

Conférence AFTES/CFMR Galerie et puits en charge - 13 juin 2024

Revêtements et étanchéités – Retour sur des solutions innovantes

Auteurs : Patrick Lignier / Pier-Luigi Tonioni / Michela Di Feo



PUBLIC

INTERNAL

RESTRICTED

CONFIDENTIAL

© Lufas stockadobe.com

AGENDA

Chapitre 1 Contexte général

Chapitre 2 Hydro-fracturation / Etanchéité – Cas de charge

Chapitre 3 Voussoirs étanches

Chapitre 4 Etanchéité par projection d'enduit

Chapitre 5 Membranes étanches

1. CONTEXTE GENERAL

- Les galeries hydrauliques – chemin d'eau – représente un coût important d'un projet hydraulique – environ 30% du coût d'un projet hydroélectrique.
- Les revêtements et étanchéités des galeries hydrauliques – solution classique avec blindage acier - peuvent constituer jusqu'à 50 % - voire plus - du coût du chemin d'eau, soit environ 15% du coût du projet hydroélectrique.
- Des solutions innovantes – non classiques – sont mises en place pour réduire ce coût. Bien souvent, cela fait l'objet d'une analyse de risques.

2. HYDRO-FRACTURATION / ETANCHEITE

On distingue trois scenarios principaux pour les revêtements et étanchéités des galeries hydrauliques liés à la géologie et l'hydrogéologie

1. Risque d'hydro-fracturation : Contraintes in-situ inférieures à la charge d'eau (perte d'eau non contrôlée)

La règle générale est : « L'eau n'est pas en contact avec la roche » soit une étanchéité totale.

Le blindage s'impose dans la grande majorité des cas.

2. Risque de perte d'eau : Massif perméable ou semi-perméable

L'analyse est économique entre le coût des pertes d'eau et le coût d'une meilleure étanchéité. **Des solutions « non classiques » sont possibles.**

3. Aucun risque d'hydro-fracturation ou d'hydrogéologie

Revêtement de tunnel classique tenant compte des cas de charge et contraintes liées à l'hydraulique

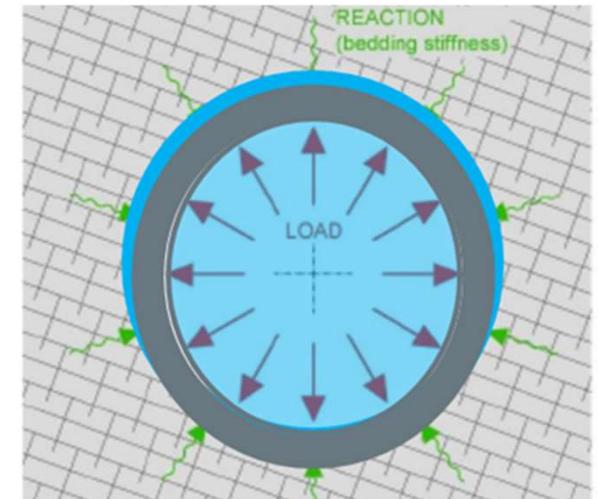
2. HYDRO-FRACTURATION / ETANCHEITE – CAS DE CHARGE

Les galeries hydrauliques doivent atteindre deux équilibres, un équilibre mécanique et un équilibre hydrogéologique – hydraulique, qui peuvent interagir entre eux.

L'équilibre hydrogéologique dépend de la nappe extérieure et de la perméabilité du revêtement et de la masse rocheuse. Il peut se former un interstice entre le revêtement et sa fondation rocheuse – principalement en voûte - si la pression extérieure est supérieure à la pression intérieure ou même équilibrée.

L'équilibre mécanique dépend notamment de la différence de pression entre l'intrados et l'extrados et des appuis/contact de la fondation rocheuse sur le revêtement.

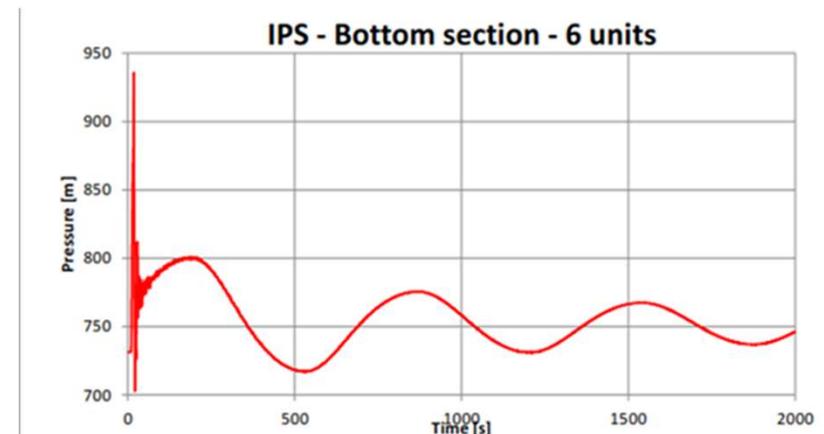
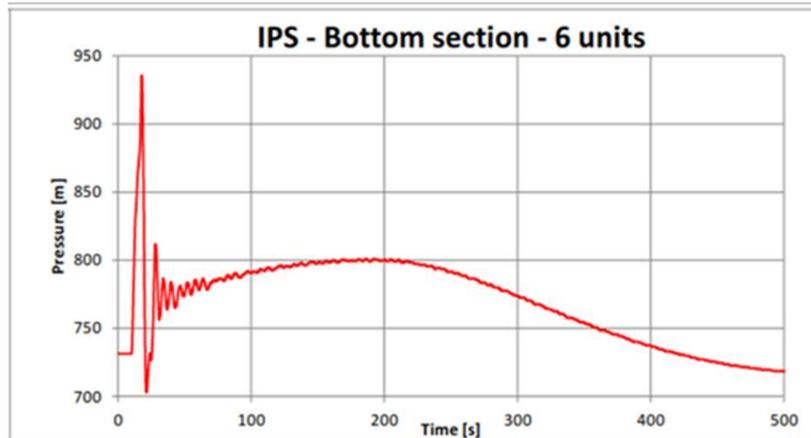
La perméabilité du revêtement peut changer en fonction du déplacement de celui-ci – fissuration.



