

# Traversée centrale des Pyrénées

---

## Protection des aquifères et des sources lors du creusement des tunnels

**Jean PIRAUD**

*Ingénieur géotechnicien, ANTEA*

*Président du Comité technique de l'AFTES*

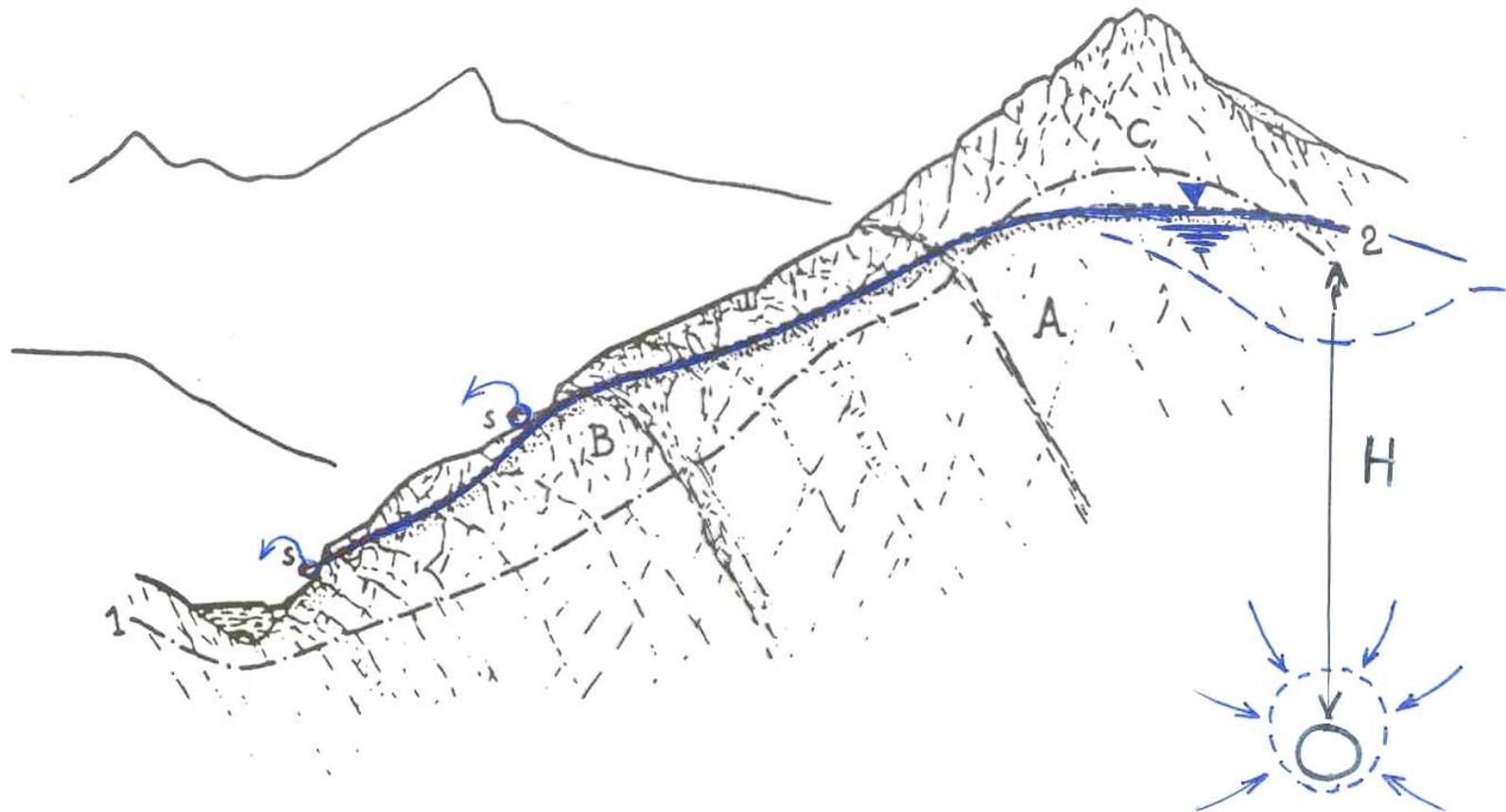
# Plan de l'exposé

---

- 1. L'eau dans les massifs rocheux**
- 2. L'étanchement et le drainage des tunnels**
- 3. L'impact hydraulique des tunnels en surface**
- 4. Exemple : le projet de tunnel transalpin (Lyon-Turin)**

