

# **Rétro-analyse de l'excavation profonde de la gare Fort d'Issy-Vanves-Clamart du Grand Paris Express**

## ***Back analysis of the deep excavation of Fort d'Issy-Vanves-Clamart metro station of the Grand Paris Express***

Khadija NEJJAR, *Terrasol, Paris, France*

Daniel DIAS, Laboratoire 3SR Université Grenoble Alpes, *Grenoble, France*

Gilles CHAPRON, *Terrasol, Paris, France*

Fahd CUIRA, *Terrasol, Paris, France*

Hervé LE BISSONNAIS, *Terrasol, Paris, France*

### **Résumé**

La gare de Fort d'Issy-Vanves-Clamart constitue le premier retour d'expérience complet d'une excavation profonde du Grand Paris Express. L'instrumentation classique de cette excavation profonde de 32 m a été renforcée par une instrumentation avancée dans l'objectif d'apporter une description complète du comportement du soutènement. Les dispositifs mis en place ont permis de mesurer à la fois les déplacements et les moments fléchissants dans les parois moulées (équipées d'inclinomètres et de fibre optique), les efforts dans les appuis provisoires (jauges de déformation) et la pression à l'interface sol/paroi (cellules de pression totale et interstitielle).

Le présent article présente une rétro analyse 2D réalisée avec la méthode aux coefficients de réaction et la méthode des éléments finis (EF). La déformée et le moment de la paroi ont été calés sur les mesures de l'instrumentation in situ avec les deux méthodes. Cela a permis de confirmer les paramètres géotechniques des couches de sol à retenir. La comparaison des efforts dans les appuis et la pression à l'interface sol/paroi a permis de mettre en évidence les différences entre les résultats des deux méthodes. La méthode des coefficients de réaction sous-estime les efforts notamment des appuis supérieurs et pour les phases d'excavations profondes. Ce constat est relié à la non prise en compte de la redistribution des pressions derrière l'écran liée à l'indépendance des ressorts. Le modèle EF reproduit d'une manière satisfaisante les efforts mesurés avec une légère surestimation.

En conclusion, la performance du système de soutènement est évaluée en comparant les mesures des efforts et sollicitations mobilisées avec les valeurs de dimensionnement.

### **Abstract**

Fort d'Issy-Vanves-Clamart is one of the first feedbacks of a deep excavation from the Grand Paris Express. A conventional monitoring of this 32 m deep excavation was enhanced by advanced devices in order to obtain a full description of the retaining wall behavior. The installed devices allow to measure both the wall displacements and bending moments (inclinometers and optical fiber), strut loads and temperature (strain gauges) and earth pressure at the interface soil/wall (pressure cells).

The present article presents a back analysis with the subgrade reaction method and the finite element method. Both methods reproduce satisfactory the wall displacements and bending moments compared to measurements. This allows to confirm the considered soil parameters. The strut forces and earth pressure highlight differences between the two methods. Indeed, the subgrade reaction method underestimates the upper strut forces especially for deep excavation phases. This finding is related to the fact that the soil pressure is not redistributed behind the wall because of the springs independency which is assumed by this method. The finite element model allows to reproduce the strut forces with a slight overestimation compared with the monitoring data.

In conclusion, the performance of the support system is assessed by comparing the measured strut forces and bending moments mobilised with the real system capacity.

# Rétro-analyse de l'excavation profonde de la gare Fort d'Issy-Vanves-Clamart du Grand Paris Express

## ***Back analysis of the deep excavation of Fort d'Issy-Vanves-Clamart metro station of the Grand Paris Express***

Khadija NEJJAR, *Terrasol, Paris, France*

Daniel DIAS, Laboratoire 3SR Université Grenoble Alpes, *Grenoble, France*

Gilles CHAPRON, *Terrasol, Paris, France*

Fahd CUIRA, *Terrasol, Paris, France*

Hervé LE BISSONNAIS, *Terrasol, Paris, France*

### **1 Introduction**

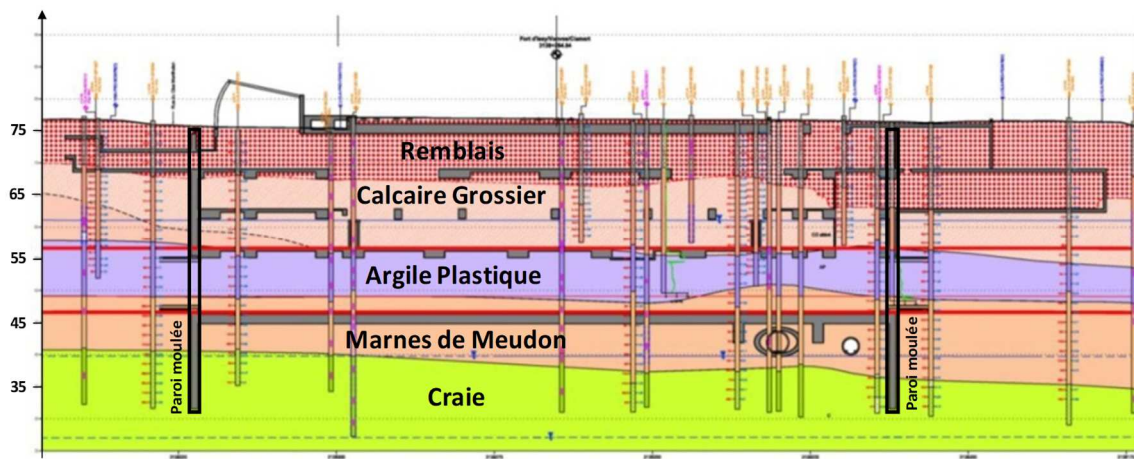
Dans le cadre du Grand Paris Express, la réalisation de nouvelles gares de métro nécessite de creuser des excavations profondes qui sortent du cadre conventionnel des soutènements classiques de par leurs dimensions et leur localisation au droit d'avoisinants vulnérables. Le suivi du comportement réel du soutènement de ces fouilles exceptionnelles est essentiel pour évaluer la performance des méthodes de prédiction utilisées dans l'objectif d'optimiser les dimensionnements futurs d'excavations similaires. Toutefois, la pertinence de ce suivi repose sur la fiabilité des dispositifs d'instrumentation mis en place et leur capacité à mesurer différentes grandeurs intéressant le géotechnicien à savoir les déplacements et les moments fléchissants de l'écran, les efforts dans les appuis et la pression du sol 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 (Dong 2014), très peu présentent à la fois des mesures de déplacement et d'efforts (Kastner 2018) et encore plus rare celles qui présentent la mesure de la pression à l'interface sol/écran (Ng 1999).

