

## **Les attaques Sud du tunnel du Loetschberg dans les granites de l'Aar**



*C o n n e c t i n g   E u r o p e . . .*

- **A - Bref aperçu sur le projet et sa réalisation**
- **B - Comparaison "en vrai grandeur" des performances TBM et explosif (D&B)**
- **C – Difficultés particulières rencontrées dans les granites par les attaques au tunnelier**

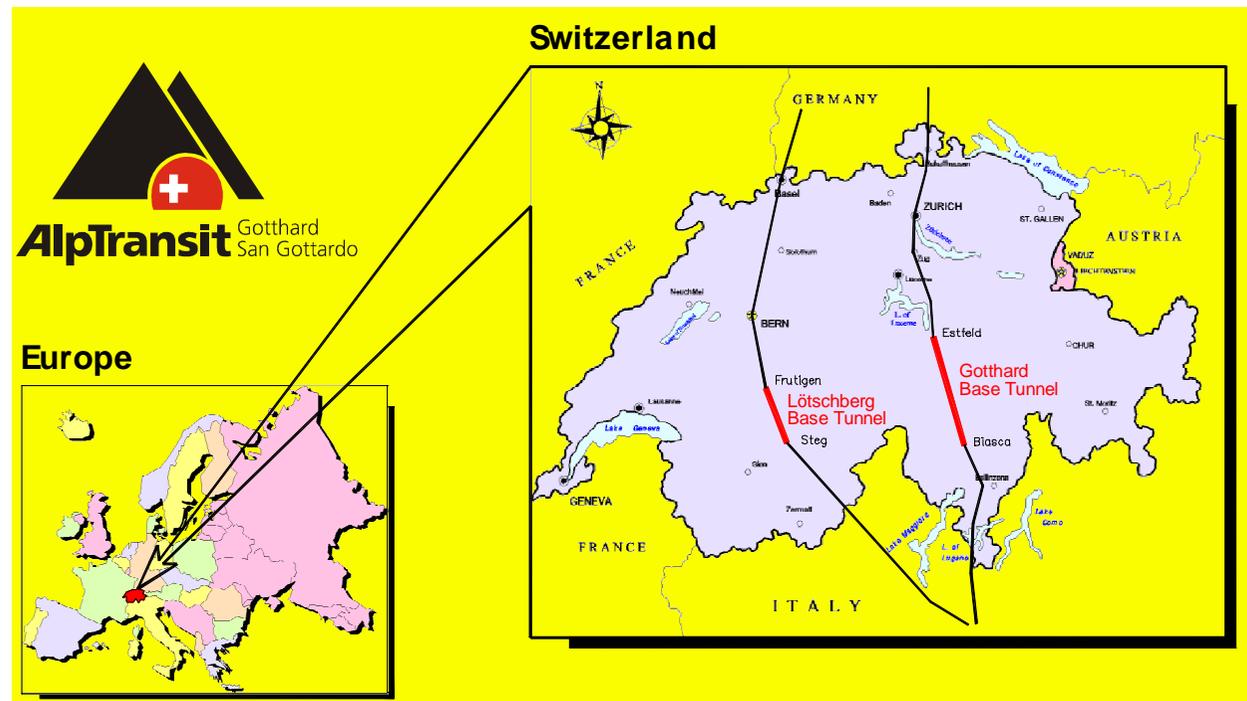
## **A – APERCU DU PROJET**

- **Qu'est ce que le projet Alptransit ?**
- **Phasage d'Alptransit-Loetschberg**
- **Contexte géologique**
- **Bilan de la 1<sup>ère</sup> phase de réalisation d'Alptransit Loetschberg**



# OBJECTIFS D'ALPTRANSIT

- Intégration de la Suisse dans le réseau ferroviaire européen à grande vitesse
- Transfert du fret de la route vers le rail
- Axes Loetschberg – Simplon et Gothard

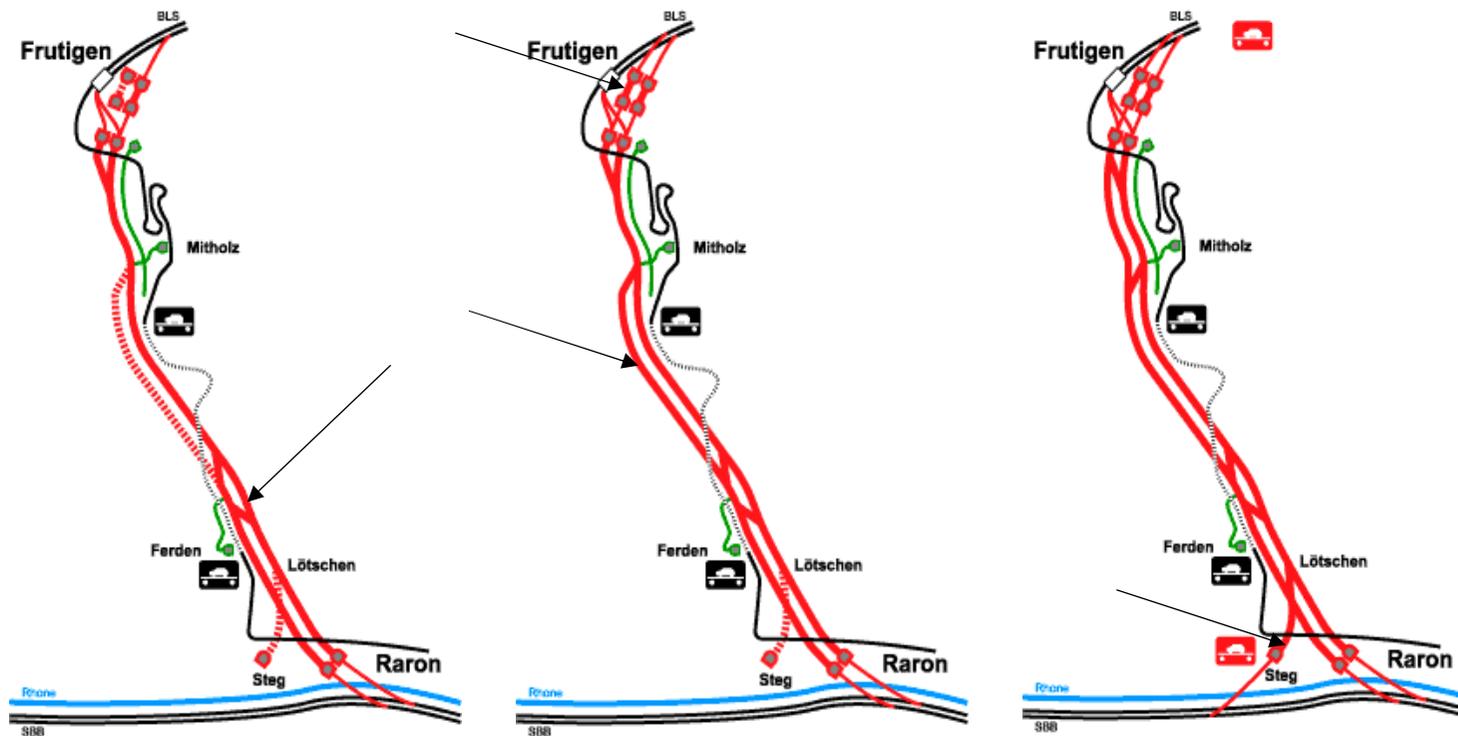


# FINANCEMENT DE LA 1<sup>ère</sup> PHASE D'ALPTRANSIT

- 20 M€ c.e. 2008 pour Altransit + Rail 2000 + projets divers



# PHASES DE REALISATION DU TUNNEL DE BASE DU LOETSCHBERG



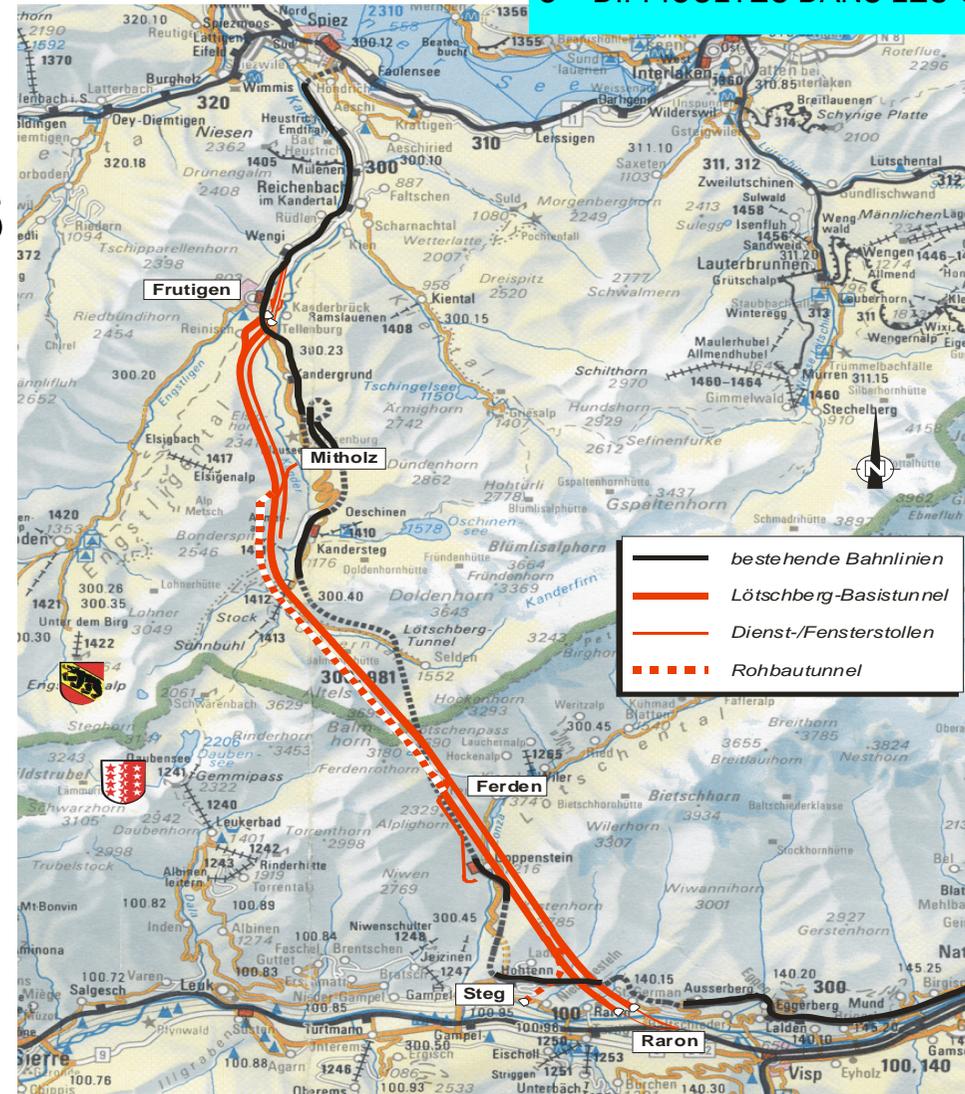
A – APERCU DU PROJET

B - COMPARAISON TBM - D&B

C – DIFFICULTES DANS LES GRANITES

# PHASE 1 DU LOETSCHBERG EN QUELQUES CHIFFRES

- 2 descenderies (4,2 km et 1,5 km) et 2 galeries de reconnaissance (9,4 km et 0,5 km)
- Axe Frutigen -Raron : 35 km
- Branche Steg : 3 km (bifurcation Loetschen)
- 2 gares de secours et de service
- 2 zones de cross-over
- Longueur galeries réalisées : 88 km
- Construction : 1995 – 2006
- Mise en service : 2007



