

Apports de l'interaction sol-structures dans le dimensionnement des ouvrages portuaires

H Abdmeziem¹, V Guirado², F Ali Ahmad², G Baldi³, M Brun³, R Taravella² et S Burlon³

¹ Haropa - direction territoriale du Havre, Le Havre, France

² Setec tpi - Groupe Setec, Paris, France

³ Setec Terrasol - Groupe Setec, Paris, France

Résumé. Les ouvrages portuaires constituent des projets particuliers pour l'ingénierie, du fait qu'ils agrègent plusieurs spécificités en interaction. Les modifications d'exploitation des quais et des terre-pleins conduisent parfois à devoir réutiliser des ouvrages existants d'âges variables. Dans ces situations, la maîtrise des déplacements des différents ouvrages est fondamentale et nécessite la prise en compte de l'interaction sol-structures. À partir de l'exemple des renforcements du quai Joannès-Couvert au Havre pour la construction d'un quai de 200 mètres dit « Jack-up », dédié à l'accueil de navires auto-élévateurs permettant le chargement de composants lourds stockés en bord à quai, et d'un quai de 200 mètres dit « Lo-Lo », dédié à l'import et à l'export de différents composants éoliens, cet article vise à illustrer par des cas concrets la nécessité de prendre en considération l'interaction sol-structures.

1. Introduction

Les ouvrages portuaires constituent des projets particuliers pour l'ingénierie, du fait qu'ils agrègent plusieurs spécificités en interaction. Les modifications d'exploitation des quais et des terre-pleins conduisent parfois à devoir réutiliser des ouvrages existants d'âges variables. Dans ces situations, la maîtrise des déplacements des différents ouvrages est fondamentale et nécessite la prise en compte de l'interaction sol-structures. Cet article vise à illustrer, par des cas concrets, la nécessité de ce type d'analyse dans le cadre du réaménagement du quai Joannès-Couvert au Havre pour l'industrie des éoliennes en mer.

Le projet de réaménagement d'une partie du quai Joannès-Couvert consiste à réaliser deux nouveaux quais : un quai de 200 mètres dit « Jack-up », dédié à l'accueil de navires auto-élévateurs, équipés de grues de bord et appelés navires Jack-up d'où le nom du quai, et un quai de 200 mètres dans la continuité Est du quai « Jack-up » dit « Lo-Lo », abréviation de « Lift on - Lift off » (Figure 1).

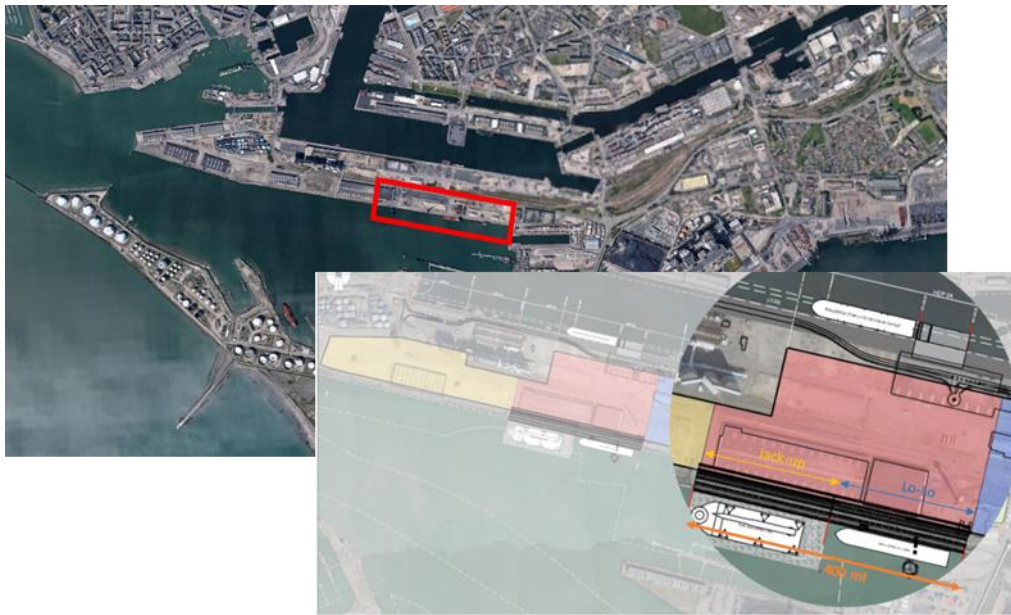


Figure 1. Localisation du quai Joannès-Couvert, ainsi que des nouveaux quais « Jack-up » et « Lo-Lo », dans le port du Havre.

2. Contexte

2.1. L'existant

La zone de terre-plein située entre le bassin de marée Théophile Ducrocq et le bassin à flot Bellot présente une largeur de 275m ; la partie Sud constitue le quai Joannès-Couvert, anciennement nommé quai des Transatlantiques. Ce quai se situe côté bassin de marée.

Sur cette partie du quai Joannès-Couvert, le quai est de type mur poids à redans construit entre 1905 et 1920. Ses dimensions principales sont de 14 m d'épaisseur à la base, de 25,5 m de hauteur et s'encastre de 4 m de hauteur dans le terrain naturel. Il est composé d'une maçonnerie de moellons siliceux-calcaires, hourdés à la chaux, parementée de granit de Cherbourg. Il fut construit selon la méthode des caissons havés sous air comprimé (Figure 3), fondés sur des sables mêlés de galets surmontant directement l'Argile de Villerville. A l'arrière du mur, des remblais ont été montés et constitue la plateforme portuaire.

