

INTERACTION SOL-STRUCTURE POUR UN RADIER SUR BARRETTES – EXEMPLE DE LA TOUR F (ABIDJAN)

SOIL-STRUCTURE INTERACTION FOR A PILED RAFT FOUNDATION – F TOWER (ABIDJAN)

Gabriel BALDI¹, Sébastien BURLON¹, Fahd CUIRA¹

¹ Terrasol, Paris, France

RÉSUMÉ – Cet article présente une méthodologie de dimensionnement des radiers sur pieux en réalisant une procédure d'interaction sol-structure à l'aide d'une méthode hybride, basée sur les courbes d'influence. Cette méthodologie est appliquée pour les études d'exécution de la Tour F, à Abidjan, et les résultats sont comparés à des calculs aux éléments finis 3D, classiquement mis en œuvre pour le dimensionnement de ce type d'ouvrage.

ABSTRACT – This paper describes a methodology for the design of pile rafts by performing a soil-structure procedure using a hybrid method based on influence curves. This methodology is applied to the design of F Tower, in Abidjan, and the results are compared to 3D finite element calculations, which are classically used for the design of this type of structure.

1. Introduction

Les enjeux associés aux immeubles de grand hauteur (IGH) imposent une procédure du type Interaction Sol-Structure (ISS), permettant de mieux apprécier d'une part les efforts repris par les fondations et d'autre part les efforts auxquels est soumise la structure.

Dans la pratique, l'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 1. 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.

Pour les ouvrages type IGH, souvent fondés à l'aide de radiers de grandes dimensions et géométrie complexe posés sur fondations profondes (pieux ou barrettes), l'évaluation de l'effet de groupe entre les différents éléments est essentielle pour bien apprécier la raideur du système de fondation. Cela impose ainsi, classiquement, la réalisation d'un modèle numérique 3D (en éléments finis ou différences finies) afin de connaître les tassements prévisionnels de l'IGH et la descente de charges sur les différents éléments de fondation. Or, ce type de modélisation complexe peut s'avérer non seulement assez coûteux en temps de calcul, mais également difficile à exploiter de manière précise (notamment vis-à-vis des efforts verticaux en tête des différents éléments de fondation) pour un bon déroulement de la procédure d'ISS.

Cet article présente une approche alternative bâtie sur une méthode hybride basée sur les courbes d'influence (Poulos and Davis, 1980). Cette approche est mise en œuvre dans le cadre des études d'exécution de la Tour F, à Abidjan, et ensuite comparée aux résultats d'un traitement numérique complet en trois dimensions.

