



HAL
open science

Spectres de plancher des structures sismiquement isolees partiellement enterrees

I. Politopoulos, I. Sergis, F. Wang

► **To cite this version:**

I. Politopoulos, I. Sergis, F. Wang. Spectres de plancher des structures sismiquement isolees partiellement enterrees. 9eme Colloque National AFPS, Nov 2015, Marne La Vallee, France. cea-02509674

HAL Id: cea-02509674

<https://cea.hal.science/cea-02509674>

Submitted on 17 Mar 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Spectres de plancher des structures sismiquement isolées partiellement enterrées

Ioannis Politopoulos^{***}, Ion Sergis^{*}, Fan Wang^{*}

^{*} CEA, DEN, DM2S, SEMT, EMSI, F-91191 Gif-sur-Yvette, France

^{**}Auteur correspondant : ipolitopoulos@cea.fr

RÉSUMÉ. Cet article traite les effets de l'enfoncement sur les spectres de plancher de structures de grandes dimensions telles que les centrales nucléaires, sismiquement isolées. Des analyses ont été réalisées sur un modèle d'éléments finis représentatif d'une centrale nucléaire réelle. Il a été démontré qu'en accord avec des travaux antérieurs, l'excitation finis rocking (balancement) à la base, induite par l'interaction sol-structure, peut amplifier la réponse des modes non-isolés et par conséquent ne doit pas être sous-estimée.

ABSTRACT. This paper deals with the effects of foundation embedment on the floor response spectra of big base isolated structures such as nuclear power plants. Analyses of a finite element model, representative of a real nuclear power plant, have been carried out. It has been demonstrated that, in agreement with previous work, base rocking excitation, induced by soil-structure interaction, may amplify the non-isolates modes' response and thus must not be overlooked.

MOTS-CLÉS : isolation sismique, interaction sol-structure, excitation de rocking, spectre de plancher.

KEYWORDS: seismic isolation, soil-structure interaction, rocking excitation, floor response spectra.

1. Introduction

Le bon fonctionnement des installations industrielles et de production d'électricité, en particulier, les centrales nucléaires, pendant et après un tremblement de terre, dépend, dans une large mesure, de la capacité de leurs composants et équipements à résister aux forces induites par le mouvement sismique. Dans cet objectif, la méthode de l'isolation sismique peut être appliquée pour réduire la demande de capacité de résistance d'équipements. Dans ce cas, on s'attend à ce que les spectres de plancher horizontaux pour des structures relativement rigides comme les bâtiments des centrales nucléaires, subissent une amplification locale au voisinage de la fréquence d'isolation mais les valeurs spectrales pour des fréquences plus élevées soient sur un plateau horizontal. La valeur de ce plateau est, approximativement, l'accélération maximale correspondant à un corps rigide monté sur des appuis parasismiques et, ainsi, la demande de capacité des équipements sera considérablement réduite. L'isolation sismique des centrales nucléaires remonte à la fin des années 70 (Labbé, 2013). Bien qu'à notre connaissance, seulement deux centrales sismiquement isolées aient été construites jusqu'à présent, plusieurs projets sont actuellement en étude ou en cours de construction, par exemple, les réacteurs expérimentaux Jules Horowitz et ITER dans le sud de la France (Germane, 2010 ; Beltran *et al.*, 2011).

Toutefois, dans certains cas et selon le contenu fréquentiel de l'excitation sismique et les caractéristiques dynamiques de la structure, une amplification de la réponse des modes non-isolés (modes autres que les modes inférieurs isolés) apparaît qui peut considérablement réduire le bénéfice escompté de l'isolation sismique, en particulier en ce qui concerne la réponse des équipements (Politopoulos, 2008, 2010, 2012 ; Wolf, 1980, 1981). Une des raisons possibles de l'amplification des modes supérieurs est l'excitation de rocking due à des mouvements de sol non uniformes sur la fondation. Ce mouvement non uniforme peut survenir en raison de l'hétérogénéité du sol, des effets de topographie et des effets de source, etc. Beaucoup de travaux ont été effectués pour caractériser les composantes rotationnelles des mouvements sismiques (Trifunac, 1982 ; Lee *et al.*, 1985 ; Castellani *et al.*, 1989 ; Basu *et al.*, 2012). Par ailleurs, des expressions pour la composante de rocking

sont également proposées dans certains règlements (CEN, 2005). Comme indiqué dans (Politopoulos, 2010 ; Wolf, 1981), l'effet de l'excitation de rocking sur les structures de grandes dimensions sismiquement isolées, en particulier sur leurs spectres de plancher, peut être considérable.

