

# CONTROLE DU SOULEVEMENT D'UN FOND DE FOUILLE PAR UNE AUSCULTATION RENFORCEE

## ENHANCED AUSCULTATION DURING AN EXCAVATION

Grégory MEYER<sup>1</sup>, Arnaud GUICHARD<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Responsable géotechnique L15S T2, SYSTRA, Paris, France

<sup>2</sup> Responsable adjoint à la Direction Technique projet L15S T2, SYSTRA, IdF, France

**RÉSUMÉ** – Lors des travaux de terrassement d'un ouvrage annexe sur le tronçon T2 du Grand Paris Express ligne 15 Sud, des mesures d'auscultation renforcées ont été intégrées au phasage d'excavation de l'ouvrage. Ainsi, des cellules de pressions interstitielles et des mesures extensométriques ont été mises en œuvre sous le fond de fouille afin de vérifier l'absence de soulèvement global du sol en fiche, bien que le calcul assure la stabilité de l'ouvrage en prenant en compte du frottement entre le bouchon argileux et les parois moulées. Ces mesures ont permis de conduire le chantier en toute sécurité et de réaliser le génie civil de l'ouvrage sans renforcement de sol lourd en termes de planning et de coût.

**ABSTRACT** – During the earthworks of an access shaft on the T2 section of the Grand Paris Express line 15 South, reinforced auscultation measures were incorporated during the excavation of the structure. Pore pressure cells and extensometric measurements were followed before installing the raft. These measures have helped to conduct the excavation safely without soil reinforcement.

### 1. Introduction

Lors des études d'exécution d'un ouvrage annexe de la ligne 15 Sud du Grand Paris Express, il a été remarqué en mission G3 une particularité au sein des Argiles Plastiques de l'Yprésien. Avec une partie sommitale (à partir de 53m de profondeur) classique constituée d'argile franche de couleur grise, cet horizon montrait un faciès de plus en plus limoneux pour finir graduellement en base de couche (jusqu'à 68m de profondeur) en un sable grossier de couleur sombre (figure 1). Les caractéristiques de ce sable ont été analysées en laboratoire et confirme la présence d'un sol grenu, avec un passant à 80 $\mu$ m de l'ordre de 5% et une VBS inférieure à 0,4.



Figure 1. Evolution sédimentométrique au sein de l'Argile Plastique (argile en haut, sable en bas).

Cette évolution sédimentométrique au sein de la couche devenait problématique puisqu'elle pouvait engendrer un risque de développement de pression hydrostatique élevée au sein de la fraction sableuse, la nappe sous-jacente de la Craie du Campanien étant fortement en charge. La limite entre l'horizon argileux et sableux a été fixée à environ mi-couche en fonction des résultats des essais en laboratoire. L'épaisseur résiduelle d'argile franche sous le fond de fouille de l'ouvrage, d'environ 7m d'épaisseur, aurait alors pu ne pas permettre de justifier la stabilité UPL de l'excavation.

Néanmoins, les études d'exécution ont montrées que pour un ouvrage de cette dimension (diamètre d'environ 18m), la stabilité était assurée en considérant un frottement du bouchon argileux sur les parois moulées. Par effet voûte, la sous-pression sous le bouchon argileux ne pouvait alors pas se produire. Dans une démarche de pilotage des travaux par les risques, SYSTRA a alors proposé la mise en œuvre d'une auscultation renforcée pour suivre les mouvements des terrains en profondeur, en corrélation avec les travaux de terrassement.

## 2. Géologie et auscultation réalisée

La géologie autour de cet ouvrage est constituée de la succession lithologique classique du Bassin Parisien : Marno-calcaire de Saint-Ouen, Sables de Beauchamp, Marnes et Caillasses, Calcaire Grossier, Sables de Cuise, Fausses Glaises, Argile Plastique, Marno-Calcaire de Meudon puis Craie du Campanien (figure 2). Le recoupement de ces terrains est partiel puisque la hauteur excavée est de 38m pour une profondeur de paroi moulée de 58,5m incluant une fiche hydraulique dans les Argiles Plastiques (16m de hauteur).

