

Comportement Dynamique Non-Linéaire d'une Fondation Placée à la Surface d'un Sol Compressible Renforcé Soumise à des Fréquences de Chargement Variables

S. Bekakra

Université Badji Mokhtar, Faculté de Technologie, Département de Génie Civil, Annaba, Algérie

B. Sbartai

Université Badji Mokhtar, Faculté de Technologie, Département de Génie Civil, Annaba, Algérie

RÉSUMÉ : L'analyse du comportement des fondations sous des charges dynamiques s'est considérablement développée au cours des quatre dernières décennies. Les exigences de sécurité strictes imposées à la conception de certains types de structures ont joué un rôle particulièrement important dans le développement des méthodes analytiques et numériques. Afin de comprendre le comportement dynamique non-linéaire des fondations, une série de modèles axisymétriques ont été réalisés sur le logiciel de calcul par éléments finis PLAXIS 3D. La prise en compte de l'interaction sol-structure dans l'analyse du comportement dynamique des fondations permet de prendre en considération de manière réaliste l'influence du sol sur ses vibrations. Différentes configurations de modèles rhéologiques du sol seront étudiées (linéaire et non-linéaire). En outre, la propagation des vibrations sur le sol environnant a été étudiée. Pour réduire le temps de calcul, seul un quart de la géométrie globale est modélisé, en utilisant des conditions limites de symétrie le long des lignes de symétrie. L'amortissement physique dû aux effets visqueux est pris en compte via l'amortissement de Rayleigh. De plus, en raison de la propagation des ondes radiales, l'amortissement géométrique peut être important pour atténuer la vibration. La modélisation des limites est l'un des points clés dans le calcul de la dynamique. Afin d'éviter les réflexions d'ondes parasites aux frontières du modèle des conditions spéciales doivent être appliquées afin d'absorber les ondes atteignant les frontières. Une étude comparative a été effectuée entre les deux modèles et des conclusions ont été émises. Les résultats obtenus ont montré que la prise en compte de la non-linéarité du sol joue un rôle important sur la réponse dynamique de la fondation.

Mots clés : Fondation, Comportement dynamique, Interaction sol-structure, Non-linéaire, Sol Compressible Renforcé, Fréquences

1 INTRODUCTION

Les structures, telles que les centrales nucléaires, les usines chimiques, les barrages, les ponts routiers et les plates-formes offshore, doivent être conçues et construites pour résister aux charges sismiques. Pour ces structures, l'interaction sol-fondation-structure doit être prise en compte. La prise en compte de l'interaction sol-structure pour l'analyse dynamique d'une fondation nécessite une prise en compte rigoureuse du comportement du sol et du signal dynamique, Tabatabaiefar et al. (2015), Ganjavi (2018). Actuellement, il existe deux types de méthodes traitant de l'analyse de l'interaction sol-structure (Wolf 1985) : la première est l'analyse de l'histoire temporelle qui correspond à une approche directe considérant l'ensemble du système et l'autre est l'approche de la sous-structure. L'approche par sous-structure permet d'analyser le problème en deux parties (Kausel et al. 1978, Pecker 1984, Aubry et Clouteau 1992). Dans cette approche, les réponses dynamiques des éléments de la superstructure et de la sous-structure sont examinées séparément. L'analyse du système de fondation peut être réduite à l'étude de la rigidité dynamique à l'interface sol-fondation (connue sous le nom de fonctions d'impédance). Les fonctions d'impédance dépendent fortement de la fréquence de charge dynamique.

2 METHODE ET MODELE D'ANALYSE

Par définition, l'impédance d'une fondation est égale à la réaction d'une fondation sans masse lorsqu'elle est soumise à un déplacement harmonique unitaire commandé suivant un de ses degrés de liberté. La fondation étant sans masse, l'impédance représente également le quotient de la charge directement appliquée à la fondation (qui est égale à la réaction du sol) par le déplacement résultant :

$$K=P(t) / U(t) \quad (1)$$

La fonction d'impédance obtenue à partir de l'équation (1) est une quantité complexe et peut être séparée en une partie réelle (correspondant à la rigidité) et une partie imaginaire (correspondant à l'amortissement). Les deux parties dépendent de la fréquence :

$$K(\omega) = K_{re}(\omega) + i K_{im}(\omega) \quad (2)$$

Dans le domaine fréquentiel l'équation (2) peut être donnée à une fréquence particulière par :

$$K(\omega) = k - \omega M + i \omega C \quad (3)$$

Où k est la rigidité statique ; C est l'amortissement ; et M est la masse.

