



# Ouvrages hydrauliques en charge en conditions géologiques difficiles

Paris,  
13.06.2024

---

## Indice

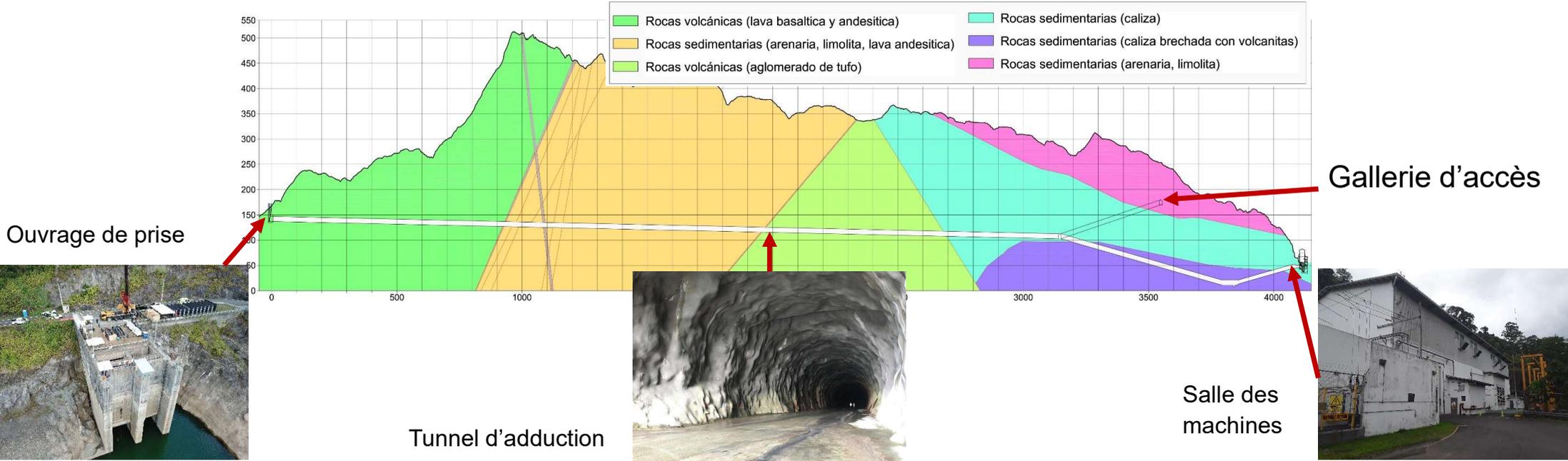
\_ PH n °1 (PAN) – Environnement karstique

\_ PH n ° 2 (GTM) – Argile sensible à l'eau en milieu karstique

# PH n°1 (PAN) – Environnement karstique

## Présentation générale du projet

- \_ Localisation: Panama
- \_ Puissance installée:  $P \approx 200$  MW
- \_ Débit de dimensionnement:  $Q \approx 220$  m<sup>3</sup>/s
- \_ Tunnel d'adduction:  $L = 4.1$  km,  $D = 12$  m
- \_ Galerie d'accès / cheminée d'équilibre:  $L = 480$  m,  $D = 12$  m
- \_ Revêtement des ouvrages souterrain: béton projeté



