

TUNREN

*Un exemple de développement
récent en matière de logiciels de
calcul en géotechnique*

Alain GUILLOUX
TERRASOL

TUNREN : logiciel d'aide au dimensionnement des tunnels

- **Module CONVERGENCE-CONFINEMENT**
(en section transversale)

Symétrie cylindrique

- ✓ Méthodes classiques de l'AFTES
- ✓ Soutènements par boulons, béton et cintres
- ✓ Aide au calcul de λ_s (méthodes de similitude et méthodes implicites)

- **Module EXTRUSION**
(Licence CNRS-ENTPE)
(au front de taille)

Symétrie sphérique

- ✓ Calcul des déformations d'extrusion
- ✓ Approche d'un coefficient de sécurité
- ✓ Prise en compte des renforcements par boulons au front
- ✓ Prise en compte d'une pression de confinement (boucliers)

Module

CONVERGENCE -CONFINEMENT

Calcul Convergence/Confinement			
Notation AFTES G.T.n°7 (Formules de PANET, Elastoplasticité, critère de Mohr-Coulomb)			
Données : terrain et tunnel		Court terme	Long terme
$R = 5 \text{ m}$	$\sigma_0 = 1.000 \text{ MPa}$	$\sigma_c = 1.732 \text{ MPa}$	$\sigma_c = 0.769 \text{ MPa}$
$V_a = 0.5$	$\psi_0 = 0^\circ$	$k_p = 3.00$	$k_p = 3.69$
$E_a = 500.000 \text{ MPa}$	$c_a = 0.500 \text{ MPa}$	$u_{a0} = 0.015 \text{ m}$	$u_{a0} = 0.0217 \text{ m}$
$E_u = 300.000 \text{ MPa}$	$c_u = 0.200 \text{ MPa}$	$\lambda_e = 0.93$	$\lambda_e = 0.74$
$\phi_a = 30^\circ$ (Court terme)	$\phi_u = 35^\circ$ (Long terme)	$\sigma_{re} = 0.067 \text{ MPa}$	$\sigma_{re} = 0.263 \text{ MPa}$
$V_u = 0.3$	$\psi_u = 5^\circ$	$u_{re} = 0.014 \text{ m}$	$u_{re} = 0.016 \text{ m}$
		$u_{a0}(\lambda=1) = 0.0153 \text{ m}$	$u_{a0}(\lambda=1) = 0.0262 \text{ m}$
Données pour le soutènement		$\lambda_s = 0.75$	
Anneau de béton		Boulons	
$e = 0.15 \text{ m}$	$f_{cm} = 2.50E+01 \text{ MPa}$	HA 25	
$F_{ts} = 0.67$	$V = 0.2$	$d = 0.025 \text{ m}$	
$E_a = 1.00E+04 \text{ MPa}$	$E_u = 5.00E+03 \text{ MPa}$	$E_s = 2.10E+05 \text{ MPa}$	
		$\sigma_{js} = 5.00E+02 \text{ MPa}$	
		$F_{rs} = 0.75$	
		$S_a = 0 \text{ m}$	
		$e_T = 2 \text{ m}$	
		$e_L = 2 \text{ m}$	
		$L = 2 \text{ m}$	
		$K_{sa}^{\text{tendon}} = 3.20E+02 \text{ MPa}$	$K_{sa}^{\text{tendon}} = 1.60E+02 \text{ MPa}$
		$K_{sa}^{\text{cable}} = 6.44E+01 \text{ MPa}$	$K_{sa}^{\text{cable}} = 6.44E+01 \text{ MPa}$
		$K_{sa} = 3.84E+02 \text{ MPa}$	$K_{sa} = 2.24E+02 \text{ MPa}$
		$p_{sa}^{\text{tendon}} = 4.95E-01 \text{ MPa}$	$p_{sa}^{\text{tendon}} = 4.95E-01 \text{ MPa}$
		$p_{sa}^{\text{cable}} = 4.60E-02 \text{ MPa}$	$p_{sa}^{\text{cable}} = 4.60E-02 \text{ MPa}$
		$p_{sa} = 0.541 \text{ MPa}$	$p_{sa} = 0.541 \text{ MPa}$
Contrainte = f(u)			
Résultats			
Court Terme :	$\lambda_s^0 = 0.87$	$u_s^0 = 0.013 \text{ m}$	$p_s^0 = 0.134 \text{ MPa}$
Long Terme :	$\lambda_s^\infty = 0.73$	$u_s^\infty = 0.0159 \text{ m}$	$p_s^\infty = 0.265 \text{ MPa}$
			$F_s^0 = 4.04$
			$F_s^\infty = 2.04$
 TunRen v1.01 de 16/01/2003 TERRASOL www.terrasol.com			réalisée par : TERRASOL

File(s) : C:\Documents and Settings\pouard\Documents\TUNREN\trt 21 - 14032003 - 160320

Module EXTRUSION :

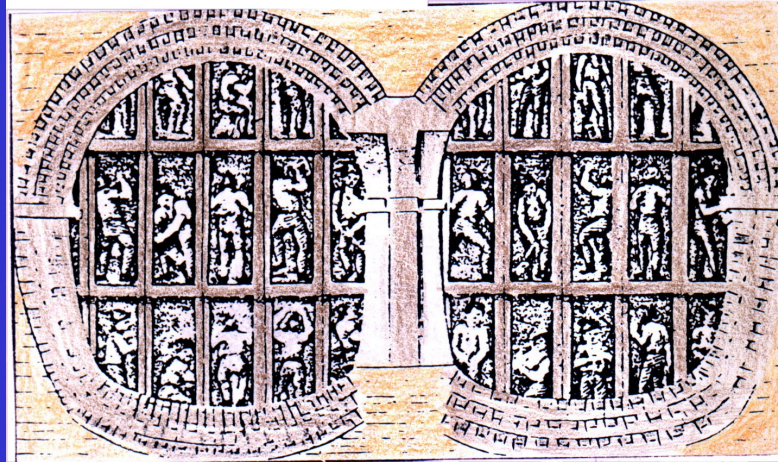
Le rôle du front de taille

- Stabilité : sécurité du chantier + effets sur l'environnement (fontis en surface)
- Déformations : interviennent dans les déformations globales et donc sur les tassements en surface

Techniques d'amélioration :

- Utilisation de boucliers
- Renforcement du front par boulons en fibre de verre

Londres 1841



Les méthodes d'analyse de la tenue du front de taille

Problème théorique difficile (3D)

- approches semi-empiriques
- approches « à la rupture »
- **approches en déformations (analytiques ou numériques)**

Grandes différences entre :

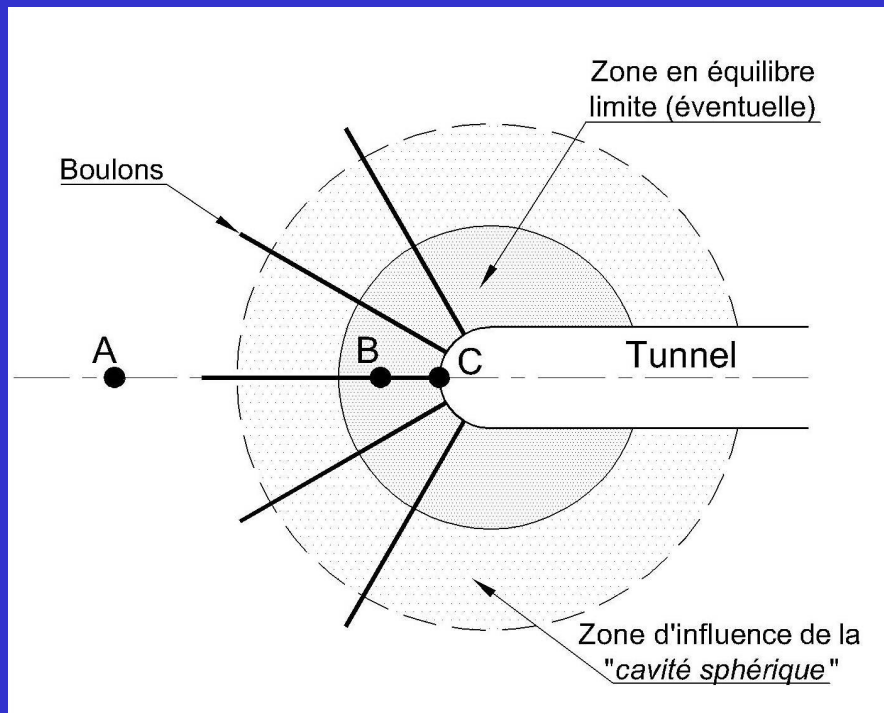
- *sols argileux* : problème de la stabilité plus ancien, mieux étudié (dépendant de c_u)
- *sols pulvérulents (si $c = 0$, $\phi = 30$ à 35° : instabilité assurée)* : développements plus récents du fait des tunneliers

