

IMPEDANCE DYNAMIQUE VERTICALE D'UNE FONDATION PLACEE A LA SURFACE D'UN SOL COMPRESSIBLE RENFORCE PAR INCLUSIONS

S. Messioud¹, B. Sbartai², D. Dias³.

¹ Département de Génie Civil, Université de Jijel BP98 18000, Algérie
smessioud@yahoo.fr

² LMGHU, Département de Génie Civil, Université de Skikda 21000, Algérie
bsbartai@hotmail.fr

³ LTHE, Université Joseph-Fourier, Grenoble, France
Daniel.dias@ujf-grenoble.fr

Résumé :

Un modèle tridimensionnel en élément finis est proposé pour de la détermination de l'impédance dynamique verticale des systèmes sol-inclusions-matelas-dalle et sol-pieux-dalle. Des groupes d'inclusions/pieux enfoncés dans un sol compressible limité par un substratum rigide, les pieux/inclusions et le matelas sont modélisés par des éléments volumiques et la dalle par des éléments coque. Afin d'éviter la réflexion des ondes, des frontières absorbantes sont implémentées aux extrémités du modèle. La formulation est basée sur la méthode de sous structuration. La réponse en déplacement est obtenue en effectuant le produit de la fonction de la force excitatrice par la fonction de transfert en amplitude du déplacement. Les résultats obtenus sont présentés en termes de déplacements harmoniques et de fonctions des impédances verticales.

Mots clés : Pieux, Matelas, Impédances, Interaction sol-structure, Frontières Absorbantes

1. INTRODUCTION

Une étape indispensable dans la conception parasismique des structures est d'étudier l'influence de l'interaction sol-structure sur la réponse sismique des fondations profondes. Les séismes sont des phénomènes très complexes qui ne peuvent être négligés dans l'estimation de la sécurité des ouvrages. La construction des ouvrages d'art de Génie Civil, comme les centrales nucléaires, les réservoirs de gaz et les constructions offshore, en zone sismique et sur sol faible, impose le calcul sismique de fondations volumineuses ou de fondation sur pieux, ou de fondations sur des sols amélioré par des inclusions rigides. L'utilisation de fondation reposant sur sol amélioré par les inclusions rigides avec un matelas de transfert intercalés à la tête des inclusions présente une bonne solution dans les zones sismiques et pour les sols compressibles, le matelas de transfert constitué une zone de dissipation d'énergie à l'interface fondation structure par l'augmentation de l'effet d'amortissement.

La prise en compte de l'interaction sol-structure peut être abordée de façon relativement simple dans la plupart des cas de fondations superficielles, il n'en est pas de même lorsque il s'agit des fondations profondes ou des inclusions rigides. Dans le cas des inclusions rigides le mécanisme de transfert des charges dynamiques vers le sol est différent à celui des fondations superficielles et des pieux. Une étude approfondie du comportement sismique des fondations profondes est donc nécessaire pour assurer le bon fonctionnement de ces dernières. L'interaction sol-structure en dynamique caractérisée par les fonctions d'impédance qui doivent être étudiées dès la conception des ouvrages. L'analyse numérique d'un pieu ou d'un groupe de pieux dans le domaine fréquentiel est présentée par plusieurs auteurs. Utilisant la méthode des éléments de frontières, des modèles numériques ont été développés et un groupe de pieux a été analysé par Kaynya et Kausel (1991) et Maeso et al (2005). Un couplage entre la méthode des éléments de frontières et la méthode des éléments finis est présenté par Padron et al (2007) pour déterminer les fonctions d'impédance d'un groupe de pieux. La méthode CIFEM (Consistent Infinitesimal Finite Element Method) est utilisée par Emanic et Maheshwari (2009) pour le calcul des impédances dynamiques d'un groupe de 4 pieux. La méthode des éléments finis avec les frontières absorbantes a

été utilisée par (Messioud et al)^{a,b} (2011) pour le calcul des impédances dynamiques verticales et horizontales d'un groupe de 4 pieux posé sur un substratum rigide.

Très peu de solution existe sur le comportement dynamique de groupe d'inclusions Hatem A (2009) et U.S.Okaoy (2010). Utilisant la méthode des éléments finis de frontières absorbantes U.S.Okaoy et al 2012 Messioud et al 2012, des modèles numériques tridimensionnels ont été développés pour le calcul des impédances dynamiques d'un massif de sol renforcé par les inclusions.

