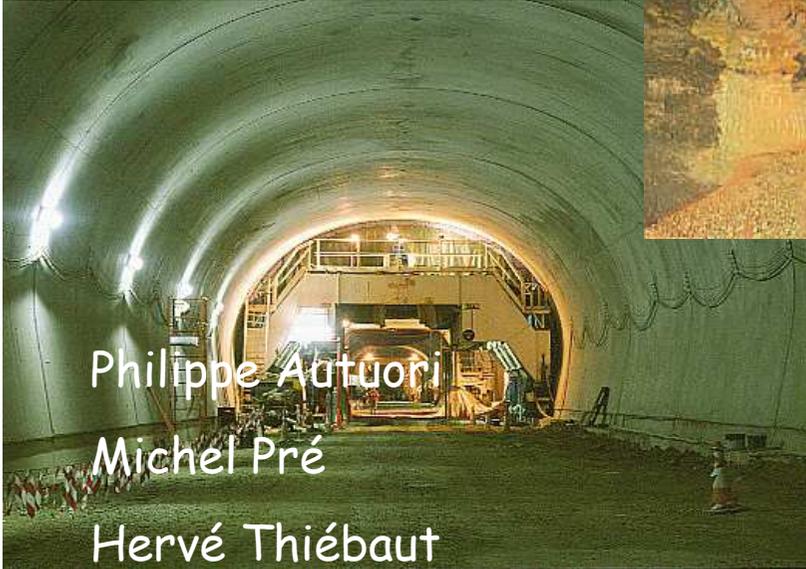
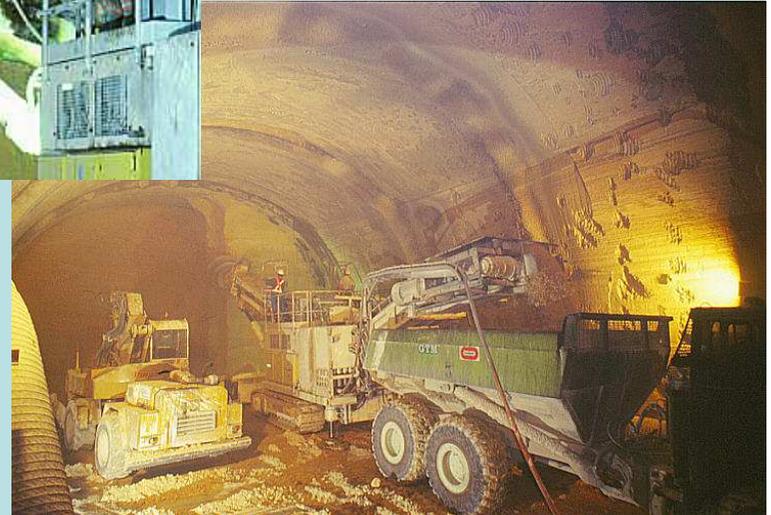




# Le Calcul des tunnels



Philippe Autuori  
Michel Pré  
Hervé Thiébaud



# Programme des 3 séances

---

- 1 : Panorama des méthodes de calcul
  - Les méthodes semi-empiriques
  - Les méthodes d'interaction
    - Les réactions hyperstatiques
    - La méthode convergence confinement
- 2 : Les méthodes d'interaction suite
  - La méthode convergence/confinement (2/2)
  - La méthode du solide composite
  - Analyse particulière de la stabilité du front
- 3 : Dernière séance
  - Première partie: les déformations autour des tunnel (tassements)
  - Test d'évaluation

---

## 1<sup>ère</sup> Séance

- Les méthodes semi-empiriques
- Les méthodes d'interaction
  - Les réactions hyperstatiques
  - La méthode convergence confinement

# Les méthodes semi-empiriques

---

Elles supposent une cinématique de rupture ou de décompression du terrain autour de l'ouvrage

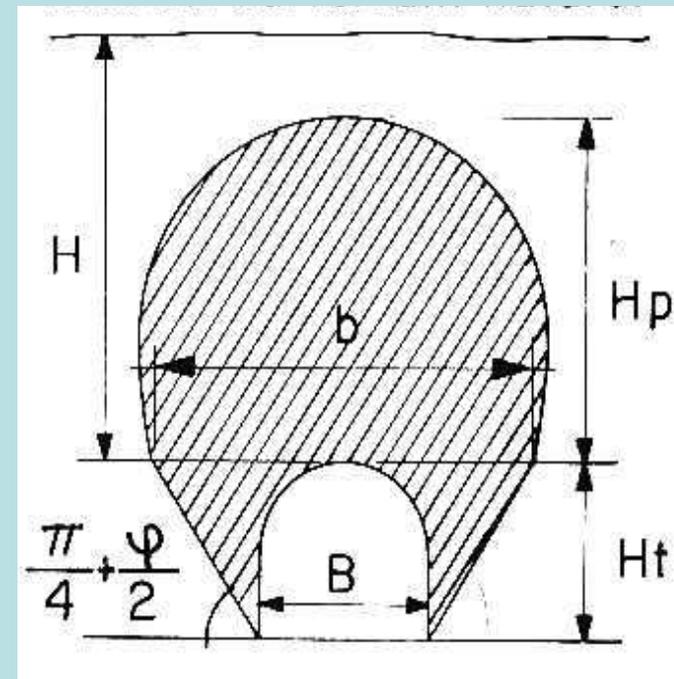
Proposition d'une charge apportée par le sol sur le soutènement

Ex. Les méthode TERZAGHI - PROTODIAKONOV

# La méthode de Terzaghi

Calcul du soutènement à partir  
d'une hauteur de terrain  
décompressée (cloche) au-  
dessus de la voûte

Dimensions de la cloche en  
fonction des caractéristiques  
du terrain



---

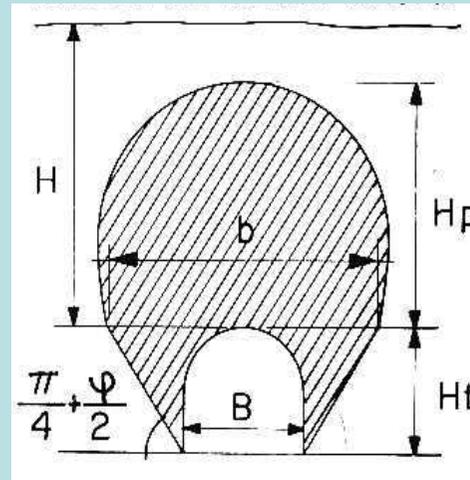
Avec pour les milieux rocheux

$H_p$  = Hauteur de la surcharge de terrain au-dessus de la voûte

$B$  = Largeur de l'ouverture de l'ouvrage

$H_t$  = Hauteur de la galerie

$K$  = coefficient variable suivant la nature du terrain



$$H_p = K(B + H_t)$$

Nature de la roche	Charge $H_p$	Remarques
Dure et intacte	0 à 0.25 B	Quelques ancrages s'il y a chute de pierres
Dure et stratifiée	0 à 0.5 B	Soutènement léger
Massive avec quelques joints	0 à 0.25 B	La charge peut changer brusquement d'un point à l'autre
Modérément ébouleuse	0.25 à 0.35 (B+ $H_t$ )	Pas de pression latérale
Très ébouleuse	0.35 à 1.1 (B+ $H_t$ )	Peu ou pas de pression latérale
Complètement broyée Chimiquement inerte	1.1 (B+ $H_t$ )	Pression latérale considérable
Roche fluante à profondeur modérée	1.1 à 2.1 (B+ $H_t$ )	Grande pression latérale Cintres circulaires recommandés
Roche fluante à grande profondeur	2.1 à 4.5 (B+ $H_t$ )	Grande pression latérale Cintres circulaires recommandés
Roche gonflante	jusqu'à 75 m indépendant de (B+ $H_t$ )	Cintres circulaires Dans les cas extrêmes, cintres coulissants

