Proceedings of the XVII ECSMGE-2019
Geotechnical Engineering foundation of the future
ISBN 978-9935-9436-1-3
© The authors and IGS: All rights reserved, 2019
doi: 10.32075/17ECSMGE-2019-0377

XVII European Conference
ECSMGE 2019
Reykjavik
on Soil Mechanics
and Geotechnical Engineering

Interaction des travaux de renforcement de sols et de terrassement sous une station d'épuration en vallée alpine

Interactions between ground improvement and earthworks of a water treatment plant in Alpine valley

P. Burtin. Corresponding / primary author
MENARD, Chaponost, France

S. Brûlé
MENARD, Chaponost, France

M. Perigault
MENARD, Chaponost, France

RÉSUMÉ : L'extension de la station d'épuration Aquavallées à BOURG D'OISANS (38) en France a été construite en 2017 dans un contexte géotechnique de sols très compressibles sur une épaisseur de 20m. En raison des conditions de sol et des caractéristiques du projet fondé sur radier avec de forts contrastes de charges, il a été retenu une solution mixte de renforcement de sols par Colonnes Bi-Modules (CBM©) et par Colonnes à Module Contrôlé (CMC©). La partie supérieure des CBM, constituée de matériau granulaire, a permis un phasage adapté des travaux de terrassement et de réalisation des réseaux enterrés, avec notamment une réalisation du renforcement de sol depuis une plateforme de travail haute sans excavation préalable pour les zones où l'arase inférieure des radiers était plus profonde. Les justifications des renforcements de sol ont été réalisées par une modélisation aux éléments finis mais le propos de cet article est aussi d'illustrer et de comparer les résultats obtenus avec ceux résultant d'une approche analytique, validée et utilisée dans le cahier des charges du procédé Colonnes Bi-Modules. Le projet a été instrumenté pour vérifier les estimations de tassement de la phase conception.

ABSTRACT: The extension of the water treatment plant Aquavallées at Bourg d'Oisans (38) in France was built in 2017 in the geotechnical context of 20 meters thick soft soils. After a thorough ground characterization and according to the technical specifications of the project, a combined solution of ground improvement was chosen: Bi-Modulus Columns and Controlled Modulus Columns. The upper part of Bi-Modulus Columns consisting of ballast permits to simplify the later earthworks. Indeed the different levels of raft and the underground pipe network involved an adapted stage construction. The soil reinforcement design was carried out thanks to the finite element modeling. As part of this article, a second design method using analytical approach is presented and compared. According to the Bi-Modulus Columns specifications, an internal spreadsheet has been validated and is used as design tool. The project was monitored in order to confirm the settlement predictions at the design stage.

Keywords: Renforcement des sols - Soil Reinforcement; Colonnes Bi-Modules - Bi-Modulus Columns; Terrassement – Earthworks; Méthode de dimensionnement – Design Method

1 INTRODUCTION

Il s'agit de la construction d'une extension de la station d'épuration (STEP) Aquavallées à BOURG D'OISANS (38) en France (Figure 1). Le bâtiment est fondé sur radier avec renforcement de sol. Ce radier est divisé en deux parties, sud et nord, séparées par un joint de dilatation. Une instrumentation a permis de relever les tassements sur 2 profils.

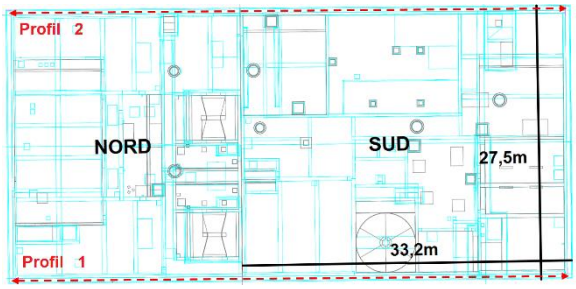


Figure 1. Vue en plan du projet

Devant notamment la diversité des différents niveaux de radiers dans chacune de ces deux zones et de réseaux projetés sous les bâtiments, il est envisagé une solution combinée de Colonnes Bi-Modules (CBM©) et de Colonnes à Module Contrôlé (CMC©) (Chu 2009 et Huybrechts 2017). La partie supérieure des CBM, en matériaux granulaires, n'oppose aucun obstacle aux excavations de masse, postérieures à la réalisation du renforcement de sol. Les inclusions rigides en mortier de type CMC quant à elles sont mises en œuvre dans les zones sans réseaux enterrés prévus et lorsque l'arase inférieure des radiers est proche du niveau 0.0 du projet. La Figure 2 présente le principe de la solution avec les cas typiques du projet : assise de radier variable et présence de réseaux.

