

TASSEMENTS DERRIERE UN ECRAN DE SOUTÈNEMENT : COMPARAISON ENTRE MESURES ET MODELES

SETTLEMENTS BEHIND A RETAINING WALL: COMPARISONS BETWEEN MEASUREMENTS AND MODELS

Tomasz DAKTERA^{1,2}, Emmanuel BOURGEOIS², Pierre SCHMITT¹,
Thierry JEANMAIRE¹, Nicolas UTTER¹, Philippe GOTTELAND³

¹ *Soletanche Bachy, Rueil Malmaison, France*

² *COSYS-LISIS, Univ Gustave Eiffel, IFSTTAR, F-77454 Marne-la-Vallée, France*

³ *Fédération Nationale des Travaux Publics, Paris, France*

RÉSUMÉ – Les soutènements des futures stations de métro du Grand Paris Express sont des parois moulées avec des hauteurs de terrassement allant jusqu'à 30 m. Lors de la construction de la gare de Créteil L'Echat, les déplacements horizontaux des parois et les tassements derrière la paroi ont été mesurés. On présente les résultats et on les compare aux modèles prédictifs.

ABSTRACT – The stations of the Grand Paris Express project are enclosed with diaphragm walls with excavation depths up to 30 m. During the construction of the Créteil L'Echat station, horizontal displacements of the walls as well as settlements behind the wall have been monitored. This communication presents the results and compares them with predictive models.

1. Introduction

Les soutènements des gares de la Ligne 15 du Grand Paris Express sont des parois moulées, avec des hauteurs de terrassement allant jusqu'à 30 m. Le terrassement de l'intérieur des gares cause des déplacements horizontaux des parois et des tassements de surface derrière l'écran, qui peuvent avoir un impact sur les ouvrages avoisinants pour les gares implantées dans des zones fortement urbanisées. Différentes techniques complémentaires et relativement classiques permettent de mesurer les déplacements horizontaux à l'aide d'instruments ou de cibles installés sur (ou dans) les parois ou les butons. En revanche, le suivi des déplacements verticaux du sol derrière l'écran est plus difficile car la surface du sol n'est pas toujours accessible en raison de l'exécution des travaux et est souvent partiellement masquée.

Cet article concerne la construction de la gare Créteil L'Echat. Pour ce site, la profondeur d'excavation est de 28 m, la paroi moulée, d'une épaisseur de 1,2 m, est retenue par trois lits de butons métalliques. Les instrumentations mises en place sont :

- des inclinomètres dans les parois moulées,
- des cibles topographiques sur les parois,
- des extensomètres à cordes vibrantes sur les butons.

En complément, un inclinomètre horizontal de type Shape Accel Array (SAA) de 30 m de long a été enterré dans une tranchée perpendiculaire à la paroi pour mesurer les tassements autour de la fouille dus aux terrassements.

Cet article rappelle le principe de la mesure puis présente différents aspects de la mise en œuvre du SAA : son installation, les problématiques de chantier et le traitement des données. On compare les mesures avec les résultats de deux approches de calcul : une méthode semi-empirique et des modélisations numériques par éléments finis.

2. La gare Créteil L'Echat

2.1 Généralités

La Figure 1 présente le plan de la gare et les instrumentations mises en place. La gare comporte une petite boîte, une boîte centrale et une boîte réalisée en taupe.

