

# CALCUL ET ANALYSE DE LA REPONSE DYNAMIQUE DES FONDATIONS ENTERREES PAR UNE METHODE APPROXIMATIVE AU SOL DE RENFORCEMENT

Z. HARICHANE

Magistère en génie Civil, Maître assistant C.U de Chlef

M. GHRICI

Magistère en génie Civil, Maître assistant C.U de Chlef

## RESUME

*Dans cet article, nous tentons de développer une méthode approximative au sol de renforcement pour calculer et analyser la réponse dynamique d'une fondation cylindrique rigide non pesante.*

*La méthode proposée est basée sur l'hypothèse que la fondation est enterrée dans un bi-couche linéairement viscoélastique.*

*Les résultats obtenus ont montré que cette méthode approximative est aussi rigoureuse que les méthodes hybrides.*

**Mots clés :** interaction sol-structure • radiation • dispersion • mouvement créés • onde inhomogène • éléments infinis • sol de renforcement • rapport d'enfoncement •

## 1 INTRODUCTION

L'importance de l'analyse dynamique de l'interaction sol-structure réside dans la modélisation des structures et des fondations. L'un des aspects importants de cette analyse est l'évaluation de la réponse dynamique des fondations rigides non pesantes.

Pour les systèmes linéairement élastiques, ou viscoélastiques, les problèmes causés par le phénomène d'interaction sol-structure peuvent être de deux types : un problème de radiation ou un problème de dispersion.

Le problème de radiation peut être caractérisé par les fonctions d'impédances représentant la relation force-déplacement entre la fondation et le sol quand la fondation non pesante est excitée par des forces extérieures. Tandis que le problème de dispersion peut se caractériser par les mouvements en champs libre. Ces mouvements sont définis comme des déplacements et des tractions créés par la fondation non pesante sollicitée par des ondes sismiques incidentes.

Le traitement de ces deux problèmes se fait indépendamment l'un de l'autre tout en excluant la masse de la fondation. Le couplage entre les solutions des deux problèmes permet d'évaluer la réponse de la fondation enterrée sous forme d'un vecteur mouvement appelé "vecteur mouvement créé par la fondation". Les effets dus à la masse de la fondation aussi bien que ceux associés à la présence de la superstructure peuvent facilement être comptés.

En tenant compte du fait que le sol entourant la fondation soit perturbé pendant les opérations de construction, Yoshida [7] a présenté une méthode approximative au sol de renforcement pour l'analyse dynamique d'une fondation soumise à l'action d'une onde sismique incidente verticale de type SH.

En étendant ceci, nous avons proposé de développer la méthode au sol de renforcement pour calculer et analyser la réponse dynamique d'une fondation enterrée sollicitée par l'incidence d'une onde sismique horizontale inhomogène.

Le développement de la méthode est basé sur le fait que les fonctions d'impédances sont connues. Les fonctions d'impédances au niveau des murs de la fondation enterrée sont évaluées par la méthode approximative de Yoshida [7] et celles au niveau de la base par la méthode tridimensionnelle d'éléments de frontières de Sato et Al [5].

Connaissant les fonctions d'impédances et les mouvements en champ libre, les mouvements créés par la fondation enterrée peuvent être évalués en adoptant une distribution des tractions de contact à des mouvements unitaires.

Nous présentons ci-après la formulation de la réponse dynamique de la fondation enterrée. Cette réponse est analysée en étudiant l'influence du sol de renforcement et du rapport d'enfoncement sur les mouvements créés. Des confrontations avec des résultats existants sont présentées afin de vérifier la précision de la méthode proposée.

## 2 FORMULATION

Dans cette étude, le problème d'interaction sol-structure posé est formulé sous deux aspects généraux :

- Un aspect géométrique et cinématique permettant de modéliser le sol et de schématiser la propagation d'onde ;
- Un aspect dynamique caractérisé par le choix de la méthode d'analyse. Ce choix est orienté vers un traitement par une méthode approximative.

Le modèle géométrique investi est constitué d'une couche de sol horizontale, d'une épaisseur unitaire, d'une étendue infinie et de caractéristiques mécaniques et inertielles déterminées. La couche est percée d'un trou où loge une fondation circulaire de rayon  $r_0$  et de profondeur  $d$ . La fondation est entourée par un sol de renforcement de largeur constante  $\Delta r$ . L'ensemble couche/fondation repose sur un demi-espace viscoélastique homogène (Figure 1).

