

IMPACT DU CREUSEMENT D'UN TUNNEL SUR DES FONDATIONS PROFONDES : ETUDE SUR MODELE REDUIT DE TUNNELIER EPB

IMPACT OF TUNNELING ON PILE STRUCTURES : EXPERIMENTAL STUDY ON A 1G REDUCED SCALE MODEL OF TBM

Justin BEL¹, Denis BRANQUE¹, Henry WONG¹, Giulia VIGGIANI², Nunzio LOZACCO²

¹ *Université de Lyon, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes, UMR CNRS 5513, rue Maurice Audin, 69518, Vaulx en Velin, France*

² *University of Roma 'Tor Vergata', Department of Civil Engineering and Computer Science, Via del Politecnico, 1, 00133, Rome,*

RÉSUMÉ – Dans le cadre du projet Européen NeTTUN, une importante campagne expérimentale sur modèle réduit de tunnelier vise à étudier l'impact du creusement d'un tunnel en terrain meuble sur des fondations profondes avoisinantes. Dans cet article, le modèle réduit de tunnelier à pression de terre est brièvement décrit et des résultats clefs concernant l'interaction tunnel-pieu-sol sont présentés dans le cas d'un pieu situé à l'aplomb du tunnel.

ABSTRACT – Within the framework of the European project NeTTUN, a large experimental campaign with an original reduced-scale physical model of EPBS is carried out to investigate the impact of tunnelling on neighbouring piled structures. In this paper, the authors describe briefly the original 3D device and present results concerning the impact of tunnelling on a single pile located above the tunnel.

1. Introduction

Dans le cas de tunnels creusés en site urbain, les concepteurs sont souvent confrontés à l'existence de structures enterrées, tels que collecteurs, fondations profondes d'immeubles ou d'ouvrages d'art, situées à proximité de l'ouvrage souterrain à réaliser. Les perturbations dues à la construction du tunnel sur ces structures avoisinantes doivent être prises en compte dès la conception jusqu'aux étapes de construction.

A ce jour, plusieurs études expérimentales ont été menées pour analyser les effets du creusement du tunnel sur des fondations profondes (Loganathan et al., 2000, Jacobsz et al. 2004, Lee and Basset, 2006, Marshall and Mair, 2011, ...). Ces différentes études réalisées en laboratoire sur des modèles 1g ou sur des modèles centrifugés ont pour but de mieux comprendre l'interaction tunnel - sol - pieu mais aussi de quantifier l'influence de différents paramètres du problème sur la réponse de la structure.

Bien que le problème d'interaction tunnel – sol – pieu soit un véritable problème tridimensionnel, une majorité de ces essais a été menée en déformations planes (2D) en modélisant les pertes de volume de sol dues au creusement du tunnel par la réduction du diamètre du tunnel ou de la pression radiale. Ainsi ces modèles ne permettent pas de reproduire les effets tridimensionnels comme par exemple les mouvements de sol dans la direction longitudinale, ou bien encore l'application d'une pression de soutènement sur le front de taille, ce qui peut avoir des conséquences sur les sollicitations mécaniques dans la fondation telles que l'apparition d'efforts de flexion, voire de torsion.

Dans le cadre du projet européen NeTTUN, le Laboratoire de Tribologie et de Dynamique des Systèmes de l'ENTPE réalise des essais avec un modèle réduit 1g de tunnelier à pression de terre. Cette étude est menée dans le cadre des lois de similitude qui permettent la transposition des résultats expérimentaux de laboratoire à des situations de chantier. La conception particulièrement sophistiquée du modèle réduit permet de simuler le procédé d'excavation tridimensionnel du tunnel en prenant en compte les paramètres affectant les pertes de volume dans le terrain, comme par exemple la pression frontale de soutènement exercée par la machine sur le front de taille du tunnel. Ainsi, une étude paramétrique peut être réalisée pour évaluer la réponse du sol et de la structure enterrée avoisinante aux variations de ce paramètre de pilotage.