Les approches en déformations restent encore peu développées

Modèle « Extrusion »

Calculs en contraintes-déformations

Hypothèses de base

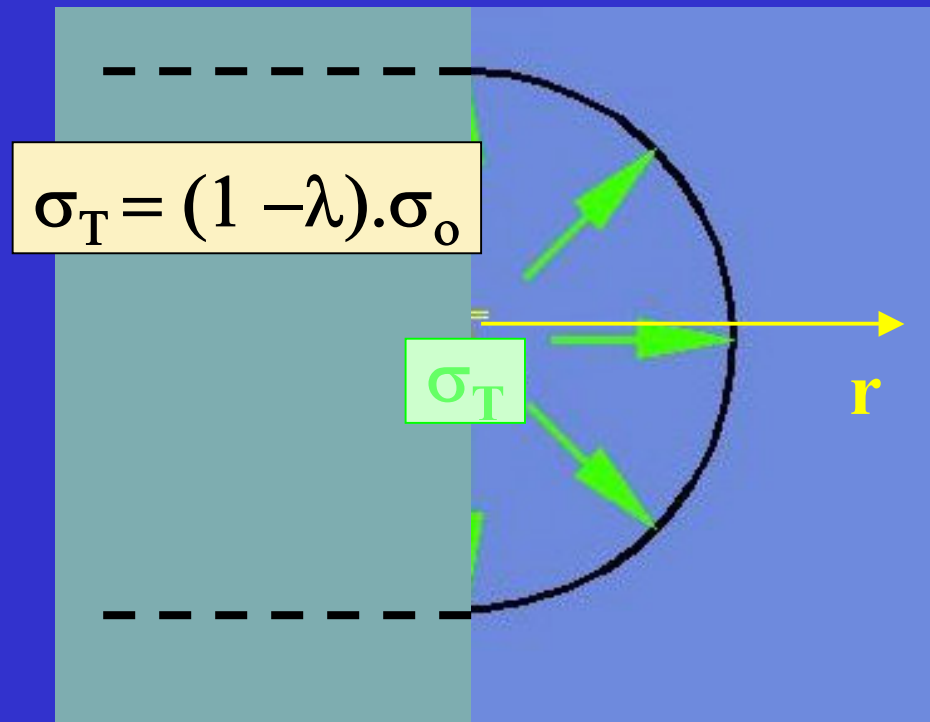


- ✓ Tunnel circulaire
- ✓ Milieu indéfini, homogène et isotrope
- ✓ Champs de contraintes initiales uniforme
- ✓ Symétrie sphérique (champs de contraintes et déformations)
- ✓ Loi de comportement élasto-plastique : critères de Tresca ou Mohr-Coulomb
- ✓ Boulonnage pris en compte par principe d'homogénéisation
- ✓ Principe de déconfinement ...

Principe de déconfinement

(WONG et al, 1999-2000) : en symétrie sphérique

- on fait décroître σ_T de σ_o à 0
(λ de 0 à 1)
(pas de soutènement)
- on calcule $\sigma(r)$ à partir d'une loi élasto-plastique
- on en déduit la convergence des parois

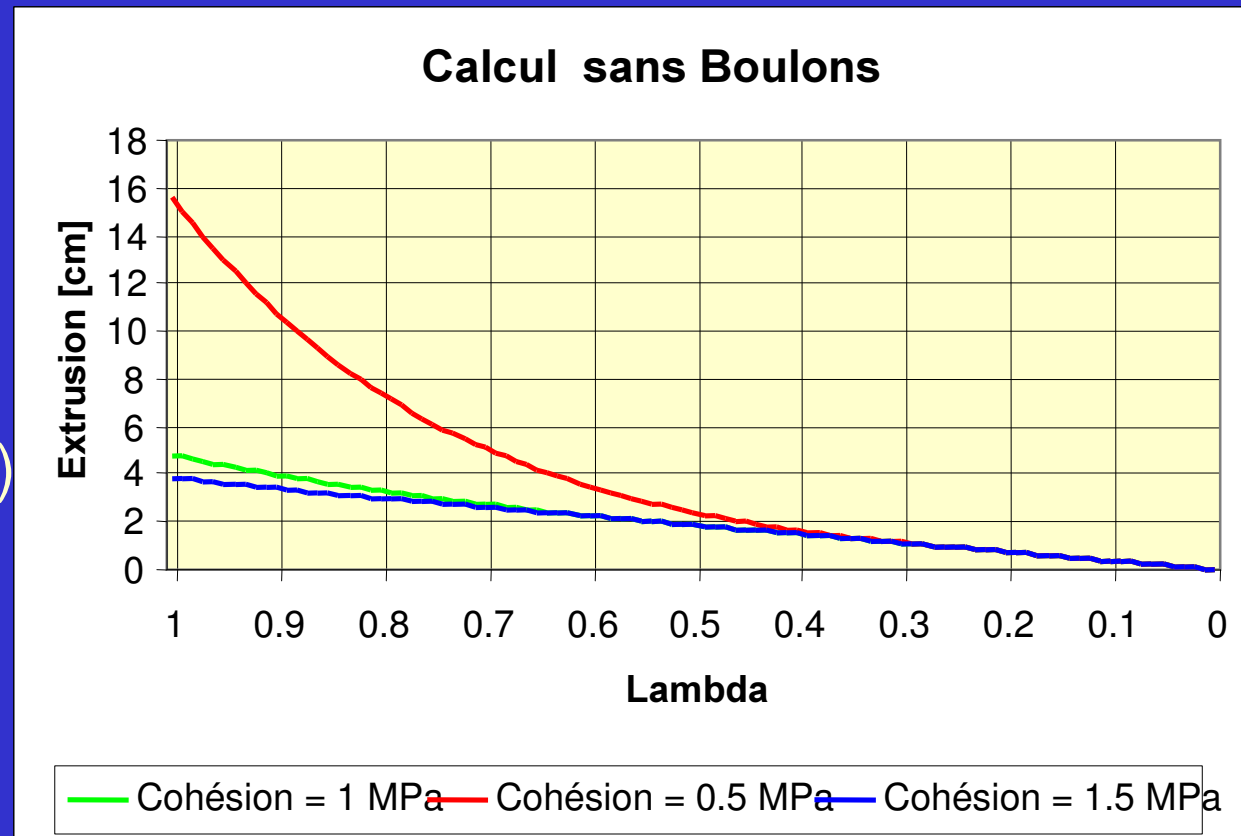


Résultats obtenus (TUNREN)

Tunnel de diamètre 12 m à 100 m de profondeur

Marne :

- $c = 1 \text{ MPa}$
(0.5 à 1.5 MPa)
- $\phi = 30^\circ$
- $E = 300 \text{ MPa}$

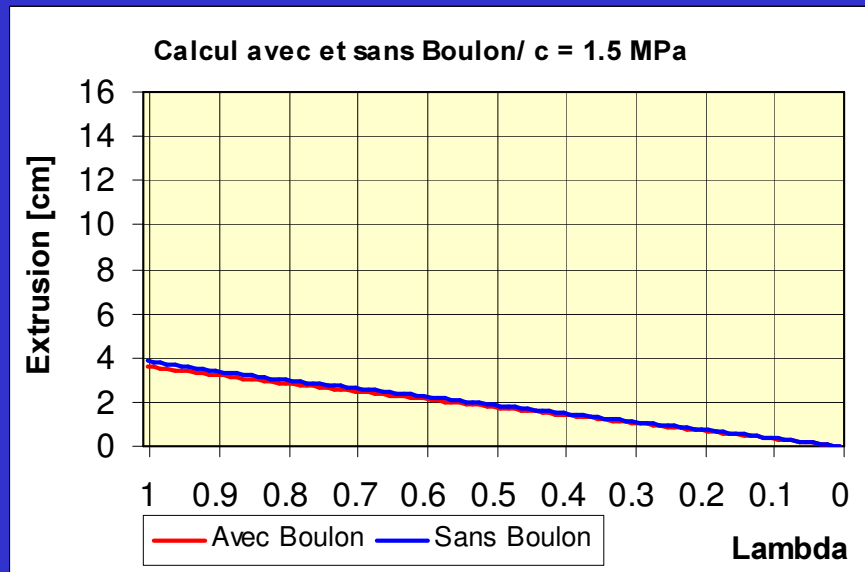


Résultats obtenus (TUNREN)

