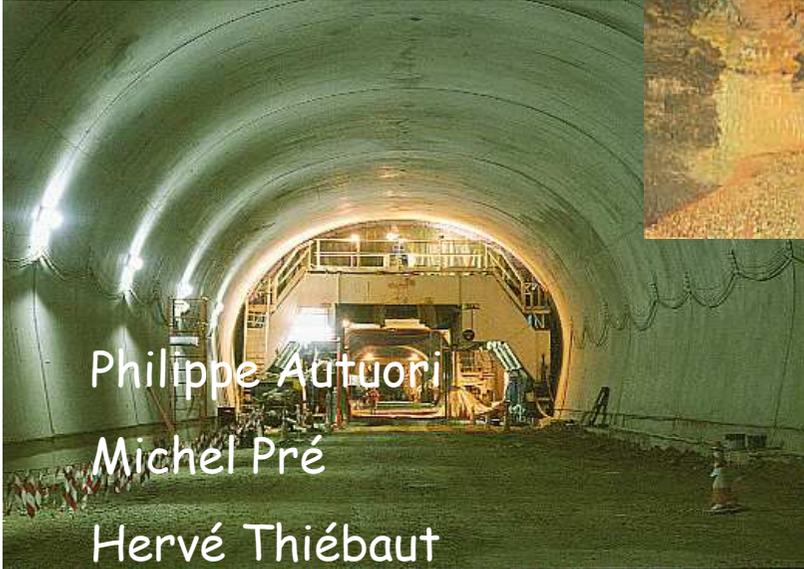
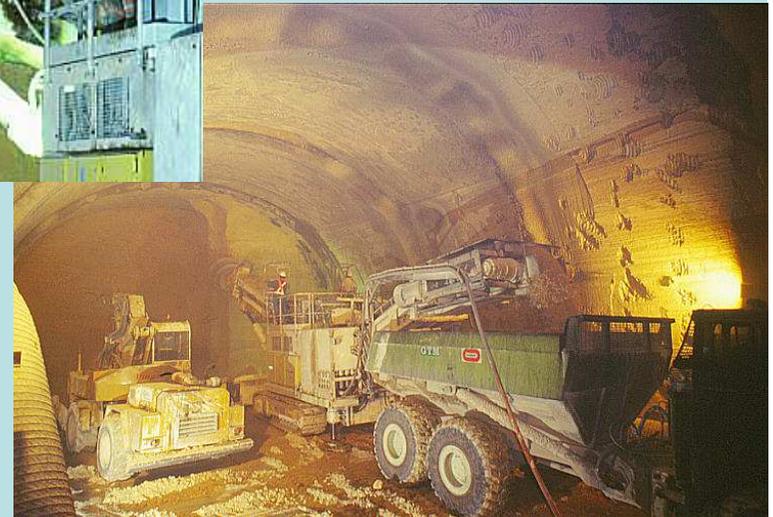




Le Calcul des tunnels



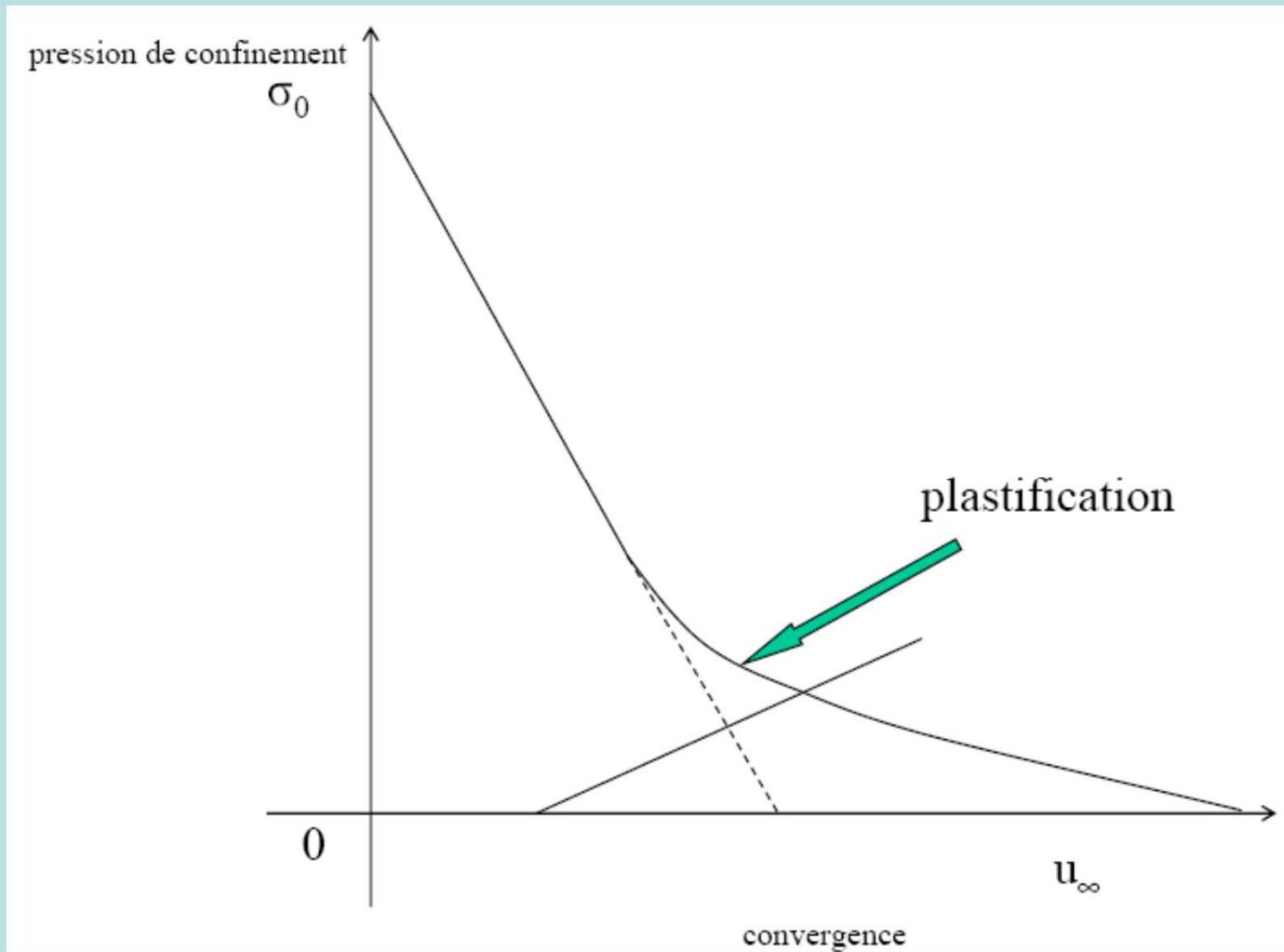
Philippe Autuori
Michel Pré
Hervé Thiébaud



2ème Séance

- La méthode convergence confinement: élasto-plasticité
- La méthode du solide composite
- Stabilité de front