# Les méthodes d'interaction

---

## Principe général

Le chargement appliqué au soutènement et/ou au revêtement résulte d'un calcul d'équilibre avec le terrain

Ces méthodes peuvent être analytiques (méthode convergence-confinement) ou numériques (méthodes des réactions hyperstatiques ou du solide composite)

# La méthode des réactions hyperstatiques

---

Privilégie le rôle du soutènement

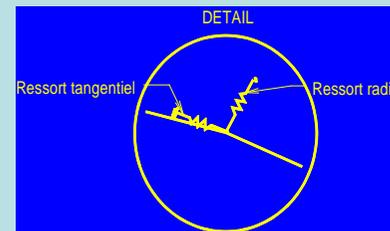
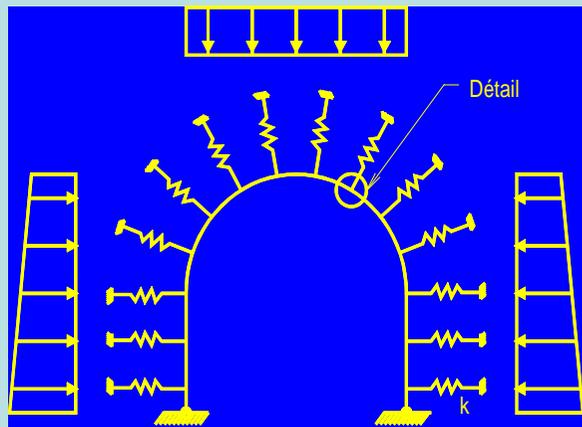
Action du terrain encaissant assimilé à des charges extérieures

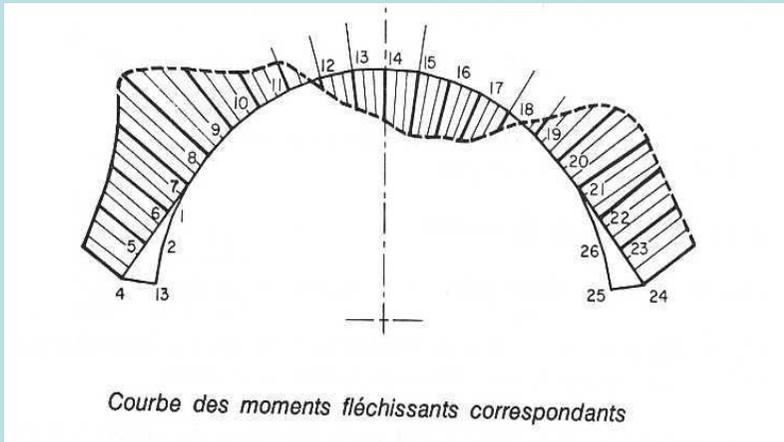
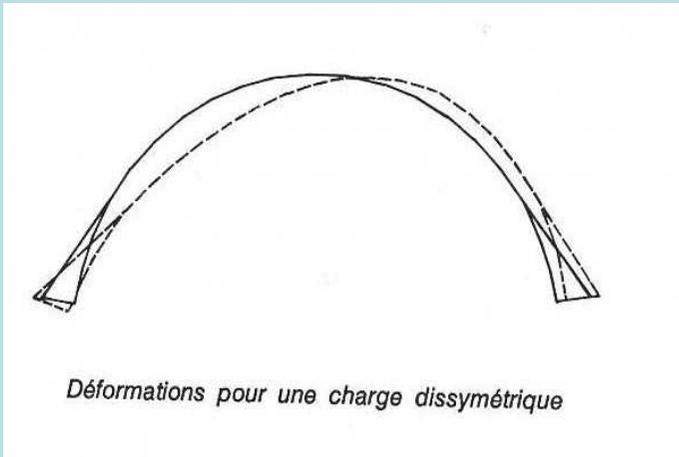
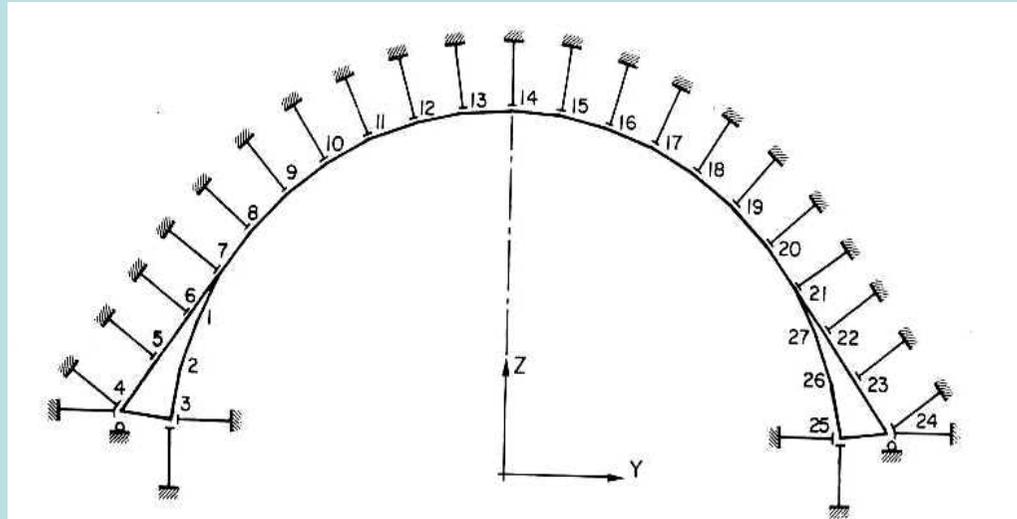
Revêtement appuyé sur des ressorts dont la raideur ( $k$ ) dépend des caractéristiques du terrain (module de réaction)

Chargements

Charges dites « actives » indépendantes de l'état de déformation du revêtement (chargement initial)

Charges dites « passives » résultant de l'équilibre de la structure (revêtement + ressorts)





---

## Avantages de la méthode

- En 2D : modélisation simple
- En 3D : étude de structures complexes

## Mais :

- Difficulté pour estimer la raideur des ressorts
- Comportement du terrain pas bien pris en compte (notamment après rupture)
- Terrain homogène avec une couverture suffisante
- Prise en compte du phasage de construction difficile