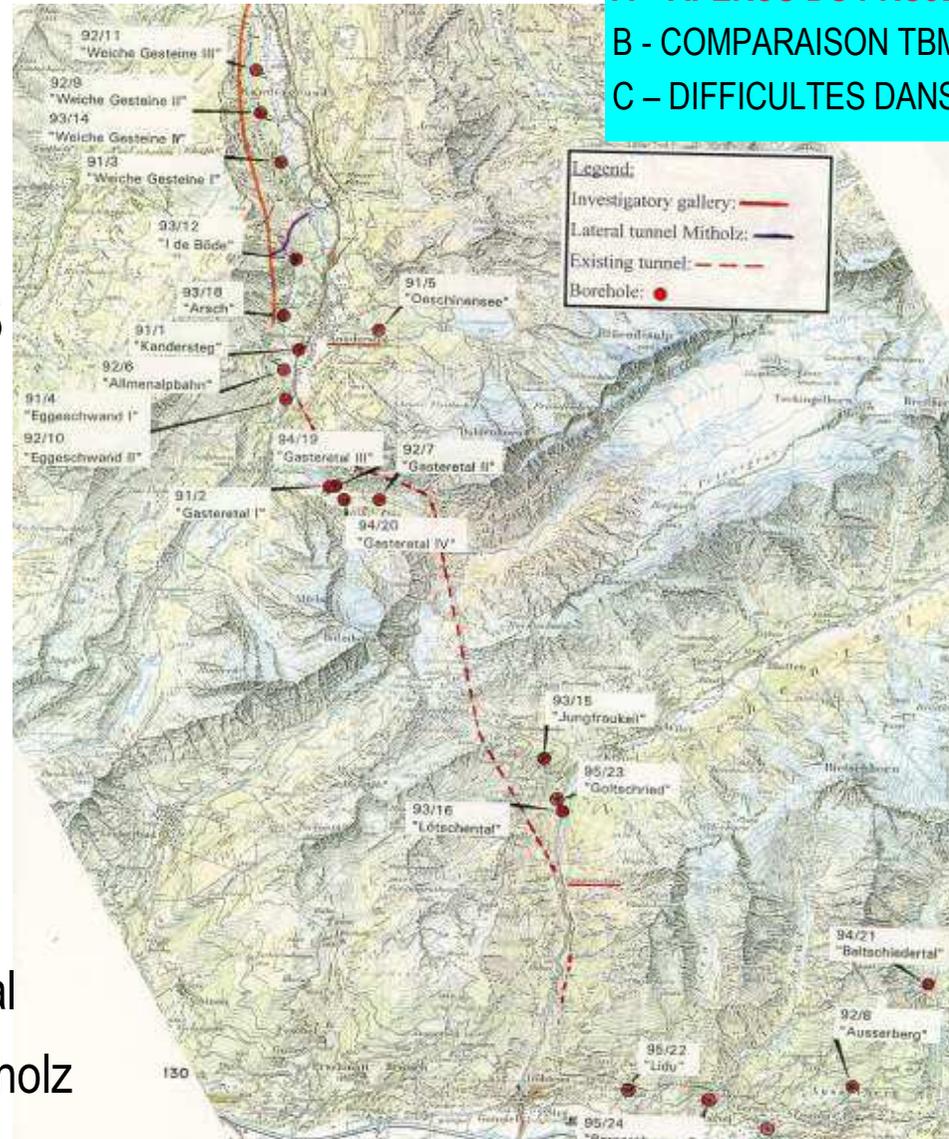
A – APERCU DU PROJET

B - COMPARAISON TBM - D&B

C – DIFFICULTES DANS LES GRANITES

# RECONNAISSANCES GEOLOGIQUES

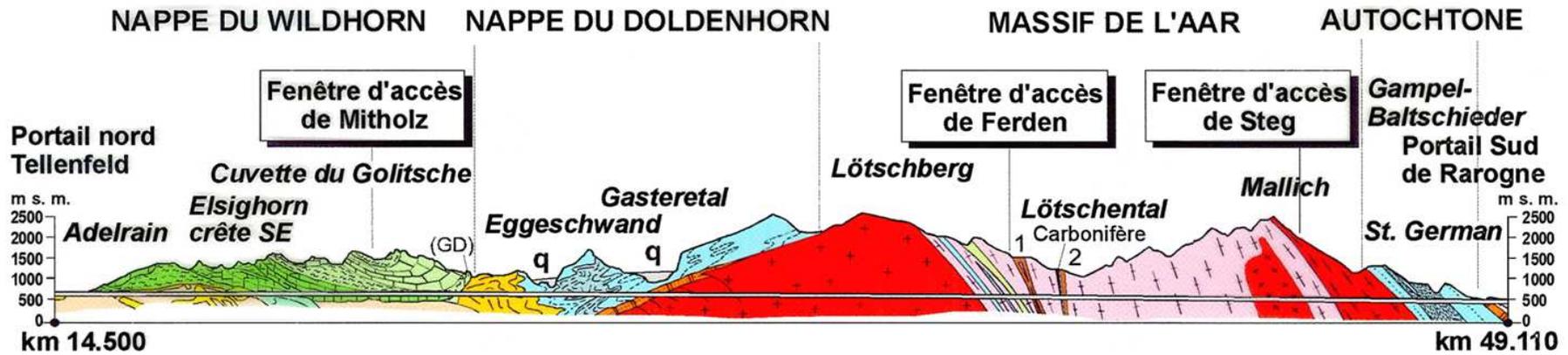
- Tunnel de faîte
- Sondages
- Galerie du Kandertal
- Descenderie de Mitholz





- A – APERCU DU PROJET
- B - COMPARAISON TBM - D&B
- C – DIFFICULTES DANS LES GRANITES

# CONTEXTE GEOLOGIQUE GENERAL (Axe Frutigen – Raron)



- q Remplissage quaternaire
- Série de Tavayanne Grès et "Dachschiefer"
- Flysch d'origine incertaine
- Nappe du Wildhorn Partie supérieure plissée  
Partie inférieure écaillée
- Mélange
- Nappe du Gellihorn (GD)
- Flysch de la nappe du Doldenhorn

- Nappe du Doldenhorn et Autochtone Prédominant calcaire marneux (au Sud: Schistes argileux durs) prédominant calcaire
- Trias autochtone Dolomies, schistes, gypse/ anhydrite, grès
- Ecaille de la Jungfrau
- Massif de l'Aar Granite de Gastern  
Granite central de l'Aar  
Granodiorite de Baltschieder
- Massif de l'Aar Socle cristallin: gneiss, schistes  
Ecailles de sédiment  
Gneiss à amphibole, amphibolite  
Zônes de phyllites 1 Dornbach/  
2 Faldumbach

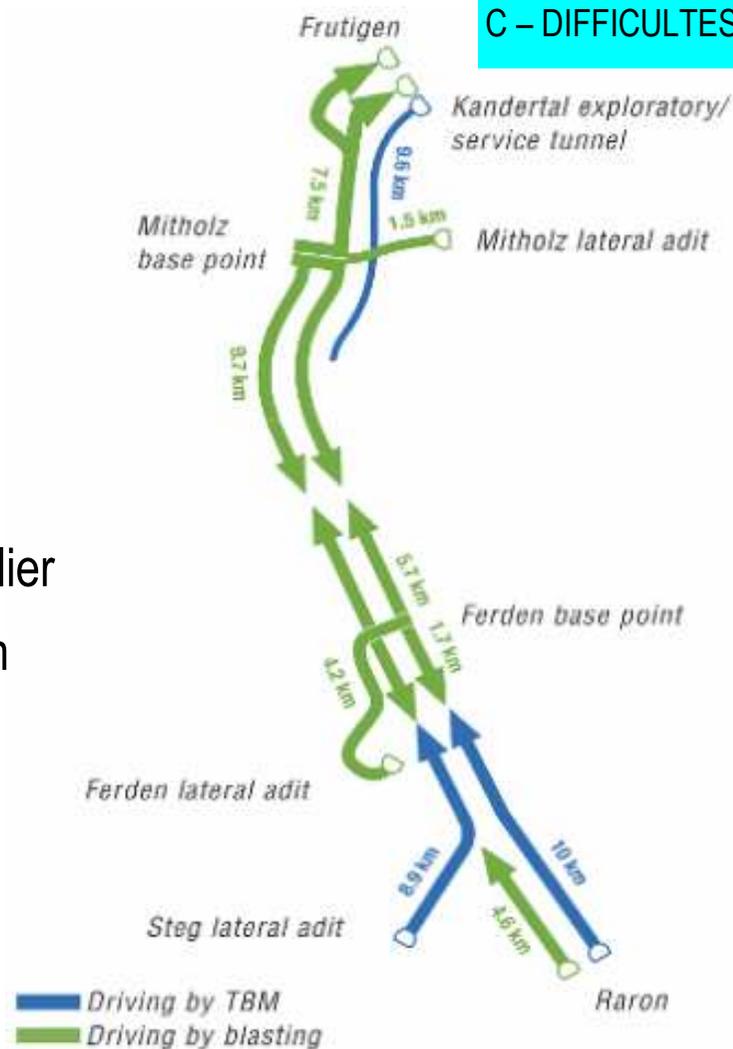
A – APERCU DU PROJET

B - COMPARAISON TBM - D&B

C – DIFFICULTES DANS LES GRANITES

# ALOTISSEMENT (hors reconnaissance et descenderies)

- 11 attaques principales dont 2 au tunnelier
- Longueur maxi des attaques env. 10 km

