

Mise en place d'une instrumentation avancée de la paroi moulée de la gare Fort d'Issy Vanves Clamart

Advanced instrumentation for the retaining wall of the metro station Fort d'Issy Vanves Clamart

Khadija NEJJAR¹, Daniel DIAS², Gilles CHAPRON¹, Fahd CUIRA¹, Hervé LE BISSONNAIS¹, Vincente FLUTEAUX³

¹ TERRASOL, Paris, France

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

³ Société du Grand Paris, Paris, France

RÉSUMÉ – La paroi moulée de la gare Fort d'Issy Vanves Clamart a une profondeur de 40 m pour soutenir une hauteur excavée de 30 m, dans un contexte géologique fortement contrasté avec la présence d'une couche d'argile plastique surconsolidée. Une instrumentation avancée, composée de cellules de pressions totales et de fibre optique a été mise en place afin de mieux comprendre le comportement de cette paroi.

ABSTRACT – The retaining wall of the station Fort d'Issy Vanves Clamart is 40 m depth and supports a 30 m excavation in a contrasted geological context with an overconsolidated plastic clay. An advanced instrumentation was set up, composed of pressure cells and optic fiber in order to better understand the behavior of the retaining wall.

1. Introduction

L'instrumentation des ouvrages géotechniques est essentielle pour mieux appréhender leur comportement, notamment dans les contextes exceptionnels pour lesquelles les pratiques courantes de dimensionnement sont à leurs limites, ce qui rend le recours à la méthode observationnelle souvent indispensable. La qualité de l'instrumentation repose d'une part sur la qualité des dispositifs mis en place et, d'autre part, sur la qualité du traitement réservé aux mesures brutes en termes de corrections nécessaires et d'appréciation des marges d'erreur.

Pour les projets courants, on se cantonne à mesurer le déplacement à l'aide de tubes inclinométriques. Pour des parois de grande profondeur, en plus des difficultés de réalisation, les mesures inclinométriques sont plus souvent entachées d'erreurs. Elles peuvent être causées, par exemple, par la durée trop courte attribuée par l'opérateur à la stabilisation de la sonde à chaque pas de mesure (cette tâche étant pour le moins répétitive sur la grande longueur), ou par l'incertitude de position de la sonde dans le tube causée par la non verticalité de celui-ci (Mikkelsen 2003).

Or, le dimensionnement d'une paroi moulée repose sur l'évaluation de son déplacement, de son moment fléchissant et de la pression appliquée par le sol. Une instrumentation complète devrait chaque fois permettre d'accéder à ces trois informations.

C'est ce type d'instrumentation avancée qui a été mise en place dans les parois de la gare de Fort d'Issy Vanves Clamart (FIVC), à la fois pour accéder à ces trois informations, mais également dans le but d'améliorer la précision des mesures de déplacements.

2. Contexte et enjeux du projet

La gare de FIVC est la première gare en travaux du Grand Paris Express. L'enceinte de la gare est constituée de parois moulées, qui seront donc les premières à se confronter au contexte géologique particulier de la ligne 15 sud et notamment à la couche d'Argile Plastique surconsolidée située entre le Calcaire Grossier et les Marnes de Meudon. Le contexte géologique type est présenté en Figure 2. Les dimensions en plan de la gare sont de 110 m x 23 m pour une profondeur excavée de 32 m. La paroi moulée a une épaisseur de 1,2 m et s'ancre dans la Craie à 41 m de profondeur.

Les études de conception de la paroi ont mis en évidence des différences non négligeables entre les résultats d'une modélisation aux éléments finis et d'une modélisation classique aux coefficients de réaction. La Figure 1 souligne la différence en termes de diagramme de pression à l'arrière de l'écran et la distribution des efforts dans les éléments d'appuis qui en résulte, alors même que les déformées calculées sont similaires. Cette observation est loin d'être exotique, elle découle du phénomène classique d'effet de voûte produit par la mobilisation du cisaillement entre les couches de sol, effet qui ne peut pas être pris en compte par la modélisation aux coefficients de réaction. Négliger ce phénomène peut avoir des conséquences importantes, notamment la sous-estimation des efforts dans les éléments d'appuis et une mauvaise localisation du moment maximal.

