

REDUCTION DES VIBRATIONS EN CENTRIFUGEUSE A L'AIDE DE BARRIERES EN POLYSTYRENE EXPANSE

MODELING OF VIBRATION ISOLATION USING EXPANDED POLYSTYRENE EPS BARRIERS IN CENTRIFUGE

Carol MURILLO¹, Luc THOREL¹, Bernardo CAICEDO²

1 Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Nantes, France

2 Département de Génie Civil, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombie

RÉSUMÉ – Avec une barrière en polystyrène expansé, une étude paramétrique de réduction des vibrations se propageant dans un sable de Fontainebleau est réalisée en centrifugeuse. L'efficacité du système d'isolation est discutée selon la géométrie de la barrière (épaisseur, profondeur, distance à la source) et les fréquences (150 à 2000Hz) générées par une céramique piézoélectrique.

ABSTRACT – A parametric study about the use of polystyrene barriers in vibration reduction is presented. Centrifuge models using Fontainebleau sand are carried out. The efficiency of the isolation system is discussed depending on the geometry of the barrier (width, depth, distance to the source), and the excitation frequency (150 to 2000 Hz) produced by a piezoelectric ceramic.

1. Introduction

Les vibrations dues au trafic routier, aux activités industrielles, au vent, aux opérations de construction et aux phénomènes naturels tels que les tremblements de terre peuvent endommager les bâtiments, gêner la population et créer des nuisances sur les équipements techniques les plus sensibles. Cette étude concerne les vibrations générées par les poids lourds et les trains. Ce sont des vibrations à haute fréquence avec un spectre complexe qui produit une vibration perceptible sur les éléments des structures proches des voies de circulation.

L'installation de barrières dans le sol pour réduire le phénomène de vibration semble être une bonne solution, car elles créent un écran qui atténue la propagation des ondes. L'efficacité des barrières a été étudiée en faisant appel à différentes approches : 1) la modélisation numérique : Aboudi (1973), El Naggar et Chehab (2005) ; 2) des essais en vraie grandeur : Woods (1968) ; 3) des méthodes empiriques : Richart et al. (1970).

Les essais en vraie grandeur et la modélisation numérique ont montré leurs limites, en particulier vis-à-vis de la réalisation d'études paramétriques avec un sol réel. Ce pourquoi récemment des études sur l'efficacité des barrières anti-vibration ont fait appel à la modélisation physique en centrifugeuse : Davies (1994), Luong (1994) et Itoh et al. (2002, 2005).

Ce document présente les résultats d'une étude paramétrique sur des barrières en polystyrène expansé (EPS) pour réduire des vibrations générées par le trafic.. L'influence de la profondeur d'encastrement, de l'épaisseur et de la distance de la barrière par rapport à la source ont été analysés pour déterminer l'efficacité des barrières (Murillo, 2007).

2. Méthodologie

2.1 Vibrations engendrées par le trafic et effet des barrières

Le trafic routier et ferroviaire produit des vibrations de haute fréquence (jusqu'à 50Hz) avec un large spectre. Le niveau des vibrations dépend de la qualité de la route et des caractéristiques du trafic (vitesse et poids des véhicules). Cette vibration est transmise fondamentalement à la surface du sol car la plus grande partie de l'énergie produite par une vibration est transmise par les ondes de Rayleigh.

Barkan (1962) a été un des premiers à utiliser des barrières pour réduire l'amplitude générée par des vibrations produites à la surface. Le matériau de la barrière et la géométrie (la profondeur d , la largeur w et la distance r de la source à la barrière) sont les paramètres les plus influents sur l'efficacité du système d'isolation.

L'effet des paramètres géométriques est évalué de façon adimensionnelle en fonction de la longueur d'onde de Rayleigh (λ_r), par exemple l'effet de la profondeur, de l'épaisseur ou de la distance à la source (d , w , r) est évalué en fonction des paramètres adimensionnels $D = d/\lambda_r$, $W = w/\lambda_r$ et $R = r/\lambda_r$. Il y a deux types de barrières : ouvertes ou pleines. Beskos et al (1985), Ahmad et Al Hussaini (1991), Luong (1994), et Segol et al. (1978) concluent que des barrières ouvertes sont plus efficaces que les barrières pleines, cependant, l'instabilité des parois des tranchées ouvertes rend cette méthode peu pratique. Les tranchées remplies de matériaux tels que l'asphalte modifié, le caoutchouc et l'EPS ont été étudiées : Zeng et al. (2001), Zhong et al., (2002), Itoh, (2003), Itoh et al., (2005), et Wang et al., (2006). Ces recherches ont montré que l'efficacité de certains matériaux peut approcher celle des barrières ouvertes.

