



13 Juin 2019

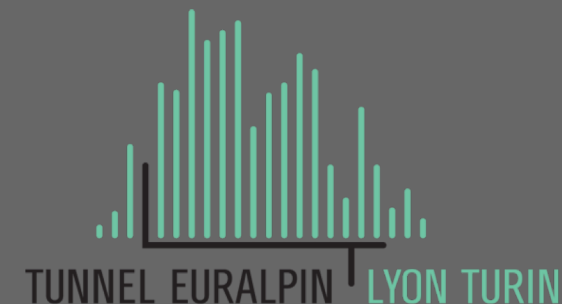


SÉANCE TECHNIQUE CFMR-AFTES

OUVRAGES SOUTERRAINS À GRANDE PROFONDEUR

RETOUR D'EXPÉRIENCE SUR LA CONCEPTION ET LA RÉALISATION
DE LA GALERIE DE RECONNAISSANCE DE LA MADDALENA
AU TUNNELIER EN ROCHE DURE

Enrico Fornari – Geodata Engineering SpA

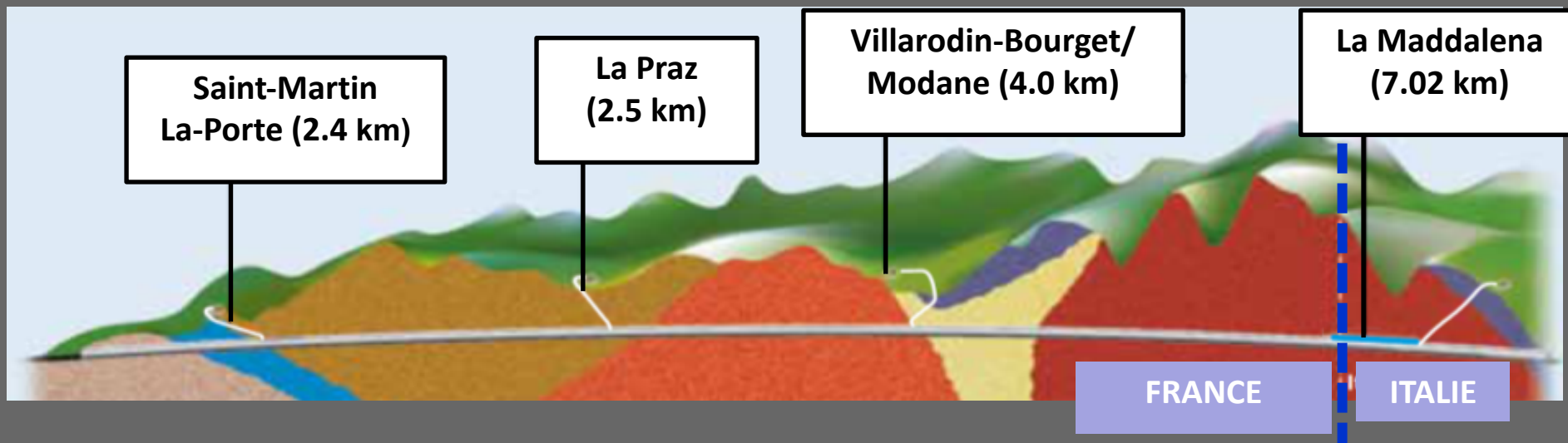


Ligne TGV Lyon-Turin: mi-chemin du «Couloir Méditerranéen» entre Séville (Espagne) et Budapest (Hongrie)



Le **Tunnel de Base du Mont Cenis**, ouvrage clé de la liaison TGV Lyon-Turin, est doté de quatre galeries intermédiaires d'accès:

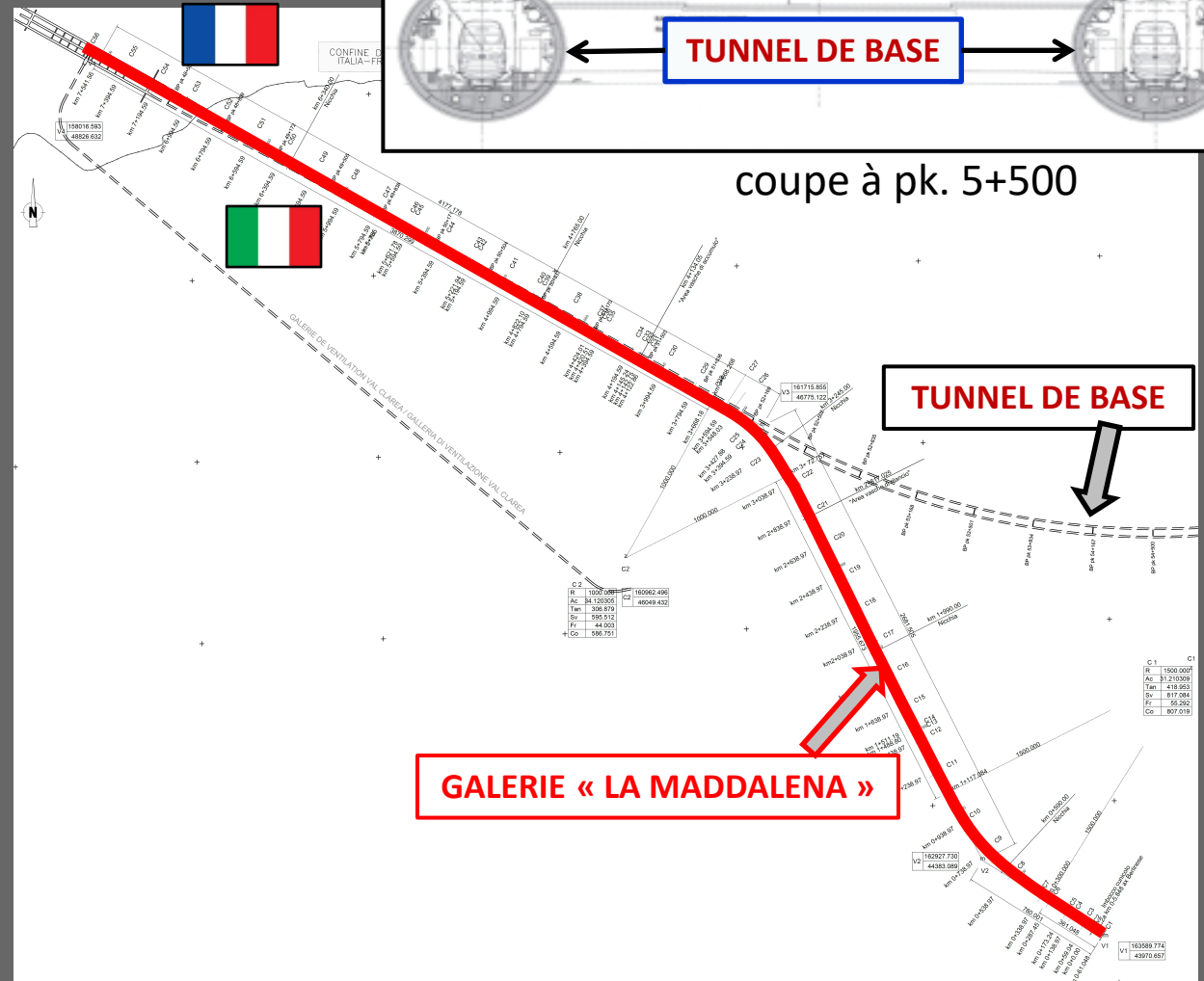
- **trois** en France (achevées entre 2007 et 2010)
- **une** en Italie (achevée 2018) – **La Maddalena**.



Finalités de la galerie de «La Maddalena»:

- **phase d'études** du TdB
étudier le massif rocheux et le comportement du tunnelier en phase d'excavation pour la meilleure définition du projet du tunnel de base
- **phase de réalisation** du TdB
donner accès pour la construction de la caverne de sécurité de «Clarea» le long du tunnel de base
- **phase opérationnelle** du TdB
donner accès au tunnel de base pendant les opérations d'entretien et de sécurité

Tracé et Coupe





Le chantier de la Maddalena



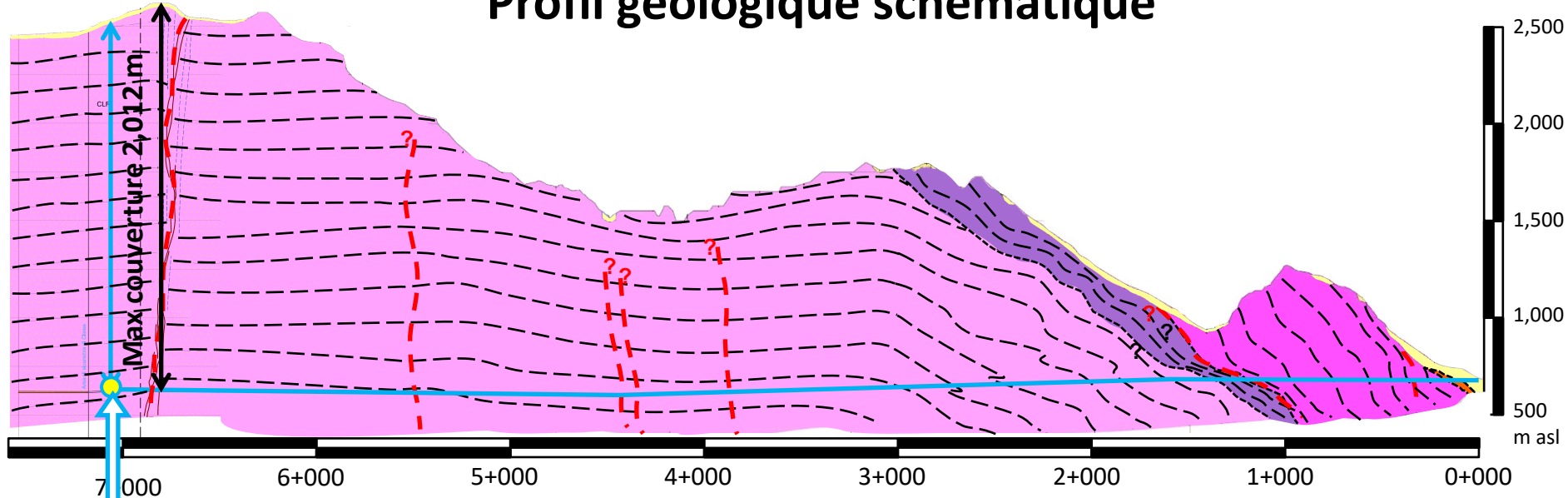
Entrée Galerie

Remblai-dépôt
des déblais

Bureaux
MOA MOE

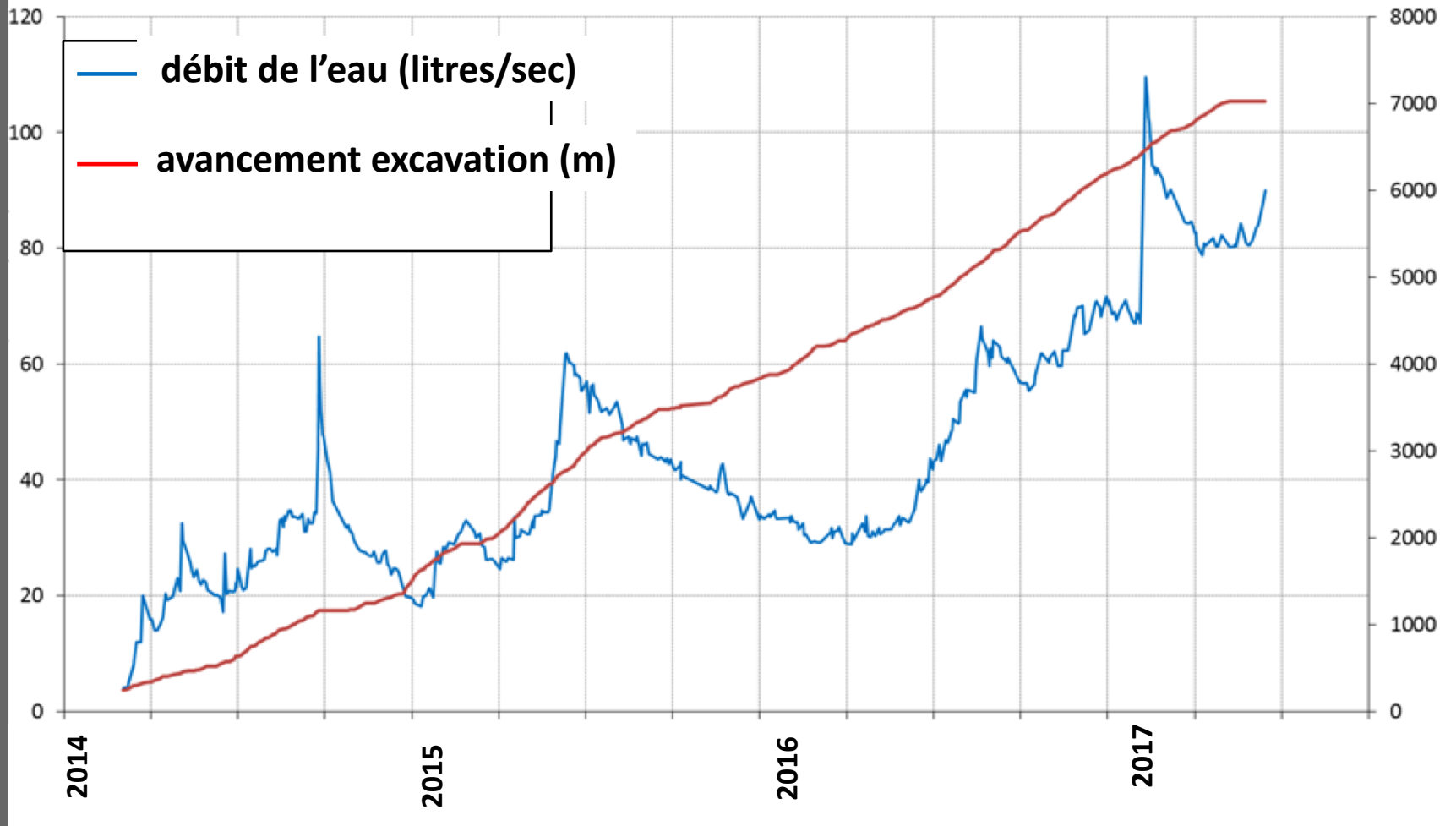
Le chantier de la Maddalena

Profil géologique schématique



Pk 7+020
couverture approx. 1.921 m

- Dépôts quaternaires
- Roches carbonatiques tectonisées
- Roches du complexe d'Ambin (Gneiss Aplitique)
- Roches du complexe d'Ambin (Micaschistes Quartzitiques)
- Roches du complexe de Clarea (Micaschistes)