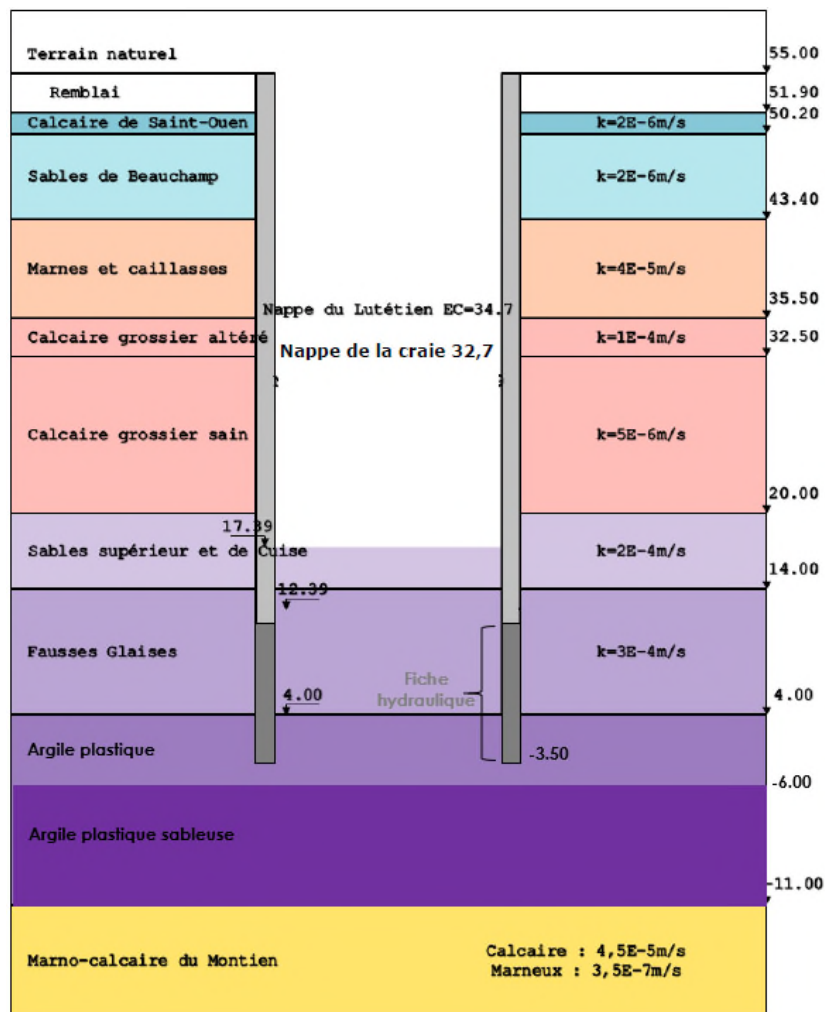


Figure 2. Coupe géologique de l'ouvrage.

L'auscultation a été réalisée directement dans l'enceinte de la fouille par la mise en œuvre de 2 forages extensométriques de 83m de profondeur avec 6 points de mesures chacun dont un ancrage dans la Craie (supposée constitutive de la partie fixe). L'un de ces forages a été placé au centre de la fouille, l'autre en bordure des parois moulées (à 1m de distance). A cela s'est ajouté un forage équipé de 4 cellules de pression interstitielle dont la gamme de mesure permettait de retranscrire la pression d'eau dans différents horizons (470 kPa attendus au maximum). Ces cellules de pression interstitielle étaient également disposées au centre de la fouille. L'auscultation a été posée avant le démarrage des terrassements et a été suivie pendant toute l'excavation et jusqu'à 1 mois après le coulage du radier. Lors des terrassements, des opérations de démontage et recâblage ont été nécessaires afin de ne pas garder des hauteurs de tubes problématiques, sans pour autant impacter les mesures (les bagues d'ancrage des extensomètres restant scellées dans le terrain - figure 3).

L'auscultation a été effective du 19/09/2019 au 31/02/2020 avec un pas de mesures toutes les 2 heures. En raison des difficultés de terrassements dans le Calcaire Grossier induré, certains câbles ont été endommagés lors des opérations de creusement. Cela a impliqué une perte de mesures partielle voire totale sur certains capteurs.

