UTILISATION D'UNE APPROCHE EN DEPLACEMENT POUR L'EVALUATION DES EFFETS PARASITES S'EXERCANT SUR UN PIEU A PROXIMITE D'UN REMBLAIS

USE OF A DISPLACEMENT APPROACH TO EVALUATE PARASITIC EFFECTS ACTING ON A PILE NEAR AN EMBANKMENT

Minh Tuan HOANG[1], Antoine ABBOUD[1], Fahd CUIRA[1]

[1] *Terrasol, Paris, France*

RÉSUMÉ – Le traitement des effets parasites susceptibles d'affecter les fondations profondes peut être mené à l'aide d'une approche en déplacement basée sur une généralisation des modèles « t-z » et « p-y ». L'article rappelle les bases théoriques d'une telle approche et présente sa mise en œuvre pratique à travers l'étude de culées remblayées édifiées dans le cadre du projet d'extension du Port de Calais. L'estimation des déplacements verticaux et horizontaux du terrain à proximité immédiate des pieux a été établie à l'aide d'un modèle élastique non-linéaire développé dans le cadre du projet national ARSCOP. Les résultats ont pu être confrontés à des mesures in situ sur des remblais de préchargement instrumentés dans le cadre de l'opération.

ABSTRACT – The treatment of parasitic effects likely to affect the piles can be carried out using a displacement approach based on a generalization of the « t-z » and « p-y » models. The article reviews the theoretical bases of such an approach and presents its practical implementation through the study of backfilled abutments built as part of the Calais Port extension project. The estimation of the vertical and horizontal soil displacements in the immediate proximity of piles was established using a non-linear elastic model developed within the framework of the French project national ARSCOP, expressing the E/E_M ratio as a function of the strain level. The results were compared with the instrumentation measurements of the preloading embankments fill to judge its validity.

1. Bases théoriques

1.1. Phénomène de frottement négatif et de poussées transversales

Le phénomène de frottement négatif se produit lorsque le tassement du sol excède le tassement du pieu qui le traverse. Le tassement du sol provient essentiellement des terrains à côté du pieu qui sont surchargés sous l'effet d'un remblaiement ou d'une structure fondée superficiellement. La Figure 1 donne l'exemple d'une culée remblayée fondée sur pieux, pour lesquels le tassement du sol supportant le remblai d'accès génère un frottement dirigé vers le bas. Ce tassement est directement lié à la différence de déplacement entre le pieu et le sol. Le résultat de ce frottement est un effort axial additionnel sur le pieu.

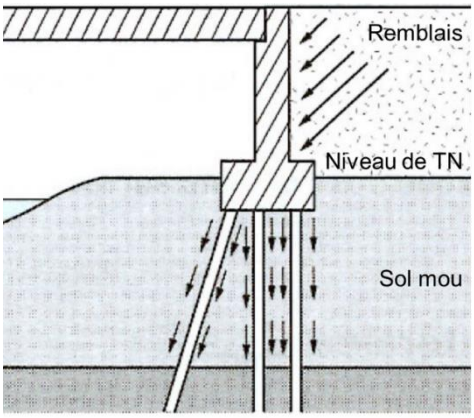

Figure 1. Phénomène de frottement négatif (Frank, Cuira, & Burlon, 2018)

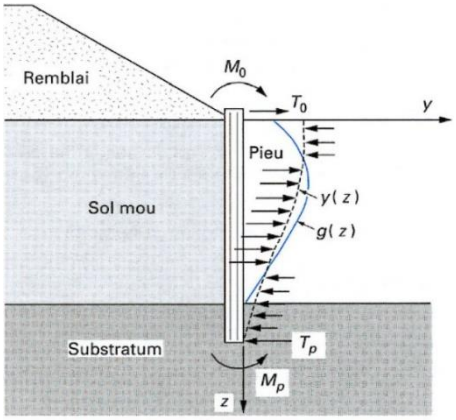

Figure 2. Phénomène de poussées transversales (Frank, Cuira, & Burlon, 2018)

Lorsque le pieu traverse une couche de sol déformable et que celle-ci est chargée de façon dissymétrique (Figure 2), les déplacements horizontaux du sol engendrent une poussée transversale et entraînent des efforts de cisaillement de flexion additionnels dans les pieux.

1.2. Approche en déplacement

L'évaluation des effets parasites (frottement négatif et poussée transversale) s'exerçant sur un pieu isolé ou un groupe de pieux peut être menée à l'aide d'une approche en déplacement où l'action du sol est représentée par le tassement w(z) et le déplacement transversal g(z) du sol au droit du pieu étudié. Les efforts d'interaction sol/pieu, qu'ils soient « agissants » (frottement négatif ou poussée transversale) ou « stabilisants » (frottement positif ou réaction frontale) sont ensuite exprimés en fonction de la différence de déplacement entre le sol et pieu selon une courbe de transfert bilinéaire comme le schématise les figures suivantes. Les courbes de transfert utilisées sont celles pratiquées pour le dimensionnement des pieux sous charges axiale et transversales, et recommandées dans la norme NF P 94 262. On remplace dans ces courbes le déplacement du pieu par la différence de déplacement entre le pieu et le sol. Dans la pratique, ces courbes sont usuellement caractérisées à partir du pressiomètre. Pour le terme de frottement axial, il y a lieu de distinguer les paliers limites (q_s ou q_{sn}) en fonction du caractère positif ou négatif du frottement mobilisé à l'interface sol/pieu. La différence de tassement concerne également la loi de mobilisation de la contrainte en pointe si le tassement libre du sol w(z) n'est pas nul en pied du pieu. Il convient dans ce cas de remplacer le tassement en pointe du pieu $s_b(D)$ par $\Delta s_b = s_b(D) - w_b(D)$ où D est la fiche du pieu.

