



**Comité Français de Mécanique des Roches**  
**Association Française des Tunnels et de**  
**l'Espace Souterrain**

Séance technique du 4 juin 2015



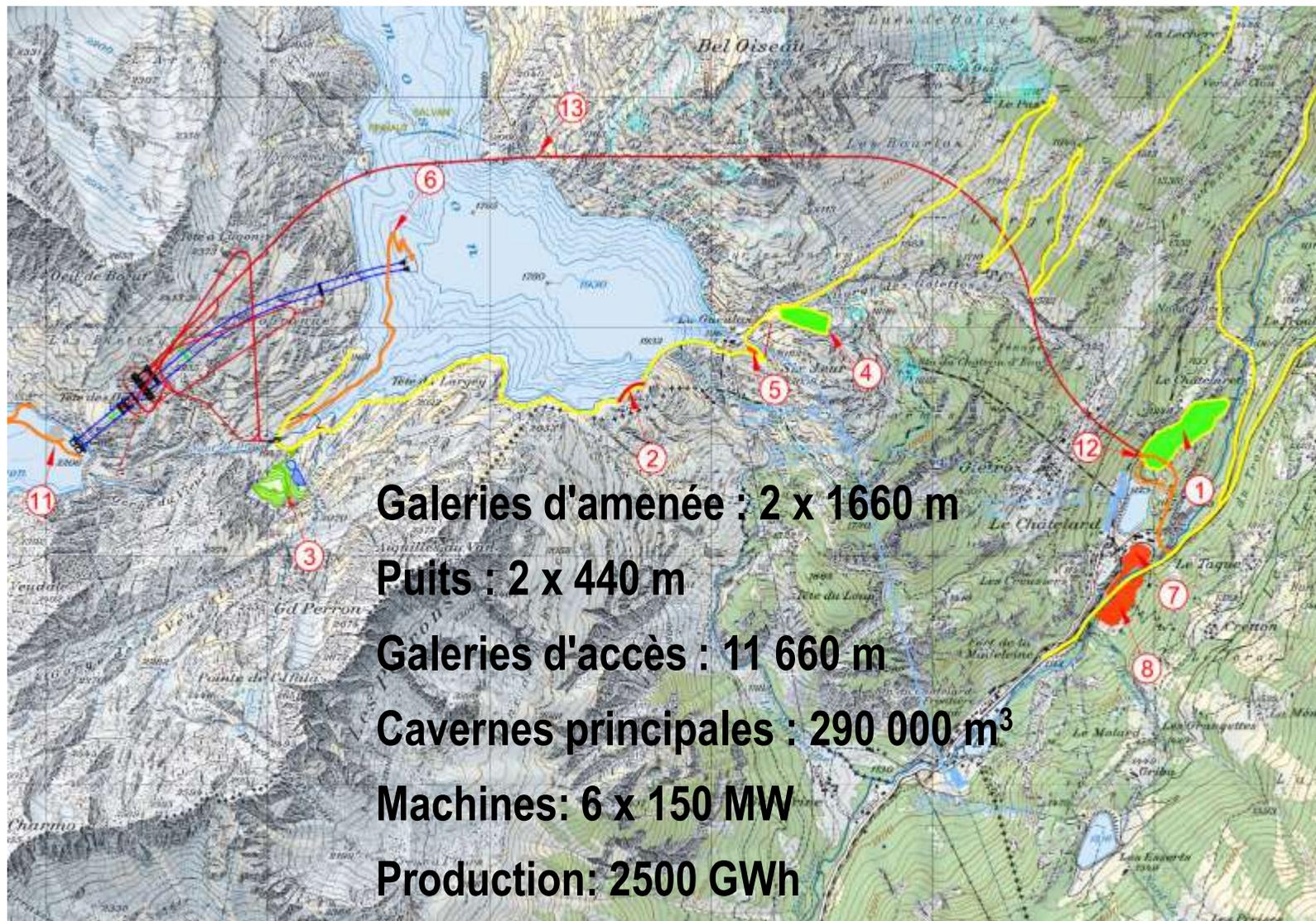
## Caverne principale –Nant-de-Drance



# Nant-de-Drance vue d'ensemble



# Nant-de-Drance vue d'ensemble



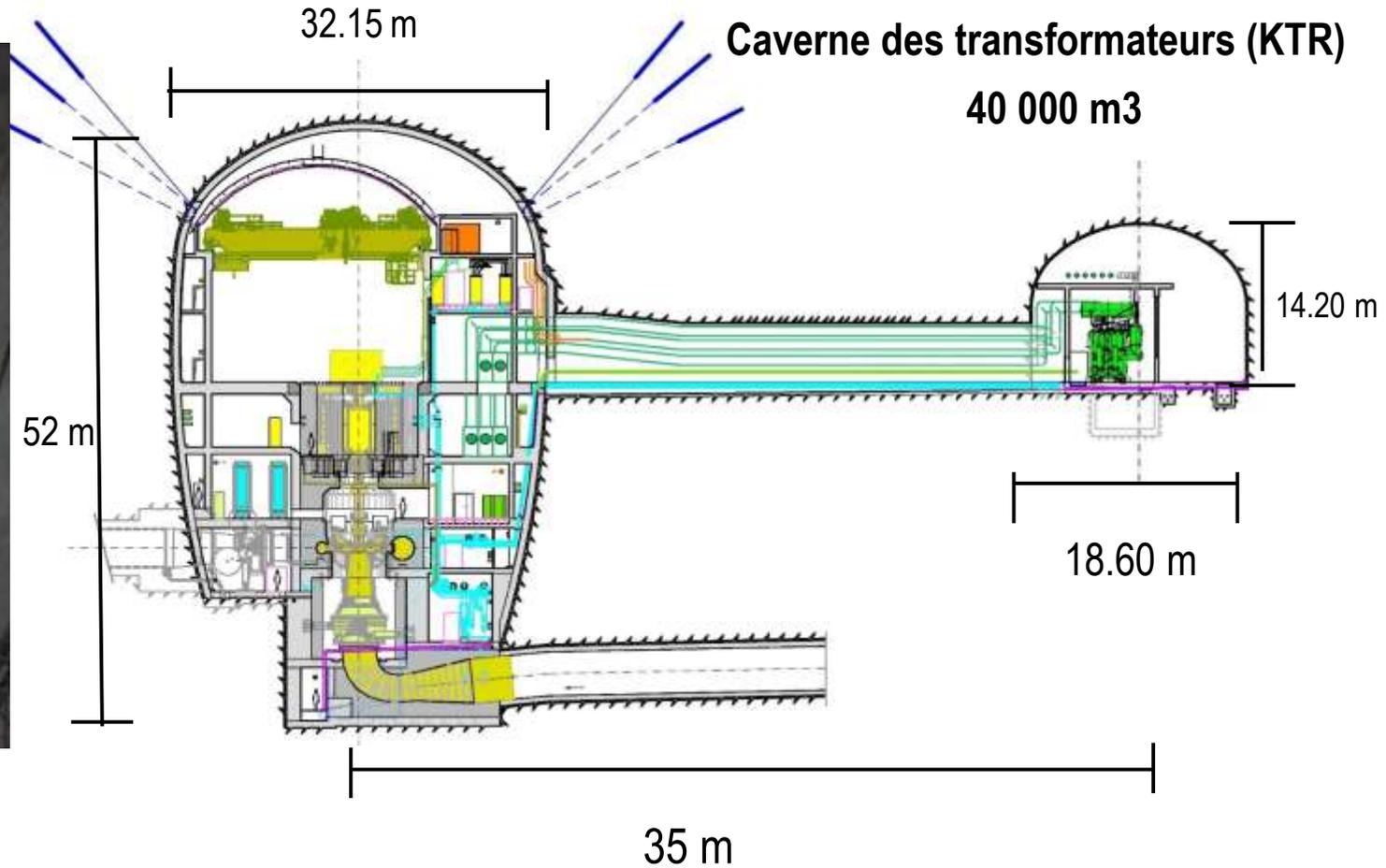
**Galleries d'amenée : 2 x 1660 m**  
**Puits : 2 x 440 m**  
**Galleries d'accès : 11 660 m**  
**Cavernes principales : 290 000 m<sup>3</sup>**  
**Machines: 6 x 150 MW**  
**Production: 2500 GWh**  
**Investissement: 2 Mia CHF**

# Dimensions exceptionnelles

## Caverne des machines (KMA) 250 000 m<sup>3</sup>

## Caverne des transformateurs (KTR) 40 000 m<sup>3</sup>

40 000 m<sup>3</sup>



# Dimensions exceptionnelles

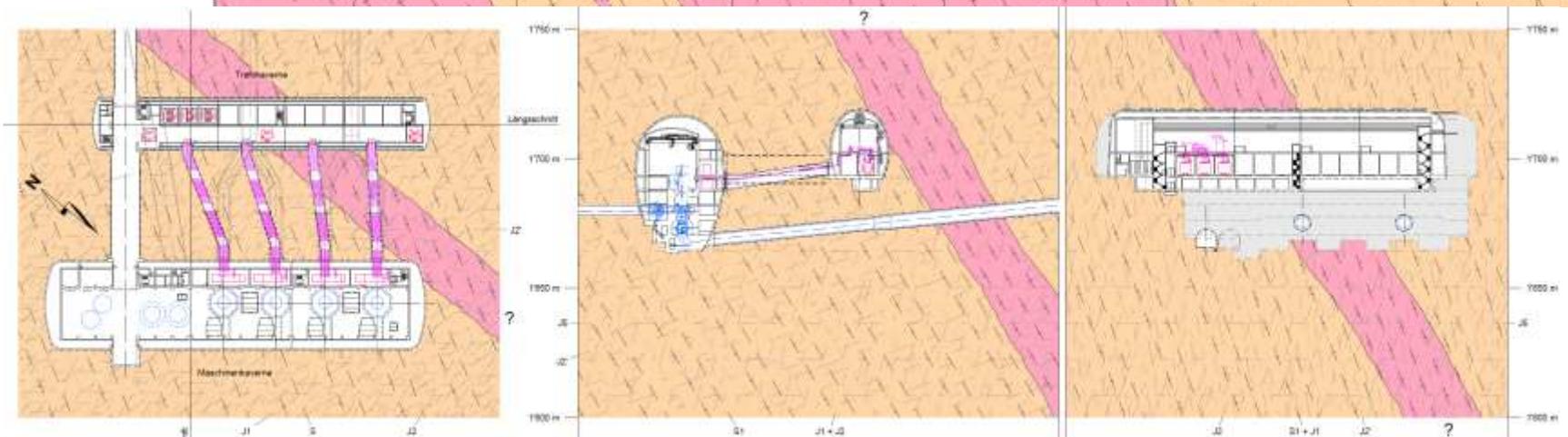
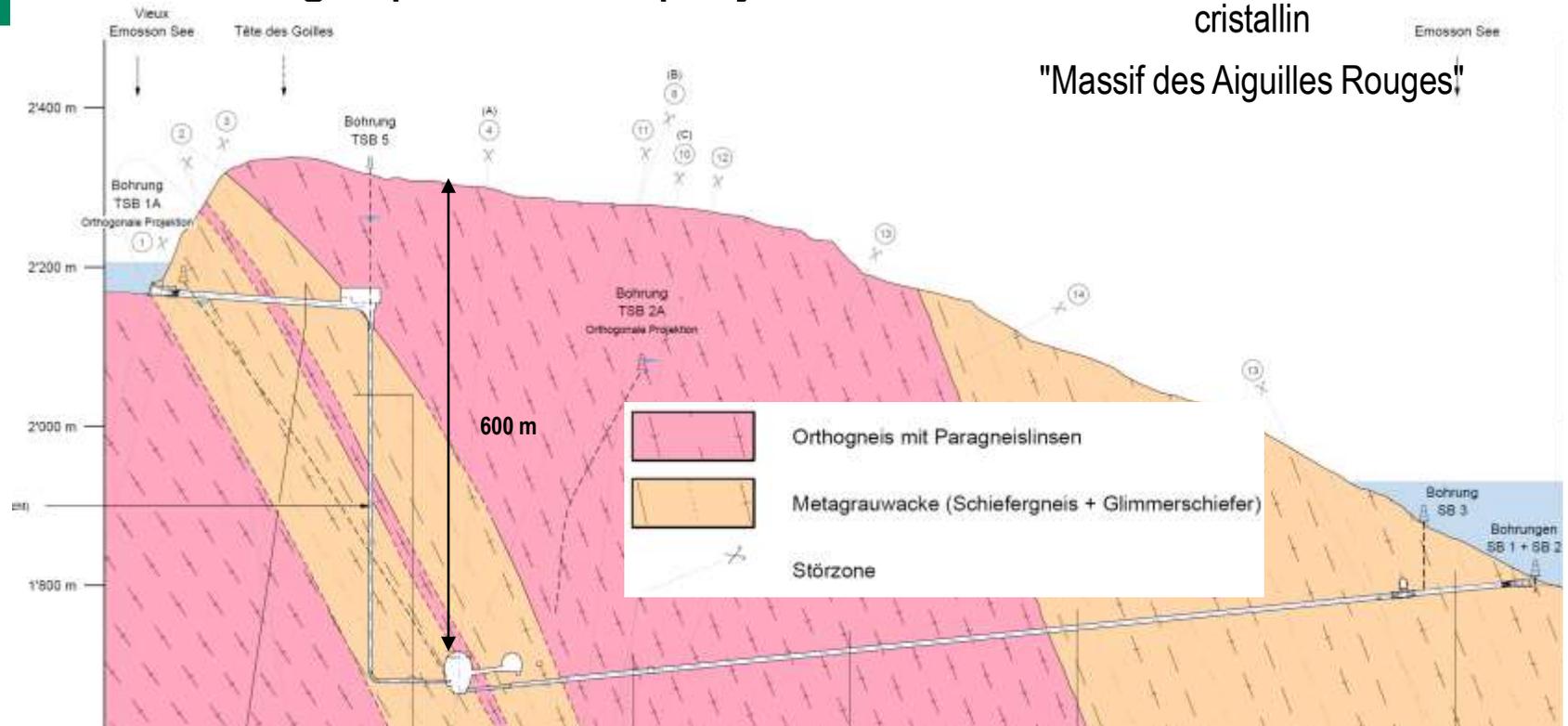
194.25 m



