

MODÉLISER UNE CUVETTE DE TASSEMENT AU TUNNELIER RÉALISTE A L'AIDE D'UNE LOI DE COMPORTEMENT ADAPTÉE

MODELLING OF A REALISTIC SETTLEMENT TROUGH DUE TO MECHANIZED TUNNELING THANKS TO AN ADAPTED CONSTITUTIVE LAW

Nicolas GILLERON¹, Emmanuel BOURGEOIS²

¹ EGIS, Saint-Quentin-en-Yvelines, France

² IFSTTAR, Marne-la-Vallée, France

RÉSUMÉ – Une nouvelle loi de comportement de sol, élastique non linéaire avec isotropie transverse, a été récemment développée. Elle est utilisée ici pour la première fois pour la modélisation du creusement au tunnelier dans les sols de la région parisienne. Elle permet de reproduire dans un modèle numérique la cuvette de tassement mesurée, en particulier sa largeur.

ABSTRACT – A new constitutive model, with a non-linear elasticity and a transverse anisotropy, has been recently developed. It is here used the first time for an application to the prediction of settlements due to tunneling by TBM in the Parisian region. It makes it possible to reproduce in numerical simulations the measured settlement trough with a good accuracy, including its width.

1. Introduction

La prévision des tassements provoqués par le creusement de tunnels en milieu urbain est un enjeu majeur, de l'avant-projet au suivi des travaux. Les calculs par éléments finis bidimensionnels sont couramment utilisés pour modéliser le creusement au tunnelier (Wedekin et al., 2012). Ils permettent de modéliser le processus de creusement, le comportement mécanique du terrain et des avoisinants (bâtis, réseaux et/ou infrastructure). L'analyse des risques du creusement permet de définir une valeur appropriée de la pression de confinement.

Néanmoins, ce type de calculs conduit généralement à des largeurs de cuvettes de tassement supérieures à celles mesurées, en particulier dans des sols sableux à marneux. Dès lors, on s'expose à une sous-estimation du risque sur les avoisinants. Ce résultat, connu de la profession, a déjà fait l'objet de nombreuses publications qui se concentrent principalement sur la modélisation du processus de creusement, 2D ou 3D, contraction ou convergence-confinement, sans aboutir à un véritable consensus. On propose ici une piste originale, en travaillant sur la formulation de la loi de comportement du terrain, pour reproduire la largeur des cuvettes de tassement observée. Cette loi de comportement est mise en œuvre dans le cadre d'une analyse en retour du creusement d'un tunnel de tramway au sud de la région parisienne pour lequel des mesures sont disponibles. La bonne utilisation de la loi de comportement permet d'aboutir à une très bonne concordance entre la modélisation et la mesure.

L'ensemble des calculs présentés ont été réalisés par le logiciel éléments-finis spécialiste de la géotechnique CESAR-LCPC2D v6.

2. Projet support et problématique

2.1. Tramway T6 à Vélizy

Le tramway T6 a été mis en service dans sa totalité le 11 juin 2016 permettant le transport de voyageurs entre les stations Chatillon-Montrouge et Viroflay Rive Droite dans le sud-ouest de Paris. La ligne transporte environ 80 000 personnes par jour. Le tracé intègre un linéaire souterrain creusé au tunnelier de 1500 m sous la ville de Viroflay jusqu'à la gare terminus. Ce linéaire a été réalisé entre mars 2013 et janvier 2014. Le diamètre extérieur du tunnelier est de 9,17 m pour un diamètre intérieur de 8,0 m.

Sur le linéaire en ville, les bâtis en surface ont été largement instrumentés (Figure 1). Pour cette étude on a retenu une coupe pour laquelle les tassements ont été significatifs (tassement maximal de 9,4 mm). On trouvera plus d'informations sur le projet et l'instrumentation dans la publication de (Mariano et al. 2014) présentée au WTC2014.

