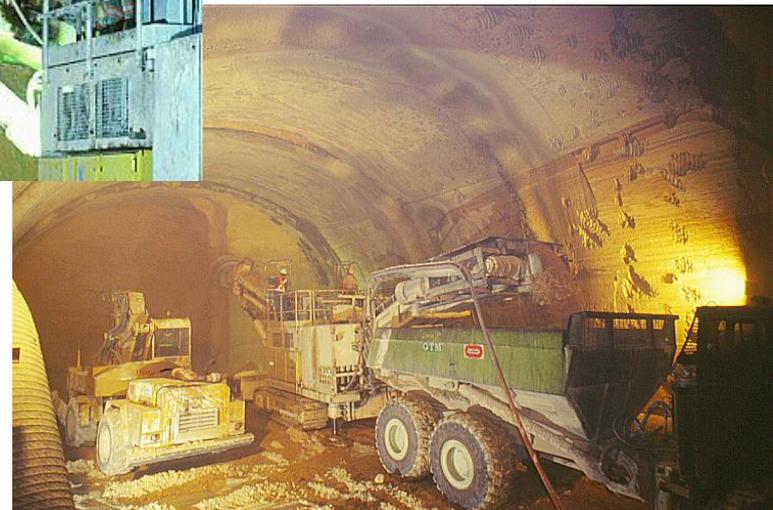


Le Calcul des tunnels



Laurent Bérend
Francis Lanquette
Hervé Thiébaud



Deuxième séance

- Exercice d'application de la méthode CV-CF en élastique
- La méthode convergence confinement: élasto-plasticité
- Exercice d'application élasto-plastique

Exercice d'application en élastique

Marnes et Caillasses

$E = 300 \text{ MPa}$

$\nu = 0,3$

$c = 500 \text{ kPa}$ $\varphi = 30^\circ$

Contrainte initiale: $\sigma_0 = 750 \text{ kPa}$

Tunnel de 7 m de rayon extérieur

Soutènement posé à 2m du front

Soutènement:

- **Béton projeté:**
 - **$e = 0.22 \text{ m}$**
 - **$E_b = 10000 \text{ MPa}$**
 - **$\nu = 0.2$**
- **Cintres HEB220 $e = 1.00 \text{ m}$**
 - **$A_s = 91 \text{ cm}^2$**

Exercice d'application en élastique

Marnes et Caillasses

$E = 300 \text{ MPa}$

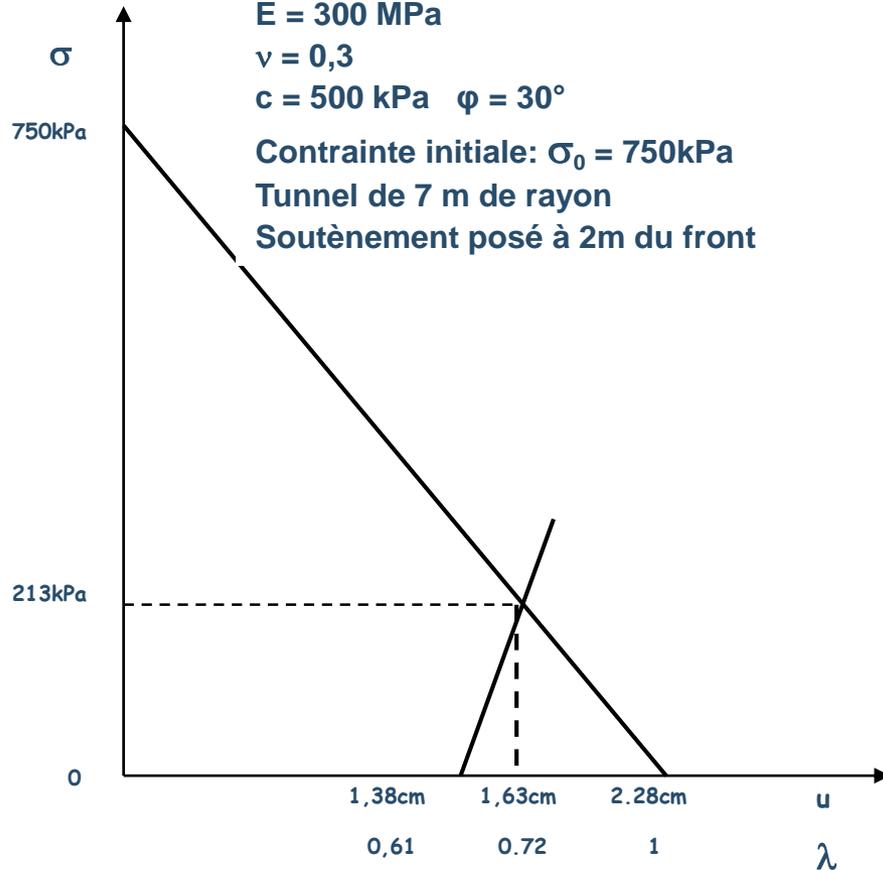
$\nu = 0,3$

$c = 500 \text{ kPa}$ $\varphi = 30^\circ$

Contrainte initiale: $\sigma_0 = 750 \text{ kPa}$

Tunnel de 7 m de rayon

Soutènement posé à 2m du front



Soutènement:

- Béton projeté:

- $e = 0,22\text{m}$

- $E_b = 10000\text{MPa}$

- $\nu = 0,2$

| $K_b = 335\text{MPa}$

| $K_b + K_s = 595\text{MPa}$

- Cintres HEB220 $e = 1,00\text{m}$

- $A_s = 91\text{cm}^2$ soit

| $K_s = 260\text{MPa}$

Résultat

L'équilibre est obtenu pour $p_s = 213 \text{ kPa}$

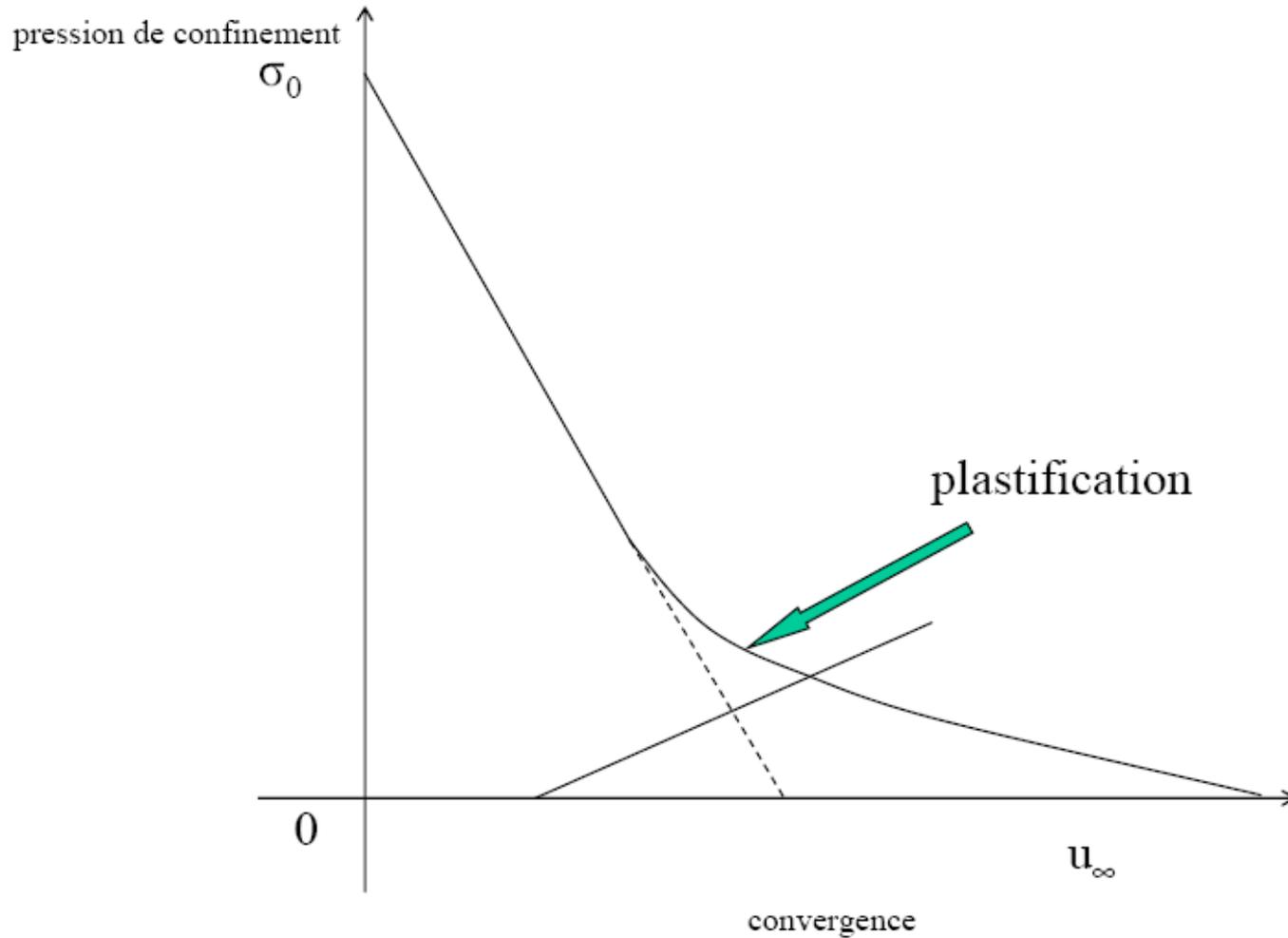
Soit $p_b = 120 \text{ kPa} < p_{b\text{lim}} = 157 \text{ kPa}$

