

## INFLUENCE DES PROPRIÉTÉS DU SOL SUR LA REPONSE DYNAMIQUE DES PORTIQUES

### INFLUENCE OF SOIL PROPERTIES ON DYNAMIC RESPONSE OF FRAMES.

Dhehbiya GUERDOUH<sup>(1)</sup>, Salah KHALFALLAH<sup>(2)\*</sup>, Widad BOUROUAIAH<sup>(1)</sup>

Réception : 21/11/2016

Acceptation : 11/09/2017

Publication: 31/01/2018

<sup>(1)</sup> Laboratoire de Génie Civil et Environnement (LGCE), Université de Jijel, Jijel, Algérie.

<sup>(2)</sup> Ecole Nationale Polytechnique de Constantine, Algérie. \*[Khalfallah\\_s25@yahoo.com](mailto:Khalfallah_s25@yahoo.com)

#### Résumé

Cette étude décrit l'analyse du comportement dynamique des portiques en considérant l'interaction sol-portique. La méthode des éléments finis est utilisée pour formuler le cadre théorique de cette approche. Pour atteindre notre objectif, la méthode directe est fondée pour modéliser les propriétés de l'interaction sol-structure.

La modélisation de l'interaction sol-portique est établie en substituant le sol de fondation par un système mécanique équivalent. Dans ce cas, le système de ressorts est utilisé représentant les rigidités du sol suivant les directions des degrés de liberté actifs au niveau du milieu interface. Trois raideurs ont été choisis : deux raideurs membranaires et un raideur de type flexion. Enfin, cette approche a conduit à l'étude de plusieurs paramètres, tels que : (1) la nature de sol, (2) la section de la fondation, (3) la hauteur du portique et (4) le nombre de travées suivant la direction sismique.

**Mots clés :** Propriétés du sol, interaction sol – structure, réponse dynamique, méthode des éléments finis.

#### Influence of the soil properties on dynamic response of frames

##### Abstract

This study describes the analysis of dynamic behavior frames taking into account the soil-frame interaction. The finite element method is used to formulate the theoretical frame of this approach. To reach our goal, the direct method is founded to model the properties of the soil-structure interaction.

The interaction soil-frame modeling is established substituting the soil of the foundation by an equivalent mechanical system. In this case, the system of springs is used representing soil stiffness according the active degrees of freedom at interface continuum. Three springs have been used; two membranous springs and a bending one. Finally, this approach deals to study many parameters, such as: (1) soil nature, (2) cross area of the foundation, (3) the frame height and (4) number of stories according to the seism direction.

**Key words:** Soil properties, soil- structure interaction, dynamic response, finite element method.

## 1. INTRODUCTION

L'objectif de ce travail consiste à montrer l'effet des propriétés du sol sur la réponse sismique des portiques. En général, les structures en portiques est le système de contreventement le plus utilisé en Algérie. Depuis le dernier séisme de 2003 <sup>(1)</sup>, une importance particulière est donnée aux projets de la construction en Algérie en vue d'améliorer leur comportement sismique. Pour cette raison, une version des règles parasismiques est apparue en 2003 portant des modifications des règles parasismiques de 1999 <sup>(2)</sup>. Dans ce concept, de nombreux travaux de recherche ont été menés dans le but d'atténuer les l'intensité sismique sur les constructions.

Universellement, la conception des ouvrages est fondée sur l'hypothèse d'encastrement de leurs bases. Cette hypothèse conduit à une augmentation importante de la période fondamentale de vibration des

structures. Gazetas [1] a montré que cet accroissement ne conduit pas à une bonne atténuation sismique des structures. L'introduction de la contribution des sols dans le comportement global des structures présente un effet considérable sur la réponse sismique [2-4]. En effet, la négligence ou la simplification de la modélisation de l'interaction sol-structure dans les codes parasismiques a conduit à une mauvaise conception structurale [5]. Dans ce cadre, Shakib [6] a montré que l'interaction sol-structure diminue le déplacement latéral et la torsion des bâtiments axisymétriques.

En plus, les règles parasismiques sont basées sur l'évaluation des trois premiers modes de vibration. La période fondamentale est le paramètre majeur dans la conception des structures en zones sismiques. Dans ce cas, l'évaluation de la période fondamentale est évaluée par les formules empiriques. Ghrib [7] et Tapia-Hernandez [8] ont montré que les formules empiriques données par les codes sont insuffisantes pour calculer les périodes de vibration des structures contreventées par des murs en béton armé.