Le rapport de réduction d'amplitude A_{RR} qui est le rapport entre l'amplitude A_B d'un système avec barrière et l'amplitude A_0 sans barrière pour des points choisis permet d'évaluer l'efficacité d'un système d'isolement (Woods, 1968, May et Bolt, 1982). Ce rapport peut s'exprimer aussi bien en termes de mouvement vertical du sol, ou de densité spectrale.

2.2 Modélisation en Centrifugeuse

La modélisation en centrifugeuse est un outil puissant qui permet d'étudier des ouvrages géotechniques en modèle réduit. La similitude entre le modèle et le prototype est garantie grâce aux facteurs d'échelle (e.g. Garnier et al., 2008). En particulier, si les longueurs sont à l'échelle $1/N$ sur le modèle réduit, les fréquences sont multipliées par N .

2.3 Caractéristiques du matériau

Le sol utilisé pour cette étude est sable de Fontainebleau NE34, à un poids volumique sec de 16.31 kN/m^3 . En utilisant les signaux enregistrés par les accéléromètres à différentes distances de la source de vibration et la technique SASW (analyse spectrale des ondes de surface) il est possible de déterminer la vitesse de propagation de cisaillement du sol. Les résultats obtenus montrent une valeur de vitesse de 230 m/s avec une tolérance de 30 m/s pour différents essais.

L'EPS, ou Geofoam, constituant la barrière, a une densité qui est seulement 1% à 2% celle du sol, mais il a une forte résistance par rapport à sa densité. En fait, il est capable de supporter des efforts de compression à long terme jusqu'à 100kPa (Horvath,2003). Pour cette étude les densités choisies pour les barrières ont été 1,4 et 1,6 pour les barrières de largeur de 2 cm et de 4 cm respectivement.

2.4 Préparation du modèle

Les barrières sont placées dans le conteneur rectangulaire (120 cm X 80 cm X 36 cm dimensions internes) à la position désirée. Ensuite le sable est placé dans le conteneur rectangulaire par pluviation dans l'air.

2.5 Instrumentation

La source de vibration est une céramique piézoélectrique (PEA). Les vibrations sont enregistrées à l'aide de 6 mini accéléromètres piézoélectrique (ICP® 325 A10). L'acquisition de données a été réalisée avec la chaîne CAREMBA (Derkx et al., 2006) qui enregistre à une fréquence de 50 kHz. Le capteur piézoélectrique est un PPA40M fournit par Cedrat Technologies. Un générateur de signaux Schlumberger 4450 a été utilisé pour générer la forme et fréquence du signal d'entrée.

Le PEA est posé sur un plateau circulaire en aluminium ($\varnothing = 30$ mm, hauteur= 5 mm). La partie supérieure du capteur est fixée à une poutre qui permet d'assurer le contact avec le sol et de transmettre la charge verticale au modèle. Le signal d'entrée a été comparé avec le signal enregistré par un accéléromètre situé à la source de vibration. Les vibrations sont enregistrées avec des accéléromètres situés en surface à 3 positions différentes : 4, 8 et 12 cm de chaque barrière (Figure 1).

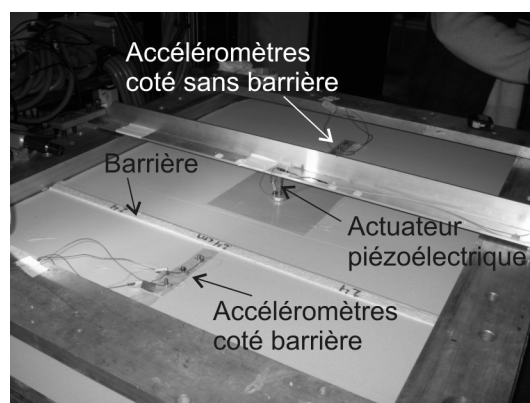


Figure 1: Modèle réduit centrifugé

2.6 Programme expérimental

Les essais, réalisés au Laboratoire Central des Pont et Chaussées à Nantes, sont effectués à une accélération centrifuge de 50 g. Différentes barrières ont été étudiées pour évaluer l'efficacité du système d'isolation. Le programme expérimental comporte un total de 960 essais, 6 barrières différentes ; deux largeurs ($w = 2$ et 4 centimètres) et quatre profondeurs ($d = 12, 24, 34$ cm). Ces barrières ont été