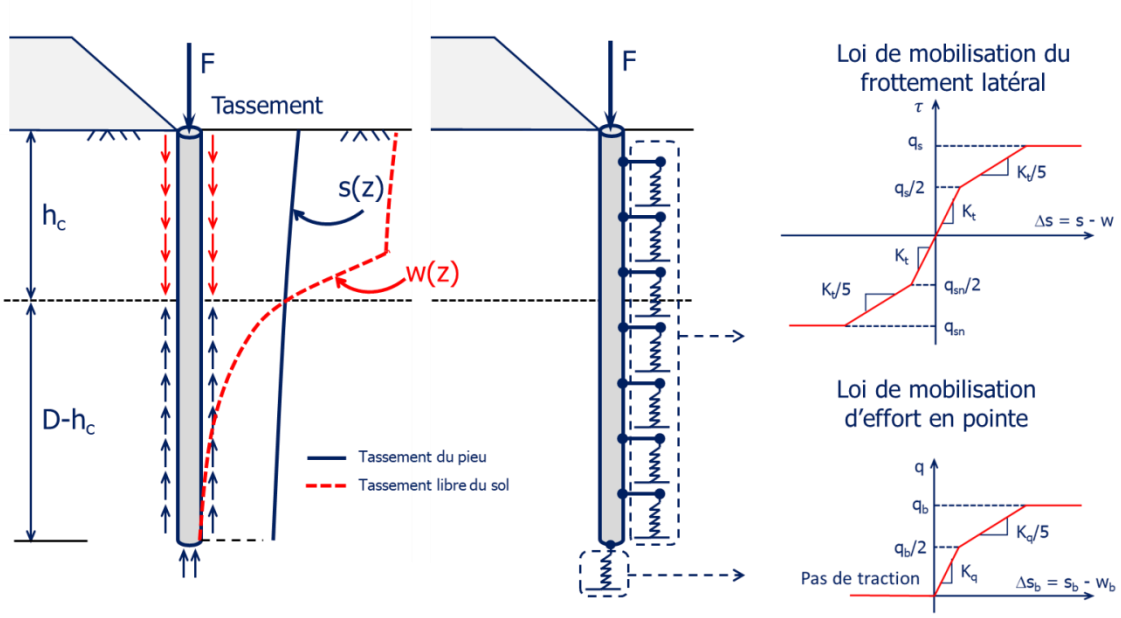

Figure 3. Approche en déplacement pour justifier le frottement négatif

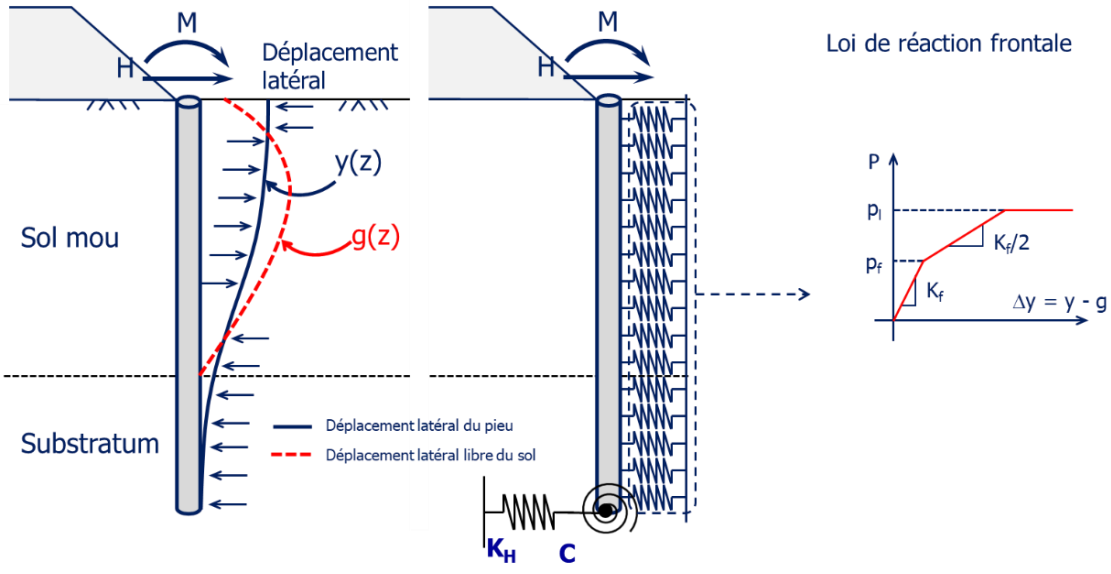

Figure 4. Approche en déplacement pour justifier les poussées transversales

Le tassement s(z) et le déplacement horizontal y(z) du pieu sont ensuite établis de manière que l'ensemble des actions s'exerçant sur le pieu s'équilibrent. Les équations d'équilibre axial et transversal du pieu sont celles d'une poutre travaillant en flexion composée :

