

PROCESSUS D'ANALYSE ET DE CONCEPTION DES FONDATIONS PROFONDES D'UN ENTREPOT ENTIEREMENT AUTOMATISE DANS DES SOLS DIFFICILES

PROCESS OF ANALYSIS AND DESIGN OF DEEP FOUNDATIONS OF FULLY AUTOMATED WAREHOUSE IN DIFFICULT SOIL CONDITIONS,

Michal Marchwicki¹, Serge Lambert²

¹ Keller Pologne

² Keller Fondations Spéciales

RÉSUMÉ – De nos jours, le secteur de la construction a comme objectif un consensus entre les coûts et la fiabilité de la structure. L'objet analysé est un entrepôt entièrement automatisé de grande hauteur, avec une superficie au sol d'environ 120 x 50 m et une hauteur de 35 m. Les entrepôts de grande hauteur font partie des structures nécessitant une étude particulière très pointu, du fait des critères stricts de tassement absolus et différentiels du dallage. Les conditions du sol sont complexes avec notamment de la tourbe (MO > 50%), des sols sablonneux alternant avec des sols organiques suivis de gyttia (sol organique MO de 30% environ) présent jusqu'à une centaine de mètre de profondeur. L'ouvrage en question représente un cas extrême en termes de dimensionnement du fait du contexte géotechnique. L'article présente le processus d'élaboration d'une solution permettant un système de fondation sûr, l'analyse des pieux testés, les modèles de construction appliqués et résume le processus de mise en œuvre de la fondation.

ABSTRACT – Nowadays, the construction industry aims to ensure a consensus between costs and the reliability of the structure. The analysed object is a high storage fully automated warehouse with a footprint of approximately 120 x 50m, 35m high. High storage warehouses in connection with the strict requirements for total settlements and angular deflection of the foundation slab belong to the group of objects requiring an individual design approach. The soil conditions are complex, including peat (Iom > 50%), sandy soils layered with organic soils underlain with gyttja's (organic soil Iom ca. 30%) reaching to 100m below ground level. The above-mentioned construction in combination with local soil conditions creates an extreme design case. The article presents the process of elaborating a solution that enables safe foundation system, analysis of conducted test piles, applied construction models and summarizes the process of foundation implementation.

1. Introduction/ Introduction

Ces dernières années, l'une des plus grandes entreprises du marché des produits alimentaires en Europe Centrale et de l'Est a décidé d'investir dans de nouvelles installations de production et de logistique sur 4 sites en Pologne. Le cœur de chaque centre logistique nouvellement développé est un entrepôt automatique de grande hauteur appelé SILO. Le cas présenté fait référence à un SILO dont les dimensions sont de 120 x 50 x 35 m et dont la capacité est de 30 000 palettes.

Dans cet article, un exemple d'une solution de fondation d'un SILO spécifique est présenté avec une description de la phase de conception et de la solution finale associée à une méthode observationnelle.

2. Caractéristiques de la structure

L'entrepôt est autoportant par sa structure composée de rack en acier d'une hauteur comprise entre 30 à 40 m. Les marchandises sont stockées principalement sur des palettes déplacées par des grues automatisées. L'ensemble du système est entièrement automatisé et nécessite de remplir des critères très stricts sur la distribution des charges et les déformations admissibles.

Le système informatique responsable de l'exploitation de l'entrepôt, assure également l'étalement des charges sur les racks pour atteindre la distribution de charge uniforme sur la dalle de fondation ; de plus, pour garantir des opérations sûres et efficaces durant toute la vie du système, les critères de déformation de fondation prescrits par le fournisseur de la technologie ou par la Fédération Européenne de Manutention des Matériaux (FEM- EUR) devaient également être remplis.



Figure 1. Exemple de structure SILO (www.kocherre-galbau.com)

Dans le cas présenté avec une hauteur de SILO d'environ 35 m, le fournisseur de technologie a spécifié un radier permettant un tassement différentiel de $1/2000^e$, tant dans la situation longitudinale que transversale. De plus, le tassement maximal au cours de la période d'exploitation (environ 30 ans) devrait être limité à moins de 3 cm afin de limiter l'incidence potentielle sur les coûts des éléments de compensation structurelle.

3. Conditions géologiques et hydrogéologiques

L'entrepôt grande hauteur de stockage se situe au centre de la Pologne. La campagne de reconnaissance préliminaires comprenait l'exécution de 15 forages de reconnaissance destructifs jusqu'à une profondeur de 12,0 m et de 4 CPTu. Un complément de reconnaissance plus profonde jusqu'à 60 m de profondeur a été réalisé dans un deuxième temps par des sondages carottés, des essais au pénétromètre statique et au dilatomètre.

