# EXERCICES SUR LE CALCUL DES CONDUITES

## EXERCICE 1

Soit une conduite d'assainissement en béton armé, posée dans une tranchée, de diamètre extérieur D = 0.55 m et dont l'épaisseur de la paroi est de 0.05 m. La hauteur du remblai au-dessus de la clé du conduite H = 2.1 m. La largeur de la tranchée B = 1.1 m. Le remblai est un sable argileux compacté contrôlé ayant une densité $\Delta = 17.652$ kN/m$^3$ et un angle de frottement interne $\varphi = 15°$. Le module instantané et le coefficient de poisson du béton ont pour valeurs : $E_{Ti} = 40000$ MPa, $\nu_T = 0.2$ (voir tableau A4).

Déterminer la pression verticale du remblai sur la conduite

par la méthode de Marston et la méthode du fascicule 70

## EXERCICE 2

Soit une conduite d'assainissement en béton non armé, posée dans une tranchée, de diamètre extérieur D = 0.28 m et dont l'épaisseur de la paroi est de 0.03m. La hauteur du remblai au-dessus de la clé de la conduite H = 2.8 m. La largeur de la tranchée B = 1 m. Le remblai est constitué par de la terre glaise compacté et contrôlé ayant une densité $\Delta = 20.594$ kN/m$^3$ et un angle de frottement interne $\varphi = 22°$. Le rapport de projection p = 0.93.

Déterminer la pression verticale du remblai sur la conduite.

## EXERCICE 3

Soit une conduite d'assainissement en béton armé, posée dans un remblai indéfini, de diamètre extérieur D = 0.65 m et dont l'épaisseur de la paroi est de 0.05 m. La hauteur du remblai au-dessus de la clé du conduite H = 1.6 m. Le remblai est constitué par de la terre glaise ayant une densité $\Delta = 20.594$ kN/m$^3$ et un angle de frottement interne $\varphi = 22°$. Le sol de fondation est de la terre meuble ordinaire dont le taux de tassement r est estimé à 0.5. Le rapport de projection p = 0.85.

Déterminer la pression verticale du remblai sur la conduite.

## EXERCICE 4

Soit une conduite d'assainissement en PVC, posée dans une tranchée, de diamètre extérieur D = 0.25 m et dont l'épaisseur de la paroi est de 0.008 m. La hauteur du remblai au-dessus de la clé du conduite H = 2.5 m. La largeur de la tranchée B = 0.55 m. Le remblai est constitué d'un sable compacté contrôlé ayant une densité $\Delta = 18$ kN/m$^3$ et un angle de frottement interne $\varphi = 25°$. Le module instantané et le coefficient de poisson du matériau de la conduite ont pour valeurs : $E_{Ti} = 3000$ MPa (voir tableau A5) et $\nu_T = 0.39$.

Déterminer la pression verticale du remblai sur la conduite.

## EXERCICE 5

Soit une conduite d'assainissement en béton armé, posée dans une tranchée sous un remblai indéfini, de diamètre extérieur D = 0.97 m et dont l'épaisseur de la paroi e = 0.07 m. La hauteur du remblai au-dessus de la clé du conduite et jusqu'au niveau du terrain naturel H = 1.8 m. La hauteur du remblai indéfini h'= 0.75 m. La largeur de la tranchée B = 1.50 m. Le remblai est constitué d'argile limoneuse ayant une densité $\Delta = 19.613$ kN/m$^3$ et un angle de frottement interne $\varphi = 20°$. On admet que le taux de tassement r = - 0.3.

Déterminer la pression verticale du remblai sur la conduite.

On utilise la méthode de Marston.

## EXERCICE 6

Soit deux conduites d'assainissement posées dans une même tranchée au même niveau. Les données suivantes sont conformes avec les notations de la figure 2.18.
Données :
1) $D_1 = 0.68$ m; $D_2 = 0.63$ m
2) $B_1 = 1.2$ m; $B_2 = 0.9$ m; $B_c = 1.0$ m
3) $H_1 = 1.9$ m ; $H_2 = 2.35$m
4) Remblai sableux, $\varphi = 31°$ et$\Delta = 16.671$ kN/m$^3$. Le rapport de projection p = 0.9.

Déterminer à l'aide de la méthode de Marston et les recommandations des normes iso 2785 la pression verticale du remblai agissant sur les deux conduites.