Dans ce travail, un modèle numérique tridimensionnel en éléments finis est proposé pour étudier la réponse dynamique d'un massif de sol renforcé par les inclusions rigides. La réponse en déplacement est obtenue en effectuant le produit de la fonction de la force excitatrice par la fonction de transfert en amplitude du déplacement. Les impédances dynamiques sol-inclusion-matelas-dalle sont comparées avec celles de système sol-pieux-dalle.

2. MODELISATION NUMERIQUE DE SYSTEME SOL-INCLUSION-MATELAS-DALLE

2.1. Méthode de sous structure

En géodynamique, les ingénieurs sont confrontés à des domaines de très grande taille dont l'influence sur les structures qu'ils cherchent à dimensionner est prise en compte via une matrice d'impédance dynamique aux interfaces. Les termes de la matrice d'impédance s'expriment sous la forme de fonctions à valeurs complexes de la fréquence. La fonction d'impédance d'une fondation peut être exprimée sous la forme générale:

$$K(w) = K_s (k + ia_0c) \text{ avec } a_0 = \frac{\omega.Bf}{C_s} \tag{1}$$

Où a_0 est la fréquence adimensionnelle définie par une dimension caractéristique de la fondation Bf , par exemple le rayon pour une fondation circulaire, ou la demi-largeur pour une fondation rectangulaire et par le diamètre d pour un pieu ou un groupe de pieux. C_s est la vitesse des ondes de cisaillement dans le sol et ω est la pulsation de l'excitation harmonique. La majorité des méthodes utilisées pour la détermination des fonctions d'impédances sont les méthodes dites classiques (BEM, BEM-MEF, BEM-TLM) basées sur le formalisme des fonctions de Green. Dans ce travail, la méthode des éléments finis est utilisée pour déterminer les fonctions impédances dynamiques. Considérons une discrétisation par éléments finis des systèmes sol-structure comme le montre la Figure 1a. Le sol et la structure sont désolidarisés, et l'équilibre doit être établi par l'application des forces d'inertie P_b , P_f . Le modèle est soumis à une excitation arbitraire. La Figure 1b représente la discrétisation du problème en champ libre. La structure représente dans ce cas la partie extraite du sol.

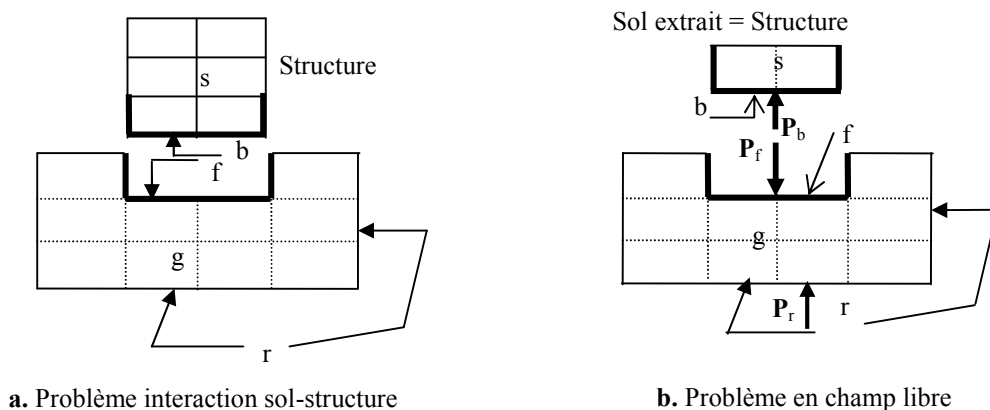


Figure 1. Schématisation d'une méthode de sous structure

Pour obtenir une solution dans le domaine fréquentiel, les équations de la matrice relative aux forces et déplacements sont données par la relation $(-\omega^2 M + i\omega C + K)U = P$, où M la matrice de masse, C est la matrice d'amortissement, et K la matrice de rigidité. P et U sont les vecteurs de force et de déplacement, où ω est la fréquence d'excitation.

