

# REX et Accidentologie des ouvrages hydrauliques en charge

François Laigle



## Les mécanismes à l'origine des pathologies et accidents

Mécanismes hydrauliques - Fuites et pertes d'eau

Instabilités et désordres d'origine mécanique

Phénomènes hydro-mécaniques

Types de pathologies et enjeux

Conclusions

Références



## Les mécanismes à l'origine des pathologies et accidents

### Phénomènes et mécanismes hydrauliques

- Fuites et pertes d'eau du tunnel vers le massif
- Drainage du massif par la galerie

### Phénomènes hydro-mécaniques

- Hydro-fracturation du massif
- Erosion interne
- Drainage du massif par la galerie et tassements...
- Dissolution et création de cavité...
- Glissements de terrains et coulées de boue...

### Phénomènes mécaniques

- Modification locale de l'état des contraintes
- Instabilité du tunnel et obstruction avec Rupture du revêtement/soutènement et effondrement
- Instabilité générale et soulèvement du massif

# Mécanismes hydrauliques - Fuites et pertes d'eau

## Limitation des pertes en fonction de considérations

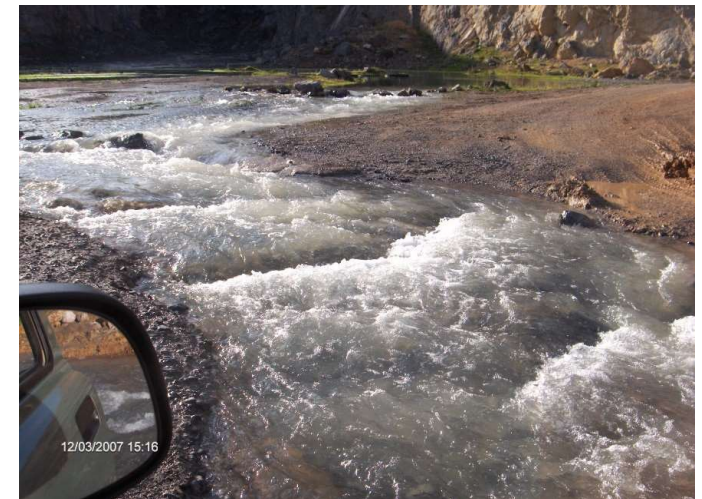
- ❑ Economiques
- ❑ Environnementales
- ❑ Hydrogéologiques
- ❑ Géotechniques

Qu'est-ce qu'une perte d'eau « excessive »?

## Dépend des spécificités du projet

- ❑ Critère économiques et pertes de revenus
- ❑ Quantité d'eau disponible et origine
- ❑ Du contexte géologique et géotechnique

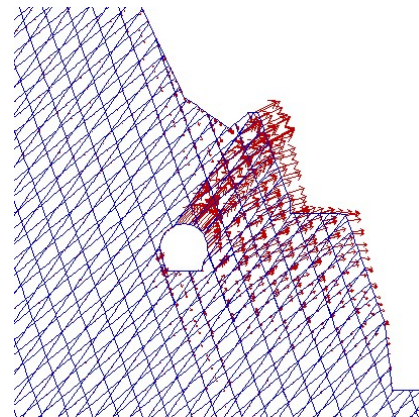
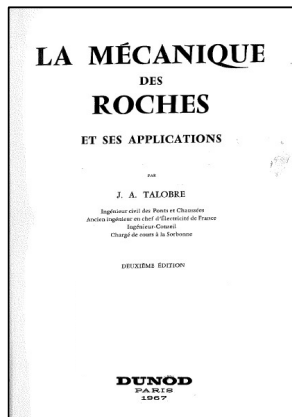
Par exemple:  
1 l/s/km/bar à 10 l/s/km/bar



# Instabilités et désordres d'origine mécanique

Instabilités locales ou générales associées à :

- ❑ Une modification de pressions interstitielles dans le massif
- ❑ Une évolution des propriétés du massif
- ❑ Un lessivage du remplissage des fissures/fractures
- ❑ Une dégradation du soutènement/revêtement
- ❑ Une couverture insuffisante de terrain



