

# APPORTS DE L'INTERACTION SOL-STRUCTURE DANS LA CONCEPTION DES FONDATIONS

## BENEFITS OF SOIL STRUCTURE INTERACTION TO THE DESIGN OF FOUNDATION STRUCTURES

Fahd Cuir<sup>1</sup>, Bruno Simon<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> Terrasol (Groupe Setec), Paris, France

**RÉSUMÉ** – L'interaction sol-structure est un passage obligé pour appréhender d'une manière réaliste le comportement des ouvrages en relation avec le sol qui les supporte. Cette communication s'attache à présenter quelques éléments d'ordre pratique pour mettre en œuvre une démarche d'interaction sol-structure éprouvée. Les enjeux conceptuels liés à cette démarche sont mis en évidence à travers des cas concrets.

**ABSTRACT** – Soil Structure Interaction is an indispensable tool for understanding in a realistic way the behaviour of structures in relation with the ground. This paper attempts to present some practical considerations enabling to implement a proven soil-structure interaction approach. Conceptual issues in this process are highlighted through real case studies.

### 1. Introduction

De quelles méthodes dispose-t-on pour traiter l'interaction sol-structure (ISS) ? Un passage obligé pour appréhender d'une manière réaliste le comportement des ouvrages. Pour l'ingénieur en charge de dimensionner la structure, l'ISS implique que les « paramètres » couramment considérés pour représenter la réponse du sol ne sont pas des propriétés intrinsèques. Pour le géotechnicien, l'ISS signifie que la réponse du sol est modifiée par la présence de la structure qu'il supporte.

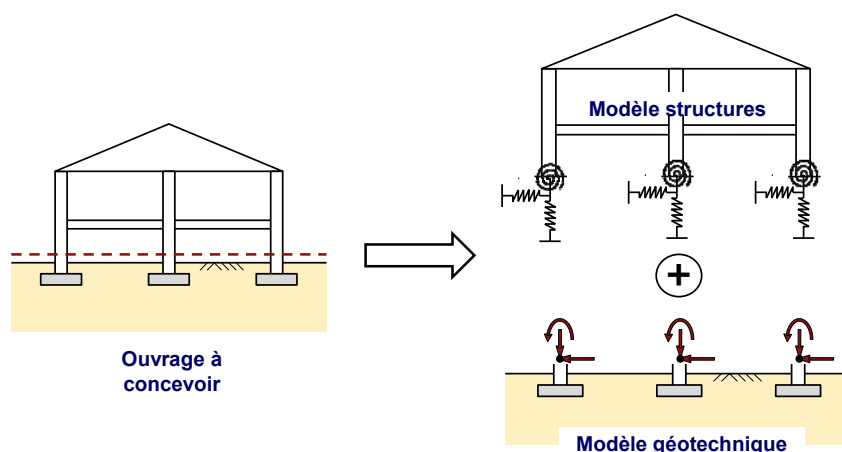


Figure 1. Découplage usuel entre les modèles « géotechnique » et « structure ».

En dehors des projets de grande envergure pour lesquels l'ingénieur dispose de « moyens » suffisants pour aborder le comportement du système « sol + structure » dans son ensemble, la réalité des études « courantes » est un découplage systématique des modèles de calcul « géotechnique » et « structure » particulièrement quand il s'agit de

problématiques de « fondation » (Figure 1). Les études de soutènement sont, le plus souvent, traitées par des modèles de calcul qui intègrent de manière plus ou moins poussée les effets d'ISS.

L'ISS vise donc à corriger les limitations implicitement introduites par ce découplage. Sa mise en œuvre en pratique se heurte néanmoins à de nombreuses difficultés principalement liées au caractère faible des représentations utilisées pour décrire la réponse du sol dans le modèle structure (le fameux « ressort de sol »). Nous nous attachons dans ce qui suit à présenter, à travers une série d'exemples concrets, des propositions de schémas concrets permettant de pallier à ces difficultés.

