

Modélisation numérique d'une fondation mixte d'un immeuble de grande hauteur

Numerical modelling of a piled-raft foundation for a high- rise building

Khoa Van NGUYEN¹, Clément PRUD'HON^{1*}, Matthieu CHAUSSADE¹

1 Terrasol, Paris, France

**clement.prudhon@setec.com*

RESUME : Cet article décrit la mise en œuvre de modèles numériques aux éléments finis 3D réalisés dans le but d'appréhender le fonctionnement d'une fondation mixte d'un Immeuble de Grande Hauteur (IGH). Une étude paramétrique a été réalisée avec plusieurs modèles de complexité augmentée : un modèle simple avec 1 pieu (pour le calage des paramètres de calcul), puis un modèle avec 4 pieux sous les poteaux, ensuite un modèle avec 75 pieux sous le noyau et enfin un modèle global de la fondation de l'IGH. Les interfaces de frottement sol-pieu sont modélisées par le comportement élasto-plastique pour examiner l'effet de la plastification progressive et la mobilisation du frottement sur la hauteur des pieux. Les résultats du modèle complet sont également comparés avec ceux de la fondation équivalente mais sur pieux. Les calculs réalisés ont mis en évidence la possibilité de réduire les tassements différentiels, de diminuer la charge en tête de pieux et, par conséquent, d'optimiser le dimensionnement de ces derniers par rapport à une fondation classique sur pieux, tout en permettant d'estimer la répartition des charges entre le sol et les pieux.

ABSTRACT: This article describes the use of 3D finite element numerical models to understand the behaviour of a piled-raft foundation for a high-rise building. A parametric study was carried out with models of increasing complexity: a simple model with one pile (to set the calculation parameters), a model with four piles under the columns, then a model with 75 piles under the core, and finally the full model of the building foundation. The soil-pile friction interfaces were modelled using elasto-plastic behaviour to examine the effect of progressive mobilization and plasticization of the soil friction along the pile height. The results of the full model were also compared with those of the equivalent piled foundation. The calculation results highlighted the possibility of reducing differential settlement, decreasing the load at the top of the piles and, consequently, optimizing their dimensions compared to a conventional pile foundation, while also enabling to estimate the distribution of loads between the soil and the piles to be estimated.

Mots-clés: fondation mixte ; IGH ; éléments finis ; interaction ; pieux.

1 INTRODUCTION

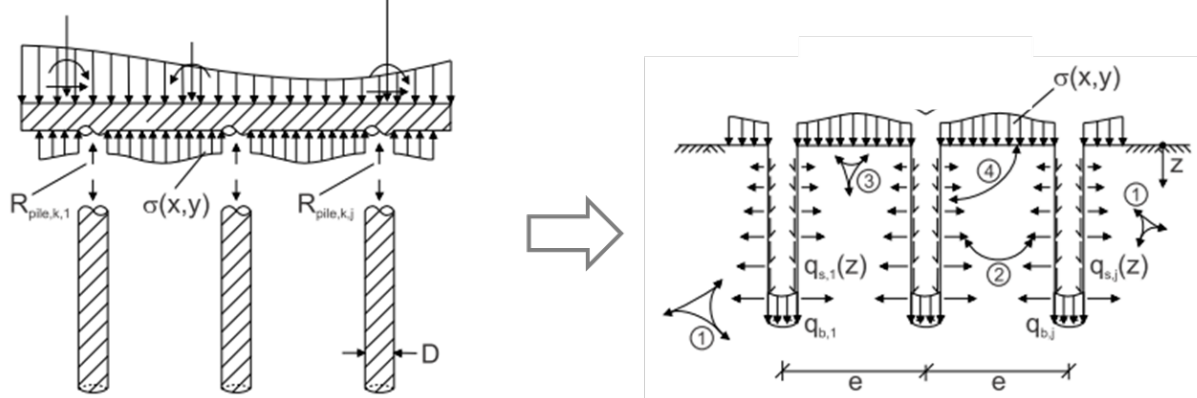
Dans la pratique courante du dimensionnement des fondations sur pieux, il est généralement supposé que seuls les pieux transmettent la charge de l'ouvrage au sol, à l'exclusion de la semelle. Cette hypothèse est justifiée lorsque les sols de surface sont médiocres, mais elle devient conservatrice lorsque ces sols ont une bonne consistance. Dans ce contexte, le concept de fondation mixte, semelle ou radier sur pieux, peut être envisagé, en considérant une reprise de charge simultanée à la fois par les pieux et par les sols situés sous le radier. Lorsqu'il est applicable, ce concept permet d'optimiser la fondation sur pieux, se traduisant par une réduction du nombre de pieux ou de leurs dimensions (diamètre et longueur), ainsi que par une diminution des efforts internes dans le radier. Cette optimisation est d'autant plus significative que le nombre de pieux est élevé, comme c'est le cas pour

les ouvrages de grande envergure tels que les ponts, les viaducs, les bâtiments industriels, les IGH, etc.

