



Comité Français de Mécanique des Roches
13 Juin 2019, CNAM, Paris



Ouvrages souterrains à grande profondeur

Principaux enjeux des tunnels profonds

Michel Deffayet,

Centre d'études des Tunnels

Jean Sulem

Ecole des Ponts ParisTech



École des Ponts
ParisTech

Quelques éléments de contexte sur les grands tunnels

1- Franchir les montagnes et relier les territoires

- 1^{er} tunnel alpin ferroviaire : Mont Cenis (1871) 14 km
- 1^{er} tunnel alpin « route » : Tende (1880) 3,2 km

1^{ère} génération

- Gothard (1882), 15 km,
- Arlberg (1884), 10,6 km
- Simplon (1906/1922), 19,6 km
- Lötschberg (1913), 14,6 km

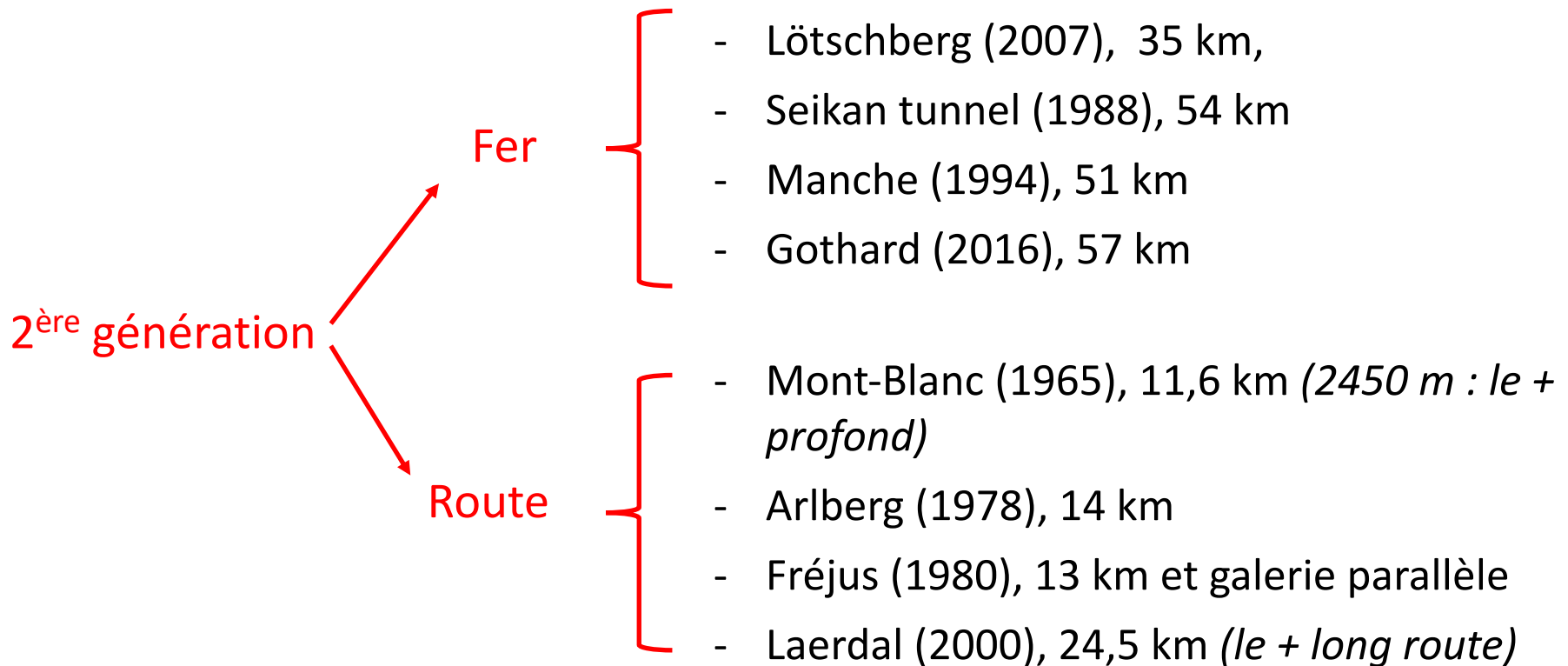
Environ 10 ans de travaux, 1 à 2 km/an



*Des prouesses techniques, et des chantiers héroïques
Des innovations sur les méthodes et la mécanisation*

2- Développer des réseaux toujours plus efficaces

- Réduire les dénivelés et les tracés sinueux
- Permettre une massification des transports

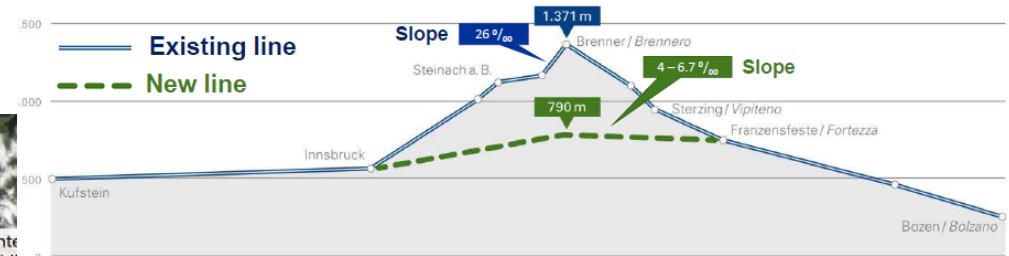
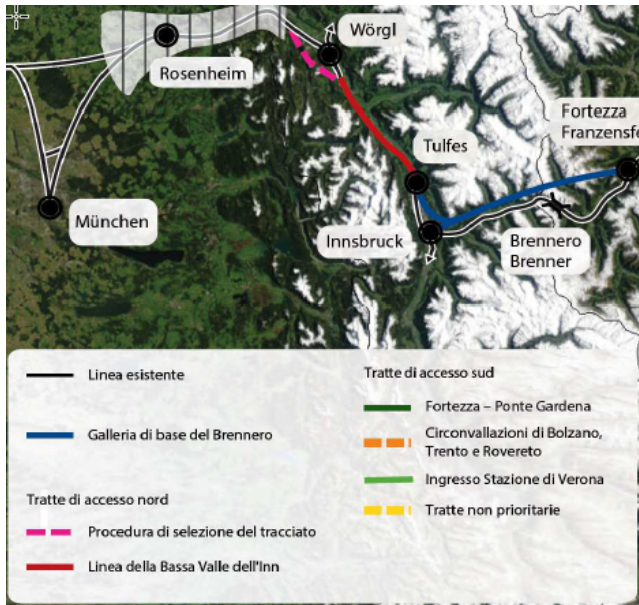


L'apport des TBM pour franchir les 25 km

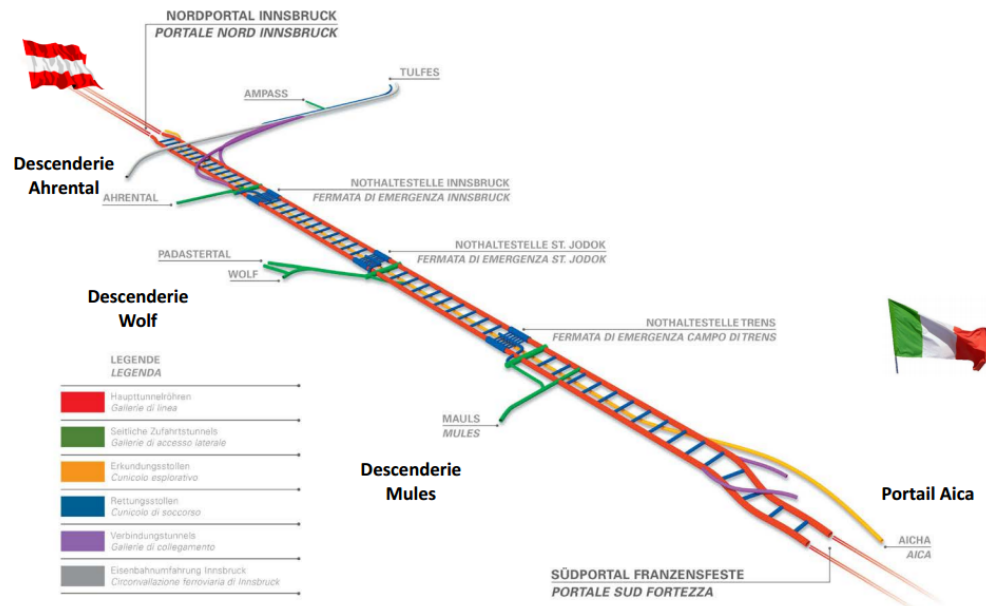
10 ans de travaux – 3 à 5 km/an – attaques multiples

