



Les tunnels profonds face aux risques naturels

Jean PIRAUD

*Ingénieur expert, ANTEA, Orléans
Président du Comité technique de l'AFTES*



Plan de la conférence

1. Les risques géologiques majeurs et mineurs
2. Comment gérer les risques géologiques ?



Risques géologiques et parades

Définition des risques géologiques

« Situations géologiques difficiles pour le chantier ou dangereuses pour le personnel, *si des moyens adaptés ne sont pas prévus* »

Ces situations peuvent résulter :

- soit de prévisions géologiques insuffisantes ou erronées,
- soit de méthodes de creusement inadaptées

Parades

- (Re)connaître le terrain avec soin
- Mesures préventives = méthodes **robustes** « résistantes aux aléas »
- Mesures correctives = dispositions prévues à l'avance si l'aléa survient



Quels risques géologiques ?

Risques majeurs

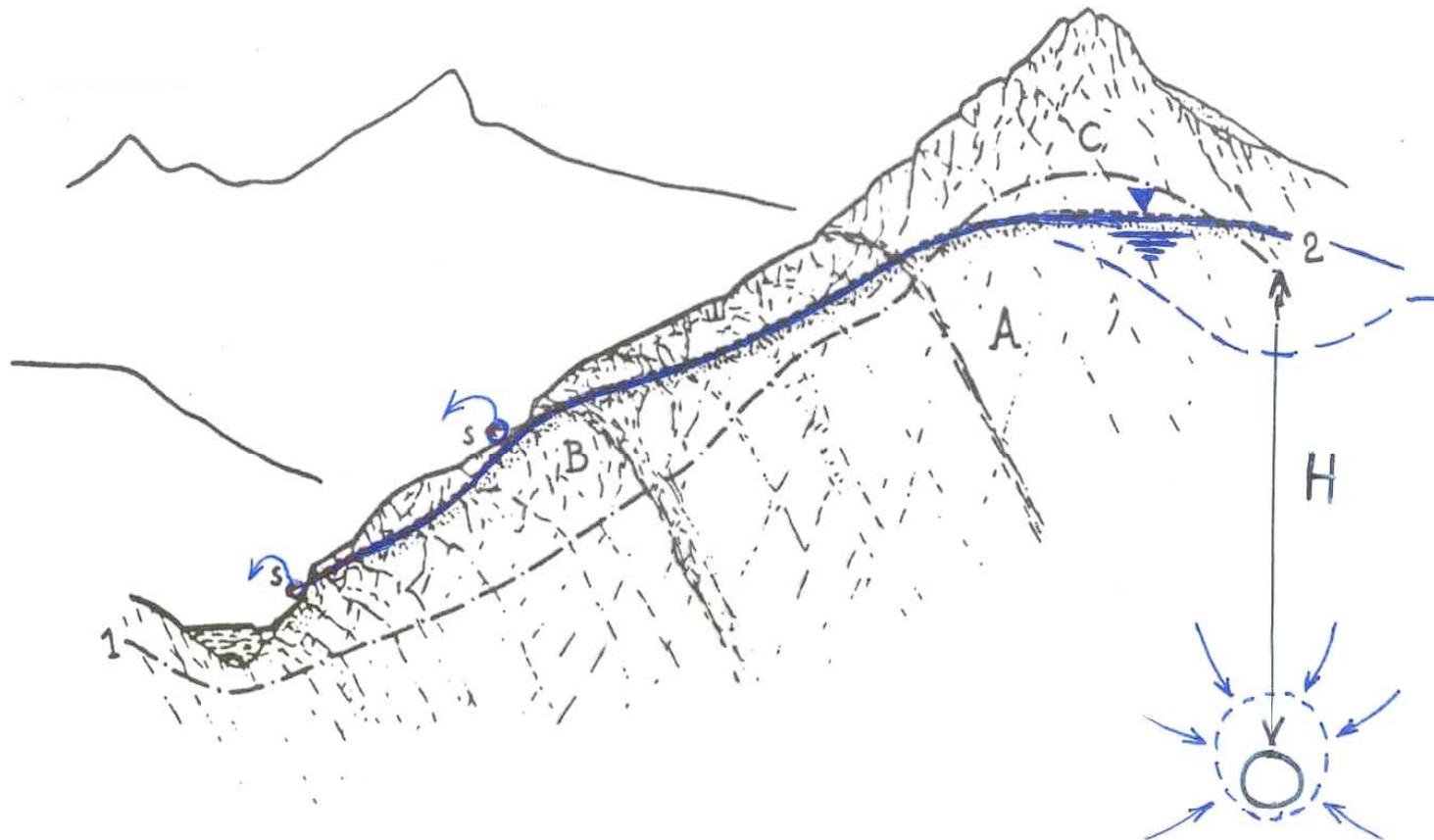
- **Fortes venues d'eau** => inondation brutale
- **Déformations du terrain après excavation**
 - Fermeture progressive du tunnel
 - Ecaillage explosif des parois
 - Gonflement du radier
- **Traversée de failles et cavités karstiques**

