

Comité Français de Mécanique des Roches
Association Française des Tunnels et de
l'Espace souterrain



Séance du 20 mars 2014

Galeries hydrauliques en charge et massifs rocheux



Christophe VIBERT

TRACTEBEL Engineering
GDF SUEZ



COYNE ET BELLIER

Bureau d'Ingénieurs Conseils

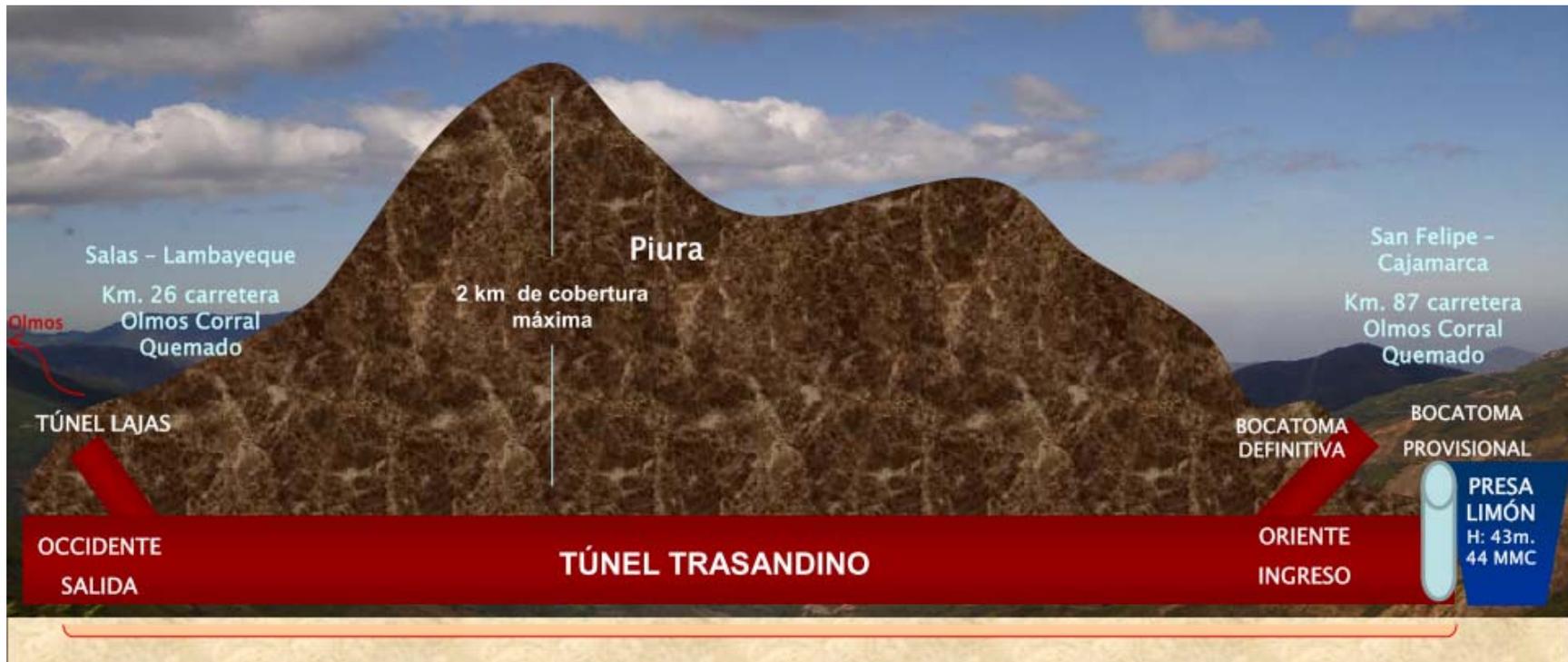
Galeries en charge

- Définition: galerie souterraine (ou puits) destinée à permettre le passage d'eau sous pression
 - Tunnels de transfert (alimentation en eau, irrigation)
 - Galeries d'amenée pour usines hydroélectriques
 - Aménagements à buts multiples ou autres
 - Dans une majorité de cas, le transfert d'eau se fait sous pression
- (dénivelée, présence de réservoir, ou nécessité d'obtenir le maximum de débit)