L'étude de dimensionnement d'une fondation mixte nécessite des calculs avancés capables de prendre en compte des interactions multiples et simultanées entre le sol, le radier et les pieux (Figure 1) : interaction sol-radier (comme celle des radiers), interaction sol-pieu (comme celle des pieux isolés), interaction entre pieux (comme celle d'un groupe de pieux) et aussi interaction radier-pieux. A ce jour, la modélisation numérique aux éléments finis 3D est la méthode la plus adaptée pour étudier ces fondations, car elle permet de représenter de manière fiable et détaillée ces interactions. À ce titre, (Nguyen *et al.*, 2022) ont réalisé des calculs numériques 3D pour étudier le comportement des fondations mixtes dans des configurations simples mais représentatives, au travers d'une étude paramétrique.

L'objet du présent article, dans la continuité du travail de (Nguyen *et al.*, 2022), est d'analyser le

fonctionnement d'une fondation mixte appliquée à un cas concret d'un Immeuble de Grande Hauteur (IGH).



1 / Interaction Pieu-Sol 2/ Interaction Pieu-Pieu 3/ Interaction Radier-Sol 4/ Interaction Pieu-Radier

Figure 1 : Interactions Sol-Radier-Pieux d'une fondation mixte (Katzenbach et Moormann, 2001)

2 DESCRIPTION DU PROJET

Le bâtiment étudié est un IGH de 190 m de hauteur (Figure 2), intégré à un complexe immobilier comprenant un socle commun et trois IGH à usage mixte (bureaux, hôtel et commerces), situé dans le quartier de La Défense (92). Compte tenu de la descente de charge particulièrement élevée sur la fondation (contrainte moyenne sous le noyau central atteignant 900 kPa), du contexte géotechnique et de l'environnement urbain très dense du site, la solution retenue pour la fondation de l'IGH est de type radier général sur pieux (Figure 3) : radier d'épaisseur variable, de 2.2m sous les poteaux et le noyau et de 0.9 m en zone courante, associé à ≈ 100 pieux ©StarSol de 1.2m de diamètre et de 25m de longueur, ancrés dans les Sables Supérieurs très compacts.

La succession lithologique du site, rencontrée depuis la surface est la suivante (Tableau 1): Remblais, Alluvions Anciennes, Calcaire Grossier, Sables Supérieurs, Fausses Glaises, Sables d'Auteuil, Argiles Plastiques, Marnes de Meudon et Craie. Les formations argileuses de l'Yprésien, sous la base des pieux, sont susceptibles d'engendrer des tassements non négligeables du système de fondation envisagé.

Tableau 1: Caractéristiques géotechniques des formations géologiques sur le site

	PI* (MPa)	E _M (MPa)	α	E _v (MPa)	q _s (kPa)
Remblais	0.7	5.8	0.5	-	72
Alluvions Anciennes	2.1	25	0.33	100	142
Calcaire Grossier	5.4	86	0.67	250	268
Sables Supérieurs	6.6	107	0.5	220	190
Fausses Glaises	2.6	32	0.67	150	91
Sables d'Auteuil	4.8	74	0.5	240	190
Argiles Plastiques	2.3	44	1	120	89
Marnes de Meudon	7	195	-	1000	272
Craie	7	220	-	-	-

La conception PRO de base du projet considère une fondation sur pieux (Nguyen *et al.*, 2024). Toutefois, la base du radier se situe dans les Alluvions Anciennes compactes, ce qui constitue une condition favorable à une reprise des charges de l'IGH par cet horizon géologique. Le concept d'une fondation mixte apparaît envisageable pour ce projet. Le présent travail vise ainsi à explorer cette possibilité et à en évaluer le gain potentiel pour la fondation du projet.