De plus, la grande profondeur de l'excavation (32 m) en comparaison de sa largeur réduite (23 m) peut remettre en question l'exactitude de la butée mobilisable classique à cause de l'éventuelle interaction du sol compris entre les parois en vis-à-vis.

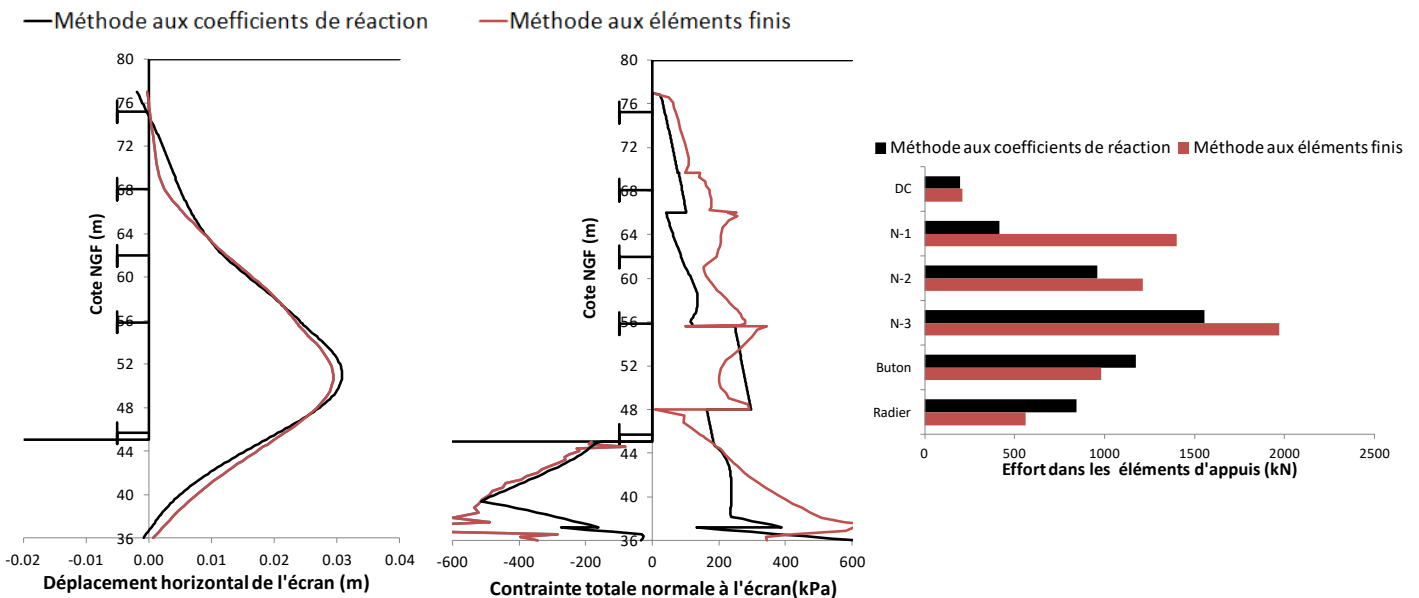


Figure 1 : Comparaison entre les résultats de la méthode aux coefficients de réaction et la méthode aux éléments finis à la dernière phase d'excavation

Pour tenter d'observer expérimentalement ces constats, une instrumentation avancée a été mise en place sur un panneau de la gare FIVC. Les objectifs sont : de pouvoir récupérer la pression du sol à l'arrière de l'écran pour identifier les concentrations de contraintes liées à l'effet de voûte ; de récupérer les déformations de la paroi pour mesurer les déplacements avec précision ; de localiser la cote du moment maximal ; de récupérer enfin la pression devant l'écran sous le fond de fouille pour mesurer la butée mobilisée.

3. Instrumentation avancée mise en place

L'instrumentation avancée mise en place est composée de 100 m de fibre optique et de 4 cellules de pressions totales combinées à 4 cellules de pressions interstitielles. La Figure 2 présente la localisation des cellules de pression et le cheminement en U réalisé pour la fibre optique.

