

É

Bruit et vibrations

Études et recherches

RAPPORT R-735



Évaluation de l'exposition aux vibrations globales du corps chez les opérateurs de compacteurs de sol

*Subhash Rakheja
Ario Kordestani
Pierre Marcotte*



Solidement implanté au Québec depuis 1980, l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) est un organisme de recherche scientifique reconnu internationalement pour la qualité de ses travaux.

NOS RECHERCHES

travaillent pour vous !

Mission

Contribuer, par la recherche, à la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles ainsi qu'à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes.

Offrir les services de laboratoires et l'expertise nécessaires à l'action du réseau public de prévention en santé et en sécurité du travail.

Assurer la diffusion des connaissances, jouer un rôle de référence scientifique et d'expert.

Doté d'un conseil d'administration paritaire où siègent en nombre égal des représentants des employeurs et des travailleurs, l'IRSST est financé par la Commission de la santé et de la sécurité du travail.

Pour en savoir plus

Visitez notre site Web ! Vous y trouverez une information complète et à jour.

De plus, toutes les publications éditées par l'IRSST peuvent être téléchargées gratuitement.
www.irsst.qc.ca

Pour connaître l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement au magazine Prévention au travail, publié conjointement par l'Institut et la CSST.
Abonnement : 1-877-221-7046

Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales
2012
ISBN : 978-2-89631-602-1 (PDF)
ISSN : 0820-8395

IRSST - Direction des communications
et de la valorisation de la recherche
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : 514 288-1551
Télécopieur : 514 288-7636
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca

© Institut de recherche Robert-Sauvé
en santé et en sécurité du travail,
mai 2012



Bruit et vibrations

Études et recherches

■ RAPPORT R-735

Évaluation de l'exposition aux vibrations globales du corps chez les opérateurs de compacteurs de sol

Avis de non-responsabilité

L'IRSST ne donne aucune garantie relative à l'exactitude, la fiabilité ou le caractère exhaustif de l'information contenue dans ce document. En aucun cas l'IRSST ne saurait être tenu responsable pour tout dommage corporel, moral ou matériel résultant de l'utilisation de cette information.

Notez que les contenus des documents sont protégés par les législations canadiennes applicables en matière de propriété intellectuelle.

Subhash Rakheja et Ario Kordestani
Centre de recherche CONCAVE, Université Concordia

Pierre Marcotte
Prévention des risques mécaniques et physiques, IRSST



Cette publication est disponible
en version PDF
sur le site Web de l'IRSST.

Cette étude a été financée par l'IRSST. Les conclusions et recommandations sont celles des auteurs.
Cette publication a été traduite, seule la version originale (R-709) fait foi.

CONFORMÉMENT AUX POLITIQUES DE L'IRSST

Les résultats des travaux de recherche publiés dans ce document
ont fait l'objet d'une évaluation par des pairs.

REMERCIEMENTS

Cette étude a été réalisée avec le soutien, sous formes variées, des organismes suivants :

- Sintra (incluant Pagé Construction), Québec
- Dynapac, Suède
- Dynapac, États-Unis
- ASP Construction, Québec
- SMS Équipement fédéral, Québec
- Hewitt, Québec

RÉSUMÉ

Les vibrocompacteurs à tambour unique sont largement utilisés pour le compactage des sols et la construction des routes. Il s'agit essentiellement de véhicules articulés composés d'un tambour vibreur (rouleau) à l'avant et d'un tracteur à deux roues à l'arrière. Le tambour renferme une masse rotative excentrique dont la vibration assure un compactage efficace du sol. Les interactions dynamiques du tambour et des pneus avec le sol, jumelées au comportement dynamique du véhicule articulé à charge asymétrique, soumettent l'opérateur à des niveaux de vibrations globales du corps (VGC) de grande amplitude à travers le siège du véhicule, lequel se réduit à un coussin de mousse de polyuréthane dans la plupart des véhicules en usage au Québec. Cette étude examine les caractéristiques des vibrations et l'exposition aux VGC des opérateurs de vibrocompacteurs à tambour unique au moyen de mesures, et présente les classes spectrales de vibrations susceptibles d'être applicables à l'établissement de mesures d'intervention appropriées. Deux séries d'essais ont été entreprises afin de caractériser les vibrations mécaniques propres aux véhicules de même que l'exposition des opérateurs aux vibrations. La première série d'essais a été menée sur une piste d'essai sous conditions contrôlées en ce qui a trait à la vitesse des véhicules, à l'amplitude des vibrations causées par la masse en rotation à l'intérieur du tambour, ainsi qu'aux propriétés du sol. L'objectif en était de déterminer les comportements vibratoires des véhicules sous forme de fréquences dominantes et de modes de vibration probables. La seconde série d'essais a été menée sur deux chantiers distincts du Québec afin de quantifier et d'évaluer l'exposition aux VGC dans des conditions de travail réelles.

Les essais sur le terrain étaient conçus pour mesurer les caractéristiques des vibrations transmises par les véhicules sur les chantiers selon deux modes d'opération : en compactage et en transit. Les variations relatives à la densité du sol et à l'amplitude du vibreur en mode de compactage ont aussi été prises en considération pour ce qui est de l'étude des plages de vibrations transmises. Chaque série d'essais portait sur deux véhicules différents et représentatifs des compacteurs en usage au Québec. La série d'essais sous conditions contrôlées a été menée avec deux compacteurs de 10 tonnes neufs (un 4 cylindres et un 6 cylindres), sur sols de faible et forte densité avec réglage de l'amplitude du vibreur à « basse » et « haute » en mode de compactage, et à une vitesse presque constante de 10 km/h en mode de transit. La série d'essais sur les chantiers a été menée avec i) un compacteur de 10 tonnes, âgé de 7 ans, considéré par les opérateurs comme étant représentatif de la « moyenne » des véhicules en usage sous l'angle des VGC, et ii) un compacteur de 13 tonnes, âgé de 2 ans, tenu pour être un des rares véhicules offrant une réduction des vibrations ; les conditions d'opération étaient entièrement à la discrétion des opérateurs.

Les véhicules de la série d'essais contrôlés sur piste ont été équipés d'instruments de mesure de vibrations afin de caractériser leurs propriétés vibratoires. Les mesures relatives aux véhicules d'essai sur le terrain ont uniquement porté sur les vibrations de translation et de rotation de la cabine et du siège de l'opérateur aux fins de caractérisation et d'évaluation de l'exposition. Les essais sur le terrain comprenaient par ailleurs des essais répétés aussi bien en compactage qu'en transit. La première série comportait 27 et 23 essais, respectivement, pour les véhicules à 4 et 6 cylindres, et la deuxième série comportait 19 et 15 essais, respectivement, pour les véhicules de 10 et 13 tonnes. Les résultats obtenus lors d'essais comparables ont affiché une répétabilité raisonnablement bonne, et ont donc été combinés pour définir les plages des spectres de vibration le long des axes longitudinal (x), latéral (y), vertical (z), de tangage (θ) et de roulis (ϕ).

Les mesures effectuées ont révélé que le comportement vibratoire de tels véhicules dépend fortement du mode d'opération. En mode de compactage, les véhicules fonctionnent

invariablement à très basse vitesse – de l'ordre de 3 km/h – et leur comportement vibratoire est principalement déterminé par les propriétés dynamiques du sol et la force centrifuge exercée par la masse rotative excentrique (qualifiée d'« amplitude du vibreur »), notamment par sa fréquence angulaire, de près de 30 Hz. Le compactage des surfaces de forte densité provoque souvent un sautiller du tambour (perte de contact avec la surface du sol), ce qui donne une vibration dominante correspondant à la moitié de la fréquence angulaire (15 Hz). L'amplitude des vibrations de basse fréquence était généralement faible dans ce mode d'opération.

L'amplitude des vibrations de basse fréquence augmentait toutefois considérablement en mode de transit et ce, le long de tous les axes, en raison des interactions dynamiques du tambour et des pneus avec le sol accidenté, ainsi que des vitesses plus élevées (près de 10 km/h). Les données obtenues pendant les essais sur les chantiers ont été utilisées pour caractériser les vibrations transmises à la cabine et au siège. On a par ailleurs tenté de grouper les données des essais en compactage correspondant à deux amplitudes de vibreur différentes, soit la « basse » et la « haute ». Cela n'a toutefois été possible que pour le véhicule de 10 tonnes, puisque l'opérateur du véhicule de 13 tonnes avait choisi d'effectuer tous les essais en réglant l'amplitude à « basse ». Les variations d'amplitude du vibreur ont eu des effets notables sur les vibrations de basses fréquences (<10 Hz), et plus importants encore sur les vibrations de hautes fréquences (>10 Hz), tout particulièrement à 15 Hz. Les fréquences dominantes des deux véhicules étaient assez comparables à celles fournies par les données obtenues sur la piste d'essai lors du compactage d'un sol de forte densité, bien que l'amplitude des vibrations ait été beaucoup plus élevée sur le véhicule de 10 tonnes. Par contre, l'amplitude des vibrations s'est avérée beaucoup plus faible sur le véhicule de 13 tonnes, en partie à cause du mode de compactage à « basse » amplitude.

L'amplitude des vibrations de basses fréquences sur les chantiers était généralement plus faible que l'amplitude mesurée sur la piste d'essai pour le compacteur de 10 tonnes. Cela est surtout attribuable à la vitesse de transit relativement moins élevée sur les chantiers que sur la piste d'essai (près de 10 km/h). Les spectres de vibrations du compacteur de 13 tonnes ont généralement révélé une amplification des vibrations au niveau des supports de cabine et du siège. Les données ont été utilisées pour déterminer les plages de vibrations pouvant servir à définir les classes spectrales de vibrations et pour explorer de meilleures façons de concevoir les supports de cabine, les supports de tambour et les sièges à suspension afin de réduire la transmission des vibrations de basses fréquences. Ces spectres pourraient également être utilisés dans le cadre d'une approche de conception fondée sur la simulation pour vérifier la dynamique des modèles de véhicules.

Les données ont ensuite été analysées pour évaluer l'exposition aux VGC à l'aide de la norme ISO 2631-1 et de la directive 2002/44/CE de la Communauté européenne (CE). Le compacteur de 10 tonnes présentait des valeurs d'exposition beaucoup plus élevées en mode de compactage que le véhicule de 13 tonnes, ce qui s'explique vraisemblablement par le réglage de l'amplitude à « basse » sur ce dernier. En mode de transit, le compacteur de 13 tonnes présentait des valeurs de vibration pondérées en fréquence beaucoup plus élevées au niveau de la cabine, ce qui peut en partie s'expliquer par des vibrations de roulis et de tangage accrues par rapport au compacteur de 10 tonnes. Le coussin du siège du compacteur de 10 tonnes causait néanmoins une amplification de près de 60 % des vibrations de la cabine, alors que cette amplification n'était que de 16 % dans le cas du siège à suspension monté sur le compacteur de 13 tonnes. Les valeurs d'exposition journalière A(8) pour les deux machines ont été calculées selon trois schémas d'exposition différents, fondés sur les durées de compactage et de transit, soit 6,00, 6,25 et 6,50 heures de compactage, et 1,00, 0,25 et 0,50 heure de transit, respectivement, avec 1 heure d'activités dans un environnement exempt de vibrations. La moyenne des valeurs d'exposition A(8) basée sur les vibrations du siège du compacteur de

10 tonnes dépassait la valeur d'action de $0,5 \text{ m/s}^2$ recommandée dans la directive de la CE et ce, pour les trois schémas d'exposition pris en compte. Les valeurs d'exposition aux vibrations de la cabine n'étaient que légèrement supérieures à la valeur d'action pour les trois schémas. Les valeurs moyennes d'exposition journalière aux vibrations de la cabine sur le compacteur de 13 tonnes étaient bien inférieures à la valeur d'action, alors qu'elles approchaient $0,47 \text{ m/s}^2$ au niveau du siège. Les valeurs d'exposition obtenues pour ce véhicule ne l'ont toutefois été qu'avec un réglage de l'amplitude du vibreur à la position « basse ». Le compactage avec un réglage de l'amplitude à « haute » pourrait produire des valeurs d'exposition plus élevées.

Ces résultats suggèrent que l'utilisation d'un siège à suspension dûment adapté serait indispensable pour maintenir l'exposition en deçà de la valeur d'action, surtout dans le cas du compacteur de 10 tonnes, soit le véhicule le plus représentatif des compacteurs utilisés au Québec. Il a été observé que le siège de la plupart des compacteurs en usage au Québec n'est pas équipé d'une suspension et que la suspension de la cabine se limite à deux supports en caoutchouc. Il est aussi recommandé d'examiner de plus près la conception des sièges à suspension montés sur les véhicules plus récents et leur adaptation réelle au contexte de travail sur le terrain pour ce qui est de limiter les vibrations transmises à l'opérateur. D'autres efforts visant à déterminer les supports de cabine optimaux sont également souhaitables et recommandés afin de limiter l'exposition aux VGC.

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION.....	1
2. OBJECTIFS DE L'ÉTUDE.....	4
3. MESURE DES VIBRATIONS	5
3.1 Mesure des vibrations sur piste d'essai.....	5
3.1.1 Instrumentation des véhicules.....	6
3.2 Mesure des vibrations sur les chantiers.....	8
3.2.1 Instrumentation des véhicules.....	10
3.3 Analyse des données.....	11
4. CARACTÉRISATION DES VIBRATIONS ET ÉVALUATION DE L'EXPOSITION	13
4.1 Caractérisation des propriétés vibratoires des véhicules.....	13
4.1.1 Caractéristiques des vibrations pendant le compactage d'un sol de faible densité	14
4.1.2 Caractéristiques des vibrations pendant le compactage d'un sol de forte densité.....	17
4.1.3 Caractéristiques des vibrations en transit.....	20
4.1.4 Fréquences dominantes.....	23
4.2 Caractérisation des vibrations des véhicules sur les chantiers.....	24
4.2.1 Mode de compactage	24
4.2.2 Mode de transit	30
4.3 Évaluation de l'exposition aux vibrations.....	32
4.3.1 Mode de compactage	33
4.3.2 Mode de transit	36
4.3.3 Exposition journalière équivalente aux vibrations.....	37
5. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....	41
6. RÉFÉRENCES.....	43

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Schéma d'un vibrocompacteur de sol doté d'un tambour vibrateur monté sur l'essieu avant.	1
Figure 3.1 : Vue de la piste d'essai utilisée pour les mesures en mode de compactage et en mode de transit.	6
Figure 3.2 : (a) Accéléromètre du siège, (b) accéléromètre du châssis avant, et (c) accéléromètre du groupe tambour (fixé au support de moteur du vibrateur).	8
Figure 4.1 : Comparaison des DSP de l'accélération verticale mesurée sur le châssis arrière (carrosserie) du véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres durant 5 essais en transit.	14
Figure 4.2 : Plages de DSP de l'accélération longitudinale (x) mesurée au niveau du plancher de la cabine pendant le compactage d'un sol de faible densité : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 10 tonnes à 6 cylindres.	15
Figure 4.3 : Plages de DSP de l'accélération latérale (y) mesurée au niveau du plancher de la cabine pendant le compactage d'un sol de faible densité : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 10 tonnes à 6 cylindres.	16
Figure 4.4 : Plages de DSP de l'accélération verticale (z) mesurée au niveau du plancher de la cabine durant le compactage d'un sol de faible densité : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 10 tonnes à 6 cylindres.	16
Figure 4.5 : Plages de DSP de l'accélération de tangage (θ) mesurée au niveau du plancher de la cabine durant le compactage d'un sol de faible densité : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 10 tonnes à 6 cylindres.	17
Figure 4.6 : Plages de DSP de l'accélération de roulis (ϕ) mesurée au niveau du plancher de la cabine durant le compactage d'un sol de faible densité : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 10 tonnes à 6 cylindres.	17
Figure 4.7 : Plages de DSP de l'accélération longitudinale (x) mesurée au niveau du plancher de la cabine pendant le compactage d'un sol de forte densité : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 10 tonnes à 6 cylindres.	18
Figure 4.8 : Plages de DSP de l'accélération latérale (y) mesurée au niveau du plancher de la cabine pendant le compactage d'un sol de forte densité : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 10 tonnes à 6 cylindres.	18
Figure 4.9 : Plages de DSP de l'accélération verticale (z) mesurée au niveau du plancher de la cabine durant le compactage d'un sol de forte densité : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 10 tonnes à 6 cylindres.	19
Figure 4.10 : Plages de DSP de l'accélération de tangage (θ) mesurée au niveau du plancher de la cabine durant le compactage d'un sol de forte densité : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 10 tonnes à 6 cylindres.	19

6 cylindres.	
Figure 4.11 : Plages de DSP de l'accélération de roulis (ϕ) mesurée au niveau du plancher de la cabine durant le compactage d'un sol de forte densité : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 10 tonnes à 6 cylindres.	20
Figure 4.12 : Plages de DSP de l'accélération longitudinale (x) mesurée au niveau du plancher de la cabine en mode de transit : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 10 tonnes à 6 cylindres.	20
Figure 4.13 : Plages de DSP de l'accélération latérale (y) mesurée au niveau du plancher de la cabine en mode de transit : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 10 tonnes à 6 cylindres.	21
Figure 4.14 : Plages de DSP de l'accélération verticale (z) mesurée au niveau du plancher de la cabine en mode de transit : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 10 tonnes à 6 cylindres.	21
Figure 4.15 : Plages de DSP de l'accélération de tangage (θ) mesurée au niveau du plancher de la cabine en mode de transit : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 10 tonnes à 6 cylindres.	22
Figure 4.16 : Plages de DSP de l'accélération de roulis (ϕ) mesurée au niveau du plancher de la cabine en mode de transit : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 10 tonnes à 6 cylindres.	22
Figure 4.17 : Plages de DSP de l'accélération longitudinale (x) mesurée au niveau du plancher de la cabine durant le compactage à basse amplitude du vibreur : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 13 tonnes à 6 cylindres.	25
Figure 4.18 : Plages de DSP de l'accélération latérale (y) mesurée au niveau du plancher de la cabine durant le compactage à basse amplitude du vibreur : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 13 tonnes à 6 cylindres.	26
Figure 4.19 : Plages de DSP de l'accélération verticale (z) mesurée au niveau du plancher de la cabine durant le compactage à basse amplitude du vibreur : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 13 tonnes à 6 cylindres.	26
Figure 4.20 : Plages de DSP de l'accélération de tangage (θ) mesurée au niveau du plancher de la cabine durant le compactage à basse amplitude du vibreur : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 13 tonnes à 6 cylindres.	27
Figure 4.21 : Plages de DSP de l'accélération de roulis (ϕ) mesurée au niveau du plancher de la cabine durant le compactage à basse amplitude du vibreur : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 13 tonnes à 6 cylindres.	27
Figure 4.22 : Réponse en fréquence du siège à suspension monté sur le véhicule de 13 tonnes à 6 cylindres.	28
Figure 4.23 : Plages de DSP de l'accélération mesurée au niveau du plancher de la cabine pendant le compactage à haute amplitude avec le compacteur de	29

10 tonnes à 4 cylindres : (a) longitudinale, (b) latérale, (c) verticale, (d) de tangage, et (e) de roulis.

- Figure 4.24 : Plages de DSP de l'accélération longitudinale (x) mesurée au niveau du plancher de la cabine en mode de transit : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 13 tonnes à 6 cylindres. 30
- Figure 4.25 : Plages de DSP de l'accélération latérale (y) mesurée au niveau du plancher de la cabine en mode de transit : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 13 tonnes à 6 cylindres. 30
- Figure 4.26 : Plages de DSP de l'accélération verticale (z) mesurée au niveau du plancher de la cabine en mode de transit : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 13 tonnes à 6 cylindres. 31
- Figure 4.27 : Plages de DSP de l'accélération de tangage (θ) mesurée au niveau du plancher de la cabine en mode de transit : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 13 tonnes à 6 cylindres. 31
- Figure 4.28 : Plages de DSP de l'accélération de roulis (φ) mesurée au niveau du plancher de la cabine en mode de transit : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 13 tonnes à 6 cylindres. 32

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 : Résumé des essais visant à mesurer les réponses aux vibrations du compacteur de sol de 10 tonnes à 6 cylindres.	7
Tableau 3.2 : Résumé des essais visant à mesurer les réponses aux vibrations des compacteurs de sol sur les deux chantiers.	10
Tableau 4.1 : Plages de fréquences dominantes observées à partir des spectres d'accélération mesurés.	24
Tableau 4.2 : Plages de fréquences dominantes observées à partir des spectres d'accélération mesurés au cours des tâches de compactage et de transit.	24
Tableau 4.3 : Moyennes et plages des valeurs globales d'accélération efficace, pondérées et non pondérées en fréquence (m/s^2 ou rad/s^2), résultant des vibrations mesurées au niveau du siège et de la cabine du compacteur de 10 tonnes à 4 cylindres en cours de compactage à basse et à haute amplitude du vibreur.	35
Tableau 4.4 : Moyennes et plages des valeurs globales d'accélération efficace, pondérées et non pondérées en fréquence (m/s^2 ou rad/s^2), résultant des vibrations mesurées au niveau du siège et de la cabine du compacteur de 13 tonnes à 6 cylindres en cours de compactage à basse amplitude du vibreur.	35
Tableau 4.5 : Moyennes et plages des valeurs globales d'accélération efficace, pondérées et non pondérées en fréquence (m/s^2 ou rad/s^2), résultant des vibrations mesurées au niveau du siège et de la cabine du compacteur de 10 tonnes à 4 cylindres et du compacteur de 13 tonnes à 6 cylindres en cours de transit.	36
Tableau 4.6 : Valeurs moyennes équivalentes à huit heures d'exposition – A(8) – en m/s^2 résultant des vibrations mesurées au niveau du siège et de la cabine du compacteur de 10 tonnes à 4 cylindres et du compacteur de 13 tonnes à 6 cylindres compte tenu de différentes répartitions journalières des tâches de compactage et de transit.	39

1. INTRODUCTION

Les vibrocompacteurs sont des véhicules articulés conçus pour assurer un compactage efficace des sols et des couches de base des routes au moyen d'un tambour/rouleau vibreur renfermant une masse rotative excentrée. Le véhicule repose sur des pneus de grande taille montés sur un de ses essieux, et sur un tambour vibreur monté sur l'autre essieu, comme l'indique la Figure 1.1. Cette asymétrie donne lieu à d'importants mouvements longitudinaux et de tangage du châssis (carrosserie) et de la cabine (poste de commande) du véhicule, qui s'ajoutent aux mouvements verticaux résultant des interactions des roues et du tambour vibreur avec le sol. La cabine et le tambour reposent sur des supports élastiques qui ne contribuent à supprimer que les vibrations de haute fréquence. Les vibrations globales du corps (VGC) de basse fréquence résultant des interactions tambour-sol et roues-sol ainsi que du comportement dynamique du véhicule à charge asymétrique sont directement transmises à l'opérateur à travers son siège, lequel se réduit à un coussin de mousse de polyuréthane dans la plupart des véhicules en usage au Québec. L'environnement vibratoire de tels véhicules peut ainsi être caractérisé comme celui d'un système avec une résonance faiblement amorti résultant du fait que le véhicule est dépourvu de suspension et que les pneus ne sont montés que sur un des essieux. Une exposition professionnelle prolongée à de telles vibrations globales du corps à basse fréquence a été associée à un risque accru de troubles de la colonne lombaire et du système nerveux connexe (p. ex. Bovenzi et Hulshof, 1998 ; Bovenzi et coll., 2006 ; Bongers et coll., 1988 ; Bernard, 1997).

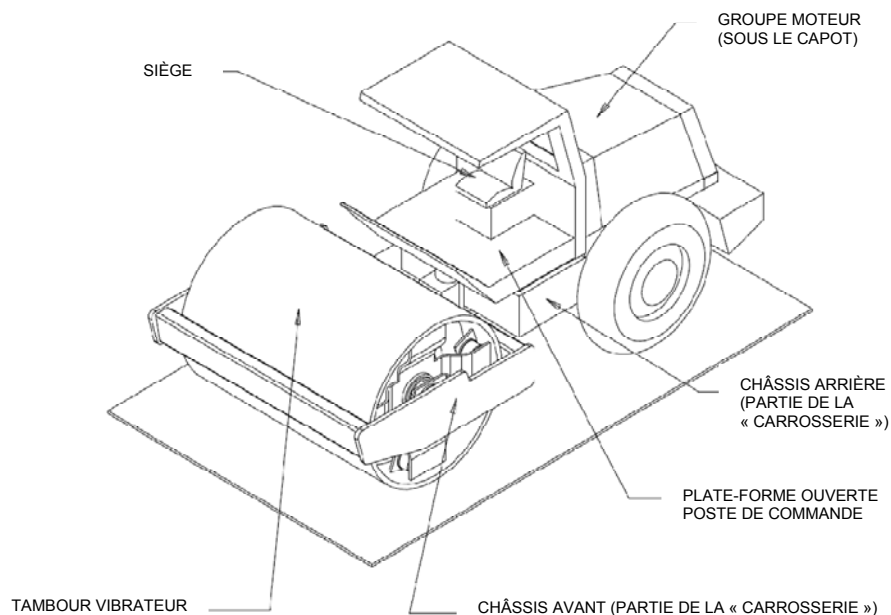


Figure 1.1 : Schéma d'un vibrocompacteur de sol doté d'un tambour vibreur monté sur l'essieu avant.

Les propriétés vibratoires de divers véhicules de travail en mouvement ont largement été caractérisées et évaluées eu égard à l'exposition aux VGC et aux éventuels risques connexes. Les efforts de caractérisation de l'environnement vibratoire des compacteurs de sol en mouvement sont toutefois demeurés restreints. Les compacteurs sont souvent perçus comme des outils ou des pièces d'équipement plutôt que comme des véhicules conduits par un humain, si bien qu'on s'est relativement moins penché sur leur comportement dynamique et sur

l'exposition de l'opérateur aux vibrations qui en résultent. Quelques études ont bien fait état de l'amplitude des VGC transmises aux opérateurs de compacteurs, mais les niveaux rapportés diffèrent grandement, notamment en raison des divers types de compacteurs pris en compte dans les études. Dupuis et coll. (1987) rapportaient des valeurs d'accélération efficace résultant des vibrations verticales d'une variété de compacteurs, et pondérées en fréquence, d'une amplitude variant de 0,3 à 1,7 m/s². L'étude suggérait en outre que les opérateurs de compacteurs pouvaient être exposés à des niveaux de VGC dépassant les limites tenues pour sûres selon la norme ISO 2631-1 (1997) pour une journée de travail de huit heures. Une étude effectuée en Europe (Griffin et coll., 2006) faisait état d'un niveau d'exposition moyen aux vibrations des compacteurs de sol de l'ordre de 0,6 m/s², supérieur au « niveau d'exposition déclenchant l'action de prévention » de 0,5 m/s² défini dans la directive de la CE (2002/44/CE, 2002). Cette étude rapportait également un niveau d'exposition aux vibrations de 1,2 m/s² pour la pire machine, supérieur au « niveau d'exposition limite » de 1,15 m/s² défini dans la directive de la CE. Une étude effectuée aux États-Unis rapportait une exposition correspondant à la somme vectorielle des vibrations verticales, longitudinales et latérales de 2,5 m/s² pour un compacteur Caterpillar (Beck et coll., 2004). Une autre étude, menée en Ontario et portant sur trois compacteurs différents, rapportait une accélération verticale moyenne pondérée en fréquence de 0,91 m/s², le niveau le plus élevé étant de 1,3 m/s² (Cann et coll., 2003).

L'amplitude des vibrations transmises à l'opérateur dépend de nombreux facteurs de conception et d'opération fort complexes. Il s'agit notamment du poids et des dimensions du véhicule, de la répartition de la charge, de la puissance du véhicule, des supports ou de la suspension du tambour et de la cabine, de la suspension du siège, de la vitesse d'opération, des propriétés du sol ou du terrain, et plus encore. Les études citées ci-dessus portaient sur un large éventail de compacteurs dont le poids, les dimensions et les conditions d'utilisation n'étaient pas clairement définis. Les plages d'exposition rapportées ne sont pas susceptibles d'être tenues pour applicables aux types de compacteurs généralement employés au Québec (de 10 et 13 tonnes). De plus, les vibrations transmises à l'opérateur sont tout particulièrement fonction du mode d'opération. En mode de compactage, le véhicule fonctionne à une très basse vitesse, de l'ordre de 3 km/h, alors que le rouleau vibreur est actif. On s'attend donc à ce que l'amplitude des vibrations résultant des interactions pneu-sol et rouleau-sol soit faible, et à ce que celle des vibrations résultant du mouvement de la masse rotative excentrique soit prédominante aux fréquences plus élevées correspondant à la fréquence angulaire du vibreur (25-35 Hz) et à ses multiples. L'environnement vibratoire en mode de compactage pourrait ainsi être caractérisé par des vibrations de fréquence relativement élevée pouvant être efficacement réduites par l'application des fonctions de pondération fréquentielle définies dans la norme ISO 2631-1. En mode de déplacement sur les chantiers et entre les chantiers, le rouleau vibreur est désactivé et le véhicule fonctionne à des vitesses relativement plus élevées (10-12 km/h). Dans ce mode, l'environnement vibratoire en mouvement est dominé par les vibrations de translation et de rotation de basse fréquence résultant de l'interaction des pneus et du tambour avec le terrain accidenté. L'exposition aux vibrations en mode de déplacement serait donc tout particulièrement préoccupante en raison de ses effets potentiels sur le bien-être et l'efficacité au travail des opérateurs de compacteurs.

La conception asymétrique des compacteurs, leur utilisation sur des terrains relativement accidentés et le manque de connaissances quant à leurs caractéristiques sur le plan des VGC – tout particulièrement en ce qui concerne les compacteurs en usage au Québec – sont les principaux facteurs qui ont motivé ce projet. Ce rapport présente le protocole d'essai retenu pour caractériser l'environnement VGC de translation et de rotation de certains modèles de compacteurs largement utilisés au Québec, et ce, aussi bien sur piste d'essai que sur des chantiers choisis. Les données sont utilisées pour déterminer l'exposition aux vibrations,

évaluée selon la norme ISO 2631-1 et la directive de la CE. Les propriétés vibratoires des véhicules sont ensuite appliquées à la formulation de recommandations de modifications de conception ou d'interventions pertinentes visant à réduire l'exposition des opérateurs aux vibrations.

2. OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

L'objectif général du projet est de contribuer à l'amélioration de l'environnement vibratoire au niveau des vibrations globales du corps (VGC) des vibrocompacteurs de sol utilisés dans le secteur de la construction routière au Québec, afin de minimiser les risques sanitaires et de sécurité chez les opérateurs de tels compacteurs. Les objectifs spécifiques sont résumés ci-dessous :

- identifier les fréquences prédominantes et les effets de différentes conditions d'opération en mesurant les vibrations émises par des compacteurs de sol dans des conditions d'opération contrôlées, sur une piste d'essai ;
- caractériser l'environnement des VGC des compacteurs de sol les plus couramment utilisés au Québec à partir de mesures sur le terrain effectuées sur des chantiers choisis ;
- évaluer l'exposition de l'opérateur aux vibrations conformément à la norme ISO 2631-1 et à la directive de la CE ;
- identifier les classes spectrales de vibrations correspondant aux modes d'opération les plus importants et susceptibles d'être appliquées à la recherche de mesures d'intervention appropriées ;
- proposer des pistes d'exploration additionnelles de mesures d'intervention efficaces ou de modifications conceptuelles propres à limiter l'exposition des opérateurs aux vibrations.

