



***Congrès international  
sur la Traversée ferroviaire des Pyrénées centrales***

---

*Saragosse, 29-31 octobre 2008*

**Reconnaissance géologique  
des tunnels profonds :  
Objectifs, coûts et programmation**

**Jean PIRAUD**

*ANTEA (Orléans, France)  
Président du Comité technique de l'AFTES*



# Objectifs des reconnaissances

- Identifier les **difficultés géotechniques prévisibles** pendant les travaux
- Programmer ensuite les reconnaissances

## Objectifs

- 1) Géologie** : comprendre la **logique géologique** du site  
=> pouvoir extrapoler les données ponctuelles des sondages  
« *Sans la géologie, la Mécanique des roches ne sert à rien* »
  - 2) Hydrogéologie** : identifier les risques de fortes venues d'eau  
« *L'eau est le principal ennemi du mineur* »
  - 3) Géomécanique** : identifier les terrains dont le comportement à l'excavation sera difficile (« risques géologiques »)
- Définir des **ensembles géotechniques homogènes** et bien caractériser leur comportement, afin d'optimiser les méthodes d'exécution
  - Identifier les risques de **difficultés isolées** (failles, karst...)



# Difficultés d'exécution des travaux en tunnels profonds

En général, **difficultés croissantes avec la profondeur (H)**

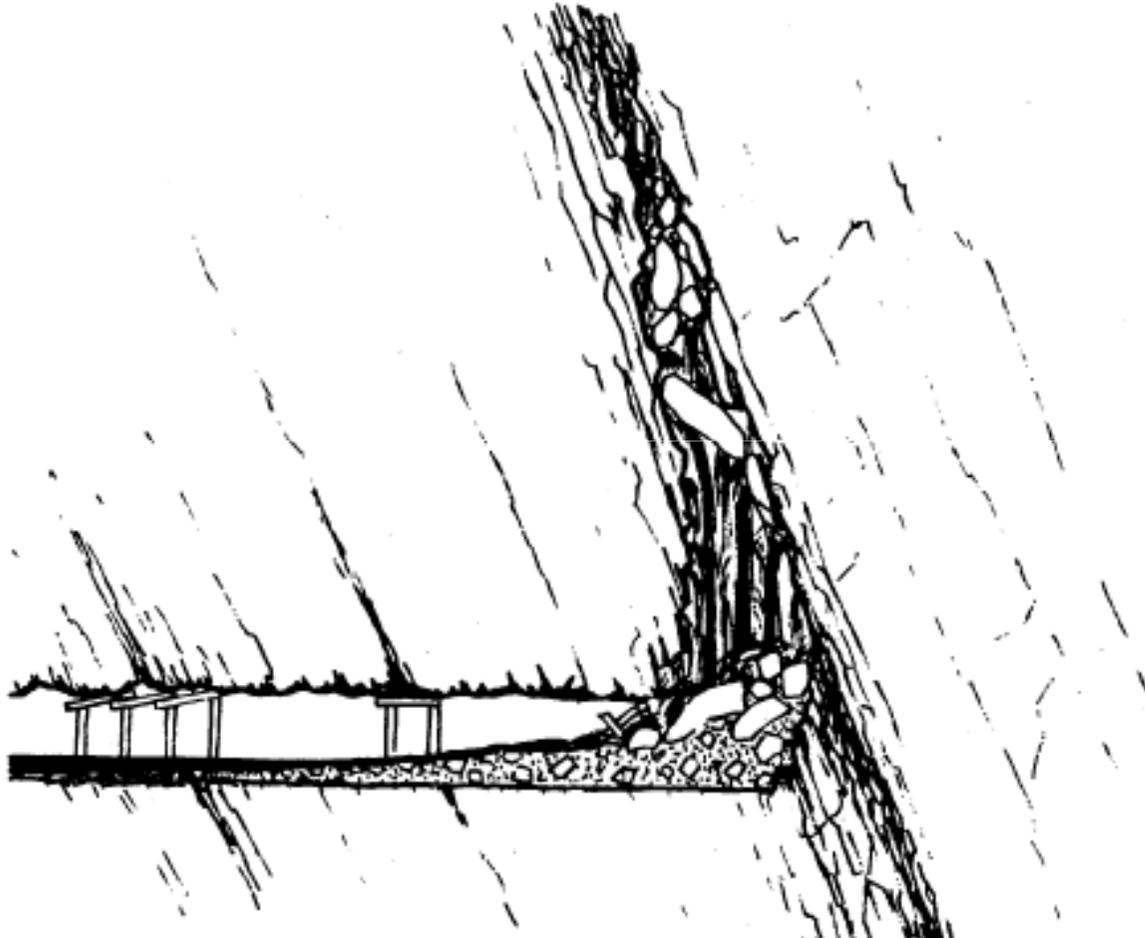
## Difficultés assez faciles à prévoir :

