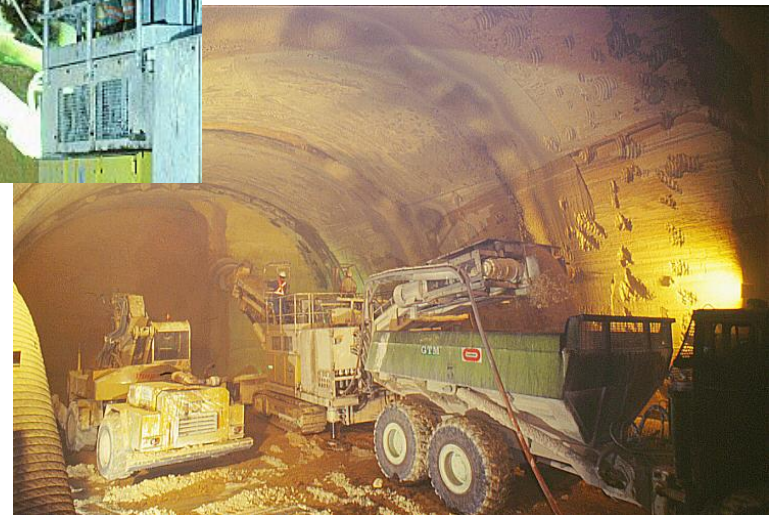


# Le Calcul des tunnels



Laurent Bérend  
Francis Lanquette  
Hervé Thiébaud



# Troisième séance

---

- Méthode du solide composite
- Stabilité du front
- Exemple de modèles de calcul de structures
- Exercice

# La méthode du Solide Composite

---

- Modélisation numérique 2D ou 3D (éléments finis, différences finies)
- Matériaux (Sol- structure) : éléments massifs
- Lois de comportement élastique ou plastique
- Possibilité d'éléments spéciaux (contacts) entre matériaux

# La méthode du Solide Composite

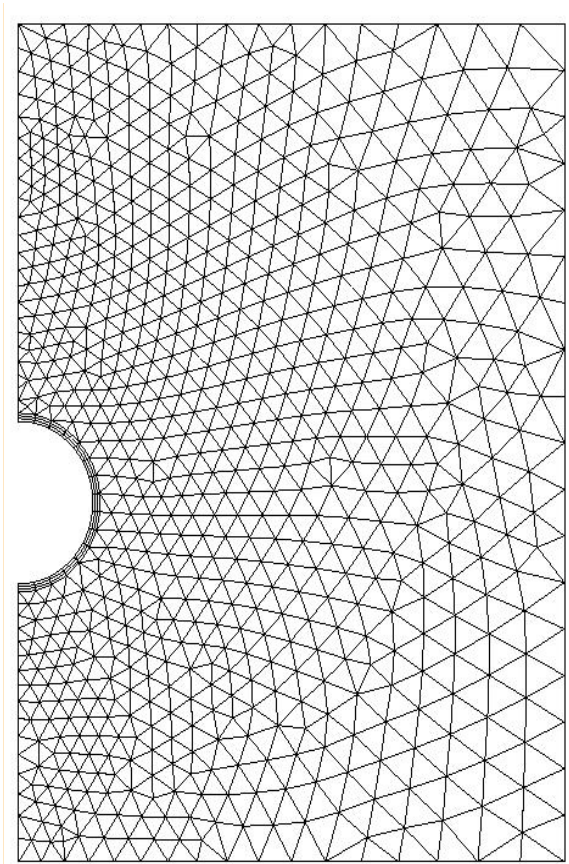
---

## ➤ Articulation avec la méthode cv-cf analytique

L'utilisation de la méthode cv-cf du solide composite consiste à réaliser une étude bi-dimensionnelle d'une section de tunnel qui reproduit la géométrie et le phasage et à lui appliquer les coefficients de déconfinement calculés selon les méthodes analytiques simplifiées ou des modèles numériques quand on s'éloigne beaucoup des hypothèses de base de ces dernières: section non circulaire, terrains hétérogènes, stratifiés, faibles profondeurs, etc...

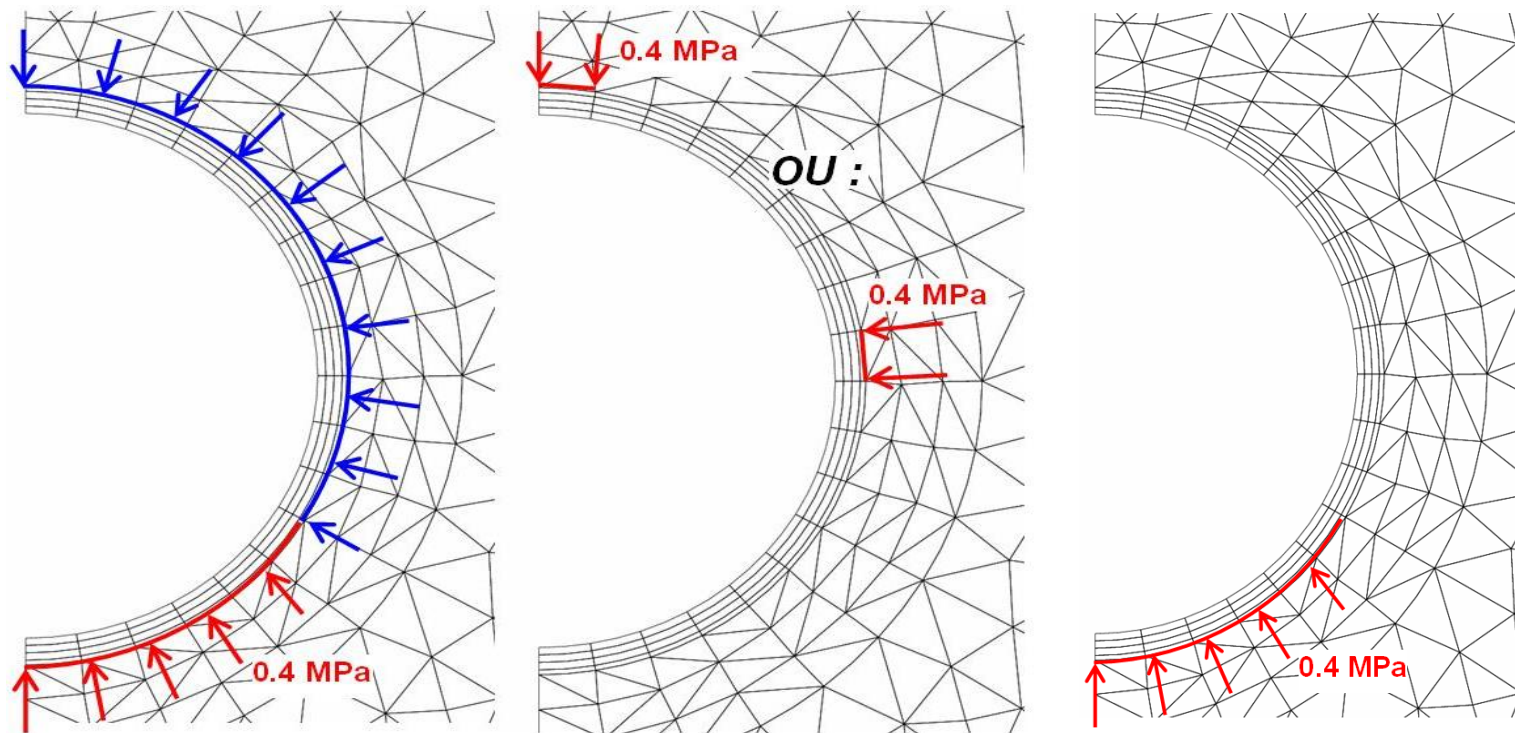
# Exemple de maillage Eléments Finis 2D – Tunnel Circulaire

---



- Plusieurs types possibles
  - Chargement extérieur (pressions)
  - Chargement résultant du poids volumique des matériaux (calculé à partir des contraintes initiales de poids propre ou résultant d'une phase de calcul antérieure)

# Pressions externes exercées sur un revêtement



## Possibilités données par la méthode

---

- En 2D : problème plan
- Modélisation plusieurs ouvrages (interaction)
- Calculs phasés
- Lois de comportement variées
- Appuis structures non linéaires (contacts, décollement, glissement)
- En 3D : étude de structures complexes

Mais

- En 3D limite taille modèle atteinte rapidement (nbre d'éléments et taille du modèle, durée du calcul)

# Exemples de calcul

## Tunnel de Sidi Ali, Maroc, études d'exécution, 2006

Logiciel: Cesar LCPC

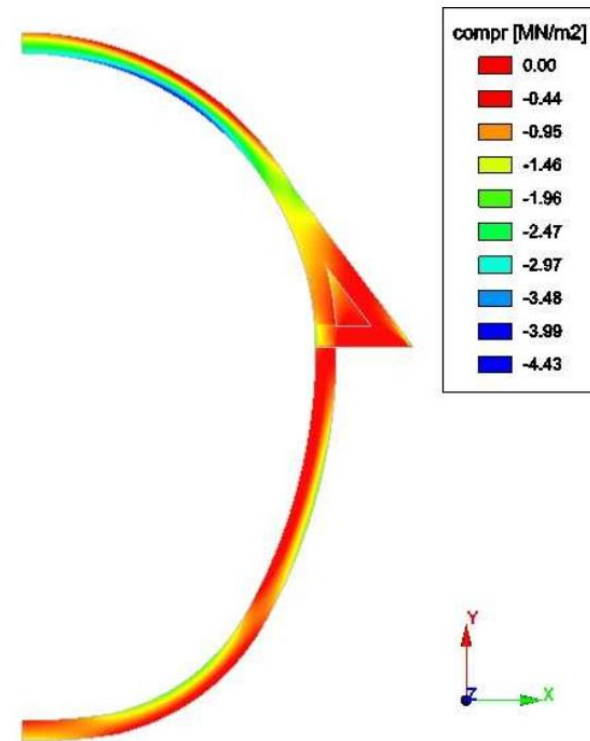
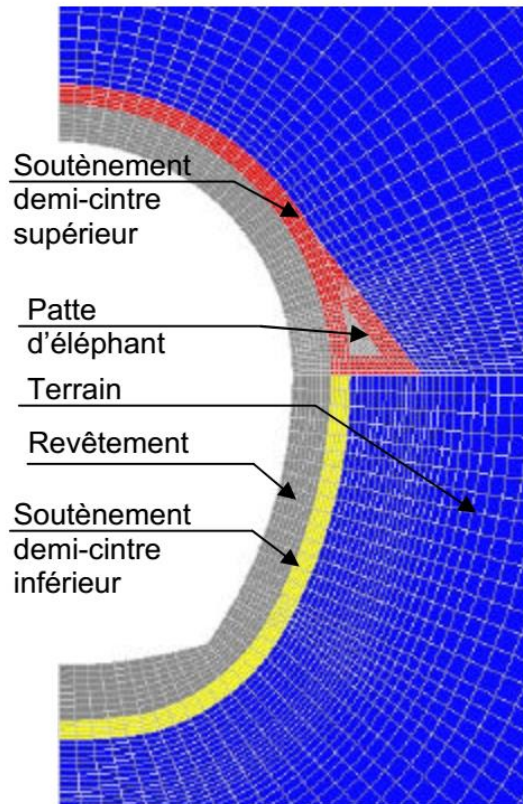


