GCIV2036-2 : Convergence-confinement

Présentation des résultats

Arthur Fanara
Bérengère Franck

ULiège
Professeur : F. Collin
Assistant : G. Corman

7 mars 2019

Sommaire

Introduction

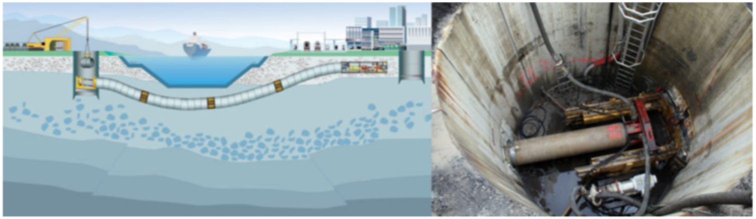


FIGURE – Fonçage et puis d'accès

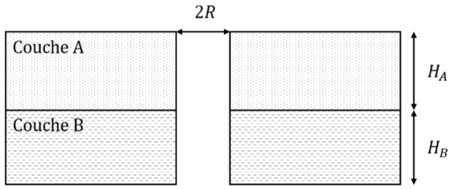


FIGURE – Coupe verticale simplifiée du massif au niveau du puits

Présentation de la méthode

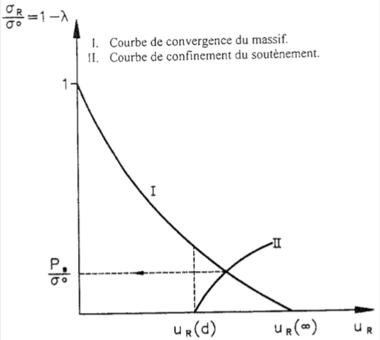
- Le déconfinement du massif s'accompagne d'un déplacement des points situés à l'intrados :

$$f_m(\sigma, u) = 0$$

- Le comportement mécanique du soutènement est décrit par la relation

$$f_s(\sigma, u) = 0$$

- La méthode de convergence-confinement décrit la relation entre le massif et le soutènement et l'équilibre est donné par l'intersection des courbe de convergence et de confinement, c'est-à-dire par la solution du système constitué des deux équations précédentes.



- Le moment auquel le soutènement est installé est important
- La méthode permet d'étudier le problème en 1D (simplification par rapport à une étude 3D)

Hypothèses de la méthode

- Matériau homogène et isotrope
- Champ de contraintes uniforme
- Conditions de symétrie de révolution
- Déformations planes dans le plan perpendiculaire à l'axe du puits
- Pas de variation de contraintes initiales

Présentation du problème

But : tracer

- le déplacement du massif u_R
- la distribution des contraintes σ_r et σ_θ
- les chemins de contraintes p-q et $\sigma_r - \sigma_\theta$
- les courbes caractéristiques du massif et du soutènement

Données

Données	Valeur	Unité
E_b	30	GPa
ν_b	0,2	-

Données	Valeur	Unité
$\gamma_{sat,sol}$	18	kN/m^3
H_s	7	m
H_A	20	m
H_B	30	m
E_A	150	MPa
E_B	800	MPa
ν_A	0,21	-
ν_B	0,26	-
c_A	**10**	kPa
c_B	100	kPa
ϕ_A	22	°
ϕ_B	27	°
ψ_A	3	°
ψ_B	4	°
$\gamma_{sat,A}$	23,5	kN/m^3
$\gamma_{sat,B}$	24	kN/m^3
K_{0A}	0,8	-
K_{0B}	1,05	-

Calcul de σ_0 pour chaque couche :

- $\sigma_{0A} = (\gamma_{sol} \cdot h_{sol} + \gamma_A \cdot h_A) \cdot K_{0A} = 476,8\ kPa$
- $\sigma_{0B} = (\gamma_{sol} \cdot h_{sol} + \gamma_A \cdot h_A + \gamma_B \cdot h_B) \cdot K_{0B} = 1381,8\ kPa$

Étude élastique

Déplacement radial : $u_r(r) = \lambda \frac{R^2}{r} \frac{\sigma_0}{2G}$ où $r \in [R; 3R]$ et $\lambda \in [0; 1]$

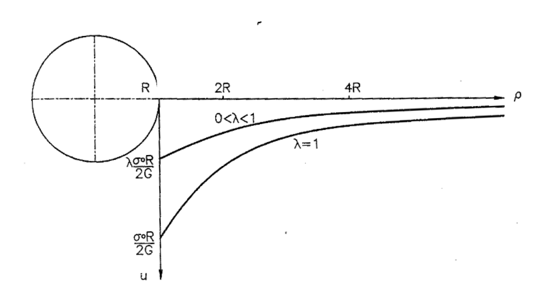
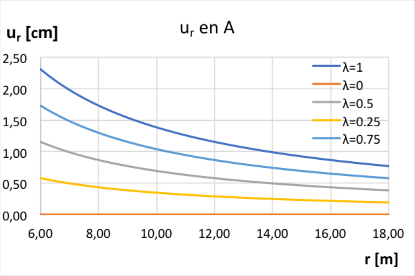


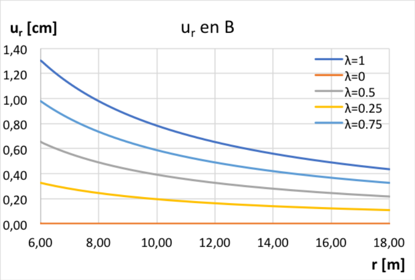
Figure – Solution théorique de la relation $u(r)$

Première composante de la courbe caractéristique du massif :

$$u_r(r = R) = \lambda \frac{\sigma_0 R}{2G}$$

DÉPLACEMENT DU MASSIF





- Plus λ est grand, plus le déplacement est grand
- Plusieurs valeurs de λ : effet du déconfinement dans chaque couche
  $\rightarrow$ la couche A est moins rigide

Contraintes radiales : $\sigma_r(r) = \left(1 - \lambda \frac{R^2}{r^2}\right) \sigma_0$

Contraintes orthogonales : $\sigma_\theta(r) = \left(1 + \lambda \frac{R^2}{r^2}\right) \sigma_0$