Dans cette étude, le déplacement $U(t)$ est calculé dans le domaine temporel en appliquant un chargement harmonique $P(t)$ de fréquence f au centre de la tête de la fondation. Le déplacement obtenu est également une fonction harmonique qui dépend du temps et à la même fréquence f de la charge $P(t)$ mais avec un angle de phase différent. Pour obtenir les déplacements dans le domaine fréquentiel, on peut utiliser la transformation rapide de Fourier (FFT). La rigidité pour chaque fréquence f_i est donnée par la formule suivante :

$$K(f_i) = \text{FFT de la force appliqué}(f_i) / \text{FFT du déplacement calculé}(f_i) \quad (4)$$

De plus, la source vibrante est un générateur fondé sur une semelle en béton de 0,2 m d'épaisseur et de 1 m de diamètre. Les oscillations provoquées par le générateur sont transmises au sous-sol par la semelle. Ces oscillations sont simulées comme une charge harmonique uniforme, avec une fréquence de 20 Hz et une amplitude de 1000 kN/m². En plus du poids de la semelle, le poids du générateur est modélisé comme une charge uniformément répartie de 8 kN/m². Le calcul est fait dans les deux cas: linéaire et non-linéaire.

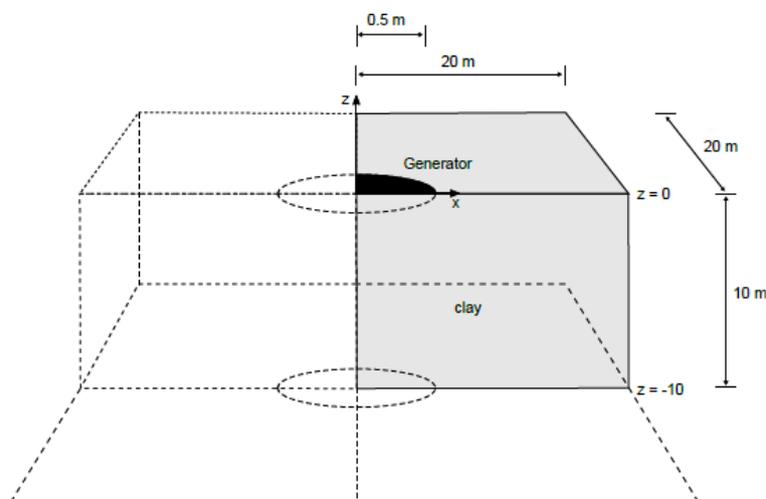


Figure 1. Un générateur fondé sur une semelle en béton.

Les limites du modèle doivent être suffisamment éloignées de la région d'intérêt pour éviter les perturbations dues à d'éventuelles réflexions. Bien que des mesures spéciales (limites absorbantes) soient adoptées afin d'éviter les réflexions parasites. Il y a toujours une petite influence et c'est toujours une bonne habitude de placer les limites loin les unes des autres. Dans une analyse dynamique les limites du modèle sont généralement plus éloignées que dans une analyse statique.

2.1. Créer et affecter des ensembles des données sur les matériaux

Créez l'ensemble de données sur les matériaux conformément au tableau ci-dessous et affectez-le à la couche de sol.

Table 1. Propriétés des matériaux.

Paramètres	Nom	Argile	Unité
Général			
Modèle de matériau	Modèle	Elastique linéaire	-
Type de drainage	Type	Drainé	-
Poids unitaire au-dessus du niveau phréatique	γ_{unsat}	20.0	kN/m ³
Poids unitaire sous le niveau phréatique	γ_{sat}	20.0	kN/m ³
Paramètres			
Module de Young	E'	$5 \cdot 10^4$	kN/m ²
Coefficient de Poisson	ν'	0.3	-
Les interfaces			
Résistance de l'interface	-	Rigide	-
Initiale			
Détermination de K_0	-	Automatique	-
Coefficient de pression latérale des terres	K_0	0.5	-

2.2. Définition des multiplicateurs dynamiques

Les charges dynamiques sont définies sur la base des valeurs d'entrée des charges ou des déplacements prescrits et des multiplicateurs correspondants en fonction du temps.