2. HYDRO-FRACTURATION / ETANCHEITE – CAS DE CHARGE

Cas de charge hydraulique principaux (outre les charges gravitationnelles) :

- Galerie en charge
- Vidange
- Transitoires (Onde pression) – Effet de fatigue (cas de charge qui peut être dimensionnant en particulier pour les stations de turbinage-pompage) (Ci-dessous une onde de pression – Pulsations dynamiques suivies d'une oscillation de masse)



3. VOUSOIRS ETANCHES

Dans le cadre de la conception des ouvrages souterrains de rejet en mer des eaux de refroidissement, Tractebel a réalisé des études détaillées sur le **comportement des tunnels sous pression intérieure creusés au tunnelier et revêtus en voussoirs.**

L'injection d'eau dans le terrain pour ces ouvrages n'étant pas admissible, Tractebel a étudié, en plus des problématiques liées à l'intégrité structurelle et la stabilité globale, **l'étanchéité du revêtement en voussoirs** de ces tunnels hydrauliques.

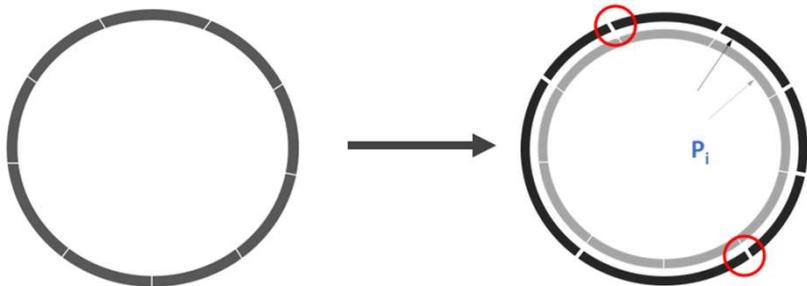
Les résultats principaux des analyses numériques concernent :

- l'ouverture des joints entre voussoirs
- l'utilisation des connecteurs entre anneaux

3. VOUSOIRS ETANCHES

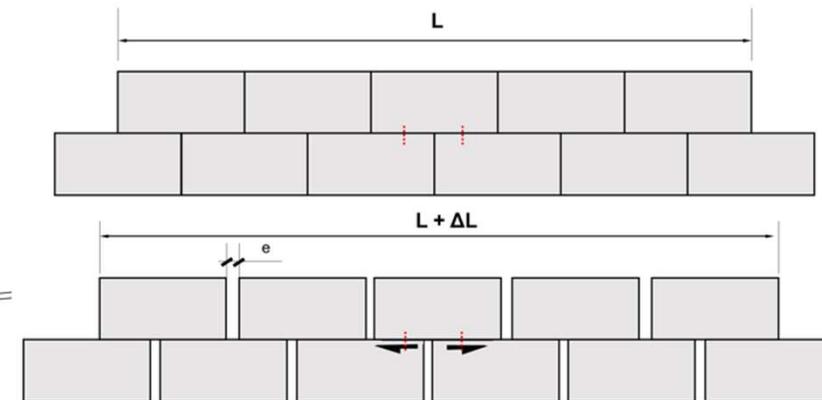
Ouverture des joints

Lorsque la pression intérieure dépasse la pression extérieure, les joints des voussoirs s'ouvrent jusqu'à solliciter la réaction de la fondation. L'ouverture des joints est essentiellement contrôlée par la réaction de la fondation (module d'Young). L'ouverture des joints peut ne pas être uniforme. Dans ce cas, les deux joints opposés, les moins résistants, s'ouvrent en premier en fonction la contre-poussée de la fondation et du poids des voussoirs.



