

ENSEIGNEMENTS TIRES DE L'INSTRUMENTATION AVANCEE DE LA GARE DE FORT D'ISSY-VANVES-CLAMART

LESSONS LEARNED FROM THE ADVANCED INSTRUMENTATION OF THE FORT D'ISSY-VANVES-CLAMART METRO STATION

Khadija NEJJAR¹, Daniel DIAS², Gilles CHAPRON¹, Fahd CUIRA¹, Hervé LE BISSONNAIS¹

¹ Terrasol, Paris, France

² Laboratoire 3SR, Université de Grenoble Alpes, Grenoble, France

RÉSUMÉ – La gare de Fort d'Issy-Vanves-Clamart a fait l'objet d'une instrumentation avancée dans l'objectif d'étudier le comportement des soutènements d'excavations profondes. L'analyse des mesures et leur confrontation avec les résultats des modélisations aux coefficients de réaction et aux éléments finis ont permis de tirer plusieurs enseignements.

ABSTRACT – Conventional monitoring of Fort d'Issy-Vanves-Clamart station was enhanced by advanced devices in order to obtain a full description of the retaining wall behavior. The measurement analysis and comparison with results from subgrade reaction method and finite element methods provide several lessons.

1. Contexte de la gare Fort d'Issy-Vanves-Clamart

La gare de Fort d'Issy-Vanves-Clamart (FIVC) représente l'un des premiers retours d'expérience complets d'une excavation profonde du Grand Paris Express. L'enceinte de la gare est constituée de paroi moulée de 40 m de profondeur et de 1,2 m d'épaisseur pour soutenir 32 m d'excavation. Le radier est posé dans les Marnes de Meudon et la fiche est ancrée dans la Craie (**Figure 1**).

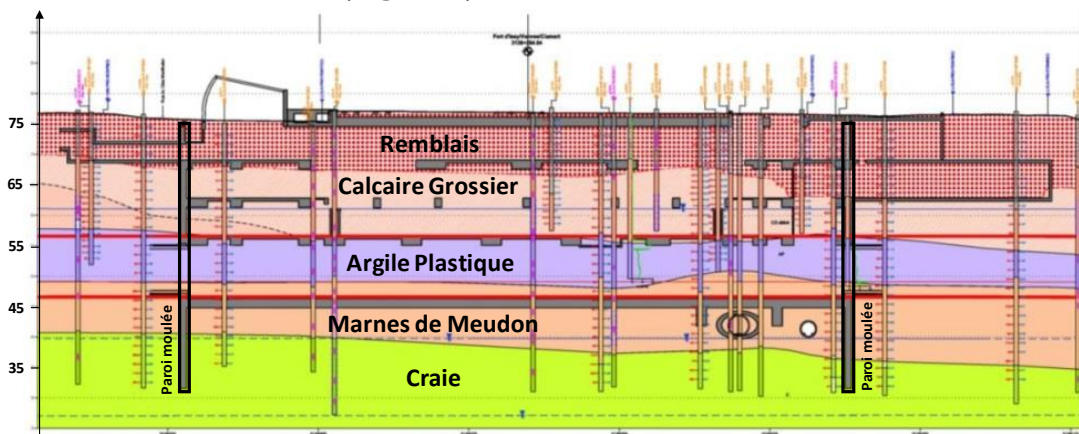


Figure 1 : Profil géologique au droit de la gare FIVC

L'instrumentation classique de la gare a été renforcée par des dispositifs complémentaires avancés dans l'objectif d'étudier le comportement du système de soutènement à travers la mesure simultanée des principales grandeurs intéressant le géotechnicien à savoir le déplacement et le moment fléchissant dans la paroi, les efforts dans les appuis et la pression à l'interface sol/écran. Les excavations instrumentées disponibles dans la littérature présentent souvent la mesure d'une seule de ces grandeurs, principalement le

déplacement, très peu présentent à la fois des mesures de déplacements et d'efforts (Kastner 2018) et encore plus rares celles qui présentent une mesure de la pression à l'interface sol/écran (Ng 1999).