2. Application à une géométrie de centrale nucléaire réelle

Pour illustrer l'effet de rocking, dans le cas d'une fondation enfoncée, sur le spectre de plancher d'une centrale isolée à la base, nous considérons les caractéristiques du sol et de la structure du benchmark international KARISMA (IAEA, 2013 ; Wang *et al.*, 2013). Le bâtiment réacteur de l'Unité 7 de la centrale nucléaire de Kashiwazaki-Kariwa (Japon) est 57 m de long, 60 m de large et 63,4 m de haut. Le bâtiment réel est conventionnel (c'est-à-dire non-isolé) et partiellement enfoncé dans le sol. Pour cette étude, nous supposons qu'il est posé sur des appuis parasismiques. Étant donné que l'objectif de ce travail n'est pas la modélisation détaillée des appuis mais l'étude de l'effet de l'excitation de rocking, les appuis sont modélisés simplement comme des ressorts et des amortisseurs. En suivant la pratique habituelle, la répartition de la rigidité des appuis suit celle de la réaction statique verticale afin de réduire l'excentricité du centre de masse de la superstructure par rapport au centre de la rigidité des appuis parasismiques. Une fréquence d'isolation horizontale de 0,5 Hz est supposée. L'amortissement des appuis considéré est de 5% ce qui correspond à des appuis en élastomère à faible amortissement. En ce qui concerne l'amortissement de la structure, un amortissement proportionnel à la rigidité est considéré, donnant un taux d'amortissement également de 5% pour le premier mode non-isolé à la fréquence de 4,7 Hz.

Tableau 1. Profil du sol, Unité 7 de la centrale de Kashiwazaki-Kariwa, (Japon)

Couche	Épaisseur (m)	Vitesse des ondes de cisaillement c_s (m/s)	Masse volumique (kg/m^3)	Amortissement (%)
1	1	119.131	1641.18	10.7
2	1	78.789	1641.18	21.7
3	1	55.613	1641.18	26
4	1	42.925	1641.18	27.8
5	1	87.213	1641.18	24.5
6	1	79.781	1641.18	25.5
7	1	72.692	1641.18	26.3
8	1	66.359	1641.18	27
9	2	284.226	1763.50	3.9
10	2	272.492	1763.50	4.8
11	2	264.381	1763.50	5.4
12	2	256.861	1763.50	5.9
13	2	252.587	1763.50	6.2
14	3	481.056	1732.92	1.6
15	3	480.307	1732.92	1.7
16	3	479.306	1732.92	1.8
17	3	477.550	1732.92	1.9
18	34	516.403	1692.15	1.9
19	81	575.119	1763.50	1.93
20	11	637.166	1967.38	1.8
21	24	719.453	2028.54	1.8

Pour tenir compte de l'interaction sol-structure (ISS), un domaine de sol proche de la structure, 360 m de long, 360 m de large et jusqu'à une profondeur de 180 m est modélisé par éléments finis et les bords du maillage par une frontière absorbante de type Lysmer. Les analyses ont été réalisées avec le code de calcul CAST3M (CEA). En raison de la présence des appuis sismiques, un radier inférieur de 2 m d'épaisseur est considéré sous la fondation. Bien sûr, un tel radier de base n'existe pas dans le bâtiment conventionnel réel. Le site de la centrale nucléaire présente une topographie de sol stratifié. Les propriétés des différentes couches de sol sont présentées dans (IAEA, 2013) et sont résumées ici dans le tableau 1. Les comportements de la structure et du sol sont supposés comme étant linéaires.

Le signal d'accélération de sol en champ libre correspond à l'un des signaux horizontaux enregistrés sur le site de la centrale nucléaire lors du séisme NCO (Niigataken-Chuetsu-Oki, Japon) du 16 juillet 2007. La figure 1a) montre les spectres de réponse horizontale à 5% d'amortissement en pseudo-accelération, en champs libre, à la surface et au niveau du bedrock supposé (sommet de la dernière couche modélisée du sol, à -156 m). Elle montre également le spectre de réponse correspondant au mouvement horizontal moyen au niveau de la fondation lorsque l'excavation est prise en compte. Dans un souci de comparaison, les analyses ont été également menées en supposant un sol homogène fictif.