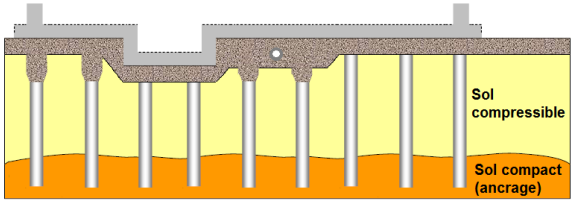


Figure 2. Coupe de principe du projet

La suite de l'article développe plus précisément la technique des Colonnes Bi-Modules (CBM) faisant l'objet d'un cahier des charges. Ce document détaille le principe et la mise en œuvre, les études et dimensionnement nécessaires ainsi que les essais et contrôles. De façon périodique, il est soumis à l'approbation de deux organismes extérieurs : l'Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux IFFSTAR et du Centre d'Etudes et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement CEREMA.

Le procédé Colonnes Bi-Modules (Figures 3 et 4) est un procédé de renforcement des sols en place qui associe une partie inférieure verticale en inclusion semi-rigide en mortier ou béton de moins de 500 mm de diamètre surmontée d'une partie supérieure en matériaux granulaires de type Colonnes Ballastées. Mise en œuvre par voie sèche (air utilisé en guise de fluide de lançage), cette dernière a un diamètre de 600 à 800 mm, voire plus et le matériau utilisé a une granulométrie comprise dans le fuseau 8/40. Pour une bonne réalisation des deux parties, un phasage adapté est nécessaire.



Figure 3. Principe de réalisation du renforcement de sols par CBM

Au contact entre ces deux parties de diamètre différent, il y a une interface de transition correspondant au recouvrement et/ou mélange du mortier de l'inclusion et du ballast de la Colonne Ballastée.

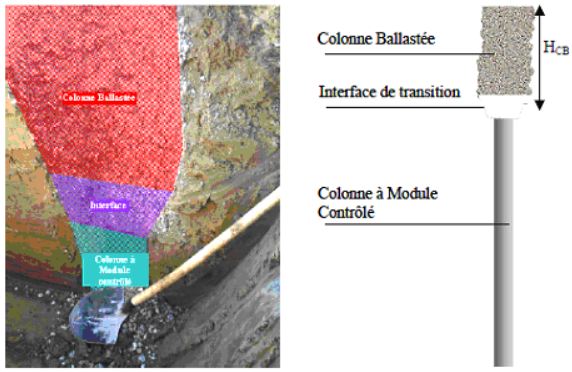


Figure 4. Principe d'une CBM

Ce procédé a pour objet de renforcer les sols en place en créant un élément composite de manière à fonder des ouvrages sur fondations superficielles. L'objectif de ce renforcement est d'atteindre l'amélioration de la capacité portante du sol ainsi que la réduction de la déformabilité verticale de celui-ci sous l'application des charges du projet.

Les dallages sont construits sur une couche de répartition alors que, pour les fondations, les charges concentrées sont fondées sur radier ou sur semelles superficielles, isolées ou filantes sans couche de répartition. Dans le cas des radiers, cette couche de répartition n'est pas obligatoire, et elle peut être supprimée si le radier est calculé en conséquence.

Les Colonnes Bi-Modules permettent de combiner certains avantages des Colonnes Ballastées dans des terrains dans lesquels les Colonnes Ballastées classiques ne sont normalement pas adaptées (terrains ne garantissant pas une étreinte latérale suffisante, présence de matière organique dans le terrain, contraintes de tassement trop strictes, etc).

Les 3 principaux avantages sont les suivants : (1) En tirant partie des sols de surface au maximum de leurs possibilités, ce procédé permet parfois d'optimiser l'épaisseur des matelas de répartition sous radiers et dallages. (2) Il permet aussi de régler les problèmes d'arases complexes (arases profondes et/ou à des niveaux très variables) en permettant un terrassement direct dans la tête granulaire des colonnes. (3) Finalement, dans certaines conditions, la réalisation de Colonnes Bi-Modules permet de s'affranchir des matelas de répartition sous semelle, aussi bien en conditions statiques qu'en conditions sismiques, quand ceux-ci peuvent être demandés pour les semelles sur inclusions rigides (Brûlé 2012 et Cahier des charges CBM 2018).