La fibre optique permettra de mesurer avec précision le déplacement et le moment qui se développe dans la paroi. Les cellules de pression permettront de mesurer la pression qu'applique le sol sur la paroi. Le dispositif a évidemment été mis en place dans le but d'alimenter de manière fiable des rétro-analyses ultérieures.

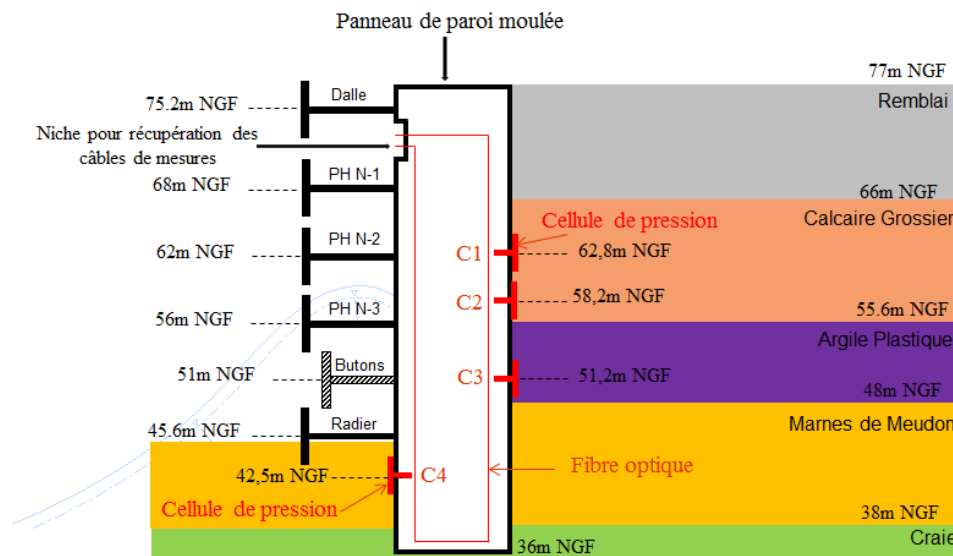


Figure 2 : Localisation des cellules de pressions et de la fibre optique dans le panneau instrumenté

3.1. Cellules de pressions totales et interstitielles

3.1.1. Principe de la mesure

La mesure de la pression totale et interstitielle se fait à travers deux dispositifs distincts : la cellule de pression totale (CPT) et la cellule de pression interstitielle (CPI). La différence des deux pressions permet d'avoir accès à la pression effective.

La CPT est une cellule circulaire de diamètre 150 mm et d'épaisseur 12 mm (Figure 3). Elle est constituée de deux plaques planes jointes à leurs périphéries et séparées par un espace fin rempli d'huile hydraulique. Lorsque le sol vient au contact de la plaque, l'huile monte en pression, un transducteur de pression convertit alors cette pression en un signal électrique qui est transmis par l'intermédiaire de câbles à la centrale d'acquisition.

La CPI est un tube de longueur 194 mm et de diamètre 32 mm (Figure 3) qui contient un transducteur de pression au centre. La première extrémité du tube au contact du sol est constituée d'une chambre de mesure avec filtre pour permettre le passage de l'eau tout en empêchant l'entrée des particules de sol. La deuxième extrémité est composée d'un joint de cloison et d'un joint de sortie de câble pour empêcher l'eau d'atteindre l'arrière du transducteur.



Figure 3 : Cellule de pression totale à gauche et cellule de pression interstitielle à droite

3.1.2. Méthodologie d'exploitation des mesures

Les câbles sortant des deux cellules de pression sont connectés à une centrale d'acquisition. Cette dernière vient solliciter la CPT et la CPI à une fréquence régulière choisie au préalable (horaire ou journalière) pour récupérer les données brutes renvoyées par les transducteurs (microvolts). Dans le cas présenté, une mesure est effectuée toutes les 6 heures (soit 4 mesures par jour). Deux formules de calibrations (régression linéaire et forme polynomiale plus précise) sont fournies par le constructeur pour chaque cellule afin de convertir les tensions mesurées en pression. Ainsi l'exploitation des mesures brutes en microvolts consiste à appliquer les formules de calibrations à l'aide d'un tableur.

