

Dimensionnement par les méthodes semi-empiriques

Exercice 1

Un massif granitique avec 3 familles de joints, RQD moyen de 88%, espacement moyen des joints de 0.24 m, surfaces des joints généralement irrégulières et rugueuses, jointives et non altérées avec quelques taches, surface d'excavation humide, mais sans écoulement, résistance moyenne à la compression uniaxiale de 160 MPa, tunnel excavé à 150 m de profondeur, sans état de contrainte in situ anormalement élevé, la masse volumique des roches est estimée à 2700kg/m³

- Déterminer la qualité du massif rocheux selon les méthodes de Bieniawski et Barton.

Exercice 2

Massif de silt très fracturé de poids volumique 27kN/m³, présentant les caractéristiques suivantes :

- 2 familles de joints et nombreuses fractures aléatoires,
- RQD moyen de 41%.
- joints continus à surfaces lisses et ondulées.
- joints ouverts 5 cm remplis d'argile,
- résistance moyenne à la compression uniaxiale de 65 MPa.
- venues d'eau par 10 m de tunnel d'environ 50 litre/minute.

Le tunnel est à 20 m de profondeur.

- 1) Déterminer la qualité du massif rocheux selon la méthode de Bieniawski.
- 2) Estimer le temps de tenue moyen du massif de silt.
- 3) Proposer un type de soutènement approprié.

Exercice 3

Un tunnel de 11 m de diamètre est réalisé dans des argiles plastiques sous 50 m de couverture dans un milieu urbain. Les caractéristiques du terrain sont présentées ci-dessous sans nappe ;

- Argile Plastique : $R_c = 0,4 \text{ MPa}$
 - Pas de discontinuité
 - Risque de gonflement.
 - Hydrologie : perméabilité très faible ($k < 10^{-8} \text{ m/s}$).
 - Couverture : 50 m.
 - Dimension : 11 m de diamètre
-
- Proposer un soutènement approprier au tunnel selon la méthode AFTES

Exercice .4

Une galerie de section circulaire de 5m de rayon est creusé dans un terrain de poids volumique 25 kN/m^3 , de résistance en compression uniaxiale 25MPa , de module de cisaillement (G) 1GPa , et où règne un état de contrainte isotrope.

- a) A partir de quelle profondeur y a-t-il rupture ?
- b) Calculer le déplacement radial de la paroi à 400 m de profondeur, en l'absence de soutènement.
- c) Quelle pression faut-il appliquer pour annuler ce déplacement ? tracer la courbe caractéristique du terrain.
- d) Le soutènement est constitué d'un anneau en béton de rigidité 1.4 GPa , placé à une distance d du front de taille. Calculer la convergence à la mise en place du soutènement, dans les deux cas : $d=0$ et $d=2.5\text{m}$.
- e) Quels sont la pression de soutènement finale et le déplacement correspondant ?

Calcul des contraintes et déformations au voisinages d'un tunnel

Enoncé

On creuse un tunnel de 10 m de diamètre (voir Fig. 1) dans des grès (hors nappe) sous une couverture de 146 m. Les grès ont les caractéristiques suivantes : $\gamma = 22 \text{ kN/m}^3$; $\nu = 0.25$; $E = 1400 \text{ MPa}$.

Il a été vérifié que les grès restent dans le domaine élastique et supposé que la loi élastique linéaire est assez réaliste pour être retenue.

- 1) Quelles sont les contraintes radiales σ_r et orthoradielles σ_θ avant creusement ?
- 2) Quelles sont les contraintes σ_r et σ_θ après creusement aux points A, B et C :

 - $X_A = -10 \text{ m}$ (en avant du front de taille) ;
 - $X_B = 0 \text{ m}$ (au front de taille) ;
 - $X_C = +20 \text{ m}$ (en arrière du front de taille).

- 3) Tracer la répartition des contraintes σ_r et σ_θ suivant les rayons $B'B''$ et $C'C''$ (les points C'' et B'' se trouvent à une distance $x = 4R$ de la paroi du tunnel)
- 4) Tracer la courbe de convergence du tunnel $u(x)$
- 5) Représenter sur une demi-coupe longitudinale du tunnel, les différentes valeurs $u(x)$ de la convergence en fonction de l'éloignement du front de taille.

