

RENFORCEMENT DE SOL PAR INCLUSIONS RIGIDES SOUS RESERVOIRS D'HYDROCARBURES DE GRANDE HAUTEUR

SOIL REINFORCEMENT WITH RIGID INCLUSIONS UNDER HIGH OIL STORAGE TANK

Pascal SCHAUBER¹, Serge LAMBERT², Maxime MARTHE³, Eric ANTOINET⁴

^{1,2} Keller Fondations Spéciales, Strasbourg, France

³ Antea Group, Lille, France, ⁴ Antea Group, Orléans, France

RÉSUMÉ – Afin de réduire le tassement absolu et différentiel sous cinquante-quatre réservoirs d'hydrocarbures de 32 m de hauteur, un renforcement de sol par Inclusions Rigides (IR) a été réalisé. Le dimensionnement a été réalisé par la méthode des éléments finis, à la fois en utilisant des calculs 2D et 3D. Des essais de chargement sont venus valider ce dimensionnement.

ABSTRACT – In order to reduce total and differential settlement under fifty-four 32 m high oil tanks, a soil reinforcement with Rigid Inclusions (RI) have been installed. The design is carried out using both 2D and 3D Finite elements calculations supported by load tests for validation.

1. Introduction

Dans le but d'augmenter la capacité de stockage et de réexpédition en produits d'hydrocarbures, HES International, l'une des plus importantes entreprise européenne de gestion de produits en vrac, a décidé de créer un nouveau site de stockage d'une capacité de 1,3 millions de m³.

1.1. Localisation et historique du projet

Ce projet, appelé HES Hartel Tank Terminal, se situe dans la zone du Maasvlakte (« Plaine de la Meuse ») dans le port de Rotterdam, qui est une zone remblayée sur la mer depuis le début des années 1970.

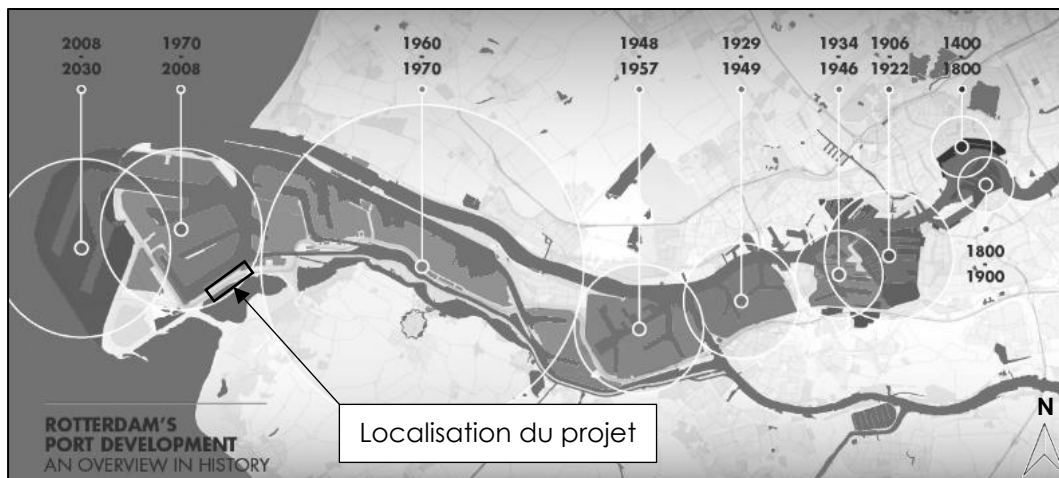


Figure 1. Localisation du projet dans le port de Rotterdam

Le site, d'environ 1100 mètres de longueur pour 170 mètres de largeur, comporte 54 nouveaux réservoirs d'hydrocarbures, d'une hauteur de 32 m chacun pour un diamètre allant de 14,2 à 44,7m.

