

# METHODE HYBRIDE APPLIQUEE AUX ETUDES ISSS – EXEMPLE D'UN ENSEMBLE DE TROIS IGH FONDES SUR PIEUX

## HYBRID METHOD APPLIED TO ISSS COMPUTATION – EXAMPLE OF THREE HIGH-RISE BUILDINGS FOUNDED ON PILED FOUNDATION

Khoa Van NGUYEN<sup>1</sup>, Gabriel BALDI<sup>1</sup>, Clément PRUD'HON<sup>1</sup>, Andreea PREOTU<sup>1</sup>, Sébastien BURLON<sup>1</sup>,

<sup>1</sup> Setec Terrasol, Paris, France

**RÉSUMÉ** – Cet article décrit l'utilisation d'une méthode hybride combinant des éléments finis et des formules analytiques pour un projet de construction de 3 IGH fondés sur pieux et reliés entre eux par un socle commun. Cette méthode simple, efficace et moins laborieuse qu'un modèle aux éléments finis 3D complet, a permis la réalisation d'études ISSS précises tenant compte des interactions réciproques entre les IGH.

**ABSTRACT** – This paper describes the use of a hybrid method combining finite elements and analytical formulas for a project involving the construction of 3 high-rise buildings founded on piled-raft and linked together by a common base. This simple and efficient method, less laborious than a full 3D finite element model, enabled us to carry out accurate ISSS studies considering the reciprocal interactions between the buildings.

### 1. Introduction

L'étude d'Interaction Sol-Structure (ISS) est un passage obligé pour appréhender d'une manière réaliste le comportement des ouvrages en relation avec le sol qui les supporte, en particulier pour des ouvrages importants et complexes, tels que des Immeubles de Grande Hauteur (IGH). La notion d'ISS doit être étendue aux projets où plusieurs ouvrages sont situés dans leurs Zones d'Influence Géotechnique (ZIG), on parle de l'Interaction Structure-Sol-Structure (ISSS), c'est-à-dire l'interaction entre les ouvrages à travers le sol de fondation. En pratique, des modèles aux éléments finis (EF) 3D sont souvent utilisés pour ces projets, que ce soit en France ou à l'international, en particulier pour des fondations sur pieux, pour tenir compte des interactions réciproques et complexes entre le terrain, les fondations (radiers et pieux) et les ouvrages. Cependant, ces modèles sont très lourds à mettre en œuvre et peu adaptés aux études de conception en phases AVP ou PRO où les conceptions architecturale et structurale ne sont pas complètement figées. Ils peuvent même atteindre leurs limites d'utilisation (nombre trop important de nœuds et d'éléments) dans le cas de plusieurs ouvrages avec un grand nombre de pieux.

Nous présentons dans cet article l'emploi de la méthode hybride pour l'étude d'ISSS d'un projet de construction de trois IGH fondés sur environ 400 pieux, proches l'un de l'autre sur un site urbain dense (cf. Figure 1). La méthode utilisée combine la méthode des éléments finis avec la méthode analytique permettant un gain conséquent en temps de calcul tout en assurant une bonne précision, ce qui est fort appréciable pour des études de conception du projet dans des délais courts. Cette méthode, simple d'utilisation, fournit non seulement les tassements des ouvrages étudiés mais également la cuvette de tassement du sol aux alentours, nécessaire pour l'étude de l'impact du projet sur ses avoisinants, ce qui est indispensable dans un contexte urbain très dense. Pour la prise en compte de l'effet de groupe entre les pieux en termes de tassements, sujet fondamental pour des groupes d'un grand nombre de pieux mais souvent négligé car non abordé dans la norme NF P94-262, le concept de « courbes d'influence », développé par Poulos et Davis (1980), est utilisé pour tenir compte des tassements engendrés par un pieu chargé sur les pieux alentours. La

méthodologie de calcul (implantée dans le logiciel Foxta / Tasplaq développé par Terrasol) a été déjà employée avec succès pour plusieurs projets d'IGH fondés sur pieux, les résultats obtenus sont comparables à ceux obtenus par des modèles EF 3D utilisant des lois de comportement avancées (Burlon et Cuira, 2021 ; Baldi et al., 2022). Elle est utilisée pour la 1<sup>ère</sup> fois pour étudier un ensemble de plusieurs IGH. Pour le projet étudié, une des particularités est la prise en compte de la présence des formations argileuses moins compactes en profondeur (et sous la base des pieux), qui induiront des tassements significatifs et, par conséquent, amplifieront les interactions entre les IGH.

