

# RÉTROACTION SUR LE DIMENSIONNEMENT DES FONDATIONS ET DES EFFORTS SISMIQUES APPLIQUÉS AUX BATIMENTS A RISQUE NORMAL APRES DENSIFICATION DES SOLS

## **RETROFITTING FOUNDATION DESIGN AND SEISMIC LOADS FOR NORMAL RISK BUILDINGS AFTER GROUND DENSIFICATION**

Stéphane BRÛLÉ<sup>1</sup>, Sébastien DUQUESNOY<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ménard, Nozay, France

**RÉSUMÉ** – La modification des paramètres mécaniques des sols après travaux de densification peut conduire à changer le spectre de réponse élastique retenu en pré-dimensionnement. Par une approche forfaitaire, la prise en compte d'un changement extrême de classe de sol (E vers A) pour un bâtiment à risque normal de cinq niveaux, montre une diminution pouvant atteindre 30% des efforts sismiques globaux calculés par une approche quasi-statique.

**ABSTRACT** – The modification of the mechanical parameters of soil after densification works could change the elastic spectra held for the preliminary design. In a flat-rate approach, the tremendous change of ground type (E towards A) for a normal risk building with five storeys, can lead to a decrease of 30% of the global seismic loads values calculated with a quasi-static method.

### 1. Introduction

Pour le dimensionnement des bâtiments à risque normal, l'usage n'est pas de prendre en compte de nouveaux paramètres de sols en petite déformation, après travaux de densification des sols granulaires au moyen de techniques de compactage dynamique ou de vibrocompactage. Cependant, des études spécifiques réalisées pour essayer de caractériser ce changement de paramètres (Brûlé *et al.*, 2010a, Bitri *et al.*, 2013, Harutoonian *et al.*, 2013), ont montré une augmentation suffisante des valeurs initiales de vitesse des ondes de cisaillement des sols densifiés, pour envisager un changement de classe de sol, donc du spectre de réponse élastique associé. Nous présentons dans cet article une étude paramétrique permettant d'évaluer, sur la base d'un pourcentage réaliste d'augmentation de la valeur de la vitesse des ondes de cisaillement  $V_s$ , les conditions initiales du terrain permettant un changement de classe de sol (EN 1998, 2005) après densifications, ainsi que l'ordre de grandeur de modification des efforts sismiques globaux sur le bâtiment, suite à la prise en compte d'un nouveau spectre de réponse élastique (Brûlé *et al.*, 2016).

### 2. Classification des sols en petite déformation

Afin de montrer que l'approche peut être généralisée, nous rappelons dans ce paragraphe, quelques-unes des classifications internationales de sol, bâties sur les valeurs moyennes des ondes de cisaillement sur les 30 premiers mètres sous la surface du sol ( $V_{s,30}$ ) ou sur la période fondamentale du site. La figure 1 (d'après Pitilakis *et al.*, 2004), représente les limites de  $V_{s,30}$  retenues dans l'EN 1998 en Europe, dans l'Uniform Building Code de l'ouest des Etats-Unis et dans le code du Building Center of Japan. Les limites des différentes classes de sol sont assez comparables.

La densification des sols peut conduire à obtenir plus du double de la valeur initiale des caractéristiques mécaniques des sols quand la technique est adaptée au contexte géotechnique. Cela est souvent vérifié quand les sols sont testés avec les reconnaissances in situ telles que le pénétromètre statique ou le pressiomètre (Liausu, 2010). Pour déterminer les véritables cas de changement de classe de sol, il est nécessaire d'effectuer une analyse des vitesses des ondes de cisaillement avant et après traitement (Brûlé *et al.*, 2012).

UBC	$V_{s,30}$ (m/s)				
	200	350	750	1 500	
	E	D	C	B	A
EN 1998	$V_{s,30}$ (m/s)				
	100	180	360	800	
		D	C	B	A
BCJ	$V_{s,30}$ (m/s)				
	$(T > 0.6 \text{ s})$ 200	$(T < 0.2 \text{ s})$ 600			
	III	II		I	

Figure 1. Comparaison de la classification des sols basée sur les valeurs de  $V_{s,30}$  pour différents codes internationaux (Uniform Building Code, 1997 – EN 1998, 2005 and Building Center of Japan, 1997).