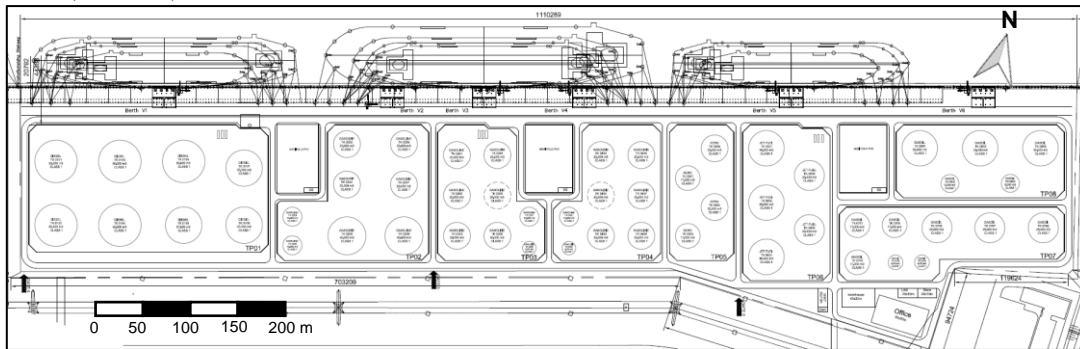


Figure 2. Vue en plan du projet

1.2. Caractéristique des réservoirs

L'ensemble des réservoirs sont de type paroi métallique à toit interne flottant. Selon le diamètre du réservoir, différents types de fondations sont prévus, tel que détaillé dans le tableau ci-dessous :

Tableau 1. Dimensions des ouvrages

Diamètres [m]	Hauteur [m]	Nombre de réservoirs [-]	Type de fondation [-]
14,2 – 15,5 – 19 – 20	32	2 – 2 – 2 – 4	Radier
26,1 – 28,3	32	5 – 6	Poutre annulaire avec remblai technique au centre
28,3 – 31,6 – 37,4 – 38,4 – 39,9 – 44,7	32	12 – 5 – 6 – 3 – 2 – 5	Remblai annulaire en graves avec remblai technique sableux au centre

Les réservoirs de petits diamètres, et donc de grand élancement, sont installées sur un radier, dont l'objectif est d'y fixer la paroi du réservoir afin de mobiliser le contre-poids en cas d'efforts latéraux de vent.

La hauteur des réservoirs sera de 32 m. De fait, la charge liée à l'essai en eau atteint 320 kPa, quand la charge opérationnelle peut atteindre 290 kPa.

1.3. Profil géotechnique du sol

Compte tenu de l'historique du site, le sol est essentiellement composé de sable fin dragué. Cependant, une particularité locale rend la zone sensiblement plus hétérogène. En effet, le projet se situe à la fois sur la digue d'un ancien canal et sur un récent remblaiement tel que le montre les images aériennes ci-dessous:

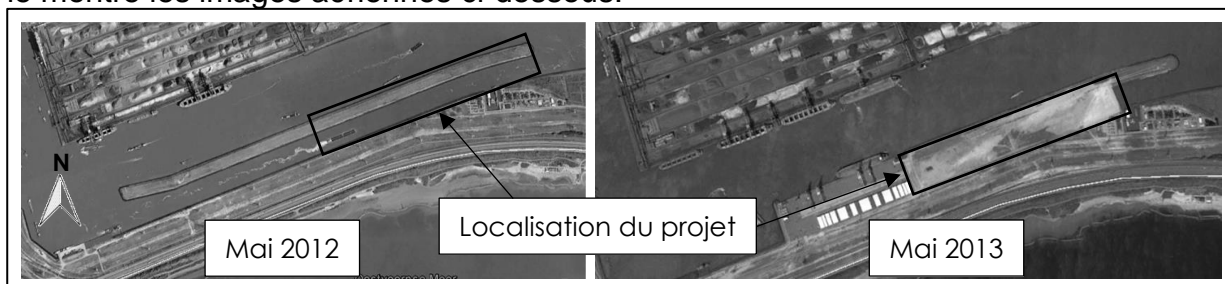


Figure 3. Localisation du projet

La campagne de reconnaissance des sols est composée de plus de 400 pénétromètres statiques (CPT) répartis sur l'emprise au sol de chacun des réservoirs.