3. MESURE DES VIBRATIONS

Des séries d'essais ont été conçues pour mesurer les réponses des compacteurs de sol aux vibrations de translation et de rotation sous deux modes d'opération distincts : pendant le transit et lors du compactage. Ces séries d'essais visaient à porter sur les modèles de véhicules les plus couramment utilisés dans l'industrie de la construction au Québec. Des consultations effectuées auprès de l'Association canadienne des distributeurs d'équipement (DECA), de Sintra, de SMS Équipement Fédéral et de Hewitt ont révélé qu'il y a actuellement plus de 1000 compacteurs en service au Québec, dont la majorité sont à tambour unique. Près de 50 % d'entre eux sont fabriqués par Dynapac, 25 % par Caterpillar et les 25 % restants par Ingersoll Rand, Bomag et d'autres fabricants. De plus, la majorité des compacteurs de sol au Québec ont une capacité de 10 ou 13 tonnes. Les deux principaux fabricants (Dynapac et Caterpillar) ont ensuite été contactés pour obtenir des renseignements pertinents sur la conception des véhicules et, si possible, les valeurs d'émission de VGC, de même que pour solliciter leur appui en vue de faciliter les mesures sur le terrain. Les deux fabricants ont fait état de connaissances limitées en ce qui concerne les réponses aux vibrations des véhicules en usage au Québec, et Caterpillar a refusé de participer à l'étude. L'étude a ensuite été axée sur deux modèles de compacteur de 10 tonnes propulsés par des moteurs à 4 et 6 cylindres – ci-après désignés « 10 tonnes à 4 cylindres » et « 10 tonnes à 6 cylindres », respectivement – et un modèle de compacteur de 13 tonnes propulsé par un moteur à 6 cylindres – ci-après désigné « 13 tonnes à 6 cylindres ». Ces compacteurs étaient considérés comme étant les plus représentatifs des compacteurs utilisés au Québec.

Deux séries d'essais portant sur différents véhicules ont été menées. La première série visait à obtenir des mesures sur une piste d'essai dans des conditions contrôlées, tandis que la deuxième était conçue pour mesurer les vibrations sur des chantiers. Les détails relatifs aux séries d'essais sont présentés dans les sous-sections qui suivent.

3.1 Mesure des vibrations sur piste d'essai

Deux compacteurs de 10 tonnes (un « 10 tonnes à 4 cylindres » et un « 10 tonnes à 6 cylindres ») ont été utilisés dans le cadre de la première série d'essais pour mesurer les vibrations en modes de compactage et de transit. Le principal objectif était d'identifier les fréquences prédominantes des véhicules dans des conditions d'opération contrôlées sur une piste d'essai. Les compacteurs choisis étaient très semblables par leur poids et leurs dimensions, mais différents quant à la puissance de leur moteur. Les deux véhicules étaient équipés d'une direction par châssis articulé, d'une plate-forme ouverte (cabine) et d'un siège coussiné (sans suspension). Il convient de noter qu'un habitacle/cabine fermé est souvent installé sur ces véhicules par souci d'adaptation aux conditions climatiques du Québec. Le tambour reposait sur un certain nombre de supports élastiques montés sur l'unité avant du véhicule. Le tambour de chaque véhicule était pourvu d'une masse excentrique tournant à environ 2000 tr/min et à même de générer deux amplitudes de vibration différentes (« basse » et « haute »). L'armature de la cabine et le moteur reposaient sur des supports élastiques montés sur l'unité arrière du véhicule.

Les essais ont été menés sur une piste d'essai de Dynapac à Selma, au Texas, afin de mesurer les vibrations des véhicules dans le cadre de simulations de tâches de compactage et de transit. La piste d'essai (Figure 3.1) offrait des tracés permettant de simuler les tâches de transit et de compactage. En mode de compactage, les véhicules roulaient sur des surfaces déformables et nivelées à une vitesse de près de 3 km/h en marche avant et arrière. Les tâches

de compactage portaient sur des sols choisis de densité variable (sol humide de faible densité, sol sec de forte densité et surface en gravier de très forte densité) et étaient effectuées à deux amplitudes de vibreur, bien que la majorité d'entre elles l'aient été alors que l'amplitude du vibreur était réglée à la position « haute ». Chaque essai en compactage, à amplitude « basse » et « haute » sur les différentes surfaces, a été répété plusieurs fois, selon les conditions météorologiques et la déformabilité de la surface. En mode de transit, les compacteurs roulaient en marche avant sur des segments de piste non déformables de plus de 100 m, à une vitesse presque constante de 10 km/h. Le vibreur était alors désactivé. La rugosité de la surface de la piste d'essai a été jugée « moyenne », donc représentative de celle des routes secondaires du Québec. La série d'essais consistait en un total de 23 et 27 essais pour les compacteurs de 10 tonnes à 4 cylindres et de 10 tonnes à 6 cylindres, respectivement. À titre d'exemple, le Tableau 3.1 résume les différents essais effectués avec le compacteur de 10 tonnes à 6 cylindres. La série d'essais incluait également des essais pendant lesquels le moteur tournait au ralenti, afin de vérifier les signaux des capteurs.



Figure 3.1 : Vue de la piste d'essai utilisée pour les mesures en mode de compactage et en mode de transit.

3.1.1 Instrumentation des véhicules

Chaque véhicule d'essai a été équipé d'instruments pour mesurer les réponses aux vibrations des quatre principales composantes du véhicule, à savoir le siège, la cabine ouverte (poste de commande), le tambour et la carrosserie comme telle du véhicule, soit le châssis arrière. Les instruments en question comprenaient :

- un accéléromètre triaxial (ADXL05JH, $\pm 5g$) installé sur le coussin du siège pour mesurer les vibrations longitudinales (x), latérales (y) et verticales (z) au point d'interface opérateur-siège, comme l'indique la Figure 3.2 (a) ;
- un gyroscope triaxial jumelé à un accéléromètre triaxial (IMU400CC, $\pm 100^\circ/s$) et installé sur le plancher de la cabine ouverte près du siège de l'opérateur pour mesurer les vibrations de translation et de rotation de la cabine/plateforme ;
- un gyroscope triaxial jumelé à un accéléromètre triaxial (IMU400CC, $\pm 200^\circ/s$) et installé sur le châssis arrière, près du centre de masse du véhicule, pour mesurer les vibrations de translation et de rotation de la carrosserie (châssis) ;

- un accéléromètre triaxial (Crossbow CXL10GP3, ±10g) monté sur le châssis arrière au-dessus du joint boulonné de l'essieu rigide. Seule l'accélération verticale a été mesurée avec cet accéléromètre, puisqu'on s'attendait à ce que la vibration horizontale soit semblable à celle de la carrosserie ;
- un accéléromètre triaxial (PCB Piezotronics, ±50g) monté du côté du châssis duquel le tambour est entraîné (transmission hydrostatique), dans le plan de l'axe du tambour, pour mesurer les vibrations de translation transmises par le tambour au châssis avant à travers les supports élastiques (Figure 3.2 (b)). Seuls les signaux d'accélération des axes x et z ont été relevés.
- un accéléromètre triaxial (PCB Piezotronics, ±50g) fixé au support de moteur du vibreur du tambour pour mesurer l'accélération du tambour le long des axes x et z (Figure 3.3 (c)).

Tableau 3.1 : Résumé des essais visant à mesurer les réponses aux vibrations du compacteur de sol de 10 tonnes à 6 cylindres.

Essai n°	Opération	Densité du sol	Vibreur	Vitesse (km/h)	Direction
1	Transit n° 1	Non déformable	Désactivé	10	Avant
2	Moteur au ralenti n° 1	Non déformable	Désactivé	0	s.o.
3	Compactage / Sol humide n° 3	Faible densité	Haute	3	Avant
4	Compactage / Sol humide n° 3	Faible densité	Haute	3	Arrière
5	Compactage / Sol humide n° 1	Faible densité	Haute	3	Avant
6	Compactage / Sol humide n° 1	Faible densité	Haute	3	Arrière
7	Compactage / Sol humide n° 2	Faible densité	Haute	3	Avant
8	Compactage / Sol humide n° 2	Faible densité	Haute	3	Arrière
9	Transit n° 2	Non déformable	Désactivé	10	Avant
10	Compactage / Gravier	Très forte densité	Haute	3	Avant
11	Compactage / Gravier	Très forte densité	Basse	3	Arrière
12	Transit / Parcours à obstacles	Non déformable	Désactivé	10	Avant
13	Transit / Parcours à obstacles	Non déformable	Désactivé	10	Arrière
14	Transit / Parcours à obstacles	Non déformable	Désactivé	5	Avant
15	Transit / Parcours à obstacles	Non déformable	Désactivé	5	Arrière
16	Transit n° 3	Non déformable	Désactivé	10	Avant
17	Compactage / Sol sec n° 1	Surcompacté	Haute	3	Avant
18	Compactage / Sol sec n° 1	Forte densité	Haute	3	Avant
19	Compactage / Sol sec n° 1	Forte densité	Haute	3	Arrière
20	Compactage / Sol sec n° 1	Surcompacté	Haute	3	Arrière
21	Moteur au ralenti n° 2	Non déformable	Désactivé	0	s.o.
22	Compactage / Sol sec n° 2	Surcompacté	Basse	3	Avant
23	Compactage / Sol sec n° 2	Forte densité	Basse	3	Avant
24	Compactage / Sol sec n° 2	Forte densité	Haute	3	Arrière
25	Compactage / Sol sec n° 2	Surcompacté	Haute	3	Arrière
26	Moteur au ralenti no 3	Non déformable	Désactivé	0	s.o.
27	Transit no 4	Non déformable	Désactivé	10	Avant

Les signaux des accéléromètres PCB ont été conditionnés à l'aide d'un conditionneur/amplificateur de signal, tandis que ceux des gyroscopes et des

microaccéléromètres de siège (Crossbow) ont été directement acquis au moyen d'un enregistreur de données multicanal (TEAC). Il convient de noter que les gyroscopes fournissaient des mesures de vitesses angulaires, lesquelles ont par la suite été différenciées lors de l'analyse des données de manière à obtenir les accélérations angulaires. Tous les systèmes de mesure ont été étalonnés en laboratoire avant leur installation.

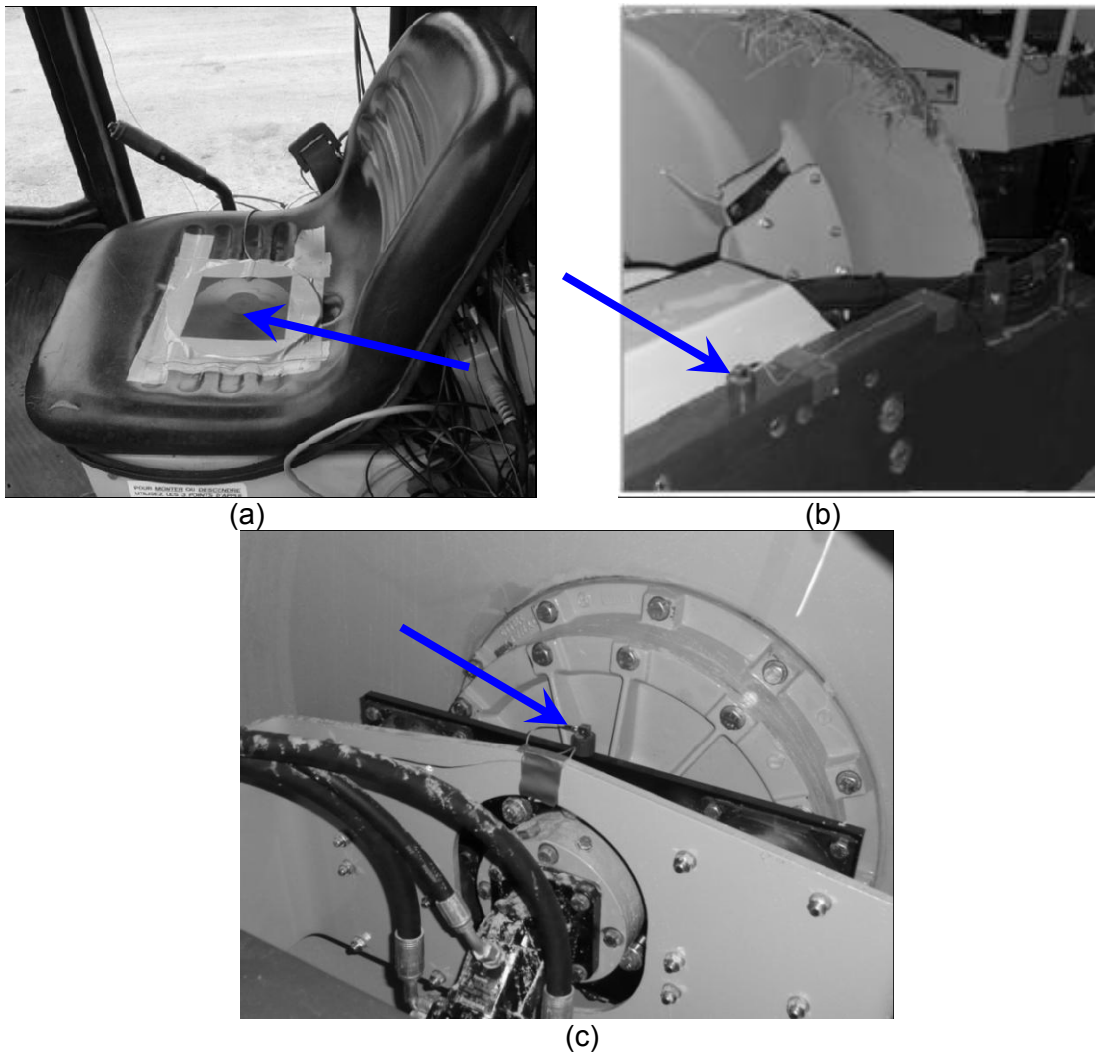


Figure 3.2 : (a) Accéléromètre du siège, (b) accéléromètre du châssis avant, et (c) accéléromètre du groupe tambour (fixé au support de moteur du vibreur).

3.2 Mesure des vibrations sur les chantiers

La deuxième série d'essais visait à mesurer les vibrations sous des conditions de travail plus représentatives, sur deux chantiers différents. Il s'agissait d'une part d'un chantier de développement urbain à Joliette (Québec) et d'autre part d'un chantier de construction routière près de Trois-Rivières (Québec). Différents véhicules ont été choisis pour chacun des chantiers, à savoir :

- (i) Un compacteur de 10 tonnes parmi les plus couramment utilisés dans l'industrie de la construction au Québec. Ce compacteur avait 7 ans d'âge (1800 heures), était surmonté d'un habitacle/cabine modifié remplaçant la plateforme ouverte d'origine, et le siège du conducteur n'avait pas de suspension. On ne sait pas si les supports de cabine avaient été adaptés au poids de la structure modifiée. Le véhicule était propulsé par un moteur à 4 cylindres. Le véhicule choisi était considéré par les opérateurs comme représentatif de la « moyenne » des compacteurs sous l'angle des VGC. Il était également tenu pour représentatif de la « moyenne » des compacteurs quant à sa capacité et son âge, et il est ci-après désigné comme le « 10 tonnes à 4 cylindres ». Les propriétés vibratoires de ce véhicule ont été mesurées sur un chantier de développement urbain.
- (ii) Un compacteur de 13 tonnes doté d'une cabine et de supports de cabine fournis par le fabricant, et d'un siège à suspension. Le véhicule était propulsé par un moteur à 6 cylindres. Ce compacteur n'avait que 2 ans d'âge (600 heures), était considéré comme l'un des rares compacteurs offrant un niveau « acceptable » de VGC, et était tenu pour le mieux conçu en matière d'isolement aux vibrations. Il est ci-après désigné comme le « 13 tonnes à 6 cylindres ». Les propriétés vibratoires de ce véhicule ont été mesurées sur un chantier de construction routière.

Les essais ont été menés sur les chantiers durant les tâches de compactage et de transit. Les essais en compactage consistaient en passages répétés sur deux voies distinctes (désignées voies « 1 » et « 2 ») de la surface de roulement, tandis que les essais en déplacement ont été menés pendant le transit du chantier aux aires d'attente. Les essais en compactage avec le compacteur de 10 tonnes à 4 cylindres ont porté sur 6 et 8 passages sur les voies « 1 » et « 2 », respectivement. Le compacteur de 13 tonnes à 6 cylindres a fait l'objet de 7 et 5 essais sur les voies « 1 » et « 2 », respectivement. Les réponses en mode de transit ont été mesurées au cours de 5 essais avec le compacteur de 10 tonnes, et de 2 essais avec le compacteur de 13 tonnes. Il importe de préciser que la nature des vibrations transmises variait considérablement au fur et à mesure qu'augmentait le nombre de passages sur une voie donnée. Cela s'explique par l'augmentation de la rigidité et de la densité du sol en cours de compactage, et des variations possibles de l'amplitude du vibreur. Bien qu'il soit généralement souhaitable de régler l'amplitude du vibreur à « basse » lors des derniers passages sur une voie donnée, un schéma de réglage de l'amplitude du vibreur n'a pu être observé pendant les prises de mesures. L'opérateur du compacteur de 13 tonnes à 6 cylindres a choisi d'effectuer tous les essais en compactage en réglant l'amplitude du vibreur à « basse », alors que l'opérateur du compacteur de 10 tonnes à 4 cylindres faisait varier l'amplitude de façon plus ou moins arbitraire. Le Tableau 3.2 résume les différents essais menés en compactage et en transit, compte tenu du réglage de l'amplitude du vibreur et du sens du déplacement.

Tableau 3.2 : Résumé des essais visant à mesurer les réponses aux vibrations des compacteurs de sol sur les deux chantiers.

Mode (passage)	Compacteur de 10 tonnes à 4 cylindres			Compacteur de 13 tonnes à 6 cylindres		
	Essai n ^o	Amplitude	Direction	Essai n ^o	Amplitude	Direction
Transit (1)	1	-	Avant	1	-	Avant
Transit (2)	2	-	Avant	2	-	Avant
Transit (3)	3	-	Avant		-	
Transit (4)	4	-	Avant		-	-
Transit (5)	5	-	Avant		-	-
Voie de compactage « 1 » (1)	6	Haute	Avant	3	Basse	Avant
Voie de compactage « 1 » (2)	7	Haute	Arrière	4	Basse	Arrière
Voie de compactage « 1 » (3)	8	Basse	Avant	5	Basse	Avant
Voie de compactage « 1 » (4)	9	Basse	Arrière	6	Basse	Arrière
Voie de compactage « 1 » (5)	10	Haute	Avant	7	Basse	Avant
Voie de compactage « 1 » (6)	11	Basse	Arrière	8	Basse	Arrière
Voie de compactage « 1 » (7)				9	Basse	Avant
Voie de compactage « 2 » (1)	12	Basse	Avant	10	Basse	Avant
Voie de compactage « 2 » (2)	13	Basse	Arrière	11	Basse	Arrière
Voie de compactage « 2 » (3)	14	Haute	Avant	12	Basse	Avant
Voie de compactage « 2 » (4)	15	Haute	Arrière	13	Basse	Arrière
Voie de compactage « 2 » (5)	16	Haute	Avant	14	Basse	Avant
Voie de compactage « 2 » (6)	17	Haute	Arrière			
Voie de compactage « 2 » (7)	18	Haute	Avant			
Voie de compactage « 2 » (8)	19	Basse	Arrière			

3.2.1 Instrumentation des véhicules

À la différence des essais sur piste, l'instrumentation des véhicules aux fins d'essais sur le terrain était essentiellement limitée à la cabine et au siège afin d'évaluer l'exposition aux vibrations et d'établir les mesures d'intervention souhaitables. Les vibrations du châssis arrière ont également été mesurées en mode de transit et de compactage. L'instrumentation utilisée pour chaque véhicule d'essai est résumée ci-dessous :

- un accéléromètre triaxial (ADXL05JH, $\pm 5g$) installé sur le coussin du siège pour mesurer les vibrations longitudinales (x), latérales (y) et verticales (z) au point d'interface opérateur-siège, comme l'indique la Figure 3.2 (a) ;
- un gyroscope triaxial jumelé à un accéléromètre triaxial (IMU400CC, $\pm 100^\circ/s$) et installé sur le plancher de la cabine près du siège de l'opérateur pour mesurer les vibrations de translation et de rotation de la cabine/plateforme ;
- un accéléromètre triaxial (PCB Piezotronics, $\pm 50g$) installé sur le châssis arrière, près du centre de masse du véhicule, pour mesurer les vibrations de translation de la carrosserie.

3.3 Analyse des données

Les segments de données obtenus pour chaque véhicule testé ont été regroupés par mode d'opération, soit en transit et en compactage. Les données de compactage obtenues sur la piste d'essai ont été regroupées par type de sol – de faible ou forte densité – parallèlement aux essais en transit. Dans ce contexte, chaque groupe comprend entre 3 et 6 segments de données de longueur variable, comme suit :

- 10 tonnes à 4 cylindres, transit (10 km/h) : 5 segments de 120 secondes chacun
- 10 tonnes à 6 cylindres, transit (10 km/h) : 4 segments de 120 secondes chacun
- 10 tonnes à 4 cylindres, compactage (forte densité) : 3 segments de 60 secondes chacun
- 10 tonnes à 6 cylindres, compactage (forte densité) : 3 segments de 60 secondes chacun
- 10 tonnes à 4 cylindres, compactage (faible densité) : 3 segments de 120 secondes chacun
- 10 tonnes à 6 cylindres, compactage (faible densité) : 6 segments de 120 secondes chacun

Les données sur les vibrations obtenues lors de différents passages en mode de compactage sur une voie de chantier donnée ont été examinées pour évaluer les effets de l'augmentation de la rigidité du sol sous l'effet de passages répétés. Les données obtenues durant plusieurs essais en compactage et en transit ont ensuite été regroupées comme pour les essais sur piste. De plus, les données obtenues selon que le vibreur fonctionnait à « basse » ou à « haute » amplitude ont été regroupées, car aucun schéma de réglage précis de l'amplitude ne pouvait être établi.

Les données ont été traitées au moyen d'un filtre passe-haut ayant une fréquence de coupure de 0,7 Hz afin d'éliminer toute distorsion éventuelle des signaux, puis numérisées à l'aide d'une plateforme d'analyse PULSE de Brüel & Kjær. Les données ont ensuite été analysées afin d'établir les spectres de réponse aux vibrations mesurée en termes de densité spectrale de puissance (DSP) avec une bande passante de 100 Hz (résolution en fréquence de 0,125 Hz) et une accélération efficace dans les bandes de fréquences de tiers d'octave. Les données obtenues dans le cadre des essais sur les chantiers ont en outre été analysées afin de déterminer les accélérations efficaces pondérées en fréquence le long de chaque axe de même que la somme vectorielle des accélérations efficaces au cours des tâches de compactage et de transit, conformément à la méthode définie dans la norme ISO 2631-1 (1997). Les valeurs équivalentes à huit heures d'exposition ont également été calculées en combinant les valeurs d'exposition en compactage et en transit, évaluées et examinées à la lumière de la directive de la CE.

4. CARACTÉRISATION DES VIBRATIONS ET ÉVALUATION DE L'EXPOSITION

Les données obtenues durant les deux séries d'essais ont été analysées afin de caractériser les vibrations transmises par les véhicules et d'évaluer l'exposition des opérateurs aux vibrations. Les données d'essais sur piste révélaient dans l'ensemble des vibrations d'une amplitude nettement plus élevée le long des axes de translation et de rotation que les données provenant des essais sur les chantiers. Cette différence a été attribuée aux vitesses relativement plus élevées auxquelles les essais sur piste avaient été réalisés, donnant lieu à de fréquents sautilllements du tambour sur la surface de roulement. En conséquence, les résultats découlant des mesures effectuées sur la piste d'essai n'ont pas été utilisés pour évaluer l'exposition aux VGC. Ces résultats ont cependant été jugés essentiels pour déterminer les propriétés vibratoires du véhicule, particulièrement en ce qui a trait aux fréquences dominantes et à l'amplitude relative des vibrations le long des axes longitudinal (x), latéral (y), vertical (z), de roulis (ϕ) et de tangage (θ). Le niveau de vibration le long de l'axe de lacet s'est avéré très faible durant les tâches de compactage et de transit, et pouvait être directement lié aux manœuvres de virage du véhicule. Les réponses des véhicules aux vibrations de lacet ont donc été exclues des analyses ultérieures. Les spectres et les fréquences dominantes obtenus ont dès lors permis de dégager une estimation des fréquences naturelles des véhicules et d'envisager des mesures d'intervention efficaces. L'évaluation de l'exposition aux vibrations a été effectuée à partir des données obtenues sur les chantiers, lesquelles étaient considérées comme représentatives des conditions de travail réelles.

Les mesures de vibration obtenues sur les chantiers ont révélé de faibles facteurs de crête (bien au-dessous de 9) ; quant aux facteurs de crête des données obtenues sur la piste d'essai, ils étaient inférieurs à 12. Les analyses d'exposition effectuées à partir des données obtenues sur les chantiers ont donc été restreintes aux accélérations efficaces non pondérées et pondérées en fréquence, conformément à la norme ISO 2631-1 (1997) et à la directive de la CE (2002).

4.1 Caractérisation des propriétés vibratoires des véhicules

Les spectres d'accélération de différents essais sur piste en mode de transit et de compactage ont été évalués pour chaque compacteur, et ensuite utilisés pour établir les fréquences dominantes et les modes de vibration probables. Les résultats obtenus l'ont été sous forme de densité spectrale de puissance (DSP) des accélérations et de spectres d'accélérations efficaces en bandes de fréquences de tiers d'octave des accélérations le long des axes de translation et de rotation. Les propriétés vibratoires des véhicules dans différentes conditions d'opération sont présentées sous forme de DSP des accélérations, tandis que les spectres d'accélérations efficaces ont servi à établir des accélérations efficaces globales non pondérées et pondérées en fréquence. Les spectres d'accélération de segments connexes ou d'essais répétés pour chaque mode d'opération ont été regroupés pour définir les plages de vibration. Les plages définies à partir des mesures obtenues au niveau du plancher de la cabine/plateforme ont ensuite servi à établir les classes spectrales de vibrations. Les spectres d'accélération des deux véhicules se sont avérés assez comparables en amplitude et en fréquences, exception faites de légères différences dans les fréquences de roulis, attribuées aux distributions de charges différentes des véhicules (unité arrière).

Les spectres d'accélération obtenus pour les essais dans chaque mode d'opération révélèrent généralement des tendances comparables quant aux fréquences dominantes correspondant à l'amplitude maximale des vibrations. Ces fréquences pouvaient donc être associées aux fréquences et aux modes de vibration naturels des véhicules. À titre d'exemple, la Figure 4.1 présente une comparaison des DSP de l'accélération verticale mesurée au niveau du châssis arrière du véhicule (ci-après désigné comme la carrosserie) durant cinq essais en transit à une vitesse de près de 10 km/h en marche avant. La comparaison suggère une répétabilité raisonnablement bonne, notamment sous l'angle des fréquences dominantes des vibrations, bien que d'importants écarts d'amplitude soient évidents, et puissent être attribués à des variations de vitesse et de rugosité de la route. Des niveaux de répétabilité comparables ont aussi été observés en ce qui concerne les mesures obtenues lors de différents essais en compactage pour chaque densité de sol prise en considération. Compte tenu de la répétabilité observée, les données issues des différents essais dans un même mode d'opération ont ensuite été regroupées afin de caractériser les propriétés vibratoires des véhicules selon la moyenne et la plage des DSP des accélérations et des accélérations efficaces. Les enveloppes spectrales qui en résultent et dont traite la sous-section suivante pourraient être appliquées à la vérification de modèles mathématiques simulant la dynamique de ces véhicules, à l'évaluation des doses de vibrations et à la conception ou au réglage de suspensions secondaires au niveau de la cabine et du siège.

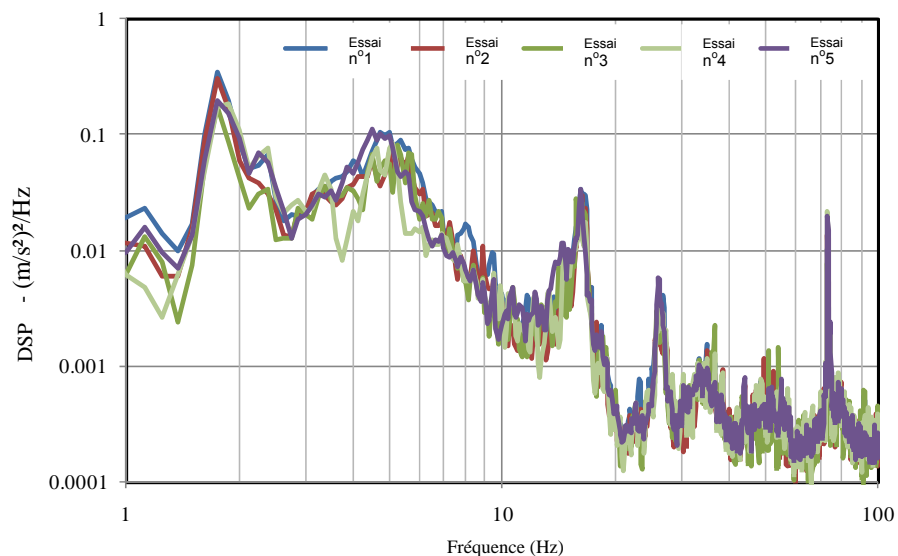


Figure 4.1 : Comparaison des DSP de l'accélération verticale mesurée sur le châssis arrière (carrosserie) du véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres durant 5 essais en transit.

4.1.1 Caractéristiques des vibrations pendant le compactage d'un sol de faible densité

Le compactage d'un sol s'effectue invariablement à très faible vitesse (près de 3 km/h). On s'attendrait donc à ce que l'amplitude des vibrations résultant des interactions pneus/tambour-terrain soit faible. Cependant, le vibreur à masse excentrique a tendance à produire des vibrations de forte amplitude à une fréquence relativement plus élevée, de près de 30 Hz. De

telles vibrations en compactage, surtout lorsque le sol est de faible densité ou que l'amplitude du vibreur est basse, ne sont pas considérées comme préoccupantes étant donné que les pondérations fréquentielles indiquées dans la norme ISO 2631-1 tendent à éliminer en grande partie les effets des vibrations de haute fréquence. Les plages de DSP de l'accélération résultant des vibrations mesurées au niveau du plancher de la cabine des deux véhicules, le long des axes x , y , z , θ et ϕ , sont présentées aux Figures 4.2 à 4.6, respectivement, tandis que celles qui résultent des vibrations mesurées au niveau du siège et de la carrosserie sont présentées à l'Annexe A (Figures A.1 à A.5).

