

Study of the behavior of bridges under seismic loads considering soil-structure interaction

Etude du comportement des ponts sous charges sismiques en tenant compte de l'interaction sol-structure

Mohamed Baheddi^{1✉}, Youcef Youb²

¹ Département de Génie Civil, Institut G.C.H.A., Laboratoire L.R.N.A.T., Université de Batna, Algérie

² Entreprise Nationale de Génie Civil et Bâtiment, Département Technique, Hassi Messaoud, Algérie

Received 04 September 2014

Received in revised form 17 February 2015

Accepted 26 February 2015

Published online: 20 March 2015

Keywords

Viaduct

Dynamic Analysis

Soil-Structure Interaction

Spring Model

Finite element Model

Abstract: This work deals with the seismic stability of bridges considering the soil structure interaction, which is one of the most important phenomena in the field of earthquake engineering that can influence the behavior of the structure and thus its vulnerability. The main objective of this study is to see the influence of soil-structure interaction on the linear dynamic behavior of structures using two modeling approaches of the surrounding soil applied to the case of the viaduct 185.1 OA Bouira (Algeria). A second objective is to highlight the impact on the seismic response, when using different dynamic analysis methods, for the evaluation of the seismic behavior of concrete structures with boundary conditions applied as rigid or flexible to their foundations. The numerical simulation, carried out by using SAP2000 and based on dynamic computing finite element model, allowed to analyze soil-structure systems considering the effects of interaction by the response spectra method and the time history analysis. A parametric study was conducted to better understand the dynamic behavior of the bridge.

© 2015 The authors. Published by the Faculty of Sciences & Technology, University of Biskra. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>)

Résumé : Ce travail traite de la stabilité sismique des ponts avec la prise en considération de l'interaction du sol avec la structure (ISS), un des phénomènes les plus importants dans le domaine du génie parasismique pouvant influencer le comportement de l'ouvrage et donc sa vulnérabilité. L'objectif phare de cette étude est de voir l'influence de l'interaction sol-structure sur le comportement dynamique linéaire des ouvrages d'art suivant deux approches de modélisation du sol environnant appliquées au cas du viaduc O.A 185.1 de Bouira (Algérie). Un deuxième objectif est de mettre en exergue l'incidence sur la réponse sismique, en cas d'utilisation de différentes méthodes d'analyse dynamique, pour l'évaluation du comportement sismique des ouvrages d'art en béton avec des conditions aux limites rigides ou flexibles appliquées à leurs fondations. Pour la simulation numérique, un modèle de calcul dynamique par éléments finis est présenté en vue d'analyser par la méthode des spectres de réponse et l'analyse temporelle les systèmes sol-structure en tenant compte des effets d'interaction à l'aide du code de calcul SAP2000, simple à l'utilisation et largement connu. Une étude paramétrique a été effectuée afin de mieux appréhender le comportement dynamique du pont.

Mots clés : Viaduc, analyse dynamique, interaction sol-structure, modèle ressorts, modèle éléments finis.

1. Introduction

Depuis des décennies, les catastrophes naturelles surviennent cycliquement. Néanmoins leur gestion s'est toujours inscrite dans la fatalité et le caractère catastrophique. Malgré la prévention de ces cas, on peut travailler en amont afin de limiter au maximum ces dégâts. Le macro objectif de notre travail est de cerner le mieux possible tous les facteurs influençant et rentrant dans l'équation structure-site-sollicitations-méthodes d'analyse. Dans un monde en pleine croissance démographique, le risque d'avoir d'importants dégâts humains et matériels lors des séismes est en constante augmentation. En vue d'atténuer ce risque, outre l'aspect sociologique, l'aspect technique et donc la bonne connaissance du comportement des structures sous sollicitations sismiques, est très importante. Toutefois, l'analyse de leurs comportement peut bénéficier d'une littérature abondante sur le comportement des structures sous charges sismique (Priestley et al 1996 ; Rober et Dowell 2004 ; Matsagar et Jangid 2006 ; Mwafy et al. 2008).

Alors que les infrastructures de ponts en Algérie sont vieillissantes, les prescriptions relatives à la conception parasismique sont de plus en plus sévères dans la norme Algérienne concernant le calcul des ouvrages d'art et notamment les ponts. Dans ce contexte, il devient primordial de vérifier certains ouvrages à la lumière du nouveau règlement et avec la prise en considération de tous les facteurs jugés influents sur le comportement de ces ouvrages.