Les forces en jeu sont généralement beaucoup plus importantes dans les galeries d'aménagements hydroélectriques

Exemple de transfert d'eau

- Tunnel transandin d'Olmos (Pérou)



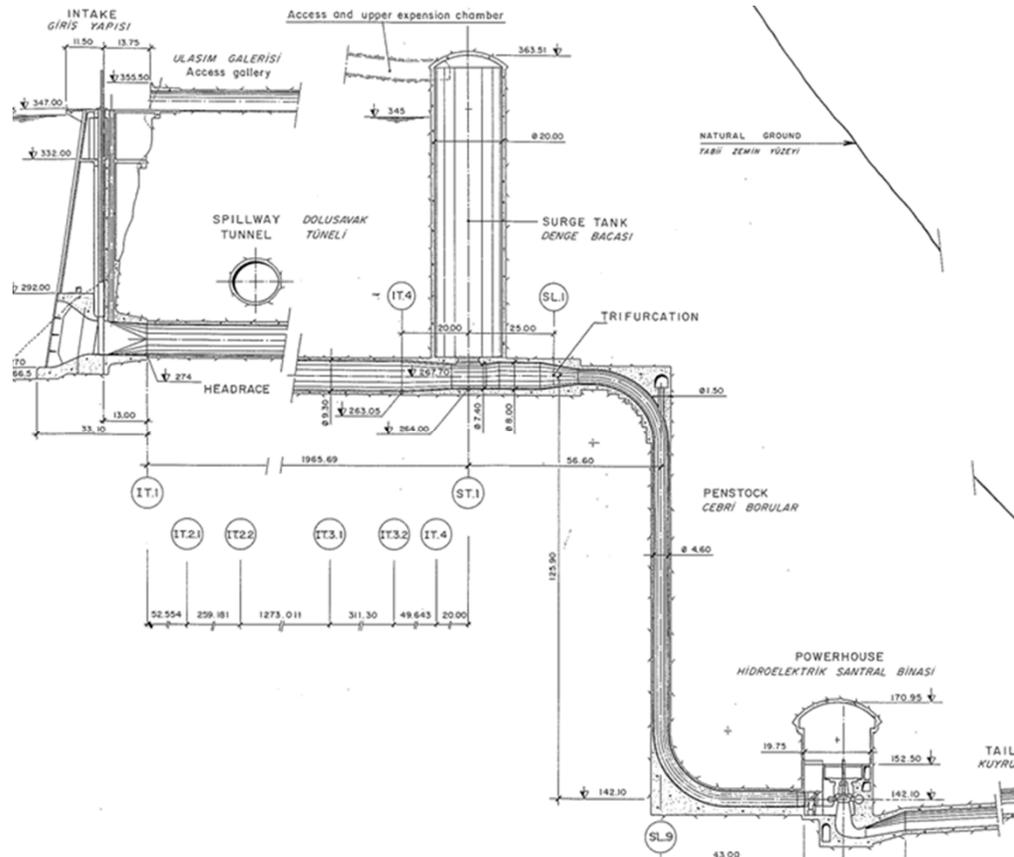
From P.E.O.T.

Transfert d'un débit régularisé à fin d'irrigation

VIBERT Christophe – 20 mars 2014 - CFMR-AFTES

Exemple d'aménagement hydroélectrique

Aménagement de Berke
(Turquie)



Puissance directement proportionnelle au débit Q et à la hauteur de chute H (pression): $P = \eta \rho g Q H$

Hydroélectricité

- Demande en énergie renouvelable en croissance constante dans le monde
 - Projets de plus en plus audacieux
- Volonté d'accroissement des performances
 - $P = \eta \rho g Q H$: Charges hydrauliques jusqu'à plus de 1.000 m,
- Sites les plus favorables déjà équipés
 - Projets de galeries en charge dans massifs rocheux aux caractéristiques mécaniques nettement moins favorables que dans le passé