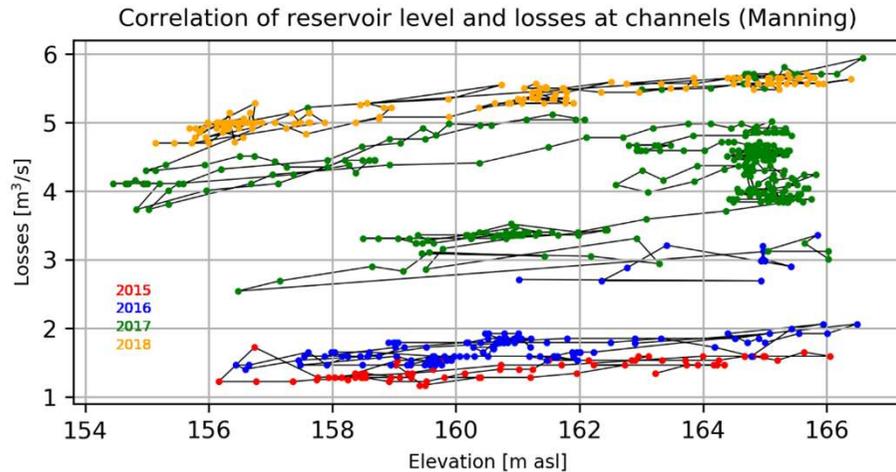
## PH n°1 (PAN) – Environnement karstique

### Cadre de l'intervention

\_ Mise en service de la centrale en 2011 mais à partir de 2015 des fuites d'eau ont été détectés au pied du talus de la salle des machines.

Le débit de fuite a progressivement augmenté jusqu'en 2019 lorsque la vidange du tunnel et le commencement des travaux de réparation sont devenus nécessaires.

→ débit de fuite jusqu'à 8 m<sup>3</sup>/s (dépend du niveau de la retenue).



- Lombardi a été missionné para le MOE pour:
- \_ Assistance à la vidange du tunnel
  - \_ Project exécutif géotechnique de la réparation
  - \_ Suivi du chantier



Fuites d'eau en pied de talus de la salle des machines (2015)

Cheneaux à proximité de las salles des machines pour canaliser le débit de fuite (2019)

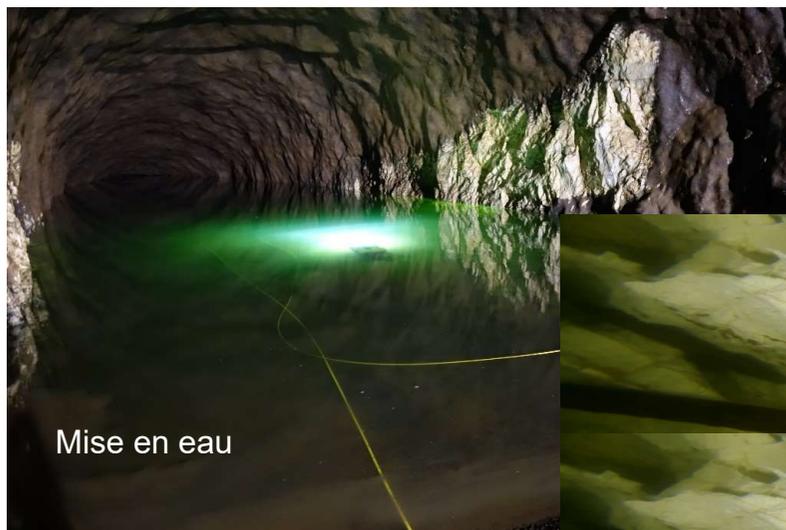
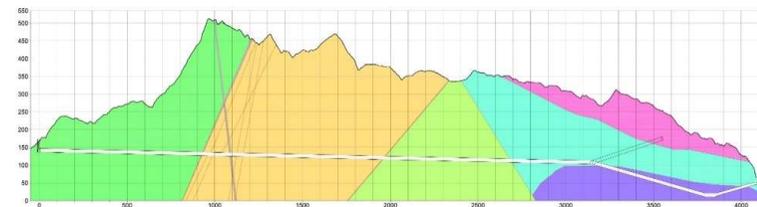