Les résultats indiquent clairement un pic d'amplitude élevée près de 30 Hz, indépendamment du véhicule et de l'emplacement ou de la direction des vibrations mesurées. Les spectres révèlent aussi des pics à des multiples de la fréquence d'excitation fondamentale de la masse excentrique, qui est d'environ 30 Hz. Ces pics sont très évidents dans les spectres de vibration mesurés au niveau du plancher de la cabine et de la carrosserie des véhicules autour de 15, 60 et 90 Hz. Dans l'ensemble, les résultats révèlent une très faible amplitude des vibrations de translation et de rotation de basse fréquence (<10 Hz), quoique sur le compacteur de 10 tonnes à 6 cylindres, ces vibrations soient d'une amplitude légèrement plus élevée. On ne s'attend donc pas à ce que l'exposition aux vibrations et les risques potentiels afférents soient source de préoccupation dans ce mode d'opération. Par ailleurs, les supports de tambour et de cabine ont tendance à atténuer fortement les vibrations de haute fréquence produites par le vibreur des deux véhicules. Ces supports semblent plus efficaces sur le compacteur de 10 tonnes à 6 cylindres, ce qui s'explique vraisemblablement par des différences de répartition inertielle et massique entre les deux véhicules. Comme l'indiquent les Figures 4.5 et 4.6, les spectres d'accélération de roulis et de tangage ont tendance à augmenter avec la fréquence, ce qui est surtout attribuable au très faible débattement en flexion et en torsion de la carrosserie et de la structure de la cabine. Quelques études traitant des vibrations angulaires de véhicules lourds font état de tendances comparables et attribuent aux modes de déformation structurale l'augmentation des vibrations angulaires à des fréquences plus élevées (Boileau et coll., 2005 ; Rakheja et coll., 2001).

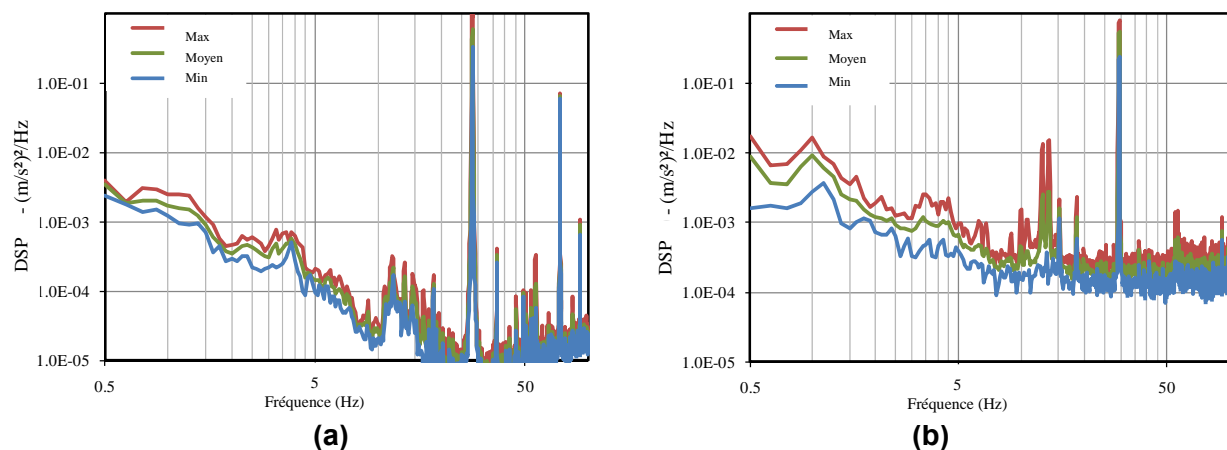


Figure 4.2 : Plages de DSP de l'accélération longitudinale (x) mesurée au niveau du plancher de la cabine pendant le compactage d'un sol de faible densité : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 10 tonnes à 6 cylindres.

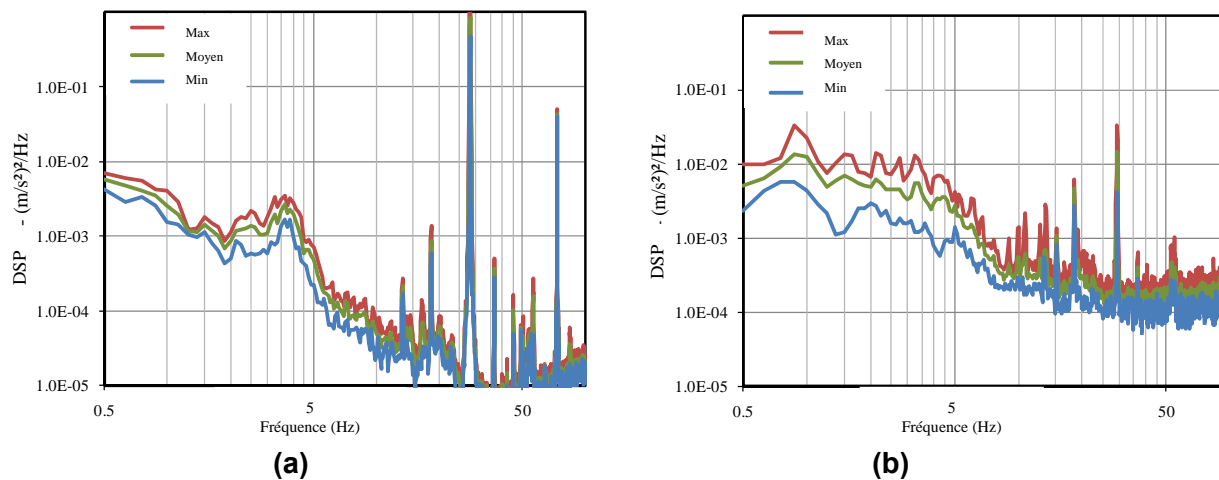


Figure 4.3 : Plages de DSP de l'accélération latérale (y) mesurée au niveau du plancher de la cabine pendant le compactage d'un sol de faible densité : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 10 tonnes à 6 cylindres.

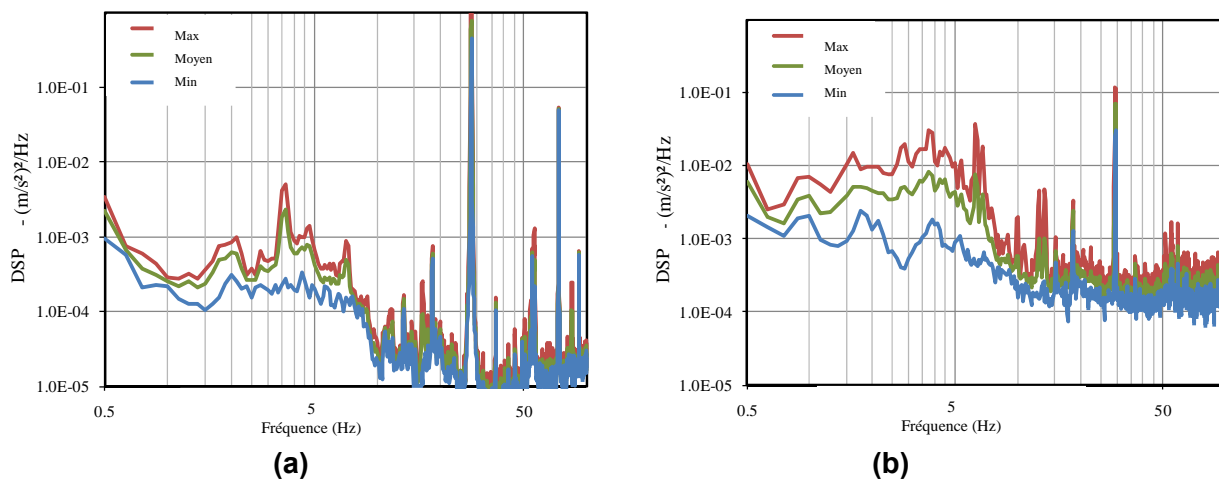


Figure 4.4 : Plages de DSP de l'accélération verticale (z) mesurée au niveau du plancher de la cabine durant le compactage d'un sol de faible densité : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 10 tonnes à 6 cylindres.

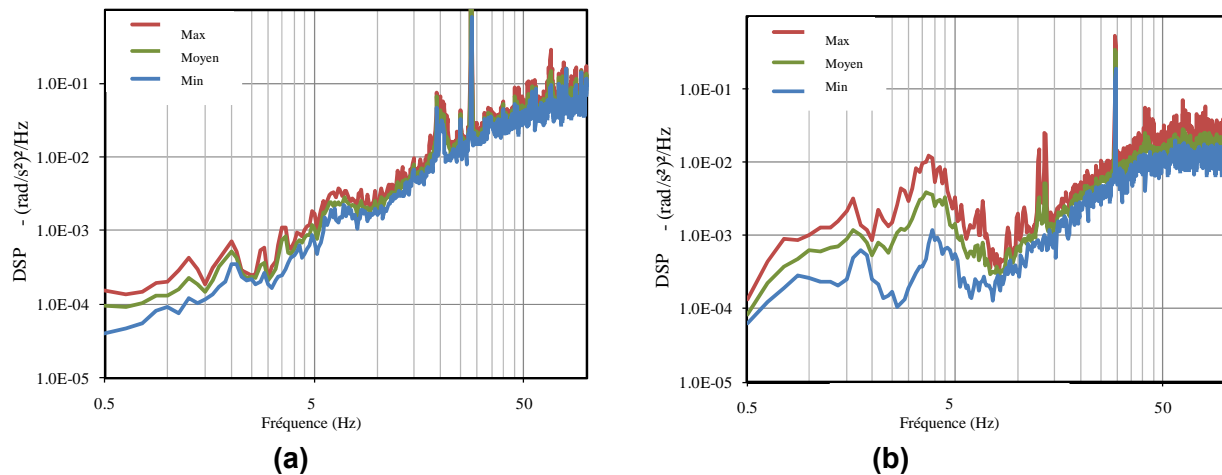


Figure 4.5 : Plages de DSP de l'accélération de tangage (θ) mesurée au niveau du plancher de la cabine durant le compactage d'un sol de faible densité : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 10 tonnes à 6 cylindres.

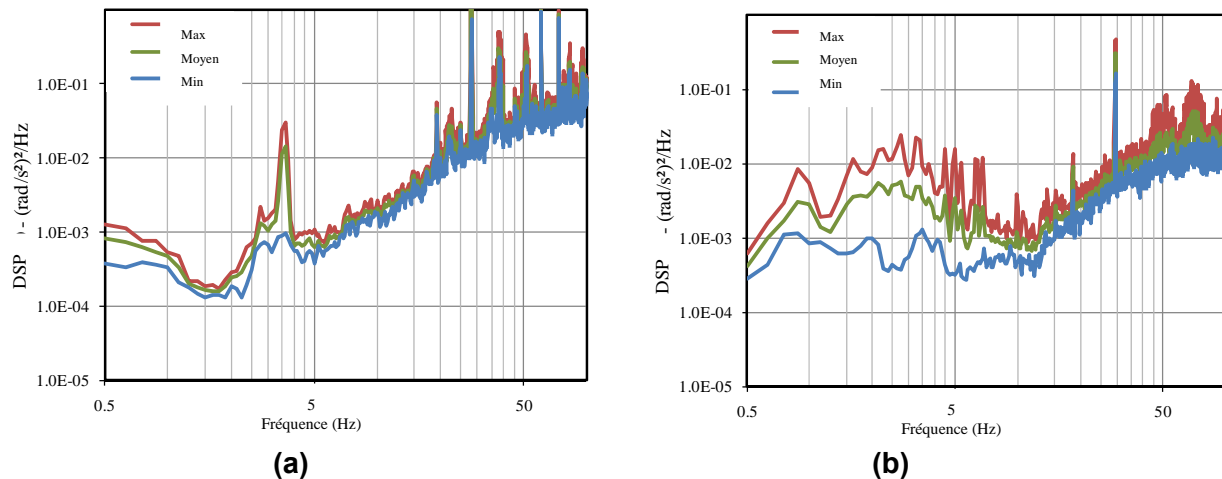


Figure 4.6 : Plages de DSP de l'accélération de roulis (ϕ) mesurée au niveau du plancher de la cabine durant le compactage d'un sol de faible densité : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 10 tonnes à 6 cylindres.

4.1.2 Caractéristiques des vibrations pendant le compactage d'un sol de forte densité

La densité du sol a tendance à augmenter au fil des passages répétés du compacteur sur une surface de terrain donnée, dont la rigidité accrue accentue les interactions dynamiques du tambour et des pneus avec le sol. L'utilisation du véhicule sur un sol dense peut également provoquer un sautiller intermittent, partiel ou total, du tambour (perte de contact du tambour avec le sol) (Adam et Kopf, 2000 ; Andereg, 2000), ce qui a pour effet d'augmenter l'amplitude des vibrations transmises à l'opérateur. L'amplitude des vibrations de basse fréquence le long des axes x, y et z des deux véhicules s'est avérée supérieure à l'amplitude mesurée durant le

compactage d'un sol de faible densité, comme l'indiquent les spectres de vibration mesurés au niveau du plancher de la cabine des Figures 4.7 à 4.9. Les plages de spectres de vibration mesurés au niveau du siège et de la carrosserie sont présentées à l'Annexe A (Figures A.6 à A.10).

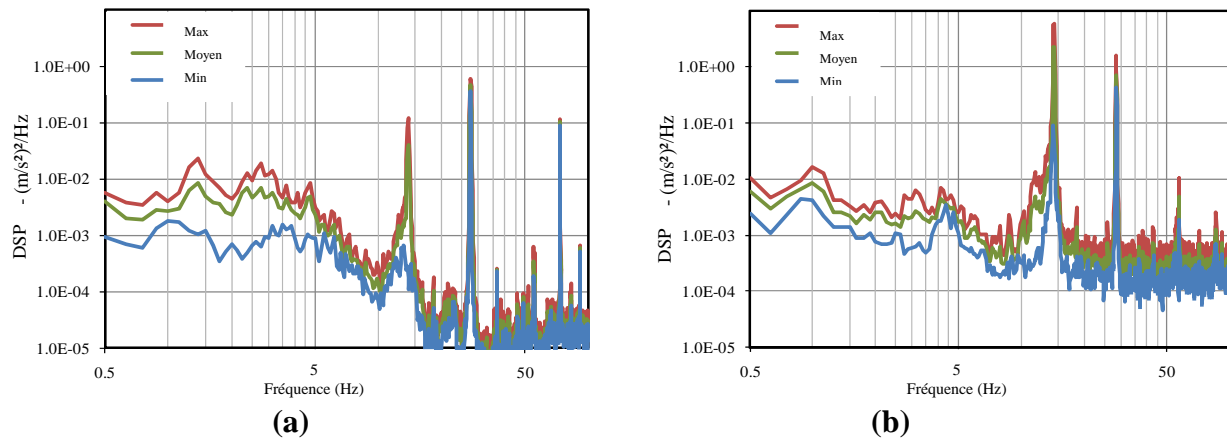


Figure 4.7 : Plages de DSP de l'accélération longitudinale (x) mesurée au niveau du plancher de la cabine pendant le compactage d'un sol de forte densité : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 10 tonnes à 6 cylindres.

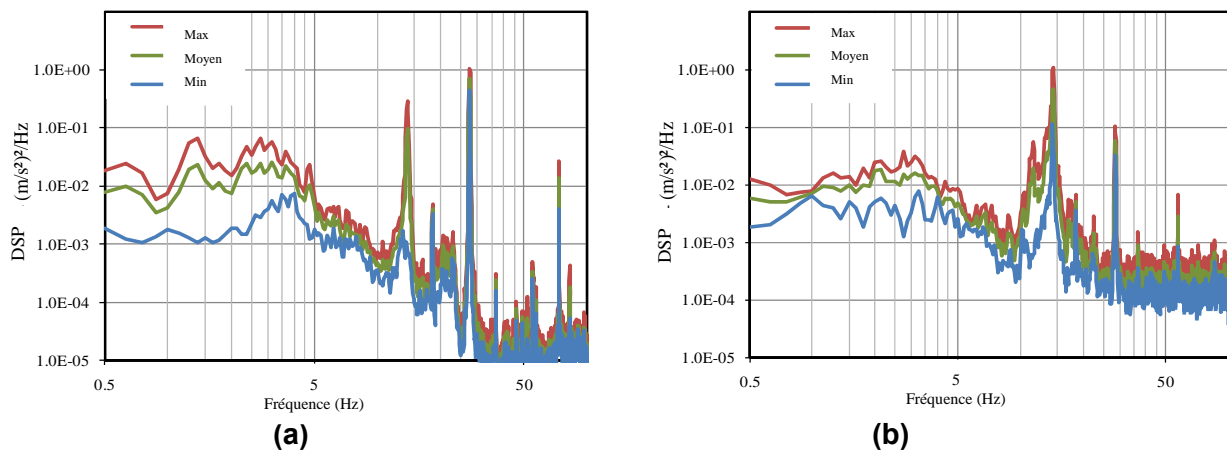


Figure 4.8 : Plages de DSP de l'accélération latérale (y) mesurée au niveau du plancher de la cabine pendant le compactage d'un sol de forte densité : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 10 tonnes à 6 cylindres.

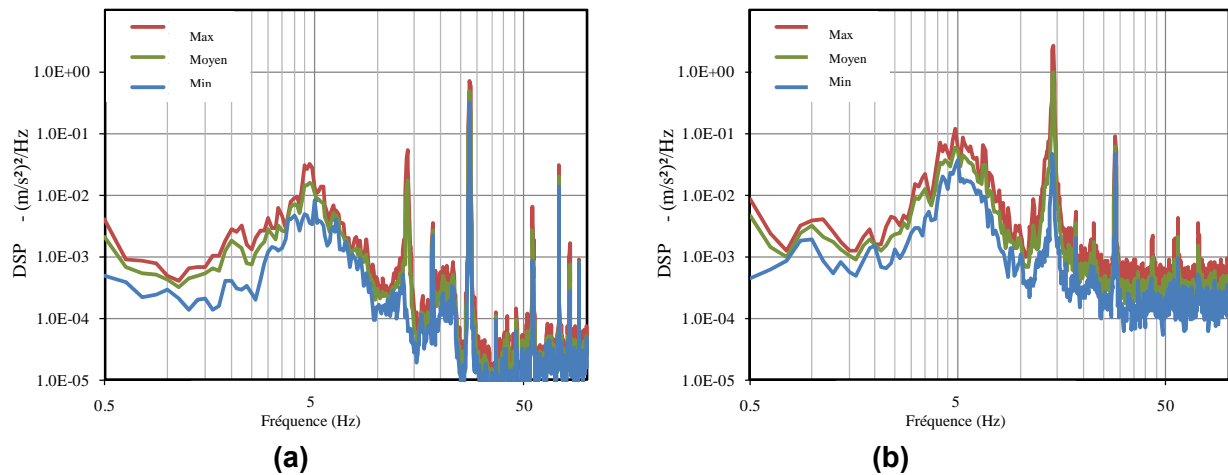


Figure 4.9 : Plages de DSP de l'accélération verticale (z) mesurée au niveau du plancher de la cabine durant le compactage d'un sol de forte densité : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 10 tonnes à 6 cylindres.

Les composantes spectrales des vibrations de basse fréquence sont toutefois assez semblables à celles qui ont été observées lors du compactage de sols de faible densité. Comme l'indiquent les figures, le compactage d'un sol de plus forte densité tend à accentuer les pics d'amplitude à 15 Hz (la moitié de la fréquence de la masse rotative en déséquilibre). On estime que cela est dû au sautellement du tambour sur le sol relativement dur. L'amplitude des vibrations longitudinales et latérales près de 15 Hz tend à être plus élevée que l'amplitude observée à la fréquence fondamentale d'environ 30 Hz. Le sautellement du tambour peut aussi contribuer à l'excitation de certains des modes de vibration à basse fréquence du véhicule. L'amplitude des vibrations de basse fréquence dans la plage de 1,4 à 8,0 Hz est dès lors plus élevée que celle dont font état les Figures 4.2 à 4.4. Des tendances similaires se dégagent également des DSP des accélérations de roulis et de tangage de la carrosserie et de la cabine, comme l'indiquent les Figures 4.10 et 4.11, respectivement.

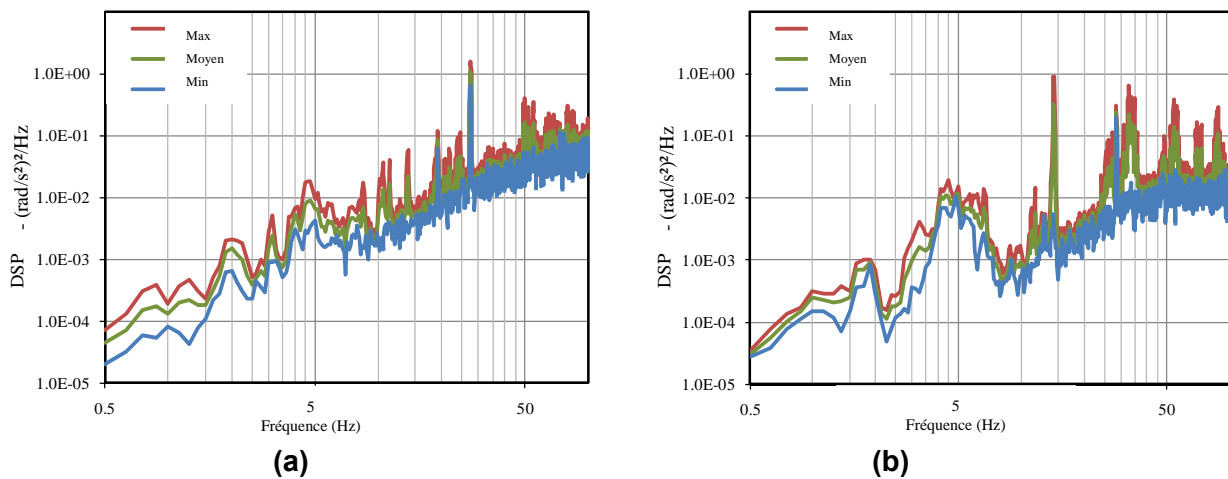


Figure 4.10 : Plages de DSP de l'accélération de tangage (θ) mesurée au niveau du plancher de la cabine durant le compactage d'un sol de forte densité : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 10 tonnes à 6 cylindres.

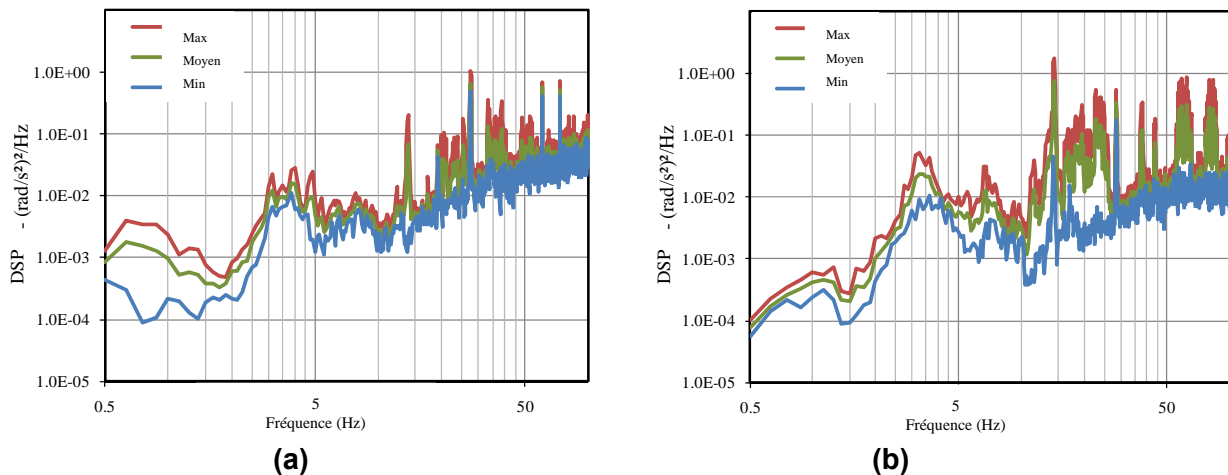


Figure 4.11 : Plages de DSP de l'accélération de roulis (ϕ) mesurée au niveau du plancher de la cabine durant le compactage d'un sol de forte densité : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 10 tonnes à 6 cylindres.

4.1.3 Caractéristiques des vibrations en transit

En mode de transit, le compacteur se déplace alors que le vibreur est désactivé. Le comportement vibratoire du véhicule est donc principalement déterminé par les interactions du tambour et des roues avec la surface du terrain. En outre, la vitesse du véhicule est beaucoup plus élevée qu'en mode de compactage, ce qui augmente considérablement l'amplitude des vibrations, surtout dans la plage des basses fréquences. Les fréquences dominantes des vibrations de basse fréquence observées dans les spectres de vibration mesurés en mode de transit étaient généralement assez comparables à celles qui ressortent des données provenant des deux véhicules lors des essais en compactage. Ces fréquences pouvaient donc être considérées comme les fréquences naturelles des véhicules. Les Figures 4.12 à 4.16 présentent les plages de spectres d'accélération longitudinale (x), latérale (y), verticale (z), de tangage (θ) et de roulis (ϕ) mesurés au niveau du plancher de la cabine, tandis que les spectres d'accélération mesurés au niveau du siège et de la carrosserie sont présentés à l'Annexe A (Figures A.11 à A.15).

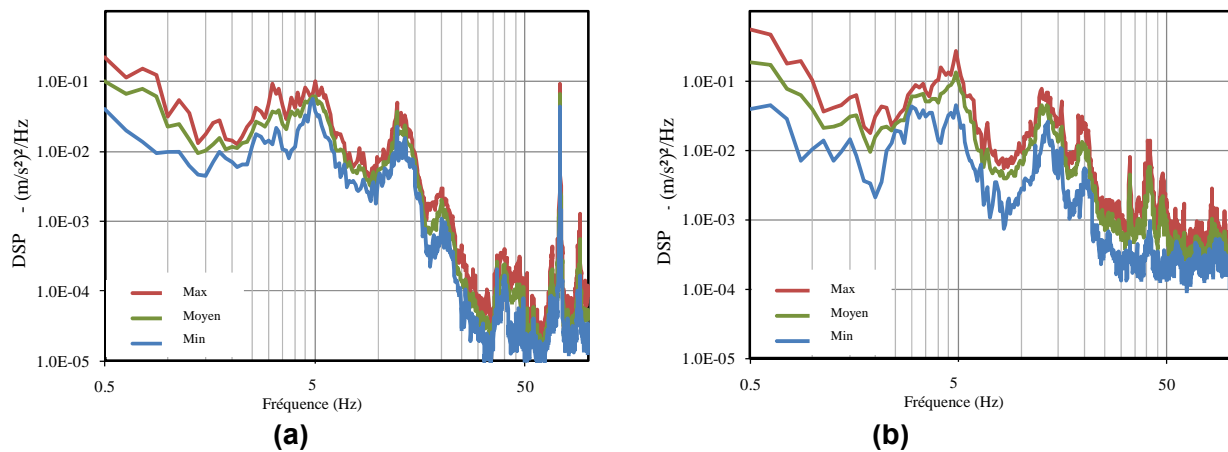


Figure 4.12 : Plages de DSP de l'accélération longitudinale (x) mesurée au niveau du plancher de la cabine en mode de transit : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 10 tonnes à 6 cylindres.

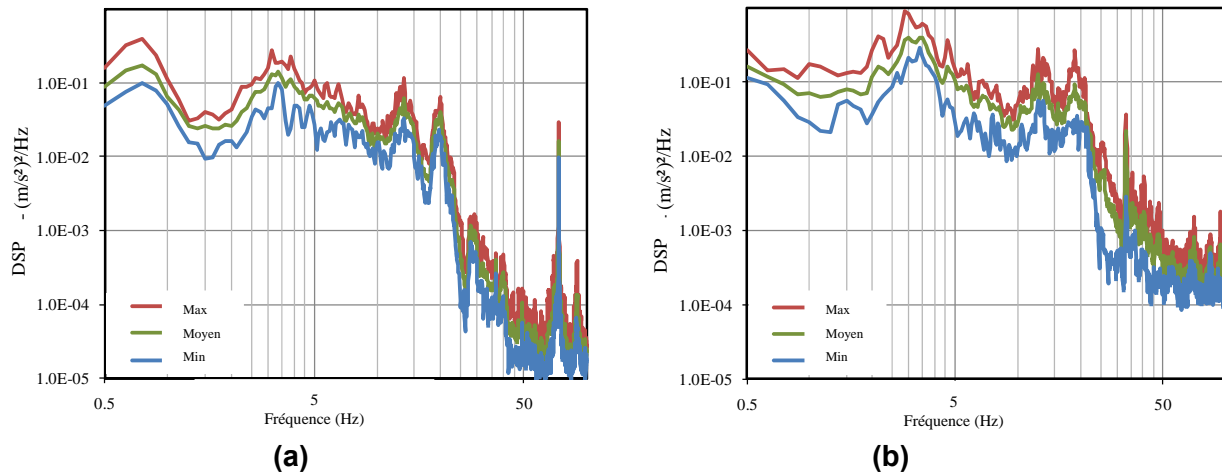


Figure 4.13 : Plages de DSP de l'accélération latérale (y) mesurée au niveau du plancher de la cabine en mode de transit : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 10 tonnes à 6 cylindres.

Les résultats révèlent des vibrations de basse fréquence d'une amplitude beaucoup plus élevée le long de tous les axes que dans le cas des essais en mode de compactage. En outre, les vibrations de haute fréquence attribuées au vibreur ne sont pas évidentes, même si les résultats indiquent par ailleurs des niveaux significatifs de vibrations de haute fréquence attribuables aux débattements en flexion et en torsion de la structure de la carrosserie et de la cabine. Les spectres d'accélération révèlent des pics d'amplitude dans les plages de 1,4 à 2,4 Hz, de 2,7 à 3,9 Hz, de 4,2 à 8,0 Hz, de 12,0 à 17,0 Hz et de 18,4 à 21,0 Hz. Ces pics sont généralement observables dans les réponses des véhicules le long de tous les axes, tandis que les fréquences correspondantes peuvent être associées à des modes de vibration particuliers des véhicules. De plus, les plages de fréquences des vibrations révélées par les spectres de vibration des deux véhicules sont assez comparables.

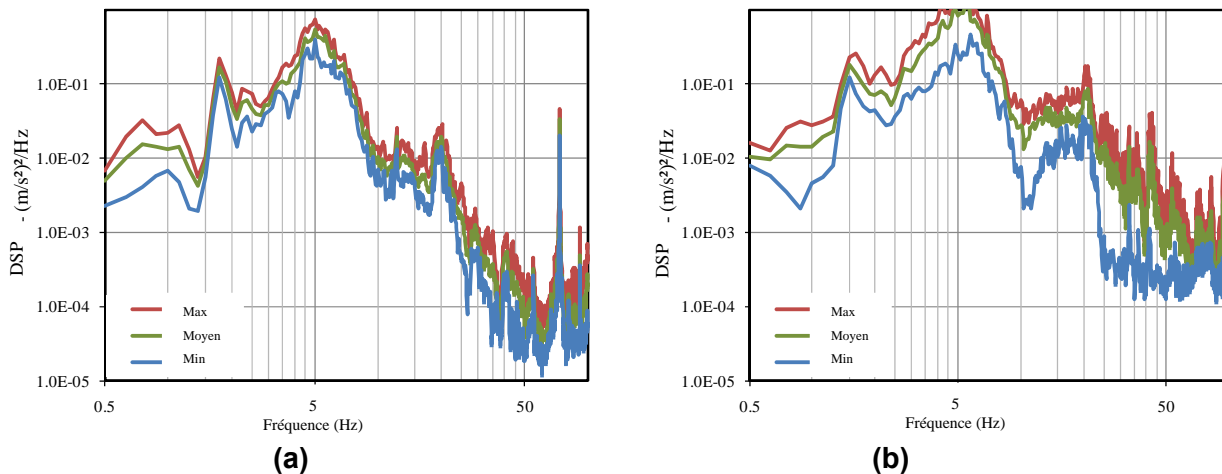


Figure 4.14 : Plages de DSP de l'accélération verticale (z) mesurée au niveau du plancher de la cabine en mode de transit : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 10 tonnes à 6 cylindres.