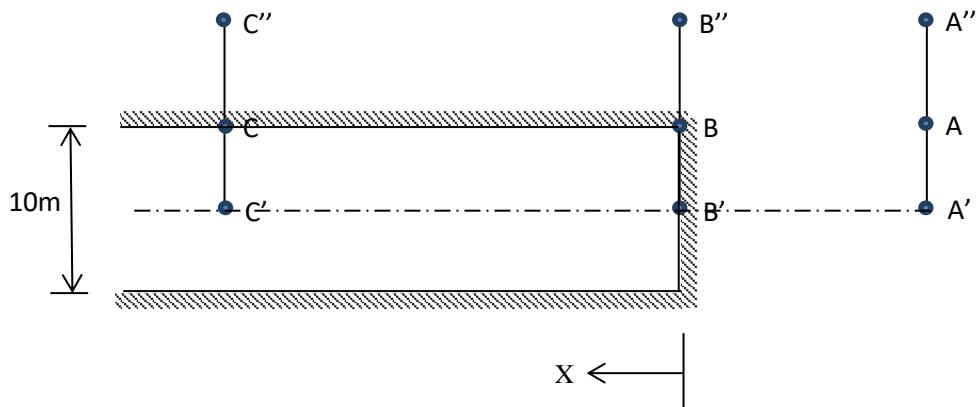


Figure 1. Définition de la géométrie du tunnel et des coupes de calculs

$$\lambda(x) = 1 - 0,75 \cdot \left[\frac{1}{1 + \frac{4}{3} \cdot \frac{x}{R}} \right]^2$$

Calcul d'un tunnel avec creusement conventionnel

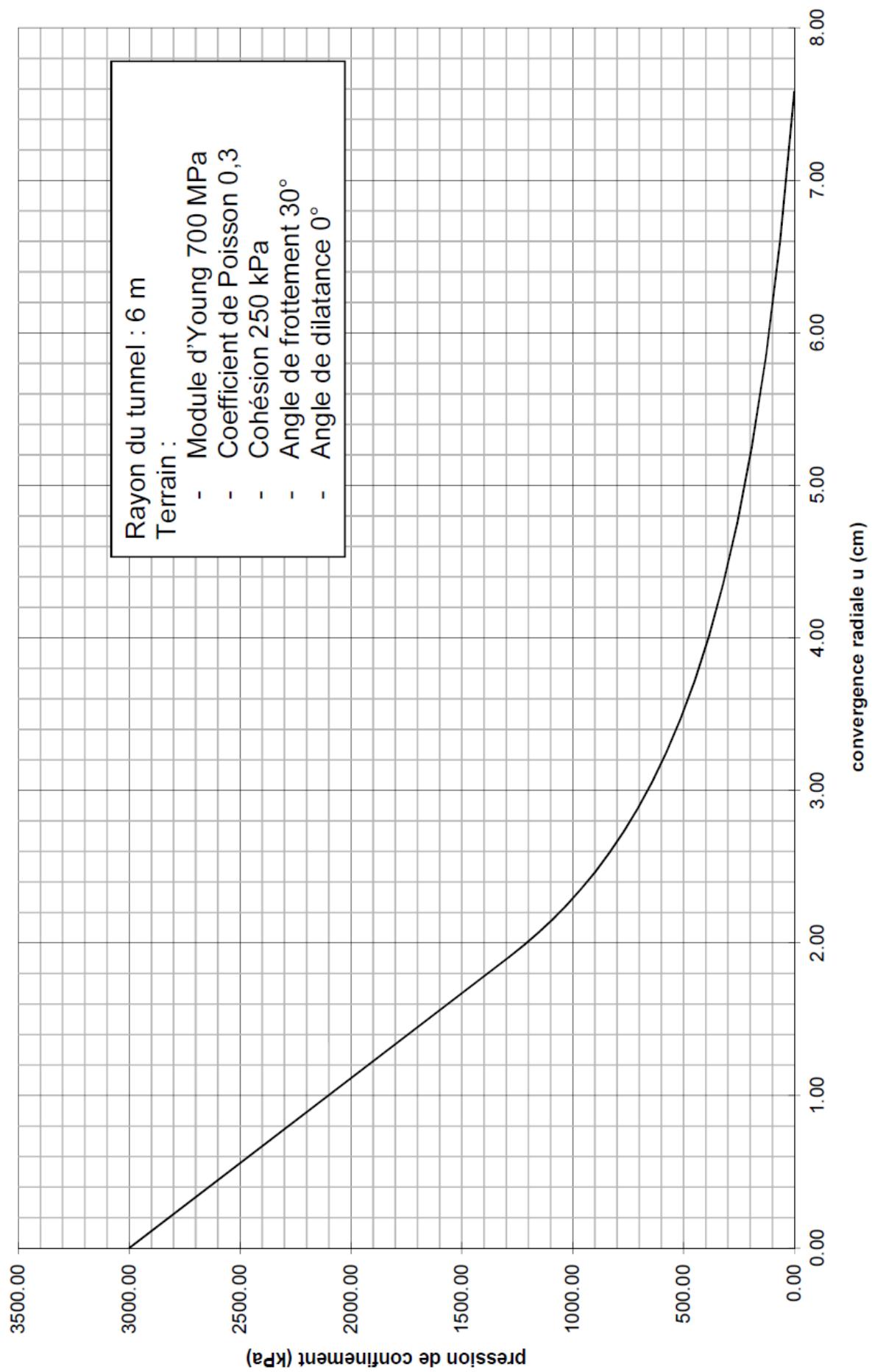
Enoncé :