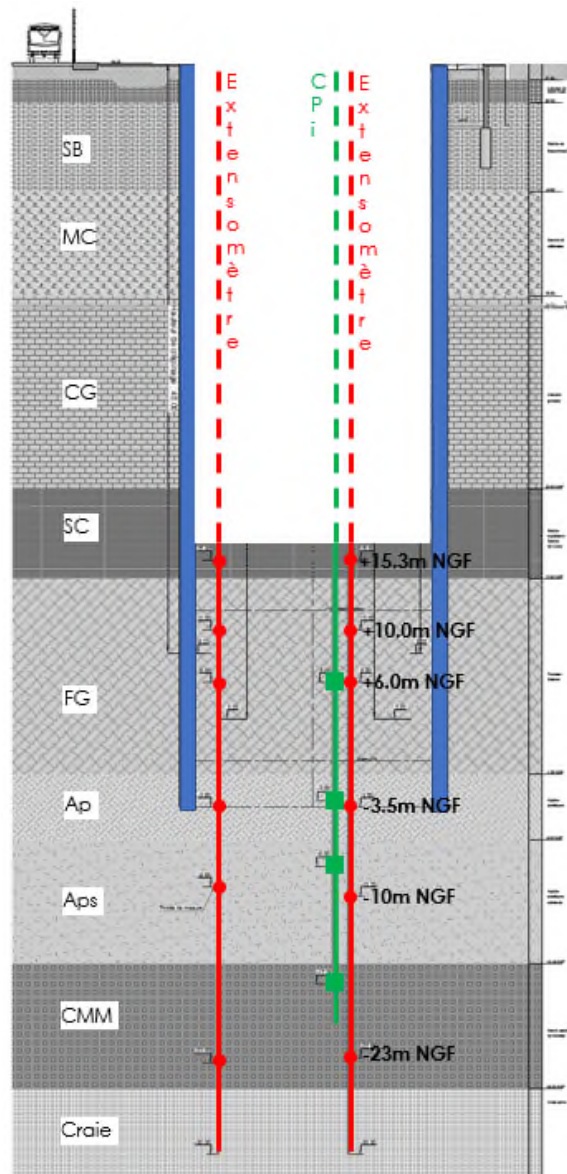


Figure 3. Vue en coupe de l'auscultation renforcée avec les points de mesures.

### 3. Résultats et interprétations

Les résultats sont présentés sur la figure 4 avec sur la partie haute les mesures au centre de la fouille et sur la partie basse les mesures à 1m des parois moulées.

Un constat immédiat est que les mesures du soulèvement dans les Marno-calcaires de Meudon (-23m NGF) sont inférieurs au millimètre et donc que l'ancrage dans la Craie constitue bien une partie fixe des extensomètres. Les mesures sont donc exploitables.