Le travail présenté dans cet article consiste à mettre en relief les effets de l'utilisation de différentes méthodes d'analyse dynamique appliquées sur différentes approches de modélisation en prenant en considération l'Interaction sol-structure. Ce travail est illustré par une étude d'un pont existant en l'occurrence le viaduc O.A 185.1 longeant le tracé de l'autoroute Est-Ouest et franchissant Oued R'khem au niveau de la wilaya de Bouira en Algérie (figures 1 et 2). Le viaduc principal est composé de trois travées de 110 m, 200 m et 110 m, soit une longueur de 420 m. Il est constitué de tabliers de types caissons à hauteurs variables construit par encorbellement successif, le profil de l'intrados étant parabolique. Le tablier est de type caisson à hauteur variant de 12 m sur appui à 4.60 m à clé. La longueur des voussoirs varie de 3 m côté appui à 5 m côté clé.

✉ Corresponding author. E-mail address: baheddi_md@yahoo.fr



Fig. 1. Viaduc de Bouira (Algérie) en construction.

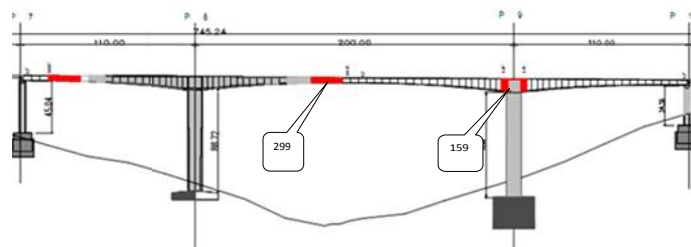


Fig. 2. Coupe longitudinale du viaduc Principal.

2. Modélisation

2.1. Modélisation de l'ouvrage

Le pont est modélisé par une structure monolithique avec des propriétés linéaires, élastiques et iso tropiques. Le sol est modélisé comme un corps multicouches avec un matériau élasto-plastique et anisotrope. L'élément solide linéaire à 08 nœuds nécessite un maillage fin pour donner des déplacements réalistes. Pour les méthodes dynamiques utilisées, le modèle en éléments finis est essentiellement identique à celui développé dans l'analyse statique, sauf que les effets d'interaction sol-structure sont pris en considération. Le sol est modélisé comme une structure monolithique représentée par une ou plusieurs couches en éléments finis. Les effets de l'interaction sont pris en considération par une représentation en ressorts ou par une modélisation directe par éléments finis. L'ouvrage est modélisé par le logiciel SAP 2000, (le modèle avec fondation rigide (encastrement) comprend : 1476 nœuds, 174 éléments poutre et 1400 éléments plaque).

2.2. Modélisation de l'interaction du sol avec la structure (ISS)

Différentes méthode existent pour prendre en compte l'ISS. Elles sont décrites et détaillées dans (Pecker 1984 ; Wolf 1988 ; Kawashima et al. 1994 ; Chopra 1995 ; Tongaokar et Jangid 1998 ; Munirudrappa et Lyengar 1999 ; Li et al. 2009 ; Frank 2014).

2.2.1 Modèle en éléments finis (méthode directe)

Les méthodes directes consistent à résoudre directement l'équation de la dynamique régissant le comportement du système (Sol+Fondation+Structure). La formulation en éléments finis est classique : certaines conditions doivent cependant être respectées. La transmission correcte des hautes fréquences impose une dimension maximale aux éléments, au plus égale à une fraction de la longueur d'onde correspondante. On retient généralement une valeur comprise entre 1/8 et 1/5 de la longueur d'onde. La formulation de ces frontières fait intervenir des termes dépendant de la fréquence; elles ne peuvent donc être utilisées que pour des résolutions dans le domaine fréquentiel.

Il n'existe pas de frontières consistantes représentant l'effet du semi-espace sous-jacent au modèle; aussi, la frontière inférieure du modèle est-elle supposée rigide. En la choisissant suffisamment profonde, les phénomènes de réflexions sur cette frontière deviennent négligeables. Les dimensions du modèle du sol doivent être déterminées en fonction du rapport entre le module de déformation du sol et le module de déformation du béton. Pour un rapport supérieur ou égal à l'unité comme dans notre cas, un maillage étendu sur la hauteur du pont dans toutes les directions peut être suffisant. Le sol est modélisé en éléments solides à 08 nœuds et son comportement est supposé élastique linéaire.