2 METHODE DE DIMENSIONNEMENT

Contrairement au principe des fondations sur pieux, le procédé CBM associe le sol et les colonnes de façon à obtenir un matériau composite dont les caractéristiques mécaniques sont fortement améliorées à l'échelle macroscopique.

Le principe de dimensionnement des Colonnes Bi-Modules est celui des Colonnes Ballastées pour la partie supérieure et celui des inclusions rigides et semi-rigides pour la partie inférieure (Cahier des charges CBM 2018).

Le dimensionnement du réseau de CBM repose sur la détermination de la répartition des charges et surcharges venant de la structure entre les Colonnes Bi-Modules et le sol encaissant. Le tassement des ouvrages est calculé en fonction de cette répartition de charges.

Il reste alors à vérifier la compatibilité de ces tassements avec les déformations dans la structure et l'admissibilité des efforts dans les colonnes et dans le sol.

2.1 Méthode des éléments finis

L'étude d'une cellule élémentaire est réalisée à l'aide du logiciel aux éléments finis PLAXIS. Centré sur une colonne, le modèle axisymétrique a un rayon équivalent dépendant de l'espacement des CBM dans les 2 directions planes a et b.

$$R_{eq} = \sqrt{\frac{ab}{\pi}} \quad (1)$$

Le phasage de construction est pris en compte dans les étapes de modélisation ainsi que la charge apportée par le radier et la charge d'exploitation. Un des modèles ainsi que la coupe de

sol associée sont présentés en Figure 5. La partie supérieure des CBM est représentée en rouge, la partie inférieure en gris. La couche de sol jaune en pied de log stratigraphique correspond à une grave sableuse de compacité suffisante pour l'ancrage des colonnes. Dans le Tableau 1, sont présentées les valeurs géomécaniques du modèle de sol retenu pour le projet.

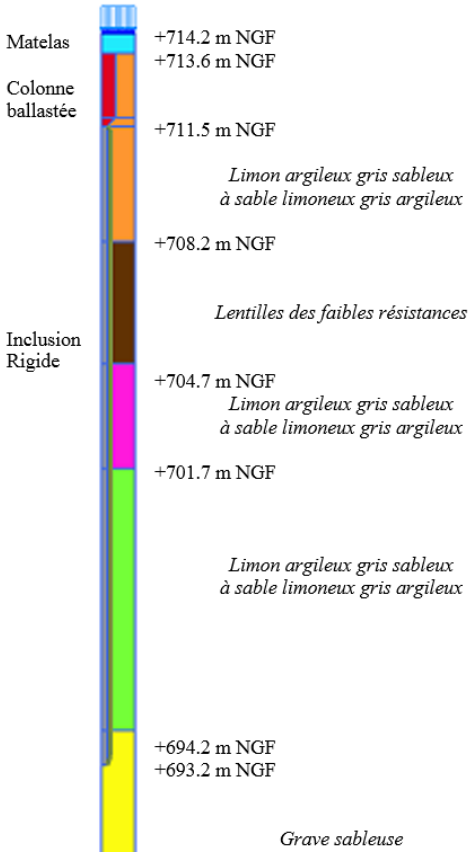


Figure 5. Géométrie du modèle aux éléments finis

Tableau 1. Paramètres pressiométriques avec le coefficient rhéologique désigné par α et modules de déformation

Couche	Module Menard (MPa)	Pression limite (MPa)	α	Module Young (MPa)
Limon 1	5	0.65	2/3	7.5
Lentilles	2	0.24	2/3	3
Limon 2	4	0.48	2/3	6
Limon 3	3	0.3	2/3	4.5
Graves	15	2.8	1/3	45

L'approche numérique permet d'estimer les déformations et les contraintes sur l'ensemble du modèle. La Figure 6 présente à gauche le tassement en phase finale et à droite la contrainte verticale effective.