➤ La méthode convergence confinement: élasto-plasticité



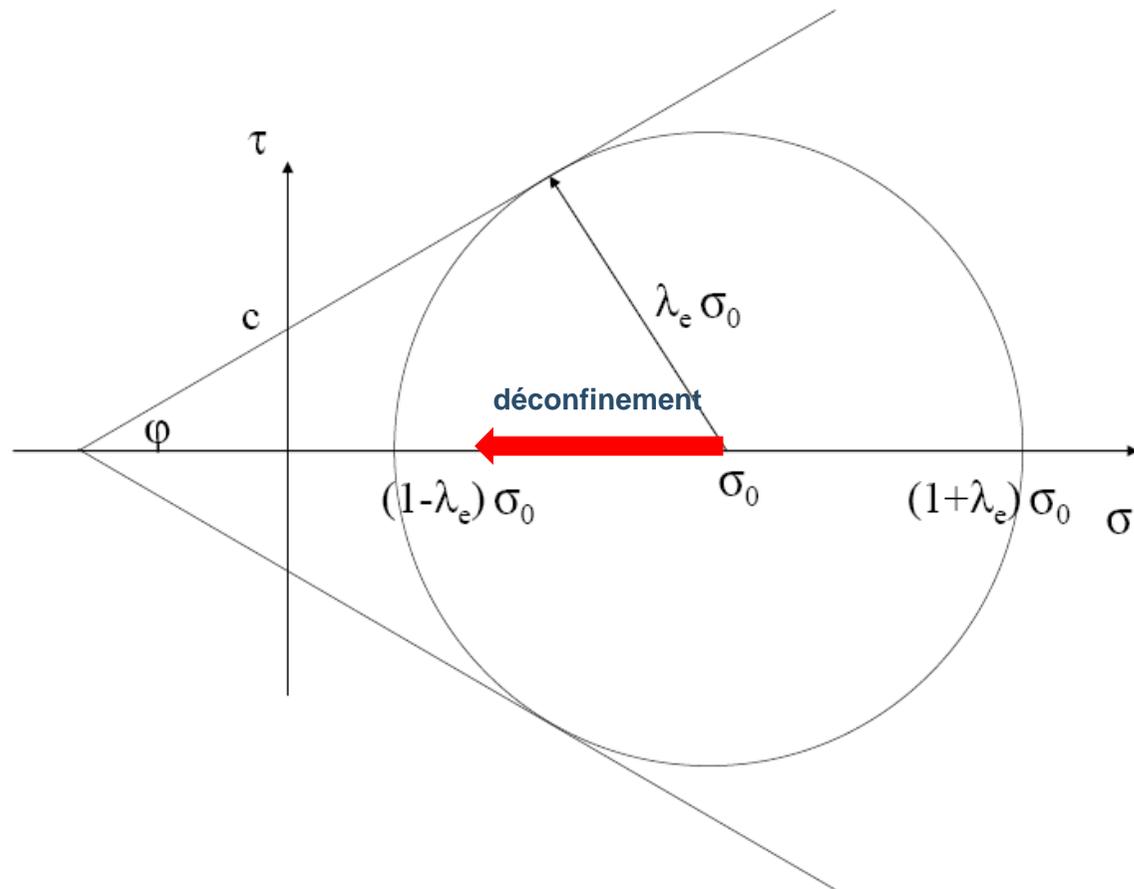
Limites du domaine élastique

- Critère de Mohr - Coulomb
 - cohésion c 20 kPa à 500 kPa
 - angle de frottement φ $0^\circ - 30^\circ - 45^\circ$
 - 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 .

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

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

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



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)**

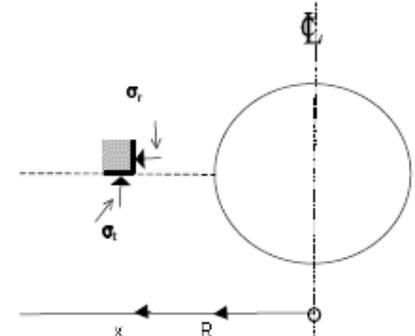
Réf. Recommandations sur l'emploi de la méthode convergence-confinement, N°spécial TOS 05.93
 Le calcul des tunnels par la méthode convergence-confinement, Marc Panet, presses ENPC, 1985

Terrain encaissant:

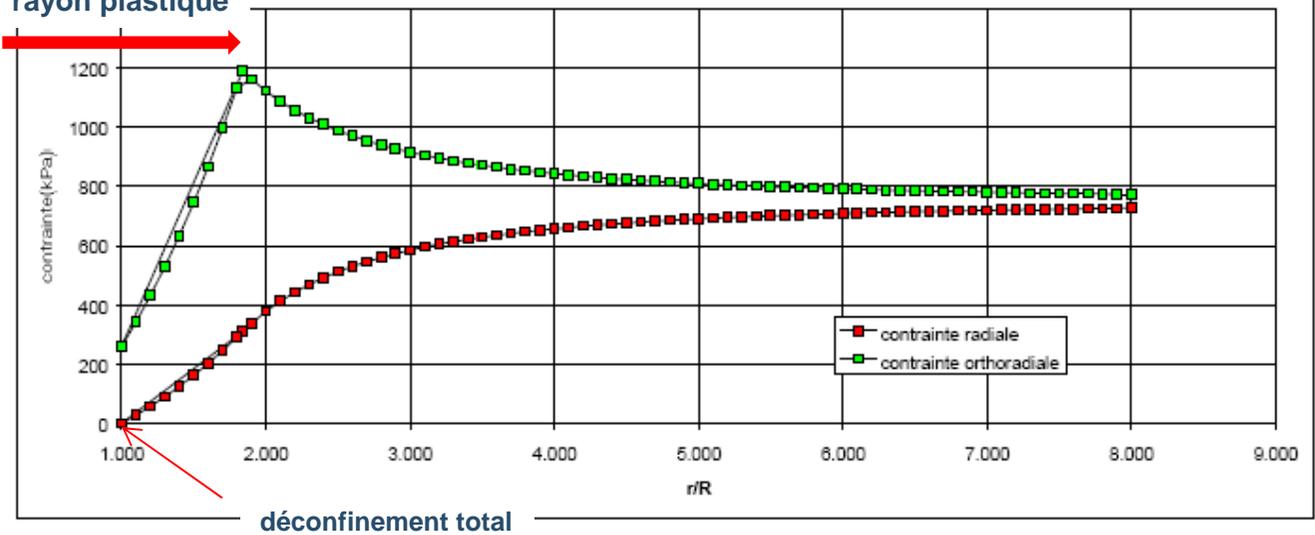
E	150	MPa
V	0.30	
c	75	kPa
φ	30	°
$>k_p$	3.00	
$>R_c$	280	kPa
coefficient de dilatance	1	
Contrainte géostatique: $\sigma_v =$	750	kPa
$>\lambda_p$	0.587	
$>\sigma_p$	310	kPa

pour $\lambda = 1.00$

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



rayon plastique



Milieu Elasto-plastique parfait

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

a) Rayon plastique :

▪ pour $\phi \neq 0$:

avec $K_p = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}$ $R_c = \frac{2.c \cdot \cos \phi}{1 - \sin \phi}$

$$\frac{R_p}{R} = \left[\frac{2}{K_p + 1} \cdot \left[(K_p - 1) \cdot \frac{\sigma_0}{R_c} + 1 \right] \right]^{\frac{1}{K_p - 1}}$$

▪ 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 :

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

Exemple:

Marnes et Caillasses

E = 300 MPa

$\nu = 0,3$

c = 150 kPa

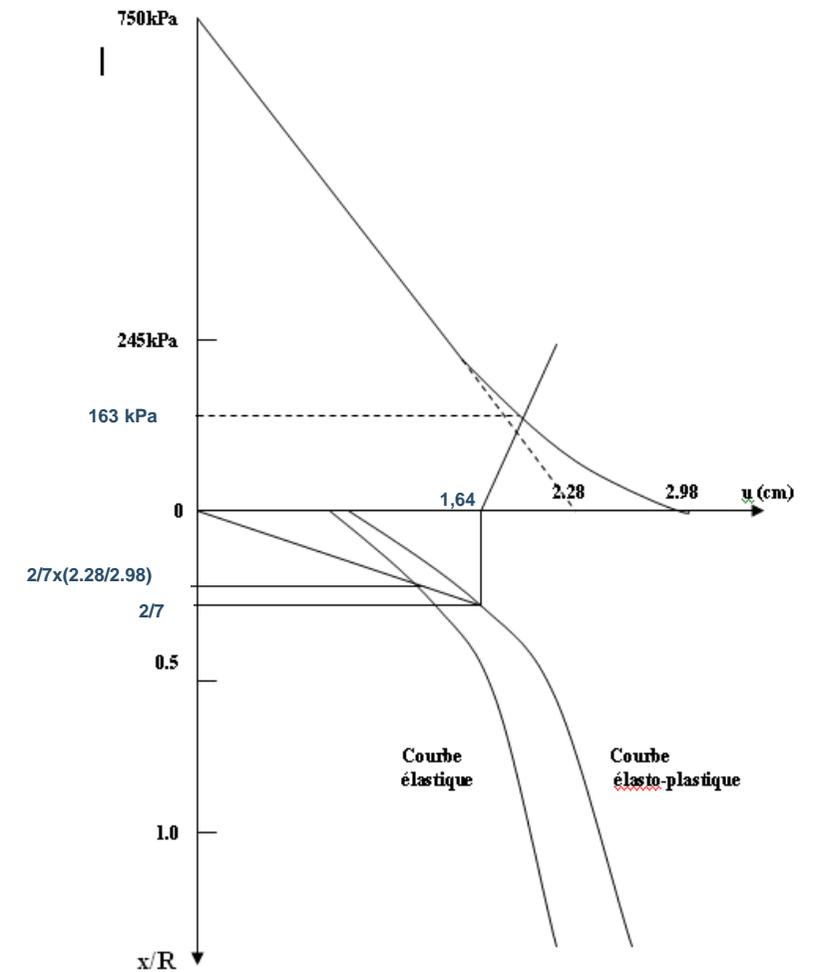
$\phi = 30^\circ$

$\alpha = 1$

R = 7m

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: $\sigma_n = 750$ kPa

Terrain encaissant: Excavation et soutènement
caractéristiques 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 dilatace

