APPLICATION DE LA CONSOLIDATION ATMOSPHERIQUE DANS LA VILLE DE MEXICO

VACUUM CONSOLIDATION APPLICATION IN MEXICO CITY

Hamza MENACEUR¹, Jérôme RACINAIS¹, Cyril PLOMTEUX¹

¹ Menard Group, 22 rue Jean Rostand, 91400 Orsay, France.

RÉSUMÉ -

Des travaux d'amélioration des sols par la technique de consolidation atmosphérique ont été envisagés dans le cadre de la construction d'un nouvel aéroport dans la ville de Texcoco, située à l'est de Mexico. Cette technique permet de créer une consolidation isotrope accélérée du sol compressible, qui élimine ou réduit le besoin de mise en place de remblais de préchargement temporaires pendant des durées importantes. Afin de tester l'efficacité in situ de cette technique, Menard a réalisé une zone d'essai en appliquant le procédé Menard Vacuum, utilisé depuis la fin des années 80 pour des applications très variées (centrales électriques, plates-formes aéroportuaires, etc). Cet article présente le phasage des travaux et les principaux résultats obtenus à partir de plusieurs instrumentations installées dans la zone d'essai.

Mots clés : Argile de Mexico, consolidation atmosphérique, drain, préchargement, zone d'essai instrumentée.

Keywords: Mexico Clay, vacuum consolidation, drain, embankment preloading, instrumented trial field.

1. Introduction

Le nouvel aéroport international de Mexico (NAIM) est le plus important projet d'infrastructure initié dans la ville de Mexico. Débutés en septembre 2015, les travaux ont été abandonnés en décembre 2018 suite à une consultation populaire imposée par le nouveau président élu, Andres Manuel Lopez Obrador, qui s'est opposé à ce mégaprojet de plus de 13 milliards d'euros. Le nouvel aéroport international de Mexico avait pour but de remplacer l'actuel aéroport qui fonctionne déjà à sa capacité maximale. Le projet consistait principalement en la construction d'un nouveau terminal occupant 743 000 m² et de deux pistes (Piste II et Piste III), sur un terrain de 4 600 hectares, afin d'augmenter la capacité de l'aéroport à 57 millions de passagers par an. La suite de l'article présente des travaux réalisés avant décembre 2018, date de l'arrêt du projet.

Ce nouvel aéroport est situé dans la zone de l'ancien lac de Texcoco de la ville de Mexico (Figure 1), connue par ses matériaux extrêmement plastiques présentant des indices des vides et des teneurs en eau très élevés avec des propriétés géotechniques médiocres. Cette ville est également soumise à un tassement régional continu (≈ 20 cm / an, Auvinet et al. 2017) dû au vaste programme de pompage dans les aquifères situés en dessous de 60 m de profondeur. Il est donc nécessaire de prendre des mesures pour limiter les tassements en surface et ainsi assurer la stabilité et la durabilité des futures installations.

Dans ce contexte, des travaux d'amélioration des sols par drains verticaux avec un programme de préchargement du sol ou par consolidation atmosphérique (sous vide) sont adoptés pour minimiser les tassements résiduels dans des limites acceptables pour le projet. La technique des drains verticaux avec préchargement (solution classique) a été réalisée dans les zones des pistes, tandis que, la technique de consolidation sous vide est prévue dans les zones de connexion entre les pistes et le terminal. Le choix de la consolidation sous vide est dû d'une part à l'efficacité de la technique en termes de temps de consolidation par rapport la solution classique, et d'autre part, à la difficulté de trouver des matériaux de surcharge dans la ville de Mexico.

Afin de valider la méthode de consolidation atmosphérique, une zone d'essai instrumentée de 3 500 m² a été réalisée en appliquant le procédé Menard Vacuum (Cognon 1991, Massé et al. 2001, Liausu and H. Scache 2009). Dans cet article, nous présentons le phasage des travaux et les principaux résultats obtenus.



Figure 1. Vue sur la nouvelle zone de l'aéroport de Mexico.

2. Conditions géotechniques

Une reconnaissance géotechnique a été menée avant le démarrage des travaux, à partir d'essais in-situ et d'essais au laboratoire, pour déterminer la stratigraphie et les propriétés géotechniques des sols rencontrés. Cette reconnaissance a mis en évidence un profil du sol caractérisé par la présence d'argile très compressible jusqu'à 30 m de profondeur. Les principales caractéristiques géotechniques des différentes couches rencontrées sont récapitulées dans le Tableau 1. On observe des teneurs en eau très élevées, comprises entre 165% et 300%, et des indices des vides variant de 3,3 à 12,8.