3- Des projets très profonds en cours

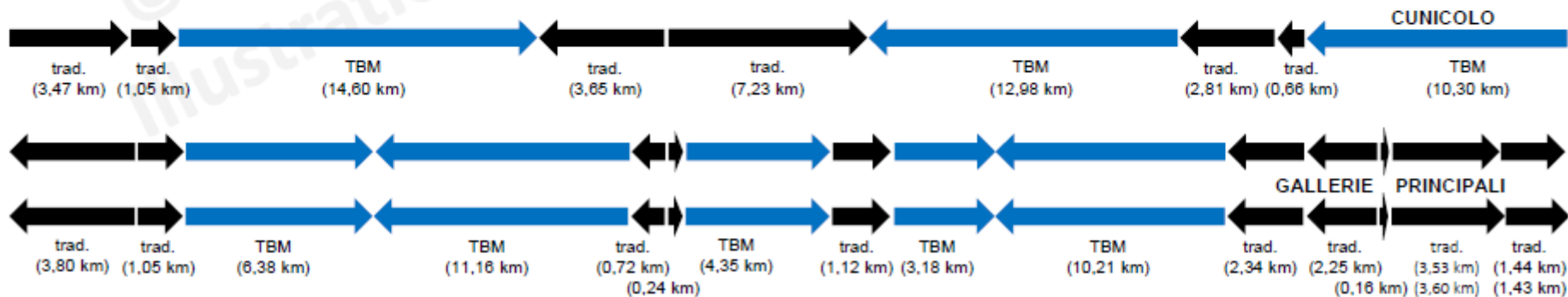
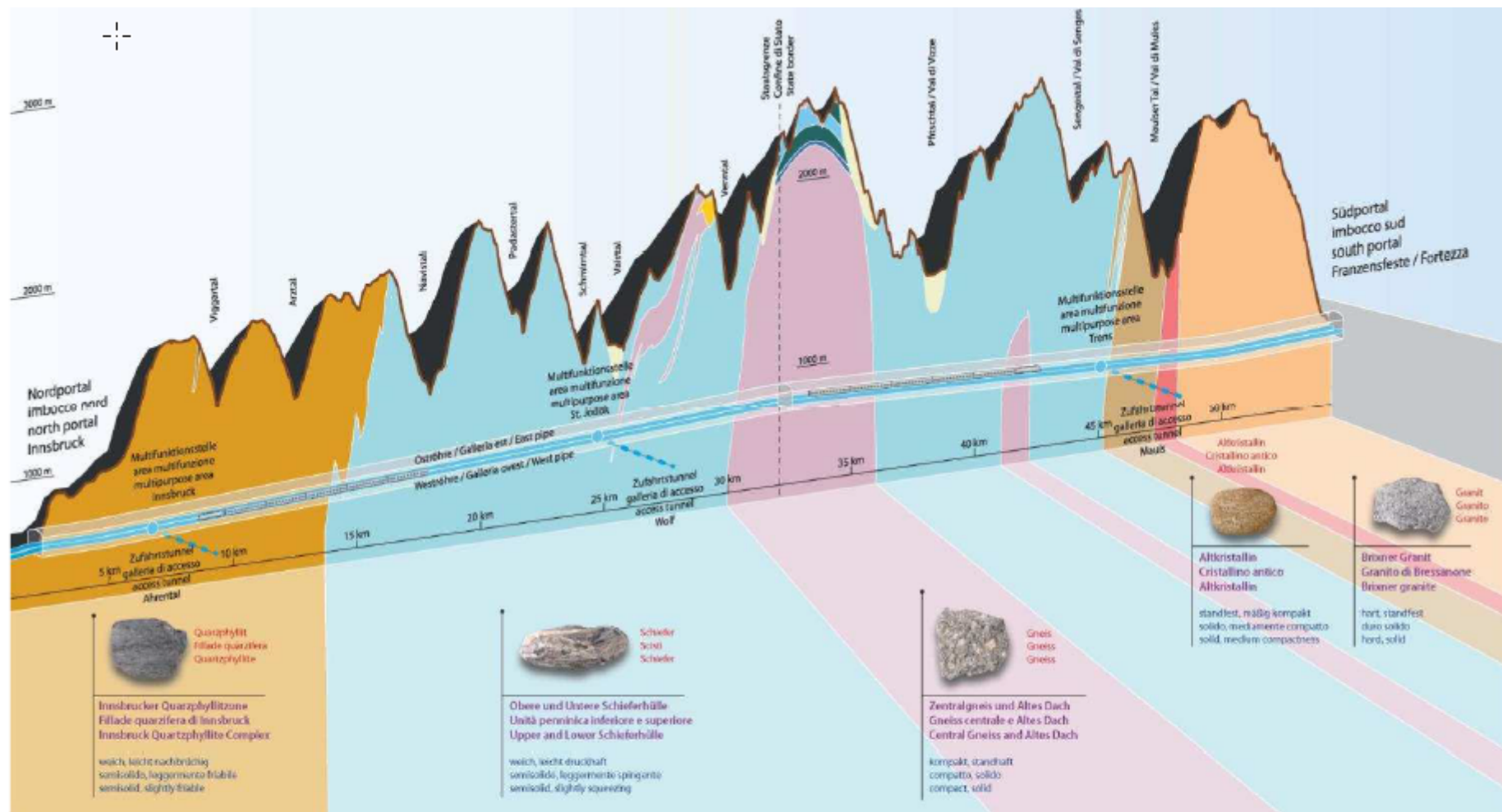
- Tunnel du Brenner



VUE D'ENSEMBLE

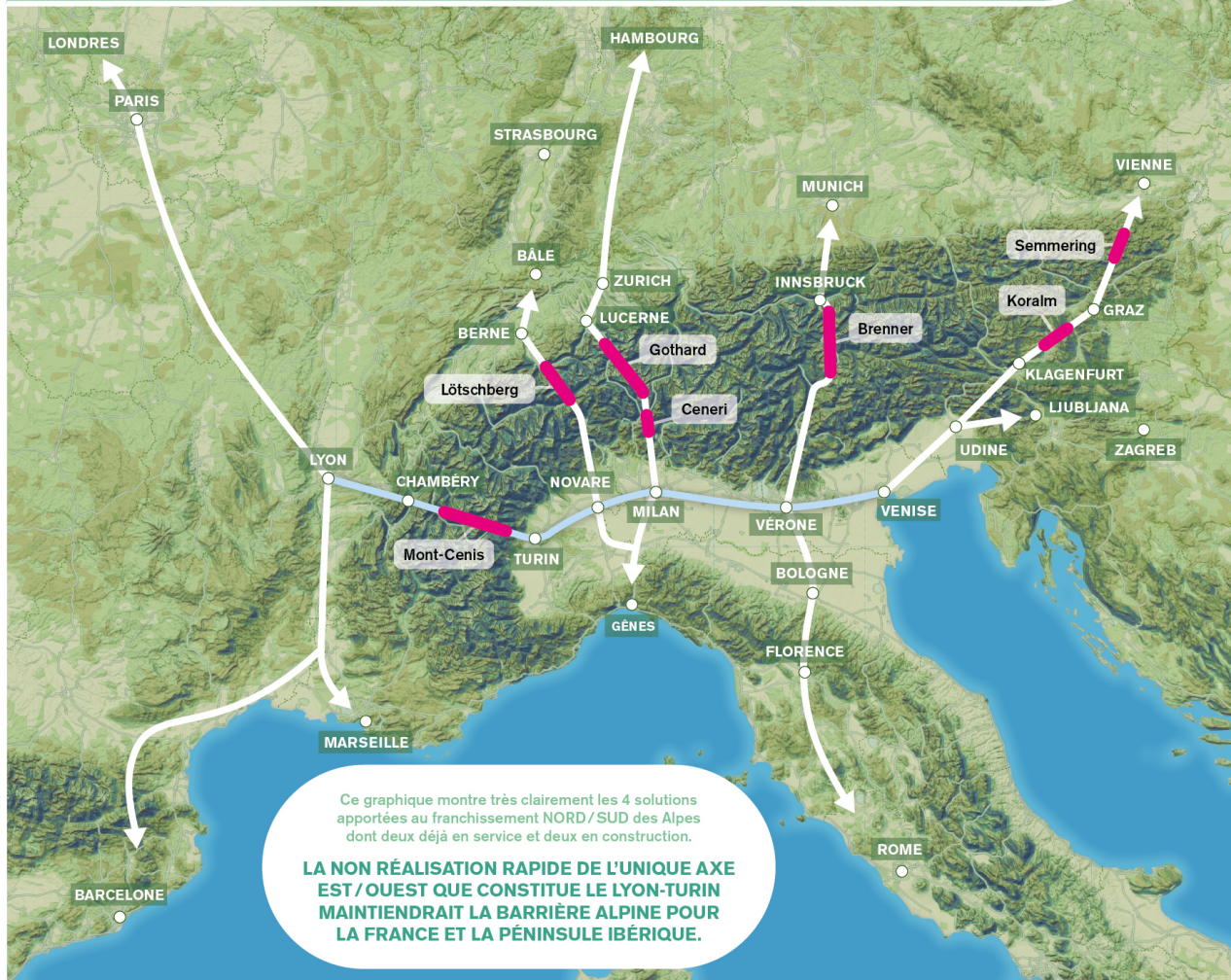


- 64 km, 1500 m de couverture
- 230 km de galerie dont près de 100 déjà creusés
- 30 km de galerie de reconnaissance