Débits de l'eau sortante de la galerie

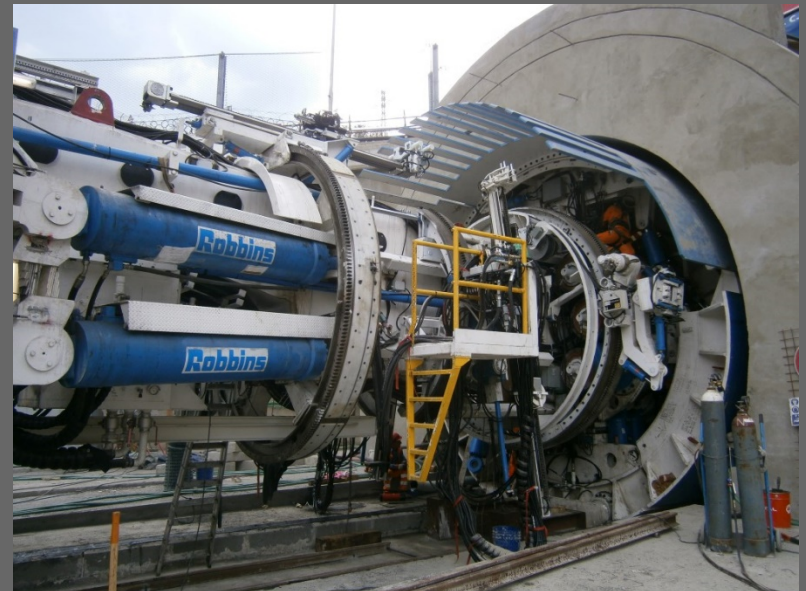
Excavation Conventiionnelle (0,20 km)

de pk. 0-006 à pk. 0+198
dépôts quaternaires et roches carbonatiques



Excavation Mécanisée (6,82 km)

avec tunnelier ouvert (Robbins)
de pk. 0+198 à pk. 7+020
massif rocheux de gneiss et de micaschistes



Diamètre 6,30m
Surcoupe 0,1- 0,2m
N. molettes 43 (17")
Course de forage 1,83m



Poussée par outil 311 kN
Poussée sur la tête 12.756 kN
Vitesse de rotation 0-10,8 tr/m
Couple de la tête 2.083 kNm

«GEA»: le tunnelier ouvert utilisé pour l'excavation

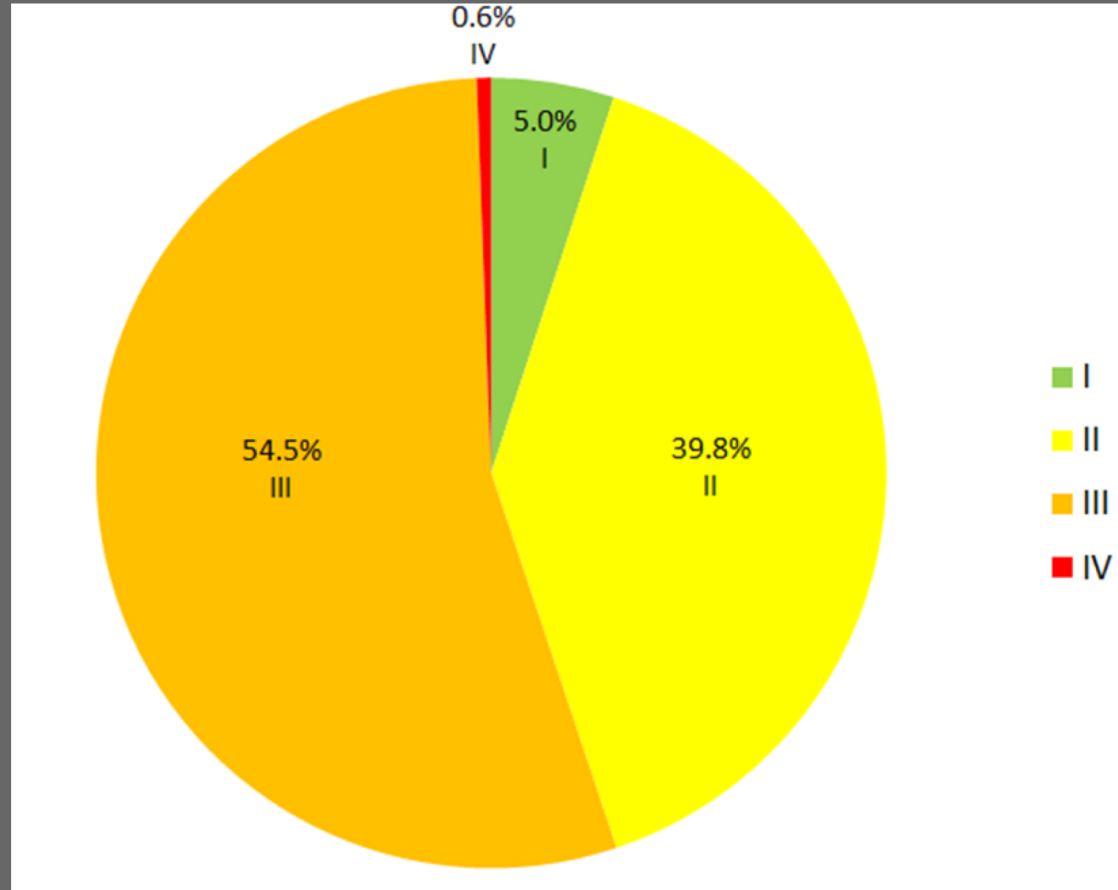
RMR "COMME RENCONTRÉ "

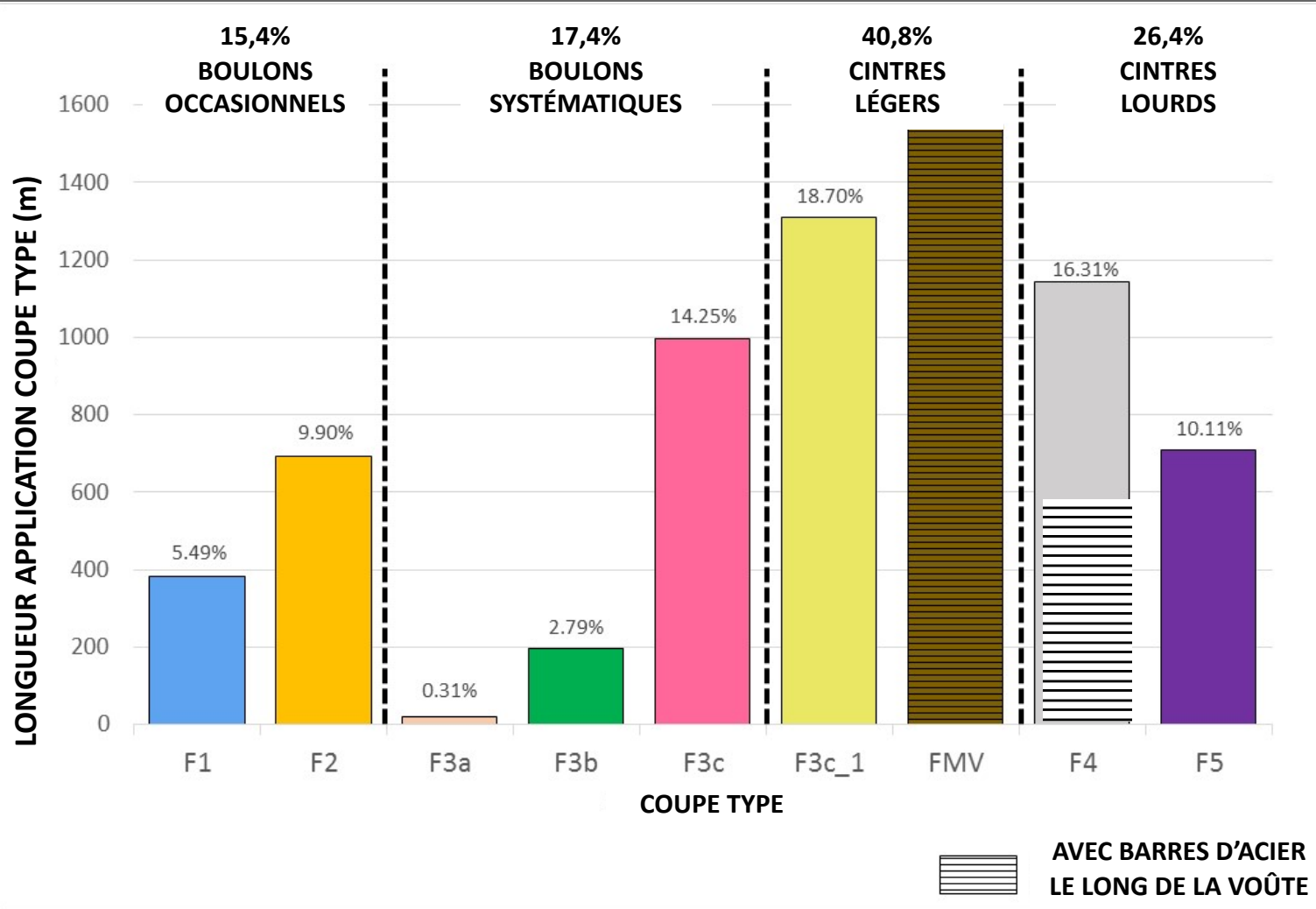
Massif rocheux extrêmement dur et abrasif

MAX RMR: **98 (!)**

MAX_{sc}: **236MPa** (test lab.)

Massif rocheux classifié de qualité entre moyenne (III) et bonne (II)





Soutènements utilisés pendant l'excavation

Boulons Occasionnels

15.4% de la longueur de la galerie

Boulons «Super Swellex» L=3m
pour massif rocheux de classe RMR I et II
avec **couverture limitée**



Boulons Systématiques

17.4% de la longueur de la galerie

boulons «Super Swellex» L=3.0m – poste de travail L1

boulons «Super Swellex» L=2.7m – poste de travail L2

maille d'acier F6 – 10cmx10cm

massif rocheux de classe RMR III

couverture limitée



Cintres métalliques légers boulonnés
18.7% de la longueur de la galerie

Cintres d'acier UPN 120 tous les 90 cm boulonnés sur arc de 120°, avec:
boulons «Super Swellex» L=3.0m – poste de travail L1
boulons «Super Swellex» L=2.7m – poste de travail L2
maille d'acier F6 – 10cmx10cm
Massif rocheux de classe **RMR III**
(utilisé seulement jusqu'à pk. 4+900)



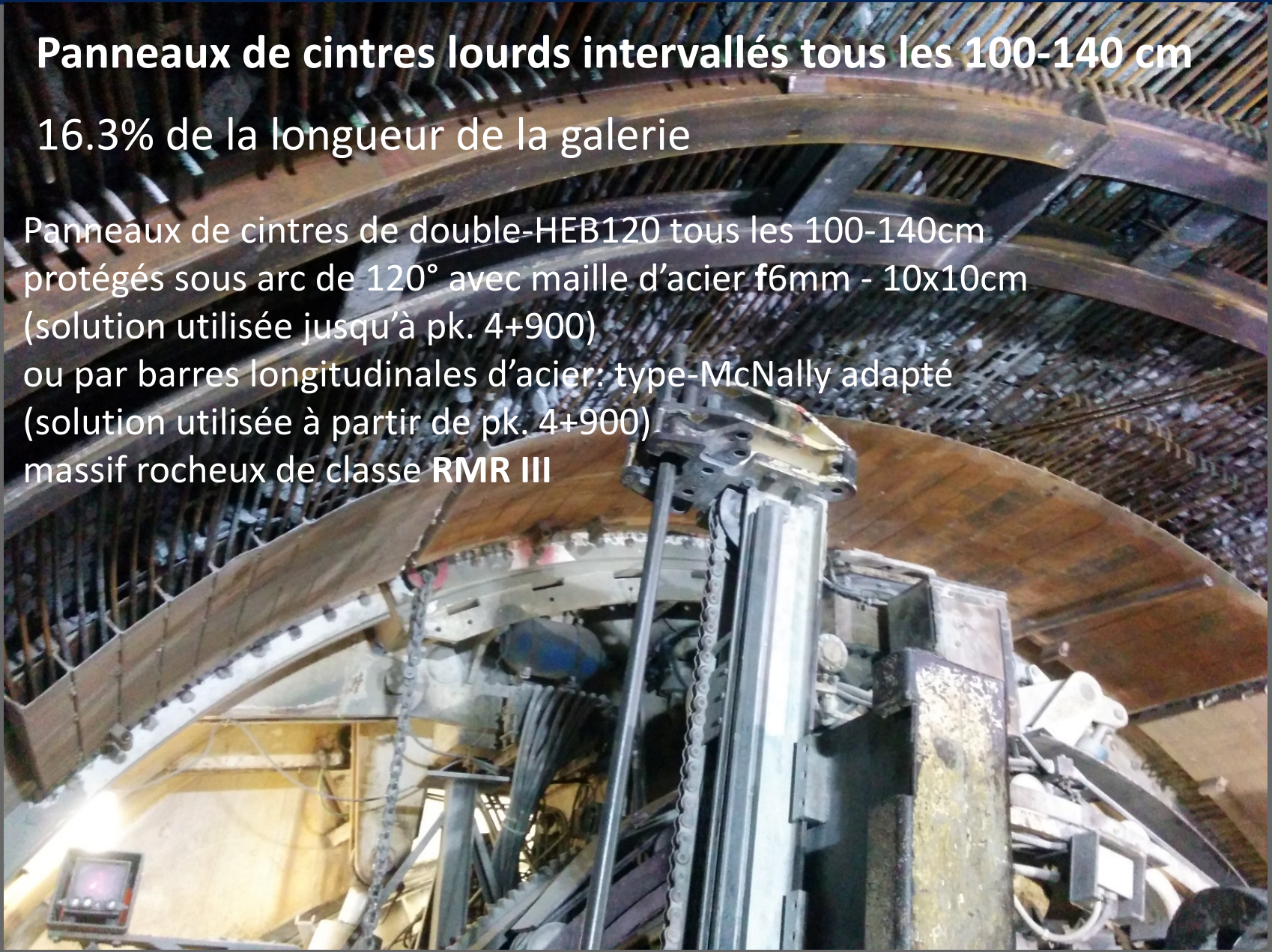
Cintres métalliques légers avec barres longitudinales d'acier
22.1% de la longueur de la galerie

arc de 120° de barres d'acier le long de la voûte
(type-McNally- mais avec des poches soudées sous le toit du tunnelier)
Cintres d'acier HEB120 tous les 135 cm
massif rocheux de classe **RMR II and III**
(utilisés à partir de pk. 4+900)