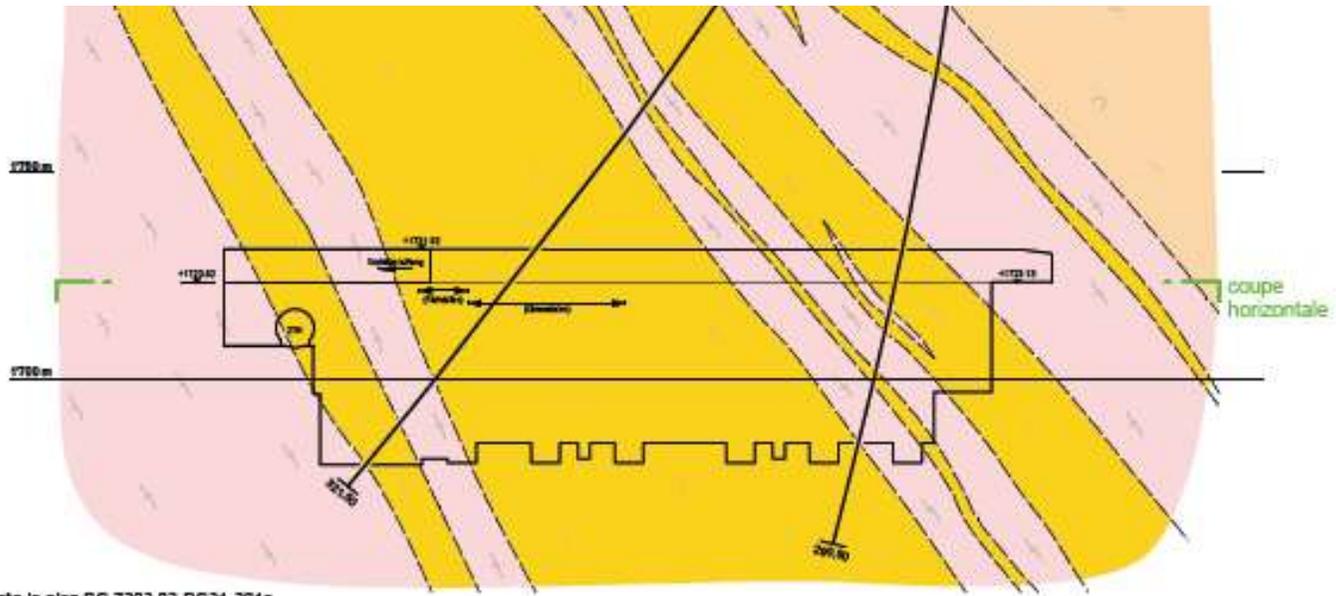
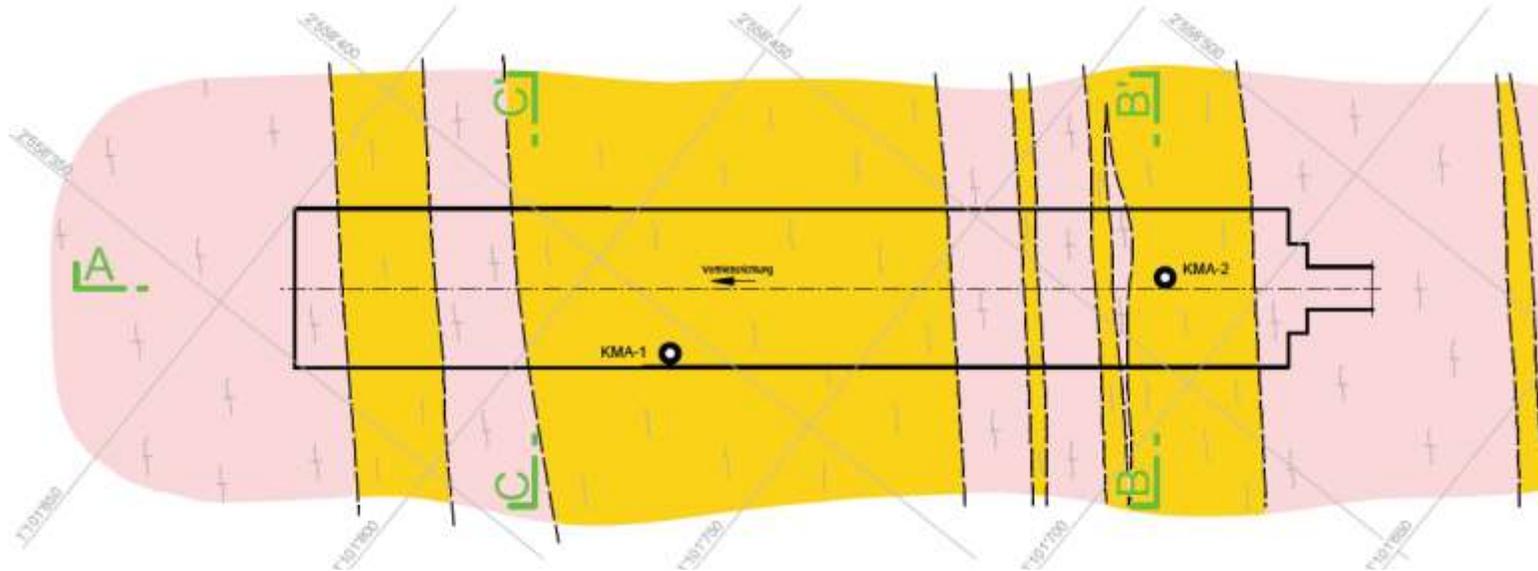
# Géologie prévue au projet

Gneis, micaschistes et méta-grauwacke du socle cristallin

"Massif des Aiguilles Rouges"



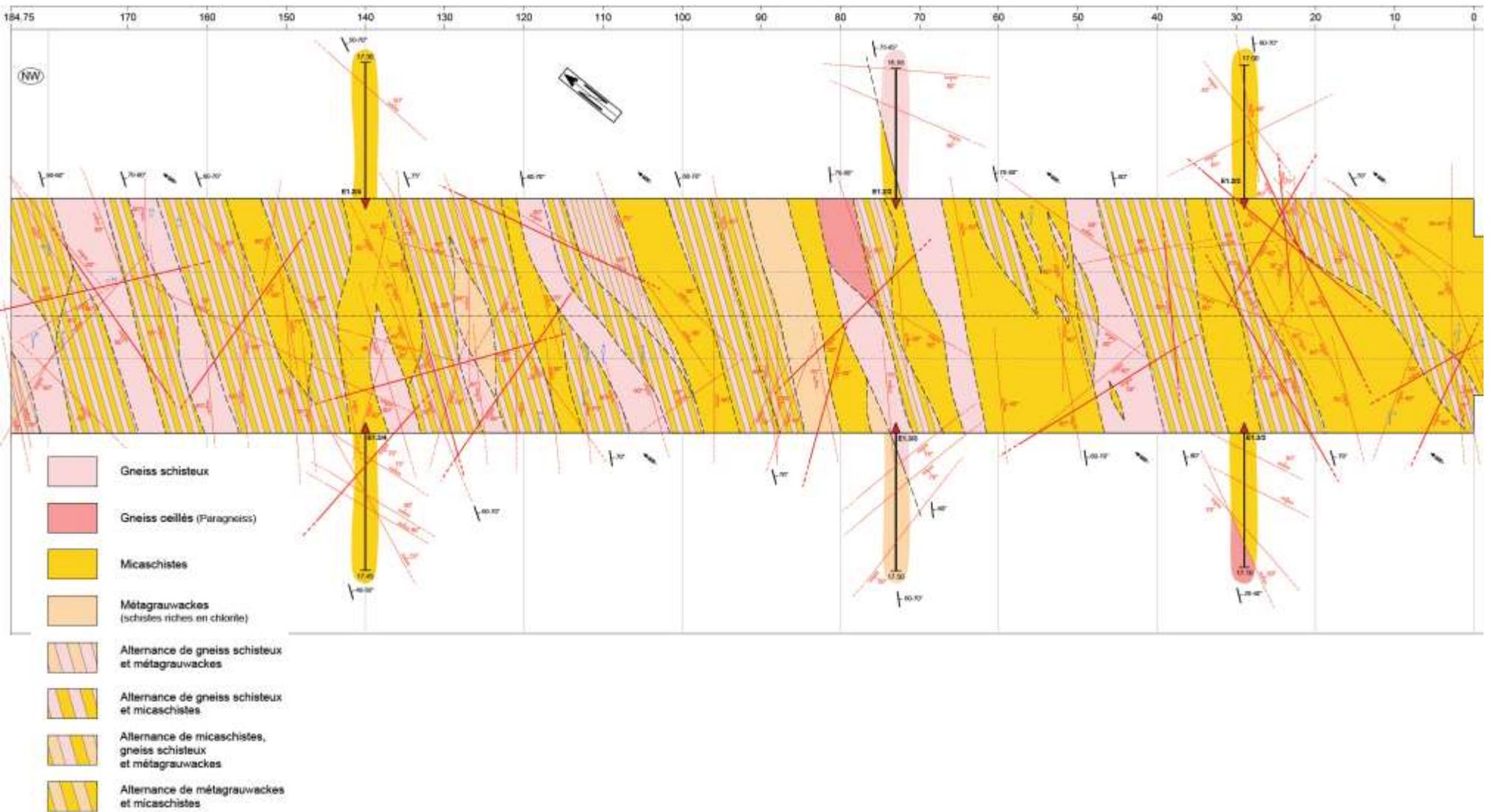
# Géologie prévue pendant excavation galerie d'accès



**LEGENDE**

- Forage
- ROCHE EN PLACE**
- MADIF DES AIGUILLES ROUGES**
- Gneiss ocellés
- Gneiss
- Micaschistes
- Schistes riches en chlorite (infégrévables)

# Géologie relevée à l'exécution de la calotte (première étape, A1)



# Mécanique des roches

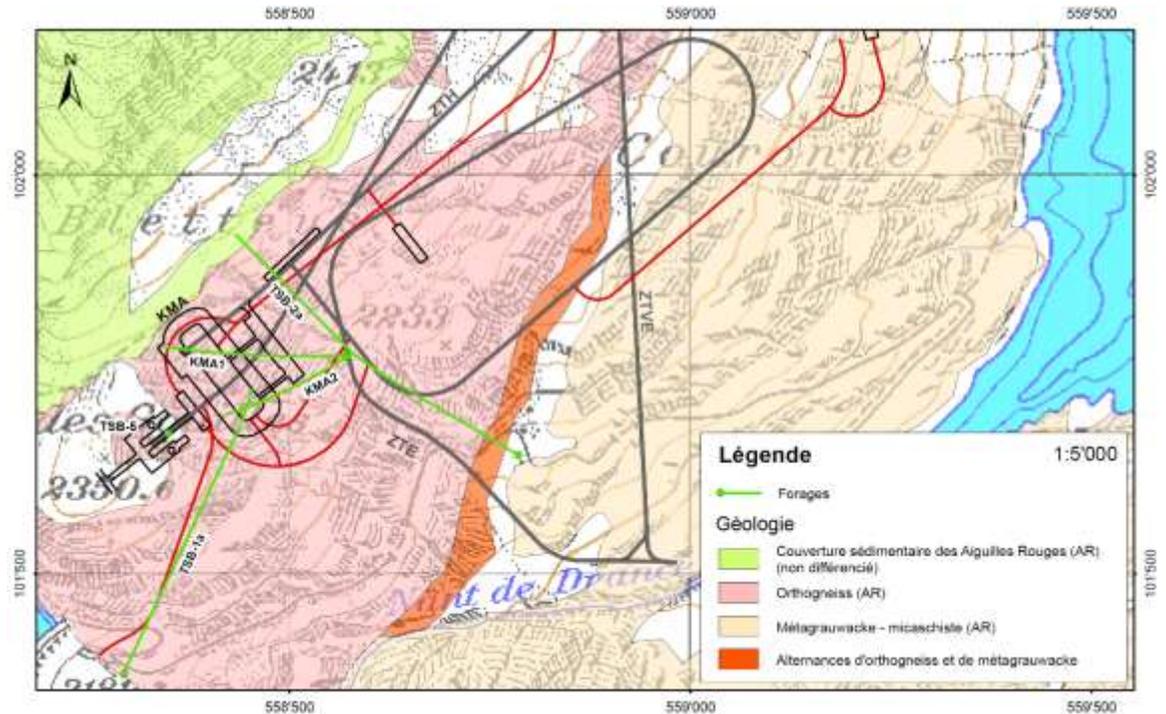
**Reconnaisances:** 5 sondages carottés jusqu'à 660 m de profondeur

Dilatomètre en forage

Hydrofracturation  
(détermination du champ de contraintes en place)

100 essais de laboratoire de mécanique de roches:

- Compression simple et triaxiale
- Traction indirecte (essai brésilien)
- Cisaillement direct



# Mécanique des roches

Diaclase au contact entre gneis et méta-grauwacke avec remplissage de kikirite



Carottes de micaschistes provenant du secteur de la caverne



Micaschistes au front

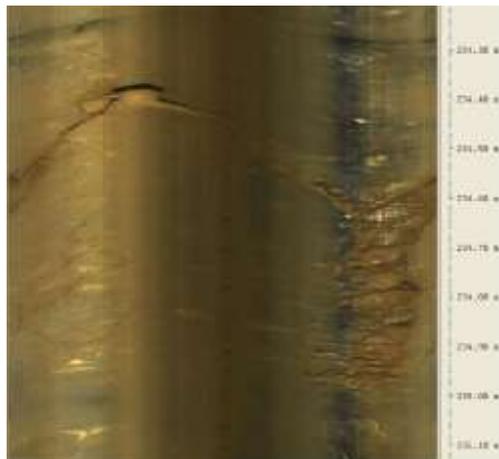


Image d'une fracture au BHTV, avec remplissage argilo-limoneux



# Mécanique des roches: caractéristiques du massif



- Qualité: bonne à très bonne
- GSI : 75-90
- $f_c$  : 62 MPa
- $f_t$  : 10 MPa
- E : 26 GPa
- Contraintes en place : 12-17 MPa
- Excellente concordance entre état en carottes et sur site