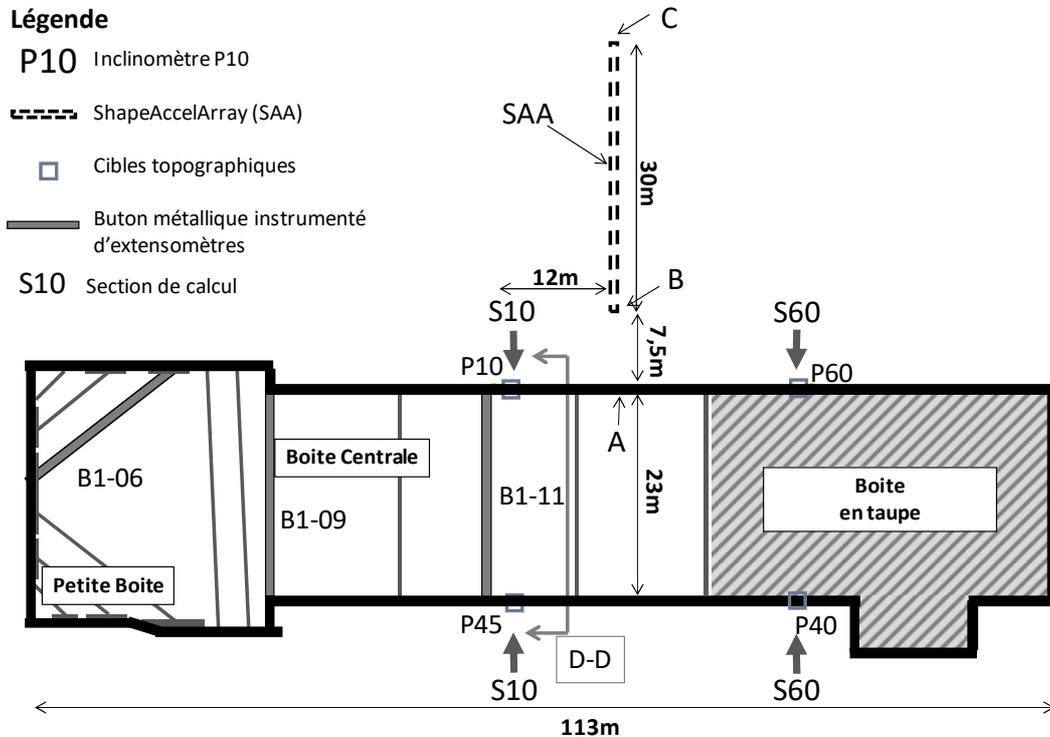


Figure 1. Plan des instrumentations de la gare Créteil l'Echat

Trois lits de butons métalliques sont mis en œuvre au fur et à mesure du creusement de la gare. La Figure 2 présente la coupe D-D pour la boîte centrale.

