

**Caractérisation de l'environnement  
vibratoire dans différentes  
catégories de véhicules :  
industriels, utilitaires  
et de transport urbain**



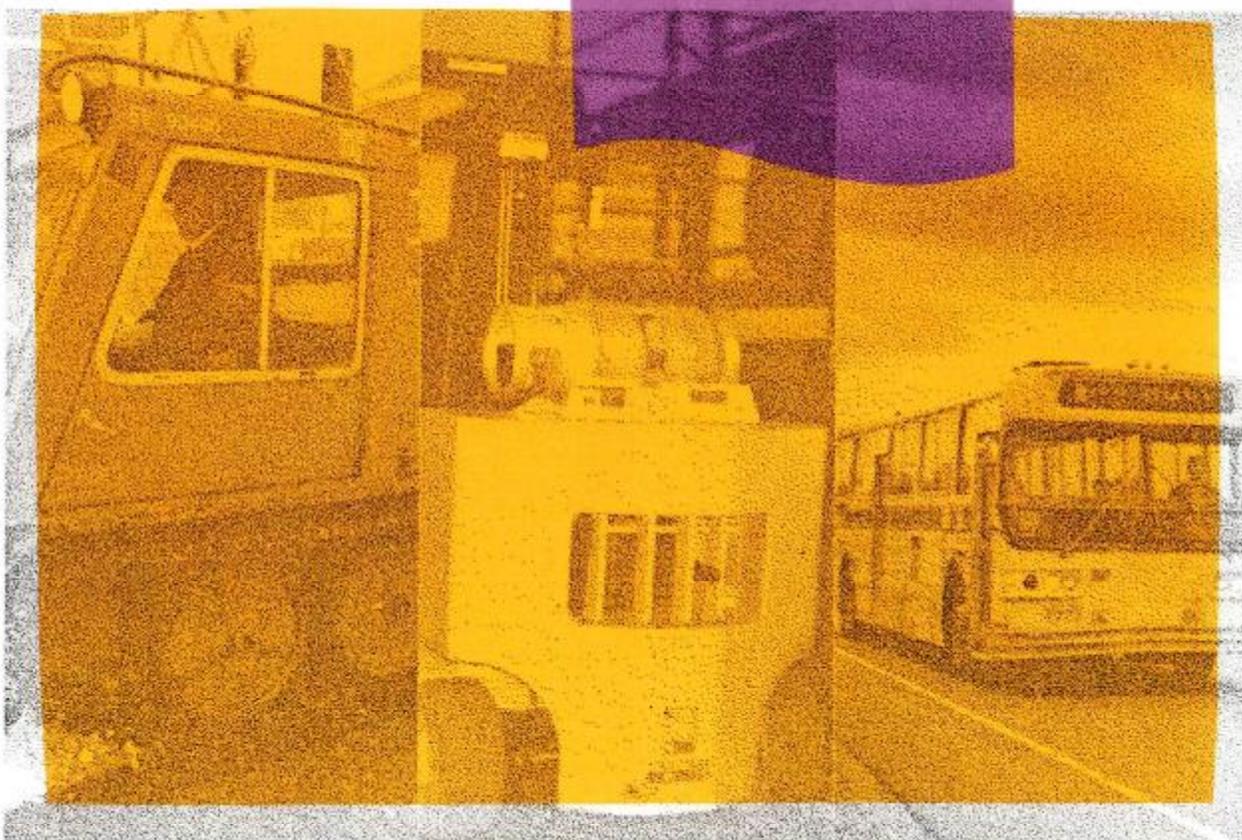
**ÉTUDES ET  
RECHERCHES**

Paul-Émile Boileau  
Subhash Rakheja

Mai 2000

R-242

**RAPPORT**



**IRSST**  
Institut de recherche  
en santé et en sécurité  
du travail du Québec

## La recherche, pour mieux comprendre

L'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) est un organisme de recherche scientifique voué à l'identification et à l'élimination à la source des dangers professionnels, et à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes. Financé par la CSST, l'Institut réalise et subventionne des recherches qui visent à réduire les coûts humains et financiers occasionnés par les accidents de travail et les maladies professionnelles.

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

Les résultats des travaux de l'Institut sont présentés dans une série de publications, disponibles sur demande à la Direction des communications ou gratuitement sur le site de l'Institut.

Dépôt légal  
Bibliothèque nationale du Québec  
2000

IRSST - Direction des communications  
505, boul. de Maisonneuve Ouest  
Montréal (Québec)  
H3A 3C2  
Téléphone : (514) 288-1551  
Télécopieur : (514) 288-7636  
[publications@irsst.qc.ca](mailto:publications@irsst.qc.ca)  
[www.irsst.qc.ca](http://www.irsst.qc.ca)  
© Institut de recherche Robert-Sauvé  
en santé et en sécurité du travail  
Mai 2000.

**Caractérisation de l'environnement  
vibratoire dans différentes  
catégories de véhicules :  
industriels, utilitaires  
et de transport urbain**

Paul-Émile Boileau, Programme sécurité-ingénierie, IRSST

Subhash Rakheja, Concave, Université Concordia

**ÉTUDES ET  
RECHERCHES**

**RAPPORT**

Cliquez recherche  
[www.irsst.qc.ca](http://www.irsst.qc.ca)



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

Cette étude a été financée par l'IRSST. Les conclusions et recommandations sont celles des auteurs.