$\lambda = 1$

>kp = 3.00

>Rc = 520 kPa

>nombre de stabilité $N_s = 2.9$

> limite d'élasticité

> $\lambda_e = 0.673$

> $\sigma_e = 245$ 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

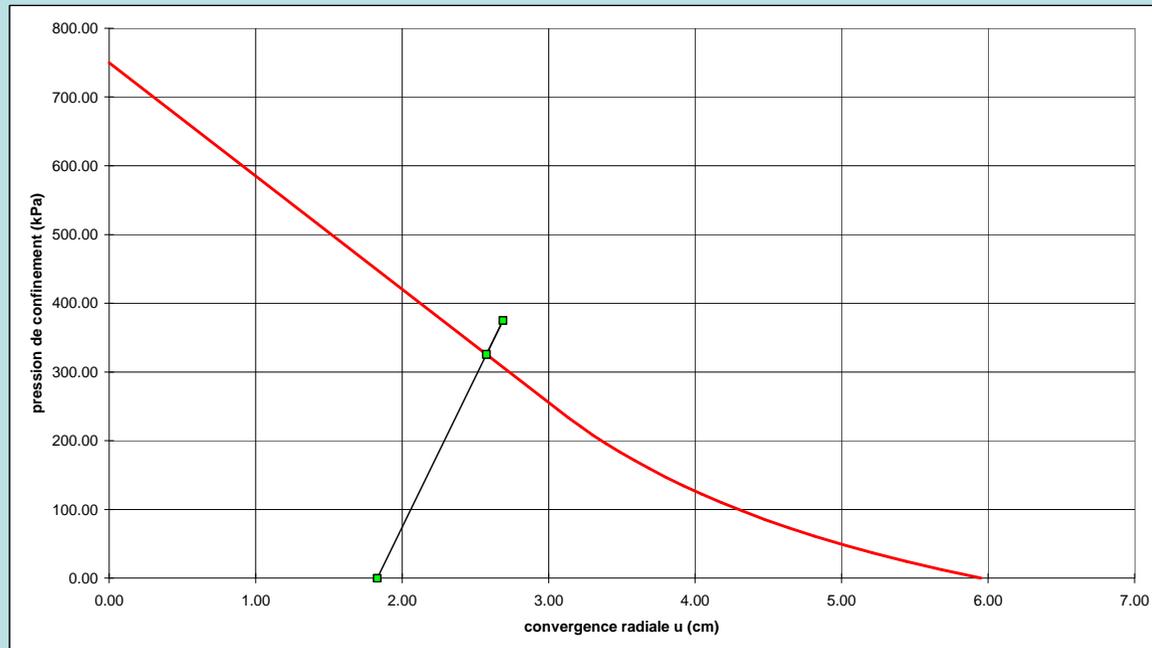
dist. point d'ancrage = 3.50 m

>module de rigidité $K_{sn} = 0$ MPa

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

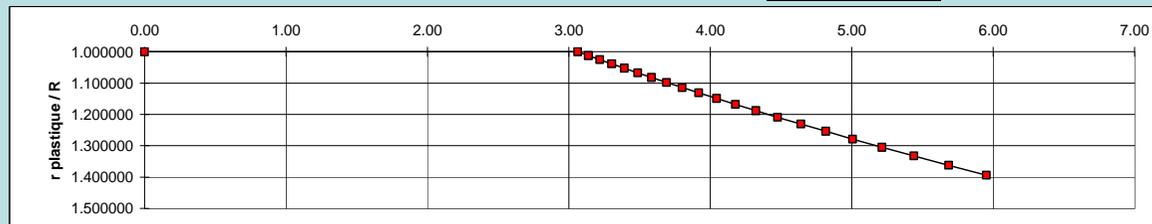
u initial/u inf = 0.31

jeu initial du soutènement = 0 mm

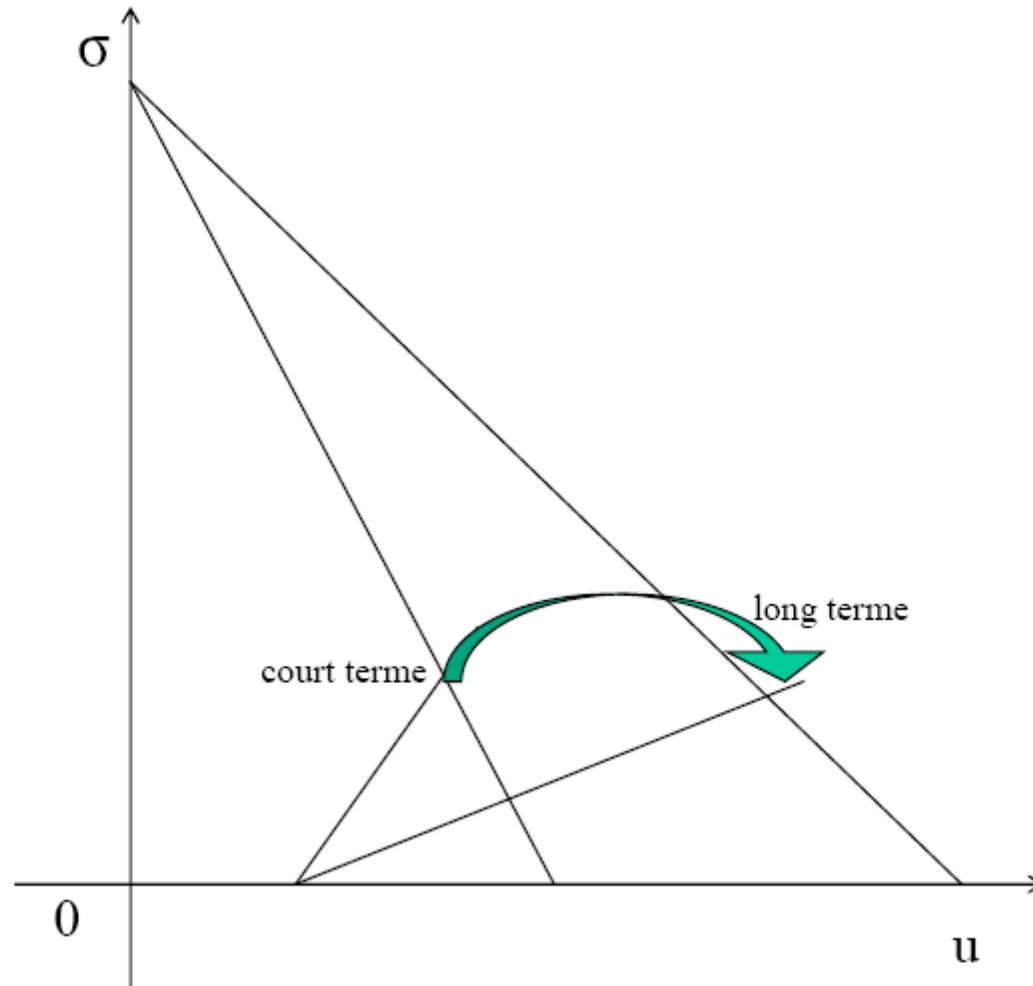


point d'équilibre: $P_s = 325$ kPa $\lambda = 0.566$
 $u = 2.58$ cm

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 $\phi = 30^\circ$

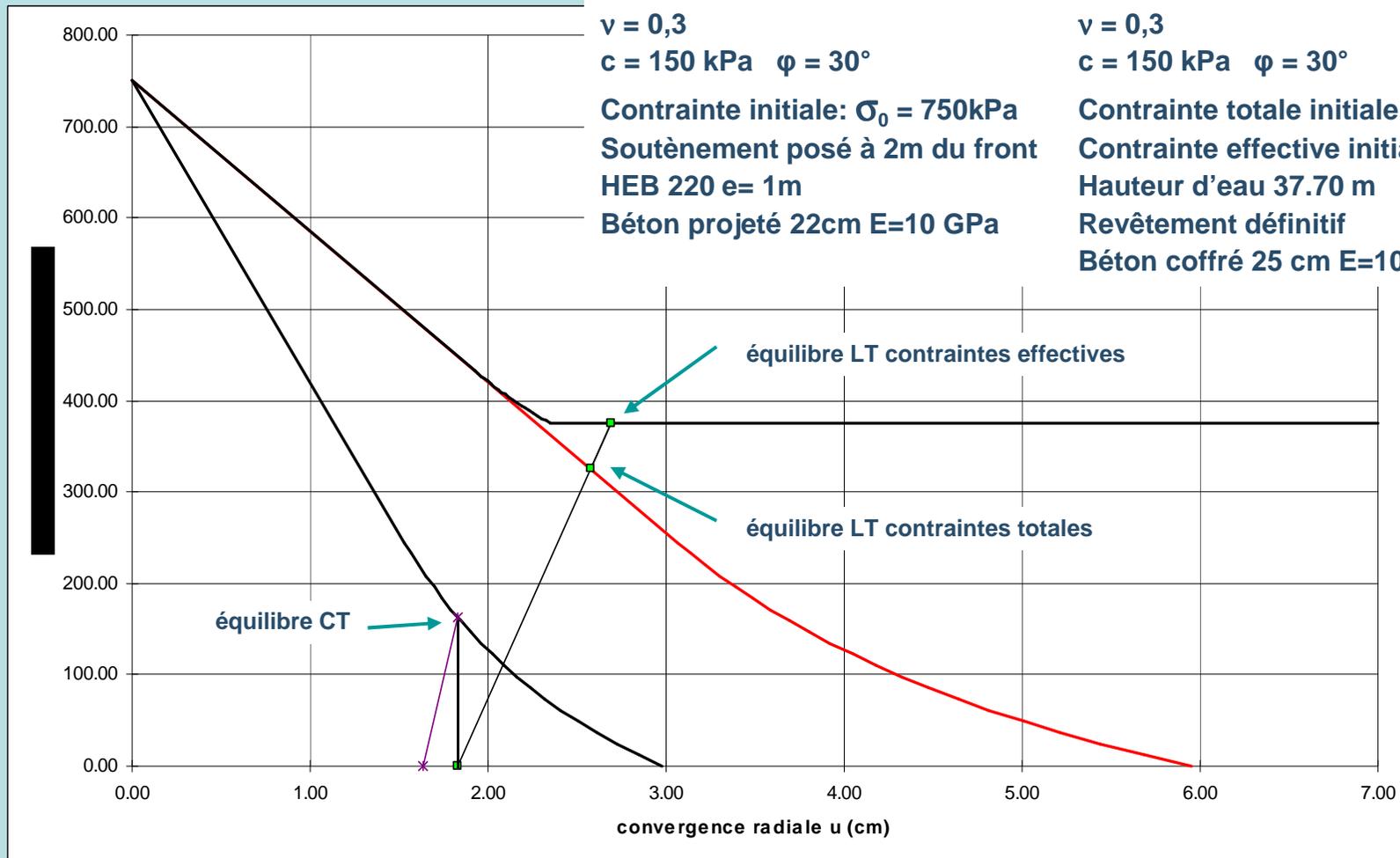
Contrainte totale initiale: $\sigma_0 = 750\text{kPa}$