Cet article présente le modèle réduit de tunnelier à pression de terre de l'ENTPE dans sa configuration actuelle destinée à l'analyse 3D de l'impact du creusement d'un tunnel sur des fondations profondes avoisinantes. Des résultats concernant l'interaction tunnelier – sol – pieu dans le cas d'un pieu simple situé en aplomb du tunnel sont ensuite présentés.

2. Le Dispositif expérimental

2.1. Le modèle réduit de tunnelier à pression de terre

Le modèle réduit du tunnelier à pression de terre de l'ENTPE est présenté figure 1. Ce modèle réduit, d'échelle géométrique comprise entre 1/4 et 1/20 si l'on se réfère aux diamètres des tunneliers réels, est composé d'une roue de coupe de diamètre 55cm (A), d'une chambre d'abattage de forme conique (B), d'une vis d'extraction (C) inclinée de 10°, d'une vis horizontale servant de convoyeur (D), d'une jupe cylindrique en acier (E) et de 4 vérins hydrauliques de poussée (F). L'ensemble du dispositif est installé sur un support équipé de galets et se déplaçant sur des rails (H). Un caisson en acier, rigide, contenant le massif de sol modèle est installé à l'avant du tunnelier (G). Les dimensions du massif de sol sont : longueur : 2.0 m, largeur : 2.7 m, hauteur : 2.15 m.

Au début de l'essai, le tunnelier poussé par les quatre vérins horizontaux entre dans le massif de sol. Ensuite, les principales étapes du creusement au tunnelier à pression de terre sont simulées. Le matériau abattu par la roue de coupe en rotation est confiné dans la chambre d'abattage. Il est ensuite extrait de manière continue au cours de l'avancement du tunnelier à l'aide de la vis inclinée d'extraction, puis conduit vers l'arrière du tunnelier à l'aide de la vis horizontale. Le soutènement radial immédiat du massif de sol excavé est assuré par la jupe cylindrique du tunnelier. Notons que la longueur maximale de creusement est de 1 mètre. Ce modèle réduit ne permet pas de simuler le creusement sous nappe d'eau dans sa configuration actuelle.

Une double instrumentation équipe ce dispositif. La première embarquée sur la machine est assez proche de celle rencontrée sur tunnelier réel. Elle assure la mesure en temps réel des pressions de terre en trois points de la chambre d'abattage (tête et reins), des couples résistants sur la roue de coupe et sur la vis d'extraction, de l'effort de poussée horizontale développé par les vérins, de la masse de matériau extrait de la chambre d'abattage. Un capteur de déplacement linéaire indique en temps réel la position et permet d'asservir la vitesse d'avancement du tunnelier. La seconde instrumentation est positionnée dans le terrain au cours du remplissage du caisson. Elle est constituée de capteurs de contrainte permettant la mesure en temps réel des contraintes horizontales frontales (σ_{xx}), horizontales radiales (σ_{yy}) et verticales (σ_{zz}) en différents points du massif (les indices x, y z sont relatifs aux directions $\hat{1}$ du repère donné Figure 1), de capteurs de déplacement (type LVDT) mesurant les déplacements verticaux en surface de massif, de

capteurs de déplacement interne (type LVDT modifié) permettant la mesure des déplacements horizontaux longitudinaux (u_x), horizontaux radiaux (u_y) et verticaux (u_z) à l'intérieur du massif. Enfin, un dispositif d'analyse par corrélation d'images (DIC) est utilisé pour suivre au cours du creusement le champ de déplacement tridimensionnel de la surface du massif.