# Mécanique des roches

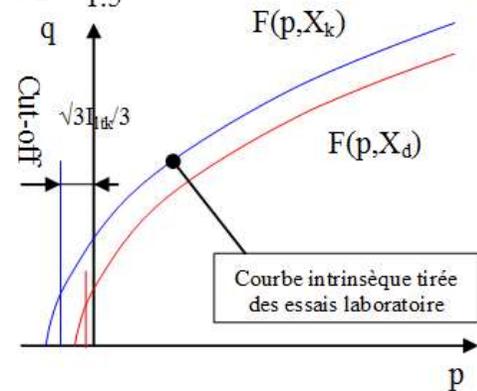
Comportement anisotrope: 2 lois constitutives différentes

Matrice de rocher intacte  
Hoek-Brown

Matrice:

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{1.35}, f_{td} = \frac{f_{tk}}{1.35}, I_{ltd} = \frac{I_{ltk}}{1.35}$$

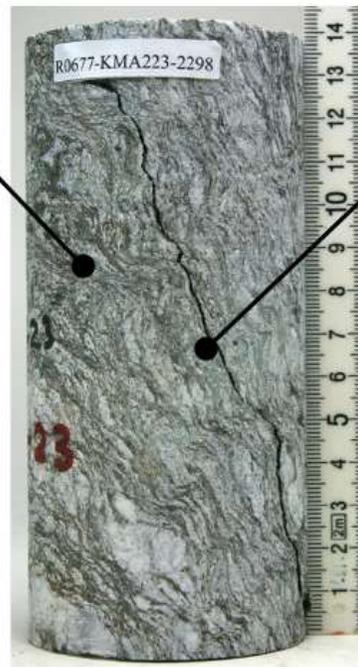
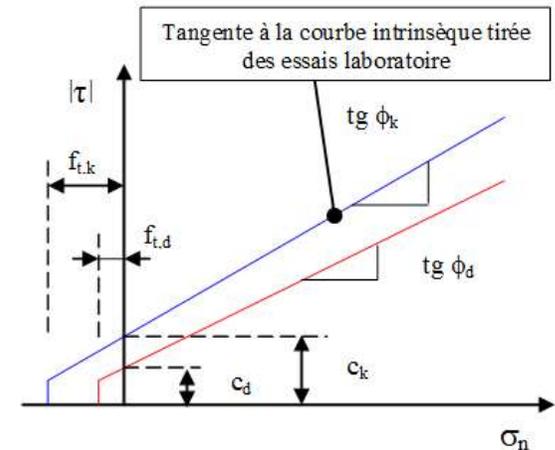
$$E_d = \frac{E_k}{1.5} \text{ (prise en compte de l'effet d'échelle)}$$



Plans de schistosité  
Mohr-Coulomb

Joints:

$$tg\phi_d = \frac{tg\phi_k}{1.2}, c_d = \frac{c_k}{1.5}, f_{td} = \frac{f_{tk}}{1.35}$$



# Mécanique des roches

## Détermination des valeurs $X_k$ sur la base des essais de laboratoire

| Ergebnisse der einachsigen Prüfungen (42 Proben) |                                    | $f_c$                |             | $f_t$                |             | $E_{(50\%)}$         | $\psi_k$ | $\nu$ | $\gamma$             |
|--|------------------------------------|----------------------|-------------|----------------------|-------------|----------------------|----------|-------|----------------------|
|  |                                    | [MN/m <sup>2</sup> ] |             | [MN/m <sup>2</sup> ] |             |                      |          |       |                      |
|  |                                    | Matrix               | Schieferung | Matrix               | Schieferung | [MN/m <sup>2</sup> ] | [°]      | -     | [kN/m <sup>2</sup> ] |
| $X_m$  | Mittelwert                         | 62.4                 | 36.3        | 9.7                  | 5.6         | 25'800               | 20       | 0.13  | 27.9                 |
| $X_k$  | Kennwert                           | 28.2                 | 16.6        | 7.1                  | 2.1         | 17'000               | 20       | 0.13  | 27.9                 |
| $C_v$  | Variations-Koeffizient ( $s/X_m$ ) | 0.29                 | 0.51        | 0.20                 | 0.52        | 0.28                 | 0.05     | 0.41  | 0.02                 |

| Résultats des essais triaxiaux (8) |                                      | $c$                  |          | $\phi$ [°] |          | $E_{(50\%)}$         | $e_{rés}$ |
|------------------------------------|--------------------------------------|----------------------|----------|------------|----------|----------------------|-----------|
|                                    |                                      | [MN/m <sup>2</sup> ] |          | [°]        |          |                      |           |
|                                    |                                      | pic                  | résiduel | pic        | résiduel | [MN/m <sup>2</sup> ] | [%]       |
| $X_m$                              | Valeurs moyennes                     | 10,8                 | 5,2      | 36         | 29       | 20 000               | 0,56      |
| $X_k$                              | Valeurs caractéristiques             |                      | 3,3      |            | 26       | 16 000               | 0,45      |
| $C_v$                              | Coefficient de variation ( $s/X_m$ ) |                      | 0,30     |            | 0,09     | 0,22                 | 0,13      |

$f_c$ : einachsige Druckfestigkeit

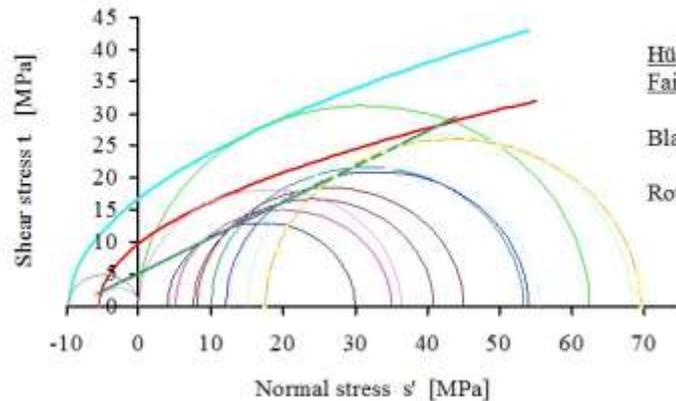
$f_t$ : Zugfestigkeit

$\gamma$ : Einheitsgewicht

$\psi_k$ : Dilatanz-Winkel

E: Deformationsmodul

$\nu$ : Poisson Modul

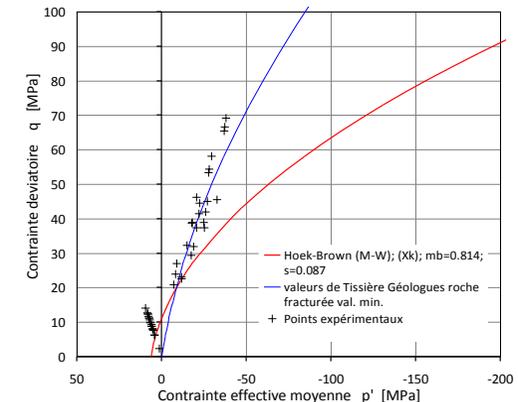
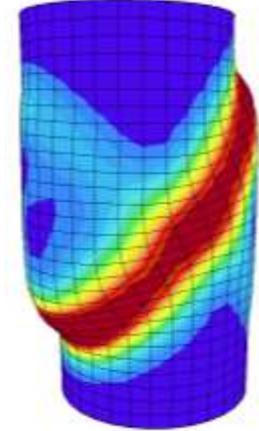


Hüllkurve der Gebirgsfestigkeit nach Fairhurst Gleichung

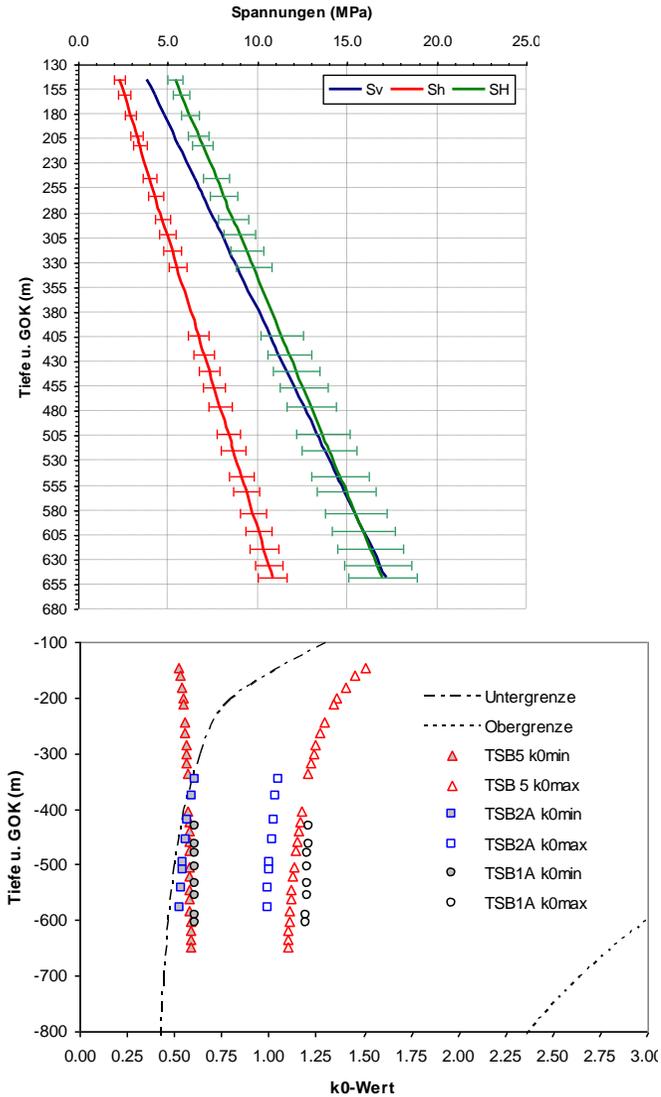
Blaue Linie: Gesteinsmatrix

Rote Linie: entlang Schieferung

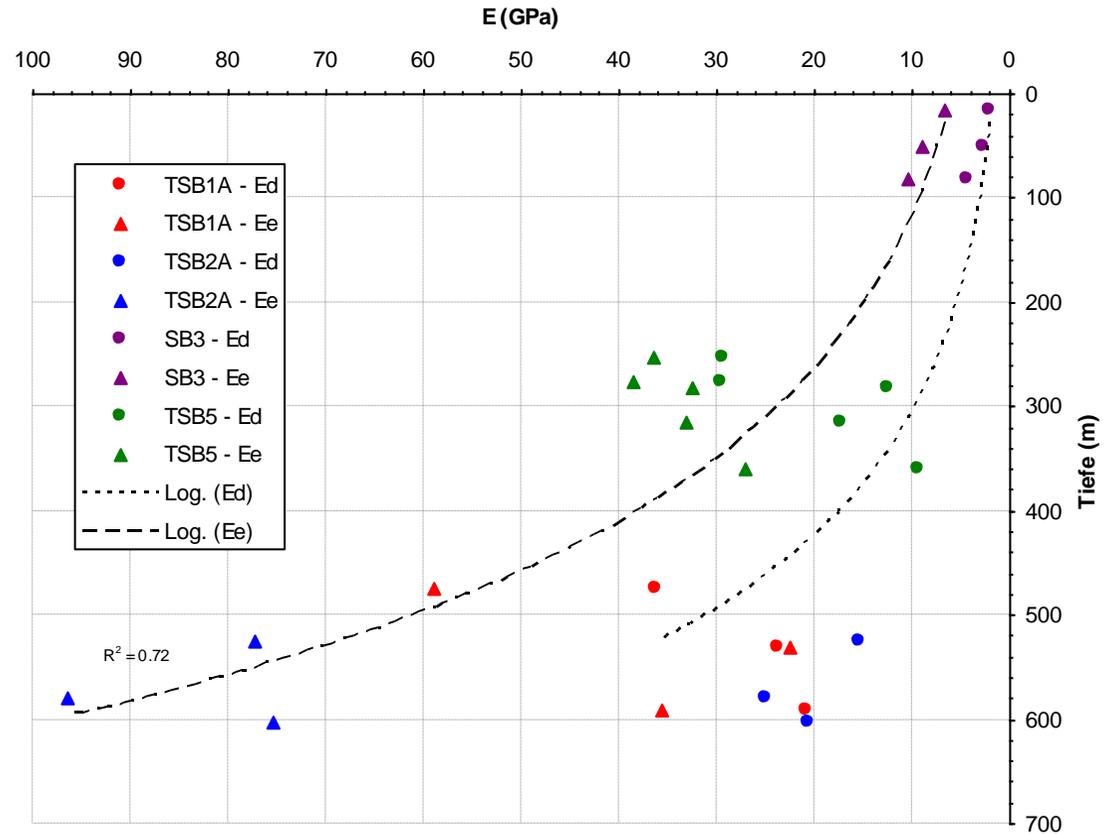
Gerade grüne Linie: Restwerte von Triaxialversuchen