$$EA_p \frac{d^2 s}{dz^2} - P_p . \tau(s - w) = 0 \quad (1)$$

$$EI_p \frac{d^4 y}{dz^4} + B . p(y - g) = 0 \quad (2)$$

Avec EA_p, EI_p, P_p et B sont respectivement la rigidité axiale, le produit d'inertie, le périmètre et le diamètre du pieu. Ces deux équations doivent être complétées chacune par les équations aux limites en tête et en pointe du pieu. Dans la pratique, ces équations peuvent être résolues par la méthode de différences finies ou des éléments finis (exemple des modèles Taspie+ et Piecoef+ de la suite logicielle Foxta). Le résultat du modèle est une sollicitation additionnelle (effort axial, effort tranchant et moment fléchissant) à prendre en compte comme effet d'action permanente dans la justification structurale et géotechnique des pieux. Dans le cas du frottement négatif, le modèle permet de définir la position du plan neutre qui marque le toit de la zone où le frottement positif peut être comptabilisé dans la justification de la portance des pieux.

1.3. Estimation du tassement et du déplacement latéral du sol

1.3.1. Estimation du tassement

Le tassement du sol est souvent estimé par la voie de modèles semi-analytiques ou numériques nécessitant l'estimation d'un module de déformation du sol (E). Ce module est usuellement corrélé aux paramètres issus des essais in-situ comme le pressiomètre PMT ou le pénétromètre statique CPT. Dans la pratique, l'approche classique basée sur le pressiomètre proposant de corréler le module de déformation E avec le module pressiométrique E_M à travers un coefficient rhéologique α par l'expression $E = E_M/\alpha$ est largement utilisée. Les retours d'expérience sur plusieurs types d'ouvrages au cours de ces dernières années confirment que le choix d'un module élastique linéaire adoptant cette approche est parfois inadapté et peut conduire à une estimation par excès des tassements et peut conduire à un surdimensionnement des fondations. Un travail engagé dans le cadre du projet national ARSCOP a permis de proposer une amélioration de cette approche en exprimant le rapport E/E_M comme une fonction de la déformation verticale à l'aide d'une courbe de dégradation en « S » (Hoang et al., 2018).

La mise en œuvre de cette approche consiste à discrétiser le sol en plusieurs sous-couches dont le module de déformation peut varier en fonction de la déformation selon l'équation suivante :

$$\frac{E}{E_M} = k(\varepsilon) = \frac{k_0}{1 + \varepsilon/\varepsilon_0} \quad (3)$$

Où k_0 et ε_0 sont deux paramètres de calage dont k_0 présente le rapport du module à très faible niveau de déformation au module pressiométrique E_M. En admettant la loi de diffusion de contraintes selon la théorie de l'élasticité de Boussinesq et la méthode de superposition, la déformation d'une couche « i » se calcule comme suit :

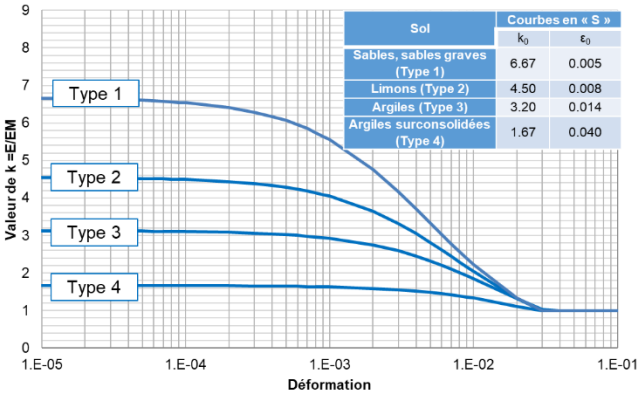

Figure 5. Lois de dégradation $E/E_M = f(\varepsilon)$

$$\varepsilon_i = \frac{\sum_{j=1}^{n} q_j \times \mu_j(z_i)}{E_i} = \frac{\sum_{j=1}^{n} q_j \times \mu_j(z_i)}{E_{M,i}} \times \frac{1 + \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_0}}{k_0} \Rightarrow \varepsilon_i = \frac{\frac{\sum_{j=1}^{n} q_j \times \mu_j(z_i)}{E_{M,i}} \times \frac{1}{k_0}}{1 - \frac{\sum_{j=1}^{n} q_j \times \mu_j(z_i)}{E_{M,i}} \times \frac{1}{\varepsilon_0 k_0}} \quad (4)$$

Où n est le nombre de charges réparties, $\mu_j(z)$ est un facteur de forme permettant de déterminer l'incrément de contraintes sous une charge répartie de q_j. Il existe deux façons de définir cet « incrément » de contraintes, soit égal à une fonction unidimensionnelle en ignorant l'effet des déformations latérales, soit égal à une fonction tridimensionnelle. Le tassement en un point quelconque s'obtient en considérant la contribution de toute couche en-dessous de ce point :

$$s = \sum_i s_i = \sum_i \varepsilon_i h_i \quad (5)$$

La performance de l'approche des courbes en « S » est vérifiée par confrontation au suivi de tassement sur différents types d'ouvrage : des essais issus de la base de données LCPC, des centrales nucléaires d'EDF, des tours de grande hauteur dans le quartier de la Défense etc.