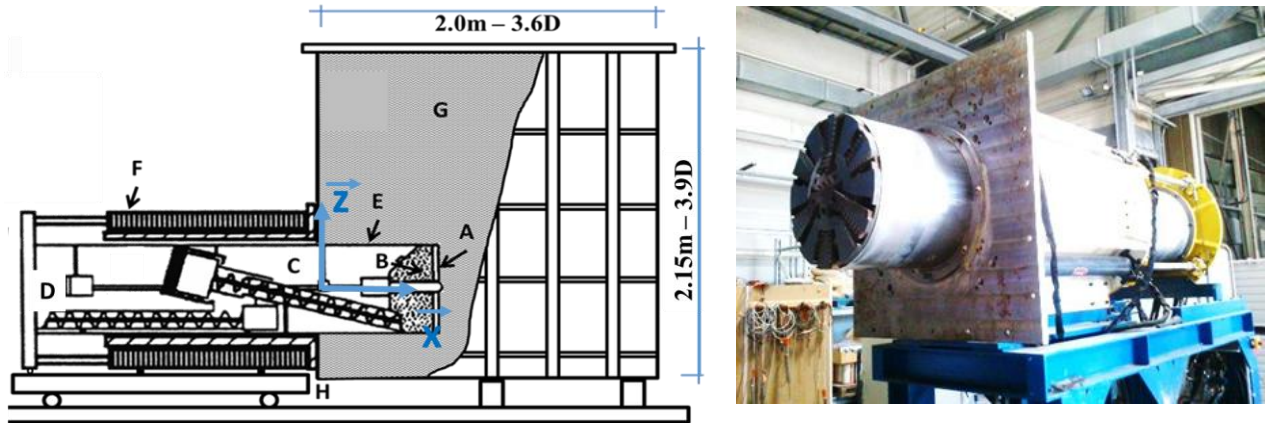


Figure 1. Modèle réduit « 1g » de tunnelier à pression de terre de l'ENTPE

2.2. Les modèles de fondations profondes

Pour modéliser les fondations profondes, 3 pieux (P1, P3 et P4) de différentes longueurs ont été usinés à partir de tubes d'aluminium (Fig. 2). Les dimensions (longueur L , diamètre extérieur D_p , épaisseur e_p ,) et caractéristiques mécaniques (module d'Young : E) des pieux modèles ont été choisies en considérant les lois de similitudes déduites de l'analyse dimensionnelle. Les expériences étant menées sous gravité ($g^*=1$), un facteur d'échelle des longueurs (L^*) égal à 1/11 a été considéré pour la fabrication de ces pieux modèles. A noter que ce facteur d'échelle se situe dans la gamme du facteur d'échelle des longueurs du tunnelier. Compte tenu de l'étude envisagée, une attention particulière a été portée à la validation des facteurs d'échelle relatifs à la rigidité des pieux (E^* , E^*I^* , E^*A^*). Les caractéristiques des pieux modèles et des pieux en vraies grandeurs correspondants sont données dans le Tableau 1.

Pour étudier les différentes sollicitations du pieu : effort axial (L^{*3}) et moments de flexion (L^{*4}), chaque pieu est instrumenté de 18 ponts de jauges répartis en six positions le long du pieu (Fig. 2) permettant la mesure de l'effort axial et des moments de flexion dans deux directions orthogonales. Au cours des essais de creusement, les pieux sont positionnés dans le terrain de telle façon à mesurer les moments de flexion longitudinal (M_y) et transversal (M_x) par rapport à l'axe du tunnel.

Les pieux sont positionnés dans le caisson au préalable du remplissage. La position des pieux et leur verticalité sont contrôlées à l'aide d'une visée laser. Après remplissage du caisson et avant creusement du tunnel, les pieux sont foncés dans le sol sur une longueur de 50mm ($1D_p$) afin de mobiliser le frottement latéral et l'effort de pointe. Des vérins pneumatiques montés sur un support métallique fixé au caisson (Fig 3) permettent de foncer les pieux à une vitesse de pénétration quasi-constante (de l'ordre de 2mm/mn). Une fois la position finale du pieu atteinte, la pression pneumatique est diminuée pour laisser uniquement la charge de service durant l'excavation du tunnel. Dans cette étude, la capacité portante maximale du pieu est définie comme étant le chargement responsable d'un tassement du pieu égal à 5% de son diamètre (O'Neil & Reese, 1999) et la charge de service correspond à 50% de cette capacité portante maximale.