Panneaux de cintres lourds intervallés tous les 100-140 cm

16.3% de la longueur de la galerie

Panneaux de cintres de double-HEB120 tous les 100-140cm
protégés sous arc de 120° avec maille d'acier f6mm - 10x10cm
(solution utilisée jusqu'à pk. 4+900)
ou par barres longitudinales d'acier: type-McNally adapté
(solution utilisée à partir de pk. 4+900)
massif rocheux de classe **RMR III**



Panneaux de cintres lourds juxtaposés

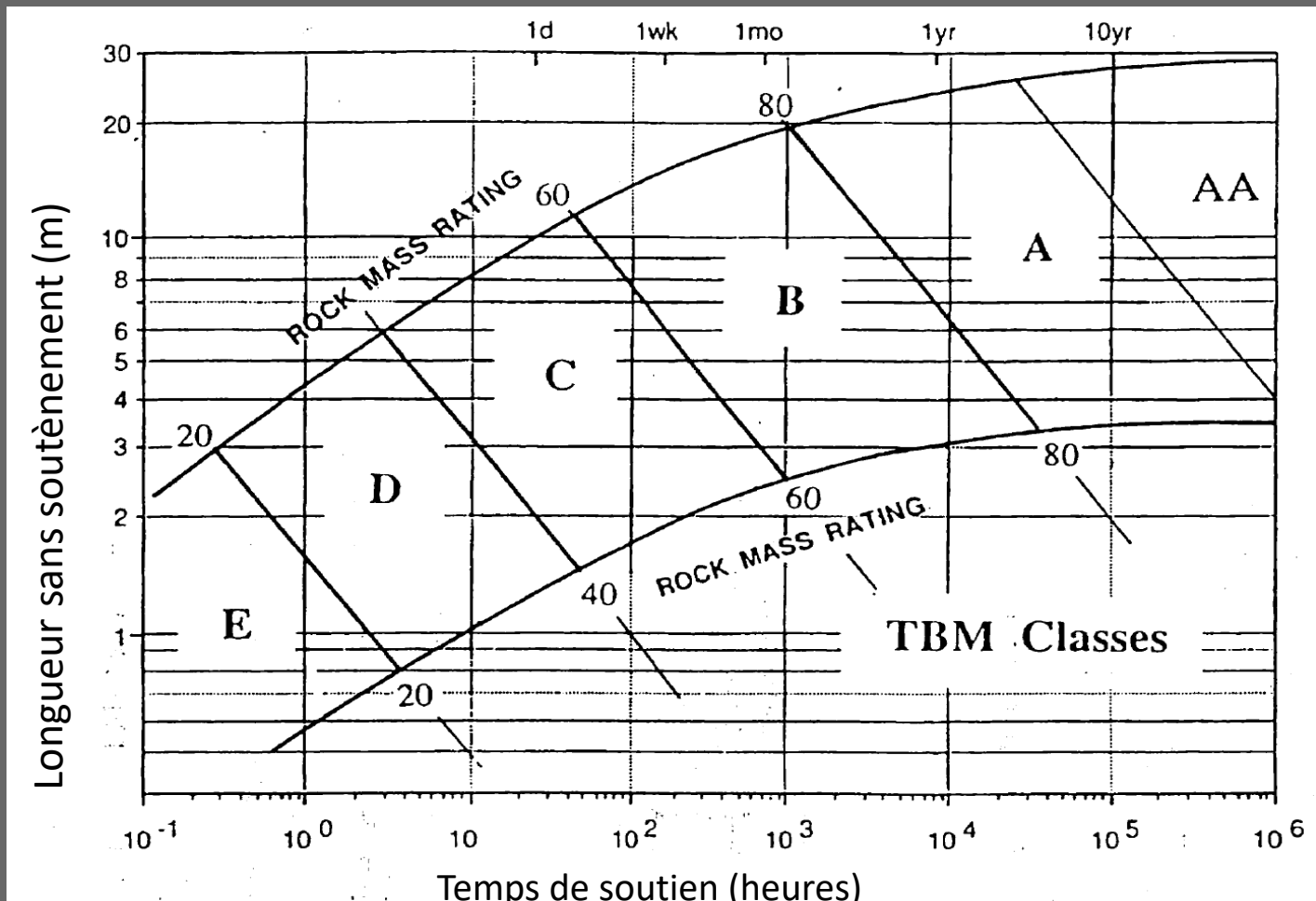
10.1% de la longueur de la galerie

massif rocheux de classe RMR IV
aussi utilisé dans massif de classe RMR II and III
pour empêcher la chute de fragments de roche



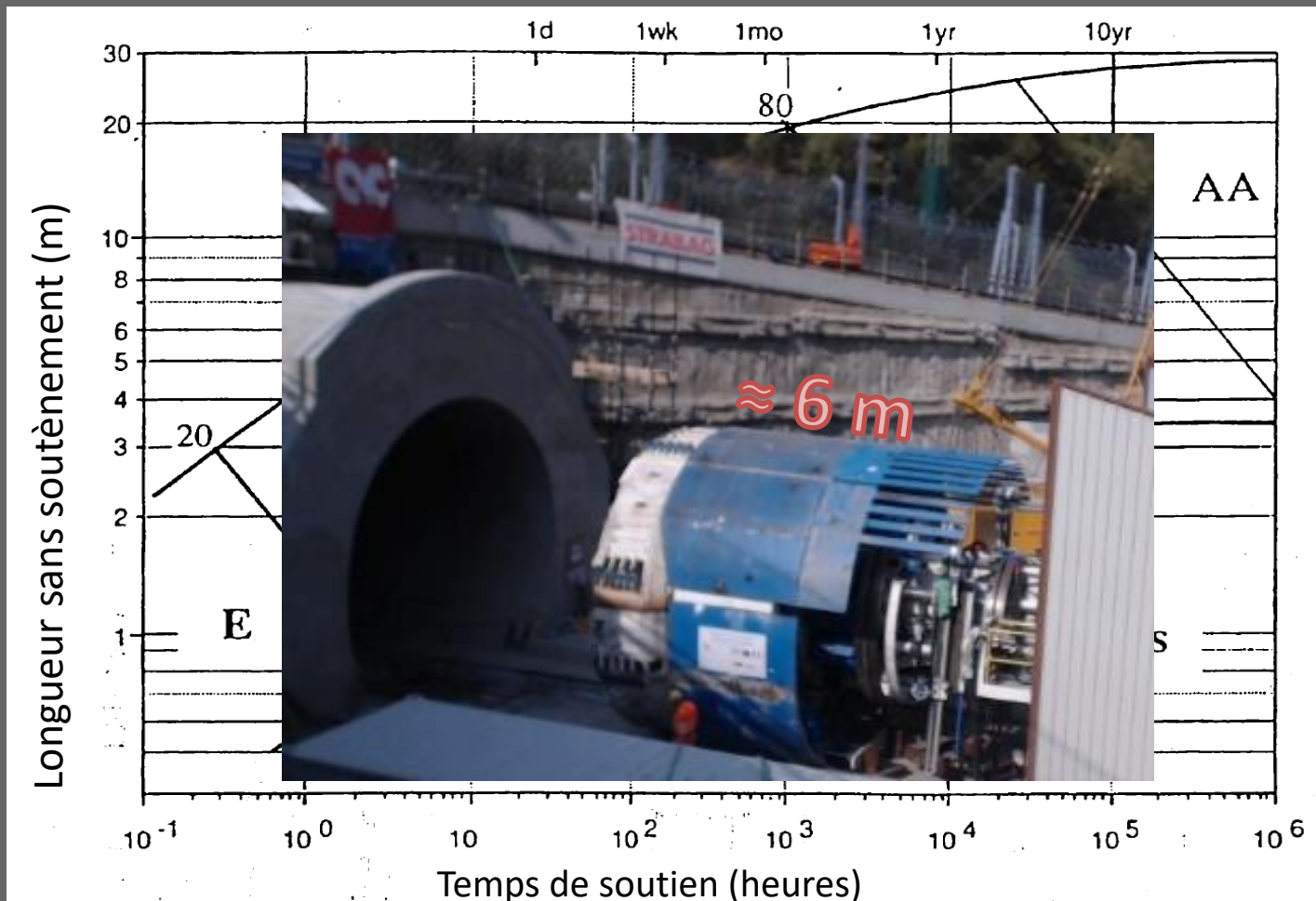
Abaque de Bieniawski (1989):

temps de soutien de la voûte en fonction du RMR et de la longueur sans soutènement



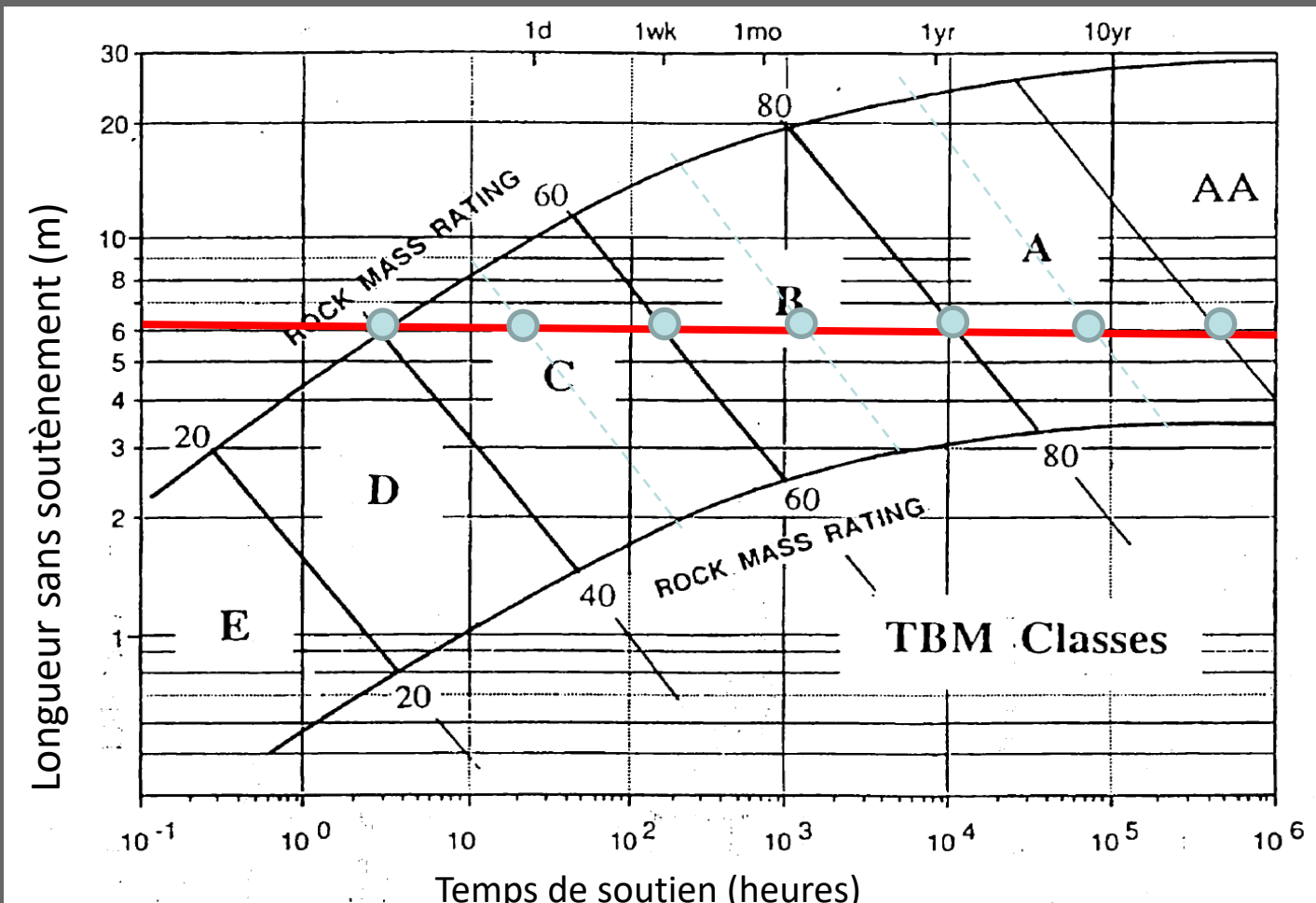
abaque de Bieniawski (1989):

temps de soutien pour la longueur sans soutènement de 6m (longueur bouclier)