L'explosion de dépôts de torpilles pendant la deuxième guerre mondiale a endommagé cet ouvrage avec des maçonneries en partie détruites. Après la guerre, le quai fut reconstruit en conservant le profil extérieur mais avec diverses solutions de réparation comme l'illustre les Figure 2 et 4.

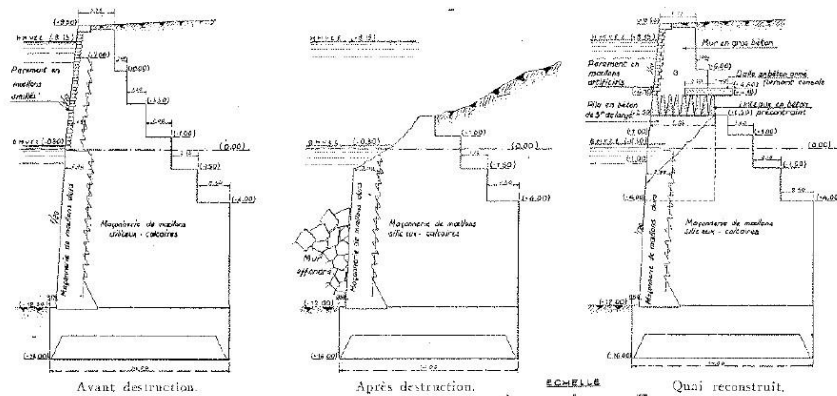


Figure 2. Quai Joannès-Couvert (section centrale)

Hormis les rares sections réparables à la marée, les murailles pleines ont été reconstruites en édifiant un viaduc frontal fondé sur les maçonneries saines subsistantes et supportant un mur d'accostage dont le profil transversal, exécuté en gros béton, reproduit le profil à redans de la partie supérieure du quai détruit. Les piles du viaduc en caisson plein sont espacées de 11 m d'axe en axe. Quant au tablier du viaduc, il est constitué de la juxtaposition de poutres préfabriquées accolées formant des linteaux. Ces poutres sont soit en béton armé de 1,4 m de hauteur (25 t) ou en béton précontraint (5 à 15 t - Figure 4).

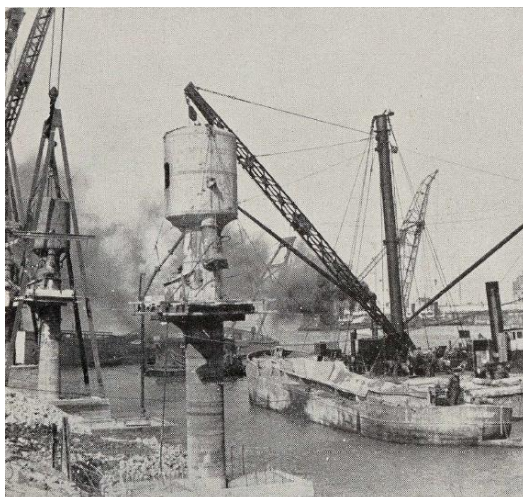


Figure 3. Quai Havrais - Havage des caissons formant le quai ([3])

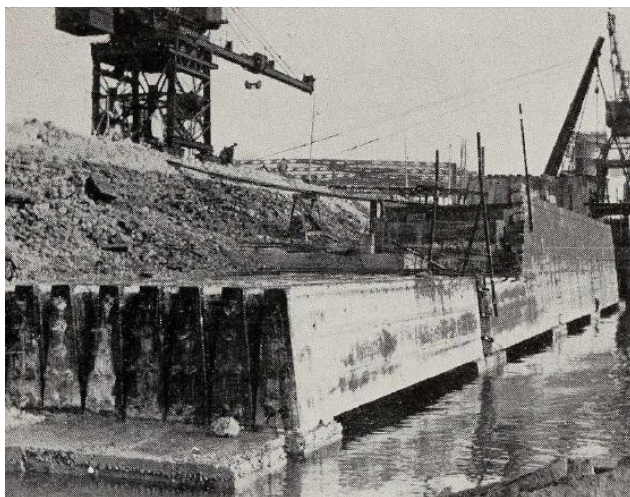


Figure 4. Quai Joannès-Couvert– Reconstruction, linteaux en poutres préfabriquées en béton précontraint 15t ([3])

A l'arrière de ce mur, se situait la gare maritime du Havre sauvée par E. Freyssinet en 1933. Elle fut également détruite lors de la dernière guerre puis reconstruite (300 m au lieu de 600 m).

Ces ouvrages existants aptes à reprendre une surcharge d'exploitation de 3 t/m² n'étaient pas adaptés à recevoir la nouvelle activité éolienne. La seconde gare a ainsi laissé la place à l'industrie des éoliennes en mer, tandis que la réalisation des deux ouvrages dit « Jack-up » et « Lo-Lo » a nécessité l'étude d'aménagements nouveaux (empiètement sur le bassin, confortement, et démolition de certaines structures du mur).