En plus de la mesure de la pression totale, la CPT contient des thermistances qui permettent de mesurer la température à l'aide d'un pont de Wheatstone. Notons cependant que cette température n'est pas celle du sol car ces thermistances sont dans la partie interne, donc noyées dans le béton de la paroi.

3.1.3. Précision des mesures

La pression mesurée par la CPT ne correspond pas à la pression du sol comme si la cellule n'existait pas mais plutôt à une pression du sol légèrement modifiée par la présence de la cellule. Du fait des dimensions de la CPT, des effets de bords peuvent éventuellement apparaître et être accentués en fonction du rapport de rigidité entre la cellule et le sol. Une cellule plus rigide que le sol aurait alors tendance à surestimer la pression tandis qu'une cellule moins rigide que le sol aurait tendance à sous-estimer celle-ci (Figure 4). D'après Geokon (2017), plusieurs tests réalisés sur différents types de sol ont confirmé que la variation de la pression mesurée par rapport à la pression réelle du sol (en l'absence de la cellule) ne dépasse pas $\pm 15\%$. L'analyse des mesures ainsi que les rétro-analyses conduites ultérieurement doivent donc prendre en compte cet intervalle de confiance de 15% sur les mesures.

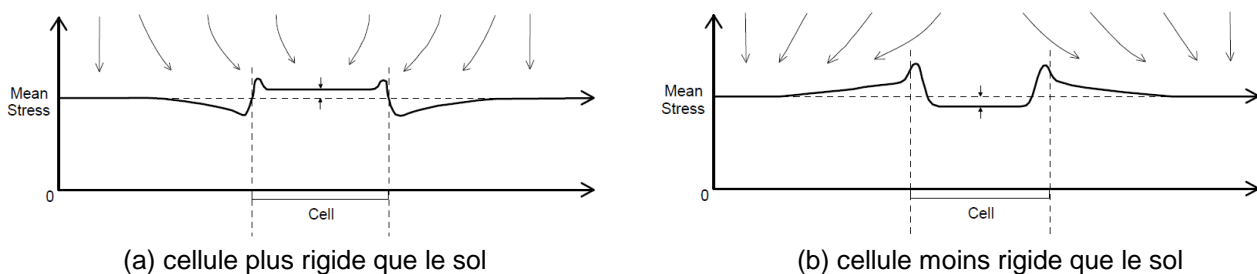


Figure 4 : Variation de la pression mesurée par la CPT en fonction de la rigidité du sol

3.2. Fibre optique

3.2.1. Principe de la mesure

L'utilisation de la fibre optique en génie civil permet d'ausculter des ouvrages de grandes dimensions (grand linéaire / surface). Elle a l'avantage d'être insensible à la radioactivité et aux champs électromagnétiques, d'être résistante aux fortes températures et peu intrusive.

La fibre optique est mise en place à la fois côté terre et côté fouille pour mesurer respectivement le comportement de la fibre comprimée et de la fibre tendue de la paroi lors de son fléchissement suite à l'excavation. Un interrogateur (appareil de mesure auquel est branchée la fibre) vient solliciter la fibre avec une onde lumineuse. Cette onde parcourt la fibre à la vitesse de la lumière divisée par l'indice de réfraction de la fibre. Elle interagit avec les particules de silice rencontrées sur son chemin et renvoie par rétrodiffusion une onde avec des caractéristiques différentes de l'onde incidente. Trois phénomènes d'interaction sont connus : la rétrodiffusion de Rayleigh, de Raman et de Brillouin (Figure 5). Plusieurs types d'interrogateur existent pour mesurer chacun des trois phénomènes. L'analyse d'une des rétrodiffusions permet d'identifier la variation de température et la déformation subie par la fibre optique.