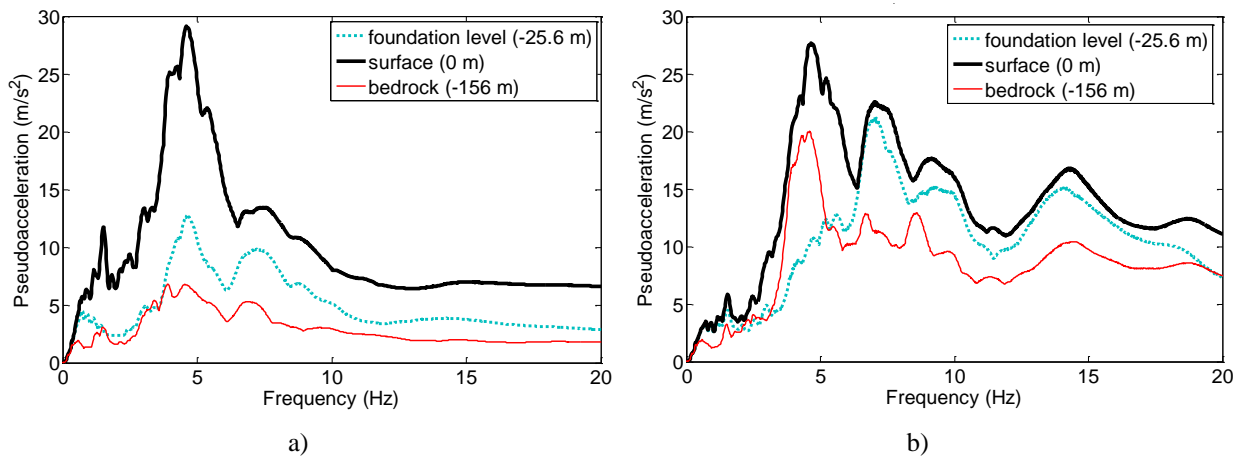


Figure 1. Spectre de réponse en champ libre: (a) sol réel multicouche, (b) sol homogène fictif.

Dans ce dernier cas, nous considérons que les propriétés du sol sont celles du bedrock supposé, c'est-à-dire de la couche inférieure (vitesse des ondes de cisaillement $c_s = 719$ m/s et taux d'amortissement hystérétique $\zeta = 1,8$ %). En outre, étant donné que le mouvement de la surface de champ libre dépend des propriétés des couches supérieures du sol, nous ne considérons pas, pour le sol homogène, le signal précédent de la surface de champ libre. Nous supposons que l'onde de cisaillement incidente à la frontière inférieure du domaine du sol modélisé est identique pour les deux sols, homogène et stratifié. Ce signal est obtenu par le procédé classique de déconvolution appliqué à la topographie des couches réelles. Les spectres de réponse en champ libre sont tracés sur la figure 1b). De plus, puisque ce travail est focalisé sur l'excitation de rocking, il est intéressant de déterminer le rocking équivalent de la base. Une estimation de l'accélération de rocking de la base $\ddot{\theta}_g$ peut être obtenue par la méthode des moindres carrés en projetant l'accélération verticale du fond de l'excavation \ddot{v}_g , sur le mouvement de rotation normalisé de corps rigide :

$$\ddot{\theta}_g = \int_{-L/2}^{L/2} \ddot{v}_g \frac{x}{I} dx = \frac{12}{L^3} \int_{-L/2}^{L/2} \ddot{v}_g x dx \quad [1]$$

où I est le moment d'inertie de la surface de la fondation par unité de largeur et L est la largeur de la fondation. La figure 2 montre les spectres de réponse de l'accélération de rocking définie ci-dessus, multipliée par la demi-longueur de la fondation pour les transformer en accélérations de translation, dans les cas du sol multicouche réel ainsi que du sol homogène fictif. On peut observer que les spectres de rocking, en particulier pour le sol homogène, présentent une amplification significative au voisinage de la première fréquence non-isolée, qui est égale à 4,7 Hz lorsque l'interaction sol-structure n'est pas considérée. Par conséquent, une amplification de la réponse de ce mode est possible en raison du rocking à la base, surtout dans le cas du sol homogène.

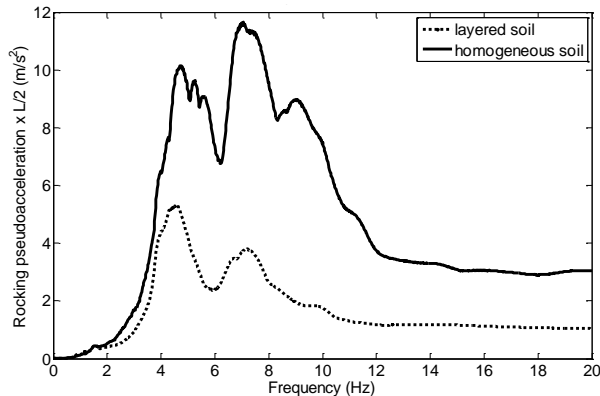


Figure 2. Spectre de réponse de rocking au fond de l'excavation

Toutes les simulations ont été effectuées en considérant que la surface inférieure de la fondation est située à 25,7 m sous la surface du sol, comme dans la centrale nucléaire réelle. Cependant, contrairement au bâtiment conventionnel réel, il n'y a aucun contact entre le bâtiment et les parois verticales de l'excavation. On suppose l'existence de murs verticaux ancrés (par exemple, pieux-murs ancrés). La rigidité de ce type de structures de soutènement est petite et pourrait avoir été négligée. En fait, leur épaisseur (diamètre des pieux, par exemple) ne dépend pas de la profondeur de l'excavation, mais de la distance entre les câbles d'ancrage. Néanmoins, un mur d'épaisseur équivalente de 50 cm, à la paroi verticale de l'excavation a été inclus dans le modèle. Pour tenir compte des conditions réalistes, des éléments de coque orthotrope sont utilisés dans les calculs avec de très faibles rigidités de cisaillement dans leur plan et de très faibles rigidités axiales dans la direction horizontale. Dans la direction verticale, la continuité des déplacements du mur et du sol est relâchée. Des simulations numériques ont également été effectuées pour une fondation superficielle. Dans ce dernier cas, en raison de la faible capacité de portance des couches supérieures du sol, seul un demi-espace homogène avec les propriétés du bedrock mentionnées précédemment a été considéré.