2.2. Contexte géologique et géotechnique :

Situé dans l'estuaire de la Seine, les ouvrages viennent s'inscrire dans un contexte géologique composé de séries alluvionnaires reposant sur un substratum constitué des Argiles de Villerville. De haut en bas, les formations suivantes sont présentes (Figure 5) :

- Remblais d'aménagement, formation d'origine anthropique essentiellement constituée de sables plus ou moins silteux où on peut retrouver des éléments de natures et de tailles diverses (fragments de nature calcaire, silex, briques, etc.) ;
- Dépôts récents, couche de nature organique pouvant présenter soit une tendance silteuse, soit une tendance sableuse ;
- Sables Gris Vert, dépôts estuariens et marins constitués de sables quartzueux fins micacés, silteux et légèrement organiques. Des graviers et galets usés sont aussi observés ;
- Silts inférieurs, silts moyennement organiques de consistance molle en alternance avec des lits d'argile tourbeuse avec parfois en partie supérieure une présence de sables fins à très fins, silteux et lâches. Cette formation a été observée sur la partie Est du quai « Lo-Lo » ;
- Graves de Fond, sédiments fluviatiles, tels que sables moyens à grossiers, graviers et galets siliceux ;

- Argiles de Villerville, formations argileuses essentiellement constituées d'une argile grise à noire assez plastique ferme à raide, datant du Kimméridgien, deuxième étage stratigraphique du Jurassique supérieur.

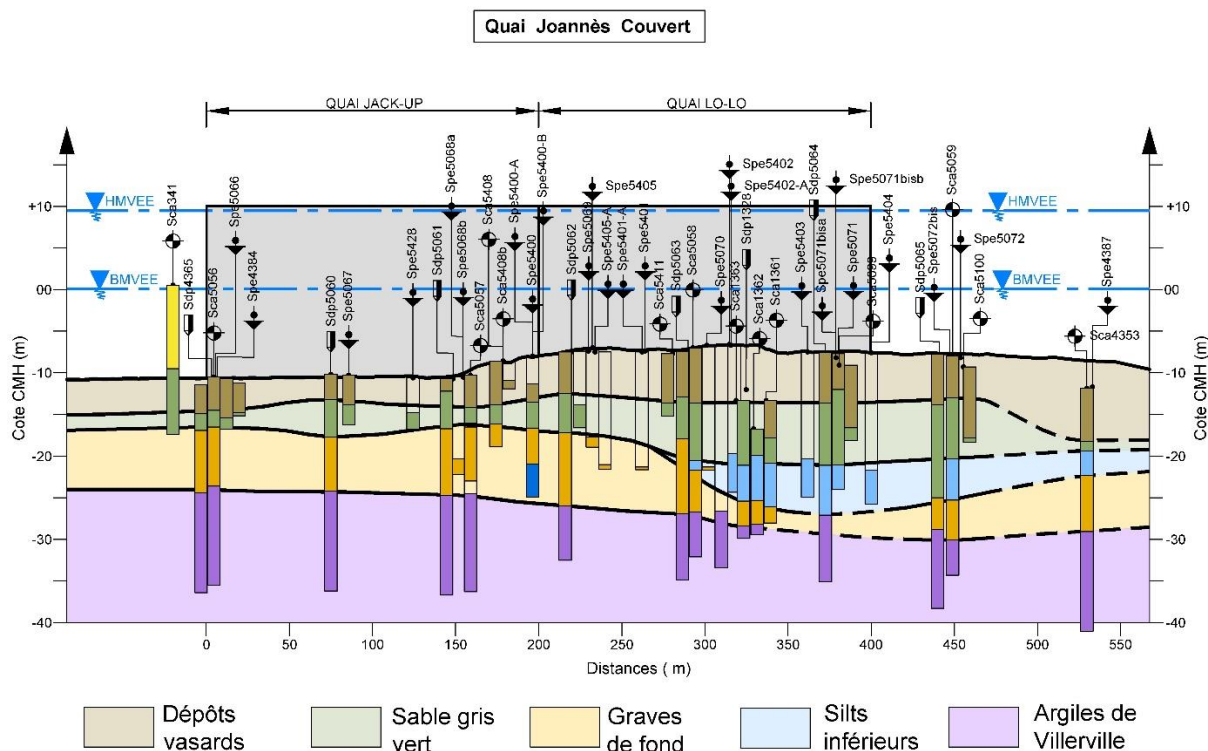


Figure 5. Profil en long géologique quai Joannès-Couvert - Bassin Théophile Ducrocq (G2-PRO)
©Terrasol

A noter une couche de Silts inférieurs qui s'intercale entre les Sables Gris Vert et les Graves de Fond sur une partie du quai « Lo-Lo ». Des Dépôts Vasards sont également présents dans les bassins. Ces derniers seront purgés au droit du quai « Jack-up » pour mettre en place un tapis de grave, mais ne le seront pas au droit du quai « Lo-Lo ».

2.3. Contexte hydrogéologique :

Dans le bassin Théophile Ducrocq, le niveau d'eau varie en fonction des coefficients de marée entre +9,45 CMH (HMVEE) et +0,05 CMH (BMVEE) avec surcote/décote. Dans le terre-plein, l'ensemble des piézomètres disponibles mettent en évidence une hétérogénéité probable de la perméabilité des sols, ainsi que de la structure du mur existant.