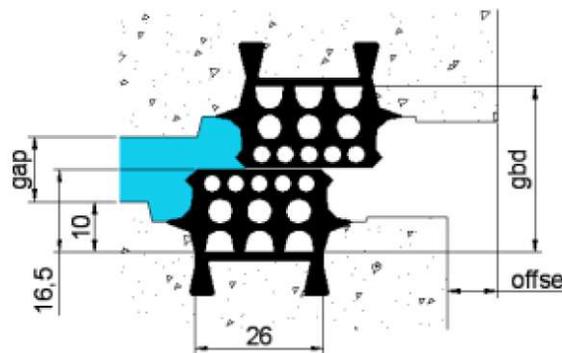
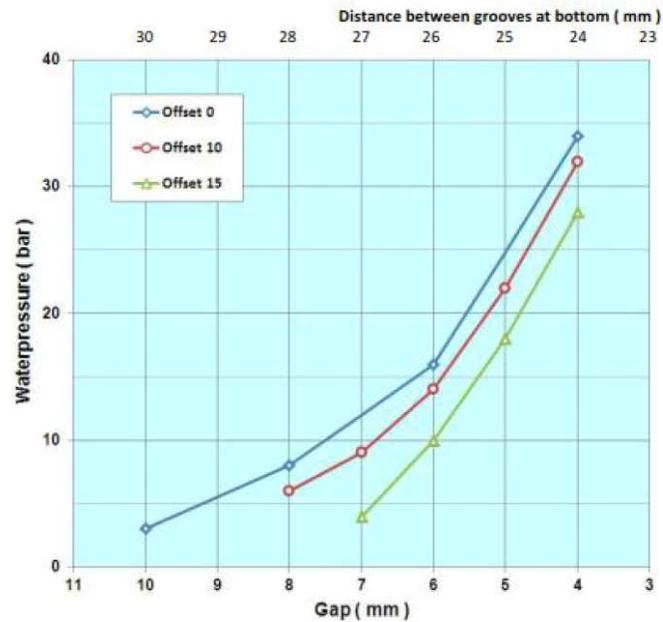
Connecteurs

Le phénomène d'ouverture des joints et de déplacement des voussoirs est complexe. En effet, lors de l'ouverture des joints, des efforts de cisaillement seront transmis aux connecteurs entre anneaux. Ces efforts auront tendance à arrêter l'ouverture d'un joint. Le déplacement imposé par la pression intérieure se reportera sur un joint plus faible. Les connecteurs jouent un rôle bénéfique dans la répartition des ouvertures de joints.



3. VOUSOIRS ETANCHES

Critères d'étanchéité : ouverture des joints inférieure à 2,0 mm



GT18R1F1

3.7.2.2 - Aspects fonctionnels

Lorsque les zones de tendance à l'ouverture des anneaux ont été localisées, le comportement hydromécanique de la structure dépend alors :

- ▶ de la présence de boulons et de leur dimensionnement ;
- ▶ de la valeur de l'ouverture des contacts vis-à-vis de la compression des garnitures d'étanchéité mises en place.

La reprise de tractions par les boulons ne peut être généralement justifiée que sur le court terme, sauf à prévoir un matériau ou une protection approprié contre la corrosion.

Aussi, paraît-il souhaitable d'éliminer les boulons dans une galerie soumise à tendance à l'ouverture des contacts.

L'étanchéité de la structure n'étant alors assurée que si les garnitures ne s'ouvrent que d'une fraction de leur compression. Un coefficient de sécurité de 2 est souhaitable pour permettre, durant les cycles de chargement / déchargement, un ré-agencement possible des anneaux de voussoirs.

Si ces conditions ne peuvent être assurées et qu'une étanchéité totale est requise, alors la mise en place d'une étanchéité complémentaire est nécessaire (anneau de béton coffré, blindage ou autre procédé).

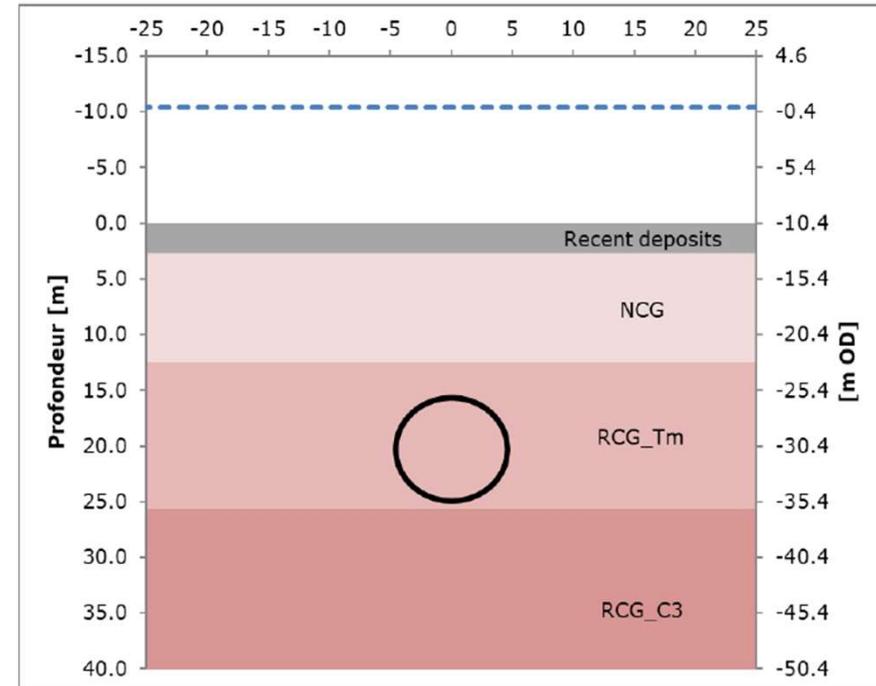
3. VOUSOIRS ETANCHES

Données géologiques, géotechniques et hydrogéologiques

Le tunnel se situe dans une alternance d'argiles et de sables, mais majoritairement dans des sables perméables sous faible couverture.