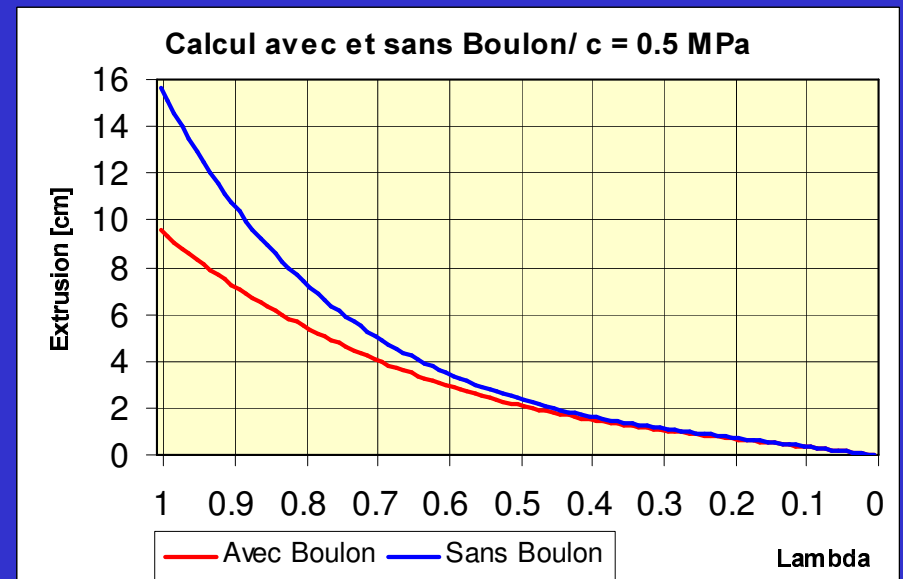
Effets des boulons sur l'extrusion

Boulons: fibre de verre de 840 kN - densité 1 u / 1.2 m²

Comportement du terrain
élastique

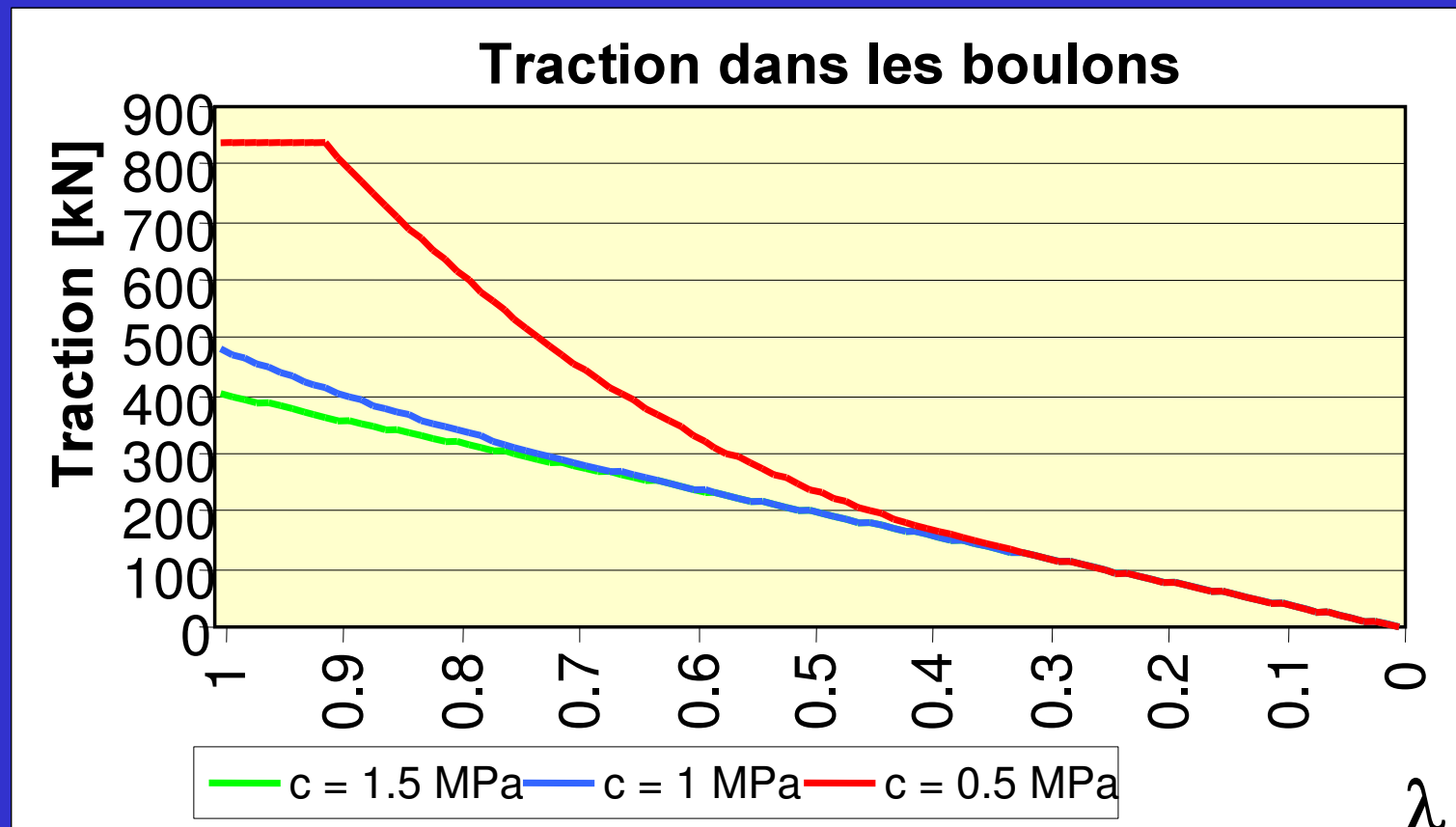


Comportement du terrain
élasto-plastique

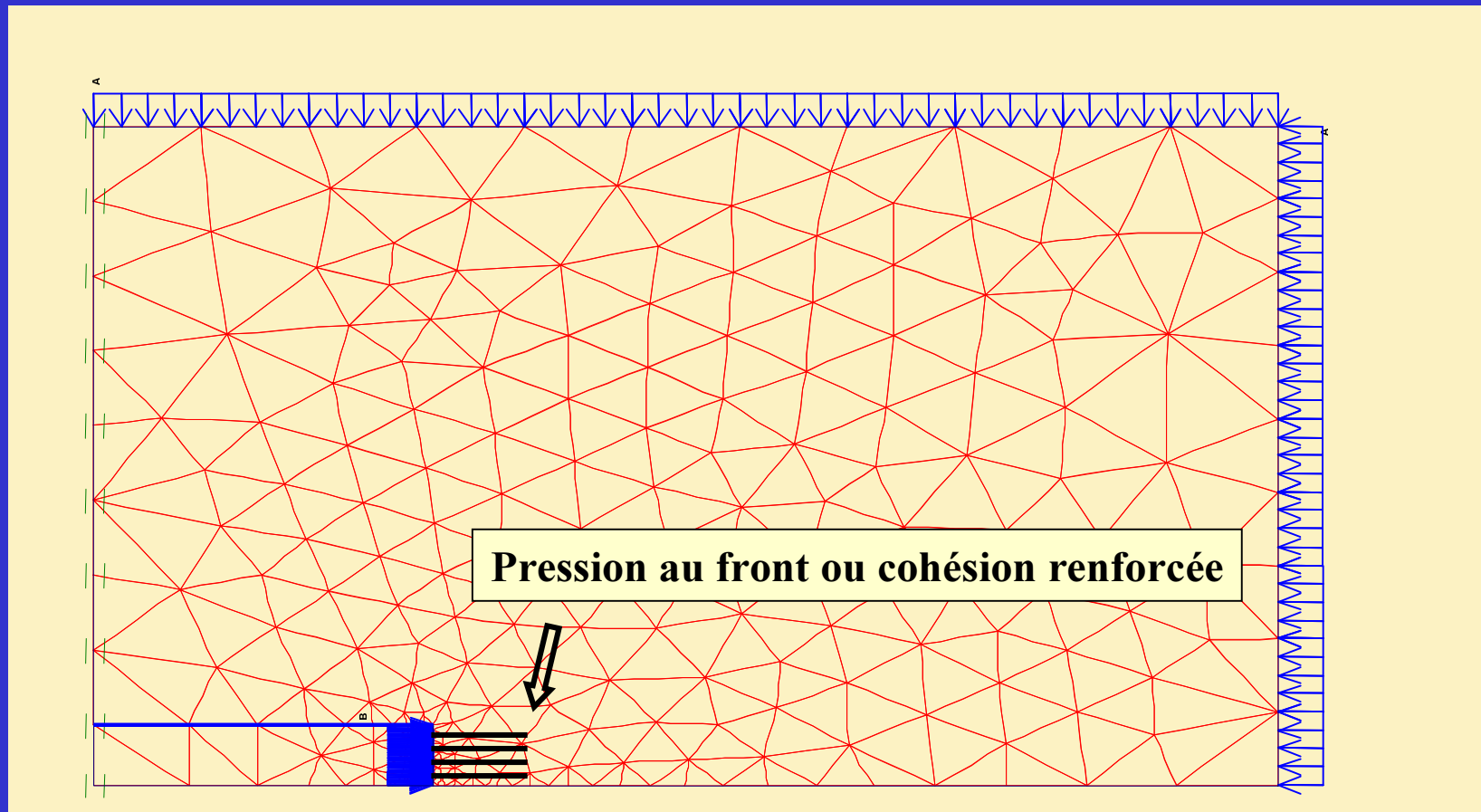


Résultats obtenus (TUNREN)