3. Description du projet

3.1. Exploitation et charges

Les quais « Jack-up » et « Lo-Lo » doivent être capables de reprendre des charges d'exploitation uniformément réparties ou des charges lourdes dont la position n'est pas fixée, et des charges mobiles de grues (Figure 7).

Le quai « Jack-up » est dédié principalement à 2 fonctions :

- Reprendre le stockage des charges lourdes en bord à quai en attendant leur chargement sur les navires-plateformes de type Jack-up. Ces navires se soulèvent au-dessus de l'eau sur plusieurs pieds appelés « spudcans » (Figure 6), les transformant en plateforme offshore posée sur le fond. Ceci permet une bonne assise de stabilité pendant les manœuvres de la grue de bord manipulant les charges lourdes ou encombrantes ;

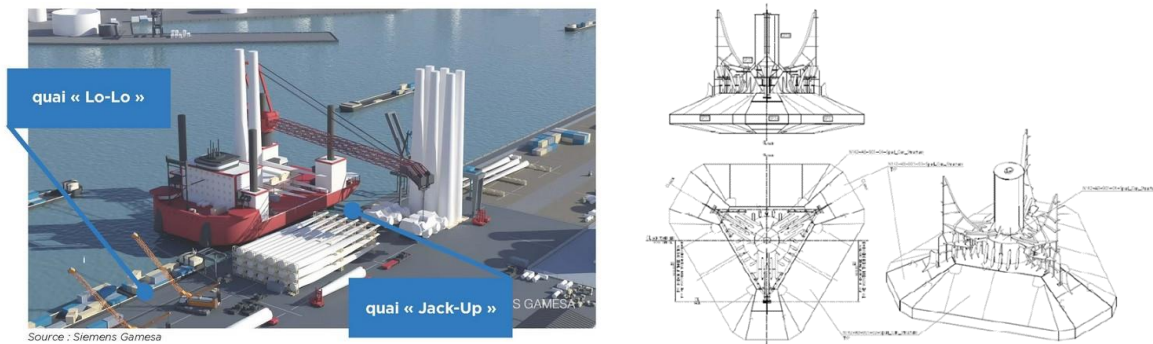
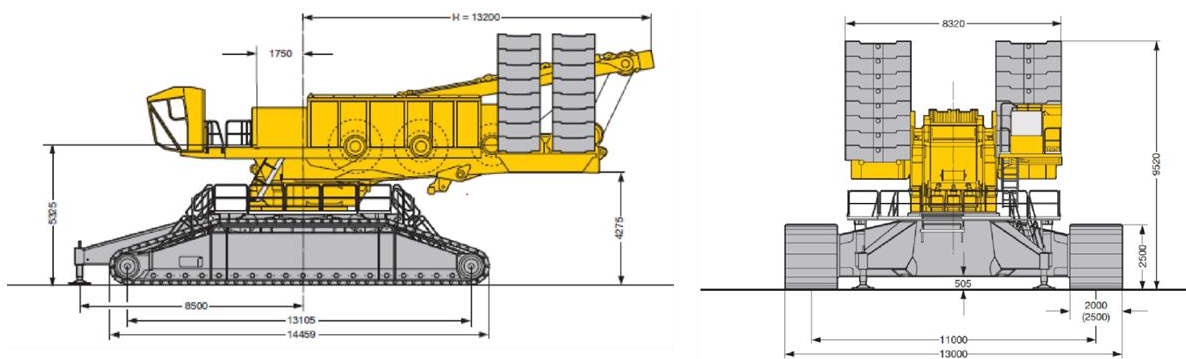


Figure 6. Navire Jack-up et illustration d'un spudcan: diamètre équivalent 17,7m / effort de préchargement 18 000t.

- Supporter les charges liées aux opérations de pré-assemblage des sections de mâts d'éoliennes par grues terrestres ainsi que le stockage des tours par paquets unitaires (4, 6 ou 8 tours complètes), comme l'illustre la figure précédente, ou par des ensembles de 10 ou 12 tours complètes avant chargement par grue de bords de navires Jack-up. A noter que les charges d'exploitation dues aux tours vont jusqu'à 30 t/m², et que les paquets de 4, 6 ou 8 tours correspondent respectivement aux charges localisées de 6200 t sur une empreise au sol de 14,45x14,45 m² pour 4 tours, 7857 t sur 8,90x30 m² pour 6 tours ou pour 8 tours 10 500 t sur 8,40x40 m².

Le quai « Lo-Lo » doit quant à lui à reprendre des charges lourdes mais moins importantes que le quai « Jack-up », avec l'accueil des navires d'import/export ainsi que l'acheminement et le stockage des différents composants d'éoliennes en vue de leur chargement sur navire par des grues terrestres. La charge de la grue circulant sur « Lo-Lo » est d'environ 2100 t, elle constitue la charge d'exploitation mobile qui dimensionne le quai, et s'accompagne de charges uniformes de 11 t/m².



Dimensions d'une chenille = 14,5 m x 2m
Pression maximale sous chenilles = 78,6 t/m²

Figure 7. Dimensions et charges d'une grue terrestre (Grue LR11 350)

3.2. Structures APD

Pour reprendre ces charges, le quai est renforcé par une structure du type dalle en béton sur pieux de largeur 34 m, qui surmonte le mur poids existant écrêté.