Contrainte effective initiale: 375 kPa

Hauteur d'eau 37.70 m

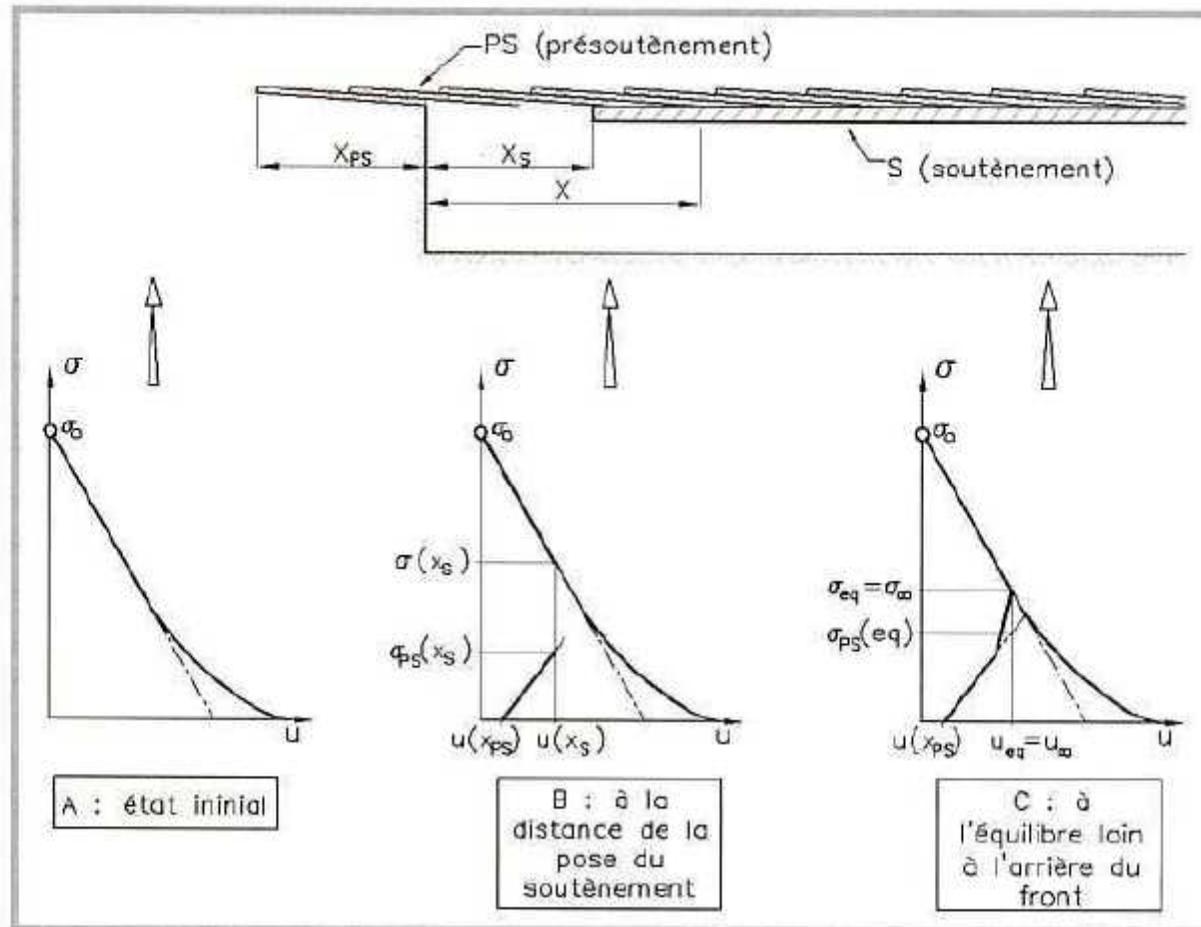
Revêtement définitif

Béton coffré 25 cm E=10 GPa

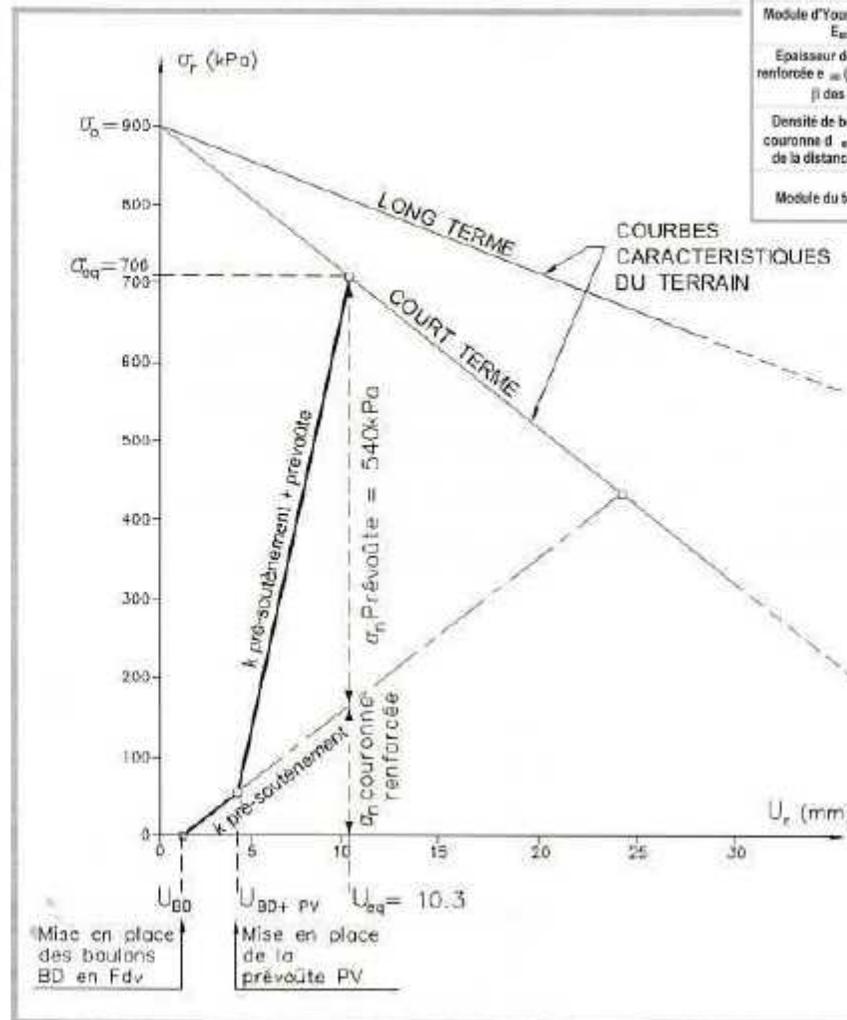


Effet d'un présoutènement

principe:



exemple du double présoutènement de Toulon :