## RÉSUMÉ

Des classes spectrales représentant l'environnement vibratoire dans l'habitacle de quatre catégories de véhicules (autobus urbains, chenillettes de déneigement, chariots élévateurs à conduite assise, chariots élévateurs à station debout) sont définies pour caractériser les vibrations agissant dans les directions longitudinale (axe x), latérale (axe y), verticale (axe z), ainsi qu'en roulis ( $\phi$ ) et en tangage ( $\theta$ ). Ces classes spectrales sont représentées en exprimant l'amplitude de la densité spectrale de puissance (DSP) en fonction de la fréquence entre 0.5 et 40 Hz. Une équation mathématique est développée pour exprimer cette relation pour des conditions moyenne et sévère; la première étant basée sur la moyenne des spectres en fréquence établie pour l'ensemble des véhicules faisant partie d'une même catégorie, tandis que la deuxième correspond à la courbe enveloppe maximale qui définit les valeurs extrêmes de la DSP à chaque fréquence telles que déterminées en considérant l'ensemble des véhicules. La définition des classes spectrales est basée sur des mesures effectuées au poste de conduite des différentes catégories de véhicules procédant à des opérations jugées normales, en circulant sur des parcours variés et en intégrant différents modes opératoires. La classe spectrale applicable aux autobus urbains est basée sur un bilan des contraintes réalisé avec une quarantaine de combinaisons circuit-autobus impliquant les modèles Classic et NewLook opérant sur des circuits réguliers. La classe spectrale applicable aux chenillettes de déneigement est quant à elle basée sur des mesures réalisées dans des véhicules Bombardier SW-48 procédant à différents types d'opérations (déblaiement, épandage d'abrasifs, chargement, en transit libre), le tout totalisant une vingtaine de combinaisons chenillette-mode opératoire. Quant aux deux classes spectrales applicables aux chariots élévateurs à conduite assise, celles-ci découlent de mesures réalisées avec six différents véhicules dont la capacité de charge est inférieure à cinq tonnes, le diamètre moyen extérieur des roues est inférieur ou supérieur à 600 mm et qui circulent à vide et avec charge à l'intérieur d'un bâtiment sur un plancher de béton. Enfin, une classe spectrale est définie pour les chariots élévateurs à station debout (transpalettes) en se basant sur des mesures effectuées dans dix véhicules dont la capacité de charge est de 2 et 2.5 tonnes et en s'insérant directement dans le cycle de production de ces véhicules dans un entrepôt alimentaire. Pour compléter cette étude, les cinq classes spectrales définissant les vibrations verticales dans les différentes catégories de véhicules sont reproduites sur un simulateur de vibrations pour des applications futures d'essais en laboratoire. Enfin, un modèle analytique est développé et validé pour représenter une chenillette de déneigement et estimer les caractéristiques vibratoires prévues dans le véhicule lorsque certains paramètres de conception sont modifiés.

## REMERCIEMENTS

Cette étude n'aurait pas été rendue possible sans la participation et l'implication des entreprises qui ont bien voulu mettre leurs véhicules et leur personnel à notre disposition pour effectuer les mesures requises. Bien que ces mesures aient été réalisées à l'intérieur des cycles de production, certaines réorganisations des opérations ont parfois été requises pour accommoder la prise des mesures. Aussi, nous tenons à remercier la Société de transport de la Rive-Sud de Montréal, la Ville de Montréal, la Société Cascades inc., ainsi que Kraft Canada inc. pour nous avoir permis de réaliser les mesures. Nos remerciements s'adressent également au personnel technique de l'IRSST, messieurs Jérôme Boutin et Pierre Drouin, qui ont procédé à l'ensemble des essais qui, à l'occasion, ont dû être réalisés dans des conditions relativement difficiles. Nous tenons aussi à remercier monsieur Z. Wang, associé de recherche du groupe CONCAVE, pour sa rigueur et sa patience dans le traitement et la gestion de quantités très importantes de fichiers de données. Enfin, nos remerciements s'adressent à madame K. Wang pour le traitement qu'elle a su donner dans le développement complexe et l'analyse du modèle analytique représentant une chenillette de déneigement, et à monsieur Nicolas Dulac pour son assistance dans la production finale des figures.

# TABLE DES MATIÈRES

	<b>Page</b>
1.0 INTRODUCTION.....	1
2.0 OBJECTIFS DE L'ÉTUDE .....	5
3.0 SÉLECTION DES VÉHICULES ET DES CONDITIONS D'ESSAI.....	7
3.1 Autobus urbains.....	7
3.2 Chenillettes de déneigement.....	8
3.3 Chariots élévateurs à conduite assise .....	10
3.4 Chariots élévateurs à station debout (transpalettes) .....	11
4.0 MESURE DES VIBRATIONS.....	13
4.1 Métrologie.....	13
4.2 Traitement et analyse des signaux vibratoires .....	15
4.2.1 Calcul des accélérations angulaires de roulis et de tangage .....	16
4.2.2 Détermination des spectres de la densité spectrale de puissance (DSP).....	16
4.2.3 Détermination des spectres en bandes de fréquences de tiers d'octave.....	17
4.2.4 Calcul des valeurs efficaces des accélérations pondérées et non pondérées.....	17
4.2.5 Détermination du facteur de crête .....	19
5.0 RÉSULTATS.....	21
5.1 Caractéristiques spectrales des différents véhicules.....	21
5.1.1 Autobus urbains.....	21
5.1.2 Chenillettes de déneigement.....	29
5.1.3 Chariots élévateurs à conduite assise .....	35
5.1.4 Chariots élévateurs à station debout.....	45
5.2 Définition de l'environnement vibratoire des différentes catégories de véhicules.....	50
5.2.1 Autobus urbains.....	50
5.2.2 Chenillettes de déneigement.....	59
5.2.3 Chariots élévateurs à conduite assise .....	73
5.2.4 Chariots élévateurs à station debout.....	82

# TABLE DES MATIÈRES

	<b>Page</b>
5.3	Élaboration des classes spectrales vibratoires..... 85
5.3.1	Autobus urbains..... 87
5.3.2	Chenillettes de déneigement..... 91
5.3.3	Chariots élévateurs à conduite assise ..... 96
5.3.4	Chariots élévateurs à station debout..... 109
5.4	Sommaire des classes spectrales vibratoires ..... 113
5.5	Simulation des classes d'excitation verticale..... 114
5.6	Modèle analytique: Chenillettes de déneigement..... 121
6.0	DISCUSSION ET CONCLUSION..... 129
	BIBLIOGRAPHIE..... 133
	ANNEXE A: MESURES DE VIBRATIONS DANS LES AUTOBUS URBAINS
	ANNEXE B: MESURES DE VIBRATIONS DANS LES CHENILLETTES DE DÉNEIGEMENT
	ANNEXE C: MESURES DE VIBRATIONS DANS LES CHARIOTS ÉLÉVATEURS À CONDUITE ASSISE
	ANNEXE D: MESURES DE VIBRATIONS DANS LES CHARIOTS ÉLÉVATEURS À STATION DEBOUT
	ANNEXE E: RÉSUMÉ DES CLASSES SPECTRALES DE VIBRATIONS DÉFINIES POUR L'ENSEMBLE DES VÉHICULES

## 1.0 INTRODUCTION

L'identification et l'adaptation de moyens de correction (e.g. siège à suspension, suspensions de véhicules) visant à réduire les vibrations et les chocs auxquels sont soumis les conducteurs de véhicules nécessitent, au préalable, la caractérisation de la contrainte vibratoire (i.e. intensité, contenu en fréquences, degré impulsionnel) associée aux différents types de véhicules concernés. Cette caractérisation est d'autant plus difficile à effectuer que pour une même catégorie de véhicules, les différences intrinsèques entre les modèles de véhicules, ainsi que les variations dans leurs conditions d'opération (e.g. surface de roulement, vitesse, charge transportée) peuvent mener à des différences importantes dans les caractéristiques vibratoires. La caractérisation de l'environnement vibratoire des véhicules nécessite donc que des mesures soient effectuées dans la cabine d'un nombre statistiquement représentatif d'une même catégorie de véhicules, tout en tenant compte des variations dans les conditions d'opération spécifiques à chacune des catégories de véhicules lors de leur utilisation normale.