Désignation	Z_{sup}	Z _{inf}	Н	w	γ	E_oed	e ₀	Cs	C _c	OCR	C_{v}	$C_h = 3C_v$
	m	m	m	%	kN/m³	MPa					m²/an	m²/an
Croûte peu profonde	0	-1	1	-	14.5	4.50	-	-	-	-	-	-
Argile très compressible	-1	-5	4	165	13.7	0.94	3.28	0.106	0.983	1.6	7.0E-01	2.09
	-5	-8	3	300	12.7	0.15	10.54	1.027	12.760	1.2	2.9E-01	0.87
	-8	-11	3	250	11.2	0.44	12.84	0.540	7.668	1.0	6.8E-01	2.03
	-11	-16	5	230	12.2	0.41	6.22	0.122	4.575	1.0	2.6E-01	0.77
	-16	-20	4	200	12.3	1.54	8.65	0.981	5.686	1.0	3.8E-01	1.13
	-20	-27	7	225	12.2	1.44	7.74	0.549	4.357	1.3	8.1E-01	2.44
	-27	-30	3	230	12.0	1.23	8.45	0.437	5.841	1.3	4.2E-01	1.26
Substratum	-30	-32	2	-	19.0	30.00	-	-	-	-	-	-

Tableau 1. Caractéristiques géotechniques des différentes couches rencontrées.

3. Phasage des travaux

Les travaux réalisés sur la zone d'essai Menard Vacuum (70 m x 50 m) comprennent les étapes suivantes :

- Plateforme de travail (Figure 2): elle est nécessaire pour assurer la stabilité des machines. Le matériau volcanique disponible sur site, matériau allégé connu sous le nom de tezontle (γ = 13,7 kN/m³), a été utilisé pour constituer 1m de plateforme de travail.
- II. Instrumentation : plusieurs instrumentations (plaques de tassement, capteurs de dépression, piézomètres, inclinomètres) ont été installées à l'intérieur et à l'extérieur de la zone (voir Figure 3).
- III. Drains verticaux et horizontaux (Figure 4): les drains verticaux sont réalisés jusqu'à 25 à 30 m de profondeur suivant une maille triangulaire de 1,2 m x 1,2 m. Les drains horizontaux sont ensuite installés sans connexion physique avec les drains verticaux. La connexion est établie à travers la couche drainante mise en place entre le sol et la membrane étanche.
- IV. Membrane étanche et système de pompage : le système de pompage est composé de deux pompes à vide placées sur les côtés Nord et Sud de la zone. Les Figures 6 et 7 montrent respectivement la mise en place de la membrane étanche avant et après la mise en route du vide (démarrage du pompage). On observe que le système de pompage utilisé permet d'avoir un contact parfait entre la membrane et le sol. La Figure 7 présente une vue générale sur toute la zone sous vide, le système du pompage et quelques instrumentations installées.
- v. Remblais de compensation et surcharge : la dernière étape consiste à mettre en place 1 m de remblais constitués de 0,3 m de couche de protection de sable qui protège la membrane étanche et de 0,7 m de matériau allégé (tezontle).



Figure 2. Plateforme de travail.



Figure 3. Mise en place de l'instrumentation.



Figure 4. Réalisation des drains verticaux et horizontaux.



Figure 5. Mise en place de la membrane imperméable (Avant mise en route du vacuum)



Figure 6. Mise en place de la membrane imperméable (Après mise en route du vacuum)



Figure 7. Vue sur la zone d'essai sous vacuum.

4. Résultats de la zone d'essai Menard

4.1. Dépression de vide (vacuum)

Les capteurs utilisés pour mesurer la dépression étaient répartis sur toute la surface de la zone d'essai et installés directement sous la membrane étanche. La dépression de vide appliquée au sol a donc été suivie durant les 180 jours de pompage. La Figure 8 montre l'évolution des dépressions enregistrées. On observe que le système de pompage utilisé (deux pompes installées à l'extérieur de la zone sur les côtés Nord et Sud) a permis d'appliquer une dépression initiale de 72 kPa. Notant que la ville de Mexico est située à 2228 m d'altitude, la dépression maximale qu'il est possible d'appliquer correspond à la pression atmosphérique, soit 78 kPa. Le système adopté avait donc une efficacité de 92% (72 kPa sur 78 kPa possibles). Les valeurs se sont ensuite stabilisées autour d'environ 63 kPa de dépression sur l'ensemble de la plate-forme. Cette diminution est due au tassement du sol qui génère une perte de charge entre les pompes (situées à l'extérieur de la zone, sans tassement et restant à 75 kPa de pression durant l'essai) et le sol.