Les investigations de laboratoire sont constituées d'essais triaxiaux CD/CU, des études sur les propriétés physiques (poids unitaire, teneur en humidité naturelle, limites d'Atterberg, teneur en carbonate, teneur en matière organique totale) et des essais oedométriques.

3.1 Résultats des investigations géologiques

Les résultats de ces investigations ont mis en évidence quatre formations principales sous une couche de remblais sablo-graveleux de 1,5 m maximum :

- une argile organique avec des passages tourbeux très compressible (I) jusqu'à 2 à 5 m de profondeur. La cohésion non drainée varie de 10 à 60 kPa et la teneur en matière organique MO de 15 à 84%,
- des sables compacts à très compacts légèrement graveleux (II) avec des intercalations de lentilles argileuses molles. L'épaisseur de cette formation varie de 9m à 15m.
- une couche d'argile molle (III) jusqu'à 25 m . La cohésion non drainée est de l'ordre de 150 kPa avec un MO de 5 à 20 %,
- enfin une formation d'argile d'origine fluvio-lacustre le Gyttja (IV) pouvant atteindre 75 m d'épaisseur. La MO varie de 5 à 30 %.

Le niveau d'eau piézométrique se situe à une profondeur moyenne de 1,0 m/TN.

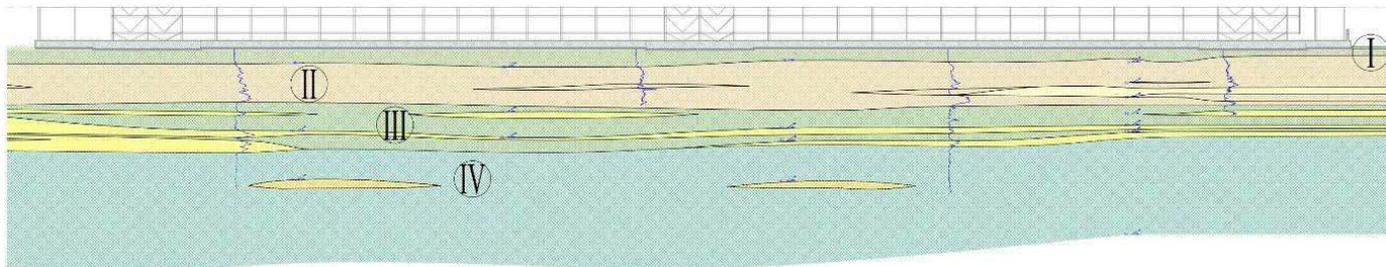


Figure 2. coupe géologique

3.2 Modèles de calcul

Pour effectuer une estimation des tassements la plus réaliste possible, il y a lieu de retenir une loi de comportement adaptée et des hypothèses de sol les plus réalistes possibles. Pour les calculs aux éléments finis PLAXIS, les loi de comportement Hardening Soil (HS) et Hardening Soil Small (HSs) ont été utilisés pour les formations sableuses (II) et argileuses (III et IV) et Soft Soil (SS) pour la formation argilo-tourbeuse (I).

Couches	γ_{sat}	φ	c	E_{oed}	E_{50}	E_{ur}	G_0	$\gamma_{0.7}$	K^*	λ^*
	(kN/m ³)	(°)	(kPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)			
Remblai	20	22	5	60	60	150	-	-	-	-
Argile tourbeuse (I)	12.8	20	16	-	-	-	-	-	0.05	0.205
Sable (II)	20	39	0.1	>100	125	375	-	-	-	-
Argile (III)	15.5	14	12	10.5	10.5	31.5	-	-	-	-
Gyttja (IV)	13.8	18	18	14.7	14.7	44.1	168	10 ⁻⁵	-	-

Tableau 1. Résumé des calculs aux éléments finis 2D.

4. Solutions étudiées

La conception initiale se basait sur une solution de renforcement de sol par inclusions rigides ou de pieux ancrées dans les sables. Il s'est vite avéré que les critères de tassements différentiels ne pouvaient être atteints en raison de la compressibilité des couches argileuses en profondeur (Tableau 2).

Solution	S max (cm)		S/L < 1/2000 (Y/N)	
	HS	HSs	HS	HSs
IR sans préchargement	4.97	3.25	N	N
IR avec préchargement 40 kPa	4.32	2.73	N	N
IR avec préchargement 60 kPa	3.63	2.17	N	N

Tableau 2. Résultats comparatifs des différentes solutions étudiées.