# Phénomènes hydro-mécaniques

## Risque d'hydro-fracturation

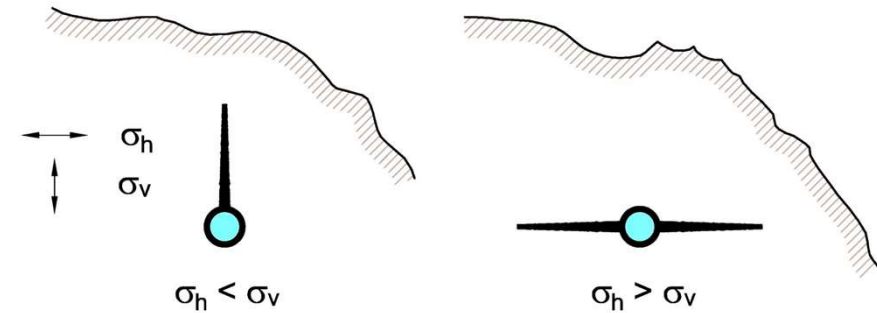
❑ **Pression d'eau > Contrainte dans le massif**

➤ Conséquences directes:

- Ouverture de fractures
- Augmentation des pertes d'eau
- Écoulements en surfaces ou cavités proches
- ...

➤ Conséquences indirectes:

- Fuites incontrôlées et excessives
- Évolution de la piézométrie dans le massif
- Glissement de terrain
- Coulées de boues
- ...



# Phénomènes hydro-mécaniques

## Glissements de terrain et coulées de boue

- ❑ Injection d'eau dans le massif
- ❑ Proximité de l'ouvrage du versant

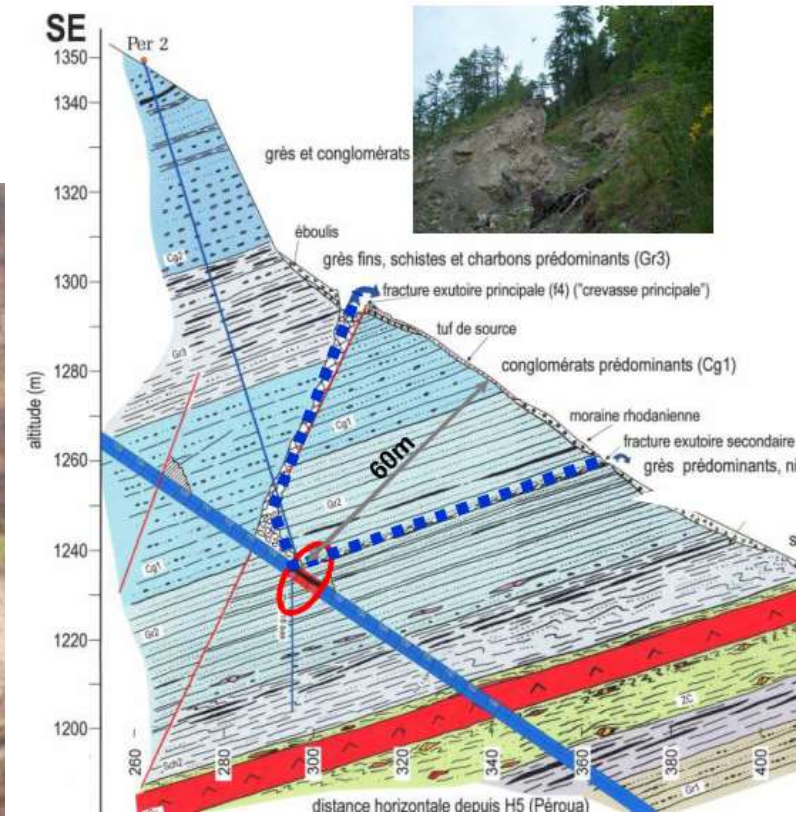


Tunnel de Pucara



Aménagement de Cleuson-Dixence

12 décembre 2000



## Phénomènes hydro-mécaniques

### Évolutions des caractéristiques du massif

- ❑ Dissolution des roches évaporites (Anhydrites, gypes,...)
- ❑ Destructuration et érosion des roches argileuses ou érodables (argiles, mylonite, sables argileux...)
- ❑ Gonflement
- ❑ ...