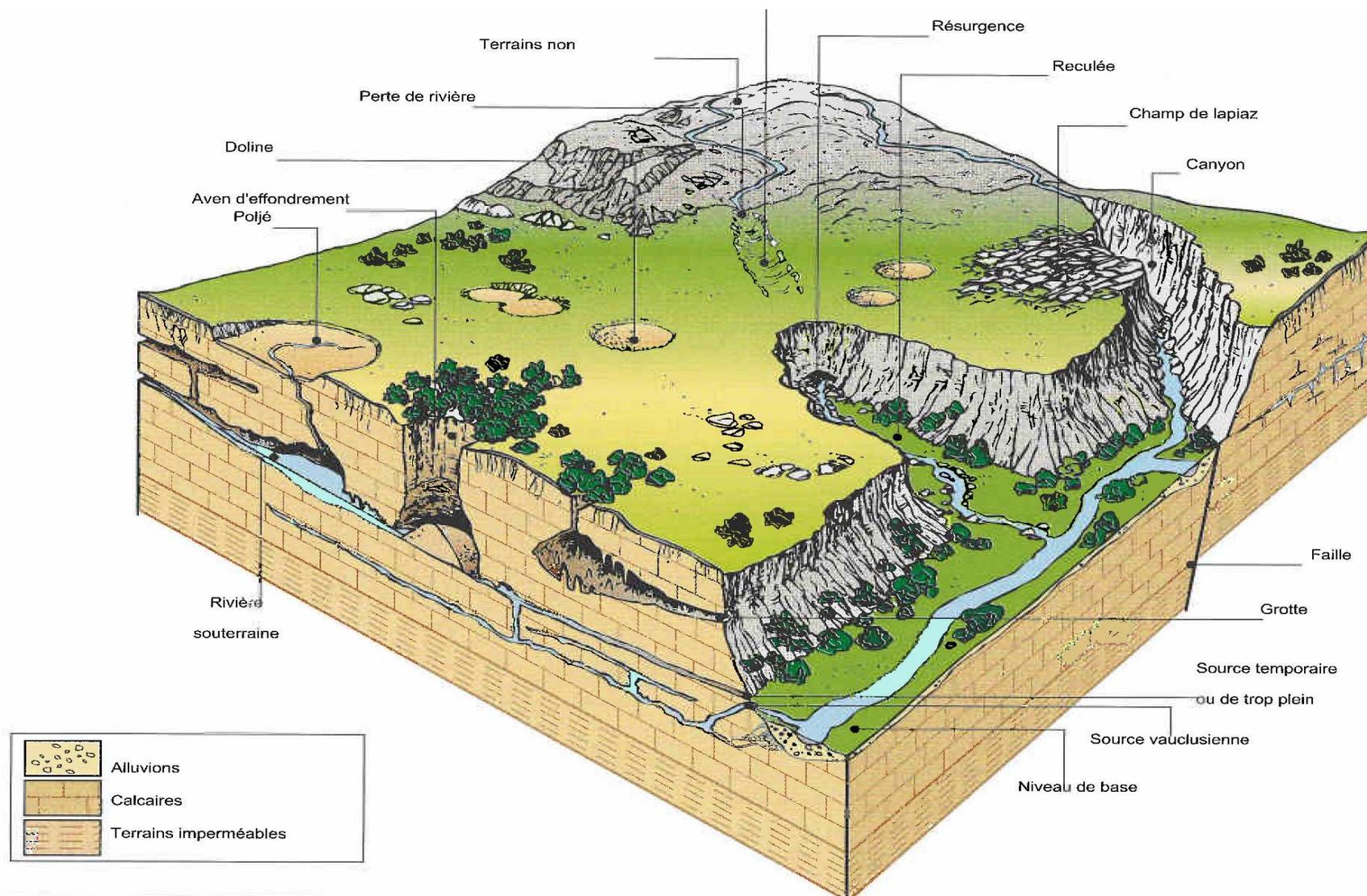
# En général, les montagnes sont pleines d'eau !

---



(sauf dans les massifs karstiques)

# Massif karstique



# L'eau dans les massifs rocheux

---

4 catégories de massifs aquifères :