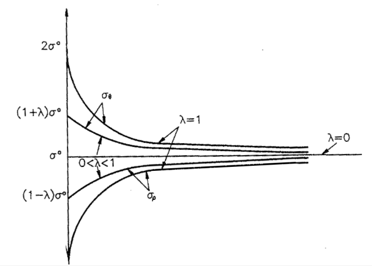
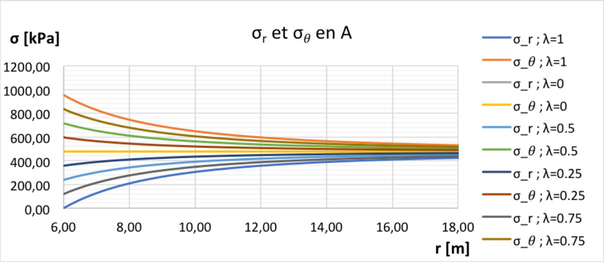


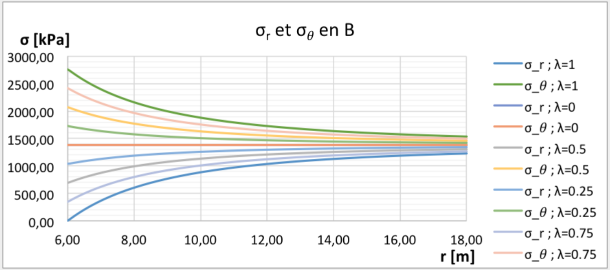
Figure – Solution théorique des relations $\sigma_r(r)$ et $\sigma_\theta(r)$

Deuxième composante de la courbe caractéristique du massif :

$$\sigma_r(r = R) = (1 - \lambda)\sigma_0$$

Distribution des contraintes





Chemins de contraintes $p - q$

$$\textbf{Contraintes moyennes :} \quad p = \frac{\sigma_r + \sigma_\theta}{2} = \sigma_0$$

$$\textbf{Contraintes déviatoriques :} \quad q = \sigma_\theta - \sigma_r = 2\lambda\sigma_0$$

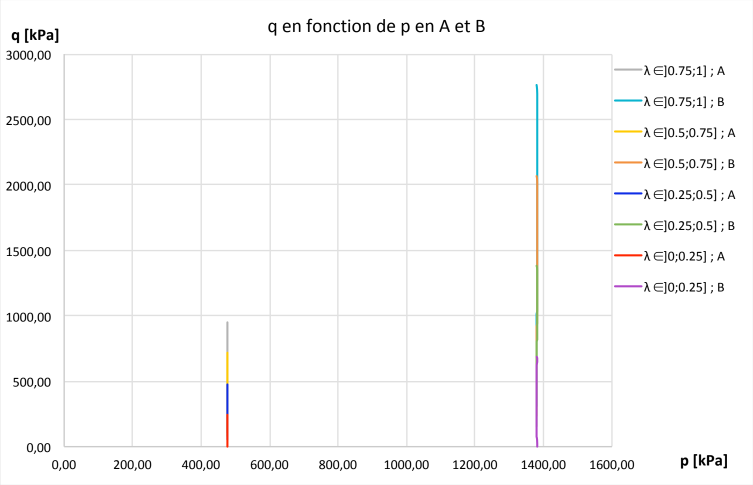
Chemins de contraintes $\sigma_r - \sigma_\theta$

$$\sigma_r(r = R) = (1 - \lambda)\,\sigma_0 \quad \text{et} \quad \sigma_\theta(r = R) = (1 + \lambda)\,\sigma_0$$

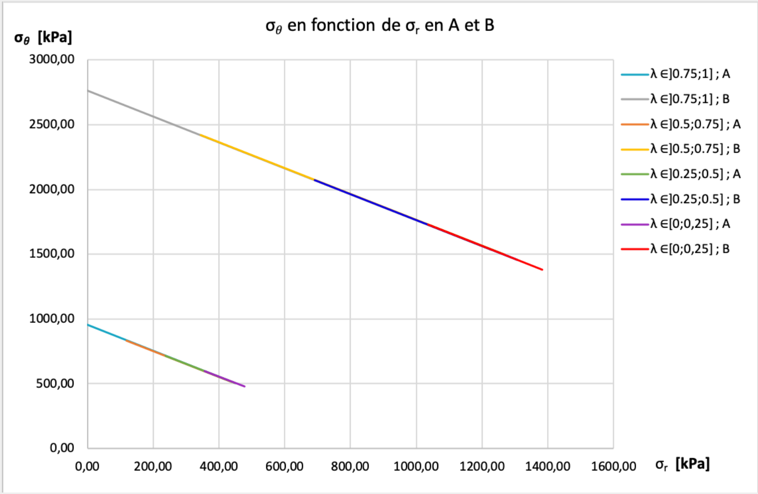
$\rightarrow$ Contraintes radiales évoluent de manière **inversément proportionnelle** aux contraintes tangentielles

$$\text{En } \lambda = 0 \; : \quad \sigma_r = \sigma_\theta = \sigma_0$$

Chemins de contraintes p-q



Chemins de contraintes $\sigma_r - \sigma_\theta$



$$\text{Si } x \in [-2R; 4R] \; : \quad u_R(x) = \alpha(x) \frac{\sigma_0 R}{2G}$$

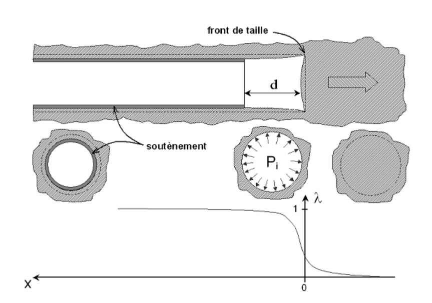


FIGURE – Déplacements en paroi en fonction de la distance au front de taille

$$\alpha(x) = \alpha_0 + (1 - \alpha_0)\, a(x) \text{ avec } \alpha_0 = 0,25 \text{ et } \forall x \geq 0$$