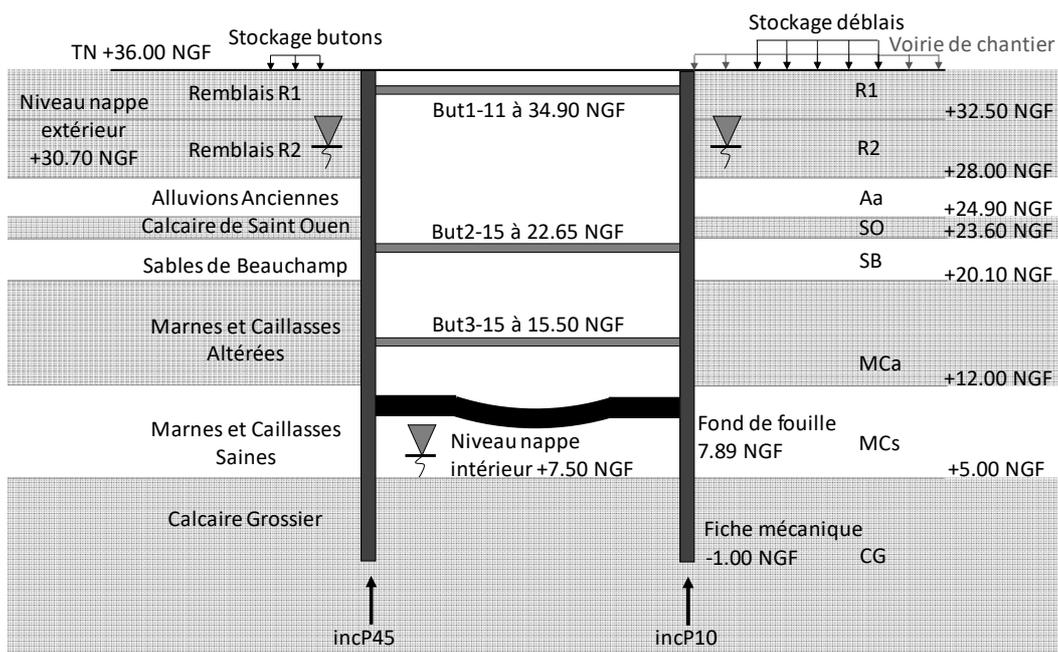


Figure 2. Coupe D-D de la boîte centrale – Section S10

2.2 Paramètres géotechniques

Les paramètres géotechniques d'entrée ont été définis en fourchette, avec une valeur supérieure et une valeur inférieure, présentées dans le Tableau 1. Six sondages pressiométriques dans la zone de la future gare ont permis de réduire l'intervalle de variation des modules E_M . En revanche, le faible nombre d'essais triaxiaux (dix essais pour les sept couches de sol) a seulement permis de proposer des valeurs extrêmes. Par exemple, pour les Alluvions Anciennes, un seul essai triaxial drainé a été réalisé. Il a donné des paramètres de cisaillement très élevés $c'=15$ kPa et $\varphi'=41$ degrés. Le retour d'expérience en région parisienne donne plutôt un angle de frottement voisin de 36 degrés et une cohésion proche de zéro. Deux calculs ont été faits pour chacune des sections : d'une part avec les jeux de paramètres inférieurs pour tous les sols et d'autre part avec les jeux de paramètres supérieurs pour tous les sols.

Tableau 1 Paramètres géotechniques

Couche de sol	Module E_M (MPa)	α - coefficient rhéologique (-)	φ' (°)	c' (kPa)
R1	9-14	0,5	32-35	5-10
R2	4-8	0,5	32-35	5-10
Aa	15-25	0,33	35-41	0-15
SO	23-40	0,5	28-32	20-30
SB	21-29	0,5	22-35	30-25
MCa	52-81	0,5	34-36	15-40
MCS	127-277	0,5	34-36	15-40
CG	334-577	0,5	40	100

3. Les systèmes d'auscultation

3.1 Les systèmes de mesure classiques

Les systèmes d'auscultation installés sur ce chantier sont représentés sur la Figure 1.

Des tubes de réservation ont été placés dans les cages des parois moulées pour y sceller des tubes inclinométriques, qui descendent 5 m au-dessous de la fiche des parois.

Quatre niveaux de cibles topographiques ont été installés sur la surface des parois moulées au fur et à mesure de l'avancement des terrassements. Ces mesures permettent de confirmer les déplacements déduits des mesures inclinométriques.

Des extensomètres à cordes vibrantes ont été installés sur douze butons métalliques de section circulaire sur les trois lits de butons. Les raideurs obtenues par comparaison des mesures inclinométriques aux efforts de compression dans la section des butons ont été utilisées pour les rétro-analyses. L'analyse des efforts dans les trois lits de butons n'est pas présentée dans cet article, faute de place, mais est disponible dans Daktera (2020)).

3.2 Le Shape Accel Array (SAA)

3.2.1 Principe de mesure

Le Shape Accel Array est un capteur fabriqué par la société Measurand, présenté comme une chaîne d'inclinomètres. Il est constitué de tubes rigides reliés par des joints souples. Les joints peuvent se plier dans toutes les directions, mais résistent à la torsion. Cela est une condition essentielle dans le calcul précis des déplacements. Chaque tube comporte trois capteurs d'accélération micro-électromécaniques orthogonaux connectés à un

convertisseur analogique-numérique et un capteur de température. Dans le cas de cet ouvrage, le SAA est fait de 30 tubes rigides de 1 m – soit une longueur totale de 30 m.

3.2.2 Installation du dispositif de mesure

Le SAA a été installé dans une tranchée de 70 cm de profondeur. Son extrémité la plus proche de l'excavation se situe à 7,5 m de la paroi moulée à cause de contraintes de chantier. L'installation a eu lieu environ deux mois avant le début des terrassements et avant la fin d'une forte activité du chantier dans la zone entre la paroi moulée et le SAA.

3.2.3 Mesures

Le SAA enregistre des mesures de manière automatique et les mesures sont disponibles en temps réel. On a effectué une mesure toutes les 30 minutes soit 48 mesures par jour. Deux types de correction ont été appliqués aux mesures : la correction de la dérive (en anglais *drift*) et du choc. Swarbrick et al. (2015) décrivent le phénomène de la dérive qui ne provient pas des capteurs mais du système d'acquisition qui doit convertir le signal analogique en signal numérique. La correction du choc consiste à détecter les cas où un des capteurs de la chaîne présente un manque de continuité de comportement dans le temps. Ces corrections sont déterminées par un logiciel fourni par le fabricant du SAA. Les détails exacts des opérations effectuées par ce logiciel sont la propriété industrielle du fabricant et ne sont pas divulgués. Les courbes de tassement présentées dans la suite de l'article prennent en compte ces deux corrections.