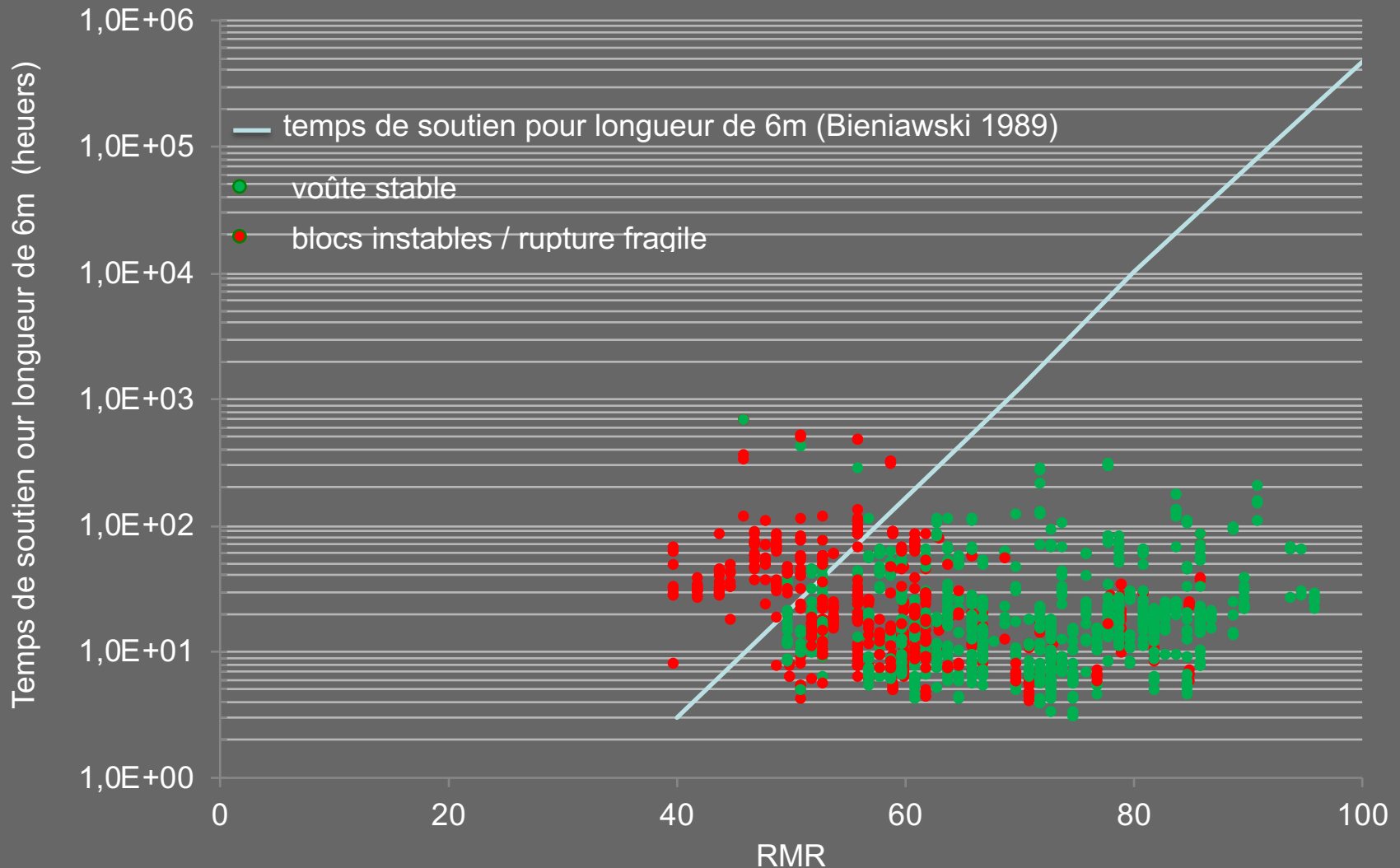


Abaque de Bieniawski (1989):

temps de soutien pour la longueur sans soutènement de 6m (longueur bouclier)



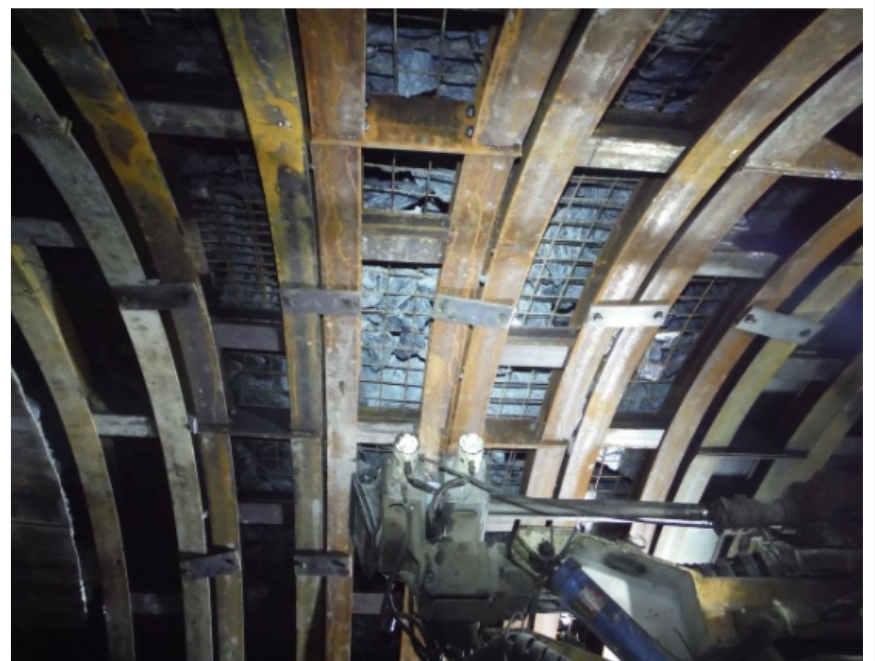
Stabilité de la voûte entre pk. 0+400 et pk. 3+000 (au-delà de pk. 3+000, la rupture fragile était systématique)



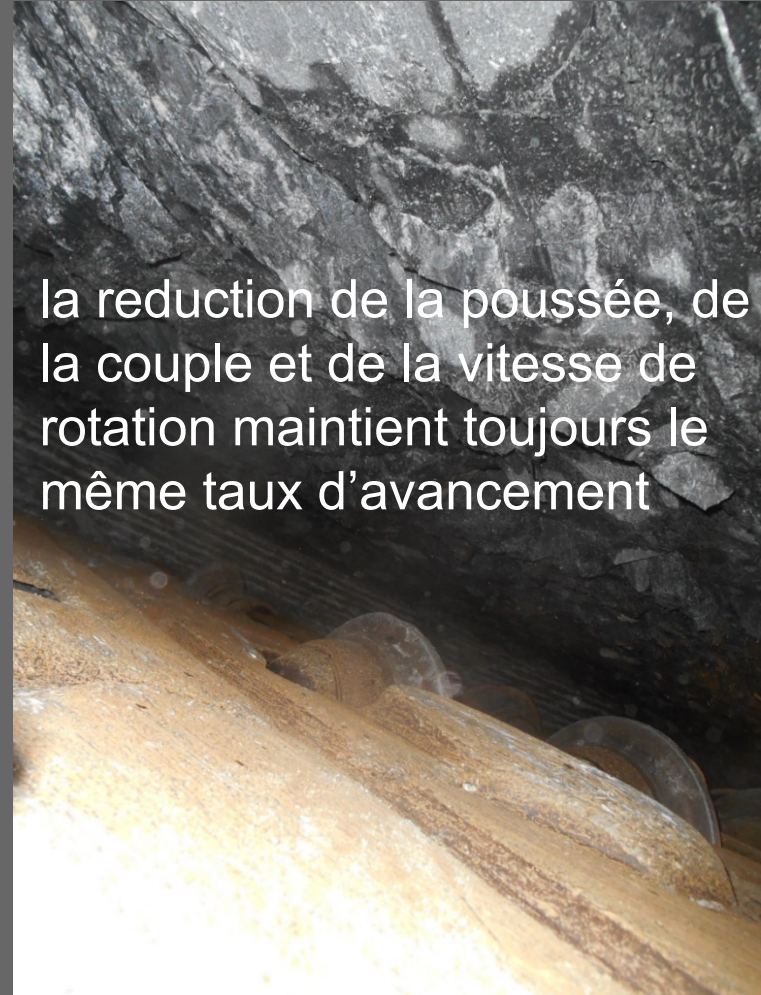
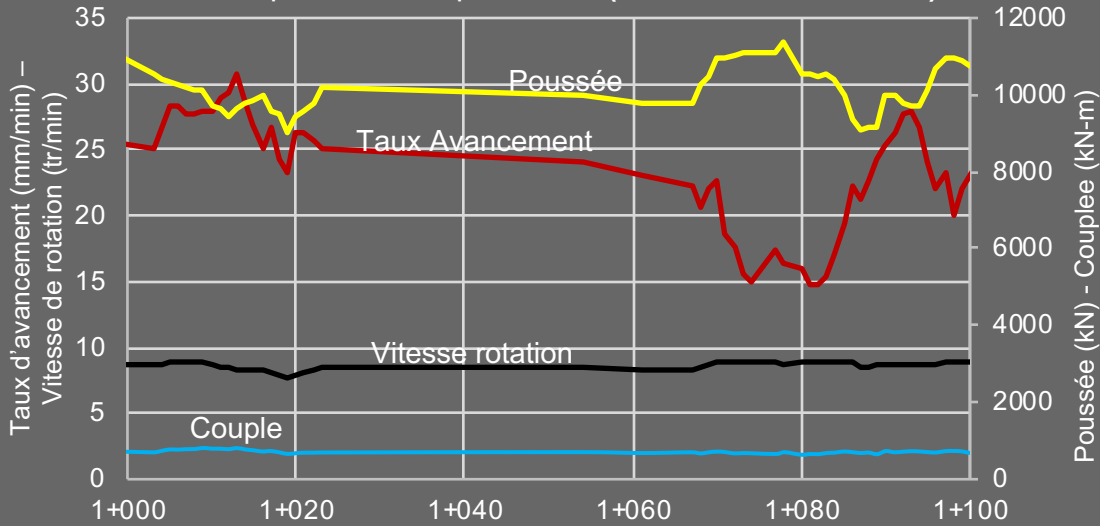


Les effets du relâchement des contraintes ont été observés à partir de couvertures de moins de 400m

Le temps de soutien de l'excavation sans soutènement est plus court du temps indiqué dans l'abaque de Bieniawski (1989) parce que l'effet du relâchement des contraintes s'ajoute à l'effet gravitationnel.

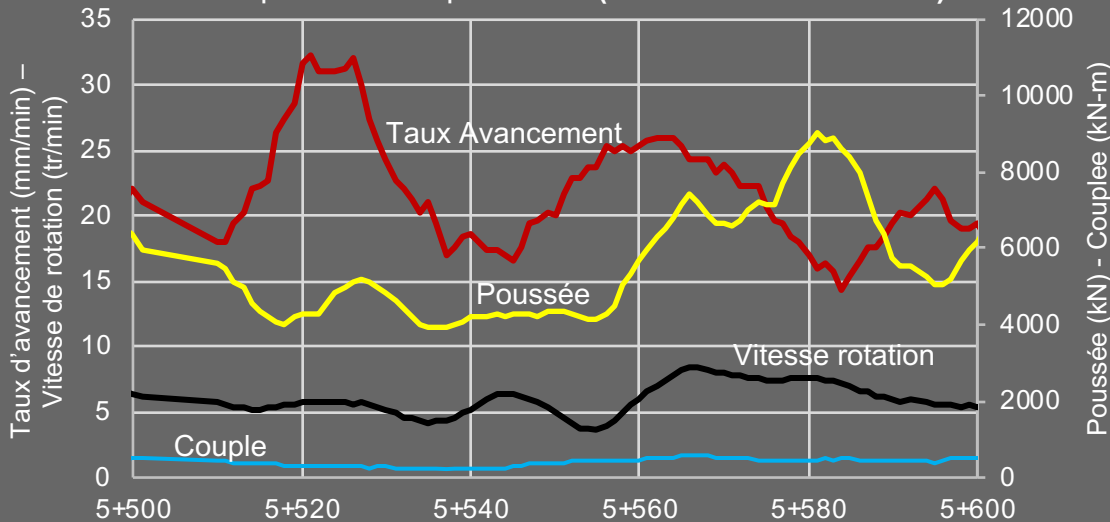


entre pk. 1+000 et pk. 1+100 (couverture de 400 m)