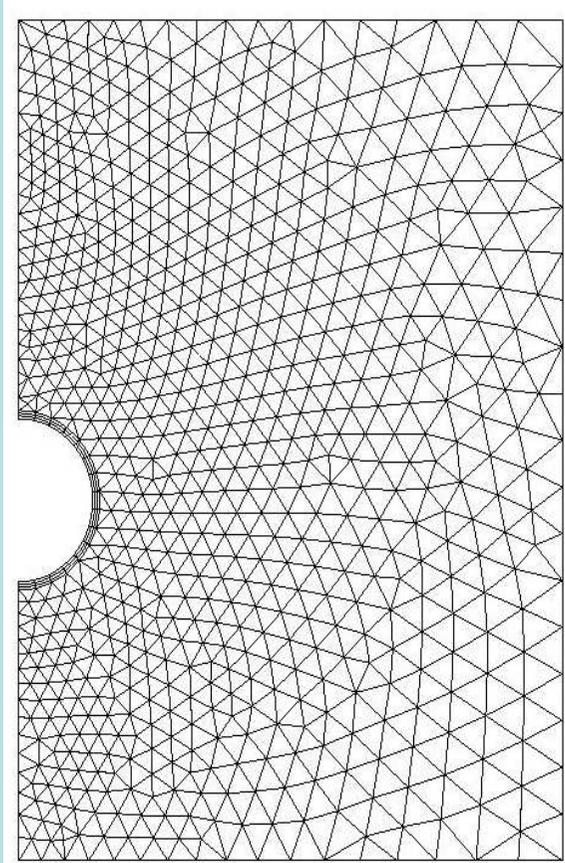


Paramètre	Calcul de base	Valeur minimale	Valeur maximale
Section des boulons S_{bol} (mm ²)	1 000	400	4 000
Module d'Young des boulons E_{bol} (MPa)	20 000 (fibre de verre)	10	210 000 (acier)
Épaisseur de la couronne renforcée e_{cor} (m) ou inclinaison β des boulons	$e_{cor} = 5$ m $\beta = 14^\circ$	$e_{cor} = 3,4$ m $\beta = 11^\circ$	$e_{cor} = 6,1$ m $\beta = 17^\circ$
Densité de boulons dans la couronne d_{bol} (n/m ²), fonction de la distance des ancrages	1	4	4
Module du terrain E_r (MPa)	150 (terrain non traité)	150	300

La méthode du Solide Composite

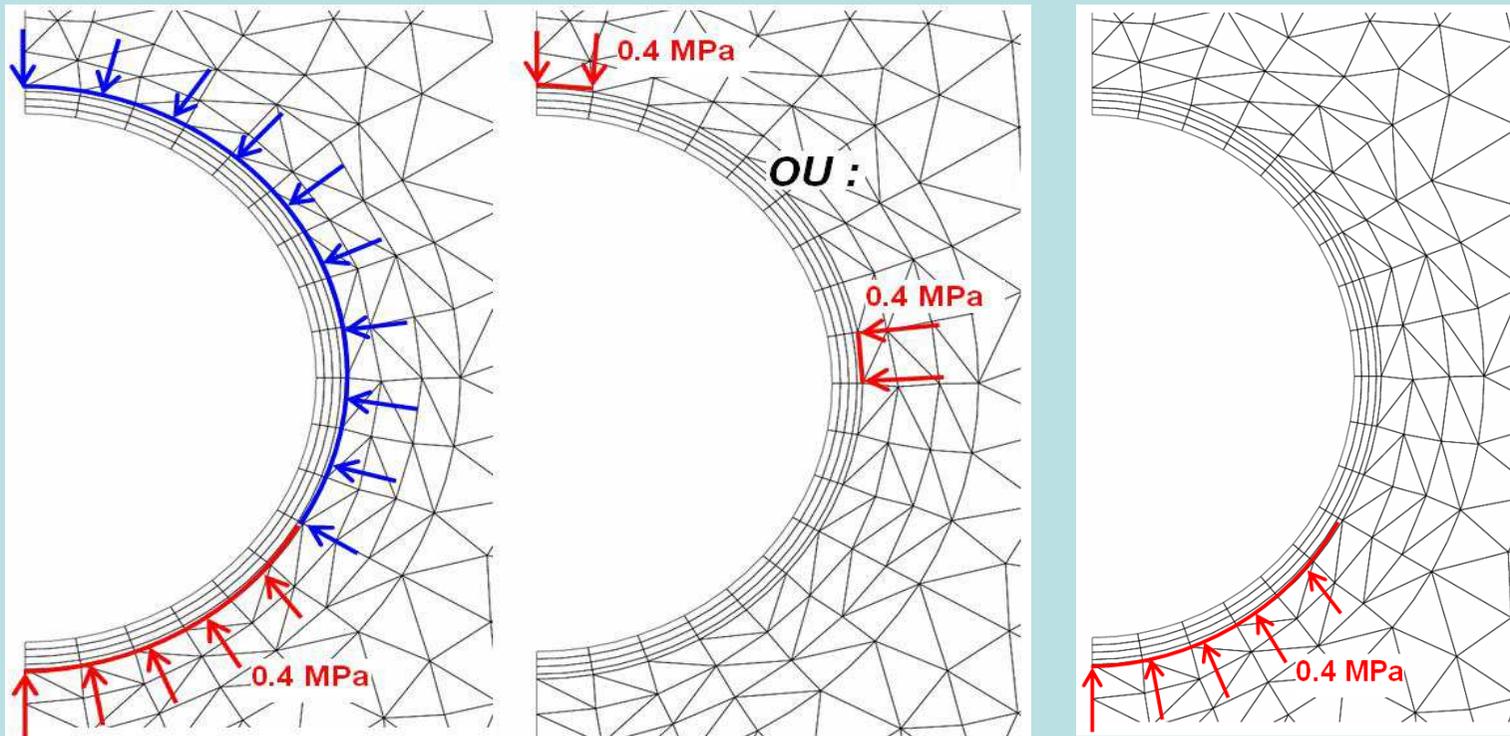
- Modélisation numérique 2D ou 3D (éléments finis, différences finies)
- Matériaux (Sol- structure) : éléments massifs
- Lois de comportement élastique ou plastique
- Possibilité d'éléments spéciaux (contacts) entre matériaux

Exemple de maillage Eléments Finis 2D – Tunnel Circulaire



- Plusieurs types possibles
 - Chargement extérieur (pressions)
 - Chargement résultant du poids volumique des matériaux (calculé à partir des contraintes initiales de poids propre ou résultant d'une phase de calcul antérieure)

Pressions externes exercées sur un revêtement



Possibilités données par la méthode

- En 2D : problème plan
- Modélisation plusieurs ouvrages (interaction)
- Calculs phasés
- Lois de comportement variées
- Appuis structures non linéaires (contacts, décollement, glissement)
- En 3D : étude de structures complexes

Mais

- En 3D limite taille modèle atteinte rapidement (nombre d'éléments et place de calcul)