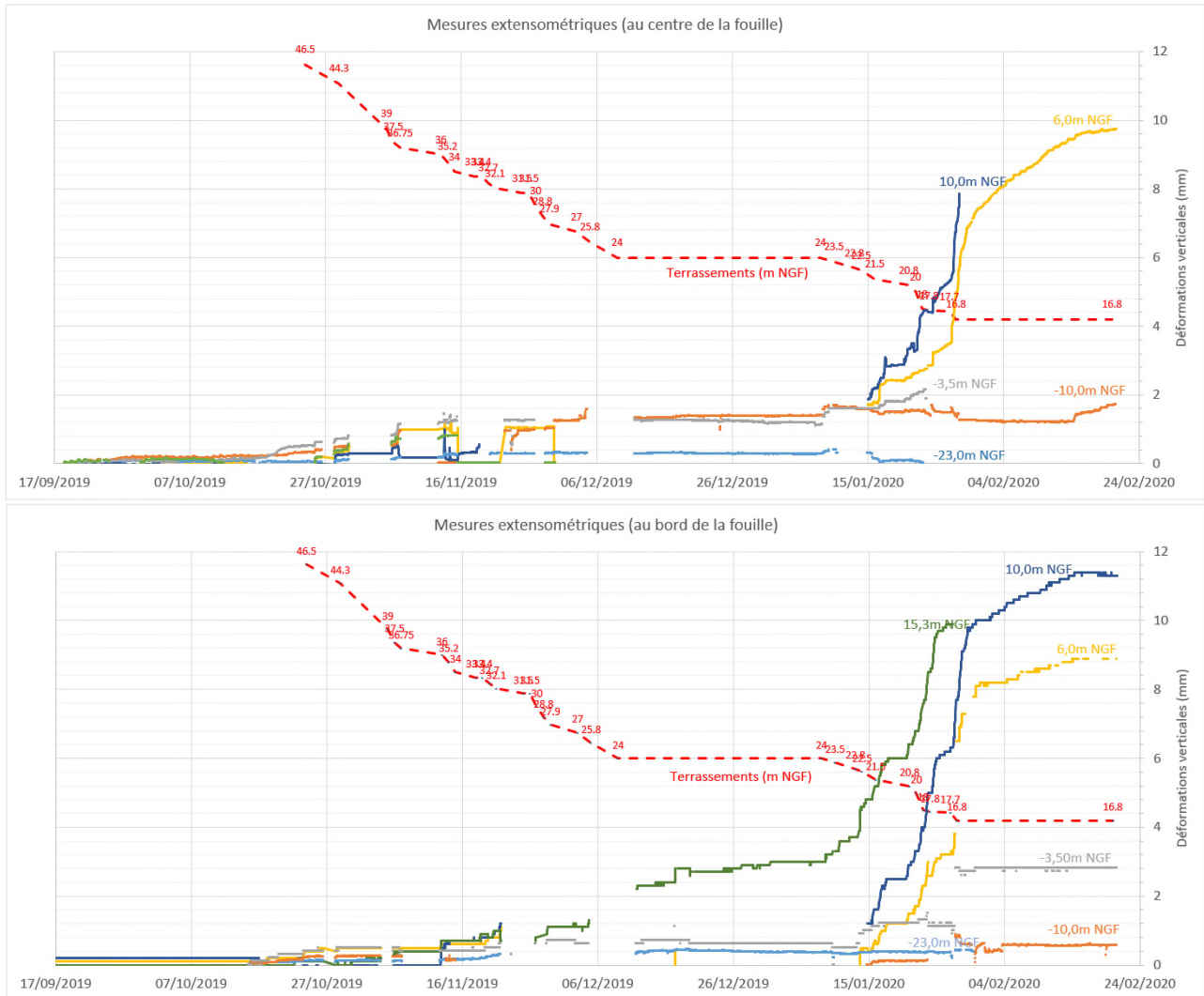


Figure 4. Mesures extensométriques (haut : au centre de la fouille, bas : au bord de la fouille).

Les premières constatations montrent tout d'abord qu'avant le terrassement de l'ouvrage, toutes les mesures sont stables et qu'elles ne montrent pas de déformations des terrains, il y a donc bien un état d'équilibre. Lorsque les travaux débutent, les soulèvements (déformations positives sur les graphiques) sont relativement modérés, à moins de 3mm, pendant les 20 premiers mètres de l'excavation. Les soulèvements deviennent plus importants à mesure que l'on se rapproche du fond de fouille, avec une augmentation de la vitesse de soulèvement vers la fin des travaux, liée à la vitesse de terrassement, plus rapide du fait du changement de dureté des terrains (passage du Calcaire Grossier induré aux Sables de Cuise tendres), avec une vitesse moyenne d'excavation de 0,5m/j dans le Calcaire Grossier, quasiment doublée ensuite.

Certaines mesures n'ont malheureusement pas pu être maintenues pendant toute la durée du chantier, malgré la mise en œuvre d'une virole métallique autour des tubes d'auscultation. En extrapolant les mesures manquantes, nous pouvons supposer un

soulèvement du fond de fouille en bordure de paroi moulée de presque 15mm et du même ordre de grandeur au centre de la fouille. En effet, la comparaison des mesures à la cote 6m NGF (dans les Fausses Glaises) montre respectivement un soulèvement de 9,7mm (au centre) et 8,9mm (sur les bords) en phase finale. Cette constatation montre que le frettage des terrains par les parois sur les bords de la fouille a une influence au centre de la fouille, par un effet voûte qui peut se développer en raison de la dimension réduite du puits.

Enfin, il est intéressant de remarquer que dans tous les cas, le soulèvement, certes réduit, se poursuit même 15 jours après l'arrêt des terrassements, vers une stabilisation lente acquise 1 mois après. L'amplitude de ces soulèvements est néanmoins fortement réduite (1,3mm), tout comme la vitesse de soulèvement des terrains, passant d'environ 0,8mm/jour en phase active de terrassement à 0,1mm/jour en phase de relaxation. Cette non stabilisation des mouvements pourrait être en lien avec le rétablissement des pressions interstitielles sous le fond de fouille, comme nous allons le voir par la suite.