Effet de la cohésion sur la traction dans les boulons



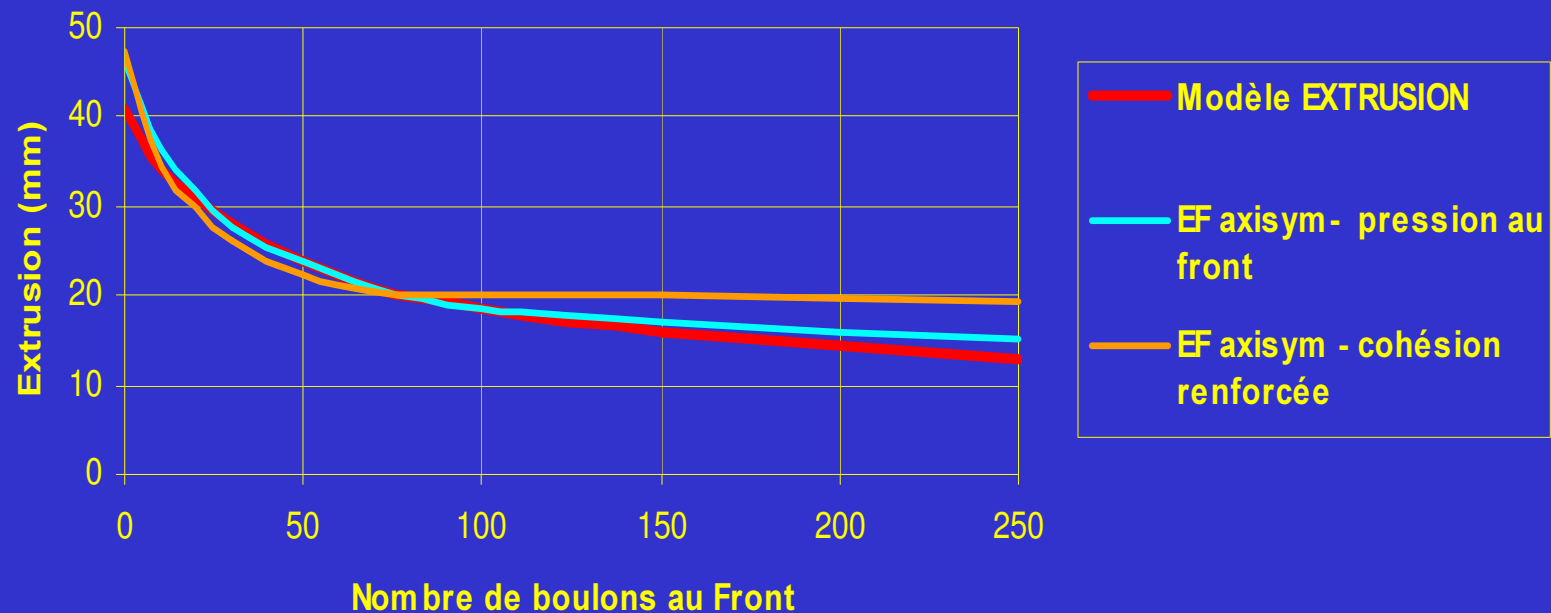
Comparaison avec modélisations EF (axisymétriques ou 3D)



Comparaison avec calculs EF axisymétriques

Toulon :

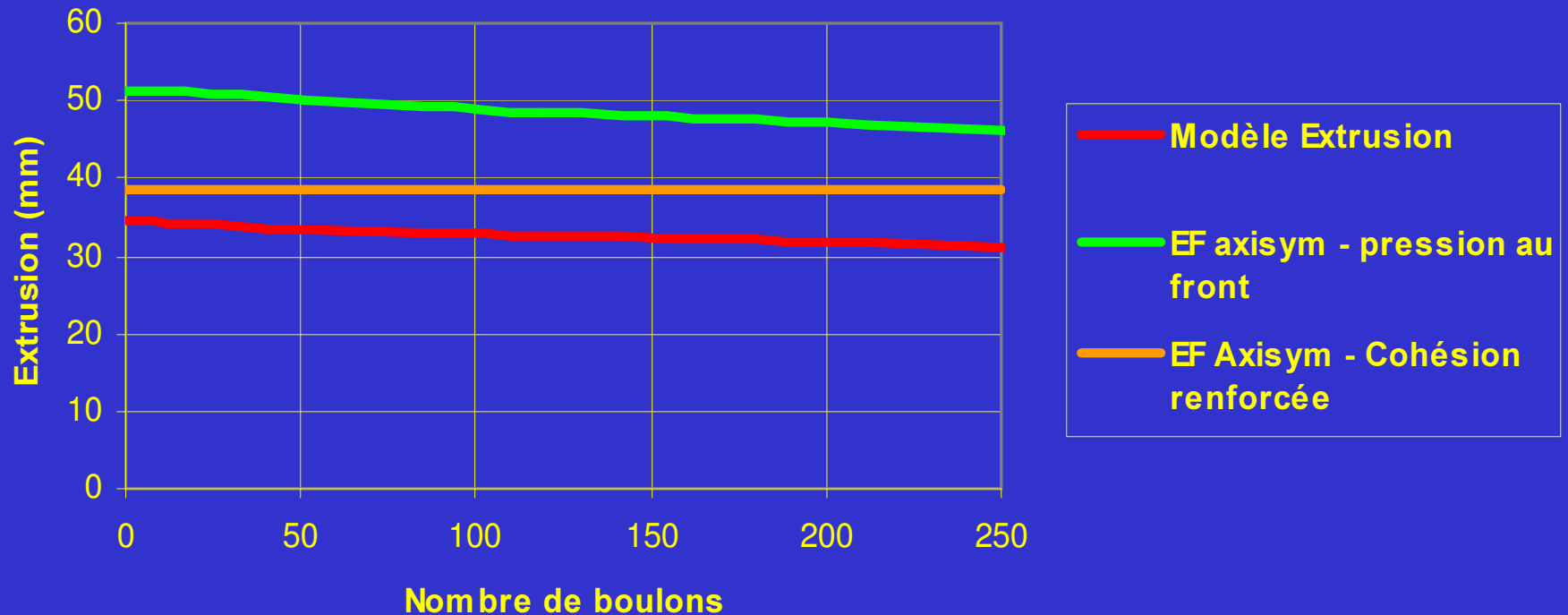
$R = 5.8 \text{ m}$ $\sigma_0 = 0.8 \text{ MPa}$ $E = 300 \text{ MPa}$ $c = 50 \text{ kPa}$ $\phi = 20^\circ$