Les projets actuels posent aux concepteurs de nouveaux défis

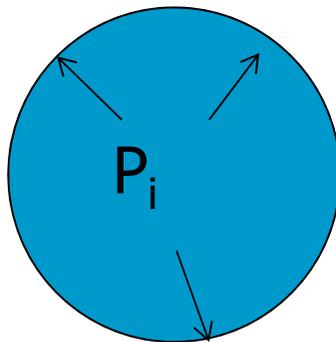
Mise en pression d'une galerie

- En l'absence de pression d'eau extérieure
Galerie située au-dessus de la nappe phréatique

La mise en pression de la galerie provoque une déformation fonction:

- de la pression interne P_i
- du module de déformation E du massif

$$P_e = 0$$



Massif élastique homogène et isotrope:

Déplacement radial $(1+\nu) P_i R/E$

**Mise en traction du rocher
et/ou du revêtement**

Mise en pression d'une galerie

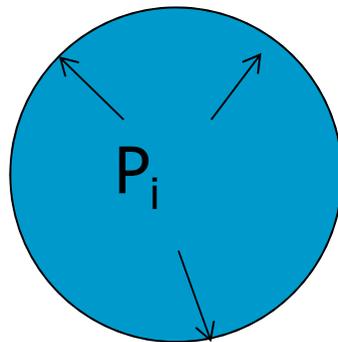
– Avec pression d'eau extérieure

Galerie située sous la nappe phréatique

La mise en pression de la galerie provoque une déformation fonction:

- de la différence de pression ($P_i - P_e$)
- du module de déformation du massif

$$P_e \neq 0$$



Massif élastique homogène et isotrope:
Déplacement radial $(1+\nu)(P_i - P_e) R/E$

**Compression ou traction du rocher
et/ou revêtement suivant signe de
 $(P_i - P_e)$**

Mise en pression d'une galerie

- Risque de fracturation hydraulique (« claquage »)

Si la différence ($P_i - P_e$), ou en général l'accroissement de pression dû au remplissage excède la contrainte principale minimum en un point quelconque du massif, il peut y avoir « claquage » ou fracturation hydraulique

(Voir exposé Gilbert CASTANIER)

- Conséquences de la fracturation hydraulique

Ouverture ou génération de fissures qui se propagent et conduisent à de très importantes fuites d'eau sous pression à travers le massif

(Voir exposé Jean LAUNAY)

Cas de charge à considérer

– 1) Remplissage et mise en pression

En l'absence de revêtement étanche, le massif rocheux se sature progressivement jusqu'à équilibre avec la pression interne de la galerie

Même sans fracturation hydraulique, le remplissage est toujours une phase délicate

Déjaugage des terrains, possible modification des caractéristiques mécaniques avec la saturation

- Exemple de Gilgel-Gibe II (Ethiopie, 2010)

Effondrement d'une section de tunnel peu après remplissage

- Glendoe ? (Ecosse, 2009)

Idem, après seulement quelques mois de mise en exploitation

Cas de charge à considérer

– 2) Conditions transitoires en opération

Surtout pour aménagements hydroélectriques:
générées par les contraintes d'exploitation

La fermeture des vannes du circuit provoque un reflux brusque avec augmentation de pression subite (coup de bélier)

Nécessité de cheminées d'équilibre: la pression fluctue durant plusieurs minutes

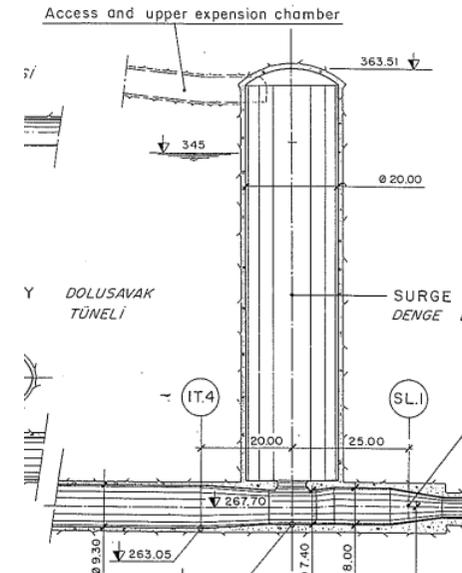
Inversion des turbines dans les aménagements de pompage-turbinage

