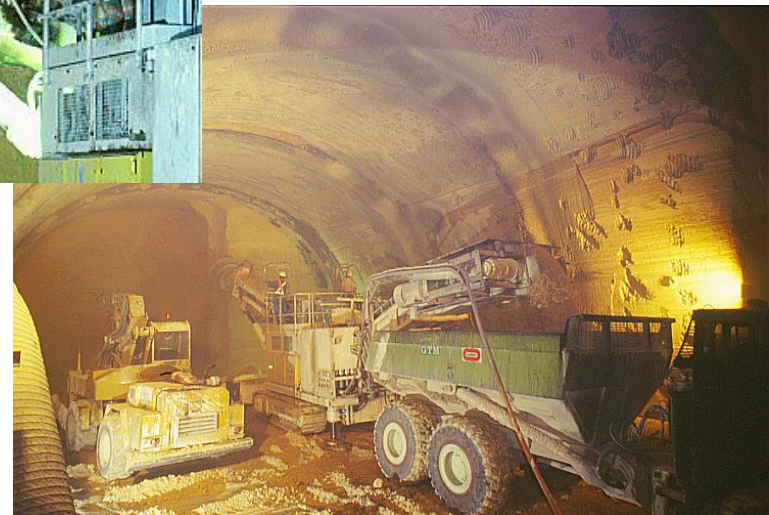


# Le Calcul des tunnels



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**

**$E = 300 \text{ MPa}$**

**$\nu = 0,3$**

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

**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

$E = 300 \text{ MPa}$

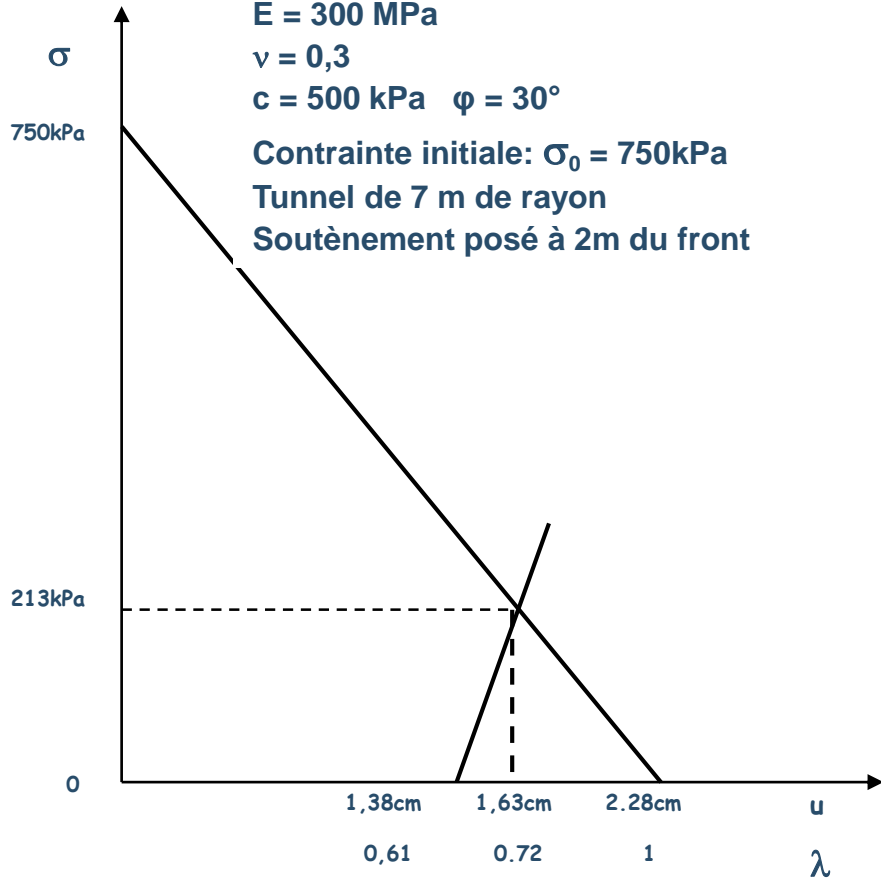
$\nu = 0,3$

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

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  $p_s = 213 \text{ kPa}$