## 2. Ouvrages fondés sur appuis isolés

### 2.1 Le schéma classique : exemple d'une dalle sur appuis

L'ouvrage étudié est une dalle de couverture de voies ferroviaires existantes dont la construction s'inscrit dans le cadre de l'opération dite ATM (Paris 13<sup>e</sup>). La dalle est amenée à supporter à terme des immeubles et des voiries avec une charge de service estimée à 170 kPa environ. Le mode de fondation retenu est celui d'un groupe de 2 à 4 barrettes par point d'appui descendues au toit du Calcaire Grossier qui constitue ici l'horizon porteur. Sous cet horizon, on rencontre une couche d'argiles (fausses glaises) d'une épaisseur allant de 10 à 20 m selon les zones (Figure 2 – gauche). Ces conditions ont justifié le recours à une modélisation numérique en éléments finis visant à apprécier les tassements absolus et différentiels de la dalle, à court et à long terme. Les tassements estimés sont de l'ordre de 2 cm pour un appui isolé dont 1,5 cm sont attribués à la couche de fausses glaises. Les effets d'interaction entre fondations (propagation des tassements au sein de la couche déformable) amplifient ce tassement d'un facteur pouvant atteindre 2,2. Le niveau de tassement global obtenu est en réalité proche de celui que l'on obtiendrait en transférant la charge de 170 kPa directement au toit des fausses glaises.

Ces résultats ont ensuite été convertis en « raideur » équivalente par appui en écrivant le rapport entre la charge appliquée et le tassement résultant. Les raideurs ainsi obtenues ont permis d'alimenter le modèle traitant du comportement de la superstructure. La figure 2 (droite) présente la distorsion dans la dalle de couverture pour différentes situations.

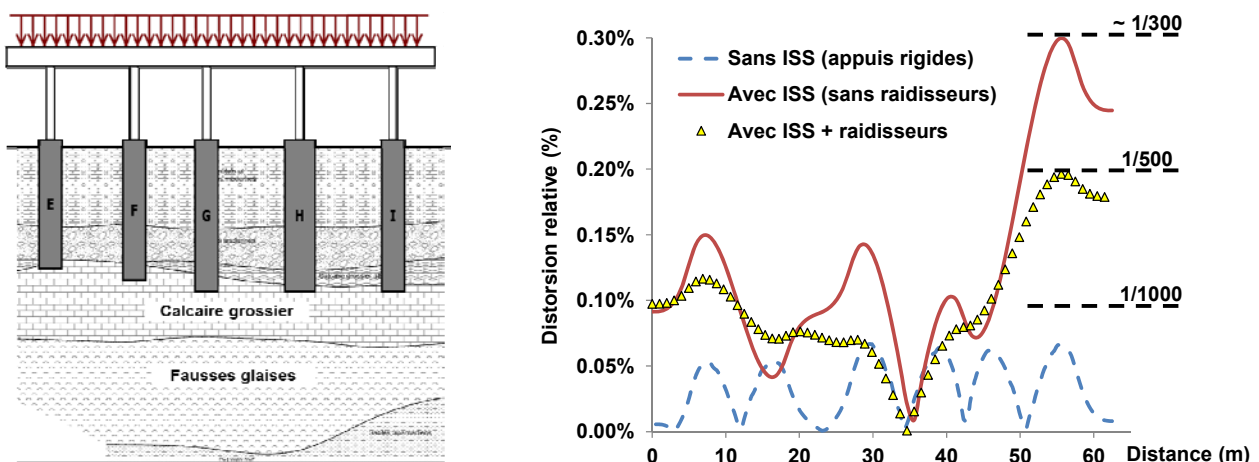


Figure 2. Distorsion de la dalle de couverture pour différentes configurations

La première situation (trait discontinu) est celle d'un modèle sans ISS mené en négligeant la souplesse des fondations (appuis rigides), cela conduit à des distorsions

exagérément optimistes en comparaison avec le résultat de la deuxième configuration (trait continu) qui se base sur les raideurs issues du modèle géotechnique (calcul de type dalle sur ressorts ponctuels). La prise en compte des effets d'ISS met en évidence la nécessité de renforcer localement la structure de la dalle (moyennant des raidisseurs – marqueurs triangulaires) afin de limiter les distorsions à  $1/500^e$ .

L'augmentation de la rigidité de la superstructure implique une redistribution de la descente de charge par appui. La « boucle » d'interaction sol-structure prend ainsi forme en relançant le calcul géotechnique sur la base de la nouvelle descente de charge en vue d'actualiser les tassements et les raideurs. Le schéma ainsi mis en œuvre est un schéma ISS classique qui peut être résumé par la figure 3.