Une solution de pieux 3TER de 620 mm de diamètre descendus à 26 m a donc été proposée et retenue pour le client, les pieux étant disposés sous chaque poteau de maille 4,44 x 3,19 m. Un modèle aux éléments finis a été élaboré avec le logiciel PLAXIS 2D pour définir les tassements absolus et différentiels. Le modèle a permis d'intégrer l'incidence d'un préchargement de 40 kPa (cas a) et de 60 kPa (cas b) sur les tassements. Les résultats de l'analyse sont présentés dans le tableau 3.

Solution	S max (cm)		S/L < 1/2000 (Y/N)	
	HS	HSs	HS	HSs
IR sans préchargement	3.92	2.40	N	N
IR avec préchargement 40 kPa	2.81	1.28	Y	Y
IR avec préchargement 60 kPa	3.10	1.78	Y	Y

Tableau 3. résumé des résultats de calculs aux éléments finis 2D

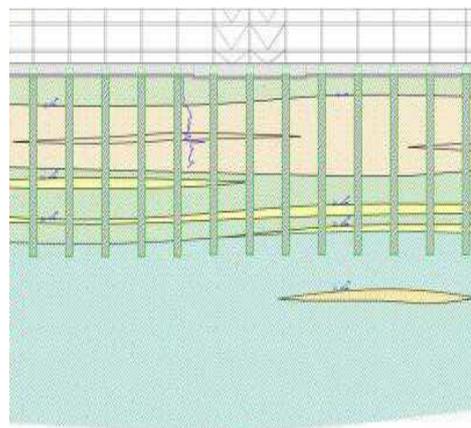


Figure 3. Coupe longitudinale du SILO avec la représentation des pieux.

5. Solution de fondation définitive

Sur la base des solutions préliminaires de fondation étudiées et afin de maintenir la rentabilité requise, le client a décidé d'augmenter la capacité du SILO de 30% et de réduire les délais de construction. Le préchargement a donc finalement été supprimé. Deux autres solutions de pieux ont été analysées à nouveau sur la base du modèle Plaxis 2D et 3D. La première consistait à utiliser des pieux 3TER de 800 mm de diamètre atteignant 36 m. La seconde solution analysée consistait à utiliser des pieux vissé INSER de 500 mm de diamètre atteignant 40 m.

À ce stade, une fois de plus, la charge a été appliquée comme une charge uniformément répartie de 80 kPa sur toute la surface de la dalle.

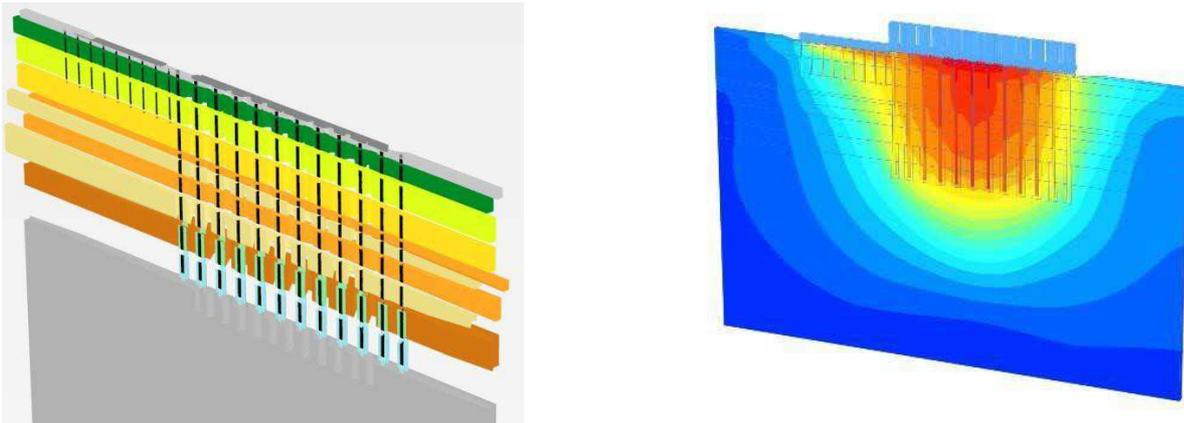


Figure 4 : modèle Plaxis 3D de la solution pieux 3TER à 36 m de profondeur.