## 2. Description des IGH et de leurs fondations

Le projet étudié consiste en la construction d'un complexe constitué d'un socle commun avec 3 IGH (tours A, B et C, cf. Figure 1) à usage mixte (bureaux, hôtel et commerces), de hauteur variable de 100m à 190m, dans le quartier La Défense (92).

Compte tenu de la descente de charge importante des IGH (contrainte moyenne au sol jusqu'à ~900 kPa sous les noyaux centraux), de la condition géotechnique et du contexte urbain très dense du site, les fondations des IGH sont de type radier général sur pieux (cf. Figure 2). L'épaisseur du radier varie de 0.9m à 2.2m selon les zones (épaisseur importante sous les méga-poteaux ou sous les noyaux des IGH). Les pieux (~400 en total), sont de type ©StarSol (équivalent aux pieux en tarière creuse continue), de diamètre variable (entre 0.8m et 1.2m). Appuyée sur une base de données approuvée d'essais de chargement, ces pieux ont des capacités portantes plus importantes que celles, estimées par l'approche normative, des pieux forés classiques similaires. Dans l'objectif d'optimisation du projet, la solution de pieux longs (jusqu'à 60m) ancrés dans le substratum crayeux est écartée, la solution de pieux « courts » (longueur ~25m) est retenue. Cette solution optimisée constitue un défi conceptionnel significatif du projet, car elle doit prendre en compte des tassements importants induits par les formations d'Yprésiens moins compactes sous la base des pieux (Fausses Glaises et Argiles Plastiques).

Des études d'ISSS avancées ont été réalisées dès l'APD puis en PRO pour estimer finement l'impact de ces tassements sur les structures des IGH. En effet, en raison de leur proximité, un IGH peut se situer dans la ZIG d'un autre IGH via la cuvette de tassement induit par ce dernier. Cette interaction réciproque entre les IGH est fonction de l'amplitude de tassement (donc du poids des IGH et du contexte géotechnique du site), de leurs distances et également de leur phasage de construction. Pour la prise en compte de cette interaction de type ISSS, qui est fondamentale pour l'étude structurale de ces ouvrages sensibles, les calculs EF 3D atteignent leur limite concernant la taille (trop) importante du modèle et la vitesse (ou la « lenteur ») de calcul. La méthode hybride a été ainsi employée et a donné des résultats de bonne précision dans des délais courts, respectant le planning serré des études de conception du projet.