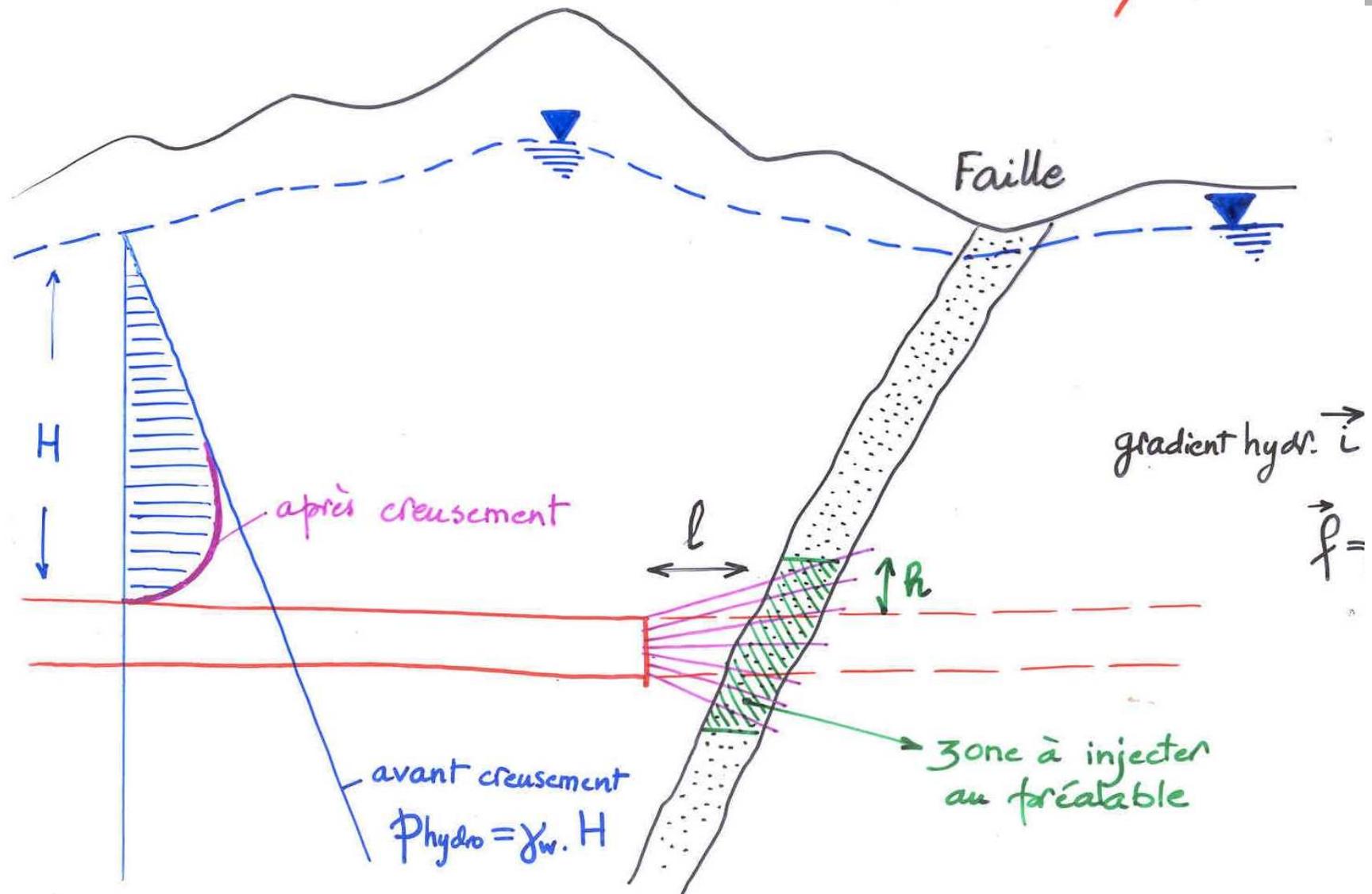
*Perméabilité (K)*

- **Aquifères de socle** (massifs cristallins) *très faible*
- **Aquifères complexes de montagne**  
(alternances de couches fracturées, poreuses, compactes...) *faible à moyenne*
- **Aquifères karstiques** (calcaires, gypse) *forte*
- **Aquifères alluviaux** (sables et graviers) *très forte*

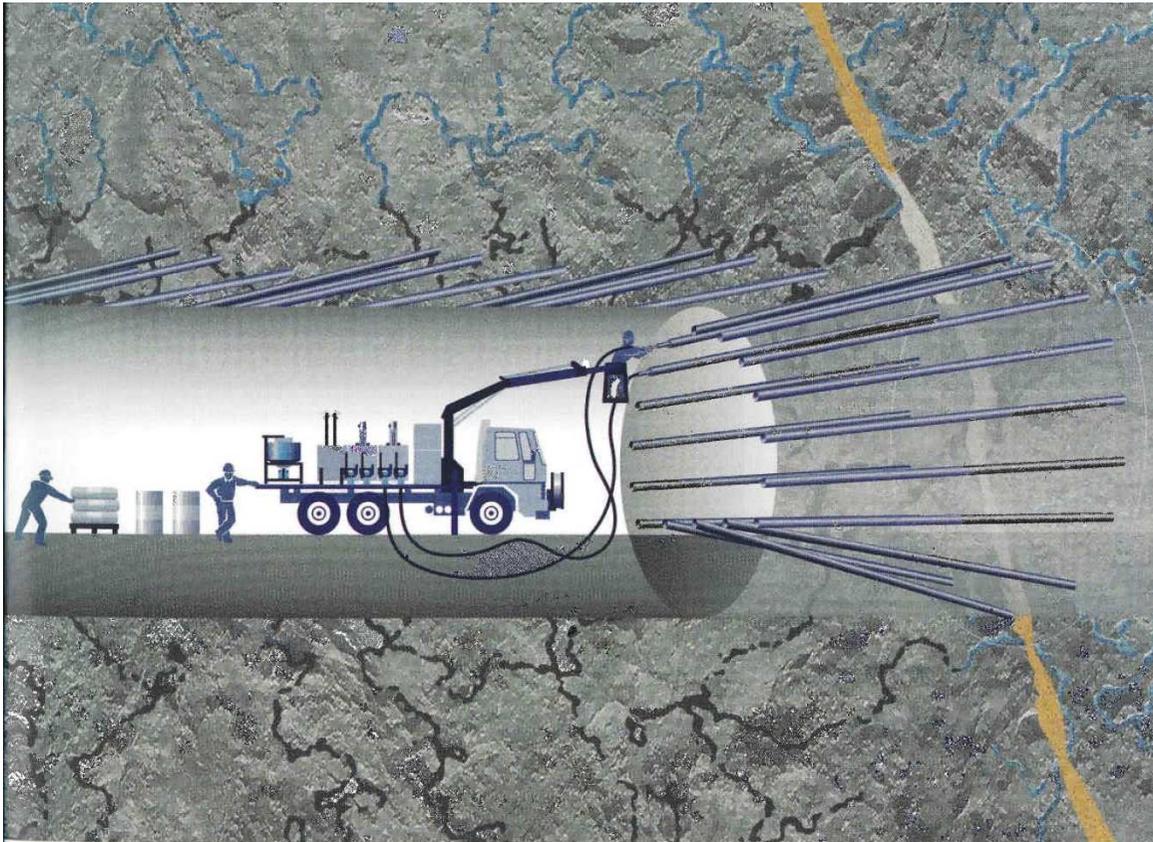
*La perméabilité varie de 1 à 1 million*