## PH n°1 (PAN) – Environnement karstique

### Inspection subaquatique (ROV)

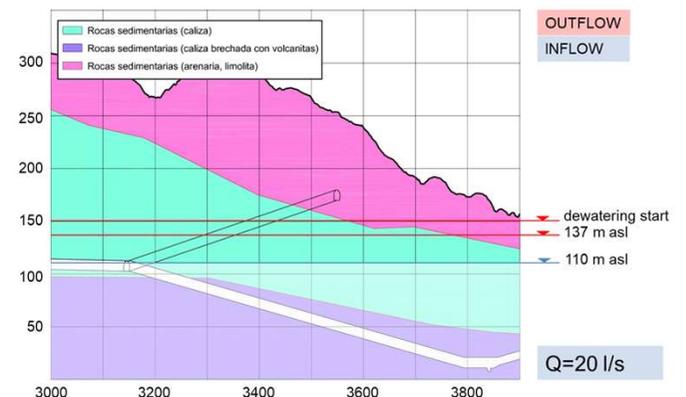
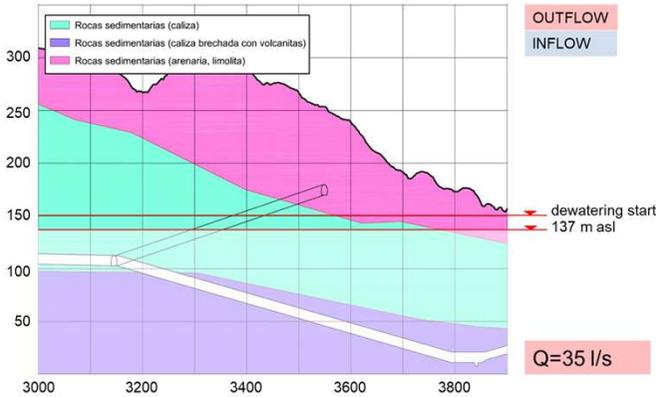
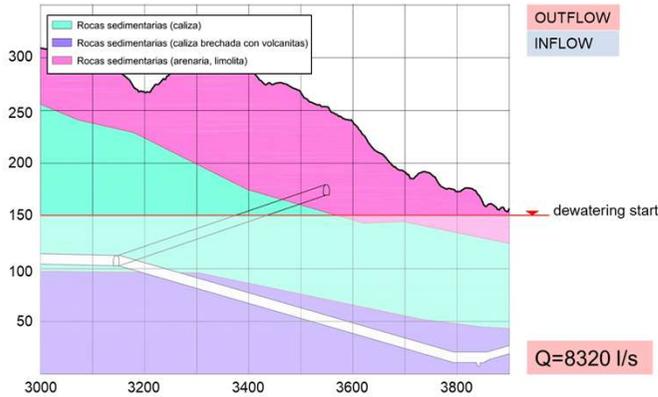
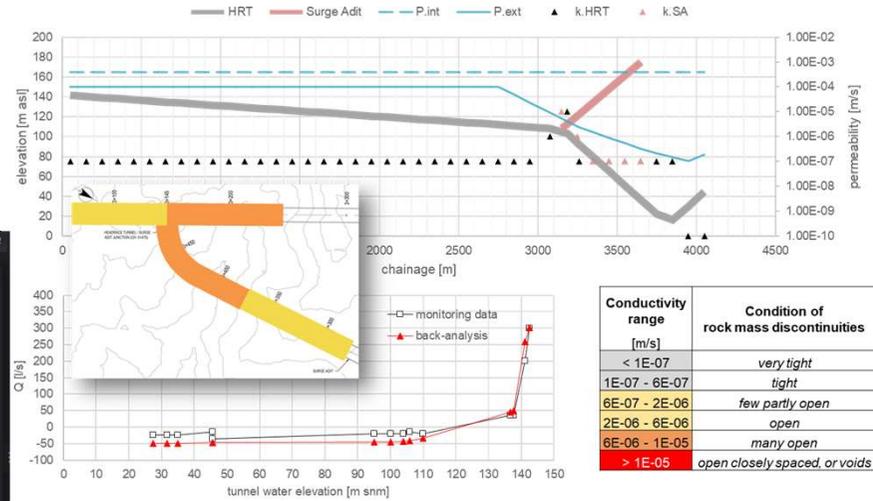
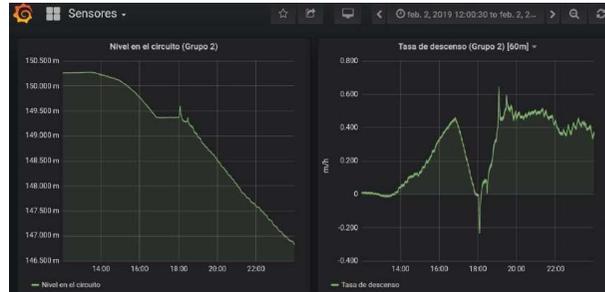
\_1ère inspection le long du tunnel d'adduction