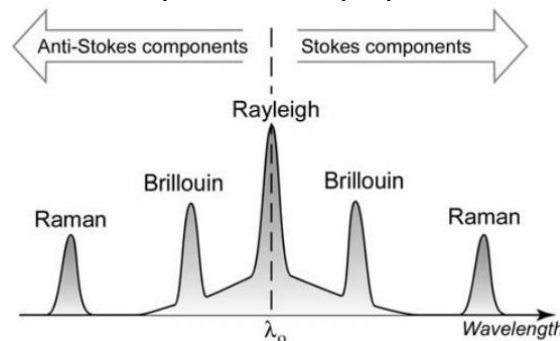


Figure 5 : Spectre de rétrodiffusion d'une onde monochromatique dans une fibre optique

Le Tableau 1 tiré de Sikali (2014) présente une comparaison entre les trois rétrodiffusions d'une onde lumineuse dans la fibre optique. Pour le diagnostic de notre paroi moulée, la rétrodiffusion de Rayleigh paraît la mieux adaptée du fait de la portée (la fibre mise en place a une longueur de seulement 100 m) et du point de vue de la résolution spatiale. Un pas de mesure faible est en effet nécessaire pour avoir un profil continu de déformation le long de la paroi. La précision de la déformation de la rétrodiffusion de Rayleigh est de plus la meilleure parmi les trois types de capteurs.

Cependant, la mesure reste également dépendante de la température. Une hypothèse couramment utilisée consiste à supposer que la paroi subit une variation de température négligeable et que la rétrodiffusion de Rayleigh est principalement due à la déformation de la fibre. Ainsi, les résultats de la mesure seront directement exploitables.

Tableau 1: Comparatif des performances des capteurs à fibres optiques

	Rayleigh	Brillouin	Raman
Résolution spatiale	< 3 mm	50 cm (5 cm)	1 m (25 cm)
Portée	70 m (2km)	10-50 km (3-5 km)	10-30 km (2 km)
Temps d'acquisition	30 s (10 kHz)	quelques minutes (Hz)	30 s-quelques minutes
Précision de la déformation ($\mu\epsilon$)	1	20	-
Précision de température ($^{\circ}\text{C}$)	0.1	1	0.1

3.2.1. Méthodologie d'exploitation des mesures

Une fois la fibre optique mise en place, une mesure de référence réalisée avant le début des terrassements est nécessaire. Elle constitue la signature de la fibre et rend compte de son historique de déformation depuis sa fabrication.

A chaque interrogation de la fibre, l'interrogateur traite le signal en considérant comme référence la signature de la fibre et fournit la déformation mesurée en fonction de l'abscisse curviligne de la fibre. La connaissance du cheminement des 100 m de fibre est indispensable afin de pouvoir convertir l'abscisse curviligne de la fibre fournie par l'interrogateur en profondeur de la paroi z . Une fois la conversion réalisée, on a ainsi accès aux incréments de déformation des deux fibres côté terre $\Delta\varepsilon_T(z)$ et côté fouille $\Delta\varepsilon_F(z)$.

Ces deux grandeurs constituent les données d'entrée pour remonter au moment et au déplacement de la paroi. Les formules suivantes issues des hypothèses de la théorie des poutres et également utilisées dans le même contexte par Schwamb (2014) et Mohamad et al. (2011) permettent de remonter à la courbure $\Delta\kappa$, au moment ΔM , à la rotation $\Delta\alpha$ et au déplacement Δu .

$$\Delta\kappa = \frac{\Delta\varepsilon_T(z) - \Delta\varepsilon_F(z)}{e} \quad (1)$$

$$\Delta M = EI \times \Delta\kappa \quad (2)$$

$$\Delta\alpha = \int \Delta\kappa dz + C_1 \quad (3)$$

$$\Delta u = \int \Delta\alpha dz + C_2 \quad (4)$$

L'espacement $e = 1.05m$ est la distance entre les deux fibres côté terre et côté fouille. Le produit d'inertie EI est calculé à partir des dimensions de la paroi et du module de béton pris égal à $E = 24GPa$. Les constantes C_1 et C_2 sont nulles du moment que l'on suppose que le pied de la paroi est fixe (pas de rotation ni de déplacement).

3.2.1. Précision des mesures

Le Tableau 1 présente une précision de la mesure de l'ordre $1\mu\varepsilon$. Cette précision dépend du pas de mesure choisi. La Figure 6 présente la déformation obtenue entre deux mesures réalisées successivement pour deux pas distincts de 5 et 10 cm. L'abscisse curviligne de la fibre est limitée entre 16 et 86 m, ce qui correspond au tronçon utile pour notre analyse.