Néanmoins, la réponse dynamique dépend de plusieurs facteurs, tels que : (1) les propriétés dynamiques de la structure, (2) l'intensité de l'excitation sismique, (3) les caractéristiques des sols et (4) les performances de l'interaction. Dans ce cadre, les propriétés mécaniques des sols jouent un rôle primordial sur la performance dynamique. Certes, l'interaction entre le sol et la fondation peut modifier d'une manière considérable les propriétés dynamiques de la structure [9-10].

## 2. METHODOLOGIE

### 2.1 - Modélisation de l'interaction sol-structure

L'interaction sol-structure modifie l'intensité sismique au niveau de la fondation et les propriétés dynamiques de la structure. Dans les problèmes d'interaction sol-structure, la performance de la modélisation du comportement de la structure et du sol est d'importance significative [11-12]. Pour cette raison, il est préféré de modéliser le comportement de la structure, du sol et du milieu interface d'une manière rigoureuse.

A l'état actuel, le comportement des structures est clairement présenté dans la littérature. Cette dernière illustre des modèles de base qui sont plus performants conduisant à des résultats pertinents. En revanche, les modèles de comportement des sols sont compliqués par leur nature de liaison avec la structure. En effet, la difficulté principale de la modélisation du comportement du sol est liée à la propagation des ondes sismiques traversant les différentes couches du sol. En plus, les sols de fondation sont connus par des propriétés spécifiques, telles que l'hétérogénéité, l'anisotropie et la dominance de la non linéarité matérielle.

À ce sujet, les modèles numériques d'analyse du comportement dynamique de l'interaction sol-structure peuvent être regroupés en deux catégories : (1) les méthodes directes et (2) les méthodes de sous-structures. La première catégorie est simple et peut être facilement implémentée dans les codes de calcul.

L'équation dynamique est donnée par

$$M \ddot{u} + C \dot{u} + Ku = f(t) \quad (1a)$$

Où  $M$ ,  $C$  et  $K$  sont respectivement les matrices masses, d'amortissement et de rigidité.  $f(t)$  est la force externe et  $u$  est le vecteur déplacement dont l'amortissement considéré est de type Rayleigh.

$$[C] = \alpha [M] + \beta [K]. \quad (1b)$$

La superstructure est composée d'éléments barres constitués par des poteaux et des poutres. L'élément barre est défini par deux nœuds avec trois degrés de liberté par nœud (Fig. 1).

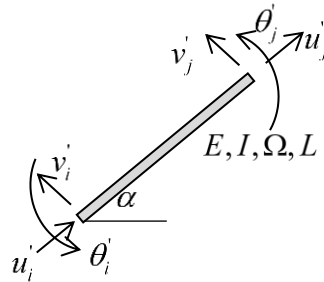


Fig. 1- élément barre  
Fig. 1- Bar element

La matrice de rigidité de l'élément barre formulée dans le repère local est :

$$[K_e'] = \begin{bmatrix} \frac{E\Omega}{L} & 0 & 0 & -\frac{E\Omega}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ -\frac{E\Omega}{L} & 0 & 0 & \frac{E\Omega}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix} \begin{matrix} u_2' \\ v_2' \\ \theta_2' \\ u_3' \\ v_3' \\ \theta_3' \end{matrix} \quad \text{La} \quad (2)$$

matrice de rigidité du portique peut être obtenue en assemblant les matrices de rigidité élémentaires du portique.

$$[K_s] = \sum_i [K_{ei}] \quad (3)$$

Le vecteur de degrés de liberté du portique s'écrit :

$$\{q\} = \sum_j \langle u_j \ v_j \ \theta_j \rangle^t \quad (4)$$

$u, v$  et  $\theta$  sont les déplacements du nœud  $j$ .

L'assemblage des matrices masses des éléments barres conduit à la construction de la matrice masse du portique.

