Exercice de prévision de l'impact d'un tunnelier sur une fondation profonde TULIP

Parole d'un participant : réflexions autour de modèles numériques bidimensionnels

Romain VALLENTIN

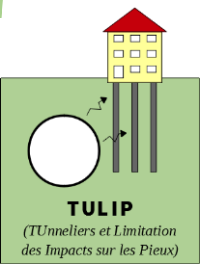
Avec la **participation très active** d'une partie des étudiants de l'ISBA TP :
Mr BEDIANG A RIM Daniel Boris
Mr BOUCHEMAT Seyyid-Ali
Mr CISSE Bakary
Mr COMPAORE Frange Landry
Mr DOUMONGUE Lantante Barthélémy
Mme FAYE Ndeye Gouby
Mr FEULEFACK DOLEGUI Christian
Mr GHOZZI Saddam
Mr IDI AMARA GASPARD Seydou
Mr KANE Djiby
Mr MAIGA Abdoul Moubarack
Mme WONGA BAREBILONGO Jeancia Exaucée

Pourquoi le choix du 2D ?

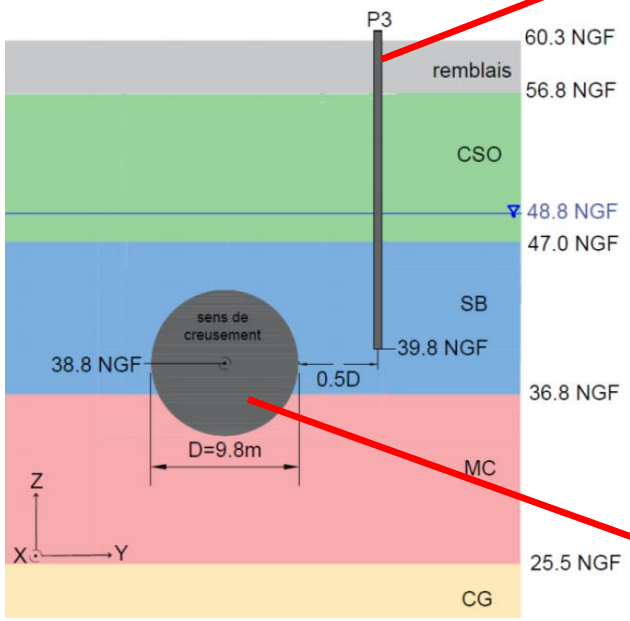
- Plus simple et rapide d'utilisation
- Test de sensibilité aisé (sur éléments structurels ou lois de comportement)
- Indispensable avant de faire du 3D
- Utilisation dans le cadre de travail avec des étudiants

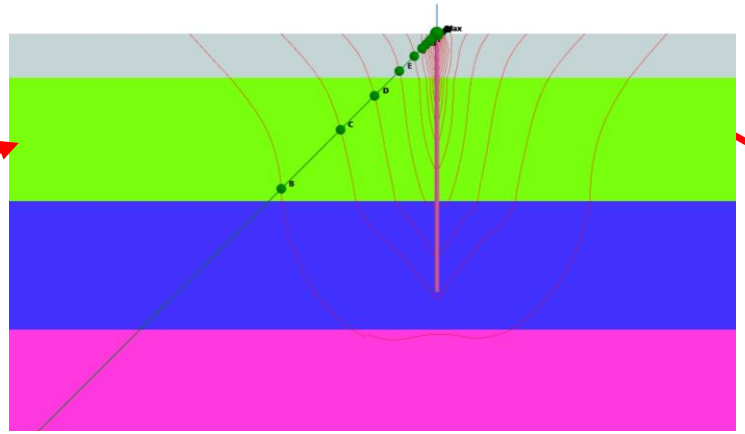
Mais simplifications importantes (trop ?) :

- Creusement du tunnel : confinement du front EPB
- Comportement du pieu
- Pression au front et interaction avec le pieu en fonction de la distance

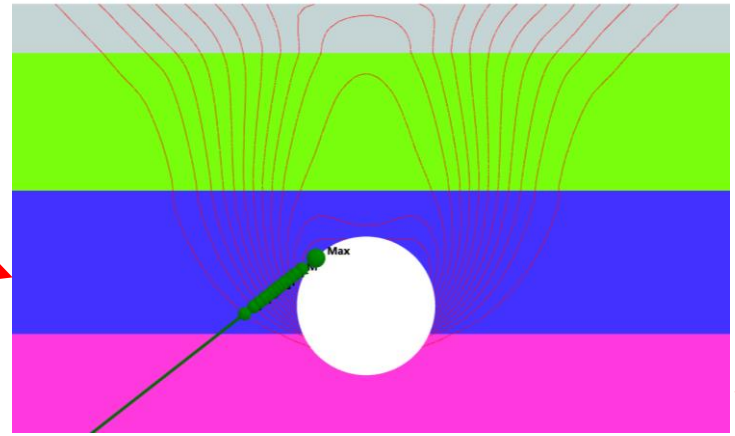


SIMPLIFICATION DU PROBLEME

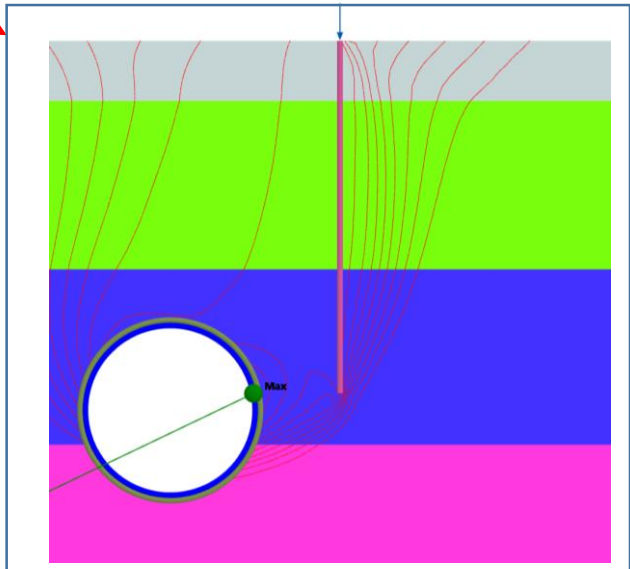




Simulation tassement du pieu sans tunnel



Simulation creusement tunnel sans pieu



Couplage

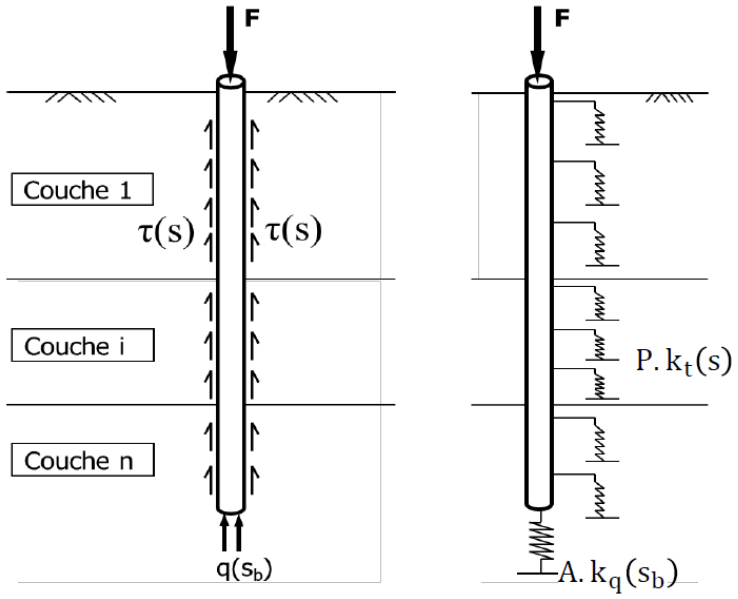
Découpage en sous-problèmes

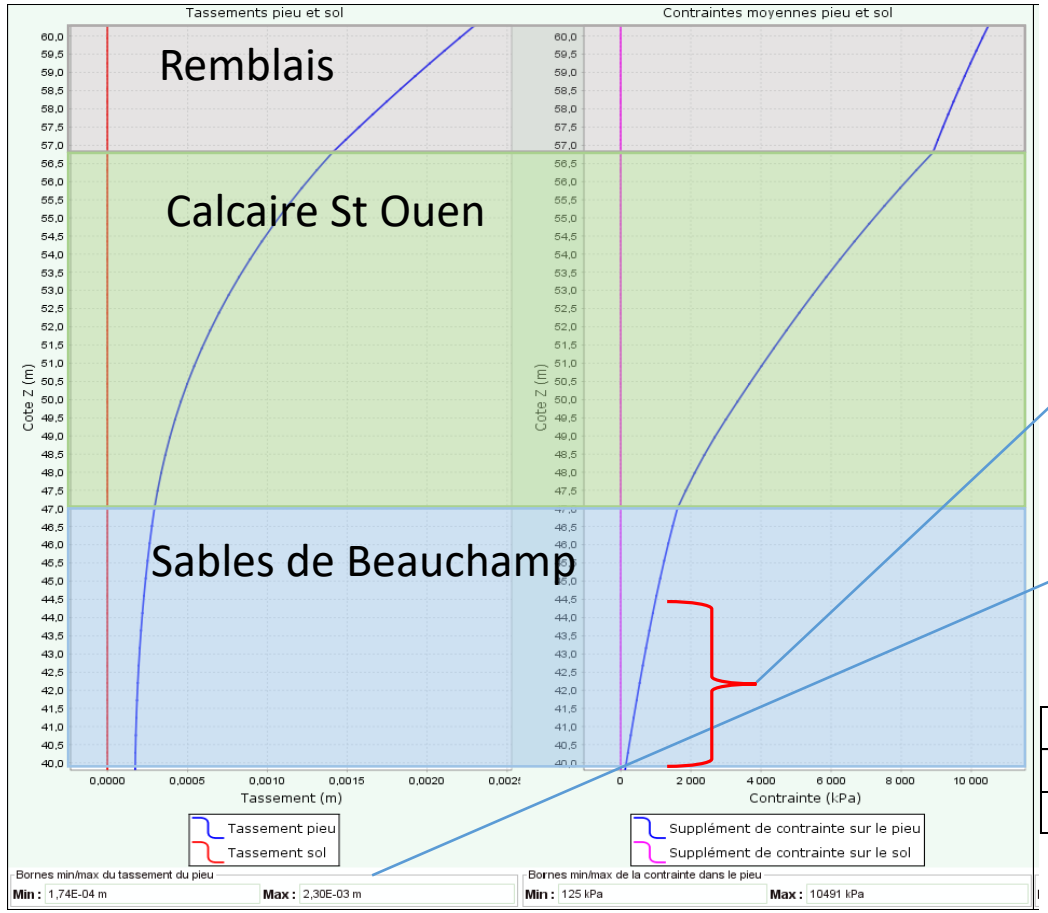
Calibrage des hypothèses avec les mesures de tassements du pieu