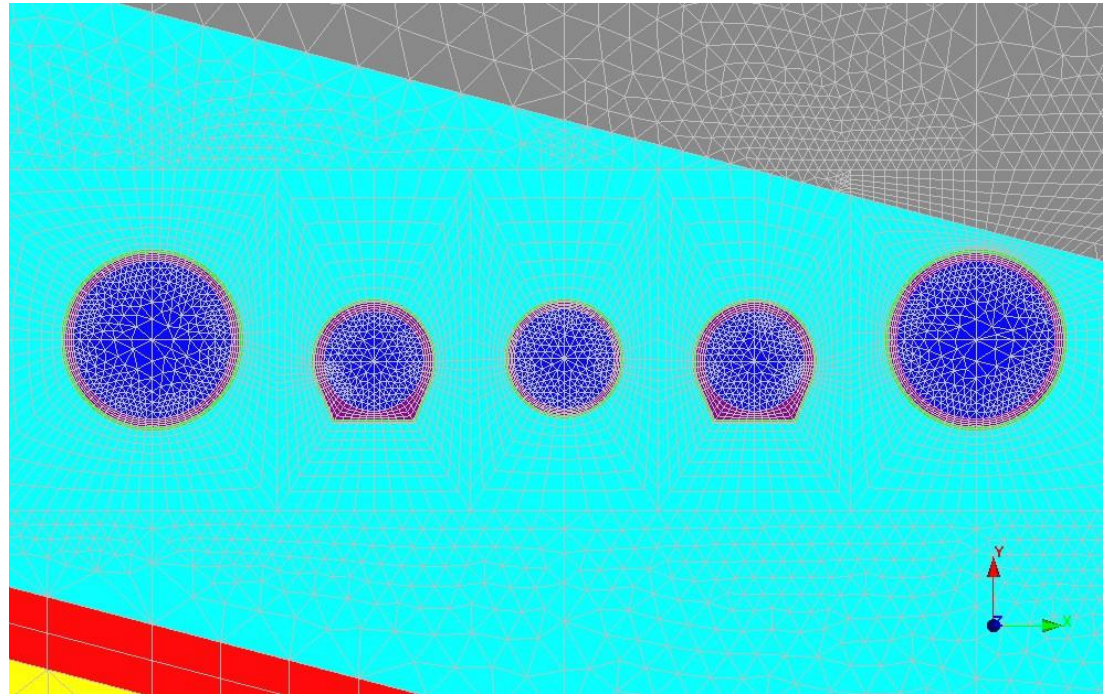
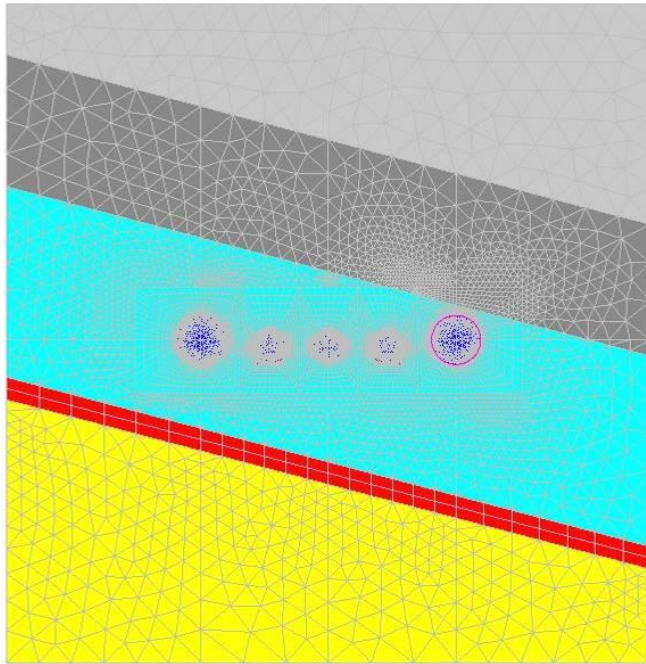
Figure 20 - contraintes de compression dans le soutènement homogénéisé



# Exemples de calcul

## Tunnel de la Manche, calcul des renforcements suite à l'incendie de 2008

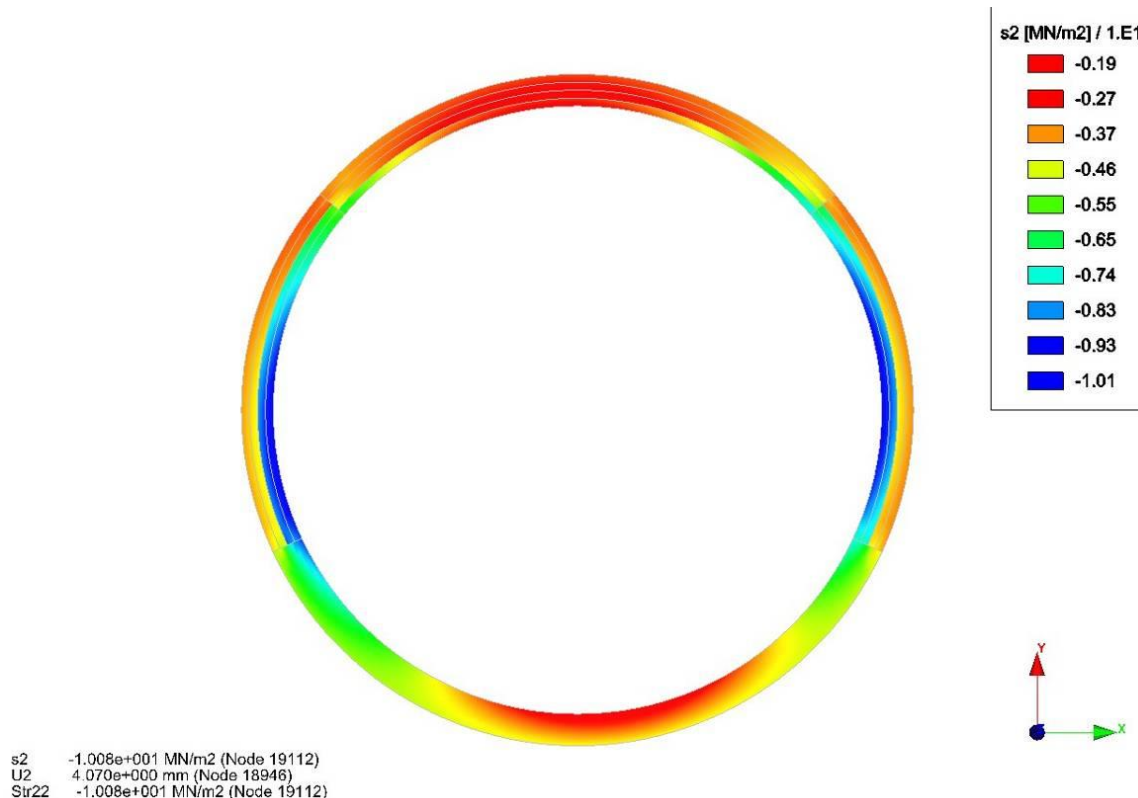
Logiciel: Cesar LCPC



# Exemples de calcul

## Tunnel de la Manche, calcul des renforcements suite à l'incendie de 2008

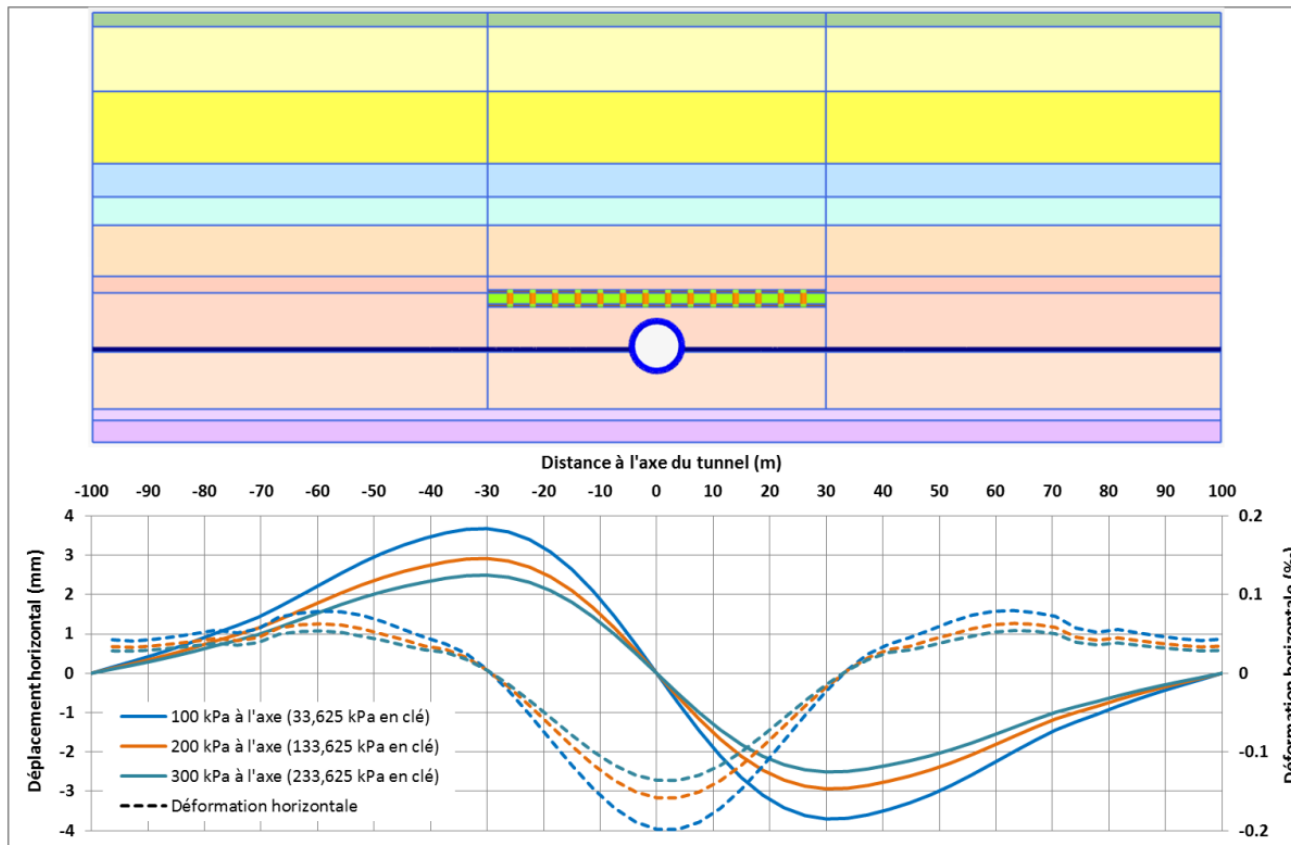
Logiciel: Cesar LCPC



# Exemples de calcul

Prolongement de la L14 au Sud, passage sous les carrières de Calcaire Grossier, 2016