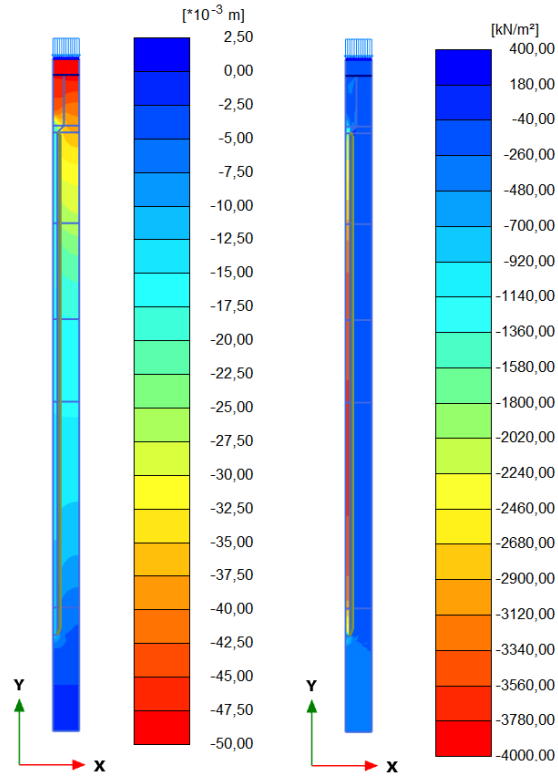


Figure 6. Résultats aux éléments finis – à gauche le tassement et à droite la contrainte verticale effective

Les tassements estimés après renforcement sont au maximum de 4.9 cm au niveau du radier. La contrainte verticale varie le long de la colonne grâce aux frottements positif et négatif avec un maximum de 3.6 MPa. Une analyse détaillée des résultats se trouve en paragraphe 2.3.

A la vue des caractéristiques des sols, des lois de comportement de type linéaire élastique parfaitement plastique avec un critère de Mohr-Coulomb ont été utilisées pour l'ensemble des couches de sol et du ballast. Par défaut les interactions colonne / sol dans PLAXIS sont régies par la même loi de comportement en considérant la couche environnante (modules et critères de ci-

saillement). Cependant, ces derniers ne permettent pas forcément de suivre les lois de comportements usuels analytiques proposés par O. Combarieu et la méthode de Frank et Zhao en termes de frottement et de pointe (Racinais 2017).

2.2 *Principes de la méthode analytique proposée*

Dans le cadre de cet article, il est proposé d'étudier une seconde méthode de dimensionnement au moyen d'un modèle de calcul analytique qui a été contrôlé par l'IFFSTAR et le CEREMA.

La feuille de calculs a été actualisée en accord avec le cahier des charges. Elle permet: (1) d'utiliser des logiciels de domotiques courants, (2) de suivre la réglementation en vigueur, (3) de détailler l'ensemble des résultats spécifiques à la solution de renforcement de sol, (4) de proposer les vérifications structurelles STR et géotechniques GEO selon le formalisme des Eurocodes.

La méthode analytique est menée sur une cellule élémentaire selon l'approche bi-phasique MV2 (ASIRI 2012). Les calculs suivent une procédure itérative, la distribution des contraintes est ajustée jusqu'à atteindre la condition finale de tassement homogène en sous face de dalle. Le schéma de principe est présenté en Figure 7 avec L_{CMC} la longueur de la partie inférieure des CBM et L_{CB} de la partie supérieure.

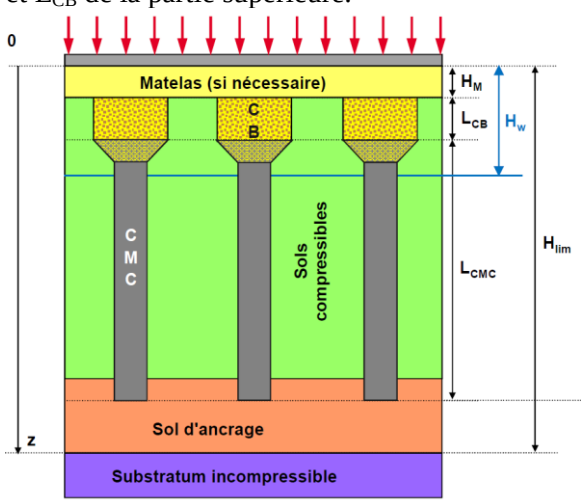


Figure 7. Schéma utilisé de la solution analytique

2.3 *Comparaison des deux méthodes de dimensionnement*

Pour une même zone du projet, deux calculs ont été menés selon les deux méthodes précédemment décrites. Le graphe en Figure 8 présente les tassements au niveau de la colonne et au niveau du sol en intermaille, à la fois pour la méthode aux éléments finis (trait plein gris pour la colonne et pointillé gris pour le sol) et pour la feuille de calcul analytique (trait plein noir pour la colonne et pointillé noir pour le sol).