$$a(x) = 1 - \left[\frac{mR}{mR + x}\right]^2 \text{ avec } m = 0,75$$

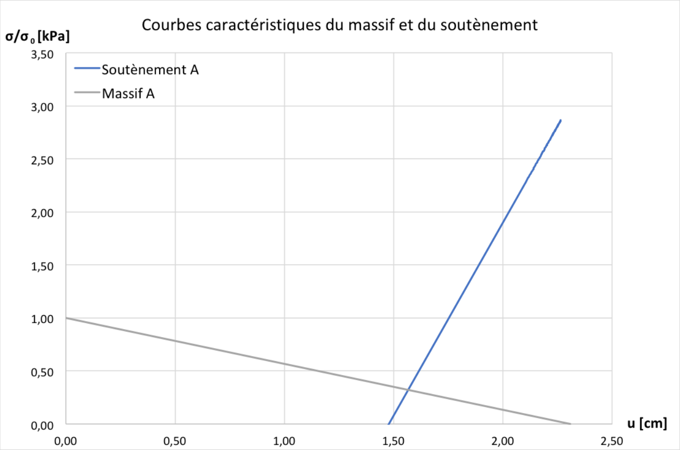
Contraintes radiales :

$$\text{Si } x < d \;\; : \quad \sigma_r(x) = 0$$

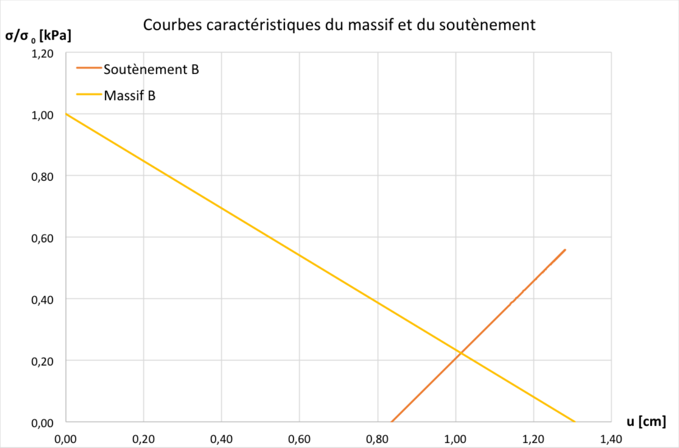
$$\text{Si } x \in [d; 4R] \;\; : \quad \sigma_r(x) = K_{sn} \frac{u_r(x) - u_r(d)}{R}$$

$$K_{sn} = \frac{E_b}{1-\nu_b^2} \frac{e_b}{R} \text{ en paroi mince } \left(\frac{R}{e_b} > 10 \right)$$

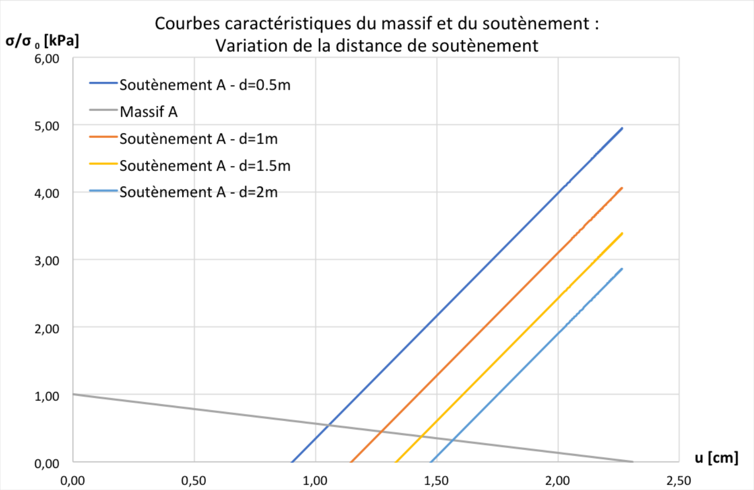
Courbes caractéristiques



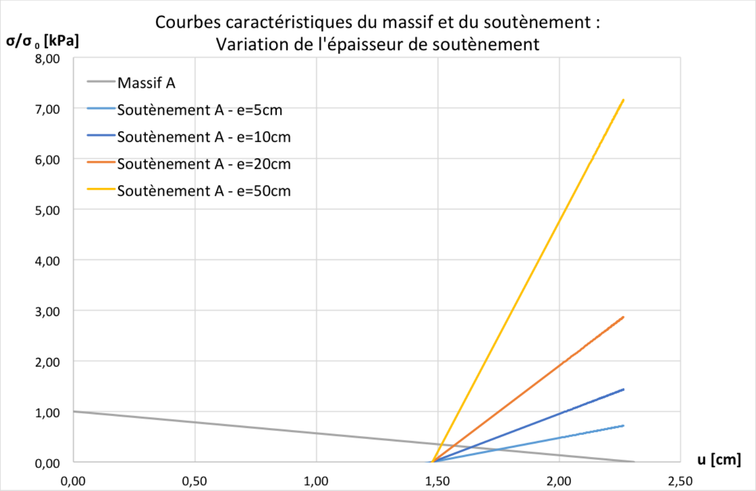
d=2m et e=20cm


Courbes caractéristiques du massif et du soutènement
σ/σ 0 [kPa]
1,20
1,00
0,80
0,60
0,40
0,20
0,00
Soutènement B
Massif B
0,00
0,20
0,40
0,60
0,80
1,00
1,20
1,40
u [cm]

d=2m et e=20cm


Courbes caractéristiques du massif et du soutènement :
Variation de la distance de soutènement
σ/σ 0 [kPa]
6,00
5,00
4,00
3,00
2,00
1,00
0,00
0,00
0,50
1,00
1,50
2,00
2,50
u [cm]
Soutènement A - d=0.5m
Massif A
Soutènement A - d=1m
Soutènement A - d=1.5m
Soutènement A - d=2m

Variation de l'épaisseur du soutènement



Étude élastoplastique

$$\tau = \sigma_n \ \tan\phi + c$$

$$\longrightarrow \sigma_c = \sigma_\theta - K_p \sigma_r$$

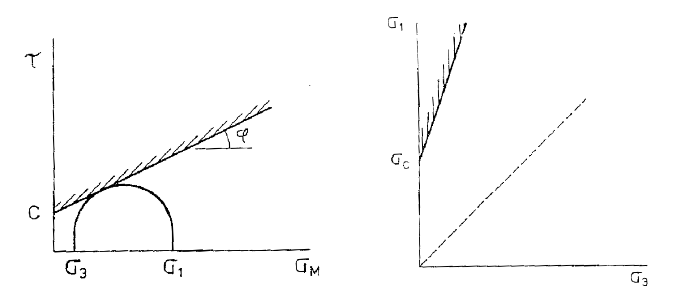


Figure – Modèle de Mohr-Coulomb

$$K_p = \frac{1+\sin\phi}{1-\sin\phi} \text{ et } \sigma_c = \frac{2c \ \cos\phi}{1-\sin\phi}$$