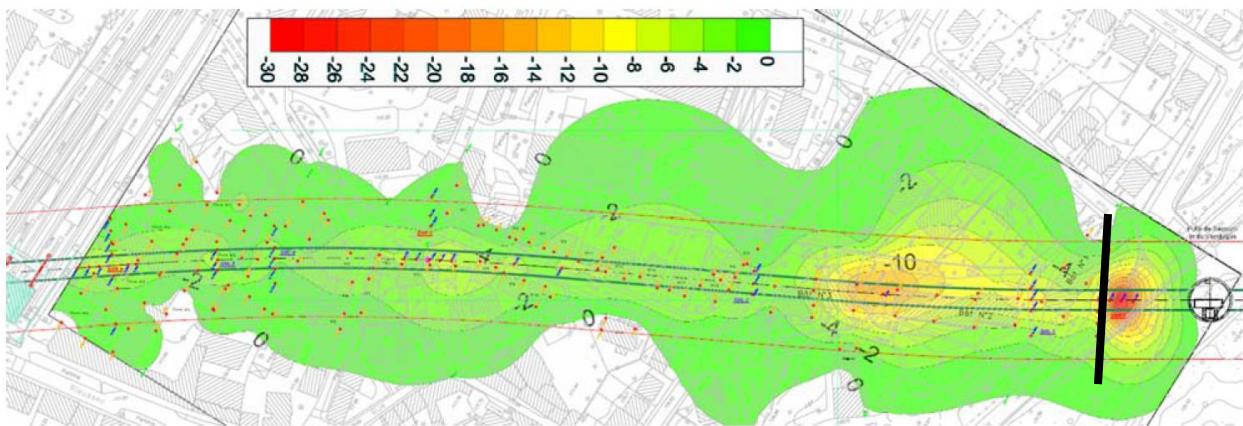


Figure 1. Auscultation sur le tronçon entre le puits de secours et la gare de Vélizy Rive Gauche.
En noir la coupe étudiée dans l'article. Figure extraite de (Mariano et al., 2014).

La géologie retenue au droit de la coupe étudiée est décrite dans le Tableau 1 avec les caractéristiques mécaniques principales. Le niveau de la nappe phréatique est à 10,55 m par rapport au TN à mi-hauteur des sables de Fontainebleau. L'axe du tunnel est à 27,5 m soit une couverture de 22,8 m, supérieure à deux diamètres.

Tableau 1 Géologie au droit de la coupe retenue

Formation		épaisseur (m)	E (MPa)	G (MPa)	v -	c' (kPa)	φ' (deg)
Colluvions	COLL	3,6	50	20	0,3		
Sables de Fontainebleau	SF	13,9	120	45	0,3	5	35
Marnes à huitres	MH	6	80	30	0,3	50	35
Glaises vertes	GV	3,5	60	23	0,3	15	30
Marnes supragypseuses	MSG	12	70	27	0,3	10	34
Calcaires de Saint-Ouen	SO	4,4	90	35	0,3	20	30
Sables de Beauchamp	SB	1,8	60	23	0,3	10	25
Marnes et caillasses	MC	14,8	190	74	0,3	25	34

2.2. Problématique

L'analyse de (Mariano et al., 2014) a été réalisée à l'aide de la loi Hardening Soil Model en utilisant la méthode contraction du logiciel Plaxis (Figure 2). Le calage du taux de contraction permet de retrouver le tassement maximal mesuré, la pente ne peut être retrouvée qu'en augmentant significativement le taux de contraction.

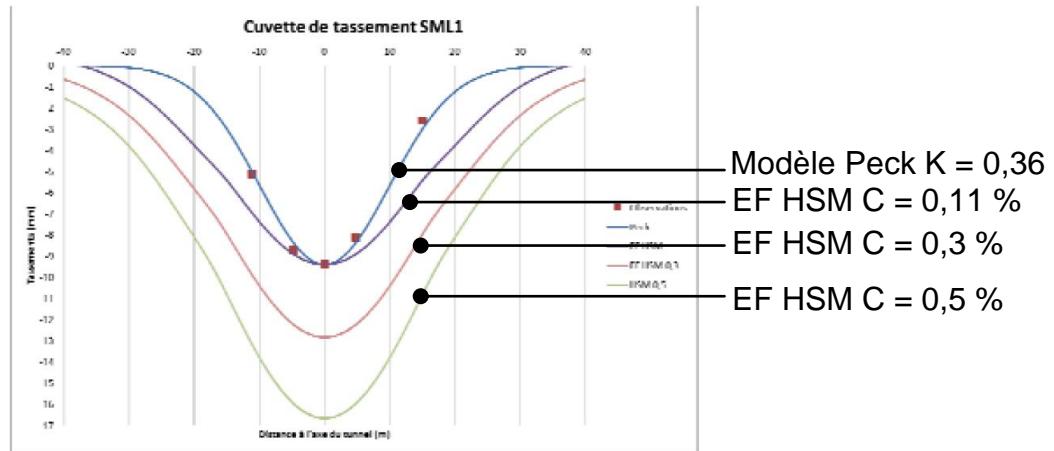


Figure 2. Cuvettes de tassements mesurées avec calage de Peck et calculées par méthode numérique (modèle HSM et contraction) - extrait (Mariano et al., 2015)