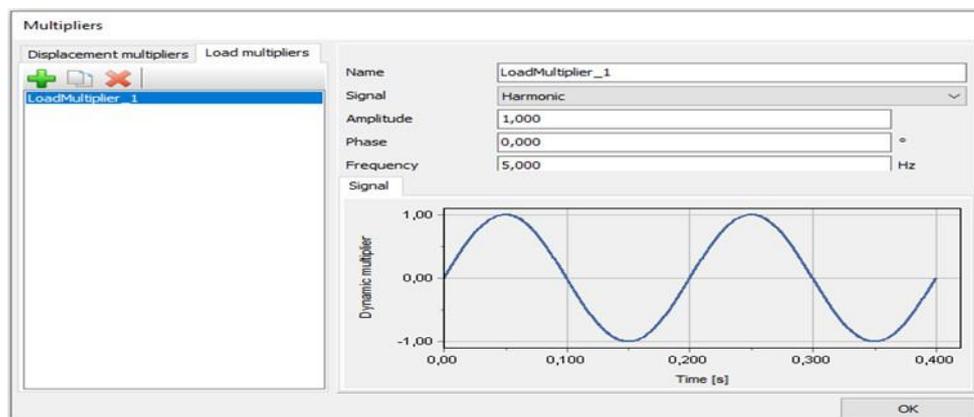


Figure. 2. Définition d'un multiplicateur harmonique.

2.3. Générer le maillage

Dans tous les calculs dynamiques, il doit accorder une attention particulière à la taille des éléments afin de réduire la dispersion numérique des ondes. Il convient de noter que les éléments de grande taille ne sont pas en mesure de transmettre des fréquences élevées. La transmission des ondes est régie par la vitesse et la longueur des ondes. Si l'utilisation dynamique contient des hautes fréquences, il faut soit filtrer les hautes fréquences, soit utiliser un maillage plus fin.

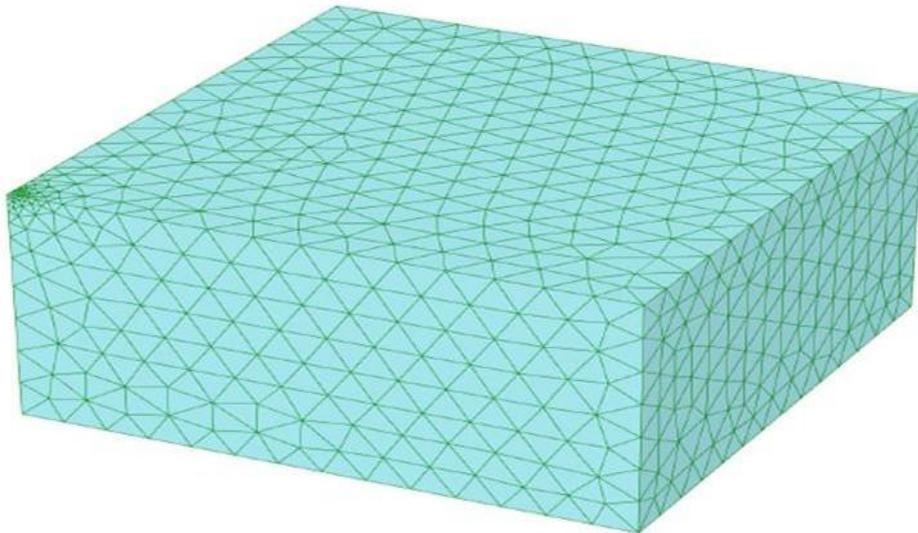


Figure. 3. Le maillage généré.

2.4. Calcul supplémentaire avec amortissement

Dans le calcul, l'amortissement du matériau est introduit au moyen de l'amortissement de Rayleigh.