- Mêmes phénomènes transitoires dans les conduites alimentées par stations de pompage

Pour absorber les variations brusques de pression:

- Cheminées d'équilibre
 - Un volume vide disponible pour permettre de limiter l'augmentation de pression et éviter la dépression
- Ballons anti-bélier
 - Même rôle: le volume vide est remplacé par de l'air comprimé

(Voir exposé d'Einar BROCH)

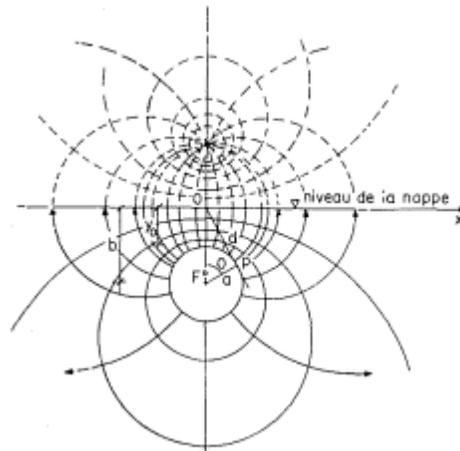


Cas de charge à considérer

– 3) Vidange de la conduite

De préférence pas trop rapide pour éviter une trop grande différence de pression

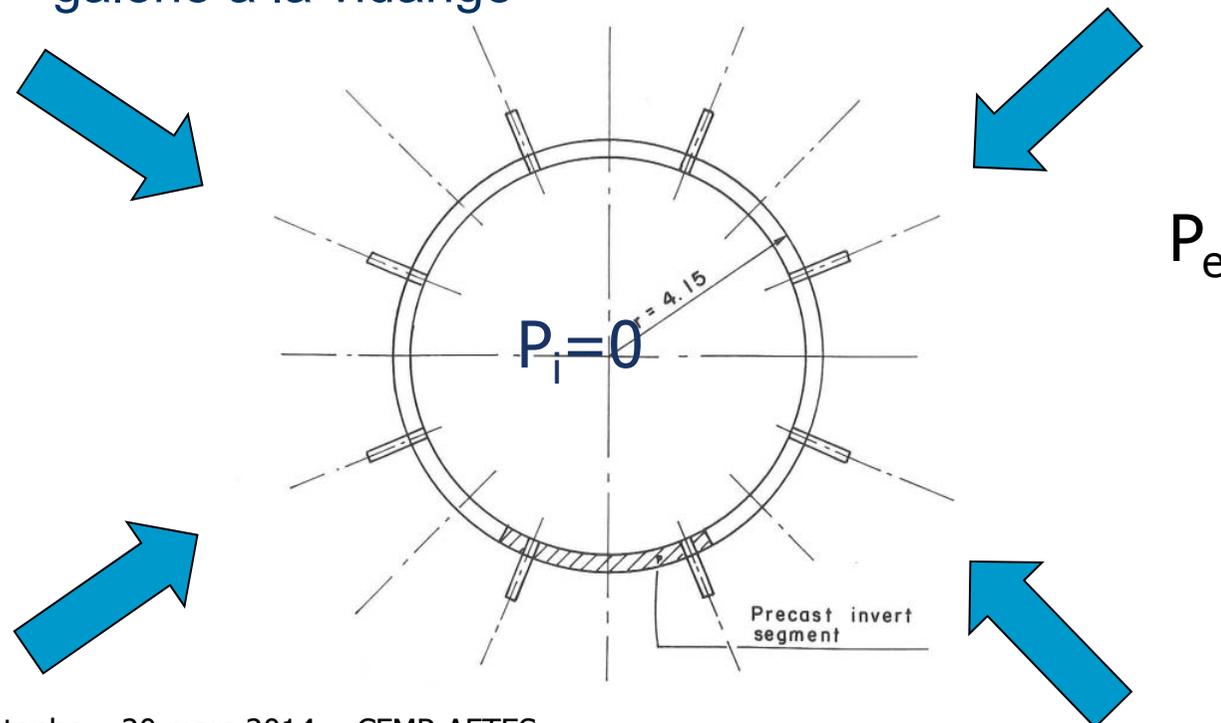
- En l'absence de revêtement étanche ou semi-étanche, même si la galerie était à l'origine au-dessus de la nappe, le massif s'est saturé