*En plus, il y a souvent des failles aquifères...*

# Le problème de la traversée de failles aquifères

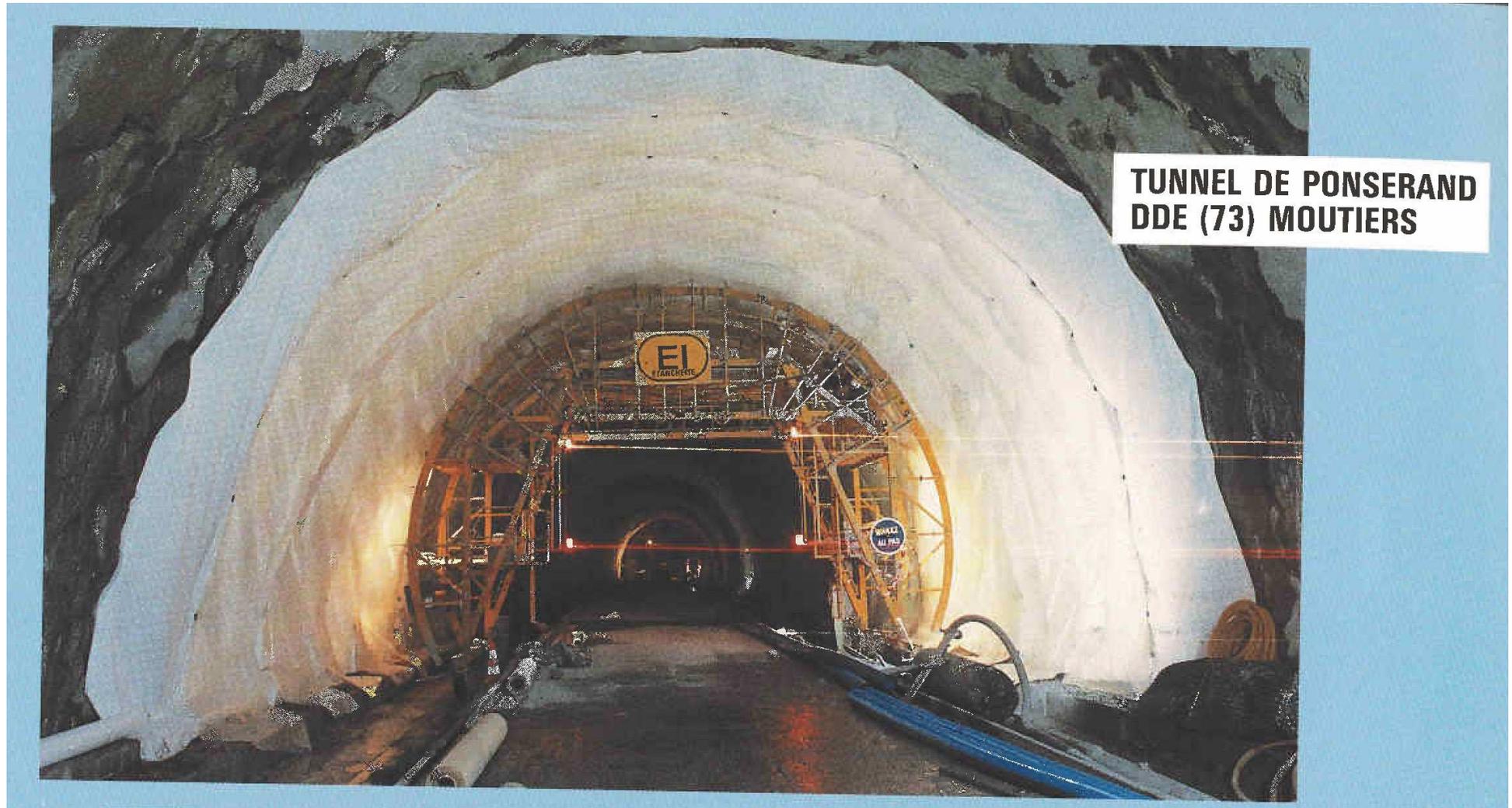


# Traitement d'une faille aquifère par injections



1. Détecter la faille par un forage de reconnaissance horizontal
2. Préparer un faisceau de forages courts
3. Injecter dans chacun un coulis de ciment pour étancher la faille