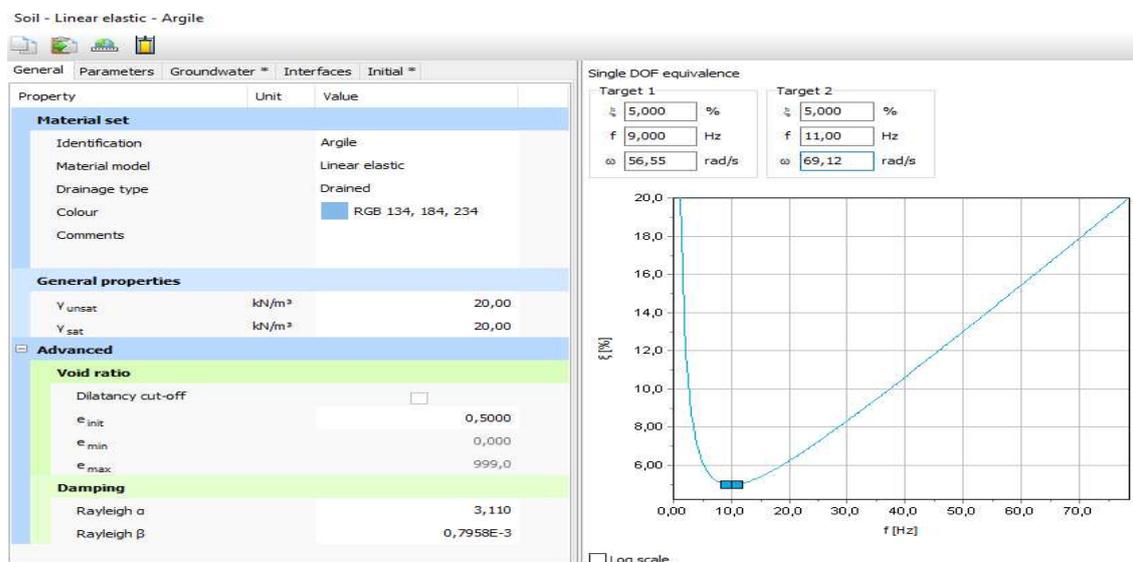


Figure.4. Définition de l'amortissement de Rayleigh

2. 5. Modèle rhéologique utilisé

Pour le modèle rhéologique, on a utilisé le modèle HS small

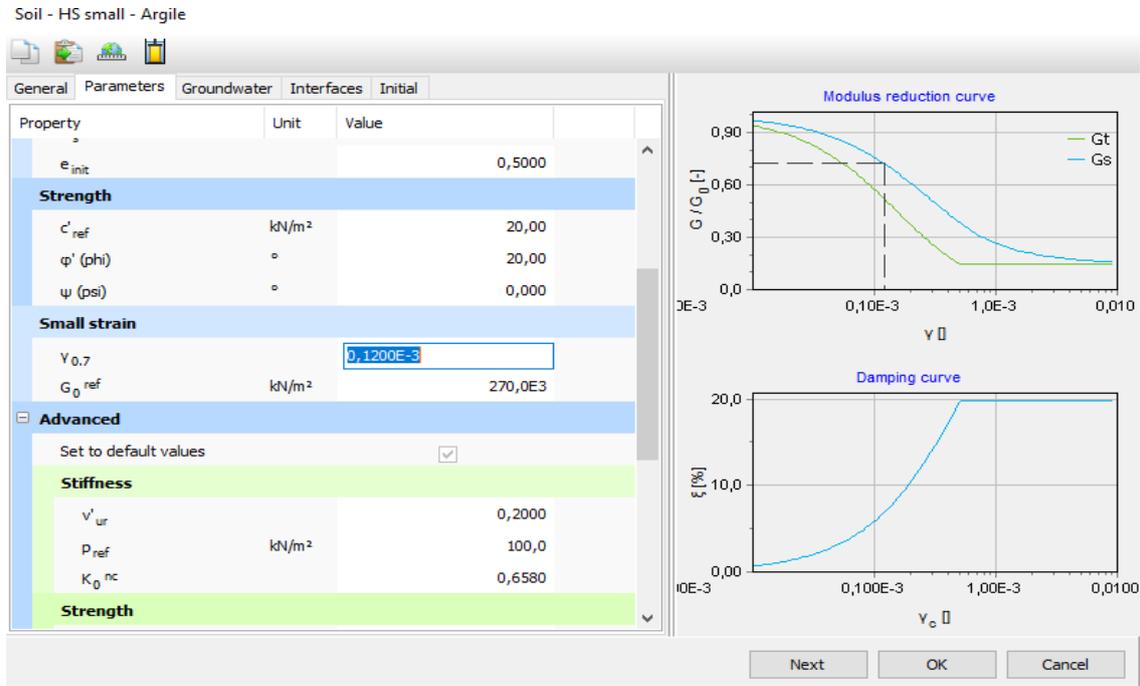


Figure.5. Le modèle HS small

3 RESULTATS

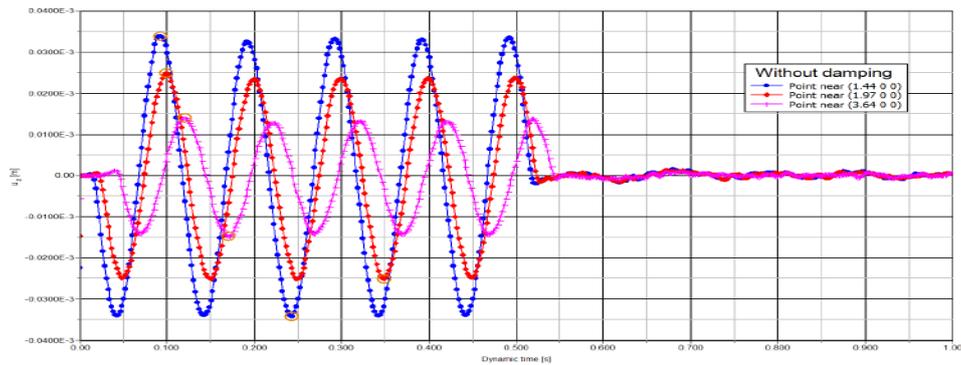


Figure. 6. Résultats des déplacements en fonction du temps sans amortissement.

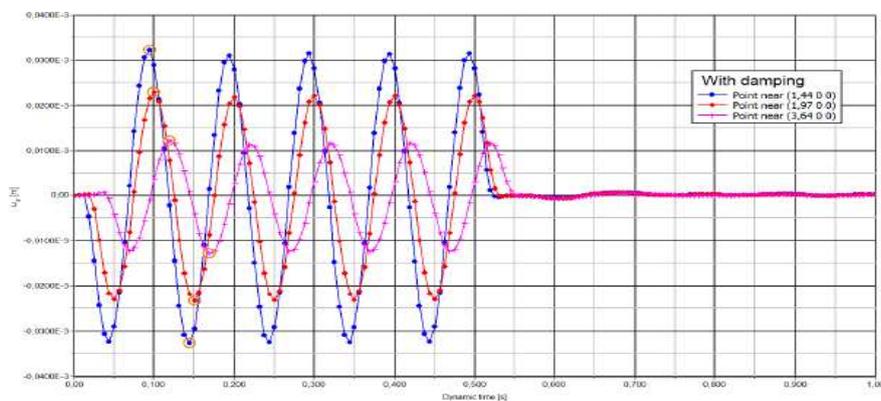


Figure. 7. Résultats des déplacements en fonction du temps avec amortissement.