Tableau 1: Caractéristiques géométriques et mécaniques des pieux modèles et correspondances en vraies grandeurs

Grandeurs physiques		Facteur d'échelle	Valeur sur modèle réduit	Valeurs correspondantes en vraies grandeurs ($L^* = 1/11$)
D_p	mm	L^*	50	550
e_p	mm	L^*	5	55
L	m	L^*	1.1 à 1.9	11 à 19,8
A	cm ²	L^{*2}	7.2	3,40E+03
I	cm ⁴	L^{*4}	18.1	2,70E+05
E	GPa	L^*	70	770
EI	GN.m ²	L^{*5}	1,3E-5	2,042
EA	GN	L^{*3}	0.049	263,4

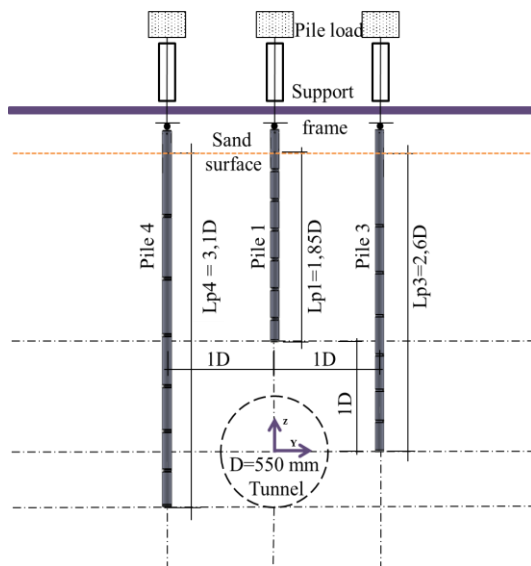


Figure 2. Positions des différents pieux modèles utilisés dans le cadre du projet NeTTUN (coupe transverse).



Figure 3. Dispositif de chargement des pieux et instrumentation de surface.

2.3. Le massif de sol modèle

Le choix du matériau sol modèle a été réalisé en tenant compte des conditions de similitude qui régissent la transposition au problème en vraies grandeurs (Garnier *et al*, 2007). Pour ces essais sous gravité, et compte tenu des mécanismes étudiés (mouvements de sol autour de la machine, capacité portante des pieux), nous nous sommes limités (similitude partielle) à la vérification des rapports d'échelle des modules de déformation ($E^*=L^*$) et des paramètres de résistance au cisaillement (cohésion : $c^*=L^*$, angle de frottement : $\varphi^*=1$) entre sol modèle (laboratoire) et sol réel (chantier).

Ainsi les massifs de sol modèles utilisés sont fabriqués à partir de sable Hostun fin (HN31) sec. Ce sable est caractérisé par des grains de densité 2.65, de diamètre moyen 0.35mm et d'une granulométrie étalée ($d_{60}/d_{10}=1.4$). Par ailleurs, en raison du faible état de contraintes régnant au sein du modèle réduit ($\sigma^*=L^*$), il a été décidé de confectionner des massifs de sol modèle dans un état lâche ($\gamma_d=13.5$ kN/m³, $e=0.96$, $I_D=6\%$) afin de tendre vers une similitude du comportement volumétrique du sol (Berthoz, 2012). Pour cela, le caisson métallique est rempli à l'aide d'une vis sans fin et d'un tuyau en caoutchouc permettant de déposer le sable avec un débit moyen (90 kg/min) et une hauteur de chute constante (300 mm) et ainsi garantir une densité de sable uniforme.