Comportement **plastique parfait** (sans écrouissage ni adoucissement) :

$$\lambda_e = \frac{1}{K_p + 1}\left[K_p - 1 + \frac{\sigma_c}{\sigma_0}\right]$$

$$\text{Rayon plastique :}\quad R_p = \begin{cases} R \text{ si } \lambda \leq \lambda_e \\ R\left[\dfrac{2\lambda_e}{(K_p+1)\lambda_e - (K_p-1)\lambda}\right]^{1/(K_p-1)} \text{ si } \lambda > \lambda_e \end{cases}$$

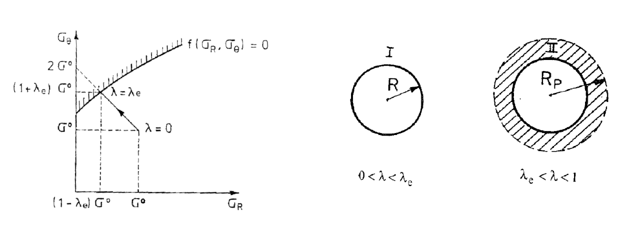


Figure – Évolution du rayon plastique

Déplacement du massif

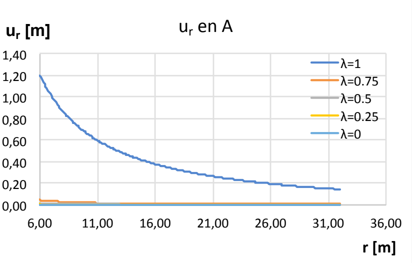
$$u_r(r) = \begin{cases} \lambda \dfrac{R^2}{r} \dfrac{\sigma_0}{2G} \text{ si } \lambda \leq \lambda_e \\ \dfrac{\lambda_e \sigma_0 r}{2G} \left(F_1 + F_2 \left(\dfrac{r}{R_p} \right)^{K_p - 1} + F_3 \left(\dfrac{R_p}{r} \right)^{K+1} \right) \text{ si } \lambda > \lambda_e \text{ et } r \leq R_p \\ \lambda_e \dfrac{R_p^2}{r} \dfrac{\sigma_0}{2G} \text{ si } \lambda > \lambda_e \text{ et } r > R_p \end{cases}$$

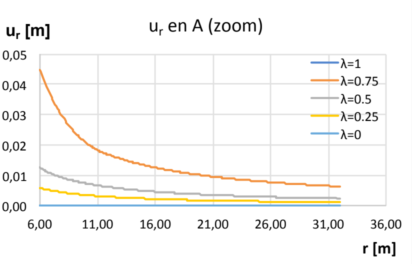
où F_1, F_2, F_3 et K sont des paramètres dépendant de ν, K_p et ψ.
On a par ailleurs calculé :

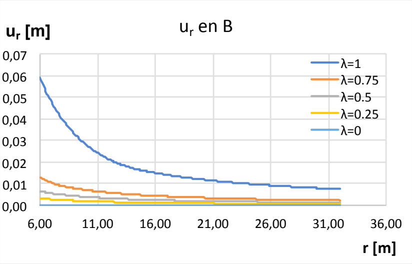
$$\lambda_{e,\text{couche A}} = 0,39$$

$$\lambda_{e,\text{couche B}} = 0,52$$

Déplacement du massif

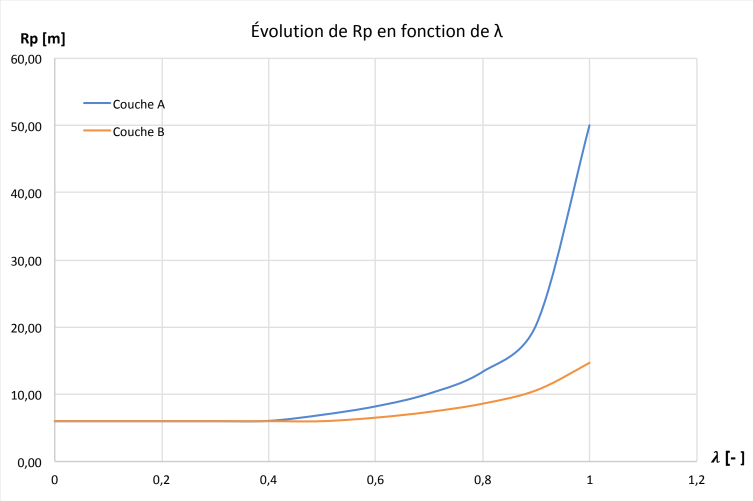






Rayon plastique

Plus λ est grand, et plus R_p est grand $\longrightarrow$ Grands déplacements



Distribution des contraintes

$$\sigma_r(r) = \begin{cases} \left(1 - \lambda \dfrac{R^2}{r^2}\right) \sigma_0 \text{ si } \lambda \leq \lambda_e \\ \left(\dfrac{\sigma_0}{K_p - 1}\right) \left(2\lambda_e \left(\dfrac{r}{R_p}\right)^{K_p - 1} - \dfrac{\sigma_c}{\sigma_0}\right) \text{ si } \lambda > \lambda_e \text{ et } r \leq R_p \\ \left(1 - \lambda_e \dfrac{R_p^2}{r^2}\right) \sigma_0 \text{ si } \lambda > \lambda_e \text{ et } r > R_p \end{cases}$$

$$\sigma_\theta(r) = \begin{cases} \left(1 + \lambda \dfrac{R^2}{r^2}\right) \sigma_0 \text{ si } \lambda \leq \lambda_e \\ \sigma_c + K_p \, \sigma_{r,plast} \text{ si } \lambda > \lambda_e \text{ et } r \leq R_p \\ \left(1 + \lambda_e \dfrac{R_p^2}{r^2}\right) \sigma_0 \text{ si } \lambda > \lambda_e \text{ et } r > R_p \end{cases}$$