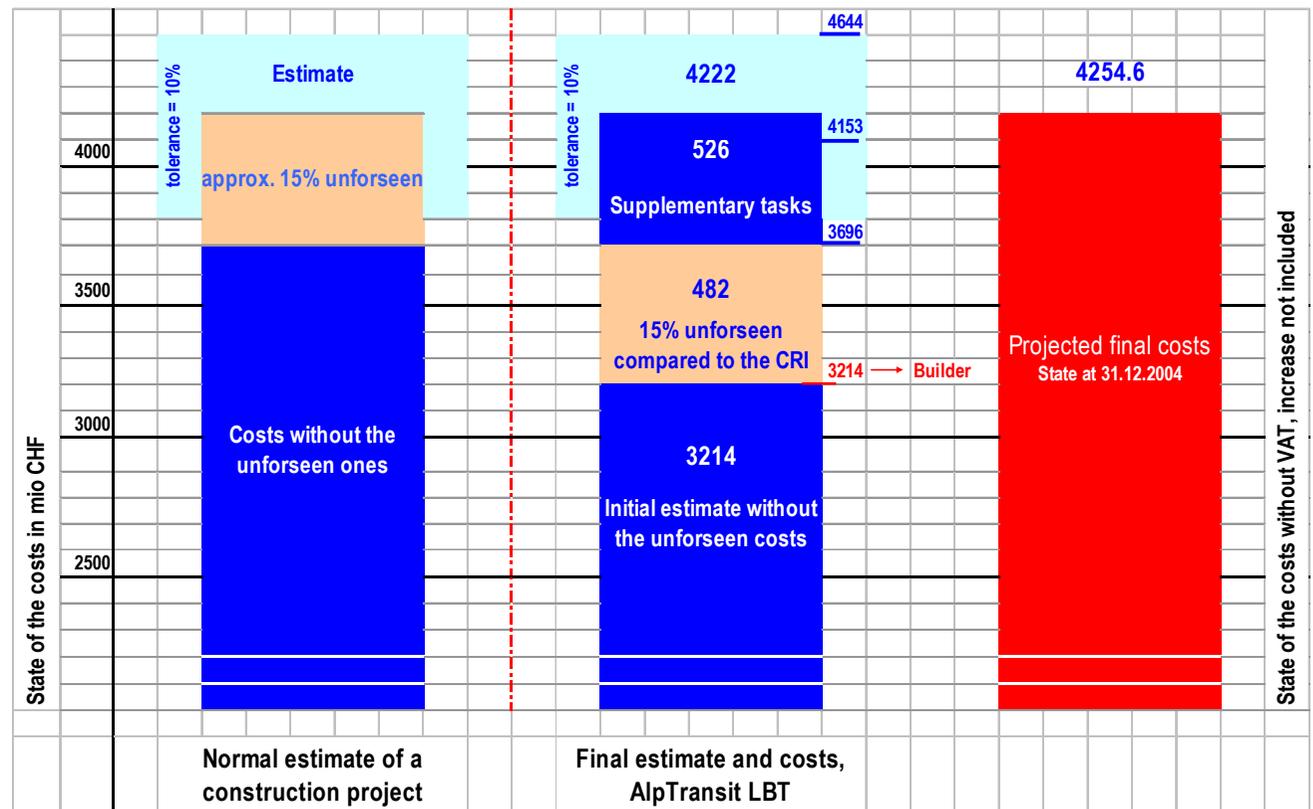




**A – APERCU DU PROJET**  
**B - COMPARAISON TBM - D&B**  
**C – DIFFICULTES DANS LES GRANITES**

# BILAN REALISATION 1ERE PHASE

- Des conditions de réalisation pour l'essentiel conformes aux prévisions
- Coûts et délais conformes aux prévisions

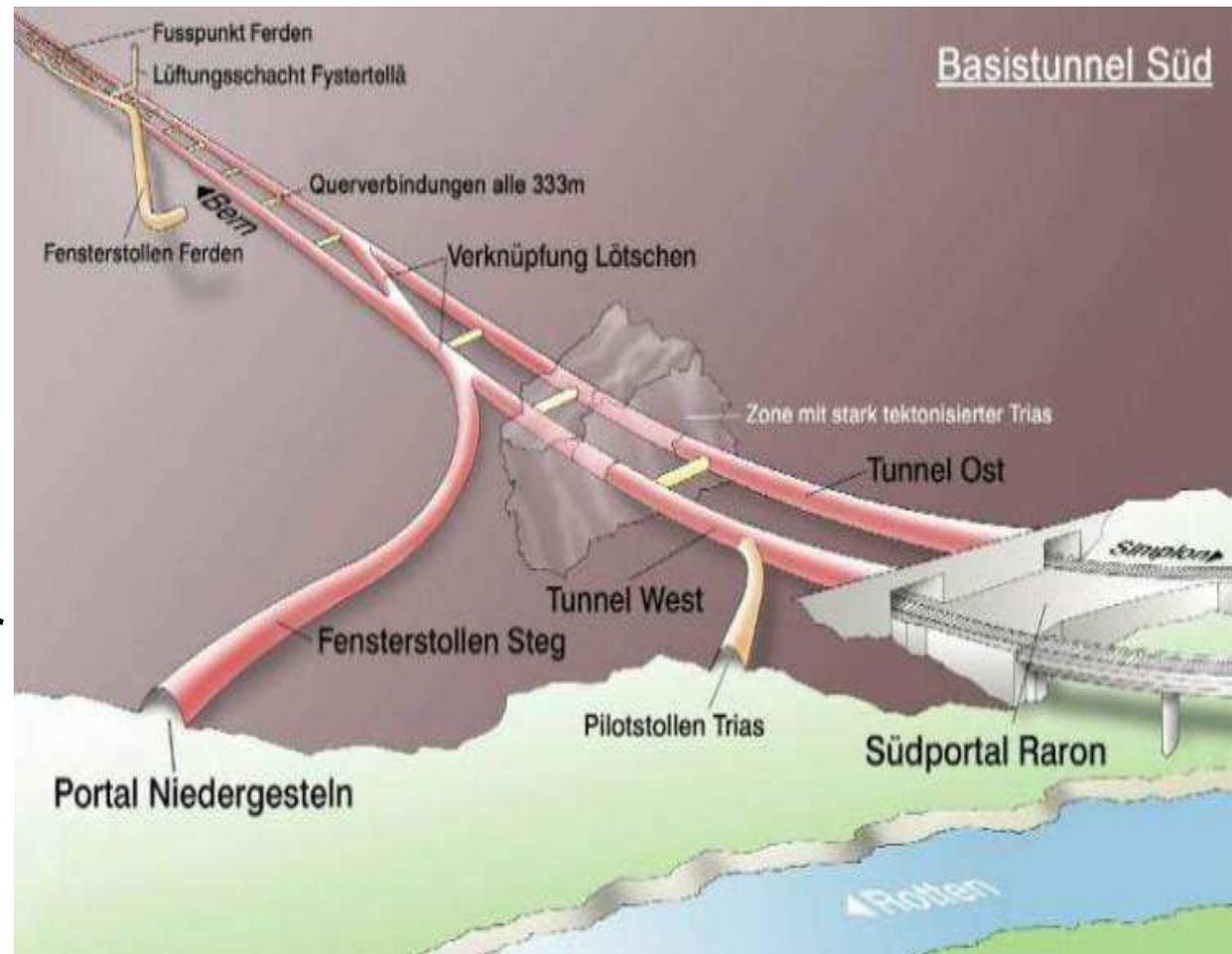


## **B – COMPARAISON DES PERFORMANCES D'AVANCEMENT POUR LES ATTAQUES SUD**

- **Les attaques Sud depuis Steg et Raron**
- **Difficultés principales rencontrées**
- **Comparaison des cadences d'avancement TBM et en méthode traditionnelle sur la même section**
- **Comparaison des cadences d'avancement TBM sur les deux lots**

## LES ATTAQUES SUD DEPUIS STEG ET RARON

- 1 galerie pilote pour reconnaître une zone de Trias
- 2 attaques au tunnelier avec ripage d'un tunnelier dans zone Trias
- 1 attaque à l'explosif



A – APERCU DU PROJET

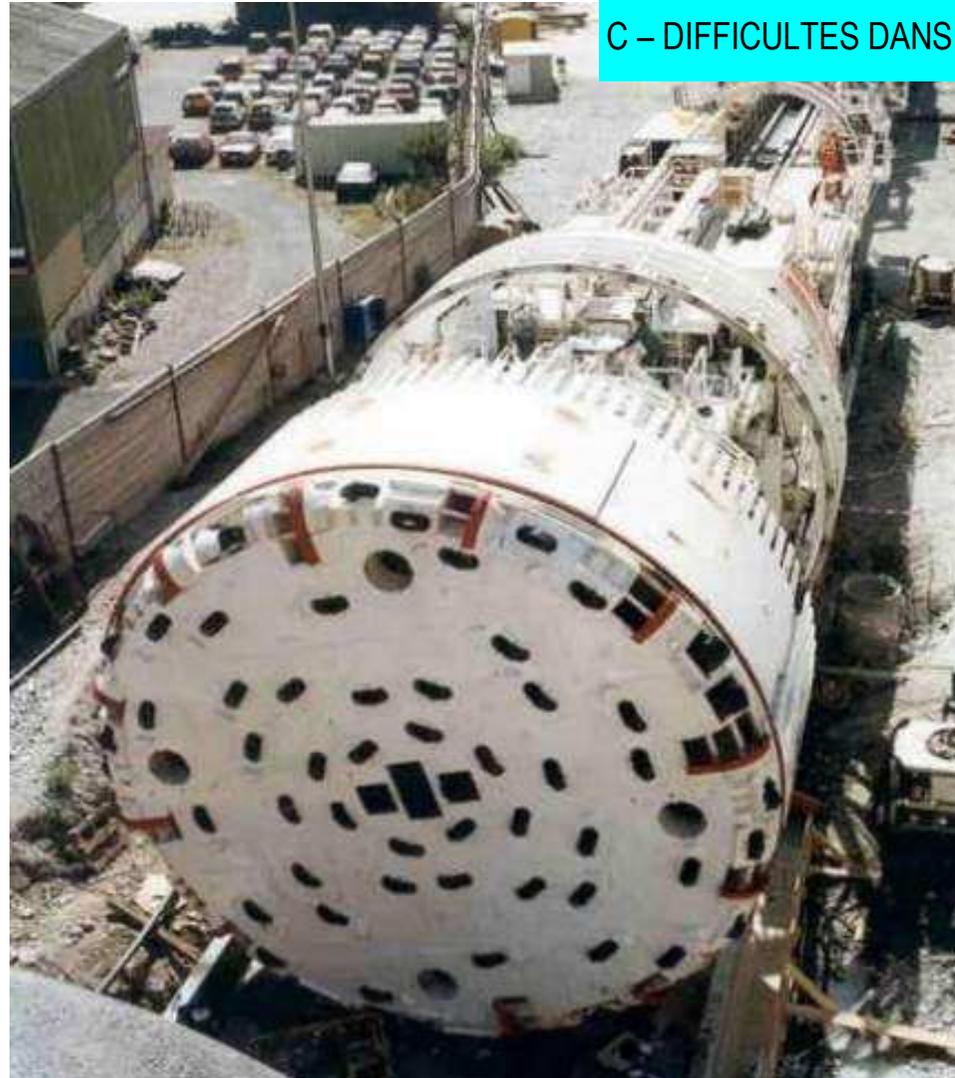
**B - COMPARAISON TBM - D&B**

C – DIFFICULTES DANS LES GRANITES

## **ATTAQUES STEG ET RARON OUEST AU TBM**

### ***Caractéristiques des TBM (machines quasi identiques)***

- **Type : ouvert roche dure**
- **Marque : Herrenknecht**
- **Diamètre nominal : 9.4m**
- **Longueur : 142m**
- **Poids : 1'450t**
- **Puissance : 3500 kW**