L'équation de mouvement pour le problème de l'interaction sol-fondation est donnée par la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} K_{ff} & K_{fg} & K_{fr} \\ K_{gf} & K_{gg} & K_{gr} \\ K_{rf} & K_{rg} & K_{rr} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_f \\ U_g \\ U_r^* \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_f \\ 0 \\ P_r \end{Bmatrix} \quad (2)$$

La réponse en mouvement en champ libre est donnée par l'équation suivante:

$$\begin{bmatrix} K_{ff} & K_{fg} & K_{fr} \\ K_{gf} & K_{gg} & K_{gr} \\ K_{rf} & K_{rg} & K_{rr} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_f^* \\ U_g^* \\ U_r^* \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_f^* \\ 0 \\ P_r^* \end{Bmatrix} \quad (3)$$

s représente les nœuds de la structure, f les nœuds de l'interface sol fondation, g les nœuds du sol, b les nœuds de la structure le long de l'interface et r les nœuds du frontière de modèle. L'astérisque représente la solution en champ libre.

Le problème en champ libre et le problème de l'interaction sol-structure sont soumis à la même excitation U_r^* .

En générale $P_r \neq P_r^*$ sauf si la frontière est loin de la structure.

Soustrayant l'équation 4 de l'équation 3 conduit à

$$\begin{bmatrix} K_{ff} & K_{fg} & K_{fr} \\ K_{gf} & K_{gg} & K_{gr} \\ K_{rf} & K_{rg} & K_{rr} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_f - U_f^* \\ U_g - U_g^* \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_f - P_f^* \\ 0 \\ P_r - P_r^* \end{Bmatrix} \quad (4)$$

L'équation 4 peut être écrite par une forme plus compacte :

$$K(U_f - U_f^*) = P_f - P_f^* \quad (5)$$

Avec $K=K_{ij}(\omega)$ est la matrice des fonctions impédance la fondation qui peut être écrite sous la forme suivante.

$$K_{ij}(\omega) = \frac{(P_f - P_f^*)e^{i\omega t}}{(U_f - U_f^*)(\omega)} \quad (6)$$

Avec; P_f le vecteur des forces (moments) qui provient de l'effet inertiel de la superstructure, P_f^* le vecteur des forces (moments) provoquées par le mouvement du champ libre, U_f est la réponse à l'interface sol-fondation et U_f^* la réponse de mouvement en champ libre à l'interface sol-fondation.

Les fonctions impédances sont obtenues à partir du code de calcul sous la forme :

$K_{ij}(\omega) = [k^r_{ij}(\omega) + ik^i_{ij}(\omega)]$ Cette expression présente une partie réelle k^r_{ij} et une partie imaginaire ik^i_{ij} l'impédance dynamique peut être factorisée par rapport à l'impédance statique

$$K_{ij}(\omega) = K_s [k'_{ij}(\omega) + ik''(\omega)] \quad (7)$$

Où K_s l'impédance statique ($\omega=0$) ou la rigidité statique, k' reflète le comportement élastique et tient compte la rigidité et l'inertie du milieu et k'' indique le mouvement vibratoire est l'amortissement.

Une caractéristique fondamentale du code de calcul utilisé est la représentation exacte de la frontière modèle figure1 qui sépare la région des éléments finis du milieu semi-infini (le champ libre). Des frontières absorbantes sont placées aux extrémités du modèle par l'implémentation d'éléments paraxiaux élastiques. Ce qui correspond a des amortisseurs visqueux distribués le long des frontières des modèles pour éviter la réflexion des ondes. On peut donc construire une pseudo-matrice d'amortissement visqueux traduisant la présence du domaine infini.

2.2 Caractéristiques des modèles

Le volume de sol étudié a pour dimensions 40 x 40 x 15 m. Les analyses numériques ont été effectuées sur 30 inclusions rigides (ou pieux). Des inclusions rigides (ou pieux circulaires) en béton armé de longueur allant de 9 m à 11 m sont modélisées. Le diamètre de celles-ci est de 0,30 m et conduit à des rapports longueur/diamètre de 30 à 37. Une maille rectangulaire de 2 m x 2 m a été retenue (soit un taux de recouvrement de 1,7 %).

La couche de sol compressible a une hauteur de 10 m et est posée sur une couche dure de hauteur 5 m. En fonction de la configuration géométrique et du type de modèle, les inclusions/pieux traversent la couche compressible et s'arrêtent entre 9 et 11 m. La figure 2 représente la discrétisation du modèle pour l'analyse dynamique par éléments finis.