4. Rétro-analyse des déplacements horizontaux

Deux sections ont été analysées dans ce travail : la section S60 passant par la boîte en taupe et la S10 passant par la boîte centrale, à 12 m du SAA.

Deux méthodes de calcul des déplacements horizontaux de la paroi ont été utilisées et comparées. La première est la méthode des éléments finis (EF) avec la loi de comportement Hardening Soil Model (Schanz et al. 1999), appelée HSM dans la suite. Toutes les modélisations aux EF ont été faites avec des paramètres drainés vu la durée du chantier. La seconde est la méthode d'interaction sol structure au coefficient de réaction (Norme Ecran NF P 94-282 AFNOR, 2009), qu'on appelle MISSK. L'équation (1) présente les modules utilisés dans la modélisation EF HSM (Daktera et al. 2019).

$$E_{50} = E_{oed} = \frac{E_{ur}}{3} = 2 \cdot \frac{E_M}{\alpha} \quad (1)$$

où E_{50} , E_{oed} et E_{ur} sont les modules sécant à 50% de la résistance, œdométrique et de déchargement - rechargement respectivement, et α le coefficient rhéologique de Ménard. L'exposant qui permet de caractériser la dépendance de raideur avec les contraintes m dans la loi HSM est supposé égal à zéro.

L'équation (2) permet l'obtention des valeurs des coefficients de réaction k_h qui ont été utilisées dans la modélisation MISSK (Schmitt 1995).

$$k_h = 2.1 \cdot \left(\frac{E_M}{\alpha} \right)^{4/3} / (EI)^{1/3} \quad (2)$$

où EI est le produit d'inertie de l'écran. Pour la paroi considérée, on a adopté les valeurs $E = 27$ GPa et $I = (1,2\text{m})^3 \times 1 \text{ m} / 12$.

La figure 3 présente les résultats des déplacements horizontaux de l'écran de la section S60 (en taupe). Il n'y a aucune surcharge derrière les parois. On a pris en compte un moment fléchissant dû au poids propre (sans aucune charge d'exploitation) de la dalle

de couverture au niveau des aciers en attente. En considérant que la dalle est encadrée dans la paroi, un calcul de résistance des matériaux donne la valeur de 1980 kN.m/m.

Sauf pour le premier terrassement, les courbes inclinométriques se situent entre les courbes calculées pour les deux jeux de paramètres, ce qui confirme que les deux méthodes peuvent être utilisées pour la prédiction des déplacements de ces parois. Le comportement de la partie supérieure de l'écran est fortement influencé par le moment au niveau de la dalle qui tire la paroi vers le sol. Une différence entre la valeur réelle du moment et la donnée d'entrée des modèles peut justifier une légère divergence du niveau et de la valeur du ventre entre les modélisations et les courbes inclinométriques. Les courbes des deux modèles de calcul se suivent très bien et sont très cohérentes.