# Mécanique des roches



Contraintes in situ déterminées par hydrofracturation



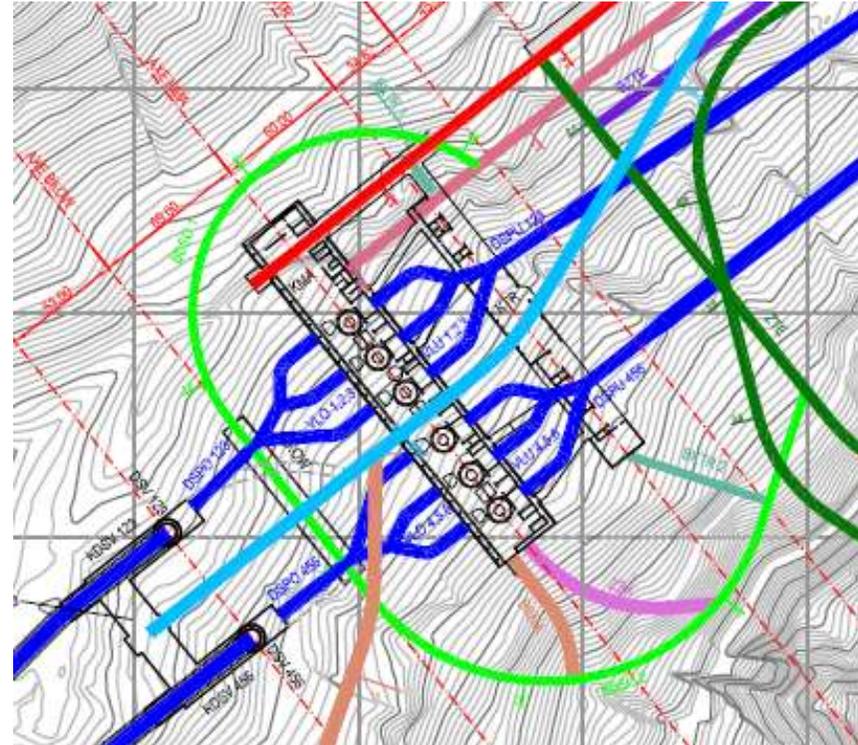
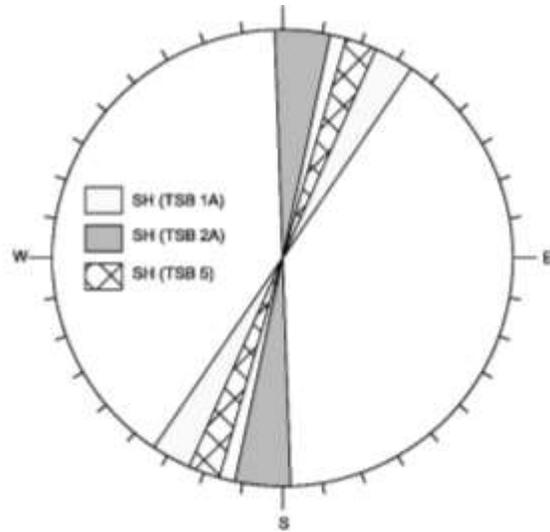
Variations des modules de déformation  $E_d$  (chargement) et élastique  $E_e$  (déchargement) mesurés au dilatomètre en fonction de la profondeur dans le gneiss

# Mécanique des roches

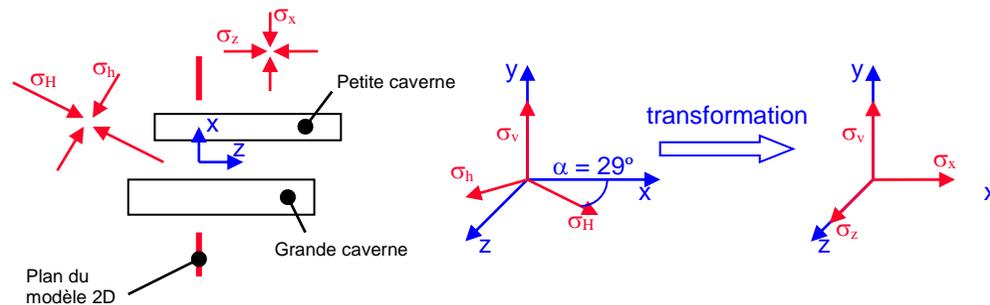
$\sigma_H = 15-18 \text{ Mpa}$

$\sigma_V = 15-16 \text{ MPa}$

$\sigma_h = 9-10 \text{ MPa}$



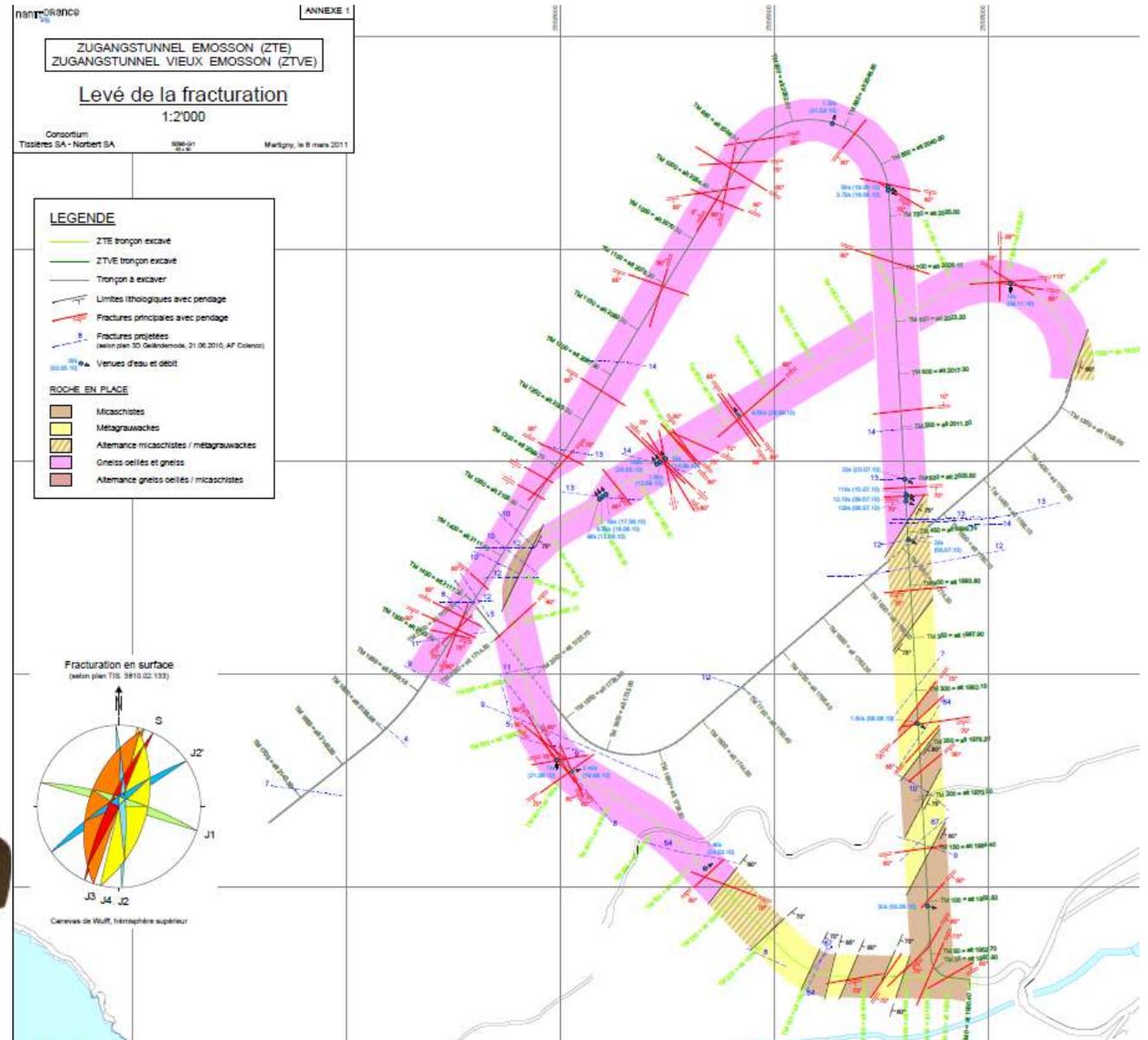
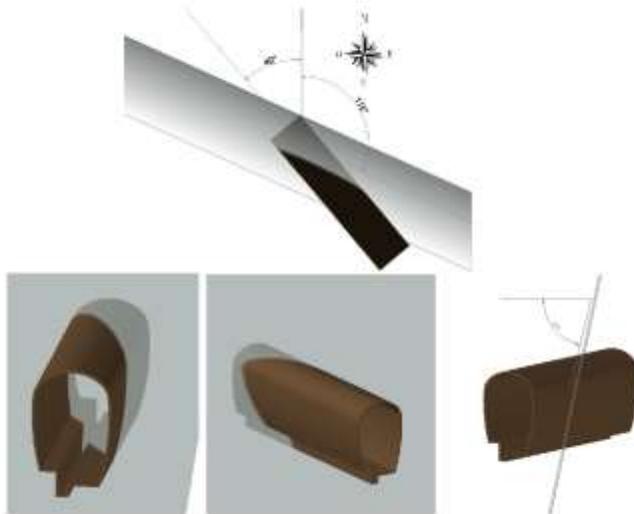
Orientation des cavernes de manière favorable par rapport à la direction de la contrainte principale (horizontale) in situ déterminée par hydrofracturation



# Mécanique des roches

Orientation des cavernes de manière favorable par rapport à la direction de la schistosité

Confirmation des orientations relevées en surface et en sondages par les relevés structurels des avancements



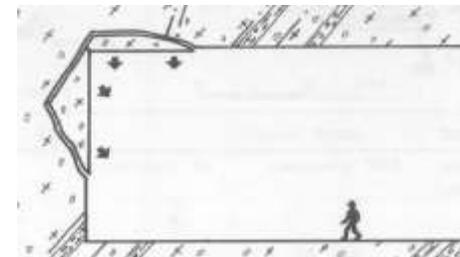
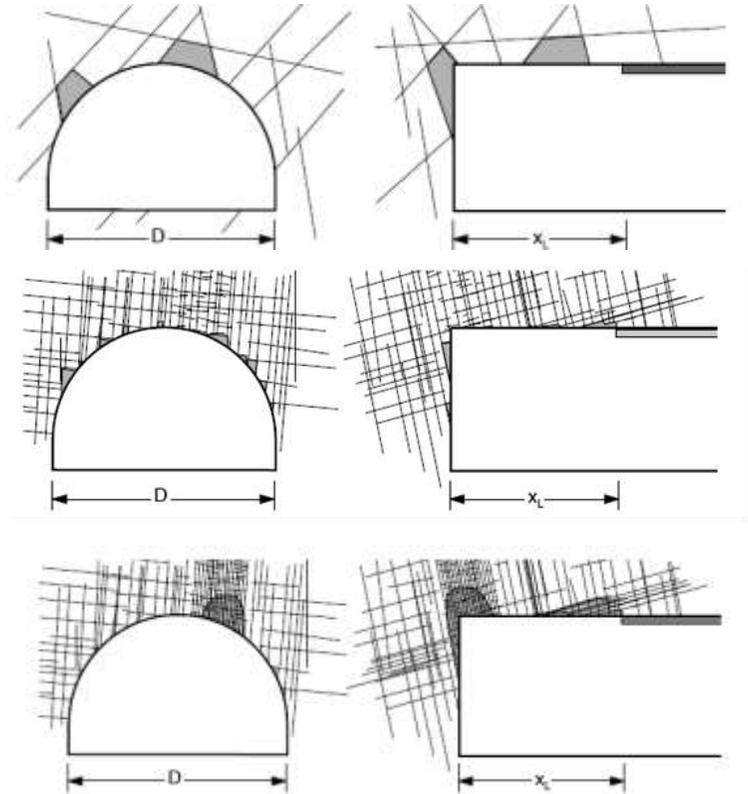
Détermination des situations de risque et des états limites

- Chute de blocs
- Effondrements en zone de faille
- Décompressions violentes
- Venues d'eau
- Déformations plastiques

Analyse à court et long terme de la stabilité d'ensemble

Analyse de la stabilité des dièdres

Dimensionnement du soutènement et du revêtement



- Modèle du massif: géotechnique
- Modèles de calcul: discontinu et continu
- Interaction sol-structure: lois constitutives
- Justification de la capacité porteuse
- Bases pour la surveillance et le contrôle pendant les travaux

# Dimensionnement du soutènement

Ancrages précontraints temporaires  $P_0 = 1660$  kN pour support de la voûte et du pont roulant de chantier.