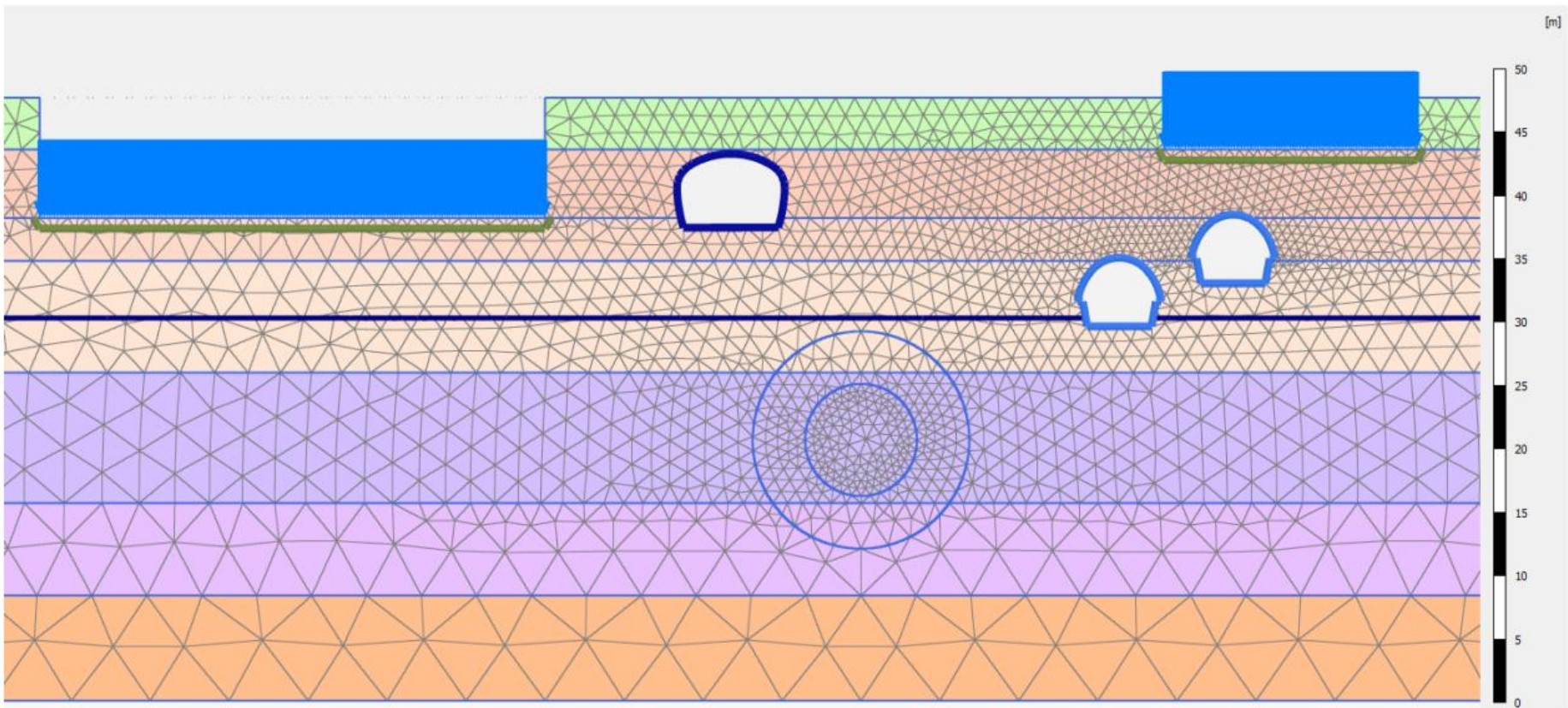
Logiciel: Plaxis



# Exemples de calcul

Prolongement de la L14 au Sud, passage la ligne 7 à Maison Blanche

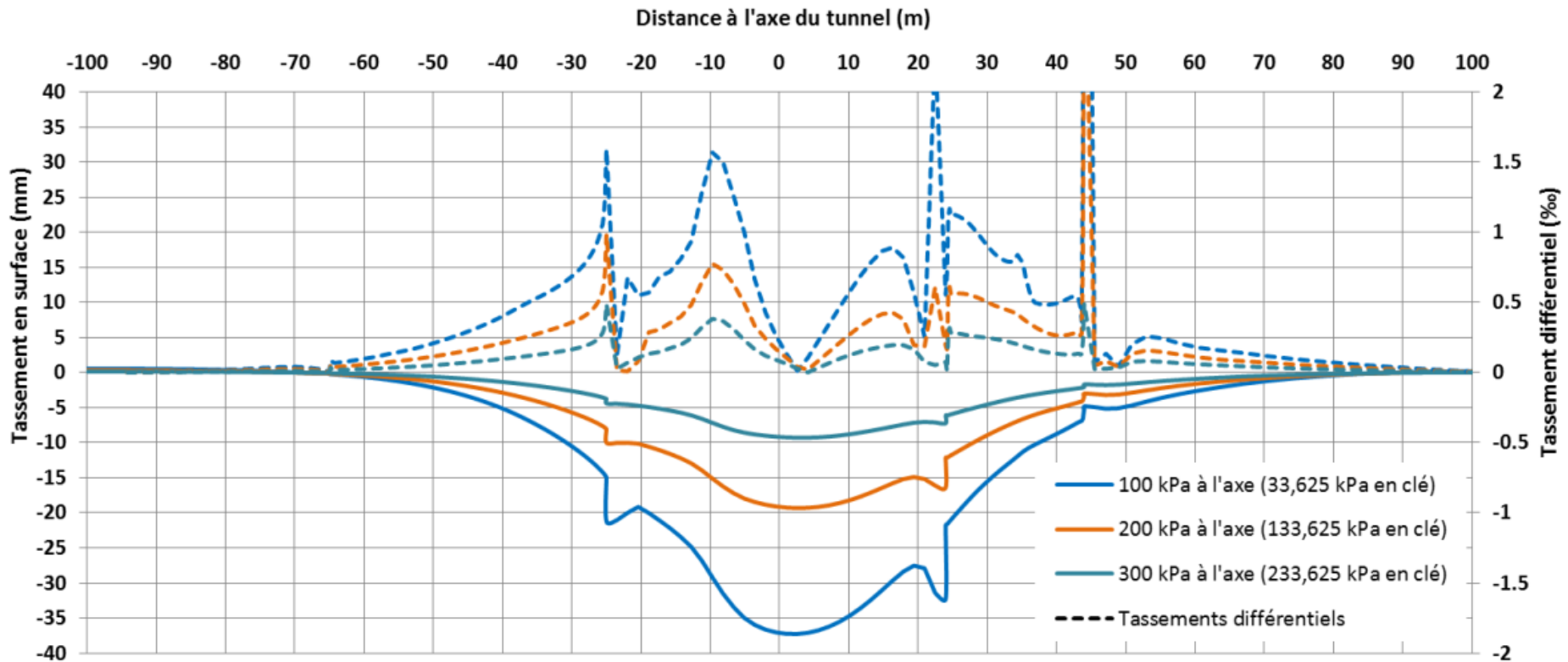
Logiciel: Plaxis



# Exemples de calcul

Prolongement de la L14 au Sud, passage sous la ligne 7 à  
Maison Blanche

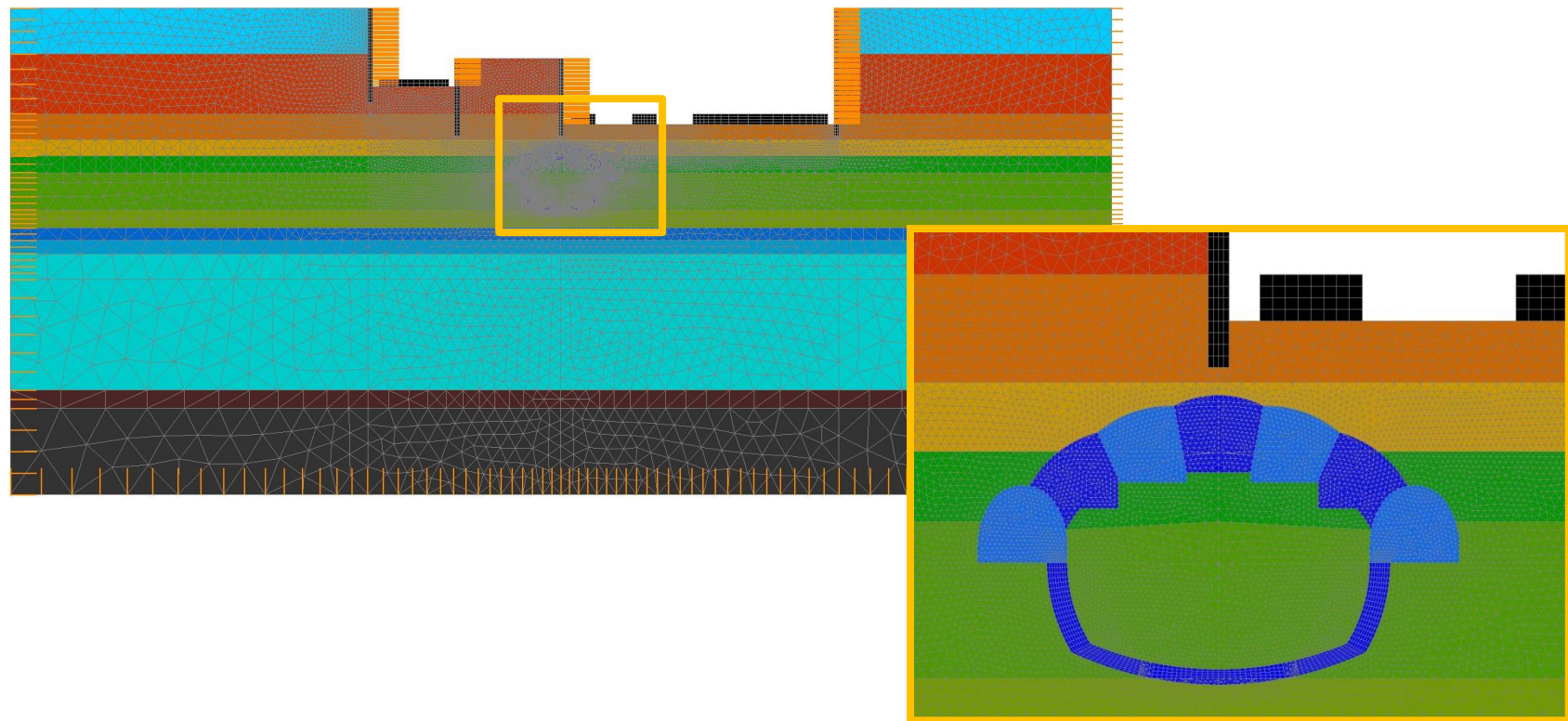
Logiciel: Plaxis



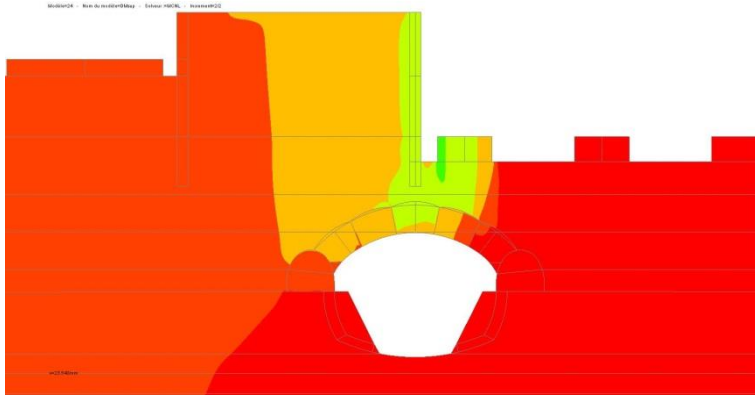
# Exemples de calcul

## Prolongement d'EOLE à l'Ouest – entonnement Triangle

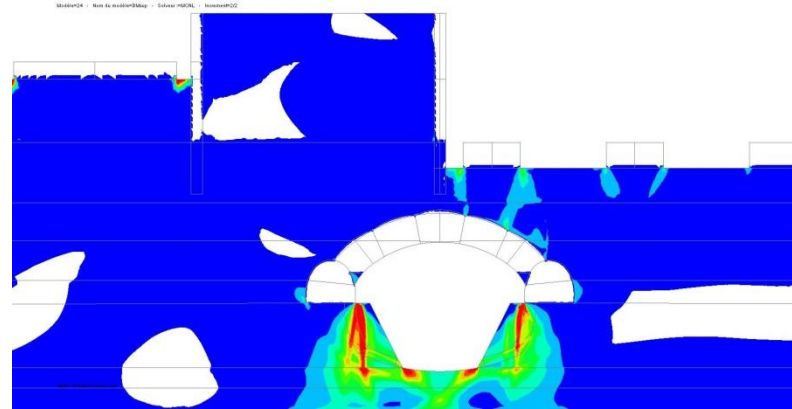
Logiciel: Cesar LCPCv



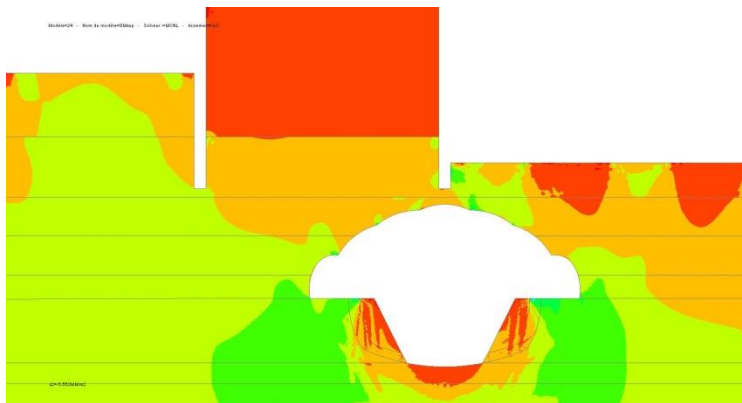
# Exemples de calcul



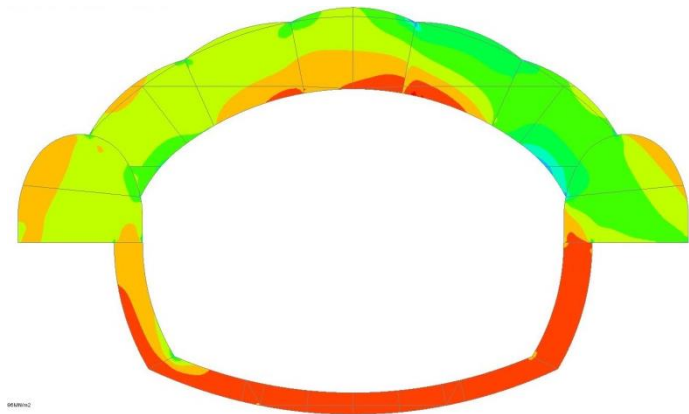
➤ tassements



➤ norme de déformation plastique



➤ contrainte principale



➤ compression