## EXERCICE 7

Soit deux conduites d'assainissement posées dans une même tranchée situées à des niveaux différents. Les données suivantes sont conformes avec les notations de la figure 2.19.
Données :
1) $D_1 = 0.45$ m; $D_2 = 0.29$ m
2) $B_1 = 1$ m; $B_2 = 0.7$ m; $B_c = 0.75$ m
3) $H_1 = 1.8$ m ; $H_2 = 2.82$ m; y = 0.6 m
4) Remblai sableux, $\varphi = 31°$ $\Delta = 16.671$ kN/m$^3$. Le rapport de projection p = 0.9.

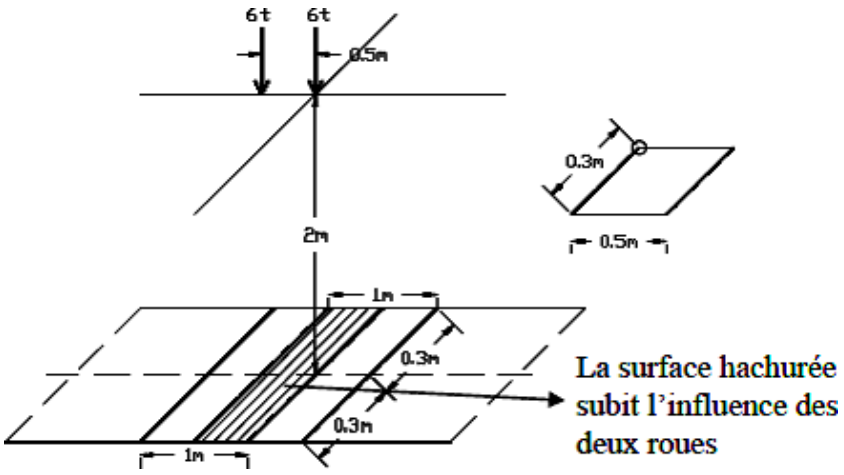
Déterminer la pression verticale du remblai agissant sur les deux conduites.

Nous sommes en présence du cas où la différence des deux niveaux du fond de la tranchée est supérieure à 30 cm.

## EXERCICE 8

Soit une conduite d'assainissement ayant un diamètre intérieur Di=0.5m et une épaisseur e =0.05 m, posée dans une tranchée de largeur 0.86 m sous chaussée. Les tronçons de tuyaux ont une longueur égale à 3m. Le remblai sableux a une épaisseur H = 2 m Les surcharges de surface considérées sont celles des camions $B_c$.

Déterminer à l'aide de la norme iso 2785 la pression agissant sur la conduite due aux surcharges du système $B_c$.

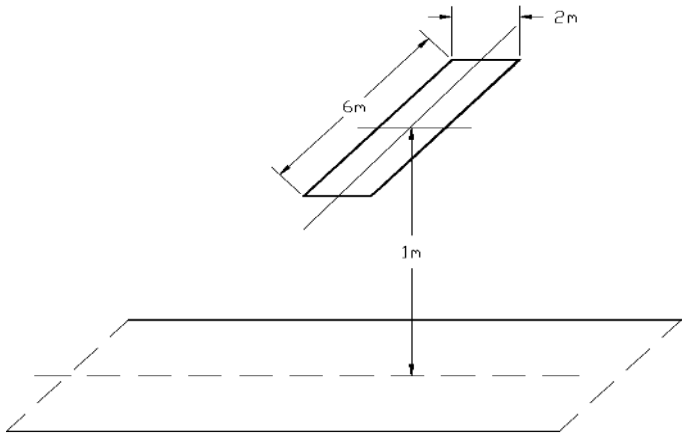



## EXERCICE 9

Soit une conduite d'assainissement de diamètre intérieur Di = 1.2 m et d'épaisseur e = 0.085 m, posée sous voie ferré. La clé étant placée à 1 m sous les traverses dans un remblai argileux indéfini. La surcharge de surface considérée est un wagon roulant sur quatre essieux portant chacun une masse de 245 kN et espacées de 2 m (convoi UIC). Les traverses ont une longueur égale à 2 m.

Déterminer à l'aide de la norme iso 2785 la pression due aux surcharges ferroviaires.

La surface d'application de la charge est 2 x 6 $m^2$. 6 m étant la longueur occupée par les essieux et 2 m est la longueur des traverses.