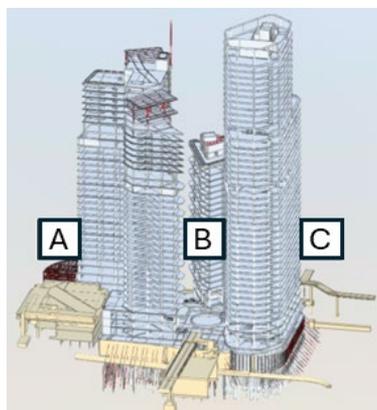


Figure 1 : Maquette numérique du projet

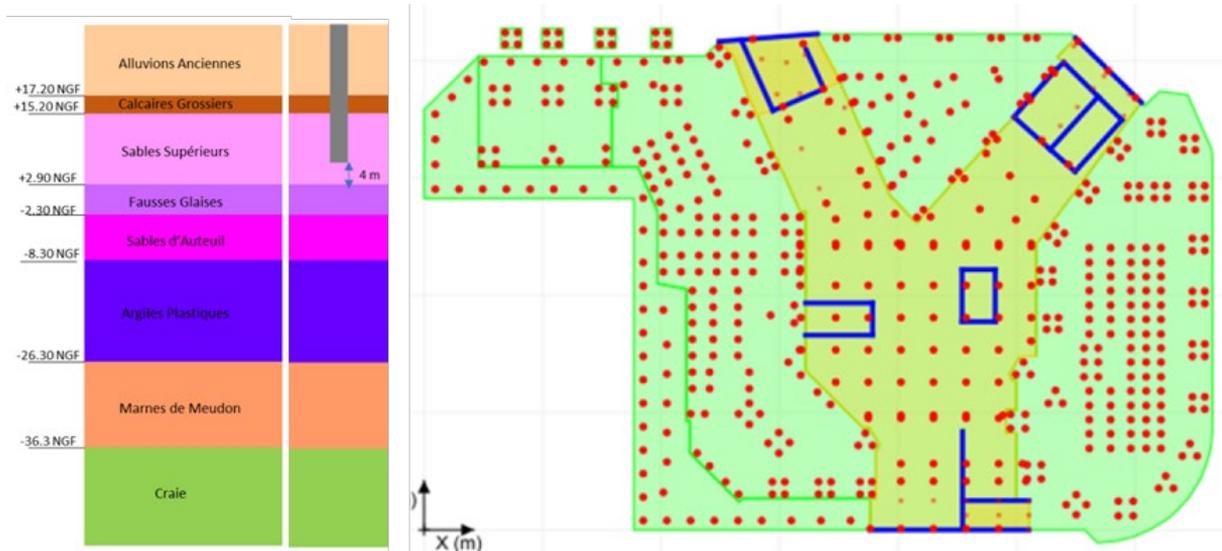


Figure 2 : Coupe type et plans de pieux du projet

### 3. Contexte et modèle géotechnique

Le site d'étude est localisé dans le bassin parisien. Depuis la surface du terrain naturel, sous des remblais anthropiques, se rencontre la succession lithologique suivante : Alluvions Anciennes (alluvions sablo-graveleuses), Calcaire Grossier (alternance de bancs de calcaire glauconieux indurés et de niveaux plus friables), Sables Supérieurs (sables fins à grossiers, à passées de lignite et passages argileux), Fausses Glaises (argiles alternant avec des lignites et des bancs sableux), Sables d'Auteuil (sables fins à passages d'argiles sableuses à silteuses), Argiles Plastiques, Marnes de Meudon (alternance de niveaux marneux et de bancs marno-calcaires compacts à fracturés) et Craie.

Tableau 1. Caractéristiques mécaniques des formations géologiques

	PI* (MPa)	$E_M$ (MPa)	$\alpha$	$E_V$ (MPa)	$q_s$ (kPa)	$k_{p_{max}}$
Remblais	0.7	5.8	0.5	-	72	1.3
Alluvions Anciennes	2.1	25	0.33	100	142	2.1
Calcaire Grossier	5.4	86	0.67	250	268	2.1
Sables Supérieurs	6.6	107	0.5	220	190	3.5
Fausses Glaises	2.6	32	0.67	150	91	2.1
Sables d'Auteuil	4.8	74	0.5	240	190	3.5
Argiles Plastiques	2.3	44	1	120	89	2.1
Marnes de Meudon	7	195	-	1000	272	3.5
Craie	7	220	-	-	-	-

Lors de l'établissement du modèle géotechnique du projet (cf. Tableau 1), notre attention a porté sur l'estimation des modules de déformation (élastique)  $E_V$ , paramètre fondamental pour les calculs de tassement et donc des calculs ISSS. Pour les formations superficielles (Alluvions Anciennes et Calcaire Grossier), situées juste sous les radiers (sur pieux), la corrélation usuelle de  $E_V$  en fonction de  $E_M$  (module pressiométrique), préconisée par la norme NF P 94-261, est acceptable et retenue. Cependant, pour les formations profondes (Sables Supérieurs, Fausses Glaises, Sables d'Auteuil et Argiles Plastiques), cette corrélation devient peu précise et pessimiste car elle n'est plus dans son domaine d'application, compte-tenu des faibles déformations attendues au sein de ces formations. Une approche plus réaliste a été adoptée : les valeurs  $E_V$  de ces formations ont été estimées à partir des courbes module – déformation (module de cisaillement  $G$  en fonction de la distorsion  $\gamma$ ). Pour établir ces courbes (cf. Figure 3), une importante campagne

géotechnique a été mise en œuvre, incluant notamment des essais in-situ et en laboratoire spécifiques (essais pressiométriques cycliques, essais triaxiaux cycliques, bender element et cross-holes). Les valeurs retenues des modules  $G$ , puis des modules  $E_Y$ , correspondent aux niveaux de déformation issus des calculs de tassement de fondations via une procédure itérative.