2.2.2 Modèle en ressorts (méthode de sous structures)

Il vise à décomposer le problème sous forme d'une somme de sous problèmes plus simples à résoudre (Figures 3 et 4). Dans le cas des fondations rigides, cette méthode consiste à utiliser le principe de superposition de (Kausel et al. 1978, Hatzigeorgiou et al. 1999 ; Clough et al. 2003 ; Mellal et al. 2007 ; Grange 2003). Dans cette approche, où les coefficients d'impédance sont pris indépendants de la fréquence, le sol de fondation est simplement modélisé à l'aide de ressorts et d'amortisseurs.

2.3 Méthodes d'analyse

Dans la présente étude, l'effet de l'Interaction sol-structure sur la réponse sismique des ponts a été mis en relief à travers l'application de différentes méthodes d'analyse dynamiques sur différents modèles de sol avec variation paramétriques de E_{sol} et l'application de chargements mobiles.

2.3.1. Analyse spectrale

Dans la méthode d'analyse dynamique par la superposition modale des spectres de réponse, on a utilisé le spectre de réponse du séisme de Boumerdès (Séisme de Boumerdès / Algérie, 21 mai 2003 à 19:44:40.00 ; Site : Dar El Beida ; GPS latitude : 36,71°N ; Gps longitude : 3,20° E ; Hypocentre : 0,0 n, 0,0e, h = 10,0km. MI = 6,80, amortissement = 0,560, durée = 27,675) et ce, pour calculer la réponse maximale du pont.

2.3.2. Analyse temporelle

La charge sismique donnée pour une analyse temporelle consiste en trois composantes d'accélération du séisme de Boumerdès. Les maximums des déplacements nodaux temporels et des contraintes élémentaires sont calculés par une intégration directe des équations de mouvement. La méthode implicite est choisie, car elle est inconditionnellement stable.

3. Résultats de l'analyse

3.1. Analyse modale

Une analyse modale dite de validation est conduite pour vérifier la stabilité du modèle.

A travers les résultats de l'analyse modale, on peut constater que pour les trois premiers modes, les périodes sont de l'ordre de 2,886 s ; 1,420 s et 1,348 s conséquences d'une prépondérance de mouvements transversaux pour les deux premiers modes et d'un mouvement vertical pour le 3^{ème} mode correspondant aux formes modales de vibration.

3.2. Interaction Sol Structure

3.2.1. Influence du type de fondation sur l'I.S.S.

Au vu de ces résultats, on peut noter l'augmentation des périodes du modèle ressorts et du modèle éléments finis par rapport au modèle d'encastrement à la base ($T_{\text{rigide}} = 2,886$ s ; $T_{\text{ressorts}} = 2,929$ s et $T_{\text{éléments finis}} = 2,908$ s). Il s'agit d'une mutuelle influence entre le pont et le sol d'assise (Figure 5).

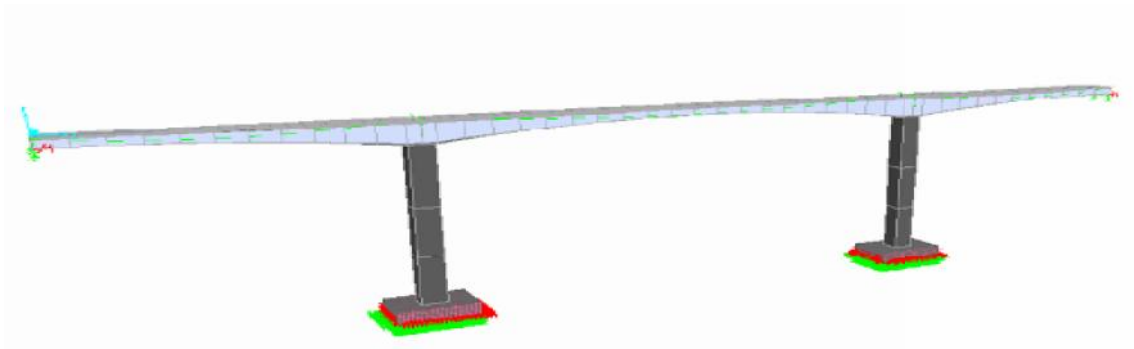


Fig. 3. Le modèle en ressorts par SAP 2000.