- Température :  $\theta = f(H) \sim 3^{\circ}\text{C}/100 \text{ m}$
- Volumes des déblais :  $V = L \times S$

## Difficultés plus difficiles à prévoir

- **Venues d'eau** :  $Q = f(H, \text{perméabilité})$ 
  - Amplitude de variation très grande => forte incertitude
  - Risque majeur : « *débouillage* » de roches meubles sous forte charge
- **Comportement à l'excavation** =  $f(H, \text{résistance, fracturation})$ 
  - Roches résistantes => écaillage (*rockburst*)
  - Roches plastiques => fortes convergences (*squeezing*)

## Risques géotechniques (1/3)



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

## Risques géotechniques (2/3)



**Ecaillage brutal des parois  
dans des roches résistantes mais fragiles,  
sous l'effet d'un excès de contraintes**



**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*



# Programmation des reconnaissances (1/2)

- Progression des reconnaissances : **en // avec le projet de génie civil**
- Programmation en 3 phases au moins, et à adapter au fur et à mesure des résultats obtenus

## 1<sup>ère</sup> phase : reconnaissances préliminaires

- Dessin d'une coupe géologique sommaire
- Synthèse critique des chantiers antérieurs en terrains analogues (*bilan des galeries hydroélectriques 1950-1980 !*)  
=> Liste des problèmes géotechniques prévisibles dans le futur tunnel
- Levé géologique de surface sur une large bande (*lithologie, stratigraphie, tectonique et fracturation*)
- Coupe géologique prévisionnelle + **indication des difficultés potentielles**, qui seront l'objectif majeur de la phase suivante de reconnaissance



# Programmation des reconnaissances (2/2)

## 2<sup>ème</sup> phase : reconnaissances en phase Avant-projet

- Quelques sondages pour caractériser rapidement chaque formation
- Focaliser les autres sondages sur :
  - les terrains a priori les + difficiles
  - les difficultés géologiques ponctuelles (failles, karst...)

*NB. Coût unitaire d'un tunnel : 1 en bon terrain  
3 en terrain médiocre  
20 en très mauvais terrain*

*=> Modification éventuelle du tracé*

## 3<sup>ème</sup> phase : reconnaissances en phase Projet

- Délimiter et caractériser en détail chaque formation
- Identifier et localiser au mieux toutes les difficultés ponctuelles

*=> Découpage du tunnel en tronçons +/- homogènes*

*=> Optimisation des méthodes d'exécution de chaque tronçon*



# Moyens de reconnaissance

- Levé géologique (+ connaissance géologique régionale)
- **Sondages** : carottés nombreux (*la Géologie d'abord !*)
  - carottage (et orientation ) sur toute la hauteur du sondage
  - essais fréquents au laboratoire et in situ

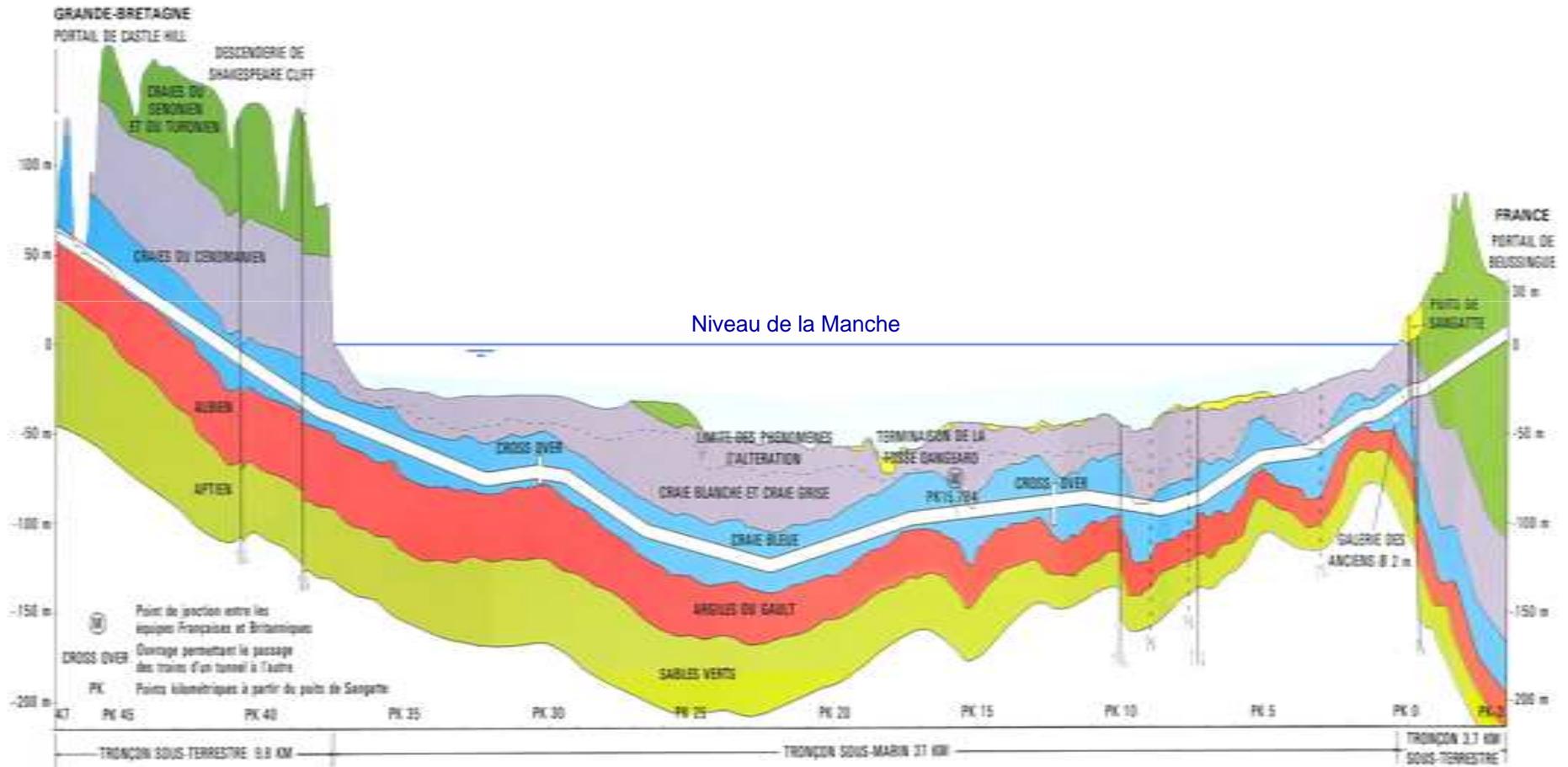
=> « log » vertical continu de propriétés physiques et mécaniques