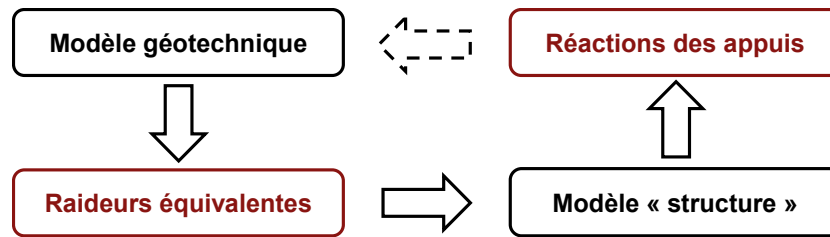


Figure 3. Schéma ISS classique

## 2.2 La question des interactions

La poursuite du processus itératif présenté dans l'exemple précédent mettrait très vite en évidence un lien de dépendance « apparente » entre la descente de charge et les raideurs : les raideurs évoluent avec la descente de charge et ce en l'absence de toute forme de non-linéarité propre au comportement du sol. Ce constat s'explique en réalité par les effets d'interaction (ou effets de groupe) entre les fondations qui conduisent mathématiquement à des raideurs apparentes dépendantes de la charge comme le montre l'exemple schématisé dans la figure 4.

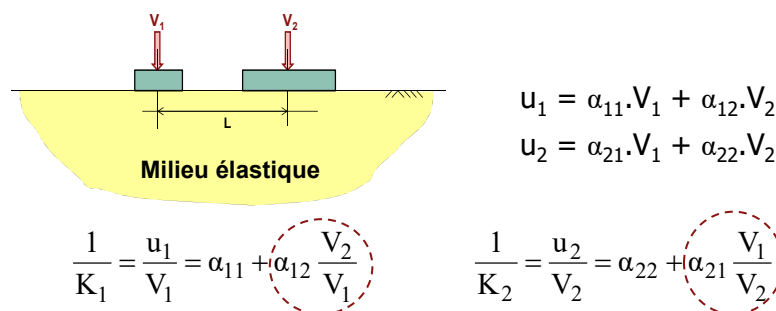


Figure 4. Raideurs apparentes pour deux fondations en interaction

Ainsi, représenter une fondation en groupe par un ressort isolé implique nécessairement une dépendance de la raideur de ce ressort avec la charge et ce malgré le caractère élastique supposé pour le comportement du sol. Une représentation alternative et « intrinsèque » de la réponse d'un groupe de fondations consisterait à recourir à la notion de « matrice de souplesse » (Figure 5), c'est-à-dire un jeu de raideurs traduisant à la fois la souplesse propre de chaque fondation mais également les effets d'interaction liés à la propagation des tassements dans le sol support. Cette matrice de souplesse, dont il convient de rappeler le caractère « intrinsèque » peut, si le logiciel « structure » le permet, être intégrée directement au modèle structure sous la forme d'un « macro » ou « super » élément. Dans la pratique, cette matrice de souplesse est plutôt utilisée comme une représentation du modèle géotechnique et permet ainsi au spécialiste

structure d'être autonome dans la poursuite du processus itératif visant à ajuster les raideurs au niveau de chaque point d'appui.

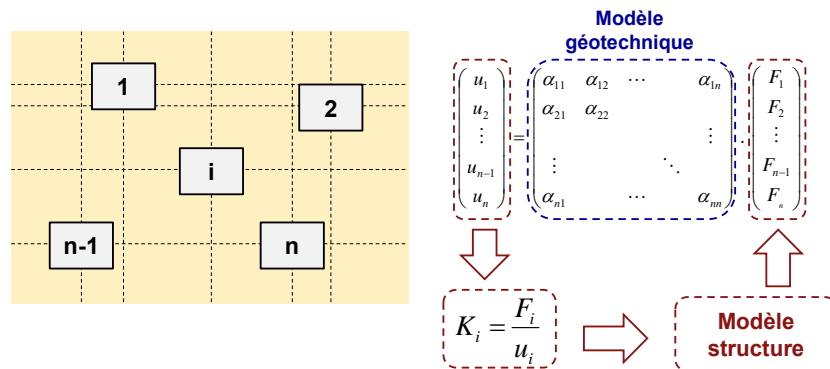


Figure 5. Notion de matrice de souplesse pour un groupe de n fondations en interaction.