\_2nd inspection: mise en eau depuis la cheminée d'équilibre juste avant la vidange du tunnel



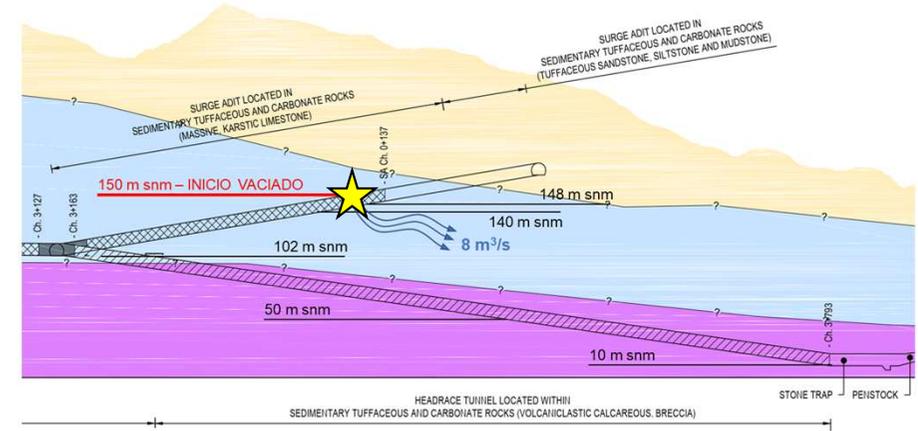
# PH n°1 (PAN) – Environnement karstique

## Estimation de la localisation des fuites durant la vidange \_Surveillance continue de la vidange à l'aide d'un système complet de capteurs



## PH n°1 (PAN) – Environnement karstique

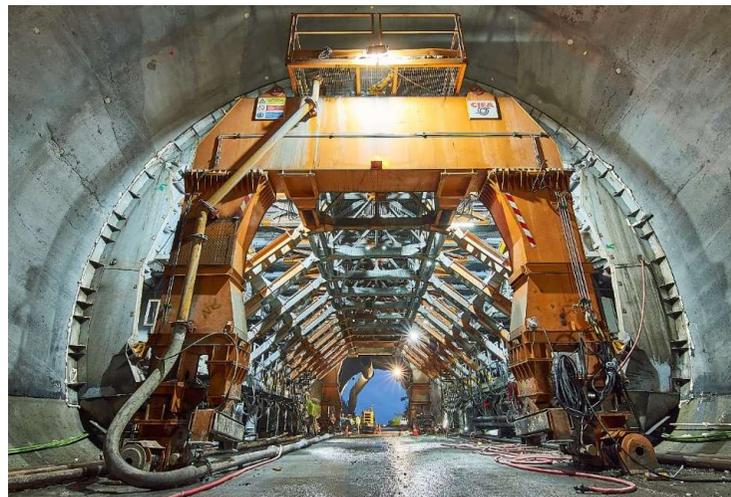
**Inspection des conduits karstiques**  
\_en quelques années d'opération le phénomène de karst c'est développé, orienté généralement selon les familles de discontinuités.  
\_les dommages étaient présent seulement dans la roche calcaire.  
\_les conduits karstiques s'étendaient sur une longueur > 600 m.