La matrice masse d'un élément barre est donnée par

- l'élément fléchi :

$$[M'_e] = \frac{\rho \cdot \Omega L}{420} \begin{bmatrix} 156 & 22L & 54 & -13L \\ 22L & 4L^2 & 13L & -3L^2 \\ 54 & 13L & 156 & -22L \\ -13L & -3L^2 & -22L & 4L^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v'_i \\ \theta'_i \\ v'_j \\ \theta'_j \end{Bmatrix} \quad (5)$$

- l'élément membranaire :

$$[M'_e] = \frac{\rho \cdot \Omega \cdot L}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u'_i \\ u'_j \end{Bmatrix} \quad (6)$$

La matrice masse de la structure peut être obtenue par :

$$[M_s] = \sum_i [M'_{ei}] \quad (7)$$

La matrice d'amortissement du système est obtenue en combinant les équations (3) et (7).

$$[C_s] = \alpha \sum_i [M_s] + \beta \sum_i [K_s] \quad (8)$$

En substituant la relation (8) dans la relation (1a), on obtient :

$$[M_s] \left\{ \ddot{u} \right\} + (\alpha \sum_i [M_s] + \beta \sum_i [K_s]) \left\{ \dot{u} \right\} + [K_s] \{u\} = \{f(t)\} \quad (9)$$

La solution de l'équation différentielle (9) est le champ de déplacements conduisant à l'évaluation du champ des vitesses et celui des accélérations.

## 2.2 - Modélisation de l'interaction sol-structure

Dans ce travail, la modélisation de l'interaction sol-structure s'effectue en utilisant la méthode directe. La méthode des sous-domaines est basée sur le principe de décomposition du problème en étapes successives dont le traitement est plus simple. La réponse finale s'obtient en faisant appel au principe de superposition. Les étapes de cette méthode sont, dans une première étape, le mouvement du champ

libre conduisant au calcul de l'accélération  $\ddot{u}(t)$  au niveau du milieu interface [13-14]. Dans la deuxième étape, on calcule la réponse du système global (sol-fondation-structure) sous l'effet de l'accélération  $\ddot{u}(t)$ .

La méthode directe traite le problème de l'interaction sol-structure en sa globalité. Les déplacements du sol, de la structure et du milieu interface peuvent être simultanément déduits. La démarche de cette modélisation nécessite la définition de la force dynamique ou de l'intensité sismique, l'utilisation des éléments spéciaux aux frontières et une discrétisation fine sur les éléments finis du sol. Dans ce cas, le milieu interface peut être aussi discrétisé en éléments finis avec leurs propres caractéristiques mécaniques.

Dans ce travail, la modélisation de l'interaction sol-portique est établie en utilisant les fonctions d'impédance qui sont exprimées en termes de rigidité suivant les degrés de liberté actifs au milieu d'interface (Fig. 2).

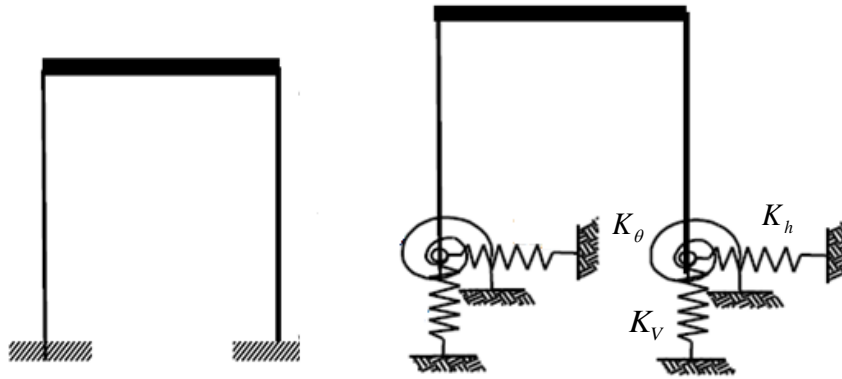


Fig. 2 - Modélisation de l'interaction sol-structure.

Fig. 2 - Soil-structure interaction modelling

Le sol de fondation est substitué par des ressorts de raideurs différentes disposés suivant les trois degrés de liberté aux nœuds d'encastrement.

### 2.2.1 - Modélisation de la structure

Le comportement des portiques est élastique linéaire. Il est composé de poutres et de poteaux. Les matrices de rigidité, de masse et d'amortissement de chaque élément sont respectivement données par les relations (2), (5-6) et (8).