# ATTAQUE RARON EST A L'EXPLOSIF

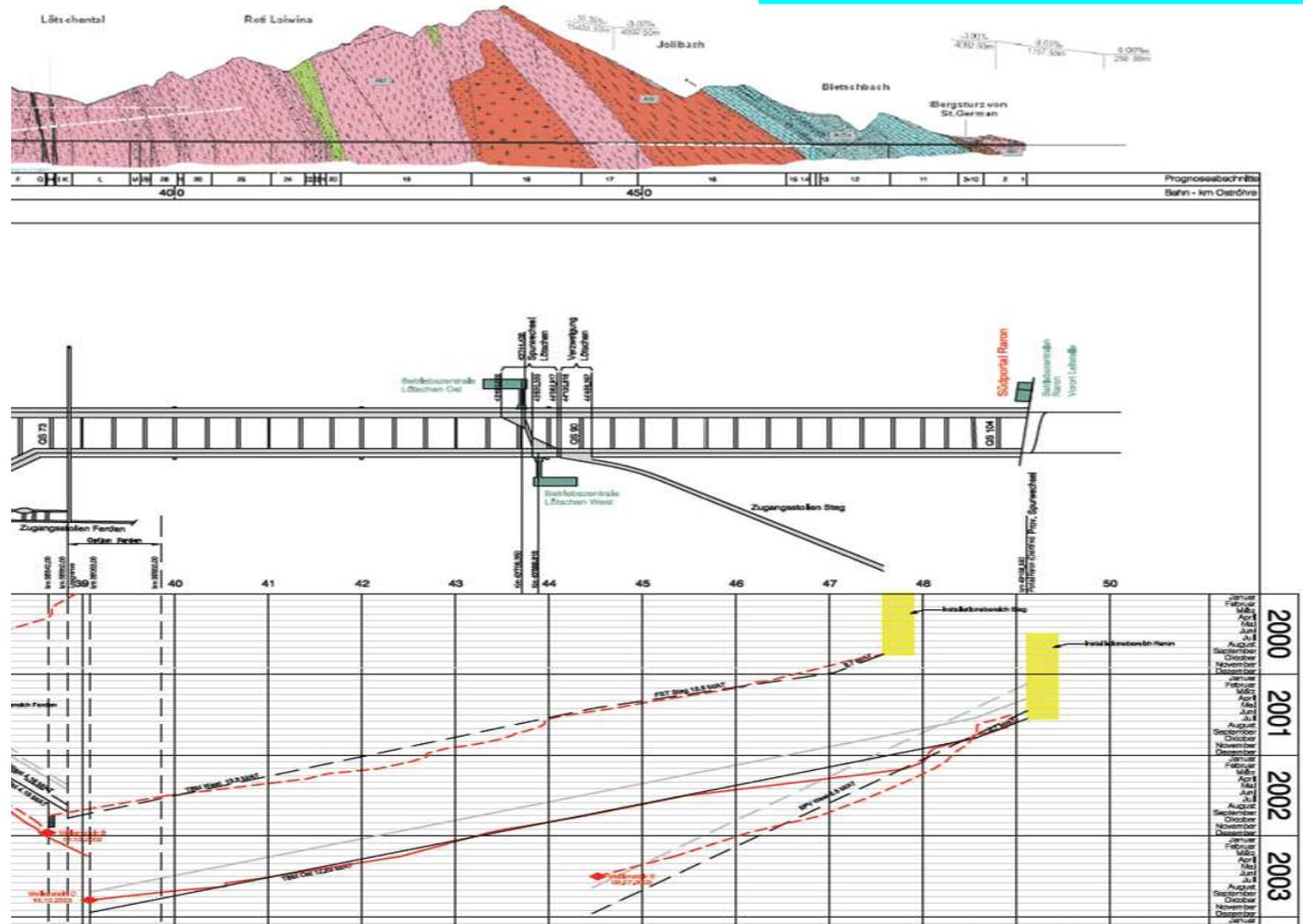
## Caractéristiques :

- **Type foreuse : automatique 3 bras + nacelle**
- **Marque : Robofore**
- **Nombre trous par section : 110**
- **Longueur max volées : 5,5 m**
- **Type explosif : émulsion**
- **Consommation : env. 400 kg/m<sup>3</sup>**



A – APERCU DU PROJET  
 B - COMPARAISON TBM - D&B  
 C – DIFFICULTES DANS LES GRANITES

# APERCU DU CONTEXTE ET DU PLANNING DE REALISATION



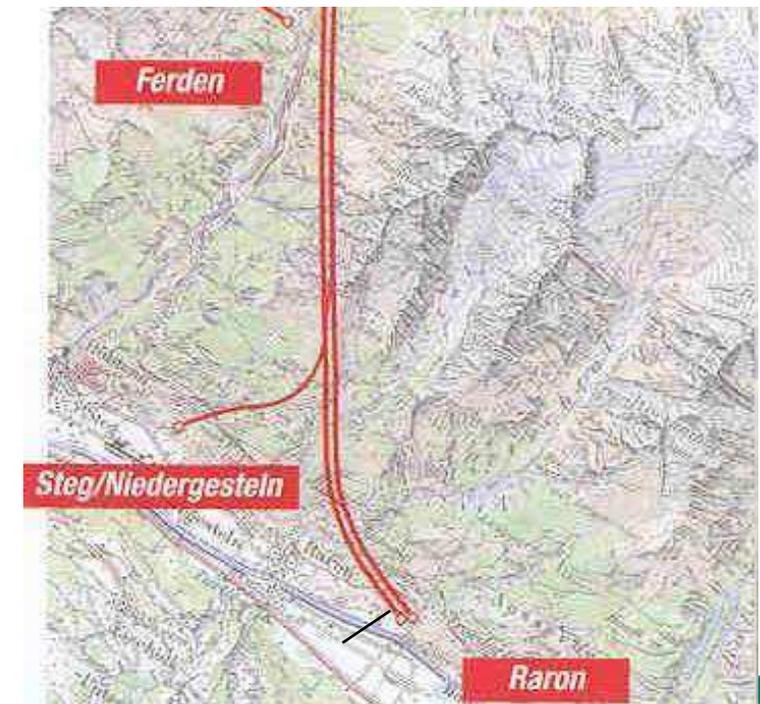
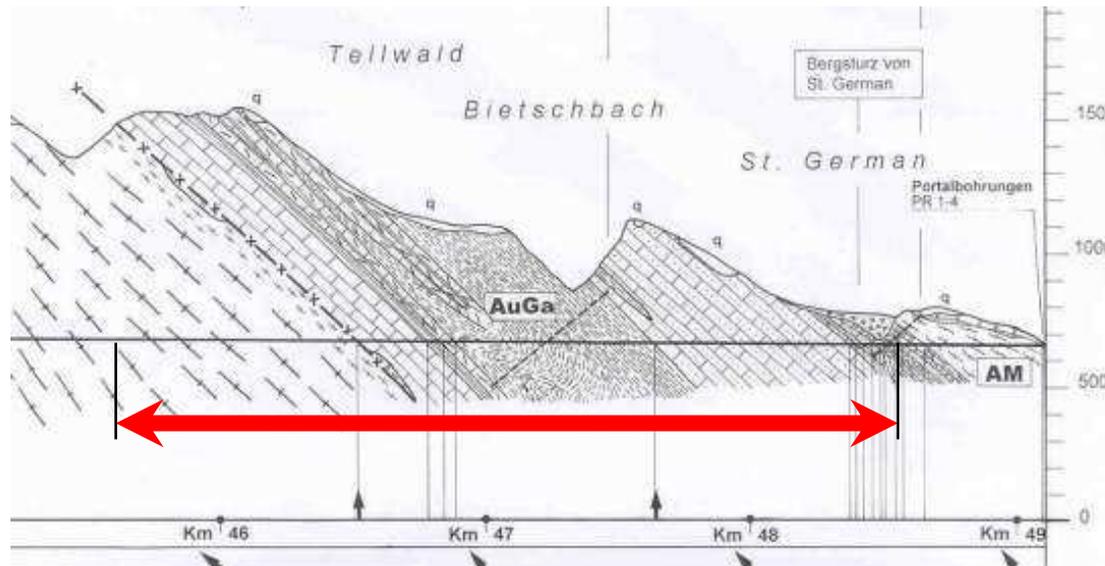
Daniel Collomb 11 juin 2009

A – APERCU DU PROJET

**B - COMPARAISON TBM - D&B**

C – DIFFICULTES DANS LES GRANITES

## COMPARAISON TBM ET EXPLOSIF SUR ENVIRON 3 KM POUR LES ATTAQUES RARON EST ET OUEST



## COMPARAISON DES CADENCES D'AVANCEMENT PAR LITHOLOGIES

Formations rocheuses	TBM (m/j)	Expl. (m/j)
Lias	6.5	5.6
Dogger (Aalenian)	17.8	7.3
Quinten Limestone	18.5	10
Granodiorite	22.2	8.7
Granite	13.7	10.2

**Instabilités en voûte**

**Roches très abrasives**

## CONVERGENCES ANISOTROPES DANS LES CALCAIRES DU LIAS

- Roche excavée "en direction"
- Convergences jusqu'à 60 cm pour l'attaque au TMB
- Moins de difficultés pour l'attaque à l'explosif



## COMPARAISON DES CADENCES D'AVANCEMENT POUR L'ENTIER DES LOTS STEG ET RARON

Section / lot	Longueur	Avancement journalier (m/j)		
		Moyen (hors vacances)	Net (hors interruptions)	Maximum
TBM Steg	8,9 km	13,7	16,2	43
TBM Raron	9,8 km	13,2	16,2	50
Expl. Raron	4,7 km		6,9	17