Concernant les CPT dans la zone remblayée, ils montrent une coupe de sol globalement homogène sur l'ensemble du site avec une couche de sable très dense sur 7 m d'épaisseur avec une résistance de pointe (q_c) parfois supérieur à 40 MPa. En dessous se trouve une couche hétérogène de sables silteux avec des passées argileuses très molles sur une épaisseur n'excédant pas 4 m. Puis, en dessous une couche de sable très dense est à nouveau présente. Plus en profondeur, vers 30 m, se trouve également une couche d'argile ferme de l'ordre de 2 m d'épaisseur.

Ceci dit, environ 10 % des CPT montrent une variabilité latérale avec une absence de sable très dense proche de la surface mais à la place des silts argileux.

Pour finir, en lieu et place de l'ancienne digue, la coupe de sol ne montre pas de sol compressible.

L'hétérogénéité du site vient donc de la présence d'une ancienne digue constituée de matériaux de bonne qualité et bien compactés, avec une zone de remblaiement sableux issue de draguage qui présente des lentilles plus compressibles composées de sables plus ou moins silteux/argileux.

2. Dimensionnement des inclusions rigides

Dans le but de limiter les tassements totaux, et notamment différentiels des réservoirs, un renforcement de sol par IR a été réalisé.

2.1. Méthode de dimensionnement

L'ensemble du projet a été dimensionné avec la Méthode des Eléments Finis en utilisant les logiciels Plaxis 2D et 3D. De très nombreux calculs ont été réalisés en suivant la procédure suivante : détermination de l'espacement des inclusions à l'aide de calculs Plaxis 2D en utilisant le module axisymétrique du logiciel, qui permet de calculer le tassement au centre du réservoir, et ceux pour chacun d'eux. Puis, pour environ 20 % des réservoirs, réalisation d'un calcul Plaxis 3D tenant compte du nombre réel d'inclusions modélisées à l'aide d'éléments structures, afin de vérifier les tassements différentiels pour différentes dimensions d'ouvrages en sélectionnant les cas les plus critiques.

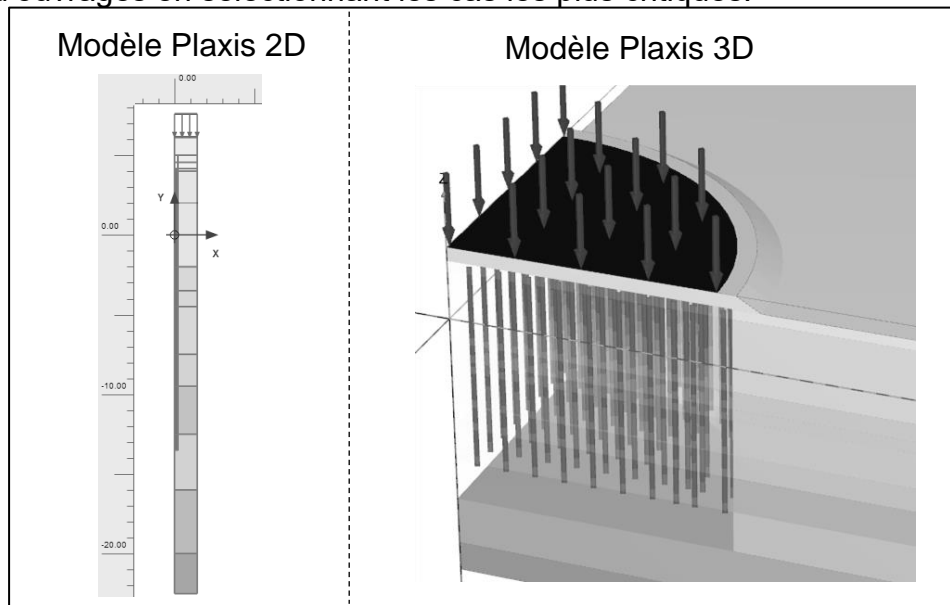


Figure 4. Exemple de modélisation 2D et 3D

2.2. Caractéristique des inclusions

Initialement, les inclusions devaient être installées à l'aide de l'outil INSER® développé par Keller. Cet outil est de type tarière à refoulement qui permet une meilleure efficacité de l'inclusion en termes de pointe et de frottements mobilisables. Compte tenu de la charge

élevée appliquée, le diamètre choisi de l'inclusion est de $\varnothing 420$ mm. L'espacement des inclusions est compris entre 2,2 x 2,2 m et 3,0 x 3,0 m pour une longueur comprise entre 7 et 18 m.