La caractérisation de l'environnement vibratoire de différentes catégories de véhicules constitue une approche toute désignée sur le plan de la normalisation puisqu'elle permet de définir les exigences requises pour contrôler les niveaux d'exposition aux vibrations et aux chocs pour les conducteurs. À cet égard, une norme internationale ISO 10326-1(1992) [1] définit la procédure expérimentale de base à appliquer en laboratoire pour évaluer la performance de sièges dont l'installation est prévue dans certains types de véhicules. Pour un usage prévu de sièges dans des catégories de véhicules spécifiques, cette norme doit être mise en relation avec d'autres normes qui définissent les excitations vibratoires spécifiques aux catégories de véhicules visées, permettant ainsi l'utilisation de ces excitations vibratoires pour effectuer les essais et définir les exigences que doivent rencontrer les sièges pour être jugés comme étant adaptés au véhicule à équiper. À ce jour, l'environnement vibratoire de certaines catégories de véhicules a pu être défini en direction verticale, notamment pour les tracteurs agricoles à roues [2], les engins de terrassement (décapeuses, chargeuses et tracteurs sur roues, tracteurs et chargeuses à chenilles) [3], les chariots élévateurs [4,5], les camions lourds industriels (i.e. tracteurs routiers) [6] et les mini-engins de chantiers (pelles, chargeuses, chargeuses-pelles compactes, motobasculeurs, compacteurs) [7]. Seules les trois classes spectrales des vibrations verticales définies pour les tracteurs agricoles à roues et les quatre classes spectrales définies pour les engins de terrassement font l'objet de normes internationales (ISO 5007 [8] et 7096 [9]), maintenant reconnues aussi comme normes canadiennes (CAN/CSA-M5007-94 [2] et M7096-94 [3]). Cependant, la norme ISO 7096 est en cours de révision et le nouveau projet présentement à l'étude entend couvrir tous les engins de chantier avec neuf classes spectrales vibratoires.

La classe spectrale des vibrations verticales définie pour les camions lourds industriels de plus de 12 tonnes fait l'objet d'une norme française (AFNOR NF R18-401-1990 [10]), tandis que les quatre classes spectrales définies pour les chariots élévateurs [4,5], dont certaines sont également utilisées pour caractériser les vibrations dans les mini-engins de chantier [7], résultent d'études réalisées principalement en Europe. En ce sens, certaines classes spectrales définissent les caractéristiques vibratoires des marques et modèles de véhicules plus communément utilisés en Europe et sont représentatives des conditions et des tâches typiques rencontrées dans les entreprises européennes. Pour les catégories de véhicules déjà couvertes par des classes spectrales, une validation s'impose pour déterminer si l'environnement vibratoire des marques et modèles de véhicules utilisés dans les entreprises québécoises dans les conditions courantes peut être représenté par les classes spectrales ainsi définies. De plus, aucune des classes spectrales présentement définies dans les normes ou projets de norme n'est associée spécifiquement aux vibrations agissant dans les directions transversales (x et y) ou encore aux mouvements de roulis et de tangage des véhicules. Pour certaines catégories de véhicules, certains modes vibratoires autres que vertical pourraient engendrer des niveaux vibratoires non négligeables, le tout dépendant de la configuration du véhicule et de son mode d'opération. Il y a donc un intérêt pour déterminer les caractéristiques vibratoires dans les directions autres que verticales, particulièrement avec l'introduction de la nouvelle norme traitant de l'exposition aux vibrations globales du corps [11] qui exprime l'effet des vibrations sur la santé en se basant sur la composante directionnelle dominante, tandis que la combinaison des vibrations agissant dans plusieurs directions (incluant les mouvements angulaires) est requise pour juger de l'effet sur le confort.

Au Québec au cours des dernières années, on compte parmi les véhicules qui ont fait l'objet de nombreuses demandes particulières concernant le choix de sièges à suspension adaptés à leurs environnements vibratoires, les autobus urbains, les chenillettes de déneigement et les chariots élévateurs à conduite assise. Les demandes mettaient clairement en évidence le peu de moyens techniques disponibles pour faire un choix éclairé du siège à suspension qui serait le mieux adapté pour contrer les vibrations, compte tenu de l'absence de données sur les caractéristiques des vibrations à atténuer dans les véhicules. Suite à ces demandes, quelques cas impliquant un ou des véhicules ont pu être étudiés dans des conditions particulières sur une base ponctuelle, sans que les résultats ne soient nécessairement applicables à d'autres véhicules faisant partie de la même catégorie en raison du nombre limité de mesures.

Au-delà du problème lié au choix d'un siège à suspension, l'absence de données relatives à l'environnement vibratoire des véhicules en conditions normales d'opération rend difficile toute tentative d'amélioration ou de modification des véhicules qui permettrait de réduire les niveaux

d'exposition vibratoire des conducteurs. C'est le cas notamment des chariots élévateurs à station debout dont l'utilisation est largement répandue dans le secteur de la manutention de produits alimentaires, mais pour lequel peu ou pas de données sont disponibles pour caractériser leur environnement vibratoire.

Avec l'essor que prend la conception assistée par ordinateur, il est maintenant possible de prévoir l'effet escompté de certaines modifications apportées à la conception du véhicule sans avoir recours aux modifications elles-mêmes. Cette approche nécessite au préalable une connaissance du comportement dynamique du véhicule, et donc, de ses caractéristiques vibratoires pour permettre la définition et la validation d'un modèle analytique du véhicule capable de simuler le plus près possible son comportement tel que mesuré dans la réalité. En modifiant certains des paramètres du modèle ainsi défini, l'influence que certaines modifications apportées au véhicule original pourrait avoir sur les niveaux d'exposition vibratoire peut être estimée.