soit un tunnel, d'un rayon d'excavation de 6 m, à creuser sous 150 m de couverture. La ligne caractéristique représentative du comportement en convergence – confinement du terrain encaissant en conditions drainées est donnée par la figure1. Le chantier prévoit un creusement conventionnel. On se propose de justifier le soutènement de première phase et le revêtement définitif du tunnel. Le soutènement utilisé a les caractéristique suivante : Béton projeté : épaisseur totale 20 cm, $E = 12000 \text{ MPa}$; $\nu = 0.2$.

Questions :

1. Quelles sont les contraintes radiales σ_r et orthoradielles σ_θ avant et après creusement du tunnel au niveau du front de taille ?
2. Déterminer graphiquement et par le calcul la convergence radiale maximale élastique en tunnel non soutenu. Déduire le rapport d'homothétie entre la convergence élastique et la convergence plastique.
3. Sachant que le taux de déconfinement lors de la mise en place du soutènement est 0.6, calculer la distance de pose par rapport au front de taille, en appliquant le principe de similitude.
4. Calculer la convergence du terrain et la pression fictive à la pose du soutènement.
5. En déterminant graphiquement le point d'équilibre, déterminer la convergence et la pression de soutènement correspondantes. Justifier la contrainte dans le soutènement, sachant que la contrainte admissible du béton projeté est 12 MPa.
6. Le revêtement définitif constitué de béton coffré sera réalisé à grande distance du front. Dans le cas où le revêtement serait étanche, la hauteur d'eau atteindrait 100 m. Déterminer dans ce cas l'épaisseur minimale du revêtement pour que la contrainte moyenne dans le béton n'excède pas 15 MPa. Justifier votre réponse.

$$\lambda(x) = 1 - 0,75 \cdot \left[\frac{1}{1 + \frac{4}{3} \cdot \frac{x}{R}} \right]^2$$



Calcul d'un tunnel avec creusement à l'explosif

Enoncé :

soit un tunnel, d'un rayon d'excavation de 6 m, à creuser sous 220 m de couverture. La ligne caractéristique représentative du comportement en convergence – confinement du terrain encaissant est donnée par la figure1, qui correspond à $E = 1000 \text{ MPa}$, $\nu = 0.3$, $c = 400 \text{ kPa}$, $\phi = 30^\circ$.

Le chantier prévoit un creusement à l'explosif par passes de 2.5 m. la durée du cycle de creusement et de soutènement est estimé à 13h (soit une vitesse moyenne d'avancement de 4 m par jour).