## Types de pathologies et enjeux

### Désordres sans impact à court terme sur les conditions d'exploitation

- ❑ Désordres n'ayant pas nécessité une interruption prolongée d'exploitation et traités dans le cadre de la maintenance courante
- ❑ Pas d'impact sur la sûreté
- ❑ Fissuration excessive, pertes d'eau...

Année de mise en eau	Ouvrage	Pays	Charge (m)	Revêtement	Désordre observé en galerie	Effet et désordres induits	Commentaire
1960	La Bathie	France		BA	Fissuration importante du revêtement		Dissolution Gypse Anhydrite
1968	Hongrin-léman	Suisse	135	BA	Fissuration importante du revêtement		Faible couverture
1974	Dorchester	USA	140	BNA	Fissuration excessive du béton		Z/H=60-70/140=0.50
1976	Hattelberg	Autriche	70	BNA	Fissuration importante du revêtement		
1983	Helms	USA	560	BNA	Fuites Excessives	Résurgences en	Sheared zone
	Sydney	Australie	150	BNA	Fissuration importante du revêtement		
1927	Liebwieller	France		BNA	Fissuration importante du revêtement		Roche gonflante
1079	Eyglie	France		BNA	Fissuration importante du revêtement		Mylonite Argile - Zone de faille
1971	Bjerka	Norvège	72	NR	Fuites Excessives		Z/H=58/72=0.8. faible contrainte le long de fractures subverticales
	Chivor	Colombie		NR	Fuites Excessives		
1919	Herlandsfoss	Norvège	120	NR	Fuites Excessives		Hydro fracturation Faible couverture
1960	Mammoth Pool	USA		NR	Fuites Excessives		
	Kaunertal	Autriche	120 170	Precontraint	Fissuration importante		Erosion Argile



- Faible couverture de terrain
- Roches altérables/érodables/évolutives
- Revêtement en béton coffré essentiellement

# Types de pathologies et enjeux

## Désordres impactant les conditions d'exploitation à court terme

- ❑ Effondrement et phénomène à cinétique rapide
- ❑ Pas ou peu d'enjeux sûreté
- ❑ Effondrement et obstruction totale de la section
- ❑ Travaux importants de réparation et pertes d'exploitation élevées



Année de mise en eau	Ouvrage	Pays	Charge (m)	Revêtement	Désordre observé en galerie	Effet et désordres induits	Commentaire
1962	Zakucca	Yougoslavi	50	BNA	Effondrement	Marne altérée	
1907	Refrain	France		BNA	Effondrement	marne	Béton pauvre
1932	Brommat	France		BNA	Effondrement	Faïlle Argileuse Erosion	Béton pauvre Changement de mode d'exploitation
1925	Big Creek 6	USA		BNA (?)	Effondrement	Erosion remplissage fissure - Chute de blocs	
1965	Batang-Padang	Malaisie		BP	Effondrement	Erosion - Chute de blocs lors d'une	
2009	Gendoe	Grande Bretagne	670	BP	Effondrement	Roche fracturée avec remplissage d'argile	
2003	Rio Esti	Panama	112	BP	Effondrement	Roche fracturée avec remplissage d'argile gonflante	
2010	La Higuera	Chili		BP	Effondrement	Roche faible	
2017	Shuakhevi	Georgie		BP	Effondrement	Roche faible Géologie complexe Argile	
	Hemesdal	Norvège		NR	Effondrement		Argile gonflante dans fissures
1954	Kemano	Canada	40	NR	Effondrement	Erosion	Erosion Argile Variation pression
1968	Iemonthyne	Australie		NR	Effondrement	Erosion	Erosion Crushed
1953	Tasen	Suède	15	NR	Effondrement	Erosion	Erosion Argile Gonflante
1961	Tauma-Tumut	Australie	135	NR	Effondrement	Erosion	Erosion Argile dans joints
	El Frayle	Perou		BNA	Eventrement		Faible couverture - ouvrage de dérivation.