3. Résultats pour un pieu simple situé en aplomb du tunnel

3.1. Les conditions de pilotage du TBM

Dans cette section, nous présentons des résultats concernant l'interaction tunnel – sol – pieu dans le cas d'un pieu simple (P1) positionné à l'aplomb et dans l'axe du tunnel (Fig 2). Les résultats présentés ont été obtenus dans le cadre d'essais de creusement menés en régime stationnaire ; c'est-à-dire pour lesquels la quantité de matériau contenu dans la chambre d'abattage du tunnelier reste quasi inchangée tout au long du creusement. Pour assurer ces conditions stationnaires, il convient de maintenir un niveau stable des pressions de terre dans la chambre d'abattage pendant l'excavation. Pour cela, la vitesse d'avancement du TBM est maintenue constante (3mm/mn) et le débit d'extraction du matériau de la chambre d'abattage est ajusté en temps réel.

Les essais présentés dans cet article ont été réalisés à différentes pressions frontales : haute, intermédiaire et basse (Tableau 2). De plus, un essai en terrain vierge, sans présence de pieu, a été réalisé pour servir d'essai de référence à pression frontale intermédiaire.

La figure 4 donne l'évolution de l'effort de poussée total du tunnelier pour les différents essais de creusement en fonction de la distance relative entre le front de taille et le pieu (X_{PT}). La pression frontale exercée par la machine sur le massif peut être déduite de la valeur initiale de cet effort de poussée total. Dans le même temps, l'accroissement linéaire de cet effort avec le déplacement du TBM caractérise l'augmentation de l'effort de frottement du sol le long de la jupe coulissante.

A noter que la valeur de pression frontale intermédiaire (36 à 38kPa) a été définie sur la base d'essais antérieurs réalisés avec ce dispositif en massifs de sable sec (Berthoz, 2012). Elle correspond à un niveau de pression frontale qui permet de limiter les déplacements du sol autour de la machine et donc de minimiser les déformations du massif purement frottant. A titre indicatif, la contrainte horizontale des terres au repos mesurée dans l'axe du tunnelier est égale à 12 KPa.

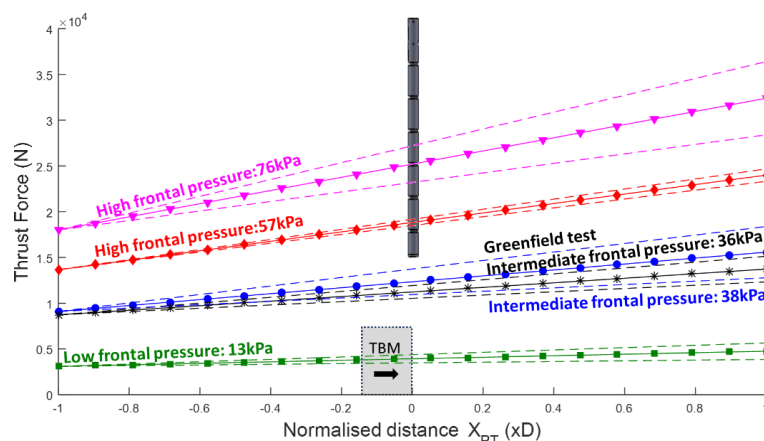


Figure 4. Evolution de l'effort de poussée total du tunnelier au cours du creusement en fonction de la position relative entre le front de taille et le pieu

Tableau 2: Caractéristiques des essais

Essai	Poids volumique du sol (kN/m ³)	K0	Pression frontale (kPa)	Charge de service sur pieu (daN)
TV2I (Test de référence)	13.3	0.3 – 0.57	36	Sans pieu
TP1I (Pression intermédiaire)	13.5	0.2 - 0.6	38	32
TP2L (Pression basse)	13.4	0.23 – 0.43	13	32
TP3H (Pression haute)	13.5	0.2 - 0.2	57	32
TP4H (Pression haute)	13.3	0.21 – 0.62	76	32

3.2. Tassements de surface

La figure 5 présente les profils transversaux de la cuvette de tassement observée en surface de massif à la verticale du front de taille lors des différents essais. Dans le cas des essais avec pieu, cette représentation correspond aussi au passage du front de taille à la verticale du pieu ($X_{PT}=0$). Ces profils transverses sont en accord avec la formulation Gaussienne proposée par Peck (1969) et utilisée dans la pratique (courbes en pointillés).