En phases études APD, les structures sont étudiées avec des modèles informatiques en 3 dimensions à l'aide du logiciel « Pythagore » développé par Setec tpi, représentant la totalité d'un quai de 200 m. A ce stade, de manière simplifiée, le modèle repose verticalement sur des appuis fixes et les pieux sont équipés d'appuis horizontaux élastiques.

La dalle en béton armé a une épaisseur de 0,65m et porte un remblai de 1,5 m d'épaisseur permettant de diffuser les charges. Cette dalle est raidie par des nervures transversales au droit des files de pieux

métalliques avant situés dans le bassin et de pieux béton en arrière. Leur hauteur est de 2,0 m et la largeur est de 1,0 m. Les nervures transversales et la dalle sont reliées par une poutre de couronnement liaisonnant l'ensemble au droit de la file de pieux métalliques. Cette poutre longitudinale qui a pour dimension 2,5 m x 2,8 m de hauteur, est équipée de divers appareils tels que bollards, échelles et défenses d'accostage flottantes montant et descendant avec la marée pour protéger les navires à quai.

La structure repose sur 5 à 6 files d'appuis, définis comme suit et illustrés par la Figure 8 :

- Une file maritime dans le bassin en avant du mur de quai actuel : pieux métalliques battus ancrés dans les Graves de Fond, avec un espacement de 2,8 m ; diamètre des tubes 1,63 m et épaisseur 24 mm ;
- Un appui continu reposant sur le mur existant ;
- Files terrestres : 4 files de pieux béton forés (diamètre 1,22 m) ancrés soit dans les Sables Gris Vert soit dans les Graves de Fond, réalisés à l'arrière du mur dans le terre-plein avec des mailles variables pendant les études.

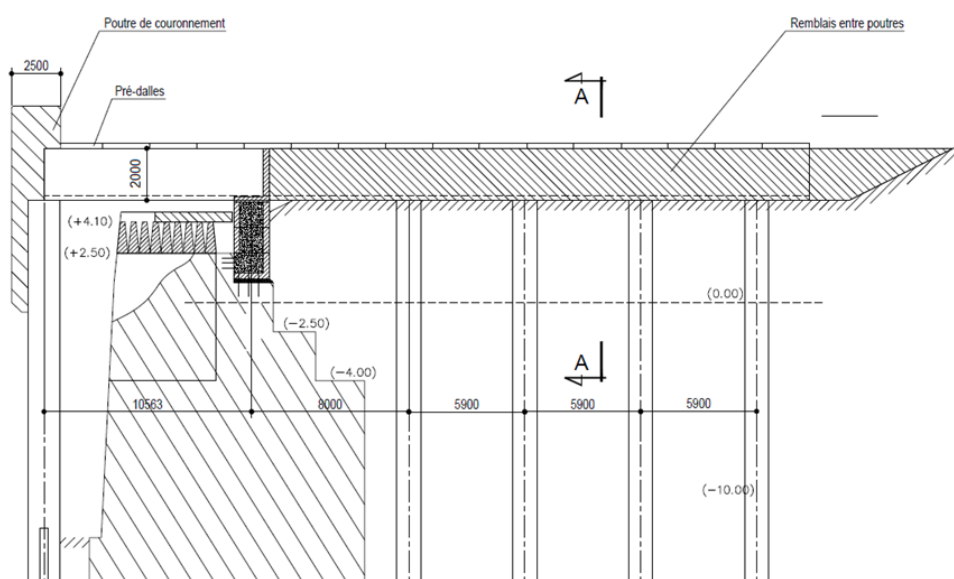


Figure 8. Quai Joannès-Couvert - quai « Jack-up » - APD

L'étude APD a permis de définir la structure de la dalle et des nervures ainsi que l'entraxe des files de pieux de 2,80 m tel que décrit ci-dessus.

3.3. Effet spécifique du Spudcan

L'effet du spudcan, évalué lors des études APD, induit un tassement d'appui au niveau de la file maritime du quai « Jack-up » et génère des sollicitations importantes dans la structure. En effet, lorsque le navire-plateforme « Jack-up » se pose sur le fond du bassin, à 8 m du bord à quai, par l'intermédiaire des spudcans, celui-ci génère une cuvette de tassement du quai de l'ordre du centimètre qui influe sur les pieux métalliques comme l'illustre la Figure 9. A noter qu'une étude de sensibilité sur la tolérance d'éloignement du bord de la semelle du spudcan au bord à quai donné par l'industriel au Port du Havre a été conduite (2 à 8 m). La faisabilité du projet avec un spudcan trop proche étant engagé, la distance maximale tolérée de 8 m a été retenue pour la suite des études du quai « Jack-up ».

La prise en compte de l'effet du spudcan ainsi que la sensibilité de la structure avec le jeu de raideurs introduit sous l'effet des charges importantes et localisées selon des positions aléatoires, a mis en évidence l'insuffisance de la structure issue de la phase APD. Cela a conduit les études de la phase PRO à s'orienter vers des calculs approfondis de type interaction sol-structure.