Afin de s'assurer de pouvoir passer à travers la couche de sable très dense, un préforage était prévu.

2.3. Estimation des tassements

2.3.1. Critères de tassements

Plusieurs critères de tassements sont définis tel que le tassement absolu le long de la périphérie devant être inférieur à 200 mm. Aussi, une fois la fin de l'essai de charge en eau et le réservoir vidangé, le tassement sous la charge opérationnelle en bord de réservoir est limité à 100 mm, afin de limiter les contraintes dans les tuyaux une fois connectés au réservoir.

Le tassement différentiel doit être inférieur à $D/100$ entre le centre et la périphérie, avec une limite de $L/400$ le long de la périphérie et une inclinaison du réservoir qui ne doit pas dépasser $H/150$ (avec respectivement, D : diamètre en m, L : longueur en m et H : hauteur en m).

2.3.2. Calculs pour le cas d'un sol homogène

L'approche consiste, pour chacun des réservoirs, à comparer les différents CPT et d'en extraire celui qui montre le profil de sol le plus compressible. Une fois le CPT sélectionné, un calcul Plaxis 2D axisymétrique est réalisé, qui permet de définir la profondeur et la maille du renforcement de sol, ainsi que le tassement au centre du réservoir.

Basé sur ces résultats, un Plaxis 3D est réalisé afin de calculer précisément les tassements : au centre du réservoir, entre le centre et la périphérie et le long de la périphérie. Les figures ci-dessous comparent les résultats de calculs en 2D et 3D :