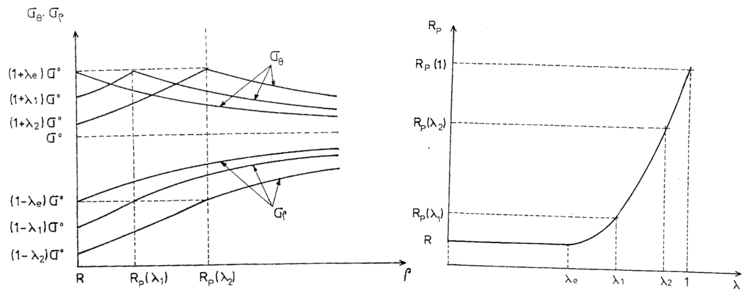
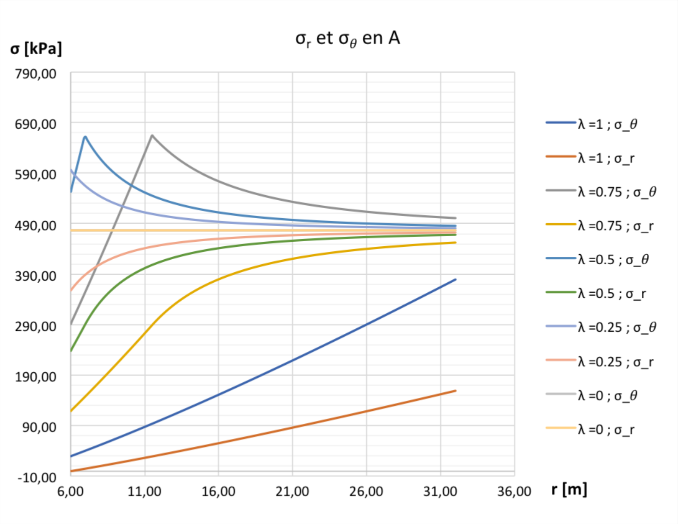


Figure – Distribution des contraintes pour le modèle de Tresca

Dans notre cas (Mohr-Coulomb) :

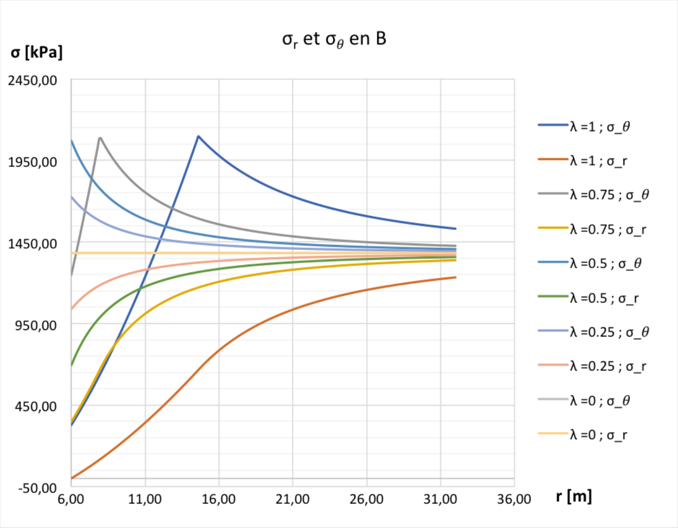
$$\sigma_\theta - \sigma_r = 2c \longrightarrow \sigma_\theta - K_p\sigma_r = \sigma_c$$

Distribution des contraintes

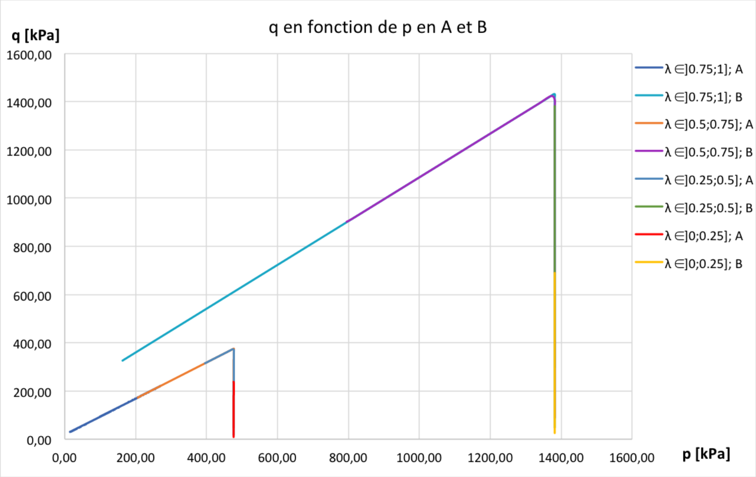


Pic en $r = R_p$

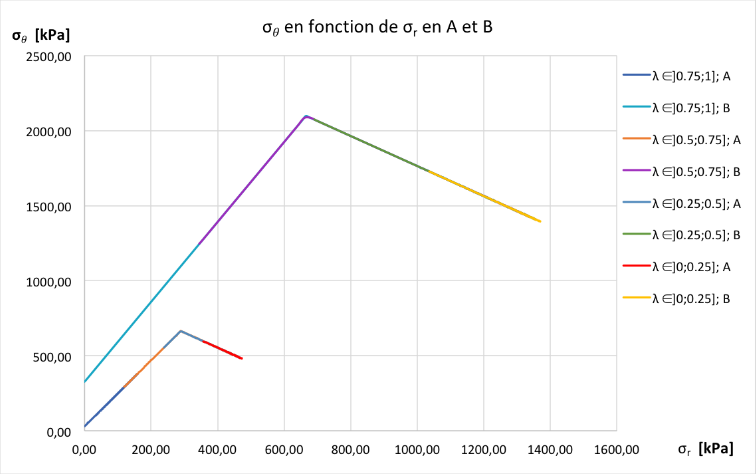
Distribution des contraintes



Chemins de contraintes p-q



CHEMINS DE CONTRAINTES $\sigma_r - \sigma_\theta$



Courbe caractéristique du massif

$$u_r(r=R) = \begin{cases} \dfrac{\lambda \sigma_0 R}{2G} \text{ si } \lambda \leq \lambda_e \\ \dfrac{\lambda_e \sigma_0 R}{2G} \left(F_1 + F_2 \left(\dfrac{R}{R_p} \right)^{K_p - 1} + F_3 \left(\dfrac{R_p}{R} \right)^{K+1} \right) \text{ si } \lambda > \lambda_e \end{cases}$$

$$\sigma_r(r=R) = \begin{cases} (1-\lambda)\sigma_0 \text{ si } \lambda \leq \lambda_e \\ \left(\dfrac{\sigma_0}{K_p - 1} \right) \left(2\lambda_e \left(\dfrac{R}{R_p} \right)^{K_p - 1} - \dfrac{\sigma_c}{\sigma_0} \right) \text{ si } \lambda > \lambda_e \end{cases}$$

$$\sigma_\theta(r=R) = \begin{cases} (1+\lambda)\sigma_0 \text{ si } \lambda \leq \lambda_e \\ \sigma_c + K_p \; \sigma_{r,plast} \text{ si } \lambda > \lambda_e \end{cases}$$