L'instrumentation de la gare de Fort d'Issy-Vanves-Clamart a pour objectif de mesurer les 4 grandeurs d'intérêt susmentionnées afin de fournir une description complète du comportement de l'écran. En effet, le déplacement de la paroi moulée formant l'enceinte de la gare est mesuré à l'aide de tubes inclinométriques et le profil du moment fléchissant le long de la paroi à l'aide des déformations axiales d'une fibre optique placée sur deux barres d'armatures longitudinales. Les efforts dans les appuis sont mesurés à l'aide de jauges de déformation soudées sur les boutons métalliques et la pression appliquée par le sol est accessible grâce à la mise en place de cellules de pression à l'interface sol/paroi (Nejjar 2019).

Le présent article présente une rétro-analyse réalisée à partir des mesures de l'instrumentation dans l'objectif d'une part, de retrouver les paramètres géotechniques d'entrée à considérer pour reproduire fidèlement le comportement observé, et d'autre part, de fournir une comparaison entre les résultats issus de la méthode des coefficients de réaction (notée MISS-K) et ceux de la méthode des éléments finis (notée EF). Ce retour d'expérience complet permet de montrer les différences entre ces deux méthodes de modélisation notamment du point de vue de l'interaction sol/structure et des effets de voûte.

### **2 Contexte géologique**

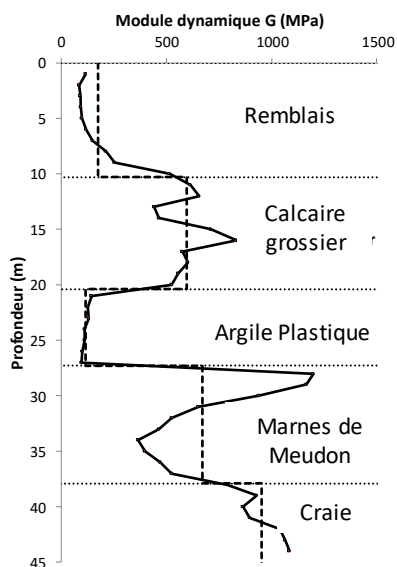
La gare Fort d'Issy-Vanves-Clamart (FIVC) est la première gare de la ligne 15 sud à démarrer en travaux, elle est située au sud-ouest de Paris dans le contexte du bassin sédimentaire parisien. Le fond de fouille se trouve dans les Marnes de Meudon à 32 m de profondeur. La stratigraphie est composée d'une couche de Remblais (RB) de 10 m, d'une couche de Calcaire Grossier (CG) de 11 m et une couche d'Argile Plastique (AP) de 8 m. L'enceinte de la gare est constituée d'une paroi moulée de 1,2 m d'épaisseur dont la fiche est ancrée dans la Craie à 40 m de profondeur (Figure 1).



**Figure 1 : Profil géologique au droit de la gare FIVC**

La nappe du Calcaire Grossier est située à la cote 61m NGF (16m de profondeur) correspondant à 5 m au-dessus du toit de l'Argile Plastique qui constitue un horizon étanche pour cette nappe. La nappe de la Craie est plus profonde que le pied de la paroi. Le projet est donc concerné par un faible profil de pression d'eau.

La Figure 2 présente le profil du module dynamique issu d'un essai cross-hole qui met en évidence le contraste de rigidité dû à la présence de la couche d'Argile Plastique entre le Calcaire Grossier et les Marnes de Meudon.



**Figure 2 : Profil du module de cisaillement dynamique issu du cross-hole**

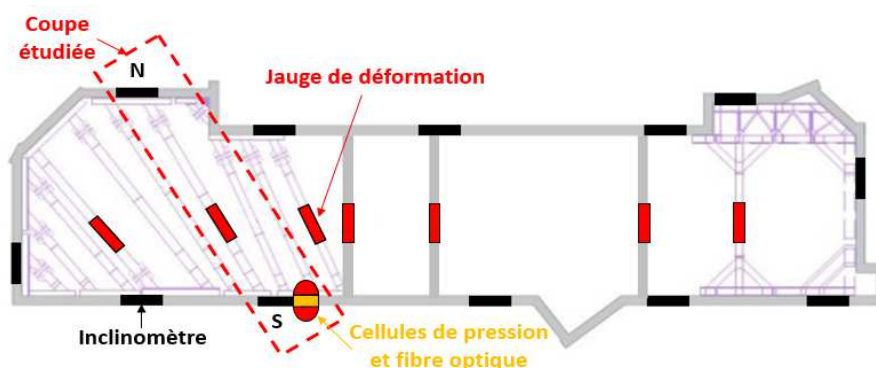
Le Tableau 1 récapitule les paramètres géotechniques retenus à partir de l'exploitation de la campagne de reconnaissance géotechnique pour les 5 couches de sol. Concernant le coefficient des terres au repos, la valeur issue de la corrélation de Mayne et Kulhawy (1982) avec un OCR de 2,2 et un angle de frottement de 16,5° conduit à une valeur de 1,06. Toutefois la valeur retenue est de 0,85. Cette valeur réduite de 20% correspond au déconfinement du terrain dû au creusement de la paroi moulée (Gaba et al. 2003).