Les mesures issues de l'instrumentation de la gare FIVC ont été analysées et confrontées aux modélisations aux coefficients de réaction (notée MISS-K) et aux éléments finis 2D et 3D (notées respectivement EF 2D et EF 3D). Le **Tableau 1** récapitule les paramètres géotechniques des couches de sol retenus. Dans le modèle MISS-K, la formule de Schmitt (1995) est utilisée pour déterminer le coefficient de réaction à partir du module pressiométrique. Dans les modèles EF 2D et EF 3D, le comportement du sol est représenté par le modèle HSSmall (Plaxis 2019) dans lequel la distorsion $\gamma_{0.7}$ à 30% de dégradation du module est calculée à partir de la formule de Benz (2007) et le module de cisaillement dynamique G_0 correspond à celui issu de l'essai cross hole. Les paramètres d'érouissage ont été choisis proportionnellement au module pressiométrique : E_{50} et $E_{oed} = 2,5 \times E_M/\alpha$. Le module contrôlant le domaine élastique E_{ur} à moyenne déformation a été pris égal à 2 ou 3 fois le E_{50} selon le type de terrain. Le paramètre « puissance » m a été pris égal à 0 pour l'ensemble des couches.

Tableau 1 : Paramètres géotechniques des couches de sol

Couche de sol	Toit (m NGF)	γ (kN/m ³)	E_M (MPa)	α	$E_{50}=E_{oed}$ (MPa)	E_{ur} (MPa)	G_0 (MPa)	$\gamma_{0.7}$	ϕ' (°)	c' (kPa)	K_0
Remblais	77	19	6	1/2	30	90	175	$9.5 \cdot 10^{-5}$	29	0	0,52
Calcaire G.	66	21	25	1/2	125	250	600	$9 \cdot 10^{-5}$	35	20	0,43
Argile P.	56	19	60	1	150	300	160	$1.1 \cdot 10^{-4}$	18	20	0,85
Marnes M.	48	19,5	100	2/3	375	750	670	$1.5 \cdot 10^{-4}$	25	30	0,58
Craie	37	19,5	170	1/2	850	1700	950	$1.3 \cdot 10^{-4}$	35	40	0,43

2. Instrumentation de la gare Fort d'Issy-Vanves-Clamart

La **Figure 2** présente une vue en plan de la localisation des dispositifs d'instrumentation de la gare FIVC. Le déplacement de la paroi est mesuré avec 12 tubes inclinométriques régulièrement répartis dans la gare. Des jauges de déformation sont soudées sur les boutons en acier ou noyées dans les poutres butonnantes. Un panneau est équipé de 100 m de fibre optique le long de deux barres longitudinales pour mesurer les déformations axiales qui permettront de remonter au profil du moment fléchissant (Nejjar 2018). Dans ce même panneau, 4 couples de cellules de pressions totale et interstitielle sont installées à l'interface sol/écran. Le détail du plan d'instrumentation est fourni dans Nejjar (2019).

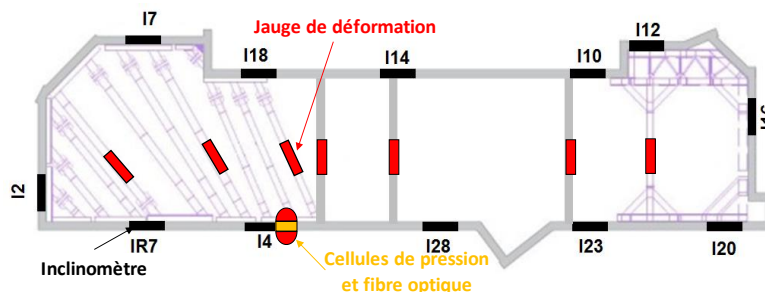


Figure 2 : Localisation des dispositifs d'instrumentation dans la gare FIVC

3. Déplacement et moment dans la paroi

La **Figure 3** présente une comparaison entre le déplacement mesuré par différents inclinomètres et les résultats des modélisations. On remarque que le mouvement de la paroi est reproduit par les 3 modélisations d'une manière satisfaisante en termes d'allure et d'amplitude. Toutefois, le modèle 3D semble le plus proche des mesures de

l'inclinomètre I7 et I28 car il permet d'intégrer les effets de la géométrie angulaire de la gare à proximité de ces inclinomètres.

On observe que le déplacement mesuré de la paroi représente environ 30% du seuil contractuel (30 mm). Le rapport entre la flèche mesurée et la profondeur de l'excavation est 4.10^{-4} , ce qui permet d'appréhender le niveau de déformation du sol.