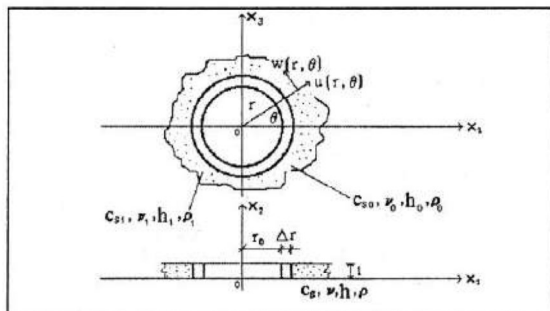


Figure 1 : Géométrie et notations.

Ce modèle s'investit sous l'hypothèse que la couche de sol en surface se déforme uniquement en cisaillement.

### 2.1 Mouvements en champ libre

La réponse au problème de dispersion posé est incorporée dans un vecteur mouvement appelé "vecteur mouvement en champ libre". Ce vecteur est composé de déplacements ( $\{u_g(x)\}$ ) et de tractions ( $\{t_g(x)\}$ ) le long de la surface de contact sol-fondation. Le vecteur  $\{u_g(x)\}$  doit satisfaire les équations de Navier.

Pour évaluer ces mouvements, nous avons proposé de modéliser les interfaces de la couche de sol en surface par éléments infinis et de soumettre l'interface couche/demi-espace à une onde sismique incidente horizontale de type Raileigh ou Stoneley. Le champ de déplacement d'une telle onde, inhomogène s'atténuant exponentiellement avec  $x_2$  et se propageant dans la direction  $x_1$  avec une vitesse  $c$  et un nombre d'onde  $k$  et vérifiant les équations d'équilibre dans le demi-espace, s'écrit sous l'expression suivante basée sur l'approximation de Dangla [1].

$$\{u_g(x_1, x_2)\} = \begin{Bmatrix} (B_1 \exp(b_1 k x_2) + B_2 \exp(b_2 k x_2)) \\ (b_2 B_1 \exp(b_1 k x_2) - i B_2 \exp(b_2 k x_2)) \end{Bmatrix} \exp(ikx_1) \quad (1)$$

$$\text{et} \quad \begin{cases} b_1^2 = 1 - \frac{c^2}{c_p^2} \\ \text{et} \\ b_2^2 = 1 - \frac{c^2}{c_s^2} \end{cases} \quad (2)$$

Dans ces équations,  $c_p$  et  $c_s$  sont, respectivement, les vitesses des ondes P et S dans le demi-espace.  $B_1$  et  $B_2$  sont des constantes de continuité des déplacements et des contraintes et  $i$  est le nombre complexe ( $i^2 = -1$ ).

Dans la couche, le champ de déplacement est supposé de la forme suivante :

$$\{u_g^0(x_1, x_2)\} = \{u(x_2)\} \exp(ikx_1) \quad (3)$$

où  $k (= \omega/c)$  est le nombre d'onde et  $\omega$  sa fréquence angulaire.

Les conditions de continuité des déplacements et des contraintes à l'interface couche/demi-espace et les conditions de disparition des contraintes à la surface libre permettent de formuler le vecteur déplacement en champ libre dans la couche, sous l'expression suivante [2].

$$\{u_g^0(x_1, x_2)\} = (A_1 \cdot \{u_1(x_2)\} + A_2 \cdot \{u_2(x_2)\}) \exp(ikx_1) \quad (4)$$

dans laquelle :

$$\{u_1(x_2)\} = \begin{Bmatrix} \cos(pk(x_2-d)) - \frac{1-q^2}{2} \cos(qk(x_2-d)) \\ i(\sin(pk(x_2-d)) + \frac{1-q^2}{2q} \sin(qk(x_2-d))) \end{Bmatrix} \quad (5)$$

et

$$\{u_2(x_2)\} = \begin{Bmatrix} i(\frac{1-q^2}{2p} \sin(pk(x_2-d)) + q \sin(qk(x_2-d))) \\ \frac{1-q^2}{2} \cos(pk(x_2-d)) - \cos(qk(x_2-d)) \end{Bmatrix} \quad (6)$$

où

$$\begin{cases} p^2 = \frac{c^2}{c_{p0}^2} - 1 \\ \text{et} \\ q^2 = \frac{c^2}{c_{s0}^2} - 1 \end{cases} \quad (7)$$

$A_1$  et  $A_2$  sont des constantes de continuité.