*Ratio conseillé aux USA : 1,5 km de carottage par km de tunnel*

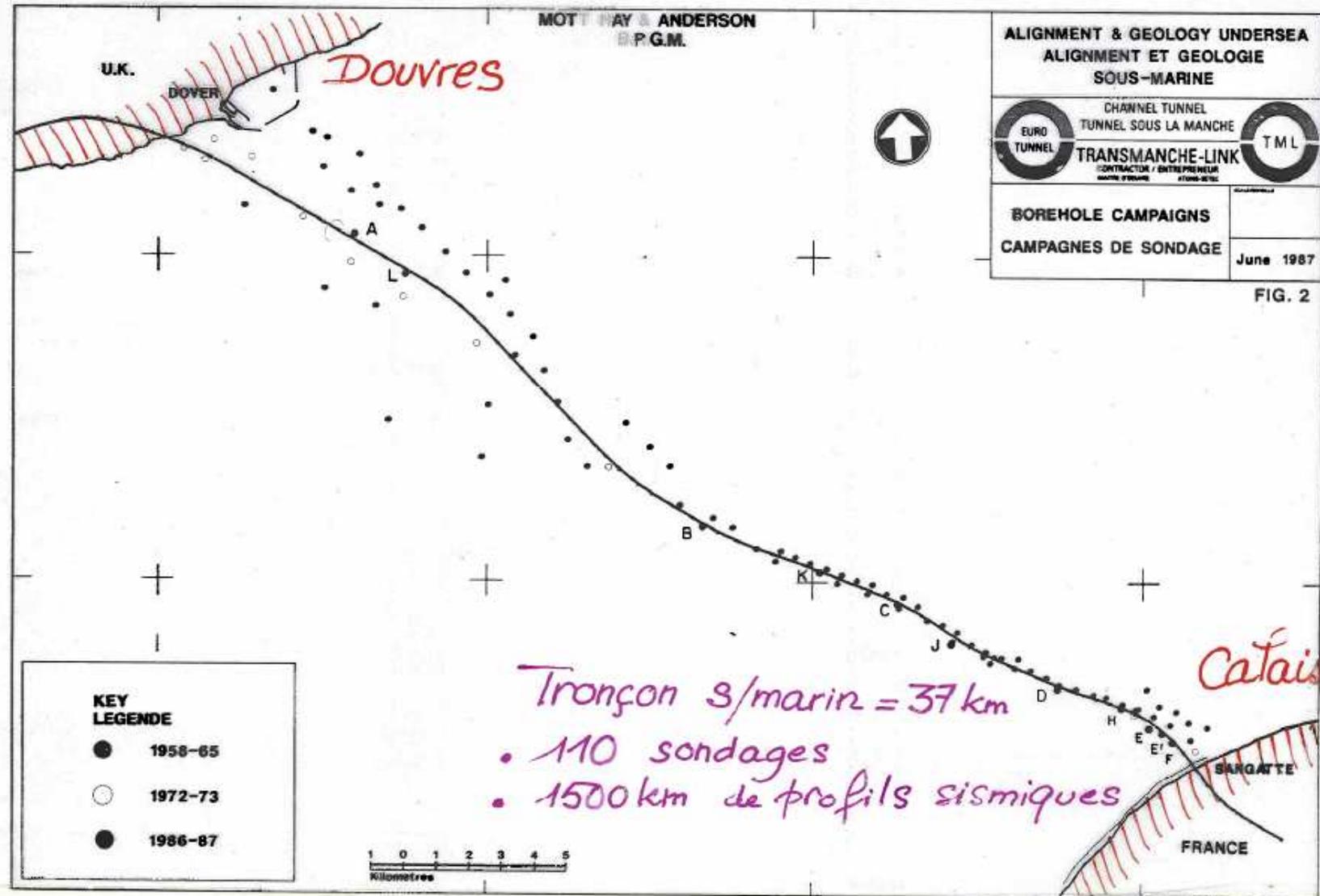
Type de forage	Terrain adapté	Coût
Forage vertical	Sédimentaire calme	1
Forage minier oblique	Sédimentaire plissé	1,5
Forage pétrolier dirigé	Plissé + Failles verticales	5 à 10