La taille des éléments de discrétisation doit être suffisamment petite pour que le maillage puisse transmettre les ondes sans distorsion numérique. Kuhlemeyer et Lysmer (1973) montrent que la taille des éléments doit être inférieure à un dixième de la longueur d'onde λ .

$$f = \frac{C_s}{10 \cdot \Delta l} \quad \text{avec} \quad f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (8)$$

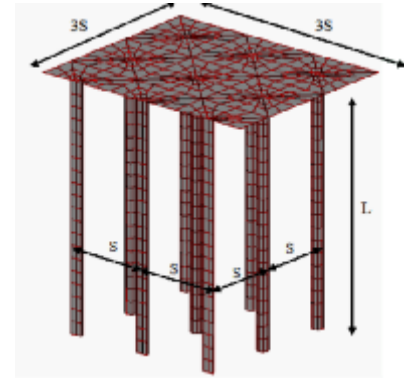
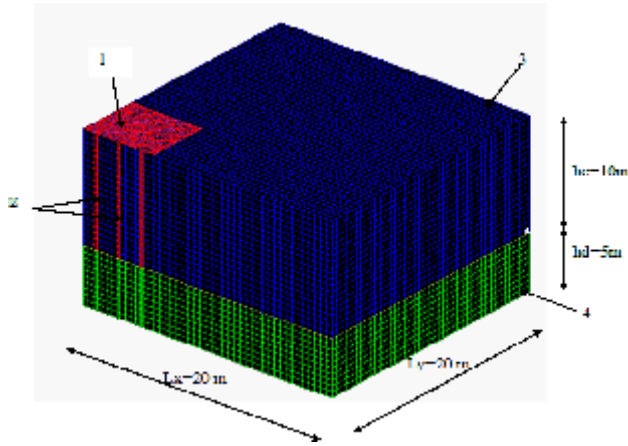
Avec C_s est la vitesse de l'onde, Δl la taille de l'élément de maillage et ω la fréquence d'excitation.

Afin de simplifier le problème, les couches de sol sont supposées horizontales dans un milieu semi-infini. Le sol du site s'étend souvent dans milieu continu, et il est nécessaire d'introduire une frontière artificielle à une certaine profondeur. Cette frontière doit tenir compte de la distribution de l'énergie réfléchie et transmise au milieu continu.

3. RESULTATS ET DISCUSSION

Dans cette section des résultats en utilisant le profil de sol dont les caractéristiques sont présentés dans le tableau 1. L'objectif principal de cette partie est d'étudier l'influence des conditions des liaisons, sur les impédances dynamiques verticales pour un groupe de pieux et/ou d'inclusions. Des impédances dynamiques verticales (rigidité et coefficients d'amortissement) de groupes de pieux et de groupes d'inclusions flottantes, posées et ancrées dans la couche de support sont étudiées. Le milieu est considéré comme homogène viscoélastique. Les impédances dynamiques et les déplacements obtenus par la méthode des éléments finis sont présentés dans les figures suivantes 3 à 7. Les fonctions d'impédance verticales ont être normalisées par rapport à la rigidité statique d'un seul pieu/inclusions (k_s) fois le nombre (n) des pieux/inclusions dans le groupe. Tous les résultats sont tracés en fonction du paramètre de la fréquence.