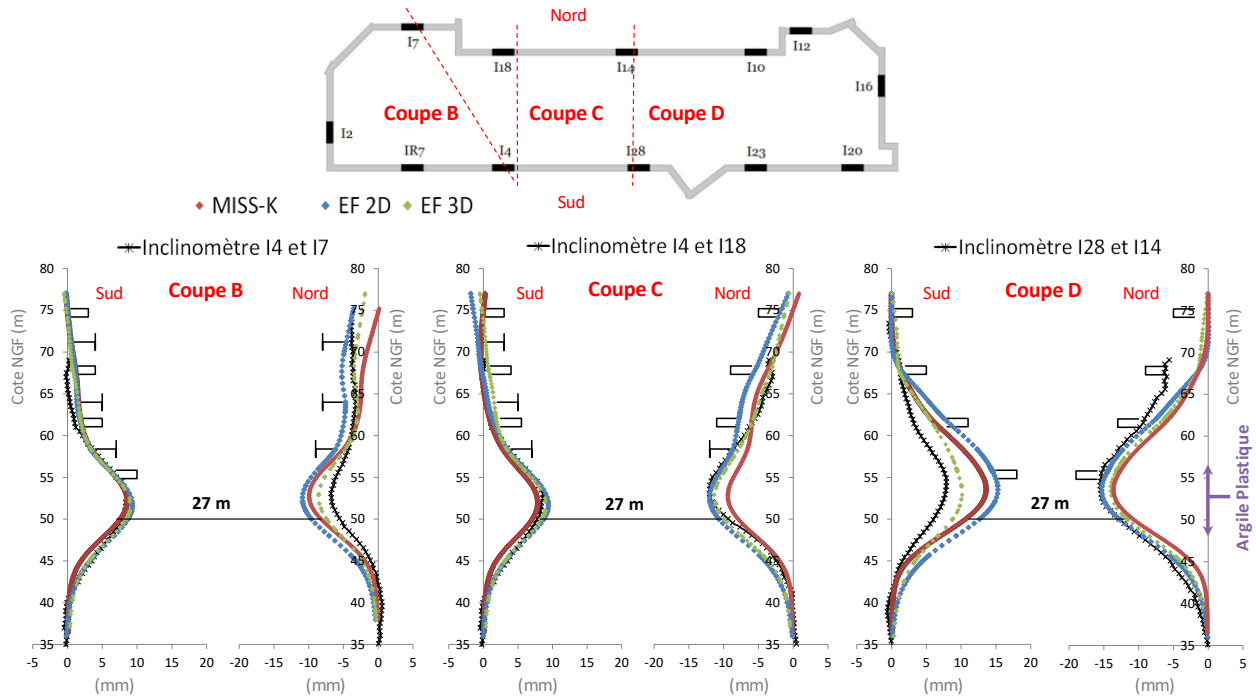


Figure 3 : Comparaison entre le déplacement mesuré de la paroi et les résultats des modélisations

La **Figure 4** présente le profil du moment fléchissant mesuré le long de la paroi en comparaison avec les résultats des modélisations. On remarque que les 3 modèles reproduisent l'allure du profil expérimental d'une manière acceptable, toutefois l'amplitude du moment maximal est plus importante. On note que le moment mesuré correspond à 1/3 du moment de dimensionnement de la paroi qui est de 3000 kN.m/ml.

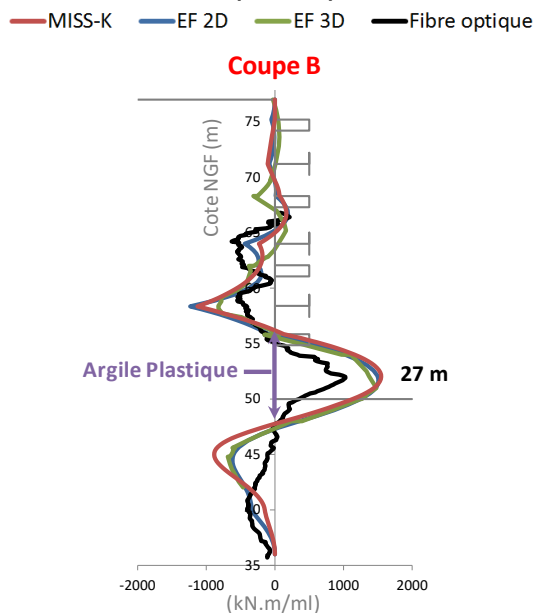


Figure 4 : Comparaison entre le profil du moment mesuré et les résultats des modélisations

4. Exploitation de l'effet de la température sur les butons

Ce paragraphe vise d'une part, à présenter une méthodologie d'exploitation de l'effet de la température sur les butons et d'autre part, à présenter l'évolution des mesures des efforts pendant l'excavation.