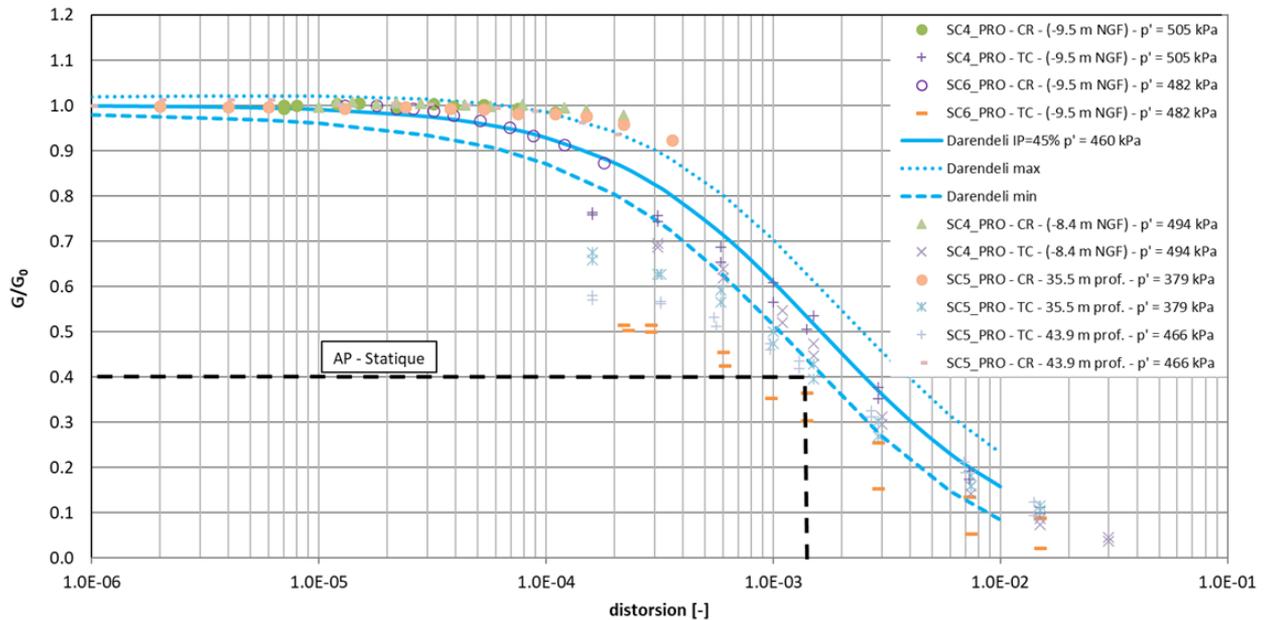


Figure 3 : Exemple de courbe module-déformation pour les Argiles Plastiques

#### 4. Méthodologie de calcul ISS

Il est connu que le comportement des pieux individuels dans un groupe sous une charge verticale centrée est différent en fonction de leur position. L'effet de l'interaction entre les pieux est maximal pour le pieu au centre et minimal pour les pieux aux coins. Par conséquent, la raideur « apparente » des pieux, même identiques, n'est pas homogène et la charge n'est pas transmise de manière uniforme à tous les pieux. Cet aspect, souvent négligé pour les ouvrages classiques ayant un faible nombre de pieux, est fondamental pour une étude ISS d'ouvrages fondés sur un grand nombre de pieux, tels que des IGH (ouvrages très sensibles aux déplacements).

La méthode hybride appliquée pour un groupe de pieux chargés verticalement consiste à évaluer les tassements puis les raideurs des pieux avec la prise en compte de l'effet de groupe entre les pieux, qui conduit à l'assouplissement de la fondation du fait de l'entraînement du terrain entre les pieux. Cette évaluation est réalisée selon les étapes successives suivantes (cf. Figure 4) :

- définition de la raideur verticale propre d'un pieu isolé  $k_i^{isolé}$ , 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 de type « t-z » (cf. norme NF 94-262 annexe L) ou de modèles numériques (EF 2D-axismétrique) ;
- définition d'une courbe d'influence, qui traduit l'interaction entre deux pieux (un pieu chargé induit un tassement sur l'autre pieu non chargé et situé à une distance quelconque), à l'aide d'un modèle numérique centré sur le pieu (EF 2D-axismétrique) ;
- définition de la raideur verticale de chaque pieu dans le groupe  $k_i^{groupe}$  prenant en compte l'effet de groupe, en additionnant les impacts de tassement de tous les pieux dans le groupe :

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

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 pseudo-élastique, ce qui est bien le cas dès lors que le dimensionnement des pieux est vérifié à l'ELS (charge appliquée au pieu inférieure à sa charge de fluage).

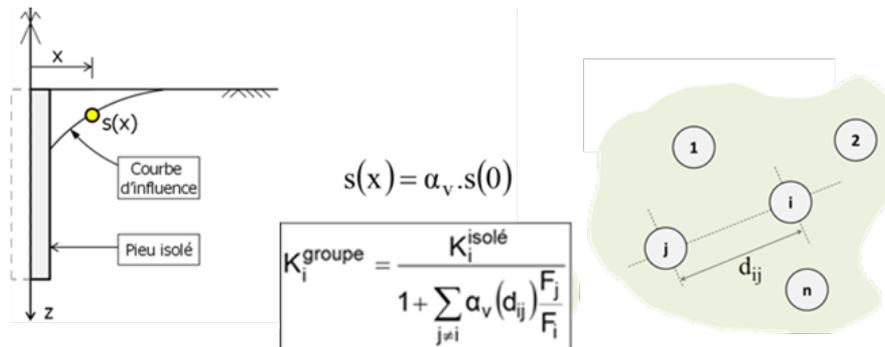


Figure 4 : Principe de la courbe d'influence pour traiter l'effet de groupe de pieux