### 2.3 Exemple d'un IGH sur micropieux

L'exemple qu'on propose de regarder à présent est celui d'un R+30 implanté dans un environnement urbain dense et restreint. Ces conditions ont privilégié le choix d'un système de fondation par micropieux au stade projet. La superstructure repose ainsi sur quatre files de piédroits longitudinaux reposant chacune sur 3 à 5 files de micropieux. L'emprise en plan de ces piédroits a été décomposée en 13 zones caractéristiques comme le schématise la figure 6 ci-dessous.

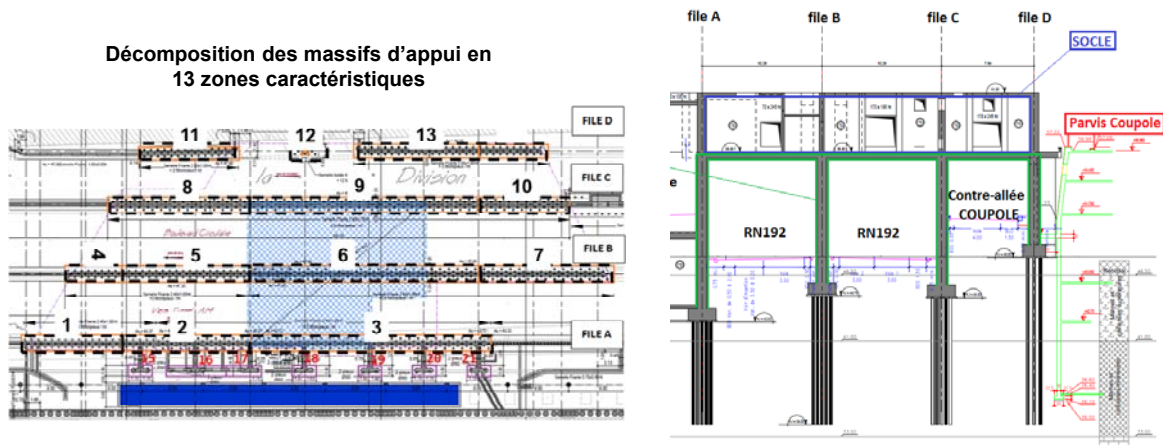


Figure 6. Exemple d'un IGH sur micropieux - zonage sur le système de fondation.

La modélisation du comportement des fondations a été menée à l'aide d'un modèle éléments finis 3D bâti sous le logiciel PLAXIS. Ce modèle intègre implicitement les effets d'interaction entre micropieux et ce qui en résulte en matière de rigidité/souplesse apparente. Après avoir justifié la validité d'un domaine de pseudo-élasticité pour le comportement du sol (choix d'un module de déformation sécant compatible avec les niveaux de chargement amenés par l'ouvrage), le modèle a ensuite servi d'outil pour élaborer une matrice de souplesse 13 x 13 représentant la réponse du système « sol + micropieux + semelles de liaison ».

Le principe du schéma d'interaction sol-structure qui a été ensuite mis en œuvre, en collaboration avec le bureau d'études structure, est résumé par la figure 7. Ce schéma a permis au « structuriste » d'être autonome dans le processus itératif visant à ajuster les raideurs pour chaque zone d'appui (1 à 13). Dans ce schéma, la sollicitation du modèle

« géotechnique » est limitée à deux itérations : définition de la matrice de souplesse et vérifications de stabilité et de portance sur la base de la descente de charge définitive. A la fin du processus, la cohérence de la démarche a pu être démontrée en confrontant les cuvettes de tassements issues des modèles géotechnique et structure.