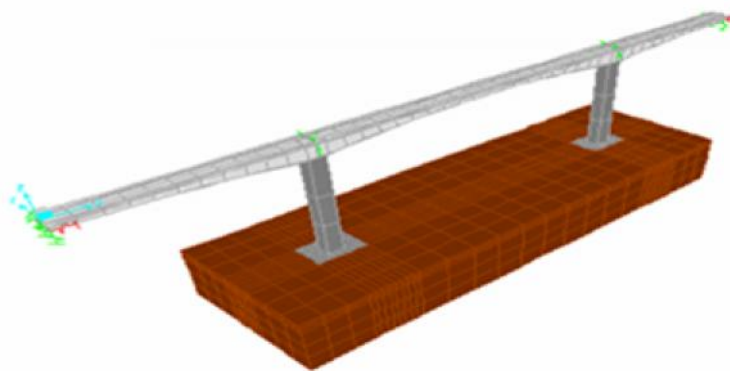


Fig. 4. Le modèle en éléments finis par SAP2000.

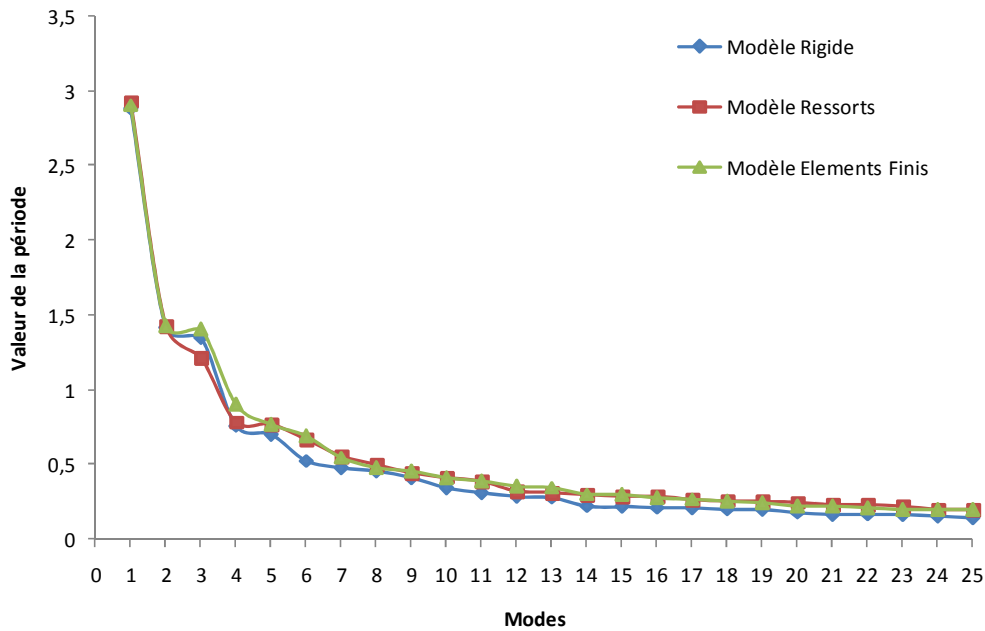


Fig. 5. Variation de périodes des modèles : Rigide, Ressorts et éléments finis.

3.2.2. Influence de la rigidité du sol sur l’I.S.S.

Afin de voir l’influence de la rigidité du sol, plusieurs analyses ont été menées en faisant varier le module d’élasticité du sol de 200 MPa (sol très ferme) à 100, 50, 20, 10 et 5 MPa (Sol très meuble).

Au vu de ces résultats, on constate à ce stade d’analyse que pour des rigidités élevées (i.e : $E > 50$ MPa), la période augmente de 4,8 % pour le modèle en ressorts et 2 % pour le modèle en éléments finis, Figures 6 et 7, dans ce cas l’Interaction sol-structure est négligeable et le calcul avec l’hypothèse de l’encastrement à la base peut être retenu. Pour les valeurs de ($E < 50$ MPa), la période fondamentale augmente de 46 % pour le modèle en ressorts et de 68 % pour le modèle en éléments finis par rapport à celle obtenue avec l’hypothèse d’un encastrement à la base, et dans ce cas l’Interaction Sol Structure est très significative et donc ne doit en aucun cas être négligée.