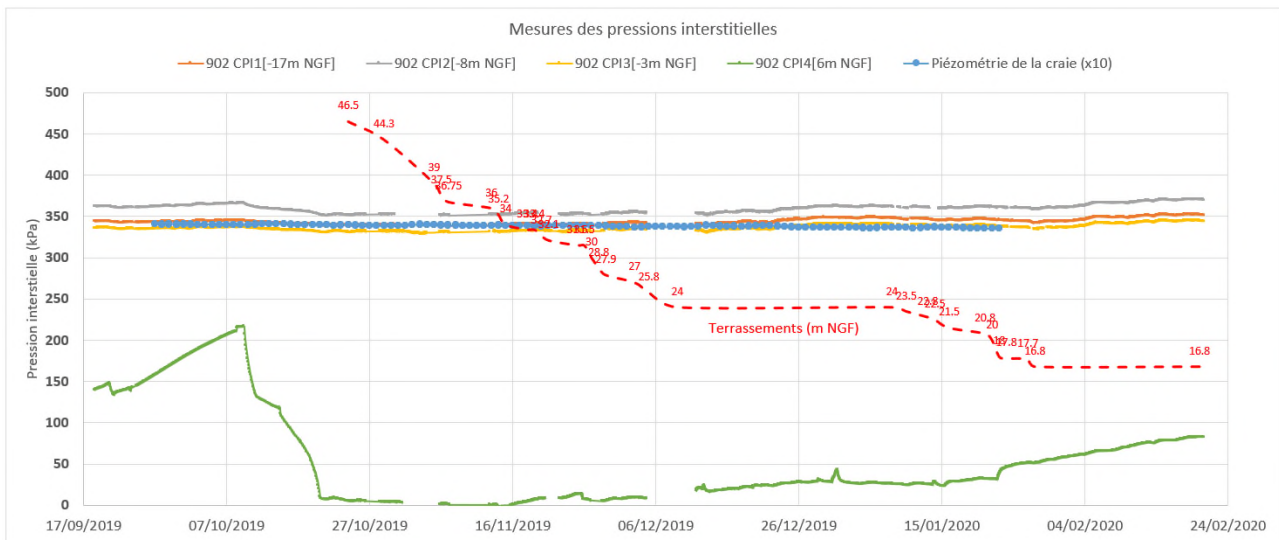


Figure 5. Mesures de la pression interstitielle.

L'analyse des cellules de pressions interstitielles (figure 5) montre que la cellule profonde dans les Marno-Calcaires du Montien (aquifère identique à celui de la Craie) – CMM – est quasiment à l'équilibre avec les mesures piézométriques de la nappe. Les travaux de terrassement n'ont vraisemblablement eu aucune influence sur cette nappe. Il est intéressant d'étudier la cellule située relativement proche du fond de fouille (dans les Fausses Glaises – FG). En effet, l'essorage des terrains réalisé pour mettre la fouille à sec a eu une forte influence sur les pressions enregistrées, montrant une chute brutale de la pression interstitielle lors du pompage. Une fois la boîte vidée, les pompages ont été arrêtés et on peut remarquer une réalimentation progressive et lente des terrains, par le fond. Elle est estimée à 0,61 kPa/j soit une alimentation de l'ordre de  $7,1 \cdot 10^{-7}$  m/s, valeur plus élevée que la perméabilité des Argiles Plastiques (Ap) sous-jacentes ( $K = 1 \cdot 10^{-9}$  m/s). Cela pourrait traduire un apport d'eau par les joints de parois moulées, éventuellement couplé à une fissuration de l'argile (par extension) liée au déchargement des terrains.

Les cellules situées au cœur des Argiles plastiques (sableuses ou non) montrent une charge proche de celle de la nappe, indiquant la lenteur à équilibrer les pressions au sein des horizons peu perméables (ou encadrés par des horizons peu perméables). Ces mesures montrent la présence de l'écran peu perméable constitué par les Argiles plastiques.

L'ensemble de ces mesures a permis de confirmer un comportement stable de l'ouvrage, en l'absence de pressions interstitielles trop importantes ou de soulèvements d'amplitude ou de vitesse trop élevées.