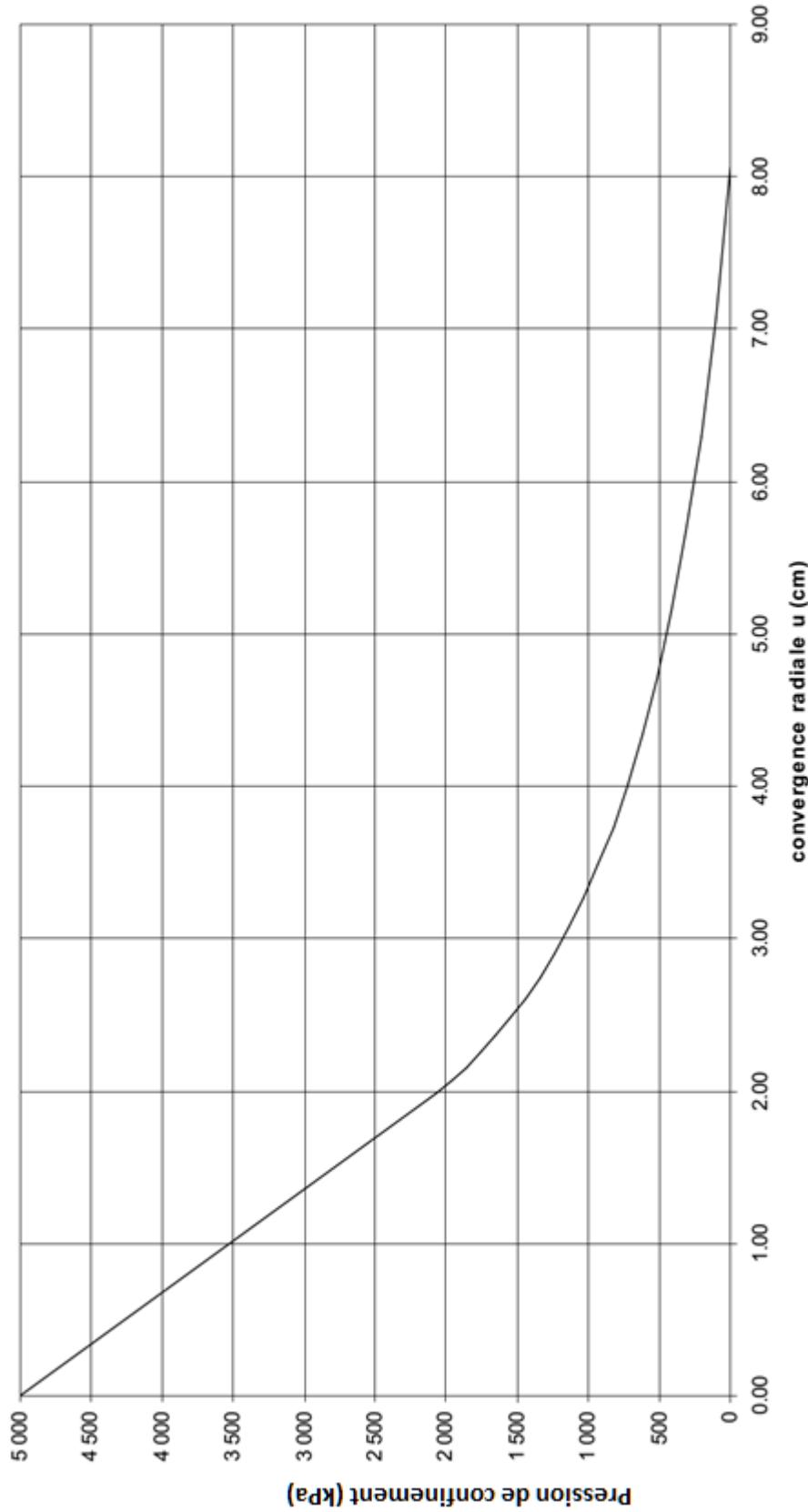
Le soutènement utilisé a les caractéristique suivante :

- Béton projeté : épaisseur totale 20 cm, $E = 12000 \text{ MPa}$; $\nu = 0.2$; contrainte admissible 12MPa.
- Cintre HEA 200 tous les 2 m : aire de la section du profilé 53.8 cm^2 , contrainte maximale admissible 250 MPa, $E = 200 \text{ GPa}$

Questions :

1. La stabilité d'une excavation souterraine est liée à un phénomène naturel de réarrangement des contraintes nommé effet de voûte. Expliquer ce phénomène.
2. Déterminer graphiquement et par le calcul la convergence radiale maximale élastique en tunnel non soutenu
3. Déduire le rapport d'homothétie entre la convergence élastique et la convergence plastique dans le cas du tunnel non revêtu.
4. Calculer le déconfinement au décousus maximal en appliquant le principe de similitude.
5. Déterminer la convergence et la pression de soutènement à l'équilibre(en déterminant graphiquement le point d'équilibre).
6. Le revêtement définitif constitué de béton coffré sera réalisé à grande distance du front. Dans le cas où le revêtement serait étanche, la hauteur d'eau atteindrait 150 m. Déterminer dans ce cas l'épaisseur minimale du revêtement pour que la contrainte moyenne dans le béton n'excède pas 13 MPa.