Le vecteur traction en champ libre  $\{t_g^{(n)}(x_1, x_2)\}$

une facette  $n(x)$  s'exprime en fonction du vecteur déplacement par la relation d'élastodynamique suivante :

$$\{t_g^{(n)}(x_1, x_2)\} = \lambda \operatorname{div}\{u_g(x_1, x_2)\} \cdot n(x_1, x_2) + 2G \frac{\partial \{u_g(x_1, x_2)\}}{\partial n(x_1, x_2)} + G \cdot n(x_1, x_2) \wedge \operatorname{rot}\{u_g(x_1, x_2)\} \quad (8)$$

où  $\lambda$  et  $G$  sont les constantes réelles de Lamé.

En calculant ces mouvements, nous avons supposé que seul le sol de renforcement est négligé et que les propriétés physiques du sol circonférenciel sont différentes de celles du demi-espace.

## 2.2 Mouvements créés par la fondation enterrée

La réponse dynamique complète de la fondation enterrée est représentée par un vecteur mouvement effectif, nommé "vecteur mouvement créé par la fondation enterrée". Ce vecteur s'exprime selon IGUCHI [3] et LUCO [4] comme suivant :

$$\{u_0^*\} = [K]^{-1} \int_S ([\Gamma(x)]^T \{u_g(x)\} - [\alpha(x)]^T \{t_g(x)\}) ds(x) \quad (9)$$

où  $[K]$  est la matrice d'impédances et  $[\alpha(x)]$  une matrice d'influence  $[\Gamma(x)]$  est la matrice des tractions de contact entre la fondation et le sol.  $S$  est l'interface de contact.

Pour déterminer les tractions de contact, nous nous sommes basés sur l'approximation de Luco [4], d'où la distribution suivante :

$$[\Gamma(x)] \cong [\alpha(x)] \cdot [H]^{-1} \cdot [K] \quad (10)$$

où

$$[H] = \int_S [\alpha(x)]^T \cdot [\alpha(x)] \cdot ds(x) \quad (11)$$

La substitution de l'équation (10) dans l'équation (9) conduit à l'approximation suivante du vecteur mouvement créé :

$$\{u_0^*\} \cong [H]^{-1} \int_S [\alpha(x)]^T \{u_g(x)\} ds(x) - [K]^{-1} \int_S [\alpha(x)]^T \{t_g(x)\} ds(x) \quad (12)$$

Ce vecteur mouvement peut se calculer en deux étapes : une première étape au niveau de la base et une seconde au niveau des murs. D'où, par superposition, le vecteur mouvement créé par la fondation enterrée s'écrit :

$$\{u_0^*\}_{\text{Fondation enterrée}} = \{u_0^*\}_{\text{Base}} + \{u_0^*\}_{\text{Murs}} - \{u\}_r \quad (13)$$

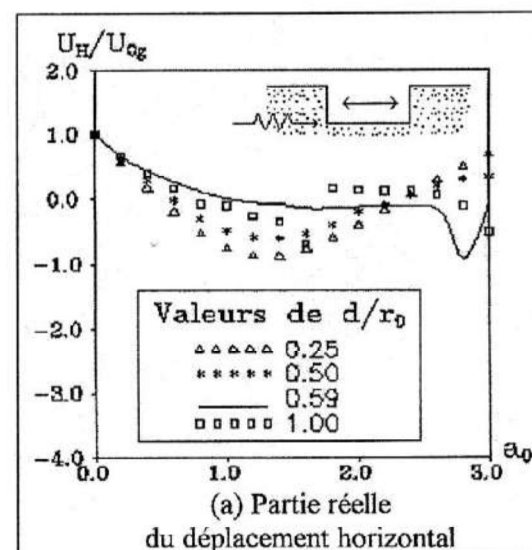
où nul, est un vecteur mouvement additionnel. Ces expressions vectorielles sont détaillées dans [2].