Pour les deux solutions, le modèle aux éléments finis 2D a été utilisé pour effectuer une analyse paramétrique de sensibilité des paramètres de l'argile Gyttja et à partir des modèles de comportements HS et HSs. Un paramétrage a été effectué sur la base des résultats des tests triaxiaux de l'argile Gyttja. On peut distinguer deux types d'échantillons représentatifs de cette formation. La première catégorie se caractérise par une teneur en eau d'environ 110-120% (échantillons K3) et l'autre d'environ 30-40% (échantillons K5) avec à chaque fois des caractéristiques de compressibilité différentes.

Etudes	S max (cm)		S/L < 1/2000 (Y/N)	
	HS	HSs	HS	HSs
Pieu 3TER (échantillon K3)	4.9	3.4	N	N
Pieu INSER (échantillon K5)	2.8	2.5	Y	Y
Pieu INSER (échantillon K3)	4.4	3.0	N	N

Tableau 4. résumé de l'analyse des résultats aux éléments finis 2D et 3D

Le tableau 4 présente un résumé des résultats de l'analyse. Pour les deux solutions analysées, les critères de tassement maximum admissible sont remplis, mais les critères de tassements différentiels n'ont pas pu être entièrement atteints. Etant donné que les hypothèses prises en compte sont sécuritaires (charge uniformément répartie sur la surface et valeurs maximales de l'argile Gyttja), il a été décidé d'étudier plus précisément le comportement des pieux des deux solutions sachant que les profondeurs proposées ont atteint leur limite de réalisation.

6. Planche d'essais sur les pieux

Afin de distinguer laquelle des solutions analysées ci-dessus sera la plus performante, des essais de chargement statique ont été envisagés et réalisés pour des pieux 3TER de 800 mm de diamètre et de 36 m de longueur et pour des pieux INSER de 500 mm de diamètre et de 40 m de longueur. Les résultats des essais de chargement statique servent d'étalonnage final du modèle numérique. Les pieux d'essai sont réalisés dans deux zones (BHA et BHB) où, selon les études de sol, la plus grande différence a été mise en évidence. A chaque fois, trois pieux d'essai ont été exécutés un pieu 3TER et deux INSER (figure 5).

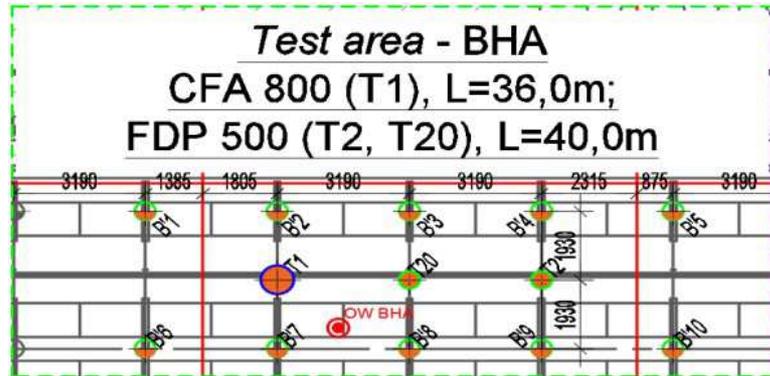


Figure 5 : disposition des 3 pieux testés dans une zone d'essais.

En raison de la présence d'une couche de sable très dense de 10 à 20 m de profondeur, un préforage est nécessaire pour l'installation. Deux méthodes de préforage ont été appliquées lors de la phase d'essai, toutes deux utilisant la tarière creuse sans extraction de déblais (mode "drill-in drill-out") mais avec un diamètre de préforage différent. Les pieux d'essai ont été instrumentés avec des jauges extensométriques afin de séparer la résistance mobilisée du fut et de la pointe. La procédure d'essai a été adoptée de manière adéquate pour les charges nominales et les conditions du sol (tableau 5) avec une charge maximale atteignant 4000 kN pour une charge de service de 1700 kN.

7. Résultats des pieux d'essai et dimensionnement final

Les résultats des essais de chargement sont présentés sur la figure 7 pour 2 pieux 3TER et 2 pieux INSER de chaque zone.

Tous les pieux ont montré un comportement satisfaisants dans les 2 zones. Les pieux INSER 500 mm plus profond de 4 m que les pieux 3TER 800 mm présente une rigidité quasi équivalente jusqu'à la charge maximale de 4 000 kN de l'essai. Une légère différence est tout de même observée entre les 2 pieux 3TER dont le pieu situé dans la zone la plus défavorable, a montré une amorce de fluage à 4500 kN.

