

# FRONTIERE ENTRE LES MODELES GEOTECHNIQUE ET STRUCTURE : QUELQUES CONSIDERATIONS PRATIQUES

## BOUNDARY BETWEEN GEOTECHNICAL AND STRUCTURAL MODELS: SOME PRACTICAL CONSIDERATIONS

Gabriel BALDI FROES<sup>1</sup>, Vincent BONNEFOI<sup>2</sup>, Fahd CUIRA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Terrasol (Groupe Setec), Paris, France

<sup>2</sup>Setec ALS, Lyon, France

**RÉSUMÉ** – Lors des procédures d'Interaction Sol-Structure (ISS), il est courant de dissocier la modélisation géotechnique de la modélisation structurale. Se pose alors la question de la frontière entre ces deux modélisations, la façon de les faire interagir et les éléments communs (radier, caisse d'infrastructure...) qui doivent y être modélisés. Cet article présente une illustration du théorème de la coupure entre les deux modèles dans l'interaction sol-structure.

**ABSTRACT** – In Soil-Structure Interaction (SSI) procedures, it is common to separate geotechnical modeling from structural modeling. This raises questions about the boundary between these two models, how to make them interact, and the common elements (foundation slab, substructure box, etc.) that need to be modeled. This article presents an example of the theorem of discontinuity between models in soil-structure interaction.

### 1. Introduction

La mise en œuvre de l'interaction sol-structure dans les problèmes de fondation pose la question du choix pratique de la frontière entre les modèles « géotechnique<sup>1</sup> » et « structure ». Dans la pratique courante des bureaux d'études, cette frontière est couramment prise au niveau du radier (Figure 1) et l'interaction entre les deux modèles est alors gérée itérativement moyennant un jeu d'actions et de réactions (Cuira et Simon, 2016).

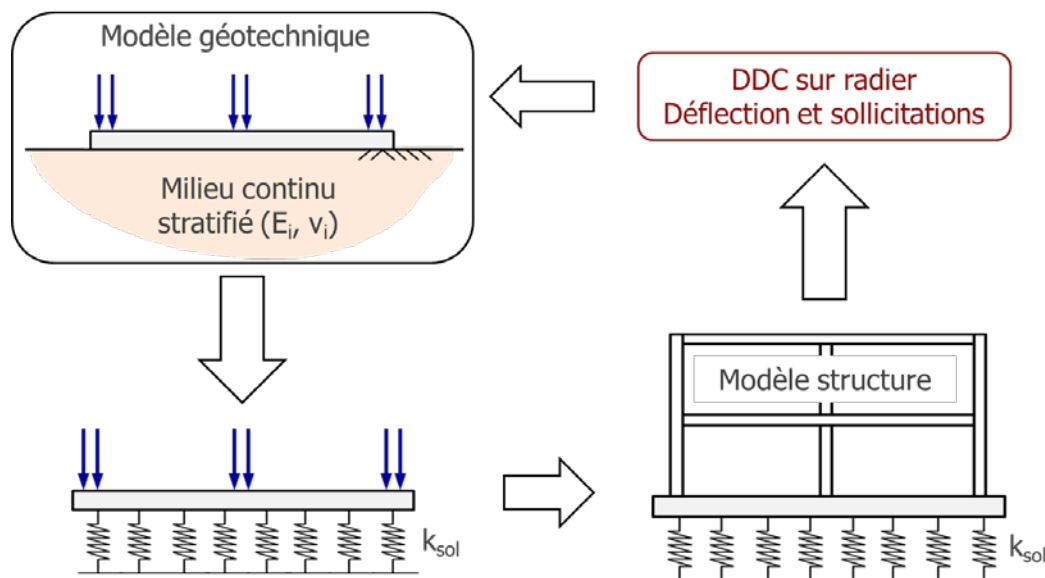


Figure 1 : Procédure classique d'interaction sol-structure pour un ouvrage sur radier général

<sup>1</sup> Dans le présent article, on désigne par "modèle géotechnique" le modèle de calcul porté par l'ingénieur géotechnicien pour estimer les tassements de la fondation et la raideur équivalente du sol utilisée dans les analyses d'interaction sol-structure.