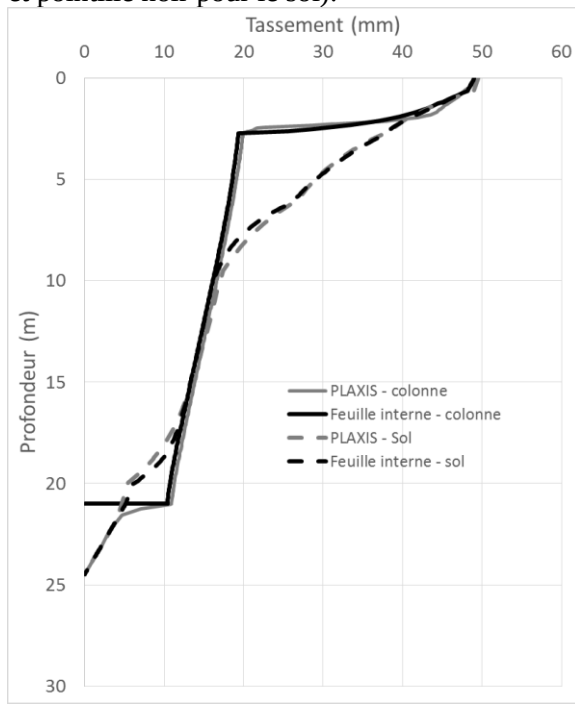


Figure 8. Tassement selon les 2 méthodes de dimensionnement FEM avec PLAXIS – analytique

Avec les hypothèses de rigidité du radier sous PLAXIS, les tassements au droit de la colonne et du sol sont uniformes. Pour les 2 méthodes, le tassement au niveau du radier est de 4.9 cm. Au niveau de la base des Colonnes Ballastées, un déplacement relatif entre colonne et sol apparait et continue sur la partie haute des inclusions rigides. Après un plan d'égal tassement situé proche du milieu de la partie inférieure des CBM, un déplacement relatif réapparait mais cette fois-ci, le sol se déplace moins que la colonne.

La Figure 9 présente la contrainte verticale appliquée au niveau de la colonne et au niveau du sol en intermaille pour les deux méthodes en respectant la légende de la Figure 8.

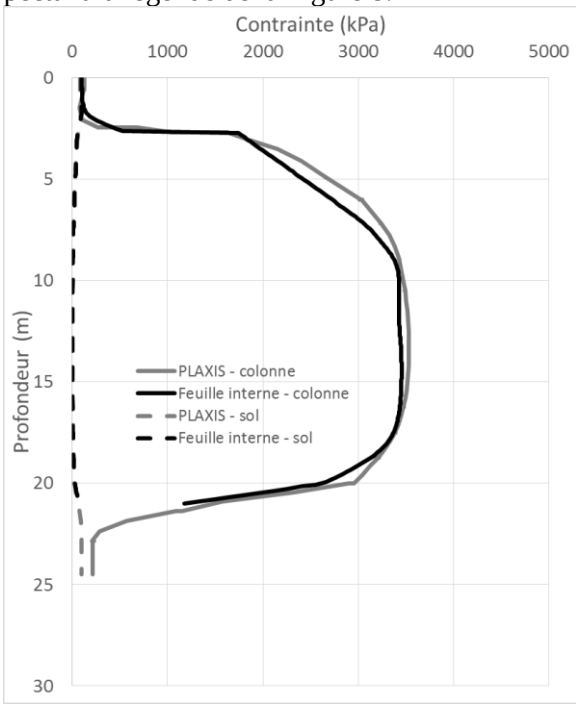


Figure 9. Contrainte verticale appliquée selon les deux méthodes de dimensionnement FEM avec PLAXIS - analytique

La contrainte maximale verticale est localisée dans la partie inclusion rigide, elle vaut 3.6 MPa pour les deux méthodes de calcul. En fonction de la profondeur, la contrainte verticale varie grâce aux frottements liés aux déplacements relatifs colonne / sol précédemment présentés.