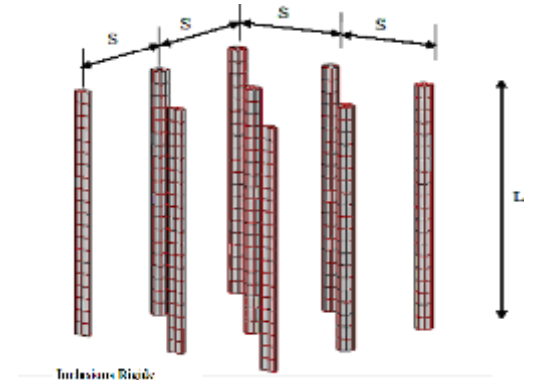
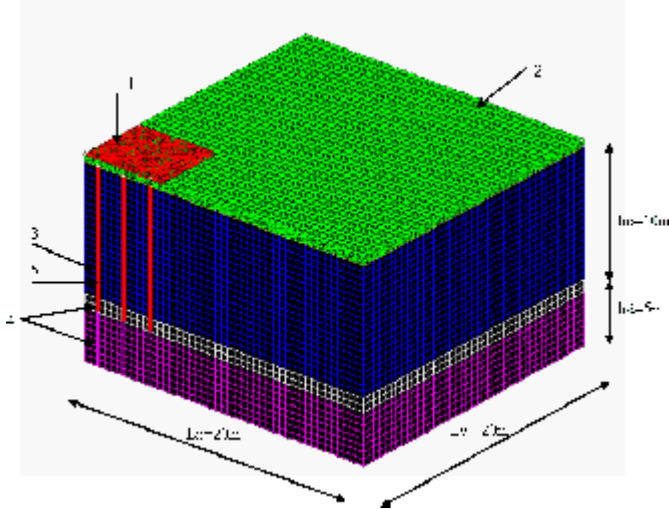
1 dalle de 0.5m d'épaisseur ; 2 groupe de pieux
3 sol mou ; 4 sol dur



Extrait d'un groupe de pieux

Figure2a : Quart de modèle pour le calcul de sol-pieux-dalle (pieux posés)

1 dalle de 0.5m d'épaisseur ; 2 Matelas de transfert de 0.6m d'épaisseur ; 3 Sol mou ; 4 Sol dur ; 5 inclusions Rigides



Extrait d'un groupe d'inclusions

- L La longueur des pieux
- L=9m Pieux flottants
- L=10m Pieux poses sur couche dure
- L=11m Pieux ancrés dans une couche dure
- S la distance entre axes des pieux
- S=2m
- t L'épaisseur de la dalle de liaison

Figure2b. Quart de modèle pour le calcul de système sol-inclusions-matelas-dalle (inclusions ancrées)

Tableau 1. Caractéristiques mécaniques des éléments en interactions.

Eléments	Inclusions/pi eux	dalle	Sol dur	Sol mou	Matelas de transfert
Caractéristique Dynamique					
Module d'élasticité (Mpa)	30000	30000	1000	100	500
Densité N/m ³	25000	25000	20000	16000	20000
Coefficient d'amortissement	0.02	0.02	0.05	0.05	0.05
Coefficient de poisson	0.25	0.25	0.3	0.4	0.4

3.1. Impédance dynamique verticale

3.1.1. Influence des conditions d'ancrages

a-Sol-pieux-dalle

Les fonctions impédances dynamiques sont calculées par application d'une charge verticale au centre de la dalle d'un quart de modèle figure 2a. Les pieux sont flottants dans la couche du sol compressible, posés et ancrés dans une couche dure. La dalle est considérée comme infiniment rigide. Les caractéristiques d'éléments en interaction sont présentées dans le tableau 1. Les figures 3 et 4 présentent l'influence des conditions d'ancrages sur l'impédance dynamique verticale et l'amplitude de déplacement vertical.

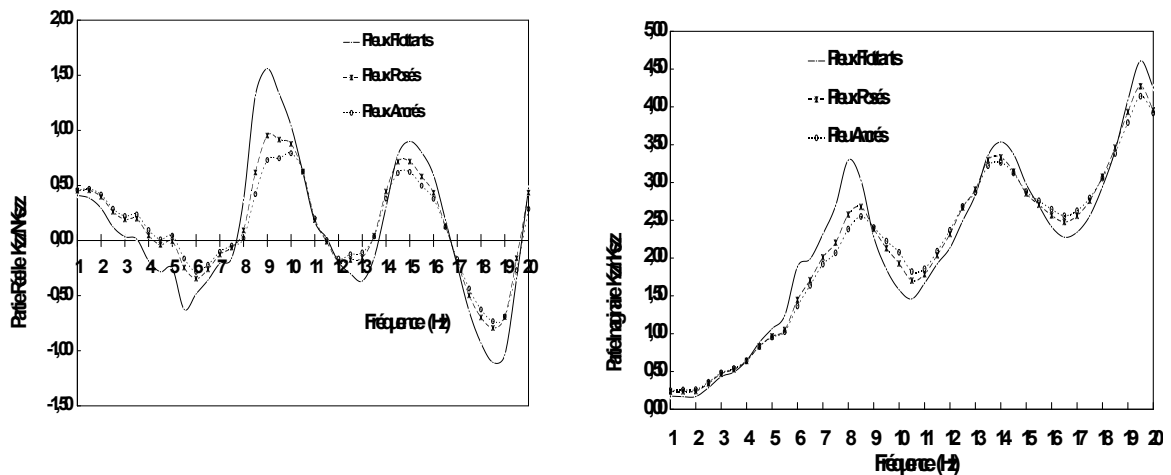


Figure 3. Influence des conditions de liaison sur l'impédance dynamique verticale K_{zz} du système sol-pieux-dalle.