# Calcul des contraintes et déformations au voisinages d'un tunnel

**Enoncee**

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 kN/m3 ; $\nu$ = 0.25 ; $E$ = 1400 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 $\sigma_r$ et orthoradiales $\sigma_\theta$ avant creusement ?
2) Quelles sont les contraintes $\sigma_r$ et $\sigma_\theta$ après creusement aux points *A*, *B* et *C* :
   - $X_A$ = -10 m (en avant du front de taille) ;
   - $X_B$ = 0 m (au front de taille) ;
   - $X_C$ = +20 m (en arrière du front de taille).
3) Tracer la répartition des contraintes $\sigma_r$ et $\sigma_\theta$ 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.

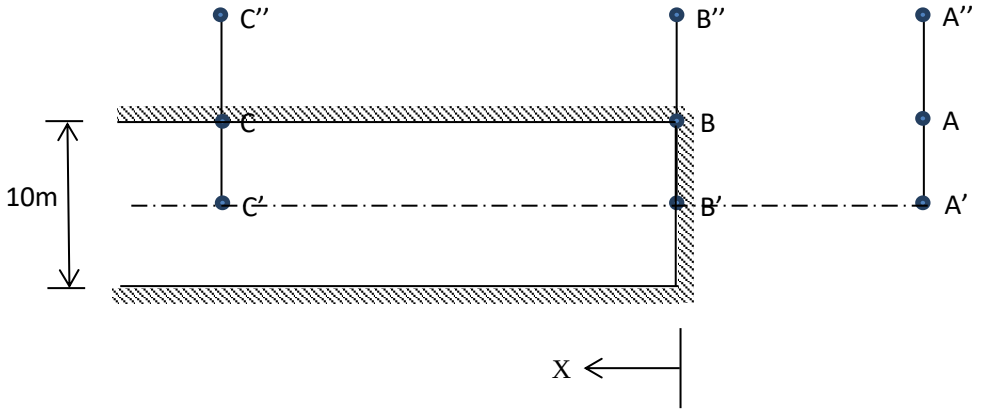



**Figure 1.** Définition de la géométrie du tunnel et des coupes de calculs

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

# 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 MPa  = 0,3  c = 300 kPa  φ = 30°. 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/m$^3$). Des reconnaissances antérieures par sondages carottés ont montré que les paramètres élastoplastiques du terrain sont les suivants : ν = 0,3  c = 250 kPa  φ = 30°. 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.

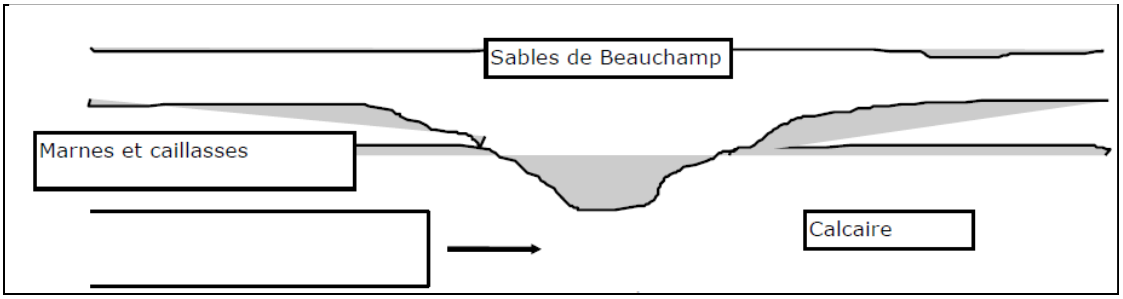
- Peut-on attendre une plastification dans le massif au cours des travaux ?

## 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 ?



# Calcul d'un portion de tunnel routier par la méthode convergence-confinement

**Énoncé:**

Soit une portion d'un tunnel routier ayant un rayon R = 5m et une couverture h variable. On supposera que la méthode convergence-confinement est valable.