### 2.2.2 - Modélisation du sol

Le sol est supposé homogène et ayant un comportement élastique linéaire. Il est modélisé par des ressorts de raideurs différentes suivant les directions des degrés de liberté actifs au niveau du milieu interface. Les coefficients de rigidité des ressorts donnés par les expressions (10) sont développés par Newmark [15] pour les fondations rectangulaires. Les valeurs des coefficients unidimensionnels  $\beta_h$ ,  $\beta_v$  et  $\beta_\theta$  (10) sont tirées des abaques établis en fonction du rapport  $\frac{b}{a}$  et de la direction sismique [15].

$$K_h = 2(1+\nu)G_s \beta_h \sqrt{\Omega} \quad (10-1)$$

$$K_v = \frac{G_s}{1-\nu} \beta_v \sqrt{\Omega} \quad (10-2)$$

$$K_\theta = \frac{G_s}{1-\nu} \beta_\theta b^2 \sqrt{\Omega} \quad (10-3)$$

Avec  $\Omega = a.b$  est la surface de la semelle de dimension a et b ; G est le module de cisaillement du sol ;  $\beta_h$ ,  $\beta_v$  et  $\beta_\theta$  sont des paramètres dépendant du rapport  $\frac{b}{a}$  et  $\nu$  le coefficient de Poisson (Tab. 1)

Tab. 1 Valeurs de rigidité des ressorts.

Tab. 1 Stiffness values of springs

Type du sol		Très meuble	Meuble	Ferme	Très ferme
Vitesse d'onde de cisaillement $V_s$ (m/s)		100	200	400	800
Masse volumique $\rho$ (KN/m <sup>3</sup> )		18	20	22	22
Coefficient de Poisson $\nu$		0.45	0.4	0.3	0.3
a=b	$K_h$ (10 <sup>6</sup> KN/m)	1.04	4.48	18.30	73.20
	$K_v$ (10 <sup>6</sup> KN/m)	1.43	5.84	22.00	88.10
	$K_\theta$ (10 <sup>6</sup> KN/m)	1.31	5.33	20.10	80.50
a/b=2	$K_h$ (10 <sup>6</sup> KN/m)	1.38	5.36	22.12	97.33
	$K_v$ (10 <sup>6</sup> KN/m)	2.03	7.46	28.44	125.16
	$K_\theta$ (10 <sup>6</sup> KN/m)	2.22	8.14	31.03	136.54

La substitution de l'équation (10) dans la relation (9) conduit à la formulation de l'équation de comportement du système portique-sol.

### 2.3 - L'analyse numérique

Le portique est composé d'une seule travée de 5m de portée et de 3m de hauteur. La section transversale des poteaux et des poutres est identique de dimension 0.30 x 0.30 m<sup>2</sup>. Le portique est soumis à une force dynamique appliquée au nœud du sommet suivant le sens horizontal (Fig. 3). La durée d'application de la force dynamique est estimée à t = 37 s.

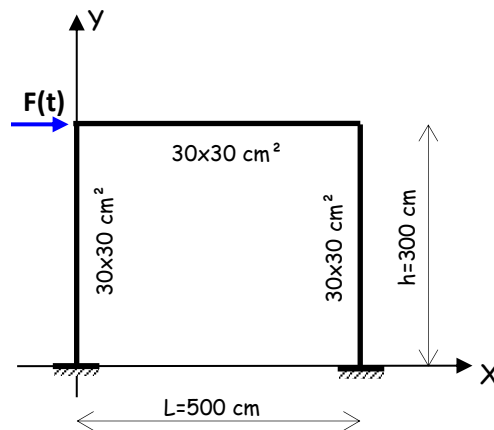


Fig. 3 - Le portique étudié

Fig. 3 - Studied frame

#### 2.3.1 - Influence de la nature du sol

La simulation numérique du comportement dynamique de l'interaction sol-portique est effectuée en utilisant un programme MATLAB développé pour ce cas-là. La figure 4 montre le déplacement horizontal en fonction du temps pour différents types de sol.

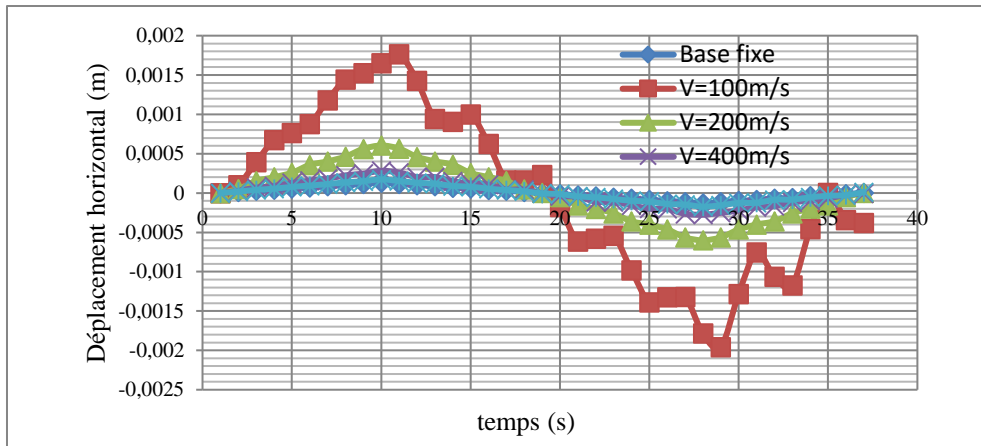


Fig. 4 - Déplacement horizontal en fonction du temps.