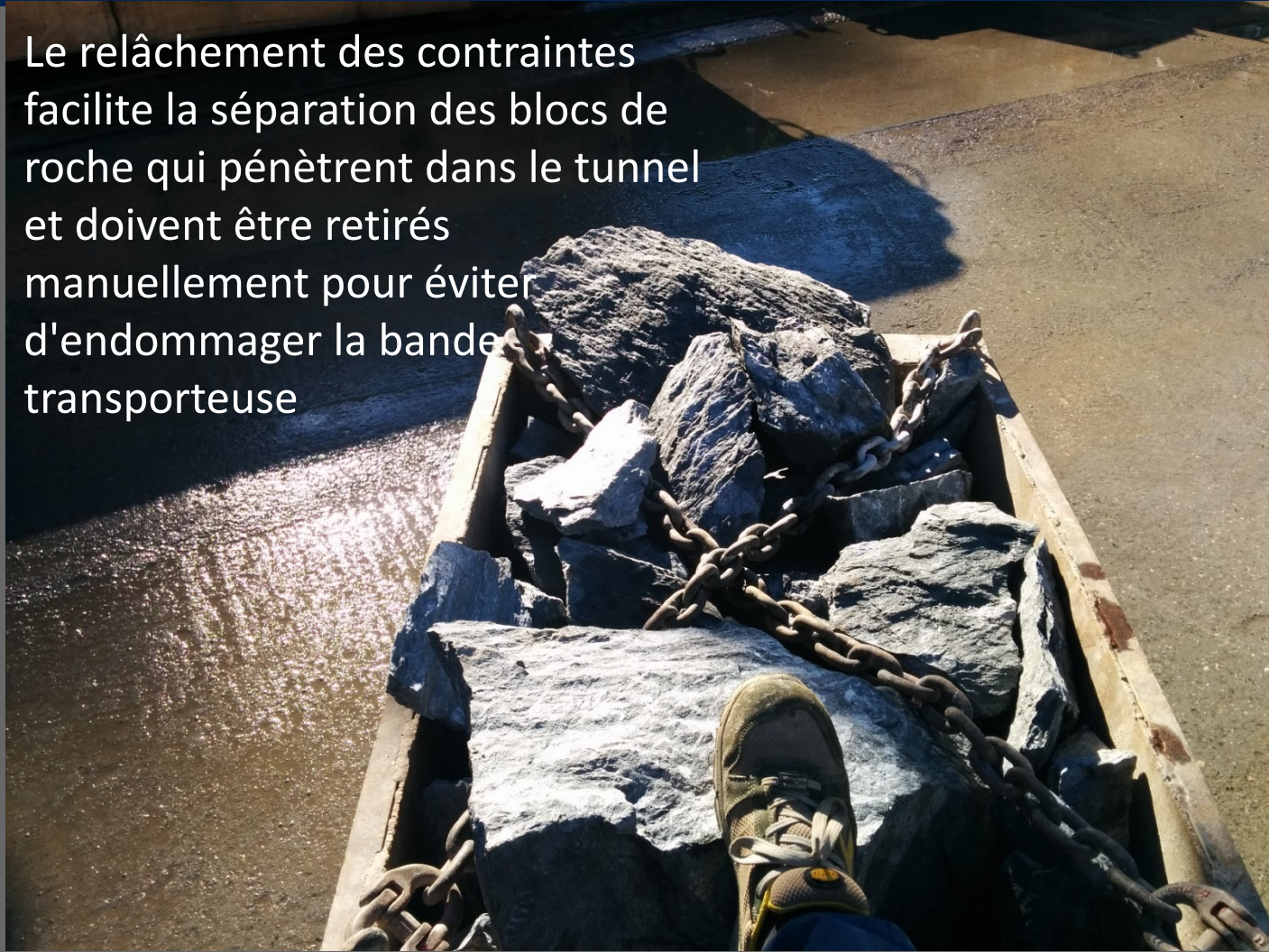
la reduction de la poussée, de la couple et de la vitesse de rotation maintient toujours le même taux d'avancement

entre pk. 5+500 et pk. 5+600 (couverture de 1400 m)



Effets du relâchement des contraintes: moins d'effort (travail) requis pour excaver

Le relâchement des contraintes facilite la séparation des blocs de roche qui pénètrent dans le tunnel et doivent être retirés manuellement pour éviter d'endommager la bande transporteuse



Effets du relâchement des contraintes:

blocs de roche libérés du front d'excavation et qui doivent être enlevés



Un tamis sépare les blocs des matériaux les plus fins.
Les blocs séparés sont concassés pour permettre leur retrait par bande transporteuse



Effets du relâchement des contraintes:
blocs de roche qui pénètrent dans la galerie doivent être concassés



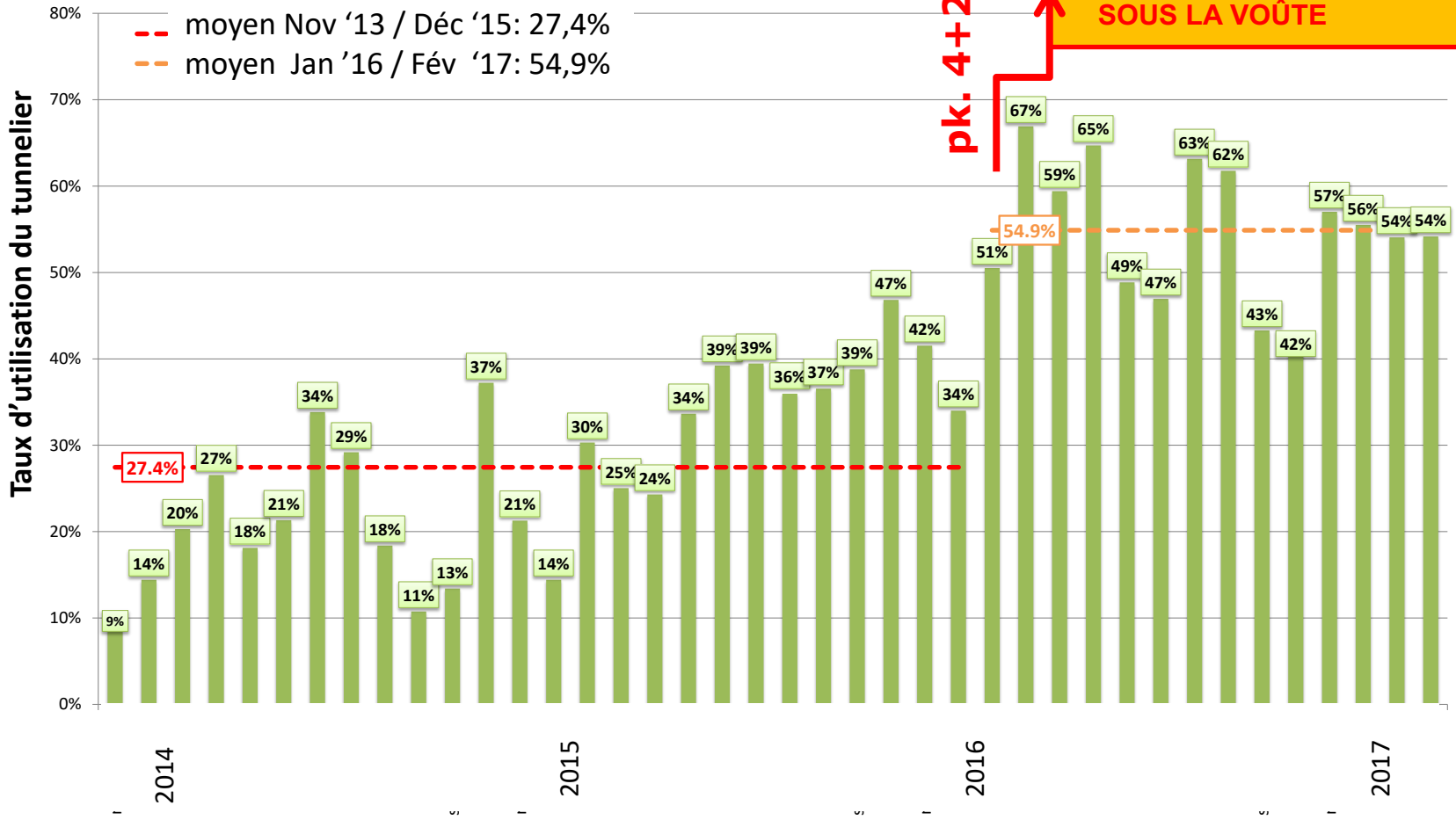
Adoption systématique, à partir de pk. 4+900, de cintres d'acier reliés par des barres longitudinales en acier formant un arc de protection sous la voûte

AMÉLIORATION DE L'EFFICACITÉ GLOBALE DE L'EXCAVATION EN AUGMENTANT LE NOMBRE D' ÉQUIPES

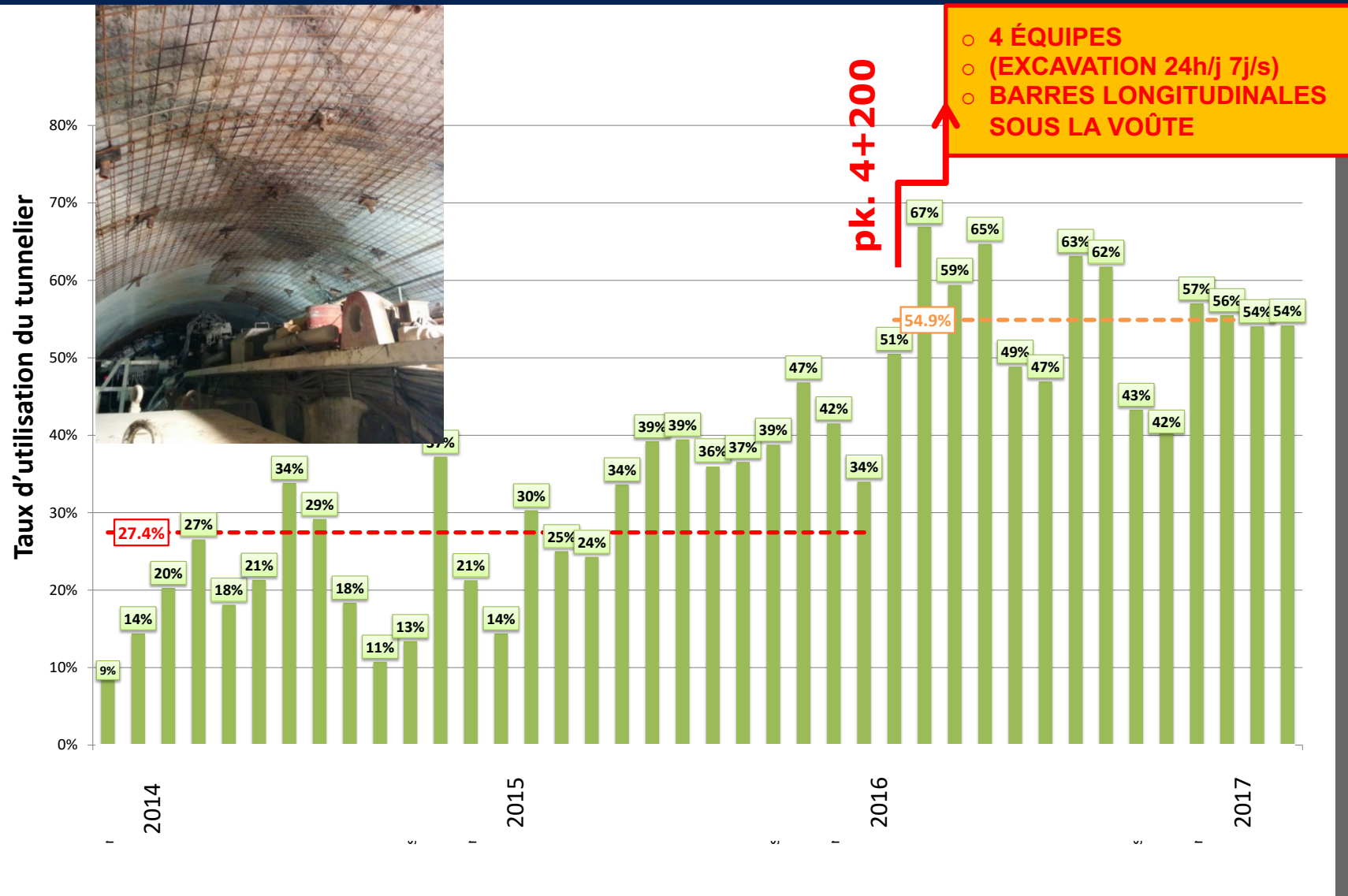
	HEURES D'UNE SEMAINE	HEURES TRAVAILLÉES PAR SEMAINE	DISPONIBILITÉ TRAVAILLEURS
3 ÉQUIPES (exc. 24h/j 6j/s)	168	124	73.8%
4 ÉQUIPES (exc. 24h/j 7j/s)		168	100%

4 ÉQUIPES VS. 3 ÉQUIPES:

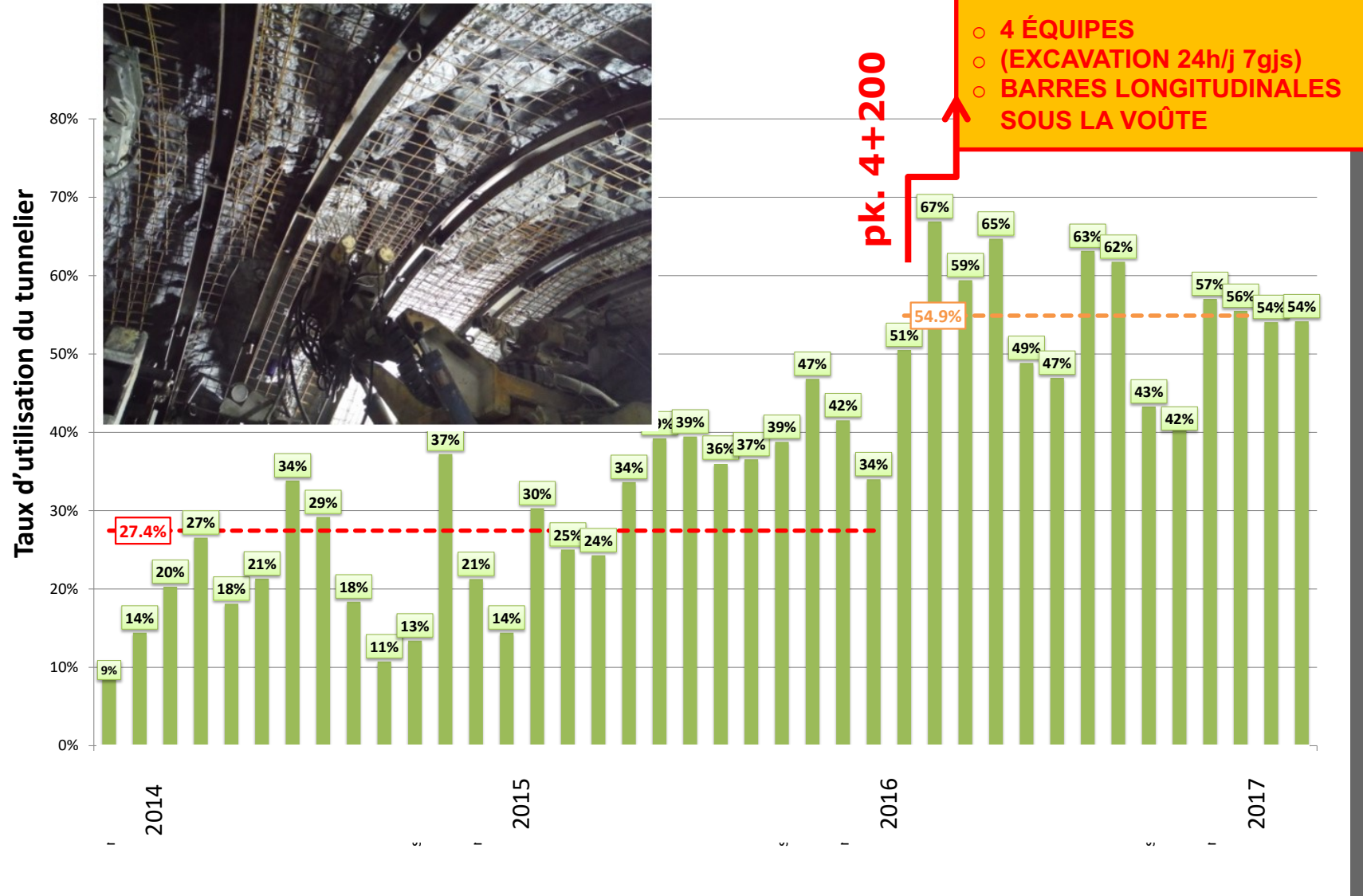
HEURES DISPONIBLES POUR L'EXCAVATION +35.5%