Tous les cas étudiés sur le modèle tridimensionnel (3D) ont été aussi examinés à l'aide d'un modèle axisymétrique simplifié. En effet, bien que la structure réelle ne soit pas complètement symétrique, l'asymétrie est relativement faible. Par conséquent, on pourrait espérer qu'un modèle axisymétrique donnera des résultats raisonnables. Un rayon équivalent de 33,6 m a été défini, pour obtenir le même moment d'inertie que la fondation réelle. Pour simplifier encore plus, la superstructure est représentée seulement par trois fonctions de

forme, illustrées sur la Figure 3. Les deux premières sont respectivement la translation horizontale et la rotation de corps rigide. La troisième fonction de forme est le premier mode de déformation d'un cylindre homogène avec des conditions aux limites de glissement à la base et libre en tête. Une répartition de masse variable a été définie afin que la masse totale, le centre de gravité et le moment d'inertie soient les mêmes que pour le modèle 3D. Le module de Young a été choisi pour avoir la même première fréquence non-isolée que le modèle 3D quand la souplesse du sol n'est pas prise en compte. Cette fréquence est de 4,7 Hz.

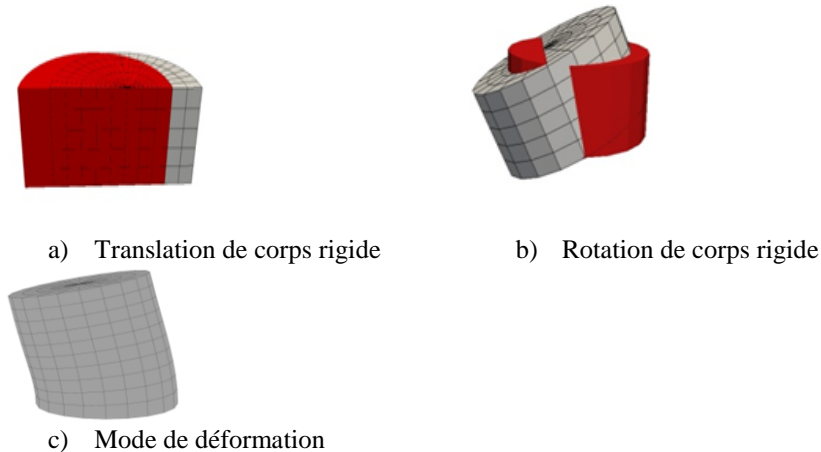


Figure 3. Fonctions de forme considérées pour le modèle axisymétrique

Comme nous l'avons déjà mentionné, cette étude est focalisée sur les spectres de plancher. Par la suite, seuls les spectres sous excitation unidirectionnelle horizontale seront considérés. La figure 4 présente les spectres en pseudo-accélération au sous-sol inférieur (c'est-à-dire à la surface supérieure du second radier, au-dessus des isolateurs). Il est à noter que les résultats du modèle axisymétrique sont très proches de ceux du modèle 3D qui est beaucoup plus fin. Dans le cas d'un sol homogène, une amplification spectrale considérable a lieu au voisinage de la fréquence du premier mode non-isolé. On peut observer que le deuxième pic spectral est situé à une fréquence légèrement plus basse que la première fréquence non-isolé (4Hz vs 4,7 Hz) en raison de l'influence de la flexibilité du sol. Lorsque la topographie du site réel est considérée, l'amplification spectrale est plus faible à cause des réflexions et diffractions des ondes dans les différentes couches de sol. Ces résultats sont en accord avec les spectres de rocking sur la figure 2. Bien évidemment, dans le cas de fondation superficielle, le second pic disparaît parce qu'il n'y a aucun mouvement de rocking, si on ne considère que des ondes de cisaillement à incidence verticale. Il est également, à signaler que les dimensions des fondations des centrales nucléaires peuvent être encore plus grandes que celles de cette étude qui sont de 57 m x 60 m. Dans un tel cas, on peut s'attendre à une amplification de la réponse des modes non-isolés encore plus prononcée.