# Une méthode analytique: Convergence-Confinement

---

## Point de départ

Participation du terrain à son propre soutènement lors de l'excavation

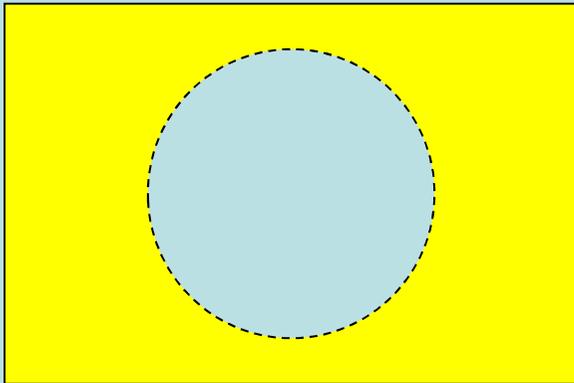
Comportement du terrain associé à celui du soutènement ou du revêtement pour assurer la stabilité de l'excavation

Le soutènement a pour objet de limiter la convergence de l'excavation

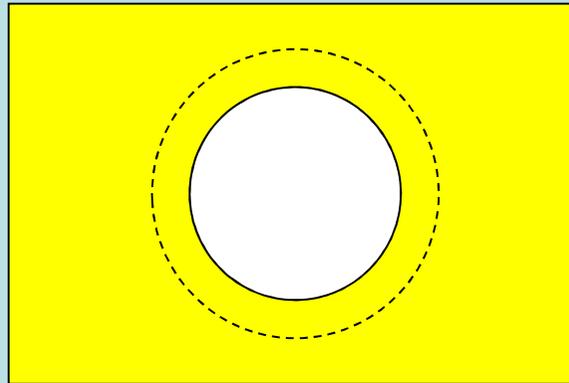
- Point de départ de la méthode

- 
- D'abord, une vue de l'esprit:

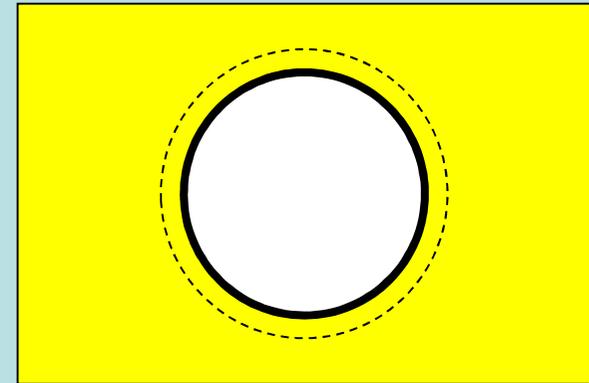
- Le tube de longueur infinie dans un massif infini (problème plan, ou plutôt en déformations planes):



- Avant l'existence du tube:
- Le milieu intérieur est en équilibre avec le milieu extérieur
- Il exerce une pression radiale sur ce milieu extérieur (pression de confinement), égale à la contrainte géostatique dans le massif.



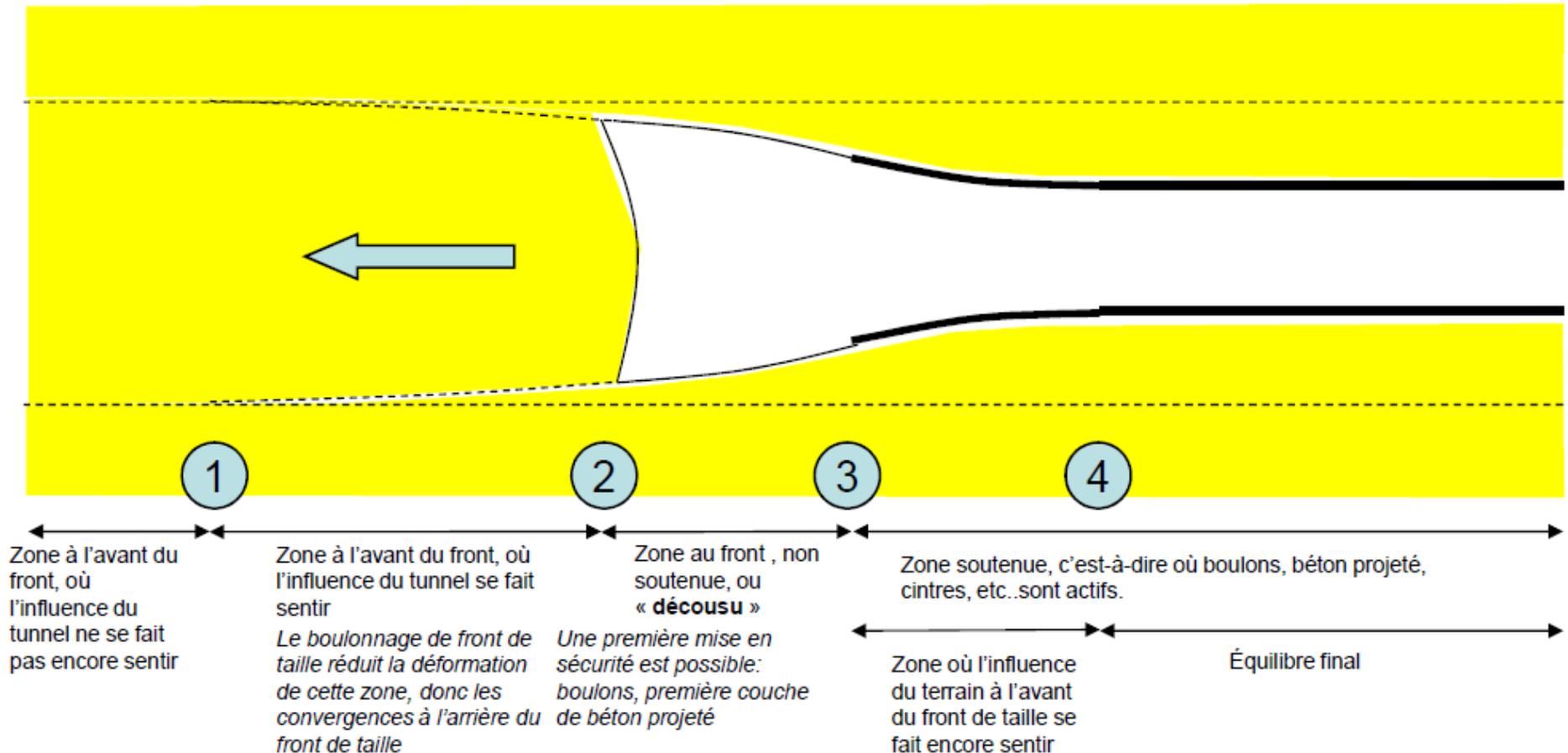
- On vide entièrement le tube, sur toute sa longueur:
- La pression de confinement disparaît et le trou a tendance à se refermer (plus ou moins selon les caractéristiques mécaniques du milieu extérieur): c'est la convergence.(radiale)