La mise en œuvre de cette démarche requiert une attention particulière sur deux aspects :

- Le premier concerne la finesse de la distribution des ressorts d'interaction servant de paramètre d'entrée au modèle structure. En particulier, la distribution de ces ressorts doit être apte à rendre compte des effets de voûte se développant dans le sol support. Ces effets expliquent notamment pourquoi un radier chargé uniformément tasse en forme de cuvette quand il est infiniment souple, et qu'un radier infiniment rigide « ressent » une réaction plus importante au bord qu'en partie centrale (Frank et al, 2018). Ces deux phénomènes ne peuvent être obtenus par une distribution homogène des ressorts et imposent le recours à une raideur variable des ressorts avec, dans la pratique, l'utilisation d'un zonage (Vezole, 1986) ;
- Le deuxième aspect concerne le caractère « détaillé » de la descente de charge appliquée au radier et servant de paramètre d'entrée au modèle « géotechnique ». En particulier, la distribution de cette descente de charge doit être apte à rendre compte des effets de rigidité additionnelle apportée par les éléments constitutifs de la superstructure. Par exemple, un voile de grande hauteur a pour effet de rigidifier localement le radier ce qui a pour conséquence de modifier la distribution des efforts d'interaction transisant à l'interface voile/radier.

Le but de cet article est d'approfondir ce deuxième aspect qui peut être traité dans la pratique selon deux types de modélisation (Figure 2) :

- Modèle de type A : modèle « couplé » intégrant le sol, le radier ainsi que toute ou une partie de la superstructure ;
- Modèle de type B : modèle « géotechnique » découplé intégrant le radier et le sol avec une descente de charge détaillée comprenant des forces linéiques ou réparties variables ainsi que des moments de rappel ponctuels ou linéiques.

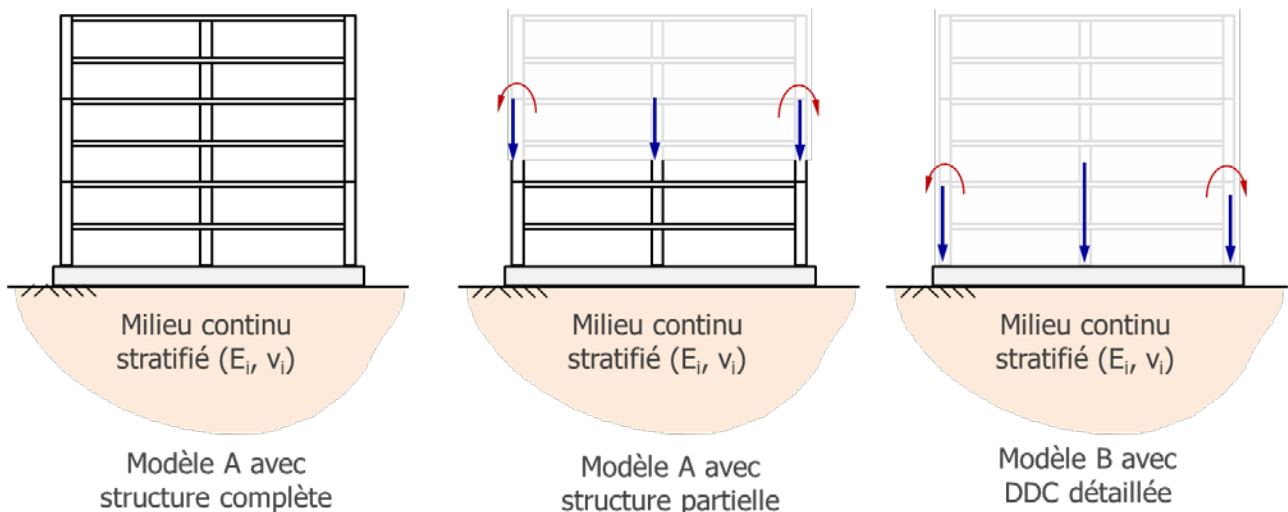


Figure 2 : Schématisation des modèles « A » et « B »

Le présent article propose une évaluation croisée de ces deux approches à travers deux exemples de bâtiments fondés sur radier général traités sous les logiciels PLAXIS 3D et PYTHAGORE : une structure simple composée d'un radier supportant des voiles (§2) et une structure plus complexe comportant plusieurs niveaux de planchers, des voiles et un radier général. Dans les cas qui sont présentés, afin d'isoler spécifiquement le sujet lié à finesse de la descente de charge, le sol est représenté directement comme un massif élastique homogène.

Les études présentées ont été menées dans le cadre des travaux de la commission de normalisation de l'Eurocode 2 (document interne N°1513).

## 2. Exemple d'une structure simple

### 2.1. Données

La structure étudiée est de forme rectangulaire composée d'un radier de 30 m x 30 m x 0,5 m supportant 8 voiles continus en béton armé de 30 m x 10 m x 1 m exerçant chacun une charge linéique moyenne de 750 kN/ml. Le sol support est assimilé à une couche élastique homogène avec un module de Young  $E = 50 \text{ MPa}$  et un coefficient de Poisson de 0,30. Le module de Young du béton est pris égal à 20 GPa.