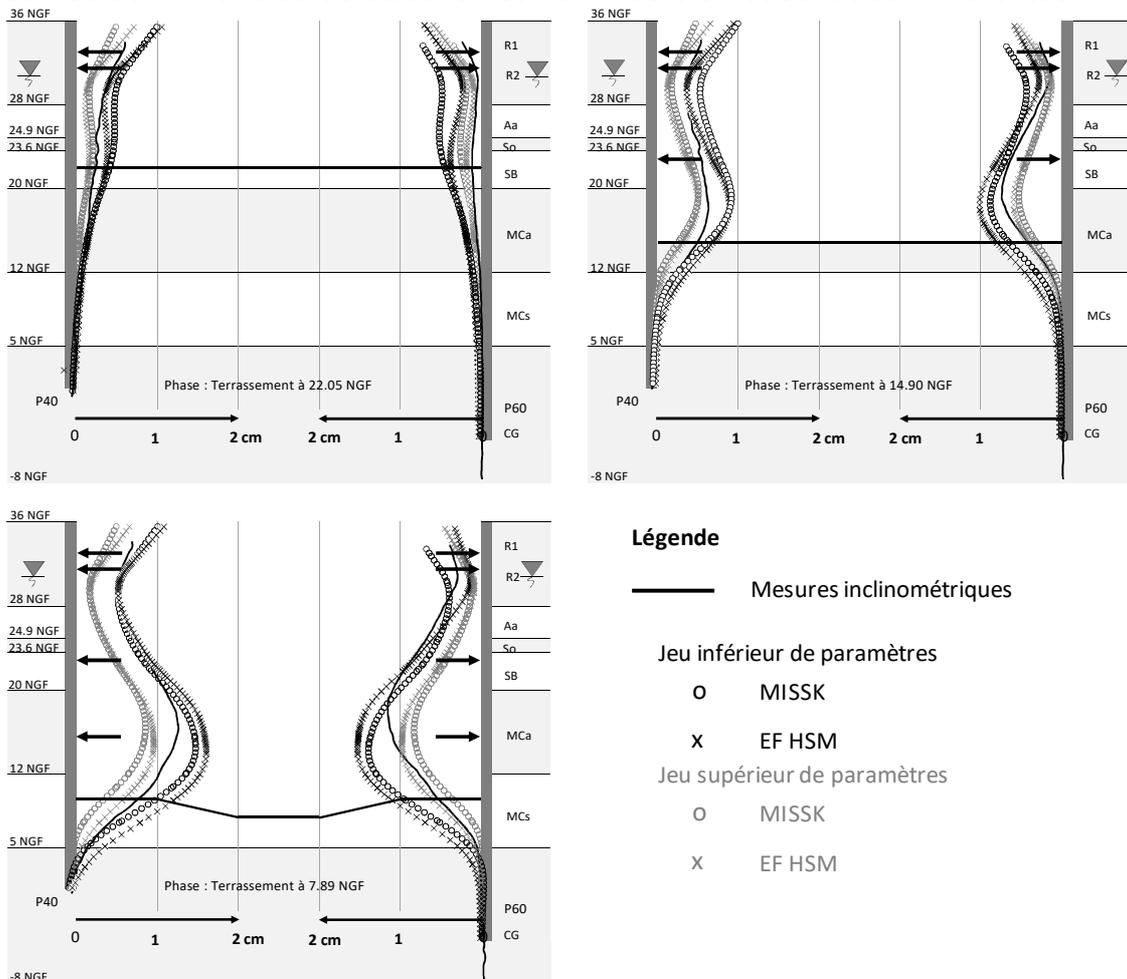


Figure 3. Déplacements horizontaux pour la section S60 : mesures inclinométriques et calculs

La figure 4 présente la rétro analyse de la section S10. Pour cette coupe, on prend en compte une surcharge derrière le panneau P10 : elle correspond à un talus formé de déblais de la fouille, constitué pour permettre un meilleur rendement des opérations de terrassement. La surcharge de 40 kPa rend le problème nettement dissymétrique.

Pour la section S10, les six courbes mesurées se trouvent entre les courbes calculées avec les deux jeux de paramètres, pour les deux méthodes. Les paramètres de la borne inférieure correspondent plus aux mesures inclinométriques. Cependant, il est important de noter que les éléments finis montrent plus de déplacements (environ 5 mm) en partie supérieure de l'écran que MISSK. Malheureusement, on ne peut en conclure davantage, car le modèle géotechnique n'est pas assez précis.

Les calculs sont présentés en détail dans Daktera (2020).