1.3.2. Estimation du déplacement libre du sol

Le déplacement libre du sol g(z) est obtenu, en un point donné, comme il est d'usage, comme le produit de deux termes : $g(z) = g_{max} \times G(Z)$ avec $Z = z/D$ où G(Z) désigne le profil de déplacement normalisé qui est considéré comme indépendant du temps et de la position du pieu(NF P 94 262) et g_{max} représente l'amplitude du déplacement prise proportionnellement au tassement maximal à l'axe de la charge s_{max}, soit $g_{max} = \Gamma \times s_{max}$, avec Γ dépendant généralement de la position relatif du pieu par rapport au remblai.

La courbe normalisée G(Z) a été établie par l'instrumentation d'une vingtaine de remblais sur sol compressible dans les années 70 et 80, et c'est ce qui a alimenté les règles simplifiées reprises aujourd'hui dans la NF P 94 262 (Figure 6).

Dans la pratique, compte tenu du contexte géotechnique toujours plus complexe, le profil g(z) est souvent établi à l'aide d'un calage à partir d'un modèle aux éléments finis. L'exploitation d'un tel modèle permet d'établir à la fois la courbe normalisée G(z) et le facteur de proportionnalité Γ exprimant le rapport g_{max}/s_{max} pour un point quelconque. Ainsi le déplacement libre du sol g(z) considéré à un point quelconque est obtenu comme suit : $g(z) = g_{max} \times G(z)$ avec $g_{max} = \Gamma \times s_{max}$ où s_{max} représente le tassement maximal au droit du point considéré obtenu à l'aide des calculs du tassement précédents (§1.3.1).

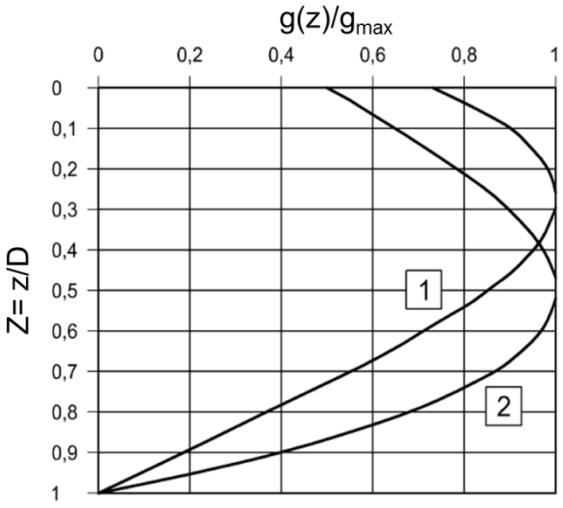

Figure 6. Fonction G(Z) - Courbes 1 et 2 telles que définies dans l'Eurocode 7

2. Projet d'extension du Port de Calais

2.1. Introduction

Situé à la limite de la Manche et de la mer du Nord, le Port de Calais est l'un des points de passage les plus importants entre le continent européen et le Royaume-Uni. Étant 1er port de voyageurs en France, il accueille chaque année plus de 9 millions passagers en ayant connu régulièrement une croissance significative des trafics.

Figure 7. Vue d'ensemble du projet Port de Calais 2015 (source: Internet)

Le projet d'extension du Port de Calais a été démarré en 2015 par l'intervention de plusieurs entreprises et sociétés. Il consiste à réaliser un ensemble d'aménagements et de nouvelles infrastructures par la création d'un nouveau bassin vers la mer. Avec la mise en service prévue en

2021, le Port de Calais doublera la capacité d'accueil actuelle et s'adaptera à l'évolution du transport maritime à l'horizon 2020-2030.

2.2. Mission géotechnique en phase d'exécution

Il s'agissait dans un premier temps de justifier des pieux à la tarière creuse sous effets parasites pour 3 ouvrages d'art OA4, OA6a et OA6b. Ces analyses ont été menées de manière complète à l'aide du logiciel Foxta. Dans un second temps, suite à la modification de la technique des pieux, il a été demandé de justifier des pieux réalisés par le procédé spécifique STARSOL® pour 4 ouvrages d'art dont l'OA5 en complément. Les justifications prennent en compte les paramètres géotechniques améliorés compte tenu de l'effet d'un préchargement sur l'ensemble du site.