Risques mineurs

- **Fortes températures**
- **Présence de gaz dans les roches** (grisou, H₂S...)
- **Roches nocives** => déblais naturellement pollués (radioactifs...)
- **Eboulements, glissements, inondations**
=> menace pour les entrées de tunnels, accès et ateliers
- **Séismes**

En général, les montagnes sont pleines d'eau !

(sauf les massifs karstiques)



Fortes venues d'eau

« L'eau est le principal ennemi du mineur »

Précautions avant travaux

- Investir dans les reconnaissances
- Eviter les terrains trop aquifères



Parades pendant les travaux

- Reconnaître le terrain par forages horizontaux en cours d'avancement
- Etancher le terrain par injections des failles aquifères
- Utiliser des tunneliers à confinement (prof . < 150 m)



Déformations du terrain après excavation

Principe de base :

« *Tout terrain excavé doit être immédiatement **soutenu** et sécurisé* »

Mais le comportement ultérieur du terrain varie :

- Comportement normal : stabilité (si soutènement adapté)
- Roches « fragiles » => écaillage brutal, surtout à grande profondeur
- Roches plastiques => tendance à la re-fermeture du tunnel
- Roches gonflantes en présence d'eau

Méthodes de soutènement : à adapter soigneusement , en temps réel

- Creusement traditionnel :
 - Béton projeté
 - Boulons d'ancrage
 - Cintres métalliques
- Creusement au tunnelier : voussoirs en béton armé

Convergence excessive des parois



Galerie de reconnaissance de St-Martin-la-Porte (projet Lyon-Turin)

Exemple de roches fortement déformables (couverture – 400 m,
convergence = 2 m) - Nécessité d'un réalésage du tunnel

Ecaillage brutal des parois



› Prato Tires pilot tunnel

Surtout à grande profondeur,
dans des roches résistantes mais fragiles,
comme le granite non fracturé

Très dangereux pour le personnel !

Gonflement du radier

Le tunnel de base du Gothard

Déformation du radier avec cintres arrachés





Failles et cavités karstiques

gravité du risque

Failles (surtout à grande profondeur)

- Eaux sous pression => inondation ou « débouillage »
- Roches broyées => fortes poussées localisées

**

Cavités karstiques dans les roches solubles (calcaire, gypse, sel)

- Si karst noyé => inondation ou débouillage
- Instabilité des parois des cavités
- Risque de chute du tunnelier