Données
1. Mesure : tassement 2 mm sous 2060 kN de chargement
2. Plus d'effort dans le pieu 4 mètres avant la fin du pieu

Modèle
1. tassement 2,3 mm sous 2060 kN de chargement
2. Effort jusqu'à la base du pieu

Utilisation de calcul de type Frank et Zhao pour évaluer les déformations et les efforts en profondeur : utilisation de Foxta de Terrasol





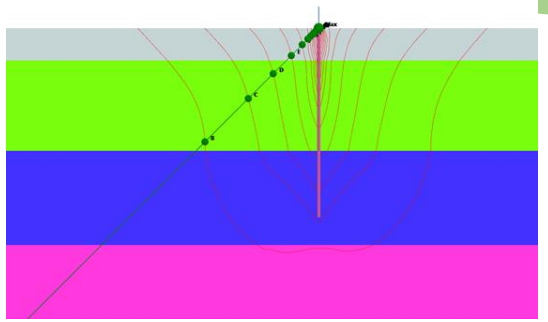
Par contre impossible de ne pas avoir d'effort sous 4 mètres

2,3 mm pour 2 mm mesuré !

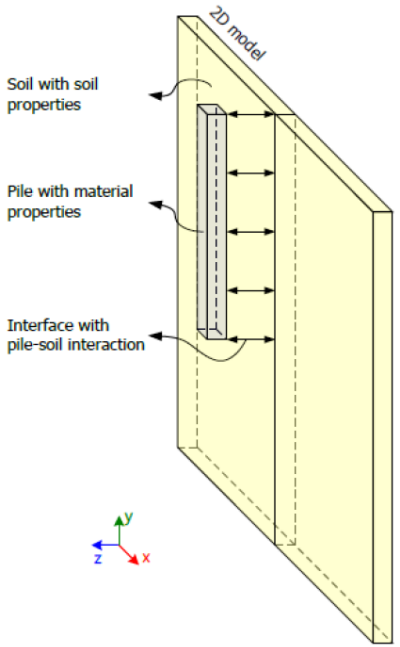
	Em (MPa)	Qs (kPa)	Comportement
Remblais	20	68	sol fin
Calcaire St Ouen	50	168	sol fin
Sables de Beauchamp	75	170	sol granulaire

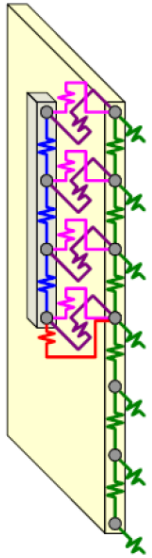
TULIP
(TUnneliers et Limitation des Impacts sur les Pieux)

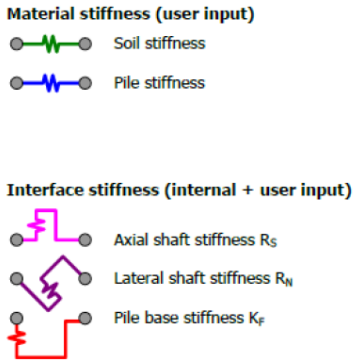
Modélisation du pieu sur le modèle global



Emploi de PLAXIS : emploi de la fonction embedded beam row : permet de simuler en 2D la déformation du sol entre les pieux (a contrario d'éléments de plaque).







$$K_s = ISF_{RS}\frac{G_{soil}}{L_{spacing}}$$

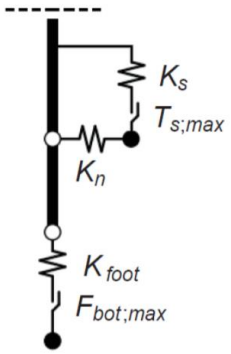
$$K_n = ISF_{RN}\frac{G_{soil}}{L_{spacing}}$$

$$ISF_{RS} = 2.5\left(\frac{L_{spacing}}{D_{eq}}\right)^{-0.75}$$

$$ISF_{RN} = 2.5\left(\frac{L_{spacing}}{D_{eq}}\right)^{-0.75}$$

$$ISF_{KF} = 25\left(\frac{L_{spacing}}{D_{eq}}\right)^{-0.75}$$

TULIP
(TUnneliers et Limitation des Impacts sur les Pieux)



R_N = stiffness lateral direction
R_S = stiffness axial direction
K_F = stiffness base
$T_{s;max}$ = maximum force axial direction
$F_{bot;max}$ = maximum base resistance

Résistance axial (π D qs) :

Axial skin resistance	
Axial skin resistance	Multi-linear
Multi-linear axial resistance	Axial skin resistance table

#	Distance [m]	Axial skin resistance [kN/m]
1	0,000	106,0
2	3,500	106,0
3	3,550	263,0
4	13,30	263,0
5	13,40	267,0
6	20,50	267,0

Remblais : qs = 68 kPa
CSO : qs = 168 kPa
SB : qs = 170 kPa

Il y a aussi un effort max Tn (correspondant à un plafond max d'effort, souvent retenu à la pression de fluage)

La résistance à la base du pieu par qu = k_p.A.Pl*e = 1.65 . ($\pi D^2/4$).3.8 = 1 231 kN.

Base resistance		
F_{max}	kN	1231

Résistance latérale : Diamètre du pieu x Pression de fluage du sol (retenue à Pl*/1.7).

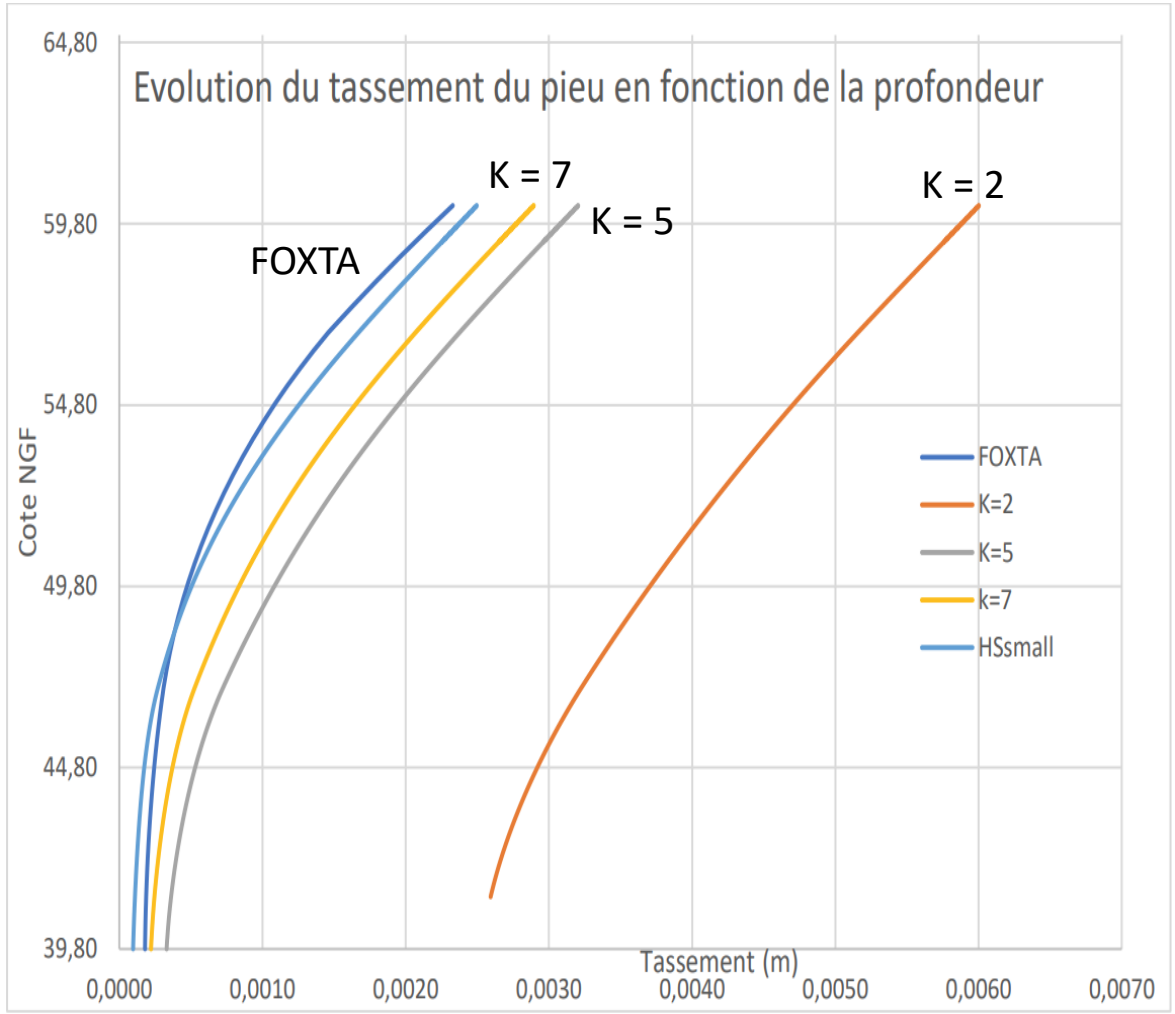
Lateral resistance	
Lateral resistance	Multi-linear
Multi-linear lateral resistance	Lateral resistance table