Parmi les quatre catégories de véhicules visées dans cette étude, les chenillettes de déneigement sont ceux pour lesquels la technologie de conception a relativement peu évolué au cours des années. La prise de conscience par les utilisateurs que l'exposition aux vibrations et aux chocs pouvait être considérable dans ce véhicule a poussé certaines municipalités du Québec à faire pression auprès du principal manufacturier pour qu'il modifie le véhicule dans le but de minimiser les vibrations et les chocs. Malgré quelques tentatives du fabricant (i.e. cabine suspendue, modification des chenilles, incorporation de sièges à suspension), les résultats se sont avérés relativement infructueux. En raison de l'utilisation marquée de ces véhicules au Québec et du besoin de renouvellement de la flotte de véhicules existants, il y a donc un intérêt de la part des utilisateurs et des fabricants, pour que des modifications substantielles soit apportées visant à limiter les niveaux d'exposition aux vibrations et aux chocs pour les conducteurs. C'est donc dans cette optique que cette étude comporte un volet qui consiste à utiliser les caractéristiques vibratoires de ce type de véhicule, telles que déterminées pour développer et valider un modèle analytique qui est subséquemment utilisé pour estimer, par simulations, l'influence de certaines modifications du véhicule sur les niveaux d'exposition aux vibrations.

## 2.0 OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

On suppose qu'en considérant un nombre statistiquement représentatif d'une même catégorie de véhicules opérant dans des conditions bien définies, des classes spectrales de vibrations caractérisant leur environnement vibratoire respectif peuvent être identifiées, éliminant ainsi la nécessité d'effectuer des mesures subséquentes strictement sur une base individuelle. Ceci nécessite un regroupement des types d'une même catégorie de véhicules possédant des caractéristiques similaires, ainsi qu'un nombre appréciable de mesures de vibrations dans les cabines de ces véhicules, tout en prenant en compte les variations dans les conditions de conduite (surface de roulement, vitesse, charge transportée).

De telles classes spectrales n'existent pas actuellement pour des véhicules tels que les autobus urbains, les chenillettes de déneigement et les chariots élévateurs à station debout, bien que pour certains, elles pourraient à la limite s'apparenter à des classes spectrales existantes. Bien qu'elles aient été définies pour les vibrations verticales dans les chariots élévateurs à conduite assise [4,5], leur application aux types de chariots élévateurs utilisés dans les entreprises québécoises n'a pas été démontrée. De plus, l'intégration de ces classes spectrales au simulateur de vibrations dont l'IRSST dispose, constitue un besoin essentiel pour évaluer l'adaptabilité de certains correctifs potentiels (e.g. sièges à suspension) dans les véhicules concernés sans avoir à recourir à de longs et coûteux essais sur le terrain. Quant aux chenillettes de déneigement, la définition et la validation de classes spectrales vibratoires sont nécessaires au développement d'un modèle analytique pouvant servir à estimer l'effet escompté de certaines modifications apportées au véhicule et au siège sur les niveaux d'exposition vibratoire des conducteurs.

De façon plus spécifique, les objectifs de l'étude consistent à :

- définir des classes spectrales de vibration pour les modes de vibration verticale, longitudinale, latérale, de roulis et de tangage qui soient représentatives de l'environnement vibratoire propre aux quatre catégories de véhicules identifiées (autobus urbains, chenillettes de déneigement, chariots élévateurs à conduite assise, chariots élévateurs à station debout), en tenant compte des marques de véhicules utilisés au Québec et des variations dans les conditions d'opération pour chacune des catégories de véhicules;

- reproduire sur un simulateur de vibrations verticales, les différentes classes spectrales identifiées dans cette direction pour chacune des catégories de véhicules dans le but éventuel d'évaluer en laboratoire des moyens de correction appropriés. Cette étape apparaît nécessaire pour évaluer la précision avec laquelle les classes spectrales ainsi développées peuvent être reproduites mécaniquement, pour éventuellement servir à élaborer une procédure expérimentale qui permettrait d'évaluer la conformité de sièges à suspension destinés aux catégories de véhicules concernés;
  
- définir pour les chenillettes de déneigement, un modèle analytique permettant d'estimer leur comportement dynamique sous différentes conditions d'opération tout en variant leur configuration actuelle pour identifier celle qui permettrait de limiter les niveaux d'exposition aux vibrations pour le conducteur.

## 3.0 SÉLECTION DES VÉHICULES ET DES CONDITIONS D'ESSAI

### 3.1 Autobus urbains

Au moment d'effectuer les travaux de mesures de vibrations à l'automne 1996, les autobus à plancher bas LFS de Nova Bus n'avaient pas encore fait leur apparition dans les services de transport urbain de la région métropolitaine. Une consultation auprès des Sociétés publiques de transport urbain démontrait que les modèles GM New Look datant des années 1977 à 1982 ainsi que les modèles GM Classic dont l'année de fabrication variait entre 1983 et 1986 comptaient pour plus de la moitié des véhicules faisant partie du parc des véhicules en utilisation. À ces modèles s'ajoutaient des MCI Classic 1990 comptant pour près de 30% du parc, tandis que les modèles les plus récents (i.e MCI Classic 1994 et Classic TDS 1995) y comptaient pour moins de 20%. Dans l'ensemble, on reconnaissait peu de différences entre les modèles d'autobus Classic et New Look en ce qui concerne les caractéristiques de la suspension et la structure générale des véhicules. Cependant, des différences de poids pouvaient être notées selon l'année de construction des véhicules.

La Société de transport de la Rive-Sud de Montréal (STRSM) a agit comme partenaire dans cette étude en mettant à notre disposition les véhicules requis, choisis parmi les quelques 350 autobus constituant le parc de véhicules de cette société. La sélection des autobus à considérer pour les essais a été faite en limitant le nombre de véhicules à 20 et en pondérant selon le nombre d'autobus et de modèles disponibles pour tenir compte de la physionomie du parc existant. Le tableau 1 identifie les marques et modèles de véhicules retenus, ainsi que leur nombre et leur numéro d'identification assigné par l'entreprise, le tout étant établi en fonction des critères précités.