pour $f_{c28} = 5\text{MPa}$

et $p_s = 93 \text{ kPa} < p_{s\text{lim}} = 208\text{kPa}$

pour $\sigma_{\text{lim}} = 160\text{MPa}$

La méthode convergence confinement: élasto-plasticité



La méthode convergence confinement: élasto-plasticité

Limites du domaine élastique

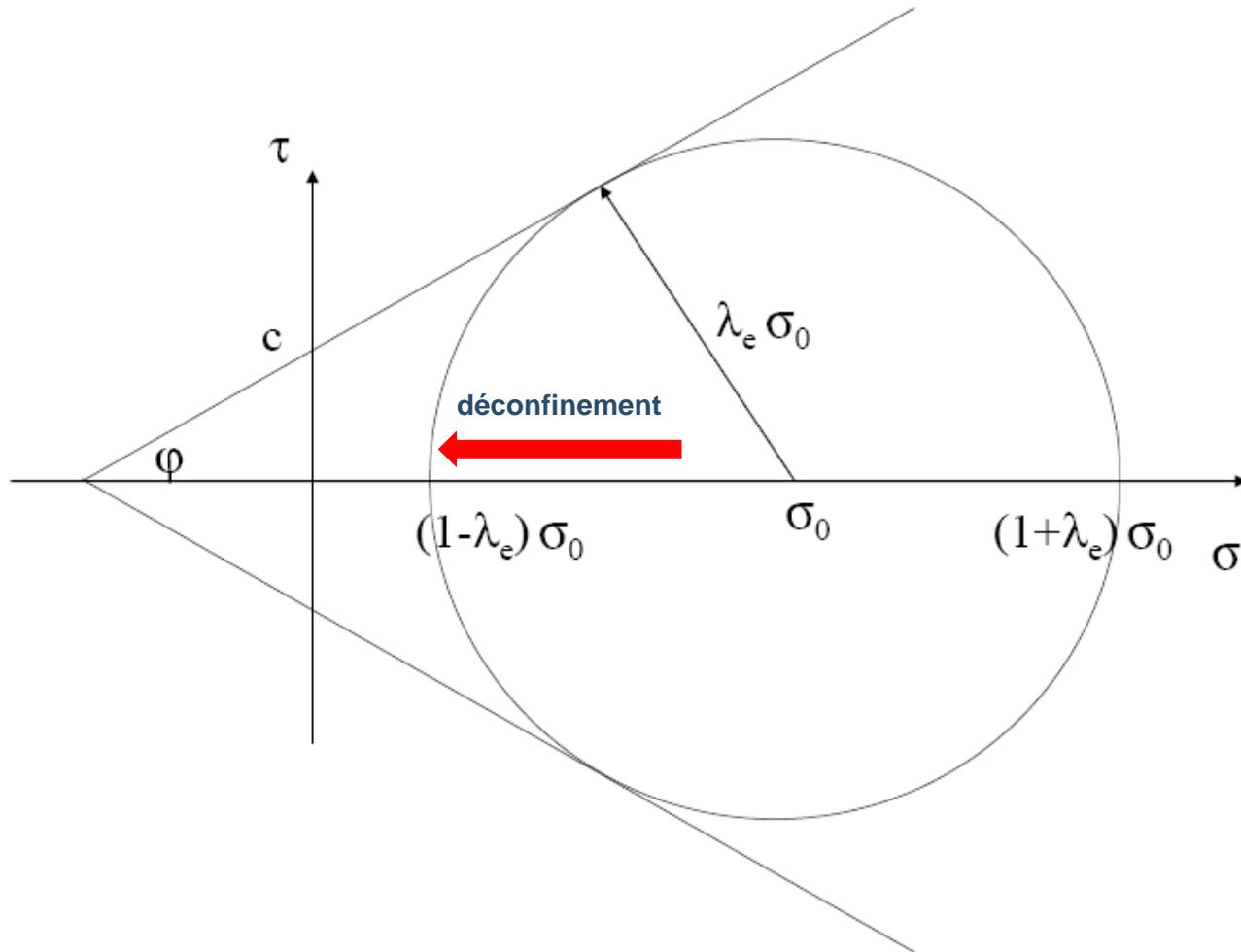
- Critère de Mohr - Coulomb
 - cohésion c 20 kPa à 500 kPa
 - angle de frottement φ 0° - 30° - 45°
 - relation R_c - (c, φ) : $R_c = 2c \cdot \cos \varphi / (1 - \sin \varphi)$
 - relation R_t - (c, φ) : $R_t = 2c \cdot \cos \varphi / (1 + \sin \varphi)$
- déconfinement total dans le domaine élastique pour $\sigma_0 < R_c/2$
-> Nombre de stabilité $N_s = 2 \sigma_0 / R_c$ ($= \sigma_0 / c$ pour $\varphi = 0$)
- cas $\sigma_0 > R_c/2$ (ou $N_s > 1$): le déconfinement reste élastique jusqu'à λ_e .

$$\lambda_e \cdot \sigma_0 = (c / \operatorname{tg} \varphi + \sigma_0) \sin \varphi$$

$$\text{soit: } \lambda_e = c \cdot \cos \varphi / \sigma_0 + \sin \varphi$$

$$\text{ou: } \lambda_e = (1 - \sin \varphi) / N_s + \sin \varphi \quad (= 1 / N_s \text{ pour } \varphi = 0)$$

La méthode convergence confinement: élasto-plasticité



Milieu Elasto-plastique parfait

Pour les formules détaillées, se référer à :

M.Panet – Le calcul des tunnels par la méthode convergence-confinement, Presses de l'ENPC 1995

Une zone plastique autour de l'excavation se forme dès lors que :

$$\lambda > \lambda_e = \frac{c \cdot \cos \varphi}{\sigma_0} + \sin \varphi$$

L'extension de cette zone est caractérisée par le rayon plastique R_p

Dans cette zone, par comparaison avec le comportement en élasticité :

- l'évolution des contraintes radiales reste similaire
- les contraintes orthoradiales chutent très vite.
- les convergences augmentent plus rapidement qu'en élasticité, avec un effet d'amplification en cas de dilatance.

Exemple

CONTRAINTES RADIALES ET ORTHORADIALES

Projet:

Marnes et Caillasses (long terme contraintes totales)

Réf.

Recommandations sur l'emploi de la méthode convergence-confinement, Nspécial TOS 05.93

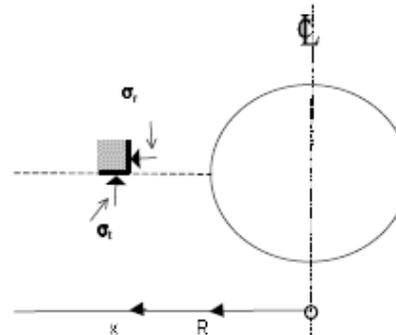
Le calcul des tunnels par la méthode convergence-confinement, Marc Panet, presses ENPC, 1995

Terrain encaissant:

E	150	MPa
ν	0.30	
c	75	kPa
φ	30	°
$>k_p$	3.00	
$>R_c$	280	kPa
coefficient de dilatance	1	
$>\lambda_e$	0.587	
$>\sigma_e$	310	kPa