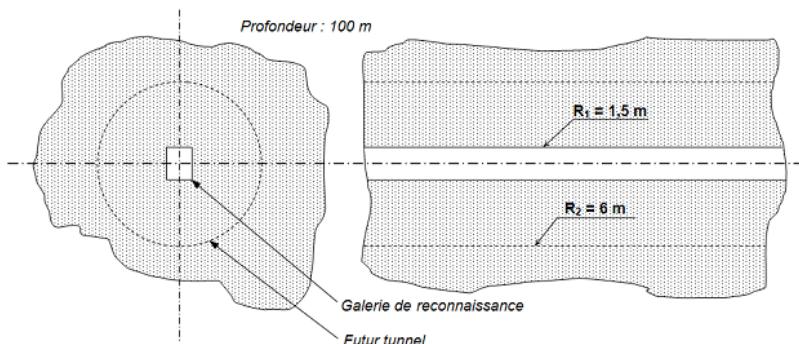
$$\lambda(x) = 1 - 0,75 \cdot \left[\frac{1}{1 + \frac{4}{3} \cdot \frac{x}{R}} \right]^2$$



Calcul d'un tunnel avec galerie de reconnaissance

Enoncé :

On se place dans le cas d'une portion de tunnel routier à projeter sous une hauteur de couverture constante de 100 m dans une géologie homogène (poids volumique du terrain : 20 kN/m³). Afin de mieux connaître le comportement mécanique des terrains à traverser, une galerie de reconnaissance de diamètre plus petit que le futur tunnel a été creusée (galerie pilote). Des reconnaissances antérieures par sondages carottés ont montré que les paramètres élastoplastiques du terrain sont les suivants : $v = 0,3$ $c = 1250 \text{ kPa}$ $\varphi = 30^\circ$.



Partie 1 : Galerie de reconnaissance

La galerie excavée a une section rectangulaire. Pour se placer dans les hypothèses de la méthode convergence-confinement, on a calculé un rayon équivalent $R_1 = 1,5 \text{ m}$. La profondeur h est constante et égale à 100 m. Dans la portion étudiée, la galerie a été creusée alors qu'aucun soutènement n'a été mis en place. Des mesures de convergences ont été réalisées dans cette galerie pour une section donnée. On suppose que la première mesure a été réalisée au front de taille et que la dernière mesure a eu lieu alors que le front de taille est très éloigné par rapport à la section de mesure. Les dernières mesures montrent que le déplacement radial de la paroi est stabilisé depuis un certain temps. La convergence (c'est-à-dire le double du déplacement radial de la paroi) obtenue entre la première mesure et la dernière mesure est égale à 8,15 mm.

- 1) Montrer que le terrain reste élastique lorsque le front est très éloigné de la section considérée.
- 2) Calculer le taux de déconfinement au moment où la première mesure de convergence est effectuée.
- 3) Calculer le module d'Young E du terrain à partir des résultats des mesures de convergences.

Partie 2 : Dimensionnement du soutènement à mettre en œuvre dans le futur tunnel

Compte tenu des conclusions de l'analyse précédente, on retiendra une valeur de module d'Young E_s du massif de 700 MPa. Les valeurs des autres paramètres du terrain sont celles données dans la première partie. On désire dimensionner le soutènement à mettre en place dans le futur tunnel. Le rayon R_2 du futur tunnel est égal à 6 m (voir Figure). La profondeur h est supposée être la même que pour la galerie pilote.

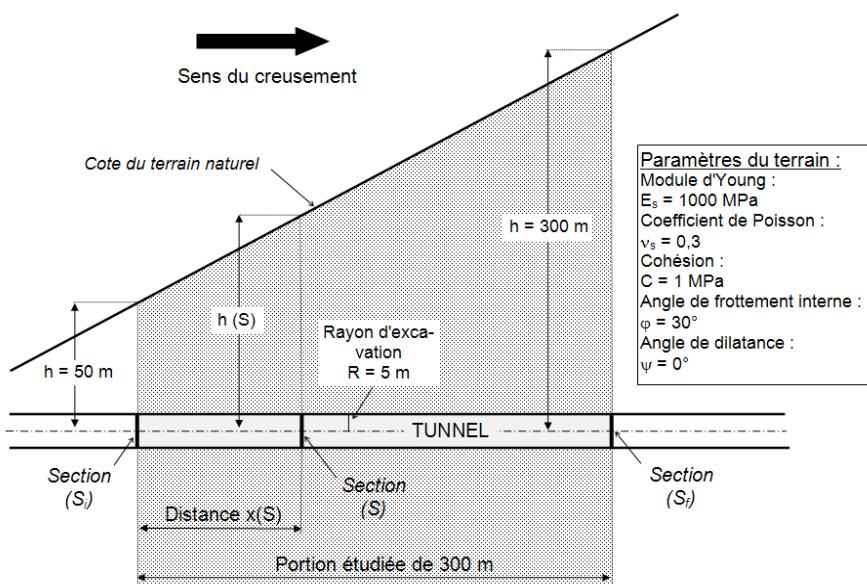
1. Courbe de convergence du massif
 - (a) Peut-on attendre une plastification dans le massif au cours des travaux ?
 - (b) Tracer la courbe de convergence en précisant la valeur du déplacement final que l'on obtiendrait s'il n'y avait pas de soutènement.
2. Courbe de confinement du soutènement
Le soutènement est constitué d'une coque en béton projeté. Ses caractéristiques sont les suivantes :
 $E_b = 10000 \text{ MPa}$; $v_b = 0,2$; Epaisseur : $e = 10 \text{ cm}$; Contrainte maximale admissible $\sigma_{\max} = 20 \text{ MPa}$
 - a) On suppose que la distance de pose du soutènement est égale à 1m. Calculer le taux de déconfinement λ_d à la pose du soutènement. Donner ensuite la valeur du déplacement du terrain u_d à la pose du soutènement en précisant clairement la démarche.
 - b) Tracer la courbe de confinement en précisant la valeur du module de rigidité K_s du soutènement.
3. Recherche de l'équilibre
 - a) Quel est le déplacement théorique du terrain u_{eq} à l'équilibre ?
 - b) Quel est la contrainte σ_s supportée par le soutènement à l'équilibre ?
 - c) Que peut-on conclure concernant le soutènement prévu ?