Dans un objectif d'optimisation, le pieu vissé INSER de 500 mm de diamètre est finalement retenu.

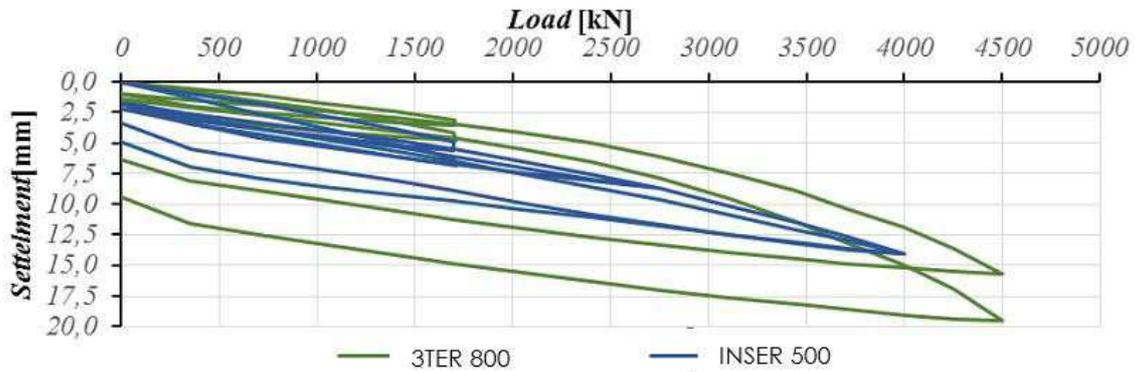


Figure 6 : comparaison des résultats des essais de chargement .

Sur la base du comportement réel des pieux, un calibrage des paramètres de résistance et de rigidité du sol et de l'interface pieu/sol a été effectué (Fig. 7). L'essai de chargement a présenté une réponse beaucoup plus rigide que ce qui avait été supposé initialement dans l'analyse aux éléments finis; en outre, des ajustements mineurs sur les modules de sol ont été apportés aux paramètres de l'argile Gyttja. La précision obtenue de calibrage du modèle, est présentée sur la Figure 7.

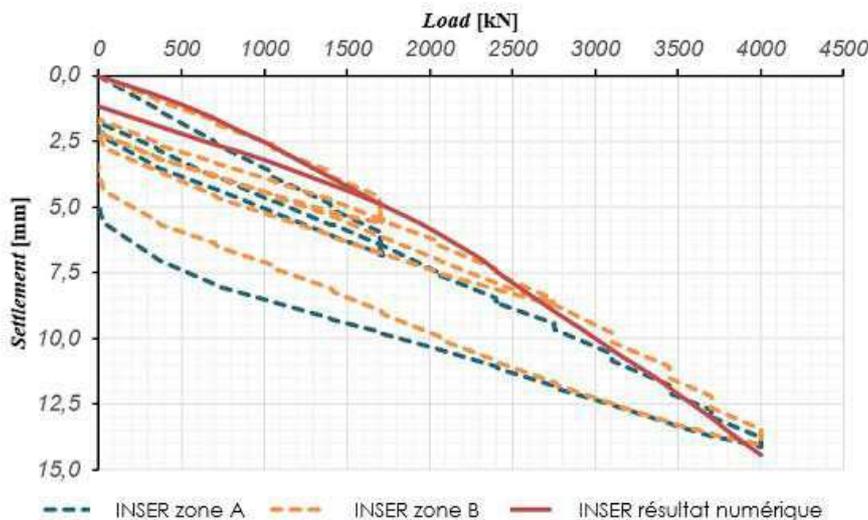


Figure 7: Résultats du modèle d'étalonnage et modèle de pieu d'essai

Sur la base de modèles calibrés, une analyse détaillée des fondations du SILO à nouveau été effectuée en tenant compte cette fois-ci des charges ponctuelles, des chargements et déchargements des différentes zones et l'influence des avoisinants (les routes d'accès et une éventuelle extension future du SILO). Enfin, une analyse de sensibilité des paramètres du sol (résistance et déformations caractéristiques) a été effectuée pour tous les modèles en réduisant de 25 % et 40 % les paramètres des modèles de sol.