## 3 INVESTIGATIONS NUMERIQUES

La formulation de la réponse dynamique de la fondation enterrée prend une forme assez complexe. La transcription informatique de cette formulation est effectuée par l'élaboration d'un programme de calcul "EVAMC". Ce programme permet d'évaluer les mouvements créés par la fondation enterrée.

### 3.1 Effet de rapport d'enfoncement

Dans la figure 2 nous présentons des valeurs normalisées des mouvements créés par une fondation cylindrique enterrée en fonction de la fréquence adimensionnelle  $a_0$ . Les coefficients d'amortissement  $h$  et de Poisson  $\nu$  sont, respectivement, égaux aux valeurs 0.03 et 1/3.



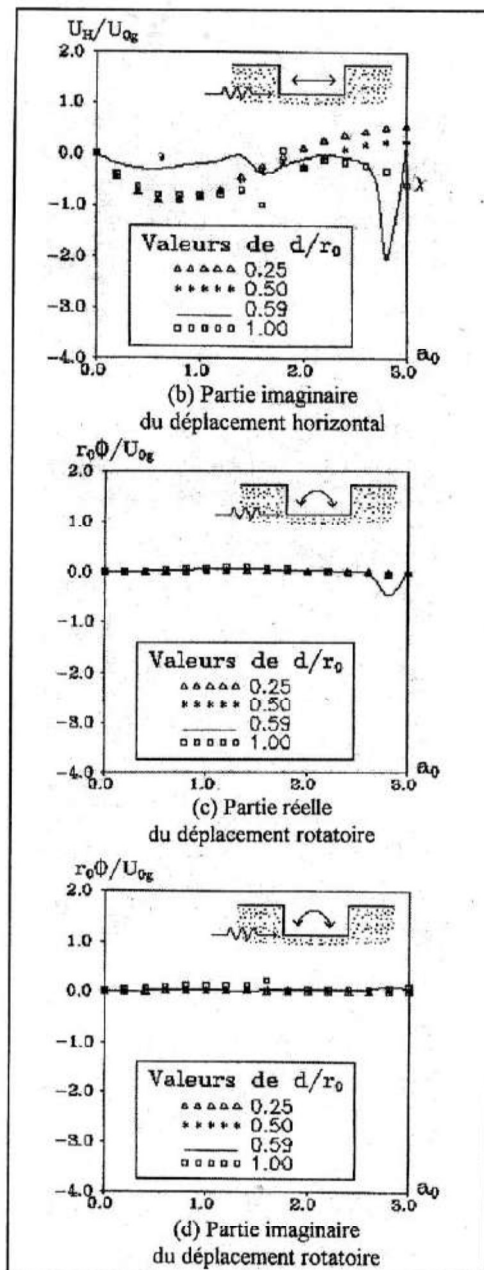


**Figure 2 :** Effet du rapport d'enfoncement.

En examinant cette figure, nous avons constaté que pour un rapport d'enfoncement ( $d/r_0$ ) égal à la valeur 0,59 toutes les courbes prennent une allure particulière pour une fréquence adimensionnelle égale à la valeur 2,8.

### 3.2 Effet du sol de renforcement

Dans la figure 3, nous avons fixé le rapport des vitesses de l'onde de cisaillement ( $c_{s1}/c_{s0}$ ) en faisant varier le rapport de la largeur du sol de renforcement au rayon de la fondation ( $\Delta r/r_0$ ). Par contre dans la figure 4, nous avons fait varier le rapport  $C_{s1}/C_{s0}$  en fixant le rapport  $\Delta r/r_0$ . Dans les deux figures, le rapport d'enfoncement est fixé à la valeur 0,59.