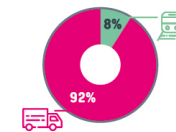
- Tunnel du Lyon-Turin (et tunnels d'accès)

LE LYON-TURIN : UNE CONTRIBUTION FONDAMENTALE À LA PROTECTION DES ALPES ET À L'ÉQUILIBRE INTERNE DE L'EUROPE

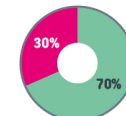


Situation rail / route 2017

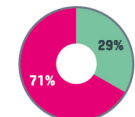
FRANCE - ITALIE



SUISSE - ITALIE



AUTRICHE - ITALIE



■ ferré
■ route



Mont-Cenis (57,5 km)

Mise en service : 2030



Gothard (57 km)

Mise en service : 1^{er} décembre 2016

Ceneri (15,4 km)

Mise en service : décembre 2020

Lötschberg (34,6 km)

Mise en service : 15 juin 2007



Koralm (32 km)

Mise en service : 2022

Semmering (27 km)

Mise en service : 2026



Brenner (56 km)

Mise en service : 2025

- Laboratoire et site d'enfouissement de Bure



PL AMDT 11-0023 / J

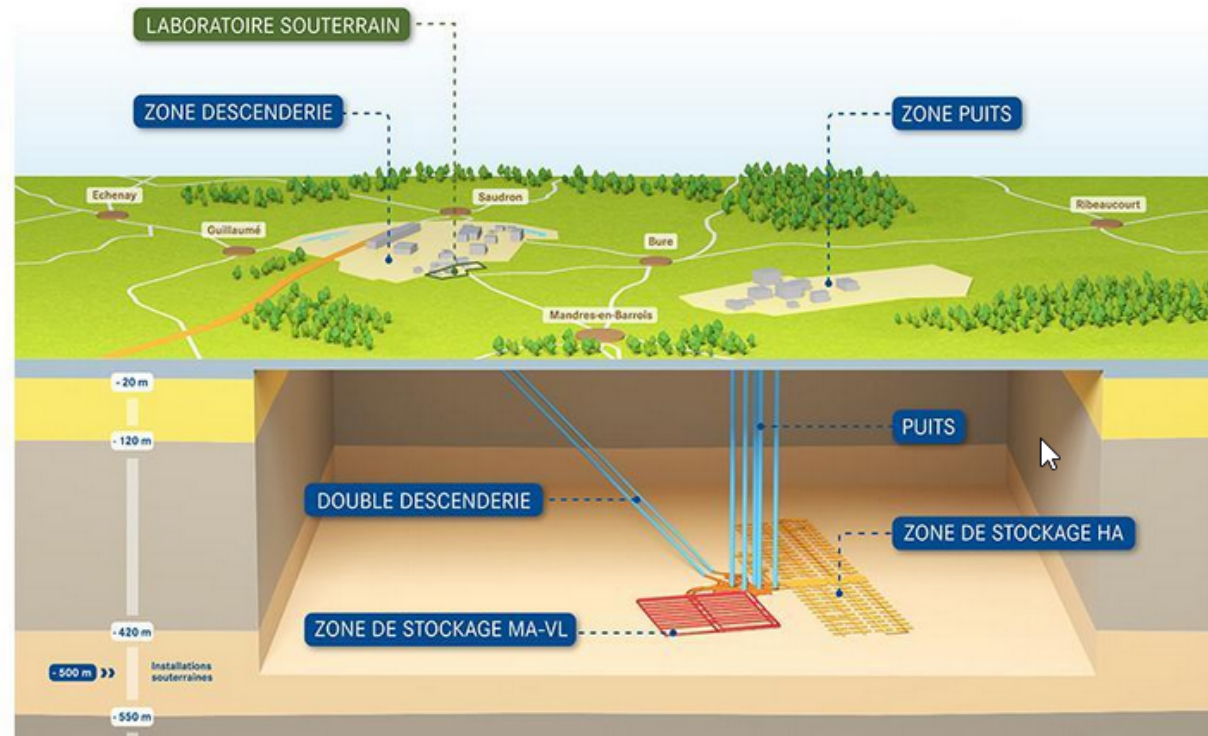
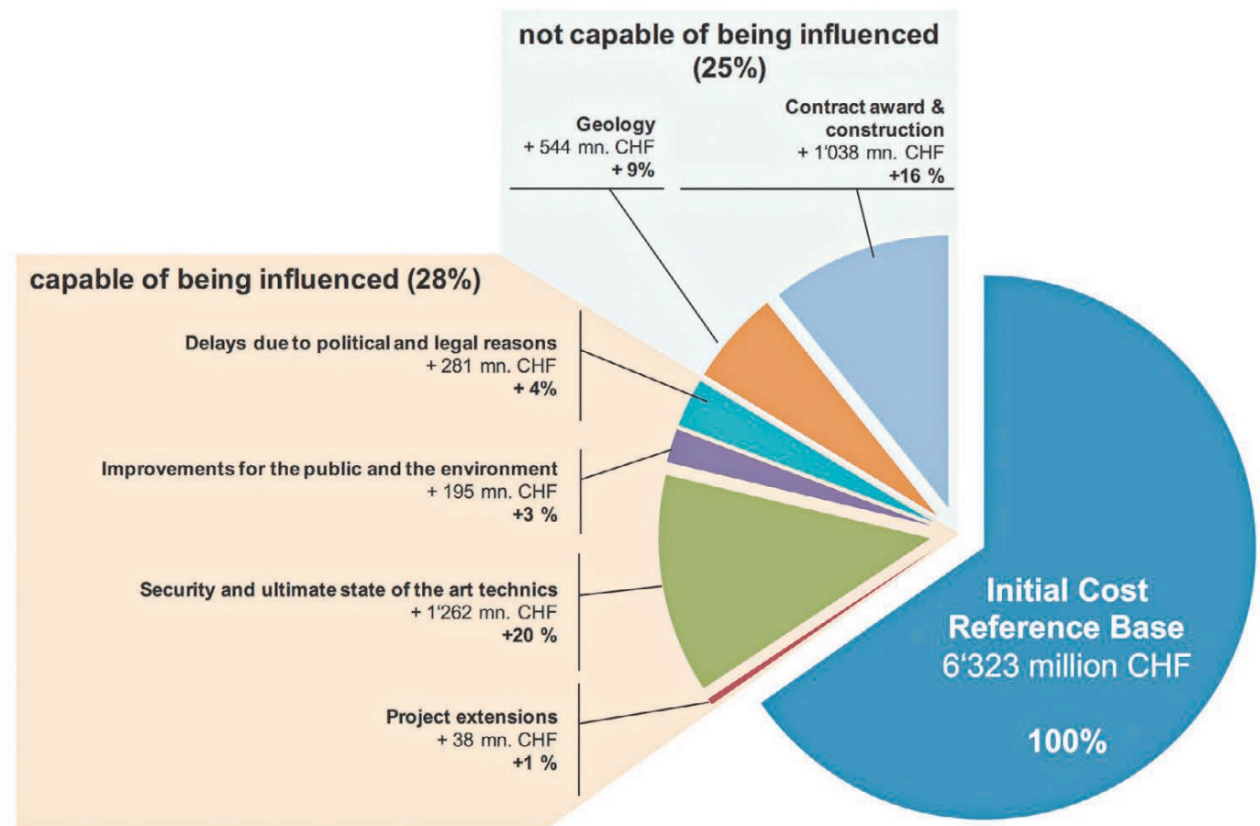


Schéma de principe du projet de stockage Cigéo

Spécificités des tunnels profonds

1- Des projets de longue durée (études et travaux)