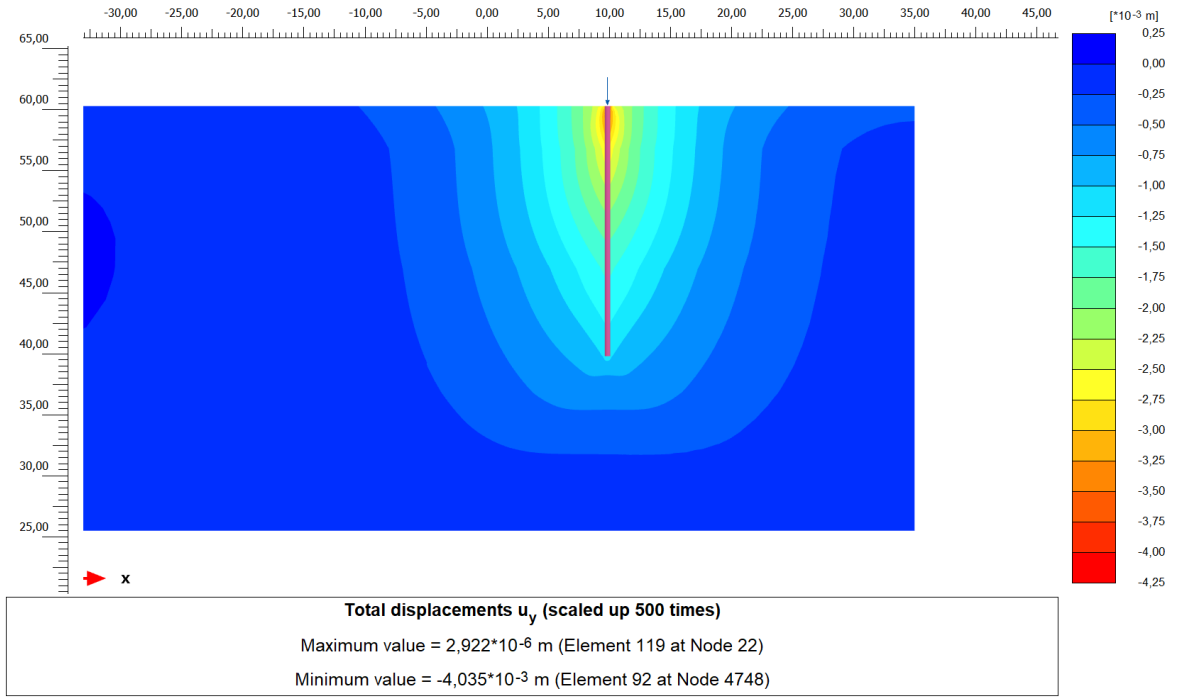
#	Distance [m]	Lateral resistance [kN/m]
1	0,000	559,0
2	3,500	559,0
3	3,550	824,0
4	13,30	824,0
5	13,40	1118
6	20,50	1118

Remblais : Pf = 1.9/1.7 = 1.1 MPa
CSO : Pf = 2.8/1.7 = 1.6 MPa
SB : Pf = 3.8/1.7 = 2.2 MPa

TULIP
(TUnneliers et Limitation des Impacts sur les Pieux)

Tentative de calage FOXTA / PLAXIS





Loi de comportement HSM :

- variation de $k = E50/(E_M/\alpha)$

Loi de comportement HSSmall :

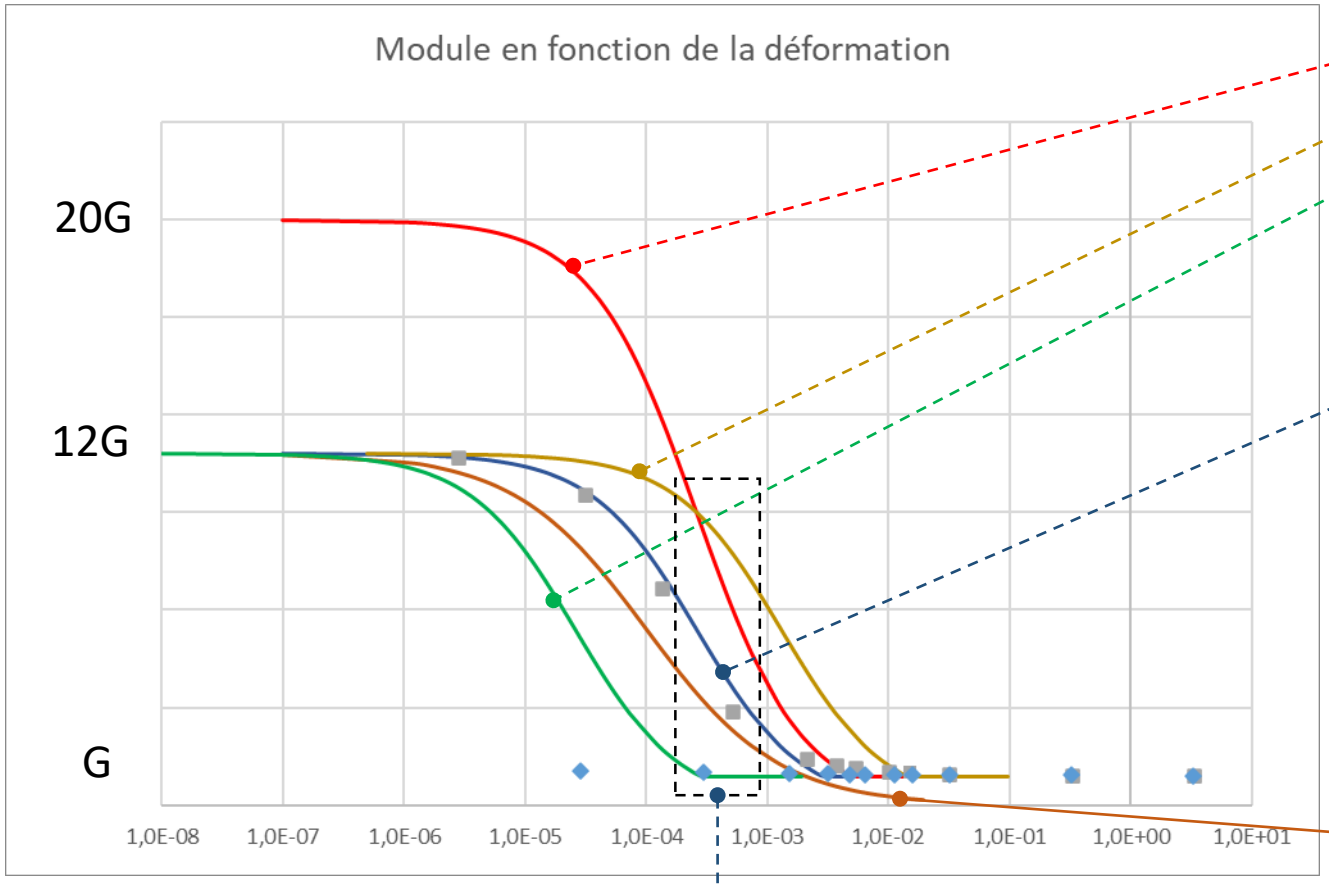
- $k = E50/(E_M/\alpha) = 1$: fixe

Variation de G_0 = 8 à 10 G_{ur} = 10 à 25 E_M

Et $\gamma_{0,7} = 10^{-4}$ à 10^{-5}

TULIP
(TUnneliers et Limitation des Impacts sur les Pieux)

Réflexions avec la variation du rapport G/G0 et $\gamma_{0,7}$ sur un modèle fictif et un même sol



Module max = 20 x module initial

$\gamma_{0,7} = 5.10^{-4}$

$\gamma_{0,7} = 10^{-5}$

Modèle de base :

Module max = 12 x module initial

$\gamma_{0,7} = 1.10^{-4}$

Santos and Correia (2003) : loi utilisée dans PLAXIS

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + \alpha\left(\frac{\gamma}{\gamma_{0,7}}\right)}$$ α = 0,385

Vardenega & Bolton (2011) :

$$\frac{G}{G_o} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_{ref}}\right)^{\alpha}}$$ α = 0,8