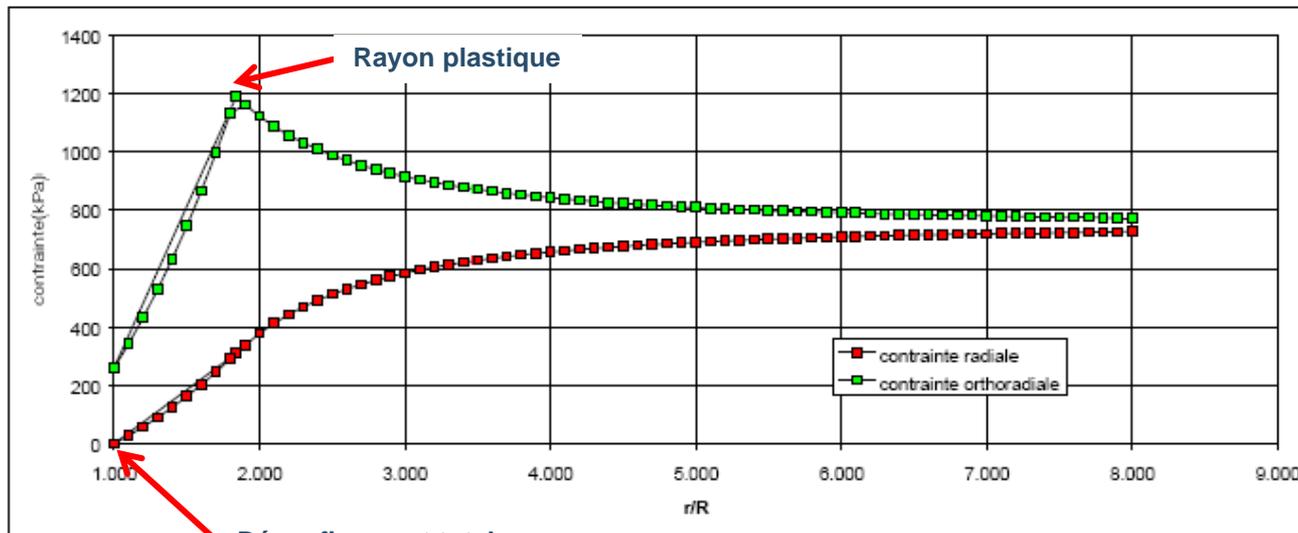
pour $\lambda = 1.00$

σ_{r0} (kPa)=	0
$R_p/R =$	1.84
σ_{w0} (kPa)=	310
σ_{t0} (kPa)=	1190



Contrainte géostatique: $\sigma_0 =$

750 kPa



Milieu Élasto-plastique parfait

Formules valables pour un déconfinement total ($\lambda = 1$) :

a) Rayon plastique :

▪ pour $\phi \neq 0$:

$$\text{avec } \boxed{K_p = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}} \quad \boxed{R_c = \frac{2.c.\cos \phi}{1 - \sin \phi}} \quad \frac{R_p}{R} = \left[\frac{2}{K_p + 1} \cdot \left[(K_p - 1) \cdot \frac{\sigma_0}{R_c} + 1 \right] \right]^{\frac{1}{K_p - 1}}$$

▪ b) pour $\phi = 0$:

$$\frac{R_p}{R} = e^{\frac{\sigma_0 - c}{2.c}}$$

b) Convergence
$$u_{\infty pl} / R = \left[u_{\infty el} / R \right] \cdot \lambda_e \cdot \left(\frac{R_p}{R} \right)^{\alpha + 1}$$

α est le facteur de dilatance défini par: $\varepsilon_r + \alpha \cdot \varepsilon_\theta = 0$

$\alpha = 1$: déformations à volume constant

$\alpha > 1$: augmentation de volume (dilatance)

Principe de similitude

Facteur de similitude :
$$\xi = \frac{u_{\infty el}}{u_{\infty pl}}$$

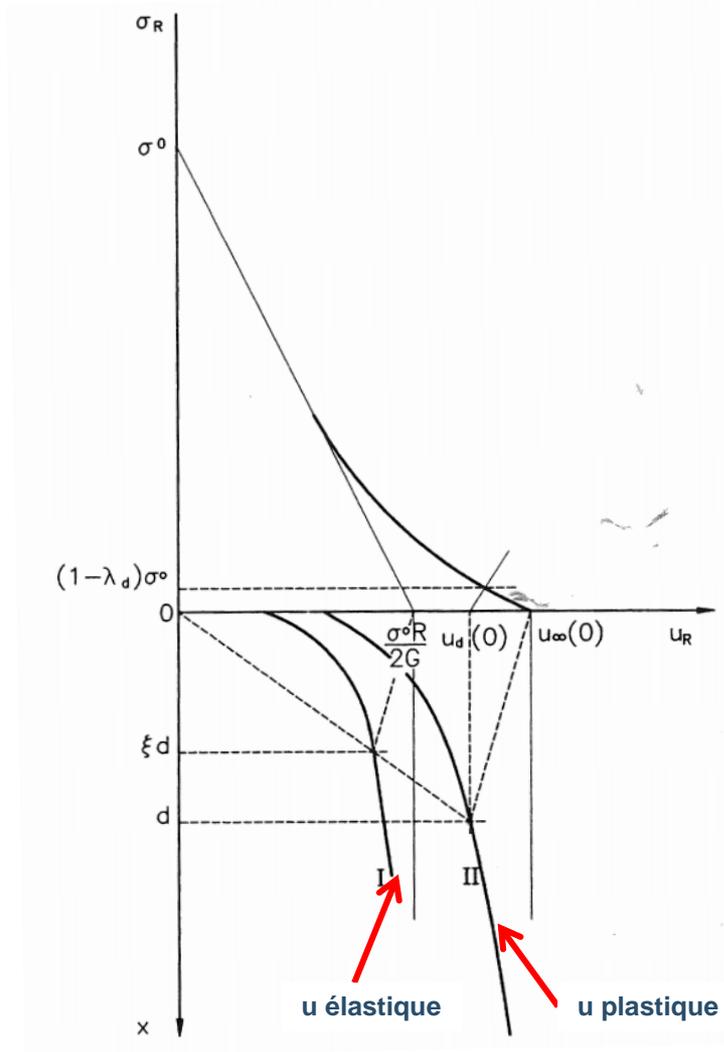
La courbe $u_{pl} = f(x/R)$ est la transformée de la courbe correspondante en élasticité par homothétie de centre 0 et de rapport $1/\xi$

$$u_{pl}\left(\frac{x}{R}\right) = \frac{1}{\xi} u_{el}\left(\xi \cdot \frac{x}{R}\right)$$

ou encore :

$$u_{pl}\left(\frac{x}{R}\right) / u_{pl\infty} = u_{el}\left(\xi \cdot \frac{x}{R}\right) / u_{el\infty} = \lambda_{el}\left(\xi \cdot \frac{x}{R}\right)$$