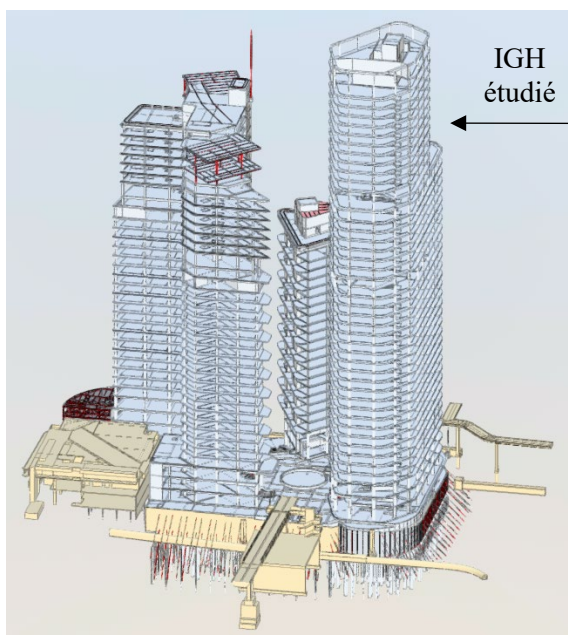


Figure 2 : Maquette numérique du projet

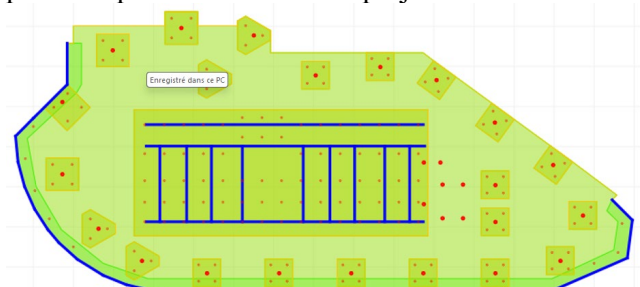


Figure 3 : Plan de pieux de l'IGH

3 METHODOLOGIE DE L'ETUDE

Une étude paramétrique a été réalisée à l'aide de plusieurs modèles aux éléments finis 3D de complexité croissante : un modèle simple avec 1 pieu (pour le calage des paramètres de calcul), un modèle avec 4 pieux sous les poteaux (interaction et comportement symétrique des pieux), un modèle avec 75 pieux sous le noyau central (effet d'un grand nombre de pieux) et enfin un modèle global de la fondation de l'IGH.

Une loi de comportement élastique linéaire est considérée pour l'ensemble des sols du site. Cette hypothèse est justifiée par le niveau relativement faible de la charge transmise au sol, inférieur au seuil de plasticité des sols. Les interfaces sol-pieux sont quant à elles modélisées à l'aide d'éléments d'interface dotés d'une loi de comportement élasto-plastique de type Mohr Coulomb, afin de représenter la mobilisation du frottement latéral le long des pieux. Pour ces interfaces, l'angle de frottement est pris nul, la cohésion est égal au frottement unitaire $q_{s \max}$, et le module de déformation est dégradé par rapport aux sols adjacents, avec $R_{\text{inter}} = 0.67$.

Les sols et les pieux sont modélisés par des éléments volumiques. Pour réduire considérablement la taille des modèles 3D tout en conservant une précision jugée suffisante ($\pm 5\%$ max), les pieux circulaires sont modélisés par des pieux carrés, de surface et raideur en compression équivalentes. Des éléments de poutre de très faible inertie (« poutres

fictives ») sont insérés au centre des pieux afin de permettre l'extraction des efforts internes, contraintes, efforts et aux tassements le long des pieux (Figure 4).

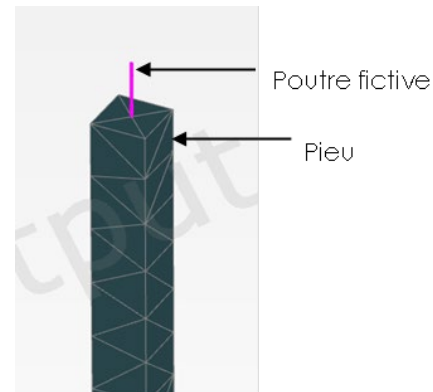


Figure 4 : Vue 3D d'un pieu carré avec poutre fictive

Pour les modèles élémentaires (1 pieu, 4 pieux ou 75 pieux, Figure 5), le radier est modélisé par un élément de plaque très rigide, sur laquelle une charge uniformément répartie est appliquée. Ces choix de modélisation sont identiques à ceux retenus par (Nguyen *et al.*, 2022). En revanche, pour le modèle global de l'IGH (Figure 6), la rigidité réelle du radier est prise en compte et les charges réelles au droit des poteaux et des voiles sont modélisées. Cette approche permet ainsi une comparaison avec la solution de fondation sur pieux des études AVP et PRO du projet.

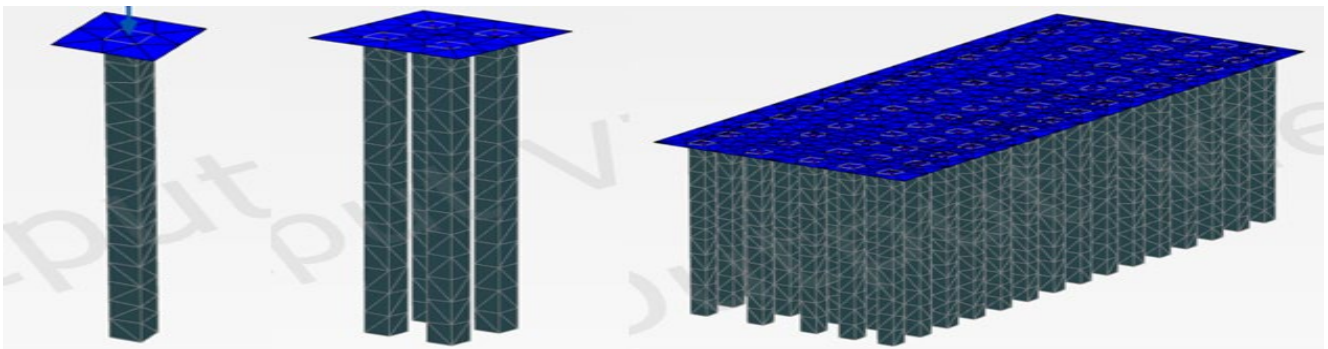


Figure 5 : Modèles 3D élémentaires à 1, 4 et 75 pieux (vue dégagée illustrant les fondations)