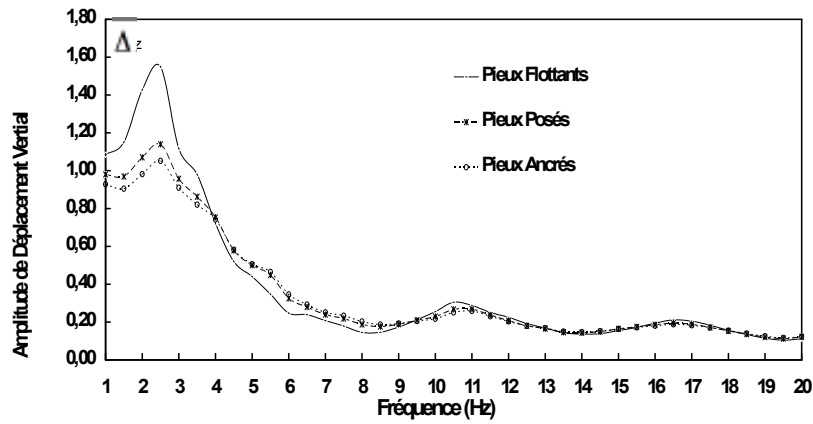


Figure 4. Influence des conditions de liaison sur l'amplitude de déplacement vertical Δ_z du système sol-pieux-dalle

b-Sol-inclusions-matelas-dalle

Maintenant, on prend le quart-modèle de calcul présenté dans la figure 2b. Un matelas de transfert est intercalé à la tête des inclusions rigides. Les inclusions rigides sont, flottantes, posées et ancrées dans la base. Une dalle considérée infiniment rigides est posée sur le matelas de transfert de charge. Les impédances dynamiques sont calculées en appliquant une force verticale au centre de la dalle. Les figures 5 et 6 présentent l'influence des conditions de liaison sur la variation de l'impédance dynamique verticale et l'amplitude de déplacement de massif de sol renforcé.

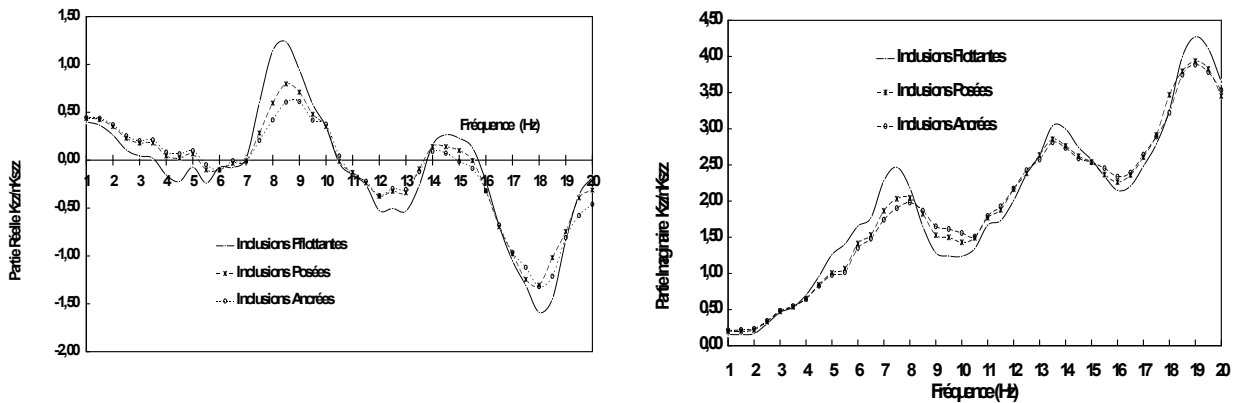


Figure 5. Influence des conditions de liaison sur l'impédance dynamique verticale K_{zz} du système sol-inclusions-matelas-dalle