## **C – DIFFICULTES DANS LES ROCHES DURES POUR LES ATTAQUES AU TUNNELIER**

- **Difficultés attendues**
- **Difficultés rencontrées**
- **Tentative d'explication**



## ABRASIVITE

- Usure des molettes (Steg : 0,42 pc/m'; Raron : 0,39 pc/m')
- Réparation têtes à plusieurs reprises (4 x pour Steg)

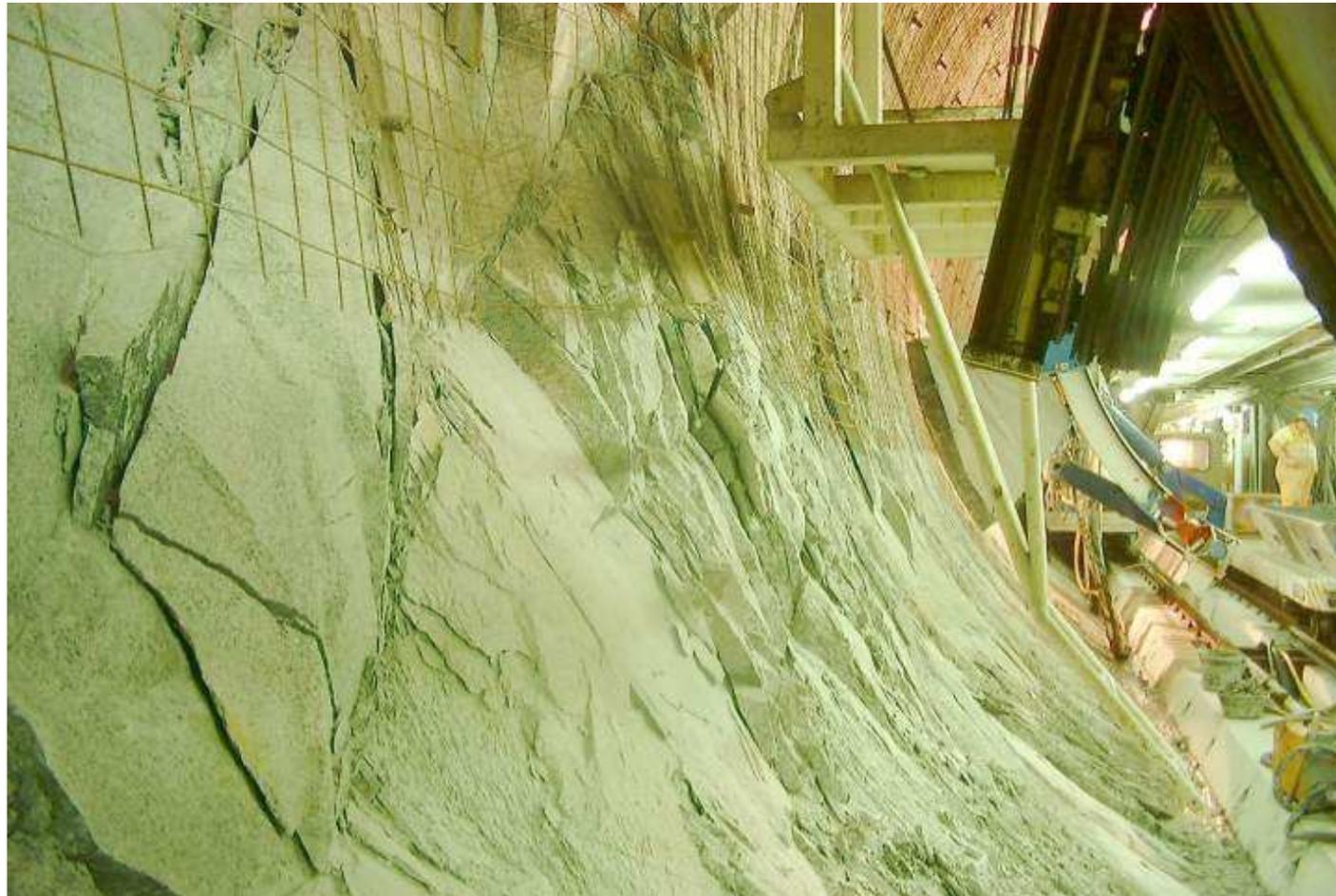


A – APERCU DU PROJET

B - COMPARAISON TBM - D&B

**C – DIFFICULTES DANS LES GRANITES**

## ECAILLAGES EN PAROI (DECOMPRESSIONS MODEREES)



Daniel Collomb 11 juin 2009

A – APERCU DU PROJET

B - COMPARAISON TBM - D&B

**C – DIFFICULTES DANS LES GRANITES**

## DECOMPRESSIONS VIOLENTES



A – APERCU DU PROJET

B - COMPARAISON TBM - D&B

**C – DIFFICULTES DANS LES GRANITES**



## DEFAUT D'APPUI DES GRIPPERS



# FORMATION DE PLAQUES ET DE BLOCS DEVANT LA TÊTE DE FORAGE



**Situation attendue**



**Situation observée**



## ENTRAINEMENT DES BLOCS DEVANT LA TÊTE DU TUNNELIER (FONCTIONNEMENT COMME "CONCASSEUR")

- Usure particulière des molettes
- Abrasion de la tête du tunnelier



A – APERCU DU PROJET

B - COMPARAISON TBM - D&B

**C – DIFFICULTES DANS LES GRANITES**

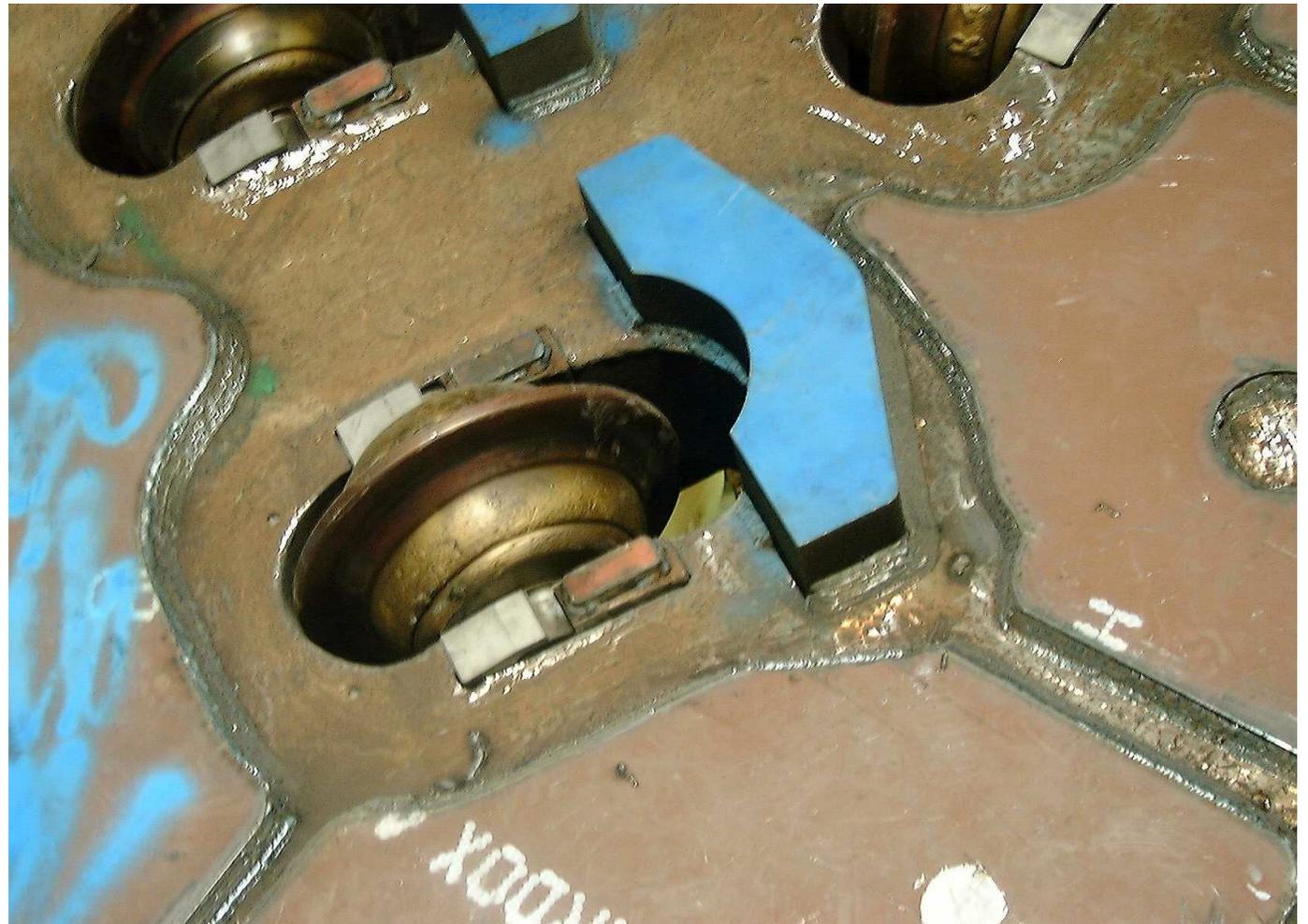
## DECHIRURE DES BANDES TRANSPORTEUSES



Doc. ARGE MaTrans, TBM  
drive Raron

## REPARATION DE LA TETE

**Soudage de  
chasse-blocs  
devant les  
molettes**

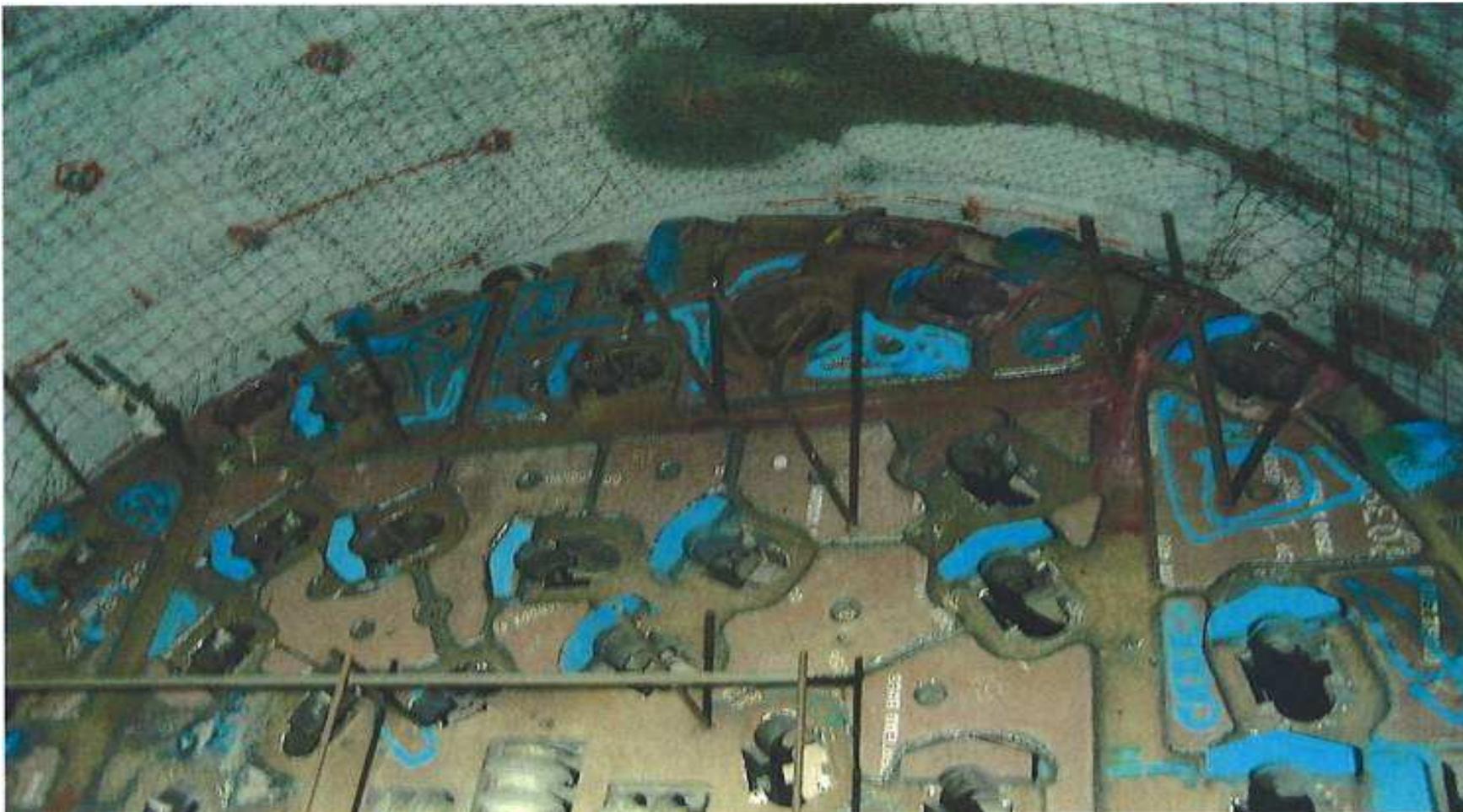


A – APERCU DU PROJET

B - COMPARAISON TBM - D&B

**C – DIFFICULTES DANS LES GRANITES**

## REPARATION DE LA TETE



Daniel Collomb 11 juin 2009



# TENTATIVES D'EXPLICATION DE LA FORMATION DE BLOCS AU FRONT

- Contexte d'apparition du phénomène
- Evaluation des risques de décompression violentes en phase d'étude
- Approches théoriques