Comparaison avec calculs EF axisymétriques

Tartaiguille :

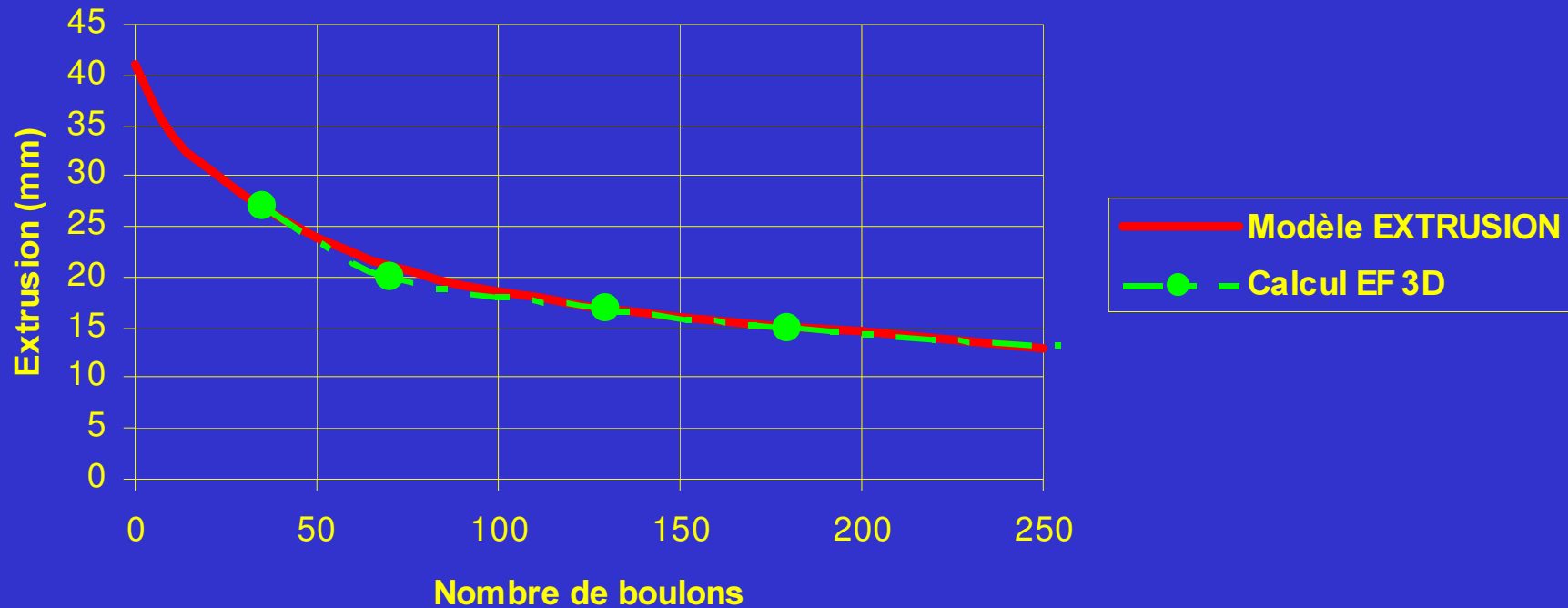
$R = 7.4 \text{ m}$ $\sigma_0 = 2,3 \text{ MPa}$ $E = 400 \text{ MPa}$ $c_u = 1200 \text{ kPa}$ $\phi_v = 0^\circ$



Comparaison avec calculs EF 3D

Toulon :

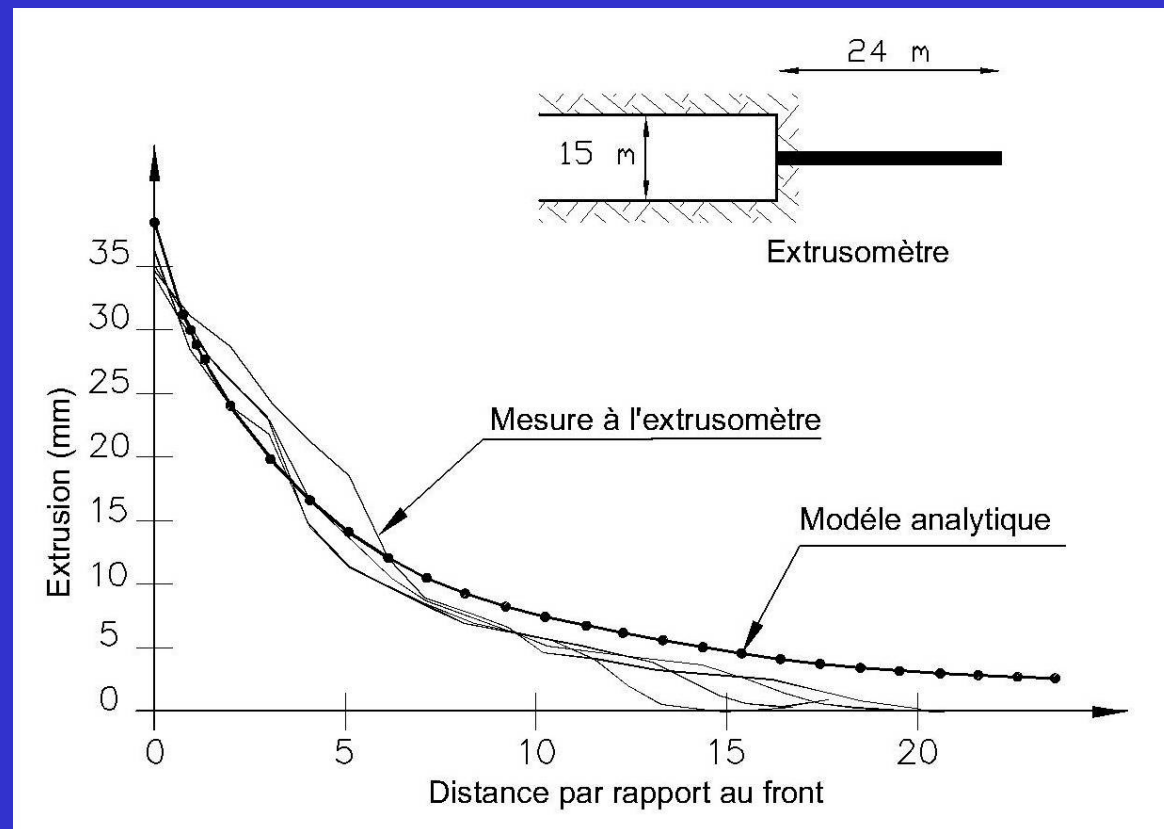
$R = 5.8 \text{ m}$ $\sigma_0 = 0.8 \text{ MPa}$ $E = 300 \text{ MPa}$ $c = 50 \text{ kPa}$ $\phi = 20^\circ$