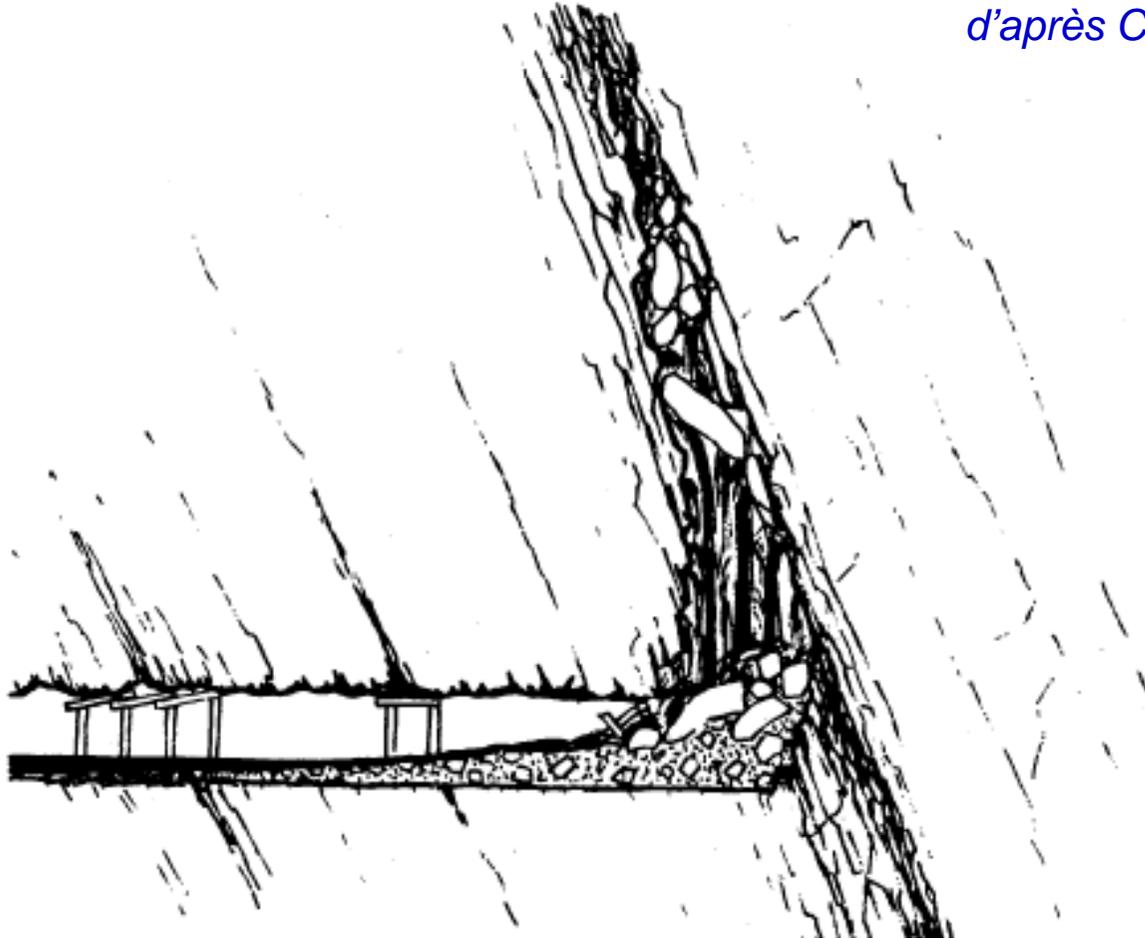
**

*

(peut être le seul terrain infranchissable)