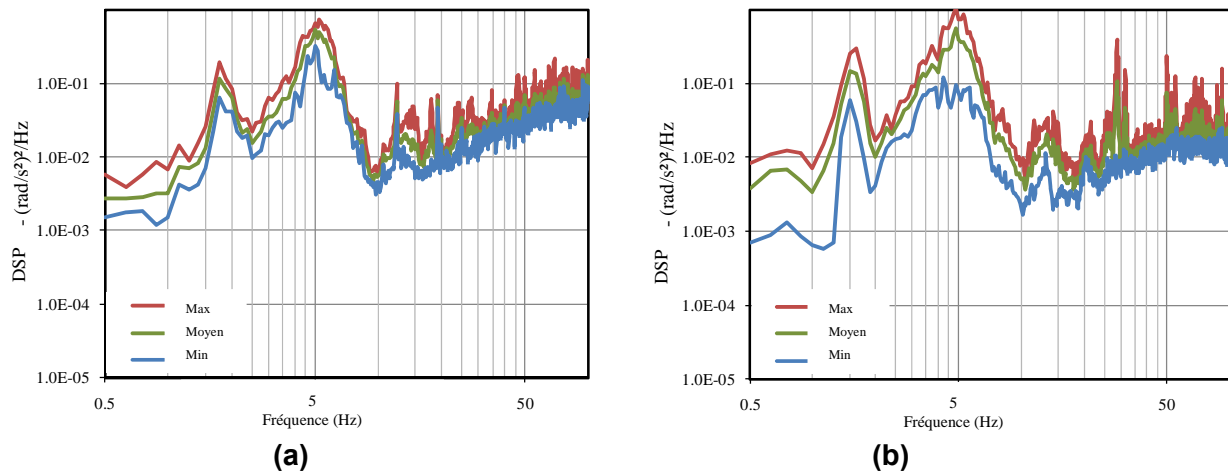


Figure 4.15 : Plages de DSP de l'accélération de tangage (θ) mesurée au niveau du plancher de la cabine en mode de transit : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 10 tonnes à 6 cylindres.

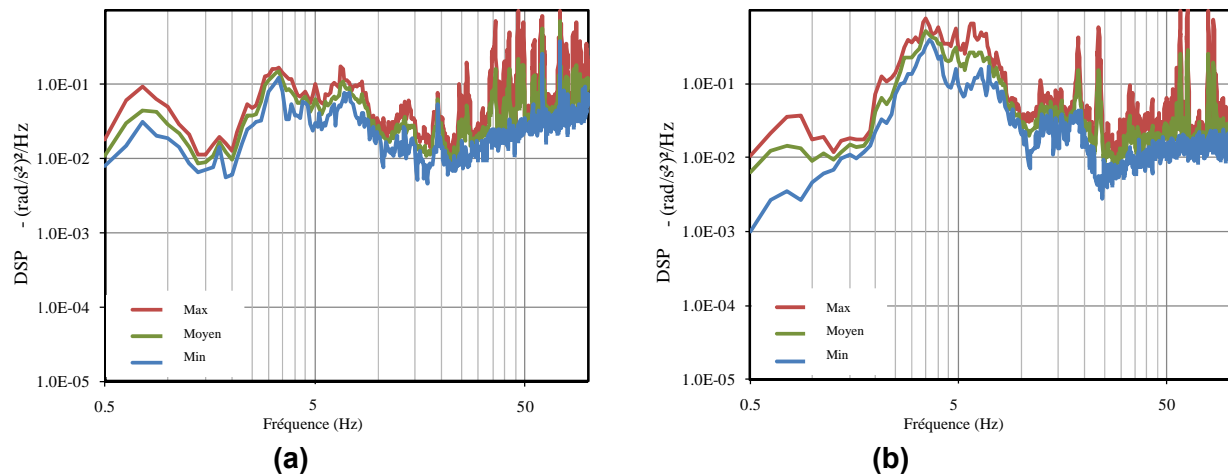


Figure 4.16 : Plages de DSP de l'accélération de roulis (ϕ) mesurée au niveau du plancher de la cabine en mode de transit : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 10 tonnes à 6 cylindres.

Les plages de spectres de vibration dans le plan de tangage (x , z et θ) révèlent uniformément un pic distinct autour de 4,9 Hz. L'amplitude de ce pic est particulièrement importante dans les réponses de tangage, mais elle est également notable relativement aux spectres d'accélération verticale et longitudinale de la cabine et du siège. On estime donc que ce pic est attribuable aux vibrations de tangage de la carrosserie. Étant donné que la masse et le moment de masse de la carrosserie sont sensiblement plus importants que ceux de la cabine et du moteur, on peut s'attendre à une plus grande participation des vibrations de tangage dans les réponses des autres composantes des véhicules.

Les spectres de vibration dans le plan de tangage présentent aussi des pics d'amplitude élevés près de 1,7 et 3,2 Hz en ce qui concerne les réponses verticales et longitudinales mesurées au

niveau de la carrosserie. Les spectres de tangage de la cabine affichent d'importants pics près de 4 Hz, tandis que les vibrations verticales de la cabine culminent près de 5,5 Hz. Les spectres d'accélération de la cabine révèlent par ailleurs des pics d'accélération longitudinale dans la plage de 12 à 13 Hz, bien que ces derniers puissent aussi être associés à une combinaison de vibrations latérales et de lacet, puisque le capteur du plancher de la cabine était monté avec un décalage notable par rapport au plan de symétrie verticale du véhicule en raison de contraintes d'espace à proximité du siège de l'opérateur. Les résultats indiquent clairement des vibrations couplées dans le plan de tangage (x , z et θ) avec des pics près de 1,7, 3,2, 4,0, 4,9 et 5,5 Hz. Les pics observés laissent croire que les fréquences de 1,7, 3,2 et 4,9 Hz sont associées aux modes de rebond, de tangage et de vibration longitudinale de la carrosserie, respectivement. Les modes de tangage et de rebond de la cabine sont présumés survenir près de 4,0 et 5,5 Hz, respectivement.

Les spectres d'accélération mesurés révèlent en outre des pics à des fréquences comparables le long des axes de rebond, de roulis et latéral, ce qui suggère un couplage en lien avec les mouvements dans le plan de roulis. Le spectre d'accélération de roulis de la carrosserie présente un pic distinct près de 3,4 Hz, lequel est aussi évident dans la réponse de roulis de la cabine. On estime dès lors que le mode de roulis du châssis arrière survient près de cette fréquence. Les spectres d'accélération de roulis de la cabine des deux véhicules présentent également des pics distincts près de 6,8 Hz et dans la plage de fréquences de 12 à 13 Hz. Ces fréquences sont attribuées au mode de roulis de la cabine et à son couplage avec les modes de vibration latérale et de lacet, respectivement. Des pics aux environs de 2,2 et de 3,0 Hz sont par ailleurs évidents dans les spectres d'accélération latérale de la carrosserie, ce qui correspond à ses fréquences couplées en modes de vibration latérale et de lacet, de même que dans les spectres d'accélération latérale de la cabine. Les spectres d'accélération affichent également des pics près de 73 Hz, ce qui semble correspondre à la seconde harmonique de la vitesse du moteur près de 2200 tr/min.

4.1.4 Fréquences dominantes

Le Tableau 4.1 résume les plages de fréquences correspondant aux pics observés à partir des spectres d'accélération mesurés sur les deux compacteurs en modes de transit et de compactage (sols de faible et forte densité). Les plages de fréquences des accélérations verticales, longitudinales et de tangage dominantes suggèrent un important couplage entre ces modes de vibration. Ce tableau présente également les plages de fréquences globales pour les pics observés à partir des spectres d'accélération mesurés. Le Tableau 4.2 présente quant à lui les plages de fréquences correspondant aux pics observés à partir des spectres de vibration mesurés au cours de différents modes d'opération, de même que les plages de fréquences globales. Les résultats suggèrent qu'un certain nombre de plages de fréquences correspondant aux pics de vibration observés durant le mode de compactage coïncident avec celles des pics observés en mode de transit, comme on pouvait s'y attendre.

Tableau 4.1 : Plages de fréquences dominantes observées à partir des spectres d'accélération mesurés.

<i>Mode de vibration</i>	<i>Plage de fréquences correspondant aux pics observés (Hz)</i>						
Vertical – siège	1.5 ~ 2.1	3.2 ~ 3.6	4.2 ~ 6.5	14.0 ~ 14.5		27.3 ~ 29.4	73.2 ~ 73.3
Vertical – cabine	1.5 ~ 2.0		4.2 ~ 7.0	14.0 ~ 14.5	18.9 ~ 19.9	27.5 ~ 29.4	73.3 ~ 73.4
Vertical – carrosserie	1.5 ~ 2.2		4.2 ~ 5.5	15.8 ~ 17.0		27.5 ~ 29.5	73.3 ~ 73.4
Longitudinal – cabine	1.5 ~ 1.9	2.9 ~ 3.5	4.5 ~ 5.5	12.3 ~ 14.5	18.4 ~ 19.9	27.5 ~ 29.5	73.3 ~ 73.4
Latéral/lacet – cabine	1.9 ~ 2.3	2.7 ~ 3.9	4.5 ~ 5.0	12.0 ~ 14.5	18.4 ~ 21.0	27.5 ~ 29.5	73.3 ~ 73.4
Latéral/lacet – carross.	1.9 ~ 2.3	2.7 ~ 3.9	4.5 ~ 5.0			27.5 ~ 29.5	73.3 ~ 73.4
Tangage – cabine	1.4 ~ 1.9	3.2 ~ 3.7	4.2 ~ 6.2	12.0 ~ 14.5	19.1 ~ 19.9	28.0 ~ 29.5	
Tangage – carrosserie	1.4 ~ 1.9	2.9 ~ 3.6	4.2 ~ 6.2	15.6 ~ 16.5		27.5 ~ 28.1	
Roulis – cabine	1.7 ~ 2.4	2.8 ~ 3.9	5.7 ~ 8.0	12.0 ~ 14.5	18.4 ~ 19.9	27.5 ~ 29.5	
Roulis – carrosserie	1.7 ~ 2.4	2.8 ~ 3.9	4.5 ~ 5.0	14.0 ~ 14.5		27.5 ~ 29.5	
Plage globale	1.4 ~ 2.4	2.7 ~ 3.9	4.2 ~ 8.0	12.0 ~ 17.0	18.4 ~ 21.0	27.3 ~ 29.5	73.2 ~ 73.4

Tableau 4.2 : Plages de fréquences dominantes observées à partir des spectres d'accélération mesurés au cours des tâches de compactage et de transit.

<i>Mode</i>	<i>Plage de fréquences correspondant aux pics observés (Hz)</i>						
Transit	1.4 ~ 2.4	2.7 ~ 3.9	4.2 ~ 8.0	12.0 ~ 17.0	18.4 ~ 21.0		73.3 ~ 73.4
Compact. (faible dens.)	1.7 ~ 2.3	2.7 ~ 3.5	4.2 ~ 7.0	12.0 ~ 14.0	19.1 ~ 19.9	27.3 ~ 29.5	73.2 ~ 73.3
Compact. (haute dens.)	1.4 ~ 2.4	2.7 ~ 3.9	4.2 ~ 8.0	12.0 ~ 17.0	19.1 ~ 19.9	27.3 ~ 29.5	73.3 ~ 73.4
Plage globale	1.4 ~ 2.4	2.7 ~ 3.9	4.2 ~ 8.0	12.0 ~ 17.0	18.4 ~ 21.0	27.3 ~ 29.5	73.2 ~ 73.4

4.2 Caractérisation des vibrations des véhicules sur les chantiers

Les données obtenues durant les essais sur les chantiers avec les véhicules de 10 tonnes à 4 cylindres et de 13 tonnes à 6 cylindres ont été analysées de façon semblable afin de caractériser les vibrations transmises au plancher de la cabine et au siège. Les spectres d'accélération obtenus pour différents essais correspondant à chaque mode étaient généralement assez comparables pour chaque véhicule. Ils ont donc été regroupés pour établir les plages de vibration le long de chaque axe, lesquelles sont traitées dans les sous-sections qui suivent.

4.2.1 Mode de compactage

Les données obtenues en mode de compactage ont été regroupées selon que l'amplitude du vibreur était réglée à « basse » ou « haute ». Dans le cas du compacteur de 13 tonnes à 6 cylindres, les résultats se limitaient toutefois au réglage de l'amplitude du vibreur à « basse », puisque l'opérateur avait opté pour ce réglage durant tous les essais. En outre, les niveaux de vibration mesurés au cours des différents passages ont été combinés pour établir les plages, même si l'amplitude des vibrations transmises avait généralement augmenté au fil des passages. Les plages de spectres d'accélération longitudinale, latérale et verticale mesurés au niveau du plancher de la cabine des deux véhicules en mode de compactage lorsque l'amplitude du vibreur était réglée à « basse » sont présentées dans les Figures 4.17 à 4.19, respectivement. Les plages de spectres correspondants mesurés au niveau du siège et de la carrosserie sont présentées à l'Annexe B (Figures B.1 à B.3). Les Figures 4.20 et 4.21 présentent les spectres d'accélération de tangage et de roulis, respectivement, mesurés au niveau du plancher de la cabine des deux véhicules. L'amplitude des vibrations et les fréquences dominantes des deux véhicules sont assez comparables à celles qui ont été observées à partir des données obtenues sur la piste d'essai pendant le compactage d'un sol

de forte densité, bien que les pics de vibration de tangage et de roulis sur le véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres soient beaucoup plus élevés. Il convient toutefois de noter que les supports antivibratiles de cette machine de 7 ans pouvaient présenter un niveau d'usure perceptible.

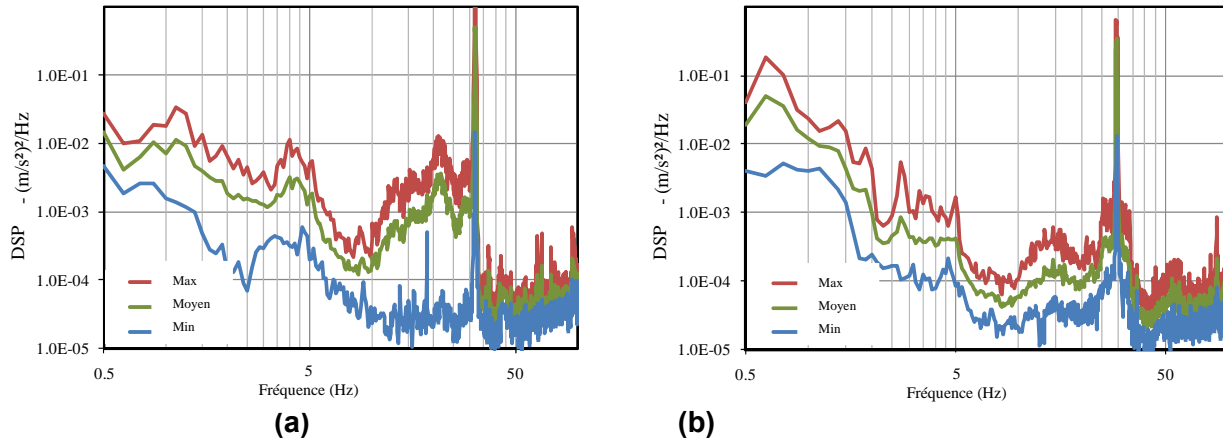


Figure 4.17 : Plages de DSP de l'accélération longitudinale (x) mesurée au niveau du plancher de la cabine durant le compactage à basse amplitude du vibreur : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 13 tonnes à 6 cylindres.

Les résultats indiquent des vibrations longitudinales de basse fréquence au niveau du siège d'une amplitude relativement plus élevée que celle qui a été mesurée sur la piste d'essai (Figure 4.17), tandis que l'amplitude des vibrations de la cabine et de la carrosserie n'est que légèrement plus élevée. Cela peut s'expliquer par des vibrations de tangage d'une amplitude beaucoup plus élevée sur le chantier, comme l'indique la Figure 4.20. L'amplitude des vibrations latérales de basse fréquence au niveau du siège du véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres sur le chantier est aussi plus élevée que sur la piste d'essai, ce qui peut être attribué aux vibrations de roulis plus importantes de la cabine, comme l'indique la Figure 4.21. De même, les mesures d'amplitude des vibrations verticales du siège et de la cabine du véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres sont beaucoup plus élevées sur le chantier. Cependant, l'amplitude des vibrations verticales de basse fréquence au niveau de la cabine du véhicule de 13 tonnes à 6 cylindres, plus récent, s'avère inférieure à celle qui a été mesurée sur la piste d'essai, ce qui s'explique vraisemblablement par le réglage de l'amplitude du vibreur à « basse ».

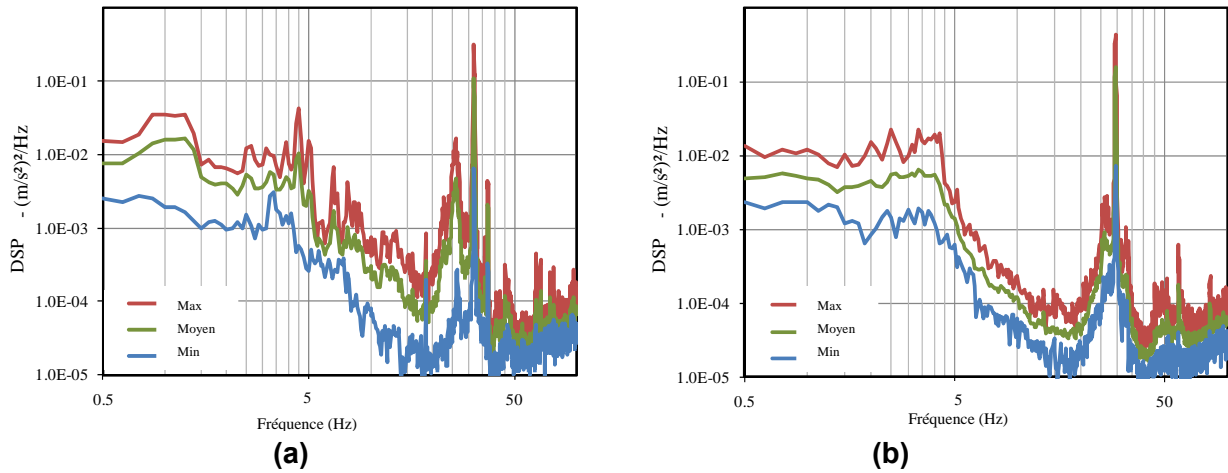


Figure 4.18 : Plages de DSP de l'accélération latérale (y) mesurée au niveau du plancher de la cabine durant le compactage à basse amplitude du vibreur : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 13 tonnes à 6 cylindres.

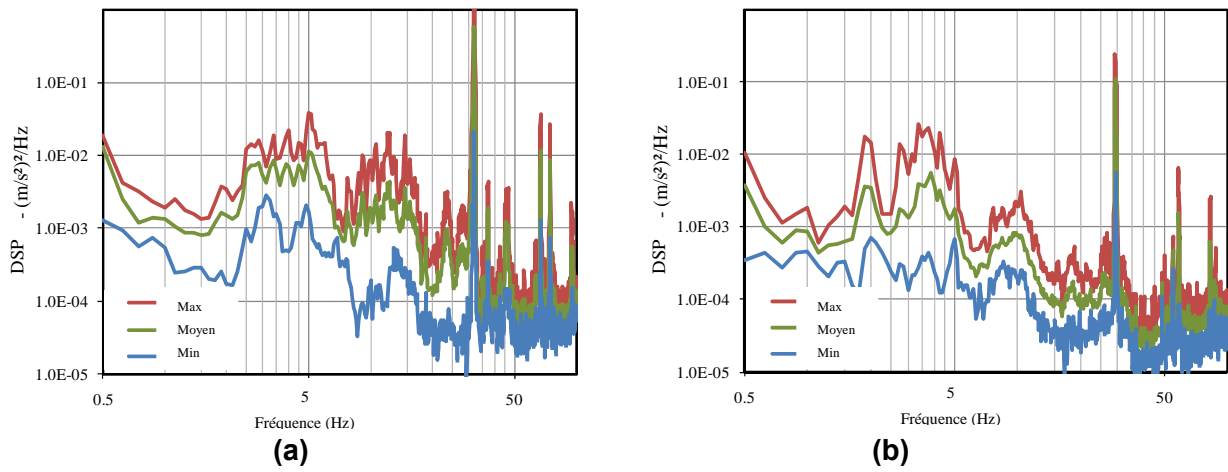


Figure 4.19 : Plages de DSP de l'accélération verticale (z) mesurée au niveau du plancher de la cabine durant le compactage à basse amplitude du vibreur : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 13 tonnes à 6 cylindres.

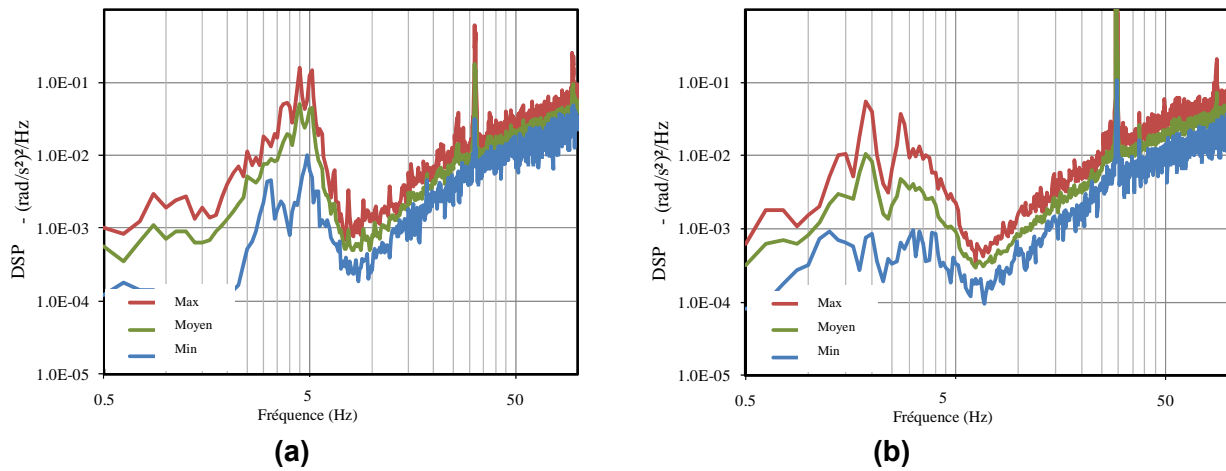


Figure 4.20 : Plages de DSP de l'accélération de tangage (θ) mesurée au niveau du plancher de la cabine durant le compactage à basse amplitude du vibreur : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 13 tonnes à 6 cylindres.

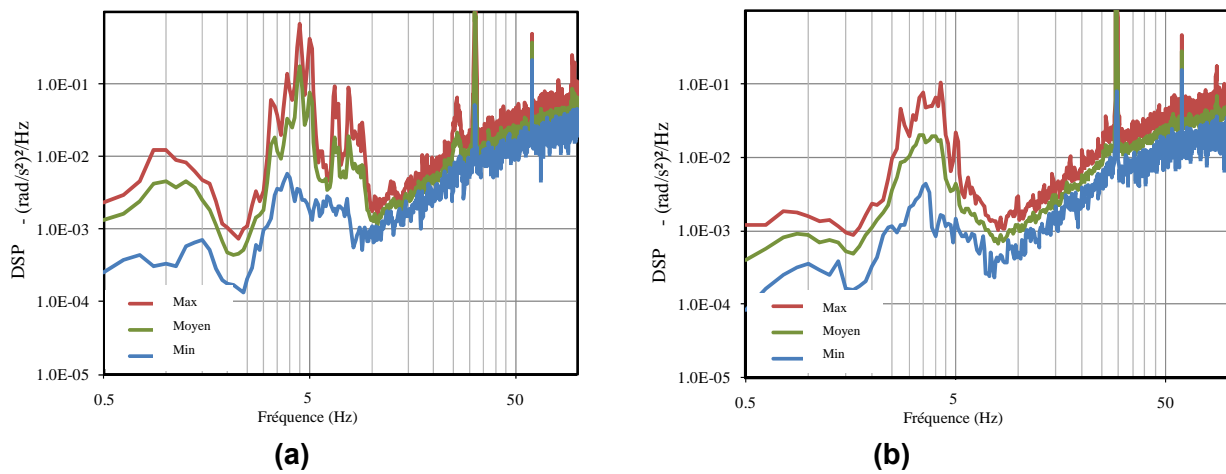


Figure 4.21 : Plages de DSP de l'accélération de roulis (ϕ) mesurée au niveau du plancher de la cabine durant le compactage à basse amplitude du vibreur : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 13 tonnes à 6 cylindres.

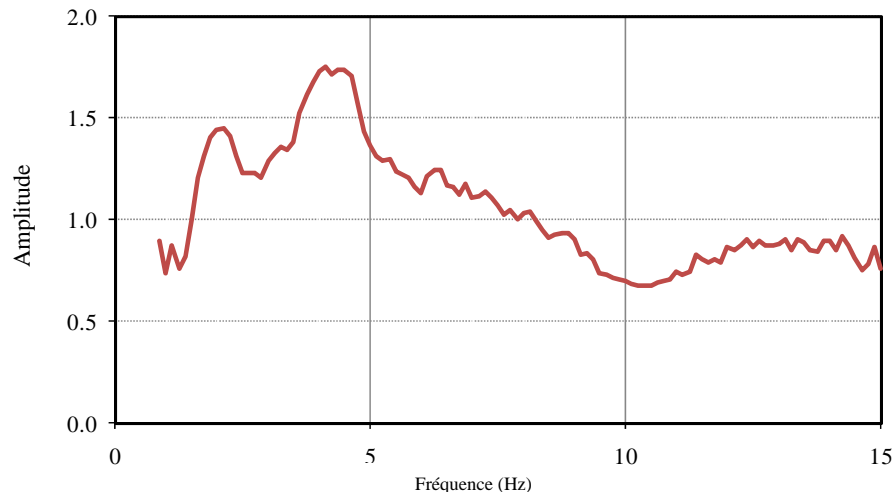


Figure 4.22 : Réponse en fréquence du siège à suspension monté sur le véhicule de 13 tonnes à 6 cylindres.

Les résultats indiquent également une amplification des vibrations verticales avec le siège à suspension employé sur le véhicule de 13 tonnes à 6 cylindres. Une estimation de la réponse en fréquence du siège à suspension a donc été obtenue à partir de la DSP moyenne de l'accélération verticale mesurée au niveau du siège et du plancher de la cabine. L'amplitude de la réponse en fréquence, présentée à la Figure 4.22, suggère que le siège à suspension amplifie considérablement les vibrations verticales de la cabine dans la plage de 4 à 5 Hz. Le siège à suspension n'atténue les vibrations verticales qu'à des fréquences supérieures à 7,5 Hz.

Le compactage d'un sol lorsque l'amplitude du vibreur est réglée à « haute » n'a pas beaucoup d'effet sur l'amplitude des vibrations de basse fréquence, mais il donne lieu à un pic important près de 15 Hz (la moitié de la fréquence de vibration) en raison du sautiller du tambour. Cela ressort à l'évidence des spectres de vibration longitudinale, latérale, verticale, de roulis et de tangage mesurés au niveau du plancher de la cabine du compacteur de 10 tonnes à 4 cylindres, comme l'indique la Figure 4.23. Les résultats indiquent par ailleurs que les vibrations verticales autour de cette fréquence sont amplifiées par la cabine et par le siège (Figure B.4 de l'Annexe B).

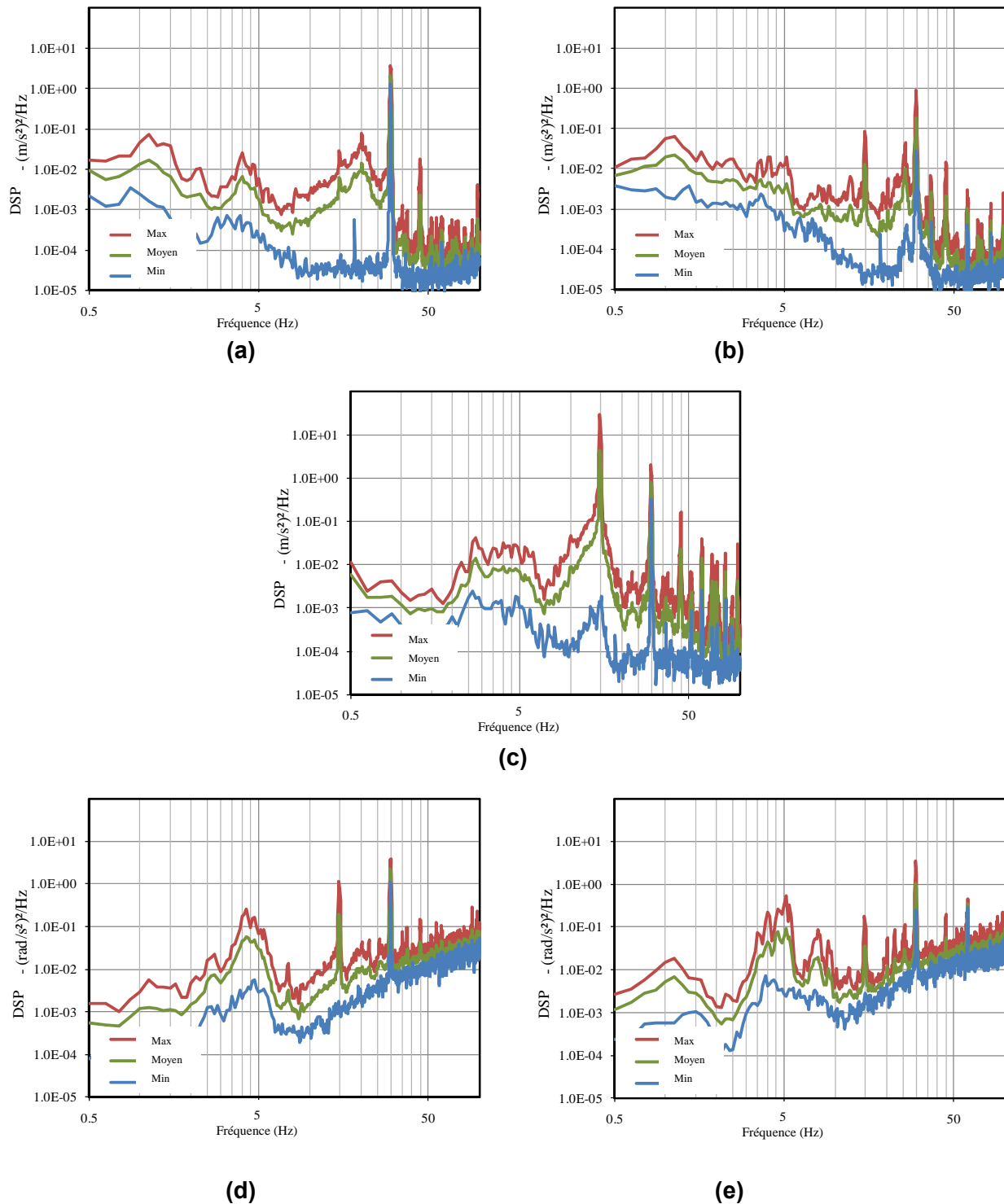


Figure 4.23 : Plages de DSP de l'accélération mesurée au niveau du plancher de la cabine pendant le compactage à haute amplitude avec le compacteur de 10 tonnes à 4 cylindres : (a) longitudinale, (b) latérale, (c) verticale, (d) de tangage, et (e) de roulis.