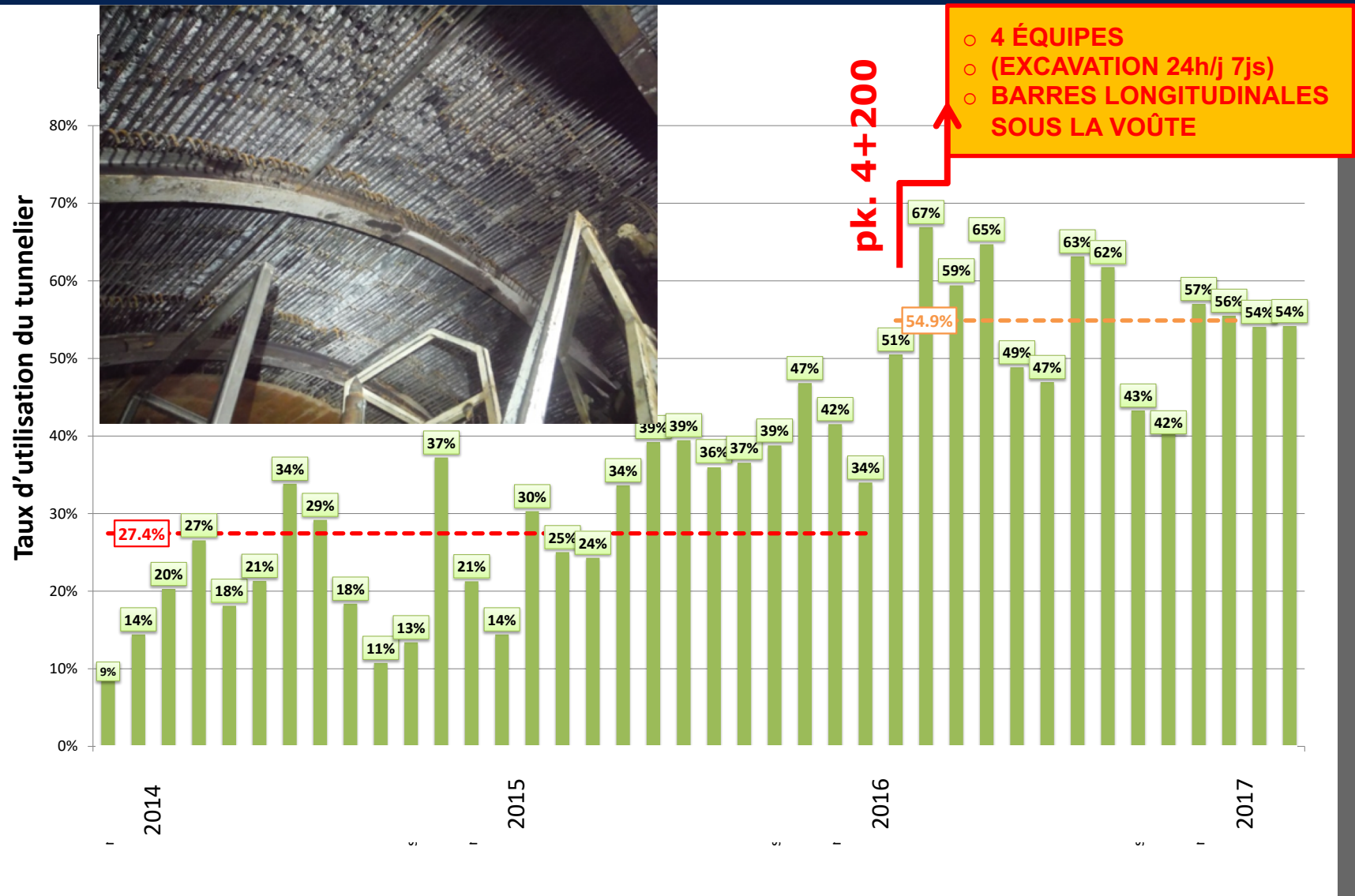
Taux d'utilisation du tunnelier: données mensuelles



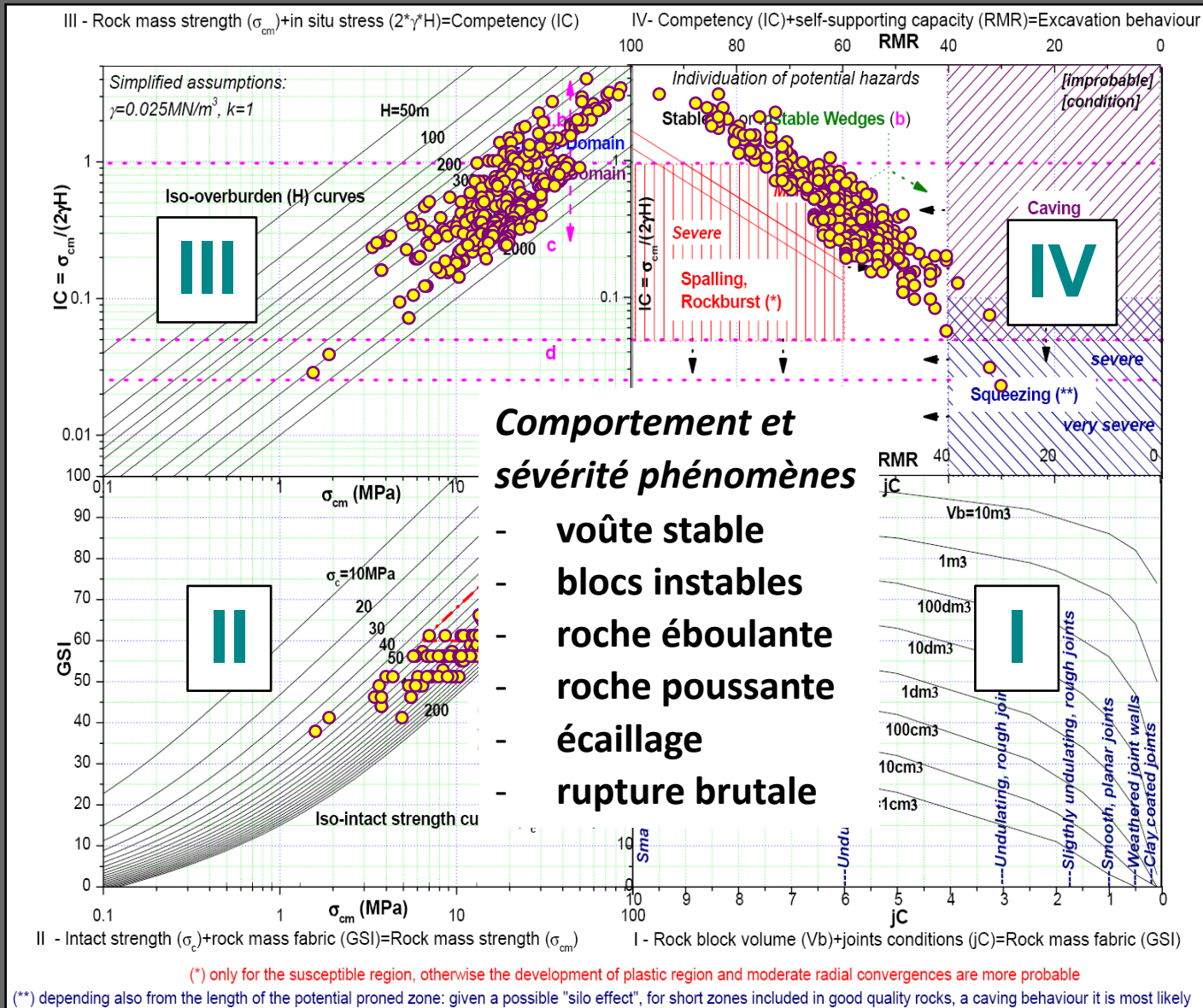
Taux d'utilisation du tunnelier: 27,4% entre fév. '13 et déc. '15