- **Géophysique** : peu efficace en phase Exploration, mais très utile pour corréliser des sondages en terrains sédimentaires connus
- **Galeries de reconnaissance** : moyen idéal !
- Modèles géologiques 3D : à la mode, mais rarement utiles

# Profil en long du tunnel sous la Manche



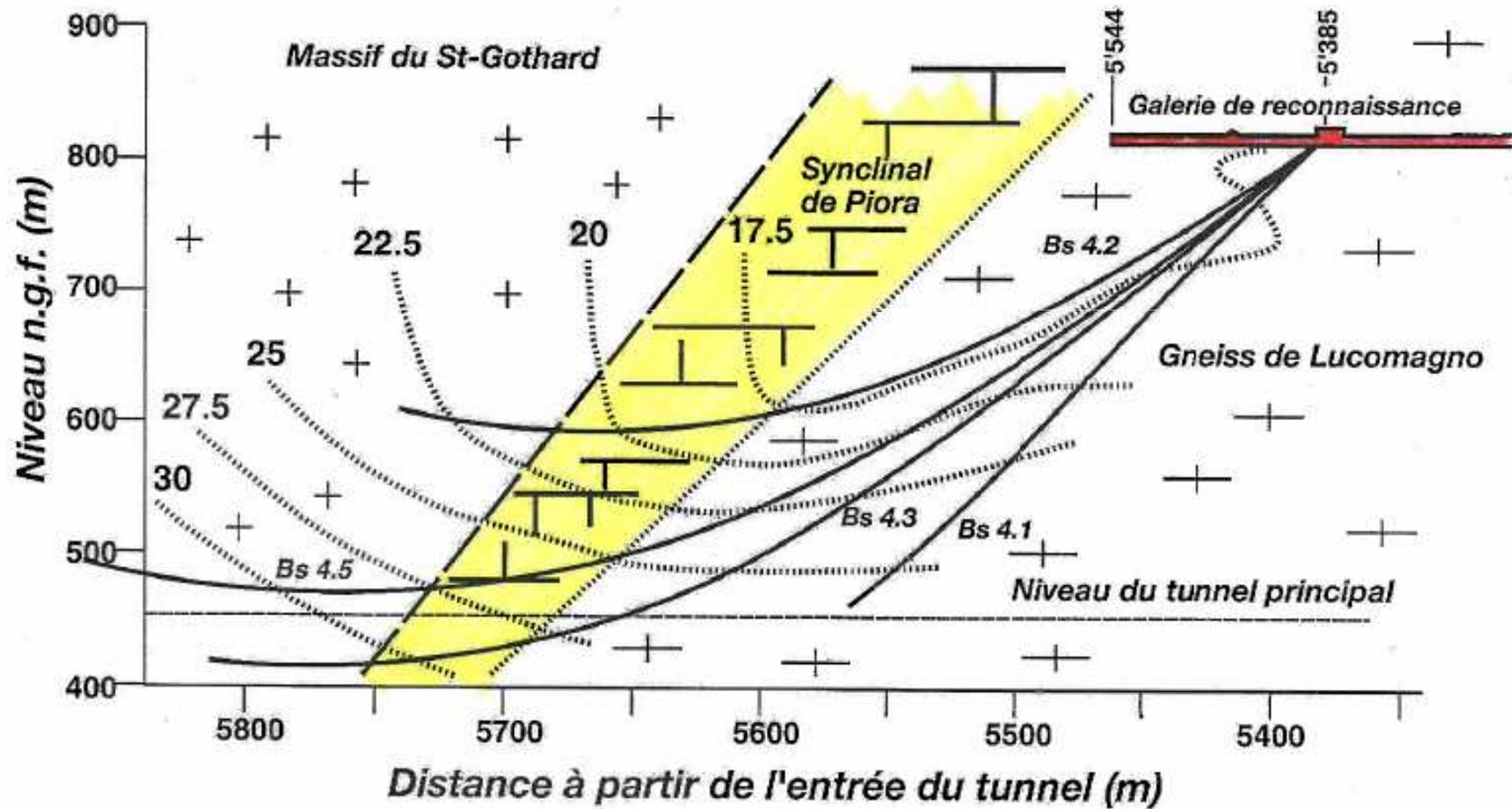
# Reconnaissance du tunnel sous la Manche