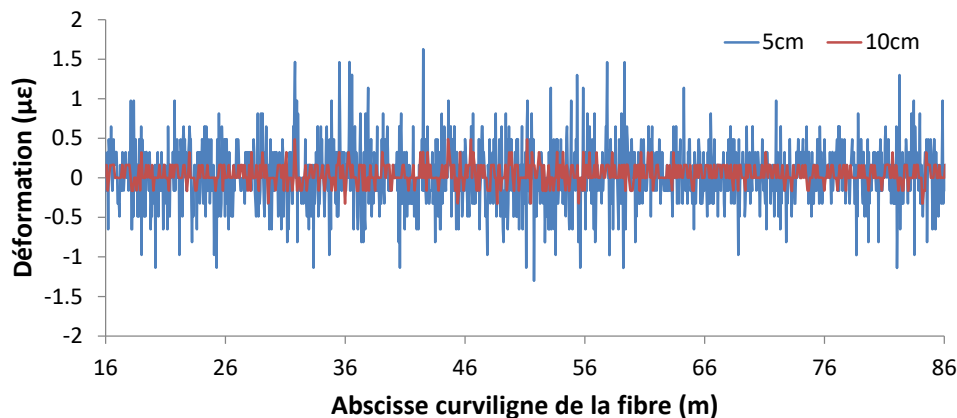


Figure 6 : Précision de la fibre optique pour deux pas de mesures différents

Pour un pas de 5 cm, on obtient une précision de $\pm 1.5 \mu\epsilon$ alors que pour un pas plus large de 10 cm, la précision est meilleure à $\pm 0.5 \mu\epsilon$. Ainsi, plus les pas sont petits, et plus la précision est faible. Il faut donc choisir un pas de mesure permettant de concilier une résolution intéressante pour la paroi (meilleure que le pas de 50 cm de l'inclinomètre) et une précision acceptable étant donné l'ordre de grandeur des déformations visées (une centaine de $\mu\epsilon$). Dans le cas d'étude présenté, les mesures ont systématiquement été effectuées avec deux pas de mesure : 5 et 10 cm.

4. Procédure d'exécution

Concernant les cellules de pression, le montage des CPT et CPI a été réalisé au préalable sur un support (Figure 7), puis les 4 supports ont été fixés dans les cages d'armatures par soudure sur la plaque support qui constitue le point fixe du vérin et en utilisant deux barres crossées pour guider horizontalement la course du vérin pendant la vérinage de la plaque de mesure contre le sol. L'ensemble des câbles d'acquisition est ensuite acheminé le long d'une armature longitudinale. Ils seront connectés à la centrale d'acquisition qui permettra la transmission des données à distance via le réseau GSM. Il est recommandé de réaliser cette connexion et de commencer à enregistrer les données avant le vérinage de la plaque de mesure contre le sol. Cela permet d'enregistrer la pression de la boue mesurée par les cellules qui servira à s'assurer de la position des cellules dans les profondeurs voulues. Ainsi, il est impératif de réaliser la configuration de la centrale d'acquisition au préalable pour démarrer la transmission des données dès le branchement des câbles. Enfin, le vérinage des plaques de mesures contre le sol est effectué à l'aide d'une pompe hydraulique. Une fois l'ensemble des plaques vérinées, le bétonnage peut démarrer.