localisées à 4 distances de la source d'excitation ($r = 5, 10, 15, 20$ cm). Pour chaque type de la barrière on varie la fréquence d'excitation, de 150 à 2000 Hz. Ces fréquences correspondent, sur le modèle réduit au 1/50^{ème}, aux gammes de fréquence des vibrations induites par le trafic à échelle réelle.

3. Interprétation des résultats

3.1 Atténuation

Une comparaison entre les signaux enregistrés par les accéléromètres A, B et C situés à 4, 8 et 12 cm avec et sans barrière permettent de visualiser une atténuation de l'amplitude des signaux. Cette observation a été effectuée dans le domaine temporel (Figure 2) ainsi que dans le domaine fréquentiel. La réduction d'amplitude est aussi bien pour l'accéléromètre A, proche des barrières que pour les autres (figure 3).

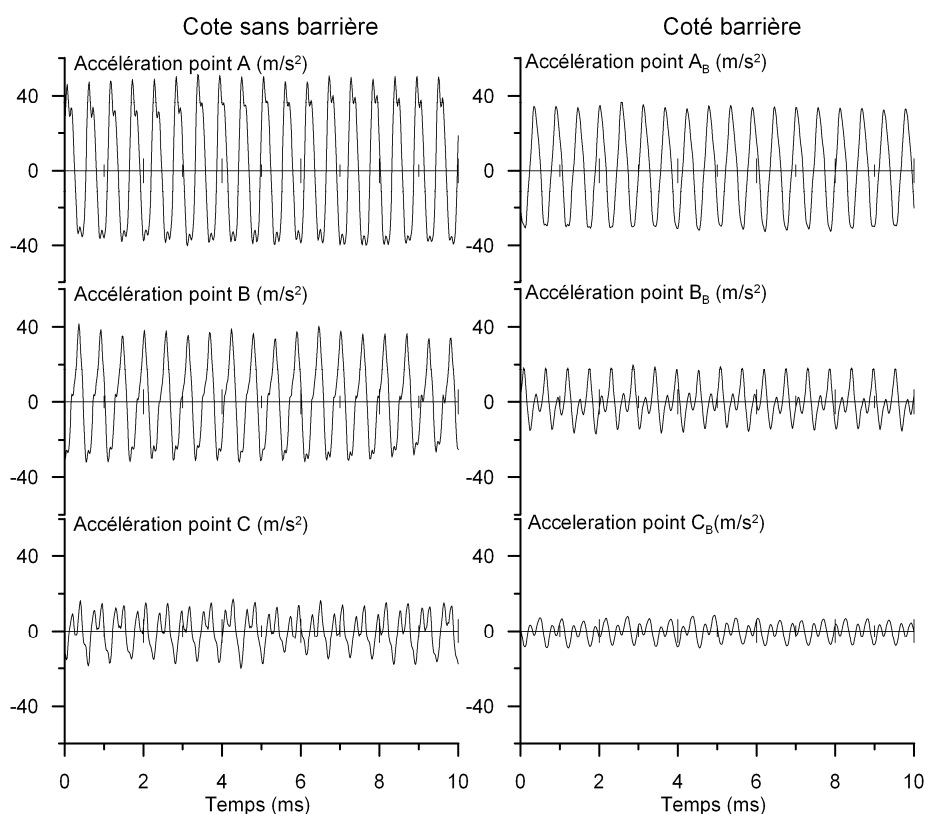


Figure 2. Accélérations des accéléromètres A, B et C avec et sans la barrière ($w = 2$ cm $d = 34$ cm, $r = 20$ cm) à la fréquence d'excitation 1800 Hz.

3.2 Effet de la barrière

La fréquence a une influence sur l'atténuation de l'amplitude des accélérations. L'efficacité de la barrière augmente avec la fréquence (figure 3). Ceci s'explique par le fait que l'énergie transmise au sol n'est pas suffisante pour perturber le milieu pour de faibles fréquences d'excitation ($f < 500$ Hz), donc l'effet de la barrière est masqué.