**Tableau 1 : Paramètres géotechniques des couches de sol**

Couche de sol	Cote du toit (m NGF)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	w (%)	IP (%)	$E_M$ (MPa)	$\alpha$	$G_0$ (MPa)	$\phi'$ (°)	$c'$ (kPa)	$C_u$ (kPa)	OCR	$K_0$
Remblais	77	19	-	-	6	1/2	175	29	0	-		0,52
Calcaire Grossier	66	21	-	-	25	1/2	600	35	20	-		0,43
Argile Plastique	56	19	30	55	40	1	117	16,5	10	120	2,2	0,85
Marnes de Meudon	48	19,5	-	-	100	2/3	670	25	30	-		0,58
Craie	37	19,5	-	-	170	1/2	950	35	40	-		0,43

### 3 Instrumentation de la gare Fort d'Issy-Vanves-Clamart

La Figure 3 présente une vue en plan au niveau du premier lit de butons. Les dispositifs de mesure mis en place dans la gare comptent 12 tubes inclinométriques uniformément répartis et plusieurs jauges de déformations soudées sur les butons ou noyées dans les poutres butonnantes. La coupe étudiée dans le présent article est indiquée en pointillé, elle constitue une section renforcée en instrumentation dans laquelle la paroi est équipée d'inclinomètres (N et S), de fibre optique et de cellules de pression totales dans un même panneau. Le phasage de construction de la gare est de type « top and down » dans la partie centrale avec la mise en place des niveaux de génie civil à l'avancement de l'excavation et il est de type « bottom up » dans la zone est et ouest avec la mise en place de butons provisoires. Dans la coupe étudiée, la paroi nord N est supportée par des appuis provisoires (butons) et la paroi sud S est supportée par des appuis provisoire et des appuis définitifs.



**Figure 3 : Localisation sur une vue en plan des dispositifs d'instrumentation de la gare FIVC**

#### 3.1 Exploitation des mesures des jauges de déformation

Les jauges de déformations installées sur les butons provisoires permettent de mesurer la déformation du buton pour en déduire l'effort repris avec une fréquence d'une mesure par heure. De plus, elles mesurent également la température du buton. Ainsi en traçant l'évolution de l'effort en fonction de la température pendant une phase de terrassement on obtient le nuage de points de la Figure 4 dont l'épaisseur représente l'incrément d'effort encaissé par le buton pendant cette phase indépendamment de l'effet de la température. La pente de ce nuage correspond au produit  $\beta \cdot E \cdot S \cdot \alpha_T$  dans lequel  $E$  est le module de l'acier,  $S$  la section du buton,  $\alpha_T$  est le coefficient de dilatation de l'acier ( $1,2 \cdot 10^{-5}$ ) et un facteur  $\beta$  qui exprime la souplesse des extrémités du buton car ce dernier est relié à la paroi soutenant le sol ( $\beta=1$  extrémité rigide,  $\beta=0$  extrémité libre).

La mesure de l'effort retenue de l'instrumentation correspond à l'incrément  $\Delta F$  issue des courbes effort-température des jauges de déformations.

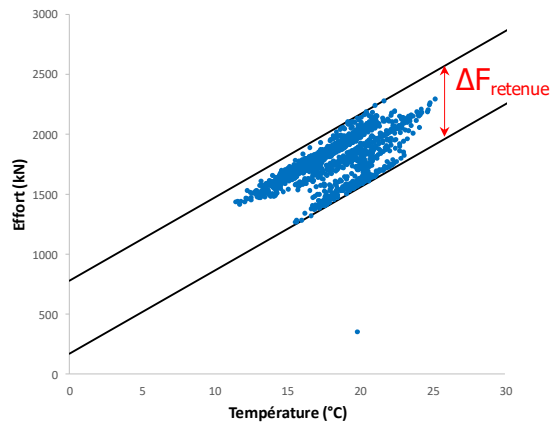


Figure 4 : Evolution de l'effort avec la température mesurée

### 3.2 Fibre optique

L'utilisation de la fibre optique pour l'auscultation des ouvrages géotechniques permet de réaliser des mesures de déformation de haute précision sur des linéaires importants. Elle a l'avantage d'être insensible aux champs électromagnétiques, résistante aux grandes températures et peu intrusive. Plusieurs retours d'expérience existent dans la littérature avec des comparaisons entre les résultats issus de la fibre et les mesures d'autres dispositifs couramment utilisés dans l'auscultation (Schwamb 2014, Mohamad et al. 2011). Compte tenu de sa fragilité, une protection de cette fibre doit être mise en place pendant la période de mesures.

Dans le cadre de la section renforcée de la gare FIVC, un panneau de paroi moulée a été équipé de 100 m de fibre optique disposés sous forme d'un U le long de deux barres longitudinales. L'objectif de cette disposition est de pouvoir mesurer la déformation axiale de la fibre comprimée et tendue de la paroi lors de son fléchissement suite à l'excavation. La différence entre ces deux déformations rapportée à la distance entre les barres correspond à la courbure. Le moment fléchissant peut ensuite être déduit en multipliant la courbure par le produit d'inertie  $EI$ . La technologie utilisée est celle de la rétrodiffusion de Rayleigh qui permet d'obtenir une précision de l'ordre du  $\mu\epsilon$  avec un pas de mesure de 10 cm.