4.2.2 Mode de transit

Les plages de spectres d'accélération longitudinale, latérale et verticale mesurés au niveau du plancher de la cabine des deux véhicules en mode de transit sont présentées dans les Figures 4.24 à 4.26, respectivement. Les plages de vibrations mesurées au niveau du siège et de la carrosserie des deux véhicules sont présentées à l'Annexe B (Figures B.5 à B.7). Les plages de vibrations de tangage et de roulis des véhicules sont présentées dans les Figures 4.27 et 4.28, respectivement. À quelques exceptions près, les plages affichent relativement peu de variations. L'amplitude des vibrations de basse fréquence le long de tous les axes est généralement supérieure à celle qui a été mesurée durant les tâches de compactage, ce qui peut s'expliquer par les vitesses plus élevées en mode de transit. En outre, une comparaison des spectres avec ceux qui découlent des mesures obtenues sur la piste d'essai suggère des fréquences dominantes comparables, alors que l'amplitude des vibrations de basse fréquence est soit comparable soit inférieure à l'amplitude mesurée sur la piste d'essai. Cela est surtout attribuable à une vitesse de transit moyenne relativement plus faible que celle des essais sur piste (près de 10 km/h).

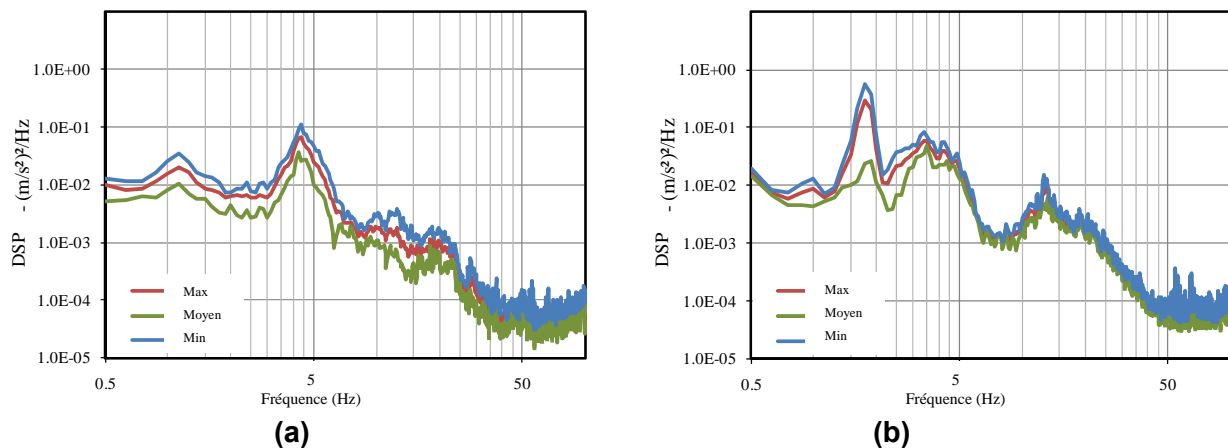


Figure 4.24 : Plages de DSP de l'accélération longitudinale (x) mesurée au niveau du plancher de la cabine en mode de transit : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 13 tonnes à 6 cylindres.

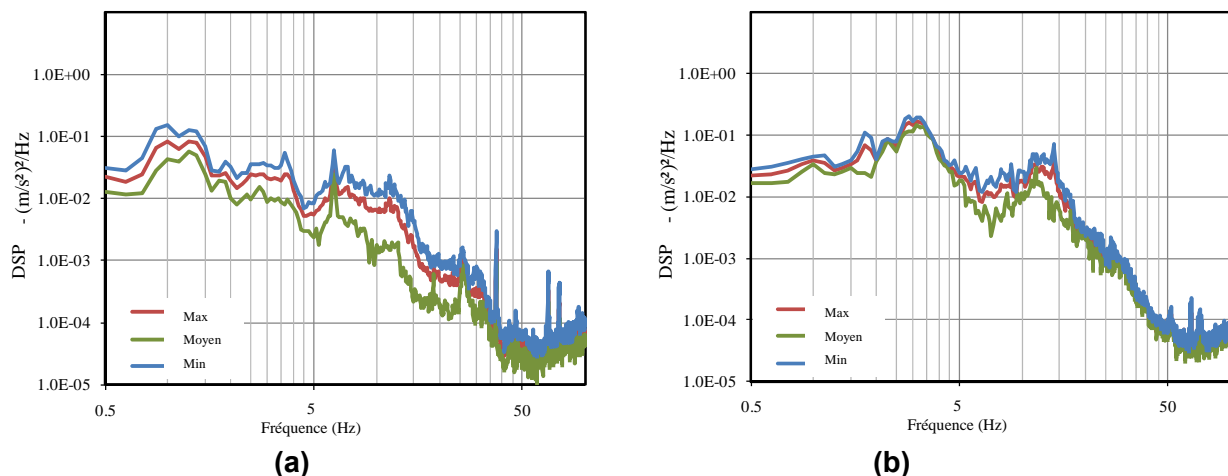


Figure 4.25 : Plages de DSP de l'accélération latérale (y) mesurée au niveau du plancher de la cabine en mode de transit : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 13 tonnes à 6 cylindres.

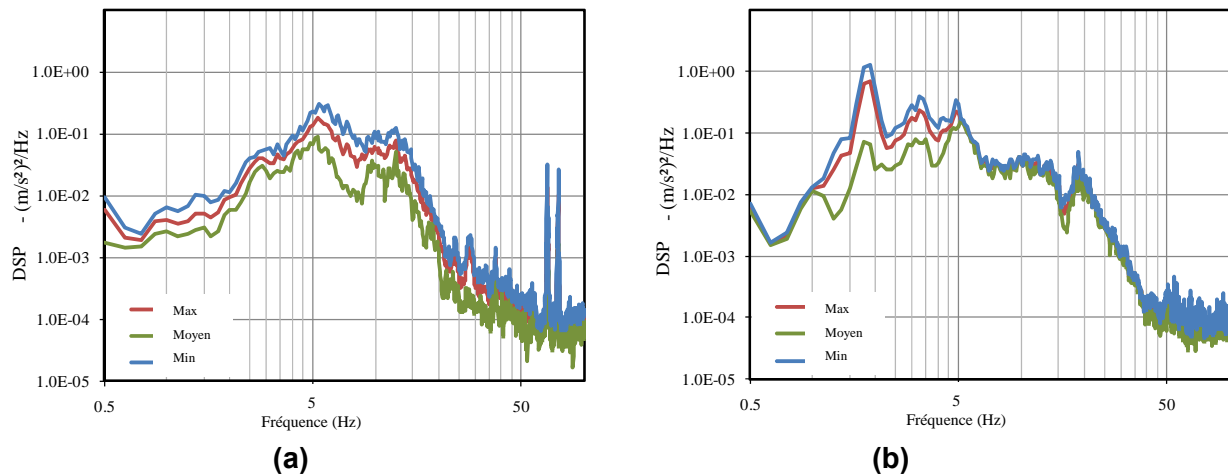


Figure 4.26 : Plages de DSP de l'accélération verticale (z) mesurée au niveau du plancher de la cabine en mode de transit : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 13 tonnes à 6 cylindres.

Les spectres d'accélération mesurés révèlent également des pics à des fréquences comparables en modes de vibration verticale, longitudinale et de tangage, ce qui suggère des mouvements couplés dans le plan de tangage. Un couplage similaire est aussi évident dans le plan de roulis, comme en témoignent les spectres d'accélération verticale, latérale et de roulis présentés dans les Figures 4.26, 4.25 et 4.28, respectivement. Le siège à suspension utilisé sur le véhicule de 13 tonnes à 6 cylindres génère des vibrations verticales d'une amplitude beaucoup plus élevée dans la plage de 2 à 3 Hz, ce qui ressort à l'évidence de la comparaison des spectres d'accélération verticale présentés à la Figure 4.26 (b) ainsi qu'à la Figure B-7 (b) de l'Annexe B. Cela suggère que le siège à suspension amplifie les vibrations verticales de basse fréquence transmises à l'opérateur. Le spectre de vibration verticale de ce compacteur présente en outre un pic notable près de 20 Hz, lequel est considérablement atténué par le siège à suspension.

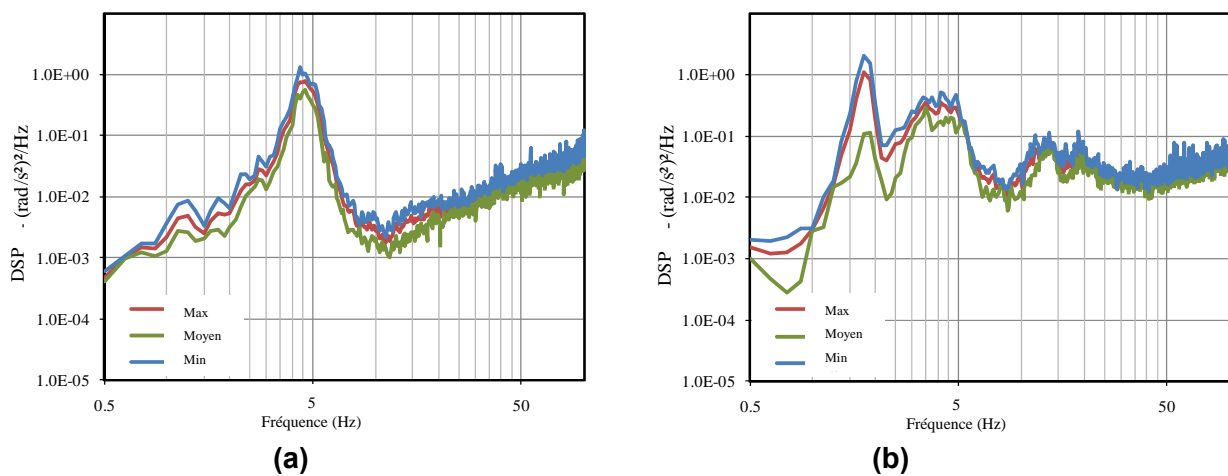


Figure 4.27 : Plages de DSP de l'accélération de tangage (θ) mesurée au niveau du plancher de la cabine en mode de transit : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 13 tonnes à 6 cylindres.

Les plages de spectres d'accélération présentées dans les Figures 4.17 à 4.28 définissent la classe spectrale de vibrations de la grande majorité des compacteurs de sol employés au Québec. Les spectres révèlent généralement des vibrations de translation et de rotation dominantes dans la plage de 1 à 5 Hz, soit celle à laquelle on sait que le corps humain est le plus sensible sur le plan de l'inconfort et des risques possibles pour la santé. L'exposition à de telles vibrations est subséquemment évaluée selon la méthode définie dans la norme ISO 2631-1 (1997), et les résultats sont présentés à la section suivante. Les plages de spectres pourraient aussi être appliquées à l'exploration de meilleures façons de concevoir les supports de cabine, les supports de tambour et les sièges à suspension afin de réduire l'amplitude des vibrations de basse fréquence transmises aux opérateurs. Ces spectres jouent en outre un rôle essentiel dans les approches de conception fondées sur la simulation pour vérifier différents modèles de véhicules.

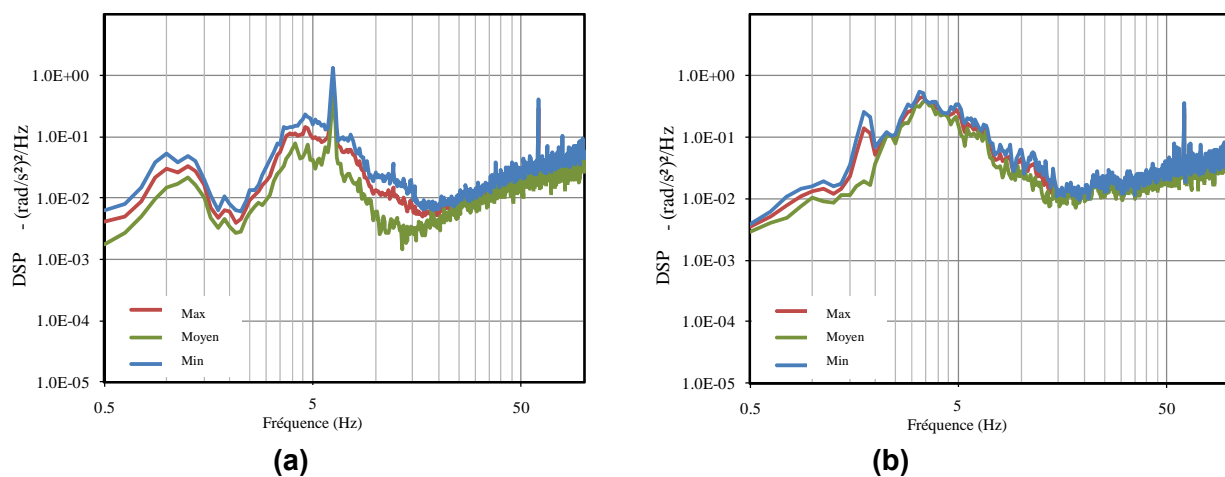


Figure 4.28 : Plages de DSP de l'accélération de roulis (ϕ) mesurée au niveau du plancher de la cabine en mode de transit : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 13 tonnes à 6 cylindres.

4.3 Évaluation de l'exposition aux vibrations

Les données obtenues sur les chantiers dans des conditions de travail représentatives sont ici analysées afin de quantifier et d'évaluer l'exposition des opérateurs aux VGC. À cette fin, les données obtenues au cours des différents essais en compactage et en transit sont exprimées sous forme de valeurs globales d'accélération efficace, puis regroupées de manière à établir les plages de vibrations dans les deux modes d'opération. Les fonctions de pondération fréquentielle définies dans la norme ISO 2631-1 (1997) sont ensuite appliquées pour déterminer l'exposition aux vibrations pondérées en fréquence le long de chaque axe correspondant aux deux modes d'opération. Il s'agit notamment des pondérations en fréquence W_d pour les vibrations longitudinales et latérales, W_k pour les vibrations verticales, et W_e pour les vibrations de roulis et de tangage. La norme internationale recommande d'évaluer l'exposition aux vibrations sur la base de l'axe de vibration prédominant. Elle indique par ailleurs que la somme vectorielle des vibrations peut être appliquée lorsque des vibrations d'une grande amplitude sont observées le long de plusieurs axes. La somme vectorielle des valeurs d'accélération efficace est donc également calculée et appliquée conformément aux directives en matière

d'évaluation des risques pour la santé. À cet effet, une pondération supplémentaire de 1,4 est imposée aux valeurs d'accélération longitudinale et latérale.

4.3.1 Mode de compactage

Le Tableau 4.3 résume les moyennes et les plages des valeurs globales d'accélération efficace résultant des vibrations mesurées au niveau du siège et du poste de commande (cabine) de l'opérateur du compacteur de 10 tonnes à 4 cylindres au cours des tâches de compactage. Étant donné que le compacteur peut être équipé de sièges très différents les uns des autres, les évaluations de l'exposition ont été réalisées sur la base des vibrations mesurées au niveau aussi bien du siège comme tel que du plancher de la cabine près du siège de l'opérateur. Le tableau présente les accélérations efficaces non pondérées (a) et pondérées en fréquence (a_w) le long des axes x, y et z au niveau du siège, et le long des axes x, y, z, θ et ϕ au niveau de la cabine. Les moyennes et les plages des accélérations efficaces sont aussi comparées selon que l'amplitude du vibreur était réglée à « basse » (6 essais) ou « haute » (8 essais) durant le compactage. Les résultats indiquent clairement que le compactage à haute amplitude génère des vibrations verticales d'amplitude beaucoup plus élevée, alors que les différences entre les niveaux de vibration le long des autres axes sont faibles. Le compactage du sol génère surtout des vibrations de haute fréquence, toutefois efficacement atténuées par les fonctions de pondération fréquentielle utilisée pour calculer les valeurs a_w . Les valeurs pondérées en fréquence sont donc beaucoup plus faibles que les valeurs non pondérées. Les réductions relatives aux valeurs de vibration verticale sont cependant moins importantes dans l'ensemble, puisque des vibrations verticales d'une amplitude importante surviennent autour de 5 Hz, dans les modes de vibration verticale et de tangage de la cabine et de la carrosserie. Les résultats suggèrent des vibrations verticales et longitudinales pondérées en fréquence d'une amplitude appréciable durant les tâches de compactage.

Étant donné que les tâches de compactage s'effectuent invariablement selon les deux amplitudes du vibreur, les moyennes et les plages des valeurs a et a_w sont par ailleurs évaluées en combinant les données propres aux deux amplitudes, lesquelles sont également présentées dans le Tableau 4.3. Les résultats révèlent des variations extrêmes dans les valeurs de vibration verticale, les valeurs pondérées en fréquence variant d'un minimum de $0,27 \text{ m/s}^2$ à un maximum de $2,88 \text{ m/s}^2$. Ces variations sont attribuables à plusieurs facteurs, dont la densité variable du sol, le ratio temps de démarrage – temps d'arrêt du vibreur sur la durée d'un passage, et des variations possibles de la vitesse. Les résultats indiquent en outre que les valeurs efficaces liées aux vibrations du siège sont beaucoup plus élevées que les valeurs liées aux vibrations de la cabine, et ce, quelle que soit l'amplitude du vibreur. L'accélération longitudinale pondérée en fréquence moyenne au niveau du siège est près de 3 fois plus élevée qu'au niveau de la cabine, ce qui est en partie attribuable aux vibrations élevées en mode de tangage et à la position élevée du siège. La valeur des vibrations verticales au niveau du siège est près de 30 % plus élevée qu'au niveau du plancher de la cabine. Ces résultats suggèrent que le siège de l'opérateur amplifie considérablement les vibrations verticales. Une comparaison des spectres d'accélération verticale mesurés au niveau de la carrosserie (Figure B.7) avec les spectres mesurés au niveau du plancher de la cabine (Figure 4.26) révèle également une amplification des vibrations verticales par les supports de cabine.

Les valeurs de vibration totales des accélérations efficaces pondérées (a_{we}) sont également calculées selon la méthode définie dans la norme ISO 2631-1 (1997) :

$$a_{we} = \sqrt{(k_x a_{wx})^2 + (k_y a_{wy})^2 + (k_z a_{wz})^2} \quad (4.1)$$

où a_{wx} , a_{wy} et a_{wz} correspondent aux accélérations efficaces pondérées en fréquence résultant des vibrations le long des axes x, y et z, respectivement, et où $k_x=1,4$, $k_y=1,4$ et $k_z=1,0$ sont des facteurs multiplicateurs. Une comparaison des valeurs de vibration totales avec les valeurs axiales prises isolément suggère que les vibrations transmises à l'opérateur durant une tâche de compactage à haute amplitude sont prédominantes sur l'axe vertical, tandis que les vibrations longitudinales sont également importantes en compactage à basse amplitude.

Les moyennes et les plages des accélérations efficaces globales résultant des vibrations mesurées au niveau du siège et du poste de commande (cabine) du véhicule de 13 tonnes à 6 cylindres pendant le compactage sont résumées dans le Tableau 4.4. Les résultats sont uniquement présentés pour le compactage à faible amplitude, puisque l'opérateur avait opté pour ce réglage lors des 13 essais de compactage. Le tableau présente les moyennes et les plages des accélérations efficaces non pondérées et pondérées en fréquence le long de chaque axe ainsi que les valeurs de vibration totales. Les résultats indiquent des niveaux de vibration sensiblement moins élevés pour ce véhicule que pour le compacteur de 10 tonnes à 4 cylindres, surtout dans l'axe vertical. Cela peut s'expliquer par un certain nombre de facteurs, dont ceux qui suivent : le compactage s'effectuait dans ce cas alors que l'amplitude du vibreur était réglée à « basse » ; le compacteur de 13 tonnes à 6 cylindres était un véhicule récent, tandis que le compacteur de 10 tonnes à 4 cylindres avait environ 7 ans (ce qui est représentatif de la moyenne des compacteurs en usage au Québec) ; et la cabine du compacteur de 13 tonnes à 6 cylindres provenait du fabricant et était montée sur des supports dûment adaptés.

Tableau 4.3 : Moyennes et plages des valeurs globales d'accélération efficace, pondérées et non pondérées en fréquence (m/s^2 ou rad/s^2), résultant des vibrations mesurées au niveau du siège et de la cabine du compacteur de 10 tonnes à 4 cylindres en cours de compactage à basse et à haute amplitude du vibreur.

Axe	Compactage à basse amplitude				Compactage de haute amplitude				Global	
	a		a_w		a		a_w		a_w	
	plage	moy.	plage	moy.	plage	moy.	plage	moy.	plage	moy.
Siège - x	1.52-1.59	1.55	0.28-0.38	0.32	1.87-2.23	2.02	0.29-0.45	0.35	0.28-0.45	0.34
Siège - y	0.41-0.49	0.45	0.13-0.24	0.19	0.45-0.72	0.50	0.12-0.18	0.15	0.12-0.24	0.16
Siège - z	0.53-1.02	0.80	0.27-0.60	0.45	0.66-3.77	1.27	0.39-2.88	0.91	0.27-2.88	0.66
Siège - a_{we}			0.51-0.87	0.69			0.59-2.96	1.06	0.51-2.97	0.84
Cabine - x	0.57-0.65	0.59	0.06-0.16	0.10	1.01-1.14	1.07	0.09-0.20	0.12	0.06-0.20	0.11
Cabine - y	0.22-0.40	0.30	0.07-0.17	0.13	0.24-0.82	0.39	0.09-0.20	0.13	0.07-0.20	0.13
Cabine - z	0.65-0.72	0.66	0.27-0.40	0.30	0.62-3.21	1.10	0.27-2.41	0.73	0.27-2.41	0.51
Cabine - θ	1.25-1.32	1.29	0.04-0.09	0.07	1.58-2.12	1.74	0.06-0.14	0.08	0.04-0.14	0.08
Cabine - φ	1.55-1.61	1.58	0.07-0.13	0.09	1.50-2.19	1.64	0.07-0.13	0.09	0.07-0.13	0.09
Cabine - a_{we}			0.30-0.52	0.38			0.32-2.44	0.78	0.29-2.44	0.56

Tableau 4.4 : Moyennes et plages des valeurs globales d'accélération efficace, pondérées et non pondérées en fréquence (m/s^2 ou rad/s^2), résultant des vibrations mesurées au niveau du siège et de la cabine du compacteur de 13 tonnes à 6 cylindres en cours de compactage à basse amplitude du vibreur.

Axe	Compactage à basse amplitude			
	a		a_w	
	plage	moy.	plage	moy.
Siège - x	0.36-0.46	0.41	0.09-0.23	0.15
Siège - y	0.42-0.75	0.55	0.15-0.31	0.19
Siège - z	0.14-0.22	0.18	0.09-0.18	0.14
Siège - a_{we}			0.26-0.57	0.37
Cabine - x	0.39-0.44	0.41	0.06-0.20	0.12
Cabine - y	0.25-0.37	0.30	0.08-0.15	0.10
Cabine - z	0.24-0.29	0.25	0.12-0.16	0.13
Cabine - θ	1.40-1.66	1.53	0.05-0.09	0.06
Cabine - φ	1.49-1.64	1.57	0.06-0.08	0.07
Cabine - a_{we}			0.18-0.39	0.26

Bien que le compacteur de 13 tonnes à 6 cylindres ait été équipé d'un siège à suspension, les résultats suggèrent que le siège à suspension amplifie légèrement les vibrations verticales de la cabine. La valeur a_{wz} au niveau du siège de l'opérateur est d'environ 8 % plus élevée qu'au niveau du plancher de la cabine. L'amplitude des vibrations longitudinales et latérales au niveau du siège est toutefois beaucoup plus élevée qu'au niveau du plancher de la cabine, ce qui peut s'expliquer par l'apport des vibrations de tangage et de roulis du véhicule, respectivement, de même que par la position élevée du siège. Les résultats permettent de conclure que l'amplitude des vibrations de la machine relativement récente de 13 tonnes à 6 cylindres pendant le compactage est assez faible, et que l'exposition de l'opérateur à de telles vibrations n'est guère préoccupante. L'amplitude des vibrations du compacteur de 10 tonnes à 4 cylindres en mode de compactage est cependant assez élevée.

4.3.2 Mode de transit

Les moyennes et les plages des valeurs d'accélération efficace non pondérées et pondérées des vibrations mesurées en mode de transit sont évaluées de façon similaire. Ces données sont évaluées au niveau du siège et de la cabine, le long de chaque axe, et résumées dans le Tableau 4.5 pour les deux compacteurs. Les résultats indiquent clairement que les vibrations transmises en mode de transit diffèrent considérablement des vibrations transmises en mode de compactage. Dans le cas du compacteur de 10 tonnes à 4 cylindres, les valeurs non pondérées en mode de transit sont généralement plus faibles qu'en mode de compactage, dû à la présence de composantes dominantes de haute fréquence en compactage. Les valeurs pondérées en mode de transit sont toutefois beaucoup plus élevées qu'en mode de compactage. Cela peut s'expliquer par des vibrations de basse fréquence et de haute amplitude, et par l'absence de composantes fréquentielles attribuables au vibreur. Les valeurs d'accélération efficace non pondérées du compacteur de 13 tonnes à 6 cylindres sont toutefois beaucoup plus élevées qu'en compactage, comme en témoignent les résultats résumés dans les Tableaux 4.4 et 4.5. Cela s'explique en partie par le réglage de l'amplitude du vibreur à la position « basse » pendant le compactage. Les résultats indiquent également que le compacteur de 13 tonnes à 6 cylindres, plus récent, génère des niveaux beaucoup plus élevés de vibrations pondérées en fréquence au niveau de la cabine que le compacteur de 10 tonnes à 4 cylindres, et ce, dans tous les axes à l'exception du mode vertical. Ceci suggère que les supports de cabine du compacteur de 13 tonnes à 6 cylindres n'atténuent efficacement que les vibrations verticales, tandis que les mouvements de roulis et de tangage plus marqués du véhicule génèrent des vibrations longitudinales et latérales de plus grande amplitude.

Tableau 4.5 : Moyennes et plages des valeurs globales d'accélération efficace, pondérées et non pondérées en fréquence (m/s^2 ou rad/s^2), résultant des vibrations mesurées au niveau du siège et de la cabine du compacteur de 10 tonnes à 4 cylindres et du compacteur de 13 tonnes à 6 cylindres en cours de transit.

Axe	Compacteur de 10 tonnes à 4 cylindres				Compacteur de 13 tonnes à 6 cylindres			
	<i>a</i>		<i>a_w</i>		<i>a</i>		<i>a_w</i>	
	plage	moy.	Plage	moy.	plage	moy.	plage	moy.
Siège - x	0.74-1.32	0.97	0.42-0.71	0.54	0.61-1.04	0.80	0.31-0.79	0.54
Siège - y	0.38-0.53	0.45	0.13-0.19	0.16	0.81-0.85	0.83	0.45-0.46	0.45
Siège - z	1.06-1.88	1.43	0.99-1.81	1.35	0.93-1.56	1.20	0.85-1.18	0.99
Siège - <i>a_{we}</i>			1.17-2.08	1.57			1.14-1.74	1.39
Cabine - x	0.26-0.42	0.36	0.14-0.23	0.20	0.37-0.60	0.47	0.20-0.44	0.31
Cabine - y	0.33-0.54	0.45	0.23-0.36	0.30	0.66-0.80	0.72	0.40-0.41	0.41
Cabine - z	0.66-1.16	0.90	0.60-1.13	0.85	0.82-1.23	1.00	0.74-0.99	0.85
Cabine - θ	1.48-1.71	1.60	0.19-0.27	0.23	1.62-2.08	1.83	0.23-0.52	0.37
Cabine - ϕ	1.51-1.64	1.57	0.15-0.22	0.20	1.83-1.85	1.83	0.30-0.33	0.31
Cabine - <i>a_{we}</i>			0.71-1.28	0.99			0.97-1.30	1.11

De plus, les résultats indiquent que les vibrations verticales de la cabine sont amplifiées par le siège dans les deux véhicules. Alors que le siège à suspension du compacteur de 13 tonnes à 6 cylindres amplifie les vibrations verticales de près de 16 %, l'amplification des vibrations par le siège rembourré du compacteur de 10 tonnes à 4 cylindres est de l'ordre de 60 %. On peut donc en conclure qu'un siège à suspension dûment adapté contribuerait à réduire l'exposition aux vibrations verticales de basse fréquence. Étant donné que les vibrations verticales prédominent essentiellement autour de 5 Hz, un siège à suspension convenablement amorti,

ayant une fréquence naturelle de l'ordre de 1,5 Hz, assurerait une atténuation plus efficace des vibrations verticales pourvu qu'il soit dûment ajusté au poids de l'opérateur.

4.3.3 Exposition journalière équivalente aux vibrations

Le Tableau 4.5 présente également les moyennes et les plages des valeurs de vibration totales pour les deux machines en mode de déplacement. Les vibrations de la cabine sont dominantes dans l'axe vertical sur les deux machines. L'évaluation de l'exposition en mode de déplacement devrait donc pouvoir s'effectuer sur la seule base de l'amplitude des vibrations verticales. Cependant, l'amplitude des vibrations longitudinales pondérées en fréquence au niveau du siège s'établit à environ 40 % et 50 % des vibrations verticales pour les compacteurs de 10 tonnes et de 13 tonnes, respectivement. Il pourrait donc être utile de tenir compte de la somme vectorielle des vibrations. La norme ISO 2631-1 (1997) stipule que l'évaluation de l'effet des vibrations sur la santé doit se faire le long de chaque axe pris isolément, et que l'évaluation doit être faite à l'égard de la plus haute accélération pondérée en fréquence dans n'importe quel axe au niveau de l'assiette du siège. Elle précise en outre que les valeurs pondérées en fréquence doivent être appliquées conjointement aux facteurs de multiplication définis à la section 4.3.1, mais que la valeur totale des vibrations, définie dans l'équation (4.1), peut être appliquée lorsqu'aucun axe dominant ne peut être identifié.

Les résultats présentés dans les Tableaux 4.3 à 4.5 révèlent clairement des niveaux sensiblement différents de vibrations pondérées le long des trois axes, en compactage comme en déplacement. Par ailleurs, l'exposition journalière des opérateurs porte sur des vibrations dans les deux modes. L'exposition journalière aux vibrations est donc déterminée en combinant l'exposition aux vibrations en compactage et en transit. Cela requiert cependant l'établissement de schémas de travail fondés sur le temps moyen que les opérateurs consacrent quotidiennement aux tâches de compactage et de transit, de même qu'à d'autres activités accomplies dans un environnement exempt de vibrations. Après quelques consultations auprès des opérateurs, l'évaluation de l'exposition peut être effectuée selon trois schémas de travail moyens :

- 6,00 heures de compactage couplées à 1 heure de transit et à 1 heure d'activités autres dans un environnement sans vibrations ;
- 6,25 heures de compactage couplées à 0,75 heure de transit et à 1 heure d'activités autres dans un environnement sans vibrations ;
- 6,50 heures de compactage couplées à 0,50 heure de transit et à 1 heure d'activités autres dans un environnement sans vibrations.