Durant les 6 mois de l'essai, la dépression de vide moyenne appliquée était donc supérieure à 60 kPa, ce qui correspond à la mise en place de 3m, au minimum, de remblai de surcharge avec un poids volumique de 20 kN/m³.

4.2. Pression interstitielle

Les piézomètres électriques installés ont permis de suivre l'évolution des pressions interstitielles à différentes profondeurs dans la zone de traitement. La Figure 9 présente la variation des pressions interstitielles mesurées durant les différentes phases. On observe que l'installation de la plate-forme de travail entraîne une augmentation de la pression d'eau. Le démarrage de la consolidation atmosphérique (application du vide) a ensuite généré une diminution de la pression d'eau avec le temps, ce qui conduit à une augmentation égale en termes de contraintes effectives. La Figure 9 montre également que les deux étapes de mise en place de remblai de compensation et surcharge entrainent une augmentation instantanée de la pression interstitielle suivie par une phase de consolidation. La vitesse de diminution de la pression interstitielle durant la phase de

consolidation est directement liée à l'espacement des drains verticaux et à la perméabilité du sol.

Une fois le pompage arrêté, la pression d'eau a continué à diminuer dans tous les piézomètres. Le sol a donc continué à consolider sous l'effet du vide maintenu dans le sol à cause de l'étanchéité de la membrane.

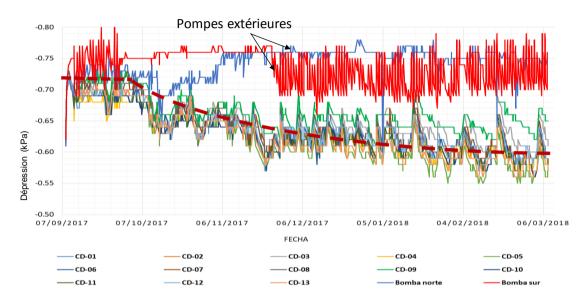


Figure 8. Historique des dépressions enregistrées dans les capteurs situés sous la membrane.

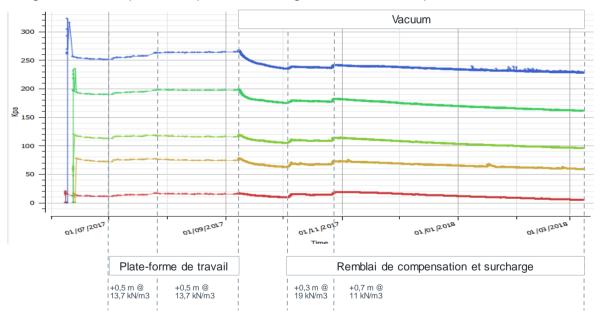


Figure 9. Historique des pressions interstitielles mesurées à partir des piézomètres électriques.

4.3. Tassements

Les courbes des tassements obtenues à partir des plaques de tassement installées à l'intérieur et à l'extérieur de la zone d'essai sous l'effet du vide (63 à 70kPa) et les 2m de préchargement (27kPa) sont présentées dans la Figure 10. Les mesures effectuées montrent que la surcharge appliquée conduit à des tassements importants à l'intérieur de la zone, supérieurs à 2,2m en 6 mois avec un maximum de 2,9m mesuré au milieu de la zone. A l'extérieur de la zone, on obtient des tassements compris entre 71cm et 115cm

dans les plaques très proches de l'extrémité de la zone. Les plaques situées plus loin donnent des tassements inférieurs à 3cm.

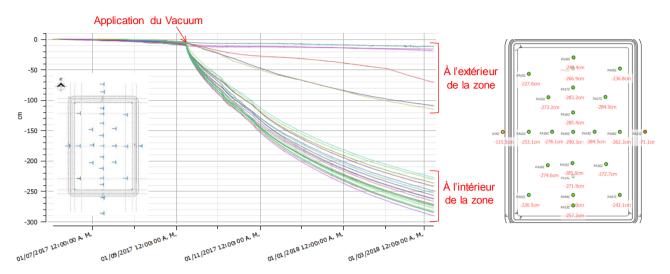


Figure 10. Evolution des tassements à l'intérieur et à l'extérieur de la zone.