# Tunnel de base du Gothard

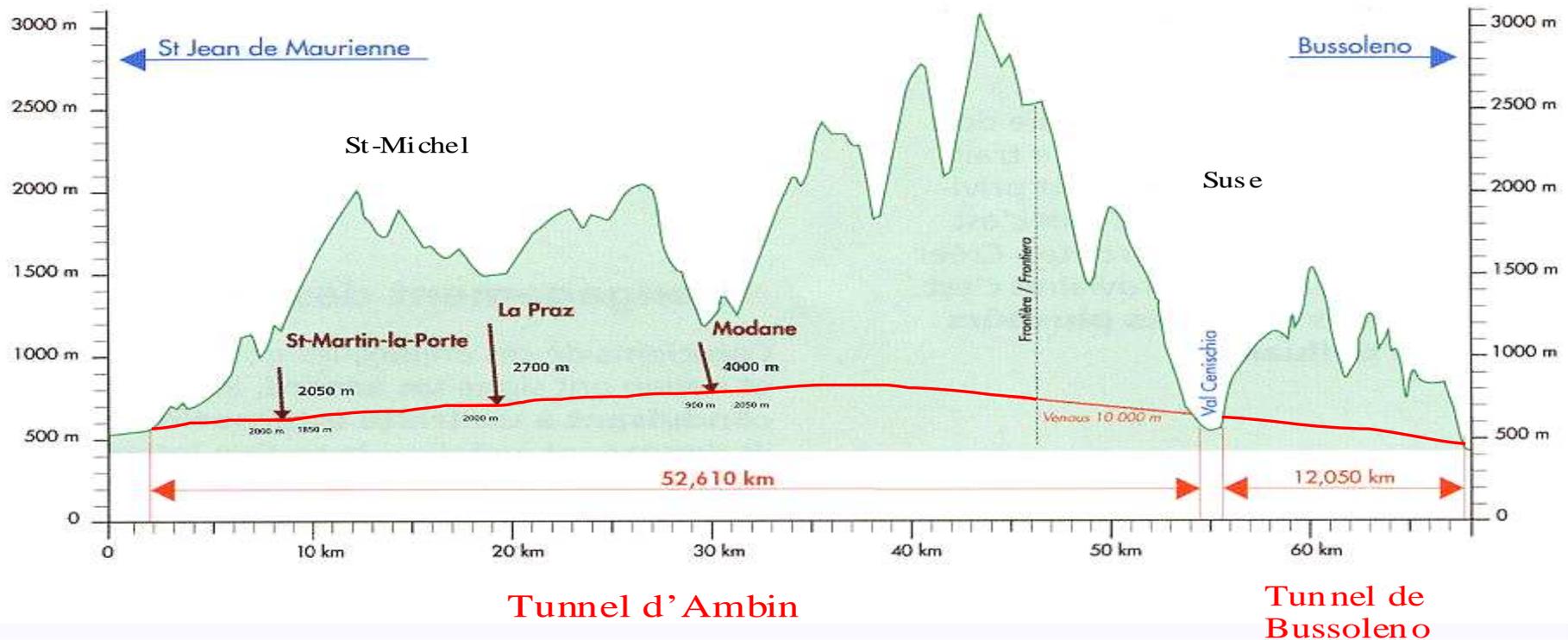
## Reconnaissance du synclinal de Piora par forages inclinés