Fig. 4 - Horizontal displacement vs. time

La figure 4 présente l'influence de la nature du sol caractérisée par la vitesse de la propagation d'onde. Lorsque la vitesse de propagation d'onde de cisaillement est importante, le déplacement horizontal est faible. La réponse du portique à base fixe montre une bonne atténuation dynamique. D'une façon générale, le déplacement dynamique dépend de la nature de sol de fondation.

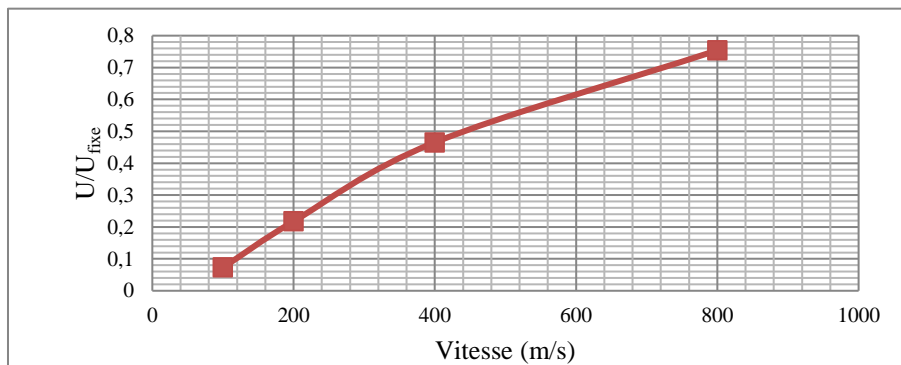


Fig. 5 :  $\frac{U}{U_{fixe}}$  en fonction de la vitesse de propagation d'onde

Fig. 5 :  $\frac{U}{U_{fixe}}$  vs. Propagation wave velocity

La figure 5 montre la relation entre la vitesse de propagation et le déplacement relatif  $\frac{U}{U_{fixe}}$ . On ne constate qu'une relation biunivoque non linéaire entre la vitesse de propagation d'onde et le déplacement relatif. On constate aussi que lorsque la vitesse d'onde est assez importante, le déplacement horizontal devient assez faible.

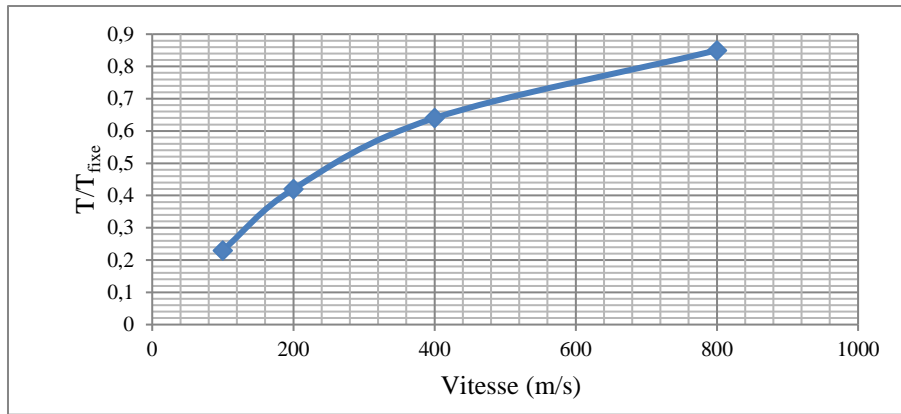


Fig. 6 :  $\frac{T}{T_{fixe}}$  en fonction de la vitesse de propagation d'onde

Fig. 6 :  $\frac{T}{T_{fixe}}$  vs. propagation wave velocity

La figure 6 montre la relation entre la période relative en fonction de la nature du sol. Cette courbe est identique à la précédente et permet de dire que lorsque la vitesse de propagation augmente la période fondamentale relative  $\frac{T}{T_{fixe}}$  augmente aussi. Une différence est remarquable entre un sol très ferme et un sol très meuble ou flexible. En effet, lorsque le sol de fondation est rigide, il correspond à une diminution de la période fondamentale.