**TABLEAU 1: Répartition du nombre et des modèles d'autobus urbains intégrés aux essais**

MODÈLE	ANNÉE	# TOTAL DU PARC	# RETENUS	IDENTIFICATION
GM New Look	1977-82	150	6	7761, 7764, 7812, 7814, 7852, 7864
GM Classic	1983-86	70	4	8300, 8301, 8312, 8601
MCI Classic	1990, 1994	92	8	9059, 9061, 9063, 9065, 9067, 9069, 9407, 9415
Classic TDS	1995	28	2	9502, 9518

Pour chacun des autobus retenus, deux parcours représentant des circuits d'autobus réguliers empruntés sur la Rive-Sud de Montréal, dont la durée était en moyenne d'une heure, ont été identifiés. Les essais se sont déroulés dans des conditions normales de transport de passagers en dehors des heures de pointe, pour une possibilité de 40 combinaisons circuit-autobus, chacune totalisant une heure de mesures. Les circuits sélectionnés avaient tous des caractéristiques particulières, certains engendrant des déplacements principalement sur des grandes artères et des autoroutes, d'autres comportant davantage de déplacements en milieu résidentiel, tandis que certains comportaient une répartition à peu près égale des deux types de déplacements. En général, la qualité de la chaussée sur les circuits empruntés était qualifiée de bonne (i.e. peu de cahots) à passable (i.e. certaines sections comportant plusieurs cahots). Les parcours résidentiels étaient généralement reconnus pour comporter davantage de manœuvres impliquant des virages que les parcours sur artères principales et autoroutes. Afin de représenter le plus fidèlement possible les conditions normales moyennes susceptibles d'être rencontrées, les essais portant sur chaque véhicule ont été effectués avec un chauffeur différent. Dépendant des circuits et de l'heure choisie pour effectuer le parcours, le nombre de passagers transportés pouvait varier considérablement d'un véhicule à l'autre.

### **3.2 Chenillettes de déneigement**

Il s'agit de véhicules à traction sur chenilles qui sont largement utilisés par les villes et les municipalités du Québec pour effectuer des opérations de déneigement et d'épandage d'abrasifs, principalement sur les trottoirs. Ces véhicules sont munis d'une lame à l'avant, leur donnant ainsi un rôle de chasse-neige, tout en permettant aussi l'ajout d'une trémie à l'arrière pour permettre l'épandage d'abrasifs. Les dimensions du véhicule et de la cabine sont établies de sorte à faciliter les manœuvres dans des espaces relativement restreints et en relation avec les exigences des utilisateurs. Le véhicule est généralement conçu sans système de suspension, bien qu'au fil des années sont apparus des prototypes comportant une cabine suspendue et/ou une suspension primaire.

Bien qu'il y ait eu au cours des années quelques marques et modèles différents de chenillettes de déneigement, le type de véhicule le plus couramment rencontré dans les municipalités du Québec est le Bombardier SW-48. À la fin de 1996, la Ville de Montréal comptait à elle seule une centaine de véhicules de ce type, tous des modèles SW-48, à l'exception d'un seul, un prototype de Bombardier comportant une cabine suspendue et datant de 1992. Le manufacturier de ces chenillettes s'affairait alors à sortir sous peu, un nouveau prototype (modèle SW-48DA) qui devait intégrer une suspension de cabine plus souple que le modèle de 1992 et une suspension primaire réalisée de par la façon d'installer et de faire fonctionner les roues sur les chenilles.

Le Service des travaux publics de la Ville de Montréal a agit comme partenaire dans cette étude en mettant à notre disposition au cours de l'hiver 1997 les véhicules requis. Il fut alors convenu de ne retenir que les véhicules SW-48 conventionnels les plus récents datant de 1988 et plus, tous équipés d'un moteur diesel, de chenilles en caoutchouc, de roues pleines et d'un mode de traction interne conformément aux exigences établies par la Ville de Montréal. La sélection des véhicules à utiliser dans le cadre des essais a dû être effectuée en fonction de la disponibilité des véhicules dans les différents secteurs de la Ville et des tâches spécifiques leur étant attribuées le jour des mesures. En effet, dépendant des conditions météorologiques et des besoins identifiés, ces véhicules peuvent être assignés à des tâches très diverses allant du simple déblayage des trottoirs, à l'épandage exclusif d'abrasifs, à des opérations liées au chargement et au transport de la neige. Dans tous ces cas, les différences dans les modes opératoires des véhicules (vitesse de roulement, charge transportée, qualité de la surface de roulement) sont susceptibles d'engendrer des différences non négligeables dans leurs caractéristiques vibratoires. En conséquence, il a été convenu de préciser et de faire la distinction entre les modes opératoires des véhicules selon les spécifications suivantes:

- Déblaiement après une précipitation majeure (supérieure à 10 cm);
- Déblaiement après une précipitation mineure (inférieure à 10 cm);
- Épandage d'abrasifs;
- Chargement; opérations en avant de la niveleuse et du chasse-neige;
- Chargement; opérations en arrière de la niveleuse et du chasse-neige;
- En transit libre, sans trémie;
- En transit libre, avec trémie.

Les véhicules ainsi que les modes opératoires impliqués lors des essais sont identifiés dans le tableau 2. Il s'agit de sept véhicules différents de type Bombardier SW-48 dont l'année de fabrication varie entre 1988 et 1992. En tout, 20 combinaisons de véhicule et de mode opératoire ont fait partie du programme d'essai. Sauf pour le mode opératoire en transit libre, chacune des combinaisons véhicule/mode opératoire a généralement nécessité que les mesures soient réalisées sur des journées différentes, avec un conducteur différent afin de se conformer à l'horaire quotidien de travail qui avait été établi. Dans chacun des cas, les mesures de vibrations ont été effectuées sur une période de temps variant entre 30 minutes et 2 heures. Pour les besoins des mesures, le conducteur recevait comme consigne de maintenir, dans la mesure du possible, un rythme de travail soutenu et régulier tout en respectant les exigences du travail à accomplir, en se conformant aux règles de sécurité et en roulant à la vitesse habituelle.

**TABLEAU 2: Identification des chenillettes de déneigement SW-48 et de leur mode opératoire respectif**

VÉHICULE	TRANSIT		DÉBLAIEMENT		ÉPANDAGE D'ABRASIFS	CHARGEMENT	
	Sans Trémie	Avec	Précipitation Majeure	Mineure		Avant	Arrière
88578	X	X			X	X	X
88584	X		X				
89508	X		X			X	
90460		X			X		
90462		X			X		
92248	X			X		X	
92254	X			X			X

### 3.3 Chariots élévateurs à conduite assise

Il s'agit de chariots élévateurs industriels utilisés à l'intérieur des usines pour transporter les produits ou autres matériaux d'un site vers un autre. Les déplacements sont effectués sur un plancher qui est généralement de béton. L'intérêt a porté dans cette étude sur les chariots élévateurs dont la capacité de charge est inférieure à cinq tonnes et qui possèdent des pneus à bandage plein dont le diamètre avant est supérieur à celui arrière. Les chariots considérés étaient dépourvus de suspension au niveau du châssis.