La perte de volume (V_L) associée à chacune des cuvettes de tassement est prise égale à l'aire située sous la gaussienne. Les essais sur modèle réduit montrent que ces pertes de volume (ramenées à la section du tunnel) sont du même ordre de grandeur que celles mesurées sur chantier. Dans le cas de l'essai à pression intermédiaire, ces pertes de volume sont de 0.9% à la verticale du front de taille et de 2.5% à 0.7D derrière le front de taille. Ainsi, il apparaît que la légère surcoupe (0.4%) et les frottements le long de la jupe du tunnelier favorisent la convergence du terrain à l'arrière du front de taille.

Les essais sur modèle réduit montrent également que l'amplitude des tassements et les pertes de volume (V_L) sont très sensibles au niveau de pression frontale appliquée par le TBM sur le massif. Au-delà, il est intéressant de noter que pour un même niveau de pression frontale, la présence du pieu à l'aplomb du tunnel tend à accroître la valeur de tassement maximal du sol alors que le volume de la cuvette de tassement reste quasi-inchangé ($V_L = 1\%$ avec pieu et $V_L=0.8\%$ sans pieu). Il semble donc que la charge transmise par le pieu au terrain modifie le profil de la cuvette de tassement.

3.3. Tassement du pieu

La figure 6 donne pour les différents essais, l'évolution des tassements du pieu et de la surface du sol situé à proximité du pieu au cours de la progression du tunnelier dans le terrain. Le profil longitudinal de tassement de la surface du sol en terrain vierge est également représenté sur cette figure. Il apparaît fort logiquement que les amplitudes de tassement du pieu et du sol sont directement liées à la pression frontale appliquée par le tunnelier sur le massif.

Notons par ailleurs que le tassement du pieu situé à l'aplomb du tunnel est toujours plus important que celui du sol situé à proximité, ceci quelle que soit la pression frontale appliquée par le tunnelier. Cette tendance augmente à l'arrière du front de taille en présence de convergence du terrain au passage de la jupe du TBM. L'ensemble de ces résultats sont en bon accord avec ceux de modèles expérimentaux 2D (Jacobsz *et al.*, 2004, Lee et Bassett, 2006).

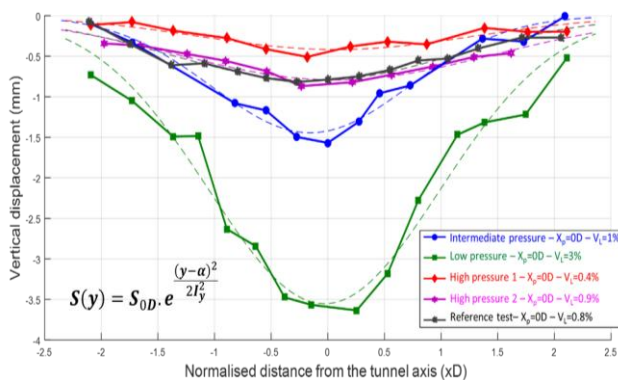


Figure 5. Profils transverses des cuvettes de tassement observés à la verticale du front de taille

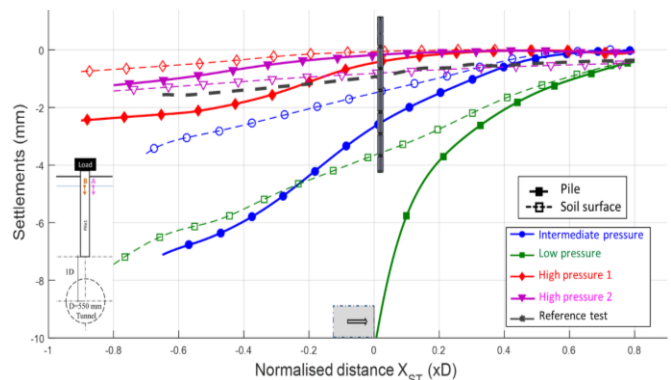


Figure 6. Profils longitudinaux de tassement du pieu et du sol en fonction de la distance au front de taille (X_{ST})