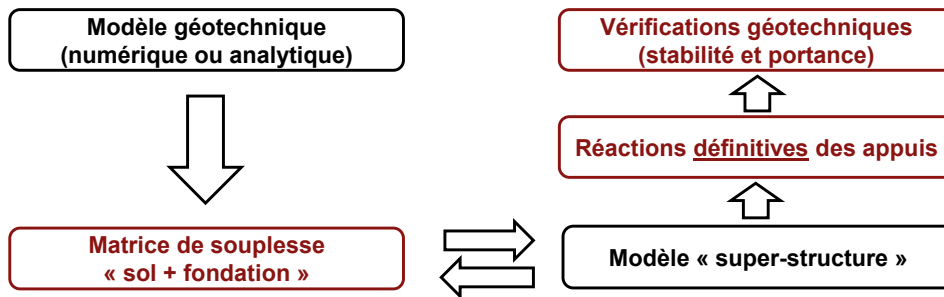


Figure 7. Schéma ISS recommandé pour un groupe de fondations en interaction.

## 2.4 La question des termes couplés

Une autre question souvent source de difficulté dans les échanges entre les bureaux d'études géotechnique et structure est celle des termes couplés : couplage entre les degrés de liberté d'un même point d'appui. L'exemple type est celui d'un pieu isolé sous chargement transversal en tête (figure 8) : l'application d'une force provoque à la fois une translation et une rotation en tête du pieu. De même pour l'application d'un couple. Il y a donc couplage entre le degré de liberté en rotation et celui en translation. Assimiler la réponse en tête d'un pieu à celle d'un couple de ressorts indépendants en translation/rotation conduira nécessairement à une raideur apparente dépendante du couple (T, M) et ce en dehors de toute non linéarité propre au comportement du sol. La question se complique bien évidemment quand il s'agit non pas d'un pieu isolé, mais d'un groupe de pieux ou de micropieux, éventuellement inclinés dans des directions variables, et liaisonnés en tête par une semelle de répartition. Le problème est tridimensionnel, il y a 6 degrés de liberté et autant de termes couplés.

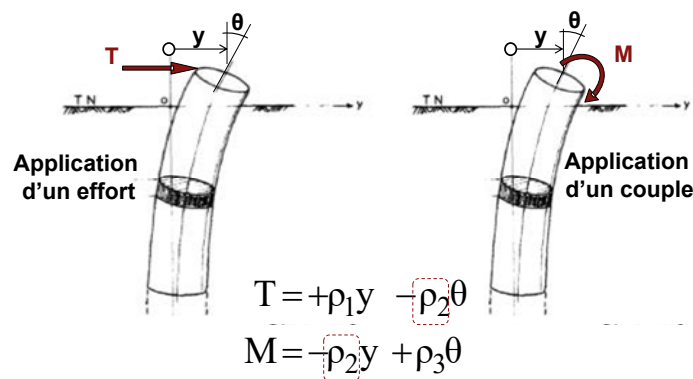


Figure 8. Problématique des termes couplés – cas d'un pieu chargé transversalement.

L'exemple qui suit est une parfaite illustration de la problématique évoquée. L'ouvrage étudié est un pont arc biais à structure mixte sur le canal de Saint-Denis dans le nord de Paris (Figure 9). La structure du pont est amenée à supporter à terme deux voies ferroviaires supplémentaires en élargissement d'un pont rail existant (pont arc en maçonnerie). L'ensemble de l'opération s'inscrit dans le cadre du projet EOLE (prolongement du RER E à l'Ouest de Paris). Le principe de fondation qui a été retenu est

celui d'un groupe de plusieurs dizaines de micropieux injectés permettant la reprise d'une résultante de charge inclinée à 45° par rapport à l'horizontale.

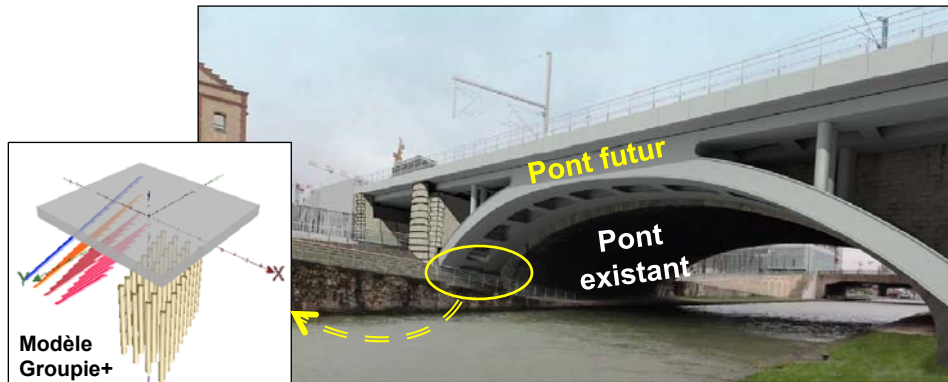


Figure 9. Elargissement d'un pont rail existant – modélisation du massif de fondation