L'exploitation des variations de l'effort dans les butons métalliques sous l'effet de la température peut être riche en enseignement. Les jauges de déformation soudées sur les butons provisoires en acier mesurent simultanément leur déformation et leur température avec la fréquence d'une mesure par heure. La **Figure 5** présente l'évolution de l'effort en fonction de la température et le temps (phases de terrassement) est rajouté en couleur. On observe que les mesures décrivent un nuage de points avec une relation linéaire constante mais une épaisseur variable en fonction de la phase de terrassement (ΔF_{14m} , ΔF_{20m} et ΔF_{27m}).

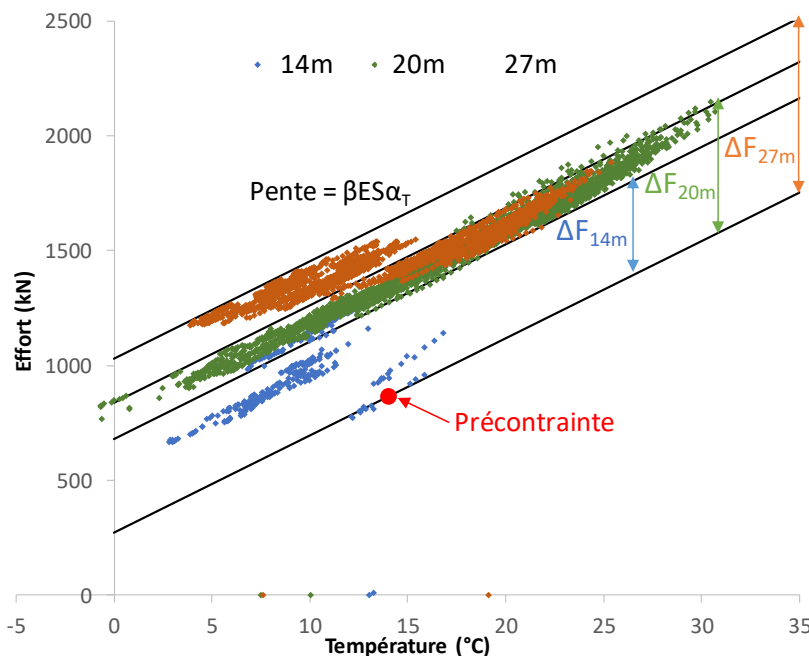


Figure 5 : Evolution de l'effort mesuré d'un buton avec la température et les phases de terrassement

La figure précédente montre par ailleurs que l'ensemble des mesures obéit à une pente $\Delta F/\Delta T$ bien précise dont l'estimation peut renseigner directement sur la rigidité de la paroi en interaction avec le terrain soutenu. En effet la valeur de $\Delta F/\Delta T$ dépend de la rigidité axiale des butons ES, du coefficient de dilatation thermique de l'acier α_T ($1,2 \cdot 10^{-5}$) et d'un facteur β qui exprime les conditions de souplesse des extrémités du buton car ce dernier est relié à la paroi soutenant le sol ($\beta=1$ extrémité rigide, $\beta=0$ extrémité libre). Ce facteur est appelé dans la littérature « facteur de restriction du buton » (CIRIA 580, Gaba et al. 2003).