Calculs PLAXIS

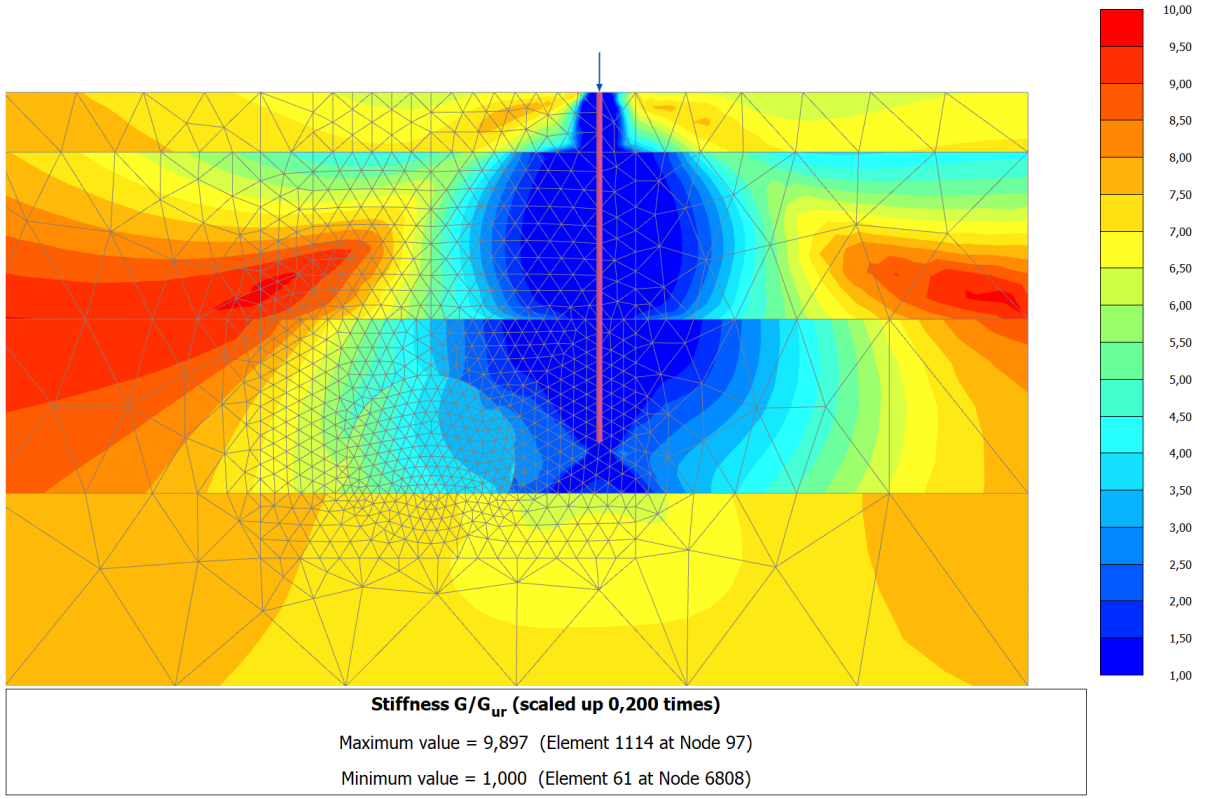
HSSmall ■

HSM ◆

! Très fortes variation du module !

TULIP
(TUnneliers et Limitation des Impacts sur les Pieux)

Evolution du module pris en compte dans les calculs

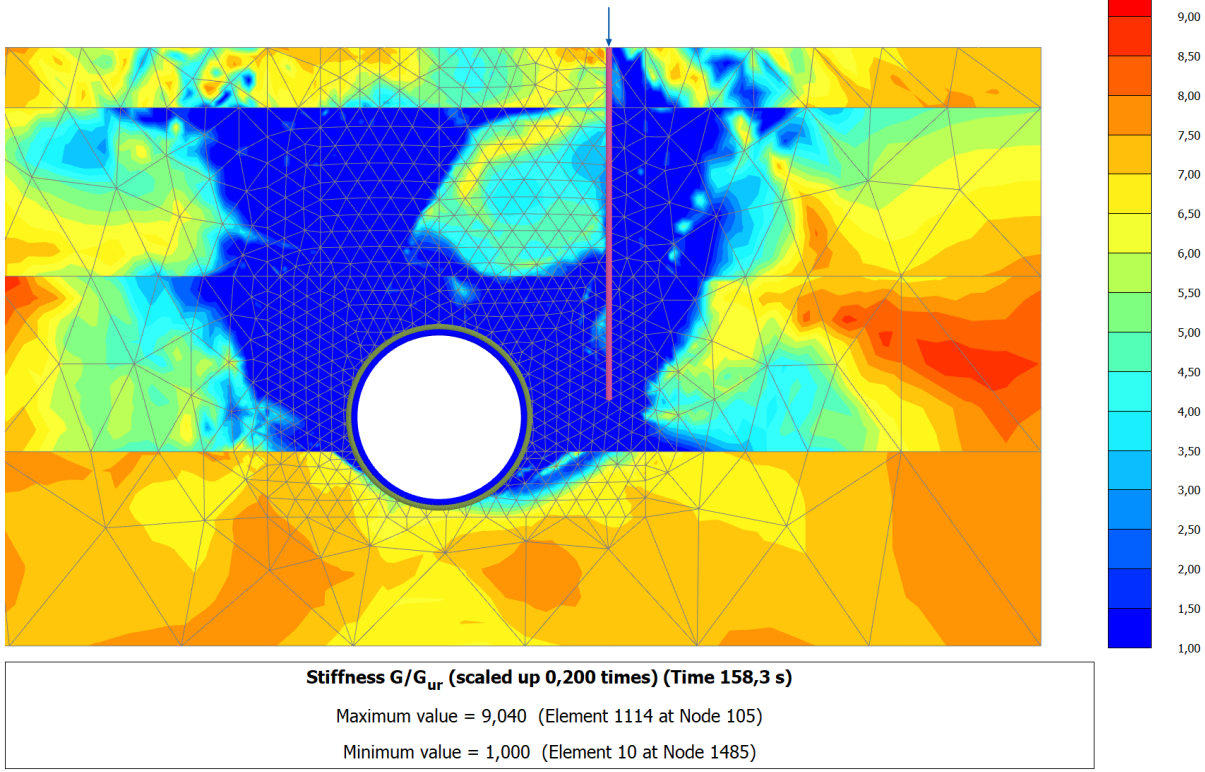


Stiffness G/G_{ur} (scaled up 0,200 times)

Maximum value = 9,897 (Element 1114 at Node 97)

Minimum value = 1,000 (Element 61 at Node 6808)

Pieu chargé uniquement



Stiffness G/G_{ur} (scaled up 0,200 times) (Time 158,3 s)

Maximum value = 9,040 (Element 1114 at Node 105)

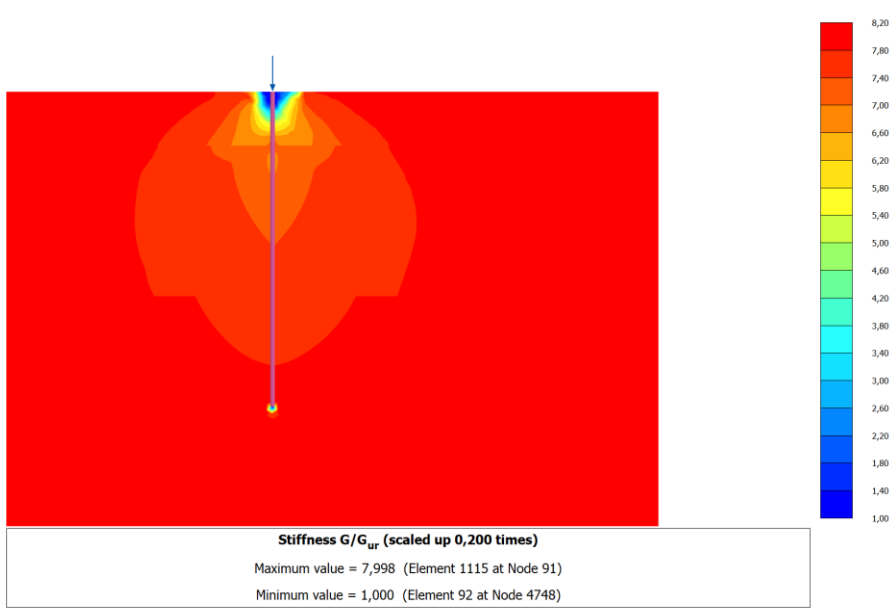
Minimum value = 1,000 (Element 10 at Node 1485)

Pieu et tunnel

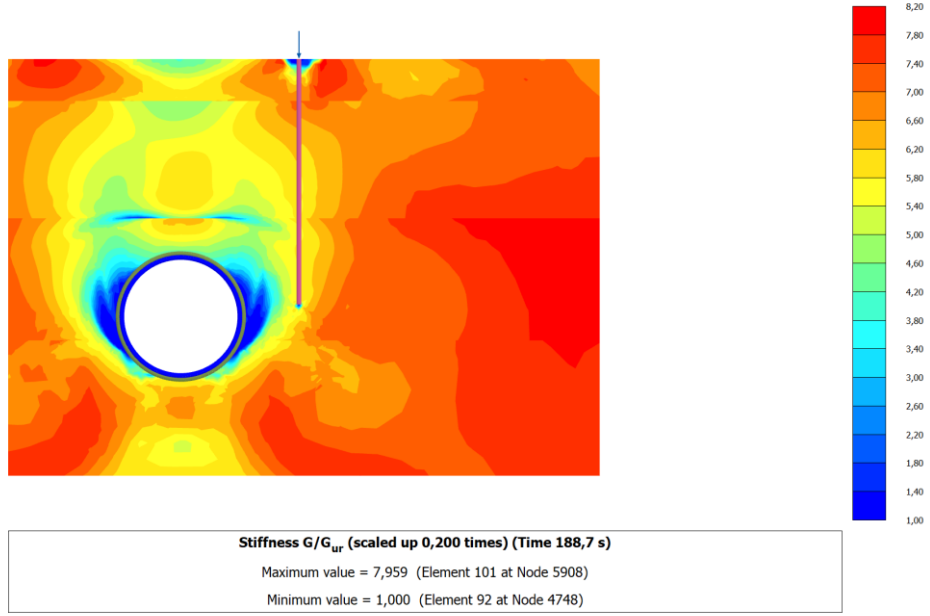
Rapport G/Gur utilisé dans le calcul

Espacement entre pieu dans le modèle 2D précédent = 1 mètre (défavorable, va concentrer les efforts pour le cas où le tunnel est au plus près), proche du rideau continu : très défavorable !