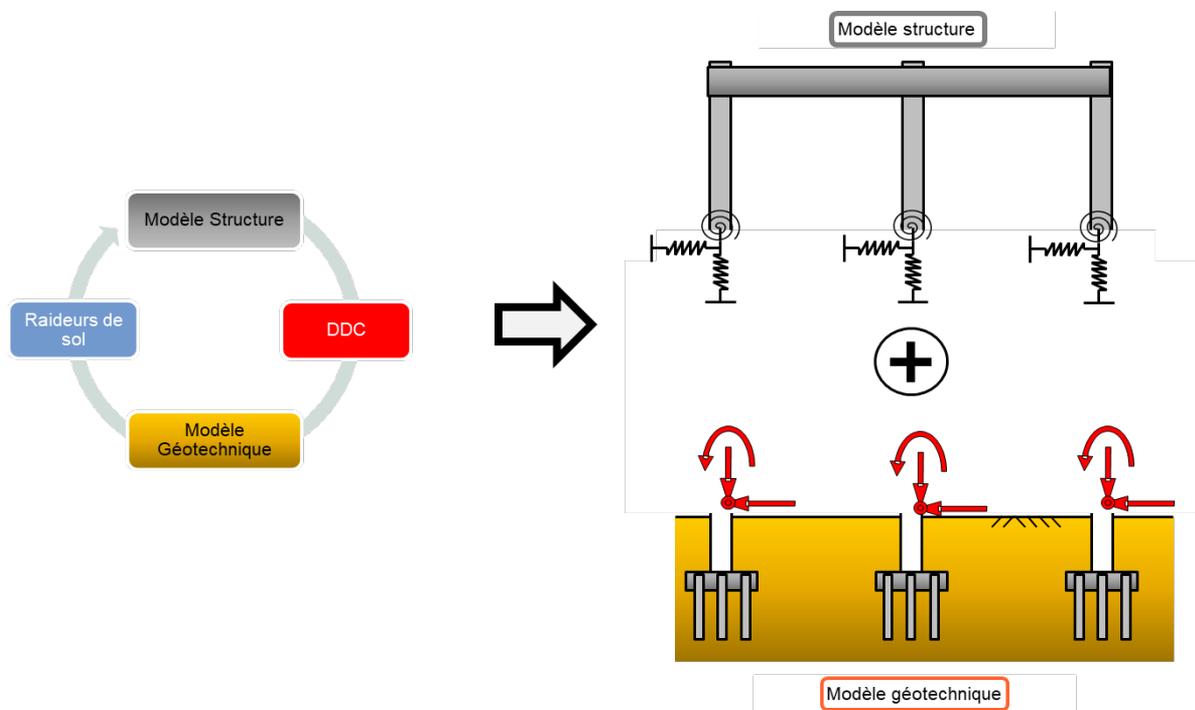


Figure 1 : Schéma de la procédure d'Interaction Sol-Structure mise en œuvre

2. Méthode hybride

La méthode hybride consiste à évaluer les tassements d'un groupe de fondations chargé verticalement avec la prise en compte des effets de groupe conduisant à l'assouplissement de la fondation du fait de l'entraînement du terrain entre les éléments de fondation. Cette évaluation 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 ;
- définition de la courbe d'influence, soit à l'aide d'un modèle numérique centré sur la fondation, soit à partir des courbes issues de solutions élastiques pré-établies (Poulos and Davis, 1980) ;
- définition de la raideur verticale des éléments de fondation avec prise en compte des effets de groupe.

Cette méthode, et l'application des courbes d'influence d'une manière générale, repose sur le principe de superposition. Cette hypothèse implique que le sol soit sollicité globalement dans son domaine élastique, ce qui est bien le cas dès lors que le dimensionnement des fondations est vérifié vis-à-vis des ELS (qui limite le taux de chargement à 30 à 50% de la charge de rupture permettant de garantir implicitement l'hypothèse d'un comportement élastique du terrain) (Terzaghi, 1943, Frank et al., 2019).

2.1. Définition de la raideur verticale propre

La raideur verticale en tête des éléments de fondation isolés (notée k_{i0}), 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_{ii}) :

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

L'évaluation du tassement de l'élément isolé peut être réalisée à l'aide d'essais (en taille réelle ou à échelle réduite) ou à l'aide de modèles semi-empiriques 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), ou numériques (éléments finis 2D ou 3D).

2.2. Définition de la courbe d'influence

Lors du chargement d'un élément dans un groupe de fondations, son tassement peut générer un tassement complémentaire sur les éléments voisins. Cet effet de groupe provoque une augmentation des tassements globaux de la fondation, traduit par un assouplissement des raideurs apparentes de chaque élément.

Cet effet de groupe peut être estimé à l'aide des courbes d'influence, qui relient la distribution des tassements en surface causés par le chargement d'un élément de fondation isolé, conformément à la Figure 2.