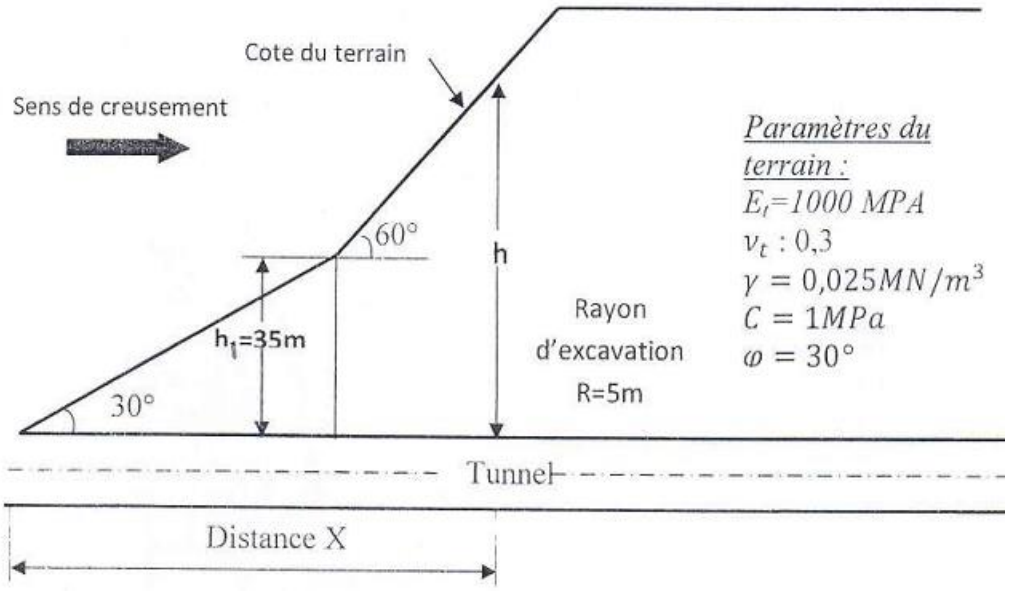



Fig.1 : portion de tunnel routier

1. Pour quelle distance x, il y a risque d'instabilité du terrain.

Pour ce qui suit, on prend la hauteur de la couverture h =150 m

2. Tracer la courbe de convergence du terrain sachant que le déplacement final $u_\infty = 2\, u_{\infty élast}$. Pour cela il faut calculer:
    a) Le déplacement à l'apparition de la plasticité
    b) La pression à l'apparition de la plasticité
3. On choisit comme soutènement des cintres métalliques calés dont les caractéristiques sont les suivants: section du cintre S = 300 $cm^2$ ; espacement e = 3m ; $\sigma_{amax}$ = 400 MPa ; Ea = 200 GPa.
    a) Calculer la rigidité du soutènement
    b) Calculer le déplacement à la pose du soutènement, sachant que le soutènement est placé à 0.5 m du front de taille
    c) Tracer la courbe de confinement
    d) Calculer la pression maximale que peut supporter les cintres.
4. Que peut-on constater ?

# TD sur les aspects de dimensionnement
# Tunnel avec galerie pilote

**Enoncé :**

On projette une section de tunnel routier sous une hauteur de couverture de 150 m dans une géologiehomogène (poids volumique du terrain : 20 kN/m$^3$).
La section d'excavation projetée est assez bien représentée par une section circulaire de 12 m dediamètre.

La ligne caractéristique du terrain dans le diagramme classique convergence-confinement établie sur la base de ces valeurs et pour le cas d'un tunnel de 6 m de rayon est donnée en annexe. Elle présente notamment un rapport de similitude (rapport de la convergence en élastique à la convergence plastique en déconfinement total) :