### 3. Domaine d'application

Nous ne considérons dans notre approche que les techniques d'amélioration des sols par compactage dynamique et vibrocompactage (figure 2) et en particulier pour cet article nous limitons notre étude paramétrique au compactage dynamique permettant de densifier les sols sur quelques mètres à un peu plus d'une dizaine de mètres de profondeur (Ménard, 1975). La technique, adaptée aux sols granulaires, consiste à effectuer un lâcher de masse de plusieurs tonnes à une hauteur de quelques dizaines de mètres.

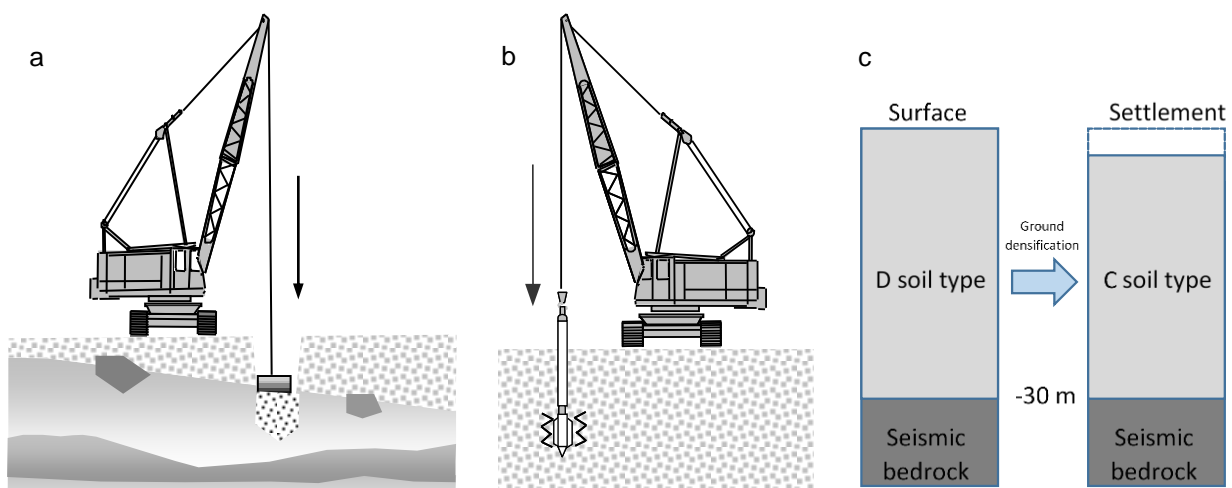


Figure 2 : Densification des sols par compactage dynamique (a) et vibrocompactage (b) (in Brûlé *et al.*, 2012). Exemple de changement de classe de sol selon l'EN 1998 après densification (in Liausu *et al.*, 2015).

#### 4. Modèle géotechnique retenu

Pour la démonstration du changement de classe de sol, nous considérons le modèle bi-couche décrit en figure 3. Le sol 1, d'épaisseur  $h_1$ , correspond à des matériaux sédimentaires détritiques, tandis que le sol 2 ( $h_2$ ) est une formation de consistance rocheuse saine ou altérée, que nous assimilons à un substratum sismique caractérisé par  $V_{s2} > 800$  m/s. Nous distinguons nettement le cas du substratum géotechnique du substratum sismique. La vitesse des ondes de cisaillement  $V_{s1}$ , est inférieure à 360 m/s (*i.e.* un sol de classe C ou D selon l'EN 1998). Comme nous souhaitons évaluer la grandeur  $V_{s,30}$ , nous donnons une relation de dépendance entre les paramètres géométriques. Considérons  $H = 30$  m, l'épaisseur totale considérée, alors  $h_2 = H - h_1$ . La profondeur effective de la densification par compactage dynamique est  $x$ . L'objectif est d'évaluer les jeux de valeurs  $\{V_{s1}, V_{s2}, h_1, x\}$  conduisant au passage du sol de classe E à A. La définition des sols de classe E correspond à une couche superficielle d'alluvions (de classe C ou D – ici, classe C) d'épaisseur comprise entre 5 et 20 m reposant sur un matériau tel que  $V_{s2} > 800$  m/s. Ainsi, nous pouvons rajouter deux nouvelles conditions :  $5 \leq h_1 \leq 20$  m et  $x \leq h_1$ .