#### 4. Modélisation numérique

Afin de prédire les soulèvements attendus et piloter les terrassements par l'introduction de seuils de pilotage, un calcul aux éléments finis (sous Plaxis 2D avec axisymétrie) a été mené. Dans un premier temps, le calcul est réalisé en champ libre, en déchargeant intégralement le modèle de la hauteur de la fouille. Le soulèvement est alors de 13 cm en l'absence de soutènement. Puis une étude paramétrique a été menée, qui a consisté à faire varier la loi de comportement introduite dans le logiciel. Ainsi, il a été testé les lois dites de Mohr Coulomb, HSM (Hardening Soil Model) et Soft Soil, ainsi qu'une variation du module d'Young (à partir du module pressiométrique  $E_M$  et du coefficient rhéologique  $\alpha$  des terrains) à  $E_M/\alpha$  et  $3 E_M/\alpha$  (cette dernière valeur étant celle proposée dans les documents du marché pour les calculs de soutènements). Concernant les lois HSM, le module de déchargement  $E_{ur}$  est quant à lui compris entre 1,5 à 3 fois le module de chargement, selon le type de sol. L'interface entre les différents sols et la paroi moulée a été considéré partiellement rigide ( $R_{inter} = 2/3$ ). Les résultats de la simulation sont compilés dans le tableau 1.

Tableau 1. Soulèvement calculé du fond de fouille (au centre de la fouille)

Modèle de calcul	Module utilisé	Type de calcul	Soulèvement (mm)
MC 1	$E' = E_M/\alpha$	Drainé  (excepté pour les Ap : non drainées)	92
MC 2	$E' = 3 E_M/\alpha$		31
HSM 1	$E_{50} = E_M/\alpha$ $E_{ur} = 1.5 \text{ à } 3 E_{50}$		35
HSM 2	$E_{50} = 3 E_M/\alpha$ $E_{ur} = 1.5 \text{ à } 3 E_{50}$		12
SSM (paramètres œdométriques équivalents)			130

Ces calculs montrent que le freinage des parois moulées joue un rôle très important dans les déformations du fond de fouille, par rapport au calcul en champ libre. Compte tenu des résultats des mesures extensométriques (15mm de soulèvement maximal), et pour la configuration et les sols étudiés, le modèle HSM avec un module de  $3 E_M/\alpha$  semble être le plus cohérent avec les mesures sur site. Il est bien entendu qu'il ne s'agit pas ici de faire une généralité de cette constatation. Remarquons également que l'effet voûte est bien visible dans la modélisation, avec un écart de soulèvement entre le centre de la fouille et les bords de seulement 3mm (figure 6).