Galerie débouchant imprudemment dans une faille non reconnue au préalable

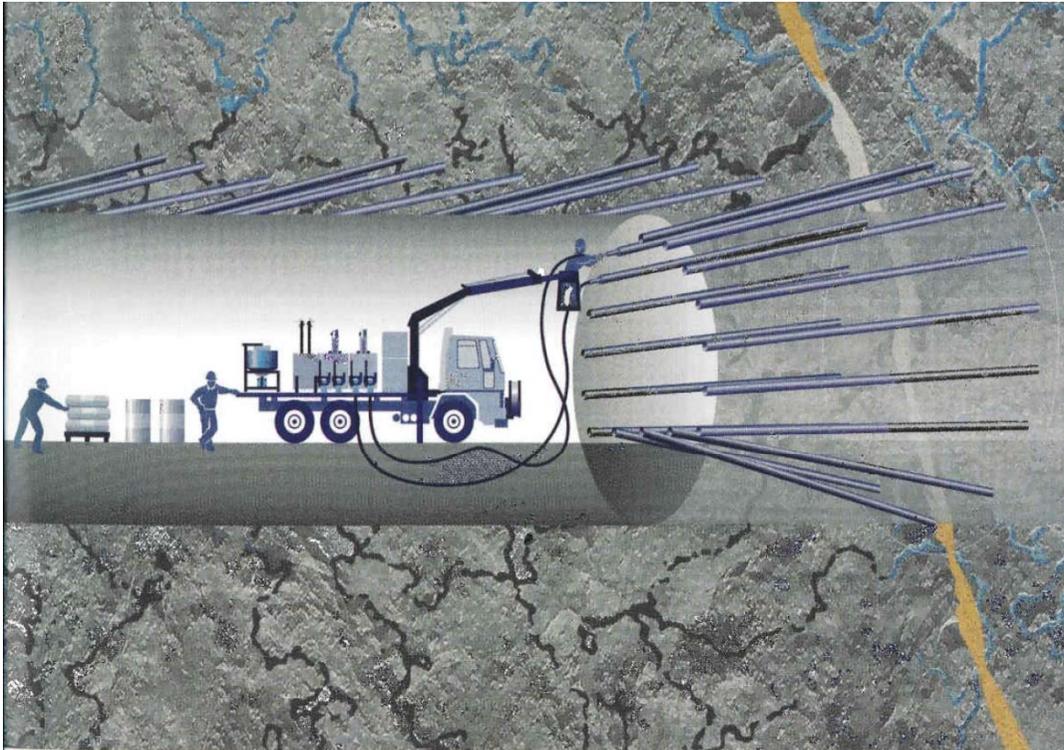
d'après Cl. BORDET, 1970



*« Débouillage » d'une faille aquifère remplie de matériaux meubles,
sous forte charge hydraulique*