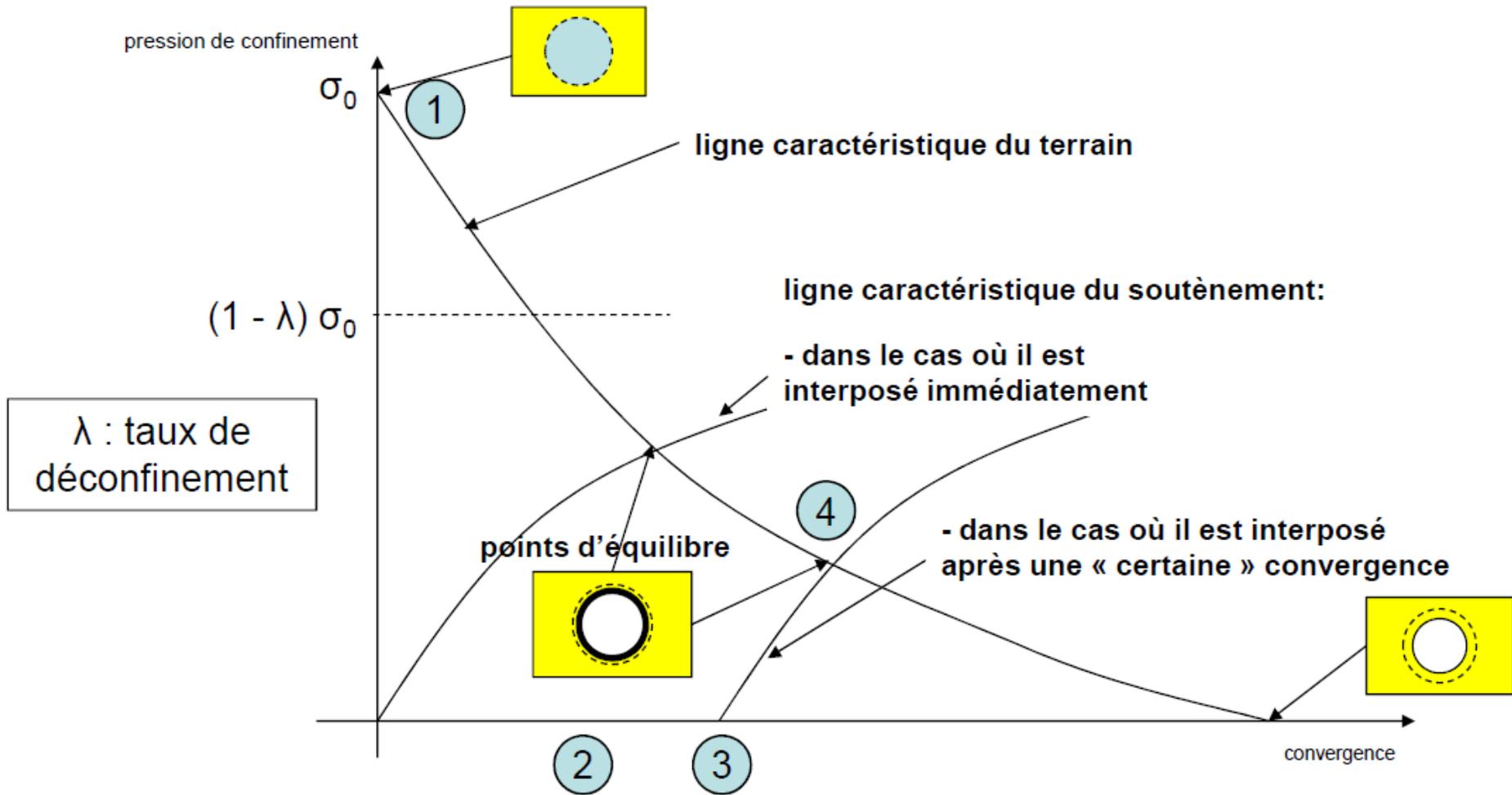


- Un soutènement est interposé:
- Par sa déformation sous l'effet de la convergence, il exerce une pression de soutènement, et un équilibre va être trouvé avec la pression qu'exerce le milieu extérieur. Cet équilibre dépend de la convergence « libre » avant soutènement.

La réalité: un problème 3D, la troisième dimension étant l'axe du tunnel

- le tunnel en traditionnel:

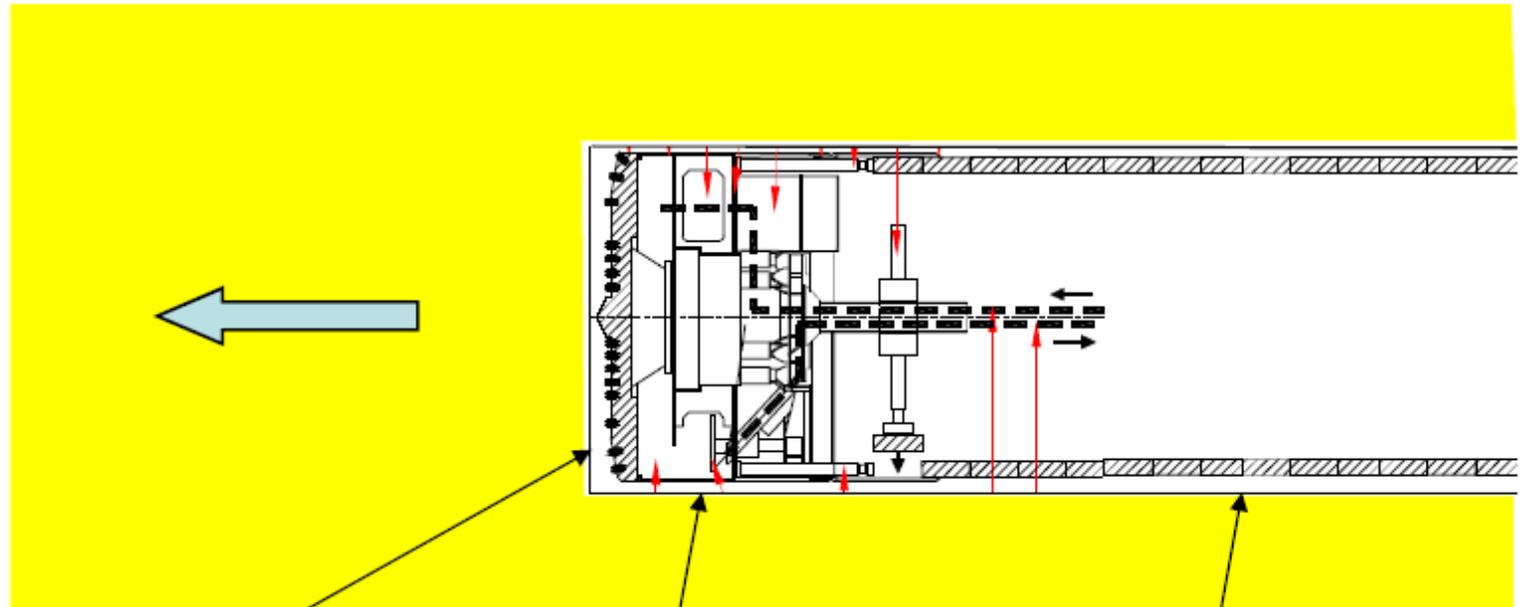




Le diagramme « convergence – confinement »

La réalité: un problème 3D, la troisième dimension étant l'axe du tunnel

- le tunnel au tunnelier à confinement (fermé):



la pression de confinement exercée par la boue ou la terre devant la roue de coupe réduit le déconfinement du front de taille

la pression de confinement exercée par la boue ou la terre autour de la jupe maintient la limitation du confinement

L'anneau de voussoirs, associé au mortier de bourrage, équilibre la pression de confinement exercée par le terrain