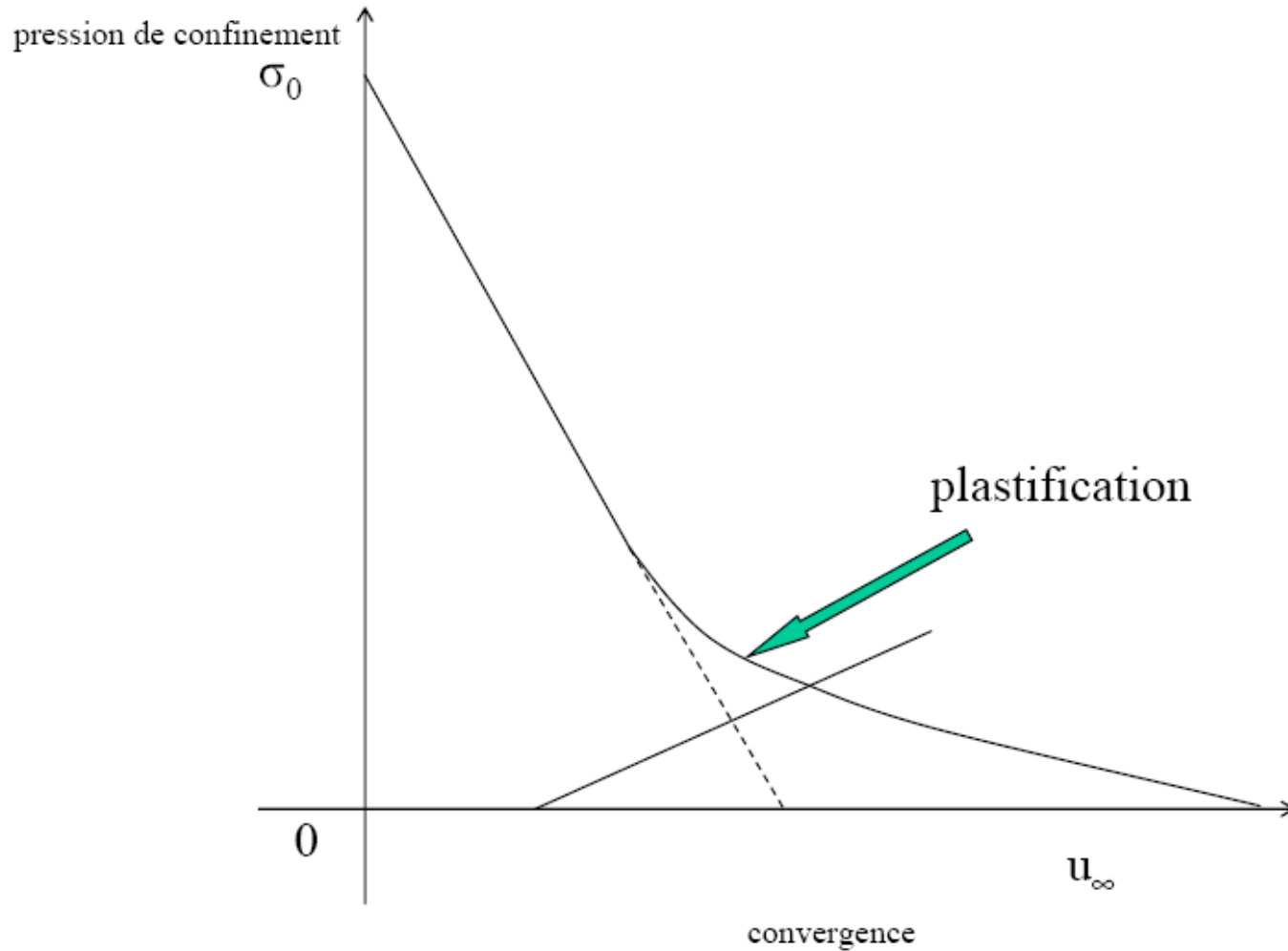
Soit  $p_b = 120 \text{ kPa} < p_{b\text{lim}} = 157 \text{ kPa}$

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  $\varphi$  0° - 30° - 45°
  - relation  $R_c$  -  $(c, \varphi)$  :  $R_c = 2c \cdot \cos \varphi / (1 - \sin \varphi)$
  - relation  $R_t$  -  $(c, \varphi)$  :  $R_t = 2c \cdot \cos \varphi / (1 + \sin \varphi)$
- 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  $\lambda_e$ .