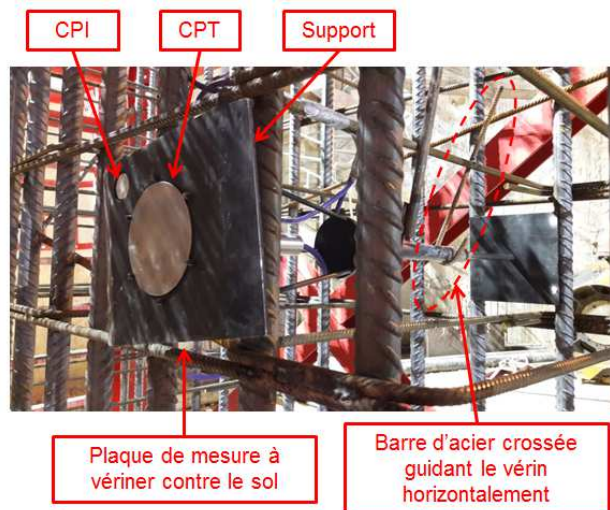
La Figure 5 illustre la mise en place de la fibre sur la première cage d'armature sur les 8 prévues pour l'équipement du panneau de paroi moulée.



Figure 5 : Illustration d'une cage équipée de fibre optique

### 3.3 Cellules de pression totale

La mesure de la pression du sol est réalisée à l'aide d'un couple de cellules de pression totale et interstitielle. Ces cellules sont installées sur un support composé d'une plaque d'appui soudée à la cage d'armature. Ce support est maintenu à l'horizontal à l'aide de deux armatures crossées. Une fois les cages d'armatures descendues dans la tranchée, les cellules sont plaquées contre le sol à l'aide d'une pompe hydraulique reliée au vérin.



**Figure 6 : Illustration du support des cellules de pression**

Les câbles sortant des deux cellules de pression sont connectés à une centrale d'acquisition. Cette dernière vient solliciter les cellules à une fréquence de 4 mesures par jour pour récupérer les données brutes renvoyées par les transducteurs sous forme de microvolts. Une formule de calibration est fournie par le constructeur pour chaque cellule afin de convertir les tensions mesurées en pression.

D'après Geokon (2017), la pression mesurée est légèrement différente de la pression du sol en l'absence de cellule. En effet, des effets de bords peuvent apparaître notamment dû à la différence de rigidité entre la cellule et le sol. Plusieurs essais ont été réalisés par le constructeur qui limite cette différence à +/- 15 % de la valeur mesurée. Ainsi les mesures des cellules sont données sous forme d'une plage correspondant à cette intervalle de précision.

Dans le cadre de la section renforcée de la gare FIVC, le panneau instrumenté a été équipé de 4 couples de cellules de pression totale et interstitielle, 3 du côté sol à l'arrière de l'écran (au niveau du Calcaire Grossier aux profondeurs 14 m et 19 m et au niveau de l'Argile Plastique à 26 m) et 1 côté fouille devant l'écran à 34,5 m de profondeur au niveau des Marnes de Meudon.

## 4 Rétro-analyse du comportement du soutènement

La rétro-analyse du comportement du système de soutènement a été réalisée à l'aide de deux méthodes de modélisation à savoir la méthode des coefficients de réaction dite MISS-K (logiciel K-Réa v4) et la méthode des éléments finis (logiciel Plaxis 2D). La présente rétro-analyse s'est basée sur les mesures de l'instrumentation obtenues à 27 m de profondeur d'excavation.

### 4.1 Détermination des paramètres d'entrée

Concernant la méthode MISS-K, la loi de comportement qui régit l'évolution de la pression du sol avec le déplacement de l'écran nécessite principalement la définition du coefficient des terres au repos  $K_0$ , des paramètres de cisaillement ( $\varphi'$ ,  $c'$ ) et du coefficient de réaction  $k_h$ . Ce dernier est calculé avec la formule de Schmitt (1995) qui fait intervenir le module pressiométrique.

Concernant la méthode EF, le comportement du sol est représenté avec le modèle HSSmall (Plaxis 2019) qui intègre la courbe de dégradation du module de cisaillement avec la déformation au cisaillement et considère un écrouissage plastique suivant deux surfaces de charge avec un critère de rupture par cisaillement de type Mohr-Coulomb. Les principaux paramètres d'entrée se composent d'un module de Young sécant à 50% de la résistance au cisaillement  $E_{50}$ , un module de Young de déchargement/rechargement élastique linéaire  $E_{ur}$  qui est généralement pris égal à 2 fois  $E_{50}$ , un module oedométrique  $E_{oed}$  qui est par défaut pris égal à  $E_{50}$ , le coefficient des terres au repos et les paramètres de cisaillement ( $\varphi'$ ,  $c'$ ). Deux paramètres complémentaires permettent de définir la courbe de dégradation, le module de cisaillement dynamique  $G_0$  et la distorsion à 70% de dégradation du module  $\gamma_{0.7}$ . Le module  $G_0$  est déduit des essais cross hole et le paramètre  $\gamma_{0.7}$  est évalué pour les sols normalement consolidés à partir de la formule de Benz (2007) dans laquelle  $\sigma'_1$  est la contrainte effective verticale à mi couche.