### 2.2. Modèle de type A intégrant toute la superstructure

Au titre d'une approche « A » complète (§1), le comportement de ladite structure est étudié directement à l'aide d'un modèle PLAXIS 3D intégrant le sol, le radier et les voiles comme le montre la figure ci-dessous.

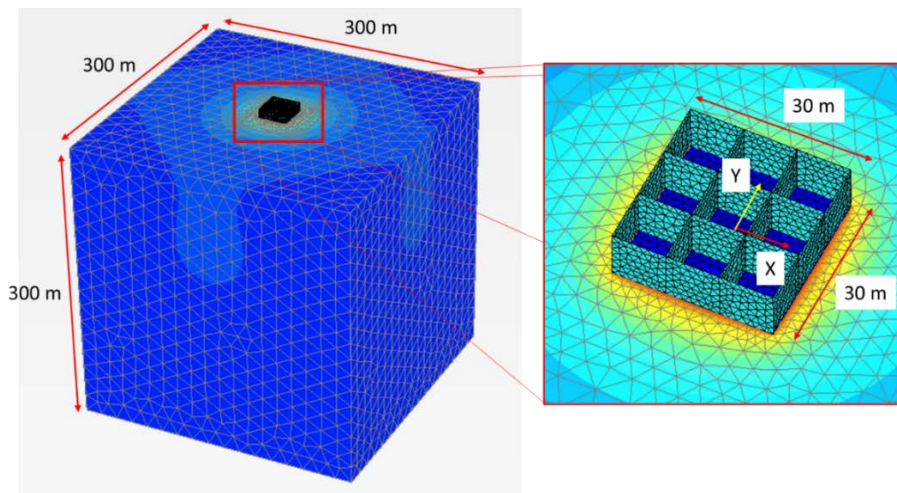


Figure 3 : Aperçu du modèle Plaxis 3D

Ce modèle conduit à la déformée du radier présentée sur la Figure 4 avec un tassement de l'ordre de 10 cm et un différentiel de plus ou moins 1 cm traduisant un comportement peu déformable du système « radier + voiles ». Ce modèle peut également être exploité pour extraire les efforts d'interaction transitant à « l'interface » voiles/radier. Cela fait l'objet de la Figure 5 qui présente la variation de l'effort « normal » noté  $N$  (= DDC verticale) et le « moment de rappel » noté  $M$  le long des voiles « centraux » et « périphériques ».

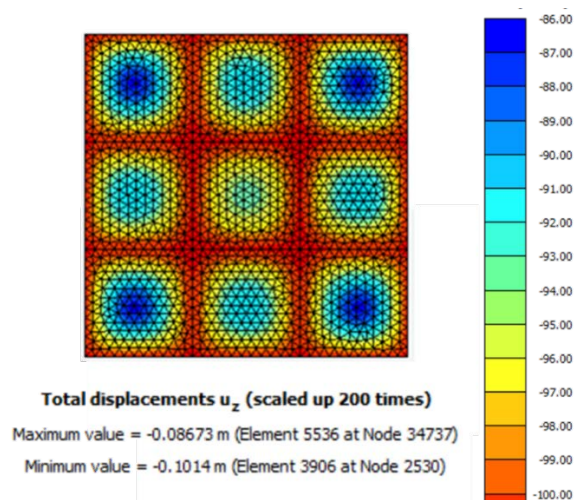
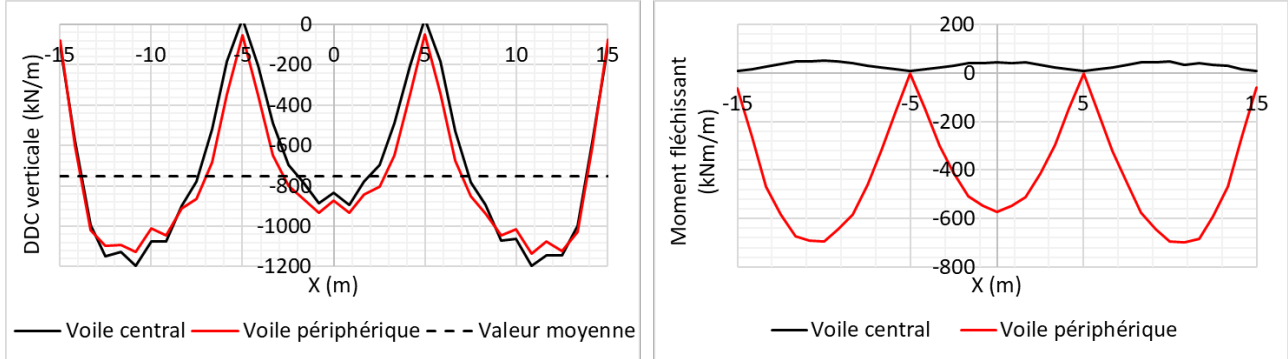