## PH n°1 (PAN) – Environnement karstique

### Solution de réparation

\_Revêtement quasi - étanche en béton de 30 cm d'épaisseur fortement armée



## PH Renace II (GTM) – Argile sensible à l'eau en milieu karstique

### Présentation générale du projet

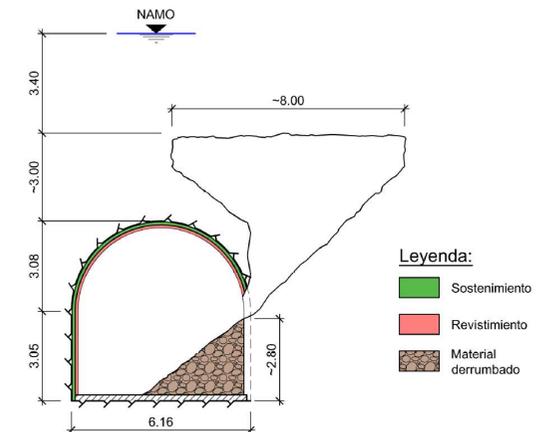
- \_ PH Renace II,
- \_ Localisation: Département d'Alta Verapaz, Guatemala
- \_ Puissance installée:  $P = 114 \text{ MW}$
- \_ Débit de dimensionnement:  $Q = 40 \text{ m}^3/\text{s}$
- \_ Tunnel d'adduction n°1 (basse pression):  $L = 3.4 \text{ km}$ ,  $D = 6 \text{ m}$
- \_ Tunnel d'adduction n°2 (haute pression):  $L = 3,9 \text{ m}$ ,  $D = 4 \text{ m}$
- \_ Mise en service effective: avril 2016.



## PH Renace II (GTM) – Argile sensible à l'eau en milieu karstique

### Cadre de l'intervention

Effondrement local de la paroi droite du tunnel n.1 découvert lors de la vidange pour maintenance



Lombardi a été missionné para le MOA pour:

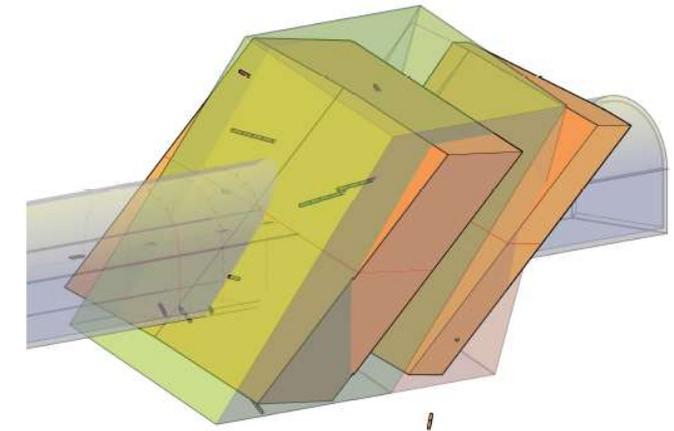
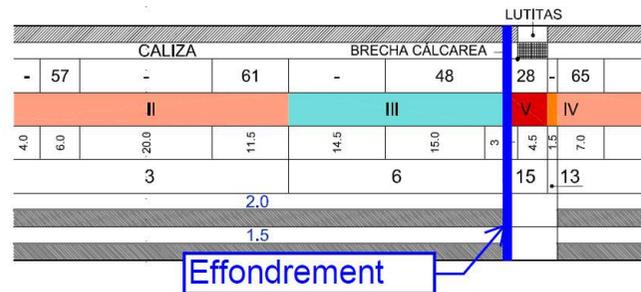
- \_ Inspection du tronçon effondré
- \_ Définition du concept de réparation et de l'étude d'exécution
- \_ Suivie du chantier

## PH Renace II (GTM) – Argile sensible à l'eau en milieu karstique

### Contexte géologique de l'effondrement

Le dommage coïncide avec une zone de faille avec présence de matériel argileux sujet à désintégration (slaking), et un environnement karstique.