- Couverture: 15 m
- Charge d'eau: 25 m
- Surpression intérieure relative de 10.64 m (1.07 bars)

Formation	γ [kN/m ³]	E [MPa]	c' [kPa]	ϕ' [Deg]	K ₀ [-]	v [-]
Recent deposits	21	5	0	25	0.58	0.35
NCG (Norwich Crags – C1)	21	79	0	31	0.48	0.30
RCG_Tm (Red Crags- C2)	18	210	0	29	0.52	0.30
RCG_Szm (Red Crags – C3)	21	280	0	33	0.46	0.30

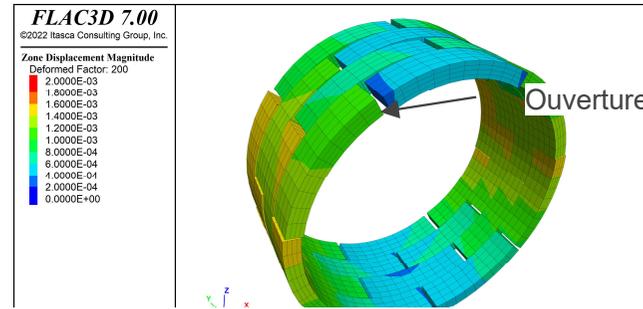
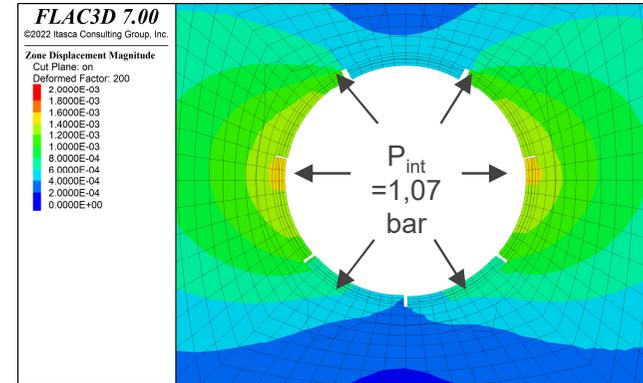
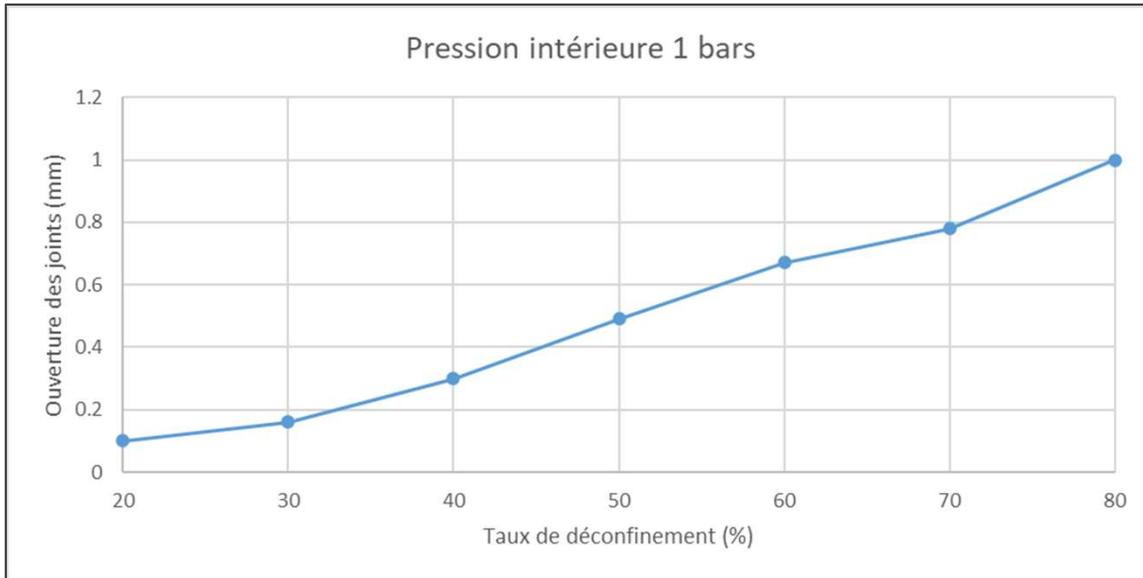


3. VOUSOIRS ETANCHES

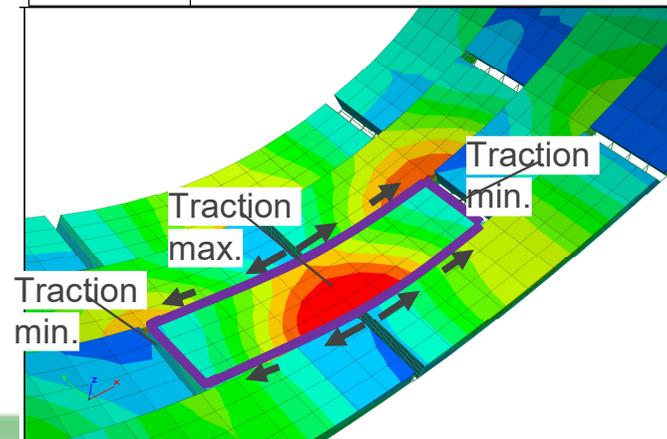
Pression relative intérieure + 1,07 bar :

- Ouverture des joints ;
- Ouverture maximale des joints d'environ 1 mm pour un déconfinement de 80 %;