---

# La stabilité de front



# Exigences spécifiques

---

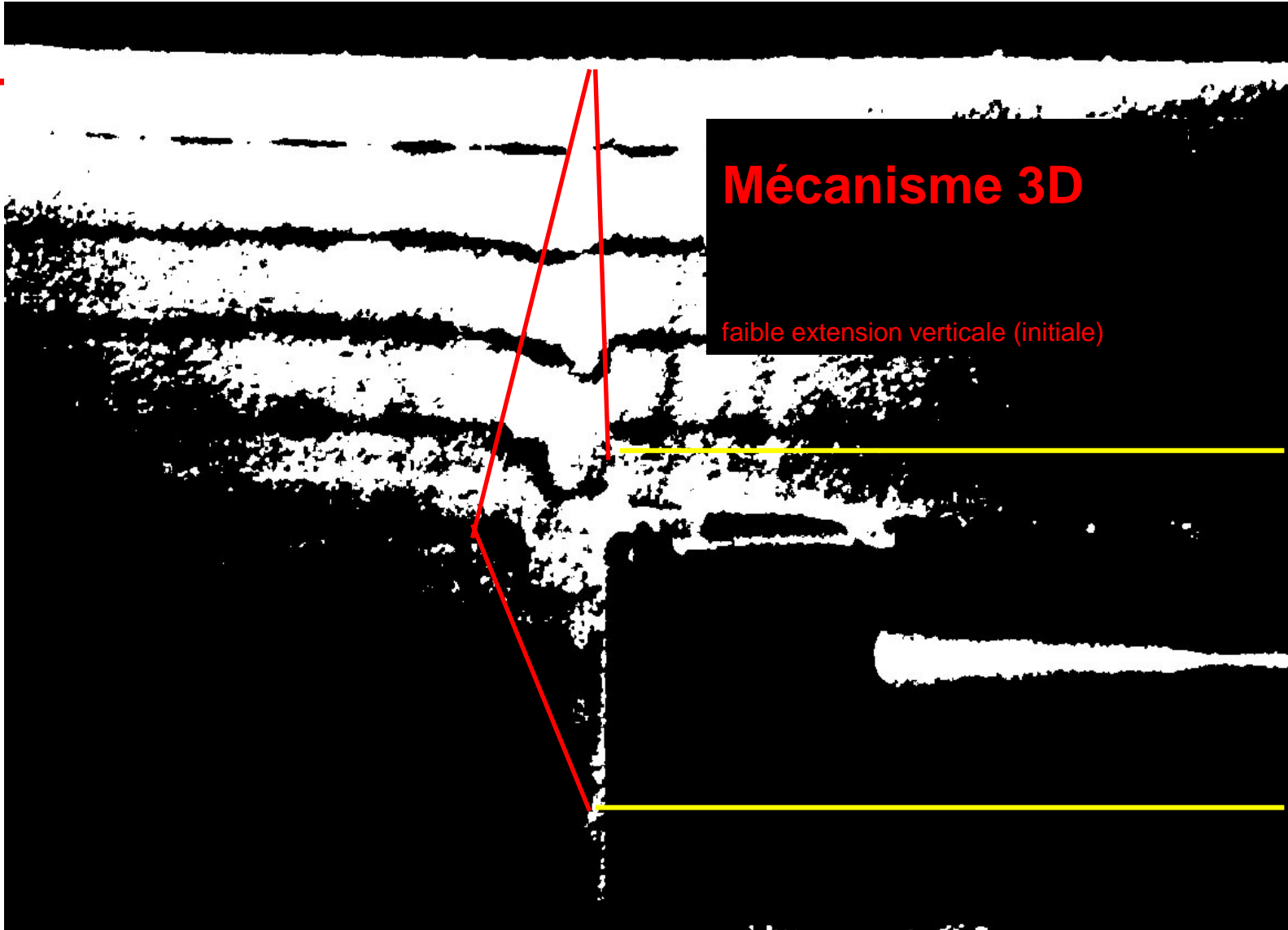
Les deux principaux risques concernent:

- La stabilité du front de taille au moment de l'excavation
- Les tassements de surface et leur impact éventuel sur le bâti environnant

# Exigences spécifiques

---





# Stabilité du front de taille d'un tunnel en terrain cohérent $\phi_u=0$ , $c_u > 0$

---

Indicateur : le nombre de stabilité :

$$N = 2\sigma_0 / R_C$$

( =  $\sigma_0 / C_u$  en terrain purement cohérent)

Dans le cas avec  $P_a$ =pression au front:

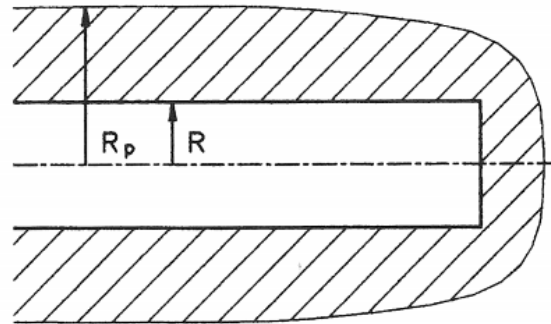
$$N = \frac{2(\sigma_0 - p_a)}{R_C} \quad \left( = \frac{\sigma_0 - p_a}{C_u} \right)$$

Détermination de la valeur de  $N_c$  critique:

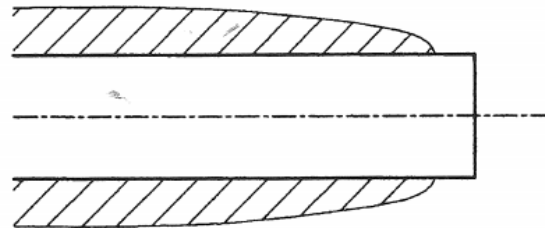
$5 < N_c < 7$  (Broms 1967 ou Peck 1969)

# Evolution de la zone plastique en fonction de $N_S$

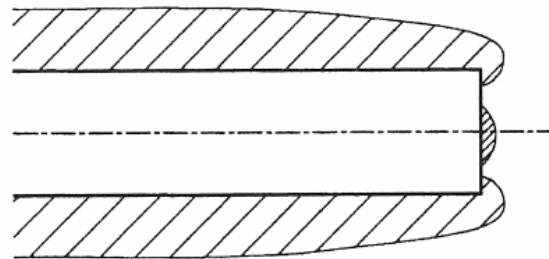
---



$N > 5$

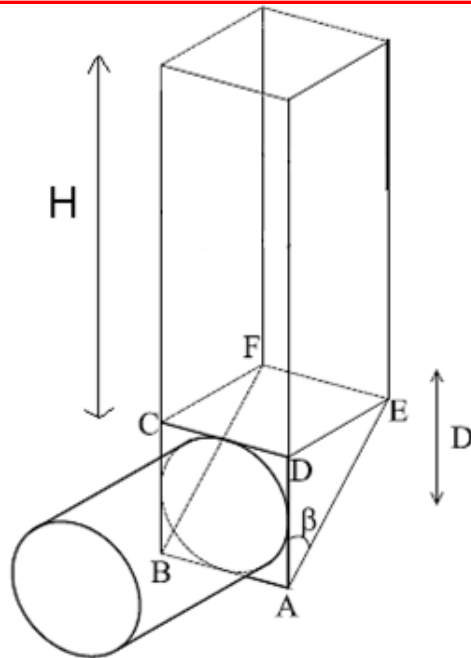


$N < 2$



$2 < N < 5$

# Stabilité du front de taille



Méthode Anagnostou-Kovari : estimation de la pression de confinement à appliquer pour assurer la stabilité du front sous l'effet du poids des terrains sus jacents.

Estimation des charges gravitaires induites par un prisme de rupture et évaluation de la pression nécessaire pour empêcher le glissement.

Angle du prisme:

$$\beta = \frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}$$

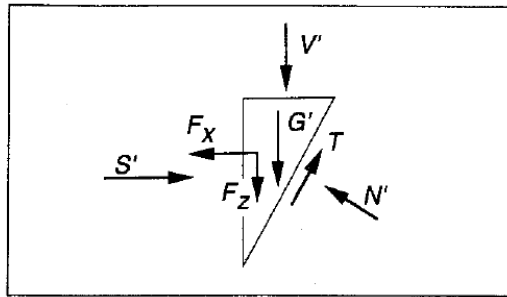
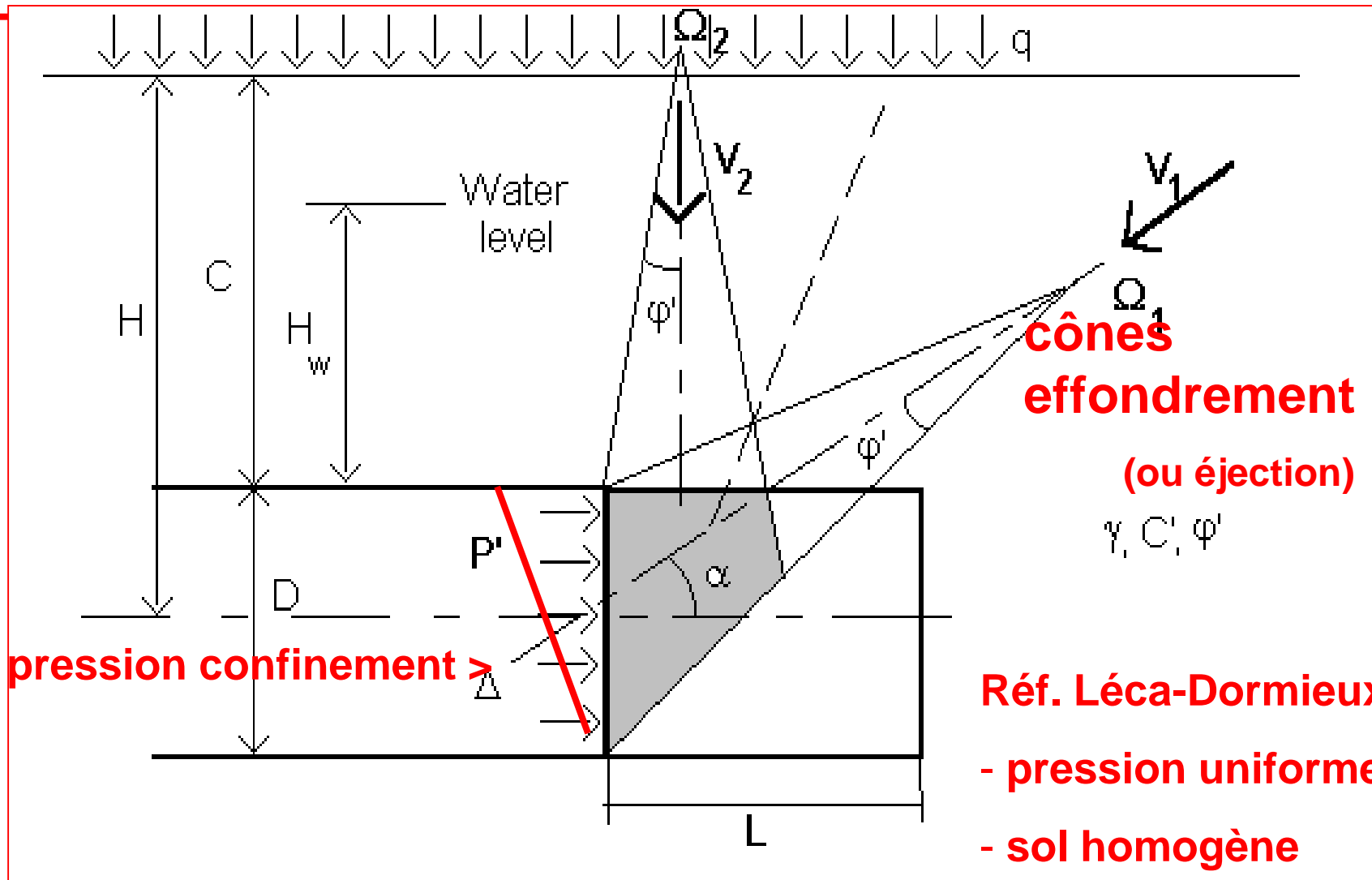


Figure 4. Forces acting upon the wedge in front of the tunnel face.

# Modèles Analytiques plus généraux $\phi > 0, c > 0$



# Exemple d'étude numérique de stabilité de front

---

Tunnelier à Air Comprimé

Points singuliers : passage à proximité culée pont rail

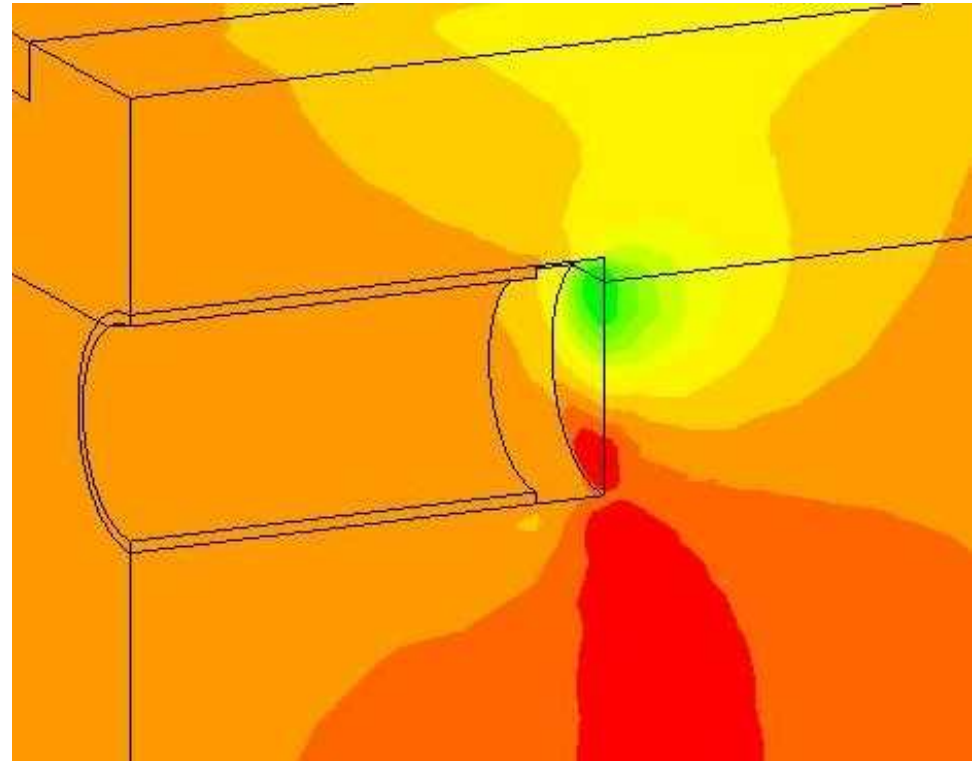
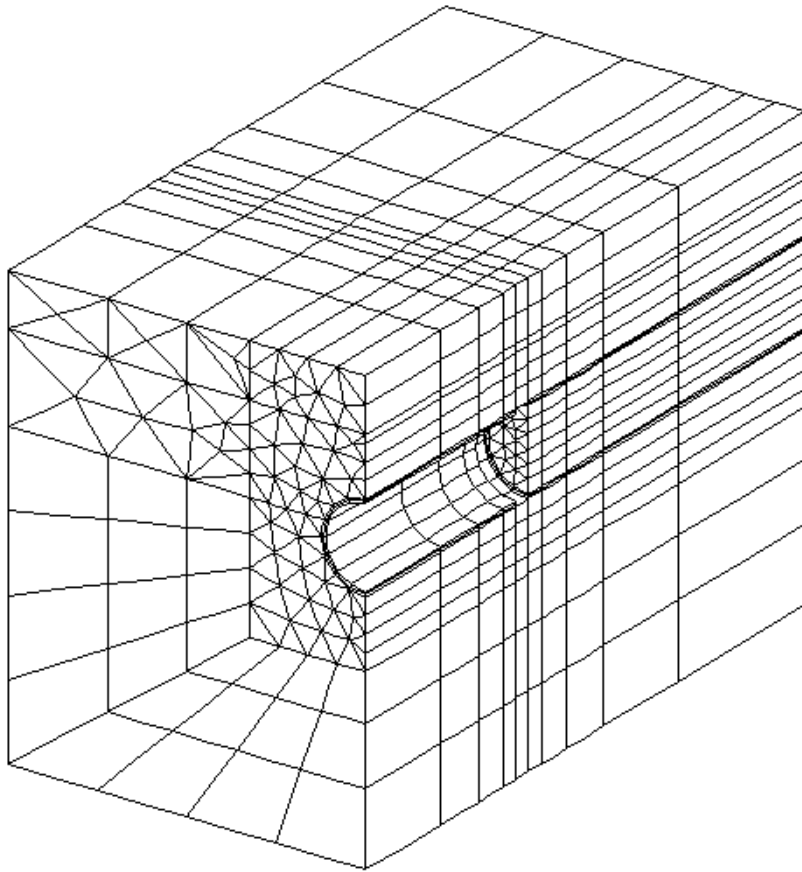
Hétérogénéité des charges autour du tunnel