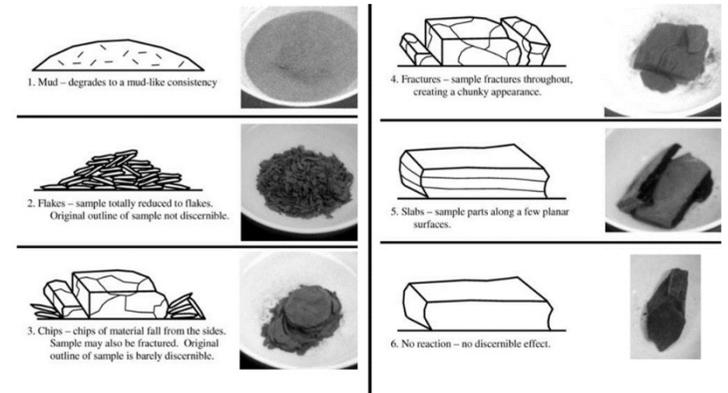
LITOLOGIA	
RMR	- 57 - 61 - 48 - 28 - 65
TIPO DE SOSTENIMIENTO	II III IV
LONGITUD DE TRAMO (m)	4.0 6.0 20.0 11.5 14.5 15.0 3 4.5 1.5 7.0
ESPESOR DE SHOTCRETE (cm)	3 6 15 13
PERNOS	T
EXPANBOL 160 kN	L
Longitud 1,8 m	



# PH Renace II (GTM) – Argile sensible à l'eau en milieu karstique

## Test de slaking

Plusieurs tests de Jar Slaking ont été réalisés sur des échantillons d'argile prélevés dans la caverne



Échantillon original



Échantillon après 5 min de saturation

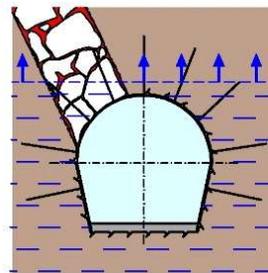
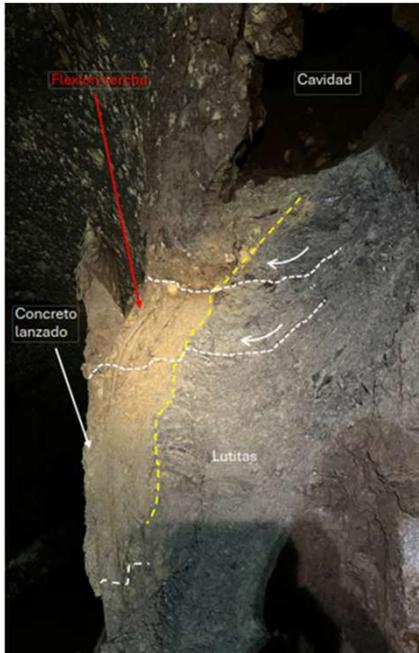


Échantillon après 24h de saturation

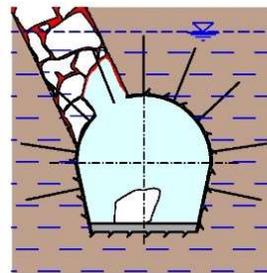
## PH Renace II (GTM) – Argile sensible à l'eau en milieu karstique

### Détermination des causes de l'effondrement

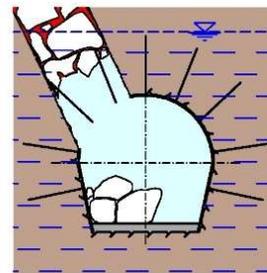
1. Saturation du massif autour du tunnel après la mise en opération
2. Début du processus de désintégration de l'argile qui déclenche la perte progressive de résistance du matériel. La présence de karst pourrait avoir accéléré le processus de désintégration.
3. La relaxation graduelle du massif rocheux dans la zone de faille augmente les charges sur le revêtement.
4. La résistance limite du revêtement est atteinte localement, provoquant l'effondrement
5. Il ne peut pas être exclu que l'effondrement ait eu lieu en plusieurs étapes