Déplacement radial :

$$\text{Si} \;\; x \in [-2R; 4R] \;\; : \quad u_R(x) = \frac{1}{\xi}\alpha(x)\frac{\sigma_0 R}{2G}$$

$$\frac{1}{\xi} = \lambda_e \left(\frac{R_{p,max}}{R}\right)^{K+1} \text{ avec } R_{p,max} = R_p(\lambda = 1)$$

$$\alpha(x) = \alpha_0 + (1 - \alpha_0)\, a(x) \text{ avec } \alpha_0 = 0,25 \text{ et } \forall x \geq 0$$

$$a(x) = 1 - \left[\frac{mR}{mR + x\xi}\right]^2 \text{ avec } m = 0,75$$

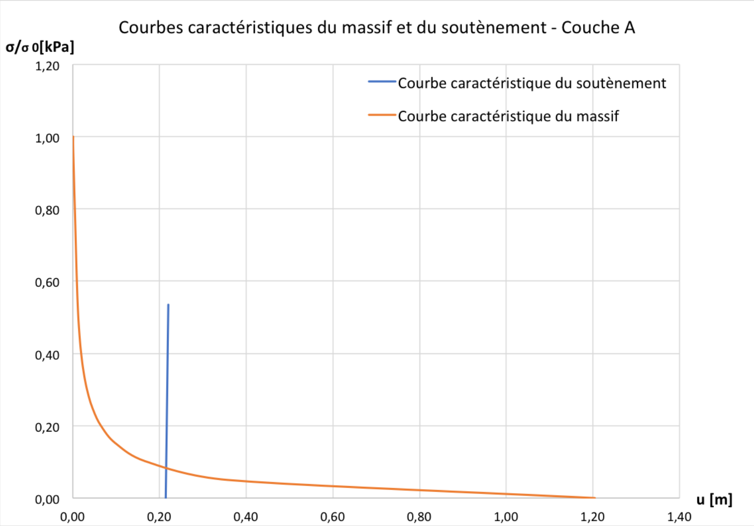
Contraintes radiales :

$$\text{Si } x < d \ \ : \quad \sigma_r(x) = 0$$

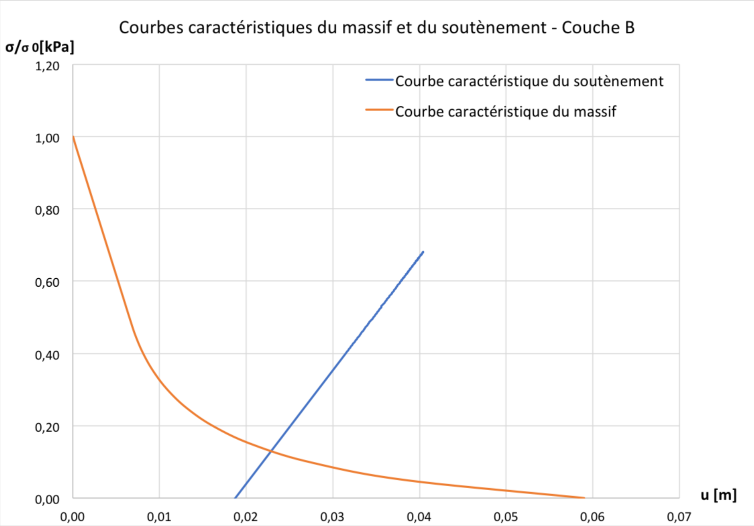
$$\text{Si } x \in [d; 4R] \ \ : \quad \sigma_r(x) = K_{sn} \frac{u_r(x) - u_r(d)}{R}$$

$$K_{sn} = \frac{E_b}{1 - \nu_b^2} \frac{e_b}{R} \text{ en paroi mince } \left(\frac{R}{e_b} > 10 \right)$$