Description du profil stratigraphique
<b>A</b> : Rocher ou autre formation géologique de ce type comportant une couche superficielle d'au plus 5 m de matériau moins résistant. $V_{s,30} > 800$ m/s.
<b>C</b> : Dépôts profonds de sable de densité moyenne, de gravier ou d'argile moyennement raide, ayant des épaisseurs de quelques dizaines à plusieurs centaines de mètres. $180 < V_{s,30} < 360$ m/s.
<b>D</b> : Dépôts de sol sans cohésion de densité faible à moyenne (avec ou sans couches cohérentes molles) ou comprenant une majorité de sols cohérents mous à fermes. $V_{s,30} < 180$ m/s.
<b>E</b> : Profil de sol comprenant une couche superficielle d'alluvions avec des valeurs de $v_s$ de classe C ou D et une épaisseur comprise entre 5 m environ et 20 m, reposant sur un matériau plus raide avec $V_s > 800$ m/s.

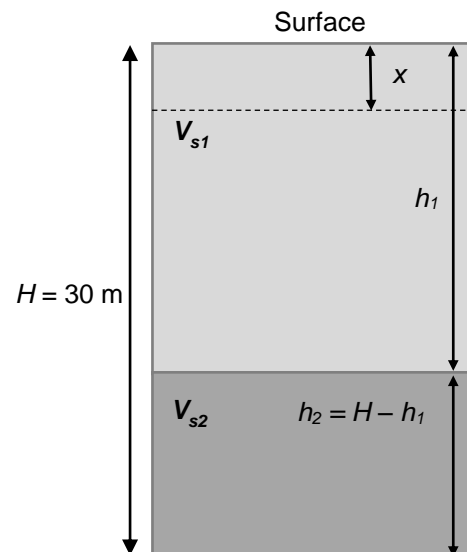


Figure 3 : Classe de sol EN 1998 (à gauche). Modèle bi-couche (à droite). Le sol 1 est de classe C ou D avec une vitesse  $V_{s1}$  et une épaisseur  $h_1$ . Le sol 2 est assimilé au substratum sismique avec  $V_{s2} > 800$  m/s et une épaisseur  $h_2$ . L'épaisseur de traitement par compactage dynamique est  $x$ .

#### 5. Données sur la modification des vitesses $V_{s1}$ après densification

Sur la base d'études menées sur différents chantiers de densification de sol (Karray *et al.*, 2008, Lauzon *et al.*, 2006, Brûlé *et al.*, 2012, Harutoonian *et al.*, 2013, Bitri *et al.*, 2013) avec plusieurs méthodes d'investigation géophysiques (MASW, HVSR, etc.), nous retenons qu'un programme d'amélioration des sols peut conduire dans certains cas à une augmentation de plus de 30% de la vitesse des ondes de cisaillement  $V_{s1}$ . Nous limitons l'étude au seul cas du compactage dynamique (Brûlé *et al.*, 2012, Bitri *et al.*, 2013) en appliquant ce résultat de +30% à la vitesse des ondes de cisaillement dans le sol 1.

Il n'y a pas véritablement de retour d'expérience de chantiers pour lesquels la densification a été poussée au point d'atteindre spécifiquement de fortes augmentations pertinentes de la valeur de  $V_{s1}$ . La valeur de  $V_{s1}$  est mesurée, une fois les critères de portance et de tassement obtenus. En effet, tel que l'a écrit Louis Ménard (Ménard, 1975), une réduction de volume de 3 à 5% d'un sol granulaire, peut conduire au doublement de la valeur du module pressiométrique, ce qui souvent suffit à tenir les objectifs de déformation verticale du sol pour les ouvrages de surface. Une autre raison est aussi l'adaptation du programme de compactage en zone urbaine avec une nécessité de contrôler les gammes de vibrations propagées, c'est-à-dire ne pas pousser la densification car les sols très compactés peuvent devenir meilleurs vecteurs de propagation d'ondes de surface, suite à la diminution de l'atténuation anélastique.