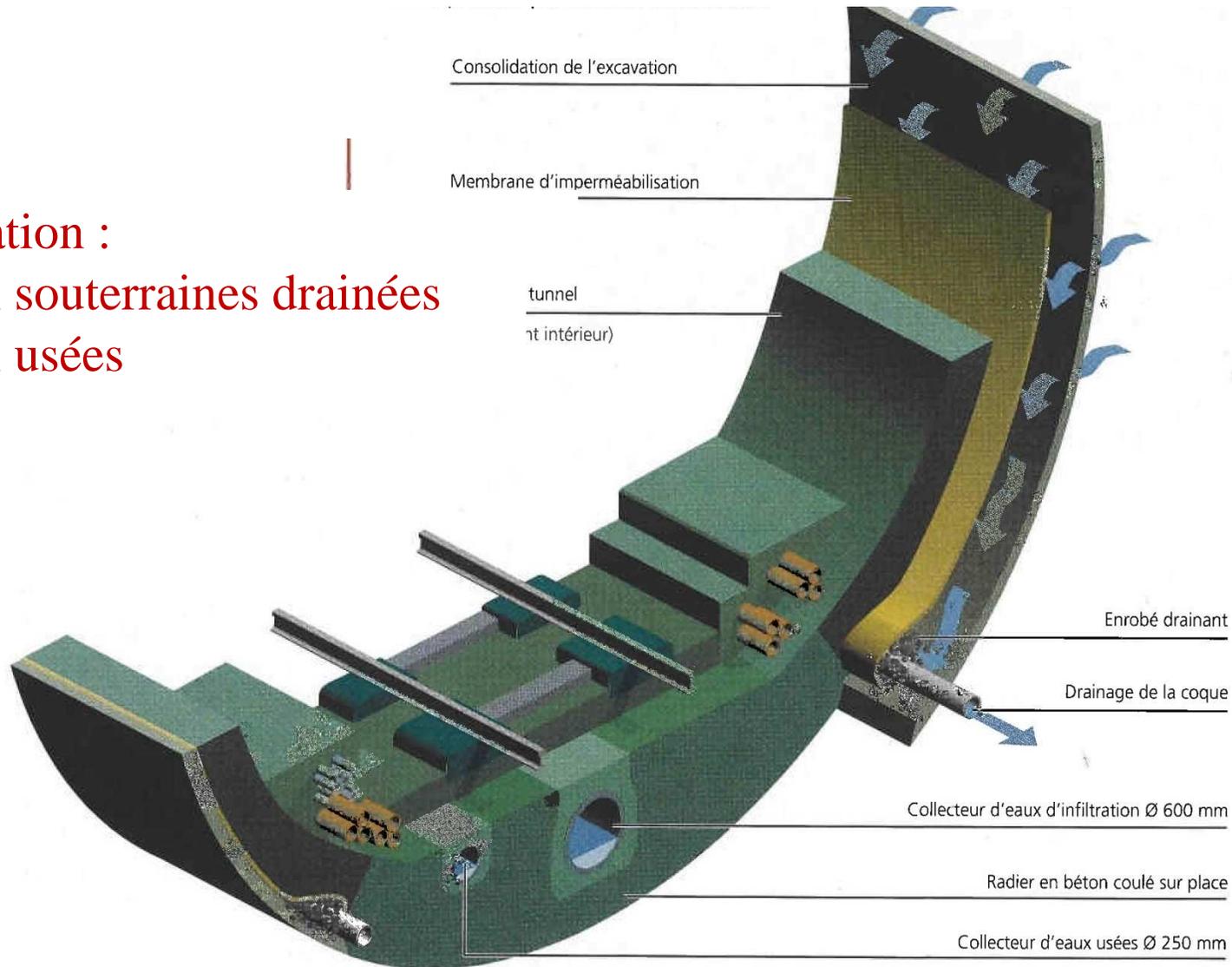
# Etanchement d'un tunnel par « géomembranes »



# Drainer, étancher et revêtir un tunnel

## Séparation :

- Eaux souterraines drainées
- Eaux usées



# Les degrés d'étanchement d'un tunnel

---

Les venues d'eau dans un tunnel (« exhaure ») dépendent de :

- hauteur de la nappe au-dessus du tunnel
- perméabilité du massif
- « accidents » ponctuels à forte perméabilité (failles, karst...)