## Avantages et extension possible de la méthode

---

- Méthode permettant une approche analytique simple pour évaluer les chargements sur un soutènement
- Prise en compte d'une manière réaliste de l'effet de la 3D dans les cas suivants:
  - Terrain monocouche mais à comportement élasto-plastique
  - Cas des couvertures fortes (>2 à 3 Ø)
  - Sans interaction avec environnement (bâti,...)
- Généralisation de l'approche par le taux de déconfinement pour simuler l'effet 3D sur une modélisation 2D plus complexe

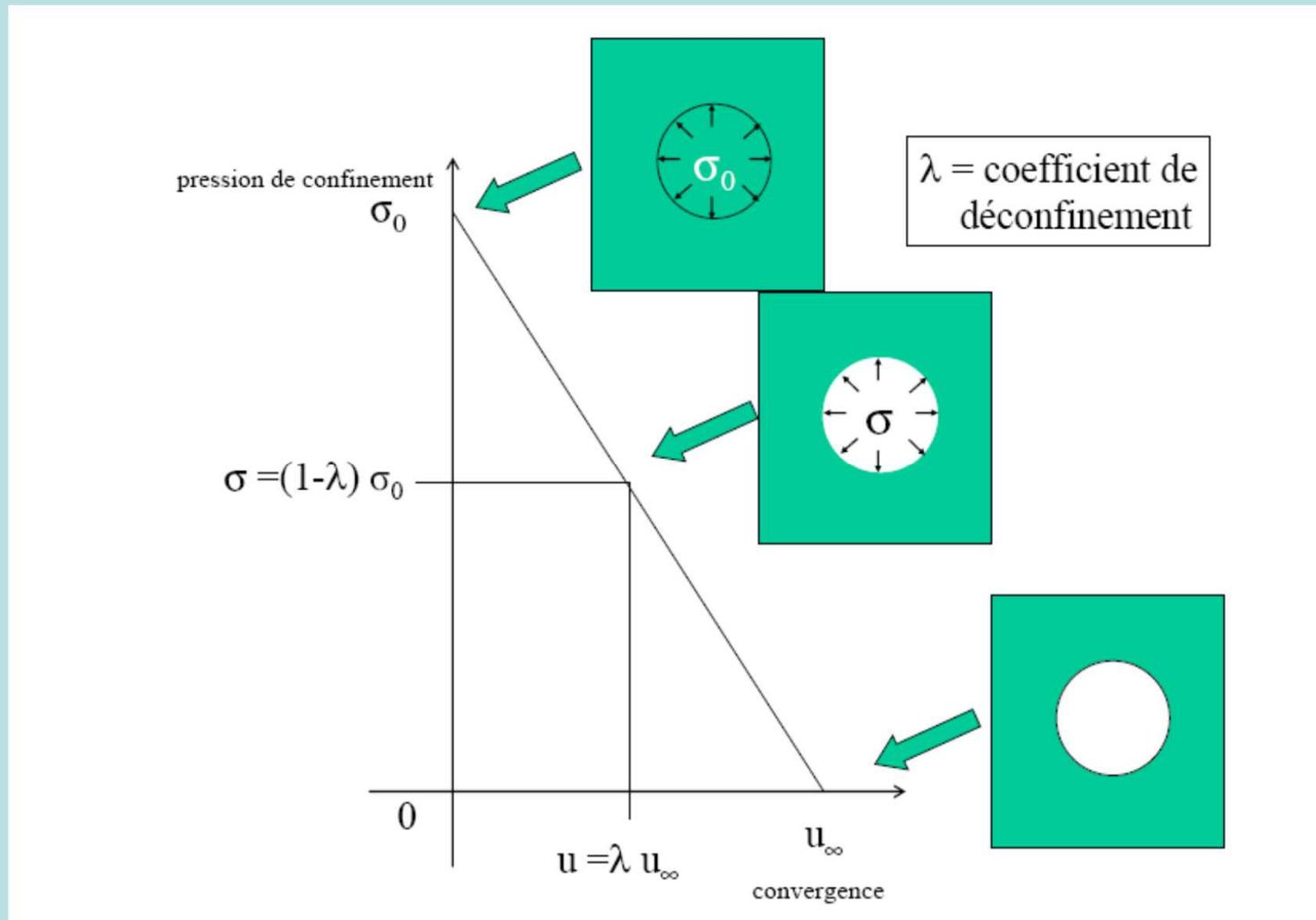
## Le milieu environnant

---

- Milieu Elastique Isotrope
- Module d'Young :  $E$ 
  - Sols Lâches:  $E = 20$  à  $100\text{MPa}$
  - Sols Compacts:  $E = 100$  à  $300\text{MPa}$
  - Rochers:  $E =$  jusqu'à plusieurs fois  $1000\text{MPa}$
- Coefficient de Poisson :  $\nu$ 
  - Sols fins, compacts, saturés:  $\nu = 0.5$  à court terme
  - Autres terrains:  $\nu = 0.25$  à  $0.30$
- Charge géostatique:  $\sigma_0$
- Contrainte totale et contrainte effective

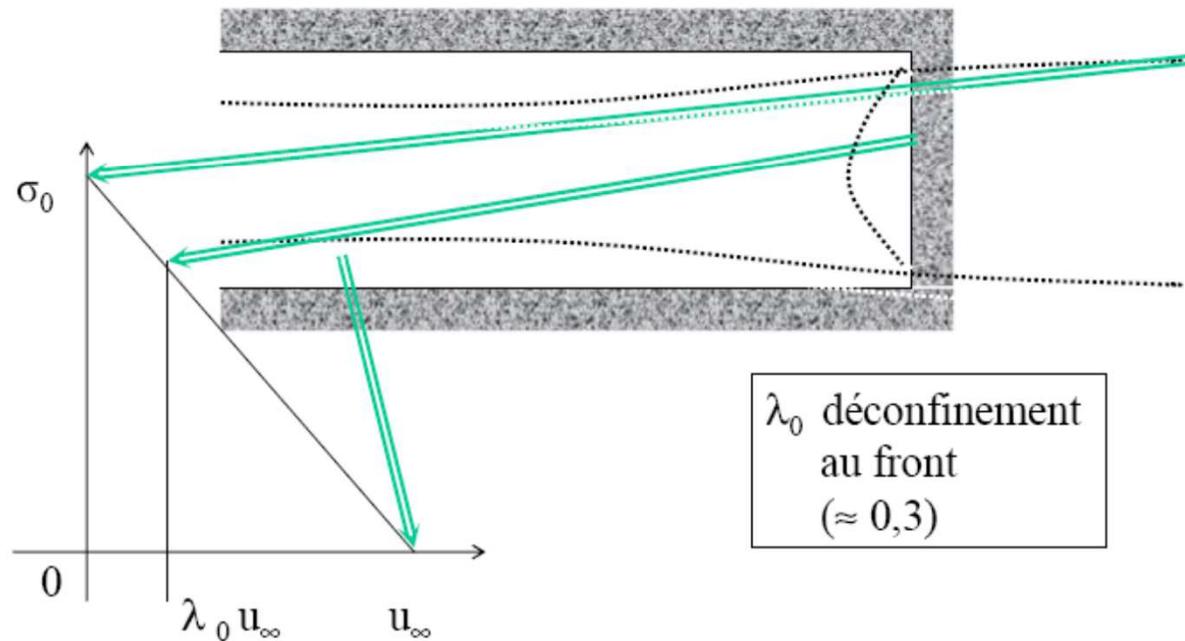
$$\triangleright \sigma = \sigma' + h_w \cdot \gamma_w$$