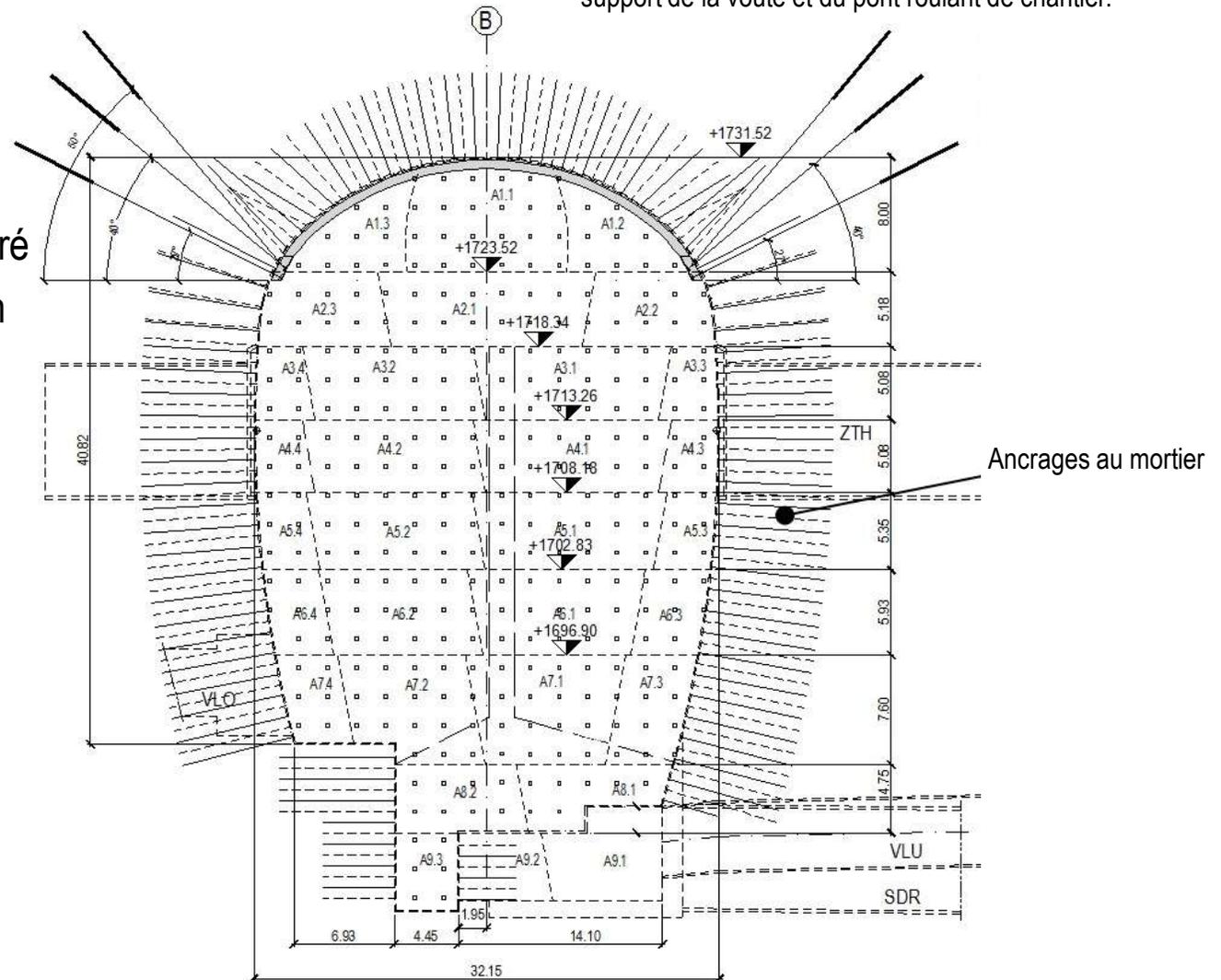
## Soutènement:

1ere couche 10 cm béton projeté fibré  
ancrages au mortier  $\varnothing 32$  de 6 – 8 m

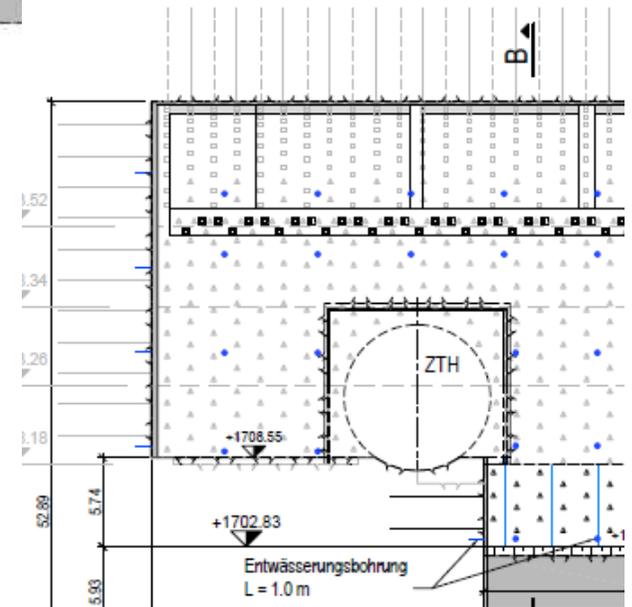
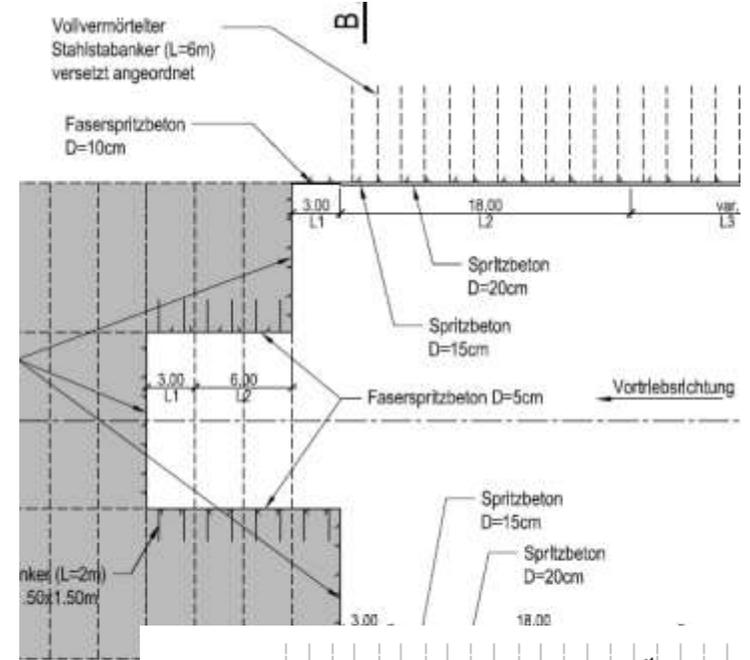
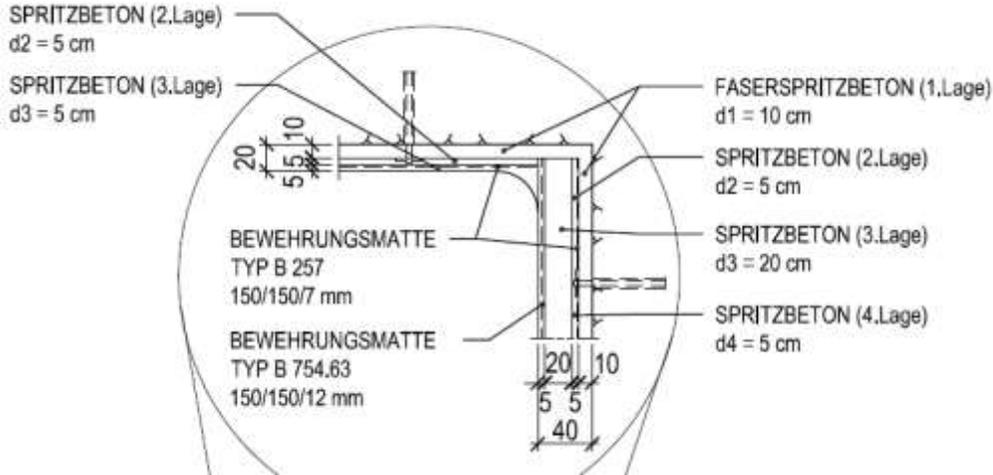
2e couche 10 cm de béton projeté  
armé d'un treillis.

## Revêtement:

60 cm de béton armé.



# Dimensionnement du soutènement

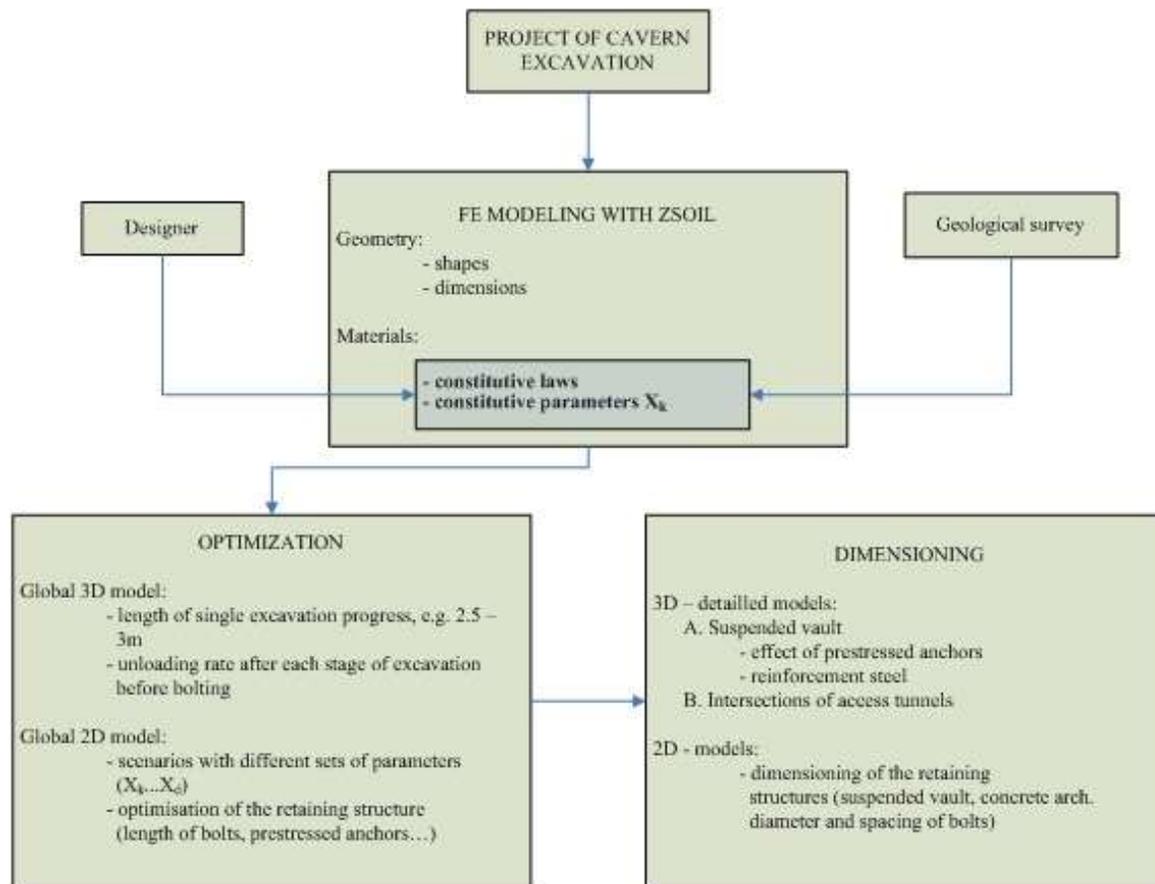




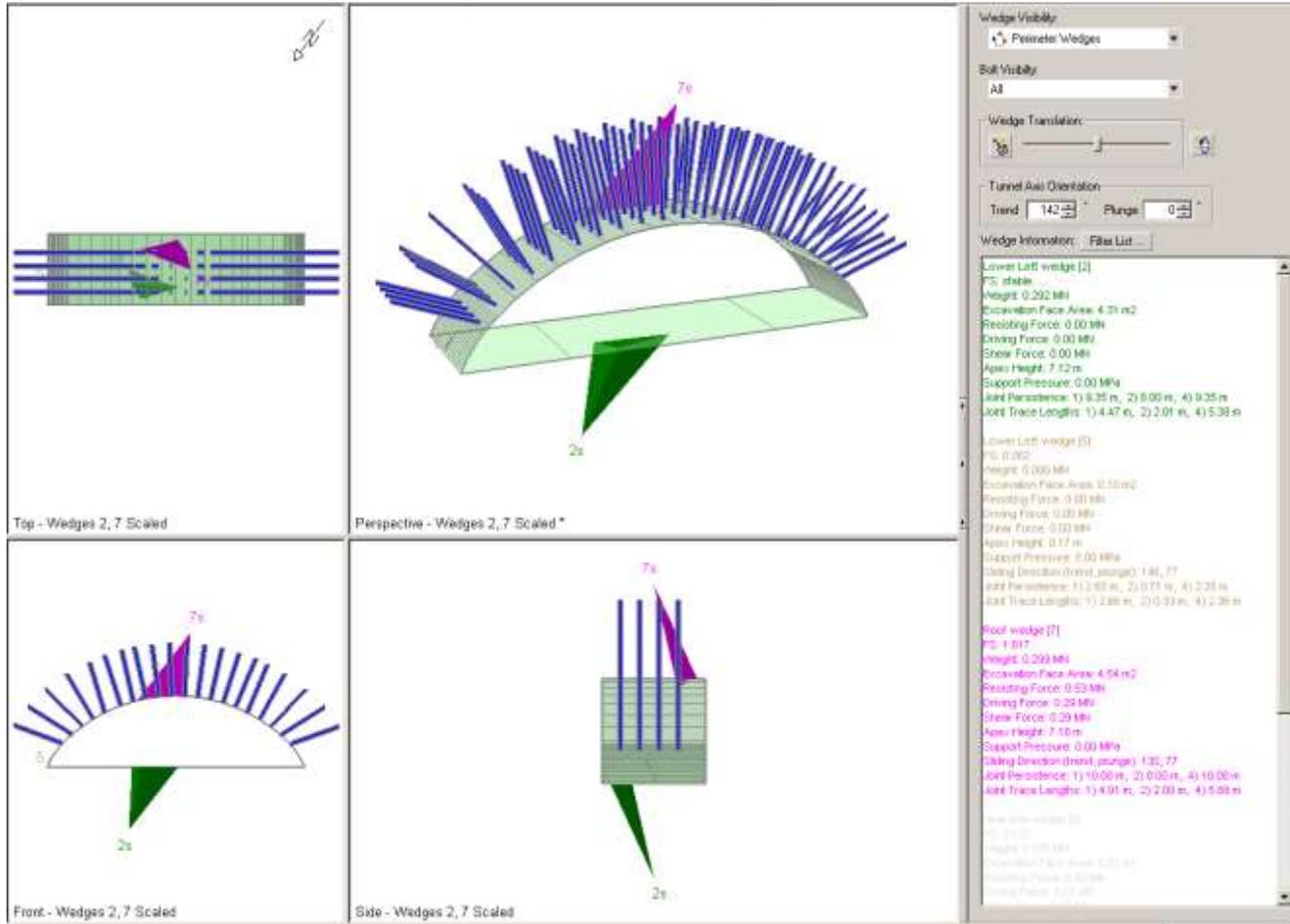
# Modèles de calcul

## Situations de risque déterminantes:

- Dièdres: modèle de blocs
- "poussée" du massif, déformations plastiques: modèle de milieu continu