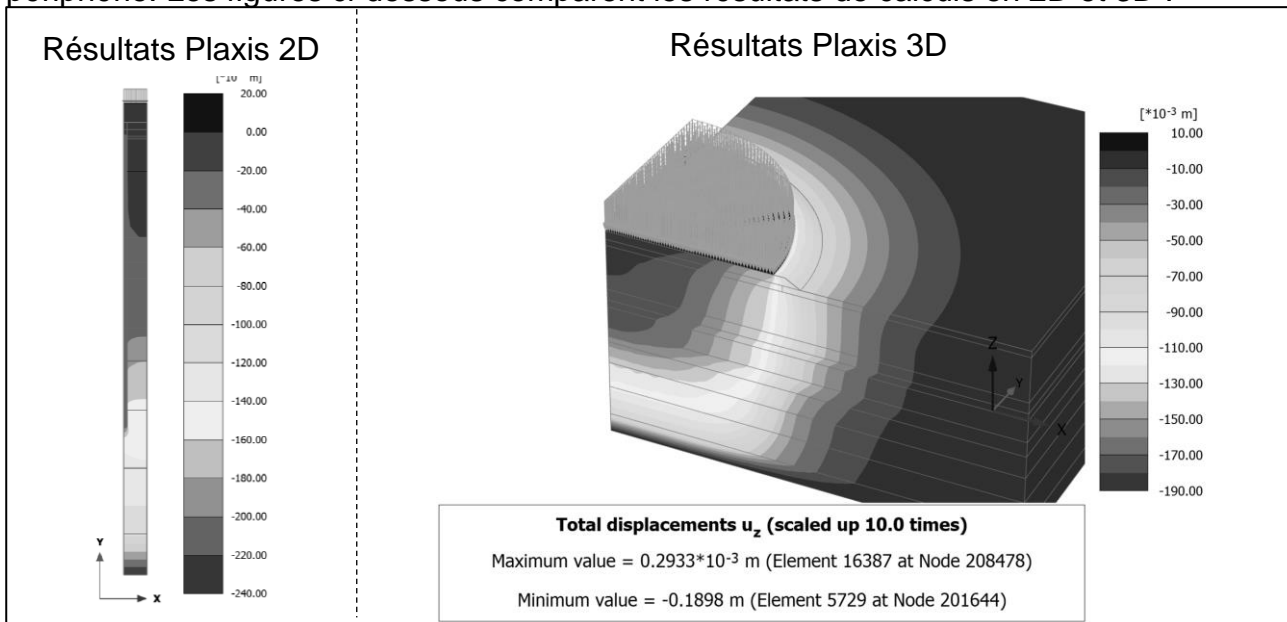


Figure 5. Résultats des calculs de tassements

Les modélisations avec Plaxis 3D affichent un tassement calculé plus faible au centre du réservoir, lié à la capacité de diffusion des contraintes avec la profondeur de ce modèle. La contrainte résiduelle en profondeur est donc plus faible et le tassement en profondeur est alors moins important. Le modèle axisymétrique est donc une approche sécuritaire. Le tassement sur la périphérie du réservoir est de l'ordre de 5 cm de moins que celui au centre, permettant de garantir un tassement absolu inférieur à 20 cm.

Des calculs comparatifs ont été réalisés par Antea Group en utilisant une modélisation 3D avec la Méthode des Différences Finies à l'aide du logiciel Flac 3D. Les résultats des calculs se sont avérés très proches des résultats des calculs de Keller.

2.3.3. Calculs pour le cas d'un sol hétérogène

Certains réservoirs, tel que le 707, montrent un sol particulièrement hétérogène, notamment du fait de la présence d'une argile très molle seulement sur un coté du réservoir. De fait, un calcul en axisymétrie basé sur le CPT le plus défavorable a permis de définir la maille d'inclusions, suivi d'un calcul Plaxis 3D réalisé en considérant l'ensemble des 7 CPT, créant un profil de sol réaliste et hétérogène. Le tassement différentiel le long de la périphérie du réservoir, avec ou sans IR, est comparé ci-dessous :

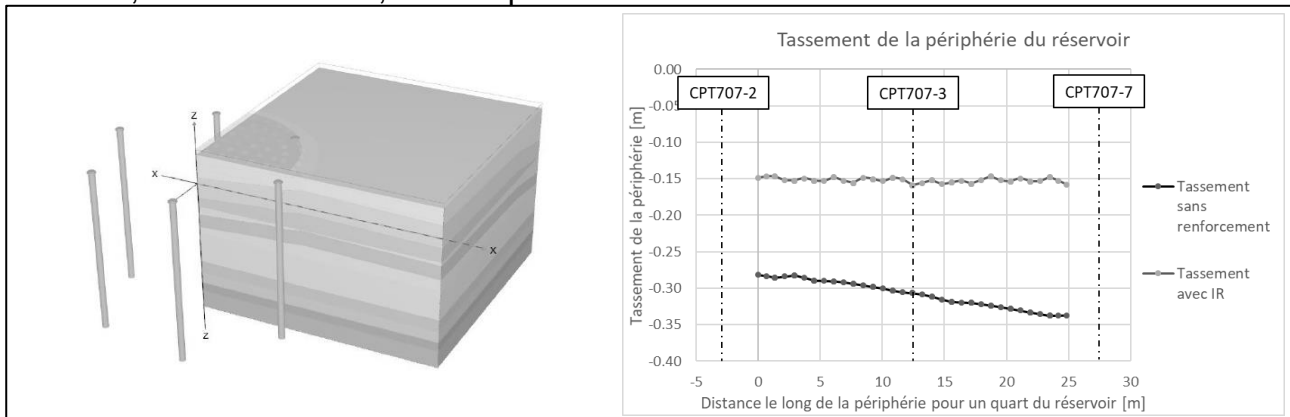


Figure 6. Résultats de calculs de tassements différentiels

On observe que sans renforcement, le tassement différentiel sur le quart de la périphérie du tank est de l'ordre de 10 cm, alors qu'en présence des IR, le tassement différentiel est entièrement atténué.

2.4. Durée de consolidation lors de l'essai de charge en eau

Des calculs comparatifs ont montré que la durée pour atteindre 90 % de consolidation est plus courte dès lors que le renforcement de sol par IR est utilisé. Contrairement à d'autres méthodes d'amélioration de sol qui permettent d'accélérer le temps de consolidation par effet drainant, les IR améliorent le temps de consolidation en réduisant significativement la contrainte appliquée sur les sols compressibles. Ainsi le tassement absolu du réservoir sera nettement moins dépendant de ces couches compressibles, réduisant ainsi le temps pour obtenir 90 % de consolidation globale.