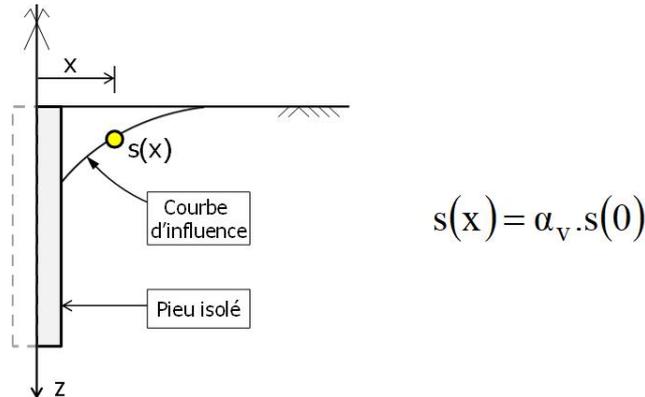


Figure 2 : Construction de la courbe d'influence

Il est intéressant de noter, par application du principe de Saint-Venant et par le fait que les fondations sollicitent les sols dans un domaine essentiellement élastique, que les courbes d'influence sont quasi-indépendantes de la géométrie de l'élément de la fondation.

2.3. Définition de la raideur verticale des fondations avec effet de groupe

A partir de la courbe d'influence, on peut définir les différents facteurs d'influence α comme le rapport entre le tassement d'un élément j (déchargé) lors du chargement d'un élément i considéré chargé de manière isolé, soit :

- $\alpha_{ii} = s_i/s_i = 1$ (par définition) ;
- $\alpha_{ji} = s_j/s_i \leq 1$ (valeur issue de la courbe d'influence).

A partir du principe de superposition, le tassement de chaque élément avec prise en compte de l'effet de groupe peut ainsi être défini par l'expression suivante :

$$s_i = \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} s_{j0} = \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} \frac{F_j}{k_{j0}} \quad (2)$$

Où :

- n est le nombre total d'éléments de fondation en interaction ;
- F_j la charge appliquée sur l'élément j ;
- k_{j0} la raideur propre de l'élément j ;
- s_i le tassement de l'élément i .

La raideur apparente k_i de chaque élément de fondation avec prise en compte de l'effet de groupe est ainsi égale à :

$$k_i = F_i/s_i = \frac{F_i}{\sum_{j=1}^n \alpha_{ij} \frac{F_j}{k_{j0}}} \quad (3)$$

A chaque itération lors de la procédure d'ISS, les valeurs des charges F_i sont mises à jour selon la variation de la descente de charges issue du modèle structure après l'introduction des raideurs k_j corrigées, comme montré à la Figure 3.

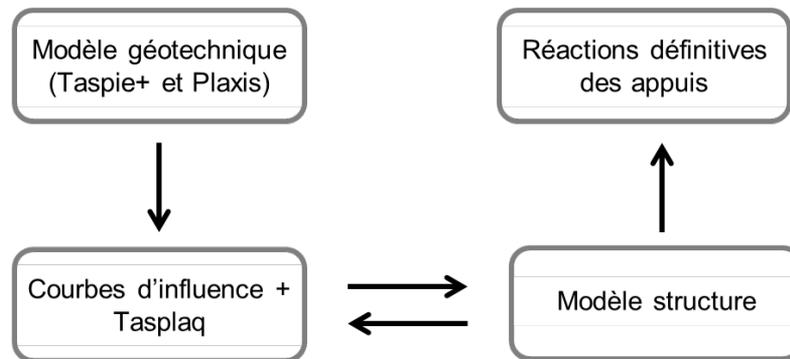


Figure 3 : Principe d'évaluation des raideurs des fondations et procédure d'ISS

3. Application de la méthode hybride pour le projet de la Tour F

3.1. Données générales et modèle géotechnique

Le projet de la Tour F consiste en un IGH d'environ 400 m de hauteur situé en Abidjan, Côte d'Ivoire. Le système de fondations de la tour est composé d'un radier général de 3,5 m d'épaisseur, posé sur 70 barrettes de 1,5 x 2,8 m et une longueur variable entre 57,5 et 62,5 m. La surface totale du radier est d'environ 1 080 m², avec les dimensions fournies dans le plan ci-dessous. On distingue deux zones :