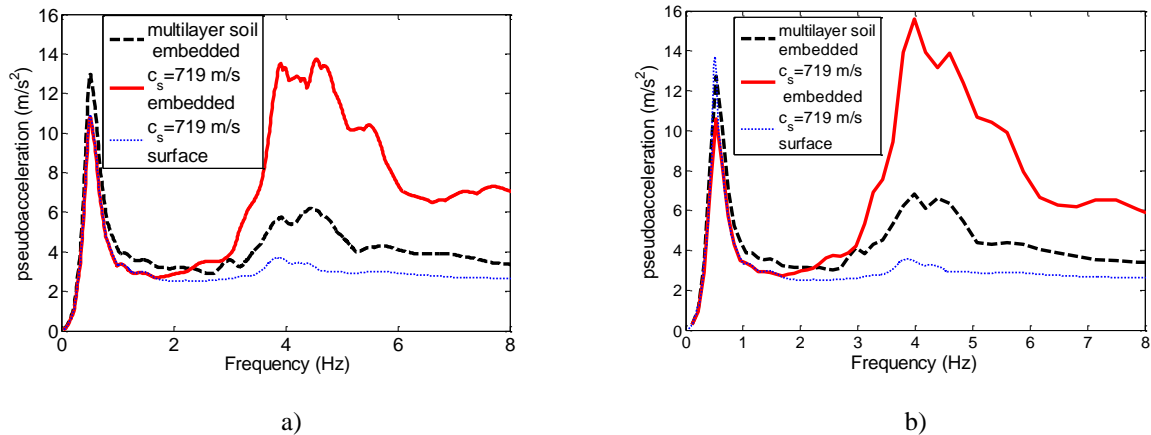


Figure 4. Spectre de plancher à 5% d'amortissement au niveau inférieur du sous-sol du bâtiment sismiquement isolé a) modèle 3D, b) modèle axisymétrique

L'apparition de l'excitation de rocking à la base n'est pas limitée seulement aux structures sismiquement isolées. Le même phénomène physique est également présent dans le cas des structures conventionnelles (c'est-à-dire non-isolées). Les effets de l'interaction cinématique sur les bâtiments enfoncés, notamment les centrales nucléaires, ont été étudiés par plusieurs auteurs, par exemple dans (Masso *et al.*, 1982 ; Wolf, 1985 ; Xu *et al.*, 2006). Néanmoins, il y a une différence substantielle entre la réponse des structures enfoncées conventionnelles et celle des structures sismiquement isolées. Dans le cas des bâtiments isolés à la base, la réponse sous excitation horizontale des modes non-isolés est en général fortement atténuée, parce que ces modes sont quasi orthogonaux à l'excitation horizontale. Par conséquent, le poids relatif de la contribution de l'excitation de rocking dans la réponse devient considérable en raison de l'amplification des modes non-isolés. En revanche, dans le cas d'un bâtiment conventionnel, l'accélération horizontale à la base n'est pas filtrée par des dispositifs d'isolation et son effet sur la réponse de la structure est prédominant, même si l'excitation de rocking à la base existe. En outre, les parois verticales du bâtiment conventionnel sont en contact avec le sol environnant, tandis qu'il y a un vide dans le cas de l'isolation à la base. En plus de modifier les conditions aux limites, cela conduit à des mouvements de rocking différents.

Les résultats des analyses pour ces deux types de bâtiments sont comparés sur la figure 5 où sont tracés les spectres de réponse du sous-sol inférieur et du troisième étage (37 m au-dessus du niveau des isolateurs). Dans le cas du sol multicouche réel, malgré l'amplification indésirable au voisinage de la fréquence du premier mode non-isolé, les spectres de plancher de la structure sismiquement isolée se situent sous les spectres du bâtiment conventionnel. Ce n'est pas le cas lorsque le sol homogène fictif est considéré. En effet, bien que le spectre de réponse au troisième étage du bâtiment conventionnel soit beaucoup plus élevé que celui de la structure isolée, les spectres du sous-sol inférieur montrent la tendance inverse. On peut remarquer que, dans le cas de la structure sismiquement isolée, les spectres de plancher du sous-sol et du troisième étage sont assez proches. Cela est prévisible au voisinage de la fréquence d'isolation puisque les modes isolés sont des modes de translation horizontale et de torsion avec très peu de déformation dans la superstructure. En revanche, la réponse au voisinage du second pic est dominée par la réponse du premier mode non-isolé. Il s'avère que les déplacements horizontaux de ce vecteur propre au niveau de ces deux étages, ont des amplitudes similaires (mais, avec des signes opposés) et donc conduisent à des spectres de réponse similaires. Ce phénomène a déjà été discuté dans (Politopoulos, 2010) sur la base d'un modèle simplifié à deux degrés de liberté soumis à une excitation de rotation à la base.