Figure 4 : Cartographie des tassements au droit du radier

Les résultats obtenus mettent clairement en évidence l'impact de la « rigidification » des voiles sur la DDC : on observe la formation d'un effet de « voûte » qui se manifeste par une redistribution de l'effort vertical linéique transmis au radier avec une densité réduite aux croisements des voiles et amplifiée vers le bord de la structure. Les résultats obtenus mettent également en évidence le développement d'un moment de rappel au niveau des voiles périphériques tendant à « redresser » la flèche du radier.

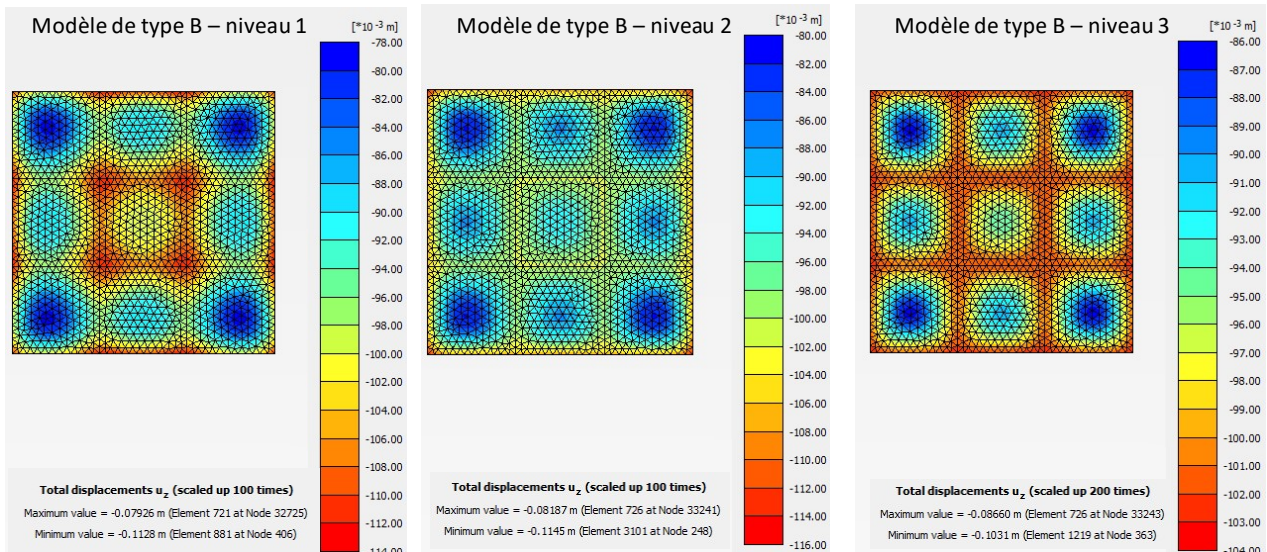


### 2.3. Modèle de type B avec une DDC définie selon trois niveaux de complexité

On considère à présent un modèle de type « B » où seul le radier est modélisé en interaction avec le sol. La descente de charge appliquée sur le radier provient directement du modèle « A » présenté en §2.2 en examinant trois niveaux de complexité :

- Niveau 1 : charge linéique uniforme au droit de chaque voile = 750 kN/ml ;
- Niveau 2 : charge linéique de densité variable = DDC verticale de la Figure 5 ;
- Niveau 3 : Niveau 2 + moments de rappel de la Figure 5.

La déformée du radier obtenue pour chaque configuration est fournie dans les figures ci-après, ainsi qu'au droit de deux coupes réalisées au centre ( $Y=0$ ) et au bord du radier ( $Y = -15m$ ). Les résultats sont comparés à ceux du modèle « A » présenté en §2.2. Ces résultats montrent qu'une DDC détaillée (niveaux 2 ou 3) améliore de façon significative la précision du modèle à la fois en termes de tassement absolu et différentiel (cuvette ou courbure) en partie courante. En périphérie, la prise en compte des moments (Niveau 3) semble nécessaire pour obtenir une déformée comparable à celle du modèle complet. Le choix d'une DDC suffisamment détaillée permet d'obtenir l'équivalence entre les approches A et B décrites en §1 avec une très bonne approximation.