Pression de stabilisation du front

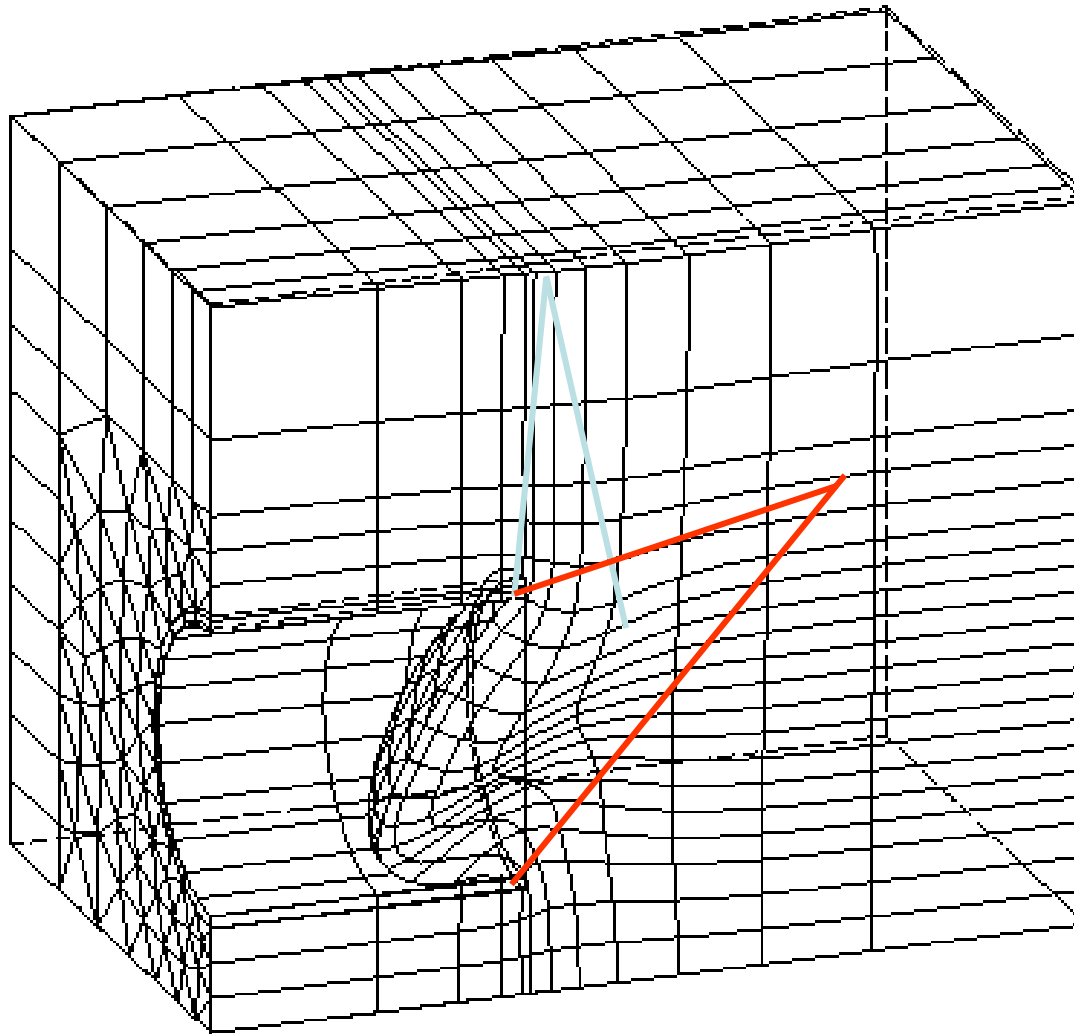
Pression requise pour minimiser les tassements



# Etude Stabilité du front en 3D



# Modèles Numériques vs Analytiques

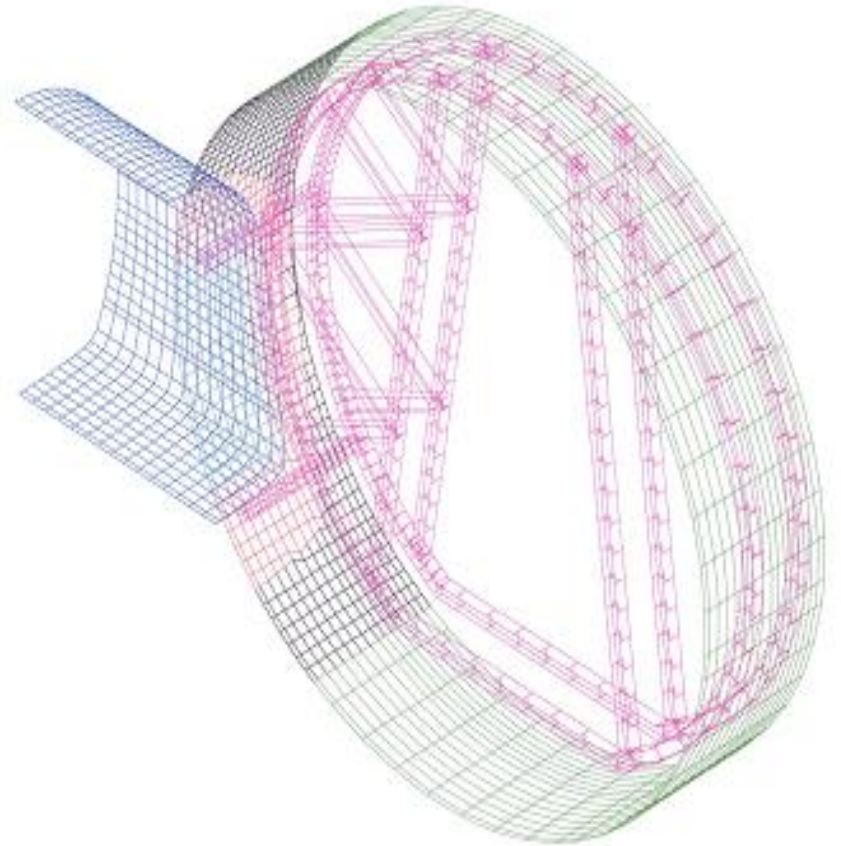
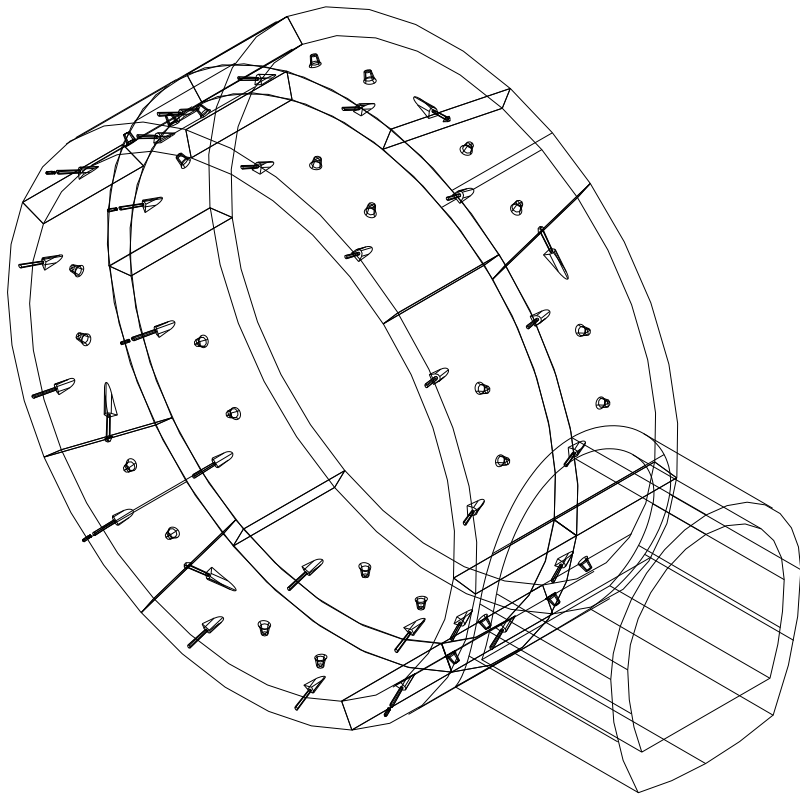