Ouverture des joints en fonction du taux de déconfinement

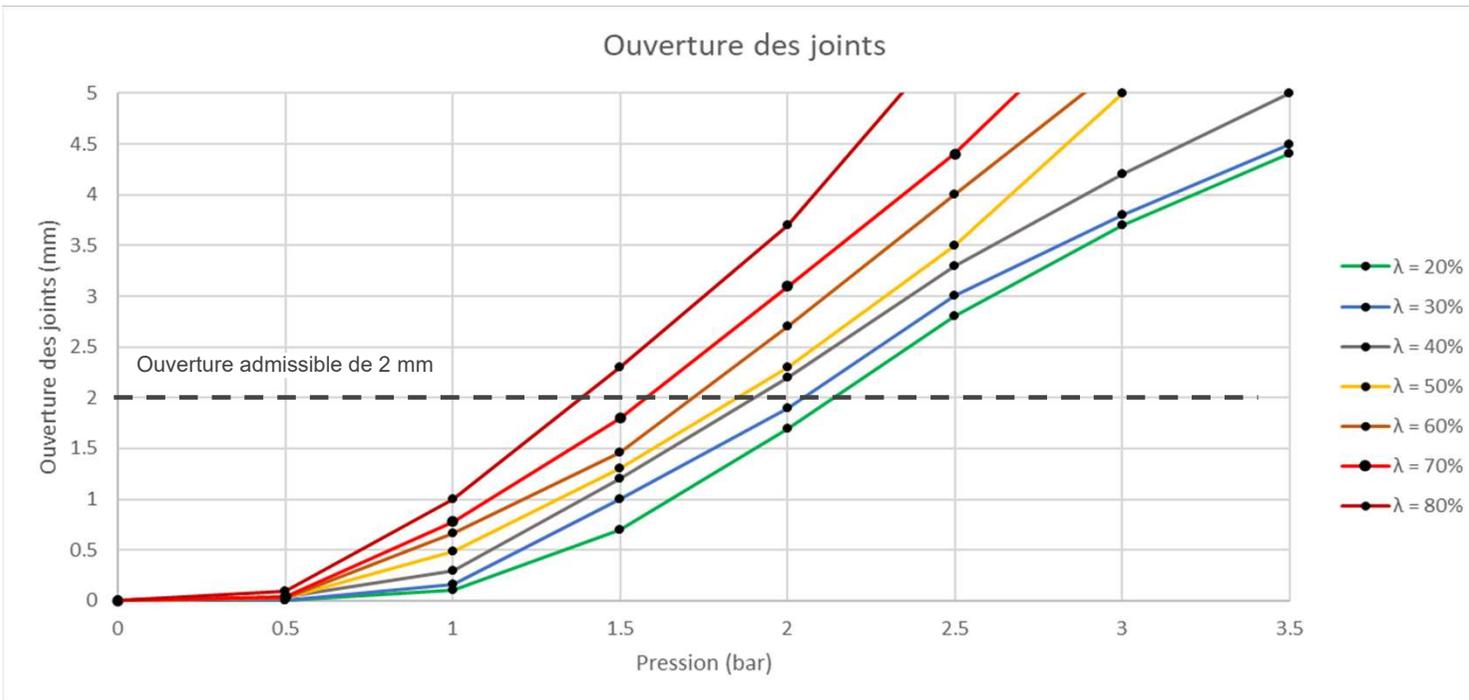


Déformée de l'anneau de voussoirs – Coupe transversale



3. VOUSOIRS ETANCHES

La pression intérieure (pression relative) varie entre 0 et 3,5 bars + le taux de déconfinement varie entre 20% et 80%.



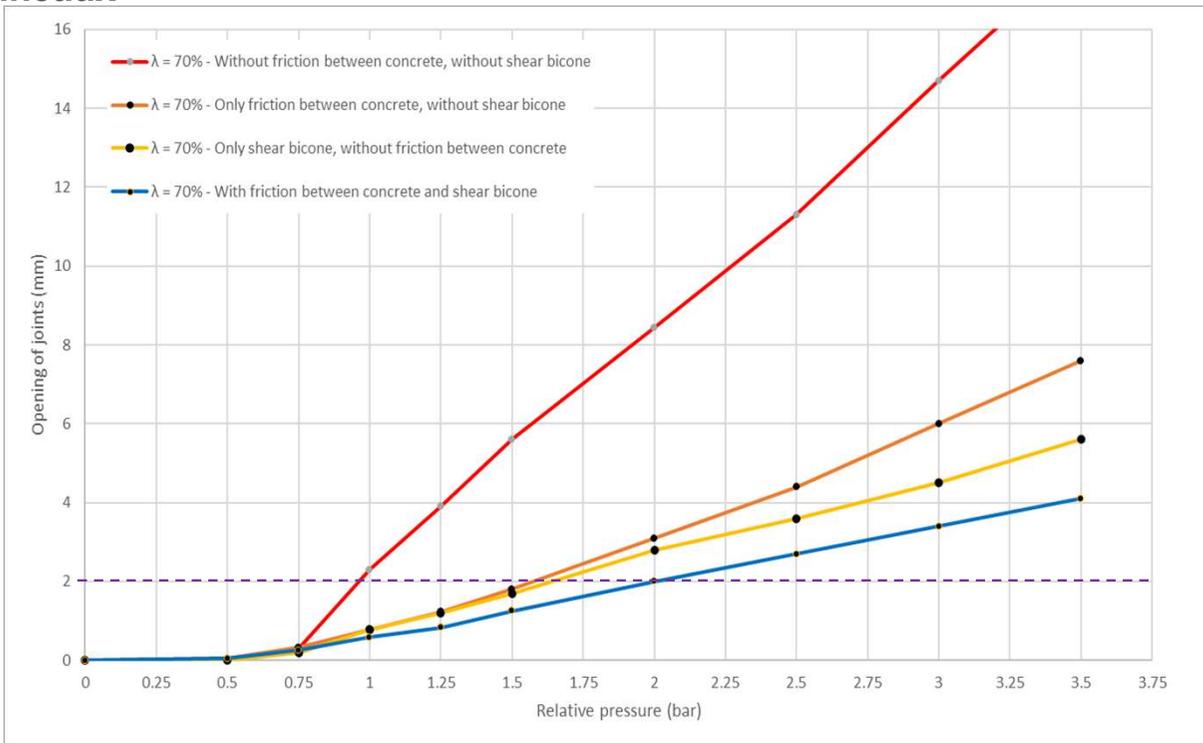
Le point de décollement des voussoirs et l'ouverture des joints, pour une configuration donnée, est fonction de la pression intérieure et du taux de déconfinement.