Comparaison avec résultats de chantier

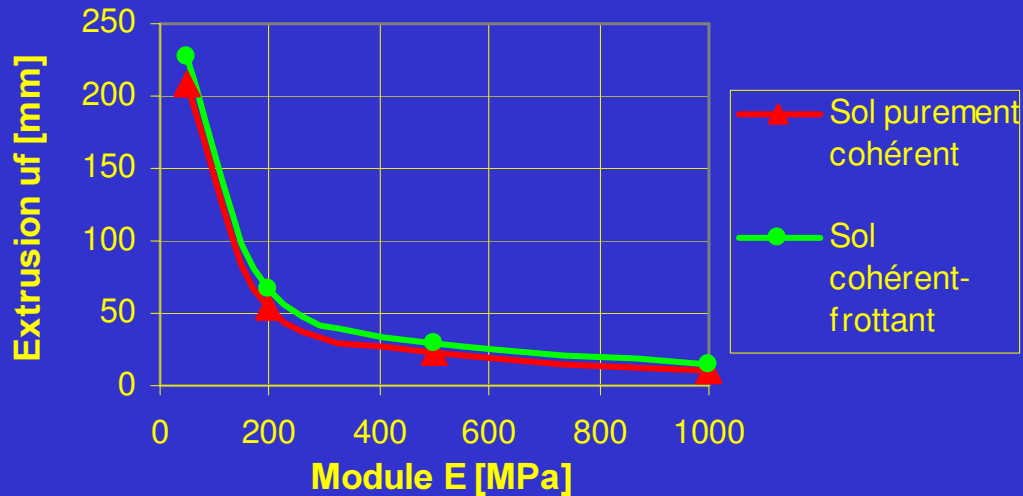
Tartaiguille

Mesures
d'extrusion

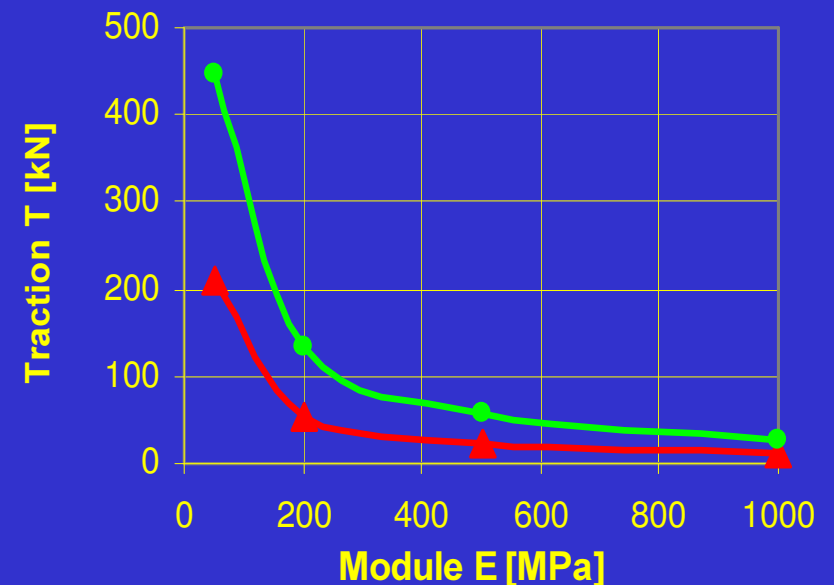


Études paramétriques

Influence du module E du terrain

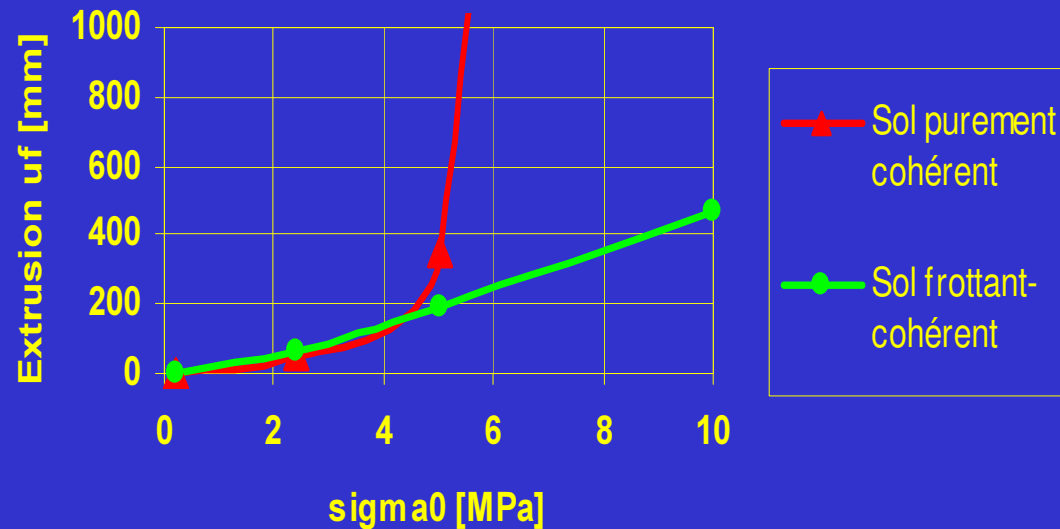


a : extrusion

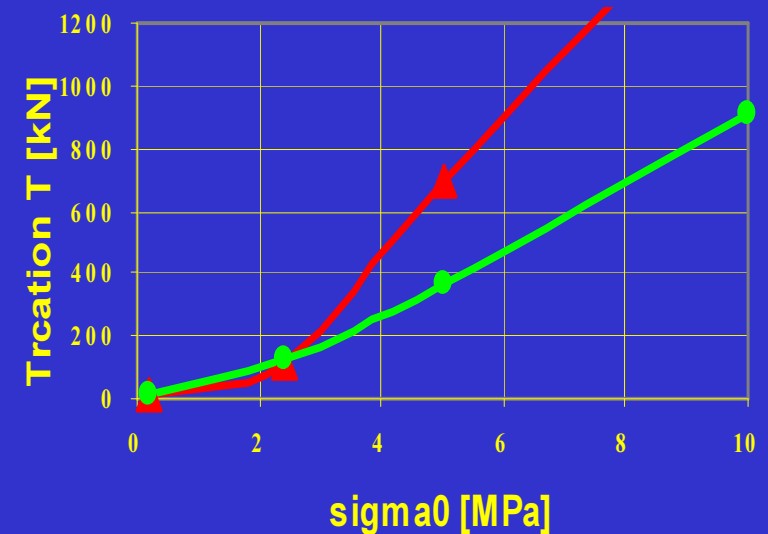


b : traction dans les boulons

Influence de la contrainte initiale σ_0

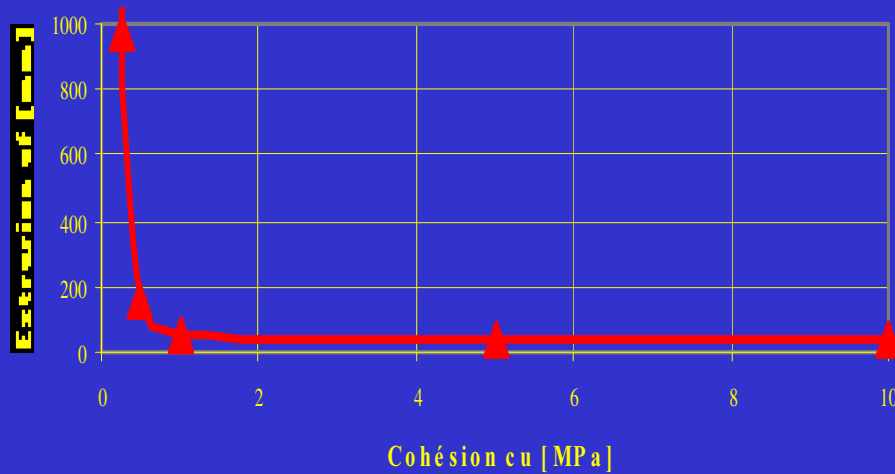


a : extrusion

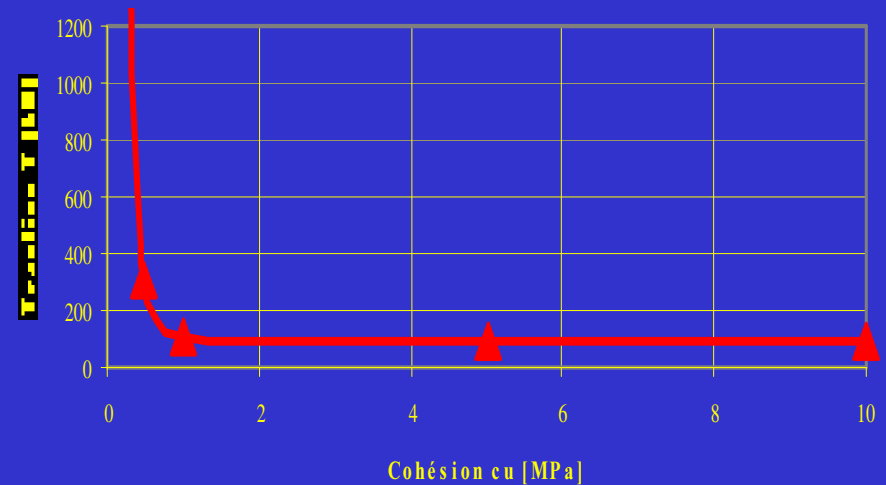


b : traction dans les boulons

Influence de la cohésion non drainée c_u



a : extrusion



b : traction dans les
boulons

Approches du coefficient de sécurité

Approches empiriques

$$N = \frac{\sigma_o}{c_u}$$

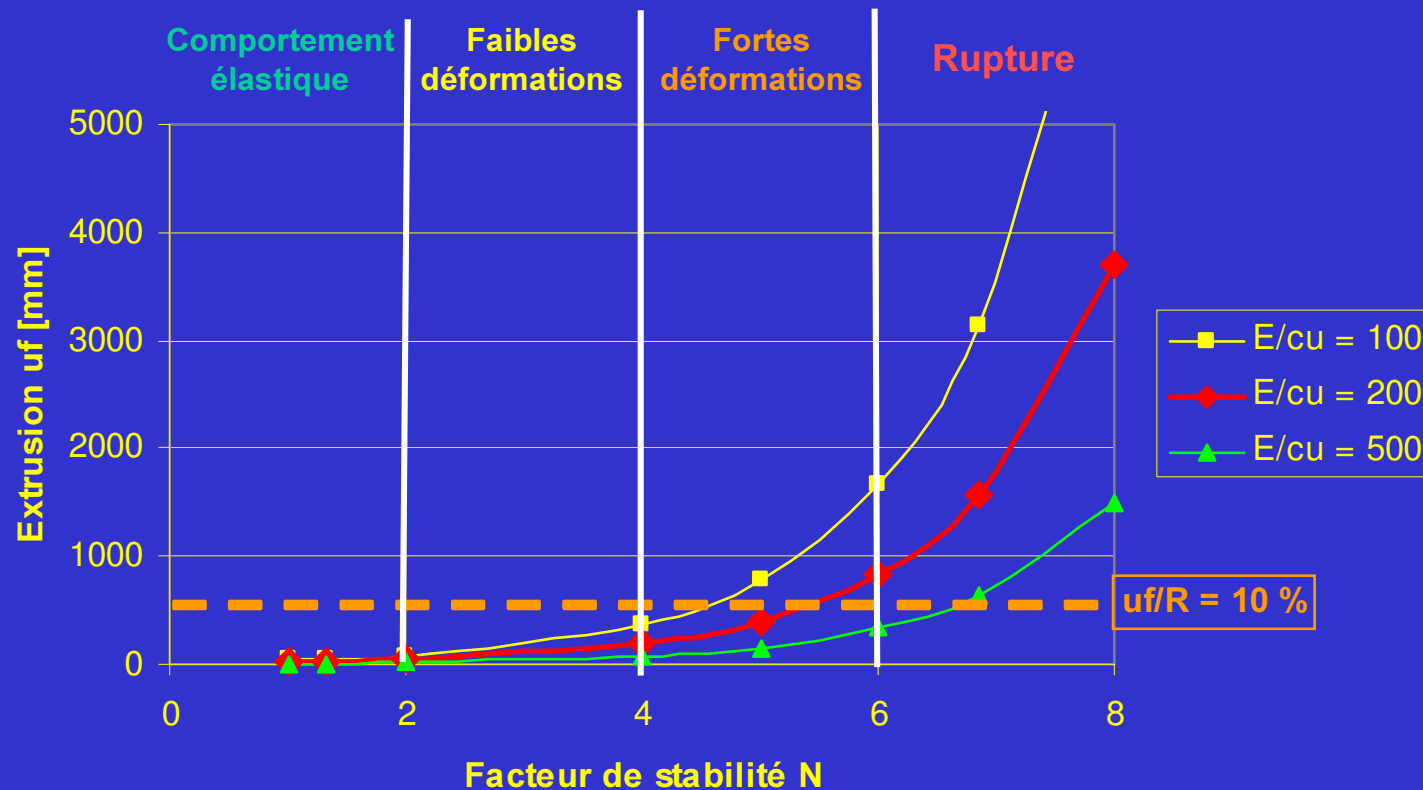
