

ANALYSE COMPLÉMENTAIRE DES VIBRATIONS POUR LES SOURCES À IMPACTS. LE CAS DU COMPACTAGE DYNAMIQUE

COMPLEMENTARY ANALYSIS OF VIBRATIONS FOR IMPACT SOURCES. THE CASE OF DYNAMIC COMPACTION

Stéphane Brûlé¹, Gillian Erbeja¹

¹ Ménard, Chaponost, France

RÉSUMÉ – Les chantiers urbains appellent une attention croissante sur l'effet des vibrations générées sur le bâti mitoyen ou proche. Le renouveau du compactage dynamique en zones urbaines en raison de son intérêt en réhabilitation des friches industrielles, a permis de capitaliser sur les mesures in situ en travaux. Des grandeurs complémentaires mériteraient d'enrichir les analyses, comme la polarisation des ondes R de surface.

ABSTRACT – Urban construction sites impose a growing need for the control of vibrations generated on neighboring or nearby buildings. The revival of dynamic compaction in urban areas thanks to its role in the remediation of brownfields has generated a library of in situ vibration data acquired during the works phase. Additional quantities deserve to enrich the analyses, such as the polarization of R surface waves.

1. Introduction

Les travaux de réhabilitation avec démolition-reconstruction en contexte urbain ou péri-urbain ainsi que la valorisation des remblais anciens d'aménagement sans évacuation hors site, ont conduit à un regain d'intérêt pour les techniques d'amélioration des sols par compactage dynamique (Chu et al., 2009 ; Brûlé et al., 2010, 2012 et 2020).

En effet, si les études environnementales l'autorisent, la densification des sols en place peut parfois éviter des travaux de déblai et d'évacuation hors site. Les sols impactés sont alors densifiés avec pour conséquence un abaissement général de la plateforme, puis des couches de matériaux inertes peuvent être déposés sur les sols d'origine et constituer, une « barrière » aux propriétés recherchées (barrière physique, faible perméabilité, etc.). Les méthodes en vigueur pour estimer les seuils acceptables en termes de vibration pour le bâti ont démontré leur robustesse (Figure 1b). Cependant, l'expérience de l'acquisition d'enregistrements de vibrations avant et pendant travaux vient compléter l'approche usuelle.

2. Caractérisation des vibrations par le maximum de la vitesse particulière

Pour une source à impact ponctuel vertical, comme le compactage dynamique, au point $M(r, \theta, t)$ de la Figure 1a, les différentes perturbations mécaniques théoriques observables sont une onde de pression P ou longitudinale se propageant à la vitesse V_P , une onde transversale ou de cisaillement V_S ($V_S < V_P$). Il y a aussi une onde de surface de type Rayleigh se propageant à la vitesse V_R et dont la polarisation est dans le plan (x, z) avec une forme elliptique, grand axe selon z . Pour le point M situé tel que $\theta > \theta_c = \arcsin(V_S/V_P)$, il existe également une « onde de tête » se déplaçant à la vitesse V_P . θ_c est appelé angle critique à partir et au-delà duquel la propagation s'effectue à l'interface entre les deux milieux. Une approche usuelle et fonctionnelle en compactage dynamique est de pointer, pour chaque capteur d'une ligne sismique, le maximum de la vitesse particulière parmi l'une des trois composantes x , y ou z . L'approche « gomme » les différents types d'onde évoqués ci-dessus mais les ondes de surfaces étant plus énergétique et surtout sujettes à une

décroissance plus lente en énergie avec la distance, ce sont essentiellement les ondes de Rayleigh ou « R » qui gouvernent la question des amplitudes mesurées.