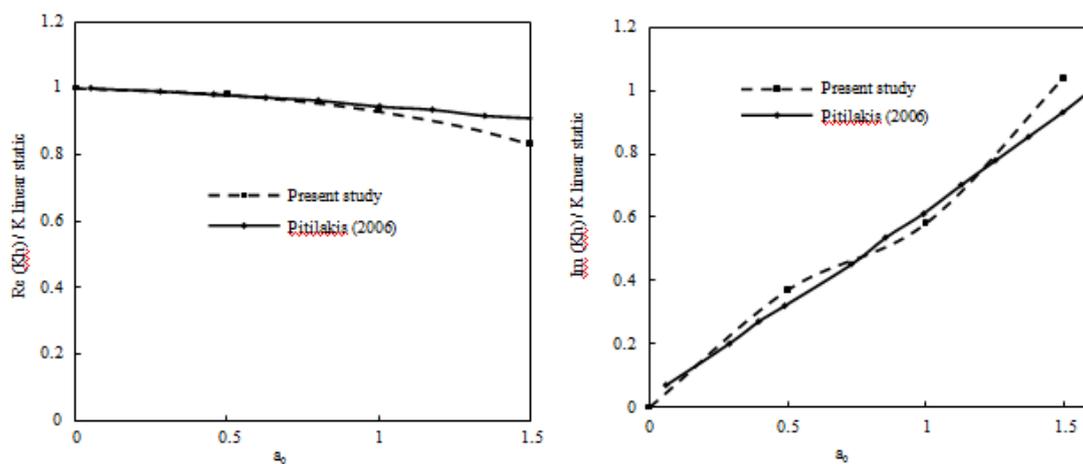
Dans cette analyse, la réponse du système sol-fondation dans le comportement non linéaire est étudiée. Tout d'abord, trouver le comportement non linéaire du sol par le code de calcul Caldynasoil, puis intégrer les propriétés non linéaires du sol dans le code de calcul FonvibWave développé pour obtenir les fonctions d'impédance non linéaires de la fondation (les coefficients de rigidités et d'amortissement à l'interface du système sol-fondation).