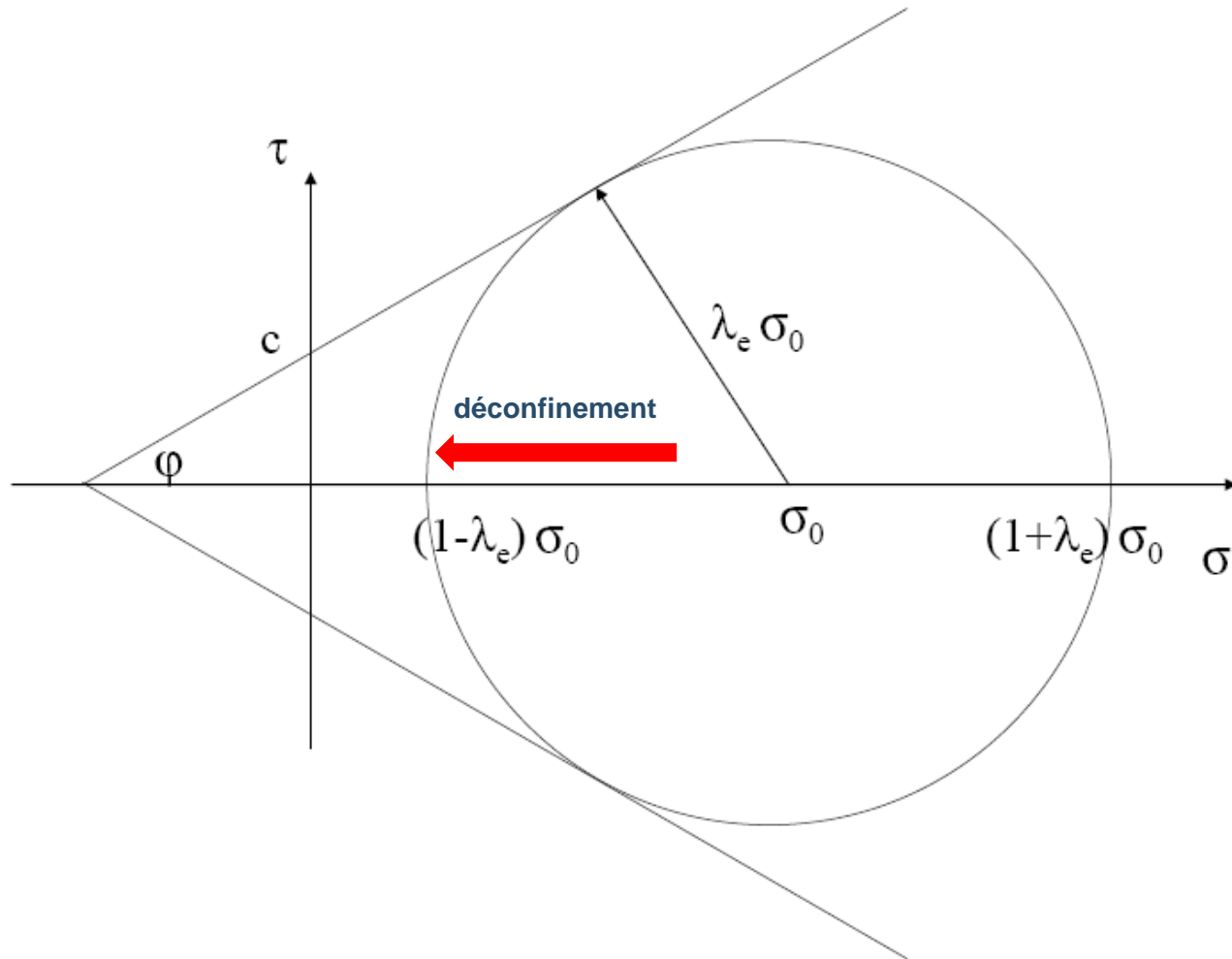
$$\lambda_e \cdot \sigma_0 = (c / \operatorname{tg} \varphi + \sigma_0) \sin \varphi$$

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

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

# 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, N°spécial TOS 05.93

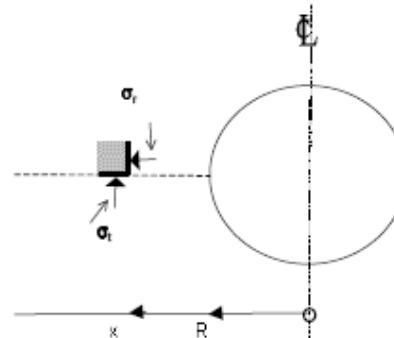
Le calcul des tunnels par la méthode convergence-confinement, Marc Panet, presses ENPC, 1995

Terrain encaissant:

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

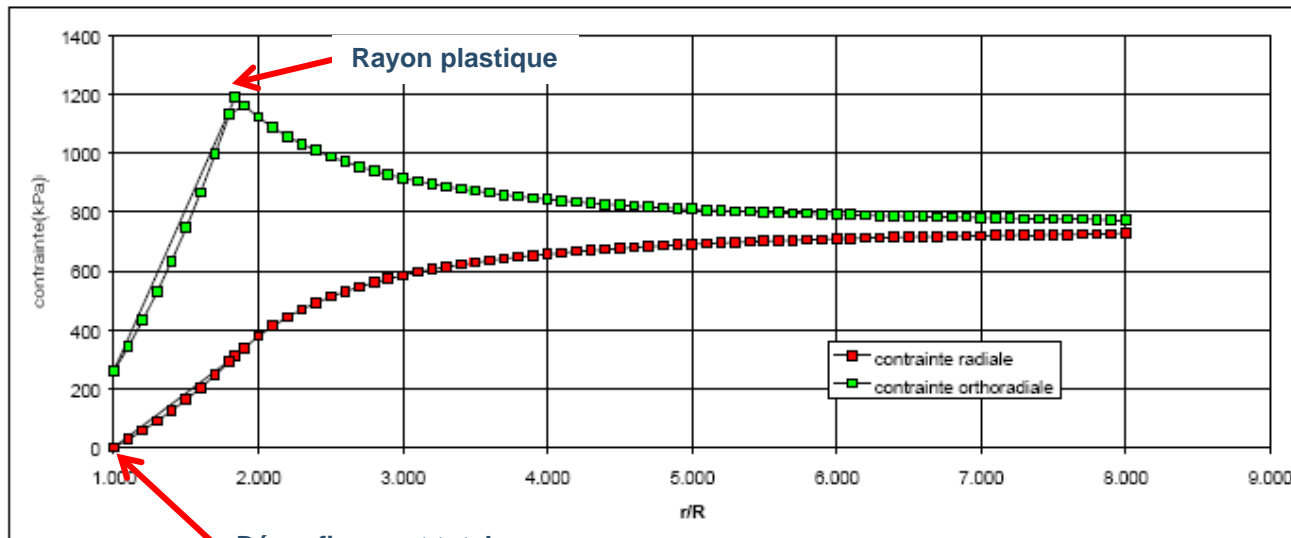
pour  $\lambda = 1.00$

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



Contrainte géostatique:  $\sigma_g =$

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

$\alpha$  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 : 
$$\xi = \frac{u_{\infty el}}{u_{\infty pl}}$$

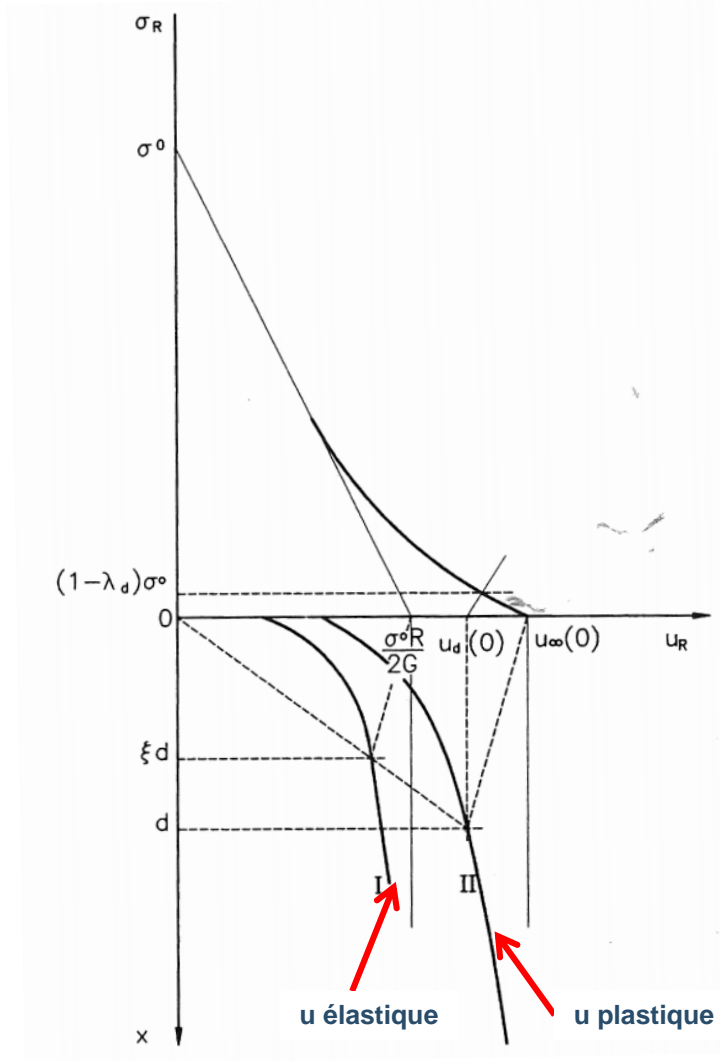
La courbe  $u_{pl} = f(x/R)$  est la transformée de la courbe correspondante en élasticité par homothétie de centre 0 et de rapport  $1/\xi$