Principe de similitude



Exercice d'application en élasto-plastique

Exemple:

Marnes et Caillasses

$E = 300 \text{ MPa}$

$\nu = 0,3$

$c = 150 \text{ kPa}$

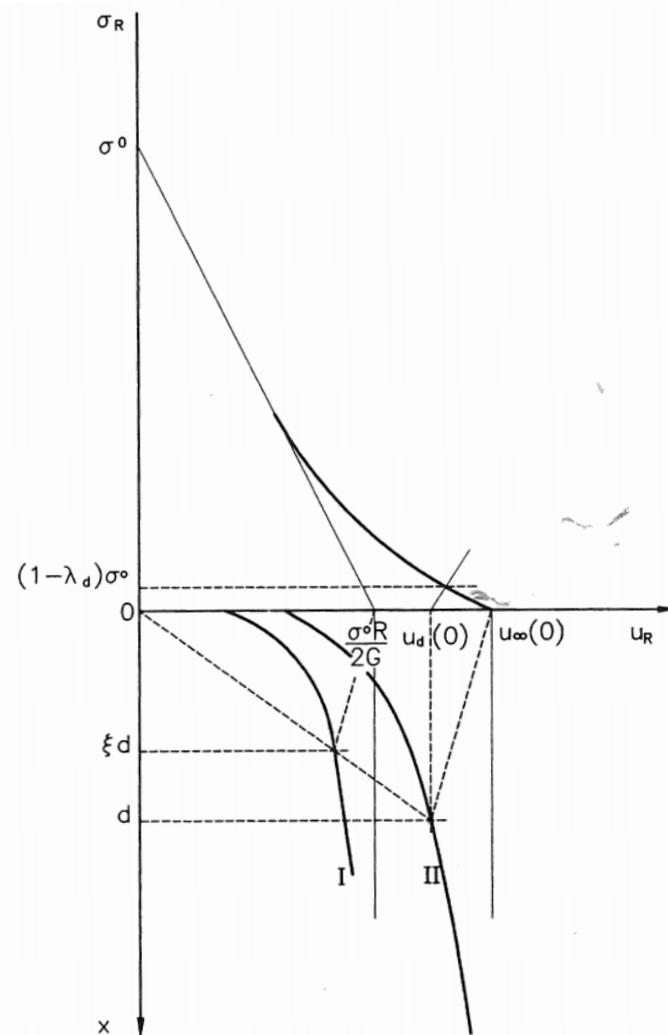
$\varphi = 30^\circ$

$\alpha = 1$

$R = 7\text{m}$

Contrainte initiale: $\sigma_0 = 750\text{kPa}$

Soutènement posé à 2m du front



Exercice d'application en élasto-plastique

Exemple:

Marnes et Caillasses

$E = 300 \text{ MPa}$

$\nu = 0,3$

$c = 150 \text{ kPa}$

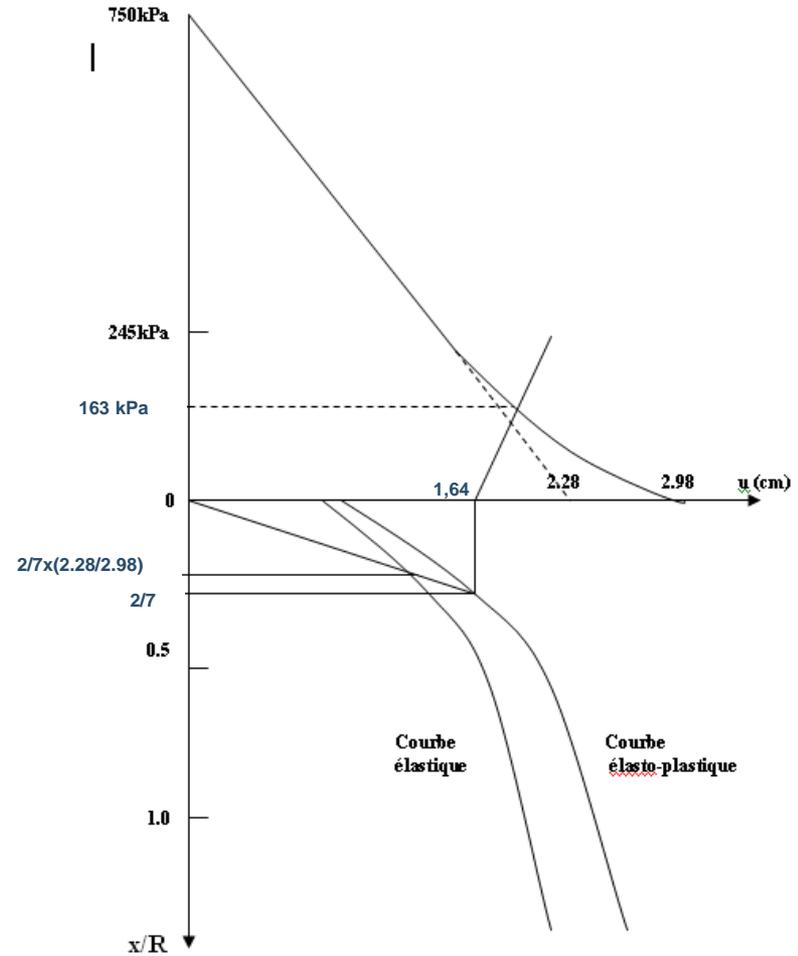
$\varphi = 30^\circ$

$\alpha = 1$

$R = 7\text{m}$

Contrainte initiale: $\sigma_0 = 750\text{kPa}$

Soutènement posé à 2m du front



METHODE CONVERGENCE - CONFINEMENT ou DES COURBES CARACTERISTIQUES

Réf.