## 6. Calcul des efforts sismiques par analyse modale pour un bâtiment de 5 niveaux

Nous avons considéré un bâtiment régulier de 5 niveaux avec les caractéristiques suivantes : largeur des murs porteurs  $l_w = 6$  m, épaisseur  $b_w = 0.3$  m, module d'élasticité du béton  $E_{cm} = 26$  GPa, hauteur entre chaque étage  $h = 4$  m, masse pour chaque niveau  $m = 300$  t. Le coefficient de comportement  $q$  est fixé à 1.5. L'ouvrage est représenté par un modèle « peigne » avec 5 tronçons de poutres non pesantes et 5 masses concentrées (Lestuzzi *et al.*, 2008). L'expression (1) est l'écriture matricielle de l'équation du mouvement pour le système considéré :

$$\underline{M} \cdot \underline{\ddot{x}} + \underline{C} \cdot \underline{\dot{x}} + \underline{K} \cdot \underline{x} = -\underline{M} \cdot \underline{e}_x \cdot \ddot{x}_g(t) \quad (1)$$

Avec  $\underline{M}$ , la matrice des masses,  $\underline{C}$ , la matrice d'amortissement,  $\underline{K}$ , la matrice de rigidité et  $\ddot{x}_g$  l'accélération du sol. Les vecteurs déplacement, vitesse et accélération sont respectivement :  $\underline{x}$ ,  $\underline{\dot{x}}$  et  $\underline{\ddot{x}}$ . Le vecteur direction est donné par  $\underline{e}_x$ . Le système d'équations couplées (1) peut être découplé et transformé en un système d'oscillateurs simples (si les matrices  $\underline{M}$  et  $\underline{K}$  sont constantes dans le temps) en utilisant les coordonnées modales. Les modes propres qui les définissent sont les modes naturels de vibration de la structure. Ils sont obtenus en annulant le déterminant du système (2) :

$$|\underline{K} - \omega_n^2 \cdot \underline{M}| = 0 \quad (2)$$

Pour calculer les efforts (moments, efforts horizontaux), nous utilisons une procédure dite « simplifiée » (en comparaison avec une approche dynamique non linéaire), basée sur une approche quasi-statique (Tataie, 2011). Les modes de vibration sont identifiés puis les contributions de chaque mode sont recombinaison sur une base modale. Ici la recombinaison est effectuée avec la méthode de la racine carrée de la somme des carrés (the square-root-of-the-sum-of-the-squares (SRSS) method). L'approche n'est valable que pour des structures restant dans le domaine élastique linéaire. La ductilité de la structure ou sa capacité à aller au-delà du domaine élastique linéaire, est prise en compte de façon simplifiée avec le coefficient  $q$  dit de comportement. Il est à noter que les spectres réglementaires, sur lesquels nous reportons les périodes issues de l'analyse modale pour déterminer les accélérations, s'appuient aussi sur des mouvements forts mettant en jeu des non-linéarités de comportement du sol.

## 7. Conséquence d'un changement de classe de sol sur le spectre de calcul

La figure 4 montre la différence entre deux spectres de calcul pour un sol de classe A et un sol de classe E, tous les autres paramètres étant égaux par ailleurs.