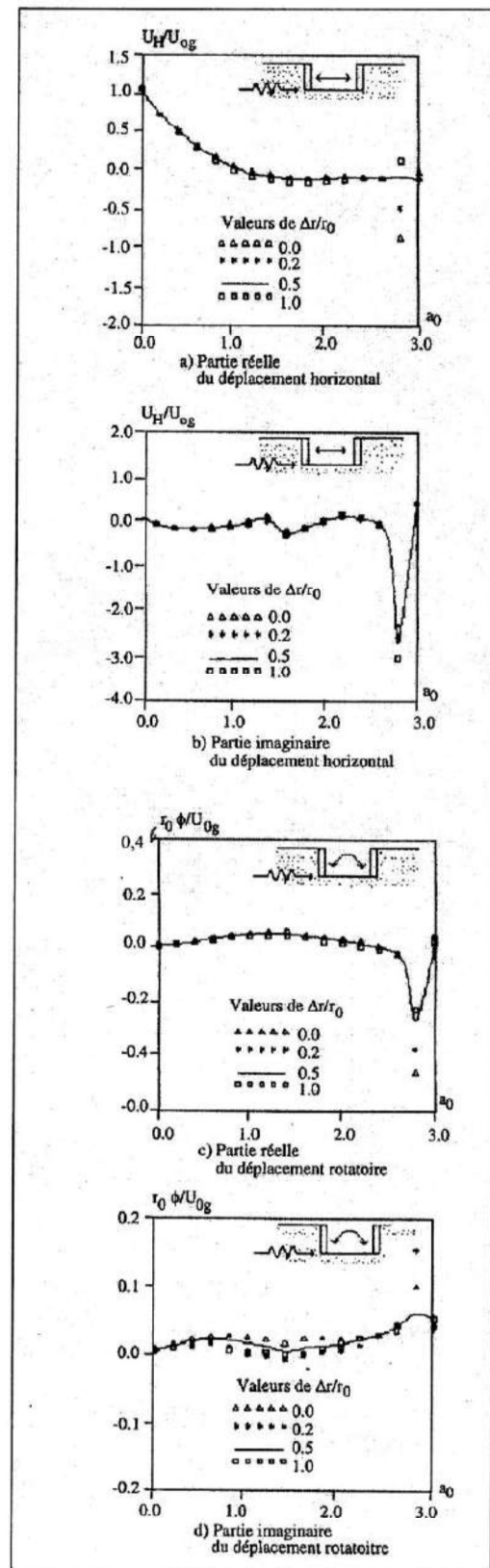


**Figure 3 :** Influence de la variation de la largeur du sol de renforcement.

( $\rho = \rho_0$ ,  $h_1 = h_0 = 0.03$ ,  $v_1 = v_0 = 1/3$ ,  $c_{s1} / c_{s0} = 0.50$ )