3.4. Moments de flexion dans le pieu

3.4.1. Moment de flexion transversal

La figure 7 donne l'évolution du moment de flexion transversal dans le pieu pour différentes distances au front de taille et différentes pressions frontales. Les essais sur modèle réduit montrent que le creusement au tunnelier est en mesure d'engendrer un moment transversal dans le pieu axial malgré la symétrie géométrique. Bien visible à forte pression frontale, ce moment de flexion transversal augmente lorsque le tunnelier approche du pieu. Il est maximum lorsque le pieu est à $0.45D$ devant la machine puis tend à décroître avec l'avancement du TBM. Lorsque l'on inverse le sens de rotation de la roue de coupe, il est intéressant de remarquer que le sens du moment de flexion est lui aussi inversé (essai TP_{4H}). Ce résultat montre que le moment de flexion transversale du pieu axial est influencé par le mouvement de rotation de la roue de coupe.

3.4.2. Moment de flexion longitudinal

La figure 8 présente l'évolution du moment longitudinal en fonction de la position du tunnelier pour les différents essais réalisés. Pour le pieu axial, les moments de flexion longitudinaux mesurés sont un à deux fois supérieurs aux moments transversaux. Ces moments de flexion longitudinaux évoluent en fonction de la position du tunnelier. A l'avant du front de taille, le moment de flexion longitudinal est fortement dépendant du niveau de pression frontale. A l'arrière du tunnelier ($X_{PT} = -0.6D$), il devient indépendant de la pression frontale et semble uniquement influencé par les effets dus aux contraintes de cisaillement le long de la jupe. Ces résultats montrent que le pieu axial est poussé vers l'avant à l'arrivée du tunnelier et que ce mouvement vers l'avant est d'autant plus fort que la pression frontale est élevée. Le profil de répartition du moment de flexion longitudinal le long du pieu tend à montrer que la pointe du pieu se comporte comme une extrémité libre, probablement en raison du faible confinement du sol autour de cette pointe.

4. Conclusion

Les premiers résultats obtenus avec le modèle réduit de tunnelier à pression de terre de l'ENTPE montrent la capacité de ce dispositif à simuler fidèlement le processus d'excavation tridimensionnel au tunnelier à front pressurisé et confirment sa pertinence pour l'étude de l'interaction TBM – sol - pieu. Les premiers résultats obtenus sont en bon accord avec ceux obtenus en déformations planes et disponibles dans la littérature. En particulier pour le pieu axial situé à l'aplomb du tunnel, il est retrouvé que ce pieu tend à tasser davantage que le sol avoisinant.

Au-delà, les essais menés avec le modèle 3D de tunnelier montrent des effets non négligeables (tassement et flexion) des structures dus aux mouvements de sol et aux variations de contraintes dans la direction de progression du tunnelier (direction longitudinale). Ils montrent un rôle prépondérant de la pression de soutènement frontal sur la redistribution des efforts dans le pieu. Enfin, ils ont montré que le mouvement de rotation de la roue de coupe est en mesure de générer un moment de flexion transversal dans un pieu axial situé en aplomb du tunnel malgré la symétrie géométrique du problème.