L'usine qui a agi en tant que partenaire dans cette partie de l'étude se spécialise dans la fabrication de cartons et de papiers à partir de matériaux de récupération. Les chariots élévateurs sont donc ainsi utilisés, soit pour transporter les matériaux de récupération ou les produits finis. Ces activités peuvent inclure le chargement ou le déchargement de remorques de camions et les chariots utilisés peuvent comporter une palette (fourche) ou encore des pinces adaptées pour le transport de rouleaux. L'usine dispose d'un parc de véhicules d'environ 25 chariots élévateurs, la grande majorité fonctionnant en mode d'énergie électrique. Leur capacité de charge varie entre deux et cinq tonnes, et leur année de fabrication entre 1960 et 1996. Pour les besoins de l'étude, on a voulu considérer seulement les véhicules dont l'année de fabrication était supérieure à 1987 (i.e. âge inférieur à 10 ans) et qui comptent pour environ 60 % du parc de chariots à l'usine. De ceux-ci, six différents modèles de chariots élévateurs ont pu être identifiés dont les caractéristiques apparaissent dans le tableau 3.

Les chariots identifiés dans le tableau 3 ont été intégrés dans le programme d'essais qui devaient être réalisés en s'insérant directement dans le cycle de production de l'usine. Les mesures ont été réalisées sur une période variant entre 30 et 45 minutes pendant laquelle les charges à manipuler étaient celles faisant partie des opérations courantes. Les conducteurs recevaient la

consigne de travailler à un rythme régulier et soutenu, tout en respectant les règles de sécurité et en roulant à la vitesse habituelle.

**TABLEAU 3: Caractéristiques des chariots élévateurs à conduite assise intégrés aux essais**

Chariot élévateur	Année	Type	Capacité de charge (tonnes)	Diamètre des roues (mm)		Diamètre moyen $D_m^*$ (mm)
				Avant	Arrière	
Hyster E 40 XL	1990	Fourche	2	457	406	432
Hyster E 50 XL	1992	Fourche	2.5	457	406	432
Toyota 2FBCA20	1988	Fourche	2	533	406	470
Hyster E 50 XL	1990	Pincés	2.5	457	406	432
Hyster E 100 XL	1993	Pincés	5	559	457	508
Hyster H65 XM	1996	Fourche	3.25	711	533	622

\* Diamètre moyen  $D_m = (D_{avant} + D_{arrière})/2$

### 3.4 Chariots élévateurs à station debout (transpalettes)

Il s'agit de chariots élévateurs couramment utilisés dans les centres de distribution et les entrepôts alimentaires pour transporter les produits d'un endroit à un autre, procéder à l'élévation ou à la descente de charges et charger les remorques des camions. La capacité de charge des véhicules ciblés est égale ou inférieure à 2.5 tonnes et le diamètre des roues avant est plus grand que celui arrière. Les roues sont à bandage plein et la conduite de ce type de véhicule est effectuée debout sur une plate-forme située directement au-dessus des roues arrière. L'opérateur est confiné à un espace relativement restreint et contrôle le véhicule à l'aide d'une pédale au plancher et de manettes installées à hauteur des mains. Les véhicules circulent le plus souvent sur des planchers de béton, mais aussi sur des rampes qui donnent accès aux remorques et dans les remorques elles-mêmes.

L'entreprise qui a agit en tant que partenaire dans cette partie de l'étude dispose d'une centaine de ces véhicules dont plus de 60 % sont des modèles de 1987 et plus récents. Il s'agit d'un centre de distribution de produits alimentaires dont les activités liées à la conduite de transpalettes consistent à entreposer les produits et à faire le chargement et le déchargement de camions remorques. Lors de la prise des mesures à l'été 1997, la sélection des véhicules a été effectuée en ne retenant que ceux dont l'année de fabrication était moins de 10 ans et en pondérant selon le nombre de chariots et de modèles disponibles pour tenir compte de la physionomie du parc existant. Le tableau 4 identifie les marques et modèles retenus, leur nombre ainsi que les dimensions des pneus des véhicules concernés.

**TABLEAU 4: Répartition du nombre et des modèles de chariots  
élevateurs à station debout intégrés aux essais**

MODÈLE	ANNÉE	CAPACITÉ DE CHARGE (tonnes)	# RETENUS	DIAMÈTRE DES ROUES (mm)		DIAMÈTRE MOYEN D <sub>m</sub> * (mm)
				AVANT	ARRIÈRE	
Crown	1992	2	3	343	229	286
Crown	1996	2	2	343	229	286
Clark	1990	2	1	457	229	343
Clark	1994	2	2	457	229	343
Clark	1992	2.5	1	457	229	343
Clark	1994	2.5	1	457	229	343

\* Diamètre moyen D<sub>m</sub>= (D<sub>avant</sub> + D<sub>arrière</sub>)/2

Au total, dix véhicules ont été retenus pour effectuer les mesures dans des conditions courantes d'utilisation (roulement à vide et en charge, chargement et déchargement), en s'insérant directement dans le cycle de production. Chaque véhicule était suivi sur une période d'au moins 30 minutes pendant laquelle on veillait à s'assurer de son déplacement constant. Les conducteurs de chaque véhicule recevaient comme consigne de maintenir un rythme de travail soutenu et régulier tout en roulant à la vitesse habituelle et en respectant les règles de sécurité.

## 4.0 MESURE DES VIBRATIONS

### 4.1 Métrologie

Les mesures de vibrations ont été réalisées en fixant des accéléromètres à des endroits spécifiques au plancher des différents types de véhicules pour permettre l'évaluation des différents modes vibratoires requis.

Pour les autobus urbains, les chenillettes de déneigement et les chariots élévateurs à conduite assise, un accéléromètre tri-axial est fixé à l'aide d'un aimant sur une partie rigide à proximité de la base de fixation du siège du conducteur. Les trois mesures résultantes, représentées par les numéros 1, 2 et 3 dans la figure 1a, représentent les modes vibratoires selon les trois directions suivantes:

- #1: Axe x: direction avant-arrière;
- #2: Axe y: direction latérale;
- #3: Axe z: direction verticale.