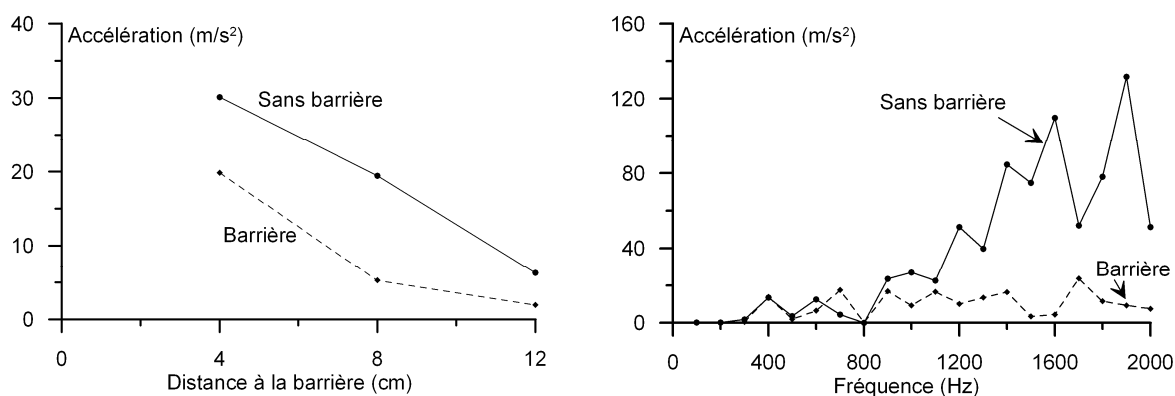


Figure 3. Effet de la barrière sur l'atténuation de l'accélération pour différentes positions ($w = 2$ cm, $d = 34$ cm, $r = 20$ cm) à la fréquence d'excitation 1800 Hz (à gauche), et selon la fréquence d'excitation (à droite) où $w = 4$ cm, $d = 12$ cm, $r = 5$ cm.

3.3 Effet de la profondeur de la barrière

La Figure 4 montre la variation du facteur A_{RR} en fonction de la profondeur de barrière ($D = d/\lambda$).