- le noyau de la tour, de dimensions 22,6 x 19,4 m environ, situé en zone centrale et composé de voiles de différentes épaisseurs. Le noyau reprend une charge globale d'environ 1 050 MN à l'ELS pour 34 barrettes (nommées N1 à N34) ;
- les poteaux de façade, composés d'éléments carrés ou circulaires et situés aux extrémités du radier. La charge totale sur les poteaux est d'environ 700 MN à l'ELS pour 36 barrettes (nommées F1-1 à F15-3).

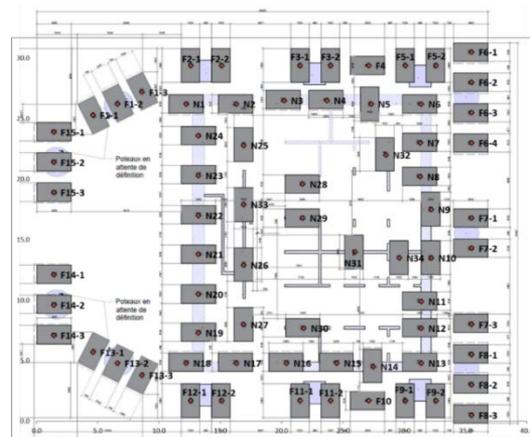


Figure 4 : Vue en plan du système de fondations de la tour F

Le sol en place est constitué de sables dont les caractéristiques mécaniques augmentent progressivement avec la profondeur, conformément à la figure ci-après. Le radier est fondé à 10 m de profondeur.

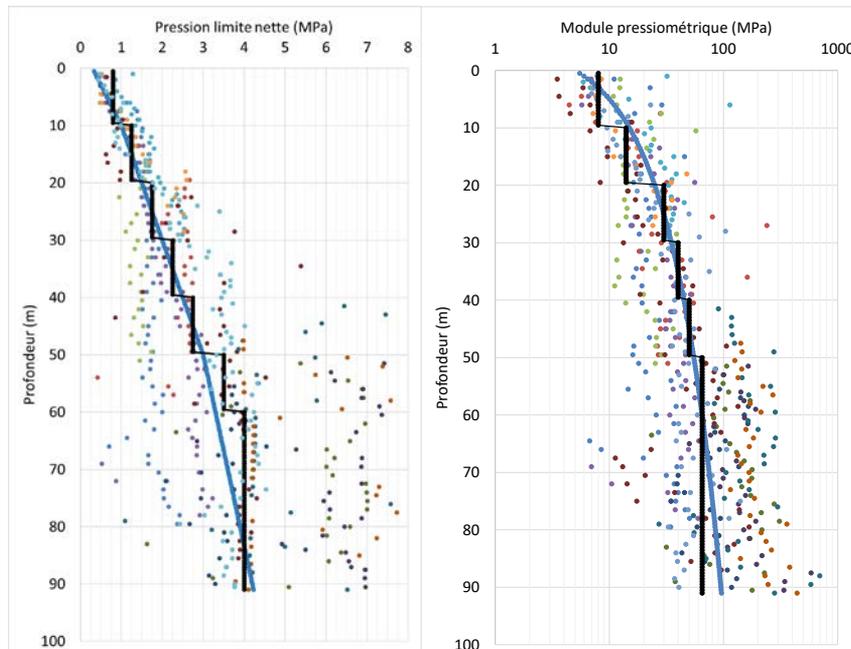


Figure 5 : Résultats des essais pressiométriques

3.2. Evaluation de la raideur propre des barrettes

La raideur verticale en tête des barrettes isolées est évaluée à l'aide du module Taspie+ (suite logicielle Foxta v4, développée par Terrasol) suivant les lois de mobilisation « t-z » à trois paliers établies par Frank et Zhao (1982). Les valeurs obtenues pour les raideurs des barrettes isolées varient entre 860 et 1 220 MN/m.