# Projet de tunnel d'Ambin (liaison Lyon-Turin) Les 3 galeries de reconnaissances et d'accès

## Descenderies et galeries



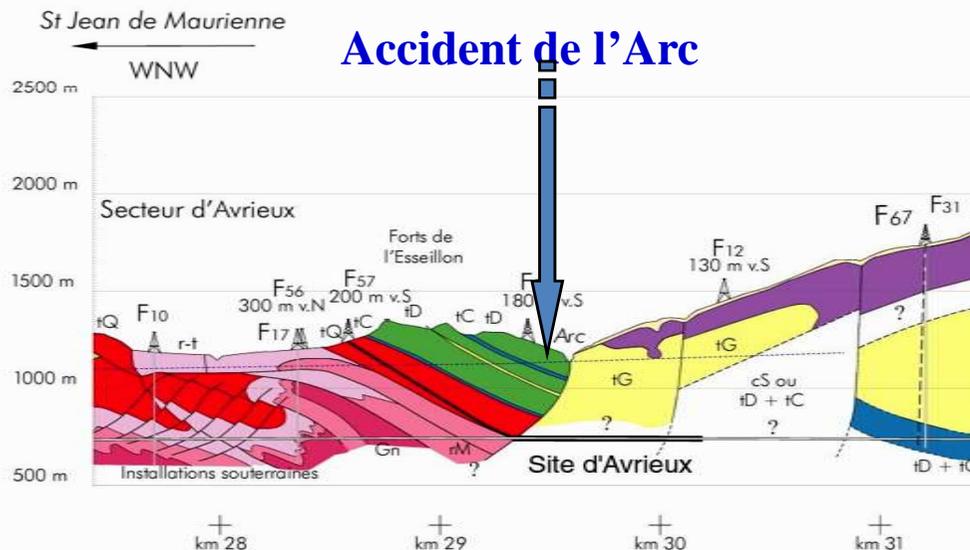


# Tunnel d'Ambin (projet Lyon-Turin) Reconnaissance par forages dirigés

## Coupe géologique prévisionnelle simplifiée du Tunnel de Base

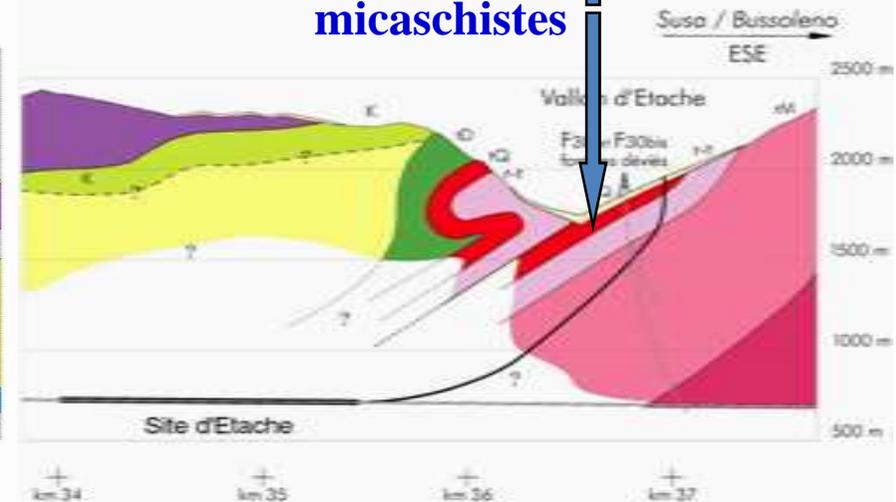
- Secteur des reconnaissances par sondages dirigés -

### Secteur d'AVRIEUX



### Secteur d'ETACHE

Accident intra micaschistes



ZONE BRIANÇONNAISE		Cg		tC		tD		tE		tF		tG		tH		tI		tJ		tK		tL		tM		tN		tO		tP		tQ		tR		tS		tT		tU		tV		tW		tX		tY		tZ	
Cg		tC		tD		tE		tF		tG		tH		tI		tJ		tK		tL		tM		tN		tO		tP		tQ		tR		tS		tT		tU		tV		tW		tX		tY		tZ			
Cg		tC		tD		tE		tF		tG		tH		tI		tJ		tK		tL		tM		tN		tO		tP		tQ		tR		tS		tT		tU		tV		tW		tX		tY		tZ			
Cg		tC		tD		tE		tF		tG		tH		tI		tJ		tK		tL		tM		tN		tO		tP		tQ		tR		tS		tT		tU		tV		tW		tX		tY		tZ			