- Roches altérables / érodables / évolutives
- Revêtements en béton projeté ou pas de revêtement

# Types de pathologies et enjeux

## Désordres impactant les avoisinants et la sûreté de l'aménagement

- ❑ Glissements de terrain ou coulées de boue
- ❑ Risques potentiellement importants pour la sûreté

Année de mise en eau	Ouvrage	Pays	Charge (m)	Revêtement	Désordre observé en galerie	Effet et désordres induits	Commentaire
1954	Genitzbach	Autriche		BP	Fuites Excessives	Glissement de terrain	
	Arc-Isère	France		BNA	Fissuration importante du revêtement	Fontis en surface	Dissolution Gypse Anhydrite
1963	Agri	Italie	90	BA	Fuites Excessives	Glissement de terrain	Erosion argile
1969	Lete-Sava	italie	50	BA	Fuites Excessives	Glissement de terrain	Erosion Argile Z/H=0.1
1951	Whatshan	Canada	215	BA	Fissuration importante du revêtement Fuites excessives	Glissement de terrain	
1977	Pucara	Equateur	65	BA	Fissuration importante du revêtement Fuites excessives	Glissement de terrain	Faible couverture
1910	Kandergrund	Suisse		BNA	Fissuration importante du revêtement Fuites excessives	Glissement de terrain	Faible couverture - Rupture sur transitoires
1970	Askora	Norvège	193	NR	Fuites Excessives	Erosion	Erosion Argile
1913	Big Creek 2	USA		NR	Fuites Excessives	Glissement de terrain	
1968	Byrte	Norvège	280	NR	Fuites Excessives	Mouvement de terrain	Faible couverture
1974	Fisher	Australie	250	NR	Fuites Excessives	Glissement de terrain	dans zones non
	Viejo Quxal	Guatemala	520	BNA	Fuites Excessives	Glissement de terrain	Dissolution Gypse Anhydrite
	Beni Haroun	Algérie	10	Voussoirs	Fuites excessives	Résurgence en surface	Karst Mauvais blocage des voussoirs



- Non respect des critères de couverture ou hydro-fracturation
- Étanchéité insuffisante ou défailante

## Types de pathologies et enjeux

Cinétique d'évolution	Critères économiques	Critère sûreté
<p>La cinétique d'évolution est plus lente dans le cas d'un tunnel avec un revêtement en béton.</p> <p><b>L'absence de revêtement ou la présence d'un soutènement définitif en béton projeté/boulon n'est pas en mesure de contrôler ou de ralentir l'évolution critique</b> d'un mécanisme d'effondrement si l'ouvrage est creusé dans des terrains altérables, faibles, érodables ou solubles</p> <p><b>La réalisation d'inspections visuelles est nécessaire, avec une fréquence d'autant plus grande lors des premières années d'exploitation que le tunnel n'est pas revêtu ou en béton projeté définitif.</b></p>	<p><b>La présence d'un revêtement en béton apporte une « ductilité » à l'ouvrage</b>, réduisant significativement le risque d'effondrement à court terme et sans anticipation, sous réserve de visites régulières et d'une maintenance préventive adaptée.</p> <p><b>L'absence de revêtement rend plus « fragile » l'ouvrage</b>, en reportant toute la fonction de stabilisation sur le terrain (<i>sans contribution supplémentaire d'une structure de revêtement</i>).</p>	<p><b>Le critère de sûreté est généralement associé au risque d'instabilité de versant sous l'effet de percolations</b> trop importantes dans le terrain (<i>remontée de la nappe phréatique et résurgence dans les terrains de surface</i>); ce phénomène étant amplifié par une éventuelle hydro-fracturation du massif.</p> <p><b>Le « moteur » est l'injection d'eau dans le massif par étanchéité insuffisante de l'ouvrage.</b> Un revêtement en béton armé n'est pas apte à pallier le risque d'hydrofracturation.</p> <p><b>Ce risque d'instabilité de versant ne peut être contrôlé et maîtrisé que par une bonne connaissance du contexte géologique</b></p>

## Conclusions

- **Ouvrages spécifiques associés à des situations de chargement différentes des autres ouvrages souterrain → Critères supplémentaires pour le choix et la conception des soutènements/revêtements.**
- **Les récents accidents sont liés à des zones de failles ou de matériaux altérables/érodables, associés à une conception inadaptée des soutènements, en particulier relativement au critère d'étanchéité.**
- **Les problématiques de sûreté sont essentiellement liées à des glissements de terrain ou coulées de boue concernant les ouvrages qui:**
  - **sont proches de la surface ←→ charge intérieure**
  - **ne sont pas suffisamment étanches.**
  - **dans un massif perméable.**
- **La présence d'un revêtement en béton coffré constitue une barrière supplémentaire de sécurité mais pas nécessairement suffisante.**
- **Adapter les fréquences d'inspection en fonction de la sensibilité de l'ouvrage et de ses revêtements**