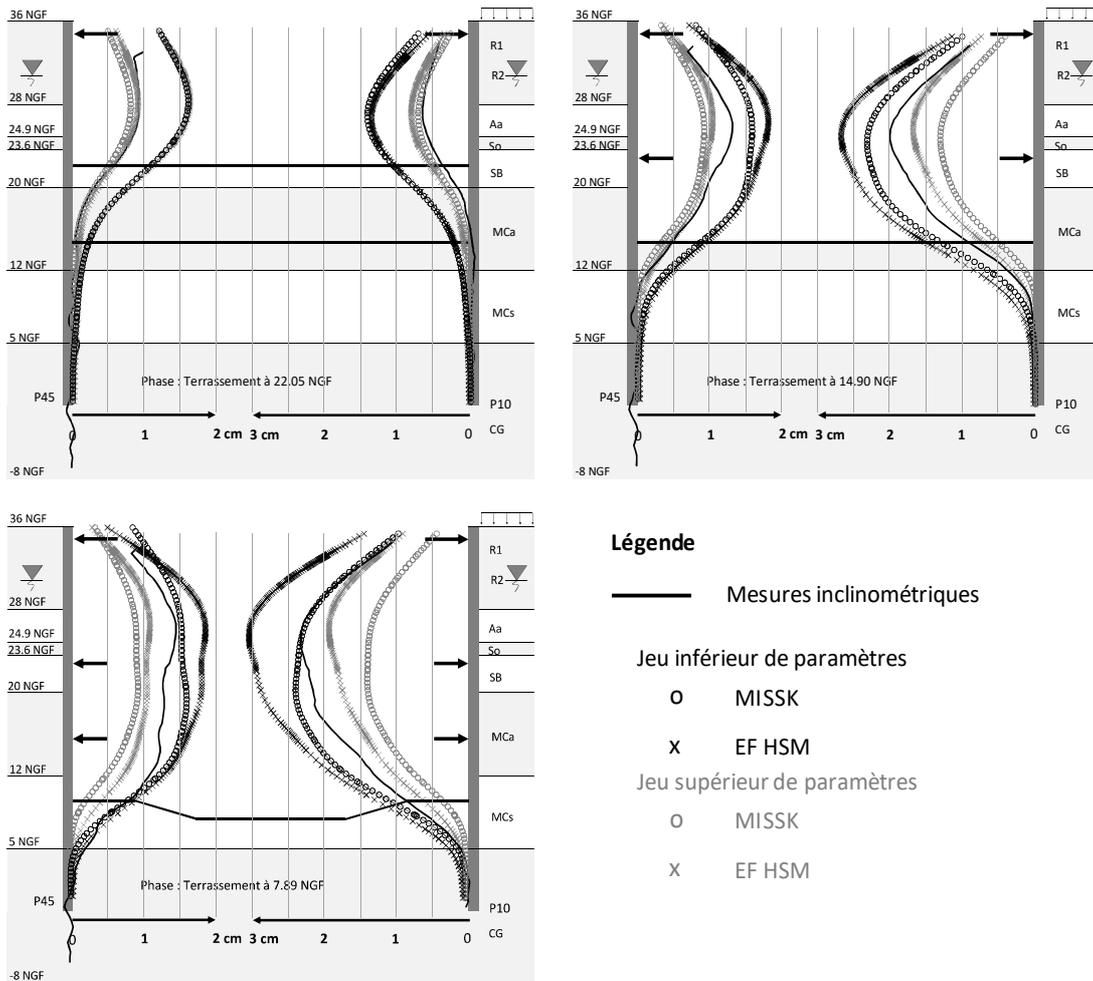


Figure 4. Déplacements horizontaux pour la section S10 : mesures inclinométriques et calculs

5. Rétro analyse de la cuvette de tassement derrière la paroi

Le SAA est décalé de la section S10 d'environ 12 m (Figure 1). En analysant les données du chantier et en particulier les photos journalières prises de l'immeuble avoisinant, on considère que, pour retrouver le tassement du SAA, il faut prendre en compte le même phasage que pour la section S10 mais avec une surcharge du talus réduite à 20 kPa au lieu des 40 kPa pris en compte précédemment (cf section 4 ci-dessus).

5.1 Calcul des tassements par la méthode de Hamza et al. (1999)

Parmi les méthodes semi-empiriques de prédiction des tassements décrites dans la littérature, celle proposée par Hamza et al. (1999) a confirmé sa validité sur les fouilles profondes du Métro du Caire (Bazin et Schmitt, 2001). Elle distingue deux modes de comportement de paroi : en console ou avec un appui en tête. Le cas de Créteil l'Echat correspond au deuxième cas. La méthode repose sur deux hypothèses principales : 1) la courbe de tassement derrière un écran de soutènement a la forme d'une courbe gaussienne décalée et inversée vers le bas ; 2) les tassements sont estimés à partir des déplacements horizontaux de l'écran, supposée connus. L'équation (3) présente le déplacement vertical vers le bas $s(x)$ en fonction de la distance x à la paroi :