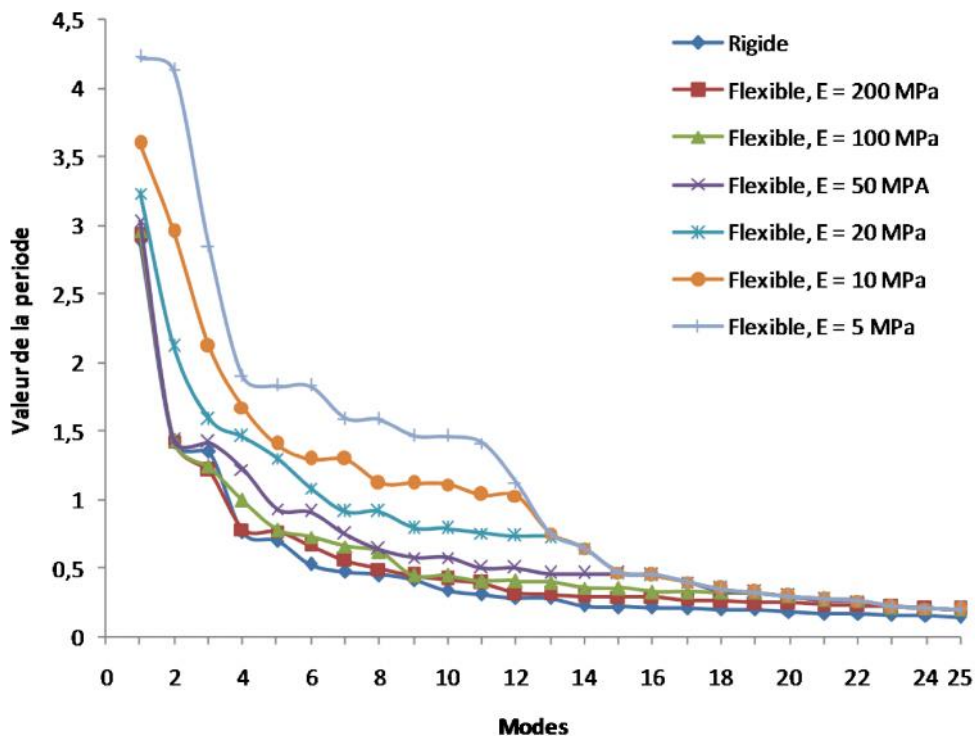


Fig. 6. Variation de la période en fonction de la rigidité du sol model ressorts.

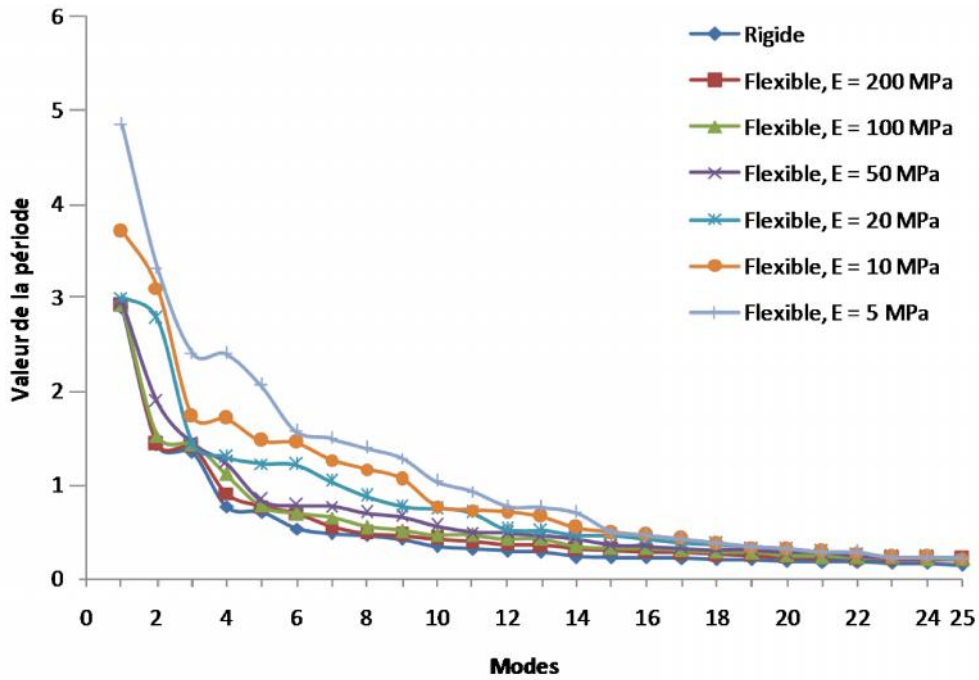


Fig. 7. Variation de la période en fonction de la rigidité du sol modèle éléments finis.