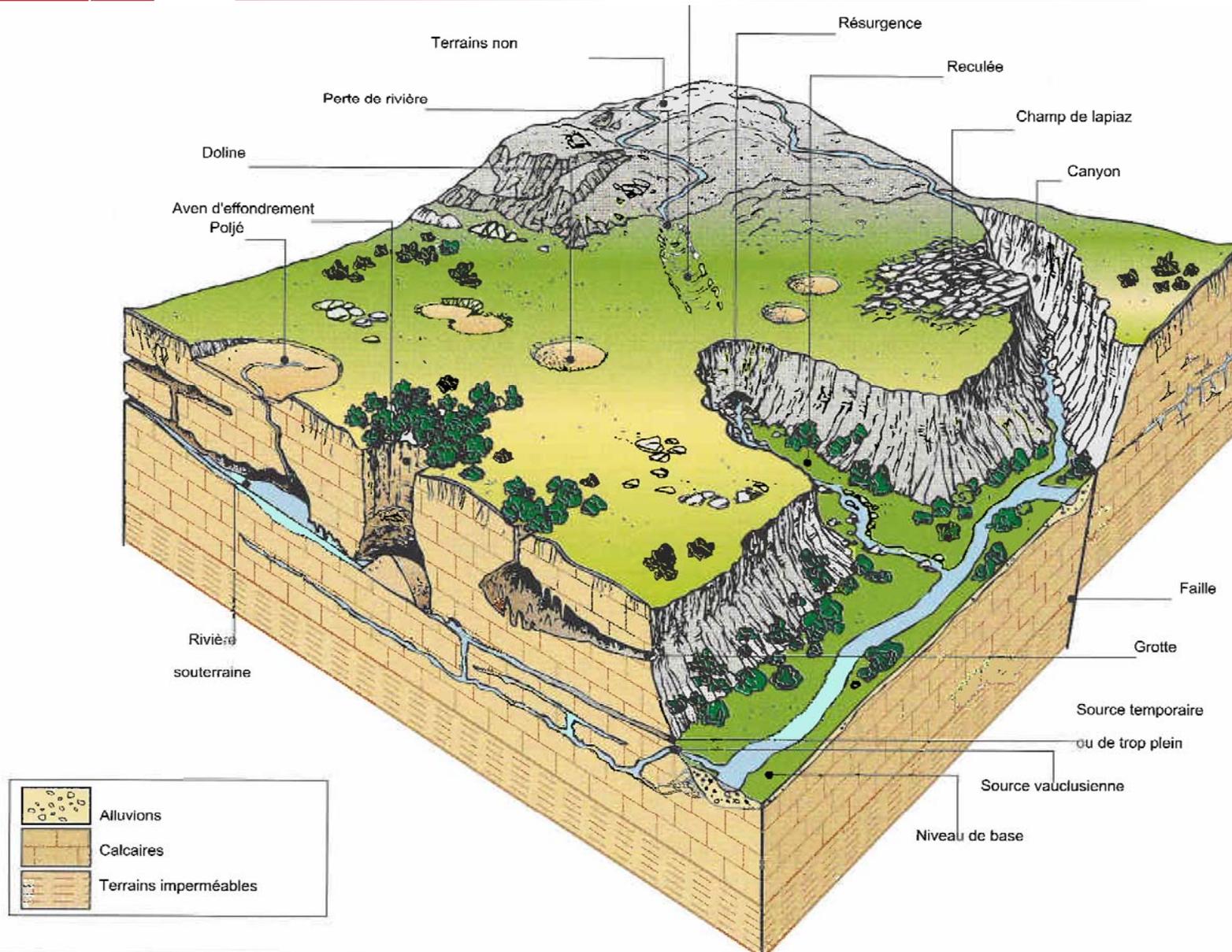


Traitement d'une faille aquifère par injections



1. Détecter la faille par des sondages horizontaux
2. Préparer un faisceau de forages courts
3. Injecter dans chacun un coulis de ciment pour étancher la faille

Massif karstique : danger !





Les risques à l'extérieur du tunnel

Attention aux risques menaçant les **ouvrages de surface** :

- têtes de tunnel, tympan (matériaux meubles et instables)
- voies d'accès, en site souvent difficile
- installations de chantier

=> Identification et prévention nécessaire de risques multiples

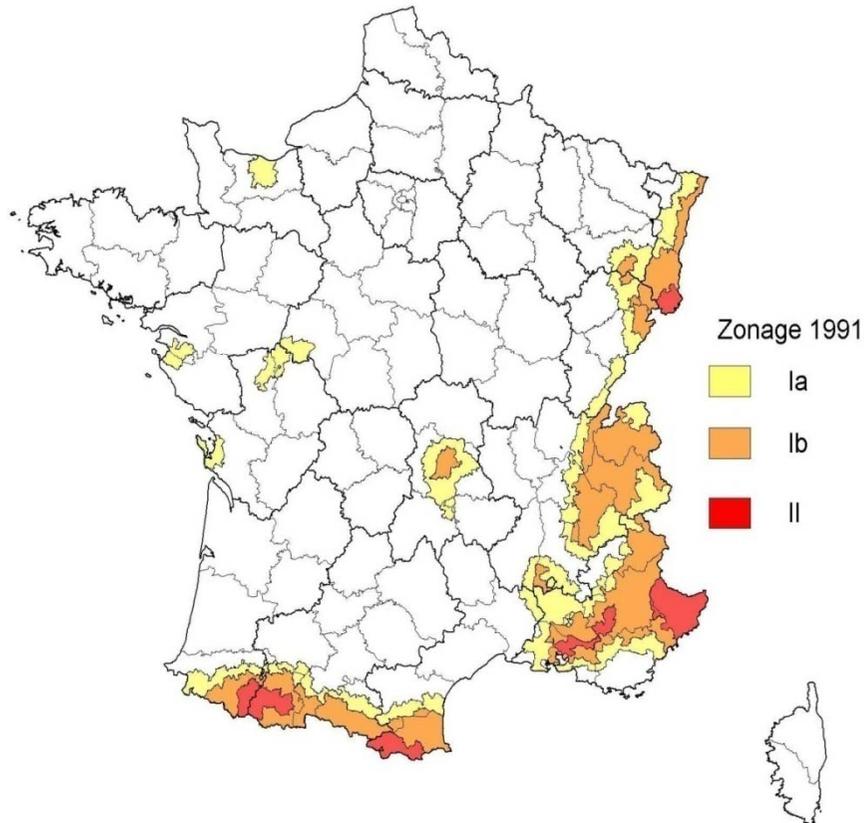
- Chutes de blocs
- Glissements de terrain et coulées de boue
- Débordement de torrents
- Avalanches !