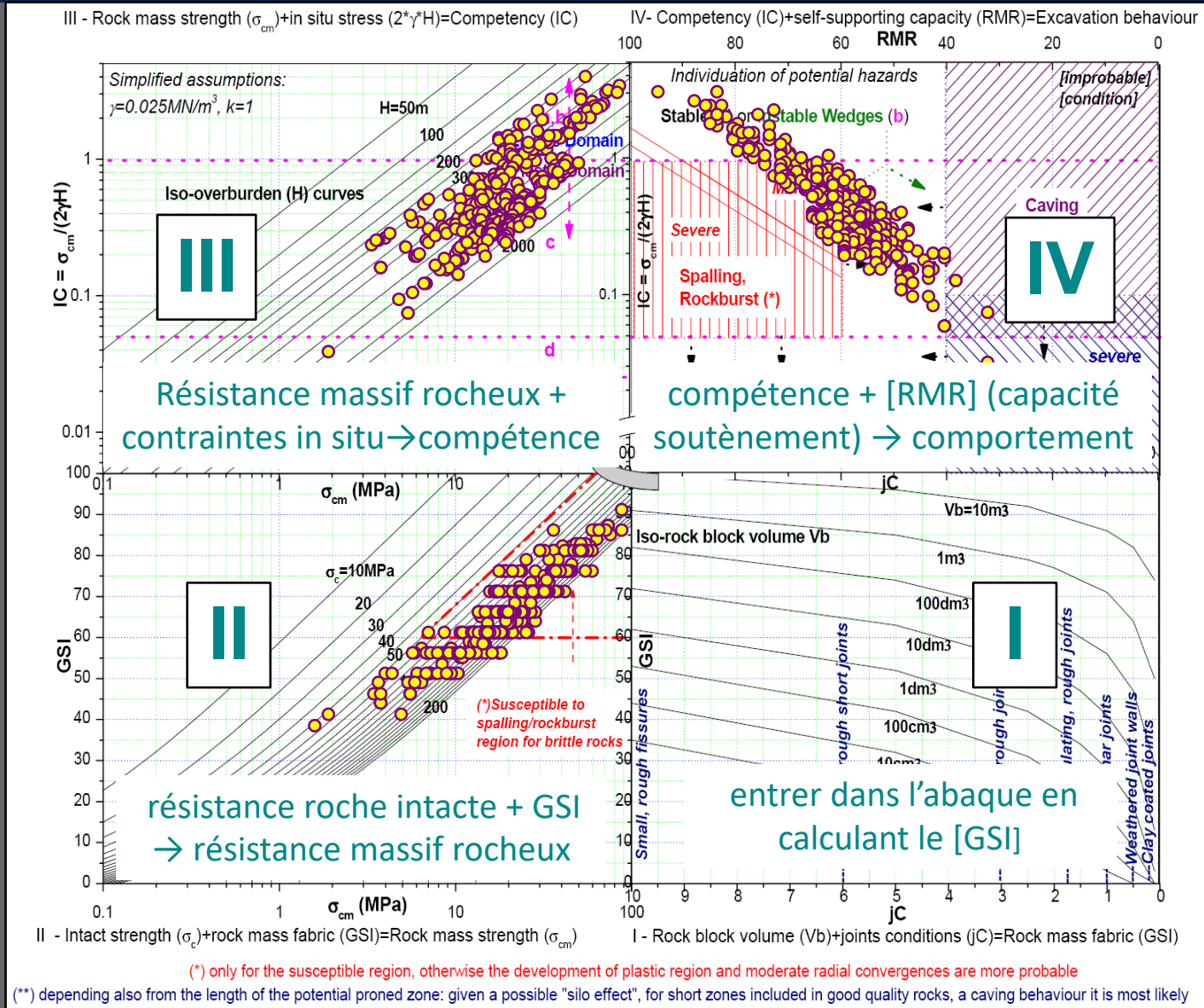


Taux d'utilisation du tunnelier: 27,4% entre fév. '13 et déc. '15



Taux d'utilisation du tunnelier: 54,3% entre jan. '16 et fév. '17





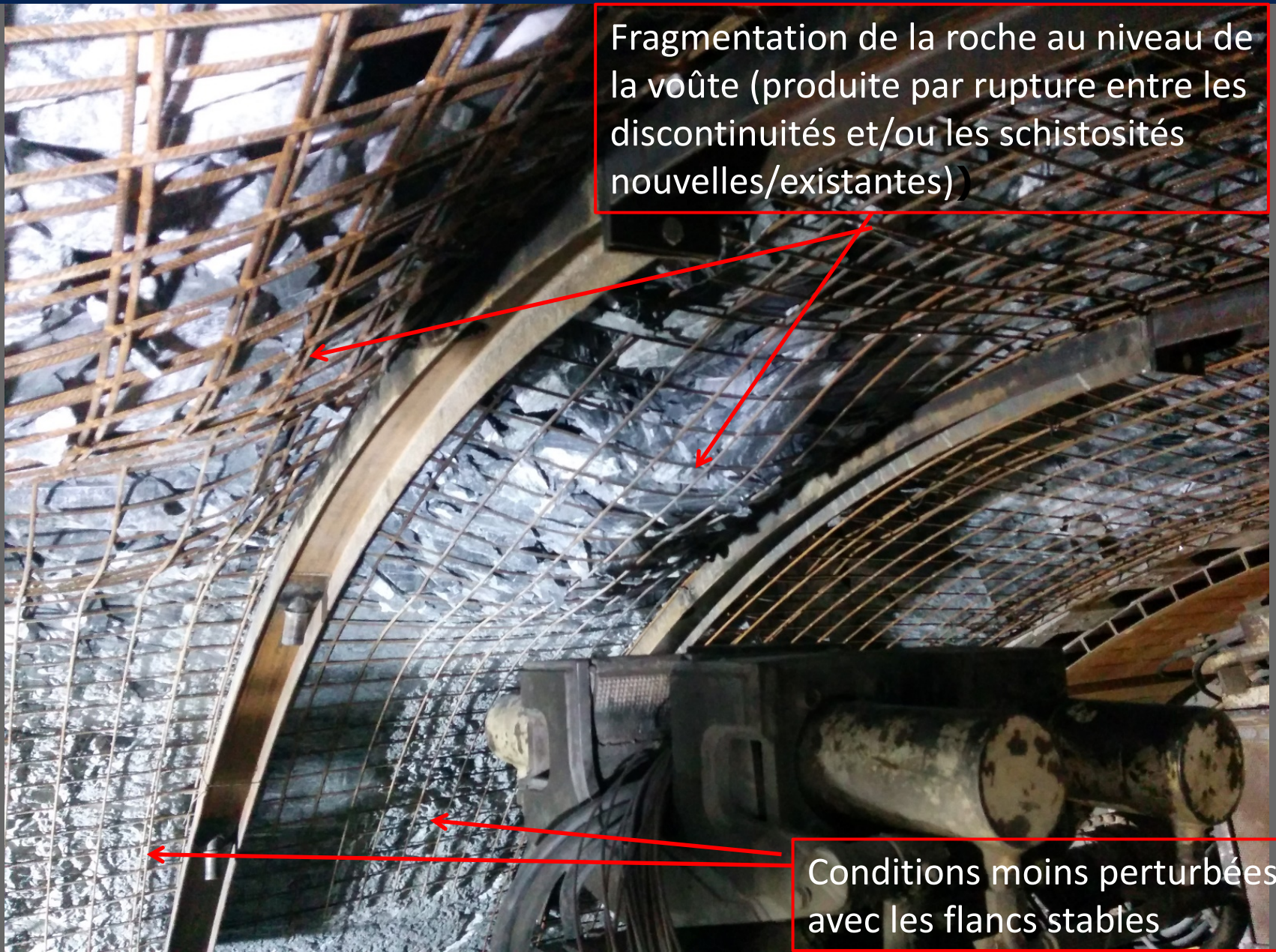
Rupture brutale («Rockburst») comme expérimenté

Un événement de rupture brutale («rockburst») s'est produit à 23 heures du 21/12/2015 autour de pk. 4+200 avec effet visible sur les soutènements pour une longueur de 10-12m de tunnel.

Le massif rocheux été classé RMR=61-72 et GSI=62-75, avec schistosité sub-horizontale et discontinuités ouvertes souvent remplies de carbonate. La couverture était d'environ 1000 m.

Les travailleurs ont entendu un fracas soudain. Ceci était accompagné de grandes déformations des soutènements.





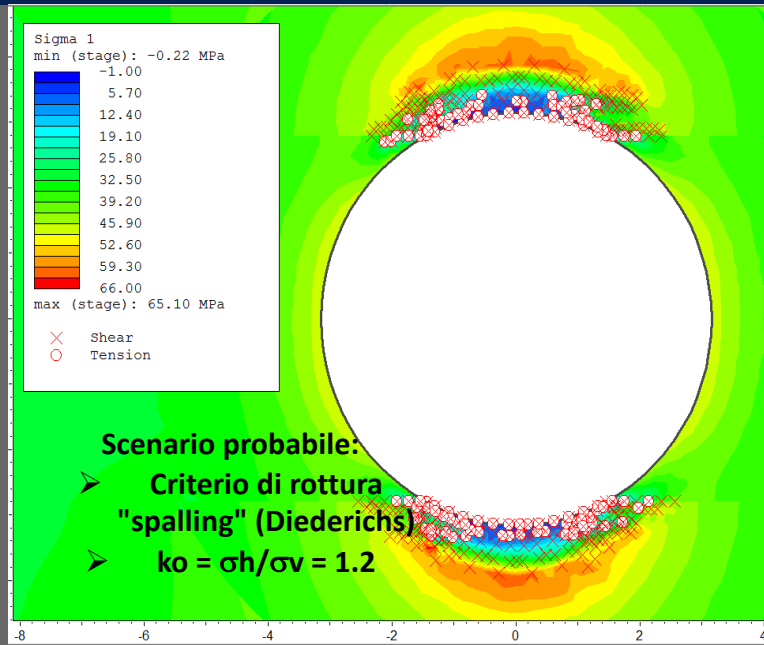
Fragmentation de la roche au niveau de la voûte (produite par rupture entre les discontinuités et/ou les schistosités nouvelles/existantes)

Conditions moins perturbées avec les flancs stables

Mécanismes des dégâts produits par rockburst et nature des dégâts anticipés

Damage mechanism	Damage severity	Cause of rockburst damage	Thickness [m]	Weight [kN/m ²]	Closure* [mm]	v_e [m/s]	Energy [kJ/m ²]
Bulking without ejection	Minor	highly stressed rock	< 0.25	< 7	15	< 1.5	not critical
	Moderate	with little excess	< 0.75	< 20	30	< 1.5	not critical
	Major	stored strain energy	< 1.5	< 50	60	< 1.5	not critical
Bulking causing ejection	Minor	highly stressed rock	< 0.25	< 7	50	1.5 to 3	not critical
	Moderate	with significant	< 0.75	< 20	150	1.5 to 3	2 to 10
	Major	excess strain energy	< 1.5	< 50	300	1.5 to 3	5 to 25
Ejection by remote seismic event	Minor	seismic energy	< 0.25	< 7	< 150	> 3	3 to 10
	Moderate	transfer to	< 0.75	< 20	< 300	> 3	10 to 20
	Major	jointed or broken rock	< 1.5	< 50	> 300	> 3	20 to 50
Rockfall	Minor	inadequate strength,	< 0.25	< 7g/(a+g)	na	na	na
	Moderate	forces increased	< 0.75	< 20g/(a+g)	na	na	na
	Major	by seismic acceleration	< 1.5	< 50g/(a+g)	na	na	na

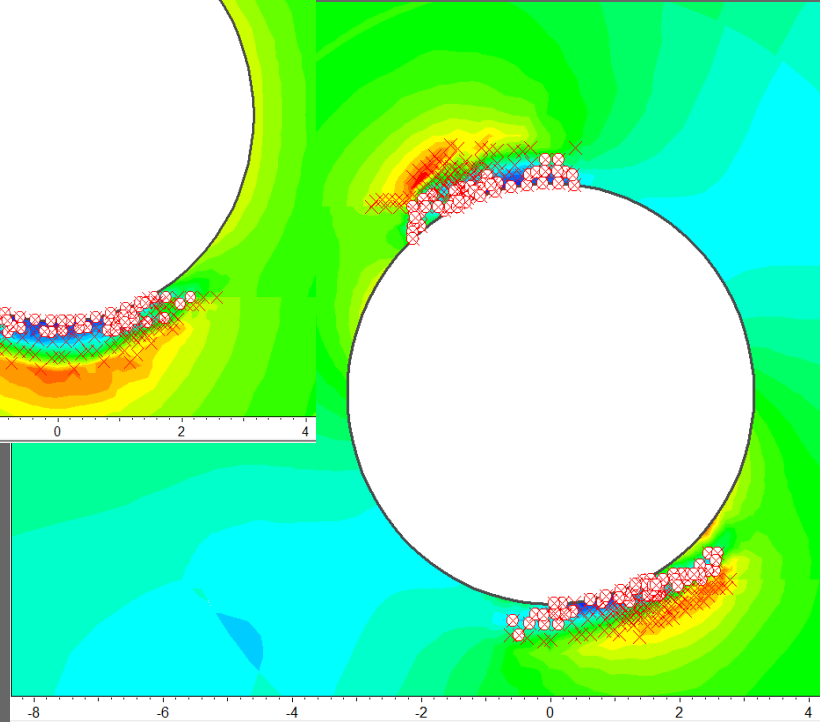
Le comportement observé correspond à un événement de «**gonflement sans éjection**» («bulking without éjection», CRRP 1996): l'énergie de déformation stockée se consomme par fracturation. Augmentation significative du volume due à la dilatance. L'énergie cinétique libérée n'est pas significative (pas d'éjection de roche à grande vitesse)



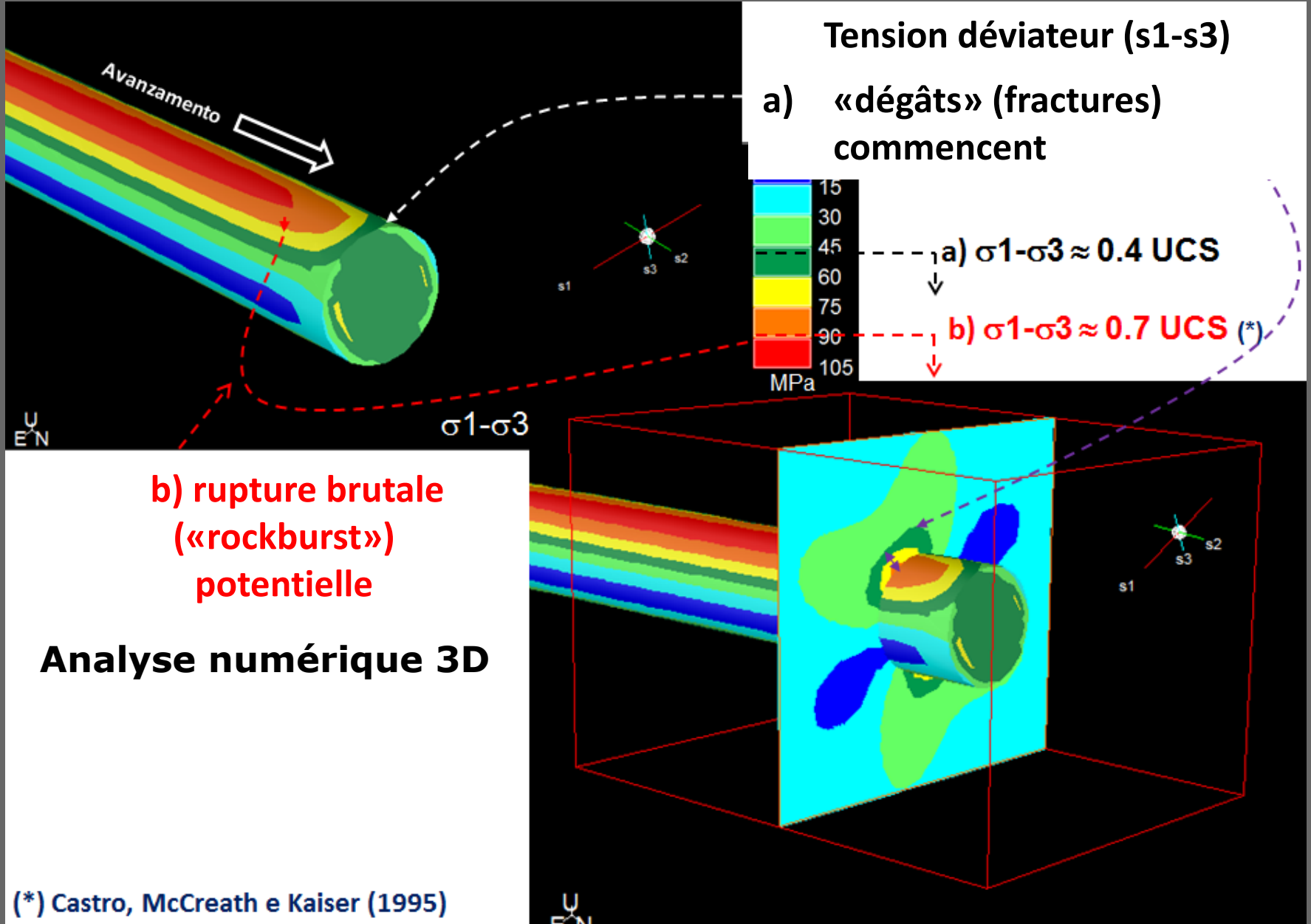
Modélisation numérique

← Étape 1: analyse paramétrique
($k_o=0.3-0.8-1-1.2; \dots$)

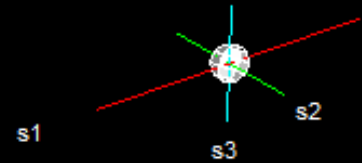
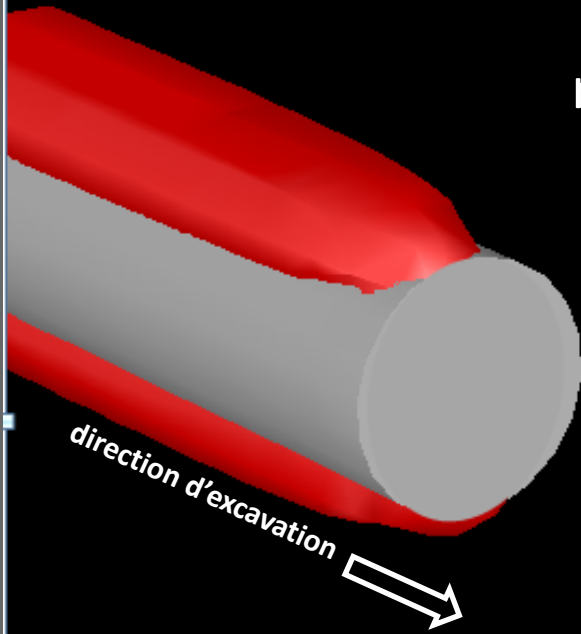
Étape 2: basée sur résultats
épreuve CSIRO (niche 3) →