*1er cas : Terrain sec => le tunnel peut rester drainant (quelle que soit H)*

*2ème cas : Terrain peu aquifère*

- *si  $H < 100$  m : l'étanchement total du tunnel est possible*
- *si  $H > 100$  m : léger drainage nécessaire pour baisser la pression*

*3ème cas : Terrain très aquifère : un traitement du terrain est nécessaire pour limiter le débit (sauf si tunnelier à confinement)*

- *si  $H < 100$  m : l'étanchement total du tunnel est possible*
- *si  $H > 100$  m : un léger drainage par le tunnel reste nécessaire*

# Evaluation de l'impact hydraulique d'un tunnel

---

1. Diviser le tunnel en tronçons homogènes du point de vue hydrogéologique
2. Evaluer les venues d'eau dans chaque tronçon du tunnel
3. Inventorier les points d'eau à l'aplomb du tunnel (sources, puits, ruisseaux...)
4. Analyser le risque de tarissement de chaque point d'eau
5. Définir l'intérêt économique et écologique de chaque point d'eau (type d'usage, débit, qualité...)
6. Identifier les points d'eau les plus « sensibles » (aléa + conséquences)

**Conclusion : faire une comparaison technico-économique entre :**

- la mise en œuvre de mesures compensatoires
- l'étanchement du tunnel par injections au droit du point d'eau
- l'emploi de tunneliers à confinement (cf. tunnel sous la Manche)

# Quel est le risque de tarissement d'une source ?

---

*Calcul en deux étapes (méthode DHI) :*

## **1. A l'aplomb d'une source, les venues d'eau dans le tunnel dépendent de :**

- La fréquence des fractures du massif
- La perméabilité du massif
- La hauteur de couverture au-dessus du tunnel
- L'extension de la zone décomprimée par l'excavation

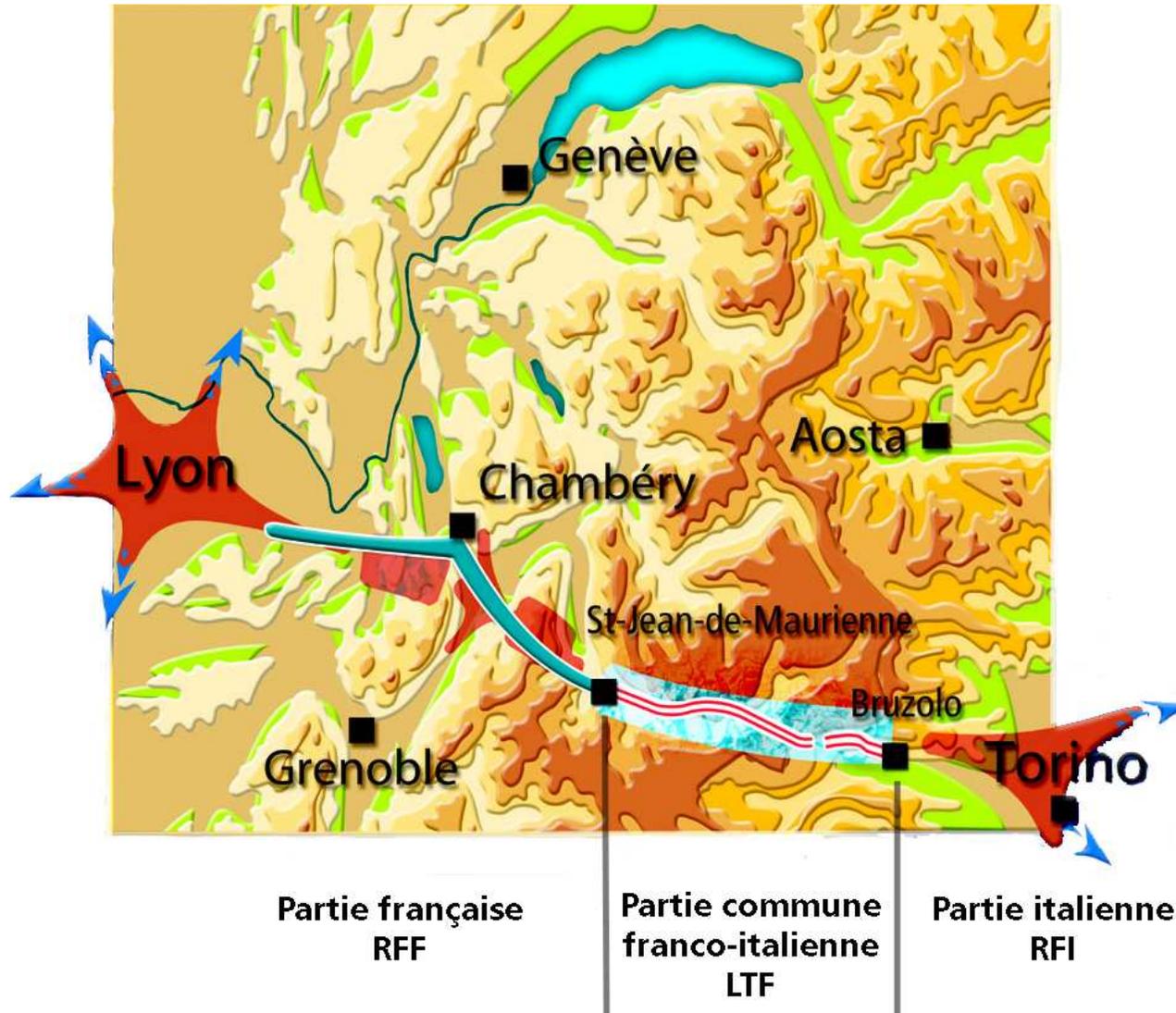
***=> capacité de soutirage du tunnel***

## **2. L'impact de cette venue d'eau sur la source dépend de :**

- La distance source-tunnel
- Le type de source (superficielle, profonde...)
- La proximité d'une faille aquifère
- La position topographique relative source/tunnel