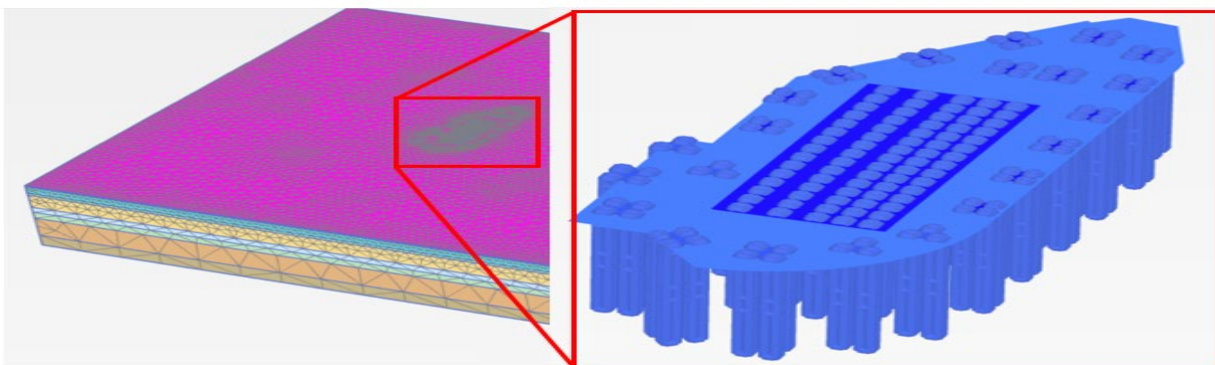


Figure 6 : Modèles 3D complet de la fondation de l'IGH

Afin de pouvoir comparer les deux concepts de fondation, fondation sur pieux (FP) et fondation mixte (FM), une couche « remblai » de faible épaisseur est ajoutée sous le radier. Cette couche peut être activée ou désactivée, correspondant respectivement aux cas de fondation mixte (FM) ou fondation sur pieux (FP), permettant d'obtenir les résultats de comparaison sans avoir à réaliser de nouveaux modèles de calcul.

Pour l'ensemble des calculs réalisés, l'analyse porte sur les trois paramètres principaux suivants :

- le taux de charge reprise par le sol sous le radier,
- le tassement de la fondation mixte, rapporté à celui de la fondation sur pieux équivalente (Δ_{FM}/Δ_{FP}),
- la répartition des charges entre les pieux au sein du groupe.

4 ETUDE PARAMETRIQUE

4.1 Modèles élémentaires à 1 et 4 pieux

Lors de notre travail précédent (Nguyen *et al.*, 2022), et afin de simplifier les modèles numériques (>600 modèles au total), une adhérence parfaite sol-pieux avait été supposée. Dans le présent travail, des éléments d'interface sol-pieux sont introduits et modélisés à l'aide d'une loi de comportement élasto-plastique de type de Mohr-Coulomb. La comparaison des résultats obtenus par ces modèles avec ceux issus des modèles purement élastiques sans interface sol-pieux (adhérence parfaite), permettent d'analyser la mobilisation du frottement latéral ainsi que la plastification progressive de ce frottement.

Le Tableau 2 présente les valeurs de frottement mobilisé q_s dans les différentes couches traversées par les pieux (AA – Alluvions Anciennes, CG – Calcaire Grossier et SS – Sables Supérieurs), calculés pour les modèles avec et sans interfaces. Il est montré que :

- Les frottements mobilisés dans les modèles avec interfaces sont, en moyenne, 20 % inférieurs à ceux obtenus dans les modèles sans interface. Ce résultat est logique : la modélisation avec des interfaces est plus réaliste puisqu'elle autorise le mouvement relatif sol-pieux et prend en compte la réduction des paramètres mécaniques du sol (résistance et module de déformation) au droit de l'interface sol-pieux.
- Les frottements mobilisés diminuent avec l'augmentation du nombre de pieux, qu'il y ait modélisation des interfaces ou non. Ce comportement est lié aux interactions entre pieux (effet de groupe), qui diminuent non seulement les frottements mobilisables ($q_{s \max}$) mais aussi les frottements effectivement mobilisés (y compris pour un entraxe $e/D = 3$).

Tableau 2 : Modèles à 1 et 4 pieux - frottement mobilisés q_s (kPa) le long des pieux ($E_{\text{remblai}} = 50 \text{ MPa}$)

	1 pieu – avec interface	1 pieu – sans interface	4 pieux – avec interface	4 pieux – sans interface
AA	96.2 kPa	127 kPa	68.7 kPa	102 kPa
CG	173 kPa	185 kPa	152 kPa	170 kPa
SS	124 kPa	139 kPa	109 kPa	133 kPa

Dans les calculs précédents, les interfaces sol-pieux restent dans le domaine élastique ($q_s \text{ mobilisé} < q_{s \max}$) la charge appliquée étant modérée. La plastification progressive des interfaces est ensuite étudiée pour 2 modes de fondation, FM et FP, par augmentation progressive de la charge (Figure 7). Les charges considérées correspondent à la charge minimale, moyenne et maximale en tête des pieux issues de l'étude PRO du projet. Pour les fondations mixtes, le comportement observé reste globalement élastique, les 3 points de mesure sont quasi alignés, ce qui peut être attribué aux charges plus faibles transmises aux pieux dans ce type de conception. En revanche, pour les fondations sur pieux, le dernier point de mesure (charge maximale) s'écarte légèrement de la droite définie par les deux premiers points (charges minimale et moyenne) : ceci pourrait signifier l'amorce d'une plastification des interfaces et donc un dépassement de la charge de fluage. Enfin, à charge égale, le tassement Δ_{FP} est plus faible que le tassement Δ_{FM} , y compris dans le domaine élastique.