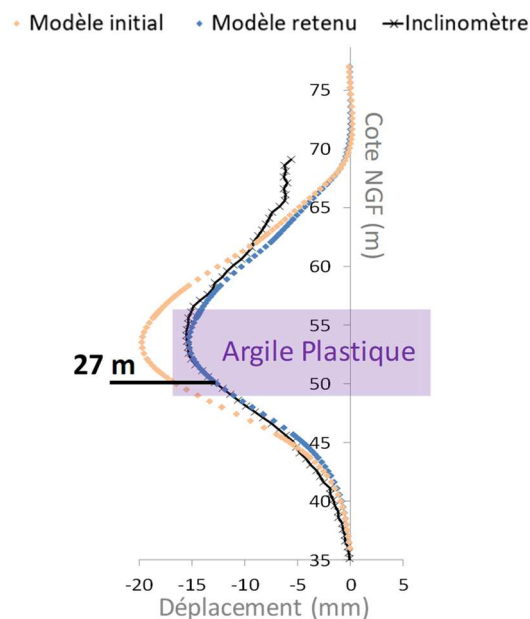
$$\gamma_{0.7} = \frac{3}{28G_0} (2c' (1 + \cos(2\varphi')) + \sigma'_1(1 + K_0)\sin(2\varphi')) \quad (1)$$

Pour l'Argile Plastique surconsolidée, le paramètre  $\gamma_{0.7}$  est calé à partir de la courbe de dégradation tracée à partir des modules  $E_{50}$  et de la déformation correspondante  $\gamma_{50}$  issus des essais triaxiaux.

Dans la présente rétro-analyse, le module  $E_{50}$  est pris égal à  $2,5 E_M/\alpha$ . La prise en compte de cette hypothèse permet d'obtenir des déformées similaires entre les deux modélisations MISS-K et EF. Le module  $E_{ur}$  est pris égal à 2 fois le module  $E_{50}$  et le module  $E_{oed}$  est pris égal à  $E_{50}$ . Aucune dépendance du module avec la contrainte n'est considérée ( $m=0$ ).

En résumé, 4 paramètres sont déterminés : le module pressiométrique, les paramètres de cisaillement (cohésion et angle de frottement) et le coefficient des terres au repos. La rétro-analyse effectuée ne concerne que les paramètres d'entrée de l'Argile Plastique étant donné que la flèche de l'écran est située au droit de cette couche.

Les 3 paramètres d'entrée sont déterminés à partir d'un calage sur la déformée mesurée dans la zone centrale de la gare qui est proche d'une configuration en déformations planes. L'amplitude de la déformée calculée avec les paramètres initiaux est 25% plus importante que celle mesurée (Figure 7). Pour reproduire de manière plus précise la déformée mesurée, il a été nécessaire d'augmenter le module pressiométrique avec le module dynamique et les paramètres de cisaillement. Cette augmentation est limitée par le coefficient de variation COV afin de respecter les propriétés de l'Argile Plastique. En effet, l'indice de plasticité de cet horizon ne permet pas d'envisager un angle de frottement trop élevé et l'état de surconsolidation permet d'avoir une cohésion plus importante mais limite le coefficient des terres au repos à une borne inférieure de l'état normalement consolidé.



**Figure 7 : Comparaison entre le modèle initial et retenu dans la zone centrale à 27 m de profondeur**

Le Tableau 2 récapitule les valeurs initiales des 3 paramètres, leurs coefficients de variation et les valeurs retenues pour la modélisation de la coupe étudiée au droit de la section d'instrumentation renforcée.

**Tableau 2 : Détermination des paramètres d'entrée de l'Argile Plastique**

	Valeur initiale	COV (%)	Contrainte	Valeur retenue
$E_M$ (MPa), $G_0$ (MPa)	40 MPa, 117 MPa	45	-	60, 160 MPa
$\varphi'$ (°), $c'$ (kPa)	16,5, 10kPa	24	Cohérente avec IP (48%)	18°, 20 kPa
$K_0$	0,85	29	$>K_0^{NC}$	0,85

## 4.2 Déplacement de la paroi

La Figure 8 présente une comparaison entre les déformées mesurées et calculées avec les deux méthodes de modélisation MISS-K et EF à 27 m de profondeur. Les appuis provisoires sont représentés par un T horizontal et les appuis définitifs qui se trouve au niveau du panneau sud S sont sous forme d'un rectangle.

On remarque que le calage des paramètres d'entrée est pertinent étant donné que les deux méthodes reproduisent la déformée mesurée en termes d'allure et d'amplitude. L'inclinomètre N mesure une déformée plus faible à cause de sa localisation à proximité de zones anguleuses de la gare. Le seuil de pilotage du projet (seuil d'alerte) est fixé à 20 mm (limite de l'échelle du graphe) correspond au minimum entre 125% de la déformée calculée et 90% de la déformée contractuelle (30 mm). On observe que le déplacement de la paroi représente 50% du seuil de pilotage et 30% de la valeur contractuelle. Le rapport entre la flèche mesurée et la profondeur de l'excavation est  $4 \cdot 10^{-4}$ , ce qui permet d'appréhender le niveau de déformation du sol.