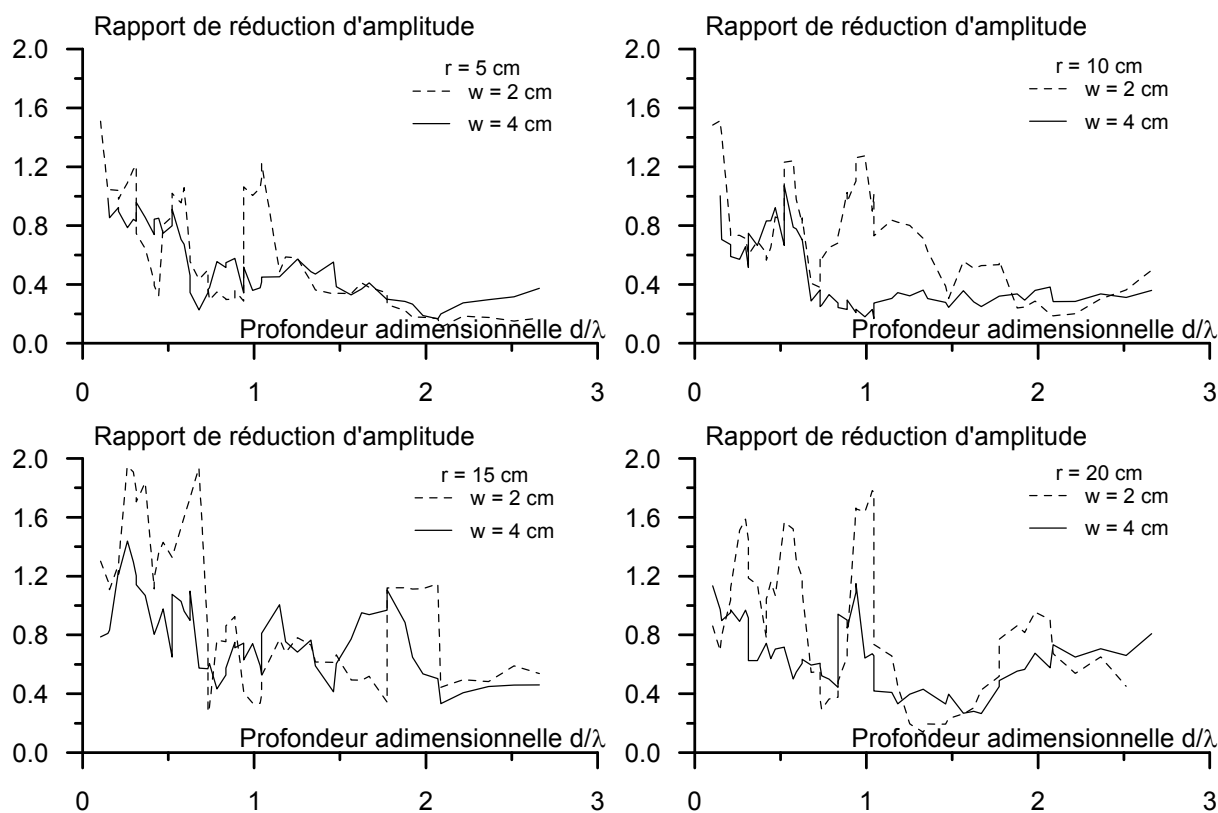


Figure 4. Variation du facteur A_{RR} en fonction de la profondeur de la barrière

L'efficacité du système d'isolation augmente avec la profondeur d'encastrement. Les résultats montrent des valeurs d' A_{RR} autour de 0,2 pour $D > 2.0$ et pour $r = 5$ cm. D'autre part pour les barrières les moins profondes ($d < 10$ cm), A_{RR} varie entre 0,8 et 1,4, et on observe une augmentation de l'amplitude quand la barrière est éloignée de la source ($r > 15$ cm). Le phénomène d'amplification a été observé pour des fréquences d'excitation faibles ainsi que pour de faibles valeurs de D . En effet la plus grande part de l'énergie ne peut pas être retenue par la barrière.

3.4 Effet de l'épaisseur de la barrière

La Figure 5 résume l'effet de W sur la réduction de l'amplitude. Les résultats montrent que la largeur de la barrière influe sur la diminution de l'accélération. Pour des valeurs $W > 0,25$ et pour $r=5$ cm, A_{RR} est proche de 0,2 pour toute profondeur.

Pour des barrières fines ($W < 0,25$) une amplification de l'accélération est perceptible. Cette observation est plus visible pour les barrières peu profondes. Ces résultats sont en concordance avec ceux de Zelikson (1986) qui suggère que la largeur des barrières doit être égale à un quart de longueur d'onde pour assurer l'efficacité du système. Les résultats ont montré que l'influence de l'épaisseur de la barrière reste modérée pour des barrières profondes. Cependant pour les barrières peu profondes l'influence de l'épaisseur devient importante. Cette observation est conforme aux résultats obtenus par Ahmad et al. (1991) et Al-Hussaini et Ahmad (1996), Itoh et al. (2005).