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

*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

$E = 300 \text{ MPa}$

$\nu = 0,3$

$c = 150 \text{ kPa}$

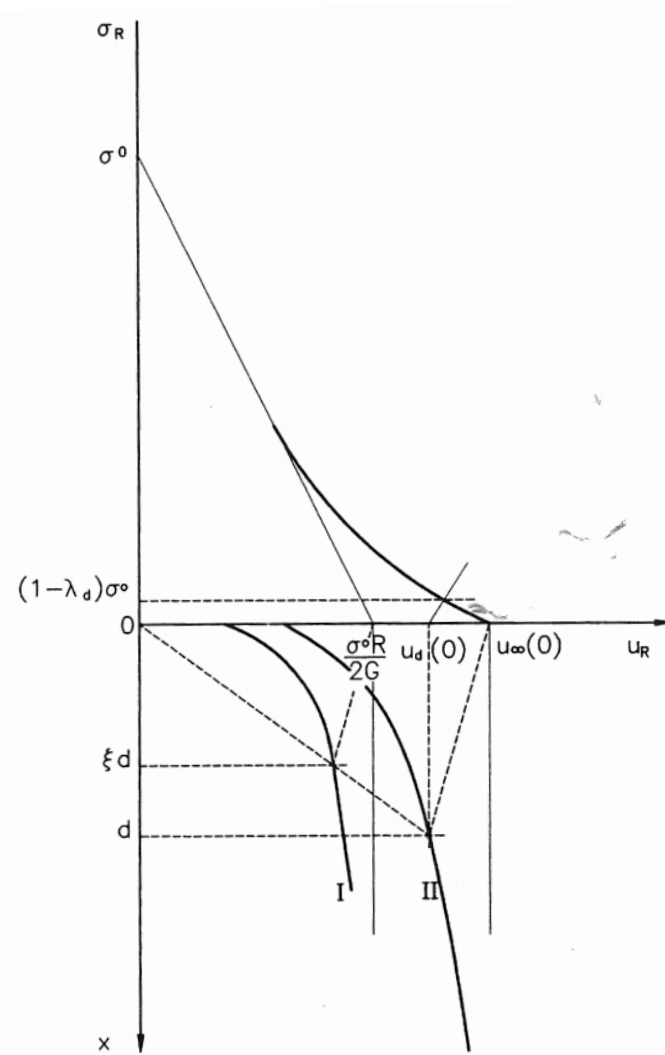
$\varphi = 30^\circ$

$\alpha = 1$

$R = 7\text{m}$

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

Soutènement posé à 2m du front



# Exercice d'application en élasto-plastique

## Exemple:

Marnes et Caillasses

$E = 300 \text{ MPa}$

$\nu = 0,3$

$c = 150 \text{ kPa}$