# Modèles de calcul: modèle de blocs



| Résultats des essais de cisaillement direct sur joints (14) |                          | c   |          | φ [°] |
|---|--------------------------|-----|----------|-------|
|   |                          | pic | résiduel |       |
| Xm  | Valeurs moyennes         | 179 | 0,26     | 25    |
| Xk  | Valeurs caractéristiques | 130 | 0        | 23    |

# Modèles de calcul: modèle de blocs



Adaptation du schéma de boulonnage aux fractures relevées en travaux



## Représentation des familles de fractures

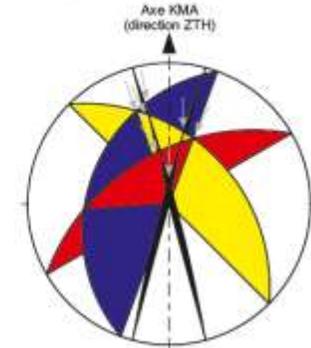
Diagramme de Wulff, hémisphère supérieur et croquis des fractures relevées et supposées (Selon visites et relevés géologiques du 21.10.13, 12.11.13, 10.12.13 et 20.2.14)

Azimut et pendage des fractures (relatif à l'axe KMA, direction ZTH)

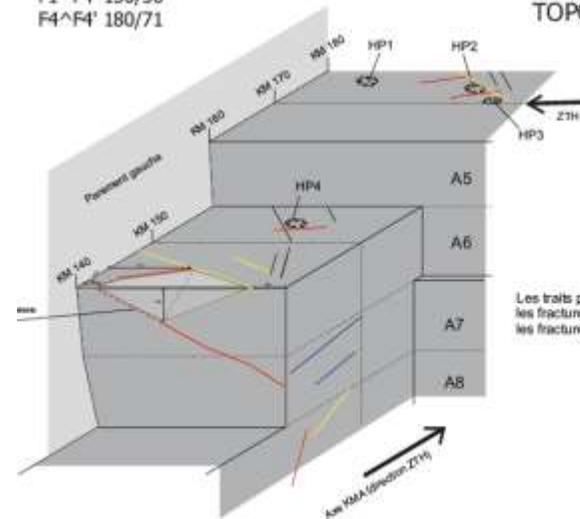
- F1: 150/50 → Séparable à la scabotière
- F2: 110/30
- F3: 225/40
- F4: 255/85, F4': 105/85

Dièdres potentiels :

- F1^F3 200/37
- F2^F4 167/18
- F3^F4 167/24
- F2^F3 161/20
- F3^F4' 191/35
- F1^F4' 150/50
- F4^F4' 180/71



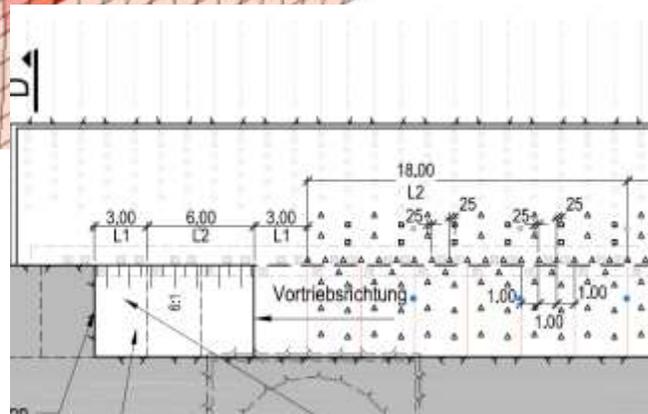
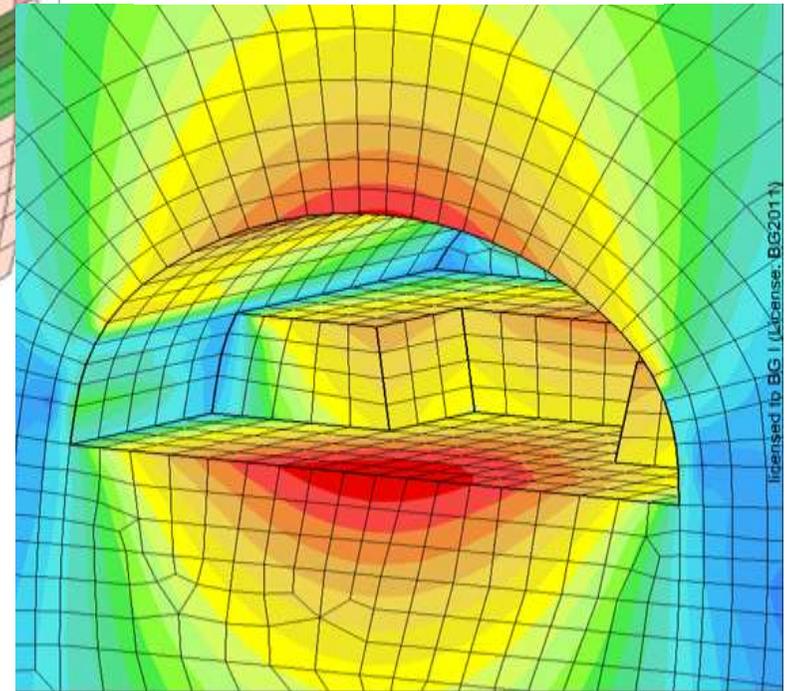
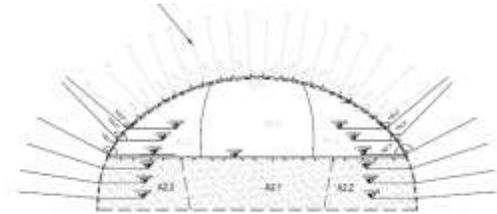
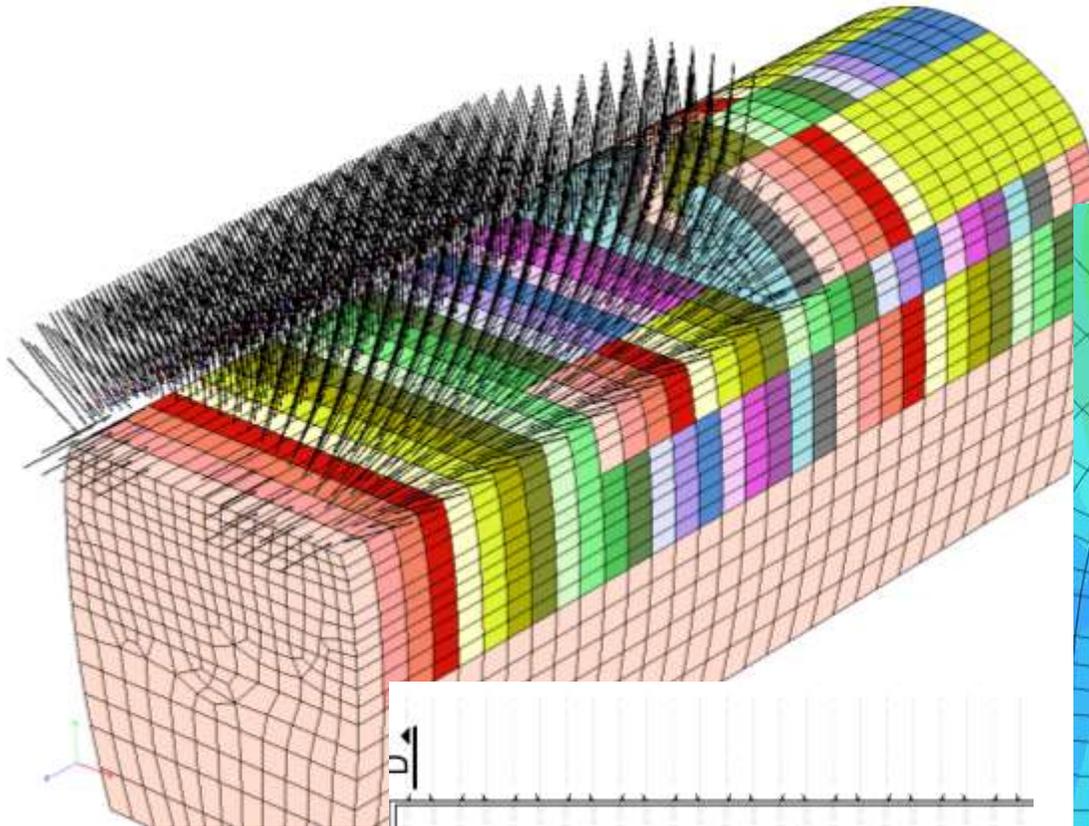
TOPO  
Diagramme de Wulff, hémisphère supérieur



Les traits pleins représentent les fractures relevées et les traitillés, les fractures supposées.

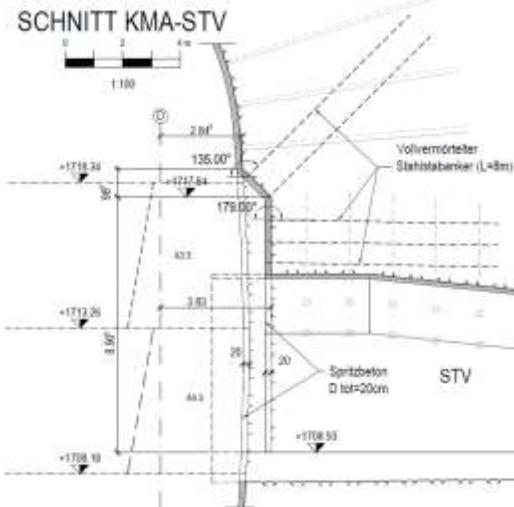
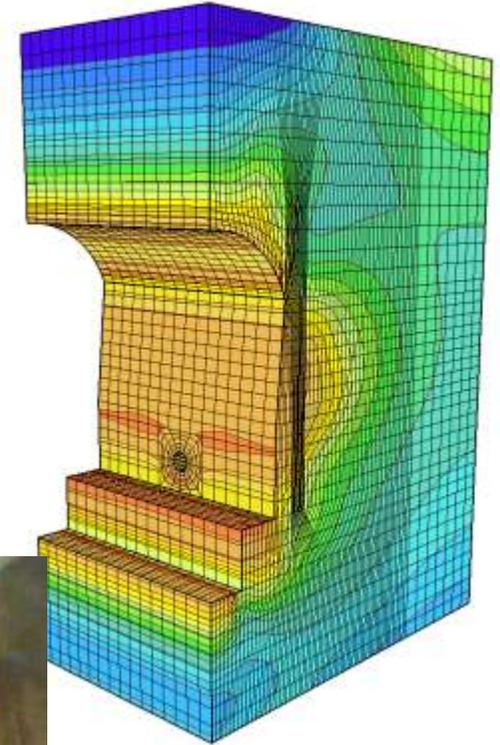
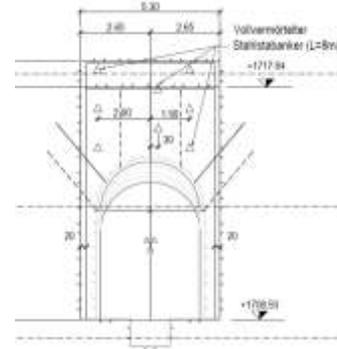
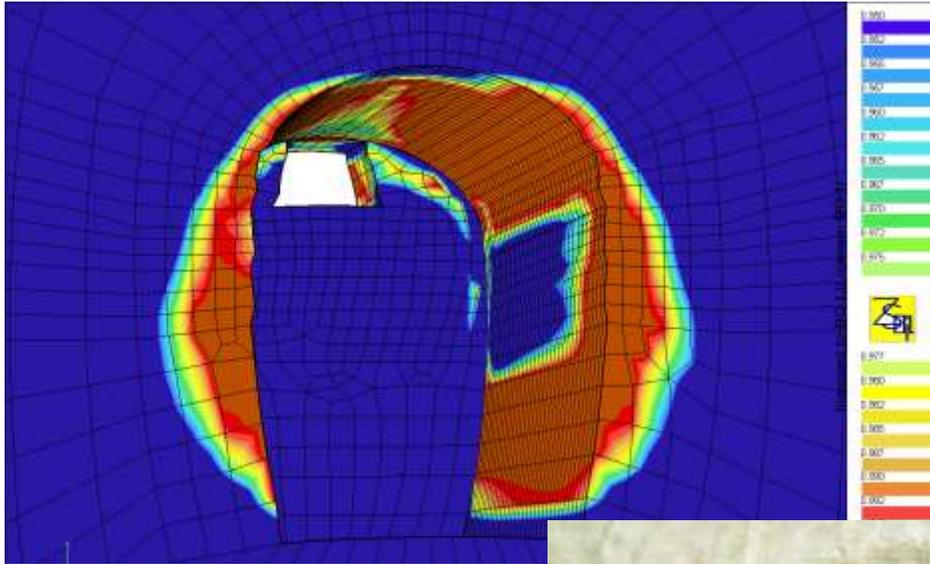
# Modèles de calcul: éléments finis