Recommandations sur l'emploi de la méthode convergence-confinement, N°spécial TOS 05.93
Le calcul des tunnels par la méthode convergence-confinement, Marc Panet, presses ENPC, 1995

Projet:

Marnes et Caillasses Long Terme contraintes totales

hypothèses: contraintes isotropes; comportement élasto-plastique parfait du terrain; comportement élastique du soutènement

Contrainte géostatique: $\sigma_a = 750$ kPa

Terrain encaissant:

Excavation et soutènement

carctéristiques élastiques:

rayon moyen de l'excavation R = 7.0 m

E = 150 MPa

$\nu = 0.30$

critères de rupture Mohr-Coulomb

c = 150 kPa

$\phi = 30^\circ$

coefficient de dilatance

>kp = 3.00

>Rc = 520 kPa

>nombre de stabilité $N_s = 2.9$

> limite d'élasticité

> $\lambda_o = 0.673$

> $\sigma_o = 245$ kPa

> u pl / u él inf = 1.308

caractéristiques mécaniques du soutènement

coque cylindrique:

épaisseur e = 0.25 m

module élastique E = 8 000 MPa

coefficient de Poisson = 0.2

>module de rigidité $K_{sn} = 306$ MPa

cintres métalliques

aire de la section = 0.0 cm²

espacement = 1.00 m

>module de rigidité $K_{sn} = 0$ MPa

boulons à ancrage ponctuel

densité géométrique = 0.00000

module d'Young = 200 000 MPa

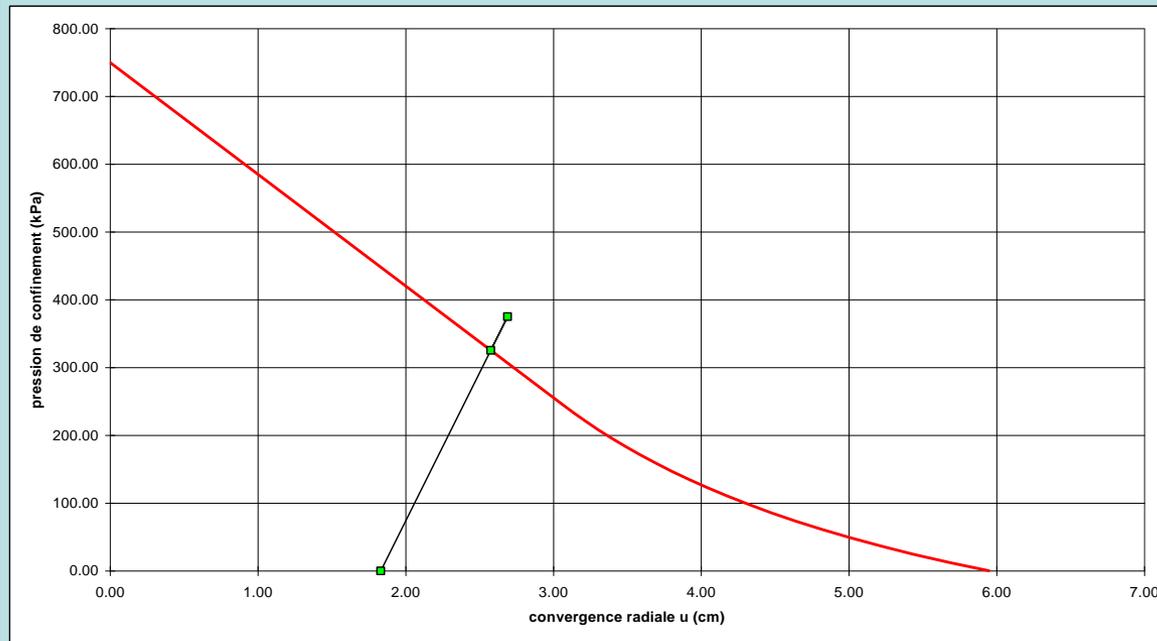
dist. point d'ancrage = 3.50 m

>module de rigidité $K_{sn} = 0$ MPa

>module de rigidité total $K_{sn} = 306$ MPa

u initial/u inf = 0.31

jeu initial du soutènement = 0 mm



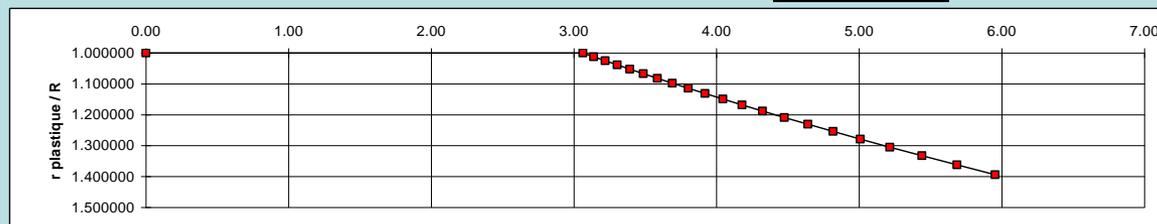
point d'équilibre:

Ps = 325 kPa

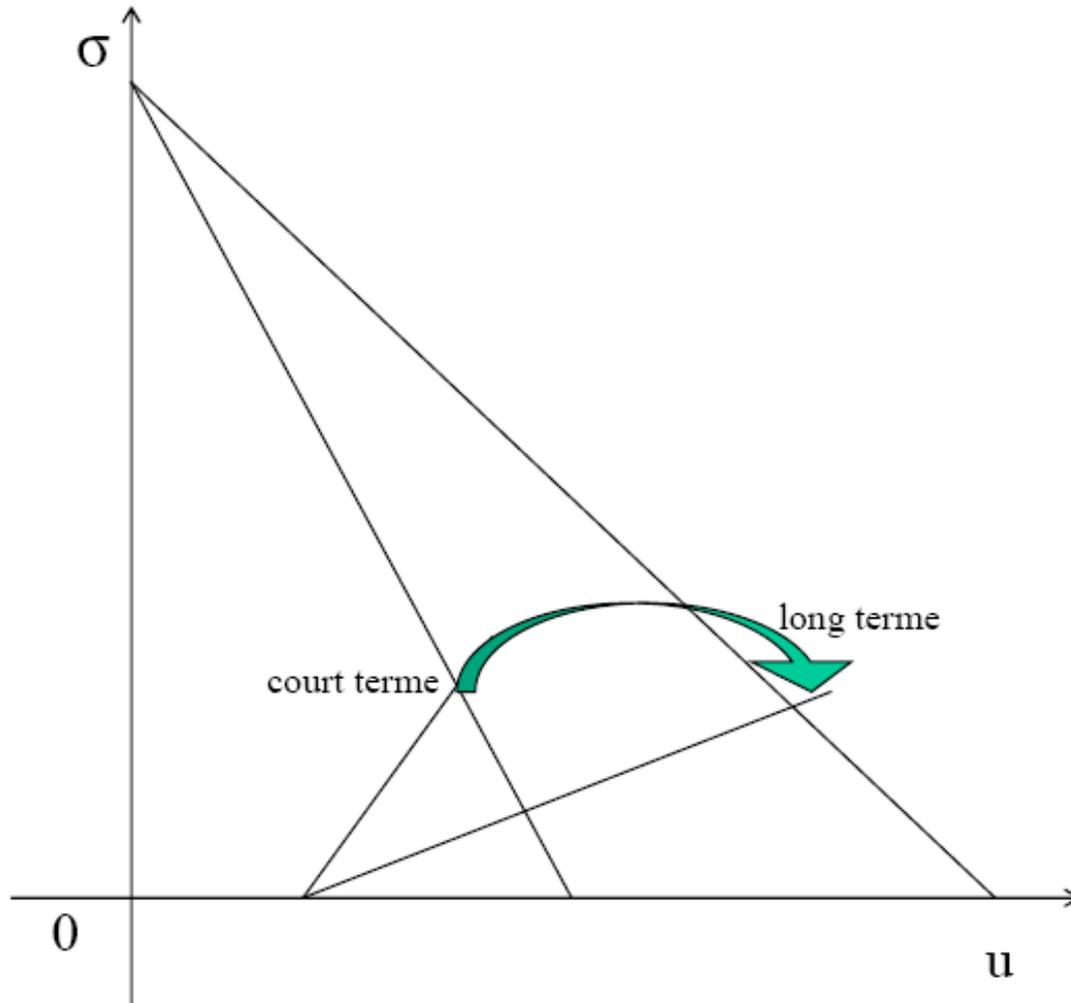
u = 2.58 cm

$\lambda = 0.566$

pour obtenir le point d'équilibre, lancer la macro1, touche de raccourci ctrl+a



Passage à long terme



**Marnes et Caillasses
Tunnel de 7 m de rayon**

Court Terme

E = 300 MPa

$\nu = 0,3$

c = 150 kPa $\phi = 30^\circ$

Contrainte initiale: $\sigma_0 = 750\text{kPa}$

Soutènement posé à 2m du front

HEB 220 e= 1m

Béton projeté 22cm E=10 GPa

Long Terme

E = 150 MPa

$\nu = 0,3$

c = 150 kPa $\phi = 30^\circ$

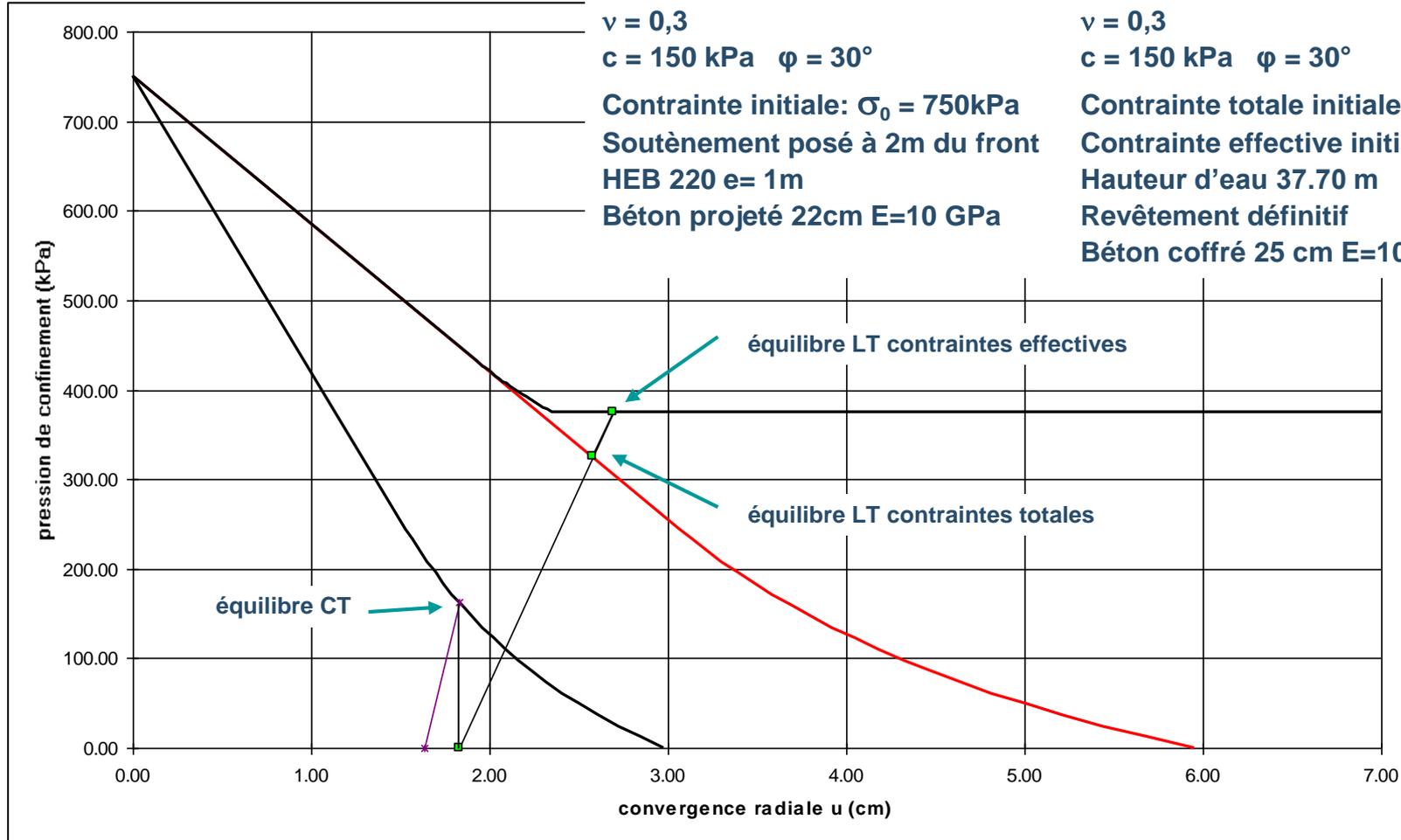
Contrainte totale initiale: $\sigma_0 = 750\text{kPa}$