Suite à la demande du client, la durée de l'essai de charge en eau pour certains réservoirs a été réduite à 1 mois, au lieu de 2 mois initialement prévu. Pour respecter cette contrainte, le maillage des inclusions a été resserré afin de réduire davantage la contrainte appliquée sur les couches compressibles.

2.5. Renforcement des inclusions

Les calculs Plaxis 3D ont montré qu'il n'y a généralement pas nécessité de renforcer les inclusions. Or, compte tenu de l'hétérogénéité locale des sols et notamment de la présence de couches plus molles proches de la surface, certaines inclusions de rives ont été renforcées par des poutres types IPE2700 sur 6 m de profondeur.

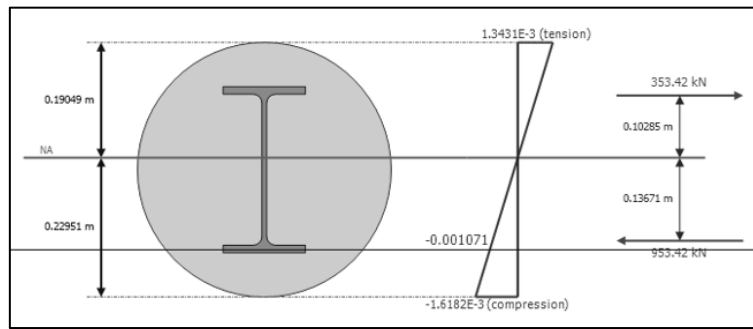


Figure 7. Inclusions rigides renforcées par des poutres IPE2700

3. Exécution du renforcement de sol

3.1. Profondeur de préforage et longueur des inclusions

L'ensemble des CPT a été passé en revue afin de définir des longueurs de préforages et des longueurs d'inclusions sur l'ensemble du site. Ces données ont été implantées dans un logiciel de cartographie.