Comportement observé: «**gonflement sans éjection**» («bulking without éjection», CRRP 1996) - l'énergie de déformation stockée se consomme par fracturation. Augmentation significative du volume pour dilatance. L'énergie cinétique libérée n'est pas significative: pas d'éjection de roche à grande vitesse



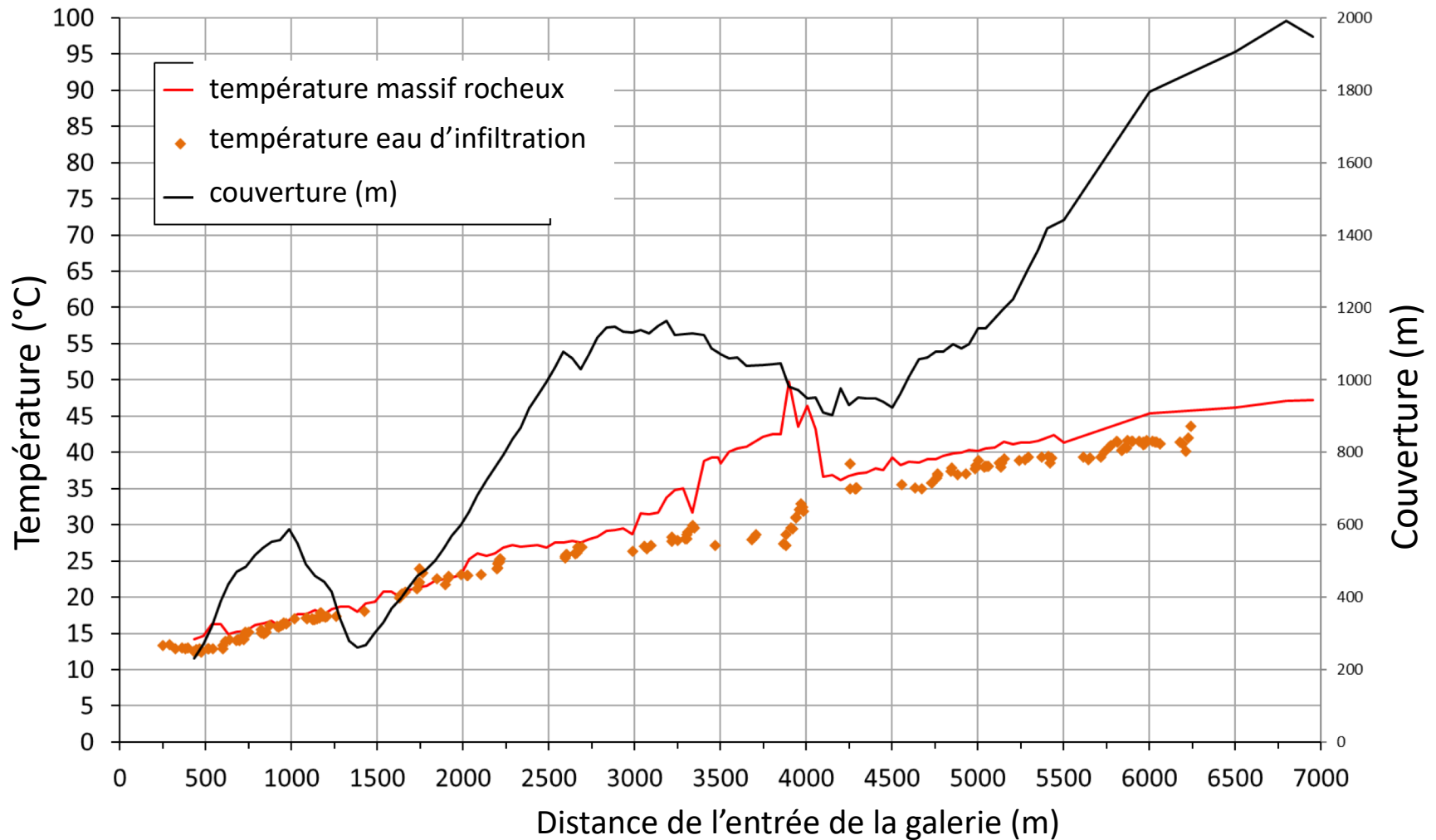
rupture fragile potentielle



Le front d'excavation est généralement stable grâce à l'orientation favorable de la schistosité

MÉCANISME OBSERVÉ

- La fracturation commence près du front d'excavation à la voûte et au radier
- Conditions potentielles de rupture brutale («rockburst») à distance d'environ un diamètre derrière le front
- La profondeur des dégâts est au maximum 1-1,5m derrière le profil excavé



Températures du massif rocheux et de l'eau infiltrée le long de la galerie



La température du massif rocheux dans la galerie atteint 50°C (pk. 3+900)

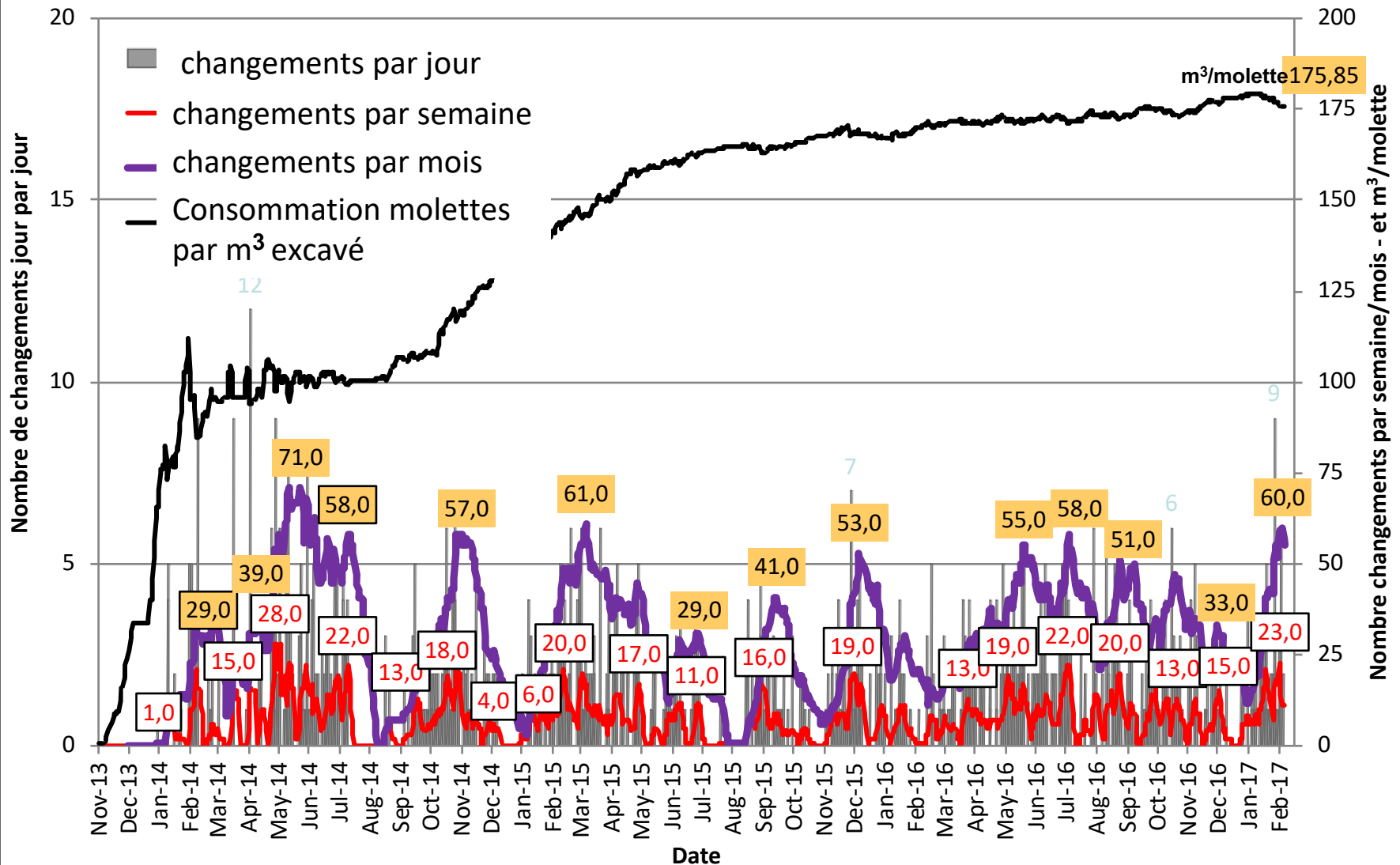
→ la ventilation doit inclure un système de refroidissement

L'air pré-refroidi est pompé de l'extérieur de la galerie → l'air froid atteint tous les postes de travail intermédiaires

Au train suiveur au front d'excavation, l'air est refroidi pour compenser les températures gagnés le long de la galerie
→ températures aux postes de travail du tunnelier maintenues entre 24°C et 29°C (différences en fonction du poste)



CONSOMMATION DES MOIETTES





Opposition «NO TAV» à la ligne TGV entre Lyon et Turin: un chantier de construction sous la protection permanente de la police et de l'armée

Opposition «NO TAV» à la connection TGV Lyon – Turin

Pourquoi contraires?

L'opposition «No TAV» contre le projet de TGV Turin-Lyon a commencé au début du siècle dans le Val de Susse, quelque kilomètre à l'ouest de Turin. Elle avait initialement une **base environnementale**: risque de dispersion des fibres d'amiante lors de la construction.

Le **mouvement «No TAV»** s'est rapidement développé, les motivations des gens contraires se transformant en doutes sur les avantages du projet.

La majorité des opposants au projet sont non violents mais une petite minorité a utilisé à plusieurs reprises la **violence** et le **sabotage**. Des attaques ont accompagné la construction de la galerie de La Maddalena, raison de la **présence permanente de la police sur le chantier**.

La **couverture médiatique** pour **NO TAV** se poursuit.

Entre-temps, un mouvement **SI TAV** s'est développé.....





L'excavation à été achevée le 19 février 2017

RETOUR D'EXPÉRIENCE

- Le tunnelier ouvert utilisé pour la galerie de reconnaissance de La Maddalena a creusé 7,02 km dans un massif rocheux dur (gneiss/micaschistes) de qualité entre moyenne et bonne. La galerie a atteint une couverture de 2000m.
- Les effets de relâchement des contraintes - fracturation et rupture du massif - en particulier à la voûte, ont accompagné l'excavation à partir de couvertures d'environ 400 m, lorsque les temps de soutien, sans soutènement des profils excavés, devenaient systématiquement plus courts que ceux rencontrés dans des contextes plus simplement gravitationnels (Bieniawski, 1989).
- Le relâchement des contraintes a aussi facilité la fracturation du massif rocheux au front d'excavation. On a observé:
 - a) réduction de la poussée, du couple et de la vitesse de rotation de la tête en maintenant le même taux d'avancement du tunnelier
 - b) formation de blocs de roche au front qui pénètrent dans le tunnel et provoquent problèmes d'enlèvement par bande transporteuse

RETOUR D'EXPÉRIENCE

- Pour l'entrée de blocs du front d'excavation, un tamis a été installé pour séparer ces blocs des matériaux plus fins; les blocs séparés ont été concassés pour permettre leur retrait par bande transporteuse
- Le type de rupture fragile observé, derrière le front sous la voûte, est une fracturation dilatante (ou «gonflement sans éjection»), un mécanisme de rupture brutale («rockburst») sans dégagement significatif d'énergie cinétique
- Fin 2015, lorsque les couvertures étaient environ de 1000 m, le gonflement du massif rocheux a provoqué de grandes déformations des cintres métalliques de soutènement du profil d'excavation.
- Jusqu'à la fin de l'excavation de la galerie, où une hauteur de 2.000 m de couverture a été atteinte, la rupture fragile a continué à se produire systématiquement en forme moins intense, sans aucune éjection violente de roche.

RETOUR D'EXPÉRIENCE

- Les soutènements du profil d'excavation de la galerie ont été adaptés pour protéger de la rupture fragile du massif rocheux, en installant systématiquement sur un arc de 120 ° des barres longitudinales en acier sous la voûte supportées par des cintres circonférentielles en acier, une solution permettant de poursuivre l'excavation avec un massif rocheux fragmentée sur la voûte .
- Les nouveaux soutènements ont immédiatement augmenté l'efficacité de l'excavation : le taux d'utilisation du tunnelier est passée de moins de 35% à plus de 55%, permettant des productions de 12m/jour au lieu de 4m/jour dans les conditions antérieures.

Références:

- Bieniawski Z.T. 1989. *Engineering Rock Mass Classification*. John Wiley & Son. 251.
- Camiro Mining Division, 1996. *A comprehensive summary of five years of collaborative research on rockbursting in hard rock mines. Canadian Rockburst Research Program (CRRP)*.
- Diederichs M.S., Carter T., Martin D. 2010. *Practical Rock Spall Prediction in Tunnel*. Proceedings of World Tunnelling Congress 2010 – Vancouver, Canada.
- Fornari, E., Gilli, P., Rolando, M., Sorlini, A. 2014. *Some unusual aspects in the Construction Management of “La Maddalena” Exploratory Adit in Italy for the Turin-Lyon HSR Project*. Proceedings of the World Tunnel Congress 2014 - Tunnels for a better Life. Foz do Iguaçu, Brazil.
- Russo, G. 2014. *An update of the “multiple graph” approach for the preliminary assessment of the excavation behaviour in rock tunnelling*. Tunnelling and Underground Space Technology 41 (2014). 74–81.