En parallèle, une mission d'interprétation des tassements liés au préchargement a été menée. Cette étude fait l'objet à la fois d'une confirmation de la stabilisation de tassements pour le retrait des remblais et d'une confrontation aux mesures enregistrées pour la validation du modèle géotechnique. L'occasion s'est donc présentée pour mener une étude approfondie sur le tassement en appliquant l'approche des courbes en « S » reliant le module au niveau de déformation.

3. Remblais de préchargement

Ce paragraphe s'adresse particulièrement à l'analyse des tassements liés au remblai de préchargement de l'OA4 et la confrontation aux mesures enregistrées sur site. Il s'agit d'un préchargement sur une hauteur de 8,7m par rapport au terrain naturel sur une emprise de 75m x 80m environ. Ce préchargement du terrain en place prévu pour une durée suffisante permettra de réduire les tassements au droit de l'ouvrage définitif. Les travaux ont démarré début Novembre 2017 et la montée du remblai à la cote finale a été achevée le 5 Décembre 2017.

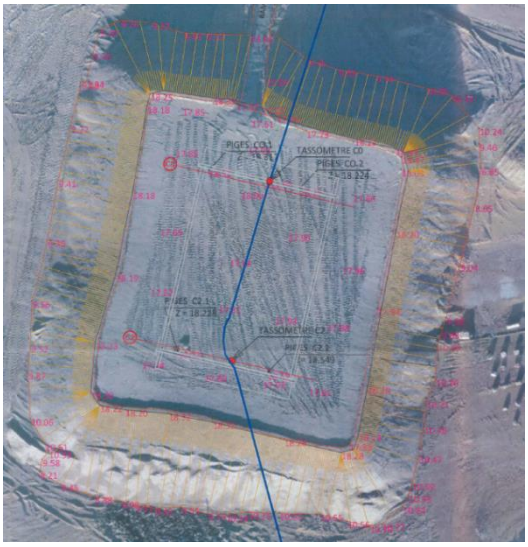

Figure 8. Remblai de préchargement de l'OA4

L'enlèvement du remblai de préchargement est prévu pour le 24 Janvier 2018, soit 7 semaines après la fin de la montée. Cette période permet d'assurer que le tassement se produisant dans l'horizon sableux est bien consommé.

Le suivi de l'évolution du tassement lors du préchargement a été assuré par trois tassomètres (T5 réf, T5a et T5b).

Les mesures des trois tassomètres ont été bien enregistrées pendant le préchargement. La comparaison de ces mesures avec des valeurs de tassements calculés permettent de statuer sur l'arrêt du préchargement et de confirmer la pertinence sur le choix des paramètres géotechniques, notamment en ce qui concerne les modules de déformation.

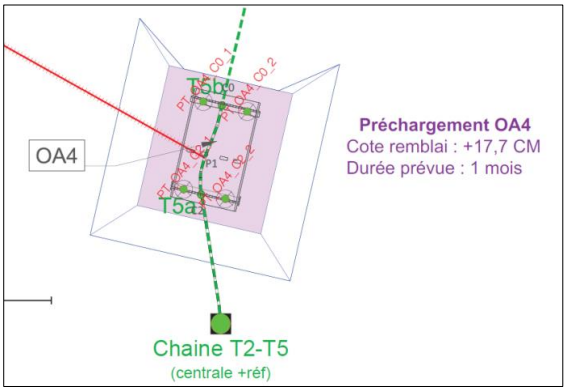

Figure 9. Instrumentation de suivi des tassements

Le tassement « final » (fin de l'opération) lié au remblai de préchargement est calculé comme la différence entre les valeurs mesurées de T5a et T5b avec celle de T5 référence installé hors de la zone chargée. L'amplitude « finale » des tassements varie dans ce cas entre 3 et 4 cm. Les tassements sont stables quelques semaines après la fin de la montée du remblai, ce qui est en cohérence avec le comportement des couches sableuses sur site.

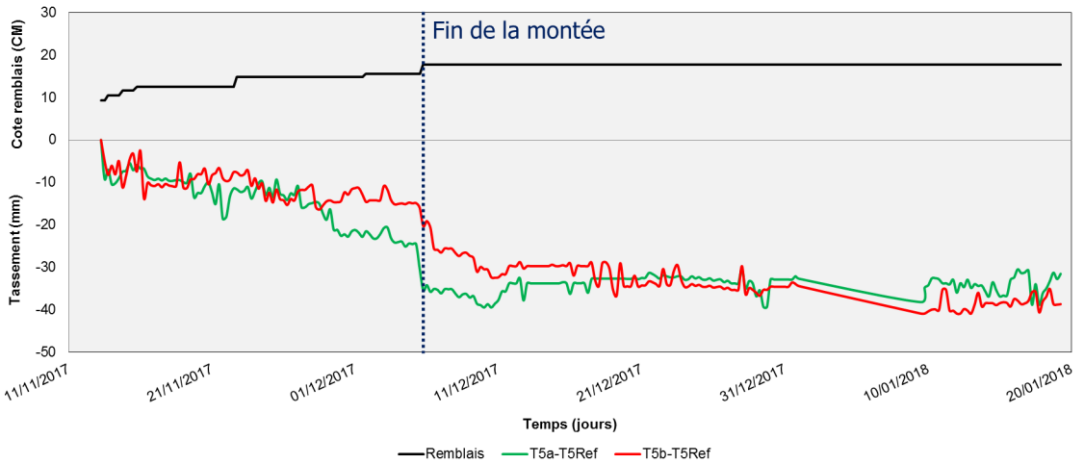

Figure 10. Suivi de tassement du remblai de préchargement

Les paramètres géotechniques retenus sont indiqués dans le Tableau 1.