3.3. Détermination de la courbe d'influence

La courbe d'influence est déterminée à partir d'un modèle aux éléments finis 2D en condition axisymétrique, à l'aide du logiciel Plaxis 2D, comme suit :

- les barrettes de la tour ont une section rectangulaire et un module de déformation $E = 10 \text{ GPa}$. Elles sont modélisées en éléments volumiques dans Plaxis 2D, avec une loi élastique linéaire et une section circulaire en imposant une équivalence des périmètres et rigidités axiales ;
- les sols sont modélisés avec une loi élastique linéaire. Le module de déformation est corrélé au module pressiométrique à l'aide de la relation $E = 4,5EM$. Ce choix permet de garantir la cohérence avec le tassement issu du modèle empirique utilisé pour l'estimation de la raideur propre des barrettes (§3.2). Le coefficient de Poisson (ν) est considéré égal à 0,3 ;
- des interfaces sont introduites entre les barrettes et les sols, avec une loi de comportement élastique parfaitement plastique possédant un critère de rupture de Mohr-Coulomb (loi « Mohr-Coulomb » dans Plaxis). Les paramètres d'entrée sont les suivants :
 - Modules d'élasticité : équivalents à ceux des sols ;
 - Paramètres relatifs au critère de rupture : $\phi' = 0^\circ$ et $c' = C_e \cdot q_s$ (frottement axial). La valeur du frottement axial q_s est issue de la norme fondations profondes (NF P94-262). Elle est associée aux coefficients d'efficacité C_e pour des barrettes avec un entraxe inférieur à $3B$. Le choix d'une interface purement adhérente (avec un angle de frottement nul) permet de rendre compte exactement des frottements recommandés par la norme NF P 94-262.

La courbe d'influence déterminée à l'aide des calculs Plaxis est fournie sur la Figure 6.

3.4. Modélisations géotechniques et comparaisons avec un modèle numérique 3D

3.4.1. Modèle géotechnique du projet

Le modèle de calcul géotechnique, utilisé pour les calculs d'ISS, est bâti dans le module Tasplaq de la suite logicielle Foxta v4 développée par (Cuira et Simon, 2008) qui intègre :

- le radier de la tour, introduit comme une plaque avec les caractéristiques suivantes :
 - Module d'Young $E = 10 \text{ GPa}$;
 - Coefficient de poisson $\nu \sim 0$;
 - Epaisseur $e = 3,5 \text{ m}$.
- la descente de charges au-dessus du radier à l'ELS QP issue des calculs structuraux du projet et introduite selon des points de chargement préalablement établis ;
- les raideurs des fondations avec prise en compte de l'effet de groupe (raideurs propres combinées avec la courbe d'influence) introduites sous la forme d'une matrice de souplesse équivalente (option « matrice de raideur » imposée du module Tasplaq).

Un aperçu du modèle est fourni sur la Figure 7.

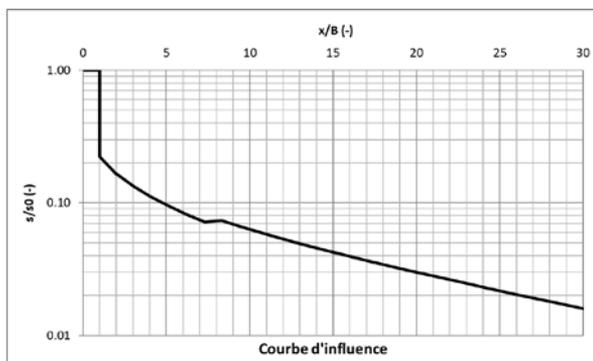


Figure 6 : Exemple d'une courbe d'influence normalisée

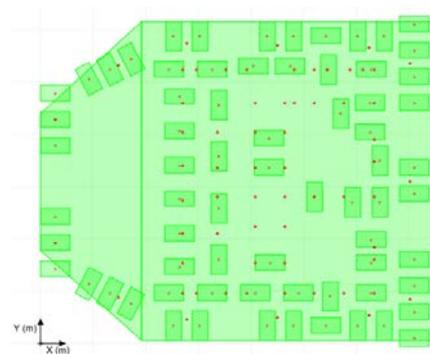


Figure 7 : Modèle de calcul géotechnique (logiciel Tasplaq)