#### 4.2 - Influence de la nature de fondation

Le changement de la nature de fondation conduit à une variation de la raideur des ressorts. Les expressions établies par Newmark [15] donnant les valeurs de  $K_h$ ,  $K_v$  et  $K_\theta$  peuvent être calculées pour une section circulaire de rayon R comme suit [16] :

$$K_h = \frac{16(1-\nu)ER}{(7-8\nu)(1+\nu)}$$

$$K_v = \frac{2ER}{(1-\nu^2)}$$

$$K_\phi = \frac{4ER^3}{3(1-\nu^2)}$$

$$K_\theta = \frac{8ER^3}{3(1+\nu)}$$



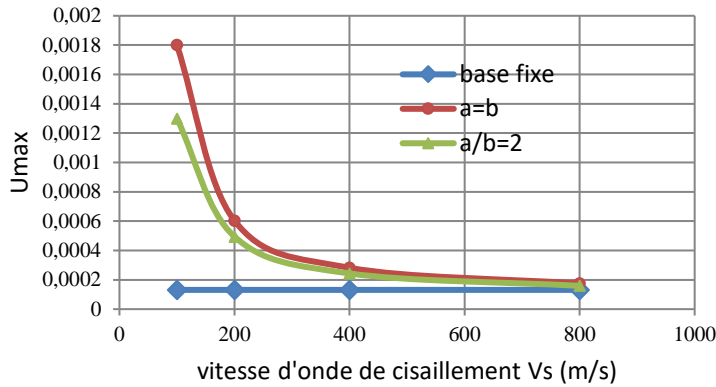


Fig. 7 Déplacement en fonction de la nature de la semelle

Fig. 7 Displacement vs. sole nature

Le déplacement horizontal maximum en fonction de la nature du sol et la nature de la semelle est montré sur la figure 7. D'une part, cette figure montre le déplacement horizontal avec et sans interaction sol-portique et présente l'effet de la nature de la semelle sur le champ de déplacement horizontal, d'autre part.

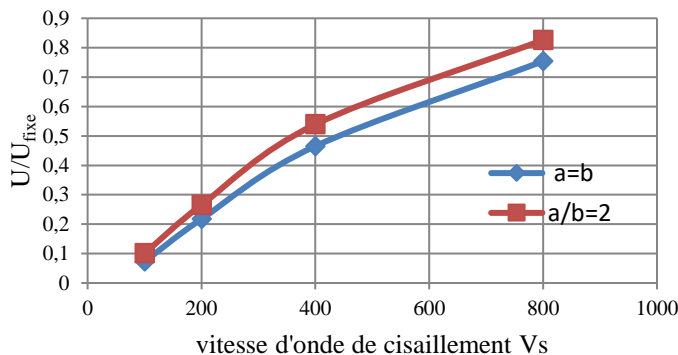


Fig. 8 - Effet de la nature de la semelle

Fig. 8 - Sole nature effect

Le rapport du déplacement maximum par rapport à celui d'une base encastrée en fonction de la nature du sol et celle de la semelle est donné par la figure 8. Les résultats obtenus montrent que la semelle rectangulaire est plus appropriée vis-à-vis de la semelle carrée.

#### 4. 3 Influence de l'élévation de la structure

Les dimensions géométriques et les propriétés mécaniques de l'exemple précédent sont maintenues. Cette section présente l'influence du nombre de niveaux sur la réponse dynamique du portique. Pour ce cas-là, trois cas ont été étudiés : il s'agit d'un portique à 2 niveaux et à 3 niveaux.

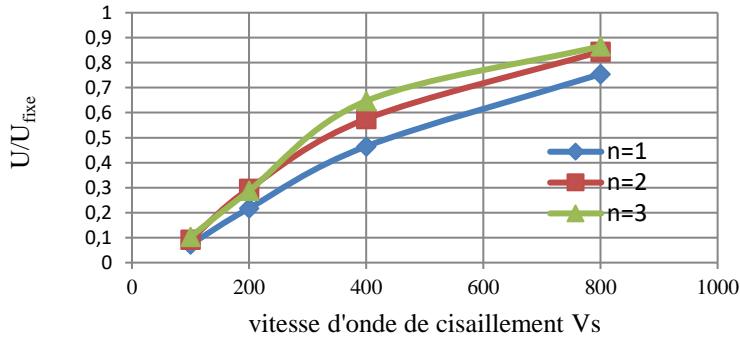


Fig. 9 Déplacement relatif en fonction de la vitesse d'onde

Fig. 9 Relative displacement vs. wave velocity.