## CONTEXTE D'APPARITION DU PHENOMENE

- Pour des couvertures rocheuses de plus de 1500 m (augmentation du phénomène avec la profondeur pour une même lithologie)
- Dans le Zentraler Aare-Granit et dans une moindre mesure dans l'AltKristallin
- Dans des faciès à grains grossiers
- Pas dans les zones tectonisées
- Pour les zones concernées de gneiss, fréquence d'apparition plus grande si schistosité bien développée (Bändergneiss)



## **CONTEXTE D'APPARITION DU PHENOMENE**

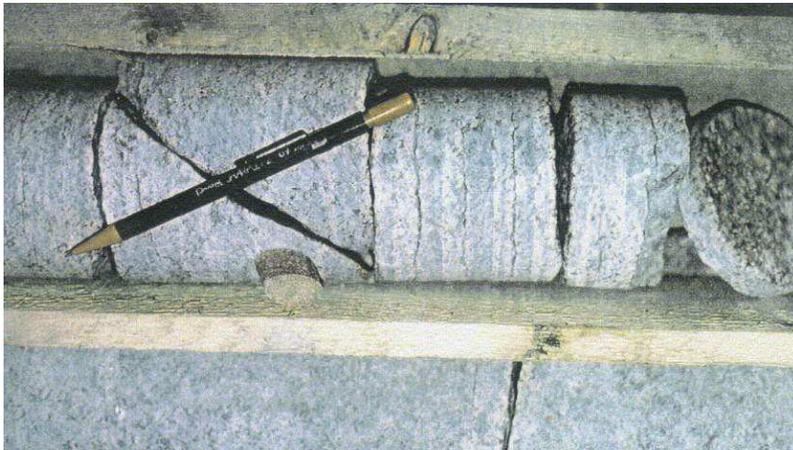
- **Une surface concernée au front d'environ 15 m<sup>2</sup>, c'est-à-dire selon une couronne d'environ 4 m de diamètre (Ø tunnelier de 9,4 m)**
- **Des instabilités jusqu'à 2 m de profondeur, avec le plus souvent détachement de blocs d'environ 20 cm "de côté"**
- **Des surfaces de rupture "fraîches" (indépendantes des discontinuités), associées ou non à des surfaces liées à des discontinuités préexistantes**

## **EVALUATION DU RISQUE DE DECOMPRESSIONS VIOLENTES EN PHASE ETUDE**

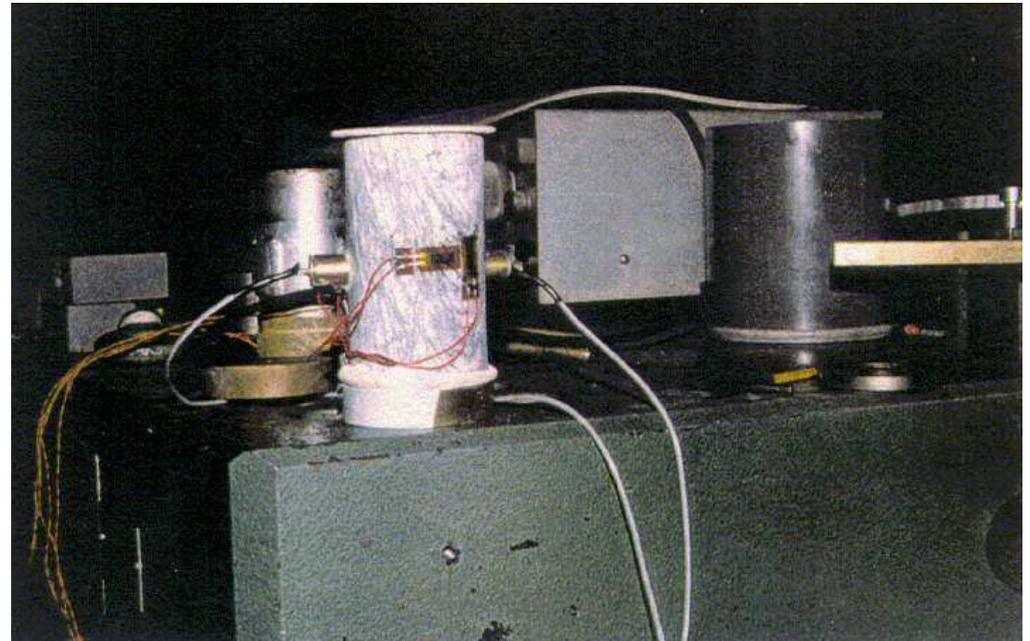
- **Retours d'expérience du tunnel de faîte du Loetschberg et du tunnel du Mont Blanc**
- **Identification des lithologies à risque**
- **Estimation de l'état des contraintes initiales**
- **Définition de classes de risque fonction de la pétrographie et des niveaux de contrainte**
- **Définition d'un zonage des risques pour le projet**
- **Proposition de mesures de conception pour réduire les risques**



## IDENTIFICATION DES LITHOLOGIES A RISQUE



Discage des carottes de forage  
dans le Gastern-Granit  
(extraites du tunnel de faîte)



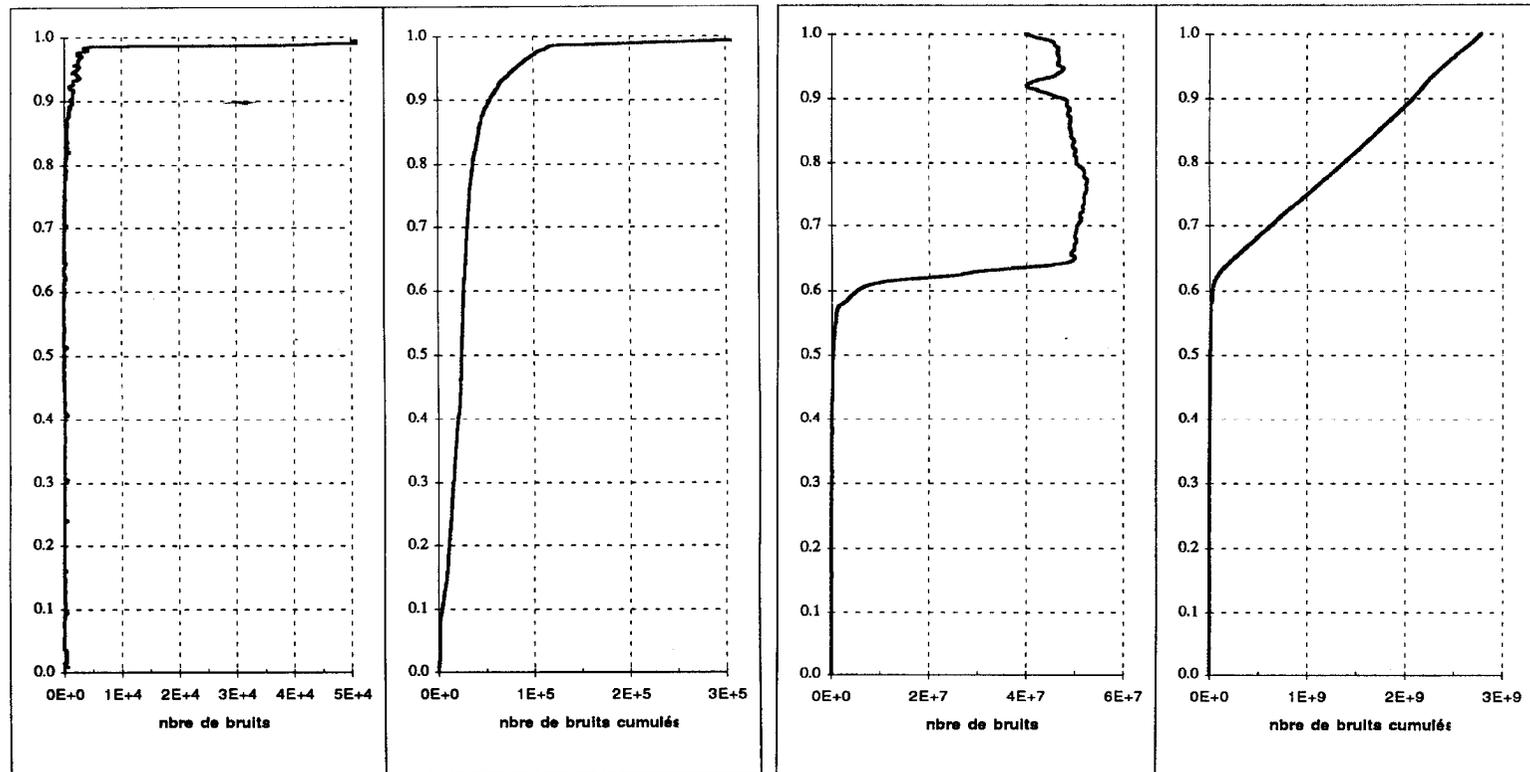
**Essais de compression simple avec  
enregistrement des émissions acoustiques**