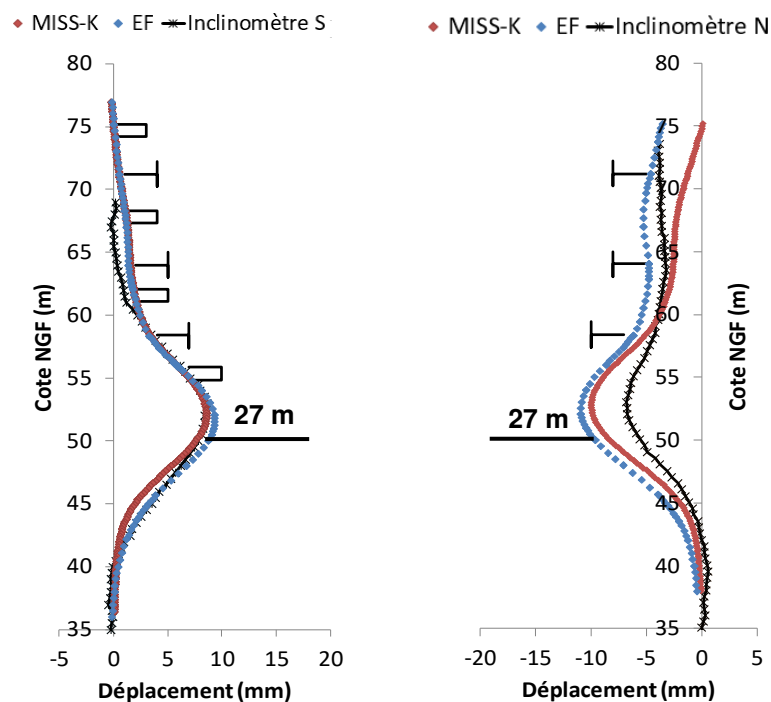


Figure 8 : Déplacement de l'écran à 27 m de profondeur d'excavation

## 4.3 Moments fléchissants dans la paroi

La Figure 9 présente le profil de moment fléchissants le long de la paroi mesuré à partir de la fibre optique en comparaison avec les résultats des modélisations. On remarque que l'allure du profil expérimental est reproduite de 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.



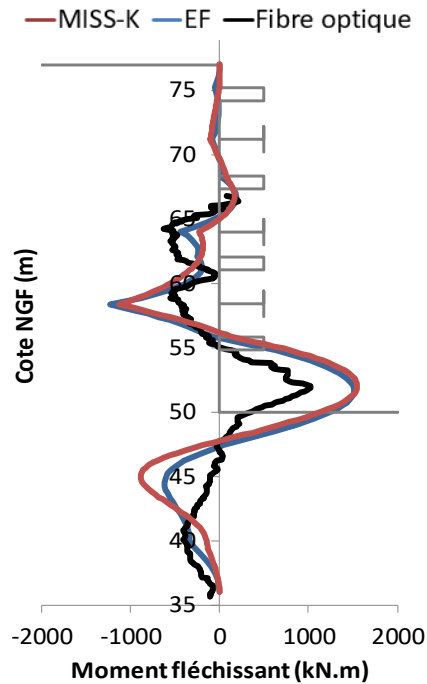


Figure 9 : Moment fléchissant de la paroi à 27 m de profondeur d'excavation

#### 4.4 Efforts dans les appuis

Pour les efforts dans les appuis, une divergence existe entre les résultats des deux méthodes de modélisation.

La Figure 10 présente l'évolution de la somme des efforts des 3 appuis provisoires en fonction de la profondeur d'excavation. On remarque que les efforts prévus par MISS-K sont jusqu'à 30% plus faibles et les efforts prévus par EF sont 8% plus importants que les valeurs mesurées.

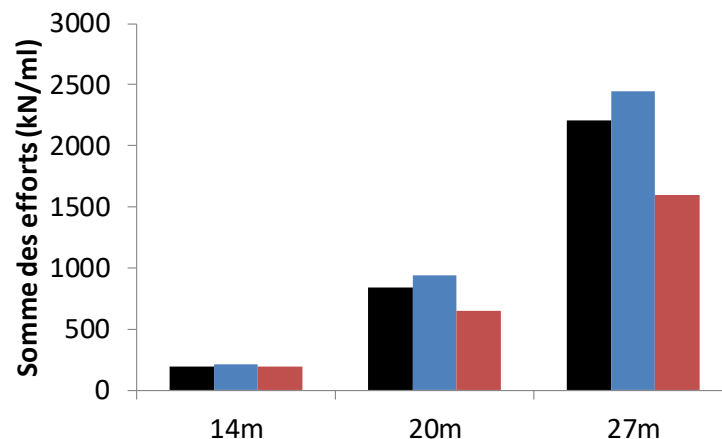


Figure 10 : Evolution de la somme des efforts des appuis provisoires avec la profondeur d'excavation

La Figure 11 présente l'évolution des efforts de chacun des appuis en fonction de la profondeur de l'excavation. On remarque que MISS-K sous-estime globalement les efforts, de plus la tendance de l'évolution de l'effort avec l'excavation est inverse en comparaison avec les mesures. En effet, pour les appuis B1 et B2, MISS-K prévoit des efforts qui diminuent à mesure que s'approfondit l'excavation alors que le modèle EF reproduit les mesures des jauges de déformation en mettant en évidence des efforts qui continuent à augmenter avec l'avancement de l'excavation ou se stabilisent.

Ce chargement observé des appuis traduit un mécanisme de report de charge par effet de voûte qui peut s'expliquer par la redistribution des contraintes derrière l'écran. En effet, la zone excavée étant plus souple que la zone des appuis, ces derniers forment des points durs de concentration des contraintes. La méthode MISS-K considère que les ressorts modélisant l'interaction sol-écran sont indépendants les uns des autres, ainsi le contraste de rigidité le long de l'écran est sans incidence sur les appuis. En revanche, la méthode EF représente le sol sous forme d'un milieu continu et permet ainsi la redistribution des contraintes derrière l'écran par mobilisation du cisaillement entre les couches du sol. Ce phénomène de report de charge est d'autant plus important que l'excavation est profonde et les appuis les plus sollicités sont les appuis supérieurs qui ont été mis en place les premiers et subissent les reports de charge de l'ensemble des phases d'excavation ultérieures. La Figure 11 illustre ce phénomène avec l'appui B1 qui présente l'écart le plus important entre les mesures et la méthode MISS-K.