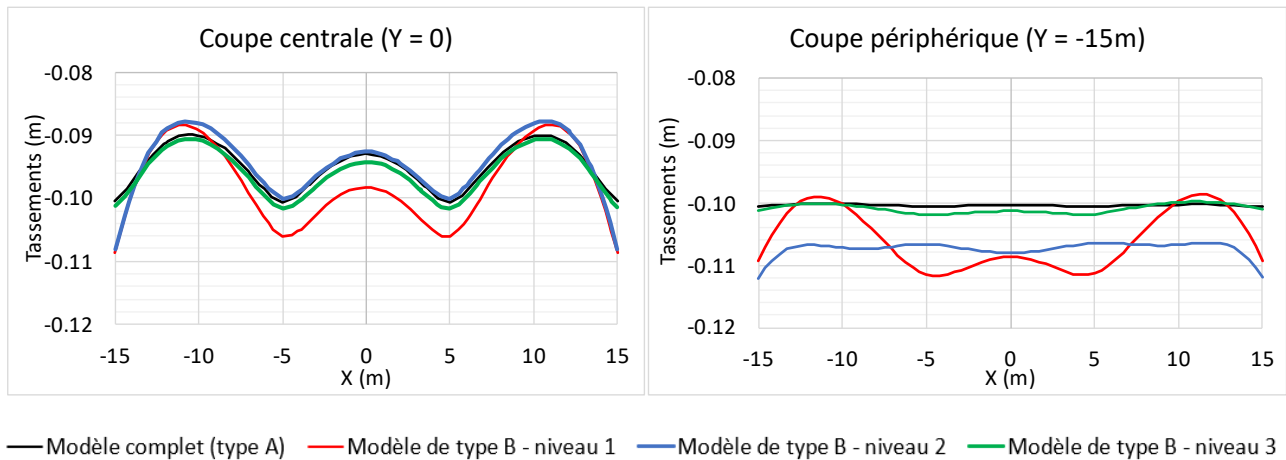


Figure 7 : Tassements en coupe (pour  $Y = 0$  et  $Y = -15$  m)

### 3. Exemple d'une structure complexe

#### 3.1. Données

L'exemple étudié est un bâtiment complet de 40 m de hauteur et dimensions 30 x 30 m. La structure est composée de :

- 5 poteaux extérieurs 40 cm x 40 cm espacés de 6 m ;
- 9 étages avec des planchers de 30 cm d'épaisseur, espacés de 4 m ;
- 3 niveaux d'infrastructure, avec 4 voiles intérieurs et 4 périphériques d'épaisseur 50 cm.

Le bâtiment est fondé sur un radier général de 30 cm d'épaisseur. L'ensemble des éléments structuraux est réalisé en béton armé. Les liaisons entre les différents éléments sont des encastremements (aucun relâchement interne) et le béton a pour caractéristiques un module  $E = 10$  GPa,  $\gamma = 25$  kN/m<sup>3</sup> et  $\nu = 0$ . Le sol support a les mêmes caractéristiques que celles fournies dans le §2.

#### 3.2. Modèle de type A avec un modèle intégrant toute la superstructure

Un modèle intégrant le sol, le radier et toute la superstructure est utilisé en guise de « modèle complet » au sens d'une approche « A ». Deux outils de modélisation sont considérés ici à titre de comparaison : un modèle PLAXIS 3D où le massif de sol est explicitement représenté par des éléments finis volumiques et un modèle Pythagore où le sol est simulé de façon équivalente à l'aide d'un modèle hybride (Cuira et Simon, 2008)<sup>2</sup>. Un aperçu des modèles utilisés est fourni sur les figures ci-dessous.

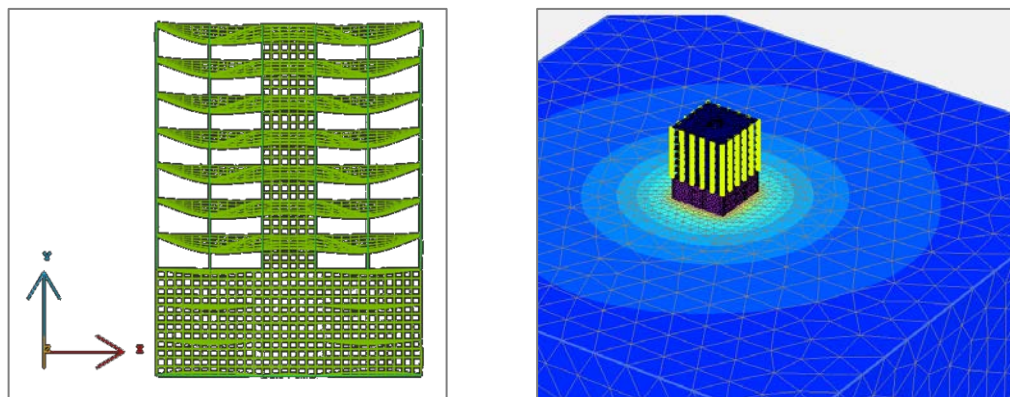


Figure 8 : Aperçu des modèles utilisés (approche A) : Pythagore, Plaxis 3D complet

<sup>2</sup> Détermination d'une matrice de sol sous le radier selon une démarche comparable à celle d'un modèle de type TASPLAQ couplée, dans Pythagore, à la matrice de rigidité de toute la superstructure.