Calcul d'un tunnel routier à hauteur de couverture variable

On se place dans le cas d'une portion de tunnel routier à projeter de longueur 300 m pour laquelle la hauteur de couverture h varie selon le schéma indiqué Fig. 1. On désire dimensionner le soutènement lors du creusement du tunnel. L'excavation est supposée circulaire de rayon R égal à 5 mètres et creusé dans le sens d'une augmentation de la hauteur de couverture. Le terrain est homogène dans la portion considérée et possède un comportement élastoplastique parfait dont les paramètres sont donnés en Figure 1. On supposera que la méthode convergence-confinement est valable.

On s'intéresse dans cette partie à la section (S_i) de la portion dont la hauteur de couverture est minimale.

- 1) Sachant que le poids volumique du terrain est égal à $0,025 \text{ MN/m}^3$, calculer la pression initiale P du terrain avant creusement pour la section (S_i).
- 2) Y a-t-il apparition de la plasticité dans le terrain pour la section (S_i) ?
- 3) Quelle est la valeur finale du déplacement de la paroi au cas où aucun soutènement n'est mis en place ?
- 4) Tracer la courbe de convergence du massif pour la section (S_i).
- 5) On décide de mettre en œuvre en (S_i) un soutènement à base de béton projeté dont les caractéristiques sont les suivantes :
 - Module d'Young $E_b = 10\,000 \text{ MPa}$
 - Coefficient de Poisson $v_b = 0,2$
 - Contrainte maximale de compression admissible $\sigma_{\max} = 20 \text{ MPa}$
 L'épaisseur choisie (e) est de 20 cm et la distance de pose (d) du soutènement par rapport au front de taille est de 1,5 m.
 - a) Calculer le taux de déconfinement λ_d à la pose du soutènement.
 - b) Calculer la pression fictive P_{id} à la pose du soutènement.
 - c) Quel est le déplacement u_d du terrain à la pose du soutènement ?
 - d) Tracer la courbe de confinement.
- 6) On recherche les valeurs atteintes à l'équilibre :
 - a) Quelle est la valeur du déplacement de la paroi à l'équilibre ?
 - b) Quelle est la valeur du taux de déconfinement à l'équilibre ?
 - c) Quel pourcentage de la contrainte maximale admissible σ_{\max} a-t-on mobilisé à l'équilibre ?
 - d) Que peut-on conclure sur l'épaisseur de soutènement choisie pour la section (S_i) ?
- 7) A partir de quelle distance (x) du début de la portion étudiée (voir Figure 1) y aura-t-il apparition de la plasticité dans le terrain ?



Application sur le confinement du front de taille

Exercice 1 :

Soit un tunnel routier à réaliser, à l'aide d'un tunnelier, sous une hauteur de couverture constante de 150 m dans une géologie homogène (poids volumique du terrain : 22 kN/m³). Des reconnaissances in-situ ont montré que les paramètres élasto-plastiques du terrain sont les suivants : $E = 100 \text{ MPa}$ $\nu = 0,3$ $c = 300 \text{ kPa}$ $\phi = 30^\circ$. Le tunnelier utilisé permette de fonctionner en mode confiné à confinement de pression de terre.