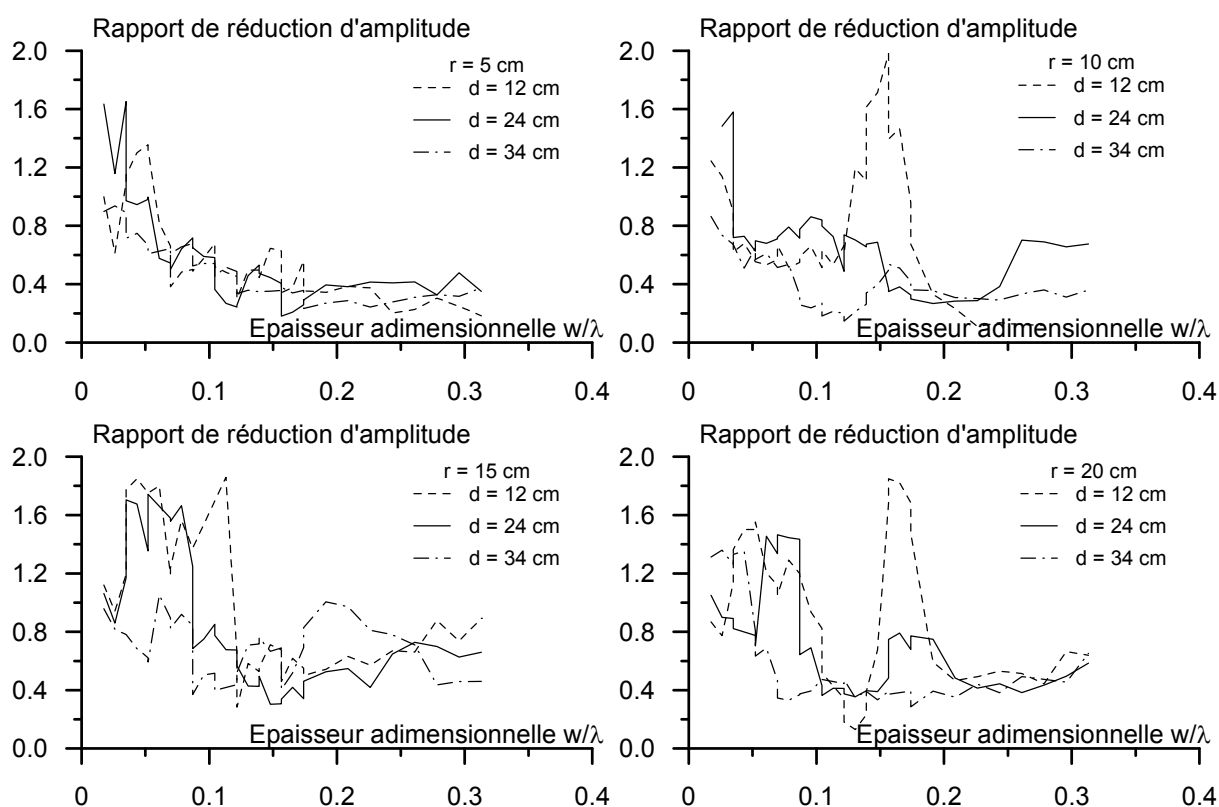


Figure 5. Variation du facteur A_{RR} en fonction de la profondeur de barrière

3.5 Effet de la distance de séparation entre la source et la barrière

Plus la distance entre la source et la barrière est grande, moindre est l'effet de la barrière. En fait, pour des barrières avec une relation $D < 1$ et $r > 15$ cm la réduction en amplitude pour les accélérations est faible. Une grande distance entre la source et la barrière ne peut pas garantir l'efficacité du système; la même conclusion a été exposée par May et Bolt (1982).

4. Conclusions

Le but de ce travail a été la modélisation en centrifugeuse d'un système pour isoler des vibrations produites par le trafic en utilisant des barrières en EPS. Un système de vibration à hautes fréquences a été implanté en centrifugeuse en utilisant un capteur piézoélectrique. Les résultats ont montré que cette méthode est adaptée pour la génération des vibrations en centrifugeuse.

La réduction de vibration est déterminée en utilisant le facteur A_{RR} , ce facteur est le rapport entre l'accélération enregistré avec les accéléromètres avec et sans la barrière. Les résultats ont donné A_{RR} compris entre 0,2 et 1,8. Ils ont montré que l'efficacité du système d'isolation est liée à la géométrie de la barrière, en particulier à la profondeur. Plus la barrière est profonde plus elle est efficace. Ce phénomène est accentué quand la profondeur de la barrière est supérieure à la longueur d'onde.

Pour des barrières avec un rapport entre la profondeur de barrière et la longueur d'onde entre $1,5 < D < 2,5$ le facteur de réduction reste constant. Pour les barrières caractérisées par $0,5 < D < 1$ une amplification a été observée. L'influence de l'épaisseur de la barrière devient importante pour les barrières peu profondes et pour des fréquences d'excitation faibles (< 500 Hz), en particulier pour des barrières avec $W < 2$. D'autre part, pour des barrières profondes l'effet de l'épaisseur ne semble pas important. Enfin, l'efficacité de la barrière est plus importante si la distance entre la barrière et la source est faible.

En général il semble que l'utilisation des barrières anti vibration puisse être une solution effective pour réduire les vibrations générées par différentes sources, en particulier celles induites par le trafic routier ou ferroviaire. Cependant pour son utilisation il est nécessaire d'entreprendre des études détaillées, qui puissent tenir compte des particularités de chaque site et des caractéristiques de la source.