Le caractère extrêmement exigeant des critères de tassement imposés à l'ouvrage (liés notamment à une nouvelle voie placée à cheval entre les ponts existant et futur) a conduit à préconiser une conception tenant compte des effets d'interaction sol-micropieux-structure afin de garantir une cohérence stricte entre la raideur des appuis et les charges transmises par la superstructure. L'évaluation de la matrice de raideurs de chaque appui a été menée à l'aide du module Groupie+ du logiciel Foxta. La figure 10 présente la matrice de raideurs obtenue : il s'agit d'une matrice 6 x 6, non diagonale et comportant plusieurs termes couplés non nuls liés notamment au caractère dissymétrique de la répartition imposée aux éléments de fondation.

Le modèle élaboré par le structuriste ne permettant pas le traitement des termes couplés, un changement de « repère » a donc été calculé pour ré-exprimer sous forme « diagonale » la matrice de raideurs à prendre en compte dans le modèle structure. La figure 10 présente la démarche retenue pour mener ce changement de « repère », qui est en réalité un changement du point d'application : la présence de termes couplés a été simulée par des « bras de levier »  $d_x$ ,  $d_y$  et  $d_z$  artificiels (barres rigides) introduits à la base de la superstructure et qui permettent de se ramener à la définition d'un jeu de ressorts classiques en rotation/translation.

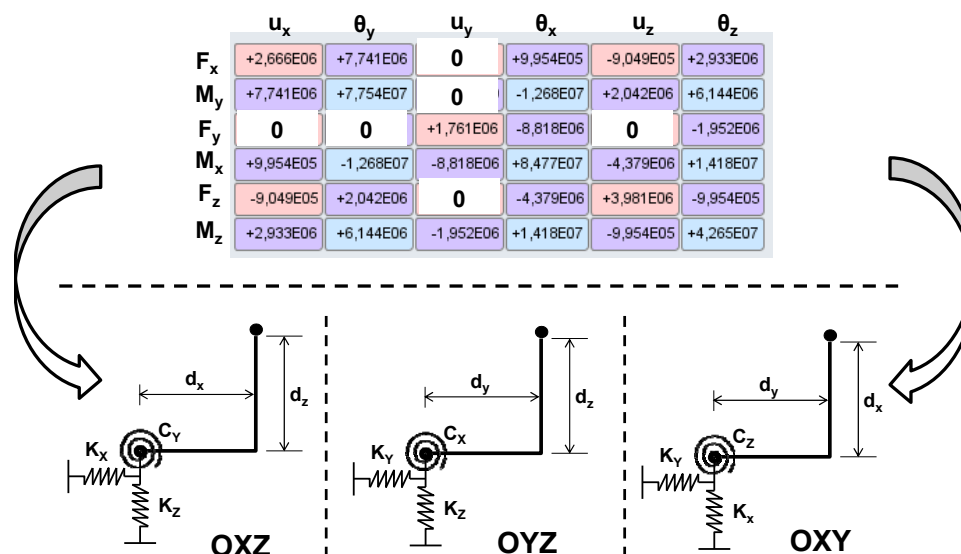


Figure 10. Matrice de rigidité d'un groupe de pieux – élimination des raideurs couplées par un changement de repère (ou du point d'application).

### 3. Ouvrages sur fondations étendues : l'écueil du choix d'un coefficient de réaction

Pour des ouvrages reposant sur un système de fondation composé de longrines, radier ou dallage, le géotechnicien est systématiquement confronté à la question du coefficient de réaction à donner au structeur. La problématique peut être illustrée à travers l'exemple simple d'une poutre de roulement (figure 11), soumise à une charge mobile pouvant être exercée en partie courante (situation 1) ou à proximité du bord (situation 2). L'exercice est traité à l'aide d'un modèle Tasplaq (Cuira et al, 2008) qui permet de mener et de comparer les deux types de modélisation : une, de référence, de type « radier sur sol multicouche », face à une autre de type « radier sur ressorts ».