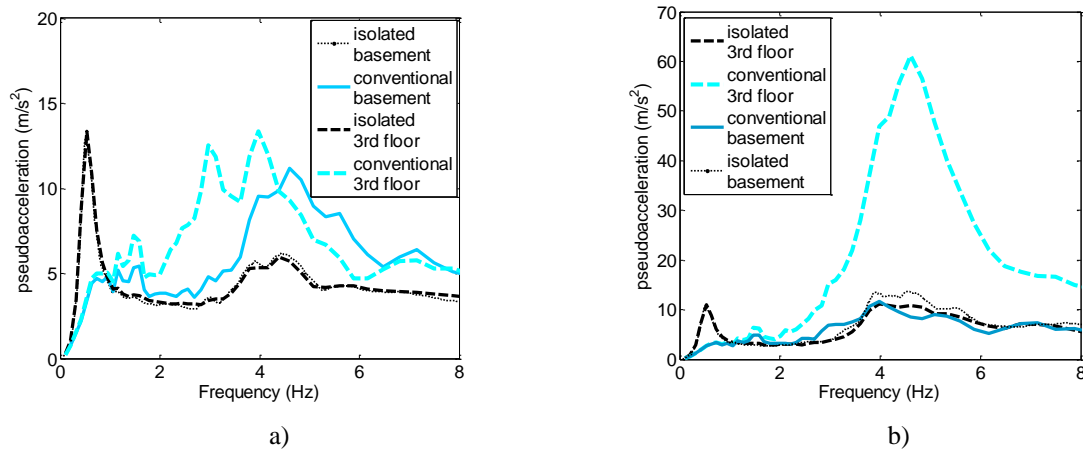


Figure 5. Spectres de plancher (5% d'amortissement) : bâtiment horizontalement sismiquement isolé vs bâtiment conventionnel, a) sol réel multicouche, b) sol homogène fictif

3. Isolation tridimensionnelle (3D)

Comme il a été démontré dans (Politopoulos, 2010), l'excitation de rocking a un contenu riche en hautes fréquences mais négligeable en basses fréquences, proches de la fréquence d'isolation. Ainsi, les systèmes d'isolation 3D (6 DDL), souples dans les directions horizontale et verticale peuvent s'avérer efficaces, non seulement contre des excitations de translation, mais également contre des excitations de rocking. En effet, si le rocking est laissé libre, ces systèmes diminuent les fréquences des modes qui, dans les sections précédentes, étaient excités par l'excitation de rocking. Ainsi, ces modes, initialement non-isolés, deviennent isolés. Dans la gamme de basses fréquences, la superstructure peut être considérée comme un corps rigide monté sur des ressorts horizontaux et verticaux. Cet effet bénéfique de l'isolation 3D est illustré sur la figure 6 où la rigidité verticale des dispositifs d'isolation est supposée égale à 16 fois leur rigidité horizontale, correspondant à une fréquence de « pure » mode vertical de 2 Hz. Nous observons un décalage de la fréquence du second mode vers les basses fréquences (environ 1,5 Hz), correspondant à une faible excitation de rotation effective. Par ailleurs, le pic au voisinage de 4 Hz, associé à la réponse au rocking dans le cas de l'isolation uniquement horizontale, est supprimé.

Cependant, comme le montre la figure 6, la réponse du deuxième mode est amplifiée même dans le cas du système d'isolation 3D. En effet, ce mode est excité par l'accélération horizontale, car il n'est plus orthogonal à l'excitation horizontale à la base. En outre, sa fréquence, bien que faible, est bien supérieure à la fréquence d'isolation (1,5 Hz vs 0,5 Hz dans le cas présent). On en conclut que l'isolation 3D est très efficace contre l'excitation de rocking, mais produit une amplification légère, voire modérée de la réponse à basses fréquences dans le cas d'une excitation horizontale. Les résultats ci-dessus ont été obtenus pour un faible amortissement vertical ($\xi_v = 5\%$). Comme on peut s'attendre, un amortissement plus important ($\xi_v = 20\%$) réduit le deuxième pic spectral de façon considérable. Bien que non illustré ici, l'augmentation de l'amortissement horizontal n'atténue pas significativement l'amplification du deuxième mode. En fait, comme démontré dans (Politopoulos, 2010), le deuxième mode est plus sensible à l'augmentation de l'amortissement dans la direction verticale que dans la direction horizontale.

Bien que ces résultats soient encourageants en ce qui concerne l'application de l'isolation complète 3D, sans dispositifs anti-rocking (c.-à-d. 6 DDL d'isolation), il faut porter une attention particulière sur les possibles effets indésirables. En particulier, la question de l'amplification possible en raison du couplage entre la réponse

horizontale et l'excitation verticale et vice versa doit être étudiée. Un tel couplage peut se produire à cause de l'excentricité inévitable du centre de gravité de la superstructure par rapport au centre de rigidité verticale du système d'isolation. Ce n'est pas le cas pour l'exemple étudié ici car, comme mentionné dans la section précédente, on a pris un soin particulier pour éviter cette excentricité. Néanmoins, malgré le couplage mentionné ci-dessus, l'amplification de la réponse horizontale à cause de l'excitation verticale ne devrait pas être considérable. La raison est que l'énergie de la composante verticale des séismes réels est répartie, principalement, dans une plage de fréquences plus élevées que les fréquences des modes isolés d'une structure isolé en 3D et, également, plus élevées que les fréquences d'amplification spectrale des composantes horizontales.