Couche de sol	Cote toit (m CM)	E_M (MPa)	p_f* (MPa)	p_l* (MPa)	Type de sol
RSc *Remblai sableux compact*	+9.4	12	0.5	1.2	1 – Sable, sables et graves
Smc1 *Sables moyennement compacts*	+7.5	7	0.5	0.8	
Smc/Sc1 *Sables moyennement compacts à compacts*	+6	14	0.9	1.5	
Smc2 *Sables moyennement compacts*	-6	9	0.6	1.0	
Smc/Sc2 *Sables moyennement compacts à compacts*	-15	18	1.2	2.0	
AFa *Argile des Flandres altérée*	-21	15	0.5	0.9	4 – Argiles surconsolidées
AFs *Argile des Flandres saine*	-25	25	0.8	1.4	

Tableau 1. Modèle géotechnique retenu pour l'OA4

L'estimation des tassements est réalisée à l'aide du module Tasseldo+ du logiciel Foxta v4, développé par Terrasol. Deux approches sont utilisées : approche forfaitaire $E = E_M/\alpha$ et approche des courbes en « S » (Figure 5). Les tassements des argiles ne sont pas comptabilisés compte tenu de la courte durée du préchargement. Les tassomètres indiquent les tassements après préchargement stables de l'ordre de 3 à 4 cm, en cohérence avec ceux estimés par l'approche des courbes en « S ». L'approche forfaitaire $E = E_M/\alpha$, quant à elle, surestimait les tassements. Cette approche peut être améliorée en considérant un coefficient correctif k = 1,7, soit $E = 1{,}7\ E_M/\alpha$.

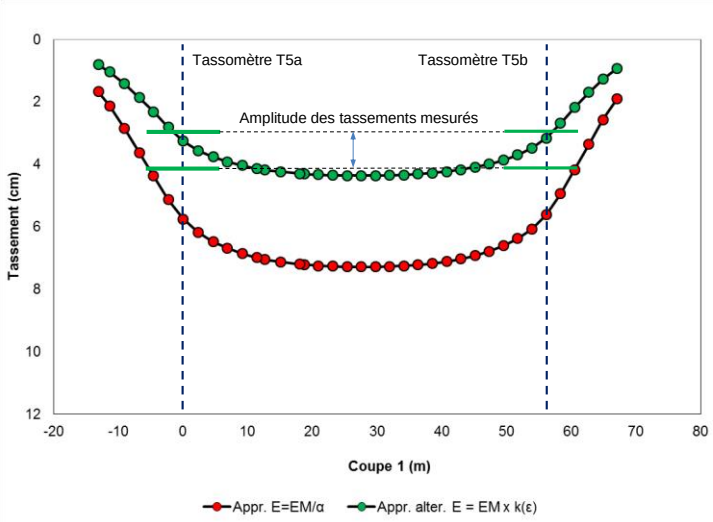

Figure 11. Tassements calculés et mesurés du remblai de préchargement de l'OA4

L'analyse sur les autres ouvrages confirment également la performance de l'approche des courbes en « S » et le caractère pessimiste de l'approche $E = E_M/\alpha$.

4. Justification des pieux sous effets parasites

La méthodologie consiste à évaluer dans un premier temps le profil de tassement vertical du sol le long des pieux sans considérer la présence de ces derniers à partir du modèle décrit en §1.3.1. Ce profil est ensuite injecté dans le modèle « t-z » décrit en §1.2 en intégrant les descentes de charge en tête des pieux afin d'évaluer l'étendue des frottements négatifs (localisation du plan neutre) et le tassement du pieu. On vérifie ensuite que le tassement, la réserve de portance sous le plan neutre et la contrainte dans le béton sont acceptables.