On retrouve ici un résultat classique en modélisation numérique de tunnels souligné dans la recommandation française (AFTES GT16R2F1, 2018) et dans le rapport (ITA/AITES, 2007) exprimé initialement dans (AFTES GT16R1F1, 1996) :

« [...] La technique des éléments finis en modèles bidimensionnels tend à répartir les déformations sur un ensemble d'éléments trop grands, et il peut s'en suivre une diffusion trop large des déformations conduisant à une surestimation de la largeur de la cuvette de tassement [...] »

On se propose de réaliser sur cet exemple une prévision de classe C au sens de (Lambe, 1973) à l'aide de la loi de comportement ANL décrite dans (Gilleron, 2016a) avec l'objectif de reproduire la cuvette de tassement dans sa profondeur et sa largeur.

3. Modèle numérique

3.1. Modèle du creusement au tunnelier

Le modèle numérique est en déformations planes. La méthode retenue pour la modélisation du confinement apportée par le tunnelier est celle du taux de déconfinement global, ou « méthode implicite », décrite notamment dans (Aristaghes et Autuori, 2001). La pression de confinement au front et en jupe est assimilée à une réduction du taux de déconfinement.

Nous avons retenu cette méthode parce que nous n'avons pas d'informations détaillées sur la pression de confinement effective lors du creusement. Cela dit, l'application d'une pression directe sans réduction du taux de déconfinement (appelée « méthode explicite » par (Aristaghes et Autuori, 2001)) ne donne pas de meilleurs résultats pour le profil de tassement calculé, en particulier sa largeur.

Le maillage et la géologie sont présentés en Figure 3. Le revêtement constitué de voussoirs en béton armé est modélisé par des éléments poutres.

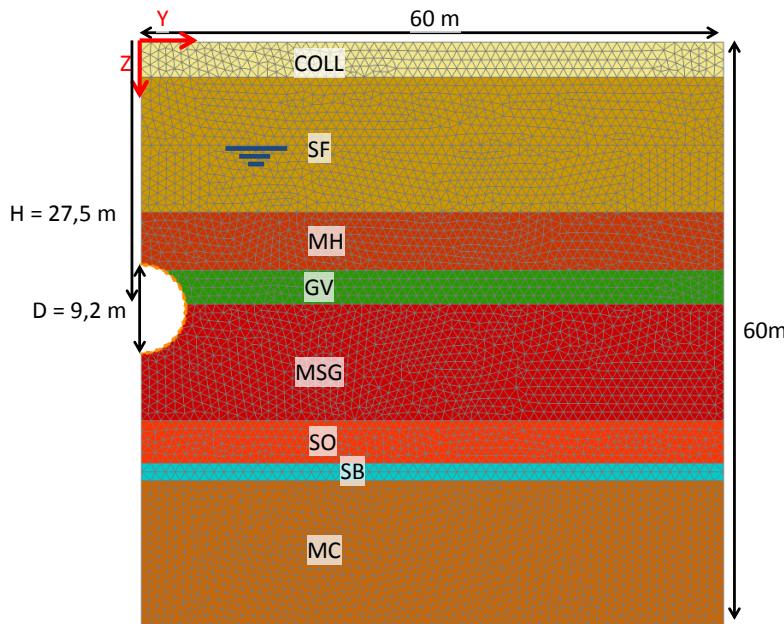


Figure 3. Maillage et modèle numérique CESAR 2D

Le creusement au tunnelier est donc modélisé en trois phases successives :

- Phase 1 : Initialisation des contraintes : on retient pour le calcul des contraintes initiales la formule de (Jàky, 1948) : $K_0 = 1 - \sin \varphi$
- Phase 2 : Excavation avec prise en compte de la pression de confinement par la méthode implicite, avec un taux de déconfinement dans la fourchette 35 % – 65 %
- Phase 3 : Mise en œuvre des voussoirs et rétablissement de l'équilibre mécanique et hydraulique : on applique le chargement restant et la pression hydraulique sur les voussoirs.