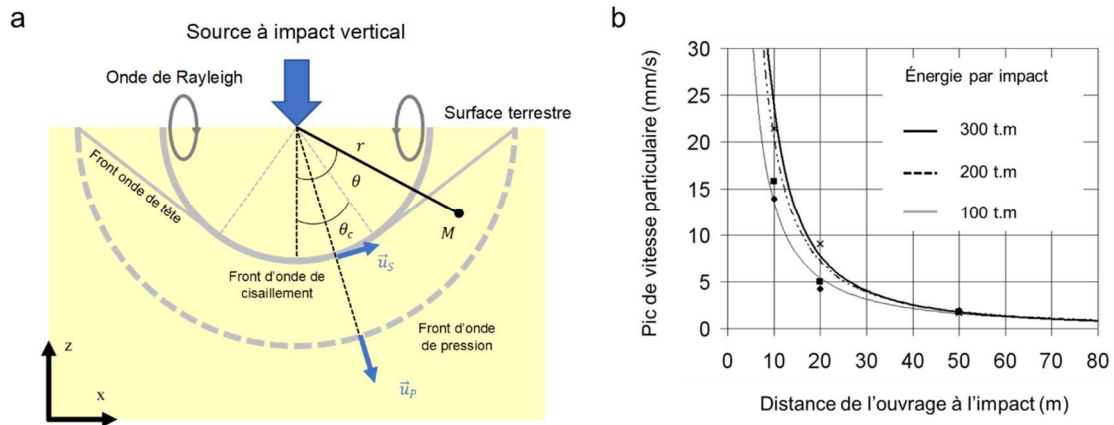


Figure 1. Compactage dynamique. (a) Représentation schématisée des différents fronts d'onde lors d'un impact ponctuel sur la surface vide-solide d'un milieu semi-infini élastique, homogène, isotrope (a). Le front d'onde de pression (onde P) se déplace le plus rapidement avec un vecteur déplacement $\vec{u}_p$ perpendiculaire au front d'onde. Le vecteur déplacement $\vec{u}_s$ de l'onde de cisaillement est tangent au front d'onde. (b) Vitesse particulaire selon la distance à la source et selon l'énergie à l'impact, exprimée en t.m (Brûlé et al., 2012).

L'objectif est de tracer une courbe avec la vitesse particulaire en ordonnée en fonction de la distance au point d'impact en abscisse (Figure 1b). Cette analyse en amplitude maximale se complète par une étude en contenu fréquentiel. Ainsi le couple de valeur amplitude-fréquence permet de statuer sur des seuils de vibration à ne pas dépasser en phase travaux, selon la typologie de la structure.

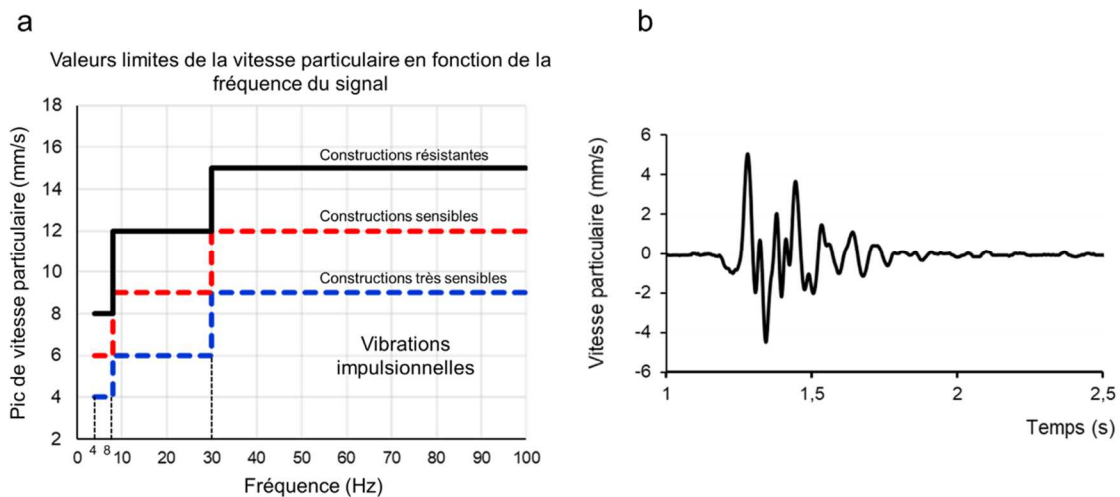


Figure 2. (a) Valeurs limites de la vitesse particulaire (en mm/s) pour différentes sensibilité de bâtiment et pour une source impulsionnelle telle le compactage dynamique (d'après Circulaire du 23/07/86). (b) Signal d'impact de compactage dynamique (composante horizontale).