L'analyse finale a permis de prévoir la déformation des fondations du SILO à long terme (Figure 8), y compris les valeurs de déformation distinctes aux étapes opérationnelles importantes (charge initiale, 3 ans de fonctionnement, 10 ans de fonctionnement, consolidation totale). En raison de ces conditions de sol très défavorables associées à des charges élevées et des critères de déformations strictes de la dalle, la décision a été prise d'introduire la méthode d'observationnelle selon l'Eurocode 7. Celle-ci est appropriée lorsque "la prédiction du comportement géotechnique est difficile". Les prescriptions de Patel et al. (2007) ont été appliqués.

En gardant à l'esprit que le système de fondation appliqué est unique pour des exigences de déformation de structure aussi strictes, des dispositions supplémentaires ont été prises

dans la conception en accord avec le client et le fournisseur du process du SILO. Sur la base de l'approche observationnelle, un cahier de charges pour l'exploitation du bâtiment a été établi préconisant un chargement progressif en plusieurs étapes. La charge du SILO pour les trois premières années de fonctionnement est réduite à 70 % de la charge totale prévue. Une surveillance de la déformation des dalles du SILO sur 10 ans. devra permettre d'analyser son comportement et d'adapter éventuellement le cahier de charge d'exploitation.

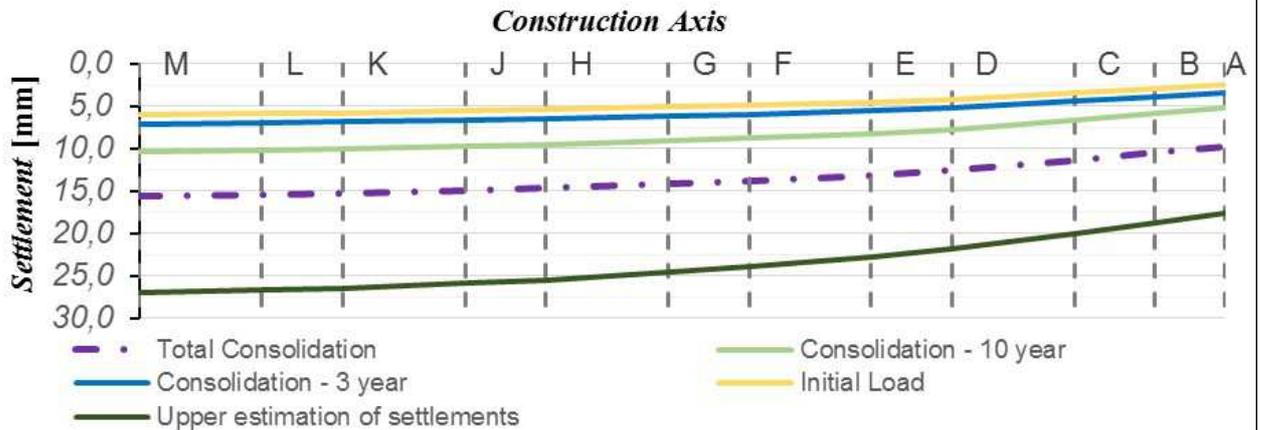


Figure 8 : prévision de tassement des fondations du SILO

8. Conclusions

L'étude de cas présentée sur la conception des fondations de bâtiments industriels montre un exemple de coopération entre les exigences du client, le fournisseur du process, le BE structure, le géotechnicien et l'entrepreneur. L'investissement important dans une campagne de reconnaissance de sol dès le lancement du projet, a permis de trouver une solution technique et économique optimale et de mener le projet à son terme. La présence de sols compressibles et fluants a nécessité une analyse détaillée des paramètres de sols, des calages des modèles de calcul sur la base des essais de chargement des pieux et enfin de l'introduction de la méthode d'observation dans la conception finale.

La méthode observationnelle mise en place doit permettre de garantir un fonctionnement correct de l'ouvrage. En outre, il fournira des données précieuses pour la vérification des calculs de fondations de l'éventuelle extension du SILO. La construction du bâtiment SILO a démarré le premier semestre 2019.

9. Références

Benz, T. 2006. Small-Strain Stiffness of Soils and its Numerical Consequences. Ph.d. thesis, Universitaet Stuttgart.

Maćkowska, R. 2011. Diagenesis of lacustrine chalk and gytja in holocene deposits from northwestern Poland. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego* 444, 149-156.

Patel D., Nicholson D., Huybrechts N., Maertens J. 2007. The observational method in geotechnics. *Proceedings of XIV European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Madrid*, 24-27.

Schanz, T., Vermeer, P.A., Bonnier, P.G. 1999. The hardening-soil model: Formulation and verification. In R.B.J. Brinkgreve, *Beyond 2000 in Computational Geotechnics*, Balkema, Rotterdam, 281-290.