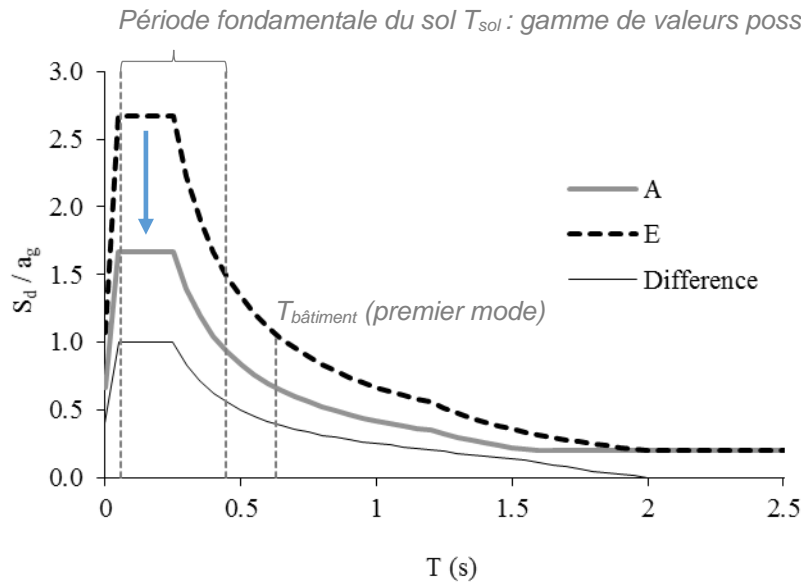


Figure 4 : Spectres horizontaux de calcul  $S_d(T)$  normalisés par  $a_g$  (5% d'amortissement) pour des sols de classes A et E (type 2) avec un coefficient de comportement  $q = 1.5$ . La catégorie de bâtiment est de niveau II. Le terme  $a_g$  est l'accélération de calcul au niveau d'un sol de classe A.

En figure 4, nous avons dessiné les limites de variation de la période du sol  $T_{sol}$  pour un matériau de classe E tel que défini en §4 :  $0.055 < T_{sol} < 0.44$  s. Le premier mode du bâtiment,  $T_{bâtiment} = 0.63$  s, a été calculé en §6. Dans ce cas, le cas de résonance est évité. La relation à vérifier pour passer d'un sol de classe E à A, pour un jeu de paramètres donnés  $\{V_{s1}, V_{s2}, h_1, x\}$ , se traduit par une inégalité (3) :

$$x \geq \frac{I_{Vs}}{1-I_{Vs}} \left( \frac{30 \cdot V_{s1}}{V_{min,A}} - h_1 - \frac{V_{s1} \cdot (30 - h_1)}{V_{s2}} \right) \quad (3)$$

Avec  $I_{Vs} = 1.30$ , le facteur d'amélioration de la densification (Improvement factor for  $V_s$ ) mesuré à partir de la mesure des ondes de cisaillement.  $I_{Vs} = 1 + ((V_{s1} - finale - V_{s1} - initiale / V_{s1} - initiale)) \times 100$ , fixé ici avec une augmentation de 30% de  $V_{s1} - initiale$ . Ici  $V_{min,A} = 800$  m/s, est la valeur minimale de  $V_s$  pour un sol de classe A. Les résultats sont présentés en figure 5. Nous avons considéré que  $V_{s1} \in [180, 360$  m/s] et  $h_1 \in [5, 20$  m]. Nous avons représenté les résultats pour deux valeurs de  $h_1$  (5 et 10 m) et deux valeurs de  $V_{s2}$  (1000 et 1500 m/s). La valeur de 10 m pour  $h_1$  représente déjà une profondeur nécessitant beaucoup d'énergie de compactage en surface.

L'étude paramétrique se traduit en figure 5 par des surfaces en grisées délimitant, pour des valeurs données de  $V_{s2}$ ,  $V_{s1}$  et de  $h_1$ , l'épaisseur  $x$  nécessaire de densification, se traduisant par +30% d'amélioration de  $V_{s1} - initiale$ .

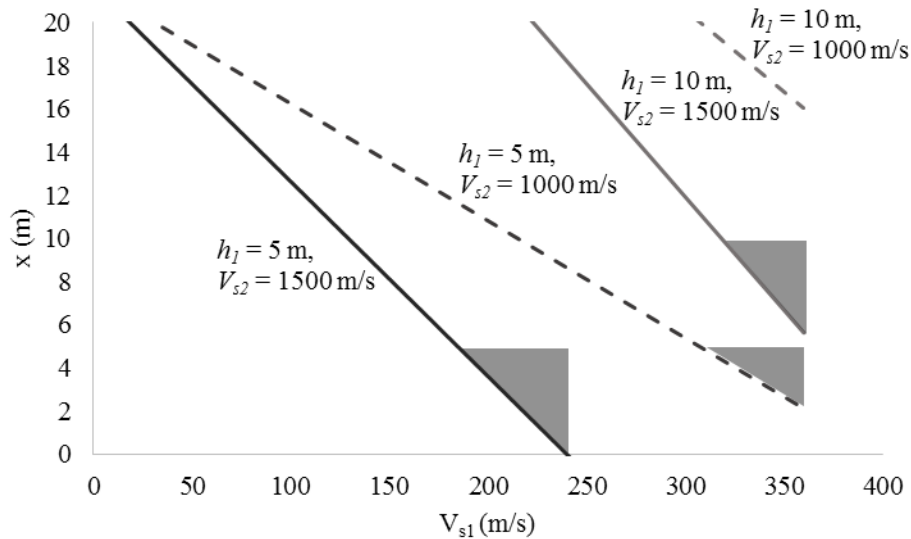


Figure 5 : Domaines  $\{V_{s1}, V_{s2}, h_1, x\}$  représentés en surfaces grisées, réunissant les conditions nécessaires pour le passage d'un sol de classe E à A pour  $I_{Vs} = 1.30$ .