En travaux de compactage dynamique, la Circulaire de 1986 et le texte de la SNCF sont les plus utilisés. La Circulaire de 1986 contient un mode opératoire de la mesure, une méthode d'analyse fine des structures permettant de définir leur sensibilité aux vibrations et des seuils s'appliquant aux vibrations impulsionnelles répétées (Figure 2b) ou continues, mais pas aux tirs de mine. Par exemple, la vitesse particulaire est limitée à

6 mm/s pour une construction sensible si les vibrations sont comprises entre 4 et 8 Hz (Figure 2a). Les études au cas par cas peuvent être envisagées s'il y a incertitude sur la classification de la construction (résistante, sensible, très sensible).

3. Le référentiel documentaire

Les documents techniques professionnels sont les suivants pour les vibrations (d'après Jacques Leblond du CEREMA – voir présentation sur le site du CFMS lors de la Journée Technique du 05/04/2016 « Séismes et vibrations ») :

- Circulaire du 23/07/86 relative aux vibrations mécaniques émises dans l'environnement par les installations classées pour la protection de l'environnement. Ce texte est le seul document réglementaire traitant des vibrations. Son champ est fréquemment élargi notamment dans les CCTP en l'absence d'application en l'absence d'études préalables.
- Le fascicule de documentation AFNOR FD P 94-447 – 1 et 2 sur les vibrations provoquées par les travaux géotechniques en milieu rocheux (2003),
- Le Guide et note technique du SETRA pour les tirs à l'explosif (2002) et les vibrations des compacteurs (2009),
- Les consignes générales SNCF IN 1226 pour les vibrations émises sur les infrastructures ferroviaires,
- Les recommandations AFTES sur les vibrations,
- Le chapitre vibration du dossier pilote tunnels, fascicule environnement, du CETU,
- La Revue TIRS, etc.

Ce référentiel documentaire ne distingue pas spécifiquement les différentes ondes émises (ondes de volume et ondes de surface). Cependant, pour le cas particulier du compactage dynamique caractérisé par une source ponctuelle impactant la surface, plus de 60% de l'énergie est convertie en onde de surface de type Rayleigh. Il y a un intérêt à étudier spécifiquement ces ondes en fonction de leur fréquence, notamment pour les milieux bicouches.

4. Aller plus loin avec les ondes de surface de type « Rayleigh » émises par des impacts à la surface des sols

Les ondes de surface, de type Rayleigh, représentent environ les 2/3 de l'énergie des ondes sismiques propagées pour des sources à impact (Woods, 1968 ; Liausu, 1981). Leur étude est un point clé dans la compréhension des ondes émises en compactage dynamique ou dans tous les sujets de fondation ayant recours au battage.

4.1. Demi-espace homogène, élastique et isotrope

Les ondes de Rayleigh sont polarisées dans un plan vertical perpendiculaire à la surface libre. On rappelle que pour un demi-espace infini, homogène et isotrope, il existe une expression analytique pour le déplacement du sol selon x et z (u_x et u_z) pour des ondes de Rayleigh (Semblat et Pecker, 2009). En traçant les deux courbes de déplacements correspondantes, pour une valeur donnée de coefficient de Poisson, il apparaît que les ondes de Rayleigh mobilisent essentiellement une épaisseur de terrain correspondant à la longueur d'onde du signal sismique. Le déphasage entre les deux composantes est de 90°, d'où une représentation du mouvement des particules sous forme d'une ellipse.