De plus, deux accéléromètres linéaires additionnels orientés en direction de l'axe z sont aussi fixés au plancher des véhicules, en les positionnant de sorte à pouvoir déterminer les accélérations angulaires de roulis et de tangage des véhicules. En se référant aux figures 1a et 1b, ceci est accompli en fixant l'accéléromètre représenté par le numéro 4 directement en ligne avec le numéro 3, mais en les séparant par une distance A, permettant ainsi la détermination des mouvements de roulis ( $\phi$ ). Le tangage ( $\theta$ ) est quant à lui déterminé en fixant un accéléromètre linéaire représenté par le numéro 5 directement en ligne avec le numéro 3, les deux étant séparés par une distance B (figure 1). Les accélérations angulaires de roulis ( $\ddot{\phi}$ ) et de tangage ( $\ddot{\theta}$ ) sont ainsi déterminées en effectuant les opérations suivantes sur les signaux vibratoires enregistrés dans le temps:

$$\ddot{\phi} = \frac{\ddot{z}_4 - \ddot{z}_3}{A} \quad (\text{rad/s}^2) \quad [1]$$

$$\ddot{\theta} = \frac{\ddot{z}_3 - \ddot{z}_5}{B} \quad (\text{rad/s}^2) \quad [2]$$

où  $\ddot{z}_3, \ddot{z}_4, \ddot{z}_5$  représentent les accélérations vibratoires verticales mesurées aux points 3, 4 et 5 respectivement. Il en résulte donc que pour les autobus urbains, les chenillettes de déneigement et les chariots élévateurs à conduite assise, les mesures sont réalisées en contrôlant simultanément cinq canaux de mesure représentés par les numéros 1 à 5 dans la figure 1.

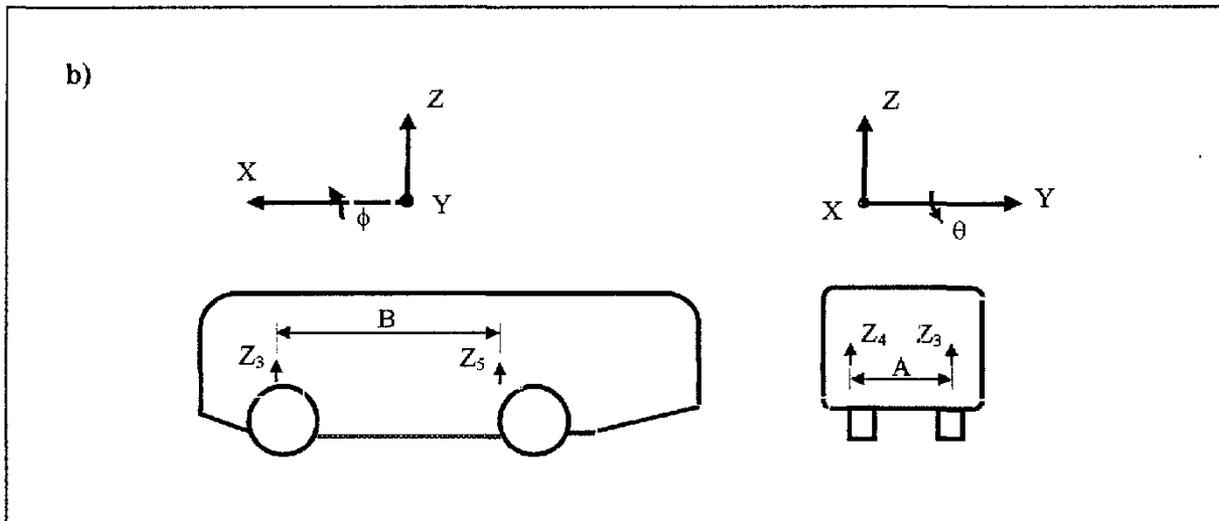
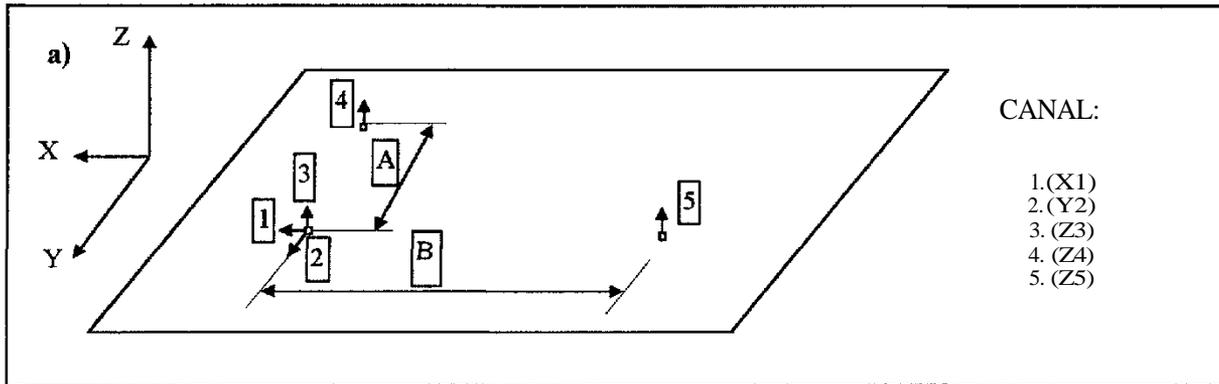


Figure 1: Identification de l'emplacement et de la direction des points de mesure, a) Vue de dessus; b) Vue de côté.

En ce qui concerne les chariots élévateurs à station debout, seules les accélérations linéaires selon les axes x, y et z sont déterminées, en fixant un accéléromètre tri-axial au plancher, à proximité des pieds du conducteur debout.

Les accéléromètres utilisés sont de type piézo-électrique avec une sensibilité de charge de  $1 \text{ pC/ms}^{-2}$ . Utilisés conjointement avec des amplificateurs de charge, la bande passante est fixée de 0.2 à 100 Hz, tandis que l'étendue de mesure, et en conséquence, la sensibilité en tension ( $\text{mV/ms}^{-2}$ ) est ajustée en prenant en compte l'amplitude crête anticipée pour le signal d'accélération vibratoire au point de mesure et dans la direction considérée.

Les signaux analogiques issus des trois ou cinq canaux de mesure sont enregistrés avec un enregistreur numérique multivoies pour analyse ultérieure en laboratoire. Les positions sur le ruban sont identifiées et correspondent aux temps pendant lesquels le véhicule est soumis à des manœuvres spéciales ou il s'immobilise.