La mise en œuvre pratique de cette méthodologie pour nos projets consiste à établir successivement des modèles de calcul suivants, selon les étapes définies ci-avant :

- modèle analytique élémentaire, à l'aide du logiciel Foxta / Taspie+, pour estimer la raideur verticale propre d'un pieu isolé  $k_i^{\text{isolé}}$  ;
- modèle EF 2D-axismétrique, à l'aide du logiciel Plaxis 2D, centré sur le pieu et avec des éléments d'interface (comportement élasto-plastique type Mohr-Coulomb) modélisant le frottement sol-pieu, pour établir la courbe d'influence. D'après les résultats de plusieurs calculs tests, une seule courbe « normalisée » est suffisante pour l'ensemble des pieux de diamètres différents et de longueurs similaires ;
- modèle global de la fondation (radier/semelle + pieux) avec la descente de charge du modèle Structure, à l'aide du logiciel Foxta / Taspiaq, dans lequel les pieux sont modélisés par des ressorts de raideur  $k_i^{\text{groupe}}$ . A chaque itération lors de la procédure ISS itérative, 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  $k_i^{\text{groupe}}$  corrigées des pieux.

Cette méthodologie ISS a été employée avec succès sur plusieurs projets de IGH fondés sur pieux et étudiés par Terrasol : tour Triangle (H ~180m) à Paris, tour Mohammed VI (H ~250m) à Rabat, tour F (H ~300m) à Abidjan. Par rapport à ces projets, une des particularités du projet ici décrit est la présence des formations argileuses profondes moins compactes proches de la base des pieux. Cette particularité géologique n'est pas, en théorie, incompatible avec l'application de cette méthodologie ISS. Pour le confirmer, un calcul EF 3D a été réalisé, à l'aide du logiciel Plaxis 3D, pour un IGH isolé (le plus chargé) ; ces résultats ont été ensuite comparés avec ceux obtenus par la méthodologie proposée, à l'aide du logiciel Foxta / Taspiaq. Le modèle EF 3D (cf. Figure 5 – gauche) comprend ~135 000 nœuds et ~150 000 éléments volumiques 3D et nécessite plusieurs heures de calcul. Quant au modèle Foxta / Taspiaq (cf. Figure 5 – droite), il ne comprend que ~1500 nœuds et ~3000 éléments 2D et le temps de calcul n'est que 18 s. La Figure 6 présente la comparaison des tassements de l'IGH considéré, estimés par ces deux calculs, dans 2 directions (longitudinale et transversale) : des écarts inférieurs au centimètre ont permis de pleinement confirmer la validité, la précision et l'efficacité de la méthodologie ISS proposée dans un contexte géotechnique particulier du projet.

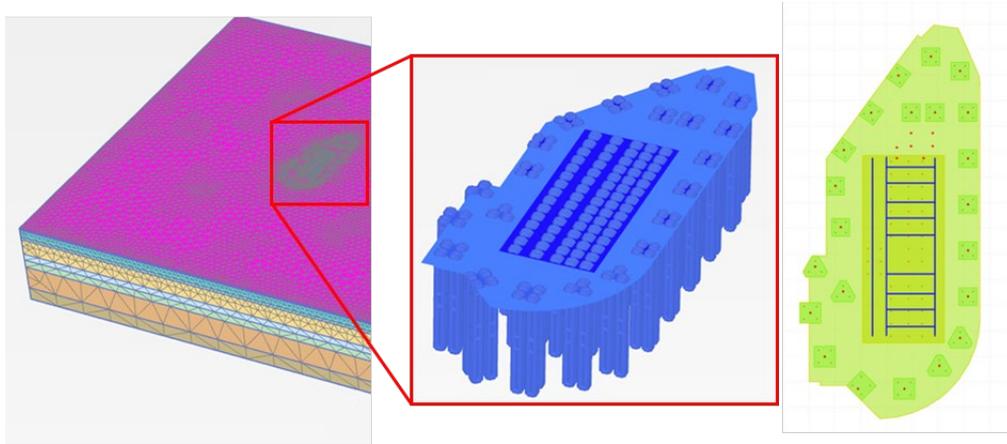


Figure 5 : Modèle Plaxis 3D (à gauche : ~135 000 nœuds et ~150 000 éléments 3D) et modèle Tasplaq (à droite : ~1 500 nœuds et ~3 000 éléments 2D) d'un IGH

