rôle du module galeries en charge

Contrôle la déformation à l'excavation

Contrôle de la réaction du rocher vis-à-vis de  $P_i$  => Contribution du massif



### 3. Reconnaissances / caractérisation

#### Caractérisation du module / Reconnaissances

1. Mesure du module intact  $E_i$  (Labo - Echantillon)
2. Mesure des ondes  $V_p$  et  $V_s$  (Profils géophysiques SRT et MASW )=> Calcul du module élastique dynamique.
3. Dilatomètre et sondes similaires (Goodman jack, etc.)
4. Essais au vérin plat

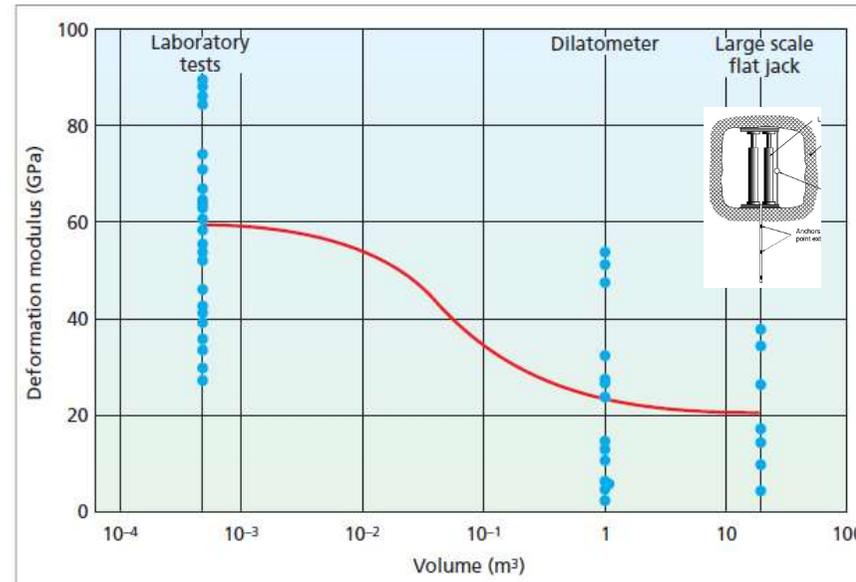


Figure 3.110 Variation of the rock mass deformability as a function of the scale considered: volumes approaching REV (Cunha and Muralha, 1990).

Gonzalez de Vallejo, 2011

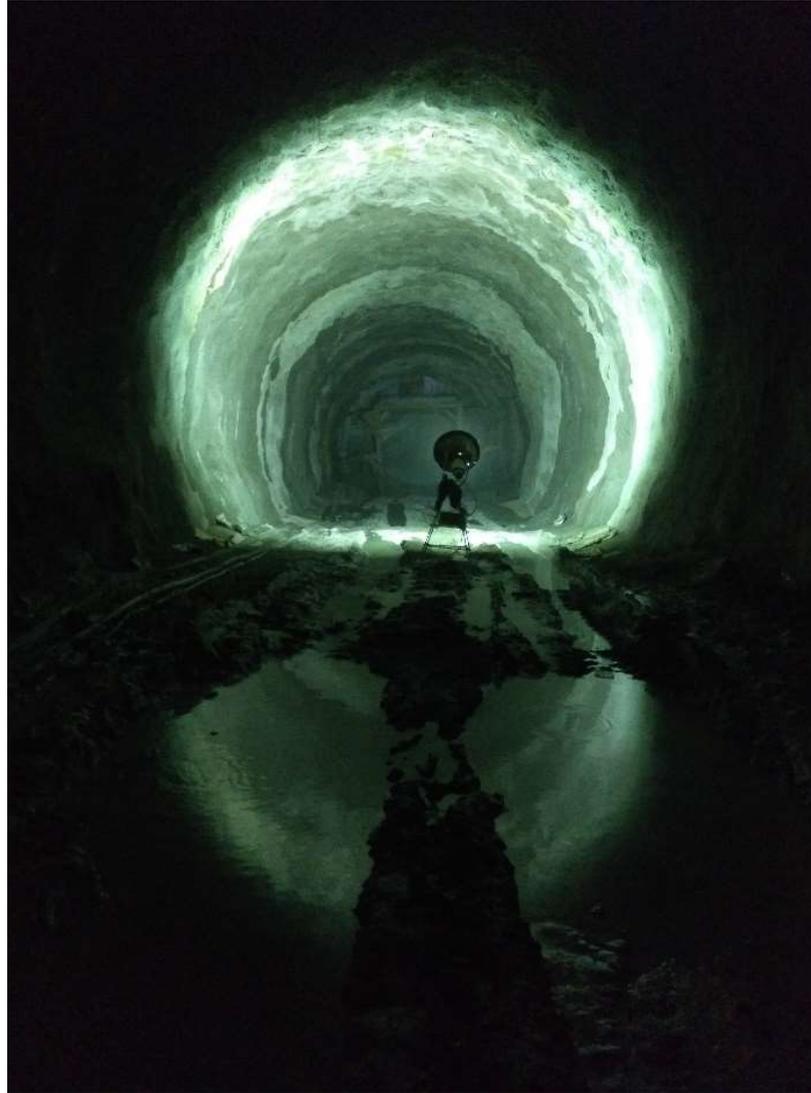
Très fort effet d'échelle => Volume sollicité par l'essai vs volume sollicité par l'ouvrage

## 4. Conclusions

### Caractérisation du massif autour des galeries en charge – Sujets GT

1. Paramètres clé contrôlant l'interaction hydromécanique galerie-pression-massif
  1. Contrainte principale mineur : difficulté estimation / méthodes reconnaissance / Utilisation des critères de couverture/contrainte.
  2. Profondeur de la nappe : distribution en profondeur dans le massif
  3. Perméabilité : Effet d'échelle essais Lugeon (quantification, exemples), Perméabilité relative  $K_c/K_r$
  4. Sensibilité du massif à l'eau : Cas remarquables (Basaltes Lesotho Katsé-Muela, évaporites, Méthodes)
  5. Module de déformation du massif : Différents modules et quand sont-ils sollicités, méthodes de mesure.

MERCI



AFTES–Journée technique-13/06/2024-Galeries en charge- Jordi PERELLO