***=> risque de tarissement de la source***

# Exemple : le projet de tunnel sur l'axe Lyon-Turin



# Génie civil et Hydrogéologie

---

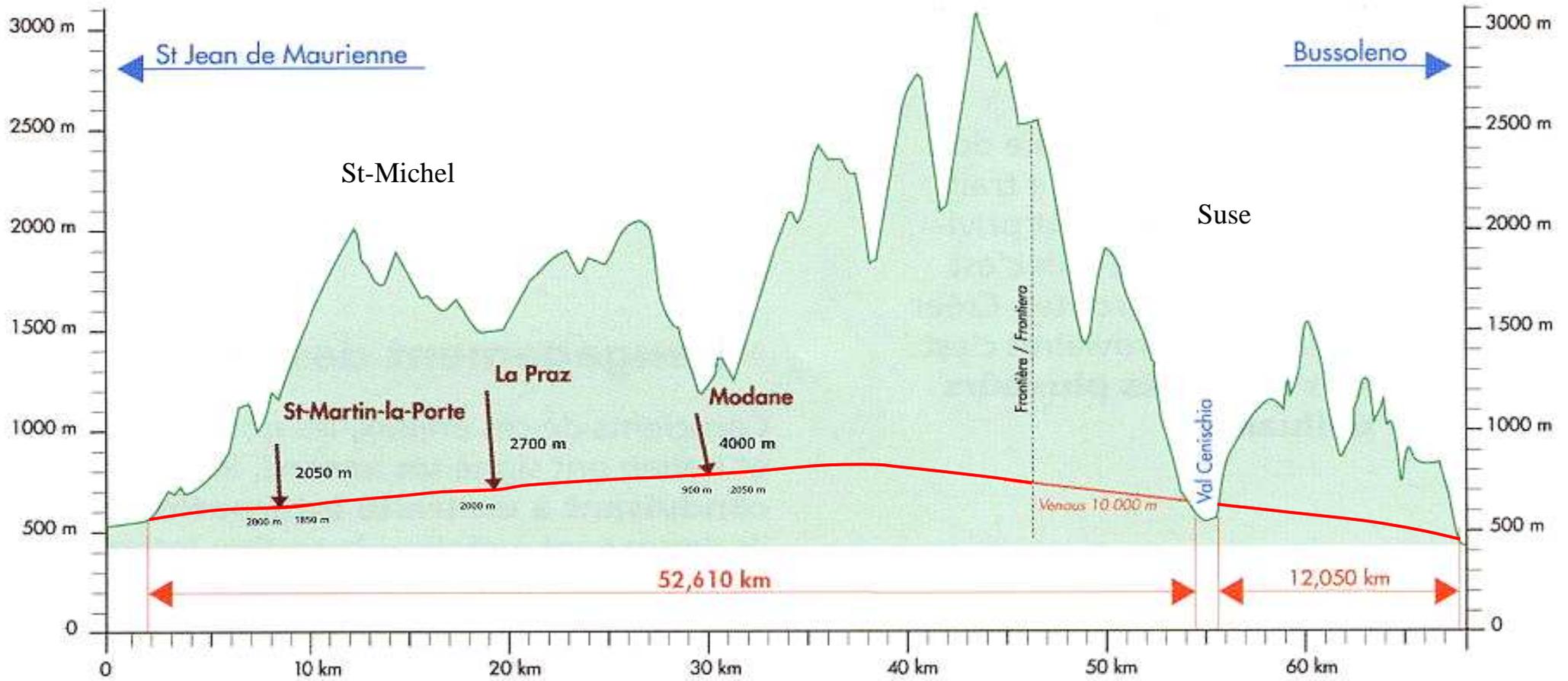
## Le projet initial de tunnel transalpin

- 2 tubes Ø 9m, longueur : 2 x 53 km
- Modification en cours côté italien (tunnel de versant pour préserver la vallée)
- Côté français : 3 galeries d'accès achevées (« descenderies »)
- Coût estimé du génie civil : 6 Md €
- Début des travaux lourds principaux : ~ 2012

## Objectifs des études hydrogéologiques

- Faire un bilan de l'exhaure de tunnels antérieurs dans les mêmes terrains
- Estimer les débits d'exhaure au cours du futur chantier, puis de l'exploitation
- Estimer les **perturbations possibles** vis-à-vis des sources et torrents en surface
- Prévoir des **mesures compensatoires** si ces perturbations sont inadmissibles :
  - soit : trouver des **ressources de remplacement**
  - soit : prévoir des **méthodes de creusement** évitant ces perturbations

## Descenderies et galeries



Tunnel d'Ambin

Tunnel de Bussoleno

# Bilan de l'exhaure des tunnels alpins

---

## Exhaure constatée dans des tunnels alpins

- *Sur 100 km de galeries hydroélectriques en Maurienne : 2 à 30 L/s/km*
- *Moyenne pondérée sur 260 km de tunnels alpins : 10 L/s/km*