Malgré des lois de comportement des matériaux et des interfaces différentes, les valeurs déterminantes (tassement au niveau du radier et contrainte maximale) sont comparables pour les deux modèles. Les évolutions des résultats en fonction de la profondeur sont très similaires aussi bien pour le comportement de la colonne que du sol. Cette approche analytique permet le dimensionnement du projet. Les lois usuelles d'interactions colonne / sol sont directement implémentées alors que celles considérées par défaut sous PLAXIS peuvent ne pas correspondre aux spécifications en vigueur (Racinais 2017). Un autre avantage concerne des vérifications structurelles STR et géotechniques GEO (non présentées dans cet article). En effet les justifications du renforcement de sol sont directement entreprises et présentées par la feuille de calcul analytique. Dans le cas de la méthode aux éléments finis, les vérifications sont moins directes.

3 PRESENTATION DES TRAVAUX

Selon les spécifications du projet, le renforcement de sol a été dimensionné pour garantir un tassement homogène de 5cm au maximum. A l'aide des éléments finis, il a été réalisé 13 modèles différents adaptés à la variabilité du chargement, du niveau fini et des réseaux enterrés.

La Figure 10 présente une partie du renforcement de sol et montre le fort ajustement avec les différentes variables. Les élévations des interfaces ballast / inclusion rigide sont adaptées aux contraintes de terrassement, elles sont représentées sur la figure par les hachures de couleur. Les mailles des colonnes sont resserrées sous les charges les plus importantes du projet. Les cercles de couleurs permettent d'identifier les différents espacements entre colonnes, en petit diamètre les inclusions rigides, en plus gros, les Colonnes Bi-Modules.

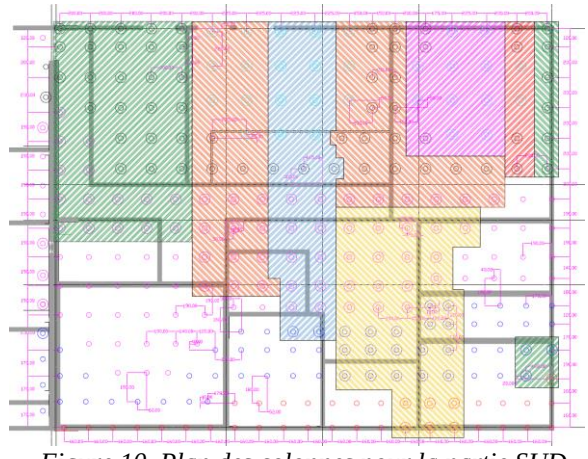


Figure 10. Plan des colonnes pour la partie SUD



Figure 11. Atelier MENARD d'inclusions rigides pour la réalisation de la partie inférieure de la CBM

Sur l'ensemble du projet, 550 colonnes ont été exécutées. Le linéaire de la partie inclusions rigides se porte à 11500 m. Concernant la partie supérieure en ballast, un total de 400 m a été réalisé.

La Figure 11 montre l'atelier de la partie inférieure des CBM qui correspond aux inclusions rigides. La pompe à béton et le camion malaxeur se trouvent en arrière-plan de la foreuse. A l'aide notamment d'une analyse directe des paramètres de forage, l'ancrage des colonnes de 1 mètre dans l'horizon graveleux compact a pu être réalisé précisément. Cette solution permet de faire face aux variations potentielles du toit de la couche d'ancrage. Pour ce projet et avec la configuration de l'atelier, une profondeur de 21 mètres a pu être atteinte.

Dans une seconde phase, un atelier de Colonnes Ballastées met en œuvre la partie supérieure des Colonnes Bi-Modules. Selon le niveau des terrassements de masse ultérieurs, une profondeur de plusieurs mètres est atteinte.

Des essais et un contrôle qualité (non présentés dans cet article) ont également été réalisés afin de s'assurer de la bonne exécution des travaux. A comparer au nombre de sondages géotechniques profonds initiaux (8 à 18m et 2 à 35m), les 550 forages des colonnes permettent d'estimer de manière plus précise la cote des interfaces des couches. Dans le cas d'une rencontre de matériaux successifs aux propriétés mécaniques contrastées, l'analyse des paramètres d'enregistrement a permis de confirmer le toit des couches.

A la faveur des auscultations menées lors de tests en phase de construction, des tassements de faible amplitude ont été mesurés au 25/09/2018. Sur un même graphe en Figure 12, les prédictions et les mesures de déplacements sont comparées. L'abscisse correspond à la position du point selon les profils présentés en Figure 1.