3.2. Loi de comportement ANL

La loi ANL a été développée dans le contexte de la prévision des tassements creusés par les tunnels en site urbain en méthode conventionnelle. Rien n'empêche cependant de l'utiliser dans le cas du creusement au tunnelier. Il s'agit d'une loi élastoplastique avec une partie élastique non linéaire et isotropie transverse, avec décharge-rechargement élastique, les déformations plastiques étant décrites par un modèle de plasticité parfaite. La loi est complètement modulaire, c'est-à-dire que l'utilisateur a le choix d'activer ou non les différents éléments (ou modules) du modèle. De plus, les paramètres des différents modules sont indépendants.

La non linéarité de la loi élastique comporte deux aspects : les modules élastiques en petites déformations dépendent de la contrainte de confinement, d'une part, et de la contrainte déviatorique, d'autre part. La formulation repose sur le module de cisaillement (et non le module de Young).

Pour la dépendance du module en fonction du confinement, on adopte la formulation suivante :

$$G_0 = G_{ref} + A \left(\frac{p'}{p_{ref}} \right)^m \quad (1)$$

Contrairement au HSM, le module dépend de la contrainte moyenne et non la contrainte mineure. On trouvera une justification dans (Gilleron, 2016b).

Pour la dépendance du module en fonction de la contrainte déviatorique, on retient :

$$G_i = \text{Max}(G_{min}; G_0 \zeta^{1-q/\beta_i p'_i}) \quad (2)$$

où l'indice t indique qu'il s'agit d'un module tangent. L'impact de cette variation sur les profils de tassements est détaillé dans (Gilleron et al., 2016) ; elle n'a pas d'impact significatif sur la largeur de la cuvette de tassement.

Pour modéliser le décharge/recharge élastique, on considère que, si la contrainte déviatorique est inférieure à sa plus grande valeur atteinte q^e , alors la raideur élastique est majorée :

$$\text{Si } q < q^e \text{ alors } G_t = G_{ur} \text{ et } \nu_t = \nu_{ur} \quad (3)$$

L'isotropie transverse est exprimée par deux paramètres n et m/m_{iso} . Le premier caractérise le rapport des raideurs élastiques horizontale et verticale, le second le module de cisaillement transverse. C'est ce dernier qui a une influence importante sur le profil de tassement en surface (Gilleron, 2016a). On définit le module d'Young horizontal par :

$$E_{h,t} = G_t(1+2\nu_t) \quad (4)$$

Et on définit les autres modules dans le cadre de l'isotropie transverse par :

$$n = E_{h,t}/E_{v,t} \quad (5)$$

$$G_{v_{h,t}} = \frac{m}{m_{iso}} \frac{E_{v,t}}{2(1+\nu_t)} \quad (6)$$

Pour la partie plastique du modèle, on utilise le critère de Mohr-Coulomb, avec éventuellement une loi d'écoulement non associée :

$$(\sigma'_1 - \sigma'_3) - (\sigma'_1 + \sigma'_3)\sin\varphi - 2c\cos\varphi < 0 \quad (7)$$

4. Résultats

4.1. Calcul élastoplastique parfait

Ce calcul de référence permet de retenir le taux de déconfinement de 60 % lors de la phase 2 pour reproduire l'ordre de grandeur des tassements. Le profil de la cuvette de tassement à la fin des phases 2 et 3 est présenté en Figure 4a. L'ordre de grandeur des tassements est comparable avec les mesures, la largeur de la cuvette est surestimée, les tassements différentiels sous-estimés. On note un soulèvement lors de la phase de mise en place des voussoirs et l'application de la pression hydrostatique dont la résultante est vers le haut.

4.2. Calcul avec module de décharge/recharge

Pour traiter le soulèvement, la loi ANL permet d'introduire un module de décharge/recharge lorsque il y a une réduction de la contrainte déviatorique. Dans les simulations en déformation plane, deux zones sont concernées, au-dessus et en dessous du tunnel (Gilleron, 2017). Dans les modélisations tridimensionnelles, seule la zone sous le tunnel est concernée. On retient donc l'utilisation du module de décharge/recharge sous le tunnel, avec un rapport G_{ur}/G de 4,5 pour les couches MSG, SO, SB et MC. Le tassement calculé est présenté en Figure 4b.