## Tunnel d'Ambin (liaison Lyon-Turin) Forage dirigé d'Etache





# Intérêt des galeries de reconnaissance

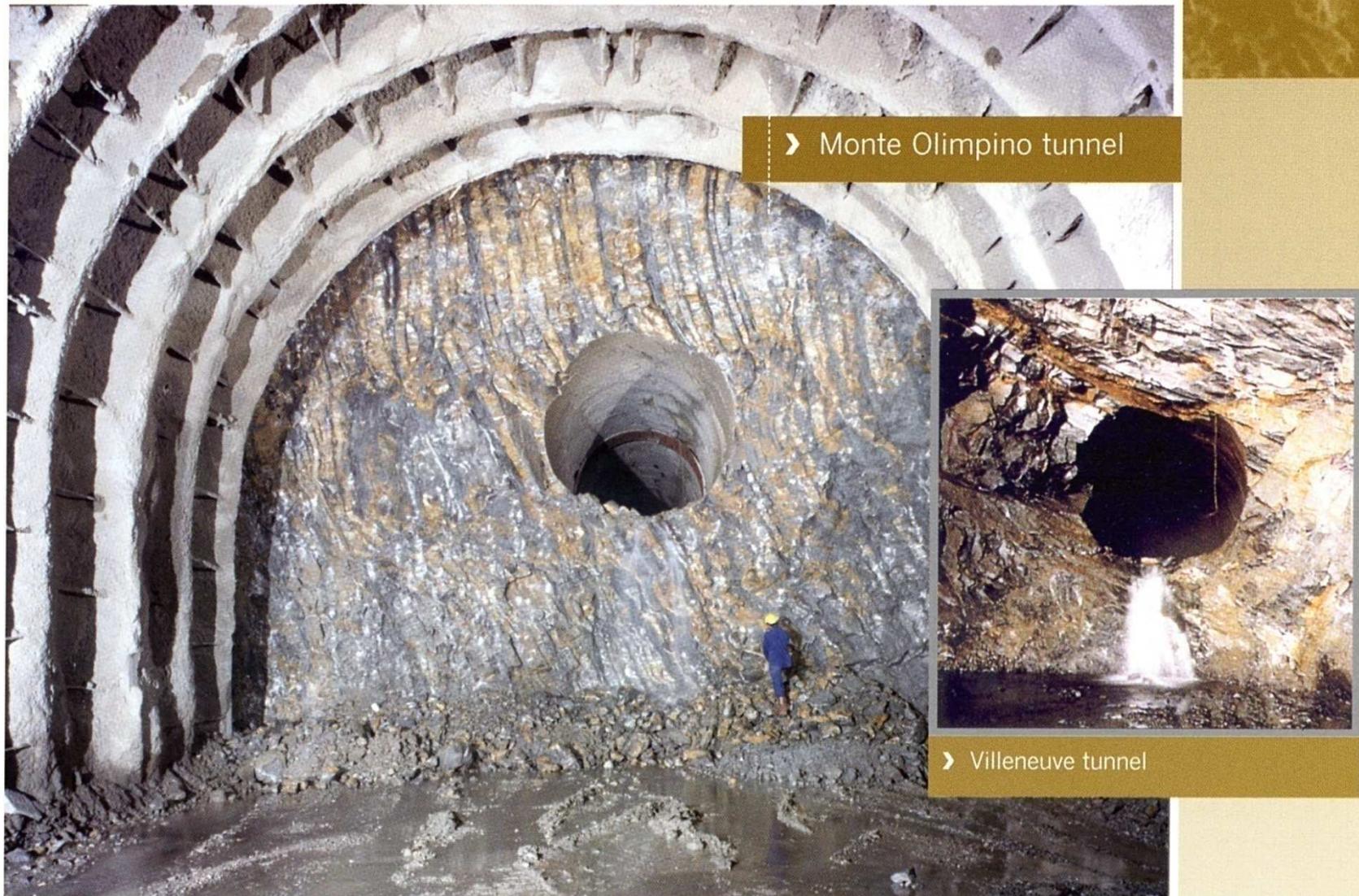
## Intérêt pour les études

- 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** d'un tunnel
- Galerie de visite pour les futurs entrepreneurs

## Intérêt pour les travaux du « grand » tunnel

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

## Reconnaissance avec un petit tunnelier (Ø 3 m)





# Gestion d'une reconnaissance par galerie

## Implantation et géométrie de la galerie

- Si possible, implanter les accès en bon terrain, afin que la galerie ne soit pas elle-même un problème...
- Privilégier l'objectif « Reconnaissance », même si la galerie pourra être réutilisée pour les travaux ou l'exploitation
- Au niveau du futur tunnel, investiguer surtout les plus mauvais terrains
- Diamètre minimal (3 m ?), pour réduire le coût, faciliter le processus de décision et améliorer la tenue de la galerie

## Gestion du contrat de travaux

- Le contrat de travaux de la galerie ne doit pas comporter de risques pour l'entrepreneur
- Les nécessités de la reconnaissance doivent toujours prévaloir sur l'objectif d'avancement de la galerie

*Ex. : Chemins de fer italiens (1960-1990) : 100 km de « pilot bore » Ø 3 m creusés au tunnelier*



# Coût des reconnaissances

L'objectif des reconnaissances est de faire baisser le coût des travaux :

- en optimisant le tracé du tunnel,
- en ajustant au mieux les méthodes d'exécution en fonction du terrain,
- en permettant aux entreprises d'établir un planning réaliste,
- en limitant les « surprises géologiques »,
- en réduisant les provisions pour aléas.

Coût d'un grand tunnel ferroviaire bitube :  $\sim 100 \text{ M€}/\text{km} \times 40 \text{ km} = 4 \text{ G€}$