$$\xi = \frac{u_{\infty el}}{u_{\infty pl}} = \frac{1}{2.27}$$

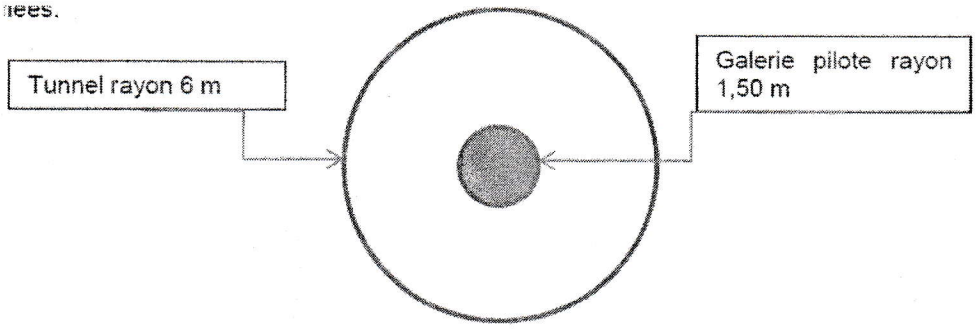
***Question 1 : Galerie pilote***

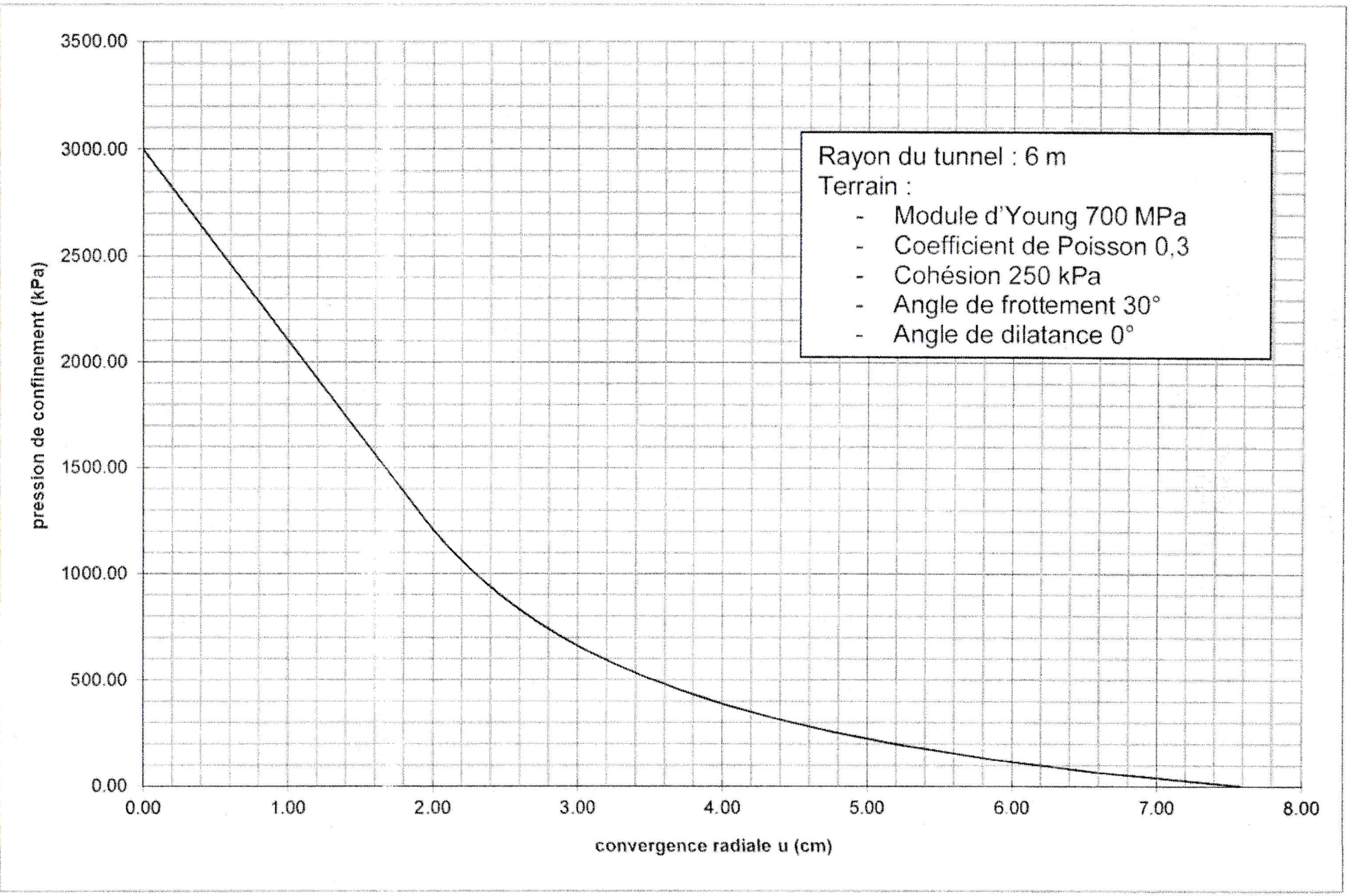
Afin de s'assurer du comportement du terrain en place, avant de lancer l'excavation en grande section, il a été réalisé une galerie de petit diamètre (galerie pilote) dans l'axe du futur tunnel. Cette galerie présente un diamètre équivalent de 3 m. Elle ne présente pas de soutènement, mais une simple projection de béton pour éviter l'altération du terrain et procurer une sécurité minimum. Des mesures de convergences ont été faites dans un certain nombre de sections. Dans chaque section de mesure, une première mesure a été réalisée au front de taille, puis régulièrement jusqu'à ce que le front de taille soit éloigné d'au moins 30 m.