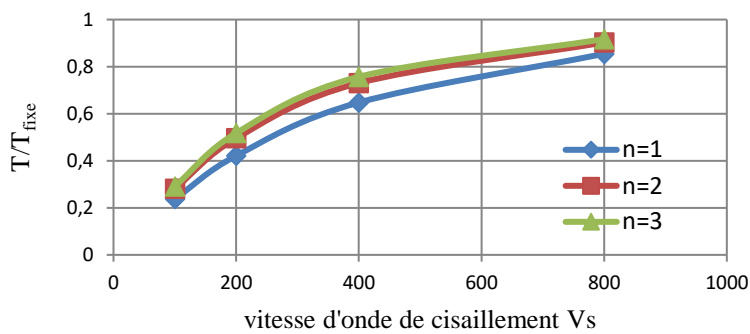


Fig. 10 - Période relative en fonction de la vitesse d'onde

Fig. 10 - Relative period vs. wave velocity

Les figures 9 et 10 montrent respectivement le déplacement relatif et la période relative en fonction de la nature du sol de fondation et le nombre de niveaux du portique. Les deux figures montrent que lorsque le nombre de niveaux croît le déplacement relatif et la période relative diminuent.

#### 4.4 - Sollicitations internes

Les figures 11-13 montrent respectivement le diagramme de l'effort tranchant, de l'effort normal et du moment de flexion dans les poteaux du portique. Les figures 11 et 13 montrent les montants du portique quand ils sont soumis au même effort de cisaillement et au même moment de flexion. La figure 12 montre que les montants du portique sont soumis à des efforts normaux identiques mais de signes différents.

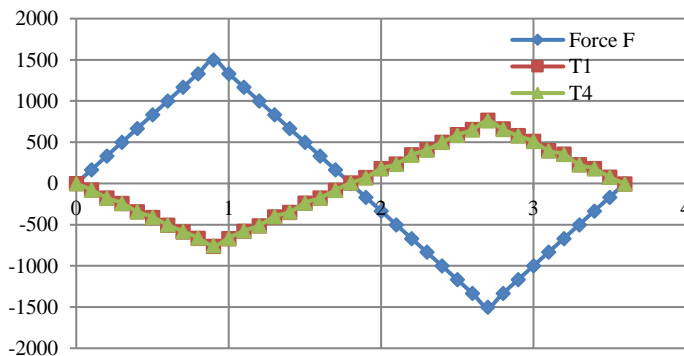


Fig. 11 - Effort tranchant à la base

Fig. 11 - Base shear force

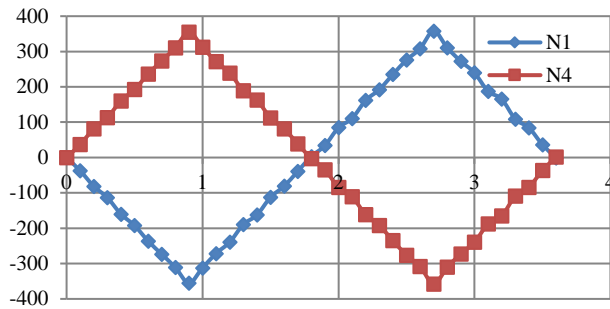


Fig. 12 - Effort normal à la base  
Fig. 12 - Base normal force

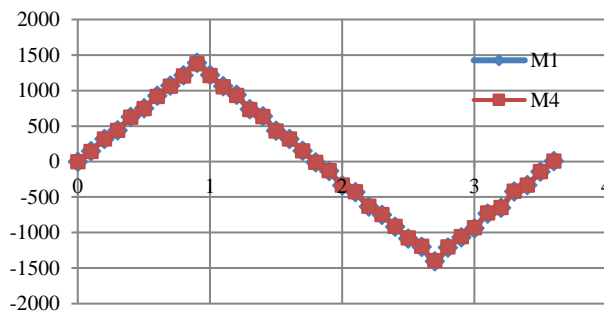


Fig. 13 - Moment de flexion à la base  
Fig. 13 - Base bending moment

## 5. Conclusion

Cette étude présente la simulation numérique de l'interaction sol-portique sur la réponse des portiques soumis à des forces dynamiques. Les conclusions pouvant être tirées de ce travail sont :