Le projet NeTTUN est financé par la Commission Européenne dans le cadre du "Seventh Framework Program for Research, Technological Development and Demonstration" au titre de la convention 280712

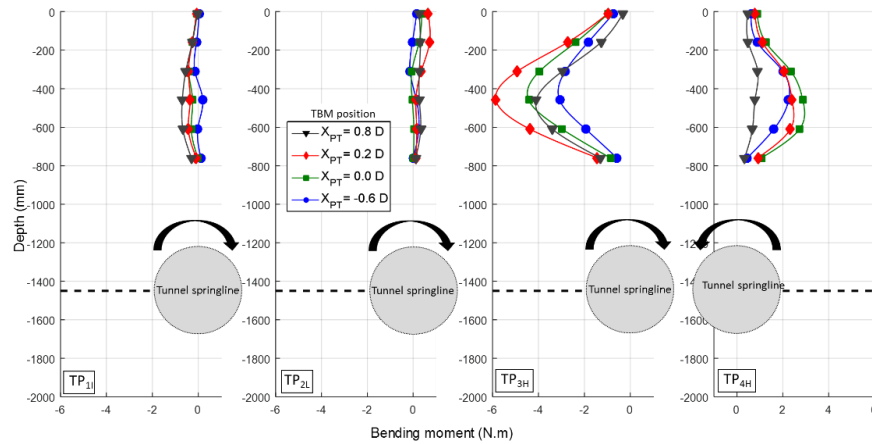


Figure 7. Moment de flexion transversal mesuré dans le pieu axial à différentes distances du tunnelier et pour différentes pressions de soutènement frontal

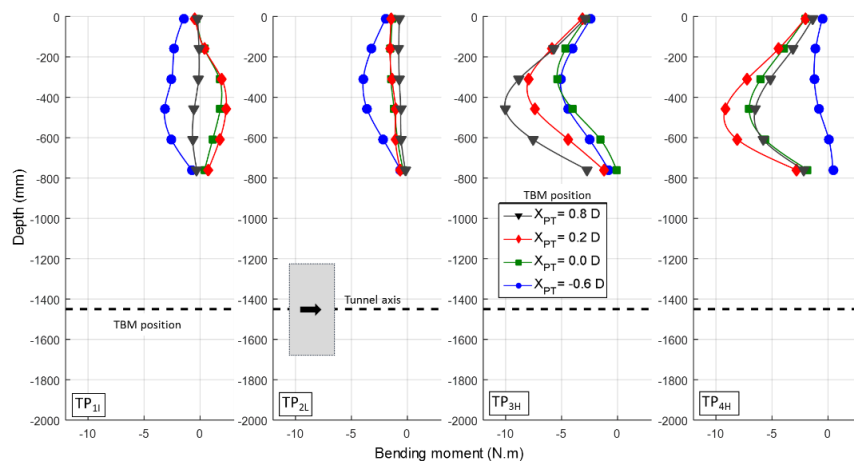


Figure 8. Moment de flexion longitudinal mesuré dans le pieu axial à différentes distances du tunnelier et pour différentes pressions de soutènement frontal

5. Références

- Berthoz, N., 2012. Modélisation physique et théorique du creusement pressurisé des tunnels en terrains meubles homogènes et stratifiés, *Thèse de doctorat de l'ENTPE*.
- Garnier, J., et al., 2007. Catalogue of scaling laws and similitude questions in geotechnical centrifuge modelling. *IJPMG-International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 3: 1-23.
- Jacobsz, S. et al., 2004. Centrifuge modelling of tunnelling near driven piles. *Soils and foundations*, Volume 44, pp. 49-56.
- Lee, Y. & Bassett, R., 2006. Influence zones for 2D pile-soil-tunnelling interaction based on model test and numerical analysis. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 22, pp. 325-342.
- Loganathan, N., Poulos, H. & Stewart, D., 2000. Centrifuge model testing of tunnelling-induced ground and pile deformations. *Géotechnique*, Volume 50, pp. 283-294.
- Marshall, A. & Mair, R., 2011. Tunneling beneath driven or jacked end-bearing piles in sand. *Revue canadienne de géotechnique*, Volume 48, pp. 1757-1771.
- O'Neil, M. W. & Reese, L. C., 1999. *Drilled shafts: Construction procedures and design methods*.
- Peck, R., 1969. Deep excavations and tunneling in soft ground. *7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Volume 7, pp. 225-290.