Conclusion : « On est plus à l'abri dans le tunnel ! »

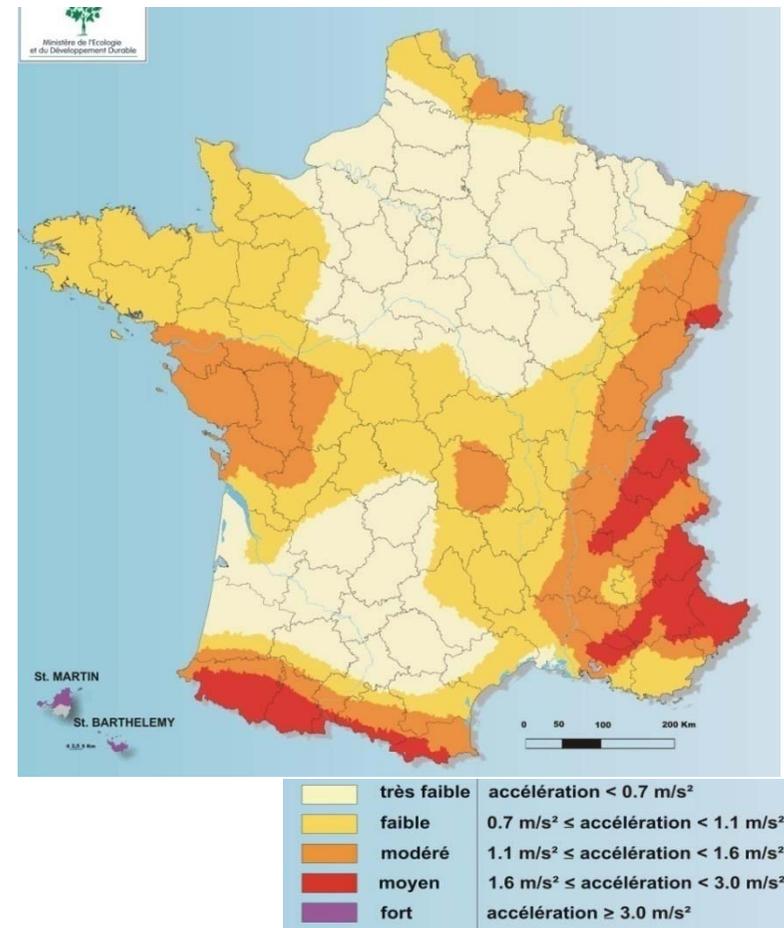
Zonage sismique de la France (en surface)

La réglementation sismique est cours d'évolution majeure en France avec l'adoption de l'EUROCODE8

Zonage sismique actuel associé aux règles PS92



Zonage sismique associé à l'EC8 (arrêté du 22/10/2010)





Quels risques sismiques en tunnel ?

- **Les séismes ont peu très d'effets sur les tunnels**, car :
 - les secousses sont très atténuées en profondeur
 - le revêtement bétonné « fait corps » avec le terrain
- Même dans les régions françaises les plus sismiques, on ne prend pas de dispositions particulières pendant les travaux
- Aucun dommage n'a jamais été constaté dans les tunnels français !

Quelles conséquences pour les ouvrages définitifs ?