La figure ci-après présente la variation des efforts transmis à l'interface voiles/radier issus des deux outils de modélisation. Sous Pythagore, la DDC a été établie par morceaux avec des moyennes par tronçons de 6 m de longueur.

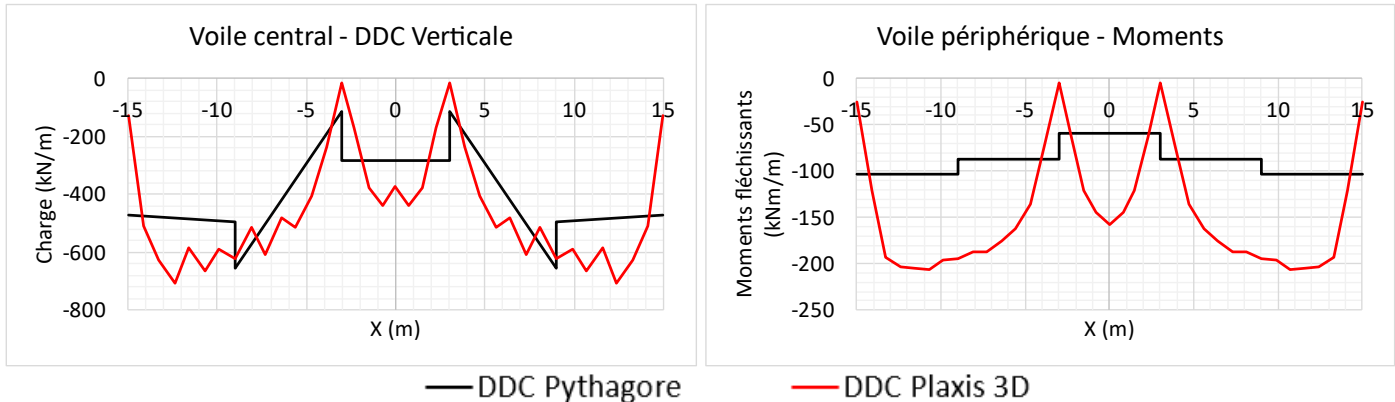


Figure 9 : DDC issue des modèles Pythagore et Plaxis 3D

### 3.3. Modèle de type B avec une DDC définie selon différents niveaux de complexité

On considère à présent un modèle de type « B » où seul le radier est modélisé en interaction avec le sol à l'aide du logiciel PLAXIS 3D. La descente de charge appliquée sur le radier provient directement du modèle « A » présenté en §3.2 en examinant trois niveaux de complexité :

- Niveau 2 DDC verticale N issue du modèle Pythagore ;
- Niveau 3a DDC verticale N + moments M issus du modèle Pythagore ;
- Niveau 3b DDC verticale N + moments M issus du modèle Plaxis.

Les tassements obtenus selon deux coupes (centrale  $X = 0$  et périphérique  $X = 12$  m) sont présentés sur la figure suivante. Les résultats sont comparés à ceux issus des modèles « A » présentés en §3.2. Le Tableau 1 présente la même comparaison en termes de cartographies de tassements et de moments fléchissants.

Les résultats obtenus appellent les commentaires suivants :

- Les deux modèles de type « A » sous Pythagore et PLAXIS conduisent à des résultats comparables en termes de tassements. Une divergence est toutefois observée au niveau des moments, liée d'une part à l'influence de la densité du maillage et d'autre part à la qualité des éléments finis de plaque utilisés ;
- Une DDC de niveau 2 se révèle suffisante pour capter l'amplitude des tassements absolus et différentiels. L'utilisation d'une DDC suffisamment détaillée (niveau 3b) permet reproduire fidèlement les résultats d'une approche A, que ce soit en termes de tassements ou de moments fléchissants dans le radier.