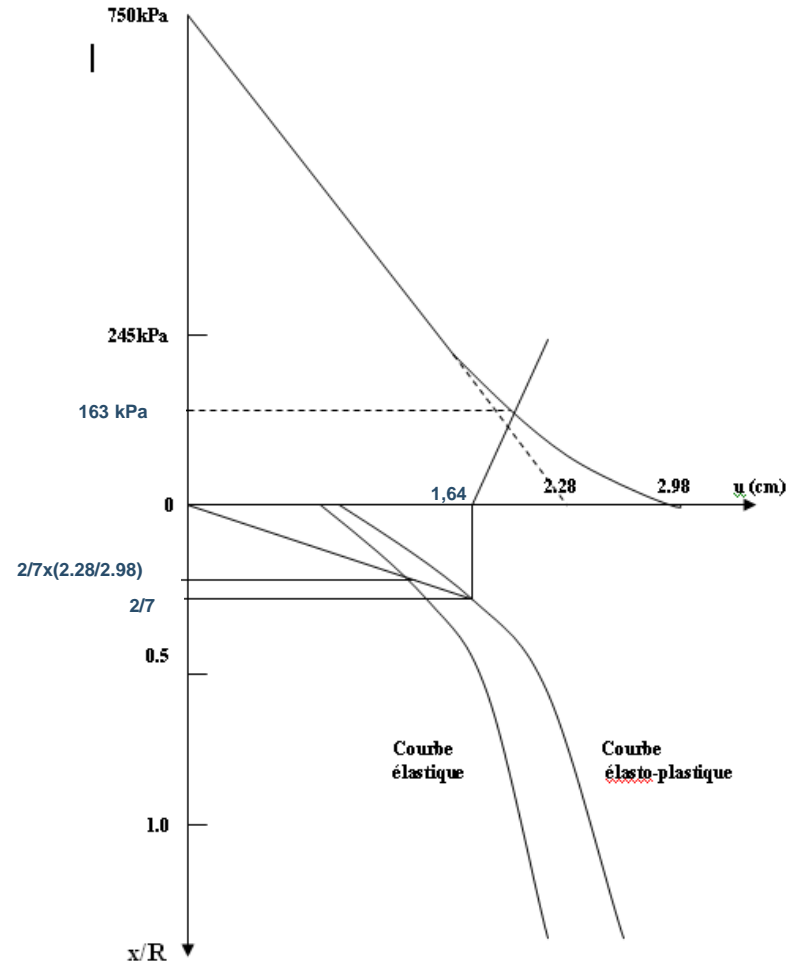
$\varphi = 30^\circ$

$\alpha = 1$

$R = 7\text{m}$

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** °

coefficient de dilatance

**1**

>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** cm<sup>2</sup>

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

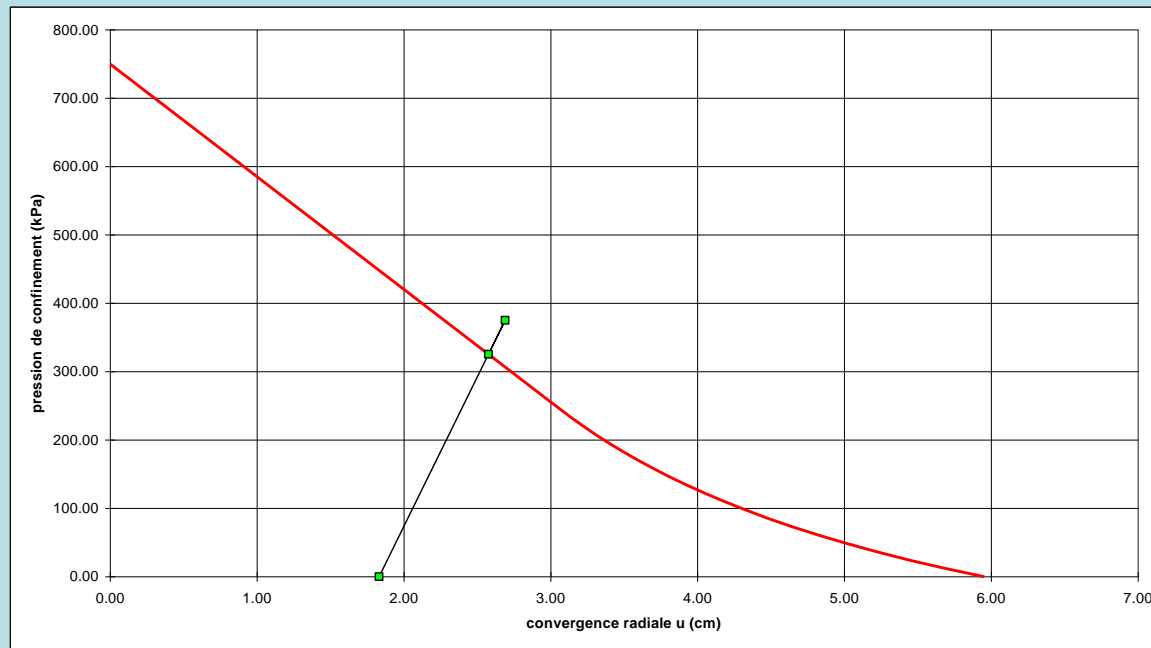
dist. point d'ancrage **3.50** m

>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



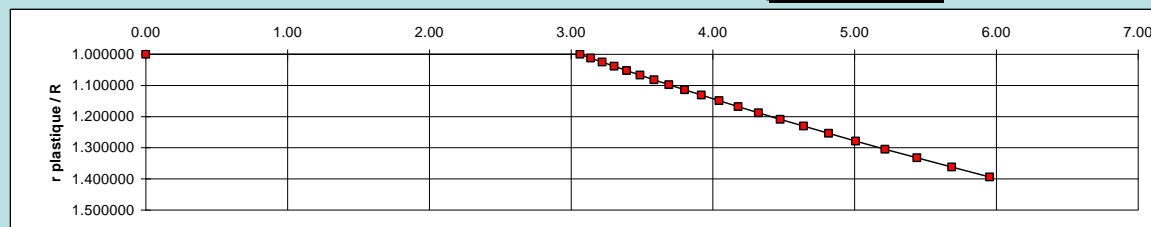
point d'équilibre:

Ps = 325 kPa

u = 2.58 cm

$\lambda =$  0.566

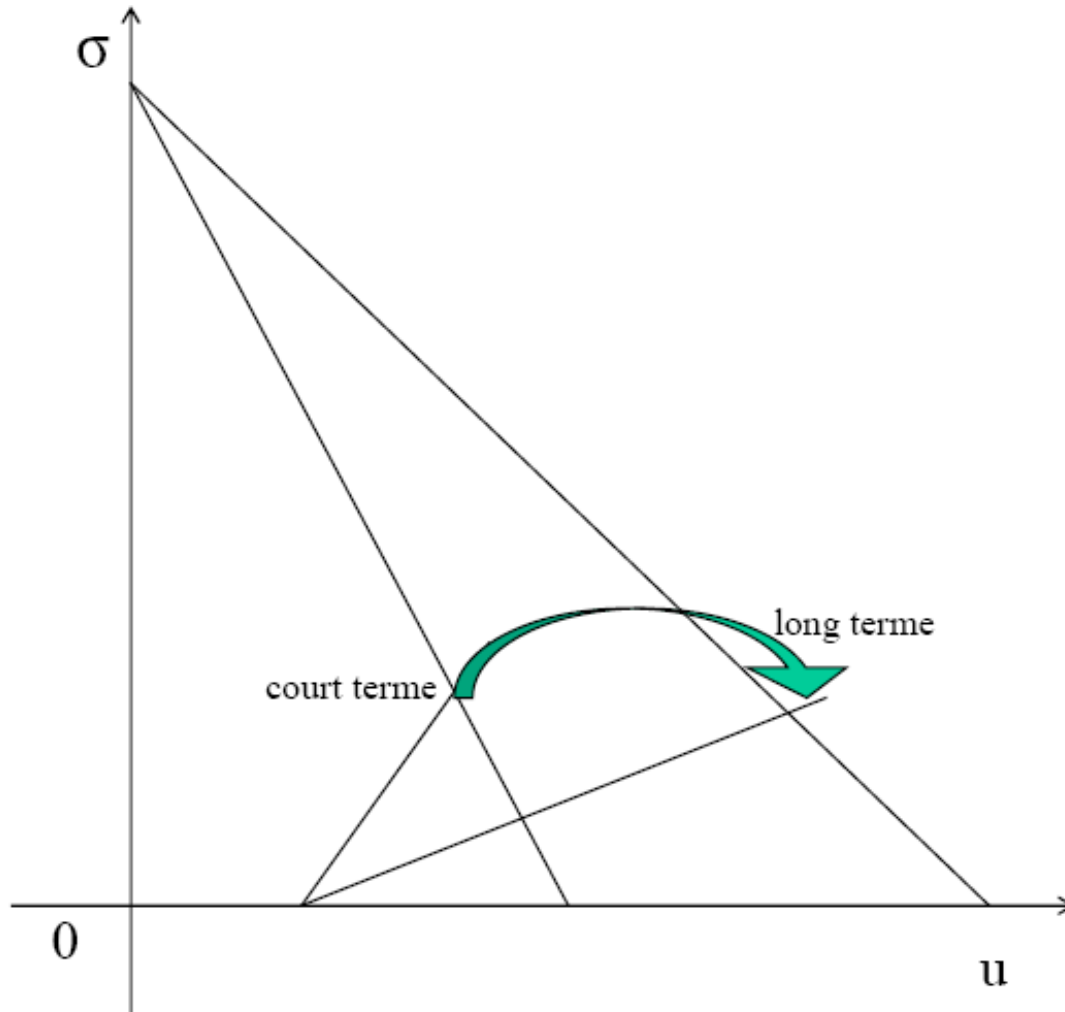
pour obtenir le point d'équilibre, lancer la macro1, touche de raccourci ctrl+a





# 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  $\phi = 30^\circ$**

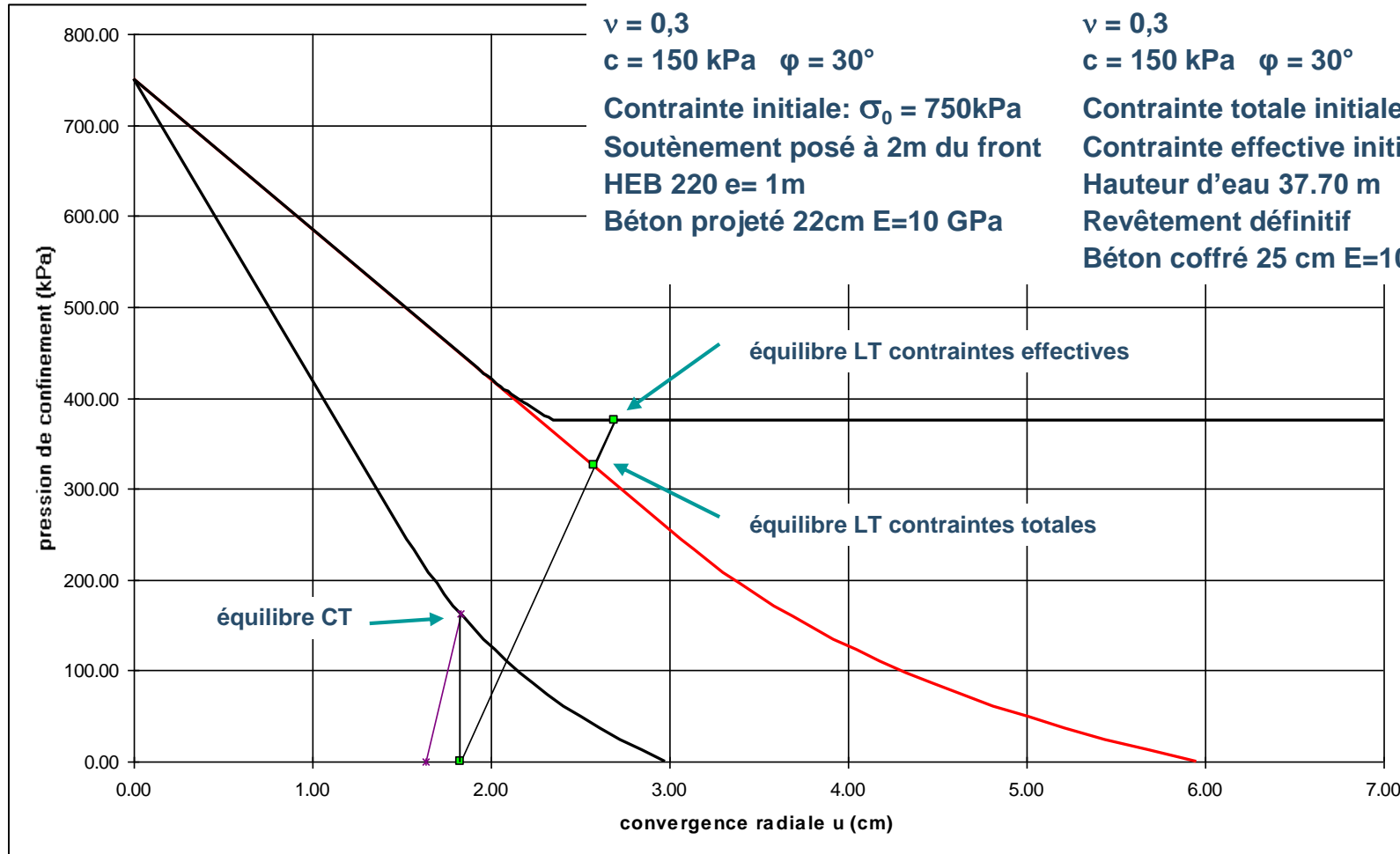
**Contrainte totale initiale:  $\sigma_0 = 750\text{kPa}$**