3.4.2. Modèle géotechnique de contrôle

Un modèle de calcul géotechnique de contrôle aux éléments finis 3D est bâti dans le logiciel Plaxis 3D à la fin de l'ISS, une fois la géométrie des fondations et la descente de charges du projet arrêtées.

Le modèle 3D est limité à la modélisation des éléments de fondation (barrettes et radier) ainsi que des sols avec un comportement élastique linéaire. Des interfaces sont introduites autour de chaque barrette, avec un comportement élastique linéaire parfaitement plastique (loi Mohr-Coulomb avec les paramètres $c' = C_e \cdot q_s$ et $\phi' = 0^\circ$) permettant de simuler l'interaction sol-fondation. Les modules de déformation de sol et les paramètres structuraux sont équivalents à ceux présentés aux §3.3 et §3.4.1.

La descente de charges de la tour à l'ELS QP issue du modèle structure est introduite en tant que charges ponctuelles au-dessus du radier selon des points de chargement préalablement établis, conformément à la modélisation présentée au §3.4.1.

Un aperçu du modèle est fourni dans la figure ci-après.

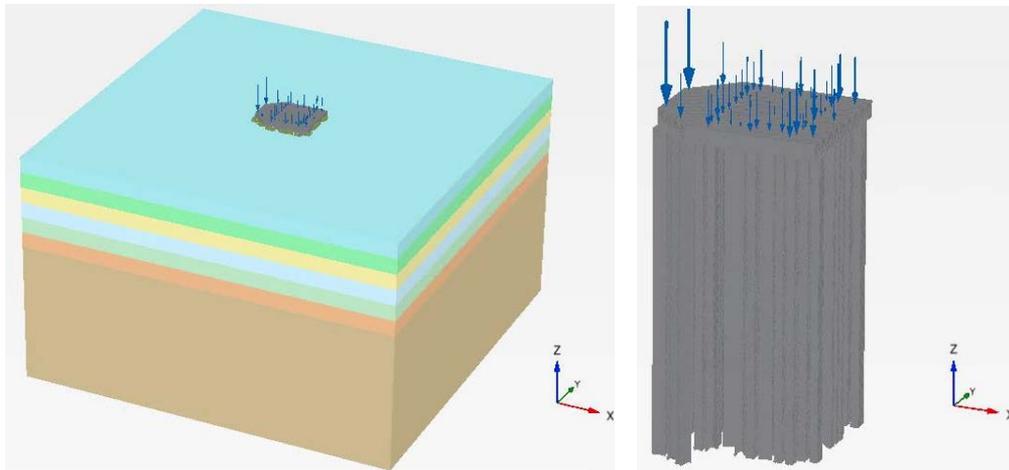


Figure 8 : Modèle géotechnique 3D des fondations de la Tour F

3.4.3. Comparaison des résultats

Les principaux résultats des deux modélisations (tassements et efforts en tête des barrettes, fournis dans les figures ci-après) montrent une bonne correspondance entre les modèles :

- les tassements obtenus sont du même ordre de grandeur, avec une valeur plus importante observée dans le modèle hybride (écart d'environ 15%). Cela est directement associé à l'évaluation de la courbe d'influence en déformations au « champ libre », sans considérer la présence des barrettes de la tour qui a tendance à rigidifier le terrain ;
- les efforts en tête restent comparables, avec un écart moyen d'environ 5% ;
- les raideurs des barrettes sont également comparables, avec des valeurs variant entre 155 et 326 MN/m, soit un facteur de réduction de la raideur isolée d'environ 0,2 lié à l'effet de groupe.