En phase PRO, il a été introduit des raideurs verticales sous l'ensemble des appuis : pieux métalliques, mur existant et pieux de la zone arrière, explicitées au paragraphe suivant.

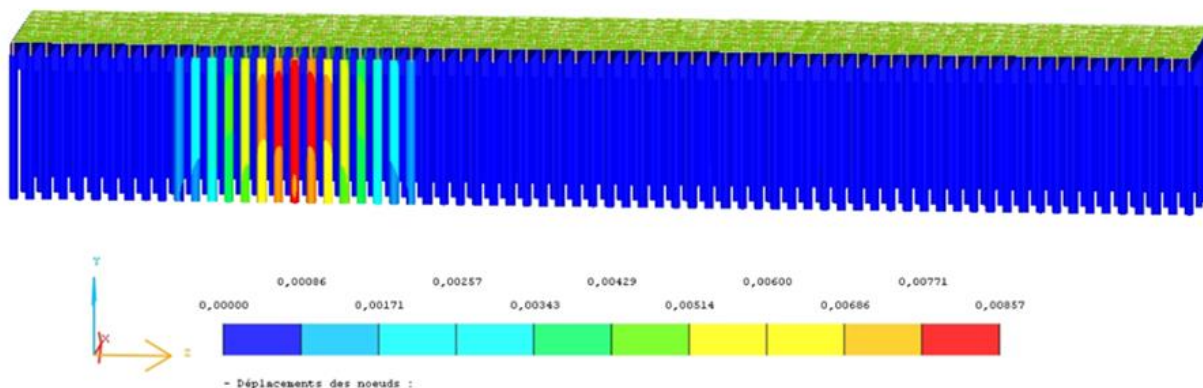


Figure 9. Tassement induit par un pied type spudcan

4. Prise en compte de l'interaction sol-structure

L'interaction sol-structure (ISS) consiste à évaluer l'évolution de la raideur des fondations (relation effort/déplacement) par rapport à la descente de charges (DCC) de la structure, de manière itérative, conformément au schéma de la Figure 10. Ces itérations doivent se poursuivre jusqu'à la convergence entre les tassements obtenus dans les modèles « structure » et « géotechnique », ainsi qu'entre les raideurs et efforts suite à deux itérations successives.

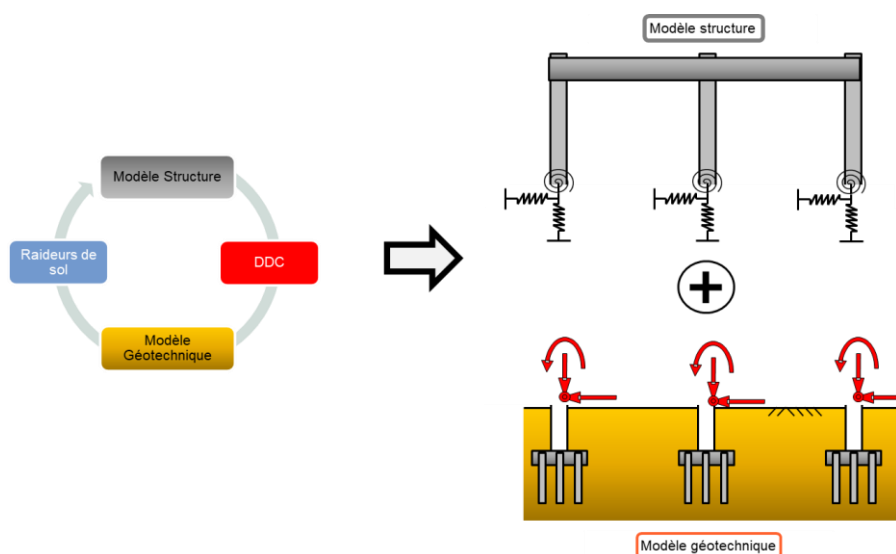


Figure 10. Schéma de la procédure d'Interaction Sol-Structure mise en œuvre

Pour les quais « Jack-up » et « Lo-lo », l'évaluation des tassements de la structure (et donc de la raideur verticale des fondations) a été essentielle pour le bon dimensionnement de l'ouvrage pour intégrer correctement le contraste de rigidité entre le mur et les files de pieux (maritime et terrestres) dans le dimensionnement. De cette façon, un calcul paramétrique a été privilégié, en considérant soit un comportement des éléments de fondations dit « isolé », sans prise en compte d'effets de groupe (raideur maximale), soit un comportement avec « effet de groupe » (raideur minimale), qui intègre :

- l'entraînement du sol entre les éléments de fondation, conduisant à une plus faible mobilisation du frottement latéral et une augmentation de la part de la charge transmise en pointe ;
- le tassement des couches profondes, notamment les Silts et les Argiles de Villerville, qui provoquent une augmentation des tassements globaux des fondations.

Pour le comportement transversal, les raideurs des fondations ont été estimées par un modèle p-y conformément à l'annexe J de la norme NF P94-261 pour le mur de soutènement et à l'annexe I de la

norme NF P94-262 pour les fondations profondes, avec prise en compte des coefficients de réduction liés aux effets de groupe.