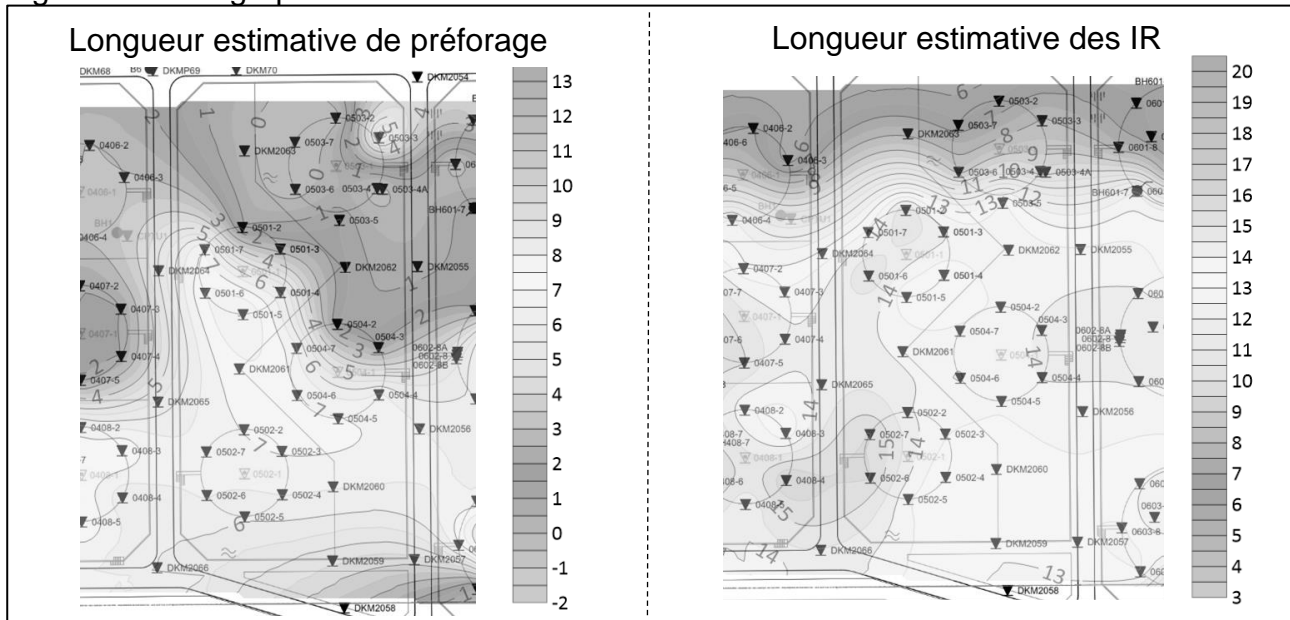


Figure 8. Extrait de carte de contours des profondeurs de préforages et longueurs des IR

Sur la figure de longueur des inclusions (à droite), il peut s'observer qu'en général la longueur est de l'ordre de 14 m. Cependant, la partie au nord montre des profondeurs nettement plus faible, du fait de la présence de l'ancienne digue.

Basé sur cette carte de contour des profondeurs, il a été fourni au foreur des tableaux de longueurs estimées des IR. Le recollément a montré que seul deux réservoirs présentent des inclusions dont la profondeur moyenne déviait de plus de 1 m par rapport aux estimations.

3.2. Forage des inclusions

Malgré l'utilisation de préforage de la couche de sable très dense pour permettre le passage de l'outil INSER® à refoulement, cet outil n'a pas été capable de passer sous de nombreux ouvrages.

De fait, durant le premier mois du chantier il a été décidé de modifier l'outil de forage vers de la tarière creuse. Un balayage rapide des calculs a permis de confirmer que l'utilisation d'un outil type tarière creuse Ø450 mm obtient des résultats de tassement identiques en

considérant la même maille d'inclusions. Ainsi, seul l'outil a été modifié sans avoir besoin de modifier le reste du dimensionnement notamment les plans d'implantations.

Les rendements obtenus se sont avérés légèrement supérieurs à ceux attendus, malgré une modification de l'outil, et ce en lien avec une organisation optimale de l'approvisionnement en béton. Au final, des surcoûts liés à la surconsommation de béton et aux déblais ont tout de même été légèrement supérieur au gain lié à la bonne productivité.

3.3. Tentative d'optimisation des matériaux du matelas de répartition

Le Scope of Work de Keller inclut la réalisation du matelas de répartition. Les Pays-Bas étant un pays n'offrant pas la possibilité d'accéder à des matériaux granulaires concassés à des coûts raisonnables, le client souhaitait que Keller utilise le matériaux sableux présent sur site. Ce matériaux sableux étant particulièrement mal gradué, très uniforme ($D_{10} \approx 0.007$ mm, $D_{90} \approx 0.020$ mm : sable 0/0.02 mm) et correspondant à un sable de dune, il n'a pas été approuvé par Keller. Ce matériau s'avère également non recommandé selon les critères du guide EEMUA Publication 183 App II-2 section 2.7.4.2 pour l'utilisation du sable pour les fondations de réservoirs.

Un compromis a été trouvé avec l'importation de matériaux constitués d'un mélange de sables plus grossiers et d'apports de graviers ($\approx 0/10$ mm GNT). Des essais triaxiaux ont montrés un angle de frottement de 35° , conforme à la valeur utilisée dans les calculs.

4. Contrôle d'exécution

L'exécution de l'ensemble des travaux d'inclusions rigides ont été suivis par Antea Group afin de vérifier la conformité avec le dimensionnement initialement prévu.

De nombreux essais d'intégrités et de compressions sur éprouvettes ont été réalisés. Deux essais de chargement sur inclusions, type système Kentledge, sont venus compléter le programme de contrôle. Ces essais sont réalisés sur le toit du matelas de répartition, de 80 cm d'épaisseur, afin de tester l'ensemble du système inclusion + matelas. La charge est appliquée sur une surface équivalente à la maille de l'inclusion testée.