3.2.3. Influence du type de méthode d’analyse dynamique sur l’I.S.S.

Pour l’analyse des résultats issus des deux méthodes précédemment citées, on a choisi pour voir l’évolution des déplacements un point de référence en l’occurrence le nœud 159 qui se situe juste sur la dalle au-dessus de l’appui et le deuxième nœud 299 qui se situe sur la dalle au niveau de la section à clé (à mi-travée), et qui s’est soldée par l’aboutissement aux déplacements consolidés dans les graphes des figures 8 et 9.

On notera que l’impact de l’interaction sol-structure sur le comportement dynamique du pont se traduit par une augmentation sensible des déplacements dus aux séismes d’intensités élevées ; la composante sur x et celle sur z et notamment sur cette dernière, par contre pour les séismes d’intensités modérées (composante y), on remarque que pratiquement il n’y a pas d’influence significative.

Les déplacements et les contraintes maximums sont présentés dans les tableaux 1 et 2.

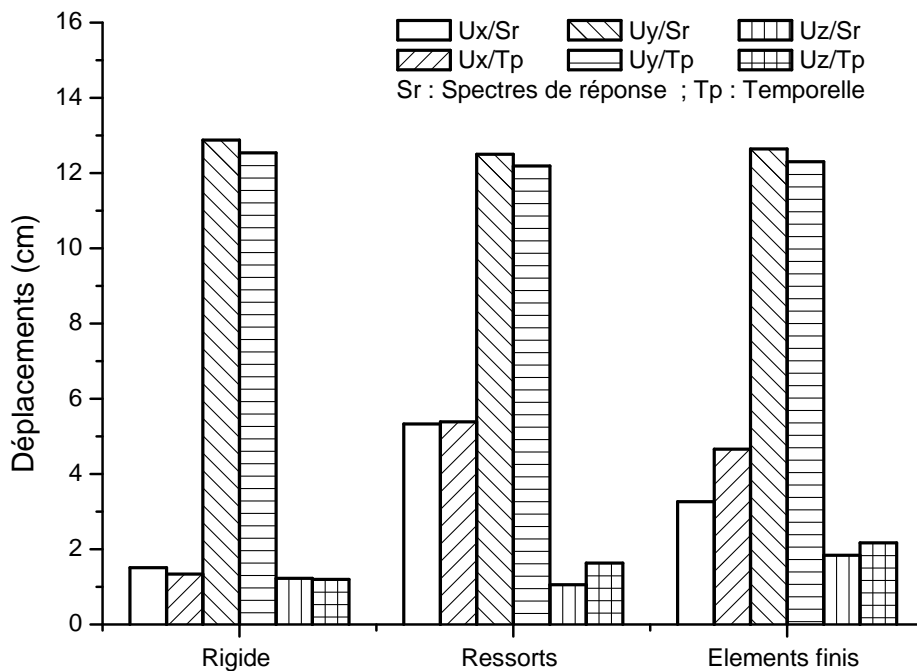


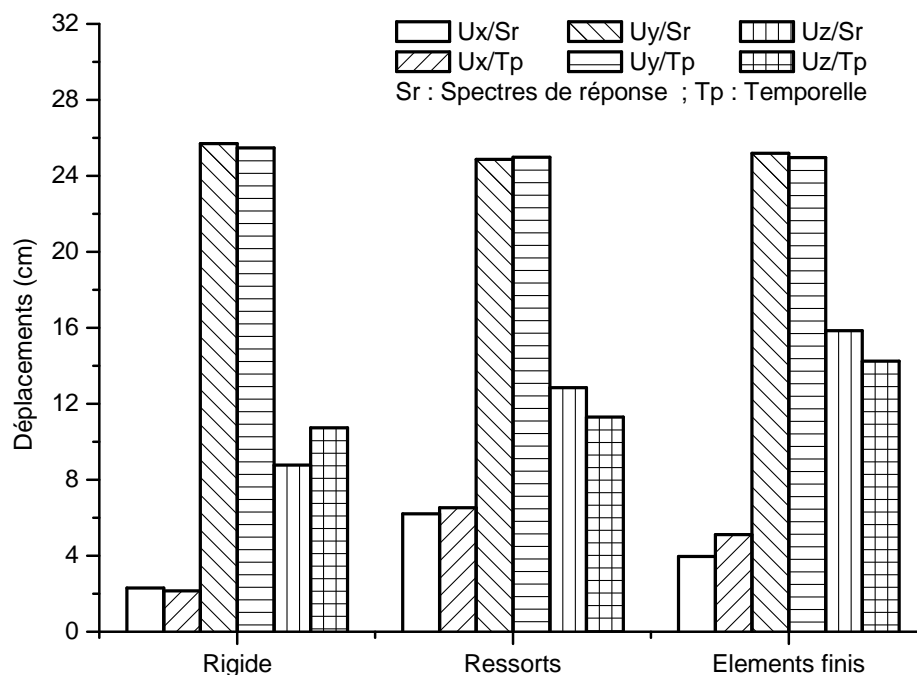
Fig. 8. Déplacements du nœud 159 selon les deux méthodes spectrale et temporelle dans les trois directions.

Tableau 1. Déplacements maximums dans le pont.

Analyse	Déplacement (cm)	Fondation rigide	Fondation flexible	
			ressorts	éléments finis
Spectrale	Ux	3,5	7,5	5,6
	Uy	25,9	25,1	25,4
	Uz	9	13	16
Temporelle	Ux	3,7	8,3	7,1
	Uy	25,8	25,3	25,3
	Uz	11,6	15,6	15,4

Tableau 2. Contraintes maximales dans le pont.

Analyse	Fondation rigide	Fondation flexible	
		ressorts	éléments finis
spectrale	15 428,01	16 443,35	14 768,07
temporelle	17 578,16	22 807,96	22 046,70

**Fig. 9.** Déplacements du nœud 299 Selon les deux méthodes et dans les trois Directions.

La récapitulation des déplacements tel que décrite, i.e. : en général les déplacements selon l'analyse spectrale sont inférieurs aux déplacements selon l'analyse temporelle, nous renseigne sur une meilleure convergence à l'exactitude de la méthode d'analyse temporelle par rapport à la méthode spectrale, du fait que cette dernière est censée se focaliser uniquement sur les maxima, alors que la première décrit un historique temporel des différentes grandeurs, Tableau 1.