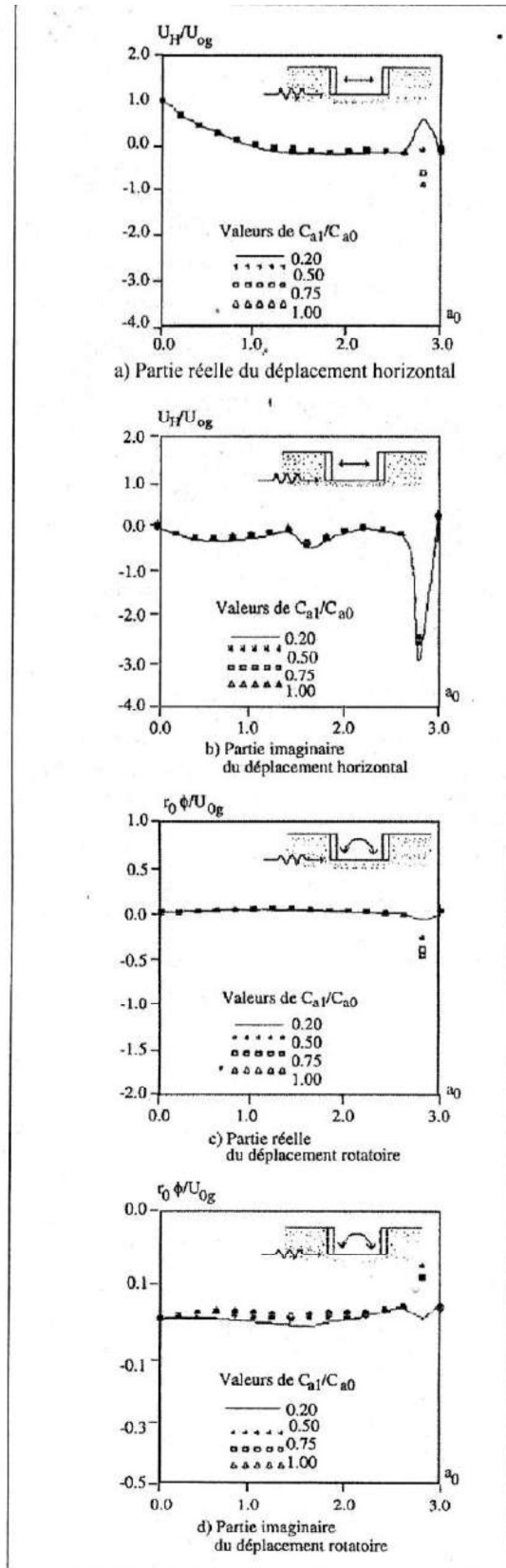


**Figure 4 :** Influence de la variation du rapport des vitesses de l'onde de cisaillement.

( $\rho_1 = \rho_0$ ,  $h_1 = h_0 = 0.03$ ,  $v_1 = v_0 = 1/3$ ,  $\Delta r/r_0 = 0.20$ )

En examinant les figures 3 et 4, nous avons remarqué une nette différence entre les différentes courbes d'un même mode pour une fréquence adimensionnelle égale à la valeur 2.8. Pour les autres fréquences, les courbes sont plus au moins confondues. De ce fait, nous pouvons penser que l'effet du sol de renforcement intervient pour les hautes fréquences au delà de la valeur 2.8.

### 3.3 Etude de la précision

La figure 5 montre les valeurs normalisées des mouvements créés par une fondation cylindrique sans sol de renforcement en fonction de la fréquence adimensionnelle. La figure 6 montre la variation des valeurs absolues normalisées des mouvements créés par une fondation avec sol de renforcement. Le rapport d'enfoncement est égal à la valeur 0.59.

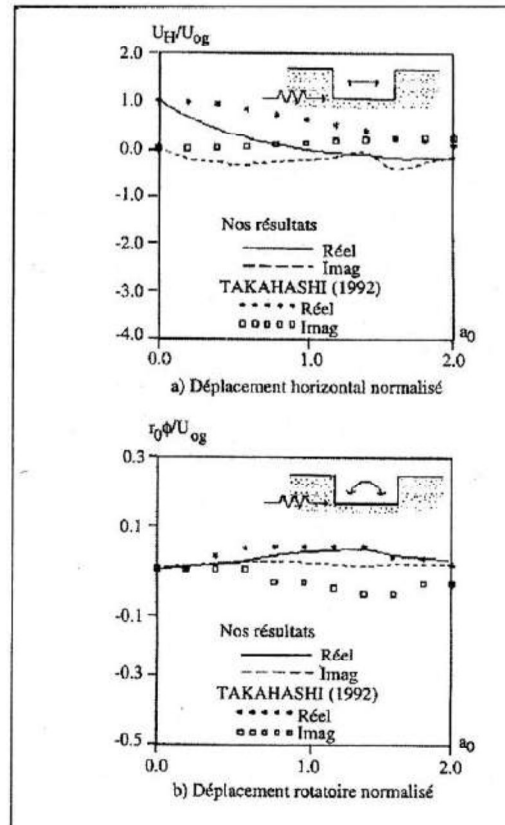


**Figure 5 :** Précision de la méthode sans sol de renforcement.

Dans ces deux figures (5) et (6), nous reportons également les résultats de Takahashi et Al [6]. Ce dernier a calculé les mouvements créés par une fondation carrée au moyen d'une méthode hybride. La fondation carrée de dimension  $2B \times 2B$  et de rapport l'enfoncement  $d/B = 2/3$  est enterrée dans un demi-espace homogène et sollicitée par l'incidence d'une onde horizontale SH. Les deux formes géométriques sont supposées avoir une section équivalente de rapport  $r_0/B = 1,13$ .