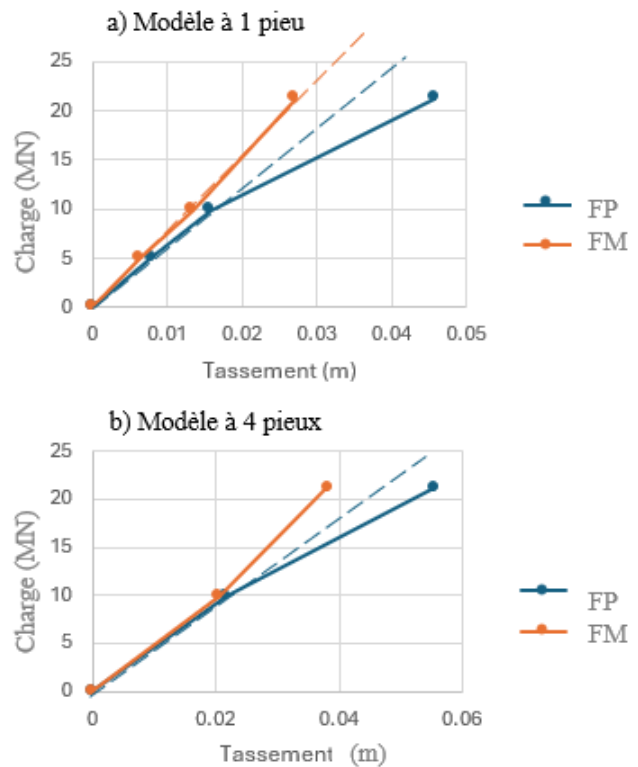


Figure 7 : Modèles à 1 et 4 pieux - Courbes charge vs. tassement des FM ($E_{\text{remblai}} = 50 \text{ MPa}$)

La Figure 8 illustre l'évolution du taux de charge reprise par le sol en fonction du module de déformation du sol situé directement sous le radier ($E_{remblai} = 10, 50$ et 100 MPa). On observe en premier lieu que ce taux augmente avec le module $E_{remblai}$ et qu'il est légèrement plus élevé pour le modèle à 1 pieu. Ces constats sont cohérents avec les résultats de notre travail précédent. Il ressort également que ce taux est plus élevé pour les modèles intégrant des interfaces élasto-plastiques sol-pieu. En effet, les interfaces diminuent la raideur globale des pieux, ceux-ci deviennent alors relativement plus souples par rapport aux modèles purement élastiques sans interface, ce qui favorise un transfert de charge accru vers le sol sous le radier.

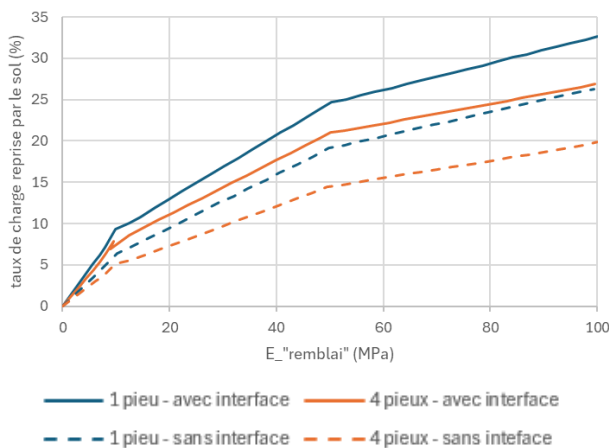


Figure 8 : Modèles à 1 et 4 pieux - Taux de charge reprise par le sol en fonction de $E_{remblai}$

4.2 Modèle élémentaire à 75 pieux

Il est bien établi que, dans un groupe de pieux sous une charge verticale centrée, le comportement des pieux individuels dépend de leur position relative. La Figure 9 présente les valeurs de frottement mobilisé q_s dans les différentes couches traversées par les pieux, obtenues à partir du modèle à 75 pieux du noyau central de l'IGH, intégrant des interfaces, pour les pieux situés à différentes positions dans le groupe. Il est montré que :

- Le frottement mobilisé est maximal pour les pieux situés aux angles (pieux n° 2 et 7), légèrement plus faible pour les pieux en bordure (pieux n° 1 et 5), et minimal pour les pieux intérieurs proches du centre (pieux n° 3, 4 et 6). Ce résultat s'explique par l'effet d'interaction entre les pieux qui est maximal pour les pieux intérieurs, qui mobilisent peu le frottement et davantage la pointe, et minimal pour les pieux de bordure et d'angle, qui mobilisent davantage le frottement.
- Les frottements mobilisés dans les couches AA - CG - SS sont largement inférieurs aux valeurs limites $q_{s,max}$ correspondantes, en tenant compte du

coefficient $C_e = 0.75$ ($q_{s,max} = 106, 201$ et 142 kPa, respectivement). Ce résultat s'explique, d'une part, par l'effet d'interaction entre les pieux, et, d'autre part, par le tassement du sol associé à la part de charge transmise au sol qui réduit le mouvement relatif sol-pieu, en particulier dans la partie supérieure des pieux.