4 VALIDATION DU MODELE

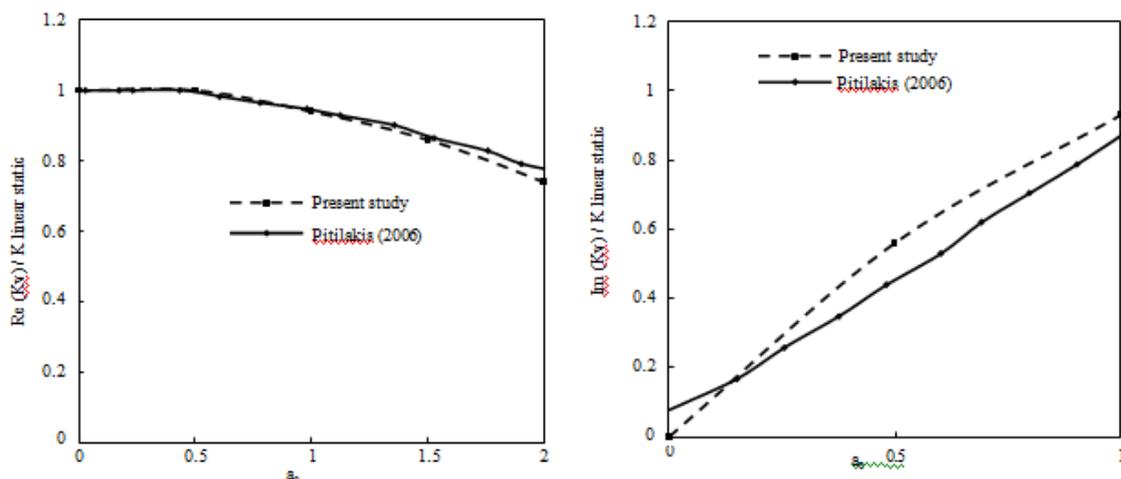
L'effet du comportement non linéaire du sol sur la réponse dynamique de l'interaction sol-structure n'est pas bien développé dans ce domaine. Pour cette raison, nous nous limitons à valider notre étude par le cas de l'impédance linéaire de [6]. La validation de ce travail est comparée aux résultats obtenus par [6], pour calculer les fonctions d'impédances linéaires en utilisant la méthode des éléments de frontière (BEM) dans le domaine des fréquences.

La fondation est circulaire ($D = 1\text{ m}$) reposant à la surface sur un milieu semi-infini, sollicité par des charges dynamiques unitaires $P_x = P_y = P_z = 1$ et des moments unitaires $M_x = M_y = M_z = 1$. Le sol est caractérisé par la hauteur $H_t = 30\text{ m}$ du socle rocheux pour simuler un milieu semi-infini, son coefficient de Poisson $\nu = 1/3$, son coefficient d'amortissement hystérétique $\xi = 0,02$, sa vitesse de cisaillement $V = 180\text{ m/s}$, et sa masse volumique $\rho = 2000\text{ Kg/m}^3$. Le sol est discrétisé en 36 éléments quadrilatéraux trouvés à l'interface sol-fondation pour le cas basse fréquence et discrétisé en 64 éléments quadrilatéraux trouvés à l'interface sol-fondation pour le cas haute fréquence.