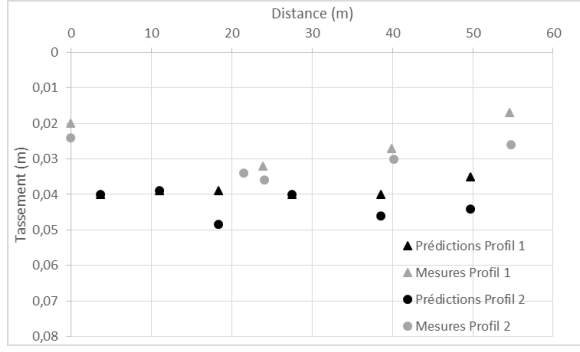


Figure 12. Prédictions et mesures de tassements

Les mesures en gris sont comprises entre 1.7 et 3.6cm. Les prédictions en noir utilisant la méthode aux éléments finis estiment des tassements entre 3.5 et 4.9cm. A zone correspondante et à la date de mesure les déplacements verticaux demeuraient inférieurs à la valeur du calcul théorique, tout en précisant que ces dernières font référence à un état de fin de consolidation des sols, non nécessairement encore atteint lors de la mesure. Les mesures positionnées en bord du radier ne permettent pas d'observer les tassements au centre de l'ouvrage. Concernant le tassement différentiel, les mesures voisines donnent un différentiel très faible de 1/4500 en moyenne, et de 1/1500 dans le pire des cas.

4 CONCLUSIONS

Pour ce projet d'extension de la station d'épuration, il a été mis en avant une solution d'amélioration de sol par Colonnes Bi-Modules (CBM) et par Colonnes à Module Contrôlé (CMC). L'un des avantages de la partie supérieure des CBM constituée de matériau granulaire a été de faciliter les travaux d'excavation ultérieurs. En effet la réalisation de différents niveaux de radiers mais aussi de l'ensemble des réseaux enterrés a nécessité une solution et un phasage adapté.

Pour dimensionner le projet, une discrétisation de la surface en de nombreux modèles de sol, géométriques et/ou de chargement a été nécessaire. Ces modèles, au nombre de 13, ont été testés par méthode aux éléments finis.

Les mesures de tassements étudiées à ce jour montrent le respect des objectifs de tassement absolu. Devant le renforcement de sol adapté à la variabilité des spécificités de l'ouvrage, les tassements différentiels observés entre les points de mesures restent très limités.

Dans le cadre de cet article une autre méthode a été présentée : une approche analytique. Permettant le dimensionnement des Colonnes Bi-Modules, elle a été validée et utilisée lors de la mise à jour du cahier des charges du procédé. La comparaison avec le modèle aux éléments finis montre des résultats théoriques similaires pour le tassement de la colonne et du sol mais aussi pour la contrainte appliquée sur les différents éléments.

5 REFERENCES

Brûlé, S., Giraud, P., Erbeja, G., Javelaud, E. 2012. Réglementation sismique et renforcement de sol : utilisation des colonnes bi-modules profondes dans le Bassin Grenoblois. Exemple du projet Immobilier du Pré Mayen à Montbonnot. *Revue mensuelle Travaux.* N°889 p 66 à 70. Juin 2012.

Cahier des charges Colonnes Bi-Modules 2018.

Chu, J., Varaksin, S., Klotz, U., Mengé, P. 2009. State of the Art Report: Construction Processes. *Proceedings of the 17th ICSMGE.*

Combarieu, O. 1988. Amélioration des sols par inclusions rigides verticales. Application à l'édification de remblais sur sols médiocres. *Revue Française de Géotechnique* 44: 57–79.

Frank, R., Zhao, S.R. 1982. Estimation par les paramètres pressiométriques de l'enfoncement sous charge axiale de pieux forés dans des sols fins. *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées* n°119.

Huybrechts, N., Denies, N., Dijkstra, J., Rujikiatkamjorn, C., Racinais, J., van der Stoel, A. 2017. TC211 General Report of the XIX ICSMGE: Ground Improvement works. *Proceedings of the 19th ICSMGE*.

Projet National ASIRI. 2012. Recommandations pour la conception, le dimensionnement, l'exécution et le contrôle de l'amélioration des sols de fondation par inclusions rigides. Presses des Ponts, Paris, France.

Racinais, J., Maucotel, F., Varaksin, S., Babak, H. 2017. Beneficial Use of Pressuremeter Tests for Accurate Modelling by Finite Elements of a Rigid Inclusion Ground Improvement Solution. *Proceedings of the 19th ICSMGE*.