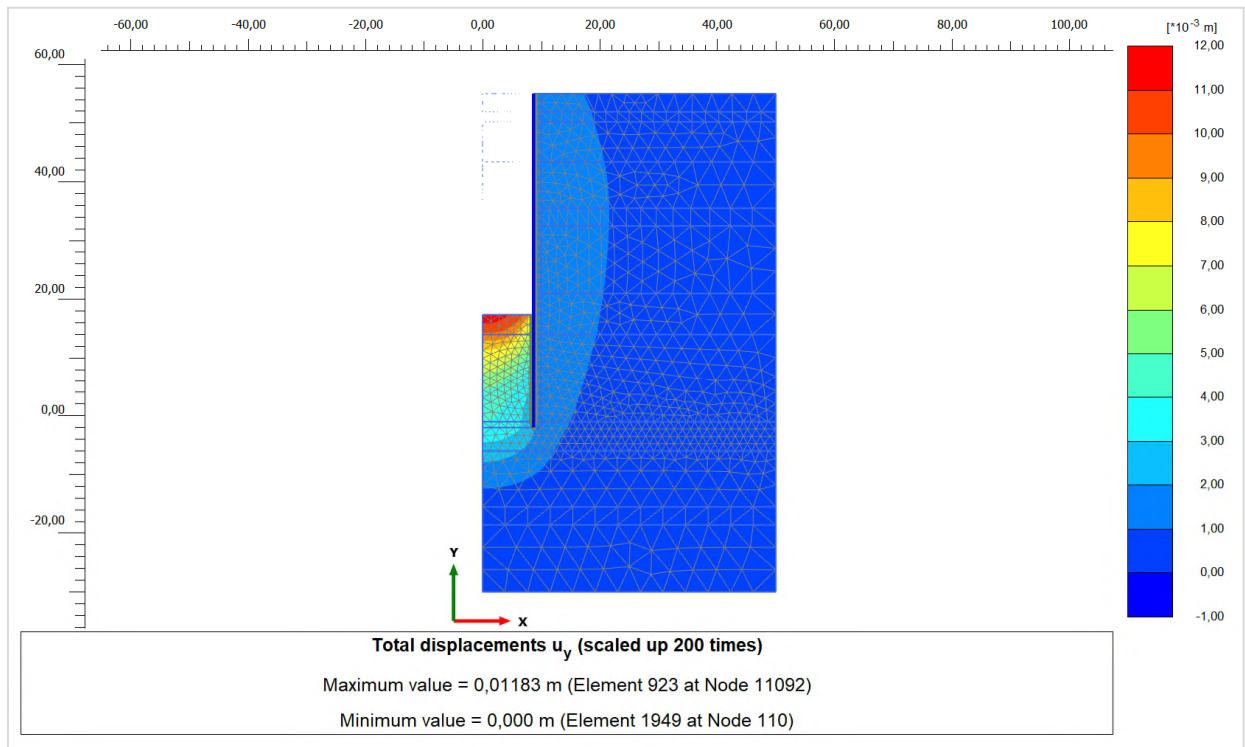


Figure 6. Résultats de la modélisation 2D.

Enfin, une modélisation 3D a également été menée. Pour cela, un cube de 80m de côté centré sur le puits a été modélisé, représentant un modèle à environ 65 000 éléments (figure 7).

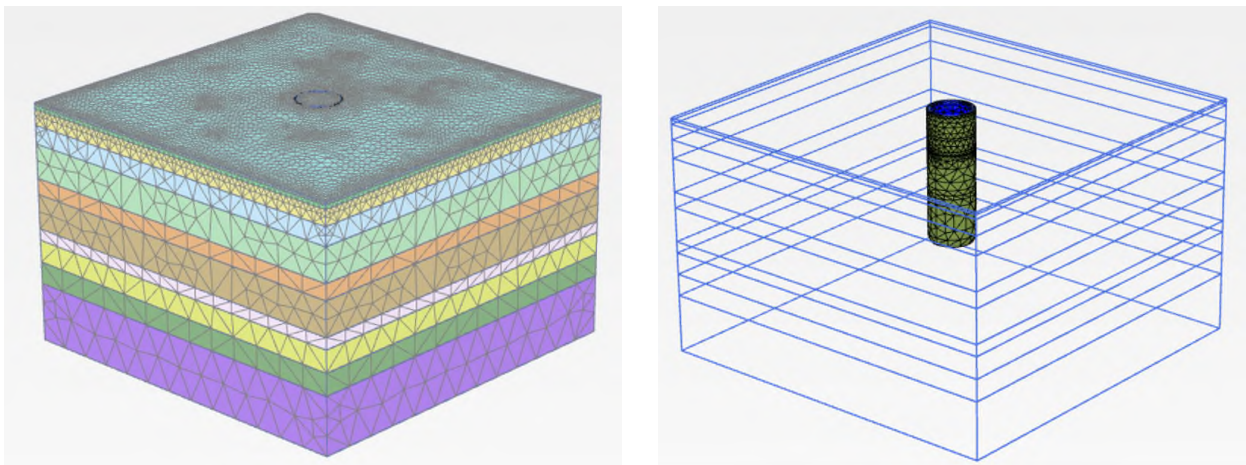


Figure 7. Maillage de la modélisation 3D.

Bien qu'un calage des modules soit nécessaire pour retrouver les soulèvements mesurés par l'auscultation, le modèle 3D (ici présenté avec une loi type Mohr Coulomb et un module d'Young égal à  $3 \text{ EM}/\alpha$ ) montre un soulèvement maximal de 22mm, à comparer aux 31mm calculés en 2D avec les mêmes paramètres. Outre l'intérêt de mieux refléter le comportement d'un ouvrage, la modélisation 3D permet également de définir rapidement la Zone d'Influence Géotechnique (ZIG) et donc l'auscultation des bâtiments alentours à réaliser (figure 8).