**Contrainte effective initiale: 375 kPa**

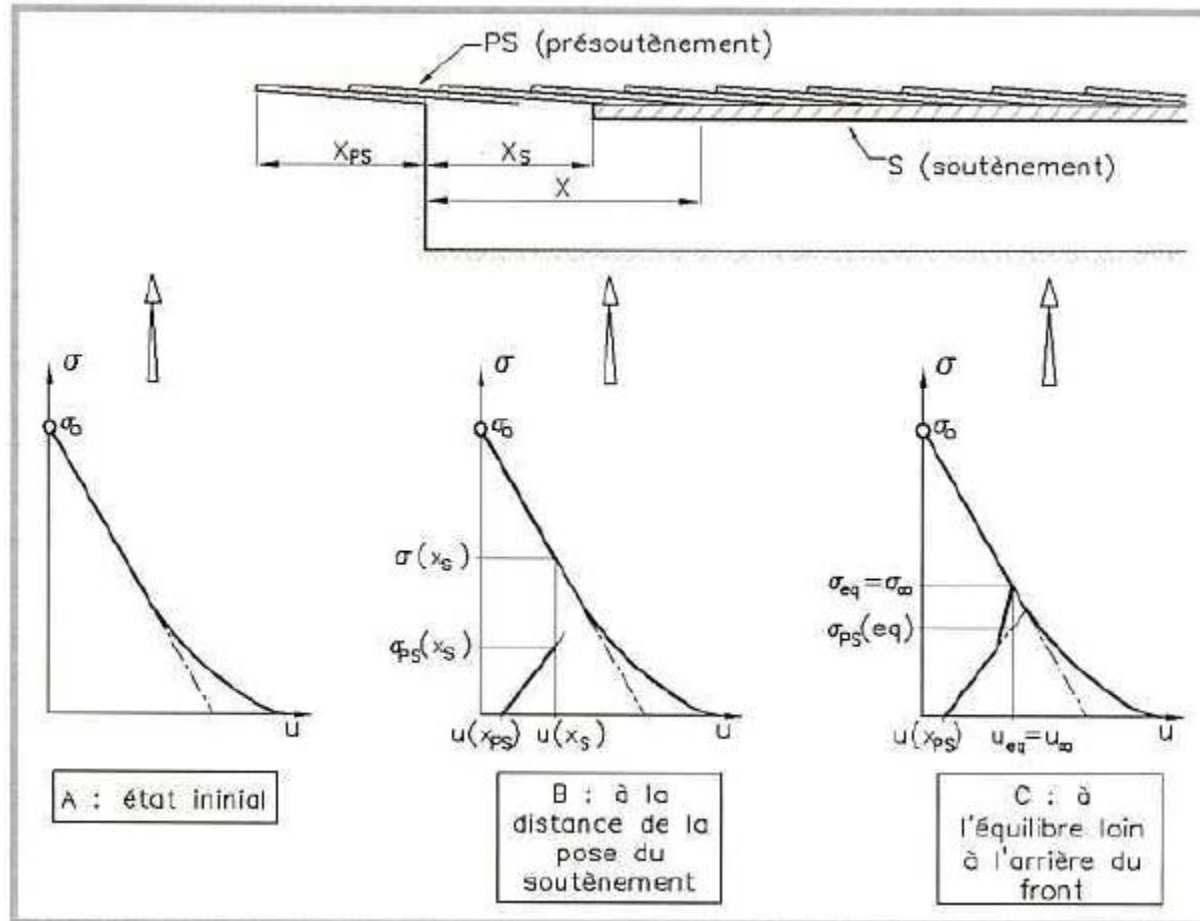
**Hauteur d'eau 37.70 m**

**Revêtement définitif**

**Béton coffré 25 cm E=10 GPa**



# Effet d'un présoutènement



$\lambda_{PS}$  avec présoutènement  $<$   $\lambda_S$  sans présoutènement

# Exemple du double présoutènement de Toulon