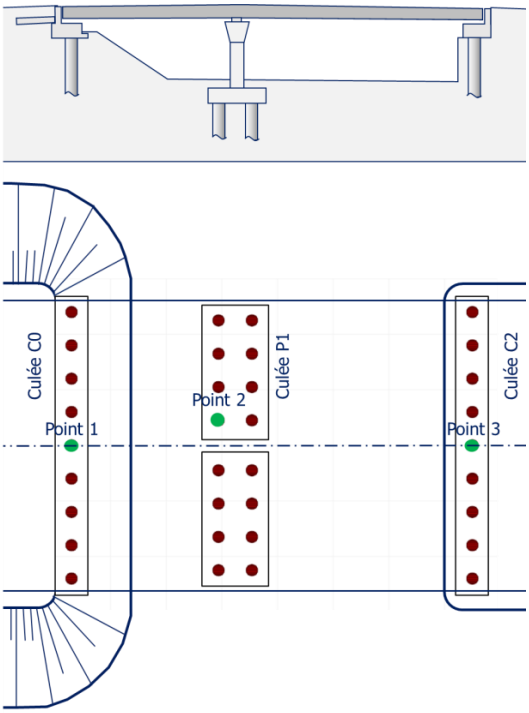

Figure 12. Vue en plan de l'OA4

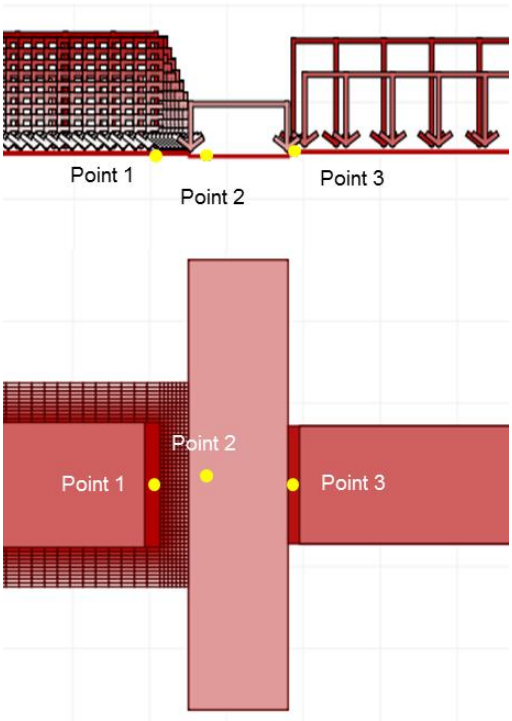

Figure 13. Modèle de chargement sur Tasseldo+

Grâce au préchargement, il y a lieu de retenir un module de rechargement E_r = 3E pour estimer le tassement. Néanmoins, il est intéressant d'évaluer, en l'absence du préchargement, l'avantage de l'approche des courbes en « S » par rapport à l'approche $E = E_M/\alpha$, notamment vis-à-vis du frottement négatif.

La Figure 14 donne les profils de tassement à imposer dans un modèle Taspie+. Ces tassements sont estimés au droit d'un pieu de la culée C2 (Point 3 dans la Figure 13) en utilisant deux approches : $E = E_M/\alpha$ (App.1) et $E = E_M$ x f(ε) (App.2). L'approche des courbes en « S » affiche de nouveau les valeurs moins élevées que celles obtenues par l'approche forfaitaire. L'utilisation d'un facteur correctif k de l'ordre de 1,7 ($E = 1{,}7E_M/\alpha$) comme les calculs du remblai de préchargement conduit à un résultat comparable à celui issu l'approche des courbes en « S ». Cela est justifié par la similitude du niveau de charge induit par le remblai de préchargement et l'ouvrage définitif.

La Figure 15 présente à titre d'exemple l'évaluation du frottement négatif du pieu de la culée C2 sur Taspie+ en intégrant les deux profils de tassement définis précédemment. Il témoigne que l'approche des courbes en « S » permette de réduire le tassement du pieu et de limiter la hauteur du frottement négatif ainsi que l'effort axial additionnel.