Modèle 3-D: effets des étapes d'excavation et des sections partielles



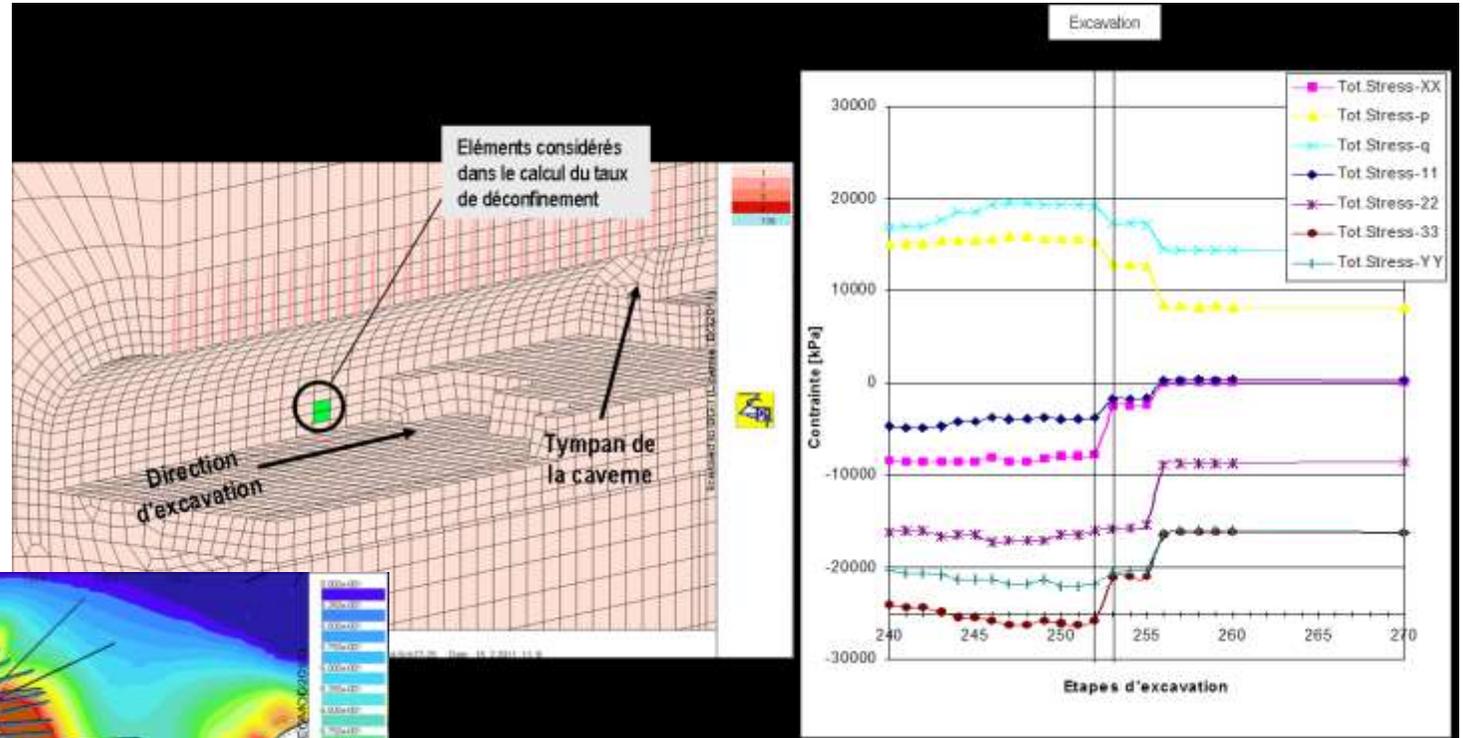
# Modèles de calcul: éléments finis

Modèle 3D: effet des intersections



# Modèles de calcul: éléments finis

Détermination des lois de déconfinement du modèle 2D à partir du modèle 3D.

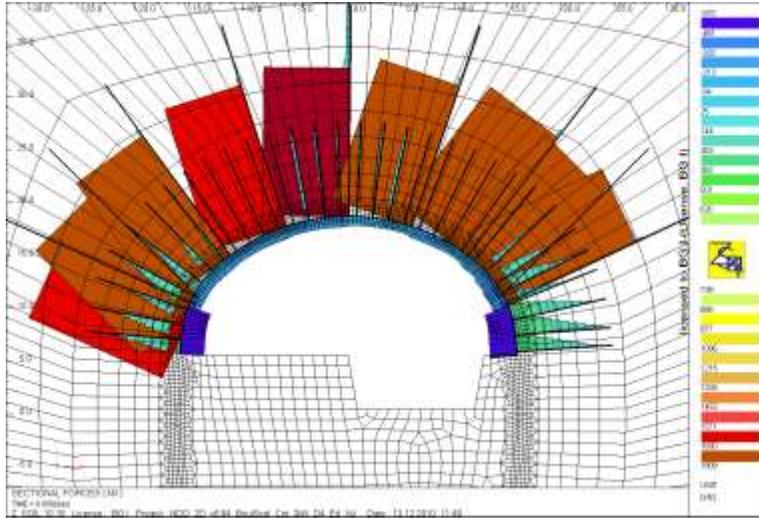


Analyses détaillées et optimisations sur modèles 2D.

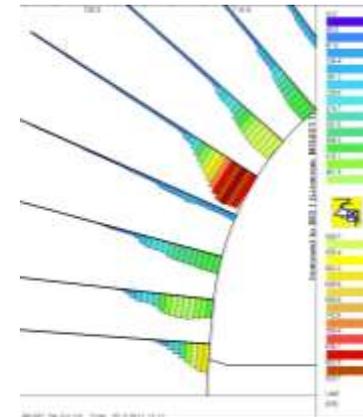
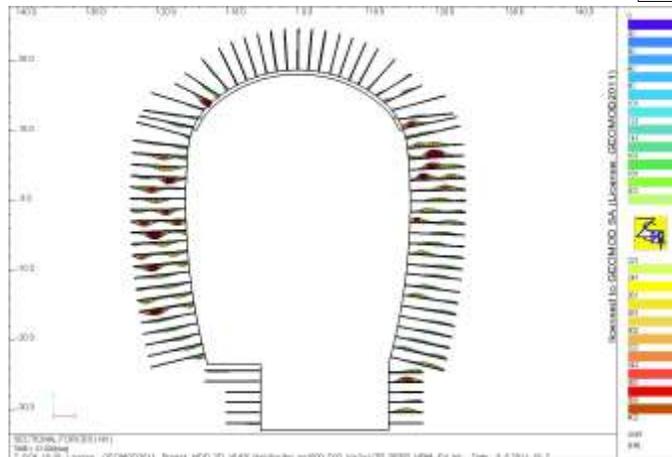
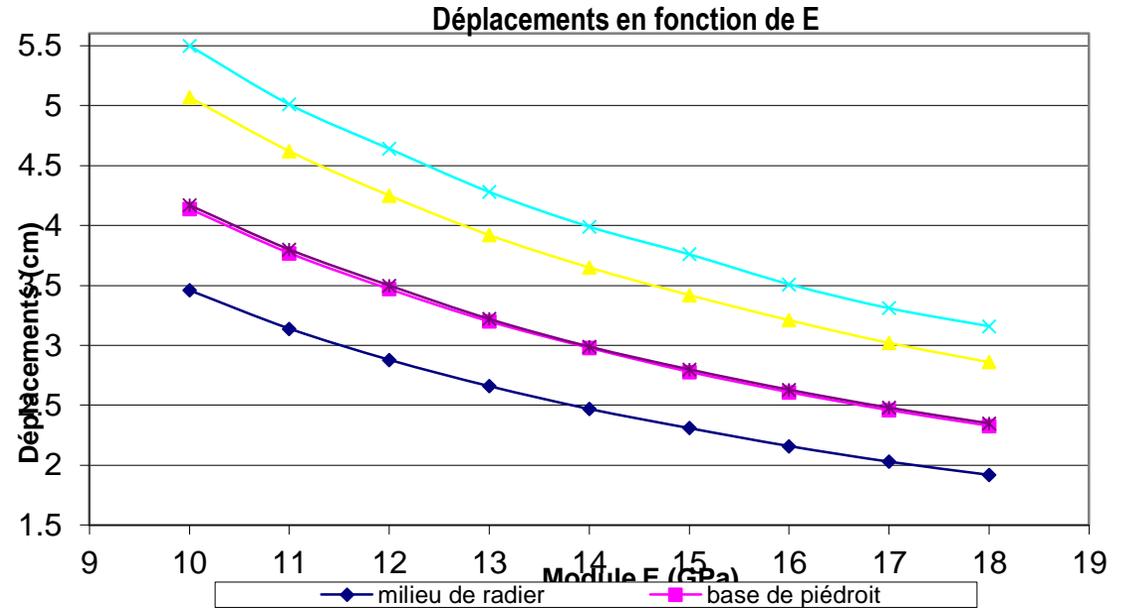
# Modèles de calcul: éléments finis

Optimisation du soutènement, études paramétriques

Variation du module d'élasticité du massif

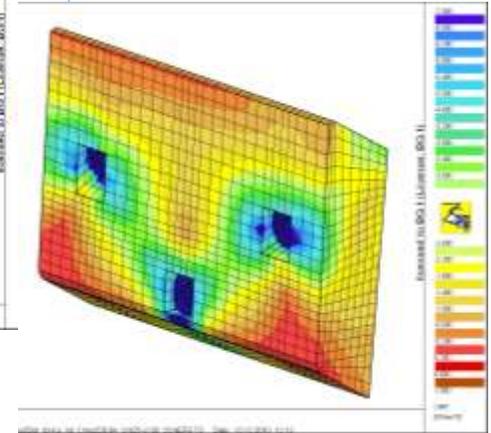
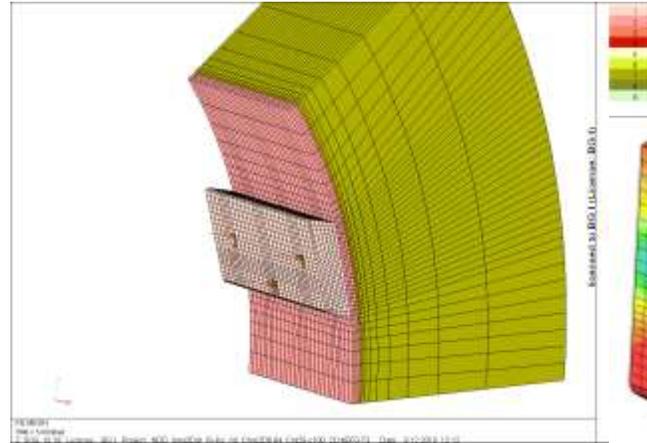
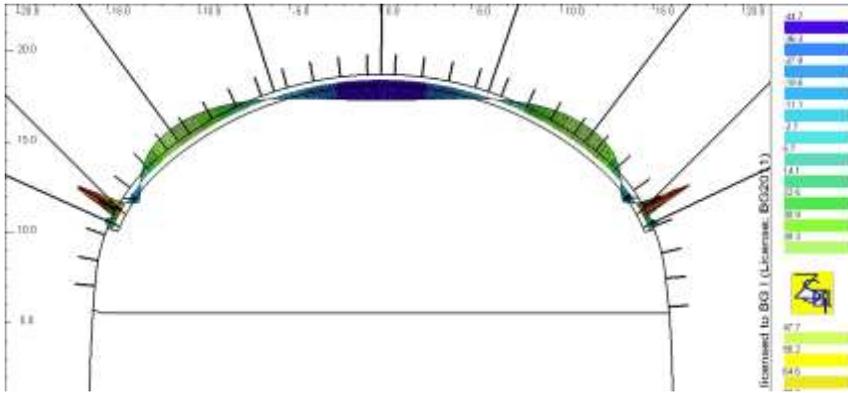


Longueur utile des ancrages



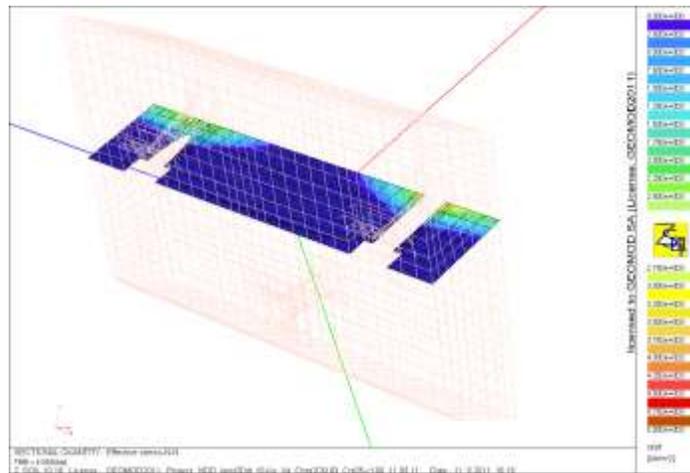
# Modèles de calcul: éléments finis

## Dimensionnement de la voûte suspendue



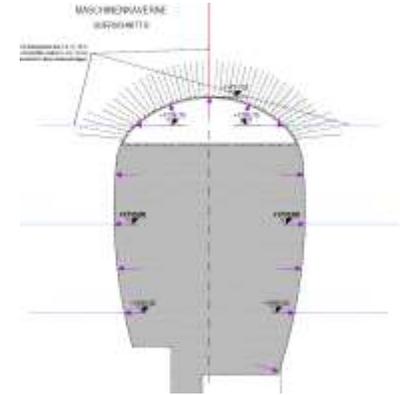
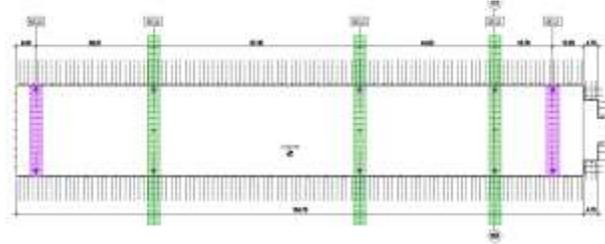
Moments de flexion en voûte

Poutre de support de la voûte



# Surveillance des déformations

- 5 profils de convergences optiques
- 3 profils avec 7 extensomètres
- 18 ancrages précontraints avec cellules de pression