- Evolutions des référentiels et réglementations
- Modifications des choix politiques et des opinions
- Nécessité d'anticiper dans la conception



2- Des enjeux de sécurité des chantiers

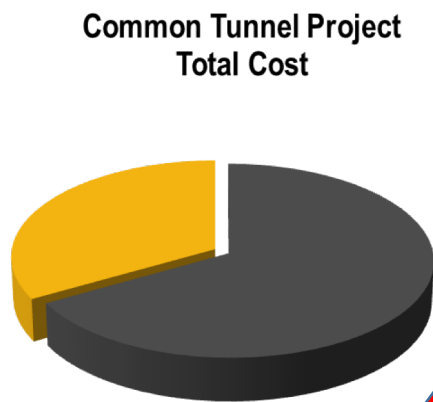
- Des progrès notables dans la sécurité mais une préoccupation essentielle
- Les risques classiques rencontrés en tunnel mais aussi des risques additionnels liés aux tunnels profonds :
 - Transport des personnes
 - Ventilation – aération
 - Chaleur
 - Evacuation
 - Risques terrain
 - Puits profonds



Importance des questions de logistique (ex Gotthard)

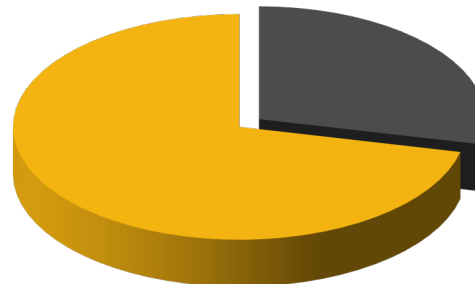
3- La question essentielle de la logistique chantiers

- Des difficultés accrues dans les tunnels longs et profonds :
 - Espaces disponibles
 - Accessibilité et transport
 - Approvisionnement énergie et eau
 - Ventilation – refroidissement
 - Déblais - eau
 - Transport du béton
 - Gestion puits et descenderies
 - Interfaces entre lots



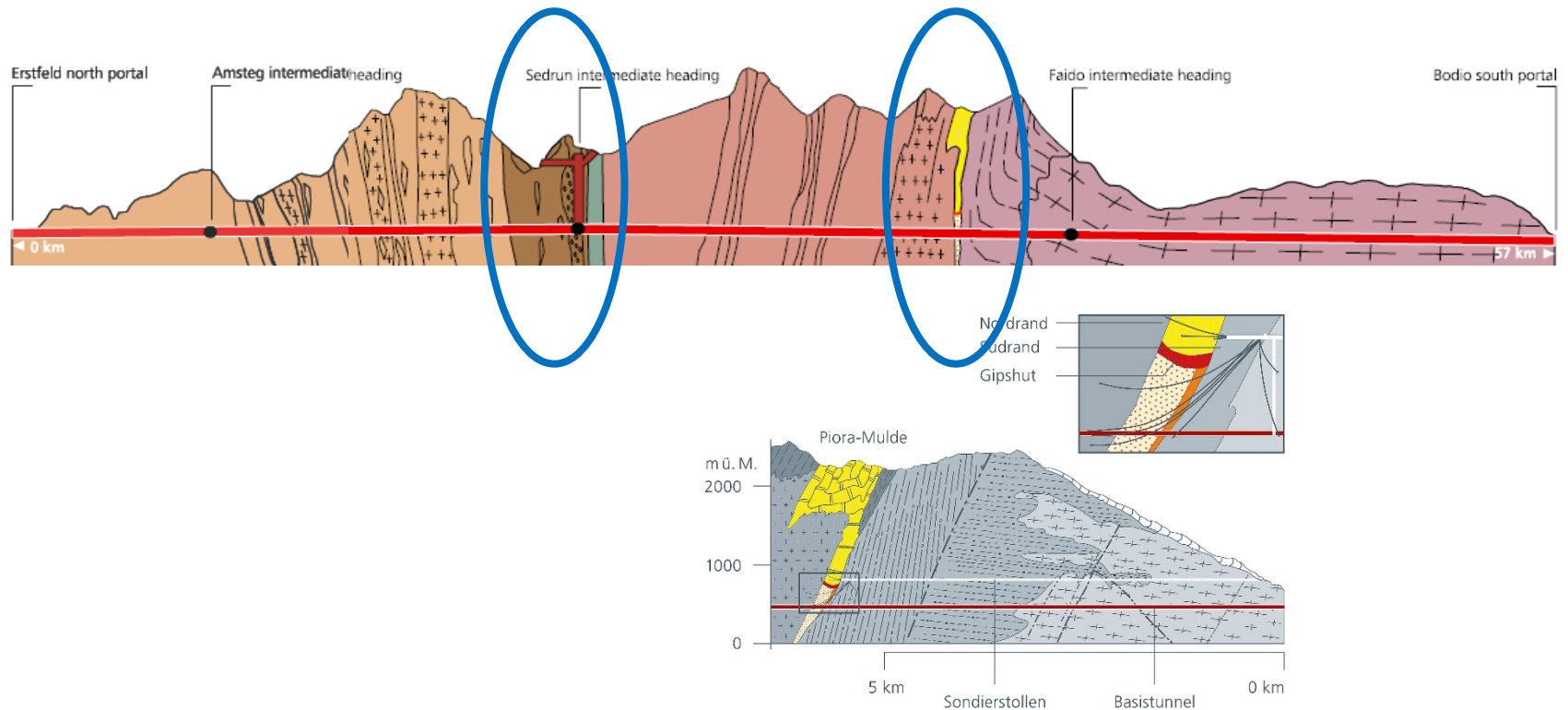
■ Production Cost
■ Logistic Cost

**Gotthard Base Tunnel
Total Cost**



4- Les risques associés à la difficulté de faire des reconnaissances

- Des impératifs d'une démarche de management des risques (cf GT 32 AFTES)



4- Le comportement géomécanique

- Des effets spécifiques liés à la profondeur :

- Instabilité du front
- Ecaillage (spalling)
- Rockburst
- Flambement (buckling)
- Convergences et serrage
- Pression d'eau
- Température

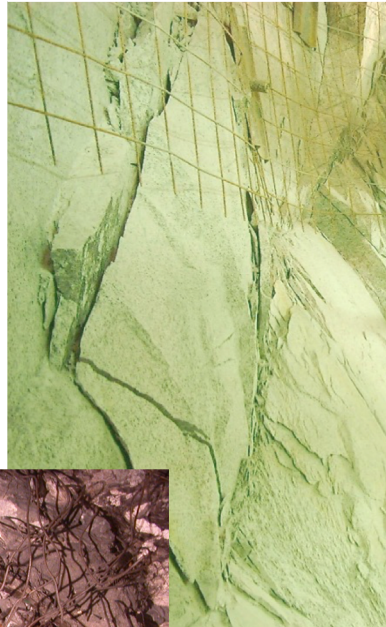
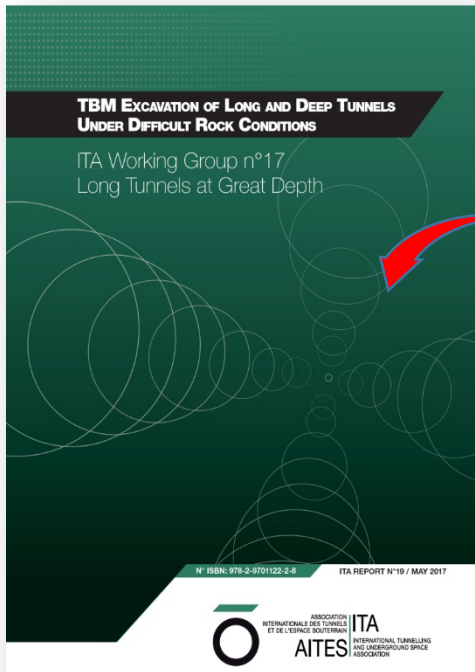