La détermination du coefficient β peut être menée analytiquement en résolvant le problème élémentaire d'une poutre fixée élastiquement sur ses extrémités. La déformation axiale du buton soumis à une variation de température s'exprime comme suit :

$$\epsilon = \frac{\Delta u}{\Delta x} = -\frac{\Delta N}{ES} + \alpha_T \Delta T$$

Si on présente la paroi et le sol par un ressort apparent de rigidité K_A placé à l'extrémité du buton, on a à l'équilibre :

$$\Delta N = K_A * \Delta u$$

Des deux équations précédentes, on peut exprimer l'incrément de l'effort dû à une surcharge thermique de la manière suivante :

$$\Delta N = \frac{1}{1 + \frac{2ES}{K_A L}} * ES \alpha_T \Delta T$$

On reconnaît ainsi dans la formule précédente l'expression suivante du coefficient β avec $K_{buton} = \frac{2ES}{L}$:

$$\beta = \frac{1}{1 + \frac{K_{buton}}{K_A}}$$

Le coefficient β est ainsi directement lié à la rigidité apparente de la paroi en interaction avec le terrain soutenu. Les mesures in situ de β issues de l'exploitation des variations de température peuvent servir d'outil pour évaluer la performance des modèles utilisés en ingénierie (qu'ils soient numériques ou semi-empiriques) pour quantifier la rigidité de la paroi en interaction avec le terrain soutenu. L'évaluation du coefficient β issu des modèles peut être menée selon la procédure suivante :

- On choisit une phase de terrassement en dessous du buton concerné. On note F_0 la réaction du buton à l'issue de cette phase ;
- A partir de cette phase, on rajoute une nouvelle phase dans laquelle on remplace le buton par une force ponctuelle égale à $F_0 + \Delta N$
- On récupère l'incrément de déplacement Δu dû à l'incrément ΔN
- La rigidité apparente au droit du buton correspond donc simplement à : $K_A = \Delta N / \Delta u$

La **Figure 6** présente une comparaison entre le coefficient de restriction mesuré $\beta_{mesuré}$ pour l'ensemble des butons instrumentés dans la gare FIVC et le coefficient calculé $\beta_{calculé}$ à partir de la procédure ci-dessus. L'exercice est mené à différentes profondeurs. On observe que les valeurs de ce coefficient sont différentes en fonction de la nature du sol derrière la paroi. Une très bonne corrélation peut être notée entre la rigidité du terrain et l'amplitude de β . Plus le terrain est raide (exemple : au droit du calcaire grossier), plus le β est grand. On remarque également une bonne concordance entre les valeurs mesurées et celles estimées par les modèles (écart moyen de 15% en omettant le buton B1-9). Cela confirme que les modélisations utilisées représentent d'une manière satisfaisante la rigidité apparente de l'ensemble « paroi + terrain ».