Ainsi, la charge n'est pas transmise de manière uniforme entre les pieux: les pieux intérieurs sont les plus « souples » donc les moins chargés, tandis que la charge augmente du centre vers la périphérie, et les pieux aux angles sont les plus chargés (Figure 10).

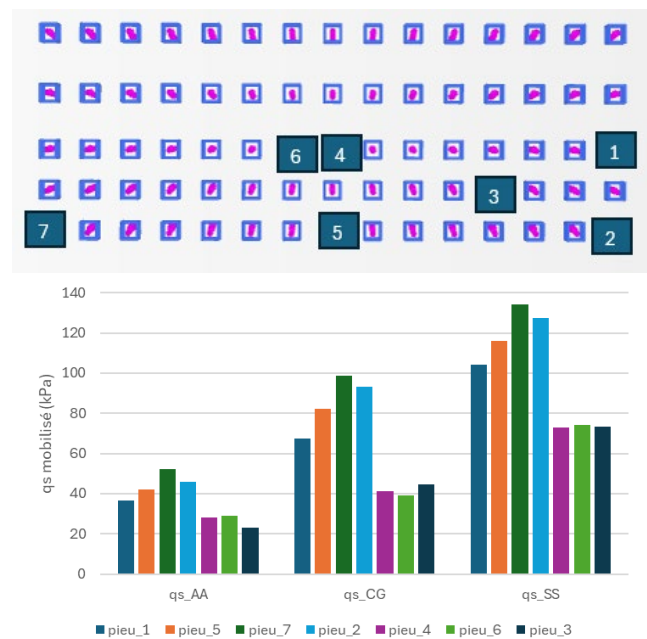


Figure 9 : Modèle à 75 pieux - q_s (kPa) mobilisés le long des pieux ($E_{remblai} = 50$ MPa)

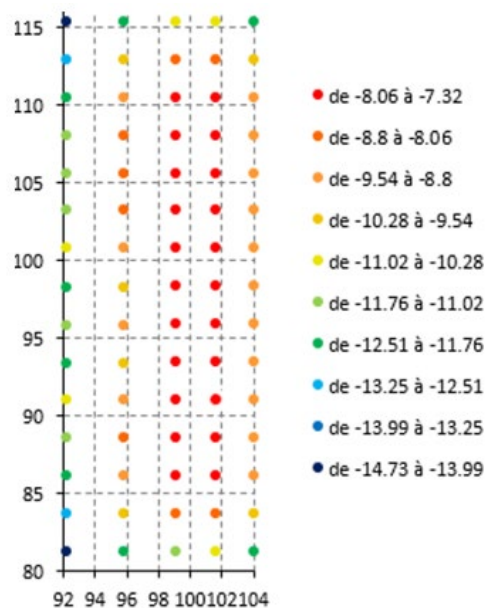


Figure 10 : Modèle à 75 pieux - Répartition des charges en tête de pieux (MN)

La Figure 11 présente le rapport de tassement Δ_{FM}/Δ_{FP} . Nous retrouvons la conclusion du précédent travail : La fondation mixte tasse moins que la fondation sur pieux équivalente (c-à-d même nombre et répartition de pieux). Cette réduction est plutôt modeste (5% à 10%). En effet, la réduction du tassement des pieux par la diminution de charges transmises aux pieux est compensée en partie par le tassement du sol sous le radier.

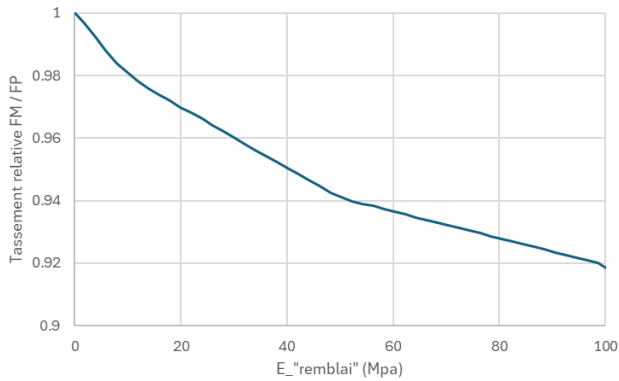


Figure 11 : Modèle à 75 pieux – Rapport de tassement Δ_{FM}/Δ_{FP}

5 RESULTATS DU MODELE GLOBAL

Pour le modèle global, la fondation mixte de l'IGH est modélisée dans son intégralité (radier et pieux). Contrairement aux modèles élémentaires, pour améliorer la précision du calcul, la rigidité réelle du radier en flexion est prise en compte et les charges localisées au droit des poteaux et des voiles sont explicitement modélisées.