Dans le graphique à côté:

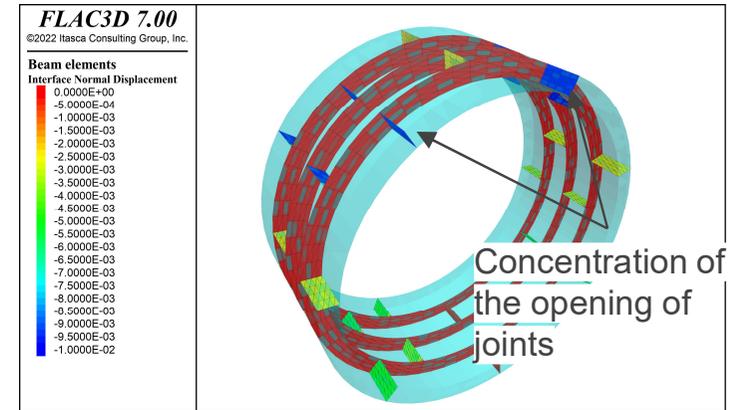
- les joints s'ouvrent à partir de 0,5 bar de pression relative ;
- le seuil d'ouverture des joints (2 mm) est atteint à partir de :
 - 1,3 bars avec un taux de déconfinement de 80%
 - 1,7 bars avec un taux de déconfinement de 60%
 - 2,2 bars avec un taux de déconfinement de 20%.

3. VOUSOIRS ETANCHES

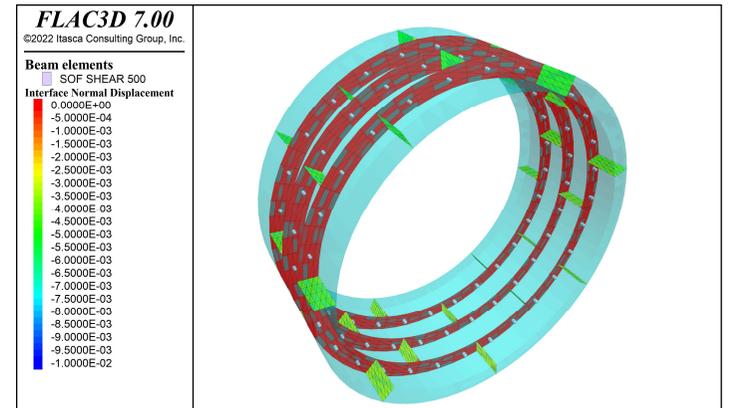
Modélisation des connecteurs et prise en compte du frottement entre anneaux



Presence of shear bicones allows a good distribution of the opening of joints



Without shear bicone



With shear bicone



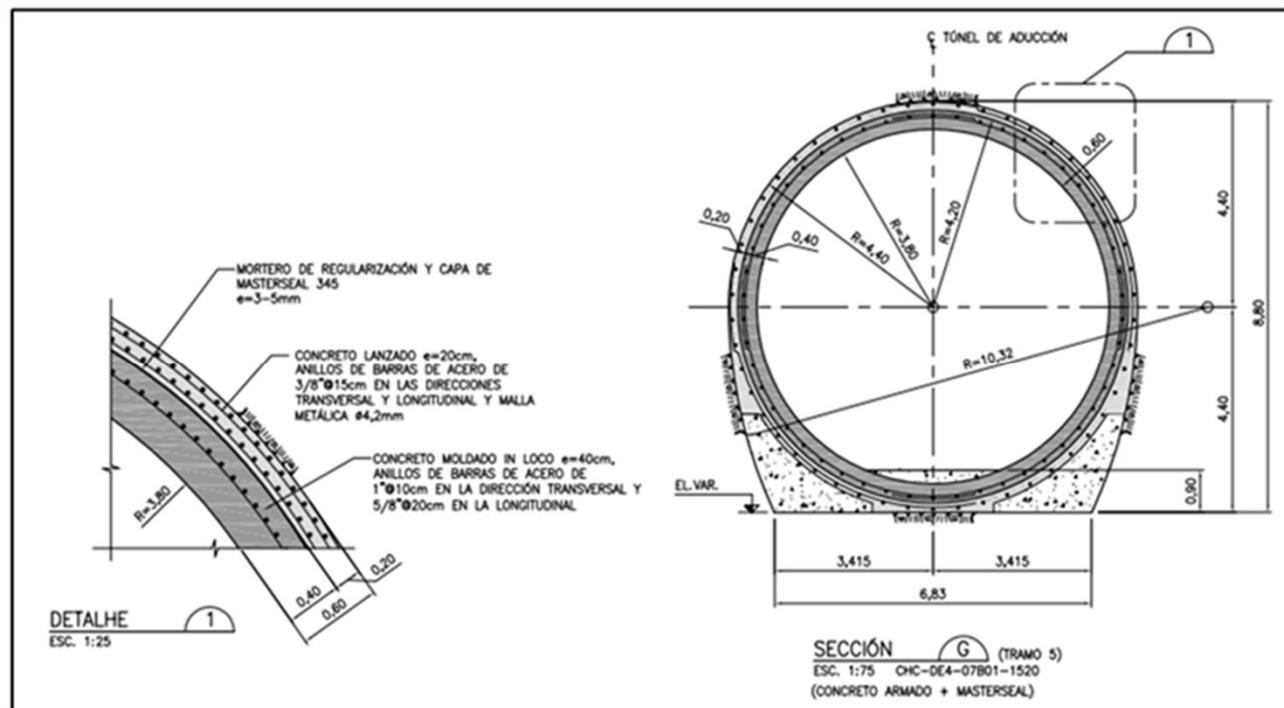
4. ETANCHEITE PAR PROJECTION D'UN ENDUIT