Vidange

Risque d'instabilité pour les tunnels profonds, si niveau de nappe phréatique très élevé au-dessus de la galerie

Des drains peuvent être incorporés au revêtement pour faciliter la chute des pressions interstitielles autour de la galerie à la vidange



Interaction galeries-massif rocheux

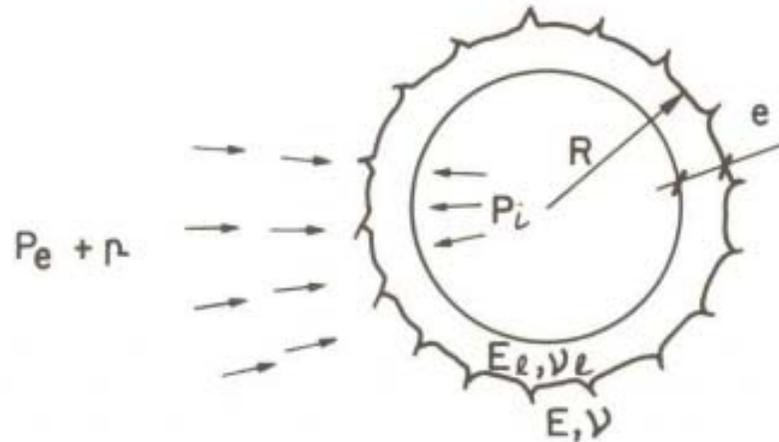
- Galeries non revêtues
 - Interaction directe eau / massif rocheux
- Galeries en charge revêtues

Fonctions du revêtement:

 - garantir la stabilité à long terme de la galerie,
 - limiter les pertes de charge (surface lisse),
 - limiter les fuites,
 - revêtement étanche: éviter la fracturation hydraulique du massif.

Interaction galeries-massif rocheux

Le revêtement peut être conçu pour reprendre la pleine pression interne de la galerie (P_i), ou considérer une participation du rocher au confinement (réaction p)



Interaction galeries-massif rocheux

— Conception et dimensionnement du revêtement

Se fait en fonction:

- des caractéristiques du massif rocheux
Déformabilité, conductivité hydraulique, etc.
- du champ de contraintes naturelles dans le massif
Prévention de la fracturation hydraulique
- du contexte hydrogéologique

Niveau des aquifères et pression d'eau extérieure à la galerie

La connaissance aussi parfaite que possible de la géologie et des caractéristiques des massifs rocheux traversés est essentielle

Excavation - construction

- Méthodes d'excavation similaires aux tunnels conventionnels

Problématique de tunnels profonds

Les galeries en charge (tunnels, puits verticaux ou inclinés) sont souvent excavés à grande profondeur

- Cas particulier de l'excavation au tunnelier avec voussoirs préfabriqués
 - Pression d'eau extérieure $<$ pression de fonctionnement
Ouverture des joints entre voussoirs: étanchéité non assurée
 - Pression d'eau extérieure $>$ pression de fonctionnement
Joints ouverts; drainage en vidange

La parole aux conférenciers!

- UNLINED HIGH PRESSURE TUNNELS AND AIR CUSHION SURGE CHAMBERS

***Einar BROCH**, Norwegian University of Science & Technology, Norway*

- APPLICATION DES MÉTHODES DE CONCEPTION DE GALERIES HYDRAULIQUES

***Christophe VIBERT** – Tractebel Engineering – Coyne et Bellier, Gennevilliers, France*

- LES RESULTATS CONTRASTES DES ESSAIS HYDRAULIQUES A FORTE PRESSION POUR DETERMINER LA NECESSITE D'UN BLINDAGE ; LIEN AVEC L'HISTOIRE TECTONIQUE DU MASSIF ROCHEUX

***Gilbert CASTANIER** – TEGG, Electricité de France, Aix-en-Provence, France*

- RUPTURE ET REPARATION DE LA CONDUITE EN CHARGE DE CLEUZON-DIXENCE

***Jean LAUNAY** – Consultant, France*