Coût des reconnaissances : 3 à 5 %, soit 120 à 200 M€

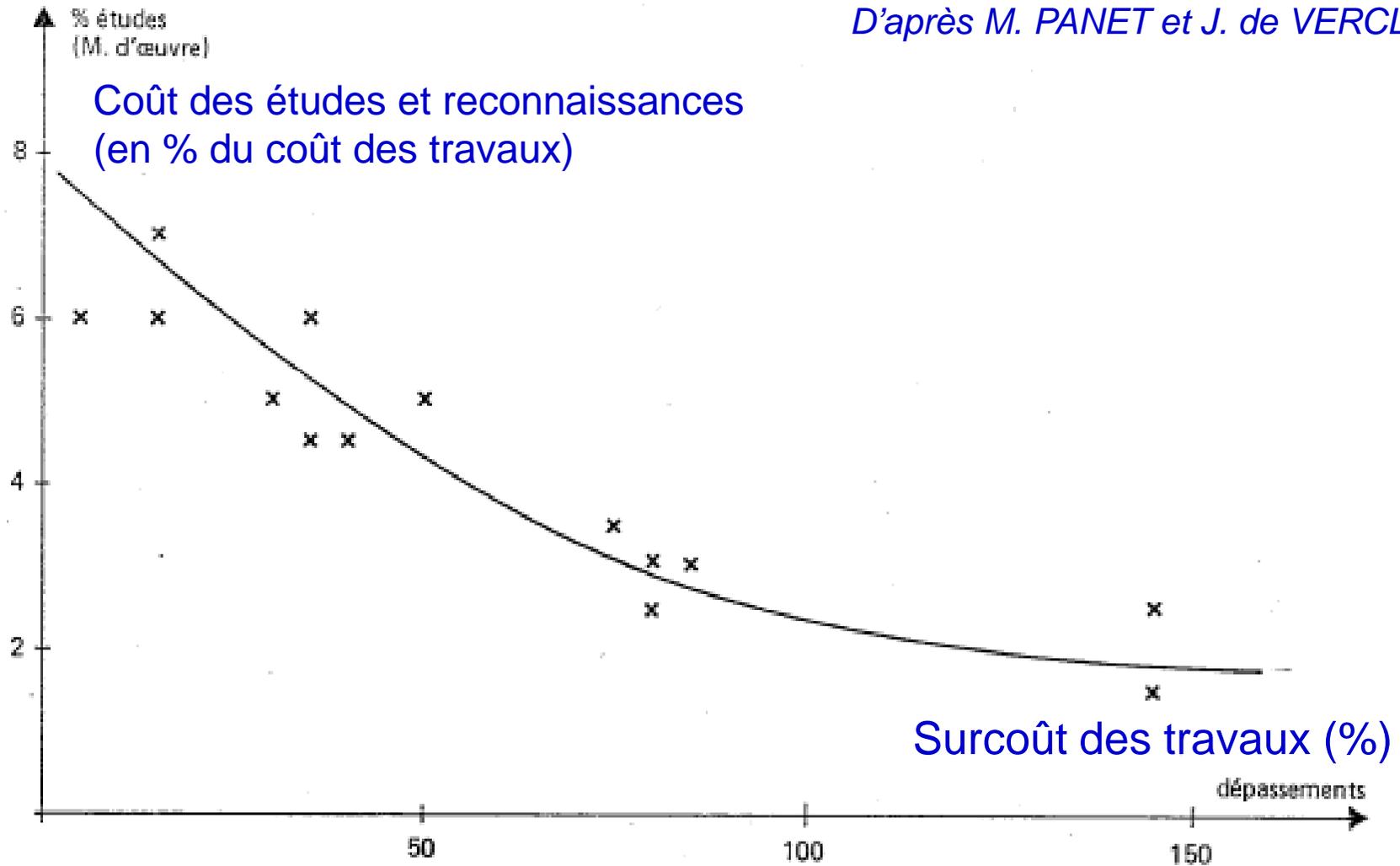
## Exemples de galeries de reconnaissances

Tunnel	Long.	Galeries de reconnaissance	Longueur	coût
Loetschberg	35 km	tunnelier Ø 5 m	9,6 km	
Ambin	53 km	3 galeries inclinées Ø 9 m tradi. (+ 60 km de sondages )	8 km	215 M€
Brenner	55 km	tunnelier Ø 6,30 m	10 km	80 M€



## Analyse de chantiers français qui ont donné lieu à des accidents géotechniques

*D'après M. PANET et J. de VERCLOS*





## Difficultés à surmonter

---

- Veiller à obtenir **l'accord des habitants** avant d'engager les sondages et galeries de reconnaissances
- Convaincre pour obtenir des **financements « lourds »** avant que la réalisation du tunnel ne soit fermement décidée
- Ne pas compter sur les « **reconnaissance à l'avancement** » (forages horizontaux en cours de travaux) pour remplacer les études préalables (il sera alors trop tard pour adapter les méthodes et les marchés)
- Garder toujours en réserve 20% du budget des reconnaissances pour faire face aux inévitables **imprévus**



## Conclusions

---

- L'intérêt du maître d'ouvrage est de faire des **économies sur les travaux**, et pas sur les reconnaissances !
- Une galerie de reconnaissance est un **investissement précoce** qui diminue le coût final de l'opération
- Ce sont les besoins du génie civil qui doivent piloter les reconnaissances géologiques
- Les conseillers du maître d'ouvrage doivent être :
  - très expérimentés en travaux souterrains,
  - bien payés pour avoir assez de temps d'optimiser le projet à loisir

*Rester modeste : la nature réserve toujours des surprises !*

\*\*\*