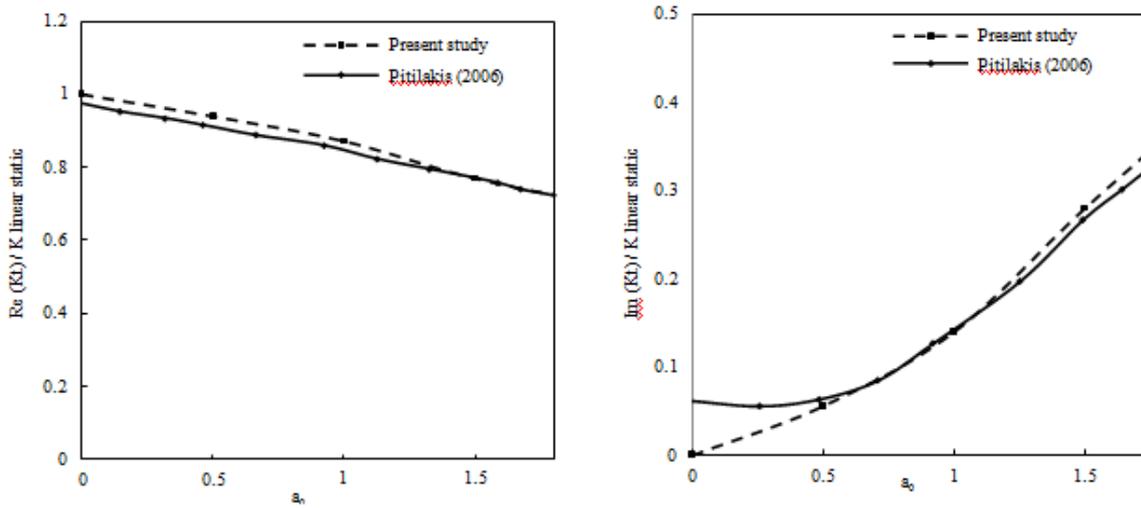
La validation représente les coefficients d'impédance adimensionnels équivalents (partie réelle et partie imaginaire) en fonction de la fréquence adimensionnelle a_0 pour tous les modes de vibration. Dans la figure 8, nous observons que les résultats de cette étude coïncident très bien avec ceux de [6]. Tous les modes de vibrations des deux approches sont presque identiques pour toutes les fréquences des vibrations.



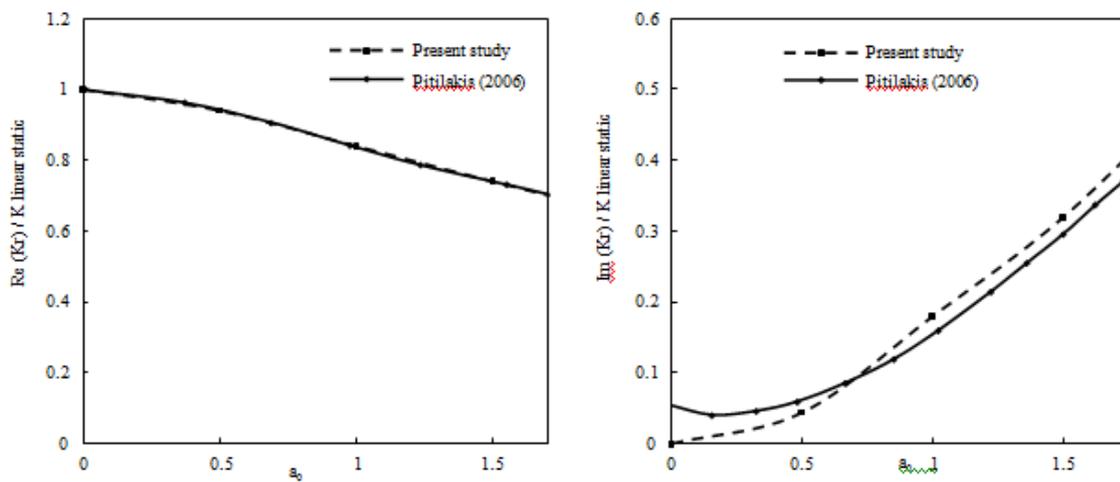
(a) Horizontal mode



(b) Vertical mode



(d) Torsion mode



(c) Rocking mode

Figure. 8. Validation des fonctions d'impédance pour tous les modes d'une fondation rigide circulaire de surface sur un sol semi-infini.