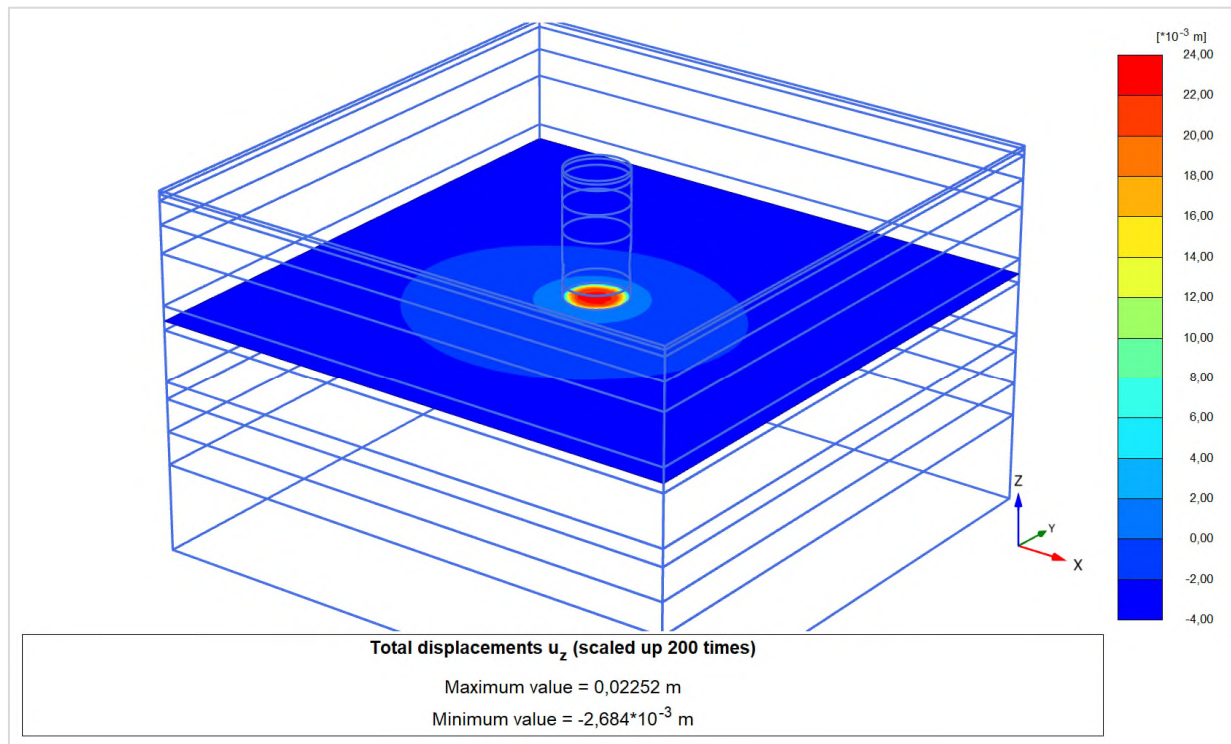


Figure 8. Soulèvements calculés en 3D (coupe au niveau du fond de fouille).

## 5. Conclusions

A l'aide d'une auscultation renforcée par extensomètres et cellules de pression interstitielle profondes, les terrassements de l'ouvrage présenté ont pu se dérouler en toute sécurité. Cela a permis d'éviter un traitement de l'horizon sableux, et ses conséquences en termes de coût et de délai, qui avait été proposé (injections ou jet grouting) et dont les calculs montraient son inutilité (la mobilisation du frottement latéral étant acquise). Les modélisations réalisées en cours de travaux ou par rétro-analyses sont cohérentes avec les mesures observées, en utilisant des modules d'Young relativement forts, identiques à ceux utilisés pour les modélisations de soutènement type parois moulées. Le frettage de ces dernières sur l'ensemble de la fouille, bien évidemment fonction de la taille de l'ouvrage, a été constaté aussi bien en modélisation qu'en auscultation. Les déformations restent quant à elles relativement restreintes et d'ordre millimétrique. Les pressions interstitielles de la nappe de la craie, problématique initiale de l'ouvrage, sont restées relativement constantes. Celles au niveau du fond de fouille, ont quant à elles chutées dès le démarrage des terrassements et pompages associés, pour reprendre un équilibre lent et partiel une fois la vidange de l'enceinte réalisée. D'autres ouvrages de ce tronçon, en cours de réalisation, seront auscultés à plus long terme, notamment afin d'étudier le gonflement des Argiles plastiques en phase service.