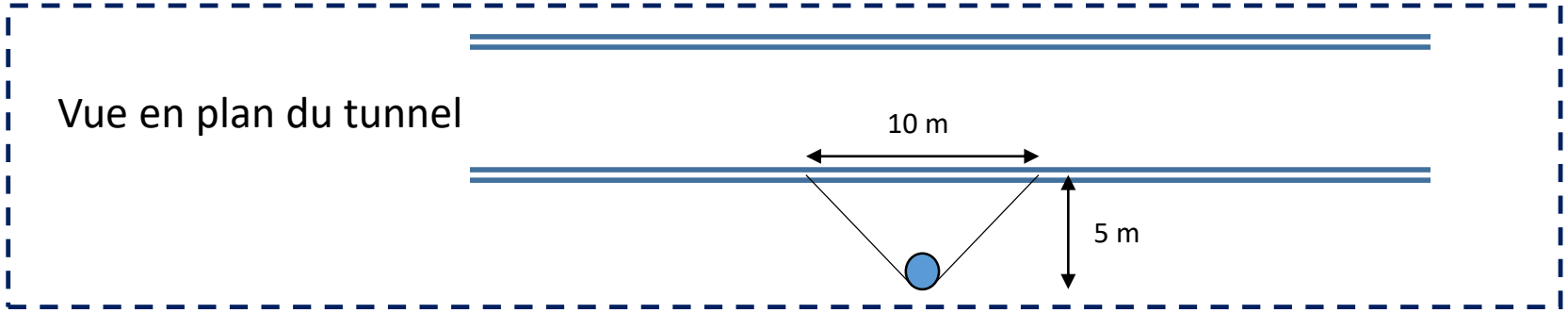
Si, à l'autre extrême, on considère un espacement de 10 mètres entre pieux :



Pieu chargé uniquement

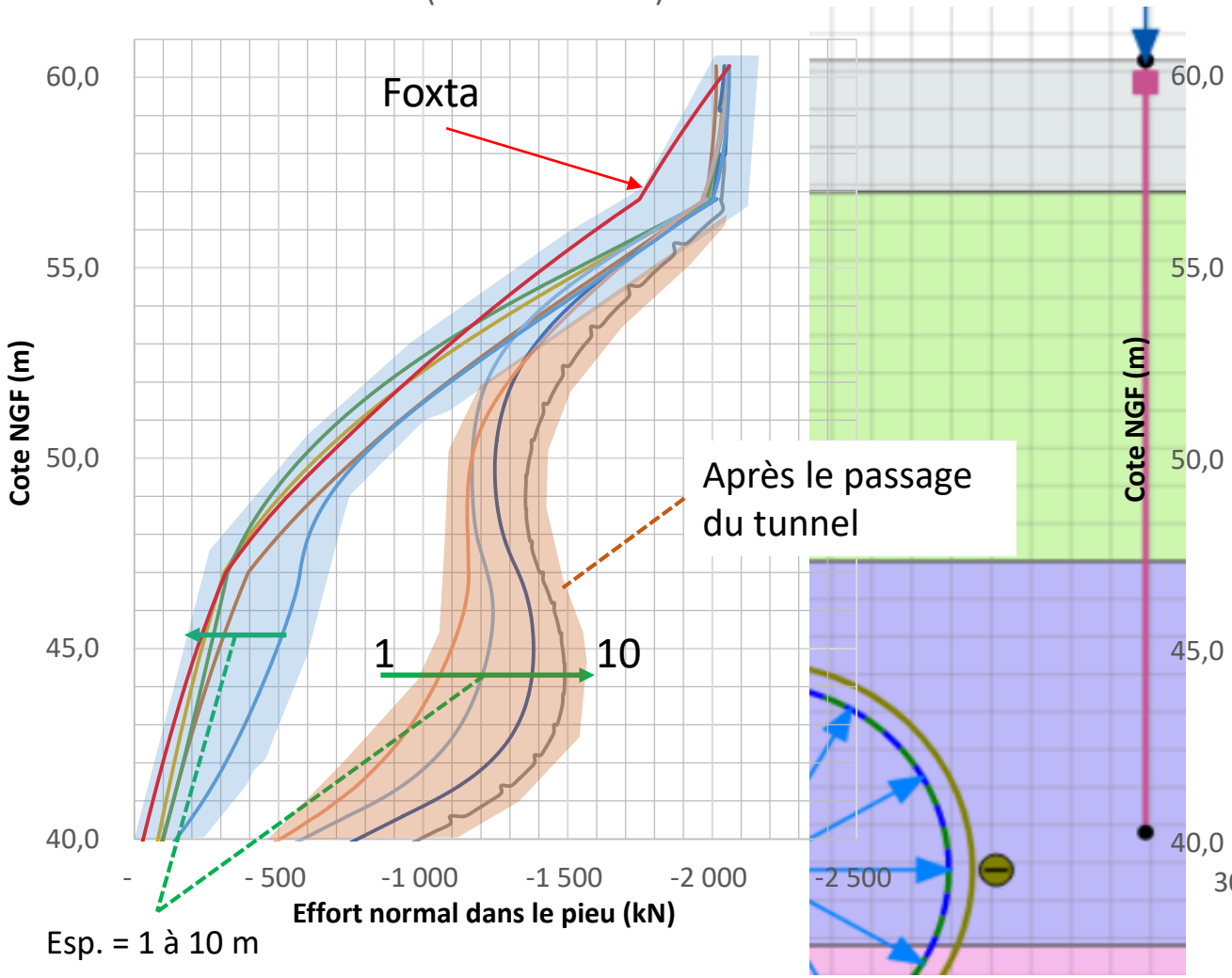


Pieu et tunnel

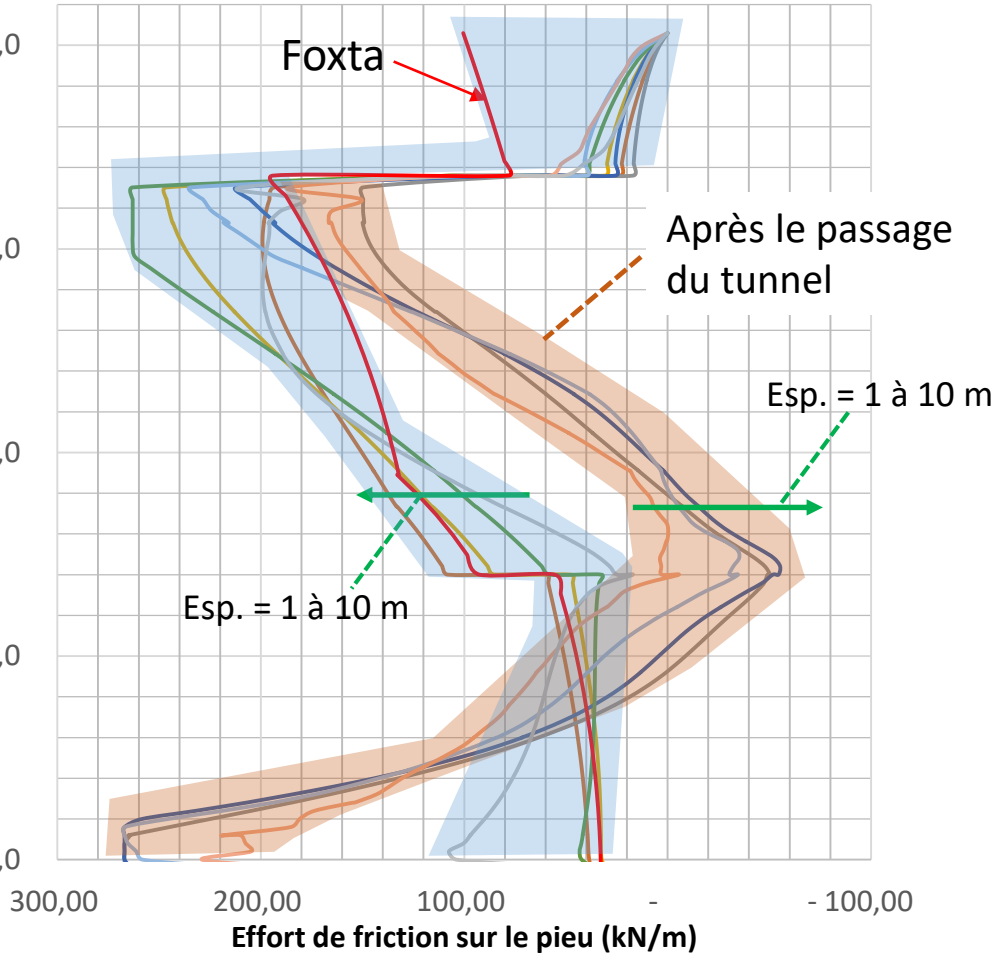


Variation de l'espacement des pieux de 1 à 10 mètres

Effort Normal dans le pieu avant et après creusement (Foxta et PLAXIS)