Selon le contenu fréquentiel du signal sismique ou des vibrations, cette profondeur varie. En considérant des signaux de quelques hertz en fréquence, se propageant dans des sols superficiels dont la vitesse des ondes de cisaillement V_s et de l'ordre de 100 à 300 m.s⁻¹, les longueurs d'ondes, et donc les profondeurs d'influence, représentent quelques mètres à quelques dizaines de mètres. À titre indicatif, avec une fréquence de 8 Hz, une vitesse

$V_R = 278 \text{ m.s}^{-1}$, la longueur d'onde est $\lambda_R = 34.7 \text{ m}$.

Dans ces conditions, le mouvement des particules de sol en surface, ou orbite, décrit une ellipse dont la forme est fonction du coefficient de Poisson ν , pour une fréquence donnée. La Figure 3c montre la sensibilité théorique de l'amplitude des ellipses en fonction du coefficient de Poisson. Pour le cas élastique, la morphologie des ellipses ne dépend que du coefficient de Poisson. La taille de l'ellipse est la plus importante dans cet exemple pour 0.45. Elle est maximale pour $\nu = 0.499$. Le sens de rotation change également avec la profondeur. Il est rétrograde (sens opposé à celui du déplacement du front d'onde) jusqu'à une profondeur correspondant au cinquième de la longueur d'onde à la fréquence considérée ($z \approx \lambda_R/5$).

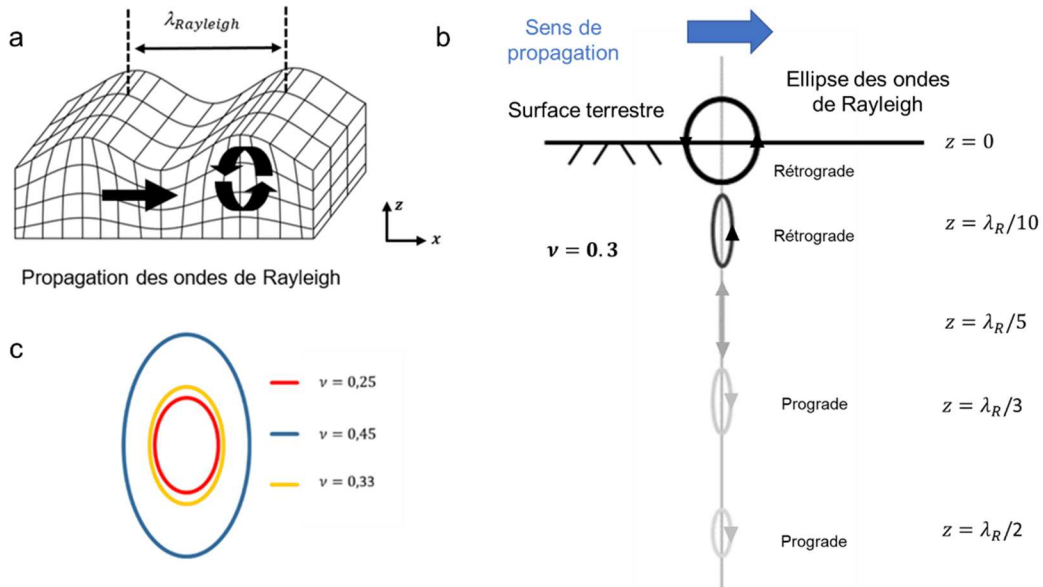


Figure 3. Mouvement elliptique décrit au cours du temps par une particule de sol en surface (a) et modification de la morphologie des ellipses avec la profondeur avec des mouvements progrades et rétrogrades (b). La valeur du coefficient de Poisson $\nu = 0.3$ (Source : Brûlé, 2022). Influence du coefficient de Poisson sur l'amplitude des ellipses (c).

4.2. Sol bicouche élastique à interfaces horizontales

Pour le cas théorique de modèles de sol à n couches, pour une fréquence donnée, la relation de dispersion présente un nombre fini de racines réelles. Il existe un nombre discret de nombres d'onde k possibles. Les ondes de Rayleigh présentent donc différents modes de propagation (Bodet, 2005).