La stabilité de front

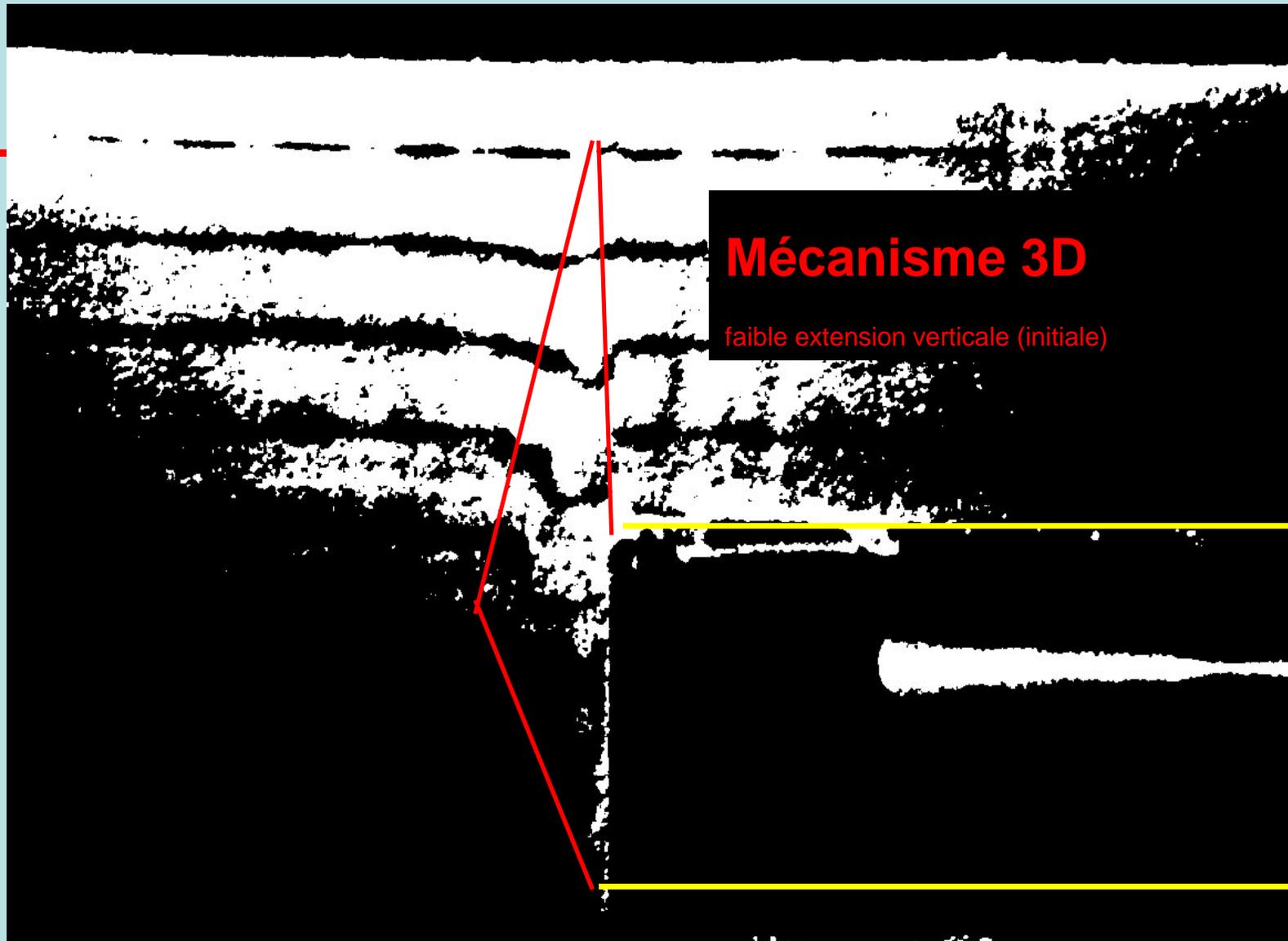
Exigences spécifiques

Les deux principaux risques concernent:

- La stabilité du front de taille au moment de l'excavation
- Les tassements de surface et leur impact éventuel sur le bâti environnant

Stabilité du Front de Taille





Mécanisme 3D
faible extension verticale (initiale)

Stabilité du front de taille d'un tunnel en terrain cohérent $F_u=0$, $c_u > 0$

Indicateur : le nombre de stabilité :

$$N = 2\sigma_0 / R_c$$

(= σ_0 / C_u en terrain purement cohérent)

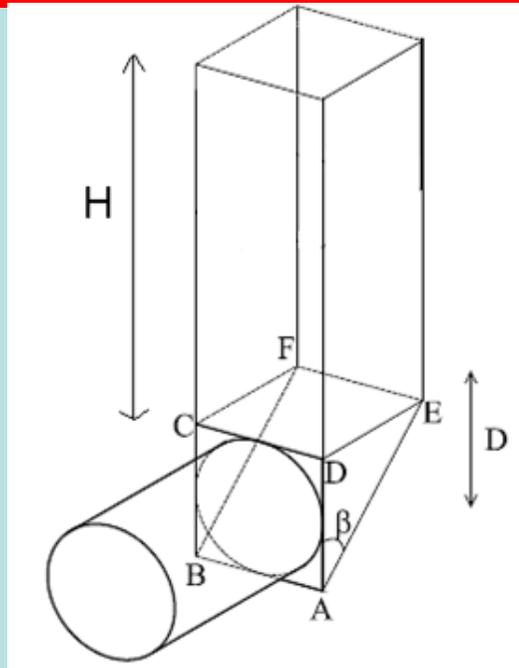
Dans le cas avec P_a =pression au front:

$$N = \frac{2(\sigma_0 - P_a)}{R_c} \quad \left(= \frac{\sigma_0 - P_a}{C_u} \right)$$

Détermination de la valeur de N_c critique:

$5 < N_c < 7$ (Broms 1967 ou Peck 1969)

Stabilité du front de taille



Méthode Anagnostou-Kovari : estimation de la pression de confinement à appliquer pour assurer la stabilité du front sous l'effet du poids des terrains sus-jacents.

Estimation des charges gravitaires induites par un prisme de rupture et évaluation de la pression nécessaire pour empêcher le glissement.

Angle du prisme:

$$\beta = \frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}$$

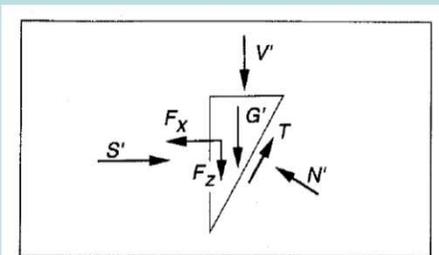
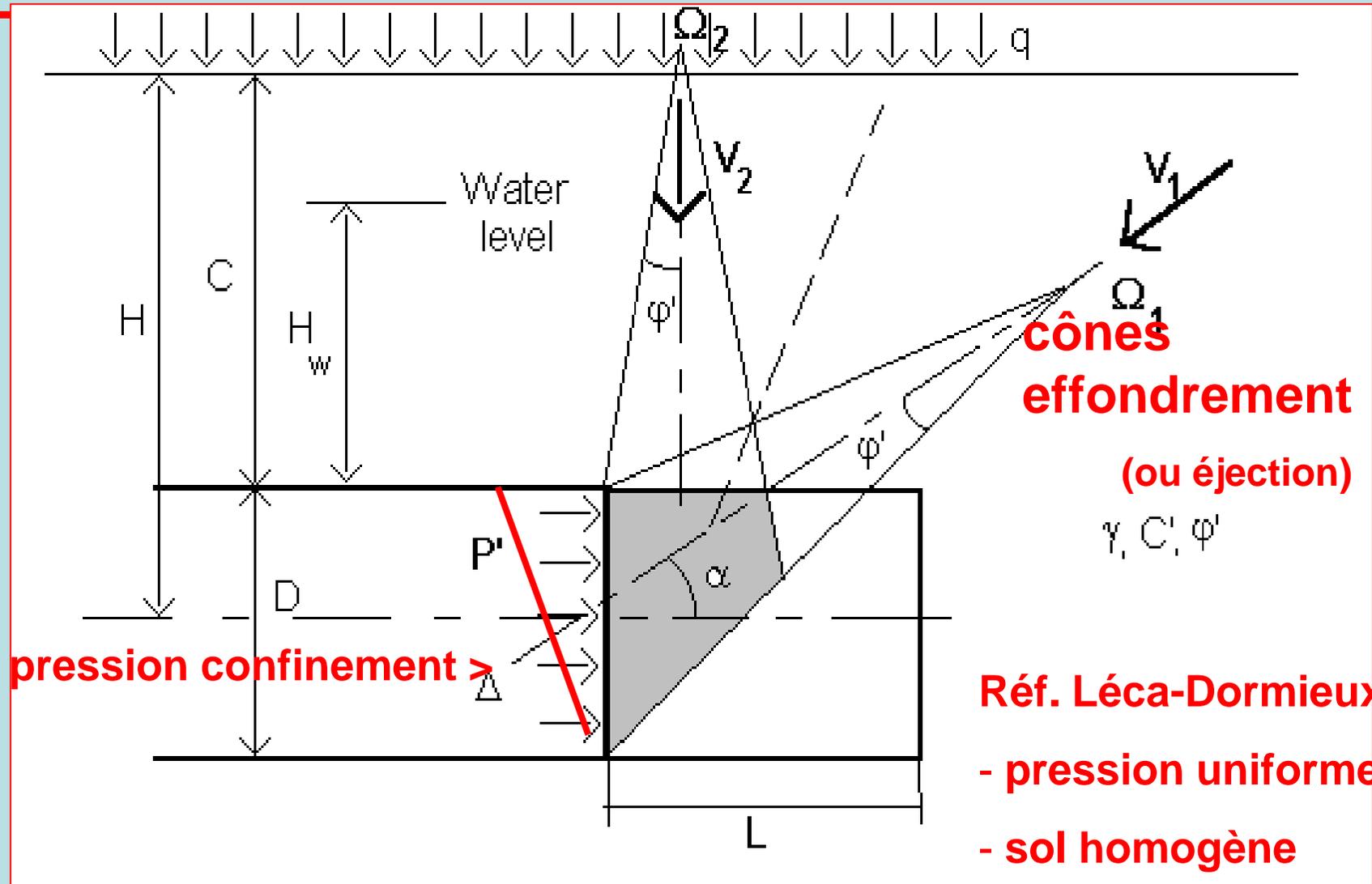