## Décomposition des venues d'eau en cours de chantier

- *Venues d'eau **transitoires** au front, qui suivent l'avancement : 20 à 200 L/s (sur les 100 à 200 m derrière le front)*
- *Venues d'eaux **stabilisées** à l'arrière, proportionnelles à la longueur du tunnel :*
  - *moins de 10 L/s/km dans massifs profonds*
  - *50 à 100 L/s/km dans la zone superficielle plus fracturée*
- *Venues d'eau **ponctuelles** dans les « accidents géologiques » ( failles, conduits karstiques ), stabilisées après étanchement à ~ 50 L/s*

# Impact hydraulique du tunnel en surface

---

## Première estimation du débit d'exhaure

- à la tête Ouest (France) : débit 1300 à 2700 L/s ; température 22°C
- à la tête Est (Suse) : débit 300 à 700 L/s ; température 30°C
- Estimations à revoir à la baisse d'après l'expérience des galeries d'accès

## Résultats de l'analyse hydrogéologique

- 667 points d'eau inventoriés au-dessus du tunnel
- 471 points d'eau à risque de tarissement nul (méthode DHI)
- 58 points d'eau à risque faible à modéré
- 36 points d'eau à risque fort

## Prise en compte de l'usage réel ou potentiel de l'eau (débit, qualité, besoins...)

- 39 points d'eau « sensibles » (dont 17 captages AEP) nécessitant de prévoir des **mesures compensatoires**

# Mesures compensatoires

---

*Deux alternatives en cas de risques avérés :*

## A) Prévoir des ressources en eau de remplacement pour rétablir les AEP

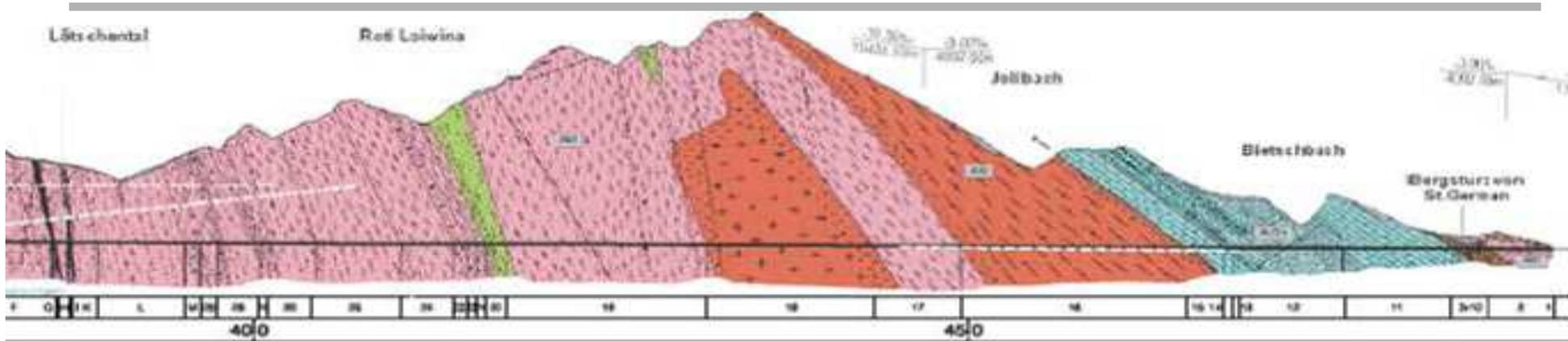
- **solutions d'urgence** : stations mobiles de traitement des eaux, à implanter à l'amont des réseaux actuels (opérationnelles en qq jours)
- **solutions transitoires** : captage de ressources voisines pendant le chantier (mobilisables en qq mois)
- **solutions permanentes** : nouveaux captages dans la vallée, connexion de réseaux intercommunaux...

*=> alternative A : en général la moins chère*

## B) Limiter l'exhaure du tunnel

- par emploi d'un **tunnelier à confinement** (à faible profondeur)
- par **injection du terrain** autour du tunnel (cf. tunnel suisse du Lötschberg)

# Tunnel suisse du Lötschberg



- Objectif : préserver les sources thermales de Leukerbad
- Limiter les venues d'eau en tunnel à 1 L/s
- Injections de deux failles aquifères (dont l'une sous 110 bar de pression)
- Coût des injections : 6 M€

## Conclusion

- Des techniques existent pour creuser un tunnel proprement
- Elles nécessitent des études préalables et des entreprises sérieuses
- Ces techniques ont un coût, à mettre en balance avec le souci de non-perturbation du milieu naturel

# Les 4 grandes méthodes pour creuser un tunnel

---

*Excavation*

*Soutènement  
des parois*

*Revêtement  
définitif*

- **Creusement au tunnelier**

- Tunnelier fermé  
(confinement air-eau-boue)

virole d'acier

voussoirs  
préfabriqués

- Tunnelier ouvert

béton projeté  
+ boulons, cintres

voussoirs  
ou béton coffré

- **Méthodes conventionnelles**

- Explosif

béton projeté  
+ boulons, cintres

béton coffré

- Machines ponctuelles  
(pelle, BRH, fraise)

béton projeté  
+ boulons, cintres

béton coffré