Les valeurs équivalentes à huit heures d'exposition, ou valeurs d'exposition journalière aux vibrations $A(8)$, sont ensuite calculées comme suit à partir des valeurs de vibration pondérées en fréquence pour les modes de compactage et de transit, et ce, pour chacun des schémas d'exposition ci-dessus :

$$A(8) = \sqrt{\frac{(a_{we}^2)_{com} T_{com} + (a_{we}^2)_{tran} T_{tran}}{8}} \quad (4.2)$$

où a_{we} correspond à la valeur d'exposition équivalente dans un mode donné, T à la durée d'exposition dans ce mode particulier, et les indices « com » et « tran » aux modes d'opération

en compactage et en transit, respectivement. L'exposition équivalente est égale à l'accélération efficace pondérée en fréquence le long d'un axe donné lorsqu'une vibration prédominante est observée le long d'un axe unique, comme dans le cas du mode de déplacement (Tableau 4.5 ; axe vertical) pour les deux véhicules. La valeur a_{we} est égale à la valeur totale des vibrations calculée au moyen de l'équation (4.1) lorsque les niveaux de vibration le long des trois axes de translation sont comparables, comme dans le cas de la machine de 13 tonnes à 6 cylindres pendant le compactage. Cependant, la valeur a_{we} pour le compacteur de 10 tonnes en mode de compactage correspond plutôt à l'accélération verticale pondérée en fréquence (Tableau 4.3), puisque le niveau de vibration dans l'axe vertical est prédominant.

Les valeurs d'exposition équivalente sont calculées à partir des vibrations mesurées au niveau du siège et de la cabine des deux véhicules. Ces valeurs correspondent à celles des vibrations verticales, sauf pour les vibrations en compactage sur la machine de 13 tonnes à 6 cylindres. Les valeurs d'exposition équivalente sont calculées à partir des plages et des moyennes des valeurs d'accélération efficace durant les modes de transit et de compactage, et résumées dans le Tableau 4.6. Il convient de noter que l'exposition de l'opérateur aux vibrations les plus élevées (présentées dans les Tableaux 4.3 à 4.5) n'est que de très courte durée, puisque de tels niveaux de vibrations ne surviennent que lors des passages finaux en compactage ou que lorsque le véhicule interagit avec des surfaces très rugueuses. Les résultats ne sont donc traités qu'en fonction des valeurs d'exposition $A(8)$ moyennes présentées dans le Tableau 4.6. Les résultats indiquent que les valeurs $A(8)$ moyennes pour la machine de 10 tonnes à 4 cylindres dépassent la valeur d'action de l'exposition journalière de $0,5 \text{ m/s}^2$ recommandée dans la directive de la CE (au-delà de cette valeur, les employeurs sont tenus de contrôler les risques de VGC), mais restent nettement inférieures à la valeur limite d'exposition journalière de $1,15 \text{ m/s}^2$ (la valeur au-delà de laquelle les travailleurs ne doivent pas être exposés), et ce, dans les trois schémas d'exposition pris en compte. La directive stipule que des mesures appropriées doivent être prises pour réduire les vibrations par l'utilisation de matériel supplémentaire ou en modifiant les méthodes de travail lorsque le niveau d'exposition dépasse la valeur d'action limite (2002/44/CE, 2002). Les résultats indiquent également que les valeurs d'exposition correspondant aux vibrations de la cabine ne sont que légèrement supérieures à la valeur d'action pour les trois schémas retenus, tandis que les valeurs correspondant aux vibrations du siège sont de l'ordre de $0,7 \text{ m/s}^2$. Ces résultats suggèrent que l'utilisation d'un siège à suspension dûment adapté serait indispensable pour maintenir l'exposition dans le voisinage de la valeur d'action. Des efforts supplémentaires visant à optimiser les supports de cabine seraient aussi hautement souhaitables.

Tableau 4.6 : Valeurs moyennes équivalentes à huit heures d'exposition – A(8) – en m/s² résultant des vibrations mesurées au niveau du siège et de la cabine du compacteur de 10 tonnes à 4 cylindres et du compacteur de 13 tonnes à 6 cylindres compte tenu de différentes répartitions journalières des tâches de compactage et de transit.

Durée (heures)	Plage (moyenne) d'A(8), m/s ²			
	Compactage, T_{com}	6.0	6.25	6.5
	Transit, T_{tran}	1.0	0.75	0.5
10 t à 4 cyl. ; siège		0.42-2.58 (0.74)	0.39-2.61 (0.71)	0.35-2.64 (0.68)
13 t à 6 cyl. ; siège		0.38-0.65 (0.48)	0.35-0.62 (0.45)	0.32-0.69 (0.41)
10 t à 4-cyl. ; cabine		0.32-2.13 (0.53)	0.30-2.17 (0.52)	0.29-2.20 (0.51)
13 t à 6-cyl. ; cabine		0.31-0.48 (0.37)	0.28-0.46 (0.34)	0.25-0.43 (0.31)

Les valeurs moyennes d'exposition journalière aux vibrations de la cabine sur le compacteur de 13 tonnes à 6 cylindres sont nettement inférieures à la valeur d'action, alors qu'au niveau du siège, elles approchent 0,48 m/s². Il convient de souligner que les valeurs d'exposition calculées pour cette machine ne s'appliquent qu'au réglage de l'amplitude du vibreur à « basse ». Or, le compactage à « haute » amplitude pourrait fournir des valeurs d'exposition qui approchent ou dépassent la valeur d'action. Les résultats pour cette machine révèlent par ailleurs une amplification des vibrations par le siège à suspension. Il est donc suggéré de revoir les propriétés des sièges à suspension à la lumière des plages de spectres de vibration définies dans la présente étude, ou de veiller à ajuster les sièges au poids des opérateurs.

5. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Les propriétés vibratoires de compacteurs choisis ont été mesurées sur une piste d'essai dans des conditions contrôlées et sur des chantiers dans des conditions de travail réelles. Les véhicules choisis comprenaient trois compacteurs de 10 tonnes, représentatifs de la grande majorité des compacteurs utilisés au Québec, et un compacteur plus récent de 13 tonnes. Les mesures ont été effectuées en modes de compactage et de transit. Les résultats de l'étude suggèrent que les compacteurs de sol transmettent des niveaux élevés de vibrations globales du corps de basse fréquence en mode de transit, alors que l'amplitude de telles vibrations reste faible en mode de compactage. Les spectres de vibration des véhicules en mode de compactage ont révélé un pic d'amplitude élevée, autour de 30 Hz, distinct et correspondant à la vitesse du vibreur excentrique, indépendamment du compacteur et de l'emplacement ou de la direction des vibrations mesurées. L'amplitude des vibrations des véhicules augmentait pendant le compactage de sols de plus forte densité en raison d'interactions accrues du tambour et des pneus avec un sol plus rigide, et lorsque l'amplitude du vibreur était réglée à la position « haute ». Les données obtenues indiquaient également un important sautillerment du tambour et une augmentation des vibrations transmises, surtout autour de 15 Hz (moitié de la fréquence du vibreur).

L'amplitude des vibrations de basse fréquence était beaucoup plus élevée en mode de transit, le long de tous les axes, alors que les composantes de haute fréquence attribuées au vibreur (désactivé en transit) n'étaient pas évidentes. Les vibrations de translation et de rotation dominantes en mode de transit survenaient généralement dans la plage de fréquences de 1 à 6 Hz, une plage de fréquences auxquelles le corps humain est plus sensible sur le plan de l'inconfort et des risques possibles pour la santé (ISO 2631-1). Ces vibrations ont été attribuées aux modes vertical et de tangage de la carrosserie et de la cabine des véhicules. Les vibrations de cabine prédominantes survenaient dans la plage de 4 à 6 Hz le long de l'axe vertical et se trouvaient amplifiées par le siège coussiné, utilisé sur la grande majorité des compacteurs au Québec. Le siège à suspension dont était équipé le compacteur plus récent de 13 tonnes a également contribué à amplifier les vibrations de basse fréquence. Par ailleurs, les supports de cabine n'atténuaient que les vibrations de haute fréquence, alors que les importants mouvements de tangage et de roulis des véhicules généraient des vibrations longitudinales et latérales de plus grande amplitude au niveau du siège de l'opérateur.

L'amplitude des vibrations de basse fréquence sur les chantiers était généralement plus faible que l'amplitude mesurée sur la piste d'essai pour le compacteur de 10 tonnes. Ceci est surtout attribuable à la vitesse de transit relativement plus faible (choisie par l'opérateur) sur les chantiers que sur la piste d'essai (près de 10 km/h). L'amplitude des vibrations de basse fréquence du compacteur de 13 tonnes en mode de transit était soit comparable soit supérieure à celle du compacteur de 10 tonnes. Les spectres révélaient généralement une amplification des vibrations par les supports de cabine et par le siège. Les spectres de vibration obtenus au cours d'essais répétés ont été combinés pour définir les plages de spectres de vibration susceptibles d'être appliquées à l'exploration de meilleures façons de concevoir les supports de cabine, les supports de tambour et les sièges à suspension, afin de réduire les vibrations de basse fréquence transmises aux opérateurs.

Ces spectres pourraient aussi être utilisés dans le cadre d'approches de conception fondées sur la simulation pour vérifier différents modèles de véhicules. Les vibrations verticales de la cabine du compacteur de 10 tonnes étaient amplifiées de près de 60 % au niveau du siège, comparativement à une amplification de seulement 16 % dans le cas du siège à suspension utilisé sur le compacteur de 13 tonnes. L'évaluation des données sur les vibrations selon la norme ISO 2631-1 et la directive de la CE a fourni des valeurs d'exposition beaucoup plus

élevées pour le compacteur de 10 tonnes que pour le compacteur de 13 tonnes en mode de compactage. Les valeurs d'exposition journalière A(8) pour les deux compacteurs dépendaient de la durée des tâches de compactage et de transit au quotidien, ainsi que des autres activités accomplies dans un environnement exempt de vibrations. Ces valeurs ont été calculées selon trois schémas de travail différents comportant 6,00, 6,25 et 6,50 heures de compactage et 1,00, 0,75 et 0,50 heure de transit, respectivement, ainsi que 1 heure d'activités autres accomplies dans un environnement exempt de vibrations.

Les résultats obtenus ont permis de conclure que la moyenne des valeurs d'exposition A(8) fondées sur les vibrations du siège du compacteur de 10 tonnes dépassait la valeur d'action de $0,5 \text{ m/s}^2$ recommandée par la CE, mais demeurait inférieure à la limite d'exposition de $1,15 \text{ m/s}^2$, quel que soit le schéma de travail pris en compte. Les valeurs d'exposition correspondant aux vibrations de la cabine étaient aussi légèrement supérieures à la valeur d'action. La moyenne des valeurs d'exposition A(8) fondées sur les vibrations de la cabine du compacteur de 13 tonnes était de loin inférieure à $0,5 \text{ m/s}^2$, mais la moyenne des valeurs fondées sur les vibrations du siège approchait $0,47 \text{ m/s}^2$. On peut s'attendre à ce que les valeurs A(8) pour ce véhicule soient plus élevées lorsque le compactage est effectué alors que l'amplitude du vibreur est réglée à la position « haute ». Il convient de souligner que les niveaux de vibration observés dans le cadre de cette étude se limitent aux véhicules et aux conditions d'opération choisis, bien que les véhicules sélectionnés soient représentatifs de ceux qui sont le plus couramment utilisés au Québec. Il est probable que les niveaux d'exposition diffèrent pour d'autres modèles de compacteurs et dans d'autres conditions d'opération.

Les résultats suggèrent que les supports de siège et de cabine amplifient les vibrations de basse fréquence sur tous les véhicules utilisés dans l'étude, quoique cette amplification soit restreinte dans le cas du compacteur de 13 tonnes équipé de supports de cabine plus perfectionnés. Par ailleurs, les vibrations dominantes en mode aussi bien de compactage que de transit survenaient le long de l'axe vertical, tout particulièrement dans le cas des compacteurs de 10 tonnes, représentatifs de la majorité des véhicules de ce type en usage au Québec. Les vibrations verticales transmises à l'opérateur pourraient être grandement réduites grâce à la conception et à l'adoption d'un siège à suspension dûment ajusté. Les résultats obtenus dans le cadre d'une étude de simulation préliminaire ont révélé qu'un siège à suspension pouvait réduire les vibrations verticales de près de 60 % (Kordestani, 2010). Il est donc fortement recommandé d'utiliser des sièges à suspension dûment amortis et assortis d'une fréquence naturelle de l'ordre de 1,5 Hz. Il est également recommandé d'examiner la conception des sièges à suspension utilisés sur les plus récents véhicules de 13 tonnes ou de veiller à qu'ils soient dûment ajustés au poids des opérateurs afin de limiter leur capacité à amplifier les vibrations. Des efforts supplémentaires sont par ailleurs souhaitables en ce qui a trait à l'identification des supports de cabine optimaux afin de limiter l'exposition aux VGC le long des axes de translation et de rotation. Des méthodes d'analyse et de simulation doivent être développées pour explorer d'autres façons de concevoir les supports de cabine et de tambour de manière à limiter l'exposition aux vibrations tout en préservant l'efficacité des véhicules en matière de compactage.

6. RÉFÉRENCES

- Adam, D and Kopf F (2000) Theoretical analysis of dynamically loaded soils. European Workshop Compaction of Soils and Granular Materials, (pp. 3-16). Paris.
- Andereg, R. (2000). ACE Ammann compaction expert-Automatic control of the compaction. Le compactage des sols et des matériaux granulaires, (pp. 229-236). Paris.
- Beck L, Blosswick D and Sesek R (2004) Health effects of vibrating equipment - A comparative analysis of a Caterpillar CS-433B vibratory compactor. 2nd Annual Regional National Occupational Research Agenda (NORA), Young/New Investigators Symposium. - Salt Lake City.
- Bernard BP (1997) Musculoskeletal disorders and workplace factors. National Inst. of Occupational Safety and Health, Cincinnati, USA.
- Boileau Paul-Émile, Boutin Jérôme, Rakheja Subhash, Politis, Harry (2005) Évaluation de l'exposition aux vibrations globales du corps des opérateurs du métro de Montréal et étude du comportement dynamique des motrices et de leur système de suspension. Études et recherches/Rapport R-420, Montréal, IRSST, 2005, 70 pages.
- Bongers Pauline M, Boshuizen Hendriek C, Hulshof Carel TJ, Koemeester Agaath P (1988) Back disorders in crane operators exposed to whole-body vibration. *Int. Arch. Occ. Env. Health*, 60, 129-137.
- Bovenzi M, Hulshof CTJ (1998) An updated review of epidemiologic studies on the relationship between exposure to whole-body vibration and low back pain. *J. of Sound and Vibration*, 215(4), 595-611
- Bovenzi M, Rui F., Negro C., D'Agostin F., Angotzi G., Bianchi S., Bramanti L., Festa G., Gatti S., Pinto I., Rondina L, Stacchini N (2006) An epidemiological study of low back pain in professional drivers. *Journal of Sound and Vibration*, 298, 514-539.
- Cann A.P. Salmoni A.W., Vi P., Eger T.R (2003) An exploratory study of whole-body vibration exposure and dose while operating heavy equipment in the construction industry. *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, 18, 999-1005.
- Dupuis H. Zerlett G (1987) Whole-body vibration and disorders of the spine. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 59, 323-336.
- EN 2002/44/EC, Directive 2002/44/EC of the European Parliament and of the Council of 25 June 2002. *Official Journal of the European Communities*, 06 25, 2002.-Vol. L 177. - 2002/44/EC.
- Griffin M.J. Howarth H.V.C., Pitts P.M., Fischer S., Kaulbars U., Donati P.M., Brereton P.F. (2006) Guide to good practice on whole-body vibration : non-binding guide to good practice for implementing Directive 2002/44/EC on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (vibrations) - European Commission, Brussels, 12 June 2006.
- ISO-2631-1 (1997) Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration-Part 1 : General requirements. Geneva : ISO.
- Kittusamy N.K (2003) A checklist for evaluating cab design of construction equipment. *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, 18, 721-723.
- Kordestani A (2010) Ride vibration and compaction dynamics of vibratory soil compactors. MASC Thesis, Concordia University, Montreal.

Rakheja S, Wang Z (2001) Urban bus optimal passive suspension study. Final Report, Transport Canada, TP13787E, April 2001

ANNEXE A

PLAGES DE SPECTRES DE VIBRATION MESURÉS DURANT LE COMPACTAGE DE SOLS DE FAIBLE ET DE FORTE DENSITÉ

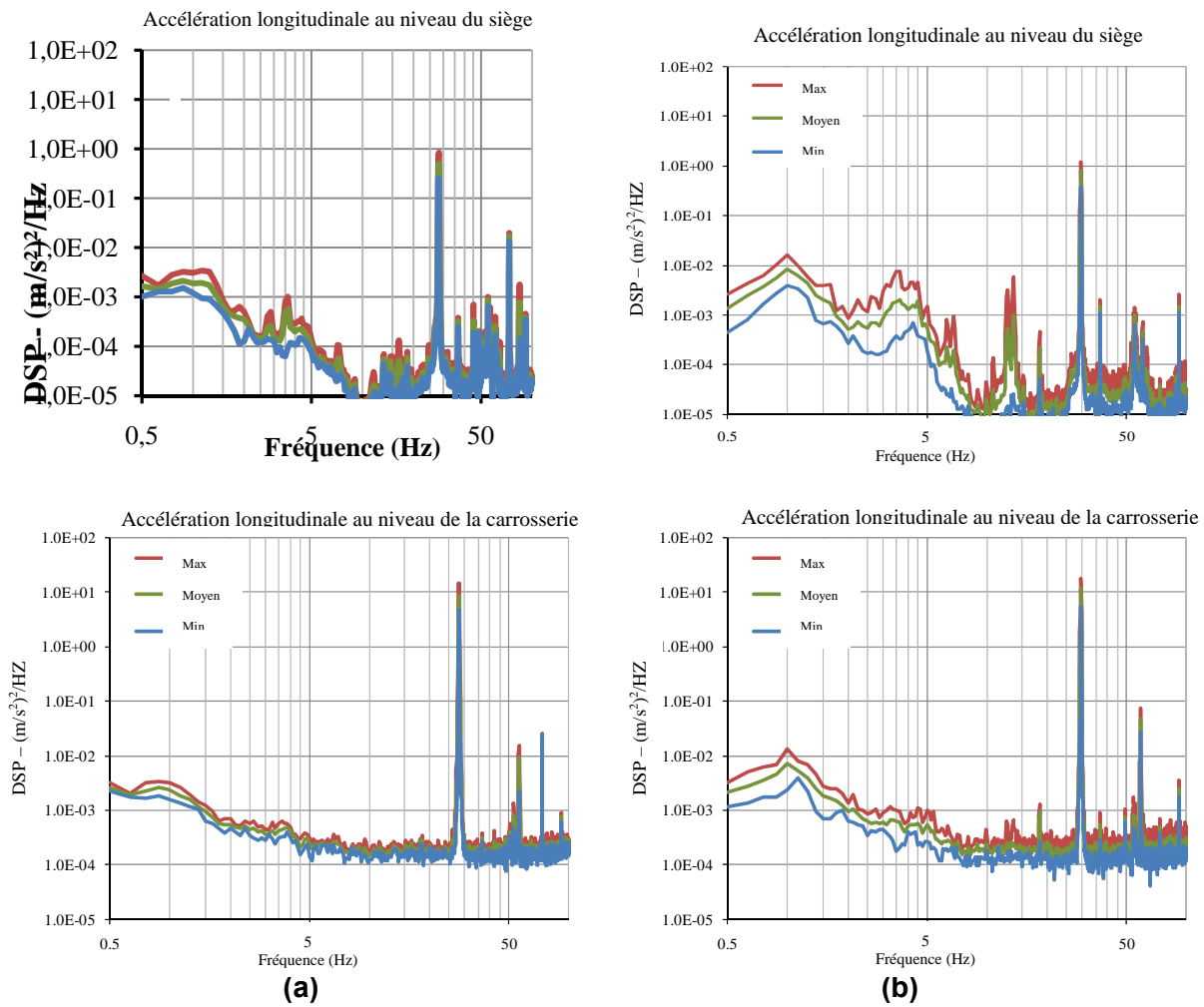


Figure A.1 : Plages de DSP de l'accélération longitudinale (x) mesurée au niveau du siège et de la carrosserie durant le compactage d'un sol de faible densité : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 10 tonnes à 6 cylindres.

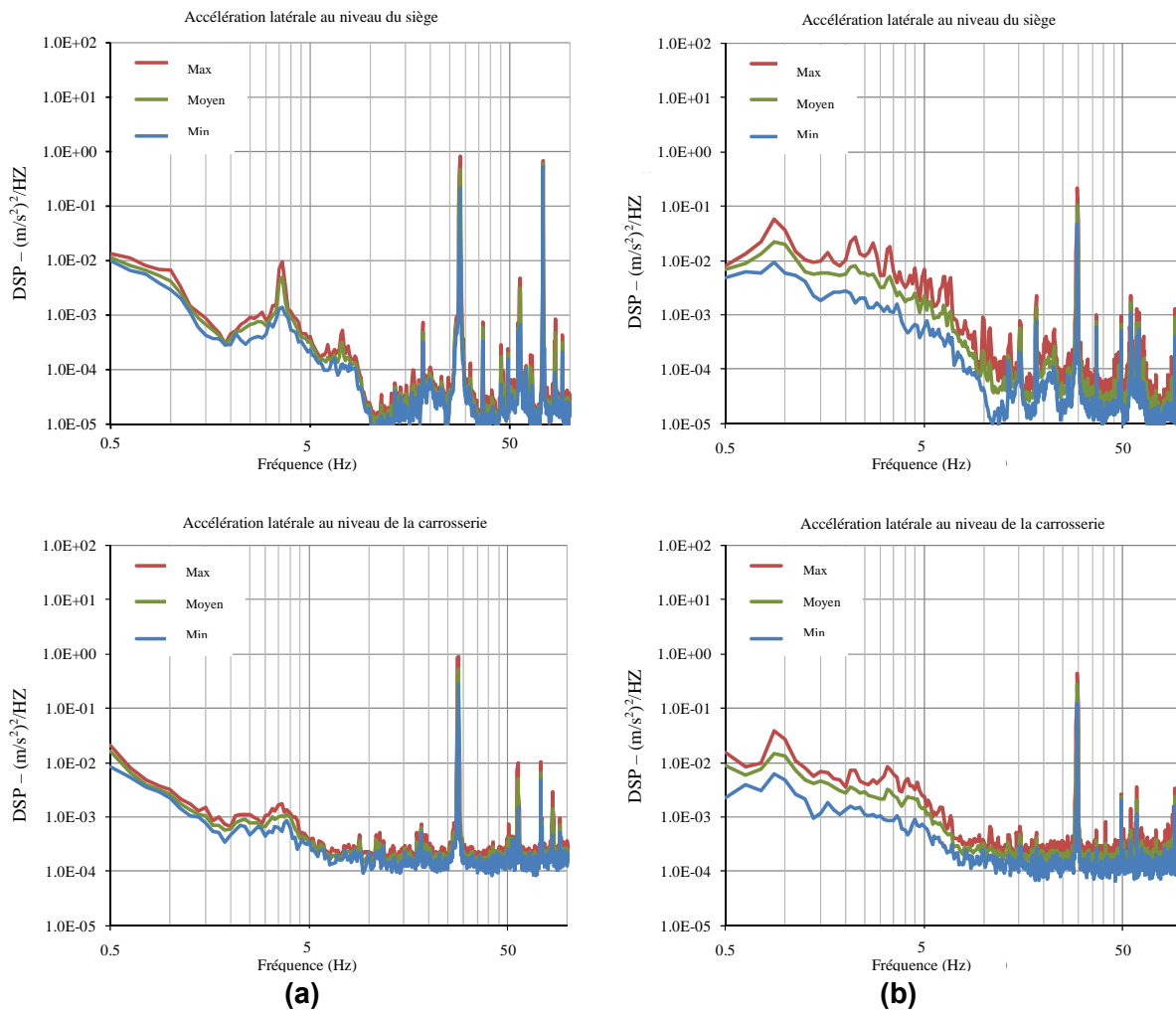


Figure A.2 : Plages de DSP de l'accélération latérale (y) mesurée au niveau du siège et de la carrosserie durant le compactage d'un sol de faible densité : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 10 tonnes à 6 cylindres.

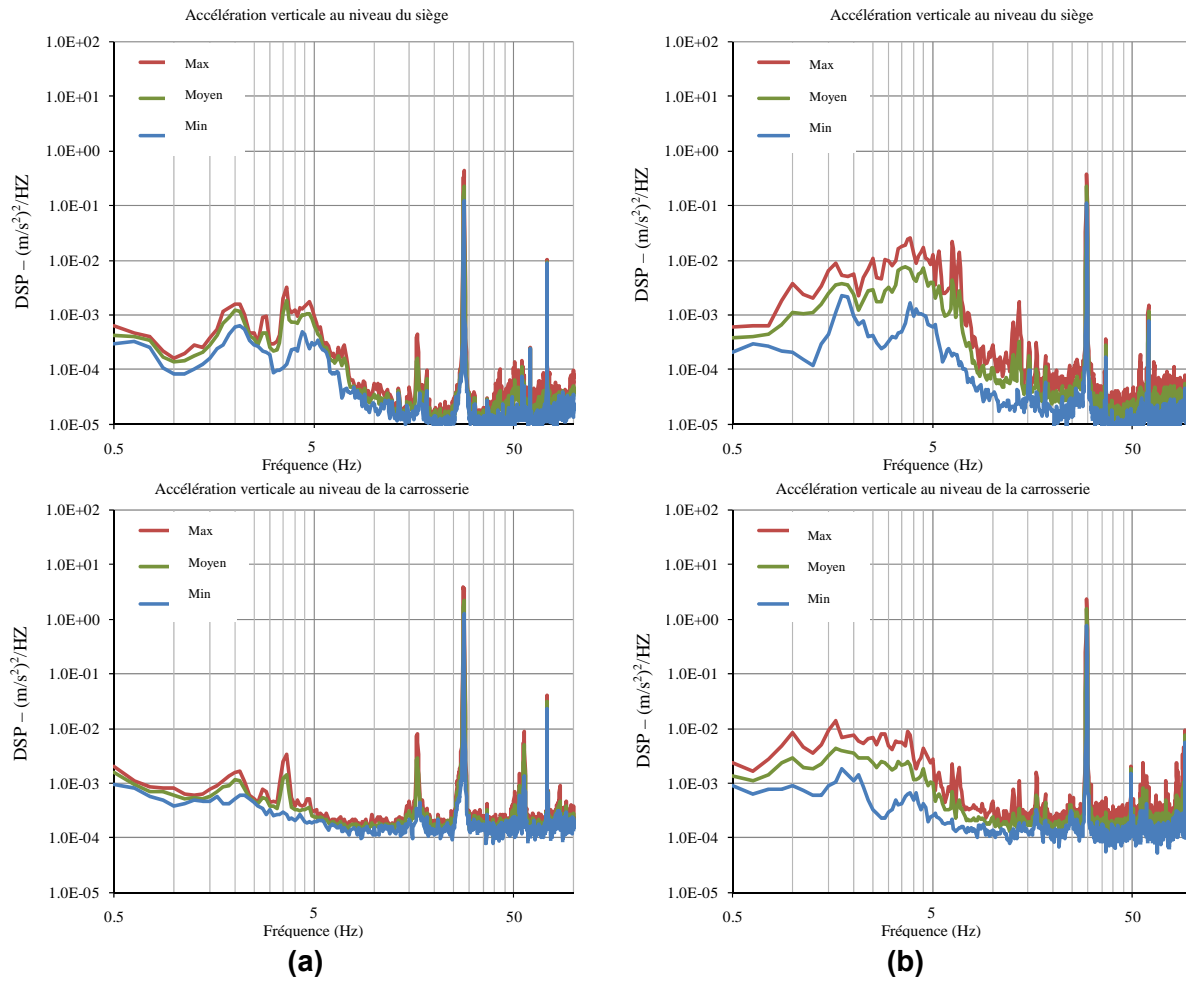


Figure A.3 : Plages de DSP de l'accélération verticale (z) mesurée au niveau du siège et de la carrosserie durant le compactage d'un sol de faible densité : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 10 tonnes à 6 cylindres.

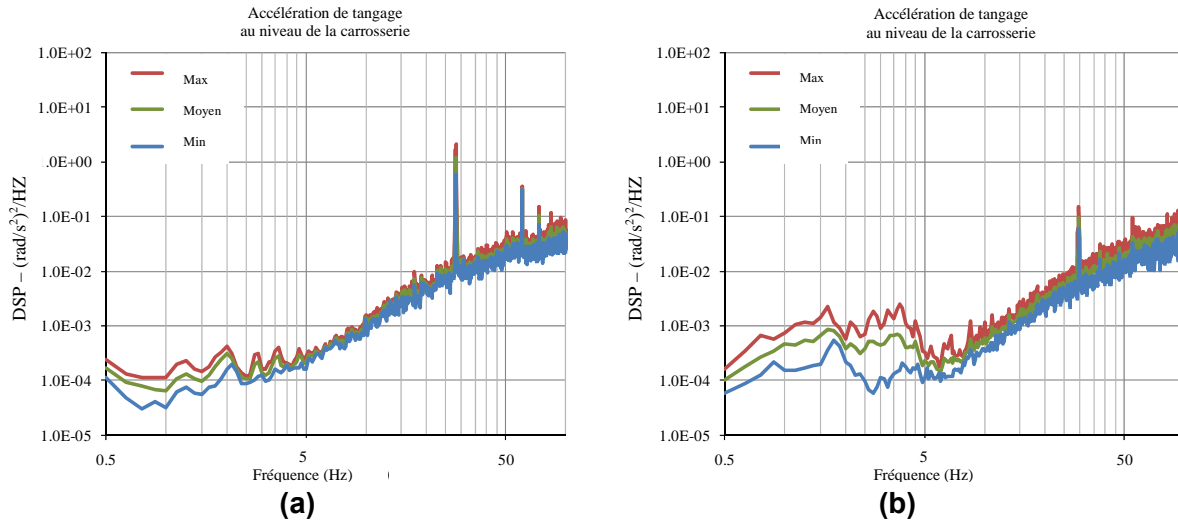


Figure A.4 : Plages de DSP de l'accélération de tangage (θ) mesurée au niveau de la carrosserie durant le compactage d'un sol de faible densité : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 10 tonnes à 6 cylindres.