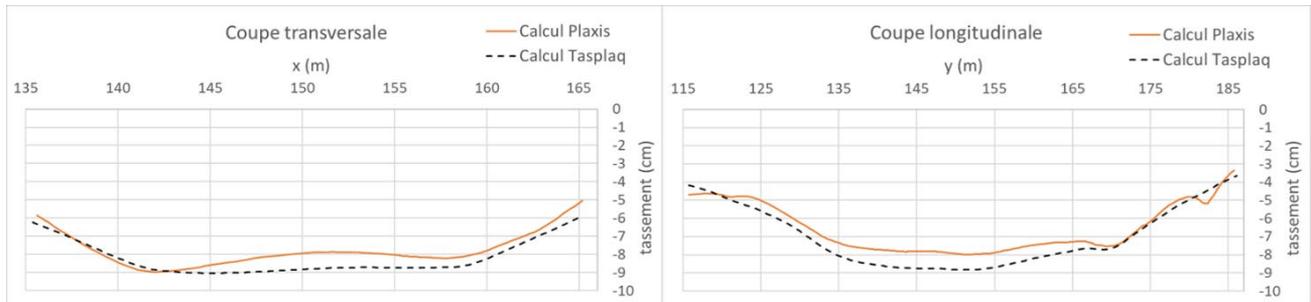


Figure 6 : Comparaison des tassements d'IGH isolé : méthode hybride vs. Plaxis 3D

## 5. Méthodologie de calcul ISSS

Dans le cadre du projet étudié, des calculs préliminaires ont mis en évidence des cuvettes de tassement étendues. Ainsi un IGH peut se situer dans la ZIG d'un autre IGH via la cuvette de tassement induite par ce dernier. Ces tassements induits sont faibles pour des IGH suffisamment éloignés ; ils sont significatifs pour des IGH proches et deviennent prédominants pour le socle commun. Il est ainsi fondamental pour l'étude structurale de pouvoir tenir compte de ces interactions réciproques (en termes de tassements) entre les ouvrages, qui modifie la répartition des efforts dans la structure de ces ouvrages. Or, il est quasi impossible de réaliser un modèle complet incluant tous les ouvrages, au moins pendant les phases d'études APD et PRO où les conceptions architecturale et structurale sont « changeantes ». Pour l'aspect géotechnique, le modèle EF 3D d'un seul IGH nécessite déjà ~150 000 éléments 3D, un modèle EF 3D de l'ensemble de 3 IGH avec le socle n'est pas envisageable. Pour l'aspect structural, le constat est identique compte-tenu de la forte complexité structurale de ces IGH. De plus, l'avancement de l'étude structurale de chaque IGH est différent, chaque modification d'un IGH nécessitant de refaire le calcul du modèle complet, ce qui n'est pas viable. Ainsi, il est indispensable de mettre en place une méthodologie ISSS permettant la réalisation des modèles Structure distincts capables de tenir compte de ces interactions entre les ouvrages.

La méthodologie ISSS développée ci-avant est tout à fait adaptée pour cette étude ISSS. Sa mise en œuvre pour l'étude ISSS est aussi simple que l'étude ISS, avec un modèle global plus grand pour modéliser l'ensemble des fondations mais restant très raisonnable (seulement ~4000 nœuds et ~10 000 éléments 2D). Les étapes de l'étude ISSS proposée sont les suivantes :

- étude ISS indépendante de chaque IGH et du socle, considérés isolés ;

- estimation de la cuvette de tassement induite par chaque ouvrage, permettant de déterminer les impacts des uns sur les autres ;
- superposition des cuvettes de tassement dans un ordre prédéfini en fonction du phasage de construction de ces ouvrages ;
- définition des jeux de raideur apparente des pieux de chaque IGH considérant des tassements induits par l'autre ouvrage ou par les autres ouvrages : la raideur apparente  $K_{groupe}$  d'un pieu dépend non seulement de son interaction avec les autres pieux alentours mais également de celle avec d'autres ouvrages proches ;
- étude ISS indépendante de chaque IGH avec des jeux de raideurs tenant compte de l'effet ISSS ;
- calcul ISS final de l'ensemble d'ouvrages.