Ces modes de propagation peuvent être interprétés par la présence d'interférences constructives pour un milieu continûment hétérogène ou entre ondes transmises et réfléchies pour un milieu multicouche (Foti, 2000). Ils reflètent en général les variations de vitesse de cisaillement du milieu avec la profondeur. C'est généralement le mode fondamental qui prédomine (Tokimatsu et al., 1992), mais la participation de chaque mode dépend de la stratification du sol autant que de la fréquence (Foti, 2000 ; Gucunski et Woods, 1991), ainsi que de la profondeur et de la nature de la source sismique.

Cette propriété de dispersion est celle retenue par les méthodes géophysiques générant des signaux en surface et détectant des ondes de surface portant une information sur les caractéristiques des matériaux du sous-sol.

Pour un profil de vitesse donné (V_p , V_s), chaque mode d'onde de Rayleigh a une forme particulière de la fonction d'ellipticité. Les fonctions d'ellipticité permettent en principe de retrouver les propriétés (V_p , V_s , masse volumique ρ) du sol par procédure d'inversion. La relation inverse à la structure du sol est néanmoins non linéaire et non unique.

Pour un modèle avec deux couches élastiques horizontales, individuellement homogènes et isotropes, il est possible de tracer la variation de l'ellipticité en fonction de la fréquence du signal sollicitant le modèle (Figure 4). Pour cela, on procède au rapport spectral des deux composantes x et z . Pour le modèle de la Figure 4, le premier sol a une épaisseur de 100 m pour une valeur de vitesse de cisaillement de 200 m/s. La vitesse du sol sous-jacent est de 800 m/s.

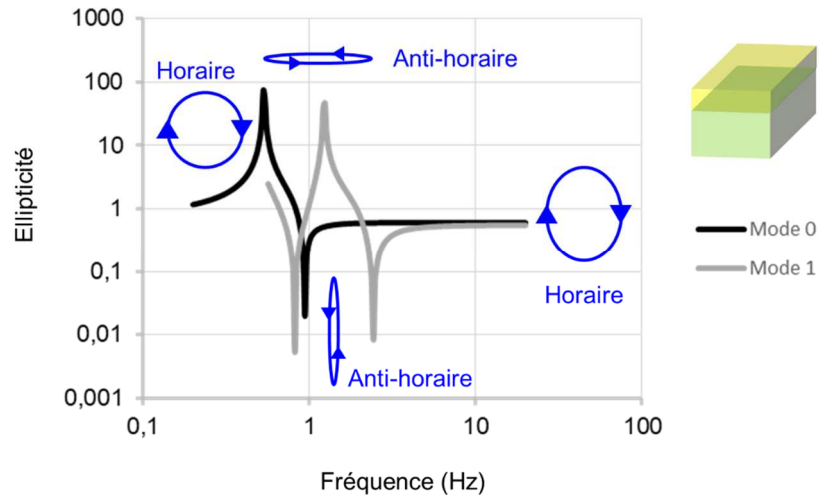


Figure 4. Ellipticité théorique des ondes de Rayleigh en surface en fonction de la fréquence pour un modèle de sol bicouche 1D (d'après Poggio et al., 2014 in Geopsy Courses). Le sens du mouvement peut être horaire ou anti-horaire. En noir, le mode fondamental et en gris, la première harmonique (Source : Brûlé, 2022 – Logiciel GEOPSY).

Si on considère le mode fondamental en trait noir continu, on note un premier pic vers 0.55 Hz qui traduit une forte amplification du mouvement horizontal par rapport au mouvement vertical du sol. Ce mouvement horizontal nécessite plus d'attention vis-à-vis des constructions.