Résultats pour les sols cohérents :

- $N < 2$: comportement élastique ; très faibles déformations
- $2 < N < 4$: faibles déformations au front
- $4 < N < 6$: fortes déformations; un soutènement du front est nécessaire si on veut limiter les déformations
- $N > 6$: rupture : soutènement du front indispensable

Résultats TUNREN

Extrusion $u_f = f(c_u) = f(N)$ pour un tunnel $R = 5$ m

$\sigma_o = 2,4$ MPa $c_u = 2,4$ à $0,3$ MPa ($N = 1$ à 8) $\phi_u = 0$



Approche proposée dans TUNREN

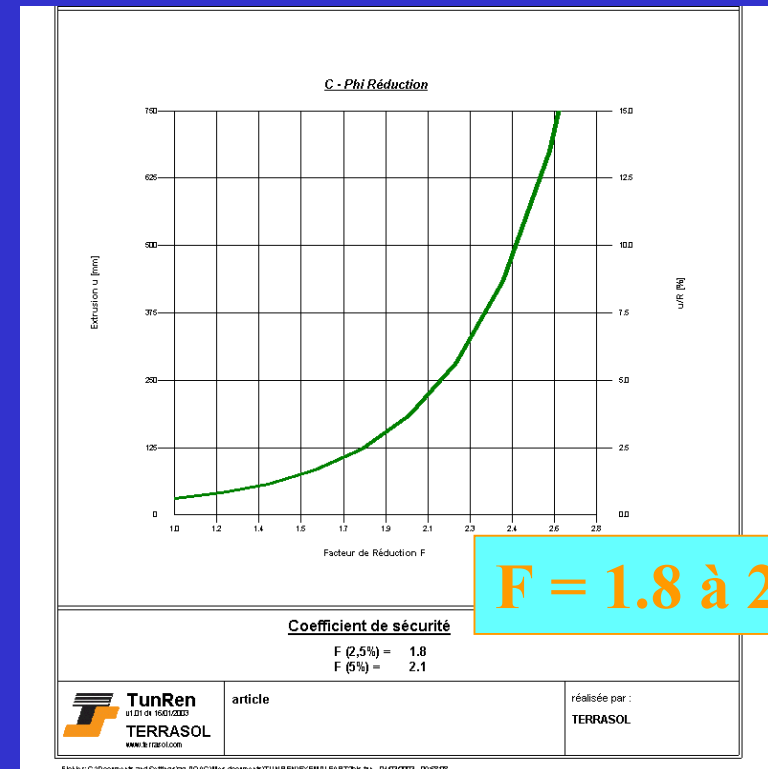
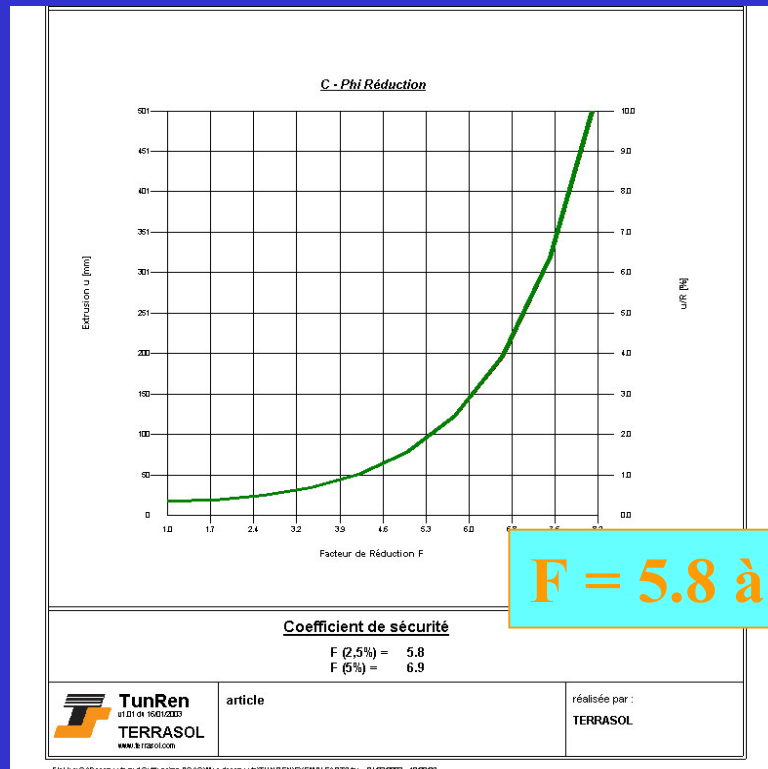
Principe de c- ϕ réduction : on réduit c et ϕ (+ résistance des boulons) par un facteur F et on détermine F pour lequel on atteint la « rupture »