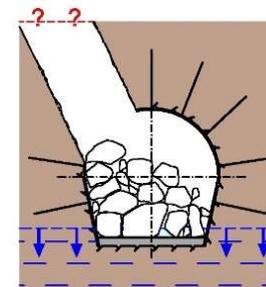
Commissioning



Beginning of the collapse due to material deterioration and overcoming of support strength



Propagation of collapse



Collapse reaches its final equilibrium

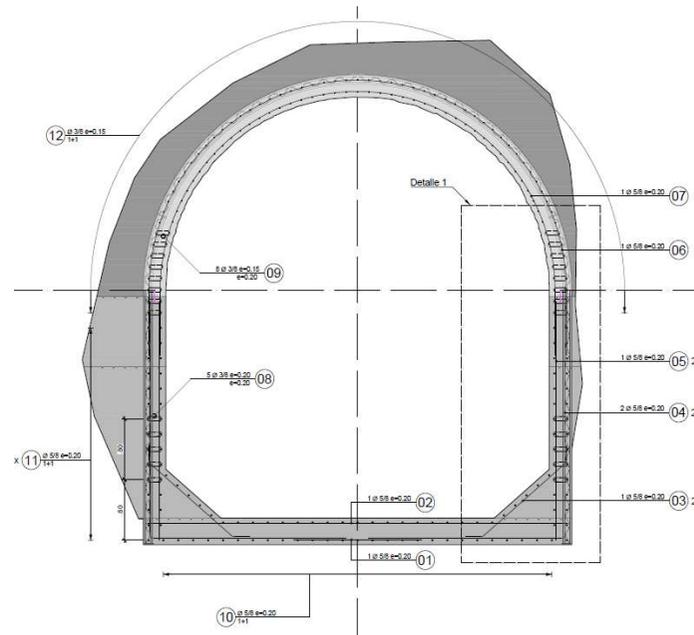
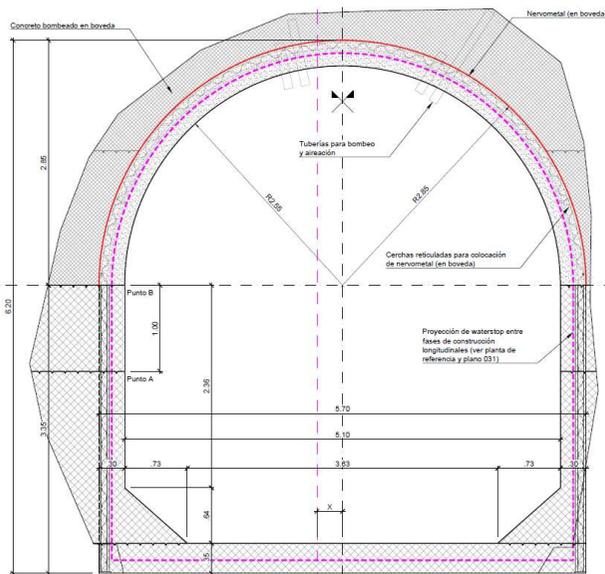
# PH Renace II (GTM) – Argile sensible à l'eau en milieu karstique

## Solution de réparation

Construction d'un nouveau revêtement robuste « quasi-étanche » qui puisse:

- \_ Résister aux efforts transmis par l'argile en condition désintégrée
- \_ Limiter la perméabilité pour réduire les filtrations depuis l'intérieur du tunnel et éviter la circulation d'eau à l'intérieur du massif rocheux

## Phase 1: construction du nouveau revêtement



# PH Renace II (GTM) – Argile sensible à l'eau en milieu karstique

## Solution de réparation

Phase 2: remplissage de la cavité et réalisation d'une campagne d'injection