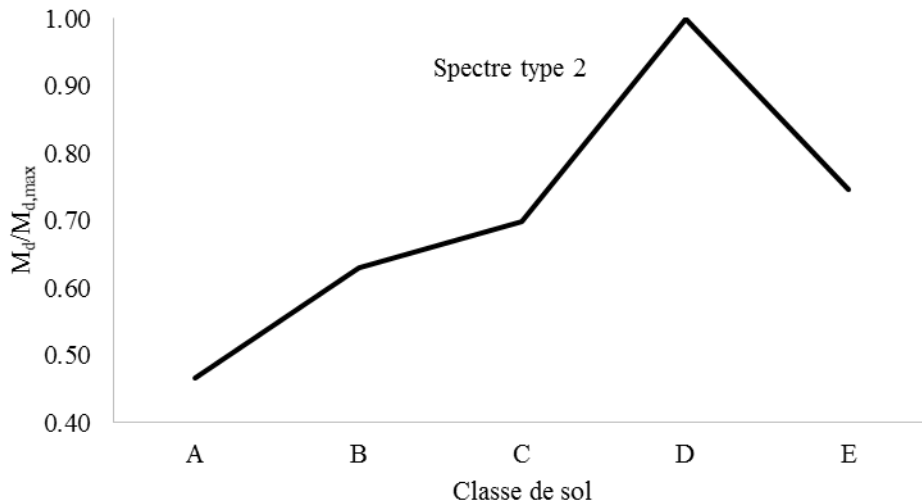


Figure 6 : Moments maximaux (i.e. en pied de voile) normalisés par rapport au moment maximal calculé pour les classes de sol A à E et pour un bâtiment régulier de 5 niveaux.

## 8. Conclusions et perspectives

Pour un modèle de sol bi-couche, les conditions reliant les paramètres  $\{V_{s1}, V_{s2}, H, h_1, x\}$  pour passer, de façon extrême, d'une classe de sol E à A, dans l'hypothèse de l'utilisation des spectres forfaitaires de l'EN 1998, ont été représentées sous forme de graphique (figure 5). Nous avons considéré qu'une amélioration de  $V_{s1}$  de près de 30% était un critère représentatif après travaux de densification, de surcroît déjà mesuré sur des sites expérimentaux en compactage dynamique. Si le sol 1 est caractérisé par des valeurs initiales de  $V_{s1}$ , conformes à celles d'un sol de classe C ( $V_{s1} \in [180, 360 \text{ m/s}]$ ), alors les possibilités de changement de classe existent mais elles imposent une condition sur  $V_{s2}$  qui doit être supérieure à 800 m/s. La valeur limite de  $V_{s2}$  est de 1 200 m/s (in Brûlé *et al.*, 2016) pour une épaisseur  $h_1 = 5 \text{ m}$ . Pour être moins dépendant de la valeur de  $V_{s2}$ , il faut tabler sur des valeurs  $I_{Vs} > 1.30$ . Une autre façon de traduire la condition de dépendance, et de constater que pour passer d'une classe de sol E à A, la valeur initiale de  $V_{s,30}$  du site doit au moins être égale à 700 m/s.

Nous recommandons, pour tous les sites de classe E, offrant une épaisseur de recouvrement comprise entre 5 et 10 m, d'être attentif à ces possibilités de changement de classe de sol en cas de compactage dynamique. L'effet de la densification est bénéfique d'un point de vue calcul des efforts sismiques appliqués à l'ouvrage. En figure 6, il est possible de constater que la réduction du moment de calcul, ou de l'effort de cisaillement pour les voiles, peut dépasser les 30%. Un aspect antagoniste à regarder est la conséquence de la modification de la période du sol  $T_{sol}$  pour le premier mode fondamental (figure 4). Un autre aspect positif de la densification réside aussi dans la modification des impédances dynamiques des sols (Gazetas, 1983 et 1991) et donc l'interaction avec les effets inertiels.