# Variation de la pression fictive – taux de déconfinement



# Déformation autour de l'excavation

Creusement du tunnel sans soutènement



## Principe de variation du taux de déconfinement

### Milieu Elastique Isotrope

- Formule de Lamé:

- $u_{\infty}/R = \sigma_0/2G$  avec  $G = E / 2(1+\nu)$

- Coefficient de Déconfinement:  $\lambda$

- Définition:  $\sigma = \sigma_0.(1-\lambda)$

- En élasticité linéaire:  $u = \lambda.u_{\infty}$

- Dans le cas du tunnel non soutenu:  $u(x) = u_0 + a(x).(u_{\infty} - u_0)$

Expression générale approchée de  $a(x) = 1 - [m.R / (m.R + \xi.x)]^2$

En élasticité linéaire, on peut admettre:

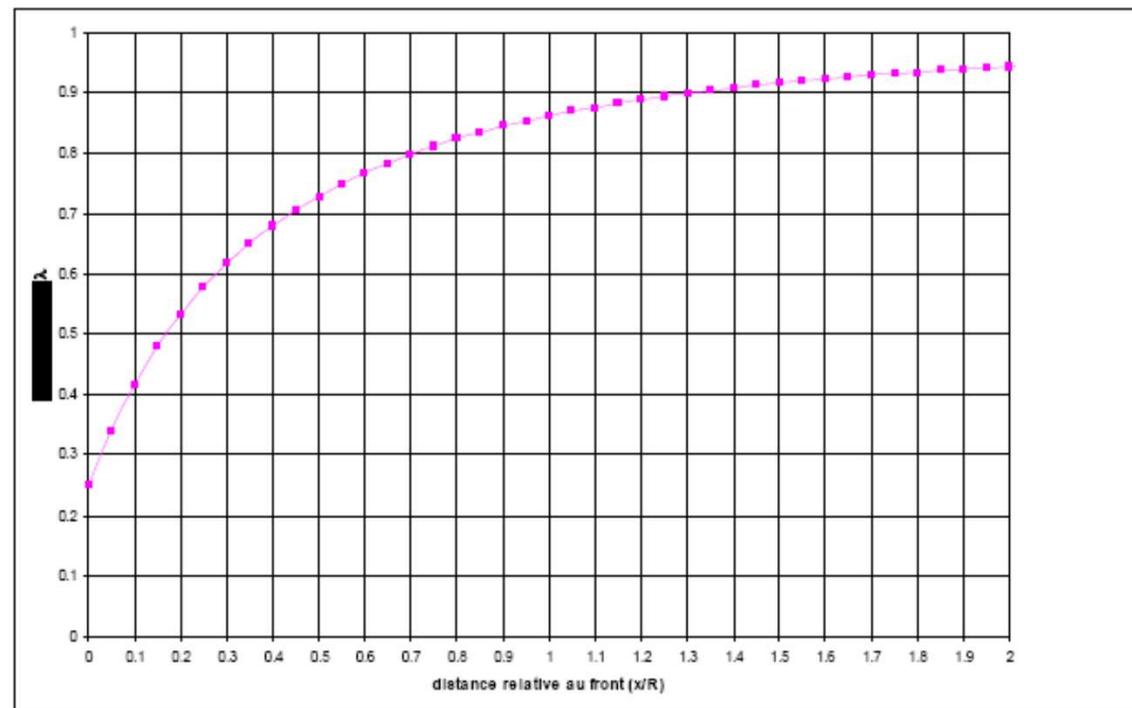
$$u_0 = 0,25. u_{\infty} \quad m = 0,75 \quad \xi = 1$$

$$\text{D'où : } \lambda(x) = 1 - 0,75 \cdot \left[ \frac{1}{1 + \frac{4}{3} \cdot \frac{x}{R}} \right]^2$$

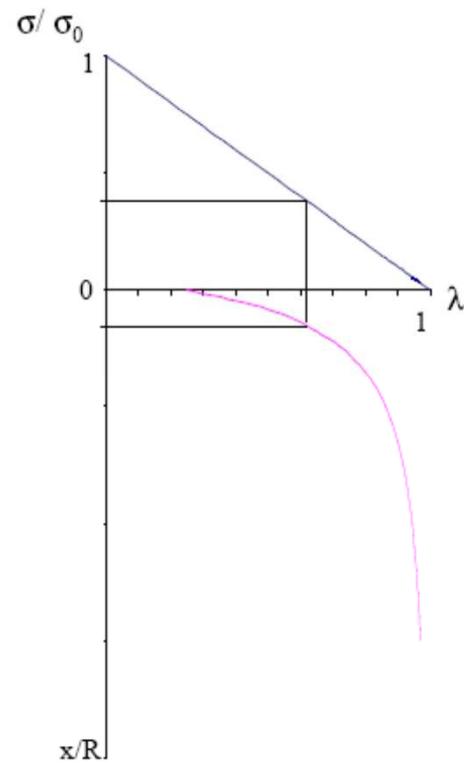
# Courbe de variation du taux de déconfinement

---

Milieu élastique: évolution du taux de déconfinement avec la distance au front



# Application graphique



Exemple:

$$x/R = 0,3$$

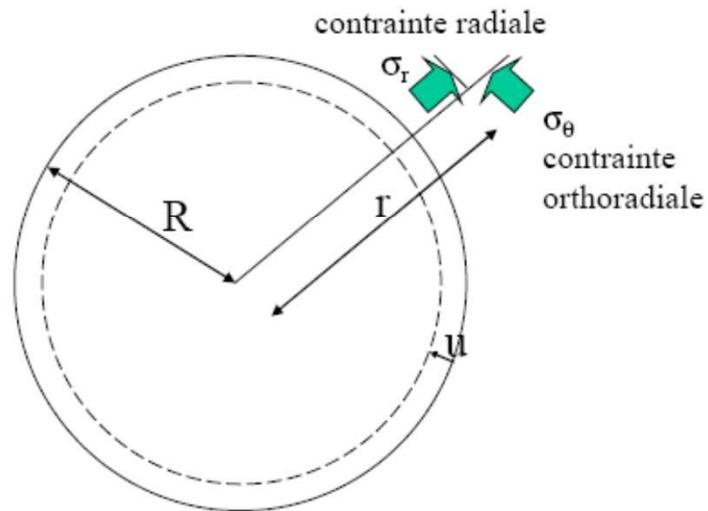


$$\lambda = 0,62$$



$$\sigma / \sigma_0 = 0,38$$

## Evaluation des contraintes en limite d'excavation



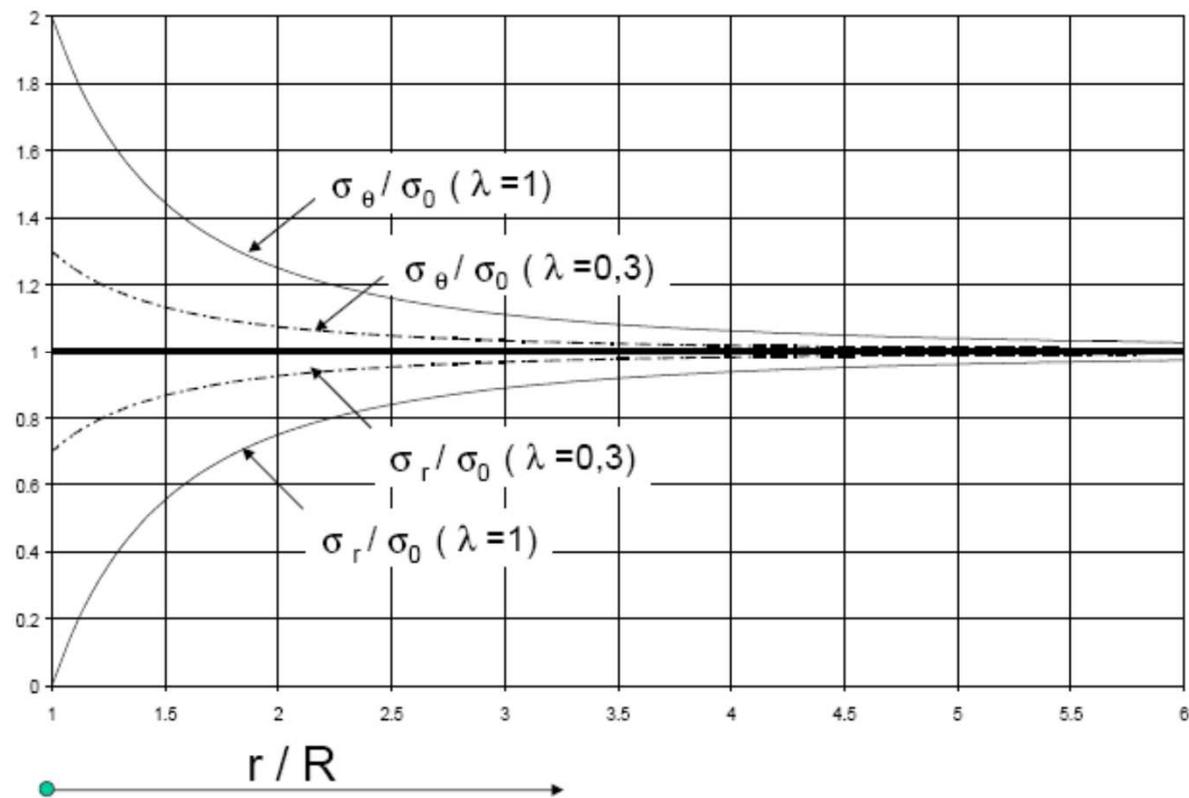
$$\sigma_r = [1 - \lambda R^2/r^2] \cdot \sigma_0$$

$$\sigma_\theta = [1 + \lambda R^2/r^2] \cdot \sigma_0$$

$$u = \lambda R^2/r^2 \cdot \sigma_0 R / 2G$$

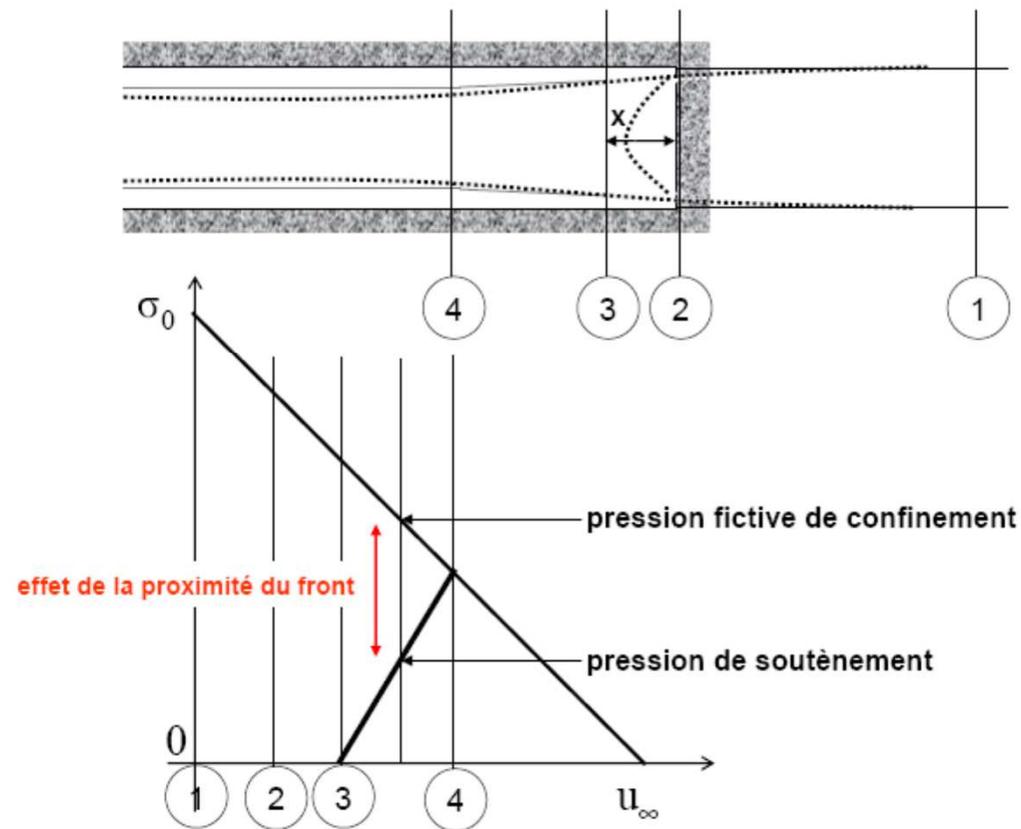
$r = R \rightarrow$	$\sigma_r = 0$
$\lambda = 1$	$\sigma_\theta = 2 \sigma_0$
	$u = \sigma_0 R / 2G$

## contraintes radiales et orthoradiales



# Principe de prise en compte du soutènement

Creusement du tunnel : mise en place d'un soutènement à la distance  $x$  du front

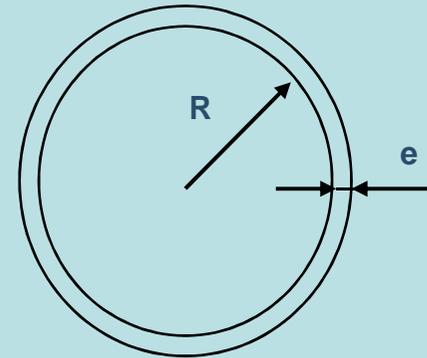


## Le soutènement – Détermination des modules de rigidité (1/4)

---

### Soutènements:

➤ Coque en béton:



Calcul simplifié:

Sous une pression radiale  $p$

l'effort normal est de  $N = p.R$  dans la coque

soit  $\varepsilon = \frac{p.R}{E_b.e}$  (valable aussi bien pour la circonférence que pour le rayon)