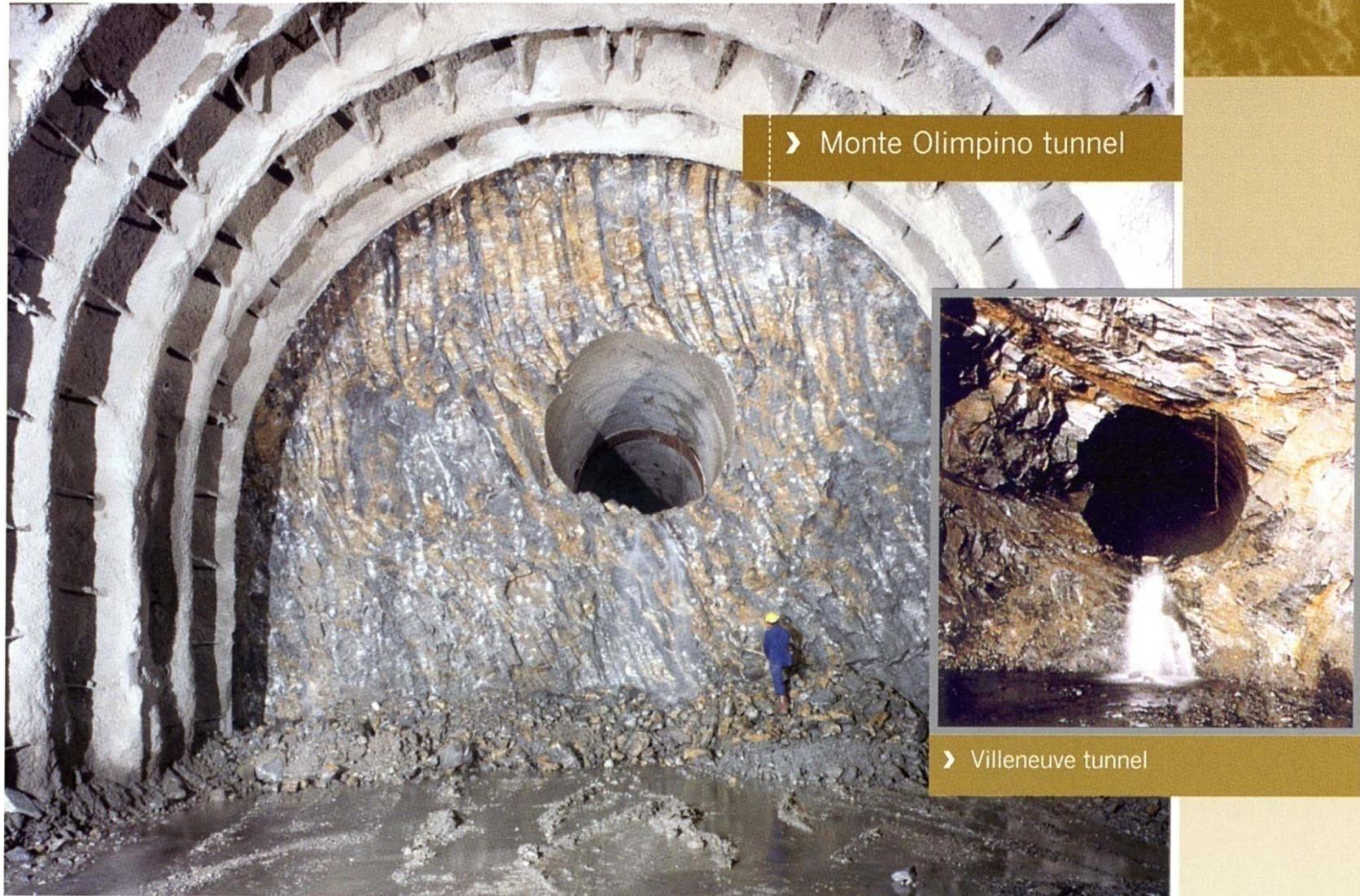
- 1) « **Durcissement** » des équipements de surface (électricité, sécurité)
- 2) **Renforcement du revêtement en béton armé** :
 - aux abords des têtes de tunnel
 - peut-être à la traversée de certaines failles ? **=> surcoût minime**
- 3) **Léger surcoût des ouvrages d'accès (< 5-10% ?)**
 - pentes des talus moins raides
 - renforcement des ponts et viaducs



Comment gérer les risques géologiques ?

- 1) **Faire le bilan de travaux antérieurs dans les mêmes terrains**
=> identification des difficultés « géotechniques » « prévisibles
- 2) **Faire des reconnaissances géologiques détaillées :**
 - levés de terrain + sondages + géophysique
 - galeries de rec. pour améliorer le projet et sécuriser les travaux
- 3) **Optimiser les méthodes d'exécution**
 - méthodes adaptées à la géologie de chaque tronçon
 - méthodes robustes, peu sensibles aux aléas naturels
- 4) **Préparer des réponses effectives à tous les risques identifiés**
- 5) **Signer un marché de travaux loyal** (=> entreprise pro-active)
- 6) **Pendant les travaux :**
 - Priorité effective à la sécurité du travail = **ne jamais prendre de risques !**
 - Rester modeste – donc vigilant – face aux caprices de la nature

Galerie de reconnaissance forée avec un petit tunnelier (Ø 3 m)