---

# Exemples de modèles de calcul de structures

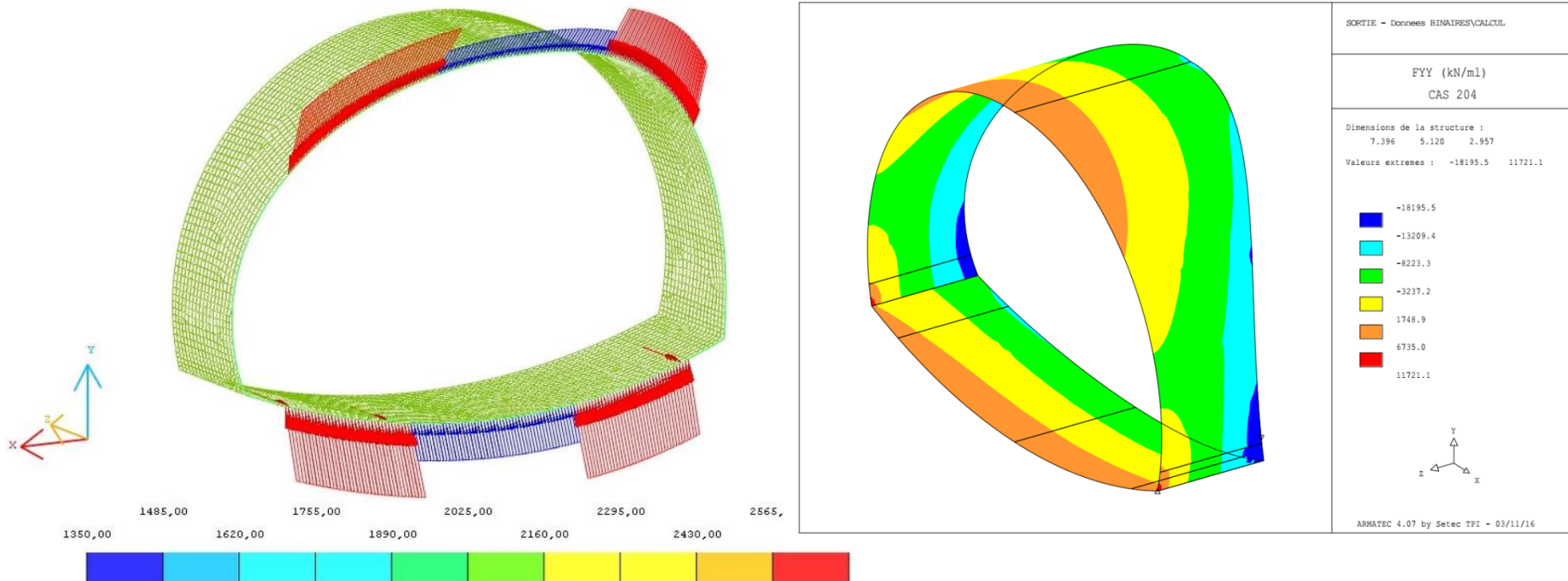
# Calculs de raccordement tunnel/intertubes

---



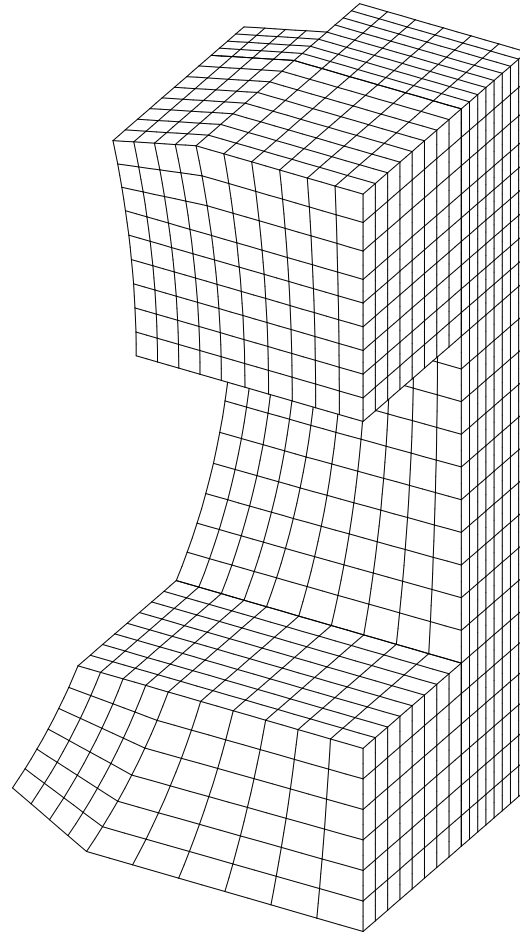
# Calculs de raccordement tunnel/intertubes

Calcul du portique de renforcement de l'ouverture d'un rameau métro de Rennes, 2016



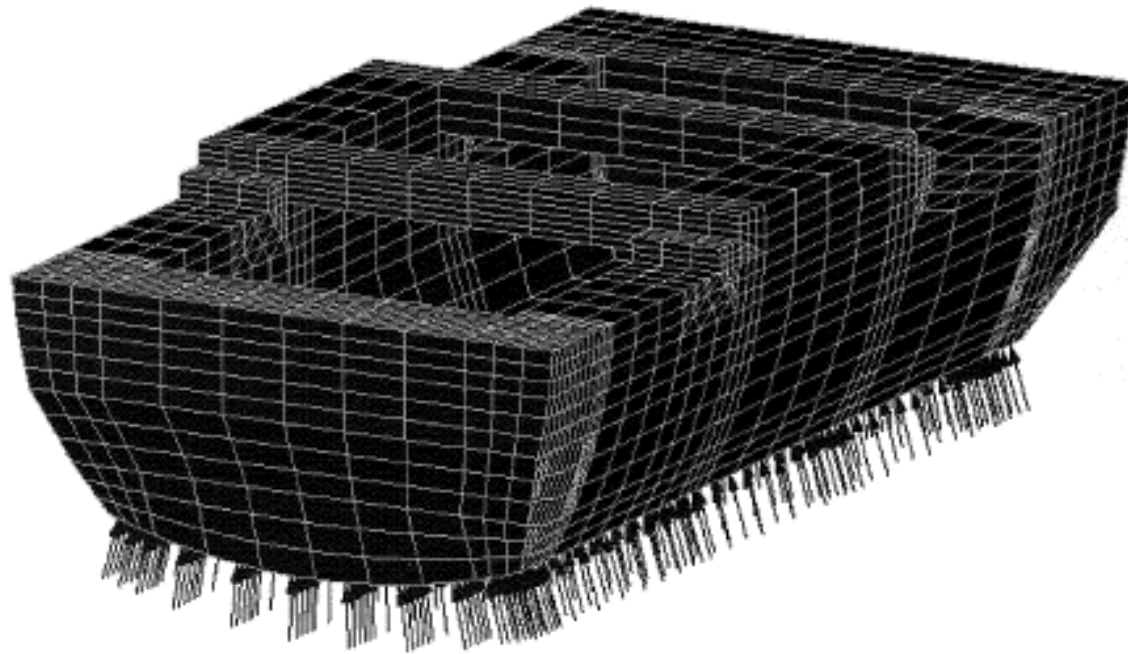
# Modélisation structures de renfort autour de l'ouverture dans les anneaux

---



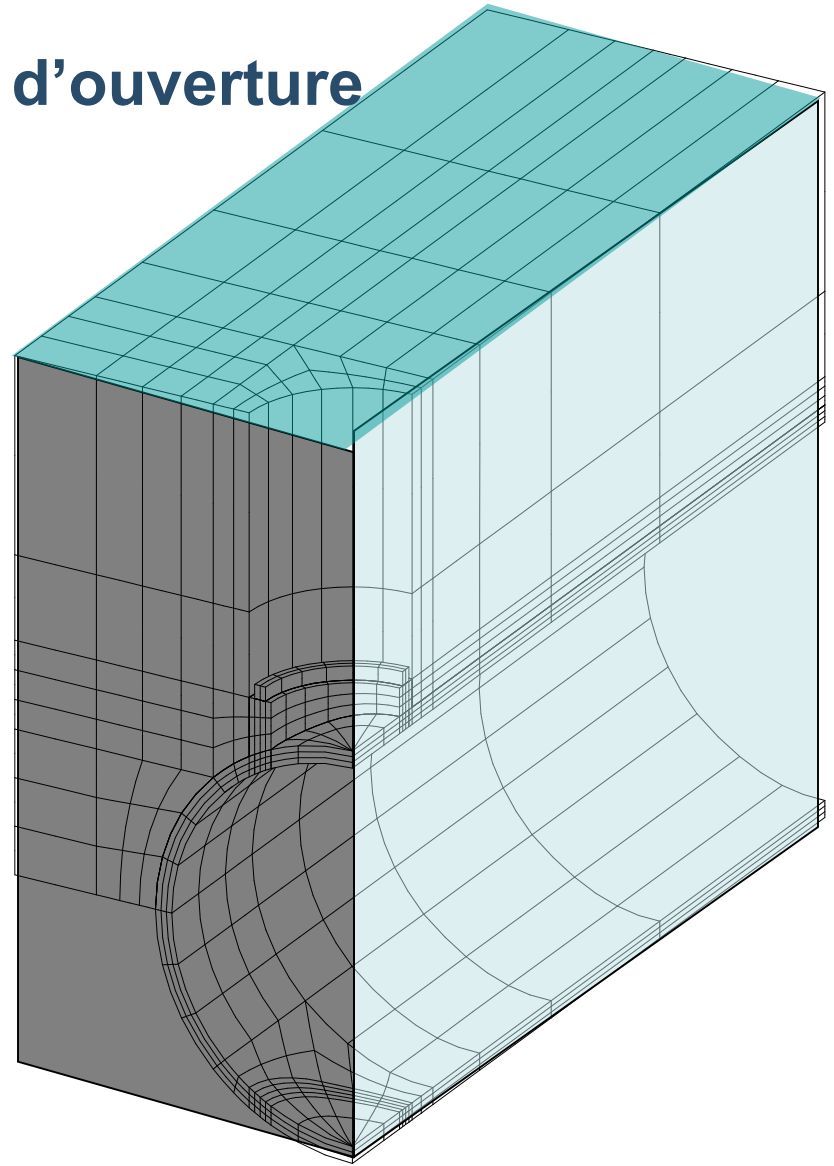
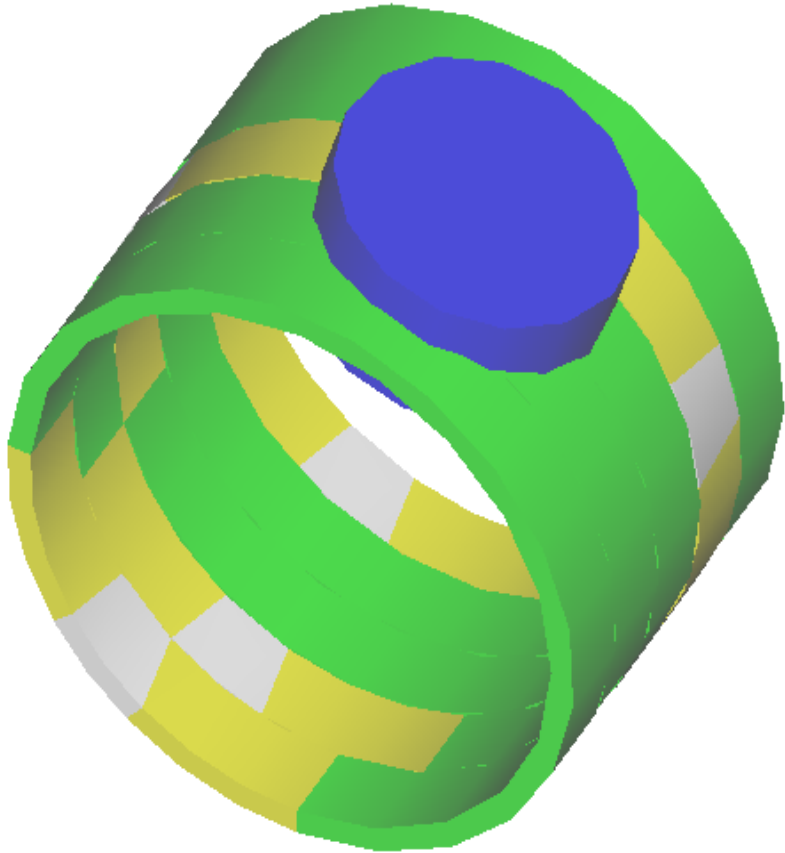
# Structures complexes