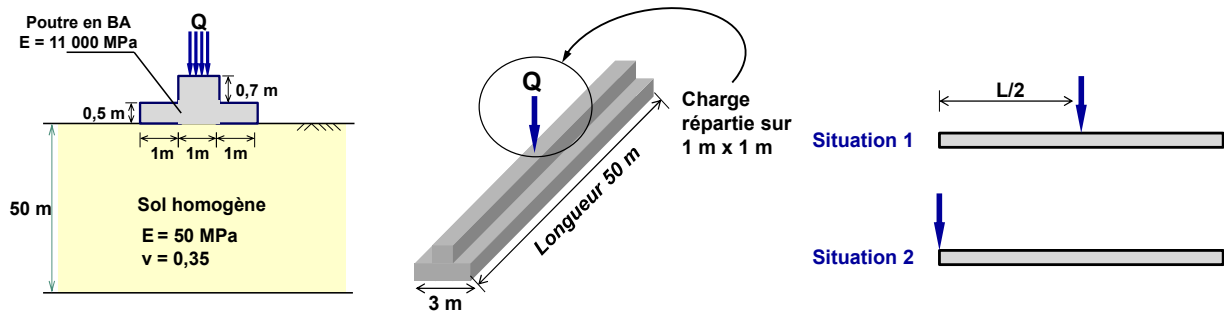


Figure 11. Poutre de roulement – quel coefficient de réaction donner au « structeur » ?

Le but de l'exercice est de caler un coefficient de réaction permettant de reproduire le résultat du calcul de référence (sur sol multicouche). Pour la situation 1, l'équivalence des moments fléchissants est obtenue avec un coefficient de réaction de 18 MPa/m (figure 12 – gauche). Pour la situation 2 (figure 12 – droite), l'obtention d'un calage satisfaisant a nécessité l'introduction d'un zonage dans la définition du coefficient de réaction : 40 MPa/m au bord (sur 2 m) et 10 MPa/m en partie courante. Il est à noter que ce résultat serait différent si le critère de calage avait été l'amplitude des tassements.

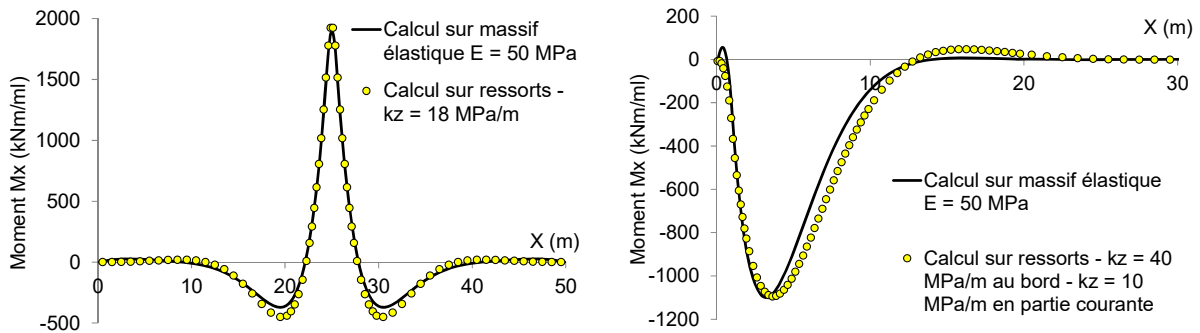


Figure 11. Moment fléchissant  $M_x$  dans la poutre pour les situations 1 et 2.