Les figures 3 et 5 montrent l'influence des conditions de liaison sur la variation des impédances verticales des deux systèmes sol-pieux-sol-dalle et sol-inclusions-matelas-dalle respectivement. Les conditions de liaison affectent les impédances dynamiques des deux systèmes d'une manière significative et surtout pour les basses

fréquences. Les figures 4 et 6 montrent que les systèmes flottants sont plus sensibles aux déplacements verticaux, la réaction du sol sur la dalle des systèmes sol-pieux-sol-dalle et sol-inclusions-matelas-dalle est importante surtout pour les basses fréquences. Dans ce cas, les valeurs maximales des impédances dynamiques sont données par le système flottant. Les figures 4 et 6 montrent que les systèmes ancrés sont plus résistants aux déplacements verticaux. Cela montre que l'ancrage des pieux/inclusions dans la couche de support est important, de réduire les déplacements.

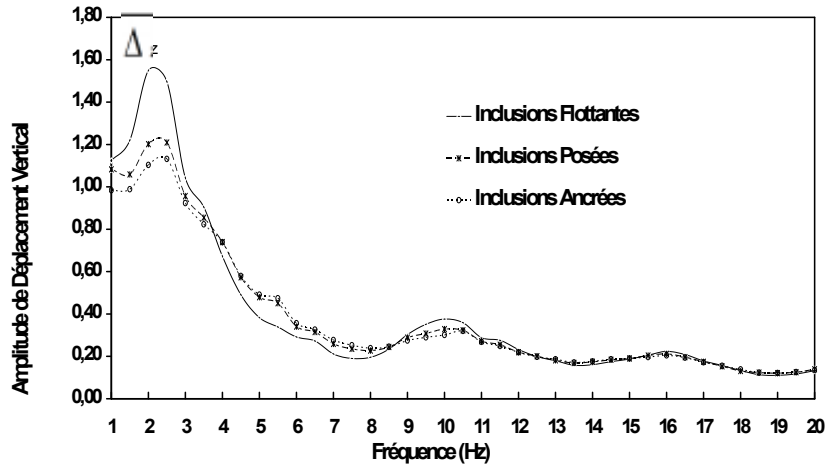


Figure 6. Influence des conditions de liaison sur l'amplitude de déplacement vertical Δ_z du système sol-inclusions-matelas-dalle

3.1.2. Influence du module de matelas

Maintenant, on prend le modèle présenté dans la figure 2b et en faisant varier le module d'élasticité de matelas entre 500, 1000 et 5000 MPa, seul le système des inclusions posées sont considérés. Les résultats obtenus sont comparés avec les impédances de système posé sol-pieux-dalle. La figure 7 présente l'influence de la rigidité du matelas sur la variation de l'impédance dynamique verticale.

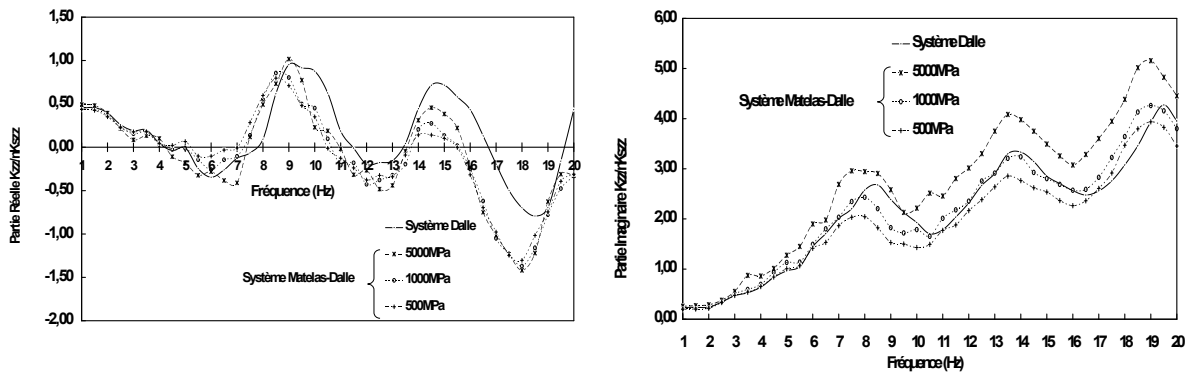


Figure 7. Influence de la rigidité du matelas de transfert sur les impédances verticales des systèmes sol-pieux-dalle et sol-inclusions-matelas-dalle (systèmes posés)