- la nature du sol décrite par la vitesse de propagation d'onde influe considérablement sur la réponse dynamique des portiques et sur le milieu interface entre la fondation et le portique ;
- Le déplacement relatif et la période relative du portique encastré et du portique à base flexible dépendent de la nature du sol de fondation. ils diminuent en fonction de l'amélioration des propriétés mécaniques des sols de fondation ;
- Le déplacement horizontal maximum dépend de la catégorie de la fondation. La fondation rectangulaire montre une bonne aptitude dynamique vis-à-vis de la fondation carrée ;
- Le déplacement relatif et la période fondamentale relative dépendent de l'élévation du portique ;
- Les sollicitations internes au niveau du milieu interface sont liées à la force dynamique et elles se répartissent proportionnellement aux facteurs de rigidité. Les montants d'un portique sont soumis au même effort tranchant et même moment de flexion mais ils sont sollicités par différents efforts normaux.

## Références

- [1] Gazetas G. and Mylonakis G., Seismic soil-structure interaction: beneficial or detrimental?, *J. Earthquake Engrg.*, Vol. 4, N° 3 (2000) 277-301
- [2] Torabi H., Rayhani M.T., Three dimensional Finite Element modeling of seismic soil-structure interaction in soft soil, *Computers and Geotechnics*, Vol. 60 (2014) 9-19.
- [3] Sall O.A., Fall M., Berthaud Y. , Ba M., Ndiaye M., Influence of the Soil-Structure Interaction in the behavior of mat foundation, *Open Journal of Civil Engineering*, 4 (2014) 71-83.



- [4] Baragani R., Dyavanal S.S., Non linear static analysis of multistory RC buildings considering soil structure interaction, *IJARSE*, Vol. 3 (7) (2014) 296-307.
- [5] Jayalekshmi B.R., Chinmayi H.K., Effect of soil flexibility on seismic force evaluation of RC framed buildings with shear wall: A comparative study of IS 1893 and Eurocode 8, *Journal of Structures* (2014) 1-15
- [6] Shakib H., Fuladgar A., Dynamic soil structure interaction effect on the response of asymmetric building, *Soil dynamic and earthquake engineering*, 24 (2004) 379-388.
- [7] Ghrib, F., and Mamedov, H., Period formulas of shear wall buildings with flexible bases, *J. of Earthquake Engrg.Struct.Dyn.*, 33 (2004) 295-314.
- [8] Tapia-Hernández E, Tena-Colunga A., (2013), Code-oriented methodology for the seismic design of regular steel moment resisting braced frames, *Earthquake Spectra*, Vol. (2013).
- [9] Smith-Pardo J., Design aids for simplified nonlinear soil–structure interaction analyses, *Engineering Structures* 34 (2012) 572–580.
- [10] Venanzi I., Salciarini D., Tamagnini C., (2014), The effect of soil–foundation–structure interaction on the wind-induced response of tall buildings, *Engineering Structures* 79 (2014) 117–130.
- [11] Garg V., Hora M.S., A review on interaction behaviour of structure–foundation–soil system, *In. J. of Engrg. Research and application*, V. 2(6) (2012) 639-644.
- [12] Worku A., Soil-structure interaction provisions. A potential tool to consider for economical seismic design of building?, *Journal of the South African institution of civil engineering*, Vol. 56(1) (2014) 54-62.
- [13] Beltrami C., Lai C.G., Pecker A., Seismic soil structure interaction in large diameter shaft foundation, Research report N° Rose 2006/04, (2006), Rose school, Pavia, Italy.
- [14] Mylonakis G., Nikolaou S, Gazetas G., Footing under seismic loading : Analysis and design issues with emphasis on bridge foundations, *Soil dynamic and earthquake engineering*, 26 (6) (2006) 824-853.
- [15] Newmark N.M., Rosenblueth E., (1971), *Fundamentals of earthquake engineering*. PrenticeHall, Englewood Cliffs, 1971.
- [16] Tamahoult M., Branci T., Influence de l'interaction sol – structure sur la réponse dynamique des structures des bâtiments.5 Symposium international sur la construction en zone sismique, SICZE-2010.
- <sup>(1)</sup> Règles Parasismiques Algériennes 2003 (RPA2003), D.T.R.B.C 2 48, Algérie, OPU 2003.
- <sup>(2)</sup> Règles Parasismiques Algériennes 99 (RPA99), D.T.R.B.C 2 48, Algérie, OPU 1999.