Le Tableau 3 présente les taux de charge reprise par le sol sous le noyau central et sous certains massifs périphériques (sur 3 à 4 pieux), ainsi que le taux moyen à l'échelle de l'ensemble de la fondation. Comparé avec le taux sous le noyau, les taux sous les massifs sont globalement plus importants. Cette différence peut s'expliquer, d'une part, par la contribution du radier dans la zone courante entourant des massifs (qui augmente leur surface effective) et, d'autre part, par un possible transfert de charges entre le noyau et les massifs via le radier de la zone courante.

Ce taux n'est pas homogène mais varie selon les zones considérées (noyau ou massifs) et selon la descente de charges de chaque zone. Néanmoins, le taux moyen de 21.4% reste cohérent avec ceux issus des modèles élémentaires ($\approx 25\%$ pour le modèle à 4 pieux et $\approx 20\%$ pour le modèle à 75 pieux). Ce résultat est également en bon accord avec ceux de notre travail précédent, synthétisés sous forme d'abaques pour des cas courants. En considérant la configuration la plus proche parmi les abaques disponibles - pieux travaillant en pointe, rapport L/D (longueur/diamètre) ≈ 20 , rapport e/d (espacement/diamètre) ≈ 3 , rapport

$E_{pieu}/E_{sol(SS)} \approx 50$ et un nombre de pieux > 25 (Figure 12), le taux de charge reprise par le sol de 22%.

Tableau 3 : Modèle global – Taux de charge reprise par le sol

Taux de charge reprise par le sol (%)	
Moyen	21.4
Noyau	15.9
Massif 1	16.9
Massif 2	25.9
Massif 3	28.3
Massif 4	27.7
Massif 5	24.7

+

Pieux travaillant en pointe		Nombre de pieux -> 25			
L/d	e/d	E_{pieu}/E_{sol} ->	50	125	500
29.17	3		22%	7%	0%
	5		40%	20%	1%
	8		62%	39%	11%
43.75	3		25%	10%	0%
	5		43%	23%	4%
	8		62%	40%	12%
58.3	3		27%	12%	0%
	5		43%	22%	2%
	8		62%	41%	11%

Figure 12 : Extrait des abaques dans (Nguyen et al., 2022)

La reprise d'une partie des charges par le sol sous le radier se traduit par une diminution des efforts transmis aux pieux, soit 21.4% en moyen. La Figure 13 illustre les différences de charges en tête des pieux entre deux conceptions : une fondation sur pieux et une fondation mixte. Compte tenu de la forte complexité du système (répartition dissymétrique des pieux, rigidité en flexion variable du radier, variation de la descente de charge selon les zones), ces différences ne sont pas homogènes et varient fortement de -2% à 40% selon la position des pieux. Au centre du noyau, les différences observées restent faibles ; les valeurs légèrement négatives peuvent être attribuées à des effets numériques liés au maillage ou au post-traitement, et demeurent marginales. En revanche, des différences nettement plus marquées sont observées pour les pieux sur les bordures du noyau (en particulier dans les coins) et pour les pieux sous les massifs.

Au regard de ces résultats, la conception d'une fondation mixte permet d'optimiser les pieux (en nombre, en longueur ou en diamètre) par rapport à la conception classique d'une fondation sur pieu. Dans le cas spécifique de l'IGH étudié, compte tenu du nombre élevé de pieux (≈ 100) et de leurs dimensions importantes (diamètre 1.2m et longueur 25m), le gain de cette optimisation potentielle est significatif.

Concernant les tassements, le mode de fondation mixte permet d'en réduire légèrement l'amplitude, comme le montre l'étude paramétrique des modèles élémentaires et comme l'illustre la Figure 14. Par ailleurs, la réduction des tassements différentiels entraîne une diminution des efforts internes dans le radier, ce qui constitue un gain potentiel pour le dimensionnement du ferrailage de ce dernier.

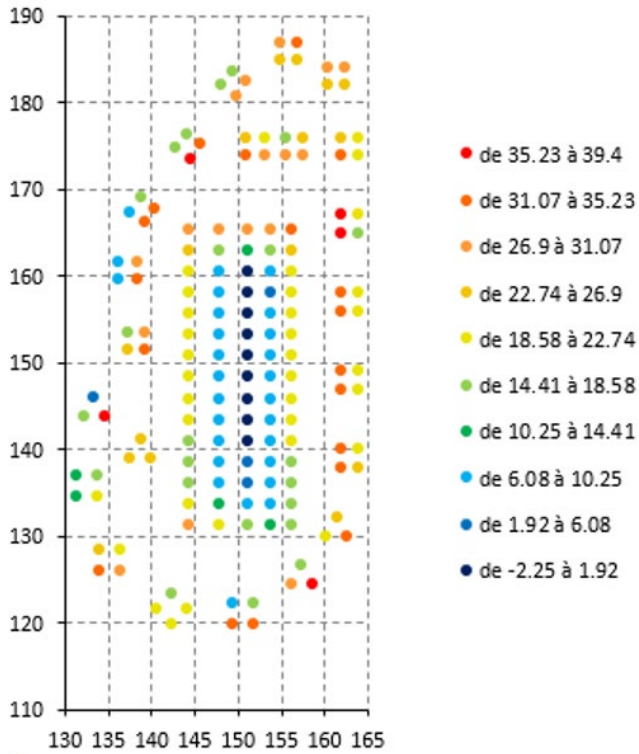


Figure 13 : Différences (en %) des charges en tête de pieux pour 2 solutions FM vs. FP