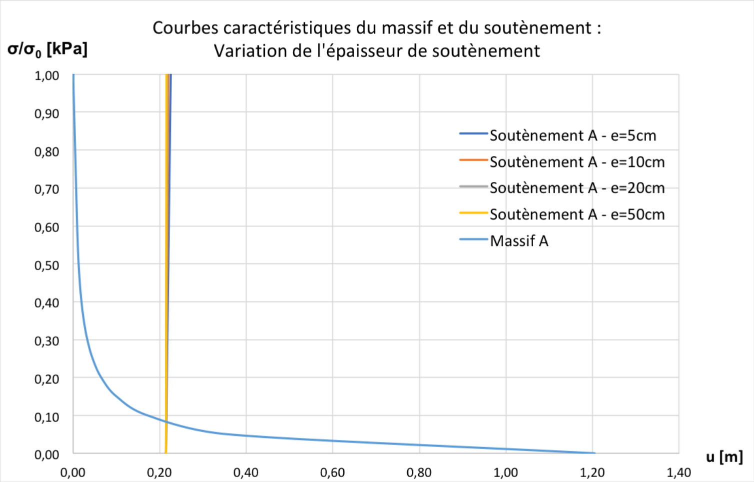
Courbes caractéristiques



$d = 2\text{m}$ et $e = 5\text{cm}$

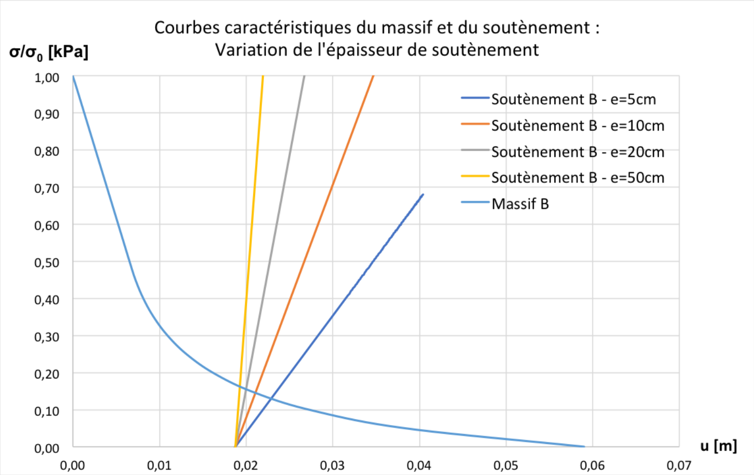


$d = 2\text{m}$ et $e = 5\text{cm}$



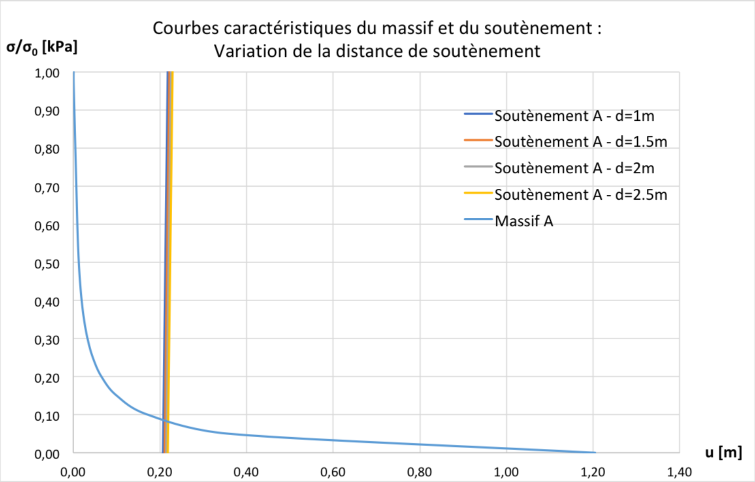
Courbes caractéristiques du massif et du soutènement :
Variation de l'épaisseur de soutènement
σ/σ0 [kPa]
1,00
0,90
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00
0,20
0,40
0,60
0,80
1,00
1,20
1,40
u [m]
Soutènement A - e=5cm
Soutènement A - e=10cm
Soutènement A - e=20cm
Soutènement A - e=50cm
Massif A

$d = 2\text{m}$

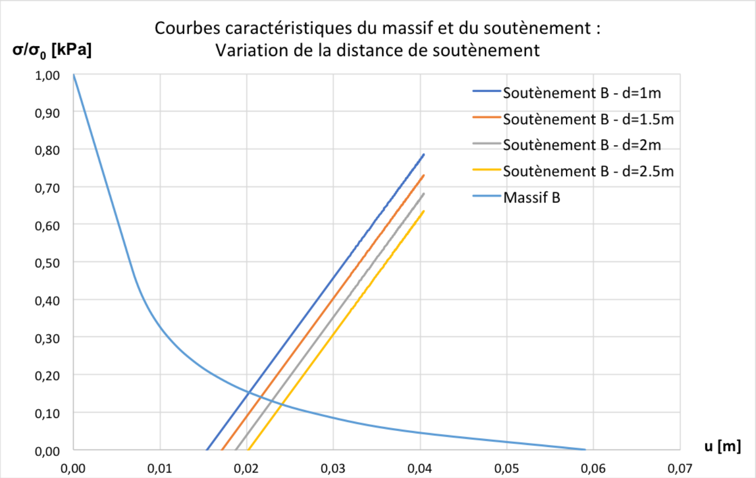

Courbes caractéristiques du massif et du soutènement :
Variation de l'épaisseur de soutènement
σ/σ0 [kPa]
1,00
0,90
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00
0,01
0,02
0,03
0,04
0,05
0,06
0,07
u [m]
Soutènement B - e=5cm
Soutènement B - e=10cm
Soutènement B - e=20cm
Soutènement B - e=50cm
Massif B

$d = 2\text{m}$

Variation de la distance du soutènement

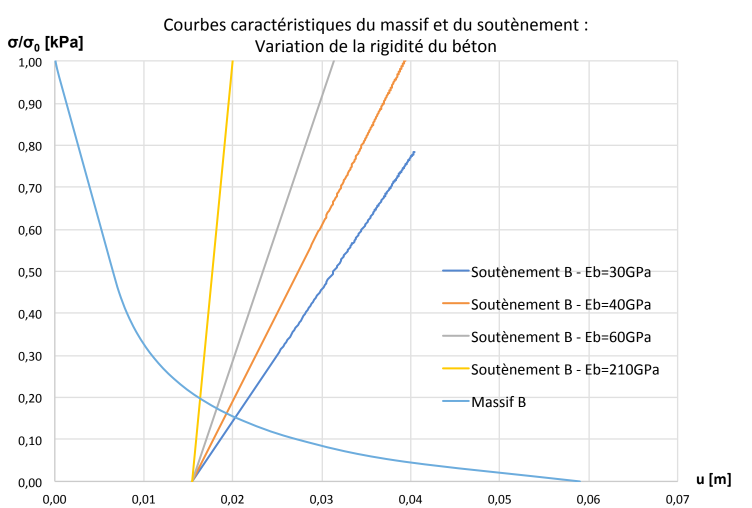


$e = 5\text{cm}$


Courbes caractéristiques du massif et du soutènement :
Variation de la distance de soutènement
σ/σ0 [kPa]
1,00
0,90
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
0,00
0,01
0,02
0,03
0,04
0,05
0,06
0,07
u [m]
Soutènement B - d=1m
Soutènement B - d=1.5m
Soutènement B - d=2m
Soutènement B - d=2.5m
Massif B