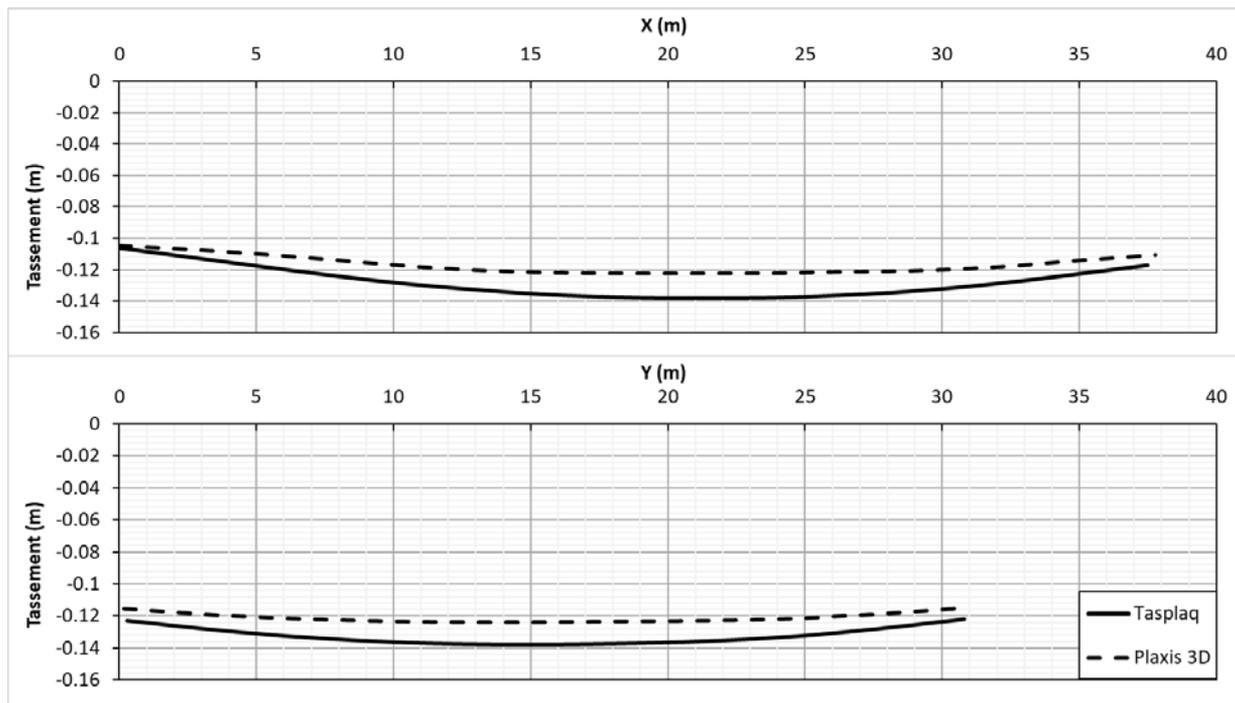


Figure 9 : Comparaison entre les tassements des modèles géotechniques selon une coupe longitudinale et une coupe transversale