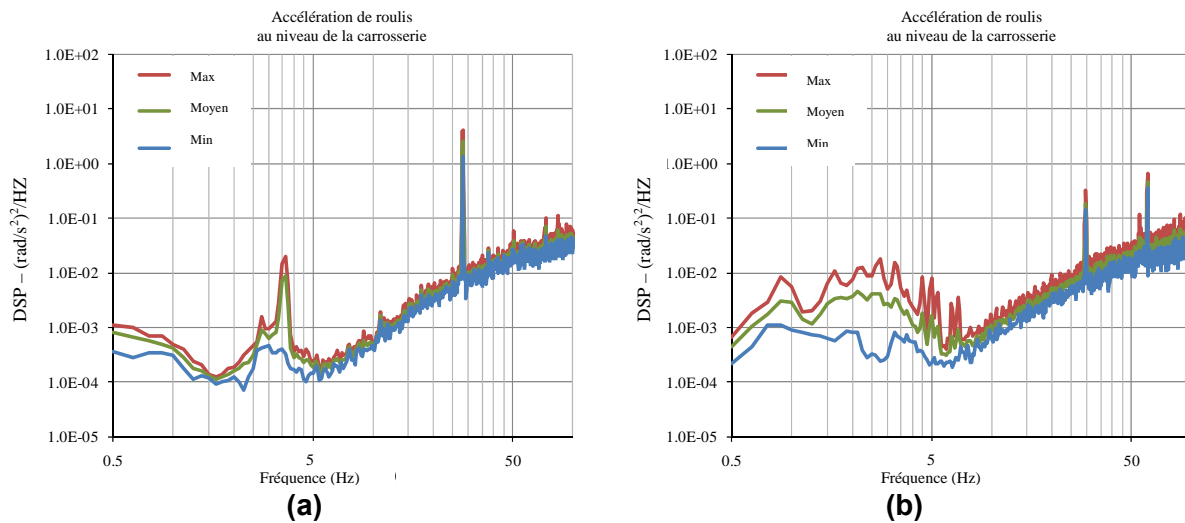


Figure A.5 : Plages de DSP de l'accélération de roulis (ϕ) mesurée au niveau de la carrosserie durant le compactage d'un sol de faible densité : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 10 tonnes à 6 cylindres.

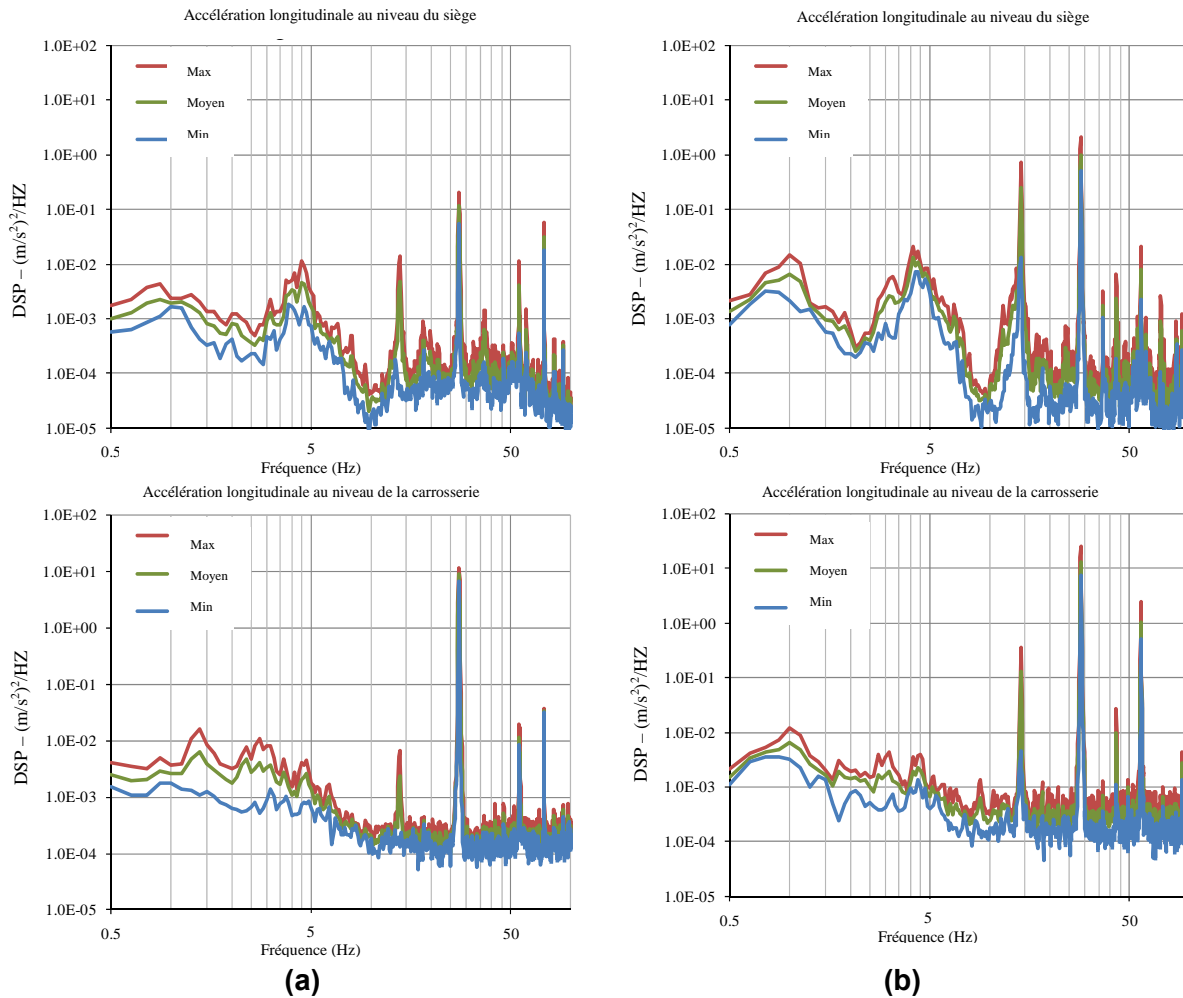


Figure A.6 : Plages de DSP de l'accélération longitudinale (x) mesurée au niveau du siège et de la carrosserie durant le compactage d'un sol de forte densité : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 10 tonnes à 6 cylindres.

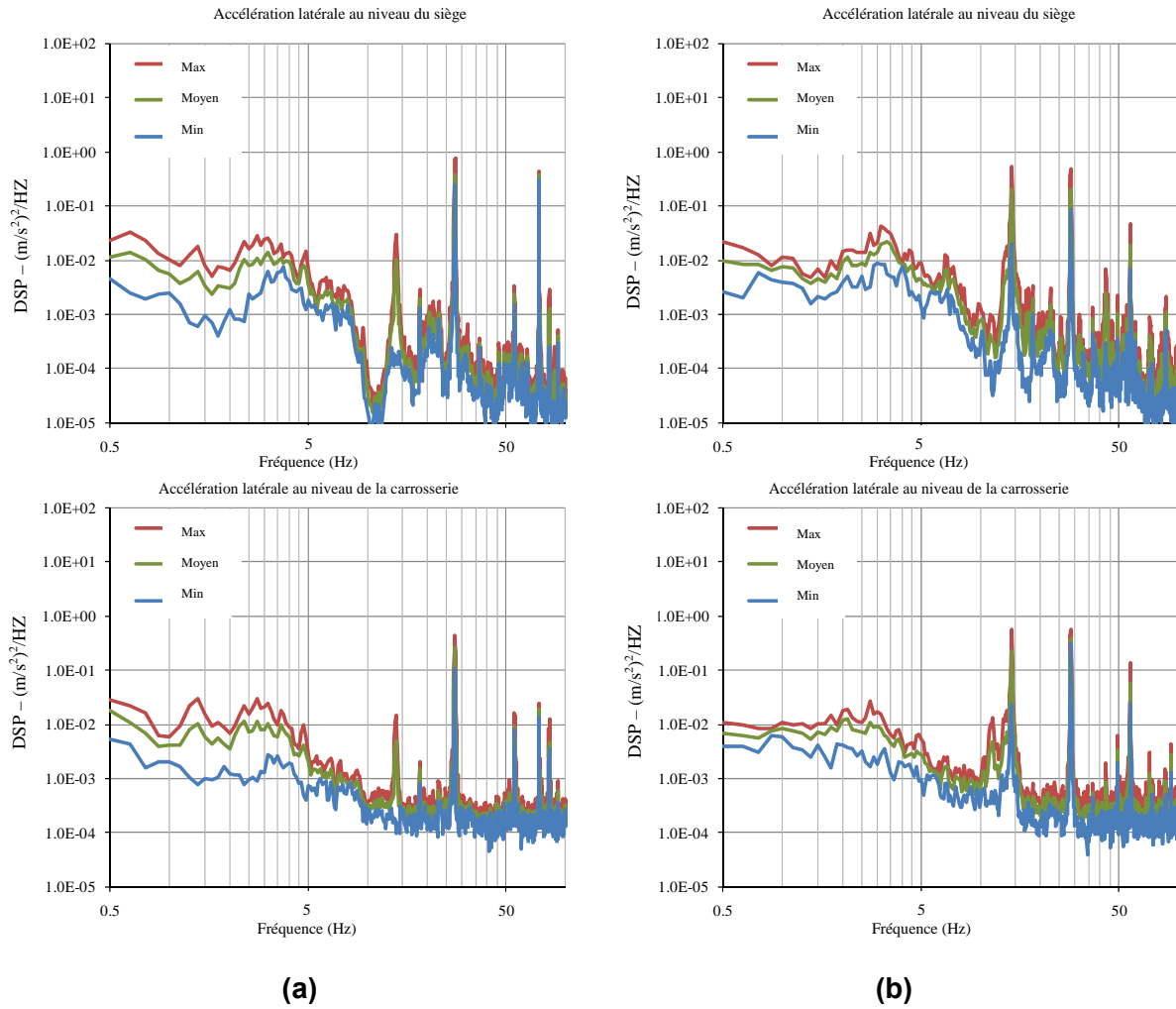


Figure A.7 : Plages de DSP de l'accélération latérale (y) mesurée au niveau du siège et de la carrosserie durant le compactage d'un sol de forte densité : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 10 tonnes à 6 cylindres.

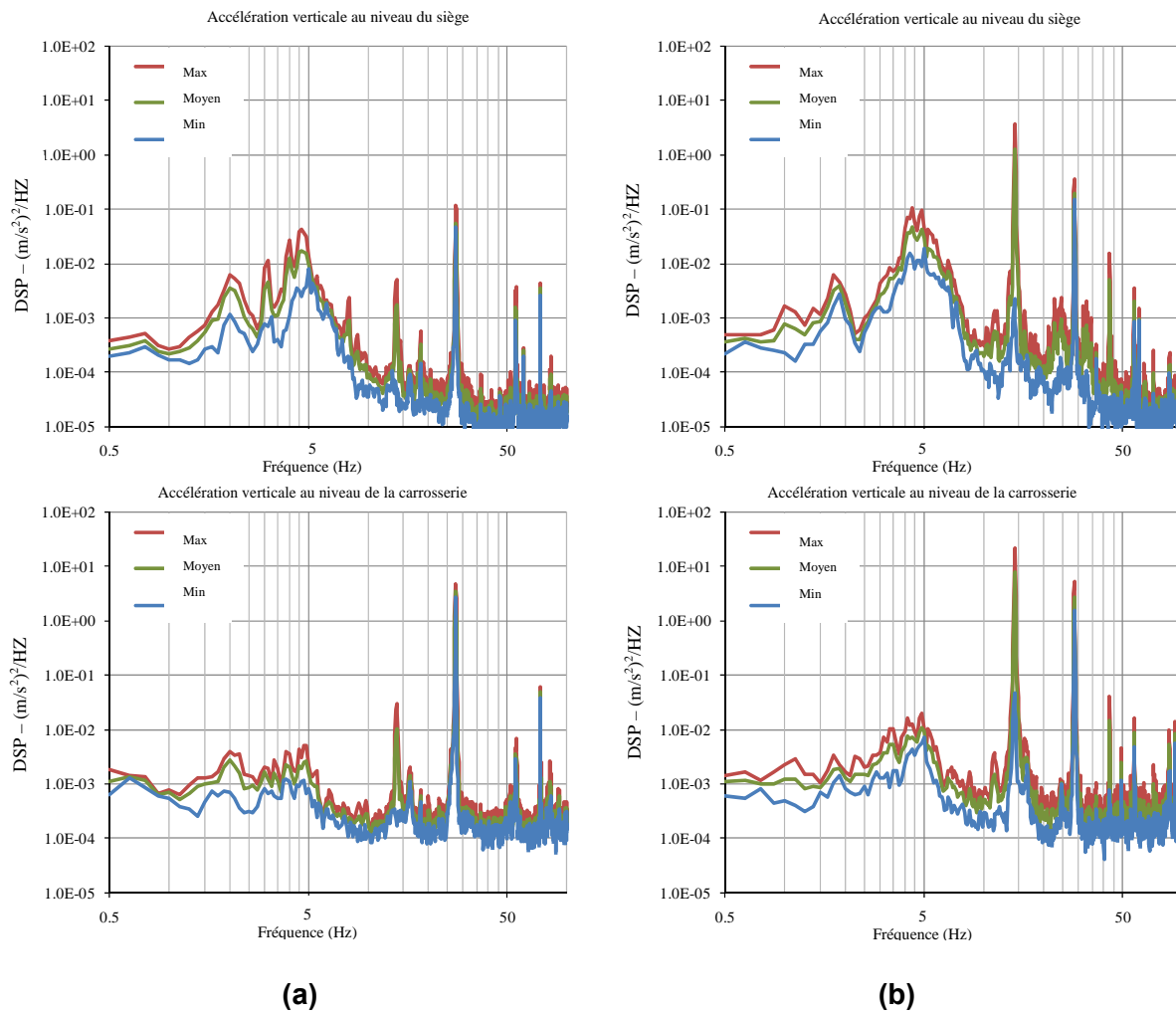


Figure A.8 : Plages de DSP de l'accélération verticale (z) mesurée au niveau du siège et de la carrosserie durant le compactage d'un sol de forte densité : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 10 tonnes à 6 cylindres.

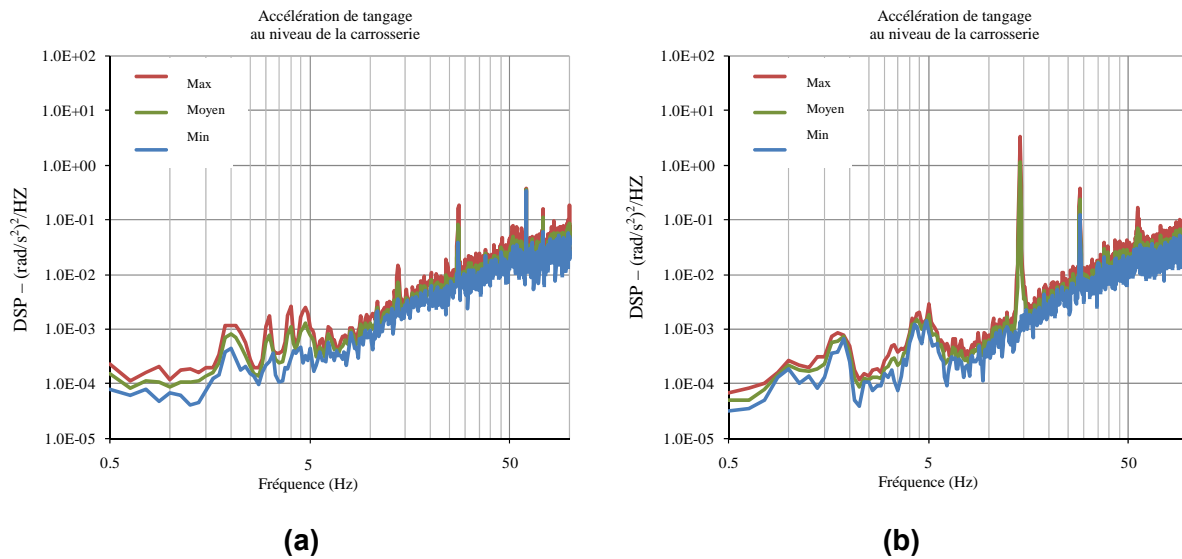


Figure A.9 : Plages de DSP de l'accélération de tangage (θ) mesurée au niveau de la carrosserie durant le compactage d'un sol de forte densité : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 10 tonnes à 6 cylindres.

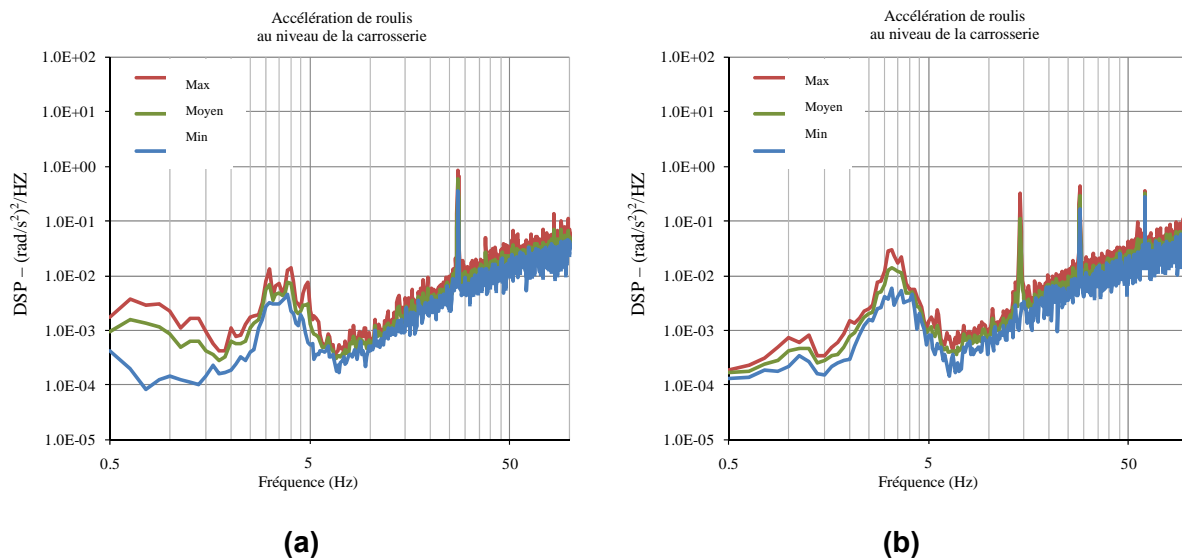


Figure A.10 : Plages de DSP de l'accélération de roulis (φ) mesurée au niveau de la carrosserie durant le compactage d'un sol de forte densité : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 10 tonnes à 6 cylindres.

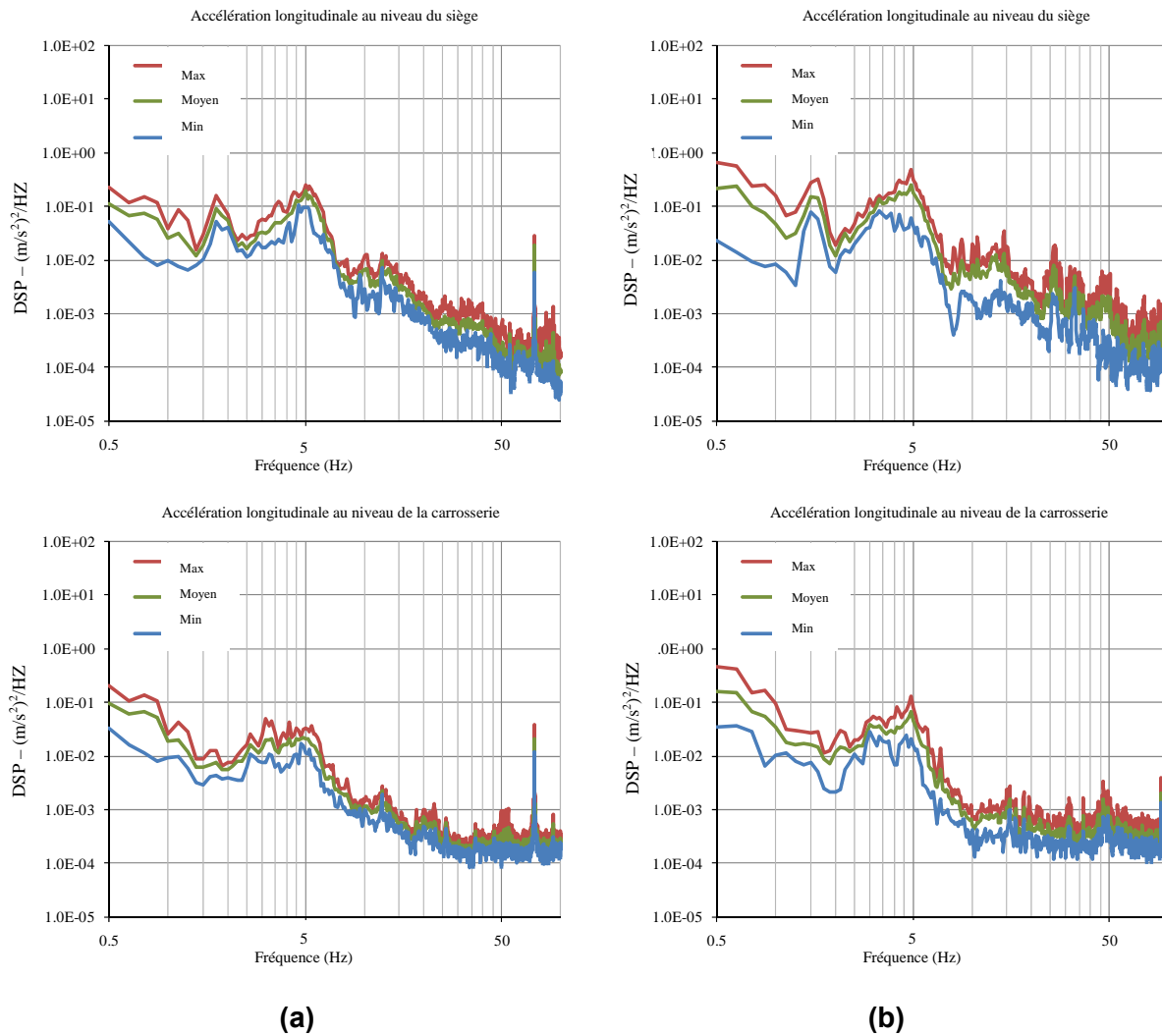


Figure A.11 : Plages de DSP de l'accélération longitudinale (x) mesurée au niveau du siège et de la carrosserie en mode de transit : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 10 tonnes à 6 cylindres.

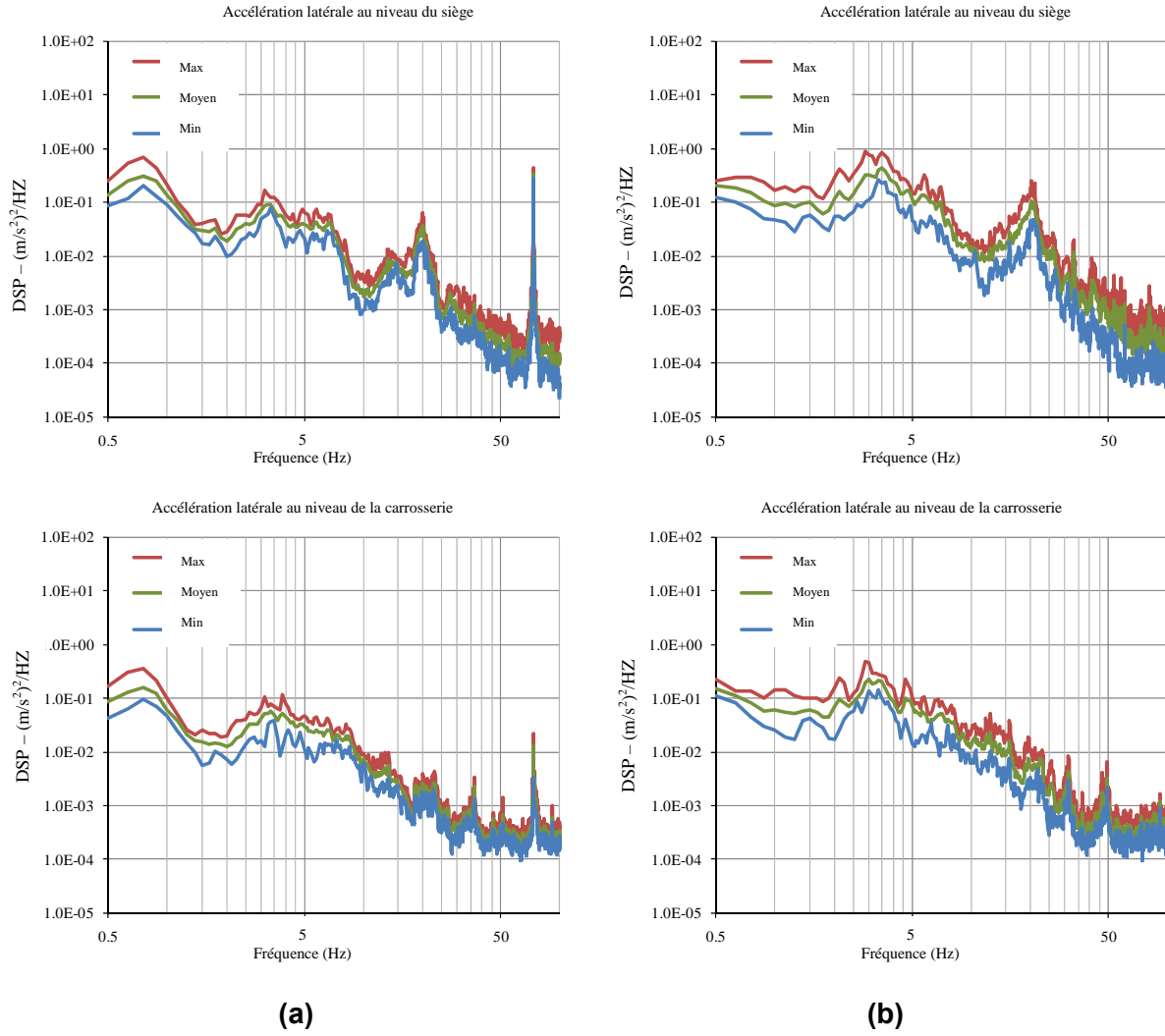


Figure A.12 : Plages de DSP de l'accélération latérale (y) mesurée au niveau du siège et de la carrosserie en mode de transit : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 10 tonnes à 6 cylindres.

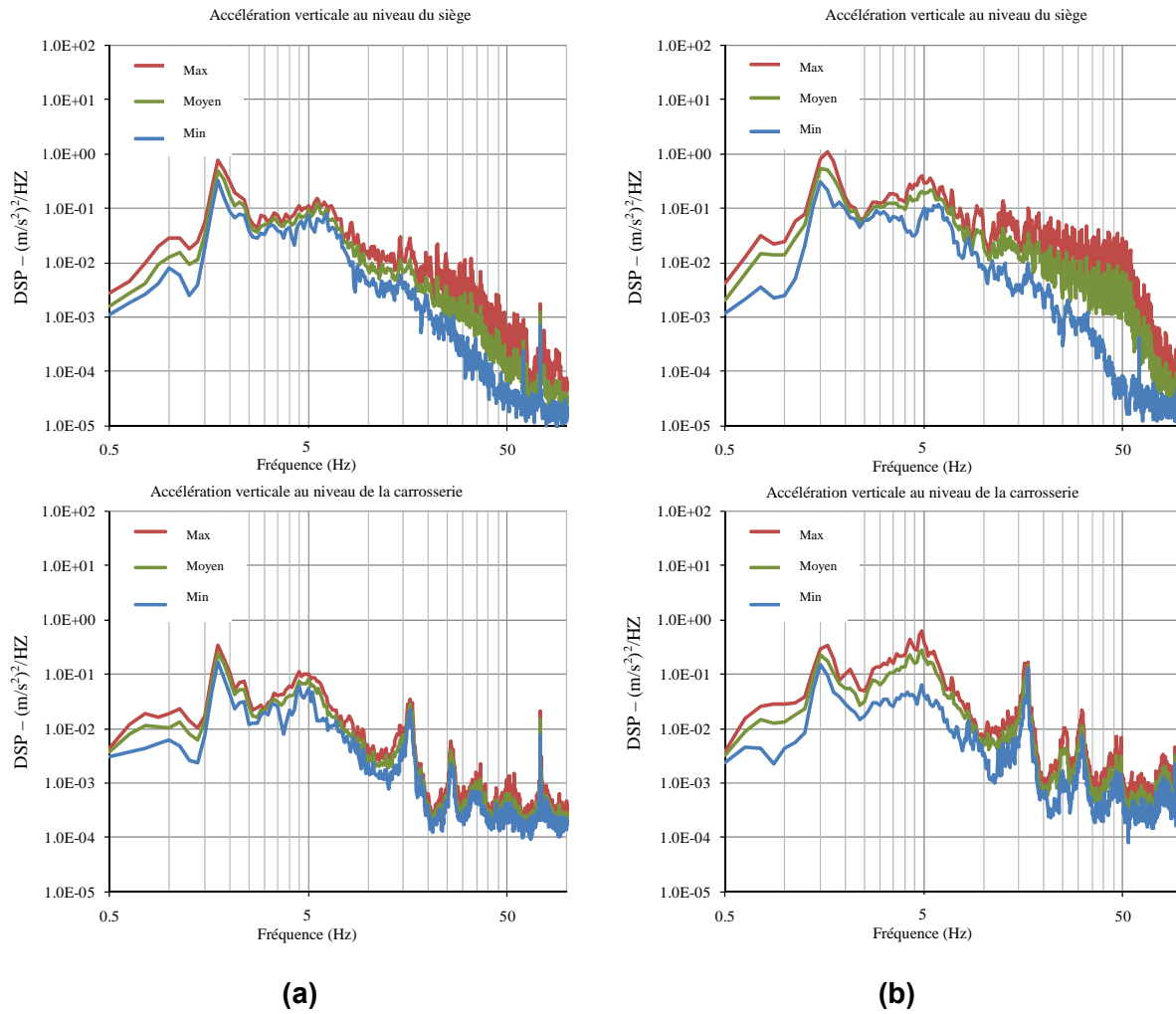


Figure A.13 : Plages de DSP de l'accélération verticale (z) mesurée au niveau du siège et de la carrosserie en mode de transit : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 10 tonnes à 6 cylindres.

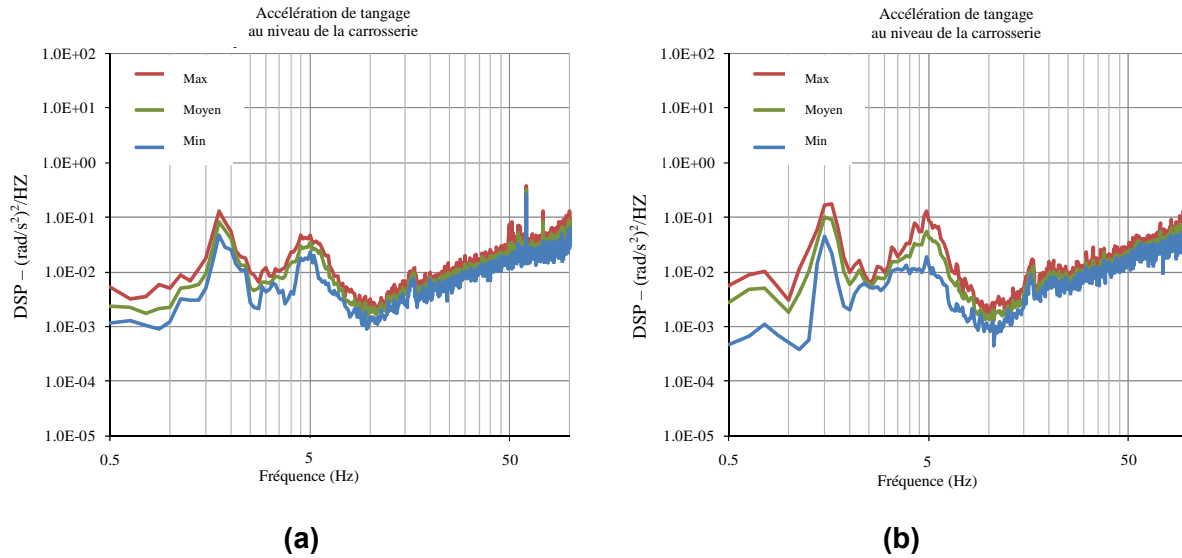


Figure A.14 : Plages de DSP de l'accélération de tangage (θ) mesurée au niveau du siège et de la carrosserie en mode de transit : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 10 tonnes à 6 cylindres.