Photo : Luzi Gruber

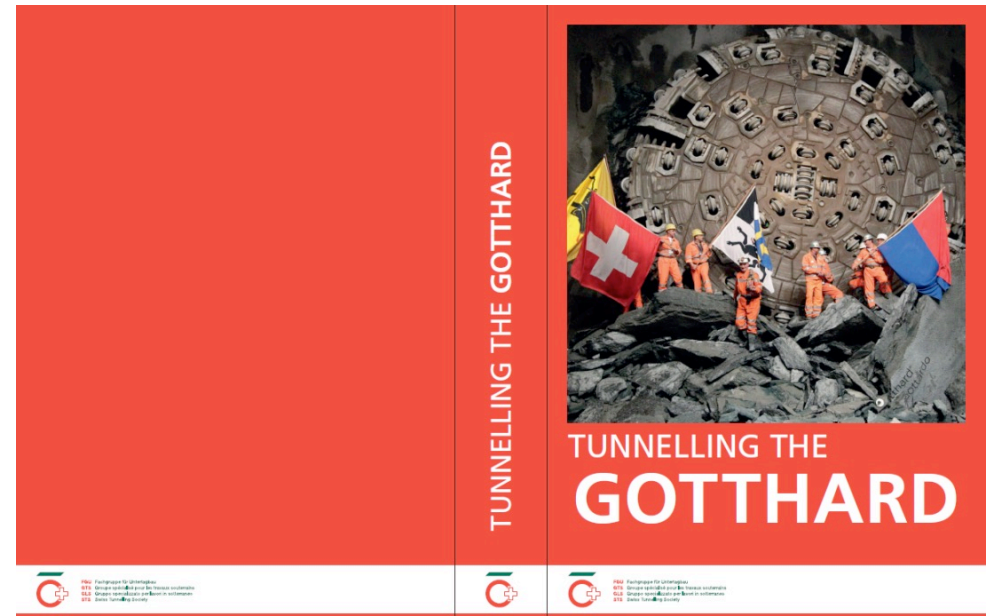


Photos : Gérard Seingre

Quelques références intéressantes de travaux collectifs



WG17 de
l'ITA/AITES



Avancées récentes des travaux de recherche dans le domaine des tunnels à grande profondeur

Modélisation et dimensionnement des tunnels excavés dans des situations complexes

- Terrains poussants ('Squeezing Ground')
- Terrains gonflants
- Terrains hétérogènes et fracturés
- Zones de failles
- Présence d'eau
- Etat des contraintes en place

Tunnels en terrains poussants

Fortes convergences, souvent anisotropes, effet différé, large zone plastique

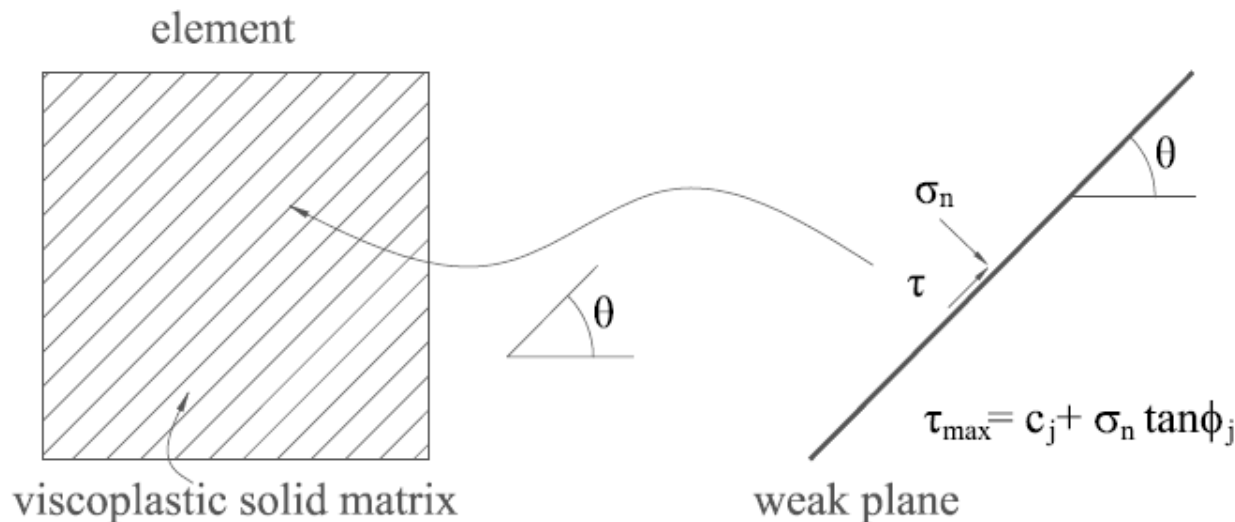
Roches altérées, hétérogènes, ductiles (argilite, flysch, schiste...)

Exemples : Tunnel du Fréjus, Lötschberg, Gotthard (Section du Sedrun), Galerie d'accès de St Martin la Porte, ...

Modèles de comportement des terrains poussants

Modèles viscoplastiques anisotropes

- Extension des modèles viscoplastiques de type 'over-stress plasticity' (modèles de Perzyna, Lemaître) aux matériaux anisotropes par l'introduction d'un tenseur de fabrique (Pietruszczak & Mroz, 2000, *Comput. Geoth*)
- Modèle elasto-visco-plastique + 'Ubiquitous joint model'

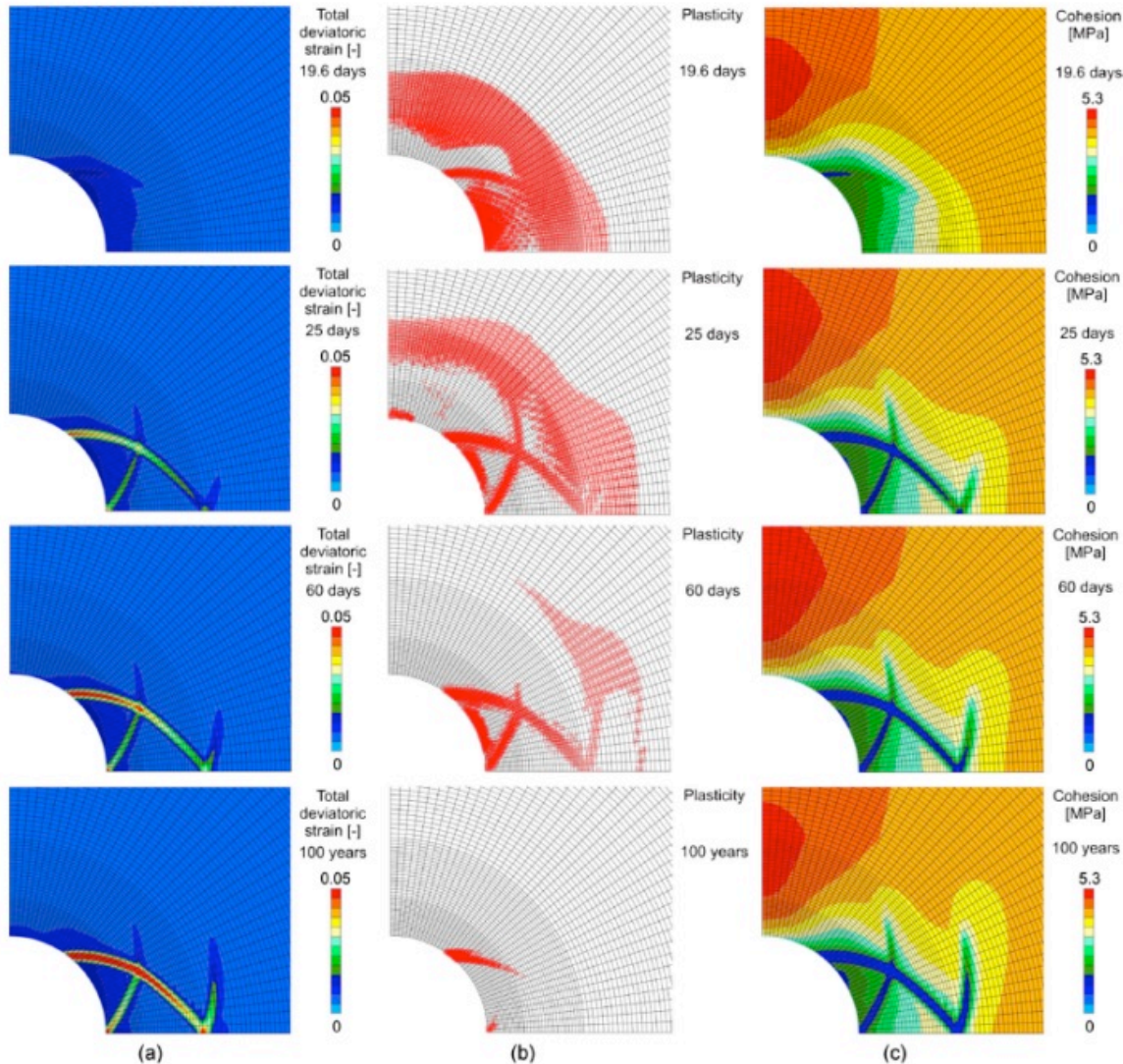


Tran Manh et al, 2014,
Rock Mech Rock Eng

Exemple de modélisation numérique de la localisation des déformations autour des galeries du laboratoire souterrain de Bure