Après avoir établi la ligne caractéristique du terrain dans le cas de cette galerie pilote à partir de celle qui est fournie en annexe pour le tunnel de 6 m de rayon, déterminer quelle valeur maximale de convergence diamétrale doit être mesurée pour qu'on puisse en conclure que les hypothèses du calcul sont vérifiées.

***Question 2 : Soutènement à mettre en œuvre dans le futur tunnel***

Les caractéristiques du terrain encaissant ayant été vérifiées grâce aux mesures effectuées dans la galerie pilote, on procède au dimensionnement du soutènement à mettre en œuvre dans le tunnel. Les dimensions importantes du tunnel justifient, pour des raisons de sécurité, que ce soutènement soit placé assez près du front de taille, à une distance d'au plus 1 m.
Le choix se porte sur un soutènement constitué de cintres HEB 180 (section : 65,3 cm²) espacés de 1 m et de béton projeté entre les cintres sur toute leur hauteur.
En tenant compte d'un module d'Young du béton projeté de 10 000 MPa, déterminer graphiquement le point d'équilibre du tunnel soutenu et en déduire les contraintes attendues à l'équilibre dans les deux matériaux constitutifs.




Rayon du tunnel : 6 m
Terrain :
- Module d'Young 700 MPa
- Coefficient de Poisson 0,3
- Cohésion 250 kPa
- Angle de frottement 30°
- Angle de dilatance 0°
pression de confinement (kPa)
3500.00
3000.00
2500.00
2000.00
1500.00
1000.00
500.00
0.00
0.00
1.00
2.00
3.00
4.00
5.00
6.00
7.00
8.00
convergence radiale u (cm)

# Soutènement et revêtement d'un tunnel profond dans une zone de roche très fracturée

## Ennoncé

On se propose d'examiner le soutènement de première phase et le revêtement définitif d'un tunnel profond construit dans une zone de roche très fracturée.

Le terrain a un comportement homogène isotrope correctement représenté par les hypothèses classiques de la méthode convergence-confinement. Le tunnel présente une section quasi-circulaire de rayon équivalent 5,20 m.

La figure 1 fournit la ligne caractéristique du comportement du terrain en contraintes totales (c'est-à-dire en conditions drainées) au niveau du tunnel, dans le repère (convergence – pression de confinement). Pour mémoire, elle correspond à un module de 1100 MPa, un coefficient de Poisson de 0,3, une cohésion de 500 kPa, un angle de frottement de 30°, et une dilatance de 1, mais il n'est pas demandé de refaire les calculs. Ce terrain n'est pas sujet au fluage.
On déterminera autant que possible graphiquement les solutions aux questions suivantes :