L'impact sur le tassement calculé avant mise en œuvre des voussoirs est négligeable. En revanche, la prise en compte d'un module de décharge/recharge permet de limiter l'effet de soulèvement. On retient donc ce mécanisme dans les calculs suivants. D'autre part, la largeur de la cuvette de tassement reste surestimée.

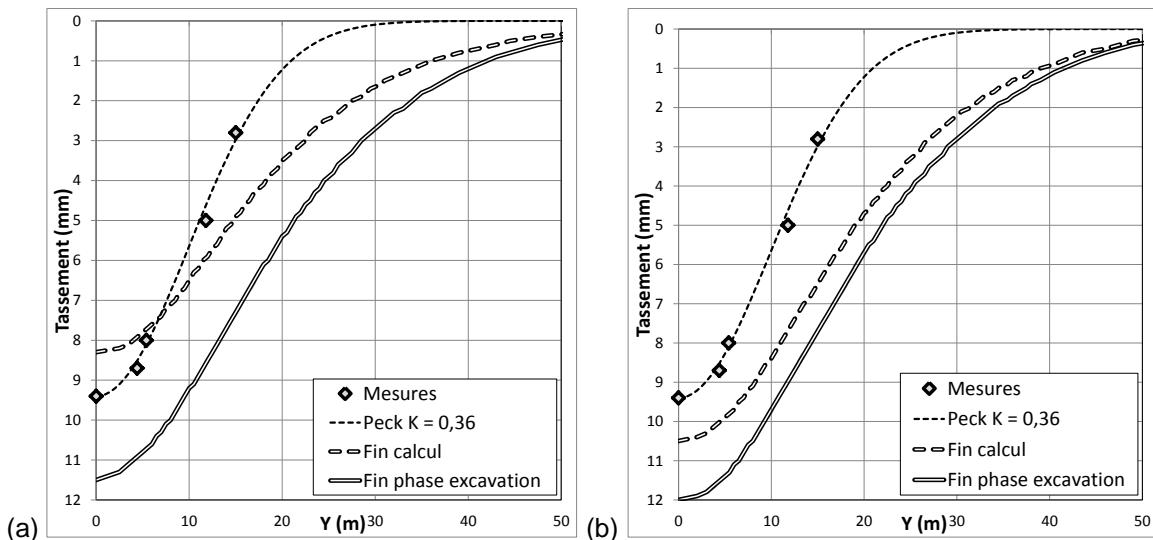


Figure 4. Tassements calculés (a) modèle élastoplastique parfait (b) avec module de décharge/recharge

4.3. Elasticité non-linéaire

On ne dispose pas d'informations sur la décroissance des raideurs avec la contrainte déviatorique. On propose ici d'intégrer uniquement la variation de module avec la contrainte moyenne dans les sables de Fontainebleau et les Marnes Supra Gypseuses. On présente en figure 5 les isovaleurs de module de Young. On note qu'en raison des faibles variations de la contrainte moyenne, la distribution de module de Young est peu affectée par l'excavation, à l'exception du déchargement sous le tunnel. L'impact sur les tassements calculés est négligeable.

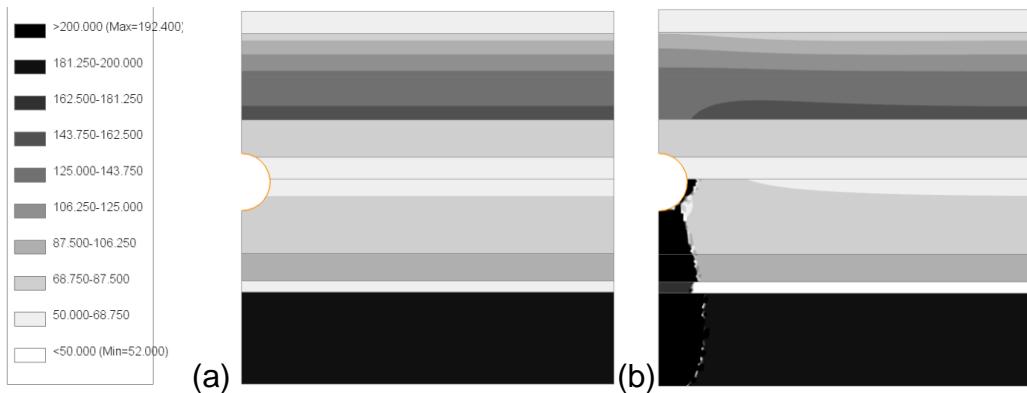


Figure 5. Isovaleurs des modules de Young (a) à l'état initial (b) à l'état final