362

B. Pardoën, F. Collin / Computers and Geotechnics 85 (2017) 351–367



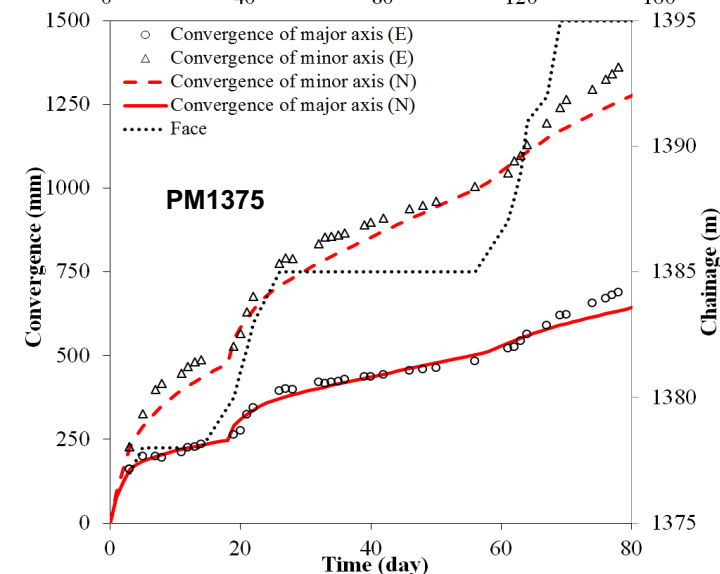
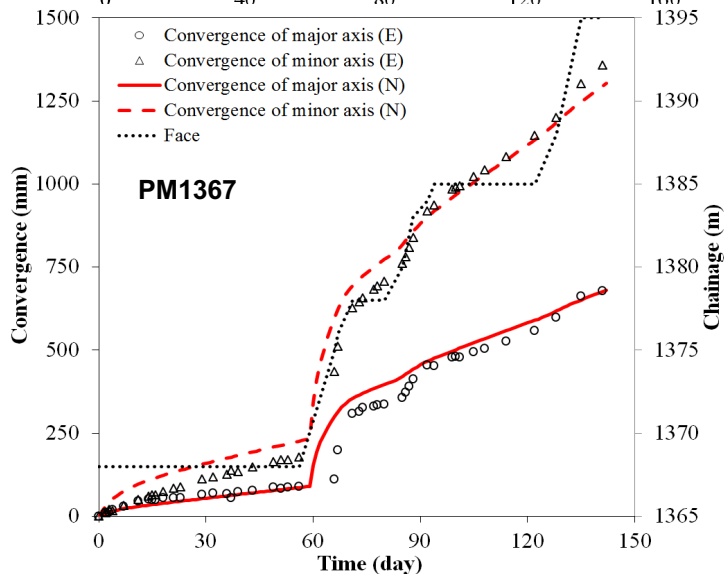
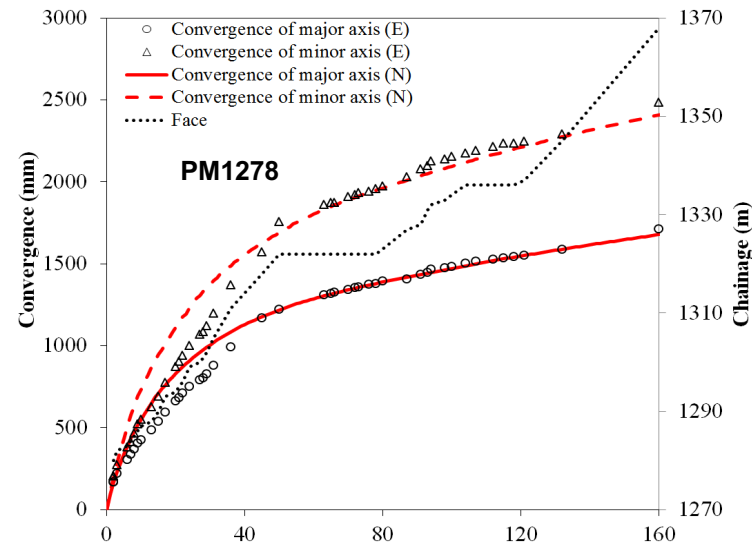
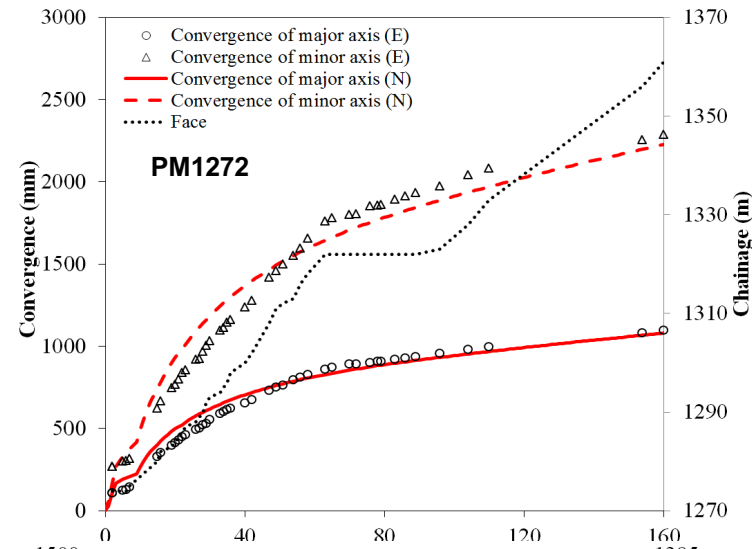
Régularisation et
modélisation du
comportement
radoucissant

Pardoën & Collin, 2017,
Comput. Geotech.

Fig. 11. Development of shear bands around a gallery parallel to the major horizontal principal stress: (a) total deviatoric strain, (b) plastic zone, and (c) cohesion.

Exemple de modélisation numérique de la convergence de la galerie de Saint Martin la Porte dans la zone des schistes houillers

Tran Manh et al, 2014, *Rock Mech Rock Eng*



Modélisation numérique des tunnels excavés en terrains poussants - Méthode traditionnelle

- Modèles 3D (Eléments finis, Différences finies)
- Phasages d'excavation
- Mise en place de soutènements souples (boulonnage, cintres, blocs compressibles)
- Reprofilage
- Mise en place du revêtement définitif

Excavation au tunnelier en terrain poussant

Travaux de G. Barla et co-auteurs, G. Anagnostou et co-auteurs

Modélisation du processus d'excavation, de la surcoupe, de la conicité de la jupe, de l'installation des voussoirs, du matériau de remplissage ...

Calcul de la force de poussée

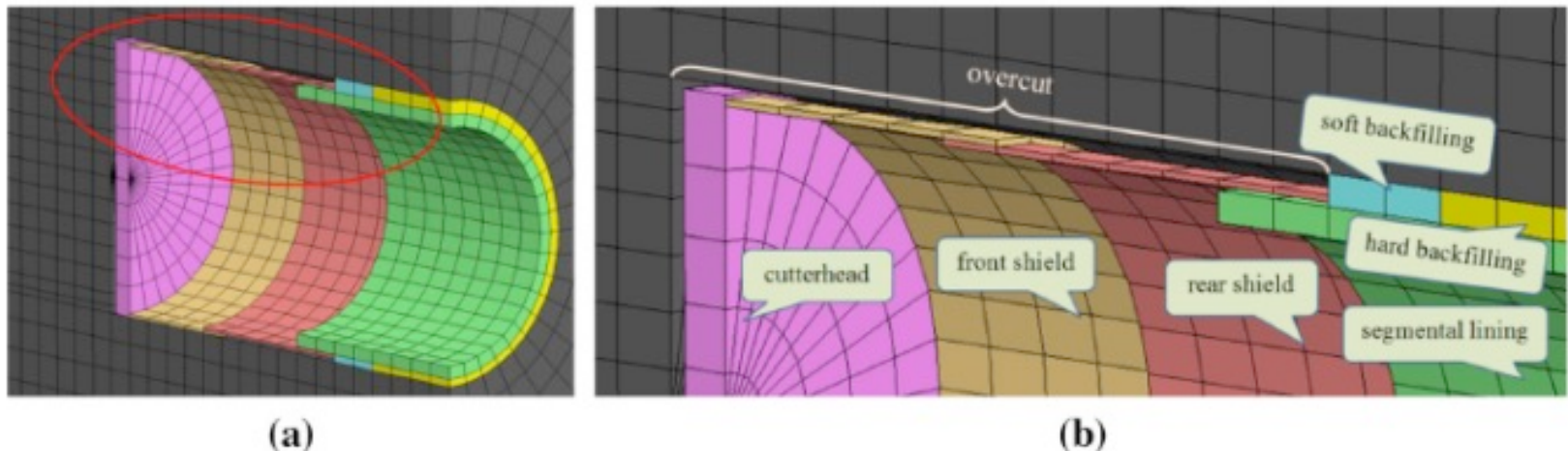


Fig. 4 Numerical model for the simulation of tunneling with a double-shielded TBM: **a** complete model and **b** description of the model (Hasanpour et al. 2014)