$$s(x) = s_{1,max} \cdot e^{\left(\frac{-x^2}{2 \cdot i_1^2}\right)} \quad (3)$$

où $s_{1,max}$ est le tassement maximum et i_1 la distance entre la paroi et le point d'inflexion de la courbe gaussienne. Hamza et al. (1999) proposent d'évaluer $s_{1,max}$ et i_1 par :

$$s_{1,max} = R_s \cdot y_{max} \quad (4)$$

$$i_1 = \frac{V_s}{2.1 \cdot s_{1,max}} \quad (5)$$

où y_{max} est le déplacement horizontal maximum, R_s est le ratio de tassement, et V_s est le volume de la cuvette de tassement. Il est pris égal au produit de l'intégrale V_w du déplacement horizontal de la paroi par un ratio noté R_v :

$$V_s = R_v \cdot V_w \quad (6)$$

Les équations (4) et (6) montrent que le ratio R_s contrôle la valeur maximale du tassement, et que le ratio R_v contrôle le volume de la cuvette et donc son étendue. Dans le cas du métro du Caire, Hamza et al. (1999) ont obtenu des résultats satisfaisants pour $R_v = 0,65$ et $R_s = 0,71$. La valeur de $R_s = 0,71 = 1/1,4$ a déjà été proposée par Clough et Schmidt (1981). Pour la station El Behoos, Bazin et Schmitt (2001) recalent le ratio de tassement à $R_s = 0,5$. L'ordre de grandeur des deux coefficients est confirmé par de nombreuses études de cas présentées dans Gaba et al. (2017).

Pour Créteil l'Echat, on obtient un meilleur accord entre le modèle et les valeurs mesurées pour $R_v = 0,5$ et $R_s = 0,71$ puisque le tassement maximal correspond environ à la valeur du déplacement horizontal maximal de l'écran multiplié par 0,71 (Figure 5).

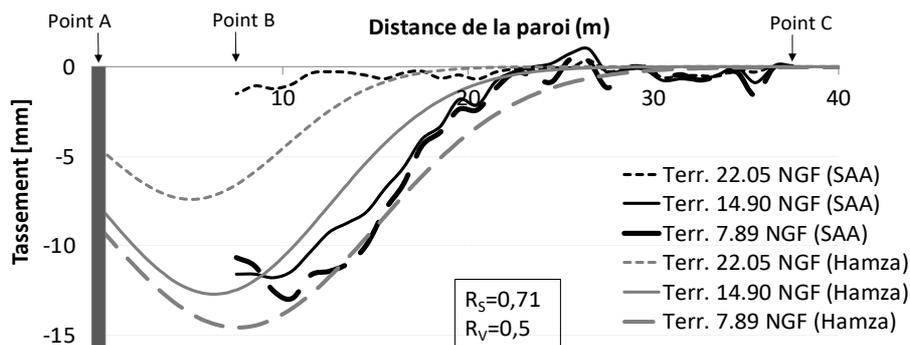


Figure 5. Tassements mesurés comparés à la méthode de Hamza (pour $R_v=0,5$ et $R_s=0,71$)

5.2 Calcul des tassements par la méthode des éléments finis

La Figure 6 présente les tassements calculés par éléments finis avec Plaxis. Les paramètres géotechniques pour ce calcul ont été recalés, entre les deux bornes des paramètres, pour que le volume de déplacement horizontal soit le même que celui mesuré pour les deux derniers terrassements. Les tassements calculés sont plus importants que les valeurs mesurées et l'étendue de la cuvette semble surestimée : pour la dernière phase, on obtient environ 10 mm de tassement à 22 m de distance alors que la mesure montre un tassement négligeable.

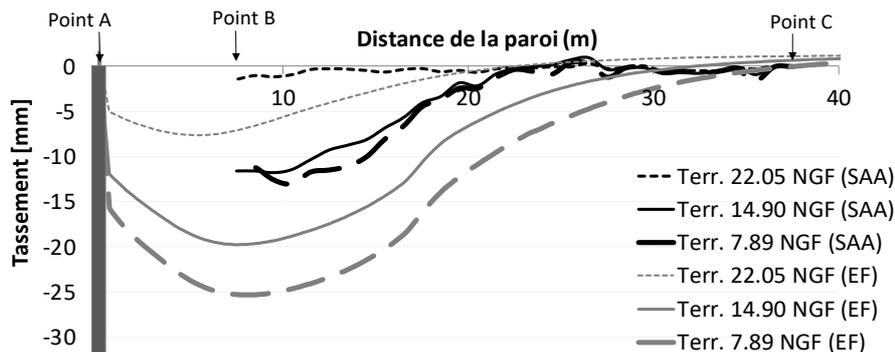


Figure 6. Tassements mesurés comparés aux calculs éléments finis

6. Conclusions

Les conclusions de cette analyse sont les suivantes :