Figure 9. Essai de chargement système Kentledge

Le premier essai est réalisé sur une inclusion forée avec l'outil INSER® $\varnothing 420$ mm jusqu'à une charge de 210 tonnes (430 kPa sur une surface de 2,2 x 2,2 m) ; quant au second il est réalisé sur une inclusion forée en tarière creuse $\varnothing 450$ mm jusqu'à une charge de 270 tonnes (430 kPa sur une surface de 2,5 x 2,5 m).

Ces deux essais ont montrés des tassements inférieur à 20 mm. Les résultats des essais de chargements ont été comparés avec des simulations d'essais de chargements réalisés avec Plaxis 2D et Plaxis 3D en considérant les IR en éléments structure (Embedded Beams) ou en éléments volumiques. Les résultats sont comparés dans le graphique ci-après :

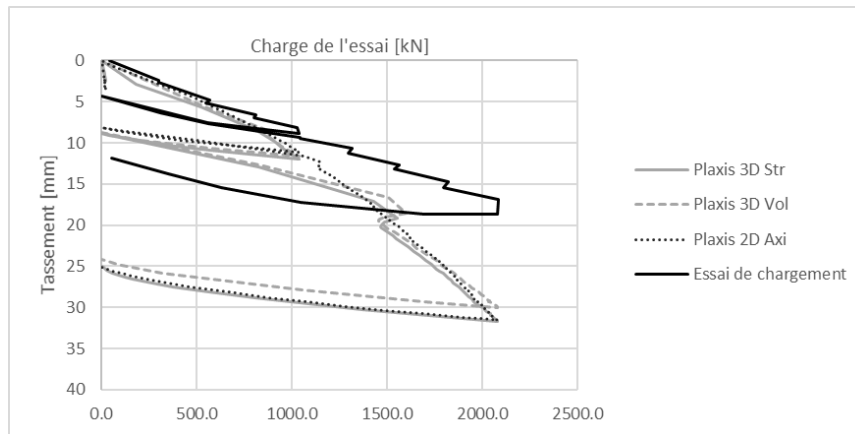


Figure 10. Résultats de l'essai de chargement

Les différentes simulations des essais de chargement montrent des résultats très similaires selon les méthodes avec des tassements de l'ordre de 50 % supérieurs aux tassements mesurés. Ce comparatif permet de montrer que les calculs de tassements ainsi que l'ensemble du design de renforcement de sol par IR sont conformes aux attentes et sont sécuritaires.

5. Conclusion

L'utilisation de renforcement de sol par Inclusions Rigides (IR) permet d'obtenir, même sous des charges élevées de 320 kPa et sur un sol présentant une hétérogénéité latérale, un tassement absolu limité à moins de 200 mm sur la périphérie des réservoirs et surtout un tassement différentiel très faible.

Cette solution permet aussi de réduire le temps de consolidation durant l'essai de charge en eau en diminuant considérablement la charge appliquée sur les sols compressibles.

Les essais de chargement ont montré que la modélisation sur Plaxis 2D et 3D a tendance à légèrement surestimer les tassements, ce qui montre que le dimensionnement est légèrement sécuritaire.

Au total, 7000 IR ont été installées pour un total de 90 000 mètres linéaires sur une durée de 5 mois, à l'aide de quatre ateliers de forage.

Les réservoirs sont actuellement en cours de construction et les essais de charge en eau devraient démarrer dans les mois à venir.

Enfin, on notera l'apport important des recommandations ASIRI, dans leur version traduite en anglais, qui ont permis au maître d'ouvrage et à ses maîtres d'œuvre, de s'appuyer sur un document technique de référence pour accepter et valider ces techniques d'inclusions rigides, peu pratiquées à ce jour aux Pays-Bas.

6. Références bibliographiques

- Presse des Ponts (2012). *Projet National ASIRI - Recommandations pour la conception, le calcul, l'exécution et le contrôle des ouvrages sur sols améliorés par inclusions rigides verticales.*
- NF P94-261 (2013). AFNOR, *Justification des ouvrages géotechniques - Fondations Superficielles.*
- NF P94-262 (2012). AFNOR, *Justification des ouvrages géotechniques - Fondations Profondes.*
- Ernst & Sohn; 2nd edition (2012). *Recommandations of the Piling Committee of the German Geotechnical Society (EA-Pfähle).*