La Figure 11 montre les profils en travers Nord-Sud de tassements obtenus tous les mois après le démarrage de la consolidation atmosphérique. On observe que les profils sont relativement plats, contrairement à ce qu'on obtient avec un préchargement classique. Ces courbes correspondent à la superposition de l'effet de la dépression atmosphérique, quasiment homogène, avec l'effet du remblai connu pour ses profils en cuvette.

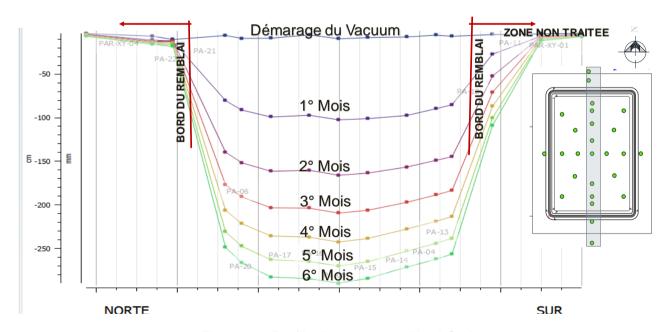


Figure 11. Profils de tassement Nord-Sud.

Le volume d'eau pompé dans les pompes a également été mesuré. La Figure 12 présente le volume d'eau pompé par jour (points rouges) et le volume d'eau cumulé (courbe bleue). Ces mesures permettent de vérifier le principe de la consolidation atmosphérique qui consiste à retirer un certain volume d'eau égal à la perte de déformation obtenue. Le volume d'eau cumulé de pompage est égal à 9 353m³. Ce volume correspond parfaitement à la perte de volume estimé à partir des tassements mesurés (9 628m³).

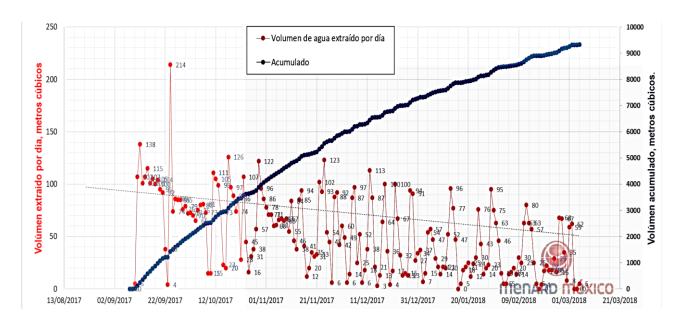


Figure 12. Volume d'eau extrait durant le pompage.

7. Conclusion

L'efficacité de la technique d'amélioration des sols par consolidation atmosphérique a été étudiée sur le site du nouvel aéroport de Mexico à Texcoco par la réalisation d'une zone d'essai. Plusieurs résultats intéressants ont été obtenus à l'aide des instrumentations mises en place. Le procédé Menard Vacuum a permis d'obtenir 72kPa de dépression sur les 78kPa possibles à atteindre dans la ville de Mexico. Après 6 mois de pompage, un tassement de 2,9m a été mesuré au centre de la zone. Ce tassement correspond à un degré de consolidation globale de 46%. Les sondages et essais au laboratoire réalisés avant et après traitement par consolidation atmosphérique ont mis en évidence une amélioration significative des différents paramètres géotechniques suivis.

8. Références bibliographiques

- [1] G. Auvinet, E. Méndez, M. Juárez (2017). Recent information on Mexico City subsidence. 19th ICSMGE,TC305, Seoul.
- [2] J.M. Cognon (1991). Vacuum consolidation. Rev. French Geotechnique (57), 37-47.
- [3] F. Massé, C. Spaulding, P. L. C. Wong and S. Varaksin (2001) Vaccum consolidation: a review of 12 years of succeful development. *Geo-Odyssey-ASCE/VIRGINIA TECH-Blackburg, VA USA June 9-13.*
- [4] P. Liausu and H. Scache (2009). Treatment of soft marine clay by vacuum consolidation. *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. doi:10.3233/978-1-60750-031-5-2386.*
- [5] V. N. Ghionna, L. G. de Mello, V. Pastore, R. Andrighetto and L. P. Cammarota (2018). Vacuum preloading with drain to drain method for the new international airport of Mexico city. *Deep Foundations Institute*.