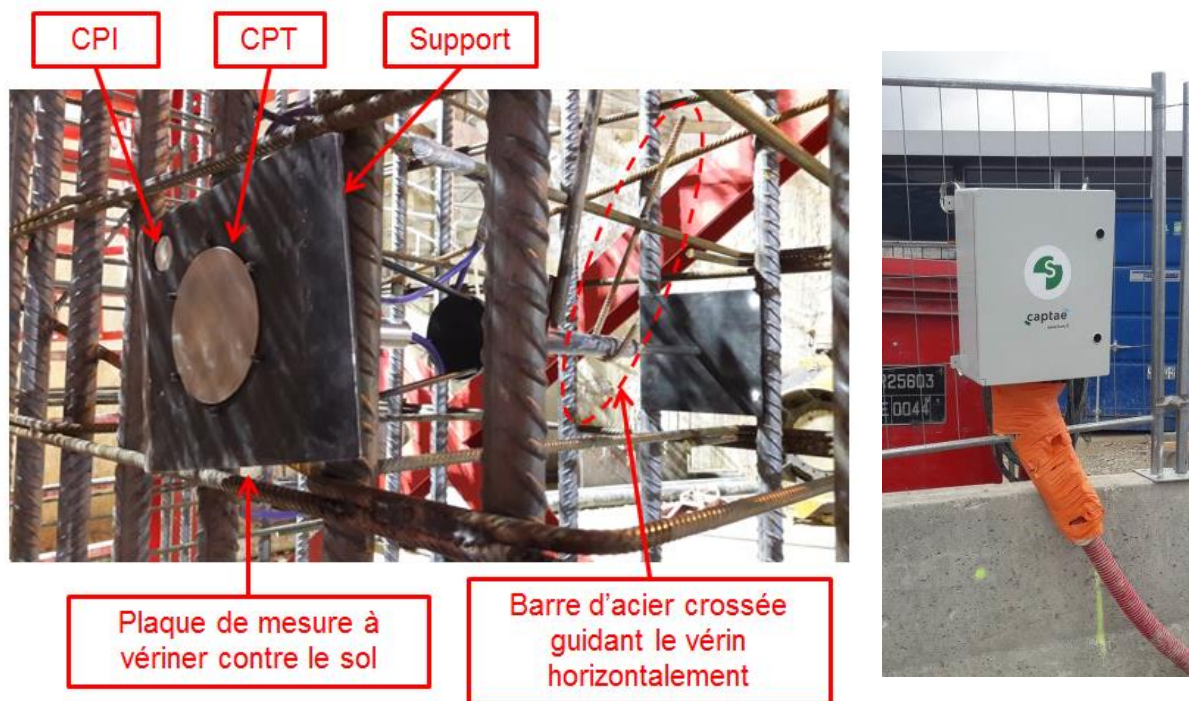


Figure 7 : Illustration du support des cellules de pression et du boîtier de la centrale d'acquisition

Concernant la fibre optique, les 100 m ont été répartis de part et d'autre du milieu du câble sur deux bobines contenant 50 m chacune de sorte à faciliter leur manipulation pendant l'exécution. Le cheminement de la fibre a été réalisé suivant deux barres longitudinales, côté terre et côté fouille, symétriquement, en choisissant de faire coïncider la moitié des 100 m au niveau de la moitié de l'épaisseur de la paroi dans le but de faciliter le traitement des données ultérieurement, notamment en termes de conversion d'abscisse curviligne de la fibre en profondeur de la paroi (Figure 8).



Figure 8 : Cheminement de la fibre optique à l'aide de deux bobines

5. Conclusions

L'instrumentation avancée de l'enceinte de la gare FIVC est constituée de cellules de pressions totales, de cellules de pression interstitielles et de fibre optique. Elle permet d'accéder à trois grandeurs intéressantes pour décrire d'une manière complète le comportement de la paroi, à savoir le déplacement, le moment et la pression appliquée par le sol. Ces trois grandeurs nous permettront de mettre en évidence le phénomène d'effet de voûte et de diagnostiquer l'éventuelle interaction du sol en butée dans le cas d'une excavation profonde et étroite.

La compilation des résultats obtenus à partir de cette instrumentation avancée et de ceux issus à partir de l'instrumentation classique (cibles topographiques, jauges de déformations sur les butons et inclinomètres) permettra, d'une part, de décrire de manière qualitative le comportement du soutènement de cette gare et, d'autre part, de fiabiliser les mesures obtenues pour alimenter les futures rétro-analyses. Les premières conclusions sont attendues à l'automne 2018.

6. Références bibliographiques

- Geokon (2017), Instruction Manual, Model 4800 series vW Earth Pressure Cells
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
Schwamb T. (2014), Performance monitoring and numerical modelling of a deep circular excavation, PhD thesis in Department of Engineering, University of Cambridge
Sikali Y. (2014), Capteurs à fibres optiques répartis par effet Brillouin : séparation de la dépendance à la température et à la déformation