Le seuil de pilotage du chantier (seuil d'alerte) correspond à 125% de la valeur de calcul multiplié par un facteur de prorata correspondant à l'effet de température. Les modélisations réalisées ne prennent pas en compte l'effet de la température. La méthodologie d'exploitation des mesures de jauges de déformation présentée au paragraphe 3.1 permet de s'affranchir de la température et de retenir la valeur principalement due à l'excavation. On remarque que le seuil sans le facteur de la température est assez proche des mesures. Toutefois, 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).

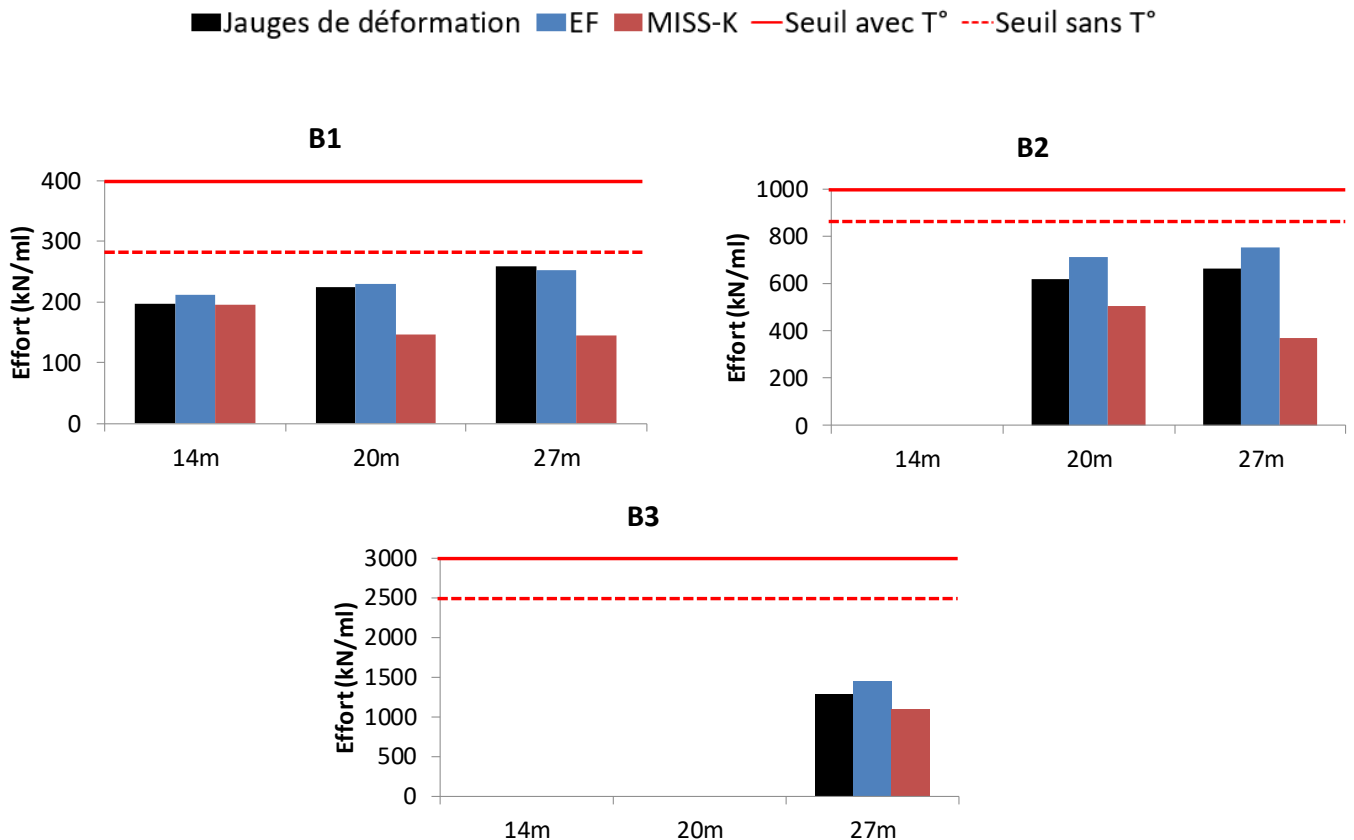


Figure 11 : Evolution des efforts de chaque appui provisoire avec de la profondeur de l'excavation

#### 4.5 Pression à l'interface sol/paroi

La Figure 12 présente le diagramme de variation de la pression totale du sol derrière et devant l'écran. 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.

Les diagrammes de pression derrière l'écran corroborent l'analyse faite sur les efforts dans les appuis. En effet, on remarque que le modèle EF met en évidence une décompression au droit de la zone excavée de l'Argile Plastique accompagnée de deux compressions dans la partie supérieure et en pied de l'écran. Cette redistribution des contraintes est mesurée par les cellules de pression derrière l'écran, notamment la première cellule au droit du Calcaire Grossier qui montre une compression. Toutefois l'amplitude des pressions est plus faible que celle prédite par les modélisations. La compression visible au pied de l'écran est justifiée par le fait qu'il s'agit aussi d'une zone plutôt rigide en comparaison avec la zone excavée au milieu de l'écran. Le diagramme de pression derrière l'écran issu du modèle MISS-K présente uniquement une décompression le long de l'écran.

Au milieu de la couche d'Argile Plastique, l'amplitude de la décompression mesurée par la cellule représente 62 % de la décompression théorique  $P_o - P_a$  où  $P_o$  est la pression des terres au repos et  $P_a$  est la poussée active.