D'où une convergence radiale de :  $u = \varepsilon.R = \frac{p.R^2}{E_b.e}$

Ce qui donne un module de rigidité de  $K_s = \frac{p}{u/R} = \frac{E_b.e}{R}$

## Le soutènement – Détermination des modules de rigidité (2/4)

---

La formule complète s'écrit:

$$K_s = \frac{E_b (R_{ext}^2 - R_{int}^2)}{(1 + \nu)[(1 - 2\nu)R_{ext}^2 + R_{int}^2]} \quad \text{[valable pour un tube épais]}$$

$$K_s = \frac{E_b \cdot e}{(1 - \nu^2) \cdot R} \quad \text{pour } R \gg e$$

Les ordres de grandeur des modules  $E_b$  à considérer dans les calculs sont:

- béton projeté: de 7000 à 15000MPa
- béton coffré: 15,000 à 30,000MPa

### ➤ Cintres métalliques:

De la même manière que pour la coque en béton, la raideur équivalente à un cintre peut être évaluée par la formule suivante:

$$K_{sn} = \frac{E_s \cdot S}{R \cdot s}$$

où :  $E_s$  = Module de l'acier (200,000MPa)

$S$  = section du cintre

$s$  = espacement longitudinal des cintres

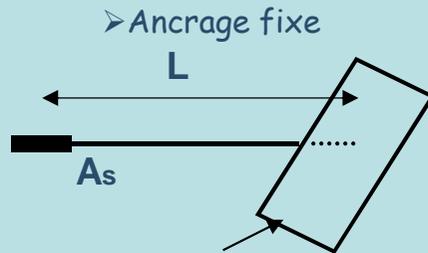
## Le soutènement – Détermination des modules de rigidité (3/4)

### ➤ Les boulons radiaux

Principalement 2 types de boulons radiaux sont utilisés:

- boulons à ancrage ponctuel
- boulons à ancrage continu

Calcul simplifié:



avec  $E_s$  = Module de l'acier du boulon

$e_c$  = espacement circonférentiel entre boulons

$e_l$  = espacement longitudinal entre boulons

Portion de parement pour 1 boulon

Dans 1 boulon on a :  $\varepsilon = \frac{u}{L}$  , soit un effort :

$$F = A_s \cdot E_s \cdot \frac{u}{L}$$

La pression équivalente peut être calculée par:

$$p = \frac{F}{e_c \cdot e_l} = \frac{A_s \cdot E_s \cdot u}{L \cdot e_c \cdot e_l}$$

La raideur à prendre en compte est donc:

$$K_{sn} = \frac{p}{u/R} = \frac{R}{e_c \cdot e_l} \cdot \frac{A_s \cdot E_s}{L}$$

(il faut prendre en compte un jeu initial avec mise en charge du boulon)

## Le soutènement – Détermination des modules de rigidité (4/4)

---

### ➤ Boulon à scellement continu

2 types d'effets sont à considérer:

- Un effet soutènement
- un effet renforcement interne du terrain

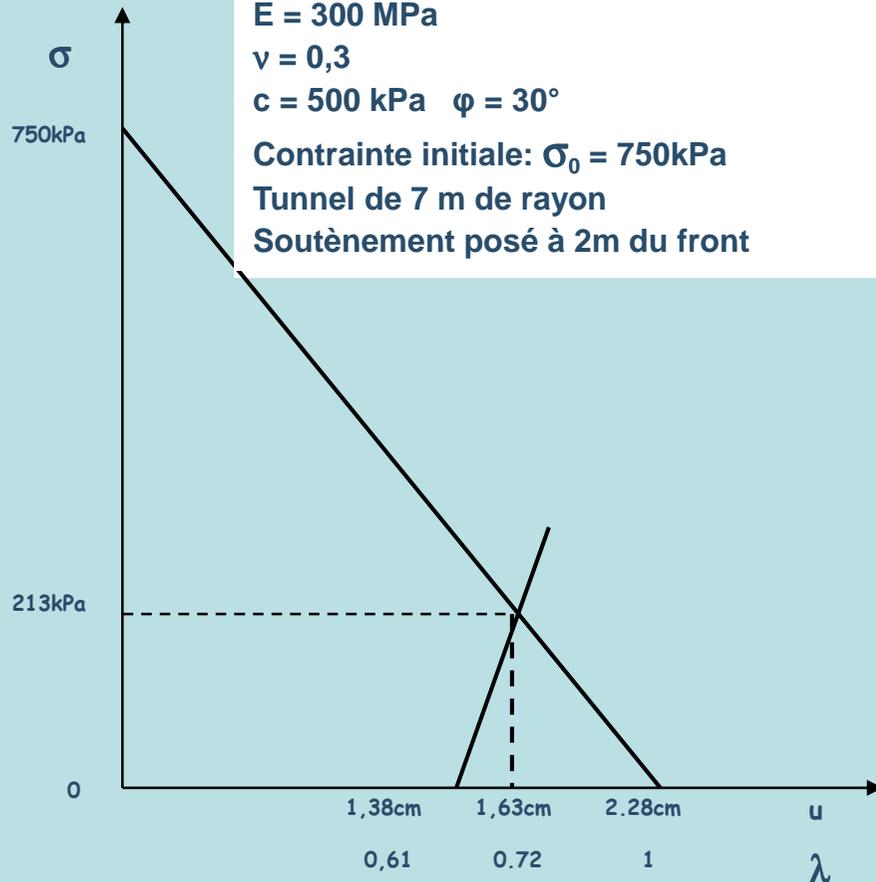
La prise en compte de ces 2 effets de manière réaliste est très complexe et non réellement résolue à ce jour de manière analytique générale.

Si dans le cas du boulonnage à ancrage ponctuel, on peut faire l'hypothèse que l'ancrage représente un point fixe pour le boulon, dans le cas d'un scellement continu, la rigidité des boulons résulte d'un équilibre d'interaction avec le sol environnant.

Pour le premier effet, on peut en première approche très simplifiée, utiliser une formulation du type de celle des ancrages ponctuels, en tenant compte d'une rigidité moyenne double ( $L$  remplacé par  $L/2$  dans l'expression précédente).

# Exemple d'application

**Marnes et Caillasses**  
**E = 300 MPa**  
**v = 0,3**  
**c = 500 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 = 0.22m |
    - $E_b = 10000\text{MPa}$  |  $K_b = 335\text{MPa}$
    - $\nu = 0.2$  |
  - Cintres HEB220 e=1.00m
    - $A_s = 91\text{cm}^2$  soit  $K_s = 260\text{MPa}$
- $K_b + K_s = 595\text{MPa}$

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

## Soutènements: quelques ordres de grandeur

(pour R = 5 m)

	anneau de béton coffré 40 cm	Béton projeté 10 cm	Cintres HEB 140 e = 1,00 m	Boulons à ancrage ponctuel L = 4,00 m 1 /m <sup>2</sup> diam. 18mm
Module de rigidité normale (MPa)	1 800	210	170	64
Pression de soutènement maxi (kPa)	600	100	140	80
Observations	$E_c = 20\,000$ MPa $\sigma_{\text{maxi}} = 7,5$ MPa	$E_c = 10\,000$ MPa $\sigma_{\text{maxi}} = 5$ MPa	$\sigma_s = 2/3 \times 240$ MPa = 160 MPa	$\sigma_s = 2/3 \times 500$ MPa = 333 MPa