a) soutènement

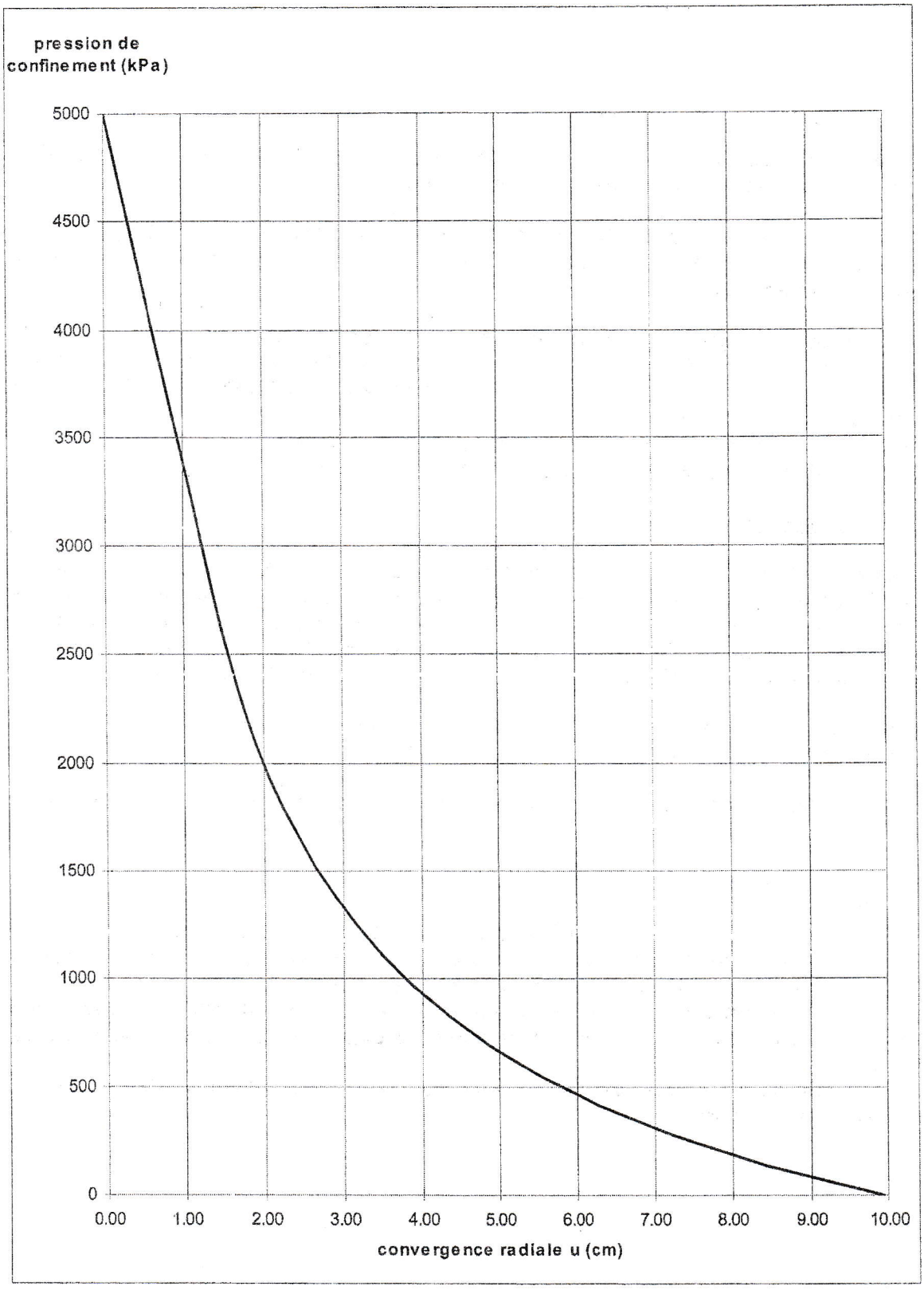
Le soutènement peut être posé à une distance de 2 mètres du front de taille. Il sera constitué :
- de boulons radiaux ; le boulonnage maximum envisageable consiste en boulons à scellement continu de 7 m de longueur (soit un point fictif d'ancrage à 3,50 m de la paroi) en barres HA25 avec un espacement mini de 1 m dans les deux directions (1 boulon par m² de paroi de tunnel) ;
- de cintres coulissants TH présentant une section de 44 cm², et dont l'espacement mini serait de 1 m
- de béton projeté, pour lequel on considérera un module de déformation de 10 000 MPa, et dont le taux de travail moyen maximum sera fixé à 7,5 MPa.

Déterminer l'épaisseur minimum de béton projeté permettant de respecter ce taux de travail maximum.

b) revêtement

Le revêtement définitif constitué de béton coffré sera réalisé à grande distance du front à l'abri d'une membrane d'étanchéité, tout en étant drainé. Par sécurité, on considère que le soutènement disparaît à long terme, le revêtement devant alors en prendre le relais.
Sachant que le module à long terme du revêtement est de 11 000 MPa, déterminer une épaisseur minimale de celui-ci pour que la contrainte moyenne dans le béton de ce revêtement n'excède pas 12,5 MPa.
Dans le cas où le revêtement serait étanche, la hauteur d'eau atteindrait 200 m. Quelles conséquences cela aurait-il ?

Figure 1 : Tunnel de Bussoleno – zones bréchiques



# Application sur le coincement de la jupe

## Données générales :

### Le projet :

- Tunnel circulaire de diamètre intérieur : 10,90 m
- Revêtement en voussoirs préfabriqués en béton armé : épaisseur 40 cm , module 10 000 MPa.