- Membrane synthétique se présente sous forme de poudre.
- L'application se fait à l'aide d'un équipement de béton projeté.
- Lorsqu'il est projeté sur la surface d'application, ép. de 3 à 5 mm, il sèche en moins d'une heure et passe d'une pâte collante à une membrane élastique.
- Habituellement, la membrane est appliquée en plusieurs couches de couleurs différentes, pour vérifier leur application correcte



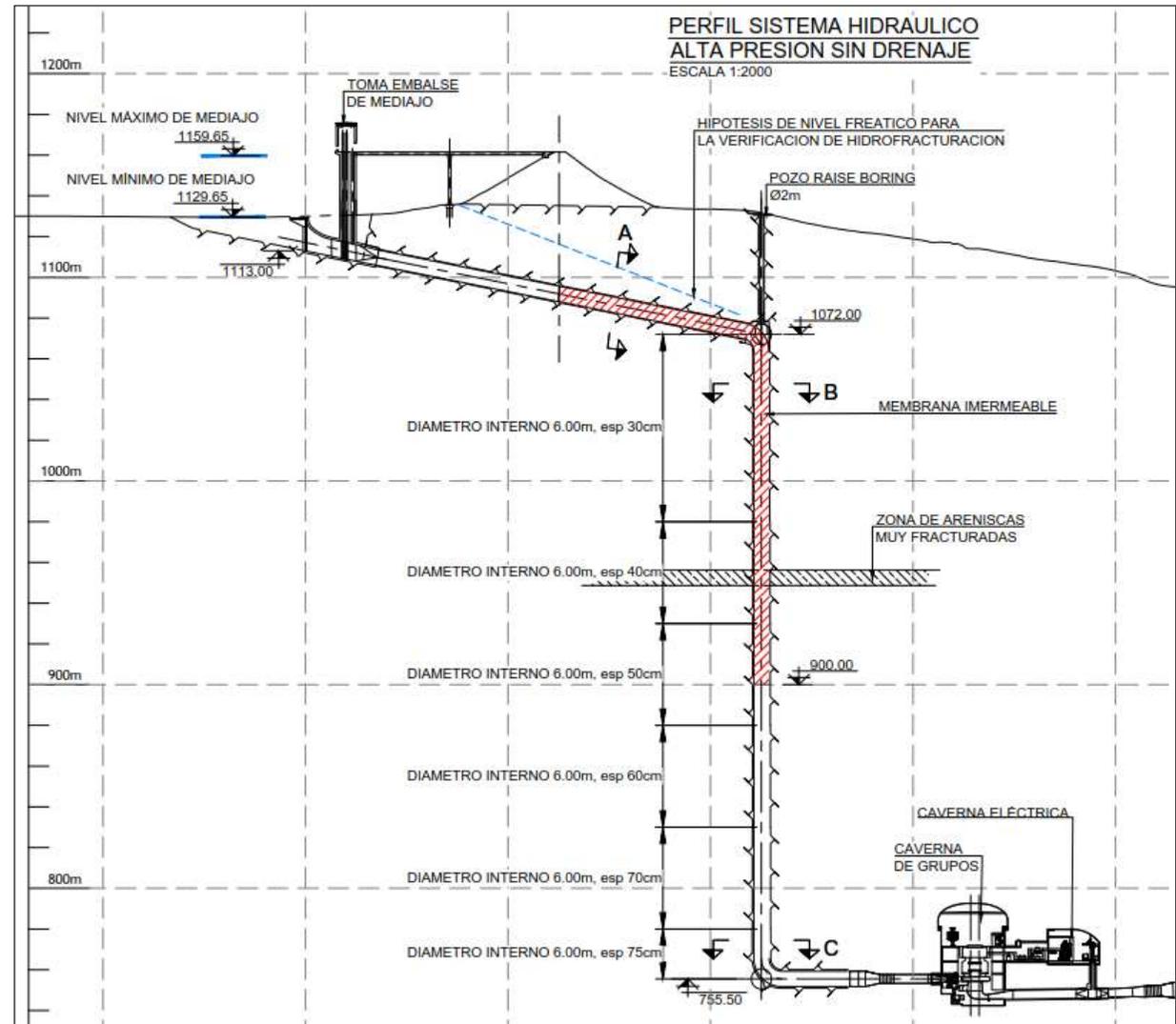
4. ETANCHEITE PAR PROJECTION D'UN ENDUIT

- Au cours des dernières années, cette solution est utilisée pour l'étanchéité des tunnels et des puits.
- Dans les galeries hydrauliques, cette mesure peut être prise pour réduire la perméabilité du revêtement au lieu d'injecter le rocher.
- Mais lorsque il y a un risque d'hydro-fracturation, cette solution n'est pas assez sûre et n'est pas recommandée.
- De plus, peu de retours sur la durabilité d'un tel produit ne sont disponibles.