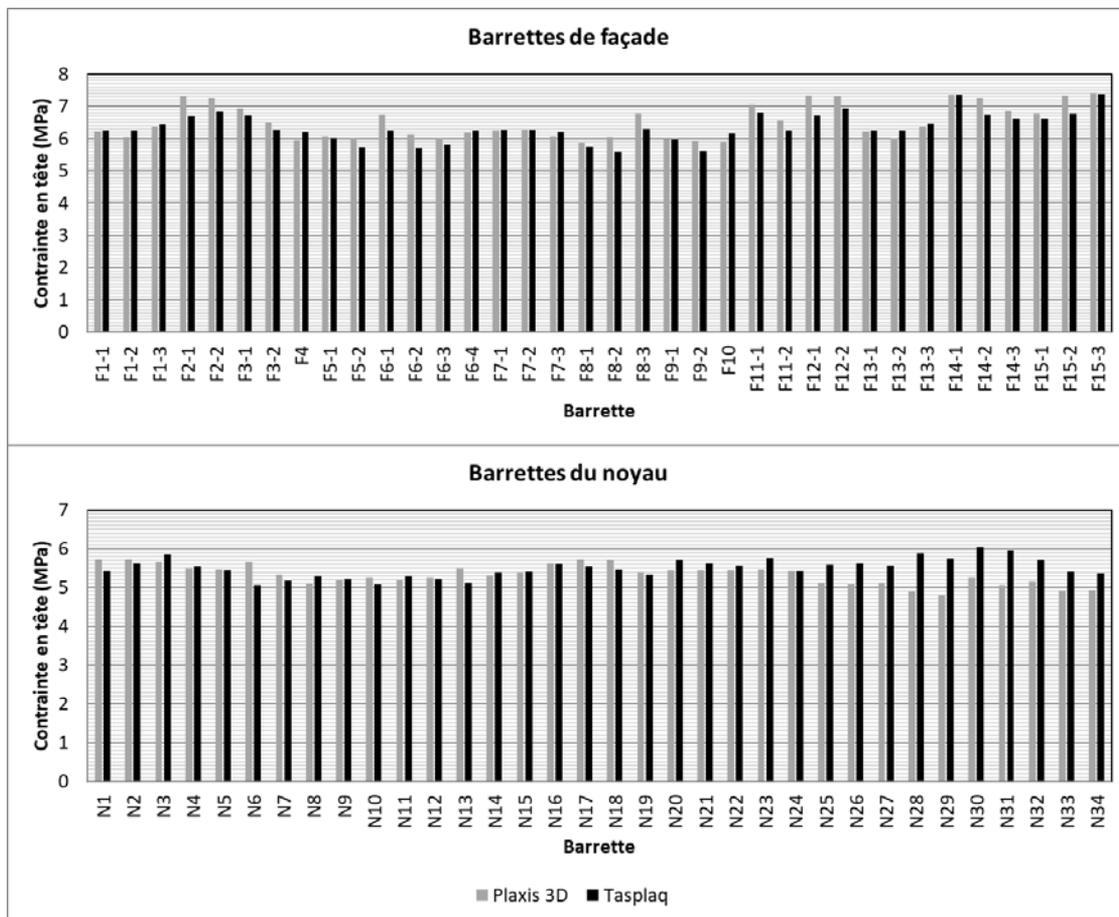


Figure 10 : Comparaison entre les efforts en tête des barrettes des modèles géotechniques

4. Conclusions

La méthode hybride mise en œuvre permet de traiter de façon aisée la problématique des calculs d'interaction sol-structure, simplifiant les étapes de modélisation et post-traitement souvent source d'erreurs dans des calculs numériques complexes. Les résultats obtenus lors d'une application sur un projet réel sont comparables à ceux issus d'un calcul aux éléments finis 3D.

Cette méthode permet ainsi un gain de temps important qui peut être consacré à des études paramétriques essentielles pour cerner la sensibilité des projets d'IGH à la variabilité des propriétés des terrains.

5. Références bibliographiques

- 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.
- Cuira F. et Simon B. (2008). Modélisation 3D simplifiée d'une plaque sur sol multicouche élastique. *Revue Française de Géotechnique*, 128.
- 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.
- Frank R., Cuira F. et Burlon S. (2019). *Calculs des fondations superficielles et profondes*, 224 pages, Presses des Ponts.
- Poulos H.G. and Davis E.H. (1980). *Pile foundation analysis and design*. John Wiley & Sons, 397 p.