1. Pour les deux sections, les déplacements ont été évalués de manière satisfaisante par les deux méthodes, la borne inférieure des paramètres géotechniques donnant des résultats plus proches des mesures. Pour la paroi P60, les deux méthodes placent le ventre des déplacements trop bas. Cela peut être dû à la difficulté d'évaluer le moment fléchissant en tête dû à la dalle de couverture. Pour la paroi P10, il est intéressant de noter que les éléments finis montrent plus de déplacements en partie supérieure de l'écran que MISSK, mais il est compliqué de tirer des conclusions précises à cause du faible nombre d'essais de laboratoire qui conduit à un modèle géotechnique en fourchette.
2. La prédiction de la cuvette de tassement avec la méthode semi-empirique de Hamza et al. (1999) se montre extrêmement pertinente en termes de valeur absolue de tassement mais aussi en termes d'étendue de la cuvette. La seule modification apportée est l'ajustement du ratio R_v (qui règle l'étendue de la cuvette) pour le ramener de 0,65 à 0,5. Le ratio R_s qui règle la valeur du tassement maximal n'a pas été modifié.
3. Les calculs par éléments finis surestiment le tassement maximum d'un facteur 2 et l'étendue de la cuvette d'un facteur 1,6 environ. Le ratio calculé entre le déplacement horizontal maximal et le tassement maximal est légèrement inférieur à 1. Pour réduire cette divergence, on peut proposer d'introduire pour les remblais un coefficient de surconsolidation supérieur à 1, de manière à réduire la valeur maximale du tassement ainsi que l'étendue de la cuvette sans modifier sensiblement le déplacement horizontal de l'écran. Cette idée reste à tester pour le cas de Créteil l'Echat ; on pourra également chercher des cas bien documentés en région parisienne pour la valider.

7. Remerciements

Les auteurs remercient la Fédération Nationale des Travaux Publics pour le financement de l'installation du Shape Accel Array sur le site de Créteil L'Echat, la Société du Grand Paris et les équipes techniques du Groupement Horizon (Bouygues Travaux Publics, Soletanche Bachy) pour le soutien durant ce projet de recherche.

8. Références

- AFNOR (2009) NF P 94-282 : Calcul géotechnique / Ouvrages de soutènement : Ecrans.
- Bazin E., Schmitt P. (2001) Analyse des mesures de déformation des parois moulées du métro du Caire. XV ICSMGE, Istanbul, vol 2.
- Clough G.W., Schmidt B. (1981) Design and performance of excavations and tunnels in Soft Clay Engineering. Elsevier, Amsterdam, pp. 569-634.
- Daktera T., Bourgeois E., Schmitt P., Jeanmaire T., Delva L., Priol G. (2019) Design of deep supported excavations: comparison between real behavior and predictions based on the subgrade coefficient method. XVII ECSMGE, Reykjavik.
- Daktera T. (2020) Evaluation des méthodes de calcul des écrans de soutènement à partir du retour d'expérience de grands travaux récents. Thèse Univ Gustave Eiffel (à paraître).
- Gaba A., Hardy S., Doughty L., Powrie W., Selemetas D. (2017) Ciria C760 : Guidance on embedded retaining wall design.
- Hamza M., Ata A., Roussin A. (1999) Ground movements due to the construction of cut and cover structures and slurry shield tunnel of the Cairo Metro. Tunnelling and Underground Space Technology, 14(3) : 281-289.
- Schanz T., Vermeer P. A., Bonnier B. G. (1999). "The Hardening Soil Model: formulation and verification." Beyond 2000 in Computational Geotechnics, Balkema, Rotterdam.
- Schmitt P. (1995) Méthode empirique d'évaluation du coefficient de réaction du sol vis-à-vis des ouvrages de soutènement souples. Revue Fr. de Géotechnique n°71, pp. 3-10.