Conventionnellement : $F_1(u_f/R = 2,5 \%)$ et $F_2(u_f/R = 5 \%)$

Exemple : tunnel de rayon $R = 5 \text{ m}$ – $\sigma_0 = 2.4 \text{ MPa}$

$c_u = 2.4 \text{ MPa}$ $\phi_u = 0^\circ$

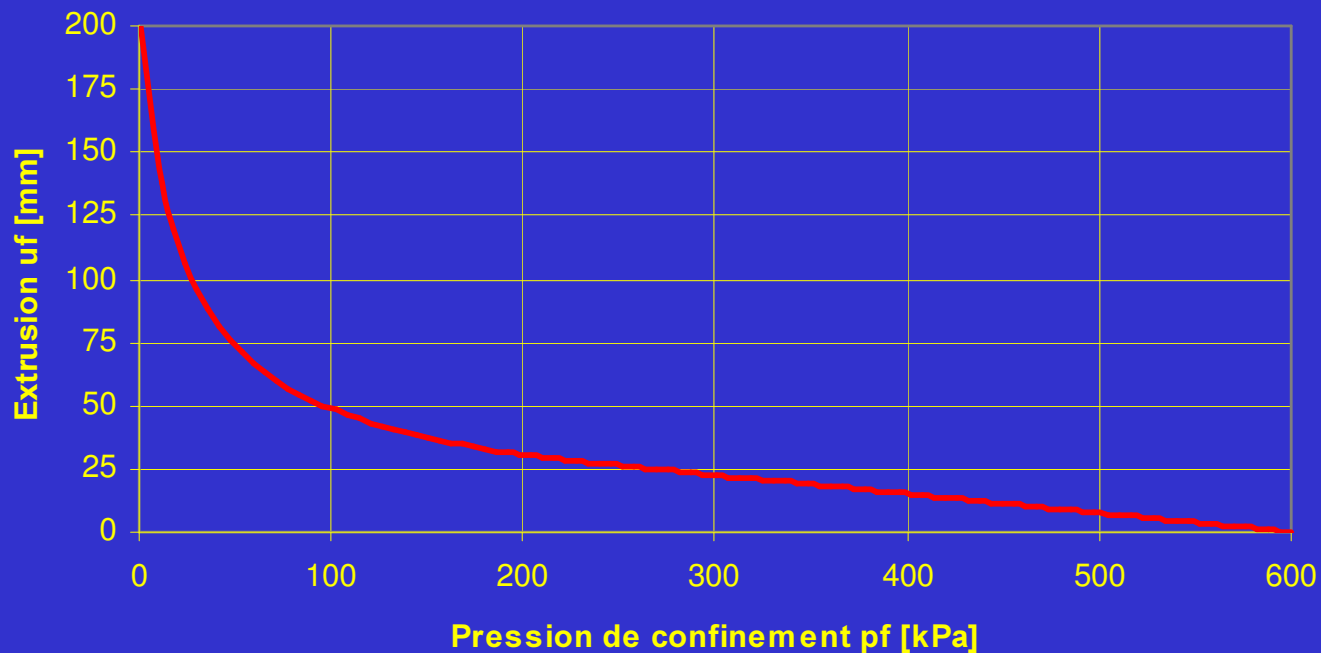
$c = 0.2 \text{ MPa}$ $\phi = 30^\circ$



Effet d'une pression de confinement

Procédure : on calcule l'extrusion pour un déconfinement partiel $\lambda = (\sigma_o - p_f)/\sigma_o$

Exemple : Tunnel $R = 5 \text{ m}$ $\sigma_o = 0.6 \text{ MPa}$
 $E = 50 \text{ MPa}$ $c = 10 \text{ kPa}$ $\phi = 30^\circ (F = 1)$

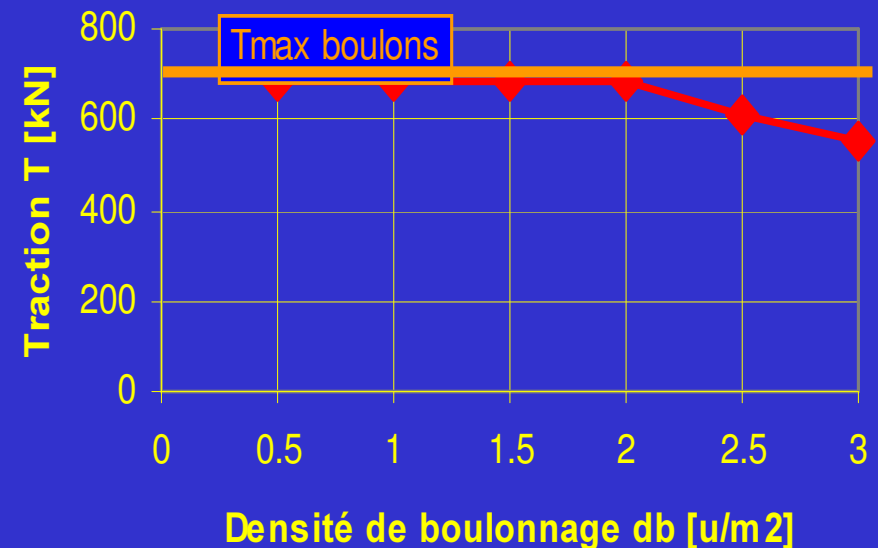
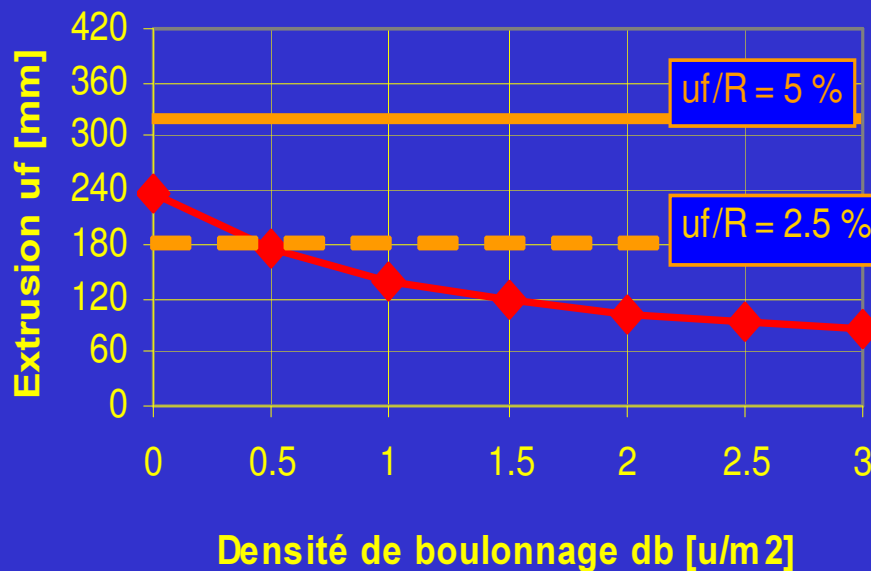


Dimensionnement d'un boulonnage de front

Exemple :

Tunnel : $R = 6 \text{ m}$ $\sigma_o = 2.5 \text{ MPa}$ $E = 200 \text{ MPa}$
 $\phi_u = 0$ $c_u = 0.5 \text{ MPa}$ **$N = 5 (F = 1)$**

Boulons : FDV 10 cm^2 $T_b = 700 \text{ kN}$ $E_b = 20\,000 \text{ MPa}$



Conclusions

- Modules « convergence-confinement » et « extrusion » basées sur **approches comparables en contraintes-déformations**
- Évaluations de la tenue du front souvent faites encore sur des approches à la rupture (sauf calculs EF)
- **TUNREN** : outil d'analyse simple pour faire des approches en déformations
- **Aide à la conception** :
 - ✓ approche du **coefficient de sécurité**,
 - ✓ effet d'une **pression de confinement** (bouclier) sur les déformations d'extrusion,
 - ✓ dimensionnement du **renforcement de front par boulons FdV**
- Support pour les **mesures d'auscultations** (extrusomètres)

A développer et à caler sur d'autres mesures sur chantiers