5. Références bibliographiques

- Aboudi J. (1973) Elastic waves in half-space with barrier. Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, 99(1): 69–83.
- Ahmad S., Al-Hussaini T.M. (1991) Simplified design for vibration screening by open and in filled trenches. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 117(1): 67–88.
- Al-Hussaini T.M., Ahmad S. (1996) Active isolation of machine foundation by in-filled trench barriers. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 122(4): 288–294.
- Barkan D. D. (1962) Dynamics of Bases and Foundations. Mc Graw Hill. New York.
- Beskos D.E., Dasgupta G., Vardoulakis I.G. (1985) Vibration isolation of machine foundations. In Vibration problems in geotechnical engineering. Edited by G. Gazetas and E.T. Selig. ASCE, New York. 138–151.

- Davies M.C.R. (1994) Dynamic soil structure interaction resulting from blast loading International Conference Centrifuge 94, 319-324.
- Derkx F., Thorel L., Chazelas J.-L., Escoffier S., Rault G., Buttigieg S., Cottineau L.-M., Garnier J. (2006) Dynamic tests and simulation of earthquakes in the the LCPC's centrifuge. 6th ICPMG Int. conf. on physical modelling in geotechnics, august 4-6 2006, Hong-Kong, 181-186
- El Naggar M., Chehab A. (2005) Vibration barriers for shock-producing equipment. Canadian. Geotechnical. Journal. 42: 297–306
- Garnier J., Gaudin C., Springman S.M., Culligan P.J., Goodings D., König D., Kutter B., Phillips R., Randolph M.F., Thorel L. (2008) Catalogue of scaling laws and similitude questions in geotechnical centrifuge modelling. Int. J. Physical Modelling in Geotechnics ISSN 1346-213X (accepté).
- Horvath, J.S. (2003). Expanded polystyrene geofoam for roads embankments and other lightweight fills in urban environments. Soil and Rock for America 2003.
- Itoh K. (2003) Physical modelling of wave propagation from ground vibration and vibration countermeasure. PhD Disertation, Tokyo Institute of technology.
- Itoh K., Koda M., Lee K.I., Murata O., Kusakabe O. (2002) Centrifugal simulation of wave propagation using a multiple ball dropping system. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics 2 : 33-51.
- Itoh K., Zeng X., Koda M., Murata O., Kusakabe O. (2005) Centrifuge simulation of wave propagation due to vertical vibration on shallow foundations and vibration attenuation countermeasures. Journal of Vibration and control. 11, 781-800.
- Luong M P.(1994) Efficiency of a stress wave mitigation barrier. Proceedings of the international Conference on Centrifuge Modelling (Centrifuge 94), Balkelma, Singapoor, 283-288.
- May T.W., Bolt B.A. (1982) The effectiveness of trenches in reducing seismic motion. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 10(2): 195–210.
- Murillo C. (2007) Vibration isolation using geofoam barriers in Centrifuge. Rapport LCPC n°RMS/MS2007-1-06-1/1-a.
- Richart F., Hall J., Woods R. (1970) Vibrations of soils and foundations. Englewood cliffs, NJ: Prentice Hall.
- Segol G., Lee P.C.Y., Abel J.R. (1978) Amplitude reduction of surface waves by trenches. Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, 104(3): 621–641.
- Wang Z-L, Yong Chi Wang J.C. (2006) Numerical analysis of attenuaion effect of EPS geofoam on stress waves in civil defense engineering. Geotextiles and Geomembranes. 265-273.
- Zeng X., Rose J., Rice J. (2001) stiffness and damping ratio of rubber modified asphalt mixes: potential vibration attenuation for high speed railway track beds. Journal of vibration and control 7 (4), 527-538.
- Zelikson A. (1986) Modélisation expérimentale des signaux d'excitation sismique. Premier Colloque National de Génie Parasismique, St Remy lés Chevreuse-France 29-30-31 Janvier.
- Zhong X., Zeng X., Rose J. (2002) Shear modulus and damping ration of rubber modified asphalt mixes and unsaturated subgrades soils. ASCE Journal of materials in civil Engineering, 14 (6) 496-502.
- Woods R. (1968) Screening surface of waves soils. Journal of soil mechanics and foundations, Vol 94 951- 979.