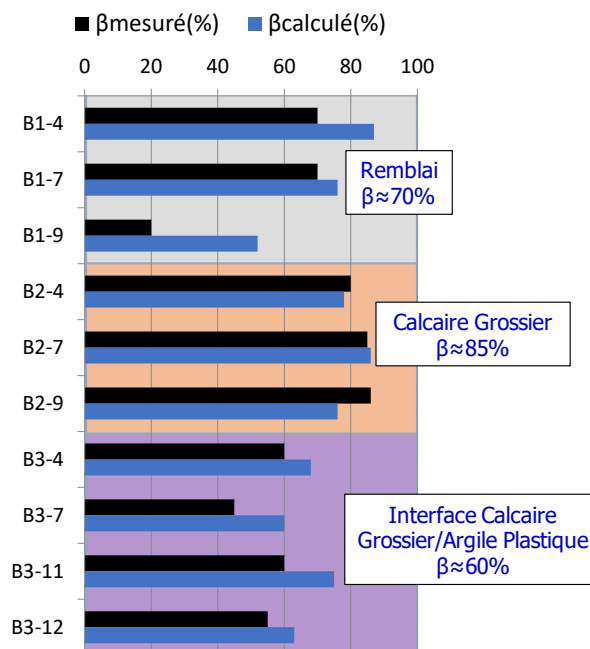
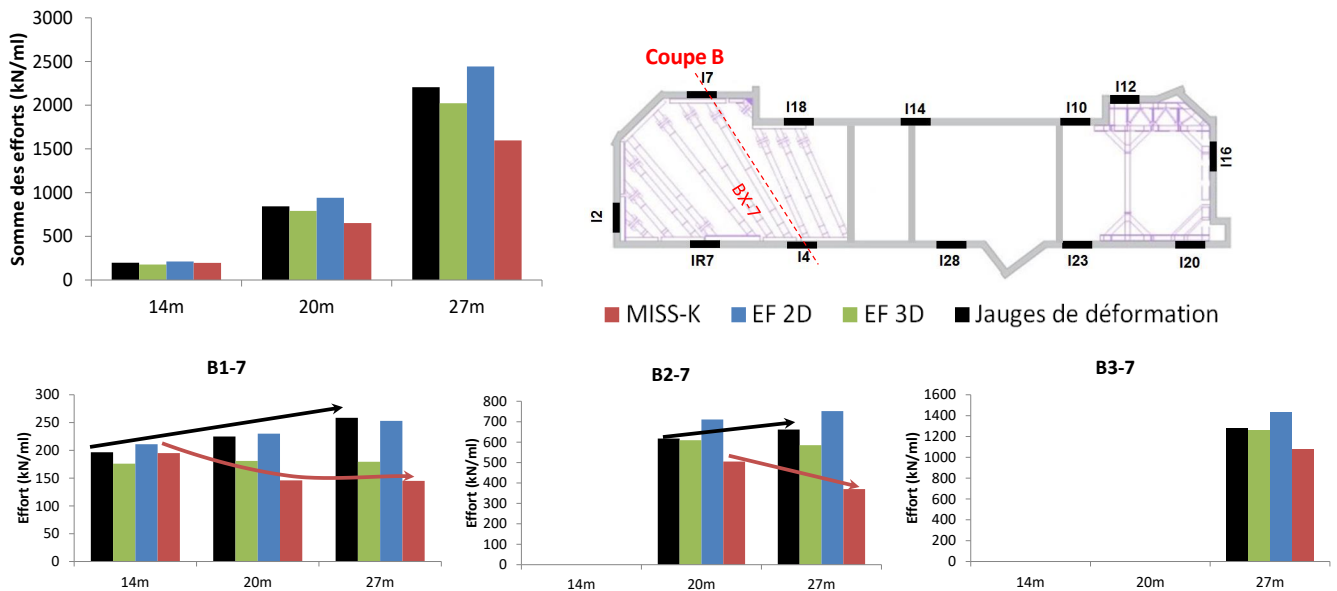


Figure 6 : Comparaison entre le facteur de restriction β mesuré et calculé

La **Figure 7** présente l'évolution des efforts dans les appuis de la coupe B en fonction de la profondeur de l'excavation. On remarque que les modèles EF 2D et 3D reproduisent

d'une manière satisfaisante la somme des efforts avec seulement une différence de 8% alors que le modèle MISS-K sous-estime l'amplitude de la somme des efforts jusqu'à -30%. Concernant les efforts dans chaque appui, on observe qu'ils augmentent avec la profondeur d'excavation. Ce chargement observé traduit un mécanisme de report de charge par effet de voûte qui peut s'expliquer par la redistribution des contraintes derrière l'écran. Le modèle EF 2D reproduit d'une manière satisfaisante cette tendance étant donné qu'il considère le sol sous forme d'un milieu continu et permet cette redistribution des contraintes par mobilisation du cisaillement entre les couches de sol. En revanche, le modèle MISS-K présente une tendance inverse étant donné que les ressorts modélisant l'interaction sol-écran sont par construction indépendants les uns des autres. On note que les efforts mesurés pour l'ensemble des butons sont à 35% de leur limite de flambement (limite de flambement de B1 = 700 kN/ml, B2 = 1800 kN/ml et B3 = 4000 kN/ml).



5. Pression du sol à l'interface sol-écran

La **Figure 8** présente le diagramme de variation de la pression totale du sol derrière et devant l'écran pour la coupe B. Ce diagramme représente la différence entre la pression à la phase d'excavation à 27 m de profondeur et la pression initiale des terres au repos. Les mesures des cellules de pression sont présentées sous forme d'un intervalle de +/- 15 % de la pression mesurée correspondant à leur intervalle de précision.

On observe que la première cellule derrière l'écran, la moins profonde, mesure une compression. La deuxième cellule à l'interface entre le Calcaire Grossier et l'Argile Plastique présente une décompression et la troisième cellule au milieu de l'Argile Plastique mesure une décompression représentant 62% de la décompression théorique Po-Pa où Po est la pression des terres au repos et Pa est la poussée active.