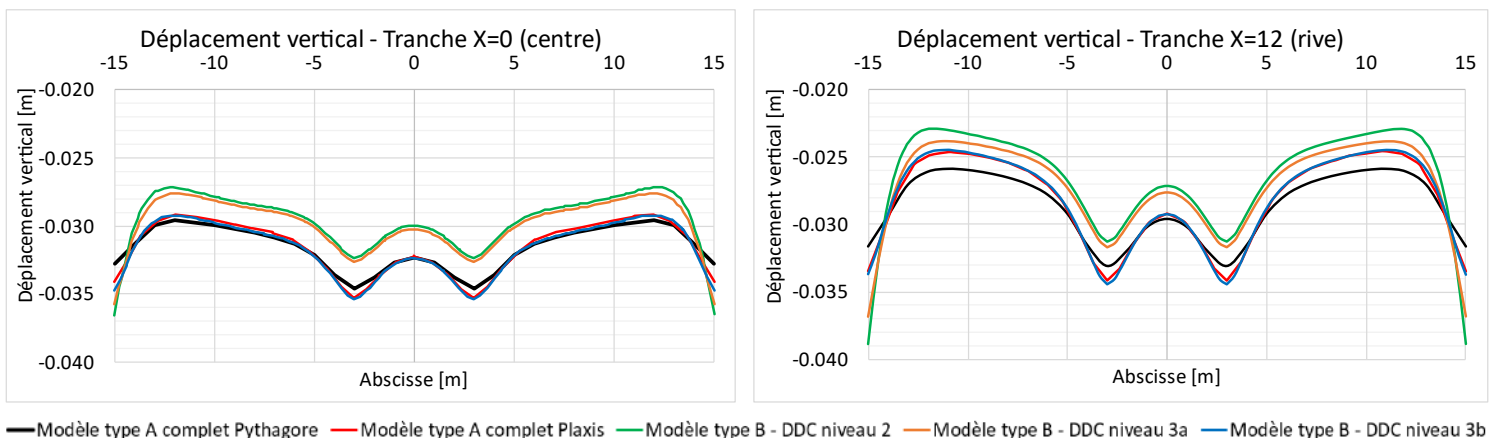
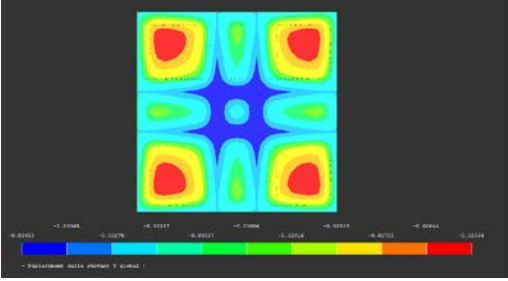
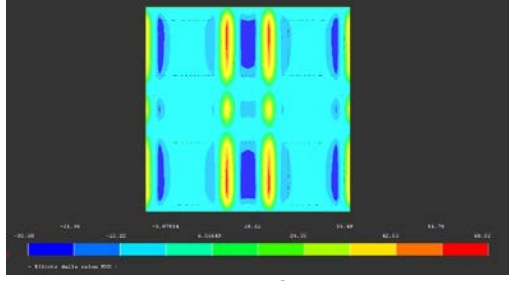
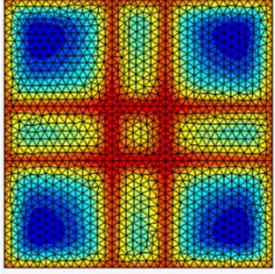
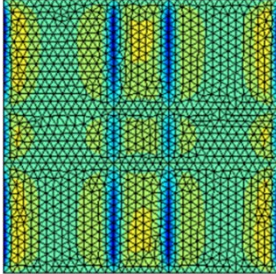
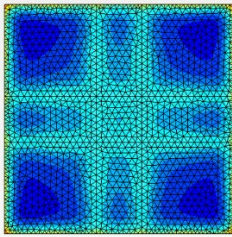
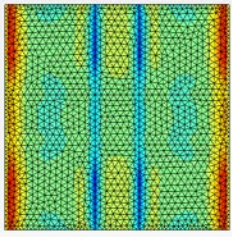
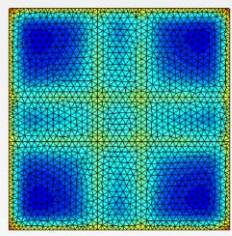
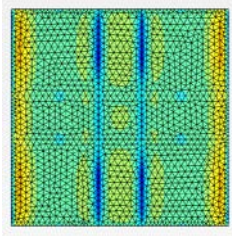
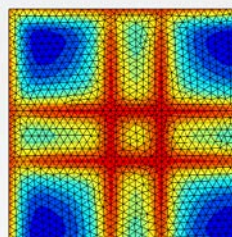
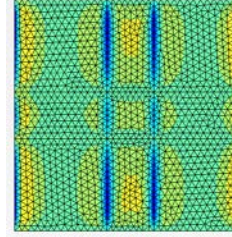