Quelle est la pression de confinement minimale que le tunnelier doit appliquer sur le front de taille afin que le comportement du massif au cours des travaux reste dans le domaine élastique ?

Exercice 2 :

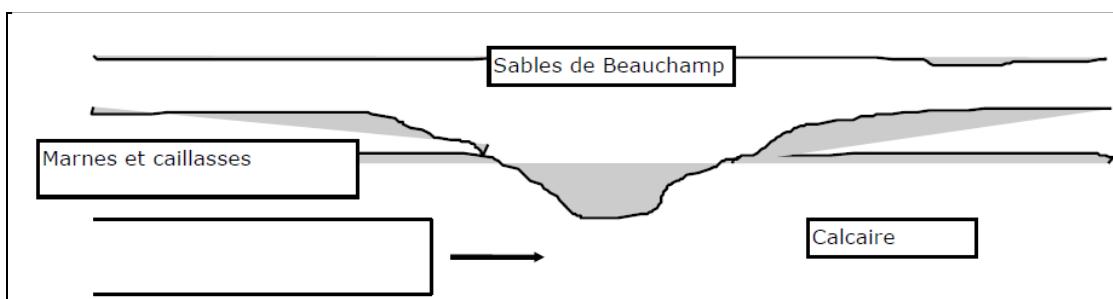
Soit un tunnel routier à réaliser, à l'aide d'un tunnelier, sous une hauteur de couverture constante de 100 m dans une géologie homogène (poids volumique du terrain : 20 kN/m³). Des reconnaissances antérieures par sondages carottés ont montré que les paramètres élastoplastiques du terrain sont les suivants : $\nu = 0,3$ $c = 250 \text{ kPa}$ $\phi = 30^\circ$. Le tunnelier utilisé permette de fonctionner en mode confiné (à confinement de pression de terre) avec une pression de confinement maximale de 350 kPa sur le front de taille devant la roue de coupe.

- Peut-on attendre une plastification dans le massif au cours des travaux ?

Exercice 3 :

D'après le schéma suivant: Le creusement se fait dans une couche dure choisie parce qu'elle est résistante et imperméable. Le tracé du tunnel est confronté à l'abaissement brutal ou progressif du contact entre la couche dure et le terrain meuble sus-jacent.

- a. Quel est le type de tunnelier concerné ?
- b. Quel est le traitement possible de l'incident ?

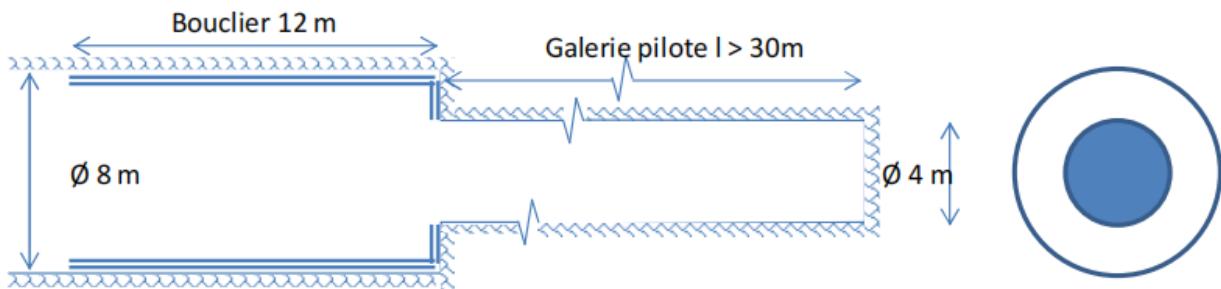


Creusement d'un tunnel profond à l'abri d'un tunnelier ouvert

La pratique consistant à précéder l'excavation d'un tunnel en grande section par une galerie pilote de plus petite section présente un certain nombre d'avantages en termes de reconnaissance des terrains et de contrôle des convergences, qu'on va illustrer dans l'exemple ci-après.

On considère le cas d'un tunnel profond (couverture 500m, densité moyenne du rocher 2,3). Le tunnel à creuser présente un diamètre d'excavation de 8 m. L'excavation est prévue à l'abri d'un bouclier de 12 m de longueur (tunnelier ouvert).

L'excavation en grande section sera précédée de l'excavation, sur le même axe, d'une galerie pilote de 4m de diamètre. Le front de la galerie-pilote aura au moins 30 m d'avance par rapport au front d'excavation en grande section. On ne prévoit pas la mise en œuvre de soutènement résistant.