4.4. Isotropie transverse

On introduit l'isotropie transverse uniquement par la réduction du module de cisaillement entre les plans verticaux et horizontaux via le paramètre m/m_{iso} . (Gilleron et al., 2016) ont montré après (Lee et Rowe, 1989) que les déformations de cisaillement sont particulièrement élevées au-dessus du tunnel. Ce module a par suite une influence particulière sur le tassement final et la largeur de la cuvette de tassement.

Dans la modélisation, on a retenu une dégradation à 30% de sa valeur isotrope du module de cisaillement pour la couche MH, à 40% de sa valeur initiale pour la première moitié du SF et à 50% de sa valeur initiale pour la seconde moitié du SF.

Il s'en suit une augmentation du tassement maximal d'environ 60% et une réduction de la largeur de la cuvette de tassement (Figure 6a).

Pour retrouver la valeur du tassement maximal, on a deux solutions : augmenter les modules de cisaillement des couches dont le module de cisaillement transverse a été dégradé ou réduire le taux de déconfinement. On a choisi ici de réduire le taux de déconfinement, la valeur de référence adoptée jusqu'ici semblant un peu forte compte tenu du confinement apporté par le tunnelier associé à proximité des voussoirs. Avec un taux de déconfinement de 0,425, la courbe calculée est en adéquation remarquable avec les mesures (Figure 6b).

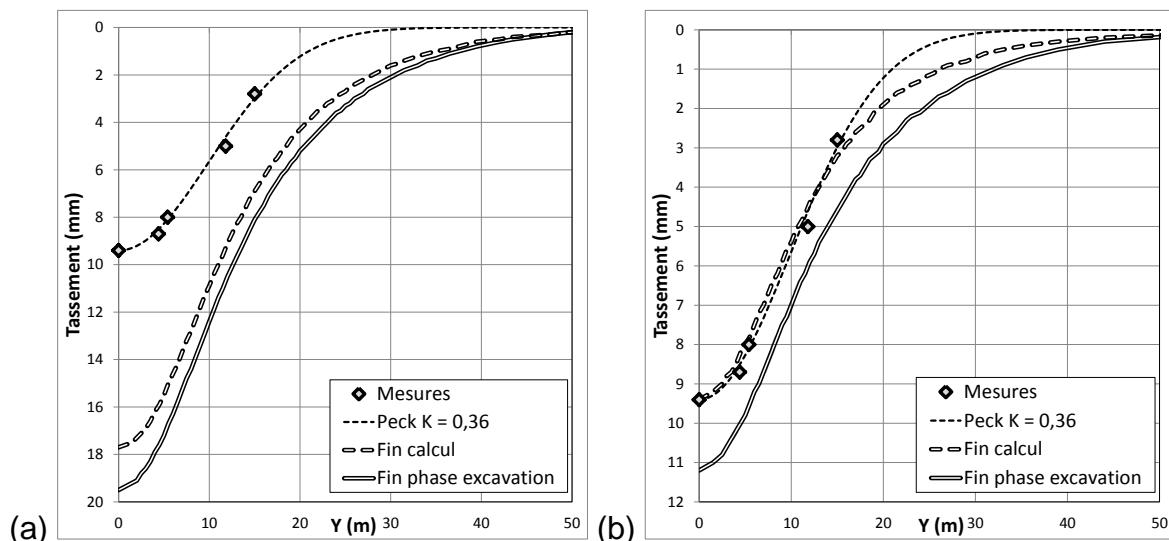


Figure 6. Tassements calculés en fonction du taux de déconfinement (a) $\lambda = 0,6$ (b) $\lambda = 0,425$

On présente en Figure 7 le déplacement total et la déformée à l'issue du calcul avec le taux de déconfinement de 0,425. On note que l'ovalisation du tunnel est vraisemblable avec un déplacement maximal de 21 mm en clé et de 9 mm en radier. Les convergences maximales sont inférieures à la surcoupe dûe à la conicité de la jupe.