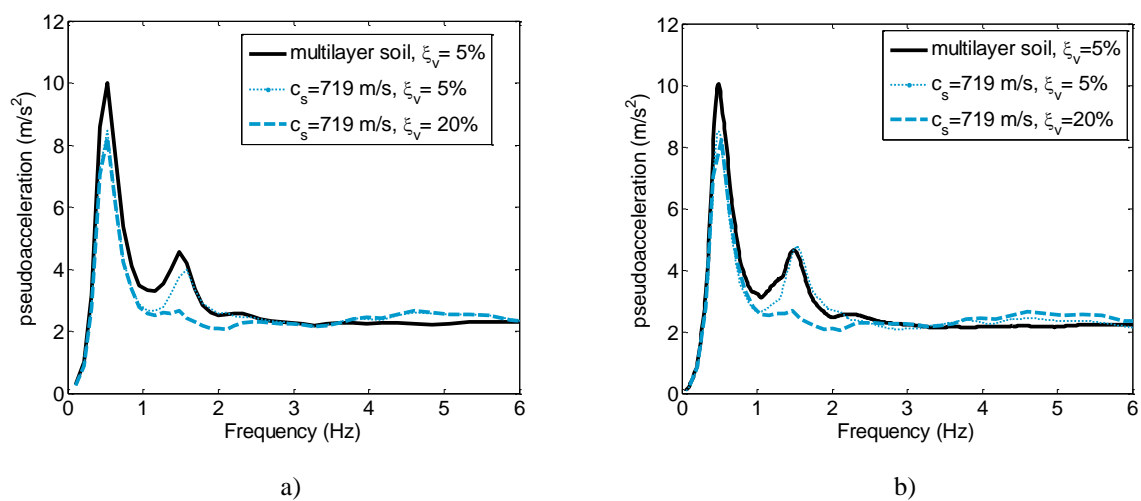


Figure 6. Spectre de plancher (5% d'amortissement), niveau inférieur du sous-sol de la structure avec isolation 3D a) modèle 3D, b) modèle axisymétrique

La figure 7 montre les spectres de plancher horizontaux à la base d'une structure sur des isolateurs 3D, avec une fondation superficielle, soumise aux composantes sismiques horizontale et verticale au niveau du rocher affleurant (outcrop of bedrock). L'interaction sol-structure n'est pas prise compte ici en raison de la grande flexibilité des isolateurs. Trois valeurs de l'excentricité ($e = 0$, $e = 0,05$ et $e = 0,10$) du centre de la rigidité verticale des appuis par rapport au centre géométrique du radier sont considérés. Un amortissement réduit de 5% est considéré pour le système d'isolation dans les directions horizontale et verticale. La figure 7b montre que, comme attendu, l'excentricité amplifie les valeurs spectrales au voisinage des fréquences du deuxième et du troisième mode d'isolation (modes principalement de rotation et de translation verticale respectivement).

Comme il déjà été évoqué, cet effet pourrait être atténué au moyen d'une augmentation de l'amortissement vertical. De plus, la figure 7a montre que, malgré cette amplification, les valeurs spectrales de la structure sismiquement isolée sont beaucoup plus faibles que le spectre de l'excitation horizontale sur toute la gamme de fréquences, à l'exception de la plage de basses fréquences mentionnée ci-dessus.

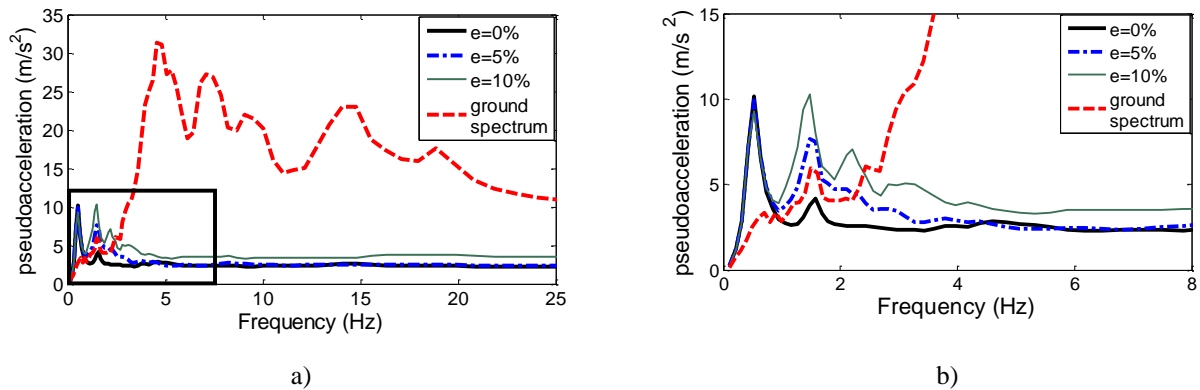


Figure 7. Spectres de plancher horizontal (5% d'amortissement), niveau inférieur du sous-sol de la structure isolée en 3D soumise aux composantes sismiques horizontale et verticale pour une fondation superficielle et trois valeurs d'excentricité de la rigidité verticale d'isolation
a) large bande de fréquences, b) zoom sur la plage de basses fréquences.