Evaluation des caractéristiques mécaniques du terrain

Calage des paramètres des modèles de comportement

Systèmes de classification des massifs rocheux (RMR, GSI)

Barton (1974), Bieniawski (1973), Hoek & Brown (1997)

Rock Mass Quality

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

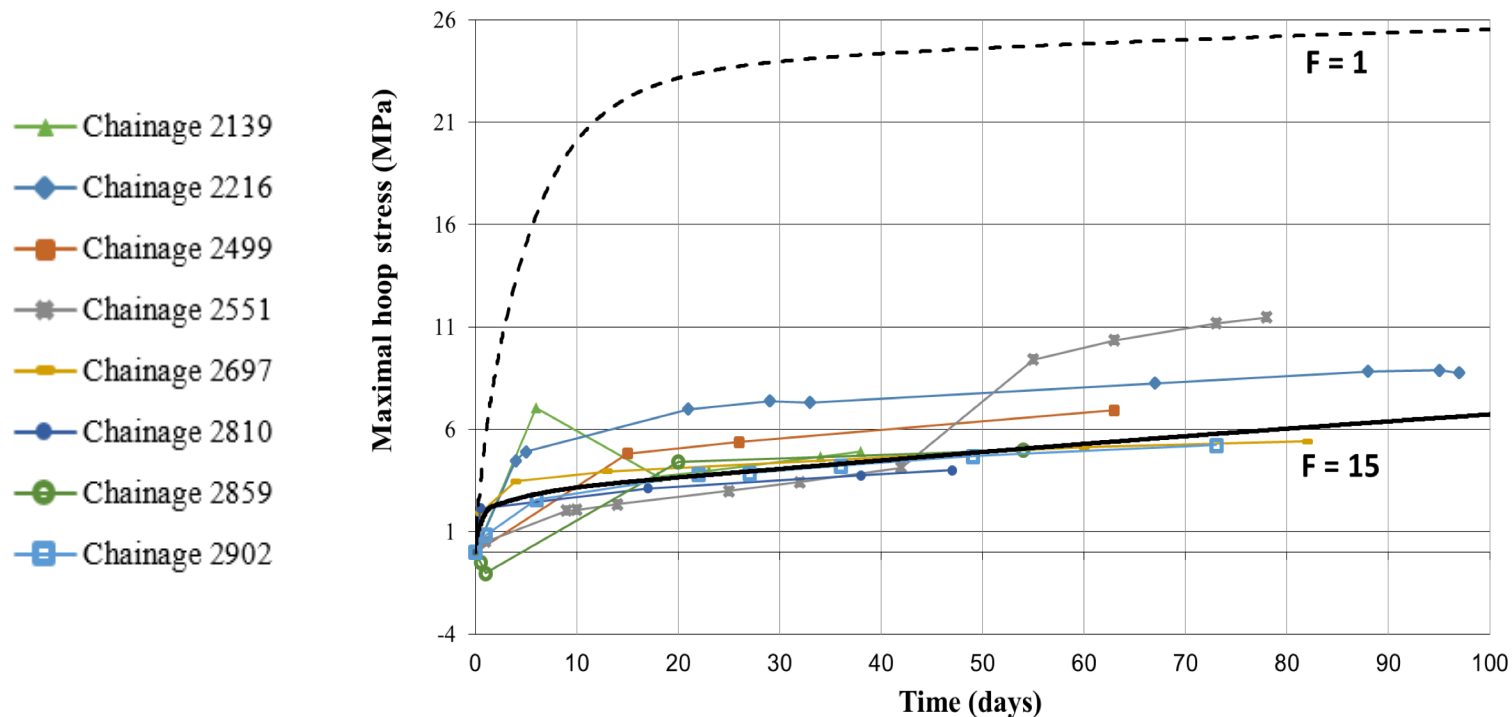
- Utilisation des paramètres de creusement (taux de pénétration, pression opérationnelle, vitesse de rotation...) en cours d'excavation pour évaluer le RQD

Schunnesson et al (2011)

- Evaluation des caractéristiques des soutènements (boulonnage, épaisseur de béton projeté) à partir de l'indice Q
- Corrélations empiriques pour évaluer les paramètres des modèles de comportement.

Effet de la méthode d'excavation sur les caractéristiques mécaniques des terrains

Exemple du tunnel routier du Fréjus (méthode traditionnelle) et de sa galerie de sécurité (tunnelier) Thèse M. de la Fuente (2018)



L'excavation au tunnelier réduit l'endommagement autour du tunnel et par conséquent les déformations différées et les efforts à long terme sur le soutènement

Solutions analytiques en 2D

Outils de pré-dimensionnement et de validation des modèles numériques

- Elasticité anisotrope, Utilisation de la théorie des variables complexes, transformation conforme
- Tunnels de forme quelconque,
- Couplage hydromécanique,
- Interaction de deux tunnels parallèles
- Solution élastoplastique en grande déformation
- Prise en compte du comportement différé

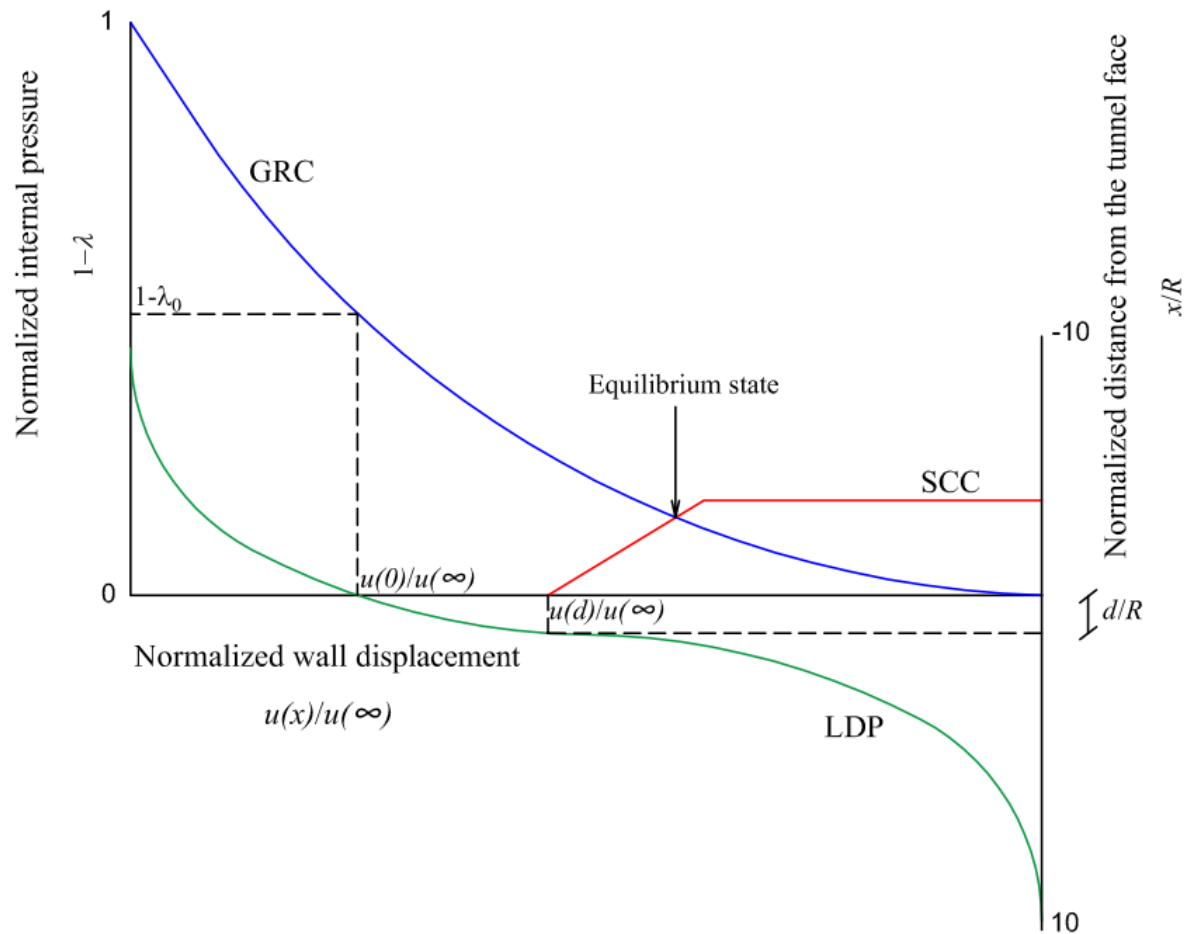
Bobet, 2010, 2011, Vu et al, 2012, Tran Manh et al 2014, 2015, 2016, Vrakas & Anagnostou, 2014a,b