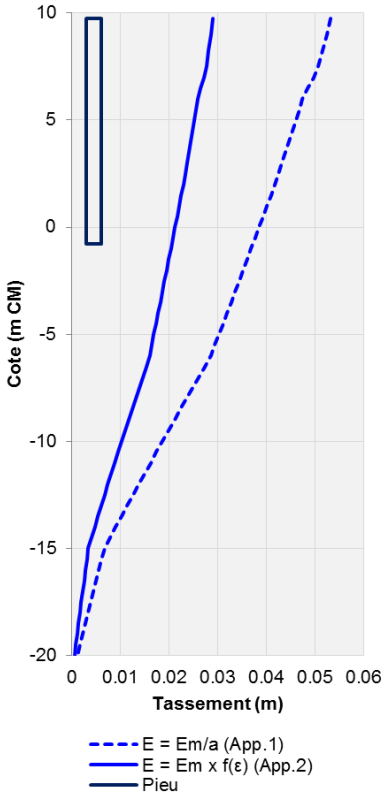

Figure 14. Profils de tassement imposé – Pieu de la culée C2

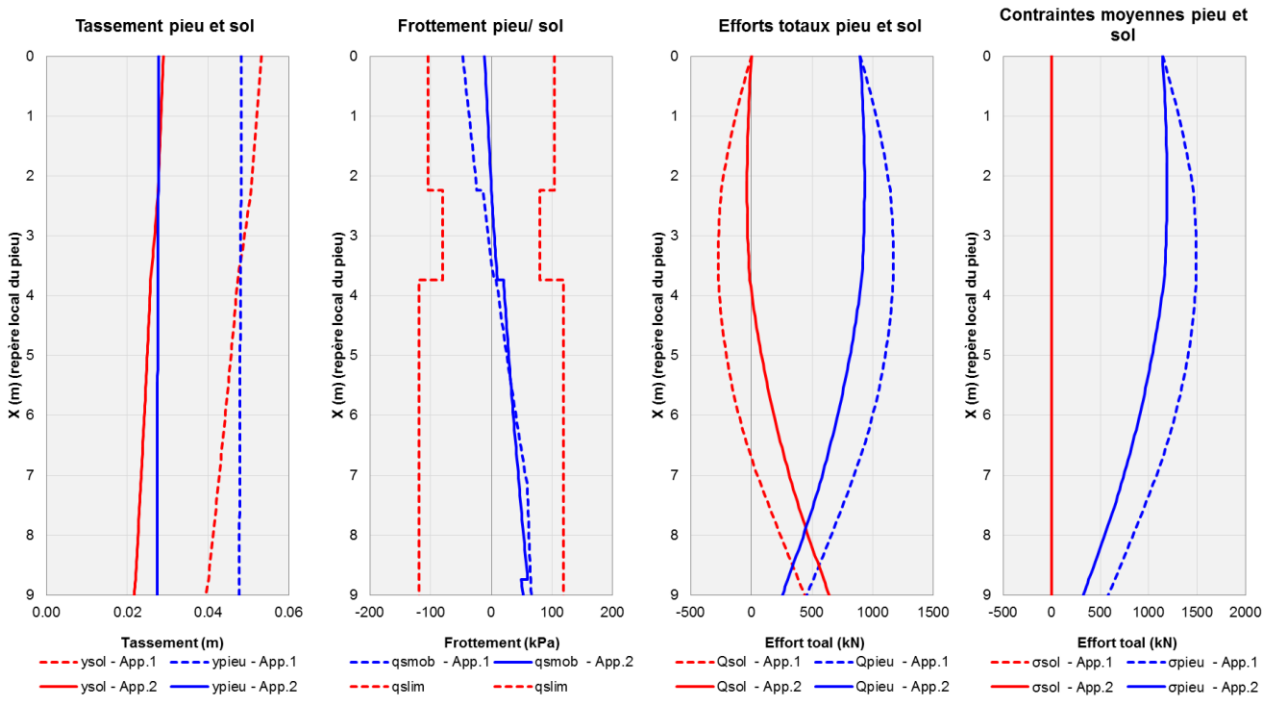

Figure 15. Résultats Taspie+ - ELS Caractéristique - Culée C2

Concernant l'effort des poussées latérales, le profil de déplacement horizontal g(z) a été estimé par différentes approches : empiriques (NF P 94 262) et numériques (éléments finis 2D). Ces estimations ont conduit à retenir un rapport g_{max}/s_{max} = 0,25. La valeur de s_{max} est celle qui issue de l'analyse du tassement libre du sol. La courbe normalisée G(z) = $g(z)/g_{max}$ est présentée sur la figure ci-contre : les courbes continuent correspondent aux modèles empiriques de la NF P 94 262, celles en points correspondent aux modèles numériques. L'approche des courbes en « S » a permis là aussi d'optimiser le dimensionnement des fondations profondes vis-à-vis de la reprise des efforts de flexion/cisaillement liés aux poussées transversales du sol : ceux-ci sont réduits dans un facteur de 1,50 environ en comparaison à une estimation basée sur une estimation usuelle des modules par une approche de type $E = E_M/\alpha$.

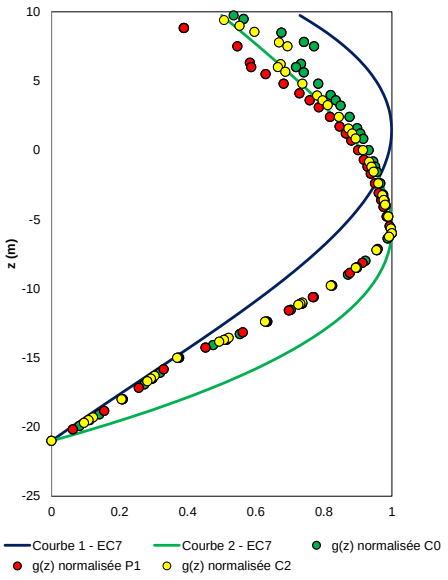

Figure 16. Courbes "normalisées" G(z)

5. Conclusion

La pertinence de l'approche en déplacement impose une estimation affinée de la loi de contrainte-déformation du sol en place et en particulier le choix des modules de déformation cohérent avec le taux de chargement ou le taux de déformation induit par l'ouvrage. Les courbes en « S » présentent une approche pertinente qui permet d'optimiser la conception des pieux sous effets parasites tout en garantissant de meilleurs niveaux de fiabilité et de sécurité.

6. Références

Hoang, M.T., Cuira, F., Dias, D. et Miraillet, P. (2018). *Estimation du rapport E/EM : application aux radiers de grandes dimensions*. JNGG 2018

Frank, R., Cuira, F., & Burlon, S. (2018). Livre *Calcul des fondations superficielles et profondes.*

Logiciel Foxta v3 – Terrasol, *Manuel Taspie+ et Piecoef+*, 2015

NF P94-262. Justification des ouvrages géotechniques – Normes d'application nationale de l'Eurocode 7 – Fondations profondes