D'après les résultats des contraintes, Tableau 2, on peut confirmer le respect de la logique par rapport au modèle éléments finis qui a tendance à mieux simuler le comportement du sol en donnant des valeurs plus restrictives comparativement aux valeurs ayant trait à l'approche du modèle ressorts.

3.2.4. Influence du type de chargement mobile sur l'I.S.S.

En chargement mobile, on notera que l'influence de l'Interaction sol-structure, mais cette fois-ci dans le sens favorable notamment pour les convois exceptionnels D et E qui sont caractérisés par leurs importants tonnages et c'est ce qui a probablement atténué l'influence du sol d'assise sur le pont, Tableau 3.

Tableau 3. Déplacements maximums (Charges mobiles).

	Déplacement (cm)	Fondation rigide	Fondation flexible	
			ressorts	éléments finis
Analyse des charges mobiles	Bc	2,9	2,6	3
	Mc120	1,6	1,4	1,7
	D	6,6	3	3,2
	E	9,9	4,5	4,8

4. Conclusions

Les analyses faites ont démontré que pour des conditions d'appuis rigides, les maximums des fréquences sont surestimés d'où des déplacements sous-estimés par rapport à ceux d'appuis flexibles. Ceci nous renvoie à la phase conception parasismique des structures de ponts qui ne doit en aucun cas omettre le phénomène interactif Sol- Structure, un effet qui a été ignoré lors des études dans le passé. Le calcul des différentes grandeurs maximums ignore également les effets souvent néfastes du mouvement du terrain environnant qui à son tour est influencé par plusieurs facteurs liés entre autres aux conditions géologiques et géotechniques du site, au modèle du sol choisi, à l'intensité du séisme ainsi qu'aux méthodes de calcul.