En perspective, il serait intéressant d'examiner la même approche mais avec des données issues du vibrocompactage, technique offrant des possibilités efficaces de densification sur des épaisseurs de plusieurs dizaines de mètres (Lauzon *et al.*, 2006). Dans ces conditions, il serait possible d'aller explorer les possibilités de passer de sols de classe D à C, voire de C à B.

## 9. Références bibliographiques

- BCJ. (1997). Structural provisions for building structures.
- Bitri, A., Samyn, K., Brûlé, S., Javelaud E.H. (2013). Assessment of ground compaction using multi-channel analysis of surface wave data and cone penetration tests, *Near Surface Geophysics*, **11**, 683-690.
- Brûlé, S., Duquesnoy, S. (2016). Change of ground type by means of dynamic compaction: Consequence on the calculation of seismic loadings. *Soumis*.
- Brûlé, S., Javelaud, E.H., Ohmachi, T., Nakamura, Y., Inoue S. (2010a). H/V method used to qualify the modification of dynamic soil characteristics due to ground improvement work by means of heavy compaction process. A case study: the former Givors's glass factory area, *7<sup>th</sup> International Conference on Urban Earthquake Engineering and 5<sup>th</sup> International Conference on Earthquake Engineering*, Tokyo, Japan, 02-26, 451-455.
- Brûlé, S., Javelaud, E. (2012). Soil dynamic response after ground improvement by heavy dynamic compaction or vibrocompaction, *ISSMGE – TC211. International Symposium on Ground Improvement IS-GI*, 30 march – 2 june 2012, Brussels, Belgium. **2**, 3-9.
- Eurocode 8 (2005). Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. The European Standard EN 1998-1.
- Gazetas, G. (1983). Analysis of machine foundation vibration: State of the art, *Soil Dynamics & Earthquake Engineering*. **3:1**, 2-42.
- Gazetas, G. (1991). Formulas and charts for impedance of surface and embedded foundations, *J. of Geotech. Eng.*, ACSE, **117:9**, 1363-1381.
- Harutoonian, P., Leo, C.J., Tokeshi, K., Doanh, T., Castellaro, S., Zou, J.J., Liyanapathirana, D.S., Wong, H. (2013). Investigation of dynamically compacted ground by HVSR-based approach, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **46**, 20-29.
- Karray, M., Lefebvre, G. (2008). Control of deep compaction using Modal-Analysis-of-Surface-Wave "MASW" for the Péribonka dam foundation, *International Conference on Geotechnical Engineering*.
- Lauzon, M., Gagné, B., Rattue, A.D, Bigras, A., Hammamji, Y. (2006). Vibrocompaction of the foundation soils of Peribonka hydro-electric dam, *Congrès annuel de l'Association Canadienne des Barrages*.
- Lestuzzi, P., Badoux, M. (2008). Génie parasismique. Conception et dimensionnement des bâtiments, 1<sup>st</sup> édition, 327 pages, Switzerland : Presses polytechniques et universitaires romandes.
- Liausou, P. (2010). Control of hydraulic sandfill vibrocompaction, *Proceedings of Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur*, Grenoble, France, 689-696.

- Liausou, P., Brûlé, S. (2015). Dams and lithological site effect: influence of deep ground improvement on soil dynamic response, *Proceedings of Colloque CFBR : « Fondations des barrages : caractérisation, traitements, surveillance, réhabilitation »*, Chambéry, France.
- Ménard, L. (1975). Theoretical and Practical Aspects of Dynamic Consolidation, *Geotechnique*, volume 25, n°1, 3-17.
- Pitilakis, K., Gazepis C., Anastasiadis A. (2004). Design response spectra and soil classification for seismic code provisions, *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, B.C., Canada, August 1-6, Paper No. 2904.
- Tataie, L. (2011). Méthodes simplifiées basées sur une approche quasi-statique pour l'évaluation de la vulnérabilité des ouvrages soumis à des excitations sismiques. Thèse de Doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.