Les diagrammes de pression devant l'écran mettent en évidence une compression en pied de paroi pour le modèle EF et l'inverse pour le modèle MISS-K. La cellule de pression mesure une compression importante allant jusqu'à atteindre la pression de butée des Marnes de Meudon. L'importance de cette compression laisse penser que le toit de la Craie est plus haut et que la cellule est plutôt située devant la Craie. Le cas échéant, la compression mesurée représenterait 30% de la compression théorique  $P_b - P_o$  où  $P_o$  est la pression des terres au repos et  $P_b$  est la butée limite de la Craie. Cette hypothèse semble plausible au vu du profil géologique au droit de la gare avec un toit variable de la Craie (Figure 1).

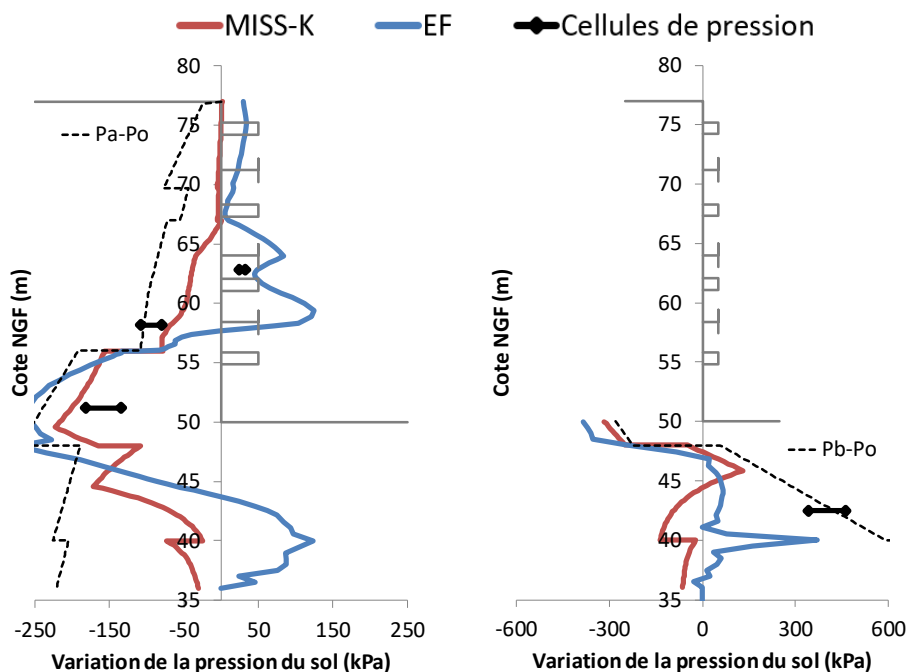


Figure 12 : Diagramme de la variation de la pression totale du sol derrière l'écran (à gauche) et devant l'écran (à droite)

## 5 Conclusion

L'instrumentation de la gare Fort d'Issy-Vanves-Clamart permet une description détaillée du comportement du soutènement. L'utilisation de dispositifs avancés tels que la fibre optique et les cellules de pression permet également d'obtenir la déformée de l'écran, le profil de moment fléchissant dans la paroi et la pression à l'interface sol/écran avec une bonne précision.

La rétro-analyse réalisée pour une excavation de 27 m à l'aide des deux méthodes de modélisation, à savoir MISS-K et EF, a permis de déterminer les paramètres d'entrée de l'Argile Plastique en termes de module pressiométrique, de paramètres de cisaillement et de coefficient des terres au repos. La déformée de l'écran ainsi que le profil du moment fléchissant mesurés sont reproduits de manière similaire par les deux méthodes. En revanche les efforts dans les appuis semblent être sous-estimés par MISS-K (environ 30 %) et 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. Ce phénomène est lié à l'indépendance des ressorts dans cette méthode de modélisation. Le modèle EF reproduit d'une manière satisfaisante les efforts mesurés avec une faible surestimation de 8%. En effet, ce modèle représente le sol sous forme d'un milieu continu et intègre donc les reports de charge par mobilisation du cisaillement dans le sol. Cette redistribution des contraintes derrière l'écran est corroborée par les mesures des cellules de pression à l'interface sol/écran.

La performance du soutènement de la gare peut être évaluée en comparant les valeurs mesurées avec les valeurs de dimensionnement. En effet, le moment fléchissant mobilisé représente 30% de la capacité de la paroi, le déplacement atteint 30% de la valeur contractuelle, les efforts repris par les appuis provisoires représentent 35% de la capacité des butons (effort de flambement) et la décompression au droit de l'Argile Plastique est de l'ordre de 62% de la valeur théorique Po-Pa.

## 6 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.

## 7 Références

- Benz T. (2007). Small-strain stiffness of soils and its numerical consequences, Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart, 55, Ed Vermeer
- Dong Y. (2014). Advanced finite element analysis of deep excavation case histories, thesis in University of Oxford, Department of engineering science
- Gaba A.R., Simpson B., Powrie W., Beadman D.R., (2003). CIRIA C580 Embedded retaining walls – guidance for economic design
- Geokon (2017), Instruction Manual, Model 4800 series vW Earth Pressure Cells
- 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
- Mayne P.W., Kulhawy F.H., (1982). Ko-OCR relationships in soil, Journal of Geotechnical Engineering Division, Proceedings of ASCE, Vol 108, N°GT6, pp 851-869
- Mikkelsen P.E. (2003). Advances in inclinometer data analysis. Symposium on field Measurements in Geomechanics, FMGM 2003, Oslo, Norway, September
- Mohamad H. Soga K., Pellew A., Bennet P.J. (2011), Performance monitoring of a secant-piled wall using distributed fiber optic strain sensing, Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, ASCE, December 2011, pp. 1236-1243
- 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
- Schwamb T. (2014). Performance monitoring and numerical modelling of a deep circular excavation, PhD thesis in Department of Engineering, University of Cambridge