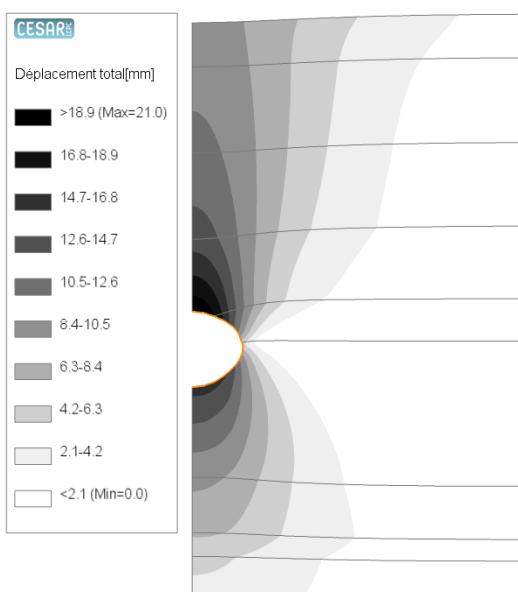


Figure 7. Déformée et isovaleurs du déplacement total dans le massif

5. Conclusions

L'utilisation d'une loi de comportement originale pour la modélisation d'un projet de tunnel au tunnelier a permis de reproduire la cuvette de tassement mesurée lors du creusement. La loi de comportement permet de mettre en œuvre une dégradation spécifique du module de cisaillement transverse qui a pour conséquence de diminuer la largeur de la cuvette de tassement.

La mise en œuvre de ce type d'analyse, selon le cadre présenté ici, sur les creusements récents en région parisienne, L14 nord et L12 nord du métro parisien, et sur les nombreux creusements à venir, L15 sud du projet Grand Paris Express et L14 sud dans un premier temps, devrait permettre de consolider la méthode et le choix des paramètres, en particulier le taux de déconfinement et le paramètre de dégradation du module de cisaillement.

Une fois ce retour d'expérience effectué, la fiabilité des estimations de tassements par méthode numérique sera améliorée pour le bénéfice de la profession.

6. Références bibliographiques

- Aristaghes P., Autuori P. (2001). Calcul des tunnels au tunnelier. Revue Française de Géotechnique, vol. 97, n° 2, pp. 31-40
- Gilleron N. (2016a). Méthode de prévision des tassements provoqués par le creusement des tunnels urbains et influence des présoutènements. Thèse de doctorat Université Paris Est.
- Gilleron N. (2016b). Use of the Hardening Soil Model for urban tunnels design. Proceedings of the 25th European young geotechnical engineers conference, Sibiu, pp. 139-146
- Gilleron N, Bourgeois E., Saïtta A. (2016). Influence of deviatoric stress dependent stiffness on settlement trough width in 2D and 3D finite element modelling of tunnelling. Proceedings of the 17th Nordic Geotechnical Meeting, Reykjavik, pp. 567-576
- Gilleron N., Bourgeois E., Saïtta A. (2017). Limites de la modélisation bidimensionnelle des tunnels urbains pour la prévision des tassements. Revue Française de Géotechnique, vol. 150, n° 2, pp.
- Jaky J. (1948). Pressure in silos. 2e international conference on soil mechanics, pp.103-107.
- Lambe T. (1973). Predictions in soil engineering. Géotechnique, vol. 23, n°2, pp. 149-202.
- Lee K., Rowe R. (1989). Deformations caused by surface loading and tunnelling : the role of elastic anisotropy. Géotechnique, vol. 39, n°1, pp. 125-140
- Wedekin V., Kastner R., Guilloux A., Bezuijen A., Standing J., & Negro Jr A. (2012). Urban tunnels in soft ground : Review of current design practice. IS Rome : Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground.
- AFTES GT16R1F1 (1996) GT16R1F1 Tassements liés au creusement des ouvrages en souterrain
- AFTES GT16R2F1 (2018) Recommandations relatives à la prise en compte des constructions avoisinantes dans la conception et la réalisation des ouvrages souterrains. TES (à paraître)
- ITA/AITES (2007). Settlements induced by tunneling in soft ground. Tunnelling and underground space technology, vol. 22, pp.119-149