4.1. Méthodologie de définition des raideurs verticales

L'évaluation des raideurs est réalisée à partir des étapes suivantes :

- définition de la raideur verticale propre d'un élément de fondation isolé, sans prise en compte de l'effet de groupe et du tassement des couches profondes (raideur maximale) ;
- évaluation de l'effet d'entraînement du sol entre les fondations profondes et définition de la charge transmise en pointe des pieux ;
- évaluation des tassements des couches profondes sous les charges transmises en pointe des fondations profondes et définition de la raideur avec prise en compte des effets de groupe (raideur minimale).

4.1.1. Définition de la raideur verticale propre (raideur maximale)

La raideur verticale en tête des éléments de fondation isolés (notée $k_{max,i}$), ou raideur propre, est définie par le rapport entre la charge appliquée en tête de l'élément (F_i) et le tassement obtenu pour ce même chargement (s_{i0}) :

$$k_{max,i} = F_i / s_{i0} \quad (1)$$

L'évaluation du tassement des pieux est réalisée à l'aide d'un modèle semi-empirique suivant les lois de mobilisation « t-z » telles qu'établies dans les travaux de Frank et Zhao (1982) et analysées par Abchir et al. (2016).

Pour le mur, les tassements sont évalués à l'aide de la méthode pressiométrique, décrite dans la norme NF P94-261.

4.1.2. Evaluation de l'effet d'entraînement et définition de la charge en pointe des pieux

L'effet d'entraînement est estimé en considérant les fondations profondes selon une « maille infinie »: il s'agit alors d'une cellule élémentaire dans laquelle est représenté le pieu en interaction avec une colonne de sol, autour de laquelle est imposée une condition de cisaillement nul (Figure 11). Ce calcul permet de considérer que la charge transmise au sol via le frottement latéral provoque un tassement de celui-ci, traduisant ainsi l'effet d'entraînement qui réduit la mobilisation du frottement latéral le long des fondations profondes et augmente donc la part des charges transmise à la pointe des pieux.

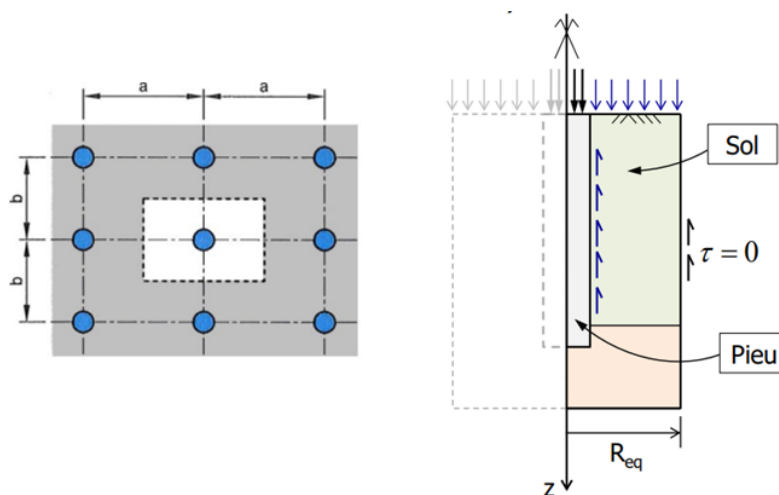


Figure 11. Schéma de calcul d'une fondation profonde dans une maille infinie (logiciel Taspie+, développé par Terrasol)

4.1.3. Evaluation des tassements des couches profondes

Une fois les charges transmises à la pointe des pieux définies, l'évaluation des tassements des couches profondes en présence de l'ensemble des charges (à la base du mur poids, considéré comme une fondation superficielle, à la base des pieux) est menée en considérant la variation de la contrainte verticale avec la profondeur (basé sur des solutions analytiques). Le massif de sol est modélisé avec un comportement élastique. La présence des charges apportées par les Spudcans est également intégrée.

4.1.4. Définition de la raideur verticale avec prise en compte de l'effet de groupe (raideur minimale)

La raideur en tête des appuis, notée $k_{min,i}$, est ensuite calculée par la relation :

$$k_{min,i} = \frac{F_i}{s_{1,i} + s_{2,i}} \quad (2)$$

Avec :

- F_i la charge appliquée en tête des appuis, équivalente à la charge décrite au §4.1.1 ;
- $s_{1,i}$ le tassement propre du pieu, issu du calcul décrit au §4.1.2 (pour les appuis sur le mur, cette valeur est considérée négligeable) ;
- $s_{2,i}$ le tassement des couches profondes, issu du calcul décrit au §0.

5. Applications aux quais « Jack-up » et « Lo-Lo »

Lors des études PRO, outre le fait de la réduction de la largeur de la dalle qui a conduit à la suppression d'une file de pieux arrière, le contraste de rigidité entre le mur et les files de pieux (maritime et terrestres), notamment avec prise en compte des effets de groupe, a conduit à différentes évolutions de la structure :

- Un report de charge sur les files de pieux conduisant à les approfondir entre les études APD et PRO ;
- Le besoin de création d'un deuxième appui sur le mur permettant de réduire la portée entre les files de pieux et les appuis sur le mur. Cela a permis de limiter les moments et les efforts horizontaux ainsi que les sollicitations dans la structure ;
- La nécessité de créer une rotule dans la dalle au droit du premier appui sur le mur, pour supprimer les efforts dus au tassement des pieux maritimes sous l'effet des spudcans dans la partie avant du quai. La dalle est séparée en deux, et seule la partie basse des nervures est continue constituant une articulation libérant les moments de flexion.