Figure 10 : Tassements obtenus pour chaque modèle

Tableau 1 : Résultats des différentes modélisations

Modèle de calcul	Tassements [mm]	Moments [kN.m/ml]
Modèle complet de type A - Pythagore	 <p style="text-align: center;">s = 25 à 35</p>	 <p style="text-align: center;">M = -30 à +60</p>
Modèle complet de type A – PLAXIS 3D	 <p style="text-align: center;">s = 24 à 36</p>	 <p style="text-align: center;">M = -61 à +190</p>
Modèle de type B sous PLAXS – Niveau 2	 <p style="text-align: center;">s = 22 à 40 (55 au bord)</p>	 <p style="text-align: center;">M = -180 à +150</p>
Modèle de type B sous PLAXS – Niveau 3a	 <p style="text-align: center;">s = 23 à 37 (44 au bord)</p>	 <p style="text-align: center;">M = -105 à +150</p>
Modèle de type B sous PLAXS – Niveau 3b	 <p style="text-align: center;">s = 24 à 35</p>	 <p style="text-align: center;">M = -63 à +185</p>

#### 4. Synthèse et conclusions

Les analyses présentées permettent d'évaluer, au titre d'une démonstration par l'exemple, la validité d'une procédure d'interaction sol-structure découplée pour un ouvrage fondé sur radier général en présence d'une superstructure de forte rigidité. Les résultats obtenus montrent que :

- L'utilisation d'un « modèle géotechnique » intégrant uniquement le radier et soumis à une descente de charge simplifiée suffit pour capter l'amplitude des tassements absolus.
- Pour fiabiliser les tassements différentiels et les courbures, ce qui peut constituer un enjeu de dimensionnement pour des ouvrages sensibles (tels que les tours de grande hauteur et certaines installations industrielles), il est nécessaire de rendre compte de l'effet de la rigidité additionnelle apportée par la superstructure. Cet effet peut être valablement représenté en détaillant la descente de charge appliquée sur le radier avec des densités verticales variables le long des voiles, des moments de rappel etc.

Ces analyses permettent de répondre également à la question souvent posée quant au choix de la « frontière » entre les modèles « structure » et « géotechnique » : celle-ci peut être valablement placée aussi bien au niveau du radier qu'au niveau de l'infrastructure, à condition que la descente de charge appliquée soit suffisamment détaillée (efforts et moments) et prélevée là où la « coupure » entre les deux modèles a été opérée.

Par ailleurs, la mise en œuvre de cette démarche doit toutefois être relativisée tenant compte des contraintes pratiques suivantes :

- Il n'est pas toujours aisé de prélever une descente de charge détaillée selon une coupe « intérieure » au modèle structure (entre les voiles et le radier par exemple) ;
- Il n'est pas toujours aisé de représenter une telle descente de charge dans les outils de modélisation géotechnique usuels ;
- La mise en œuvre du « modèle géotechnique » intervient souvent à un stade où la descente de charge détaillée n'est pas encore connue avec précision.

Enfin, les incertitudes inhérentes aux propriétés des terrains, aux méthodes de calcul utilisées ou aux aléas d'exécution (notamment les terrassements, remblaiements et compactages autour des fondations, les recèpages, etc.) sont en général largement plus grandes que celles liées à la précision des calculs géotechniques. Ces procédures d'ISS telles qu'elles ont été décrites dans le présent article ont vocation à être mises en œuvre pour des projets de construction pour lesquels ces incertitudes sont correctement maîtrisées, avec en particulier un choix approprié des modules d'élasticité du sol en cohérence avec la gamme de déformation induite par l'ouvrage (Hoang et al., 2018).

#### 5. Références bibliographiques

- Cuira F. et Simon B. (2008). Modélisation 3D simplifiée d'une plaque sur sol multicouche élastique. *Revue Française de Géotechnique*, n°124
- Cuira F., Simon B. (2016). Apports de l'interaction sol structure dans la conception des fondations, Journées Nationales de Géotechnique et Géologie de l'Ingénieur, Nancy
- Frank R., Cuira F., Burlon S. (2018). Calcul des fondations superficielles et profondes. 224 pages, Presse des Ponts, Paris
- Hoang MT., Cuira F., Dias D., Miraillet P. (2018). Estimation du rapport  $E/E_M$  pour les radiers de grandes dimensions, Journées Nationales de Géotechnique et Géologie de l'Ingénieur, Marne-La-Vallée
- Vezole P. (1986). Interactions sol structure. Méthode de calcul des pressions normales à l'interface dans quelques cas courants. *Annales de l'ITBTP*, n°448