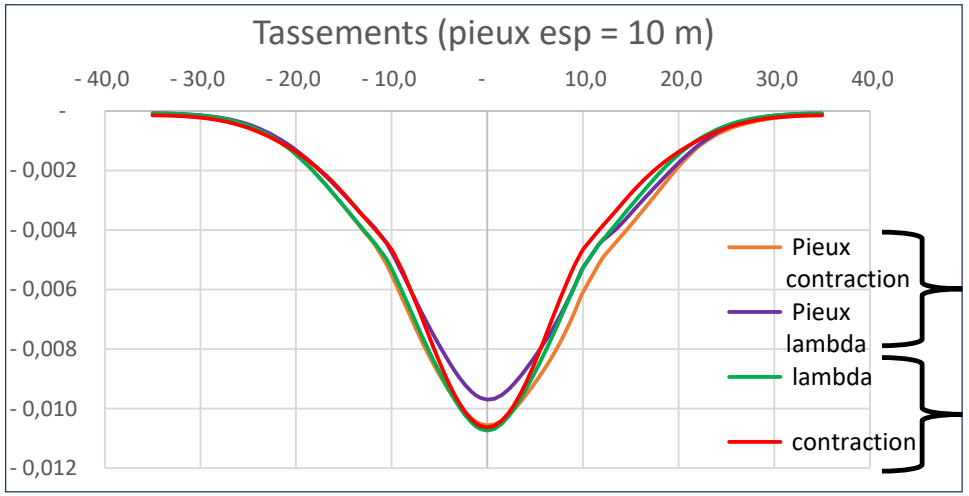


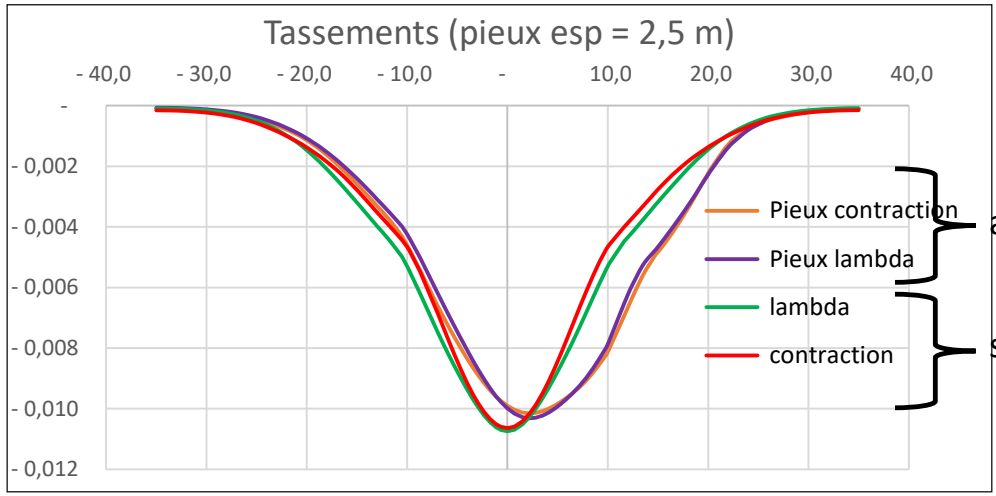
Modélisation PLAXIS et Foxta
Effort de friction sur le pieu (kN/m)

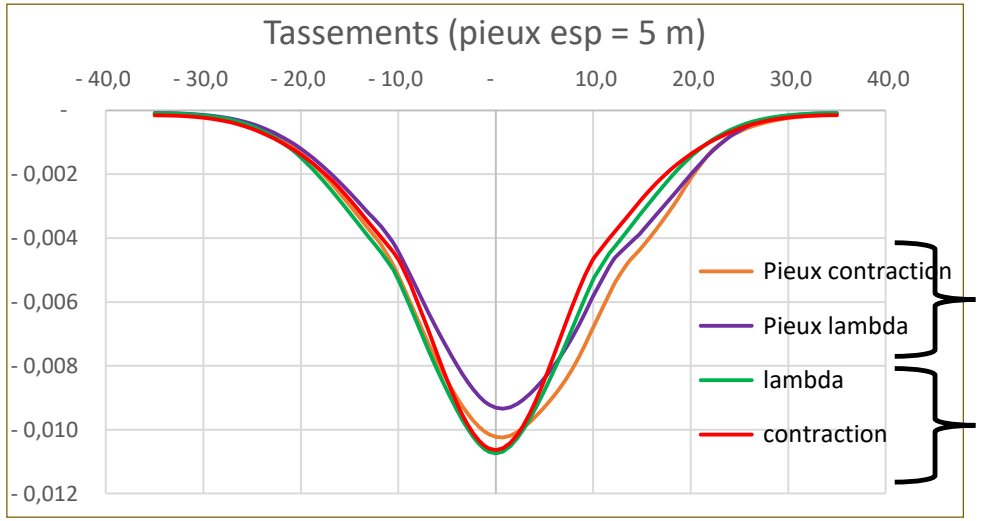


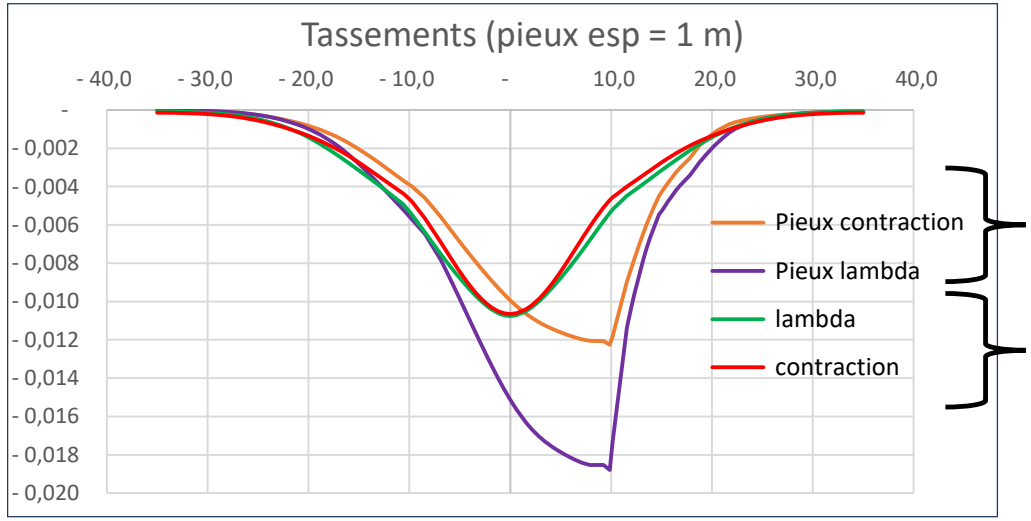
TULIP
(TUnneliers et Limitation des Impacts sur les Pieux)

Impact des espacements de pieux modélisés sur les cuvettes de tassements









TULIP
(TUnneliers et Limitation des Impacts sur les Pieux)