4. Conclusions

Ce papier met l'accent sur les effets d'éventuelles excitations de rocking à la base, due à l'enfoncement de la fondation, sur les spectres de plancher des structures de grandes dimensions telles que les centrales nucléaires lorsque celles-ci sont sismiquement isolées et partiellement enfoncée dans le sol. Ces effets sont illustrés par les résultats d'analyses d'un modèle réaliste d'un bâtiment réacteur en tenant compte de l'interaction sol-structure. Les résultats sont en accord avec des travaux antérieurs (Politopoulos, 2010 ; Wolf, 1981), confirmant l'amplification de la réponse des premiers modes non-isolés. Cette amplification est plus prononcée dans le cas de sols homogènes durs. Des sols stratifiés, avec plusieurs couches souples au-dessus du niveau de la fondation, comme celui du Benchmark KARISMA (IAEA, 2013), réduisent ce phénomène indésirable.

L'isolation tridimensionnelle sans dispositifs anti-rocking, améliore de manière significative la réponse à l'excitation de rocking. Ceci est obtenu au prix d'une amplification modérée de réponse en basses fréquences à l'excitation horizontale qui peut être atténuée en augmentant l'amortissement vertical. Toutefois, un équilibre doit être trouvé entre les avantages d'isolation sismique 3D et d'éventuels effets néfastes, en raison du couplage inévitable entre excitation verticale et réponse horizontale. Ce problème sera étudié dans un futur travail.

Il est à signaler que la structure considérée ici n'est pas le bâtiment réel de l'Unité 7 de la centrale nucléaire de Kashiwazaki-Kariwa puisque que celui-ci n'est pas sismiquement isolé. Par conséquent, les résultats des analyses présentées dans ce travail ne sont pas valides pour le bâtiment réel.

Remerciements

Ce travail a été partiellement financé par l'Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire (IRSN).

5. Bibliographie

- Basu D., Whittaker A and Constantinou M. “Characterizing the rotational components of earthquake ground motions”. Report No MCEER-12-0005 Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, 2012.
- Beltran F., Combescure D., Espeche A., Pastor M., Rueda F., Salgado S. “Structural Analysis and Optimization of the ITER-Tokamak Complex”, *The 21st International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT21)*, November 2011, New Delhi, India.
- Castellani A. and Boffi G. “On the rotational components of seismic motion”. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 1989; 18: 785-797.
- CEA, <http://www-cast3m.cea.fr/>
- CEN. “Eurocode 8: design of structures for earthquake resistance - Part 6: towers, masts and chimneys”. Brussels, Belgium., 2005.
- Germane L. “Seismic Isolation of the Jules Horowitz Reactor”. *First Kashiwazaki International Symposium on Seismic Safety of Nuclear Installation. Workshop 2 - Seismic Isolation of Nuclear Facilities*, 24-26 November 2010, Kashiwazaki, Japan
- IAEA, TECDOC-1722 “Review of seismic evaluation methodologies for nuclear power plants based on a benchmark exercise”. IAEA, Vienna, 2013.
- Labbé P. EDF “Experience on Design and Construction of Nuclear Power Plants on Seismic Isolation Systems”, *Technical Innovation in Nuclear Civil Engineering – TINCE 2013*, Paris France.
- Lee V. W. and Trifunac M.D. “Torsional accelerograms”. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1985; 4:132-139.
- Masso A.G., Pecker A., Chen J.C. and Lysmer J. “Seismic pressures on embedded structures in different seismic environments”. *Soil Dynamics & Earthquake Engineering Conference*, Southampton, UK, 1982.
- Trifunac M.D. “A note on rotational components of earthquake motions for incident body waves”. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1982; 1:11-19
- Politopoulos I. “A review of adverse effects of damping in seismic isolation”. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 2008; 37:447-465
- Politopoulos I. “Response of seismically isolated structures to rocking type excitations”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 2010; 39: 325-342.
- Politopoulos I. and Moussalam N. Horizontal floor spectra of base isolated buildings due to vertical excitation. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 2012; 41: 587-592.
- Wang F., Rambach J.M. “Contribution to the IAEA soil-structure interaction KARISMA benchmark”. *The 22nd International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT22)*, August 2013, San Francisco, US.
- Wolf J.P. and Oberhuber P. “Effects of horizontally travelling waves in soil-structure interaction”. *Nuclear Engineering and Design* 1980; 57: 221-244.
- Wolf J.P. and Oberhuber P. “Effects of horizontally propagating waves on the response of structures with a soft first storey”. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 1981; 9: 1-21.
- Wolf J. P. *Dynamic soil-structure interaction*. Prentice Hall, 1985.
- Xu J., Miller C., Constantino C. and Hofmayer C. “Assesment of Seismic Analysis for Deeply Embedded Nuclear Plant Structures”, *U.S. Nuclear Regulatory Commission NUREG/CR-6896*, 2006.