Figure 4. Forces acting upon the wedge in front of the tunnel face.

Modèles Analytiques plus généraux $F > 0, c > 0$



Exemple d'étude numérique de stabilité de front d'une zone singulière

Tunnelier à Air Comprimé

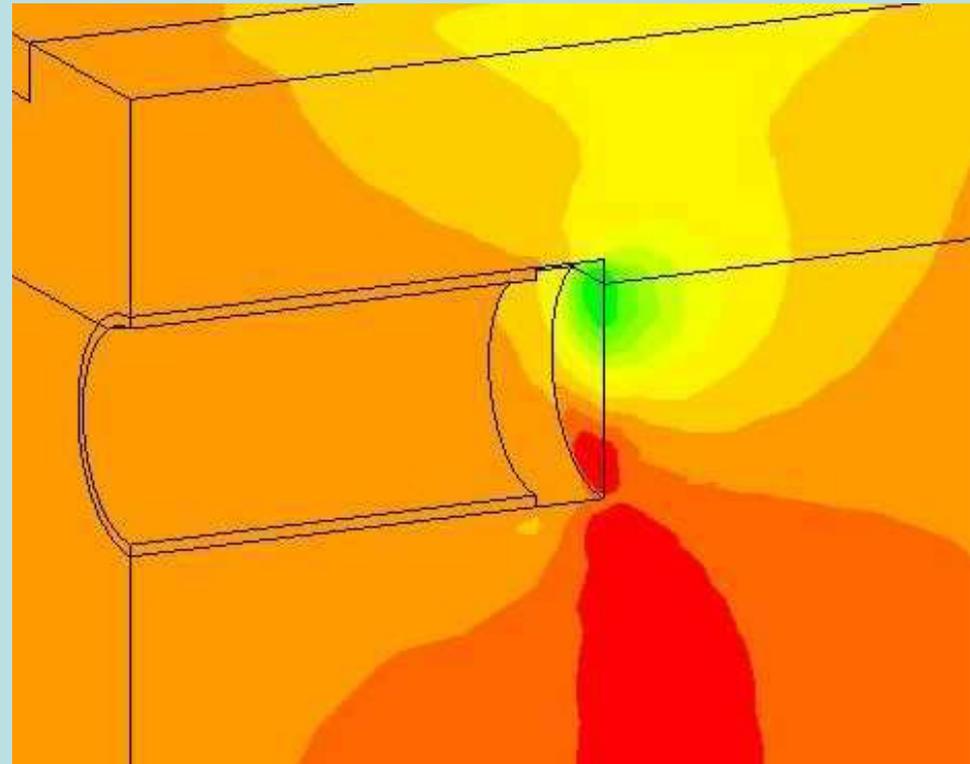
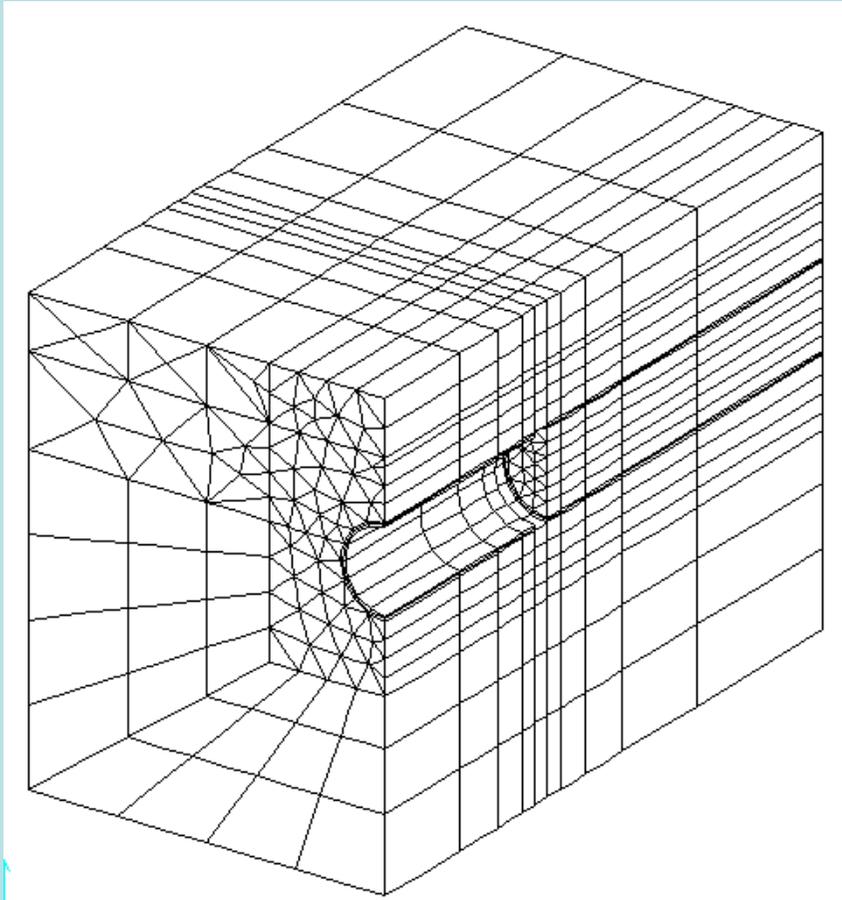
Points singuliers : passage à proximité culée pont rail

Hétérogénéité des charges autour du tunnel

Pression de stabilisation du front

Pression requise pour minimiser les tassements

Etude Stabilité du front en 3D



Modèles Numériques vs Analytiques