6 CONCLUSION ET PERSPECTIVE

Le travail présenté dans cet article s'inscrit dans la continuité de celui réalisé en 2022. Il comprend une étude paramétrique complémentaire, intégrant une modélisation plus fine de l'interface sol-pieux, ainsi qu'une application à un cas concret d'IGH de 190 m de haut. Il est démontré que le recours au concept de fondation mixte permet une optimisation significative du système de fondation - pieux et radier - de l'IGH étudié (environ 20% du volume de pieux), initialement conçu pour une fondation exclusivement sur pieux. Les résultats et conclusions de cette étude confirment et complètent ceux du travail antérieur (Nguyen *et al.*, 2022). Ils offrent aux concepteurs des ordres de grandeur pertinents des principaux paramètres, utiles tant pour le choix de la solution de fondation que pour les calculs de pré-dimensionnement et la vérification des calculs avancés.

Les modélisations aux éléments finis 3D réalisées dans le cadre de ce travail offrent un niveau de précision élevé, mais restent très consommatrices en temps de calcul et en ressources. Ce type d'approche est bien adapté aux études d'exécution (EXE), mais moins pertinent pour les études de conception préliminaire (AVP et PRO). Dans cette perspective, ce travail vise à développer une méthode hybride plus légère, combinant une modélisation par éléments finis du radier et une approche analytique pour le sol, à l'instar de la méthode proposée pour les fondations sur pieux (Nguyen *et al.*, 2024).

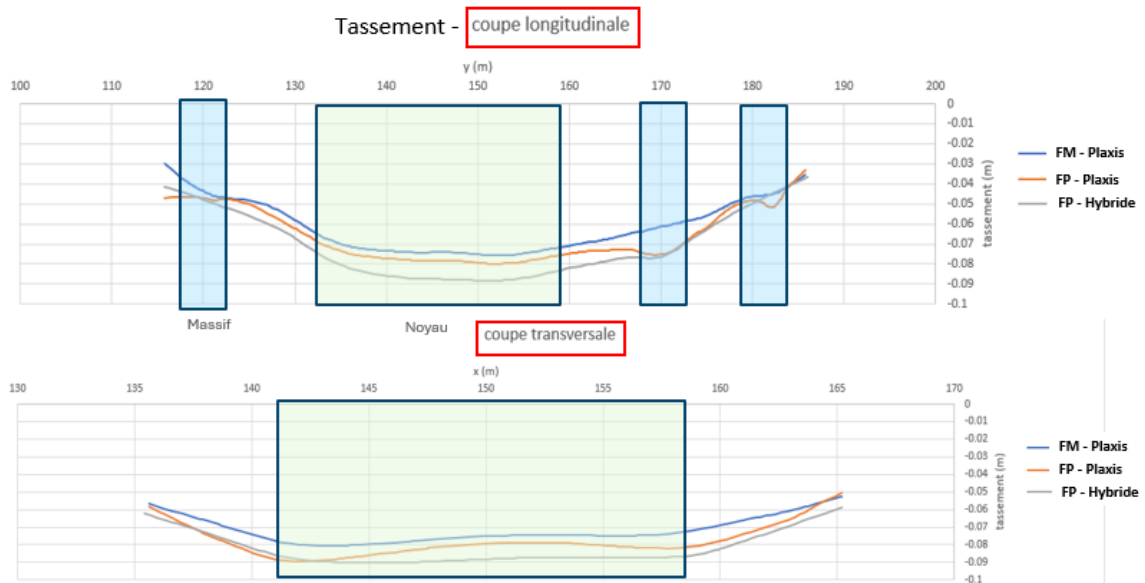


Figure 14 : Comparaison des tassements entre le mode Fondation Mixte et le mode Fondation sur Pieux.

* La courbe grise représente des tassements du mode Fondations sur pieux, estimés à l'aide d'un modèle hybride (Nguyen *et al.*, 2022)

7 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Katzenbach, R., Moormann, C. (2001). Recommendations for the design and construction of piled rafts, dans: *15th ISSMGE*, Istanbul, Turkey, pp. 927-930.

Nguyen, K.V., Carlier, F., Cuiru, F., Baldi Froes, G. (2022). Etude paramétrique appliquée aux fondations mixtes pour les IGH, dans : *11^e conférence JNGG*, Lyon, France.

Nguyen, K.V., Baldi, G., Prud'hon, C., Preotu, A., Burlon, S. (2024). Méthode hybride appliquée aux études ISSS – Exemple d'un ensemble de trois IGH fondés sur pieux, dans : *12^e conférence JNGG*, Poitiers, France.