Conclusion sur les risques naturels

Risques majeurs et mineurs

- Les risques majeurs sont l'eau et les déformations du tunnel
- Les risques augmentent avec la profondeur
- Les séismes constituent un risque très secondaire, qui ne renchérit que les ouvrages de surface
- Des méthodes existent pour faire face à tous les risques identifiables, et ces méthodes continueront à se perfectionner
- A priori, le projet de TCP ne présente aucun aléa insurmontable

A retenir :

1. *En travaux souterrains, il est défendu de « prendre des risques »*
2. *Les travaux souterrains sont une activité sûre et bien maîtrisée, de haute technologie, et qui fait des progrès constants*



Percement du 1^{er} tube du Gothard

Le tunnel de base du Gothard

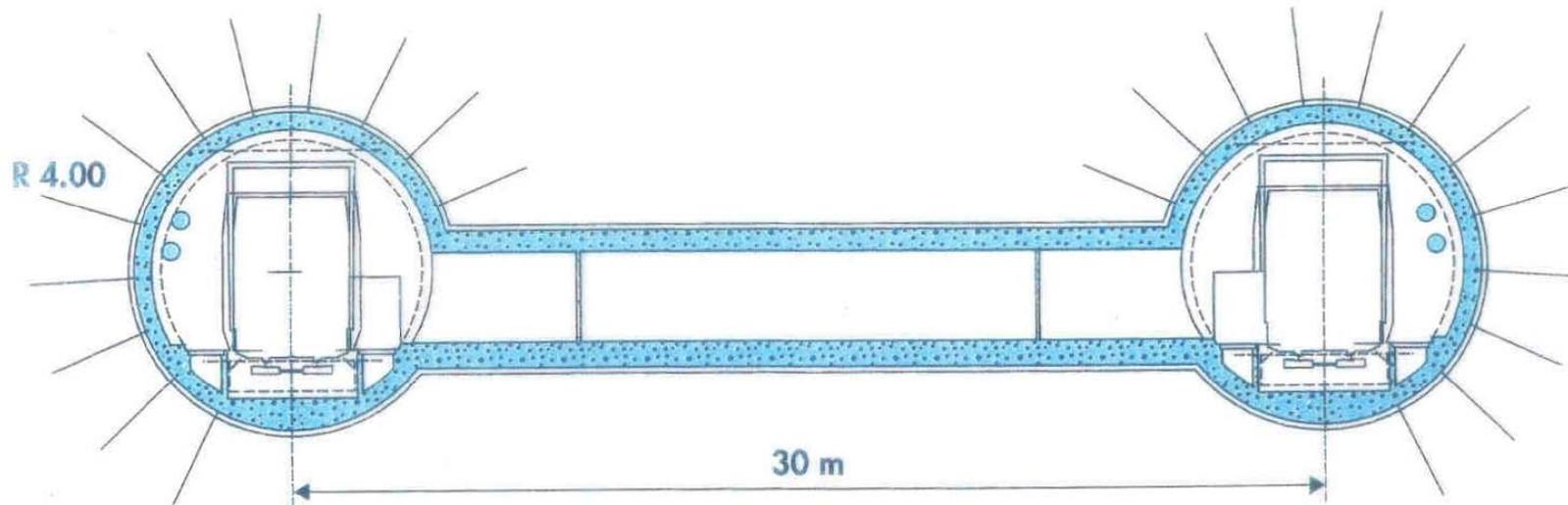
Percement le 15 octobre 2010



4.3_10089_1.071467246

Tunnel de base

Coupe en travers au droit d'un rameau de communication





Intérêt des galeries de reconnaissance

Intérêt pour les études

- Reconnaissance géologique **continue** le long du tunnel
- Estimation exacte des venues d'eau
- Echantillonnage et tests faciles sur les terrains rencontrés
- Observation du **comportement géotechnique réel** du massif
- Réalisation de tronçons d'essai en vraie grandeur
- Galerie de visite utile aux entrepreneurs

Intérêt pour les travaux du « grand » tunnel

- Permet un drainage préalable du massif (eaux + gaz)
- Permet parfois un traitement préalable des terrains
- Facilite l'excavation à l'explosif
- Facilite la ventilation
- Elimine la plupart des **surprises géologiques**
 - => meilleure planification des travaux et des dépenses
 - => réduction des « provisions pour aléas » des entrepreneurs