5. MEMBRANES ETANCHES

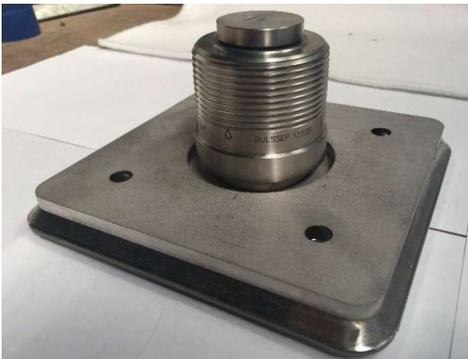
- Lorsqu'il n'y a pas de risque d'hydrofracturation, il est possible de réduire les pertes et/ou de fuites d'eau par mise en place d'une membrane étanche en PVC.
- La membrane peut être placée à l'intrados ou en sandwich.



5. MEMBRANES ETANCHES

Membrane placée à l'intrados

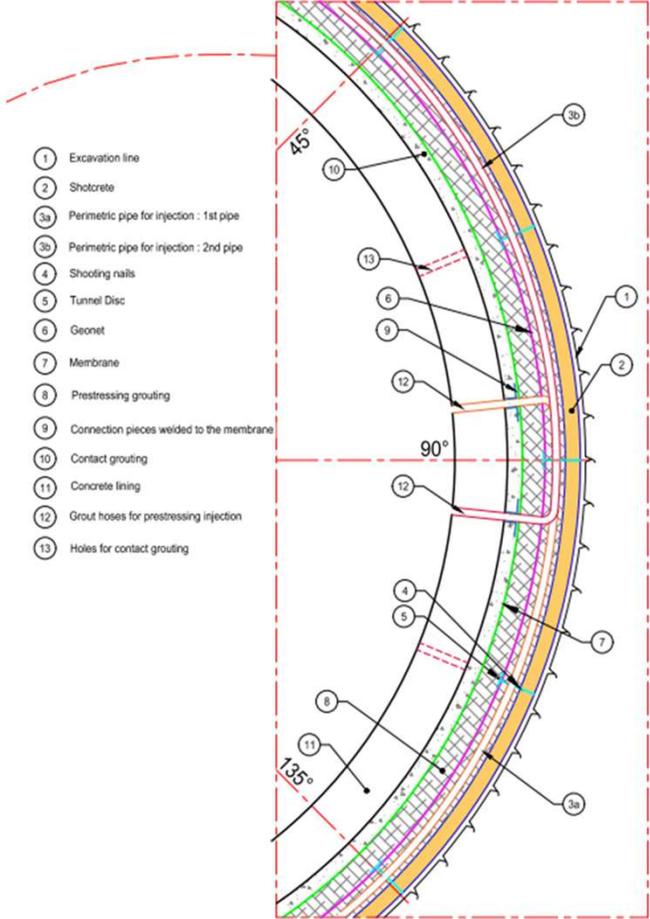
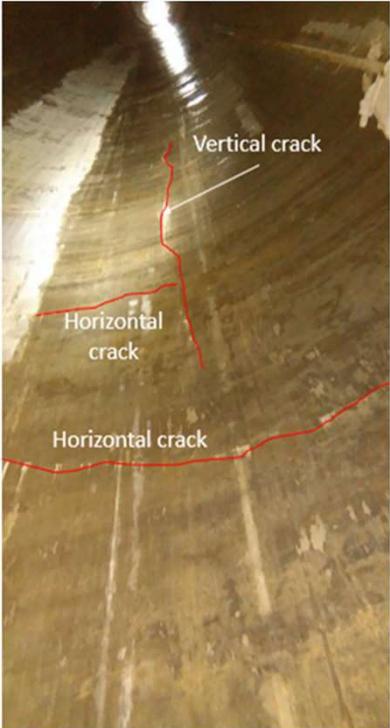
- La membrane en PVC est maintenue tendue au moyen de plaques de fixation en acier inoxydable.
- Pour contrôler la différence de pression entre l'intrados et l'extrados, des valves unidirectionnelles - laissant passer l'eau dans un sens pour une surpression donnée - peuvent être installées.



5. MEMBRANES ETANCHES

Membrane placée en sandwich

➤ La membrane en PVC est placée entre deux couches de béton et ainsi protégée.



5. MEMBRANES ETANCHES - REX

Membrane placée à l'intrados

- Les quelques retours d'expérience sur la solution membrane placée à l'intrados sont très mitigés car la membrane n'est pas protégée et soumise directement aux ondes de pressions des transitoires hydrauliques.

Membrane placée en sandwich

- Peu de retour d'expérience
- Problématique d'endommagement de la membrane coincée dans les fissures du béton – en particulier lors des transitoires. L'ouverture des fissures dans le béton lors des divers cas de charge hydrauliques est un paramètre important.

MERCI POUR
VOTRE ATTENTION