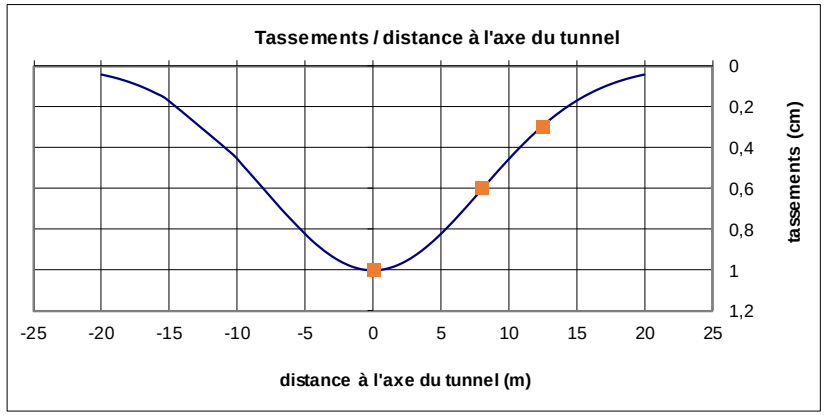
Simulation du creusement du tunnel

Svmax = 1
i = 8
Longueur critique (2,5i) = 20 m

	Mesures in-situ		
distance à l'axe (m)	0	8	12,5
tassements (cm)	1	0,6	0,3

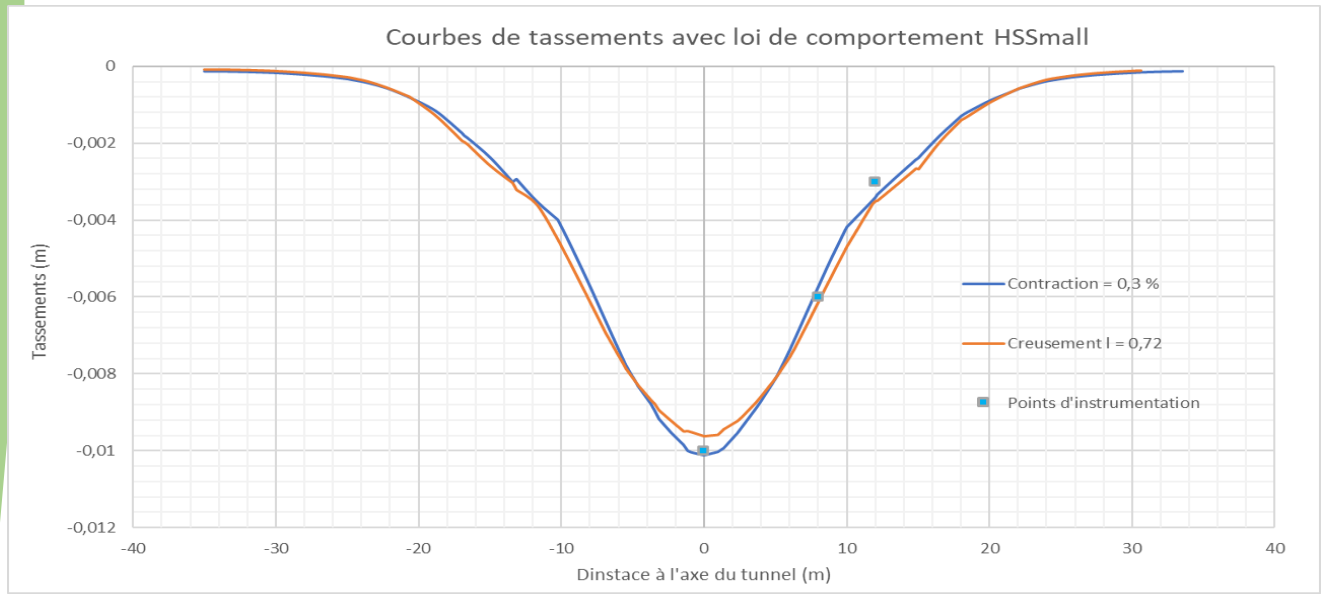
Analytique : formule de Peck

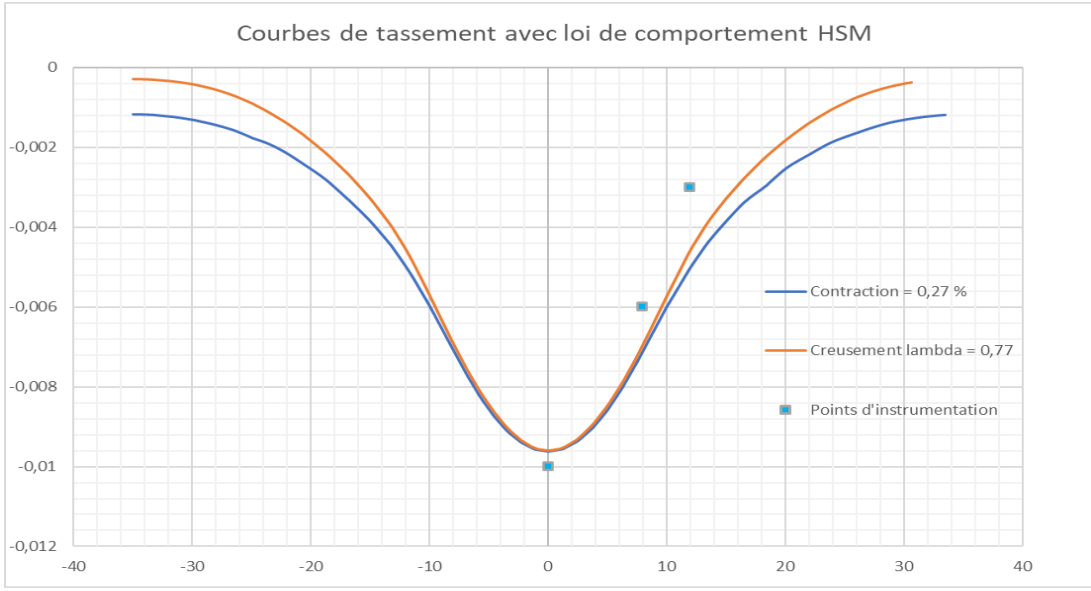
$$S_v(x) = S_{vmax} . e^{\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right)}$$



Eléments finis : deux méthodes où il est imposé soit

1. Une déformation : taux de contraction (d'expérience : 0,1 à 1 %)
2. Un relâchement des contraintes : taux de déconfinement



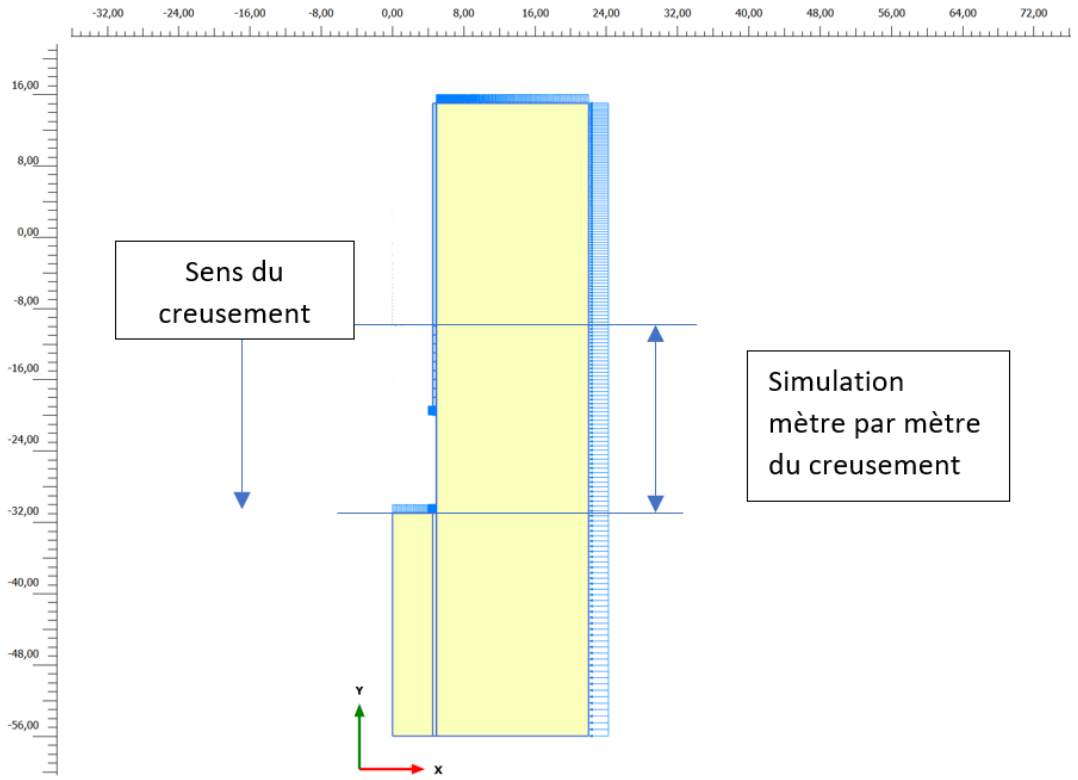


Calage de la cuvette de tassement avec le taux de contraction ou le taux de déconfinement

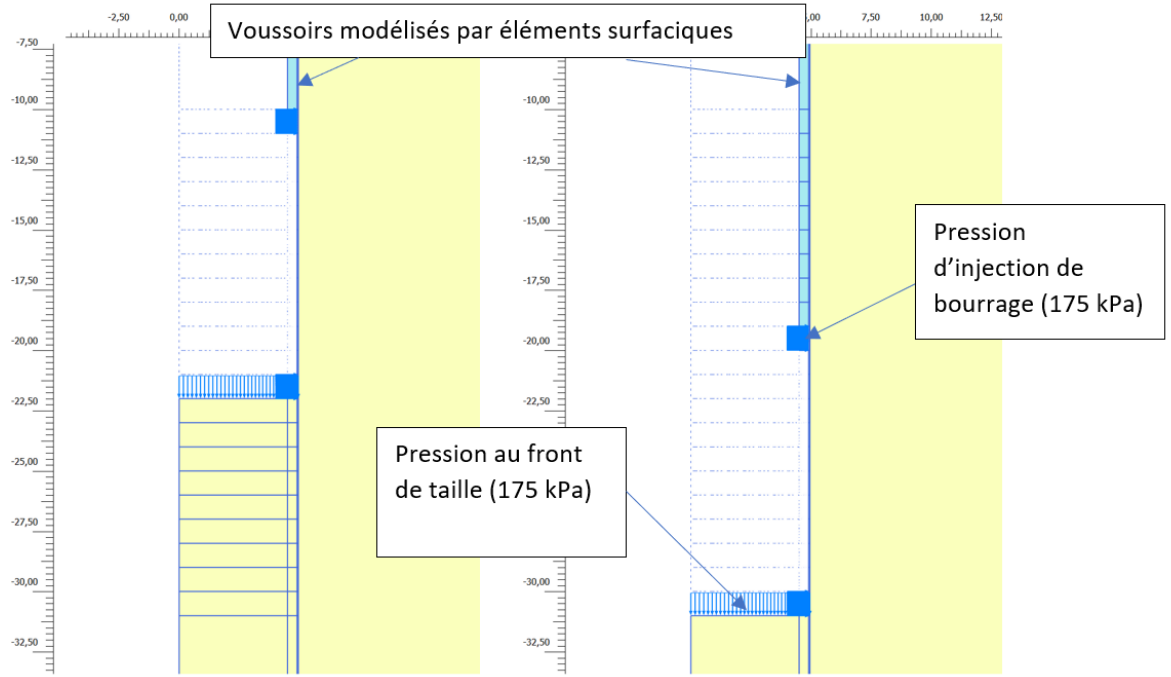
TULIP
(TUnneliers et Limitation des Impacts sur les Pieux)

Simulation du creusement du tunnel : évaluation du taux de déconfinement

Utilisation du calcul axisymétrique en inversant le sens du creusement (devient vertical).
Le poids volumique est retenu à 0. Les contraintes initiales dans le sol sont générées par des charges au bord du modèle.

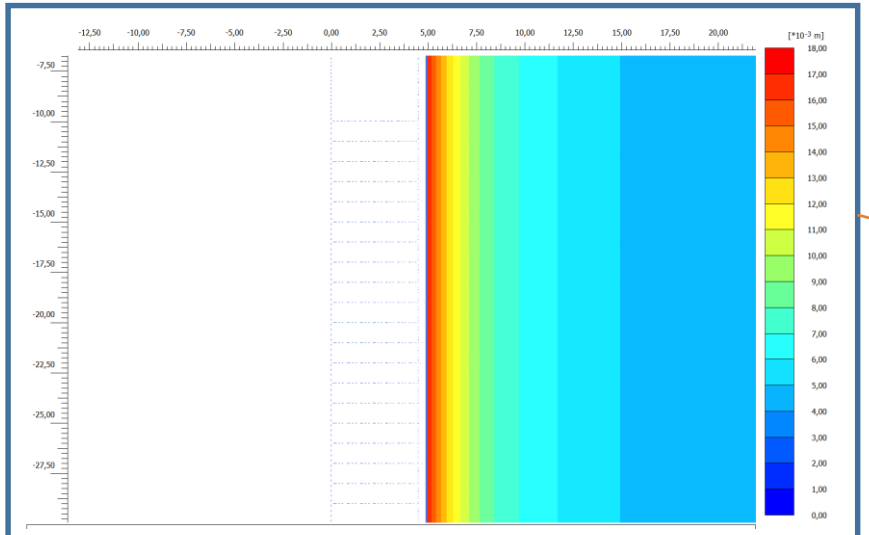


Calculs en contraintes totales

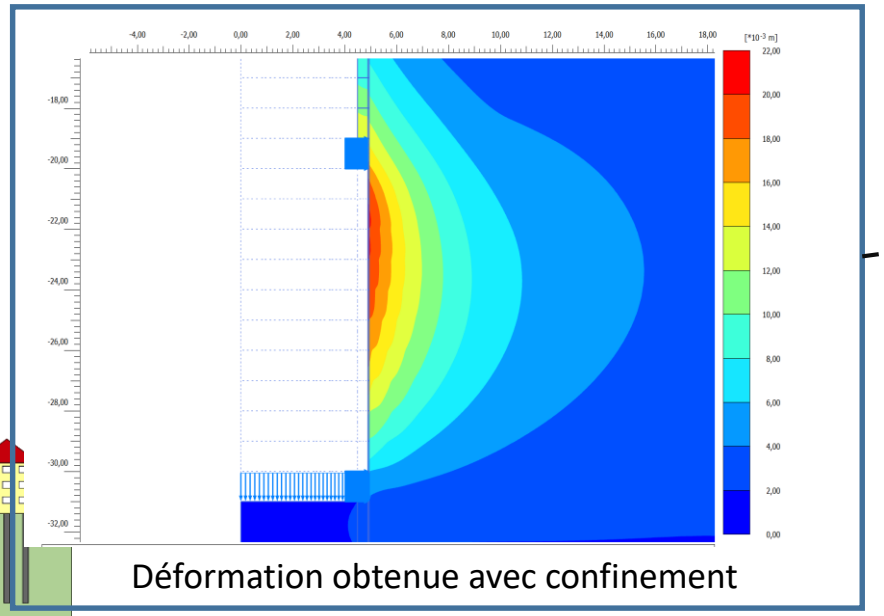


Simulation de l'avancement du creusement pas à pas.
Modélisation de la pression au front et l'injection de bourrage