La figure 7 montre l'influence du module d'élasticité du matelas de transfert des charges sur les impédances dynamiques verticales, la partie réelle de l'impédance dynamique est augmentée d'une façon remarquable en fonction de l'augmentation la rigidité du matelas de transfert. La rigidité dynamique du sol- inclusions-matelas-dalle donnée par un module d'élasticité $E = 5000\text{MPa}$ est approchée à la partie réelle de l'impédance du sol-pieux-dalle, surtout pour les faibles fréquences. La figure 7 montre que le module d'élasticité de matelas affecte la partie imaginaire d'une façon, pour des modules d'élasticités de matelas élevés le système sol-inclusions-matelas-dalle devient plus amorti.

4. CONCLUSION

Dans ce travail nous nous sommes intéressés à l'étude du comportement dynamique d'une fondation reposant sur massif de sol renforcé par un groupe des inclusions rigide et comparé avec une autre reposant sur un groupe de pieux mis en place dans le même massif de sol. Une modélisation de l'ensemble des sol-pieux-dalle et sol – inclusions-matelas-dalle a été mise en œuvre par la méthode des éléments finis avec les frontières absorbantes. Les résultats des impédances dynamiques et des déplacements des deux systèmes sol-inclusions-matelas-dalle et sol-pieux-dalle sont présentés. L'évolution de l'impédance dynamique verticale et de déplacement vertical en fonction de la fréquence a été présentée. L'influence des conditions d'ancrages et la rigidité du matelas de transfert ont été étudiées.

Les conditions d'ancrages affectent les termes d'impédance dynamique et l'amplitude de déplacement d'une manière significative surtout pour les basses fréquences. L'effet de la rigidité du matelas de transfert affecte les impédances dynamiques façon importante. Les résultats ont montré que, les impédances dynamiques de système sol-inclusions-matelas-dalle pour un module $E=5000\text{MPa}$ sont approchées a celles des pieux. Le système sol-inclusions-matelas-dalle devient plus amorti pour des modules élevés.

5. BIBLIOGRAPHIE

- [1] Kaynia AM, Kausel E. (1991), «Dynamics of piles and pile groups in layered soils». Soil Dyn Earthquake Eng; 10(8):386–401.
- [2] Maeso O, Aznarez JJ, Garcia F. (2005), «Dynamic impedances of piles and groups of piles in saturated soils». Comput Struct;83:769–82.
- [3] L.A. Padron, J.J. Aznarez, O. Maeso. (2007), «BEM–FEM coupling model for the dynamic analysis of piles and pile groups ».Engineering Analysis with Boundary Elements 31 473–484
- [4] P.K.Emani, B.K.Maheshwari. (2009), «Dynamic impedances of pile groups with embedded caps in homogeneous elastic soils using CIFECM».Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 963–973
- [5] Messiou S, Dias D, US Okoay, Sbartai S. (2011), « Impédances dynamique de fondation sur groupe de pieux. 29 eme rencontres AUGC Telemcen
- [6] Messiou S, Sbartai S, Dias D, US Okoay. (2011), « Réponse dynamique fondation sur groupe de pieux ». 1er Congrès International – GCDD2011-Tébessa 17-19 octobre 2011
- [7] Hatem A. 2009, Comportement en zone sismique des piles rigides, analyse de l'interaction sol-pile- matelas en répartition de structure. Doctoral thesis, Université des Sciences et Technologies de Lille
- [8] OKYAY U.S. (2010), « Etude expérimentale et numérique des transferts de charge dans un massif renforcé par inclusions rigides : Application à des cas de chargements statiques et dynamiques» Doctoral thesis LGCIE INSA lyon
- [9] Okyay U. S., Dias .D, Billion (2012), « Impedance functions of flab foundations with rigid piles». Geotechnical and Geological Engineering. Vol30, pp 1013-1024
- [10] Messiou S, Sbartai S, Dias D, US Okoay. (2013), « Impedances functions of a Soil-Pile-Mattress-Slab System ». International Conference on Geotechnical Engineering. ICGE'13 Hammamet Tunisie 2013