Cet exemple simple rappelle le défaut d'unicité du coefficient de réaction et la dépendance de celui-ci avec la manière dont les charges sont distribuées. Il met également en évidence l'intérêt, pour le géotechnicien, d'avoir à disposition un outil lui permettant de juger de la pertinence du coefficient de réaction donné à l'ingénieur structure. Un tel outil ouvre la voie à un autre schéma d'analyse possible où le géotechnicien apparaît « autonome » dans les allers/retours nécessaires à la mise en œuvre du processus d'interaction sol-structure. La figure 12 résume le principe de ce schéma ISS. Celui-ci a notamment été utilisé dans les études de conception de la Tour Majunga sur le site de la Défense dont la construction s'est achevée en 2014. La tour est haute de 204 m et fondée sur un radier général exécuté au fond d'une excavation de 13 m de profondeur. La figure 13 présente une vue de la Tour en fin de construction (à droite) et

le résultat auquel a abouti le processus d'interaction sol-structure en phase de conception (à gauche) : un coefficient de réaction de 4,5 MPa/m en partie centrale (sous le noyau), 10 MPa/m en partie périphérique. Ce résultat tient compte de l'effet de rigidité apparente due à la présence de la superstructure au-dessus du radier (intégration, au droit du noyau, d'une inertie « additionnelle » à la plaque représentative du radier).

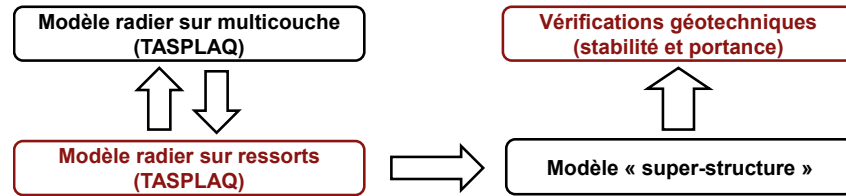


Figure 12. Schéma ISS pour système de fondation étendu

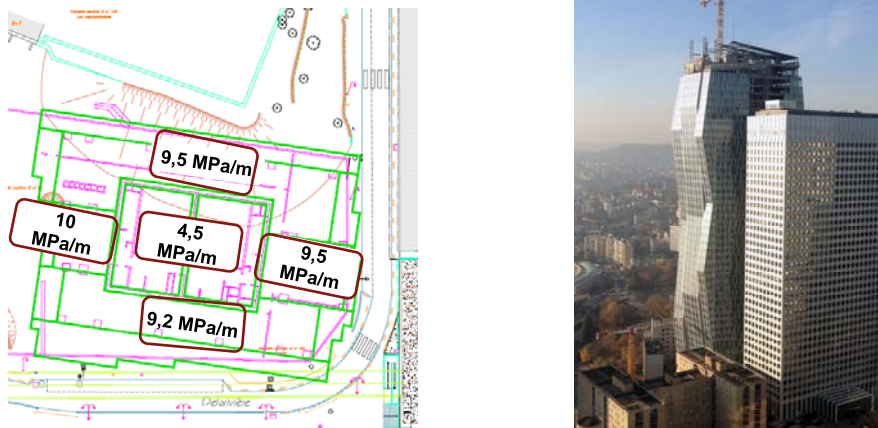


Figure 13. Tour Majunga – vue de la Tour en cours de construction (à droite) – répartition des coefficients de réaction sous le radier issue d'un modèle Tasplaq (à gauche)

## 4 Conclusions

L'interaction sol-structure permet une approche réaliste du comportement des ouvrages. Plusieurs schémas types ont été présentés qui, tous ont pu être éprouvés à l'occasion de projets réels. Le principe de ces schémas, pensés pour un cadre d'application (pseudo)statique, peut être étendu au cas « dynamique » (ou sismique) en intégrant les effets fréquentiels dans la caractérisation des réponses du sol et de la superstructure.

## 5 Références bibliographiques

- Cuira F., Simon B. 2008, Modélisation 3D simplifiée d'une plaque sur sol multicouche élastique, *Revue Française de Géotechnique n° 124*
- Cuira F., Poulain J., Some practical considerations about Soil Structure Interaction, *World Nuclear Exhibition, le Bourget 2014*
- Lefevre C., Simon B. 2010, Tassements sous un IGH fondé sur radier, *Colloque sur les Immeubles de Grande Hauteur et Ouvrages Souterrains (CIGOS), Paris*
- Simon B., 1995, Commentaires sur le choix des coefficients de réaction pour le calcul des écrans de soutènement, *Revue Française de Géotechnique n°124*
- Vezole P. 1986, Interaction Sol-Structure, Méthode de calcul des pressions normales à l'interface dans quelques cas courants. *Annales de l'ITBTP, N°44*