On remarque que les diagrammes des modèles EF 2D et EF 3D reproduisent d'une manière satisfaisante cette redistribution des contraintes derrière l'écran avec une décompression au droit du fond de fouille et de l'Argile Plastique accompagnée de deux compressions dans la partie supérieure et en pied de l'écran. En revanche, le modèle MISS-K présente uniquement une décompression le long de l'écran.

La cellule devant l'écran met en évidence une mobilisation assez nette de la butée des terrains avec une pression mobilisée qui tend vers la valeur théorique de la butée limite dans les Marnes de Meudon.

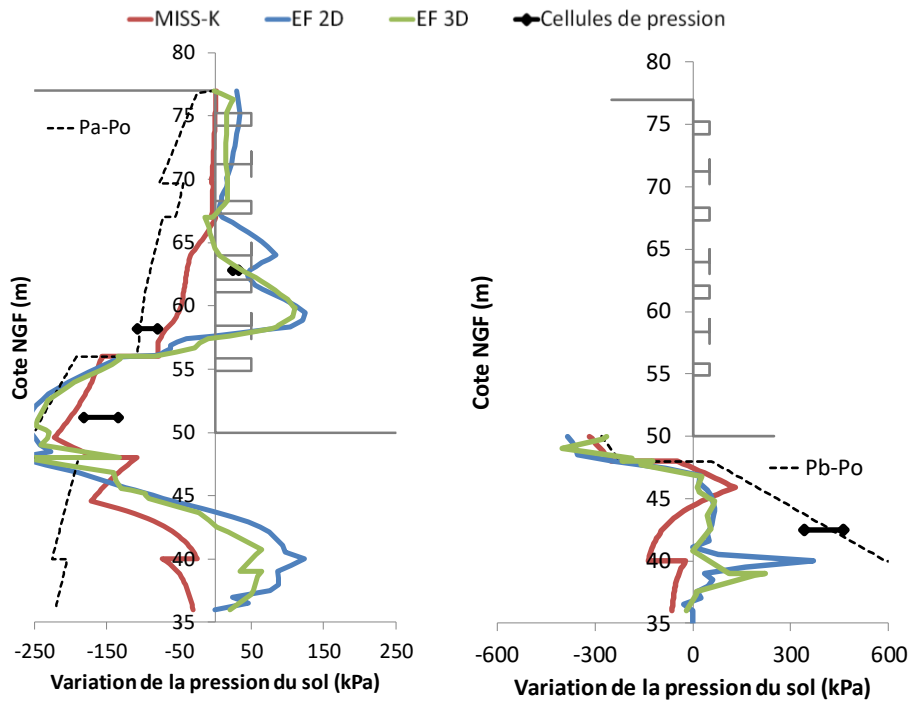


Figure 8 : Variation de la pression totale derrière (à gauche) et devant l'écran (à droite)

6. Comportement de l'Argile Plastique

La **Figure 9** présente l'évolution de la pression totale de la cellule située devant l'Argile Plastique en fonction du temps.

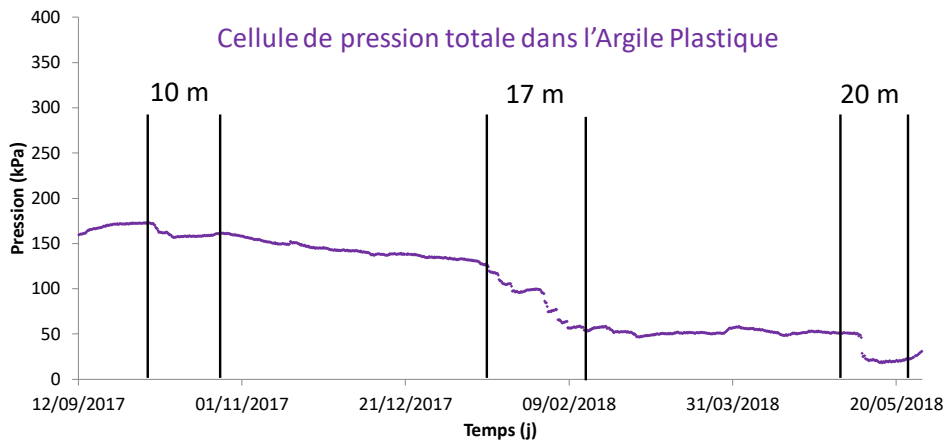


Figure 9 : Evolution de la pression totale mesurée au droit de l'Argile Plastique en fonction du temps

Les mesures obtenues mettent en évidence une stabilisation rapide des pressions à l'arrière de la paroi. Cela peut être interprété comme synonyme d'une situation où les effets de temps ou de consolidation sont faibles, ce qui est cohérent avec le caractère surconsolidé des Argiles Plastiques et le caractère décroissant de la contrainte moyenne mobilisée. Cela conforte par ailleurs le choix d'une modélisation en conditions drainées dans cet horizon.