# Références

1. K. Kanta Panthi et al (2016)  
Review of the Major Failure Cases of Unlined Pressure Shafts/Tunnels of Norwegian Hydropower Projects. Hydro Nepal Journal of Water Energy and Environment - January 2016
2. V. M. Sharma (1994)  
Cases of tunnel failures in two hydro-electric projects. XIII ICSMFE, New Delhi, India. (1994)
3. A. Schleiss (1988)  
Design of Reinforced Concrete-lined Pressure Tunnel - Tunnels and Water. Serrano(ed.). 1988 Balkema
4. EPRI  
Design Guideline for pressure Tunnels and Shafts – EPRI AP-5273 – Juin 1987A.
5. Palmström & E. Broch  
The design of unlined hydropower tunnels and shafts : 100 years if Nowegian experience. Hydropower & dams – Issue 3 – 2017
6. D. Brox  
Hydropower Tunnel Failures. Risks and Causes – London Engineering Group Conference 2018. Chesham England – October 18-19.
7. Glendoe  
Court rules against Gendoe client – Tunnels and Tunnelling International – January 2017.



## Hydropower Tunnel Failures Risks and Causes

Dear Sir,  
Consulting, Lancashire,  
Canada

### Abstract:

The hydroelectric industry has unfortunately experienced several tunnel failures over recent years. The risks and challenges for the successful design and construction of hydroelectric tunnels are much more elevated in comparison to other types of tunnels as hydroelectric tunnels are subjected to dynamic operating conditions that are not always fully known prior to the operation. Many hydroelectric tunnels have been designed and constructed as unlined tunnels incorporating concrete linings only in limited areas based on technical assessments performed during and at the later stages of construction. The technical assessment can, however, be subject to limited access, limited data collection from ongoing, controlled reliability of IBM excavated tunnels, and the misunderstanding of dynamic hydraulic operations. The main risks associated with the design and construction of hydroelectric tunnels along with causes of recent collapses are presented and explained along with suggestions for improved industry practice.

### 1. Introduction

The design and construction of hydroelectric tunnels are based on significantly different design criteria and practices in comparison to other tunnels for civil and mining infrastructure. Hydroelectric tunnels are subjected to internal and dynamic loading conditions during operations and the performance of a tunnel can only be regularly monitored by pressure instrumentation. Physical inspections of hydroelectric tunnels to confirm their structural integrity require an outage of operations with de-watering of the tunnel that results in the loss of generation and associated revenue and may also cause an impact to the integrity of the tunnel.

A number of hydroelectric tunnel failures occurred in the 1920s and 1930s including those at Kemano and Snowy Mountains Laccos, (1975). These same types of failures continue to plague recent and current practice in the industry. An alarming number of failures of hydroelectric tunnels have occurred in recent years, many of which occurred shortly after commissioning, and the reasons for which have some similarities. Figure 1 presents a summary of a database of collapses in hydroelectric tunnels. The risks associated with the design and construction of hydroelectric tunnels are presented along with causes of collapses.

### 2. Hydroelectric tunnel planning

The success of hydroelectric tunnel planning and design depends significantly on adequate geotechnical information as it has been demonstrated that cost and schedule overruns have been caused by a lack thereof (Hoek and Palmieri, 1998). Brox (2017a) presents the typical requirements for geotechnical investigations for hydroelectric tunnels. The planning and design for hydroelectric tunnels should adopt the well-established design principles and criteria including the prevention of aeration and leakage with adequate in situ confinement from the surrounding rock, the inclusion of a surge facility, adequate initial tunnel supports and final linings subject to the anticipated long-term behaviour of the geological conditions, provision of a rock trap for predominantly unlined tunnels, and steel lining sections where inadequate in situ stresses are present (EPRI, 1987).

Typical project layouts including high elevation low gradient tunnels with connection shafts or inclined tunnels to underground powerhouse are presented by Benson (1989) and important geological and geotechnical considerations for the design of pressure living types are presented by Merritt (1999), both of which should be fully respected in order not to compromise the design for future operations.