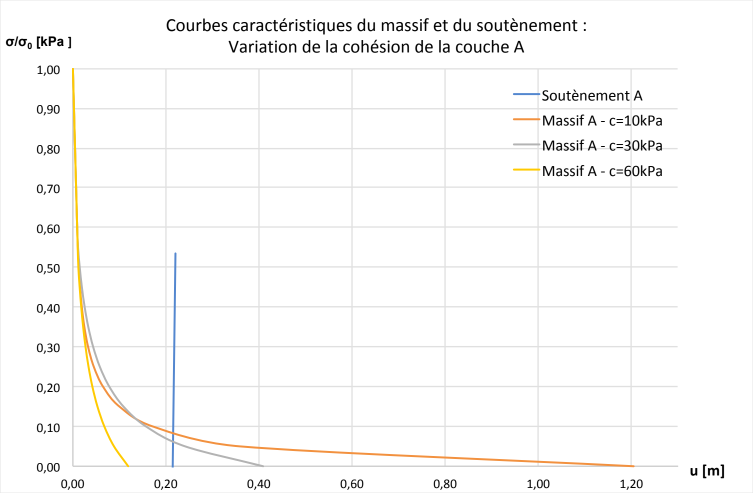
$e = 5\text{cm}$

Variation du module de rigidité



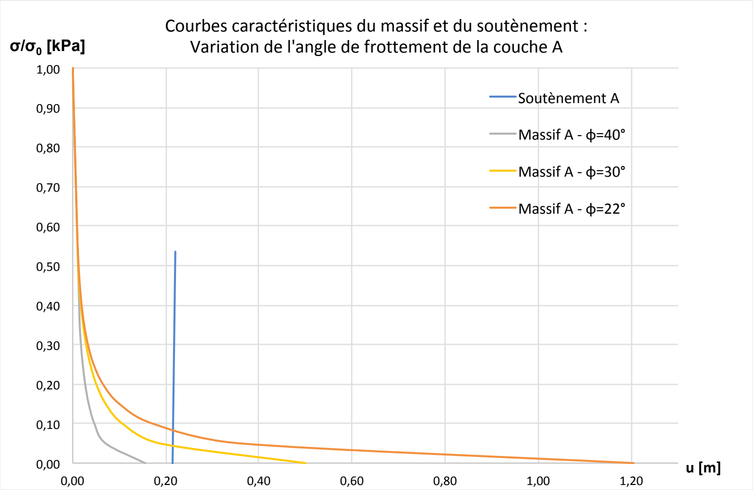
$d = 1\text{m}$ et $e = 5\text{cm}$

Variation de la cohésion dans le massif



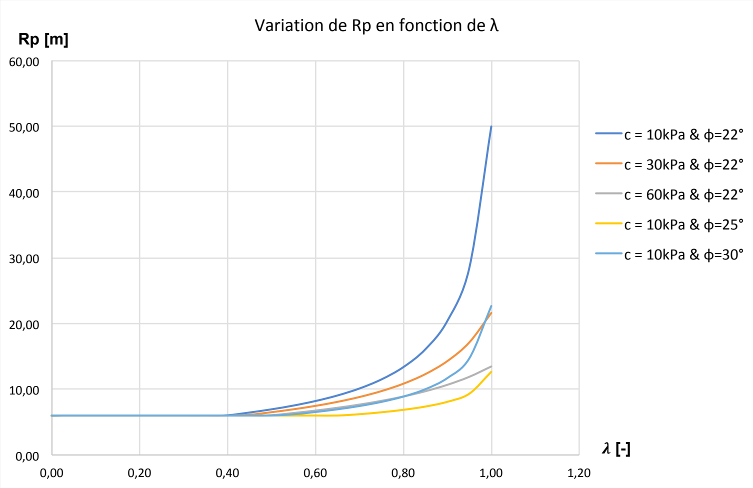
$d = 2\text{m}$ et $e = 5\text{cm}$

Variation de l'angle de frottement dans le massif



$d = 2\text{m}$ et $e = 5\text{cm}$

Variation du rayon de plasticité R_p

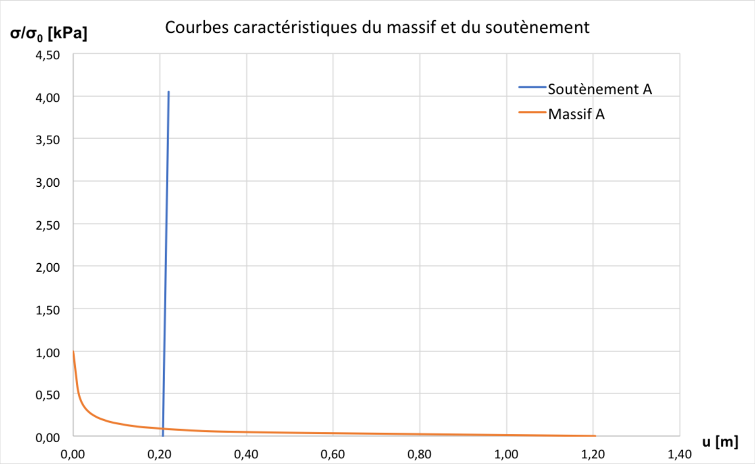


$d = 2\text{m}$ et $e = 5\text{cm}$

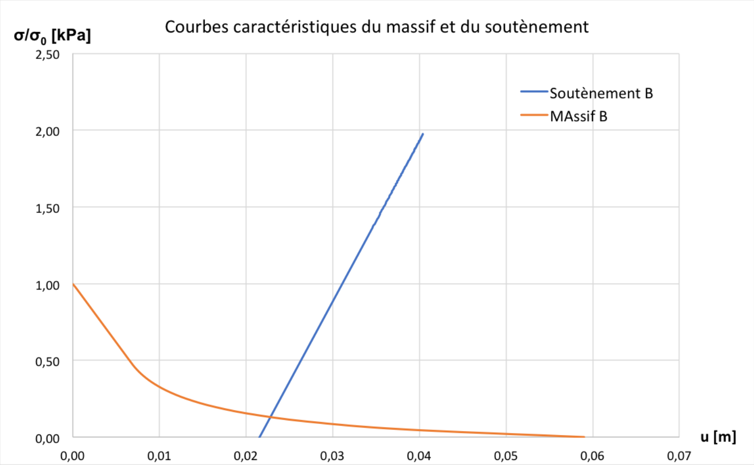
Dimensionnement

Dimensionnement pour limiter $u_r(x)$ à 5 cm : **impossible** en A

$\longrightarrow$ Accepter 20cm de déplacement OU Soutènement en voûtes parapluies



$d = 1\text{m}$ et $e = 5\text{cm}$



$d = 3\text{m}$ et $e = 5\text{cm}$

Conclusion

Conclusion

- Couche A la plus critique
- Diminution du déplacement si
  - l'épaisseur du soutènement augmente
  - la distance du soutènement par rapport au front de taille diminue
  - le module de Young du béton augmente
  - la cohésion augmente
  - l'angle de frottement augmente