7. Conclusions

L'instrumentation avancée de la gare Fort d'Issy-Vanves-Clamart a permis une description détaillée du comportement du soutènement grâce au suivi simultané de la déformée de la paroi, du profil du moment fléchissant, des efforts dans les appuis et de la pression à l'interface sol/écran. L'analyse des mesures et leur confrontation avec les résultats des

modélisations aux coefficients de réaction et aux éléments finis 2D et 3D ont permis de tirer plusieurs enseignements.

La déformée de l'écran ainsi que le profil du moment fléchissant mesurés sont reproduits de manière similaire par les 3 modélisations. Le rapport entre la flèche mesurée et la profondeur de l'excavation est de 4.10^{-4} ce qui renseigne sur le niveau de déformation du sol. Le moment fléchissant maximal mesuré représente 1/3 du moment de dimensionnement de la paroi.

La méthodologie proposée pour l'exploitation de l'effet de la température sur les butons a permis d'apprécier la performance satisfaisante des modélisations numériques en termes d'aptitude à reproduire la rigidité apparente de la paroi en interaction avec le sol soutenu.

L'analyse des efforts dans les appuis met en évidence une sous-estimation de ces efforts de l'ordre de -30% par MISS-K, en particulier pour les appuis supérieurs et les phases d'excavations profondes. Cet écart est justifié par la redistribution des pressions derrière l'écran non prise en compte par MISS-K lié à l'indépendance des ressorts. Les modèles EF reproduisent d'une manière satisfaisante les efforts mesurés. Au droit de l'Argile Plastique la décompression mesurée par la cellule de pression totale est de l'ordre de 62% de la valeur théorique $P_o - P_a$.

La faible évolution de la pression avec le temps observé en dehors des phases de terrassement a permis de conforter le choix d'une modélisation en conditions drainées de l'Argile Plastique dans le cas d'une excavation.

8. Remerciements

Les auteurs de l'article souhaitent remercier la Société du Grand Paris pour le financement de l'instrumentation avancée de la gare de Fort d'Issy-Vanves-Clamart. Un remerciement particulier est adressé à l'ensemble des partenaires ayant participé dans ce travail à savoir : Lerm, Gexpertise, Ifsttar, Geokon et Dimione. Les auteurs expriment également leur profonde gratitude pour le support précieux sur chantier des équipes travaux des entreprises Soletanche Bachy et Bouygues Travaux Publics.

9. Références bibliographiques

- Benz T. (2007). Small-strain stiffness of soils and its numerical consequences, Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart, 55, Ed Vermeer
- Gaba A.R., Simpson B., Powrie W., Beadman D.R., (2003). CIRIA C580 Embedded retaining walls – guidance for economic design
- Kastner R. (2018). Des tranchées couvertes aux tunnels urbains : l'apport des retours d'expérience organisés, Conférence de Coulomb, Comité Français de Mécanique des Sols et de Géotechnique
- Nejjar K. (2018). Mise en place d'une instrumentation avancée de la paroi moulée de la gare Fort d'Issy-Vanves-Clamart, Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, Champs-sur-Marnes
- Nejjar K. (2019). Comportement des parois de soutènement dans un contexte exceptionnel (grande profondeur, formations déformables, environnement sensible) : Application à la gare Fort d'Issy-Vanves-Clamart du Grand Paris Express et comparaison avec les mesures réalisées sur site, Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes
- Ng C.W.W. (1999). Stress paths in relation to deep excavations, Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, Vol. 125, No. 5, May, pp. 357-363, ASCE
- Plaxis (2019), Material Models manual
- Schmitt P. (1995). Méthode empirique d'évaluation du coefficient de réaction du sol vis à vis des ouvrages de soutènement souples, Revue Française de géotechnique, 71, pp. 3-10