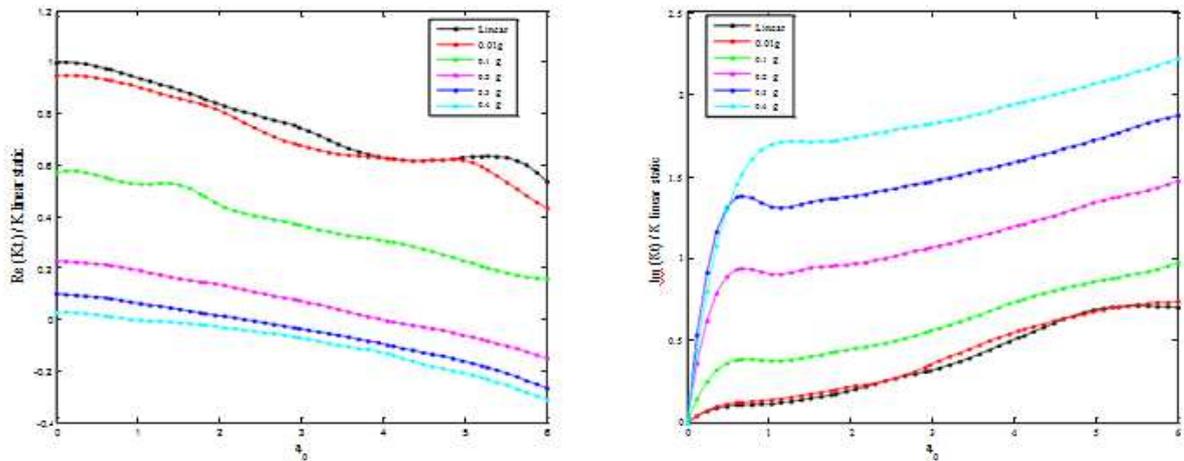


Figure. 9.: L'impédance dynamique équivalente linéaire et non linéaire d'une fondation placée en surface dans un sol homogène semi-infini.

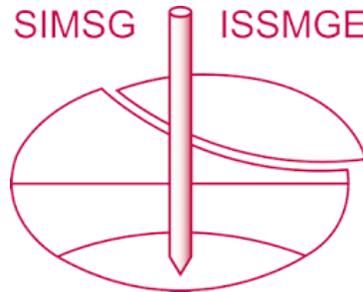
5 CONCLUSION

Les résultats obtenus ont montré que la prise en compte de la non-linéarité du sol joue un rôle important sur la réponse dynamique de la fondation. De plus, La considération de l'interaction sol-structure dans l'analyse du comportement dynamique des fondations permet de prendre en considération de manière réaliste l'influence du sol sur ses vibrations.

6 REFERENCES

- [1] Sbartaï, B. (2020), "A polynomial mathematical tool for foundation-soil-foundation interaction" *Geomechanics and Engineering*, Vol. 23, No. 6 (2020) 547-560.
- [2] Sbartaï, B. (2017), "Dynamic Impedance Functions of a Square Foundation Estimated with an Equivalent Linear Approach" *International Congress and Exhibition "Sustainable Civil Infrastructures: Innovative Infrastructure Geotechnology" GeoMEast 2017: Facing the Challenges in Structural Engineering*, pp 460–470.
- [3] Sbartaï, B. (2016), "Dynamic Interaction of Two Adjacent Foundations Embedded in a Viscoelastic Soil" *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, Vol. 16, No. 03, 1450110 (2016).
- [4] Messiou, S., Sbartaï, B., Dias, D. (2016), "Seismic response of a rigid foundation embedded in a viscoelastic soil by taking into account the soil-foundation interaction", *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 58, No. 5 (2016) 000-000.
- [5] Sbartaï, B., Boumekik, A. (2008), "Ground vibration from rigid foundation by BEM-TLM", *ISET Journal of Earthquake Technology Paper No. 498*, Vol. 45, No. 3-4, Sept.-Dec. 2008, pp. 65–78.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

The paper was published in the proceedings of the 18th African Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering and was edited by Abdelmalek Bekkouche. The conference was held from October 6th to October 9th 2024 in Algiers, Algeria.