Contrainte effective initiale: 375 kPa

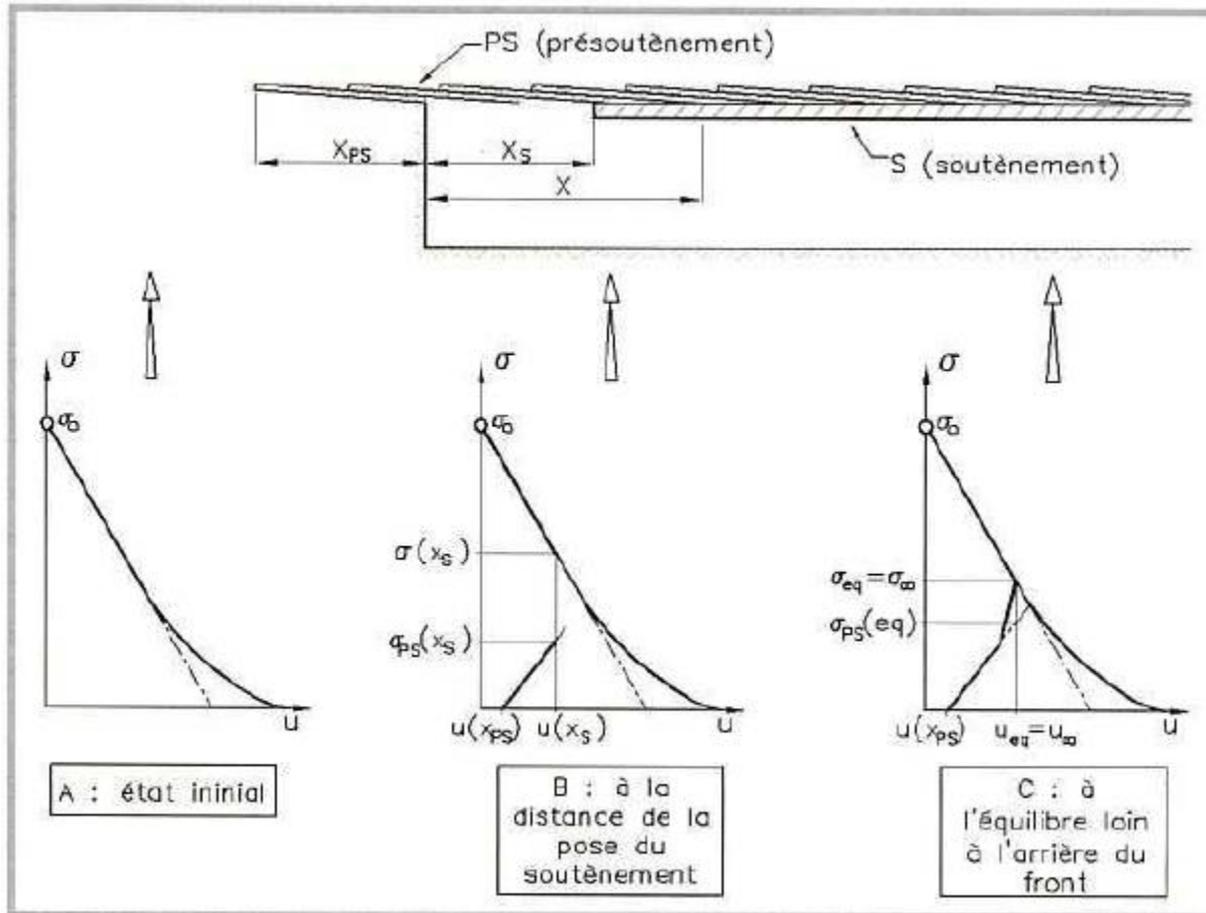
Hauteur d'eau 37.70 m

Revêtement définitif

Béton coffré 25 cm E=10 GPa



Effet d'un présoutènement



λ_{PS} avec présoutènement $<$ λ_S sans présoutènement

Exemple du double présoutènement de Toulon