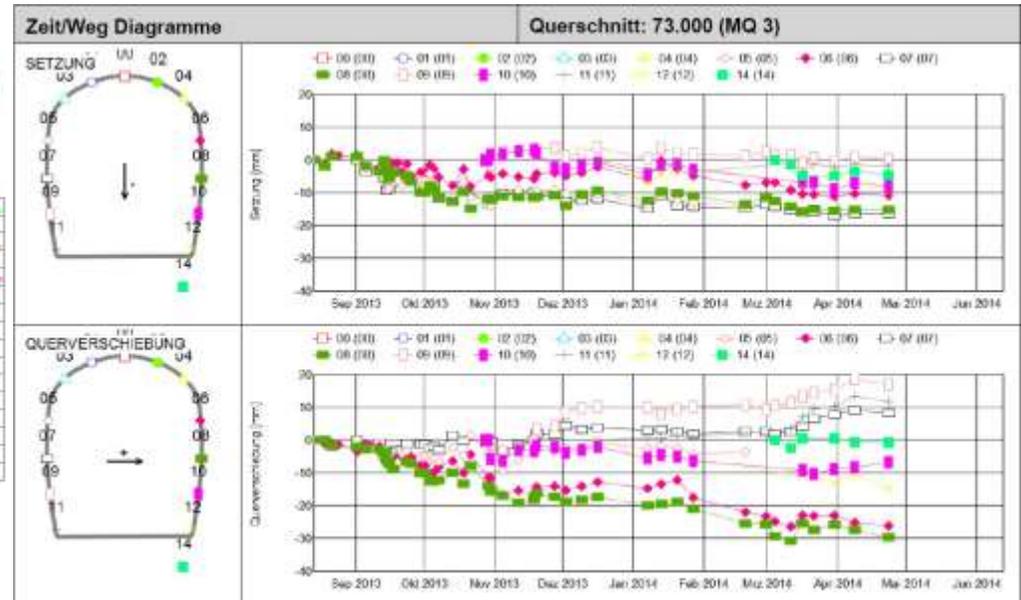
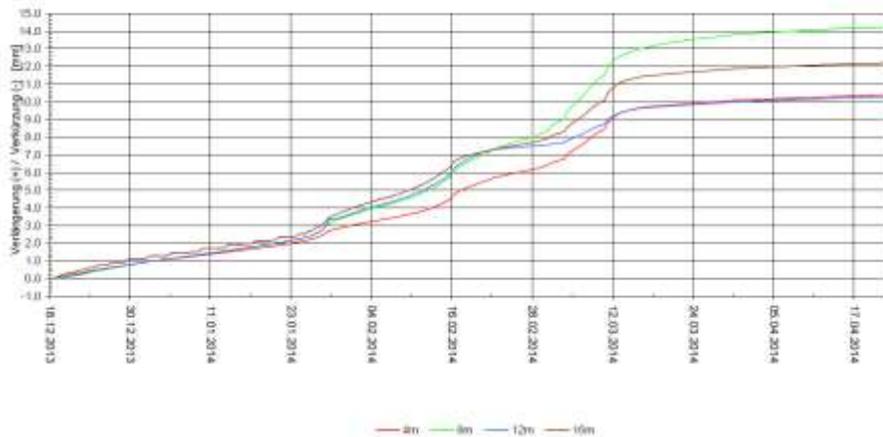
Nant de Drance SA  
Maschinenkaverne KMA 900MW

Extensometer MQ2 1695 E7.3/2 UW  
Gemäss Plan BG.3810.31.210

Periode: 1. 9. 2013 - 22. 4. 2014  
Installation und Nullmessung 18. Dezember 2013. Messintervall stündlich



Deformation der Strecke vom Anker bis Messkopf seit Nullmessung





# Surveillance des déformations



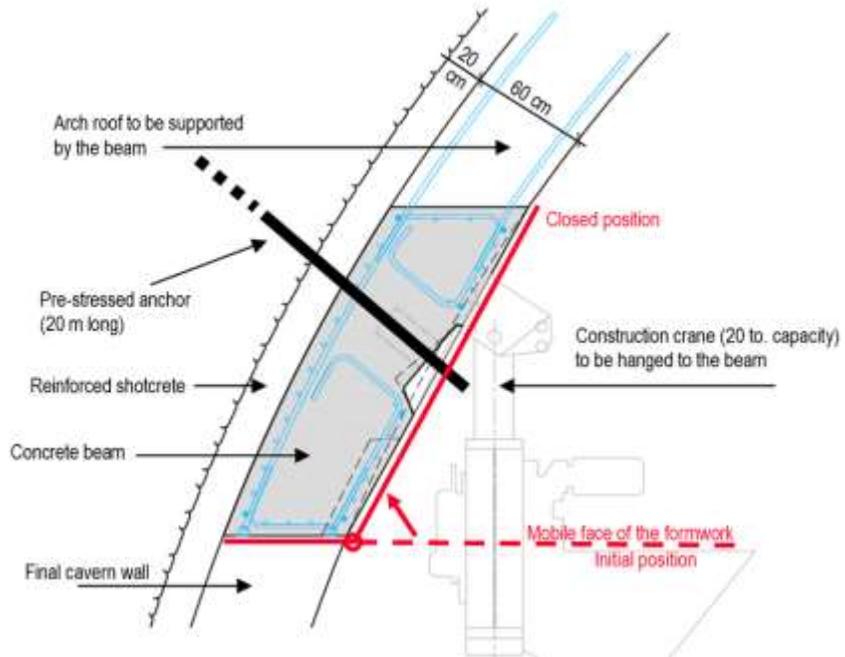
# Déroulement des travaux

Excavation du 2<sup>e</sup> étage avec sections partielles



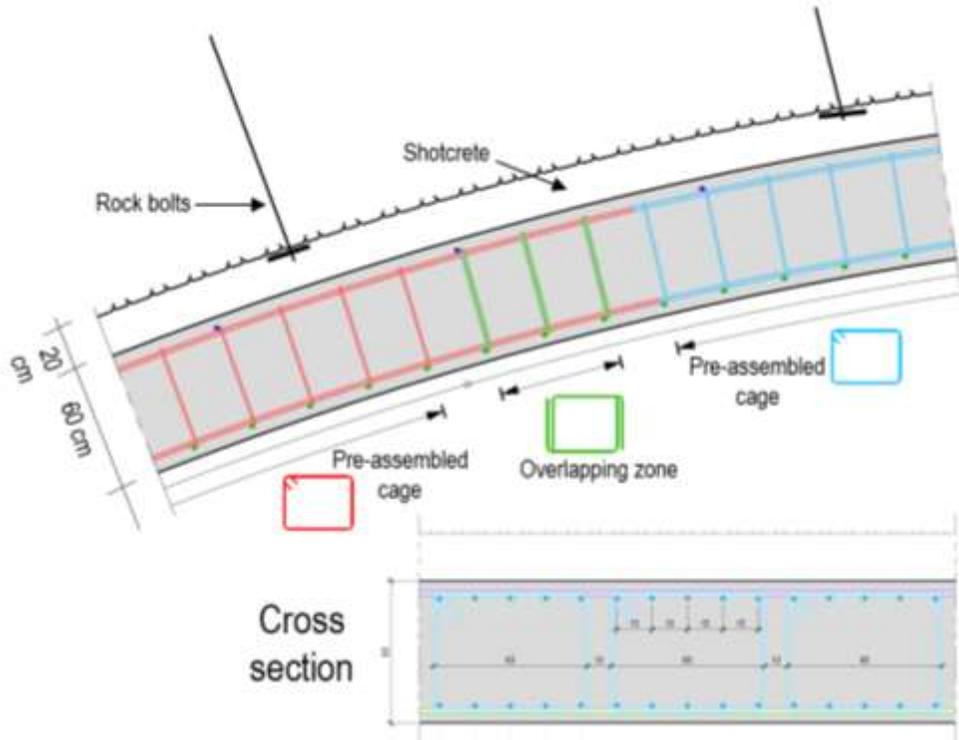
# Déroulement des travaux

Longrine de support de la voûte et du pont roulant de chantier





# Armatures de la voûte

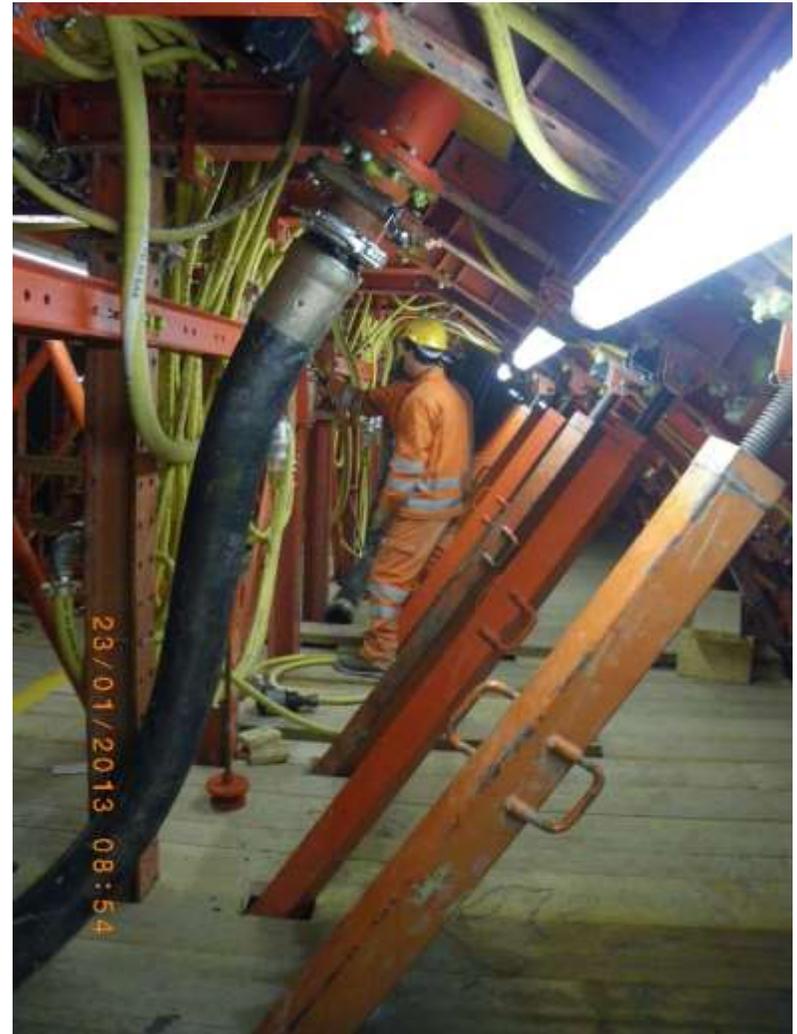




# Coffrage de la voûte



Vue d'ensemble



Tuyau de bétonnage à l'intérieur du coffrage



# Voûte et longrine après bétonnage



# Déroulement des travaux

Approfondissement simultanément au bétonnage



# Déroulement des travaux

Encore deux étapes d'excavation!



## Conclusion à la fin de l'excavation:

Investir dans l'intelligence rapporte!

Economies en soutènement:

6 fois les coûts des reconnaissances  
et des calculs d'ingénieur.



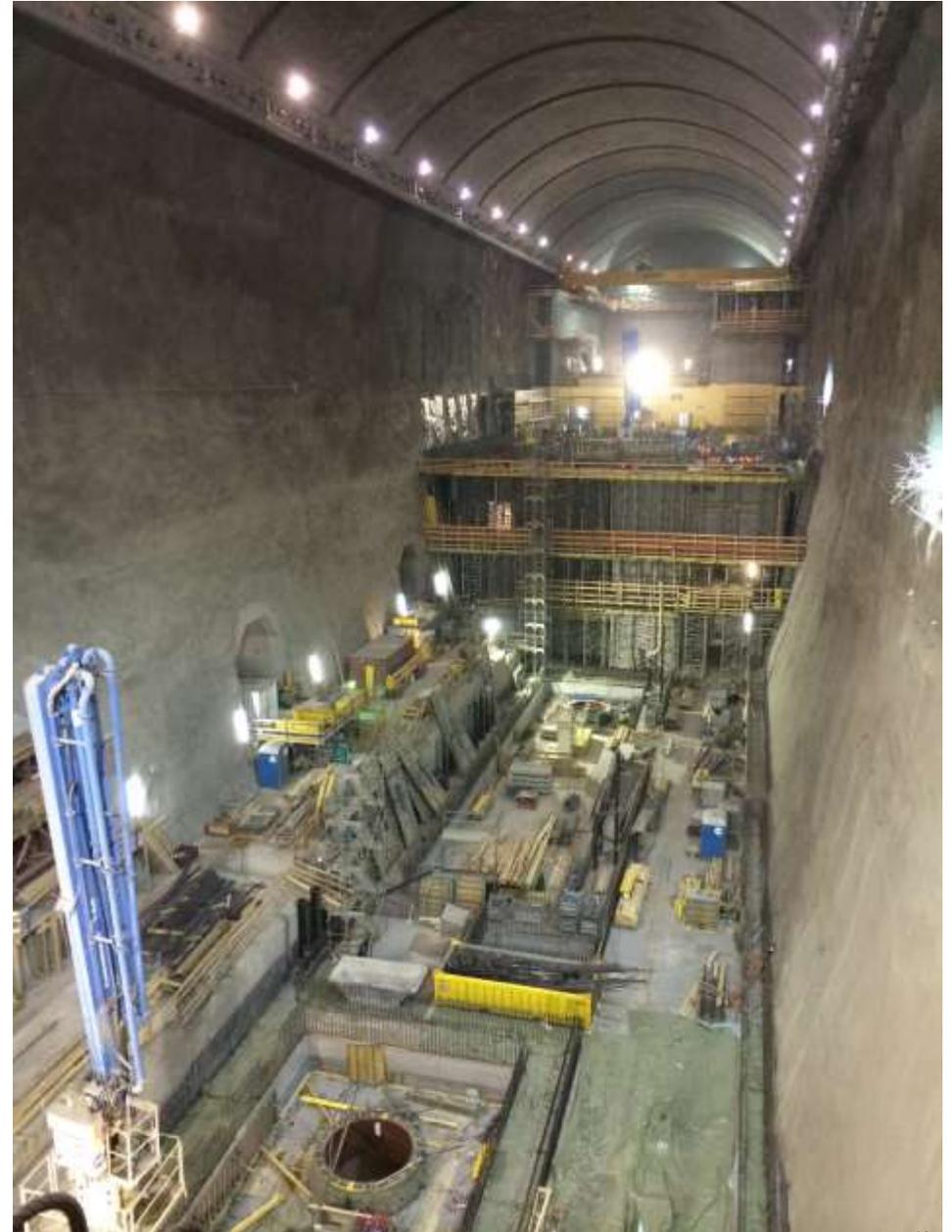


# Les travaux continuent!





# Les travaux continuent!





# Les travaux continuent!





# Les travaux continuent!





# Les travaux continuent!