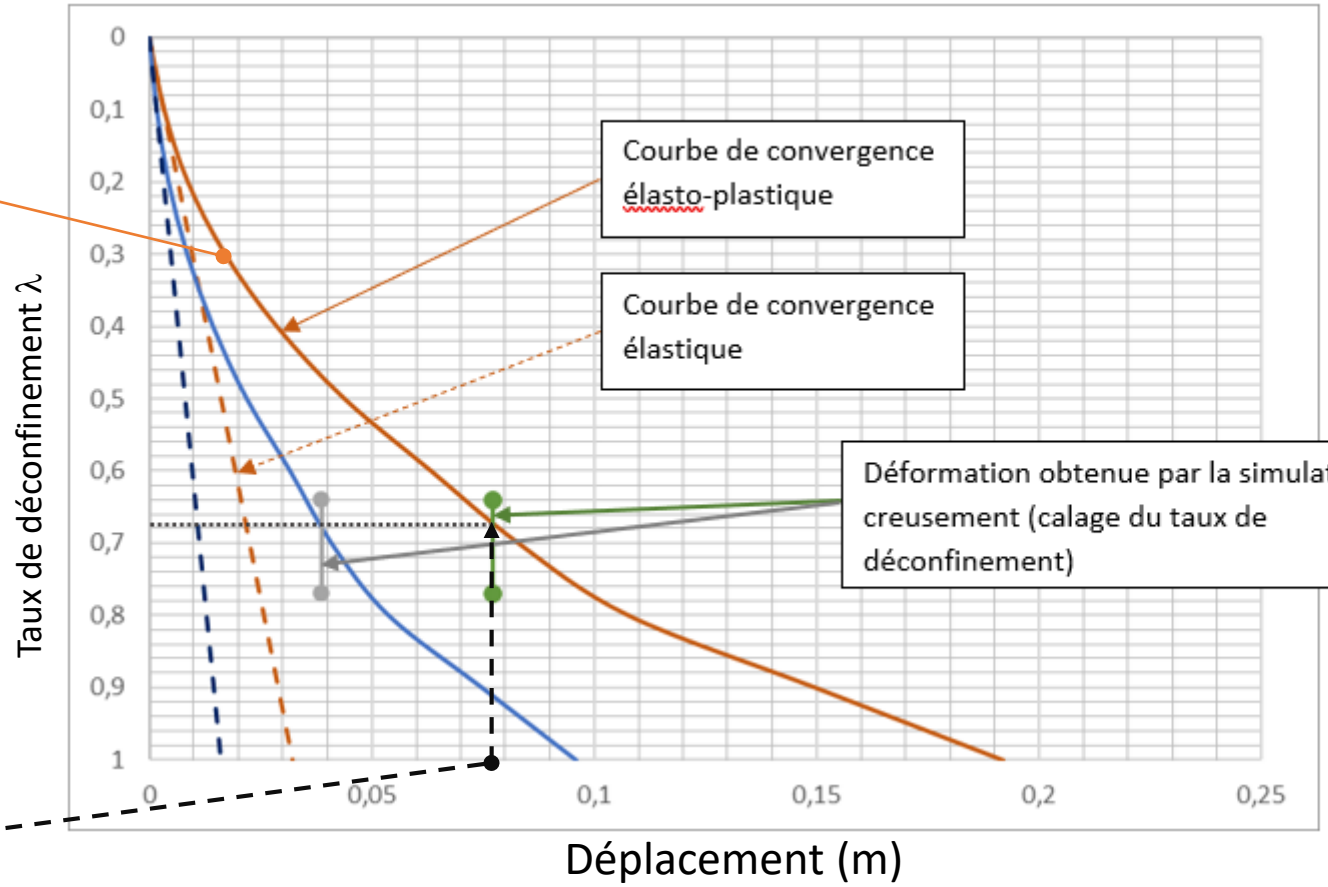
TULIP
(TUnneliers et Limitation des Impacts sur les Pieux)



Déformation sans confinement :
courbe de convergence du terrain



Déformation obtenue avec confinement



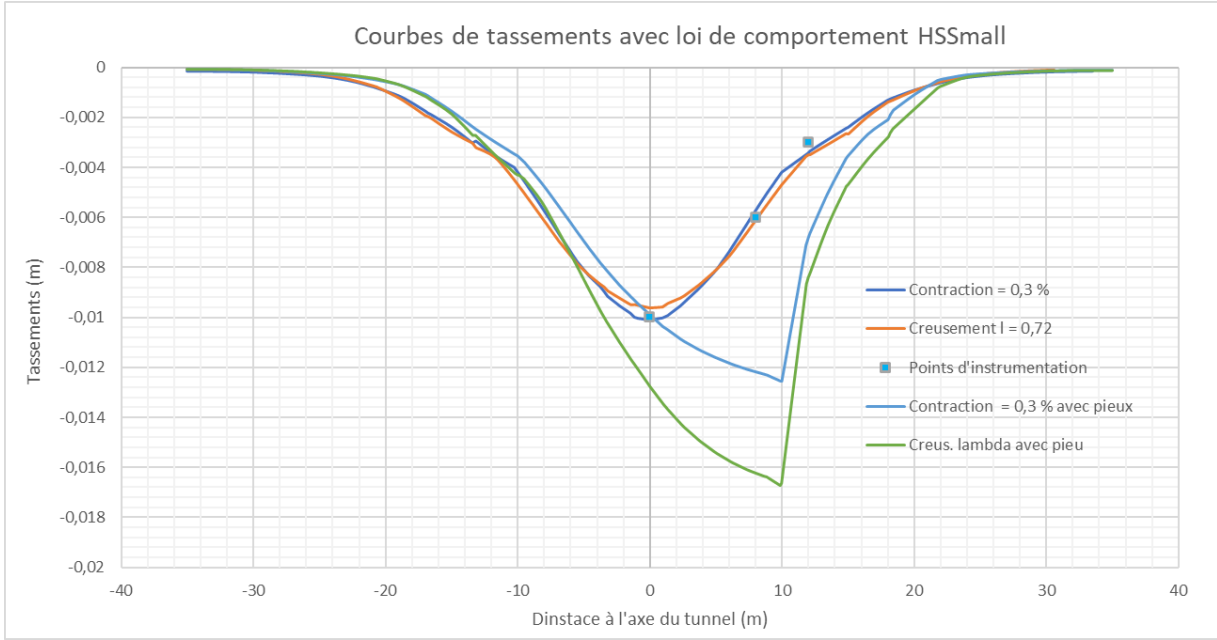
0,68 de taux de déconfinement avec ce modèle pour un taux de 0,72 à 0,77 recalé sur les mesures topographiques.

Conclusions

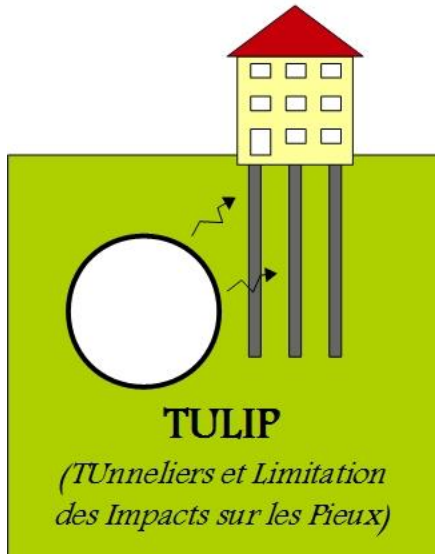
Pieu : modèle « embedded beam row » semble donner des résultats globalement satisfaisants (en comparaison éléments finis et Frank et Zhao). Dans le détail pour un pieu isolé, les efforts sont influencés par l'espacement.

Loi de comportement :
HSSmall apparaît être une approche plus précise.
Attention à son utilisation.

Creusement et couplage :
Taux de déconfinement semble plus juste car les efforts amenés par les pieux influencent l'état de contrainte.
Le creusement est à caler sur l'auscultation.



Bibliographie :
1, Calculs des tunnels au tunnelier, P. Aristaghes, P. Autuori, RFG 97
2, Soil Stiffness Constitutive Model Parameters for Geotechnical Problems: A dilatometer Testing Approach, C. Cox, P. Mayne
3, Modélisation numérique du creusement d'un tunnel à l'aide d'un bouclier à pression de boue, C. Atahan
4, L'usage des modules de déformation en géotechnique, O. Combarieu, RFG n° 114
5, The Hardening Soil model with small strain stiffness in Zsoil, R. Obrzud
6, Manuels PLAXIS



Merci de votre attention