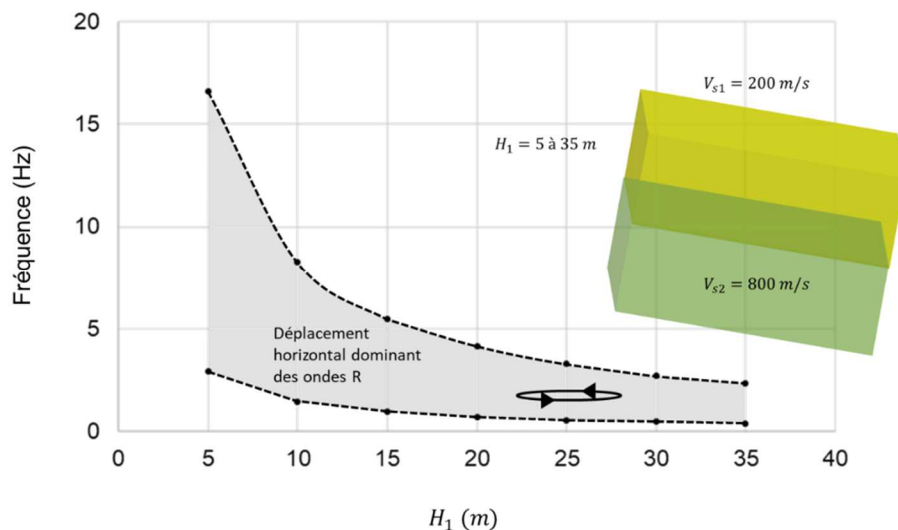


Figure 5. Mode fondamentale des ondes de Rayleigh. Domaine des déplacements de surface à dominante horizontale (zone en gris) pour un sol superficiel avec $V_{s1} = 200 \text{ m/s}$ reposant sur un substratum caractérisé par $V_{s2} = 800 \text{ m/s}$. L'épaisseur H_1 varie de 5 à 35 m. Le coefficient de Poisson est pris à 0.4 pour les deux couches.

La Figure 5 illustre un exemple de conditions géométriques et mécaniques du modèle de sol bicouche pouvant nécessiter une attention particulière sur la polarisation des ondes de Rayleigh en surface. Chaque paire de points, pour une épaisseur donnée H_1 est obtenue sur la base de la lecture d'une courbe identique à celle de la Figure 4. Sont pointées les valeurs de fréquence correspondant à une ellipticité telle que la composante horizontale devient plus grande que la verticale. La verticalisation du mouvement pourrait aussi être pointée mais elle n'est pas présentée ici. Il faut lire la Figure 5 en considérant une fréquence du signal émis sur l'axe des ordonnées et connaître l'épaisseur du sol de couverture sur la base de l'axe des abscisses. Si le point se situe dans le domaine grisé, alors une instrumentation particulière est requise en cas de mitoyens pour contrôler les énergie émises en travaux, en raison de l'amplitude du mouvement horizontal induit.

Cette analyse vient en complément de l'approche décrite en §2 pour le maximum de la vitesse particulière en fonction de la distance. Elle maximalise les effets des ondes de Rayleigh car les approches effectuées en §4.1 et §4.2 sous-entendent que la technique de travaux développe une énergie mobilisant un volume important de sol, conduisant jusqu'à un état de résonance pour les ondes de Rayleigh mais aussi pour les ondes de cisaillement S . On notera à ce titre que la valeur de la fréquence fondamentale du sol de couverture vis-à-vis des ondes de cisaillement $f_0 = V_{s1}/4H_1$ pour un modèle $1D$, se situe toujours dans le domaine grisé.

Les sols avec un substratum sismique profond, ne sont pas concernés. On peut même préciser que dès qu'il se localise à plus de 15 m de profondeur, les phénomènes décrits plus hauts ne sont plus tangibles en raison de la fréquence des sources à impact. Si le substratum sismique se situe entre 5 et 10 m de profondeur, on retrouve aussi d'autres phénomènes d'onde comme le « guide d'onde » pour des ondes de surface de type Love, polarisées horizontalement et dont l'énergie se déplace dans le sol de couverture en priorité.

On rappelle ici que les modèles de sol sont élastiques et ne tiennent pas compte de la décroissance de l'amplitude avec la distance au point d'impact (atténuation géométrique).

5. Conclusions

Dans un contexte de travaux urbains en développement vis-à-vis des techniques de densification des sols, la prévention des effets des vibrations sur les constructions mitoyennes, appelle à de l'auscultation plus poussée mais aussi à identifier les configurations géotechniques à même d'exacerber les mouvements du sol.