---



# Modèle de calcul d'ouverture

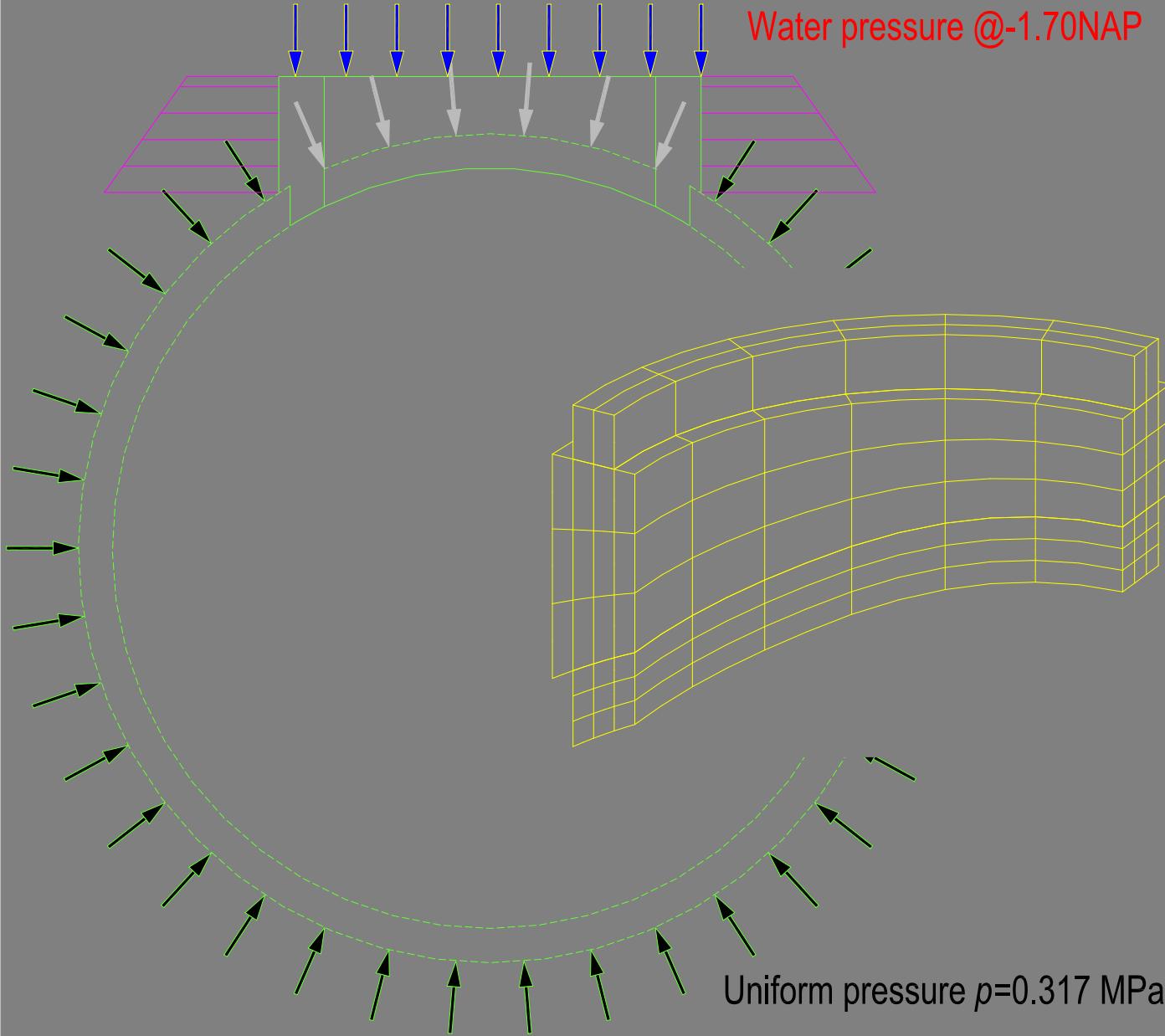
---





Upper shaft structure : P=4.52MN

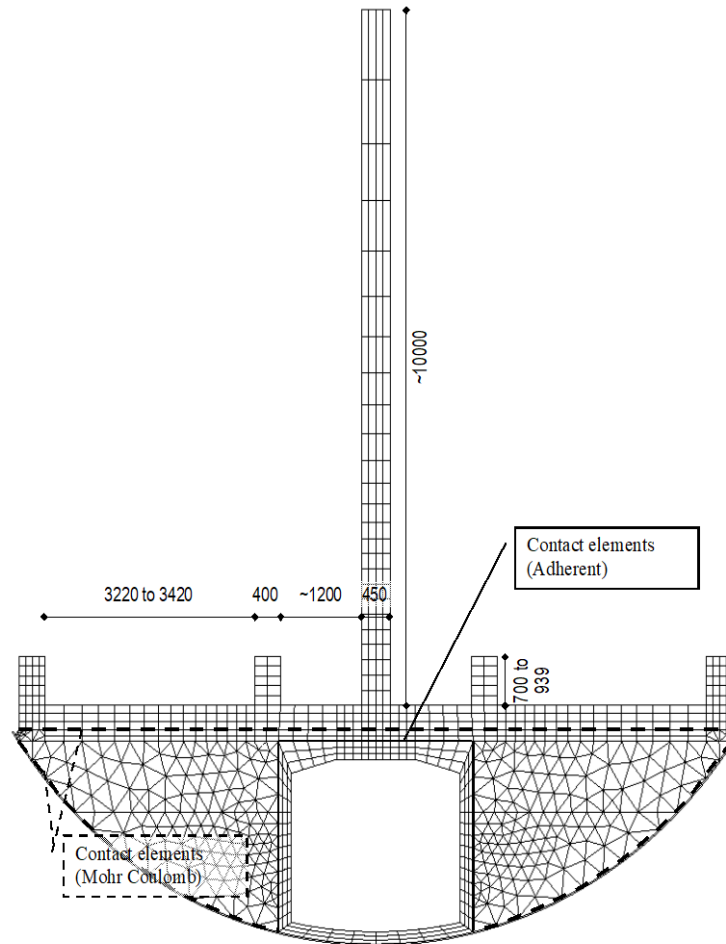
Water pressure @-1.70NAP



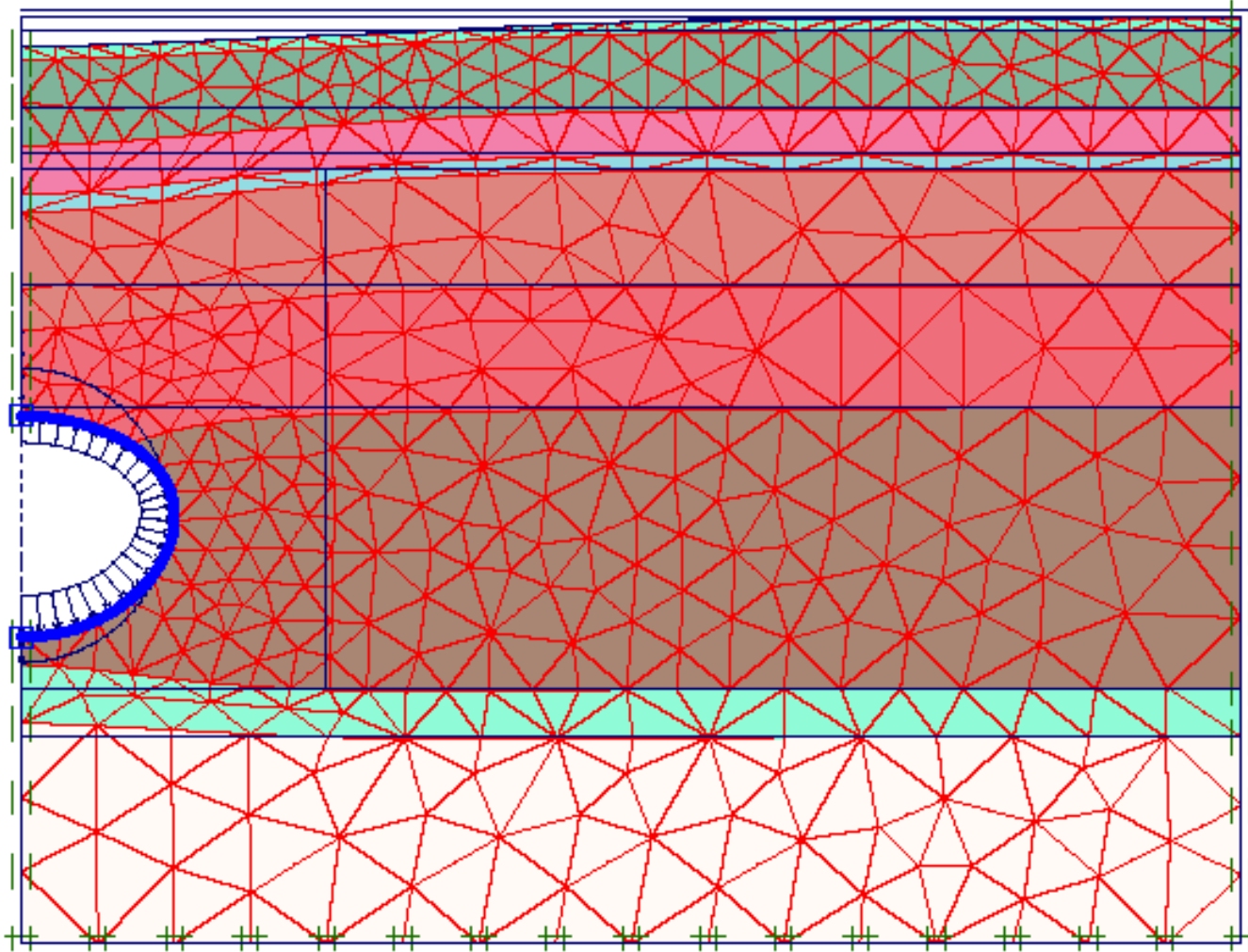
Uniform pressure  $p=0.317$  MPa



# Calcul des structures internes d'un tunnel



# Déformation du sol (Plaxis)



# Calcul des tassements

