

## Projet “Calculs des Structures”

Semaine ATHENS (MP11)

Novembre 2009

[michel.tijani@mines-paristech.fr](mailto:michel.tijani@mines-paristech.fr)

[olivier.stab@mines-paristech.fr](mailto:olivier.stab@mines-paristech.fr)

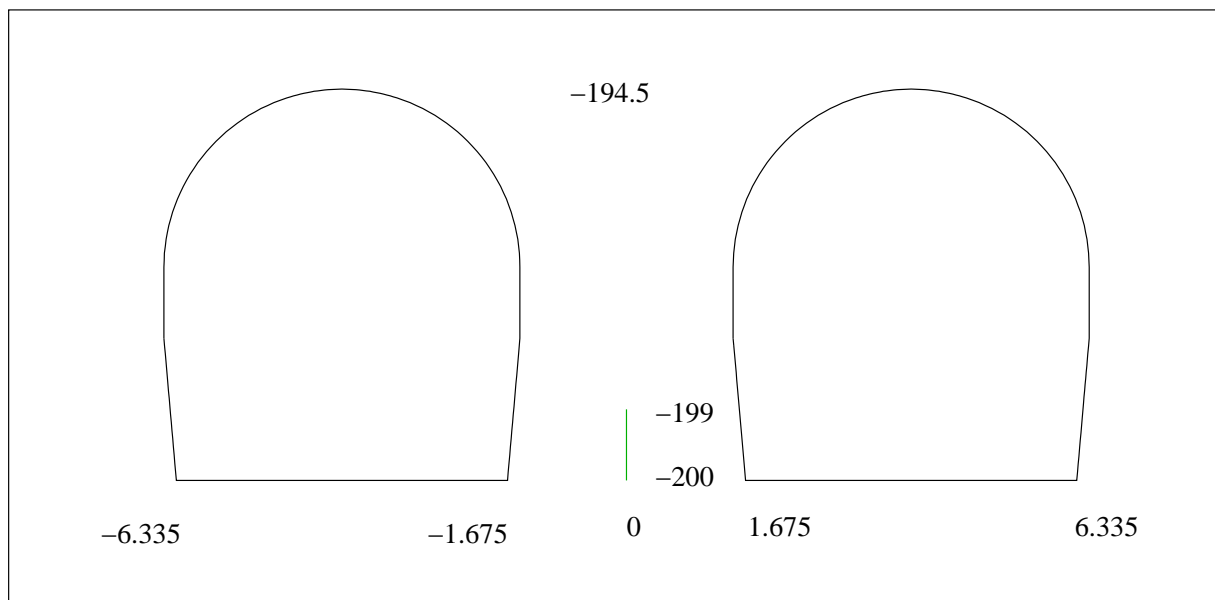
[ahmed.rouabhi@mines-paristech.fr](mailto:ahmed.rouabhi@mines-paristech.fr)



## 1 Données du problème

Le mini problème, objet de ce contrôle des connaissances est inspiré d'un problème industriel réel mais auquel des simplifications ont été apportées (non prise en compte ni de l'existence de divers matériaux : hétérogénéité du massif rocheux et moyens de soutènement, ni de l'éventuelle anisotropie du comportement mécanique de l'unique matériau considéré, ni du vrai champ des contraintes initiales, ni des effets de l'écoulement de l'eau et des variations de la température ...).

L'objectif de l'étude est la stabilité du parement qui sépare deux tunnels parallèles voisins situés à une profondeur de l'ordre de 200 m. La figure ci-dessous est une coupe verticale et indique quelques dimensions en m avec une échelle. Le modèle est en déformations planes car les tunnels sont très longs et les résultats de ce modèle bidimensionnel peuvent être considérés comme valables pour une grande partie de la longueur des tunnels (au voisinage des entrées une étude tridimensionnelle particulière s'impose).



Le matériau est homogène, isotrope et élastoplastique ayant un coefficient de Poisson de 0.3 et un module d'Young de 15 000 MPa. Il obéit à un critère de Coulomb  $3\sigma_1 - \sigma_3 - 7.5 \leq 0$  où les contraintes principales sont en MPa. Son potentiel plastique est de la forme  $2\sigma_1 - \sigma_3$ . Le matériau est parfait (pas d'écrouissage).

Le poids volumique du matériau est de 0.0256 MN/m<sup>3</sup> et les contraintes initiales (avant creusement des tunnels) sont telles que  $(\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = 0.0256 y)$  où  $y$  est la coordonnée verticale (axe ascendant) nulle à la surface du sol.

L'origine de l'axe des  $x$  étant prise sur le plan vertical médian entre les deux tunnels, le modèle a été limité à  $(-50 \leq x \leq 50$  et  $-250 \leq y \leq -140)$ . Sur les frontières gauche, droite et basse, supposées "à l'infini" on a annulé le déplacement normal et l'effort tangentiel. Sur la frontière supérieure on a imposé des efforts associés aux contraintes initiales.