Daniel Collomb 11 juin 2009



# IDENTIFICATION DES LITHOLOGIES A RISQUE

Enregistrement  
des émissions  
acoustiques



Echantillon de granite (Gastern-Granit)

Echantillon de gneiss (Altkristallin)

## EVALUATION DU RISQUE SELON 4 CLASSES :

A – Risque très élevé : 75-100 % ;  $\sigma_t > 130$  MPa

B – Risque élevé : 50-75 % ;  $120 \text{ Mpa} < \sigma_t < 130$  MPa

C – Risque modéré : 25-50 % ;  $110 \text{ Mpa} < \sigma_t < 120$  MPa

D – Risque faible : 0-25 % ;  $100 \text{ Mpa} < \sigma_t < 110$  MPa

Remarque : Selon Martin, Kaiser et Creath, le risque de décompression violente existe dès que  $\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_c / 3$ , c'est-à-dire pour  $\sigma_t > 40$  MPa en paroi dans les granites



## APPROCHES THEORIQUES

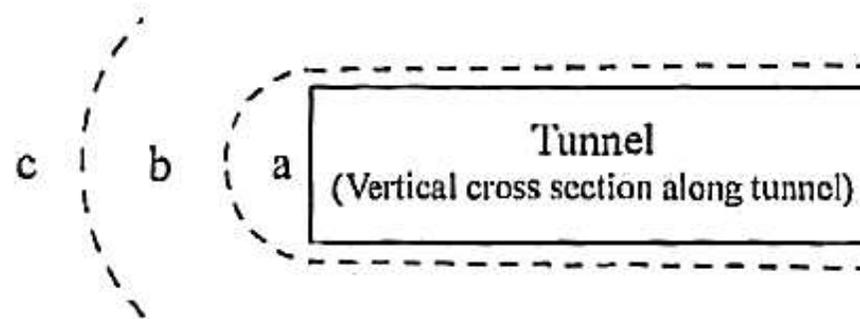
- **Modélisation aux éléments finis (milieu continu)**
- **Evaluation de modes de rupture associés aux conditions structurales**
- **Conclusion**



## MODELISATION MILIEU CONTINU : SITUATION DES CONTRAINTES DEVANT LE FRONT DE TAILLE

Ordre de grandeur des  
contraintes initiales :

- $\sigma_v = 50$  MPa;
- $\sigma_H = 20$  MPa (dir. axe);
- $\sigma_h = 15$  MPa (dir. trans.);

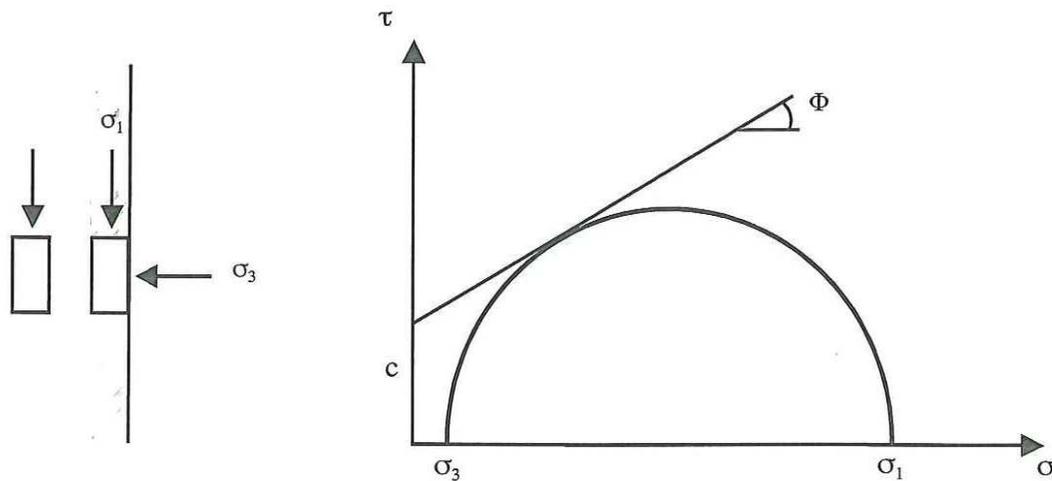


c : Zone contraintes inchangées

a : Contraintes < état initial (évt. plastification)

b : Contraintes > état initial

## CONDITION DE FRONT NON PLASTIFIE POUR UNE MODELISATION DE MILIEU CONTINU



Valeur minimale de  $\sigma_3$  :  $(\sigma_1 - \sigma_3) \times \frac{1}{2} \times \cos \emptyset = ((\sigma_1 - \sigma_3) \times \frac{1}{2} - (\sigma_1 - \sigma_3) \times \frac{1}{2} \times \sin \emptyset) \times \tan \emptyset + C$

D'où, pour  $\sigma_3 = 0$  et  $\sigma_1$  de l'ordre de 50 MPa, il faut par exemple **C min = 13 MPa** comme condition de non plastification du front pour  $\emptyset = 35$ . Cette condition est a priori remplie pour le **Felstyp 9.1**

(Zentraler Aare-Granit : Rc moyen = 117 MPa)

A – APERCU DU PROJET

B - COMPARAISON TBM - D&B

**C – DIFFICULTES DANS LES GRANITES**

## MODELISATION AUX ELEMENTS FINIS

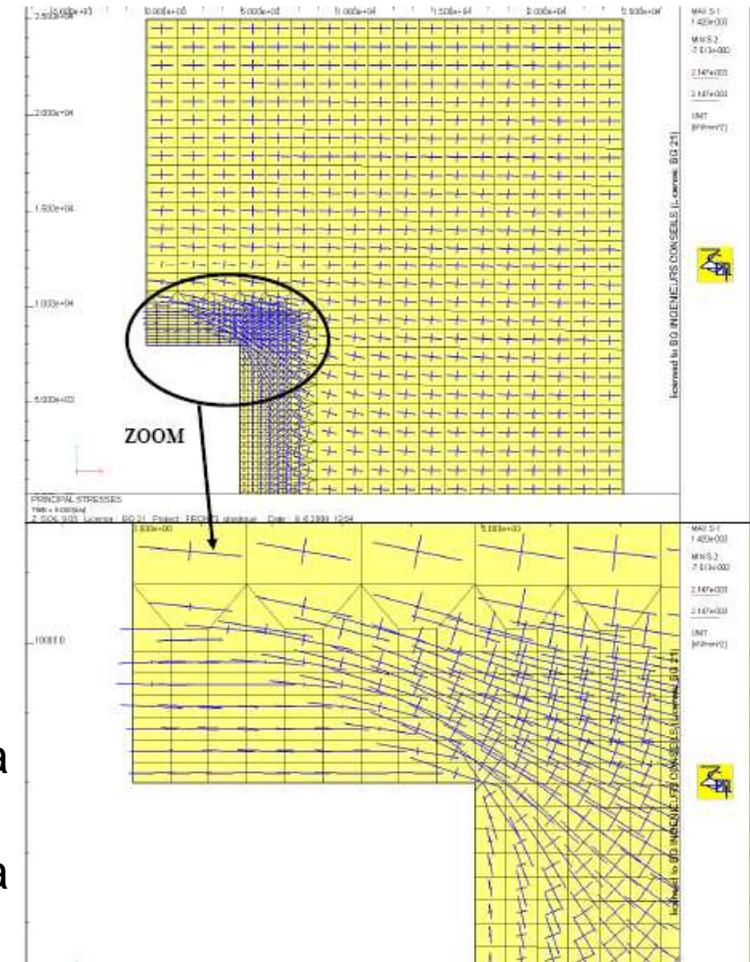
Calcul 2D  
axisymétrique

Valeurs de calcul pour  
Felspyp 9.1 tectonisé :

- $P_o = 49 \text{ MPa}$ ,
- $E = 38 \text{ GPa}$ ,
- $\eta = 0,23$ ,
- $\varnothing = 34^\circ$ ,
- $Crés = 9,2 \text{ MPa}$   
(modèle Mohr-Coulomb)

Résultats principaux :

- Aucune traction,
- Compression maxi de 90 MPa  
selon calcul élastique
- Compression maxi de 75 MPa  
selon calcul plastique





A – APERCU DU PROJET  
 B - COMPARAISON TBM - D&B  
 C – DIFFICULTES DANS LES GRANITES

# CONDITIONS STRUCTURALES

	K1	NW -SE	90
	K2	N-S to NNE-SSW	90
	K3	Horizontal to slightly inclined NW/NE	
	K4	W-E to WSW-ENE	90

Principales familles de discontinuité

Tunnels:

Main NNW, Steg NNE



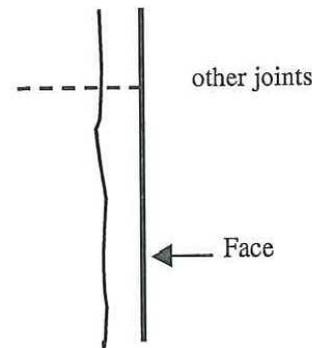
Orientation du creusement



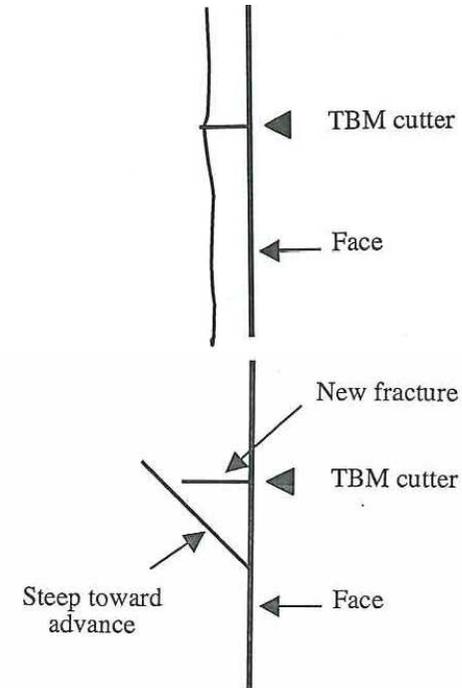
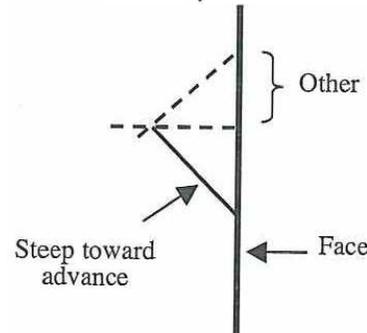


# MODES DE RUPTURE ASSOCIES AUX CONDITIONS STRUCTURALES

Mode 1 : Individualisation de  
plaques selon discontinuités  
subverticales parallèles au front



Mode 2 : Individualisation de  
blocs selon discontinuités  
subverticales biaisées





# RUPTURE PAR FLAMBAGE DE PLAQUES

Contrainte critique de flambage selon Euler :

$$\sigma_{critique} = (\pi^2 \times E \times d^2) / (12 \times Le^2)$$

(avec E l'élasticité de la roche, d l'épaisseur de la plaque et Le sa longueur de flambage)

Effective Lengths for Columns with Various End Conditions				
End Condition	Pinned-Pinned	Fixed-Free	Fixed-Fixed	Fixed-Pinned
<p>The effective length is equal to the distance between points in the column where moment = 0 (between "pins"). This occurs when the curvature of the column changes.</p> <p>The Fixed-Free column is "mirrored" through the fixed end to visualize <math>L_e=2L</math>.</p>				
Effective Length, $L_e$	L	2L	0.5L	0.7L
Relative Buckling Strength ( $\sim 1/L_e^2$ ) for same L	1	0.25	4	2

D'où  $\sigma_{critique} = 42 - 49$  MPa pour  $E = 30 - 35$  GPa (Felstyp 9.1);  
 $d = 0,2$  m (espacement type des joints K 1) et  $Le = 4.85$  m (demi diamètre d'excavation)



# CONCLUSION 1 : MECANISME DE PROPAGATION DE FISSURES

- Individualisation de plaques ou blocs par **propagation de fissures** préexistantes et/ou résultant de l'excavation (molettes),
- Dans des **roches dures à comportement fragile** à la rupture (granites à gros grains notamment),
- Rupture par **flambage** en présence de **discontinuités préexistantes subverticales**

## **CONCLUSION 2 :**

# **CETTE SITUATION EST A ATTENDRE POUR LES TUNNELS PROFONDS EXCAVES AU TBM**

- Dans certaines lithologies seulement, mais
- D'autant plus que le tunnel est profond et que la section excavée au TBM est grande,
- Possibilité de réduire un peu le risque en augmentant le nombre de molettes (diminution diamètre des molettes !) et, pour certaines configurations structurales, en réduisant la poussée appliquée (réduction de la pénétration !). C'est contraire à la tendance actuelle !
- La solution d'une tête bombée pour réduire les phénomènes de flambage n'est à priori pas pertinente vis à vis des problématiques d'abrasivité dans le type de roche concerné et pour la traversée, par ailleurs, de zones fortement tectonisées



*Colloque "Tunneliers et mécanique des roches dures"  
(CFMR – AFTES) - CNAM – 11 juin 2009*

A – APERCU DU PROJET

B - COMPARAISON TBM - D&B

**C – DIFFICULTES DANS LES GRANITES**

## **CONCLUSION 3 :**

**DES RECHERCHES RESTENT A FAIRE POUR  
MIEUX COMPRENDRE LE PHENOMENE ET  
CONCEVOIR DE MEILLEURES MACHINES**





*Colloque "Tunneliers et mécanique des roches dures"  
(CFMR – AFTES) - CNAM – 11 juin 2009*

A – APERCU DU PROJET

B - COMPARAISON TBM - D&B

**C – DIFFICULTES DANS LES GRANITES**

**FIN DE LA PRESENTATION**

**MERCI POUR VOTRE ATTENTION**





*Colloque "Tunneliers et mécanique des roches dures"  
(CFMR – AFTES) - CNAM – 11 juin 2009*

A – APERCU DU PROJET

B - COMPARAISON TBM - D&B

**C – DIFFICULTES DANS LES GRANITES**

# DIAPPOSITIVES DE RESERVE



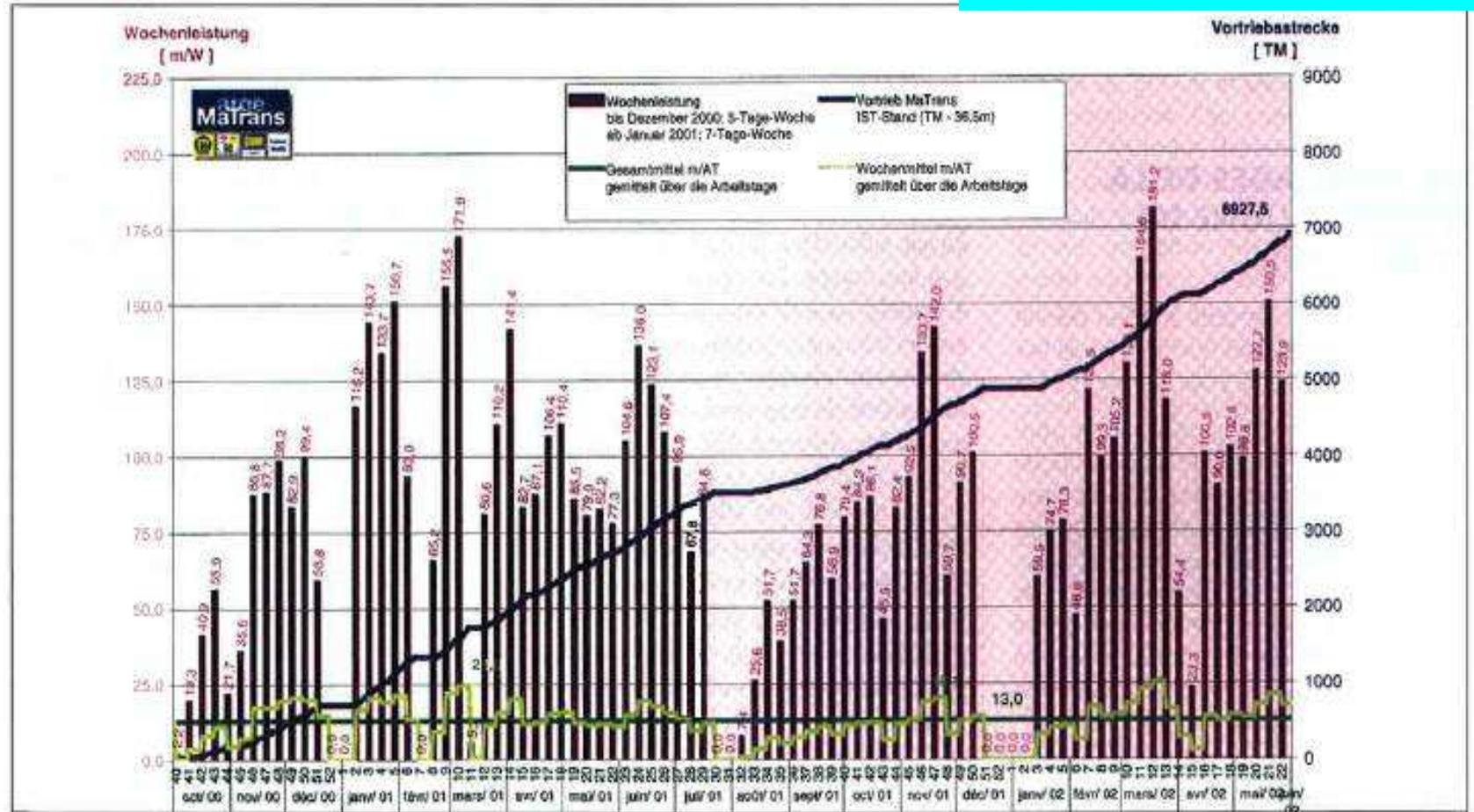


Figure 21 - Avancement journalier du TBM STEG

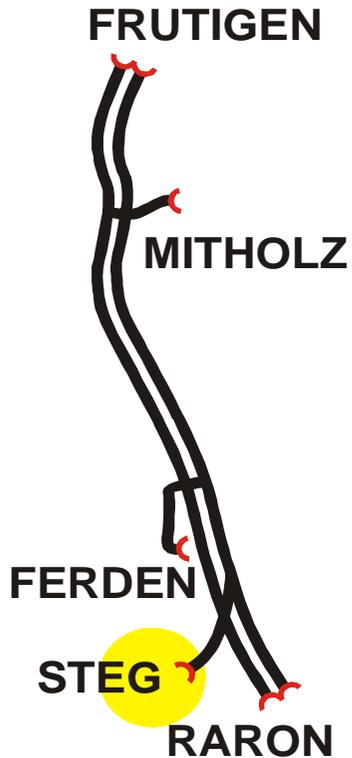


Colloque "Tunneliers et mécanique des roches dures"

C - Realisation (CHAMPAIGNES) - CNAM - 11 juin 2009

TBM excavation method

- A - APERCU DU PROJET
- B - COMPARAISON TBM - D&B
- C - DIFFICULTES DANS LES GRANITES



TBM:

Diamètre 9.4m - Longueur 142m - Poids 1'450t - Puissance 3500 kW - Avancement max. 43m/j





A - APERCU DU PROJET  
B - COMPARAISON TBM - D&B  
C - DIFFICULTES DANS LES GRANITES

## MODELISATION AUX ELEMENTS FINIS

Calcul 2D  
axisymétrique

Valeurs de calcul pour  
Felspyp 9.1 tectonisé:

$P_0 = 49 \text{ MPa}$ ,  
 $E = 38 \text{ GPa}$ ,  
 $\eta = 0,23$ ,  
 $\theta = 34^\circ$ ,  
 $\text{Crés} = 9,2 \text{ MPa}$   
(modèle Mohr-Coulomb)