Après avoir illustré le concept de polarisation du mouvement en surface avec un modèle semi-infini, homogène et isotrope, une étude de sensibilité de l'orientation du mouvement elliptique a été menée sur un modèle bicouche.

Pour la configuration de bicouche présentée ici, les ondes de Rayleigh générées par des impacts surfaciques sur le sol, ont une ellipticité en surface, fonction de leur longueur d'onde λ_R et de l'interaction avec la profondeur du substratum sismique. Pour le cas étudié, une vigilance sera apportée pour les situations telles que $2.3 \leq \lambda_R/H_1 \leq 13$. C'est une autre façon de traduire le phénomène de dispersion des ondes de surface dans un milieu hétérogène, ici constitué de deux couches.

Pour les situations réelles, l'amortissement matériel dans le sol est significatif (pouvant représenter 10%) et les effets de non-linéarité ne sont pas négligeables. Toutefois, cette approche complémentaire à celles qui existent, permet d'identifier les sites à géologie particulière pour lesquels il faut instrumenter prioritairement.

Le référentiel documentaire usuel pourrait être complété pour le cas des sources à impacts en surface, notamment pour les sols bicouches car il y a une dépendance à la fréquence de la polarisation du mouvement surfacique.

6. Références bibliographiques

- Bodet L. (2005). Limites théoriques et expérimentales de l'interprétation de la dispersion des ondes de Rayleigh : apport de la modélisation numérique et physique, Thèse de l'Ecole Centrale et de l'Université de Nantes.
- Brûlé S., Javelaud E., Meneveau P (2010). Réhabilitation des friches industrielles par les techniques Ménard d'amélioration des sols, Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur JNGG 2010, 7-9 juillet 2010, Grenoble, France, pp. 933-940.
- Brûlé S., Javelaud E., Marchand B. (2012). Auscultation d'une cheminée de grande hauteur située à proximité d'un chantier de compactage dynamique haute énergie. JNGG 2012 – 4 au 6 juillet 2012. Bordeaux, 919-926.
- Brûlé S., Champmartin F., Le Meaux R. (2020). Interaction sol-structure avec maintien des vestiges de fondations dans les friches industrielles. JNGG 2020. Lyon, France.
- Brûlé S. (2022). Propagation d'ondes sismiques dans les sols superficiels structurés artificiellement. Approche théorique et expérimentale. Les métamatériaux sismiques. Thèse de Doctorat de l'Université Aix-Marseille.
- Chu J., Varaksin S., Ulrich K., Mengé P. (2009). Construction Processes, State of the Art Report. 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, TC17 meeting ground improvement, Alexandria, Egypt.
- Foti S. (2000). Multistation Methods for Geotechnical Characterisation using Surface Waves. Ph. D. thesis, Politecnico di Torino.
- Gucunski N., Woods R. D. (1991). Use of Rayleigh modes in interpretation of SASW test, Proc. 2nd Int. Conf. on Rec. Adv. in Geotech. Earth. Eng. and Soil Dyn., S. Louis 2, 1399–1408.
- Liausu P. (1981). Vibrations engendrées par le compactage dynamique. Revue Française de Géotechnique, n°43bis, pp.134-138.
- Semblat J.F., Pecker A. (2009). Waves and vibrations in soils: earthquakes, traffic, shocks, construction works. IUSS Press, Pavia.
- Tokimatsu K., Tamura S., Kojima H. (1992). Effects of multiple modes on Rayleigh wave dispersion characteristics. J. Geotech. Eng. 118 (2), 1529–1543.
- Woods R.D. (1968). Screening of surface waves in soil. J. Soil. Mech. Found. Eng. (ASCE) 1968; 94(4): 951–79.

Sites internet

<https://www.cfms-sols.org/sites/default/files/seance-20160405/03---Leblond-Jean-Jacques---CEREMA.pdf> (dernière consultation au 18/02/2022).

<https://www.cfms-sols.org/sites/default/files/seance-20160405/04---Erbeja-Gillian---MENARD.pdf> (dernière consultation au 18/02/2022).