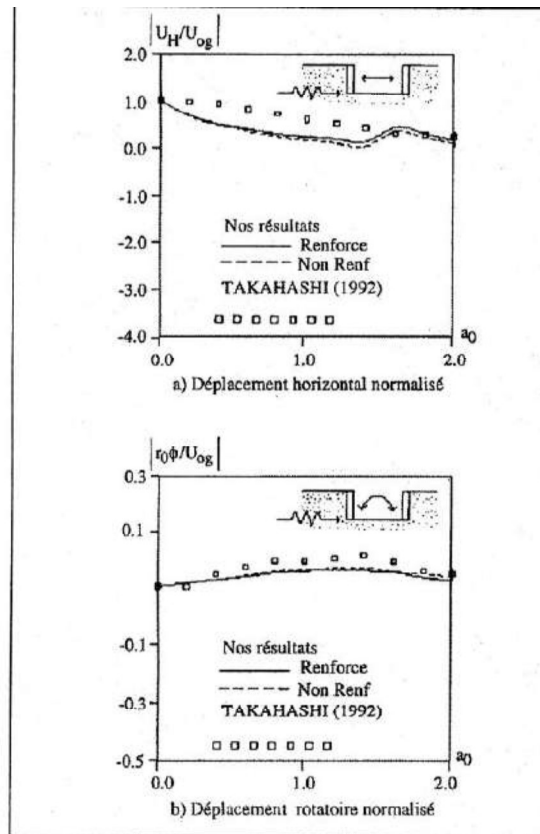


**Figure 6 :** Précision de la méthode avec sol de renforcement.

De la figure 5, nous remarquons que nos résultats sont améliorés par rapport à ceux de Takahashi [6] à l'exception de la partie imaginaire du déplacement rotatoire (Figures 5b). Cette amélioration correspond au fait que les caractéristiques physiques du sol circonférenciel ont été prises en compte dans l'évaluation des mouvements en champ libre et plus encore à la variation de la vitesse  $c$  de l'onde en fonction de la fréquence adimensionnelle  $a_0$ .

L'examen des figures (5-b) et (6-b) a permis de constater que l'introduction du sol de renforcement améliore nos résultats pour le mode rotatoire.

#### 4 CONCLUSION

Tout au long de cet article, nous nous sommes intéressés tout d'abord à modéliser le problème d'interaction sol-structure posé sous ses différents aspects et à formuler la réponse dynamique de la fondation enterrée. La méthode proposée dans cette

étude est une méthode approximative au sol de renforcement.

Puis, quelques résultats sont fournis afin d'analyser l'influence du rapport d'enfoncement et l'effet du sol de renforcement sur la réponse de la fondation.

En dernier, pour mettre en exergue la précision de la méthode nous avons confronté les résultats obtenus à des résultats existants [6]. Cette confrontation a permis de conclure que la présente méthode est aussi rigoureuse que les méthodes hybrides. Cependant, il reste à étudier sa validité pour les hautes fréquences au de la valeur 3.0.

#### BIBLIOGRAPHIE

- [1] P. Dangla : "Couplage éléments finis - équations intégrales en élastodynamique et interaction sol-structure". Thèse de doctorat, ENPC de Paris, Rapport des laboratoires au LPC, 252p. 1990,
- [2] Z. Harichane : "Contribution à l'étude du phénomène d'interaction dynamique sol-structure compte tenu de l'effet d'un sol de renforcement". Thèse de Magister, Centre Universitaire de Chlef, 152p, Déc.1995
- [3] M. Iguchi : "An approximate analysis of input motions for rigid embedded foundations". Trans. Architect. Inst. Japan, N°315, pp.61-75. 1982,
- [4] J.E. Luco : "On the relation between radiation and scattering problems for foundations embedded in an elastic half-space". Soil Dynamics and Earthquake Engineering, N° 5, pp.97-101. 1986.
- [5] T. Sato, H. Kawase & K. Yoshida : "Dynamic response analysis of rigid foundations subjected to seismic waves by boundary element method approach". Proc. of 5th International Conference on Boundary Elements, pp. 765-774. 1989.
- [6] I. Takahashi, K. Yoshida & S. Nakai : "A study on impedance functions and input motions of imbedded foundations by a hybrid approach". Proceedings of the 10th World Conf. on Earth. Eng., Vol.3, Madrid, Spain, pp. 1625-1631. 1992.
- [7] K. Yoshida & I. Takahashi : "An approximate analysis method of embedded foundations considering backfilled soil". Proceedings of the 10th World Conf. on Earth. Eng., Vol.3, Madrid, Spain, pp. 1531-1536. 1992.