La Figure 12 illustre la structure finalement retenue au stade DCE pour la consultation des Entreprises, à savoir des pieux maritimes espacés tous les 2,8 m, 2 appuis continus sur le mur existant et 3 files de pieux béton forés ancrés dans les Sables Gris Vert espacés tous les 2,8 m dans l'axe longitudinal et tous les 5,9 m dans le sens transversal.

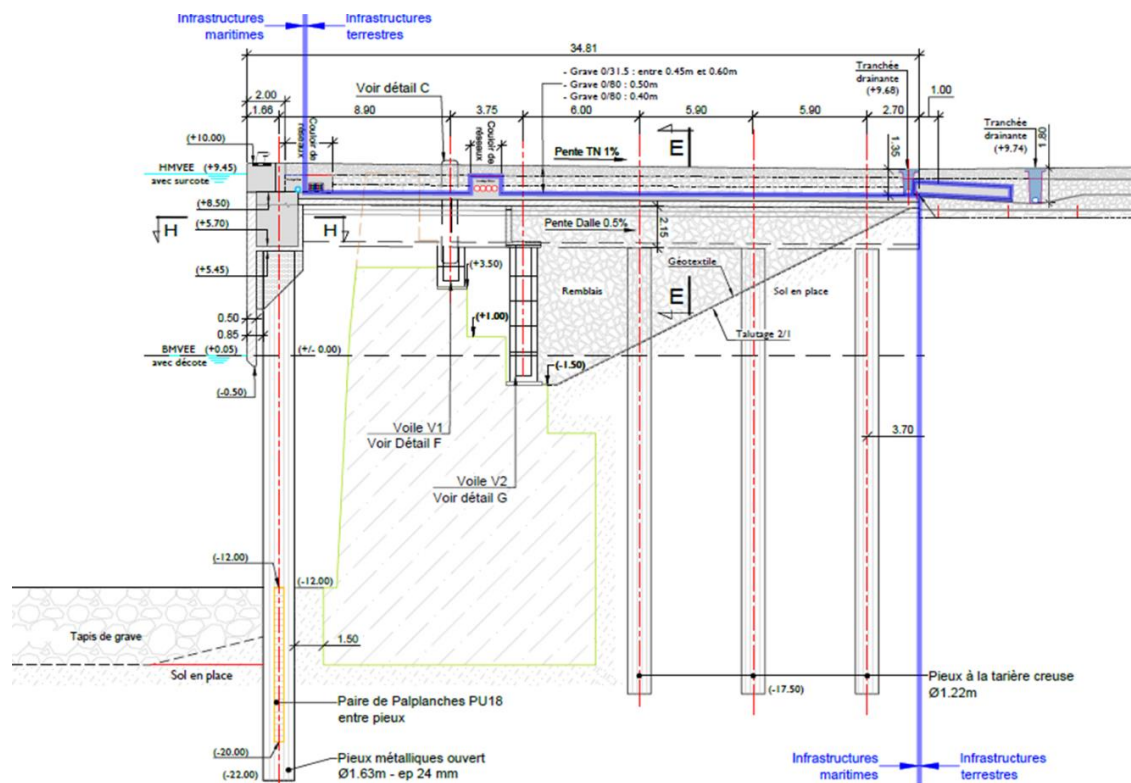


Figure 12. Quai Joannès-Couvert - quai « Jack-up » - DCE

6. Conclusions

La collaboration entre les équipes géotechniques et les équipes structure du groupe Setec (respectivement Terrasol et Setec tpi) au service du projet Quai Joannès-Couvert et d'HAROPA - Direction Territoriale du Havre a permis par de multiples allers-retours la prise en compte de l'interaction sol-structure. Cela a conduit à faire évoluer la structure vers une solution saine prenant en compte l'ensemble des chargements (charges d'exploitation, spudcan, efforts parasites, ...) auxquels la structure est soumise.

7. Références bibliographiques

- [1] Abchir Z, Burlon S, Frank R, Habert J et Legrand S 2016. T-z curves for piles from pressuremeter test results. *Géotechnique*, 66, 2, 137-148
- [2] Cuira F, Simon B 2016. Apports de l'interaction sol-structure dans la conception des fondations, *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, Nancy*
- [3] De Cot P 1950. La reconstruction des quais du port du Havre, *Revue Travaux*, juin 1950
- [4] Frank R, Zhao S R 1982. Estimation par les paramètres pressiométriques de l'enfoncement sous charge axiale des pieux forés dans les sols fins. *Bull. Liaison Labo P et Ch*, 119, 17-24
- [5] Kauffmann M, Beau M F 1932, Les nouveaux quais à grande profondeur du Bassin de Marée du Port du Havre, *Extrait du « Bulletin de l'Association Internationale Permanente des Congrès de Navigation »*, n°14 du 15 juillet 1932
- [6] NF P 94-261 Norme d'application nationale de l'Eurocode 7 - Fondations superficielles
- [7] NF P 94-262 Norme d'application nationale de l'Eurocode 7 - Fondations profondes
- [8] Manuel technique du logiciel Foxta v3, partie F : module Taspie+, juin 2015