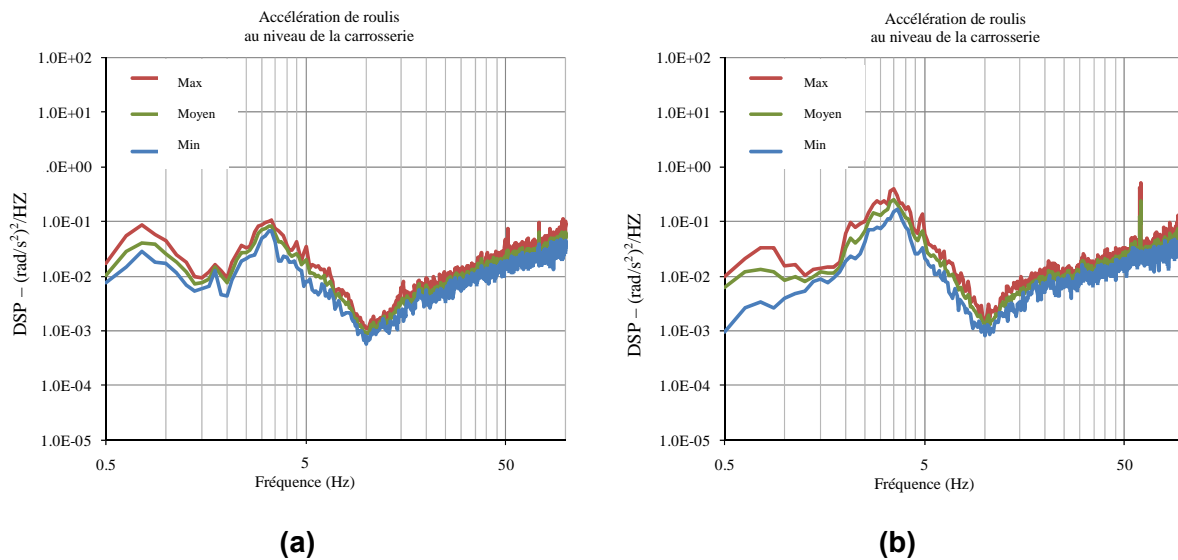


Figure A.15 : Plages de DSP de l'accélération de roulis (ϕ) mesurée au niveau du siège et de la carrosserie en mode de transit : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 10 tonnes à 6 cylindres.

ANNEXE B

PLAGES DE SPECTRES DE VIBRATION MESURÉS DURANT LES TÂCHES DE COMPACTAGE ET DE TRANSIT SUR LES CHANTIERS

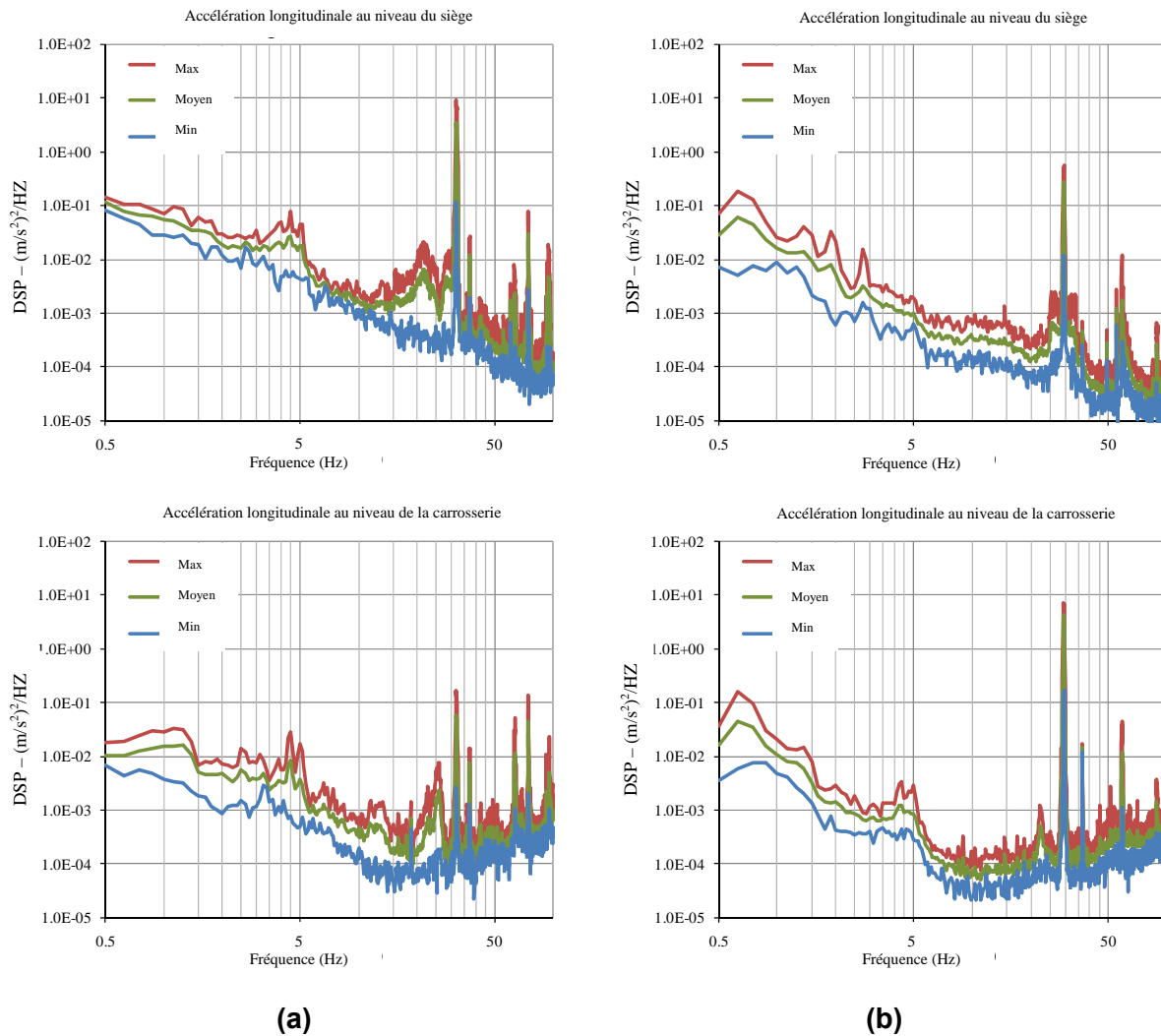


Figure B.1 : Plages de DSP de l'accélération longitudinale (x) mesurée au niveau du siège et de la carrosserie durant le compactage à basse amplitude du vibreur : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 13 tonnes à 6 cylindres.

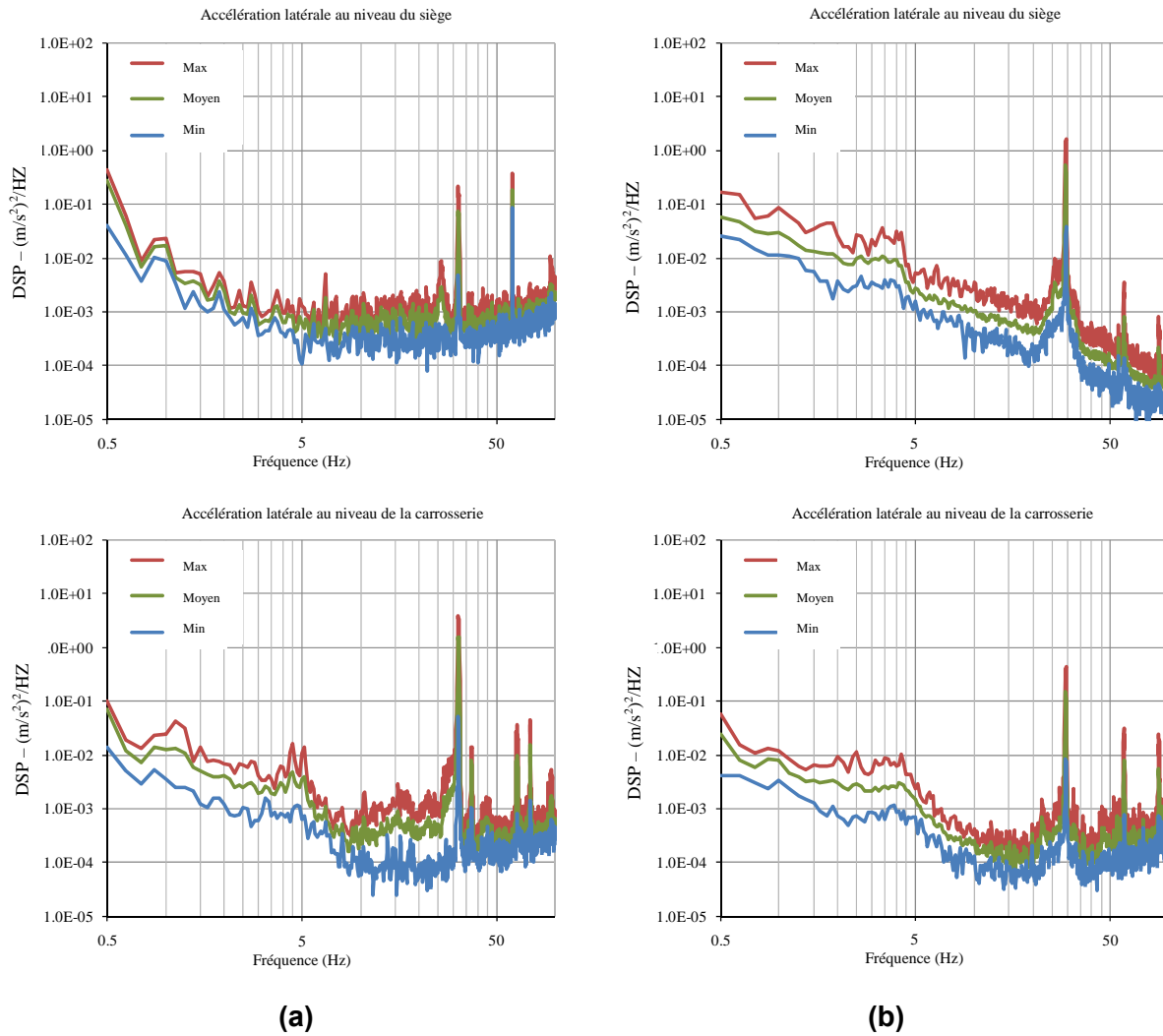


Figure B.2 : Plages de DSP de l'accélération latérale (y) mesurée au niveau du siège et de la carrosserie durant le compactage à basse amplitude du vibreur : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 13 tonnes à 6 cylindres.

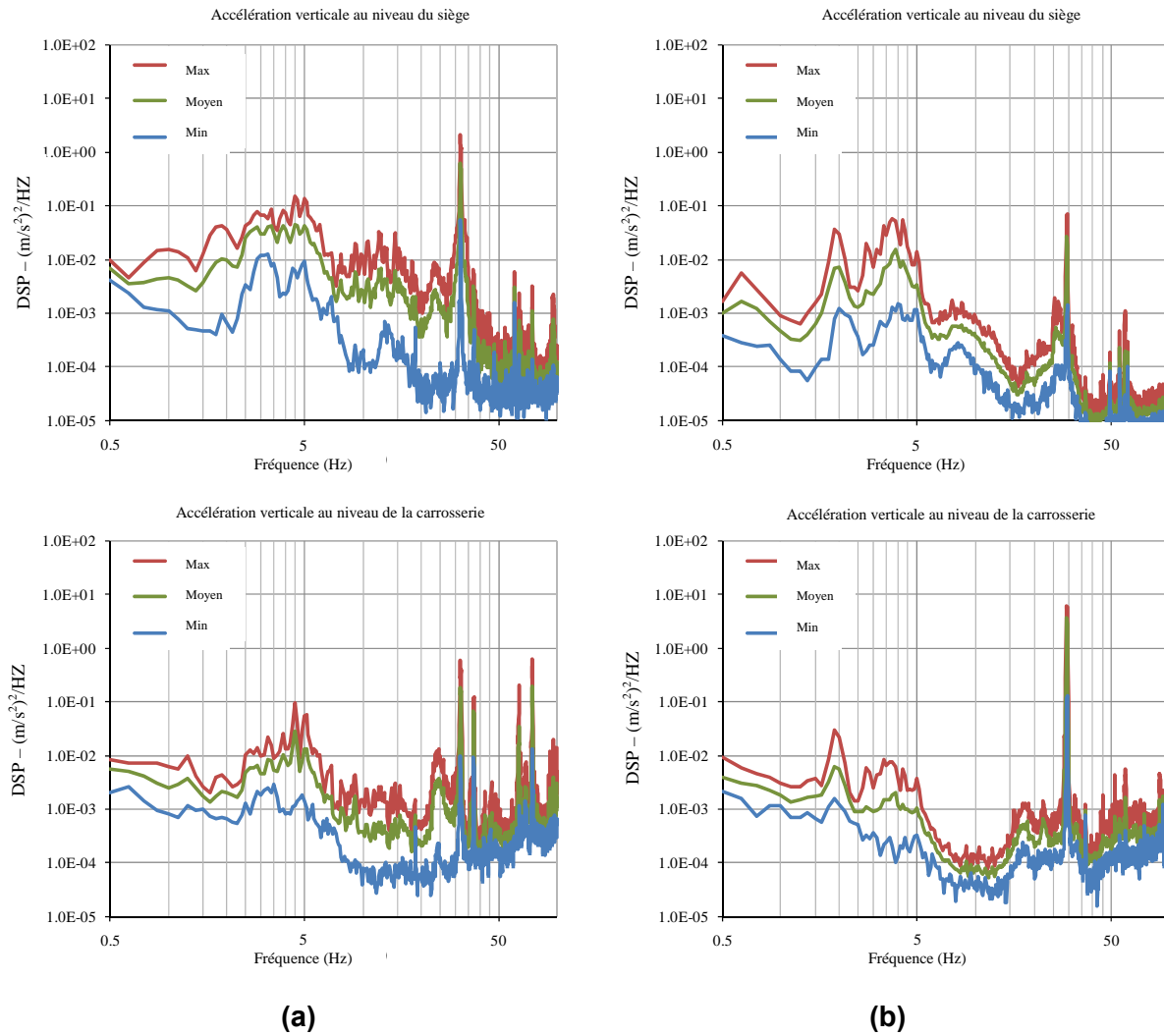


Figure B.3 : Plages de DSP de l'accélération verticale (z) mesurée au niveau du siège et de la carrosserie durant le compactage à basse amplitude du vibreur : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 13 tonnes à 6 cylindres.

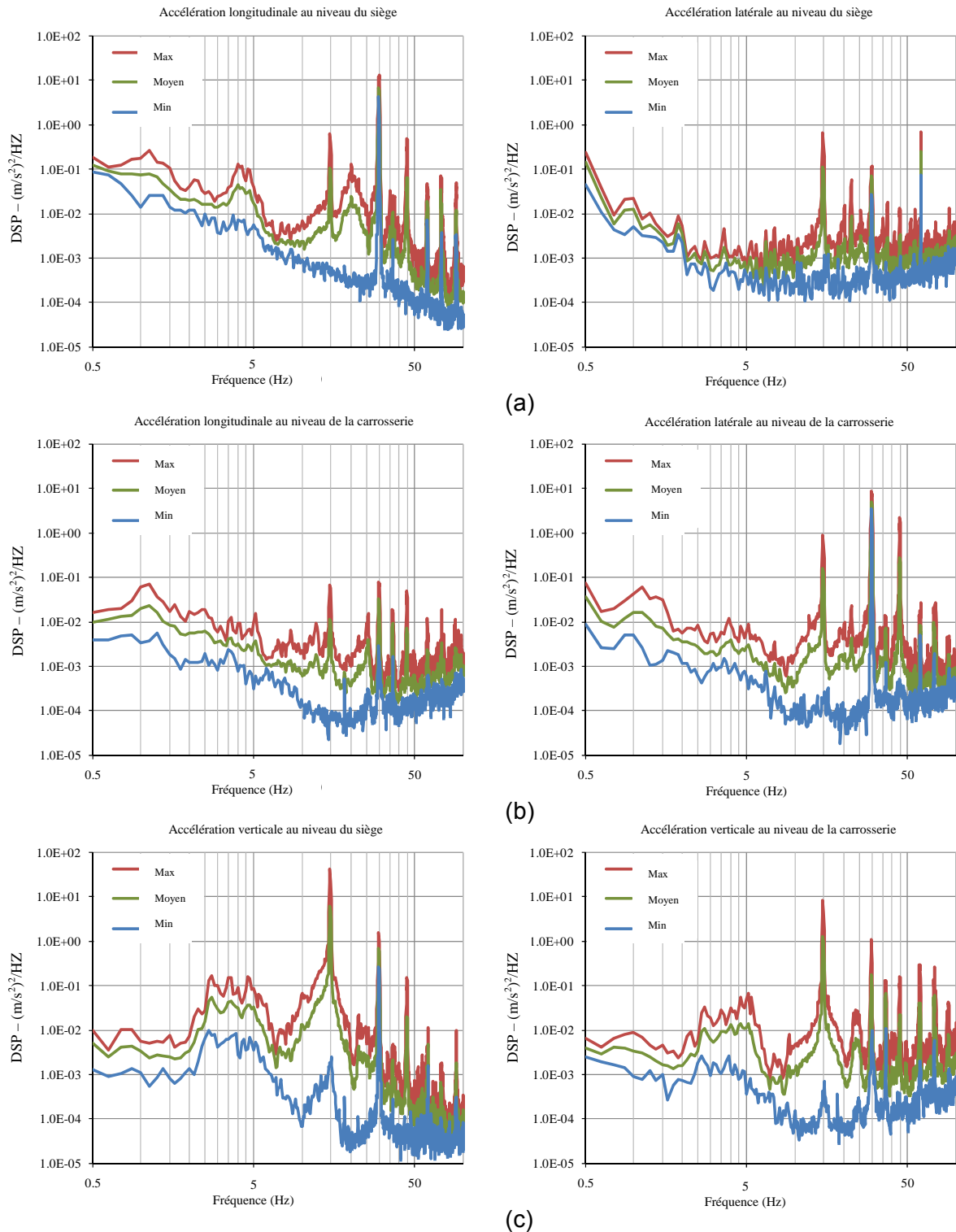


Figure B.4 : Plages de DSP de l'accélération longitudinale (x), latérale (y) et verticale (z) mesurée au niveau du siège et de la carrosserie durant le compactage à haute amplitude du vibreur avec le compacteur de 10 tonnes à 4 cylindres : (a) longitudinale ; (b) latérale ; et (c) verticale.

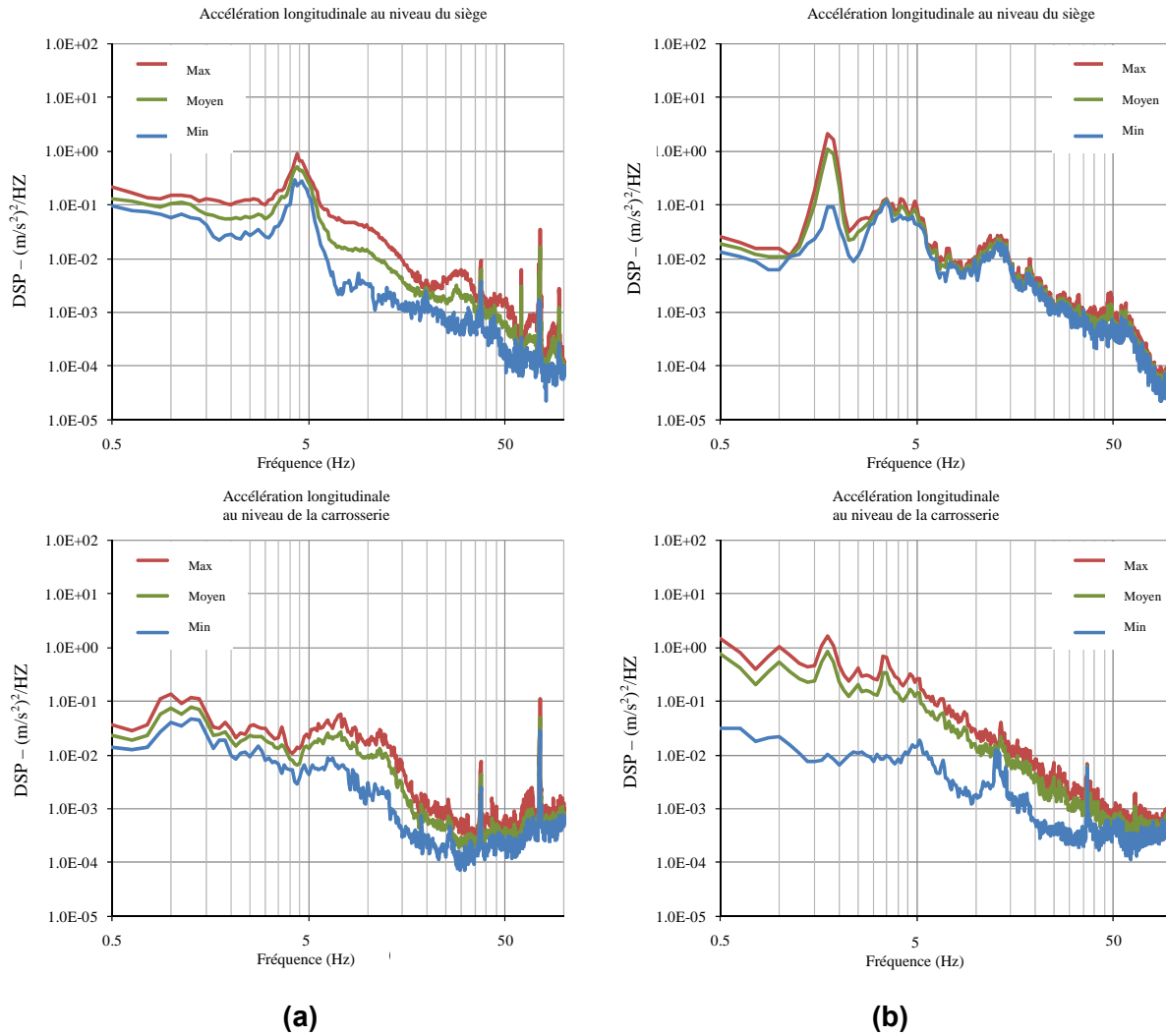


Figure B.5 : Plages de DSP de l'accélération longitudinale (x) mesurée au niveau du siège et de la carrosserie en mode de transit : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 13 tonnes à 6 cylindres.

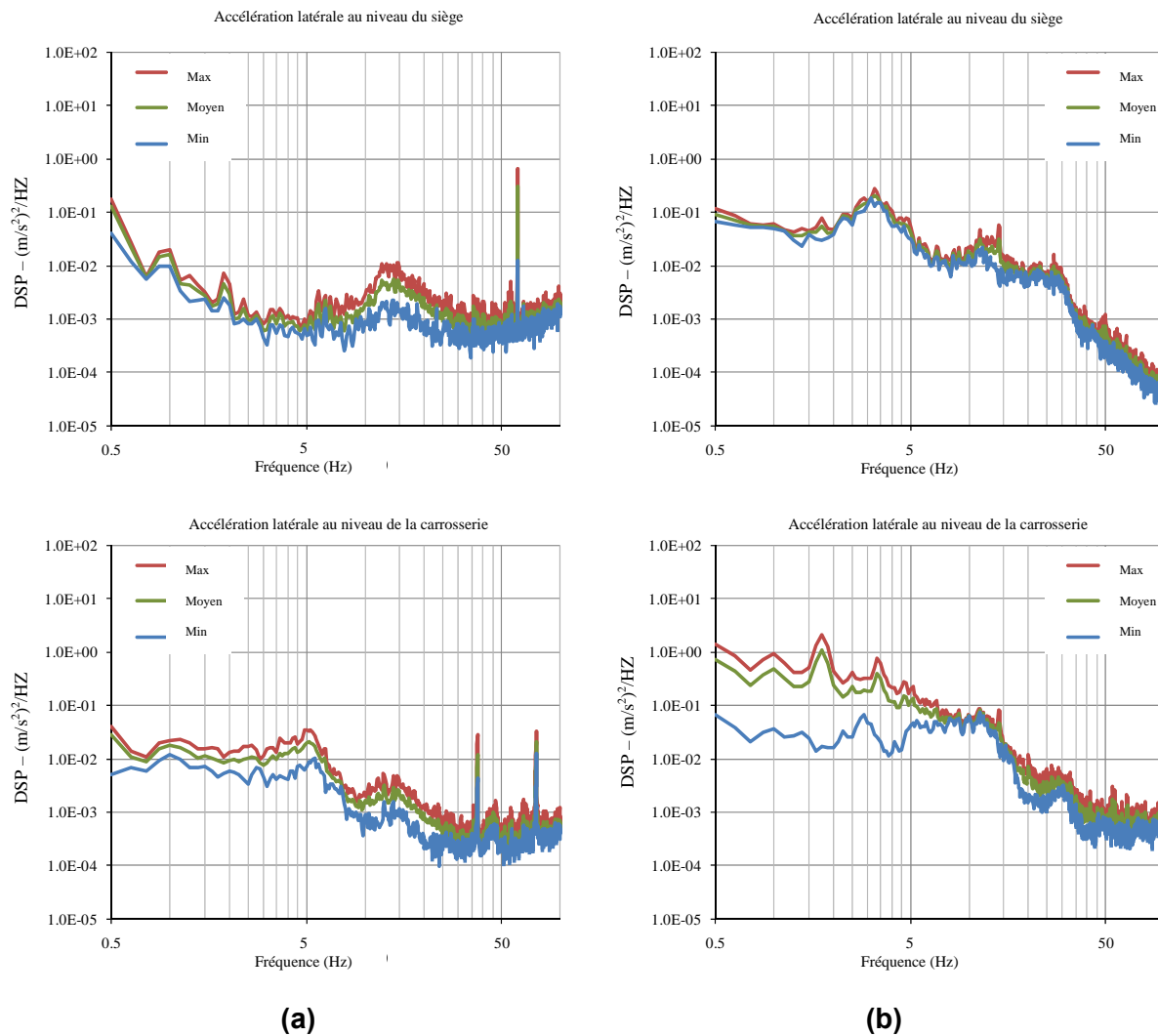


Figure B.6 : Plages de DSP de l'accélération latérale (y) mesurée au niveau du siège et de la carrosserie en mode de transit : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 13 tonnes à 6 cylindres.

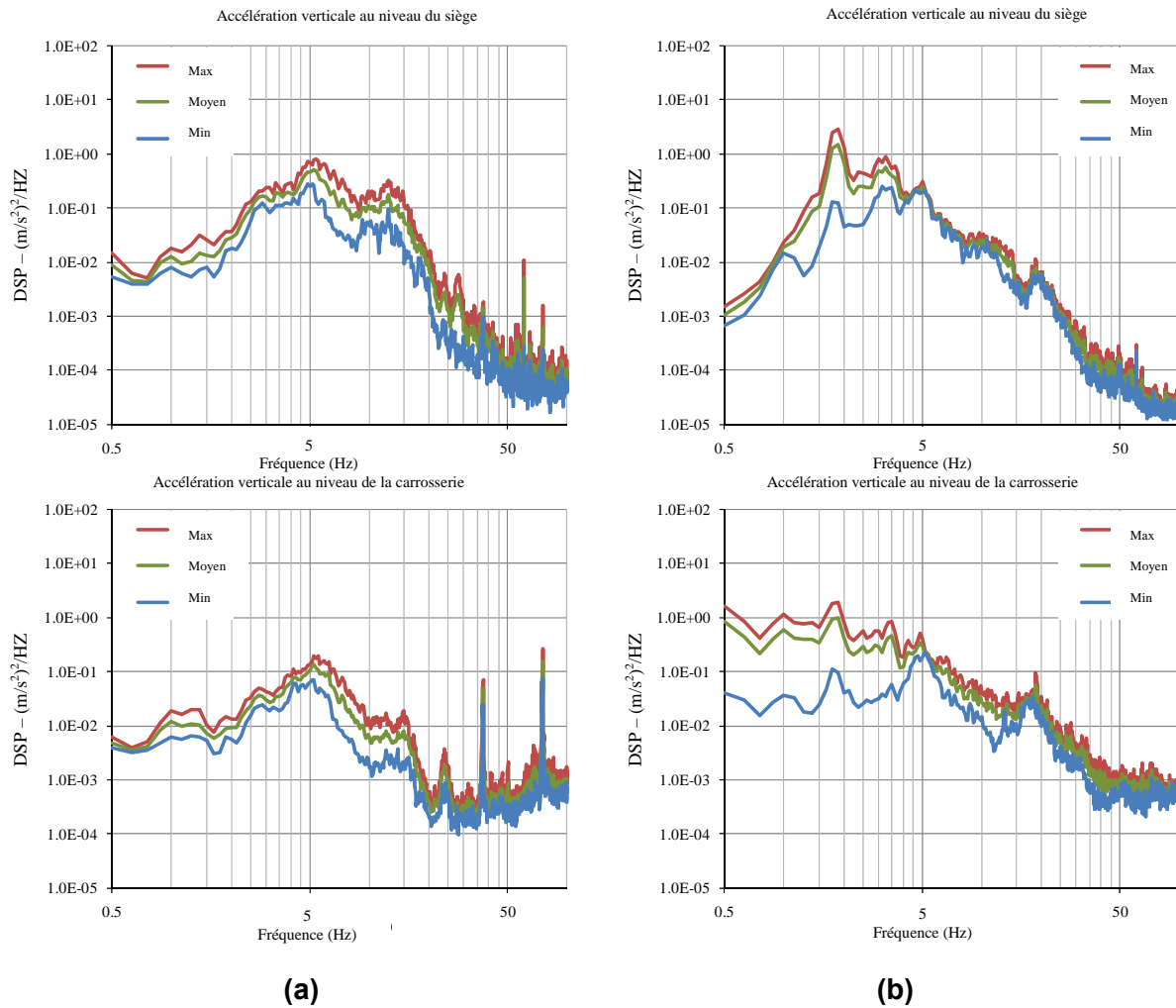


Figure B.7 : Plages de DSP de l'accélération verticale (z) mesurée au niveau du siège et de la carrosserie en mode de transit : (a) véhicule de 10 tonnes à 4 cylindres, et (b) véhicule de 13 tonnes à 6 cylindres.