Dans le cadre d'une étude ISSS, l'attention doit également être portée sur le phasage de construction des ouvrages, qui a une influence sur l'effet ISSS entre ces derniers : l'ouvrage construit en dernier impactera les autres ouvrages déjà construits et ne subira pas l'impact de ceux-ci, sous réserve que leurs tassements soient stabilisés (fin de consolidation). Dans ce cas, une étude ISS est suffisante pour le dernier ouvrage, en revanche une étude ISSS est nécessaire pour les premiers ouvrages. Lors des phases d'études de conception d'un projet, ce phasage n'est pas toujours bien connu. Si cette information n'est pas encore précisée, et pour assurer la robustesse de la conception et du dimensionnement structural, il est recommandé d'estimer une enveloppe d'efforts en réalisant plusieurs études ISS avec différents jeux de raideur apparente des pieux correspondant à différents scénarii de phasage.

## 6. Résultats des calculs

La Figure 7 présente l'exemple de la cuvette de tassements induits par un IGH (tour A) sur les deux autres IGH (tours C et B) et le socle commun. On observe que la tour A induit un tassement complémentaire d'environ 6 cm sur le socle, 2 cm sur la tour B et 0.3 cm sur la tour C. Ainsi, l'impact de la tour A sur la tour C est négligeable ; en revanche, les interactions entre les tours A, B et le socle sont non-négligeables et doivent être considérées dans l'étude ISSS. La Figure 8 présente les tassements de la tour B, issus des résultats du modèle ISSS global final. L'impact significatif des autres IGH (tours A et C) sur cet IGH est mis en évidence, ce qui démontre la nécessité, voire le caractère indispensable, des calculs ISSS pour cet IGH.

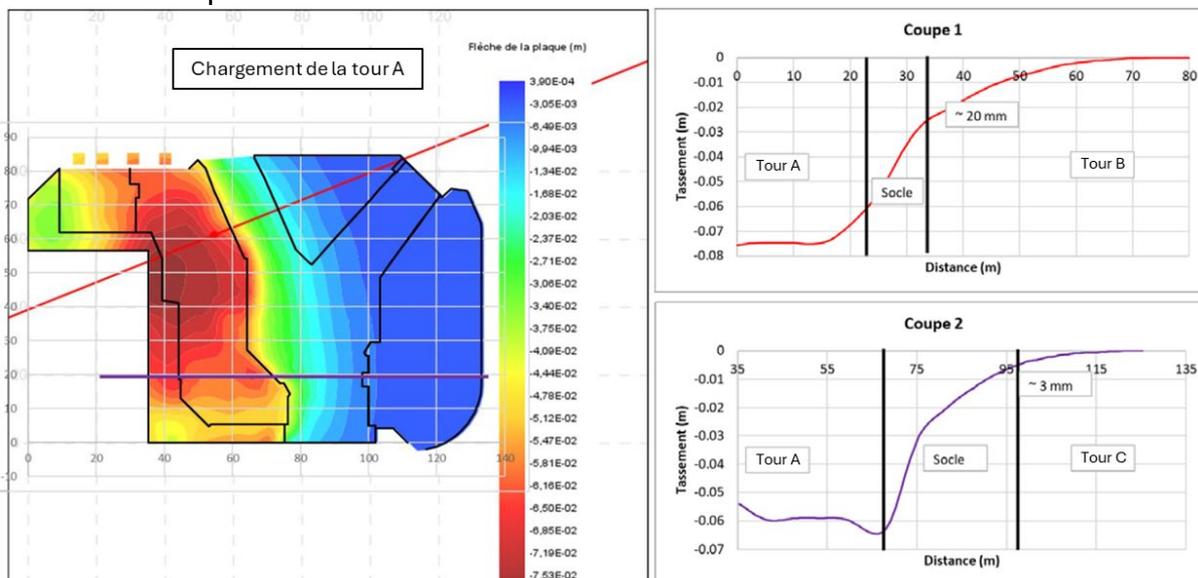


Figure 7 : Exemple de l'impact (en termes de tassement) de la tour A sur d'autres IGH