- 1) Dans une section transversale donnée de la galerie pilote, à l'avant de l'excavation en grand diamètre, on observe entre une mesure réalisée alors que le front de taille est très proche de cette section et une mesure réalisée alors que le front de taille s'en est éloigné de 20 m, une convergence radiale de 3 cm. En supposant un comportement élastique du terrain (coefficient de Poisson 0,2), quel module d'élasticité du terrain peut-on déduire de cette mesure ?
 - 2) Déduire de l'évolution de l'état de contraintes dans le terrain encaissant autour de la galerie pilote l'effet de déconfinement de terrain anticipé par la présence de la galerie pilote pour le creusement en grande section.
 - 3) En faisant l'hypothèse que ce taux de déconfinement anticipé s'ajoute au déconfinement au front de l'excavation en grande section qu'on aurait eu sans galerie pilote, en déduire la valeur de la surcoupe qu'il conviendra de donner à l'excavation au tunnelier afin d'éviter tout coincement du bouclier. Quelle aurait été cette valeur en l'absence de galerie pilote ?
- On admet que le taux de déconfinement anticipé par la galerie pilote modifie la loi de variation du déconfinement du terrain non soutenu de la manière suivante :

$$\lambda(x) = 1 - \frac{(1-\lambda_{front})}{\left(1 + \frac{4x}{3r}\right)^2}$$

- 4) Quelle est la résistance minimale à la compression simple que le massif doit présenter afin que son comportement reste dans le domaine élastique ?

Calcul d'un tunnel bitube au tunnelier

Le projet :

- Diamètre intérieur des deux tubes : 6,20 m
- Revêtement en voussoirs préfabriqués : épaisseur 30 cm, $E = 10000 \text{ MPa}$, $\nu = 0,20$
- Distance entre axes des tubes : 18 m

Le contexte géotechnique :

- Contrainte géostatique moyenne 800 kPa, tunnel hors nappe
- Module d'Young 150 MPa, coefficient de Poisson 0,30, cohésion 140 kPa, angle de frottement 30°
- Le terrain présente des propriétés de plastification telles que le facteur de similitude vaut 0,714.

Le tunnelier :

- Tunnelier à confinement de pression de terre, permettant de fonctionner en mode ouvert et en mode confiné avec une pression de confinement maximale de 350 kPa. Un dispositif spécifique permet d'appliquer cette pression de confinement, non seulement sur le front de taille devant la roue de coupe, mais également en périphérie de l'ensemble de la jupe.
- Longueur de la jupe à l'arrière de la roue de coupe : 8 m
- Le vide annulaire créé par le tunnelier autour des voussoirs, présente une épaisseur 15 cm, et est rempli par un matériau incompressible immédiatement à l'arrière de la jupe, établissant ainsi un contact total avec le terrain encaissant.

Question 1 – Calculs préliminaires

- 1.1 Déterminer, à partir du diamètre intérieur des deux tubes, le diamètre de l'excavation.
- 1.2 Calculer la convergence radiale maximale élastique en tunnel non soutenu
- 1.3 Calculer la contrainte du terrain à la limite du domaine élastique σ_e
- 1.4 Calculer la convergence au niveau du front de taille, en mode ouvert
- 1.5 Calculer la convergence à l'extrémité de la jupe, en l'absence de confinement du TBM
- 1.6 Déterminer graphiquement la convergence pour un confinement de 350 kPa

Question 2 – Surcoupe

- 2.1 Pour éviter le coincement du tunnelier en mode ouvert, déterminer la valeur minimale de la surcoupe
- 2.2 Quelle en serait la valeur, en se donnant un coefficient de sécurité de 1.5 par rapport à la valeur calculée ?

Question 3 – Contraintes dans les voussoirs

- Dès la sortie de la jupe, les voussoirs commencent à assurer le rôle de soutènement du terrain excavé.
- 3.1 En mode confiné, déterminer la convergence et la pression de soutènement à l'équilibre (en déterminant graphiquement le point d'équilibre). Le déplacement du terrain à la pose des voussoirs est celui trouvé en 1.6
 - 3.2 Quel est le mode de confinement qui induit les contraintes de compression les plus importantes dans les anneaux de voussoirs ?
 - 3.3 Déterminer la valeur de cette compression à l'équilibre.

Question 4 – Interdistance entre tubes

Que pensez-vous de l'interdistance entre axes de 18m ?

Dans le cas où cette interdistance devrait être réduite, quelle serait l'incidence du mode de confinement sur les conditions de réalisation du tunnel ?