Retour sur la méthode convergence-confinement

GRC : Ground Reaction Curve

SCC : Support Confining Curve

LDP : Longitudinal Displacement Profile (Panet, 1995, Corbetta, 1991, Vlachopoulos & Diederichs, 2009)



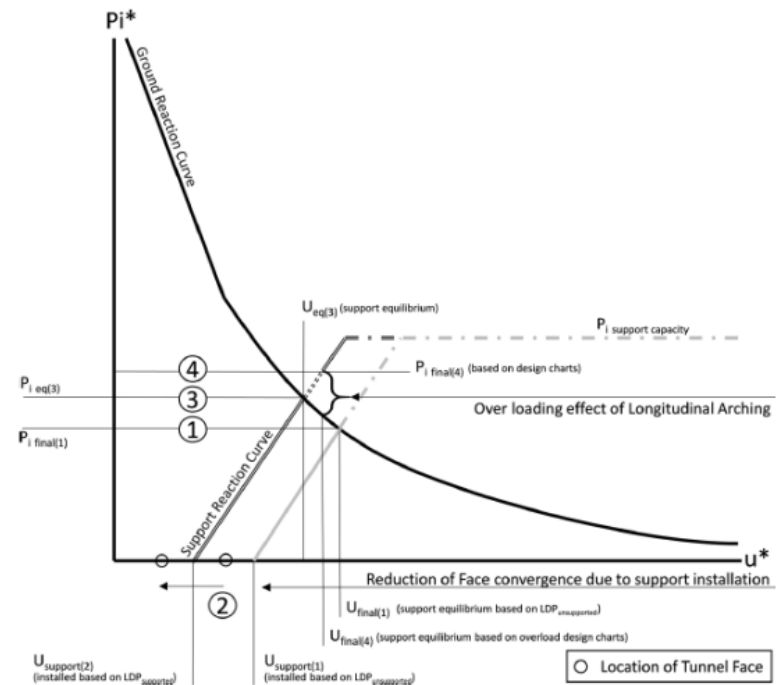
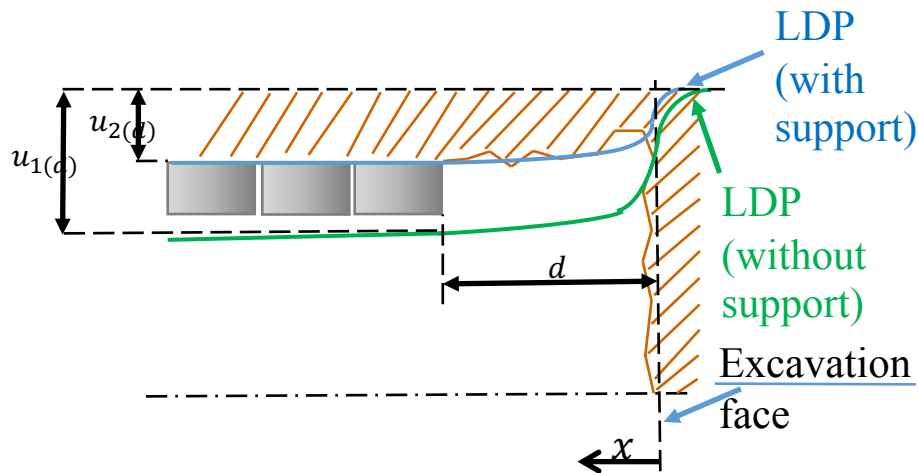
Retour sur la méthode convergence-confinement

Prise en compte de la pose d'un soutènement rigide près du front
(terrains poussants)

- Modification de la courbe LDP et GRC

Formules empiriques fonction des caractéristiques du soutènement
(distance de pose, rigidité)

- Prise en compte de la surcharge du soutènement dû à l'effet de voûte longitudinal



Bernaudo & Rousset (1994), Nguyen-Minh & Guo (1996), Oke et al. 2018, De la Fuente et al (2019)

Science des données et dimensionnement des tunnels

Construction de bases de données à partir de mesures in situ et de simulations numériques

Systèmes d'intelligence artificielle – Apprentissage

Analyse inverse

Prédiction des déplacements autour des tunnels – Méthode observationnelle

Performance des tunneliers

...

Références

- Barla, G., Barla, M., Debernardi, D., & Bonini, M. (2014). Guidelines for TBM tunnelling in squeezing conditions – a case study. *Géotechnique Letters*, 4, 83–87.
- Bobet, A. (2010). Characteristic Curves for Deep Circular Tunnels in Poroplastic Rock. *Rock Mech. & Rock Eng.*, 43(2), 185–200.
- Bobet, A. (2011). Lined circular tunnels in elastic transversely anisotropic rock at depth. *Rock Mech. & Rock Eng.*, 44(2), 149–167.
- De La Fuente, M., Taherzadeh, R., Sulem, J., Nguyen, X.-S., & Subrin, D. (2019). Applicability of the Convergence-Confinement Method to Full-Face Excavation of Circular Tunnels with Stiff Support System. *Rock Mech. & Rock Eng.*
- Liu, K., & Liu, B. (2019). Intelligent information-based construction in tunnel engineering based on the GA and CCGPR coupled algorithm. *TUST*, 88, 113–128.
- Oke, J., Vlachopoulos, N., & Diederichs, M. (2018). Improvement to the Convergence - Confinement Method : Inclusion of Support Installation Proximity and Stiffness. *Rock Mech. & Rock Eng.*, 51(5), 1495–1519.
- Pardoen, B., & Collin, F. (2017). Modelling the influence of strain localisation and viscosity on the behaviour of underground drifts drilled in claystone. *Computers and Geotechnics*, 85, 351–367.
- Pietruszczak, S., & Mroz, Z. (2001). On failure criteria for anisotropic cohesive-frictional materials. *Int. J. Num. Anal. Meth. Geomech.*, 25(5), 509–524.
- Ramoni, M., & Anagnostou, G. (2011). The interaction between shield, ground and tunnel support in TBM tunnelling through squeezing ground. *Rock Mech. & Rock Eng.*, 44(1), 37–61.
- Tran Manh, H., Sulem, J., & Subrin, D. (2015). A Closed-Form Solution for Tunnels with Arbitrary Cross Section Excavated in Elastic Anisotropic Ground. *Rock Mech. & Rock Eng.*, 48:277–288.
- Tran-Manh, H., Sulem, J., Subrin, D., & Billiaux, D. (2015). Anisotropic Time-Dependent Modeling of Tunnel Excavation in Squeezing Ground. *Rock Mech. & Rock Eng.*, 48(6), 2301–2317.
- Tran-Manh, H., Sulem, J., & Subrin, D. (2015). Interaction of circular tunnels in anisotropic elastic ground. *Géotechnique*, 65(4), 287–295.
- Vu, T. M., Sulem, J., Subrin, D., & Monin, N. (2013). Semi-Analytical Solution for Stresses and Displacements in a Tunnel Excavated in Transversely Isotropic Formation with Non-Linear Behavior. *Rock Mech. & Rock Eng.*, 46(2), 213–229.
- Tran-Manh, H., Sulem, J., & Subrin, D. (2016). Progressive degradation of rock properties and time-dependent behavior of deep tunnels. *Acta Geotechnica*, 11(3), 693–711.
- Vrakas, A., & Anagnostou, G. (2014). A finite strain closed-form solution for the elastoplastic ground response curve in tunnelling. *Int. J. Num. Anal. Meth. Geomech.*, 38(11), 1131–1148.
- Vrakas, A., & Anagnostou, G. (2016). Ground Response to Tunnel Re-profiling Under Heavily Squeezing Conditions. *Rock Mech. & Rock Eng.*, 49(7), 2753–2762.
- Zhao, K., Janutolo, M., & Barla, G. (2012). A Completely 3D Model for the Simulation of Mechanized Tunnel Excavation. *Rock Mech. & Rock Eng.*, 45(4), 475–497.