## 2 Esprit du contrôle des connaissances

Vous supposez que vous êtes l'expert chargé de l'étude et que vous avez confié à un de vos adjoints la réalisation des calculs à l'aide d'un logiciel utilisant la Méthode des Eléments Finis. Les fichiers de données ont déjà été fabriqués et les calculs sont déjà effectués. Il vous reste alors trois étapes. Dans un premier temps vous vérifiez que votre adjoint a bien résolu le problème que vous lui avez défini. Ensuite vous analysez les résultats pour y puiser de l'inspiration pour la dernière étape qui consiste à rédiger un rapport destiné à l'industriel à qui vous allez annoncer que son projet ne peut pas être réalisé car les deux tunnels sont trop proches l'un de l'autre.

## 3 Vérification des données

Vous pouvez effectivement contrôler tous les fichiers de données et toutes les étapes des calculs mais d'une part vous êtes un expert et n'avez pas de temps à perdre en apprenant le mode d'emploi d'un logiciel et d'autre part vous savez qu'il est possible de vérifier que les résultats (que vous devez analyser) sont cohérents avec les données. Vous pouvez donc vous contenter de faire appel au logiciel de traitement graphique des résultats.

Durant la vérification et l'analyse des résultats ne pas perdre de vue que le logiciel fournit, en plus des graphiques, de nombreuses informations utiles (les valeurs extrêmes et moyennes par exemple).

### 3.1 La géométrie

Vérifier que le fichier des résultats ne contient qu'un seul matériau et que les données géométriques ont été correctement fournies. En profiter aussi pour contrôler que votre adjoint a utilisé un maillage correct (petits éléments là où on s'attend à de fortes variations des contraintes).

### 3.2 Les caractéristiques du matériau

Choisir un point (par exemple :  $x=-5$ ,  $y=-160$ ) et demander au logiciel les composantes des tenseurs de déformation et de contrainte pour vérifier que les relations d'élasticité ont été respectées (ne pas oublier les contraintes initiales).

Choisir un autre point (par exemple :  $x=-1.4$ ,  $y=-198$ ) et demander la norme et la trace du tenseur des déformations non-élastiques et vérifier que ces deux quantités sont dans le rapport  $\sqrt{5}$  (justifier que ce résultat est dû au potentiel plastique). En ce même point demander la combinaison  $3\sigma_1 - \sigma_3$  et vérifier qu'elle vaut environ 7.5 MPa.

### 3.3 L'état initial

Vérifier que le long de la frontière externe (gauche, basse et droite) les contraintes sont pratiquement celles de l'état initial. Cette vérification (complétée par celles des paramètres élastiques où interviennent les contraintes initiales) permet non seulement de contrôler que l'état initial correspond aux données mais aussi que les frontières externes ont été convenablement choisies pour représenter l'infini.

### 3.4 Les conditions aux limites

Vérifier que le long de la frontière externe (gauche, basse et droite) le déplacement normal et l'effort tangentiel sont nuls et que le long de la frontière haute les deux efforts normal et tangentiel correspondent aux données.

### 3.5 Félicitez modérément votre adjoint

Il se trouve que lorsque votre adjoint vous a fourni le fichier des résultats des calculs que vous lui avez confiés il vous a signalé que les temps de calcul ont été longs pour justifier ainsi l'achat d'un ordinateur plus rapide. Cependant vous avez la possibilité de signaler à votre adjoint qu'il pouvait avoir une réduction du temps de calcul dans un facteur supérieur à 2 pour obtenir exactement les mêmes résultats. Expliquez lui comment et pourquoi.

## 4 Rapport pour l'industriel

Comme dans tout rapport toute figure doit être là pour illustrer une affirmation. L'expert peut donc être amené à visualiser un grand nombre de figures pour lui permettre de trouver des idées mais il ne met dans son rapport final que les figures pertinentes.

Dans le cas du présent problème, en tant qu'expert vous avez tout de suite constaté que le pilier qui sépare les deux tunnels présente une zone plastique dite non contenue (elle s'étend d'un tunnel à l'autre sans laisser de coeur élastique). Par conséquent l'ouvrage souterrain est instable : il suffit qu'il y ait une hétérogénéité même infime pour qu'un morceau du pilier glisse dans le tunnel de gauche ou de droite selon les lignes de glissement matérialisées par une "localisation" des déformations non élastiques.

Cependant vous n'allez pas vous contenter uniquement de ce résultat (important certes) mais vous allez développer d'autres idées consécutives à votre analyse des résultats ainsi que des propositions à fournir à l'industriel (augmenter la largeur du pilier, utiliser un soutènement des tunnels ...).

**Pour la réalisation du travail, tous les fichiers sont dans `~mtijani/PCS09`.**

**Pour le contrôle des connaissances, le rapport devra être transmis à : [michel.tijani@mines-paristech.fr](mailto:michel.tijani@mines-paristech.fr) avant le 20 décembre 2009.**

Bon courage de la part de l'équipe Ahmed, Olivier et Michel.