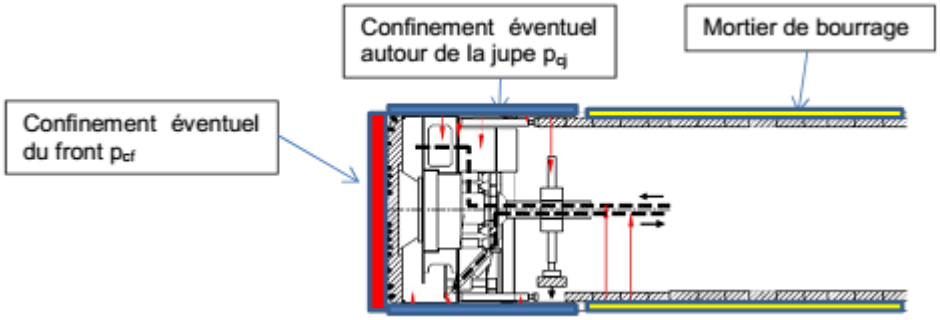
### Le contexte géotechnique :

- Axe du tunnel à 100 m de profondeur. Densité du terrain en place : 22 kN/m$^3$
- Hors nappe
- Module d'Young 500 MPa, coefficient de Poisson 0,30
- Critères de Mohr-Coulomb : cohésion 1200 kPa, angle de frottement 40°

Application des principes et hypothèses de la méthode convergence – confinement en approche manuelle, et du critère de plasticité de Mohr-Coulomb

### Le tunnelier :

- Tunnelier permettant de fonctionner en mode ouvert sans confinement, et en mode confiné. La roue de coupe est munie d'un outil de surcoupe (voir questions ci-après).
- La jupe est un cylindre d'acier de 100 mm d'épaisseur, de longueur 12 m.




## Question 1

1.1 Déterminer, à partir du diamètre intérieur du tunnel, le diamètre de l'excavation. On considérera que ce diamètre est égal au diamètre extérieur de la jupe (on ne tient pas compte de l'éventuelle surcoupe).

1.2 Établir la ligne caractéristique du terrain dans le diagramme convergence-confinement, après avoir vérifié qu'elle reste entièrement dans le domaine élastique.

## Question 2

Le tunnelier fonctionne en mode ouvert (pas de confinement du front). **La surcoupe est réglée à 20 mm.**

2.1 Montrer que le terrain entre en contact avec la jupe, en déterminant à partir de quelle distance au front ce contact se produit.

2.2 Déterminer, en recherchant le point d'équilibre de convergence du contact terrain / jupe, la pression exercée par le terrain sur la jupe sur la longueur où ce contact est établi.

2.3 Vérifier les contraintes normales générées par ce contact dans la jupe.

2.4 On fera l'hypothèse d'un coefficient de frottement du terrain sur la jupe $\mu = 0{,}35$. Déterminer la valeur de l'effort de frottement qui s'ajoute aux autres efforts que doivent exercer les vérins de poussée lors de l'excavation.

2.5 Le mortier de bourrage est injecté sans pression à l'arrière de la jupe pour remplir le vide annulaire entre le terrain et l'extrados des voussoirs, de façon à assurer un simple transfert de la pression exercée par le terrain. On assimilera les anneaux de voussoirs à des anneaux continus de 40 cm d'épaisseur. Calculer la convergence des voussoirs à l'équilibre et la contrainte moyenne de compression du béton de ceux-ci.

**Question 3**

Afin d'éviter le contact entre le terrain et la jupe, deux solutions sont envisagées :

3.1 Continuer à fonctionner en mode ouvert, mais en augmentant la valeur de la surcoupe. Déterminer la valeur théorique minimum de celle-ci.

3.2 Utiliser le fonctionnement en mode confiné, en gardant la même surcoupe de 20 mm :

On exerce une pression de confinement à front $p_{cf}$ = 400 kPa. On admet que l'introduction de cette pression modifie la loi de variation du déconfinement du terrain non soutenu :

- Le déconfinement au front répond à la relation :

$$\lambda_0 = 0{,}25 \times (1 - \frac{p_{cf}}{\sigma_0})$$

- La variation avec la distance au front s'exprime alors selon l'expression :

$$\lambda(x) = 1 - \frac{(1-\lambda_0)}{\left(1+\frac{4}{3}\frac{x}{R}\right)^2}$$

Faut-il ajouter une pression de confinement autour de la jupe $p_{cj}$ pour éviter le contact du terrain avec celle-ci ? Dans l'affirmative, quelle en est la valeur minimale ?