L'influence considérable de la rigidité du sol d'assise ayant un impact avéré sur l'Interaction sol-structure particulièrement pour des modules d'élasticité inférieurs à 50 MPA où l'influence commence à prendre des proportions très significatives, donc à ne pas négliger. Il est à noter que les résultats de la méthode d'analyse temporelle convergent mieux comparativement à ceux de la méthode spectrale, du fait que cette dernière se focalise uniquement sur les maxima, alors que la première décrit un historique temporel des différentes grandeurs.

Le respect de la logique, notamment pour les structures massives, quant à la tendance du modèle en éléments finis, pour mieux simuler le comportement du sol en affichant des valeurs plus restrictives comparativement aux valeurs ayant trait à l'approche du modèle ressorts.

L'éventualité d'avoir un impact favorable de l'interaction sol-structure notamment pour les charges mobiles et plus particulièrement pour les convois exceptionnels D et E qui se distinguent par leurs importants poids, conséquence d'une atténuation de l'influence du sol d'assise sur le pont.

Références

- Chopra, A.K. (1995) Dynamic of structures theory and application to Earthquake Engineering. Prentice Hall. Second edition, 833 pages.
- Clough, R.W., J. Penzien (2003) Dynamics of structures. Computers & Structures Inc. Berkeley, CA94704, 730 pages.
- Frank, R. (2014) Eurocode7 on Geotechnical design: a code for soil-structure interaction. Journal of applied engineering science & technology 1(1): 1-10.
- Grange, S. (2008) Modélisation simplifiée 3D de l'interaction sol-structure : application au génie parasismique. Thèse de doctorat de l'Institut Polytechnique de Grenoble.
- Hatzigeorgiou, G.D., D.E. Beskos, D.D. Teodorakopoulos, M. Sfakianakis (1999) Static and dynamic analysis of the Arta bridge by finite elements. Architecture & Civil Engineering 2(1): 4-51.
- Kausel, E., R.V. Whitman, J.P. Murray, F. Elsabee (1978) The spring method for embedded foundations. Nuclear Engineering and design 48(2): 377-392.
- Kawashima, K, H. Nagashima, S. Masumoto, K. Hara (1994) Response analysis of Miyagawa bridge based on a measured acceleration record. Journal of structural engineering 40: 203-227.
- Li, T., Z. Zhang, L. Shi (2009) Influences of Pile-Soil-Structure Interaction on Seismic Response of Self- Anchored Suspension Bridge. The Electronic Journal of Geotechnical Engineering 14: 1-12.
- Matsagar, V.A., R. S. Jangid (2006) Seismic Response of Simply Supported Base-Isolated Bridge with Different Isolators. International Journal of Applied Science and Engineering 4(1): 53-69.
- Mellal, A., S. Commend, F. Geiser (2007) 3D Finite Element Sismic Analyses of Bridges and Dams. Numerical Models in Geomechanics, London, ISBN 978-0-415-44027-1.
- Munirudrappa, N., H.N.D. Lyengar (1999) Dynamic analysis of continuous span highway bridge. ISET Journal of Earthquake Technology 36(1) 73-84.
- Mwafy, A.M., O.S. Kwon, A.S. Elnashai (2008) Inelastic seismic response of a 59-Span bridge with soil-structure interaction. The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Oct 12-17 2008, Beijing, China.
- Pecker, A. (1984) Dynamique des sols. Presses de l'Ecole Nationale des Pont et Chaussées.
- Priestley, M.J.N., F. Seible, G.M. Calvi (1996) Seismic design and retrofit of bridges. John Wiley & Sons, ISBN: 978-0-471-57998-4, 704 pages.
- Rober, K. Dowell (2004) Seismic analysis of the Sylmar Interstate 5 and Highway 14 Connector Bridge. Proceedings of SMIP04 Seminar on Utilization of Strong-Motion Data. May 17, 2004. Sacramento, California., 41-60.
- Tongaokar, N.P., R.S. Jangid (1998) Seismic response of bridges with sliding isolation devices. ISET Journal of Earthquake Technology 35(1-3): 9-27.
- Wolf, J. P. (1988) Soil Structure Interaction Analysis in time domain. Prentice Hall International Series, Englewood Cliffs, New Jersey.