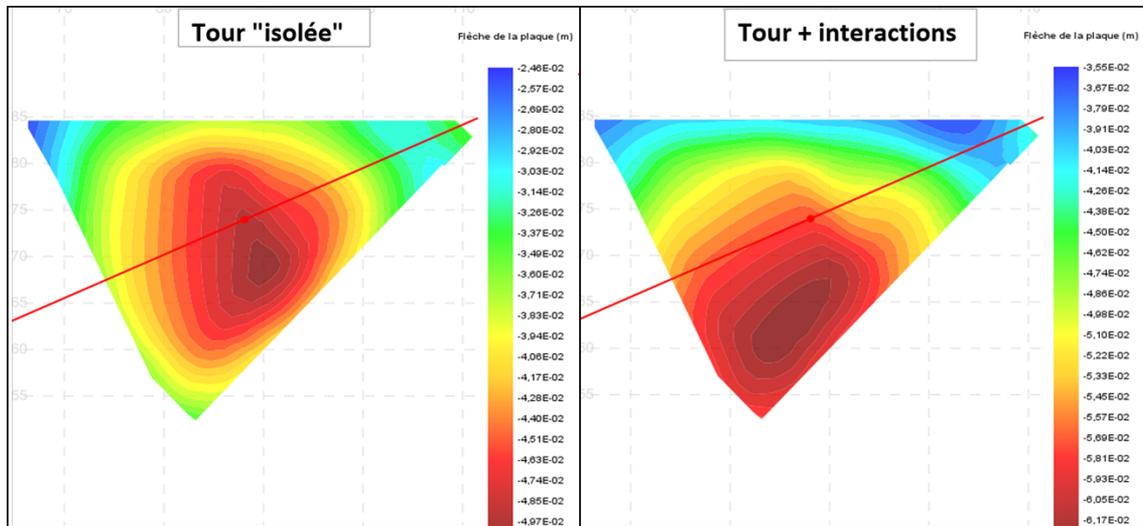


Figure 8 : Impact des tassements des tours A et C sur la tour B

A l'issue du processus itératif, les modèles finaux ISSS, Géotechniques et Structure, des IGH avec le socle présentent une très bonne convergence (cf. Figure 9).

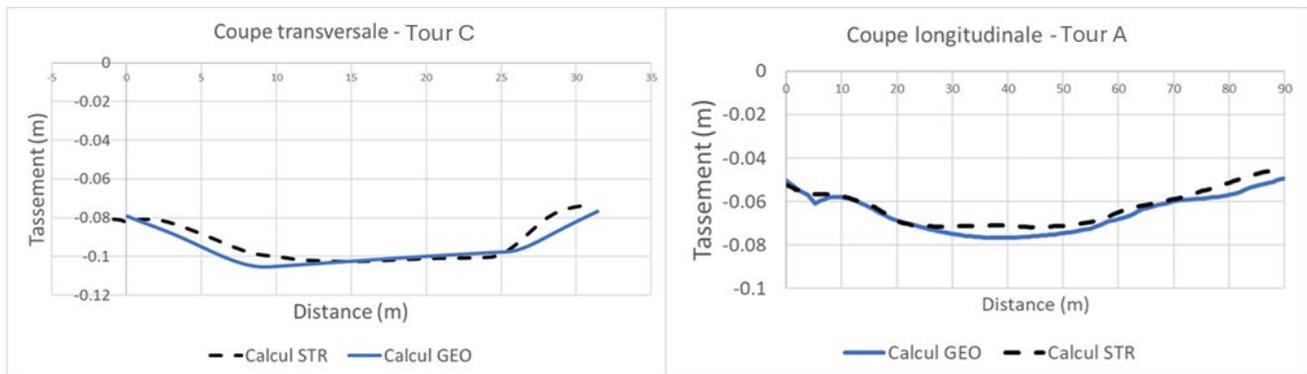


Figure 9 : Exemple de la convergence des modèles "structure" et "géotechnique" des tours A et C

## 7. Conclusion

La proximité des 3 IGH du projet étudié rend indispensable une étude ISSS avancée capable de tenir compte des interactions entre ces IGH. Un modèle EF 3D incluant l'ensemble des IGH et le socle commun, avec ses ~400 pieux, peut être extrêmement lourd, fastidieux à mettre en œuvre et aboutissant à des temps de calcul et de traitement des résultats considérables, incompatibles avec les études de conception. La méthode hybride proposée constitue une alternative pertinente et efficace pour traiter cette étude ISSS. Cette méthode, dont la mise en œuvre est simple et rapide, permet de prendre en compte les interactions complexes entre les pieux et les ouvrages, d'obtenir des résultats de bonne précision et un gain conséquent en temps de calcul.

## 8. Références bibliographiques

- Baldi G., Burlon S. et Cuira F. (2022), Interaction Sol-Structure pour un radier sur barrettes – Exemple de la tour F (Abidjan), Journée Nationale de Géotechnique et de Géologie.  
 Burlon S. et Cuira F. (2021), Exemples d'interaction sol-structure pour les fondations de deux très grandes tours, SolScope Mag.  
 Poulos H.G. et Davis E.H. (1980). Pile foundation analysis and design. John Wiley & Sons, 397 p.