## **4.2 Traitement et analyse des signaux vibratoires**

Les relevés accélérométriques sont d'abord inspectés visuellement sur un oscilloscope afin d'identifier toute anomalie qui aurait pu passer inaperçue lors de l'enregistrement des signaux (e.g. surcharges). À partir des relevés d'observation des temps d'arrêt des véhicules ou d'anomalies particulières notées lors de la prise des mesures, des portions de signaux vibratoires ou segments sont identifiés. Ceux-ci correspondent seulement à des sections de relevés accélérométriques pendant lesquels on avait pu observer que les véhicules étaient en mouvement et pour lesquels la qualité des signaux était jugée adéquate. Pour chaque type de véhicule et condition d'essai, un certain nombre de portions de relevés ou segments accélérométriques de durée égale sont identifiés pour caractériser l'environnement vibratoire attribuable au déplacement des véhicules. La durée de ces segments est fixée à 30 secondes pour les autobus urbains et à 1 minute pour les autres véhicules; ce choix étant fait en considérant les durées ininterrompues de déplacement, qu'il était possible d'obtenir pour des véhicules ayant à opérer dans des conditions réelles de travail et pour lesquels aucun contrôle ne pouvait être exercé sur la fréquence des arrêts, des freinages et des accélérations subites. Toute autre portion des relevés accélérométriques ne faisant pas partie des segments ainsi retenus n'est pas considérée dans les analyses subséquentes. De plus, pour chaque type de véhicule et condition d'essai, le nombre maximal de segments vibratoires pouvant être considéré est fixé à 30, ce qui équivaut à un maximum de 15 minutes de données par essai pour les autobus urbains et à 30 minutes par essai pour les autres véhicules.

L'élimination des temps d'arrêt des véhicules, jumelée à la consigne faite au conducteur, de maintenir un rythme de travail soutenu et régulier, suggèrent que la contrainte vibratoire résultante n'est pas réellement représentative d'une journée normale de travail qui comporte généralement des arrêts, des changements de cadence ou de tâches. Cependant, dans une optique de caractériser et de comparer l'environnement vibratoire de différents types de véhicules, et de servir éventuellement dans l'élaboration de codes d'essai de sièges à suspension spécifiques à certaines catégories de véhicule, le résultat est valable puisqu'il permet de définir un environnement vibratoire plus sévère qu'il ne l'est en réalité, constituant ainsi un majorant.

Le processus de numérisation et d'analyse des données est illustré dans la figure 2. Une fois les segments vibratoires identifiés, ceux-ci sont numérisés (format ASCII) en créant un fichier spécifique à chacun pour chaque axe de mesure. Ce processus fait appel au logiciel « Electronic Chart Recorder » (ECR) tel qu'indiqué dans la figure. Une fois numérisés, les fichiers sont importés dans le logiciel Dadisp où ils sont soumis aux traitements suivants:

#### **4.2.1 Calcul des accélérations angulaires de roulis et de tangage**

Des fichiers spécifiques se rapportant aux accélérations angulaires de roulis et de tangage sont créés à partir des fichiers comportant les vibrations verticales caractérisées par les #3, 4 et 5 dans la figure 1, et en appliquant le calcul défini par les équations 1 et 2.

#### **4.2.2 Détermination des spectres de la densité spectrale de puissance (DSP)**

À partir de chacun des segments vibratoires se rapportant à un véhicule et à une condition d'essai particulière, le spectre en fréquences est établi en termes de la densité spectrale de puissance (DSP) entre 0.375 et 100 Hz. Ceci est effectué pour chacun des modes vibratoires applicables ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $\phi$ ,  $\theta$ ). Sur la base des spectres de la DSP ainsi générés, les courbes enveloppes maximales, moyennes et minimales sont établies pour chaque véhicule, condition d'essai et mode vibratoire. Techniquement, les spectres de la DSP liés à chaque segment sont obtenus numériquement en fixant la gamme de fréquence à 100 Hz avec 800 lignes de résolution, soit une résolution en fréquence  $B$  de 0.125 Hz. Pour chaque segment dont la durée totale est de 30 ou de 60 s, le spectre de la DSP est obtenu en intégrant des blocs dont la durée est de 8 s, avec un taux de recouvrement fixé à 75%. Il en résulte donc que le nombre de moyennes effectuées pour établir les spectres de la DSP est de 12 pour chaque segment dont la durée est de 30 s, et de 27 pour chaque segment dont la durée est de 60 s. Puisque l'erreur

relative  $\epsilon_r$  sur le spectre de la DSP à basses fréquences est inversement proportionnelle à la racine carrée du produit BT (T correspondant à la durée d'intégration), et considérant que ce produit est équivalent au nombre de moyennes effectuées dans le cas du calcul numérique de la DSP, il en résulte que l'erreur relative sur les spectres de la DSP est inférieure à  $\pm 2.2$  dB et à  $\pm 1.5$  dB lorsque la durée des segments est de 30 s et de 60 s respectivement. Bien sûr, cette erreur (applicable principalement aux composantes en fréquences égales ou inférieures à 1 Hz) aurait pu être considérablement réduite en utilisant des segments dont la durée était plus longue, ce qui ne pouvait être obtenu pour des véhicules ayant à opérer dans des conditions réelles de travail.

#### **4.2.3 Détermination des spectres en bandes de fréquences de tiers d'octave**

À partir de chacun des segments vibratoires se rapportant à un véhicule et à une condition d'essai particulière, le spectre est établi en bandes de fréquences de tiers d'octave entre 0.5 et 80 Hz. Ceci est effectué pour chacun des modes vibratoires applicables (x, y, z,  $\phi$ ,  $\theta$ ). Sur la base des spectres en bandes de fréquences de tiers d'octave ainsi générés, les courbes enveloppes maximales, moyennes et minimales sont établies pour chaque véhicule, condition d'essai et mode vibratoire. La même procédure que celle décrite en 4.2.2 ci-dessus est utilisée pour le calcul en numérique des spectres en bandes de fréquences de tiers d'octave.

#### **4.2.4 Calcul des valeurs efficaces des accélérations pondérées et non pondérées**

À partir des spectres en bandes de fréquences de tiers d'octave représentant les courbes enveloppes maximales, moyennes et minimales pour chaque véhicule, condition d'essai et mode vibratoire, les valeurs efficaces correspondantes des accélérations globales entre 0.5 et 80 Hz sont calculées avec et sans pondération en fréquences. Cette gamme de fréquences est cependant réduite entre 0.5 et 40 Hz pour la définition des classes spectrales. Les valeurs efficaces des accélérations pondérées ( $a_{wx}$ ,  $a_{wy}$ ,  $a_{wz}$ ,  $a_{w\phi}$ ,  $a_{w\theta}$ ) sont calculées en appliquant les facteurs de pondération définis dans la norme ISO 2631-1(1997) et se rapportant aux réseaux de pondération en fréquence  $W_d$  pour les axes x et y,  $W_k$  pour l'axe z et  $W_e$  pour les mouvements angulaires  $\phi$  et  $\theta$ . Quant aux valeurs efficaces des accélérations non pondérées ( $a_x$ ,  $a_y$ ,  $a_z$ ,  $a_\phi$ ,  $a_\theta$ ), ces dernières sont calculées directement à partir des valeurs efficaces des accélérations rapportées à chacune des bandes de fréquence de tiers d'octave entre 0.5 et 80 Hz.

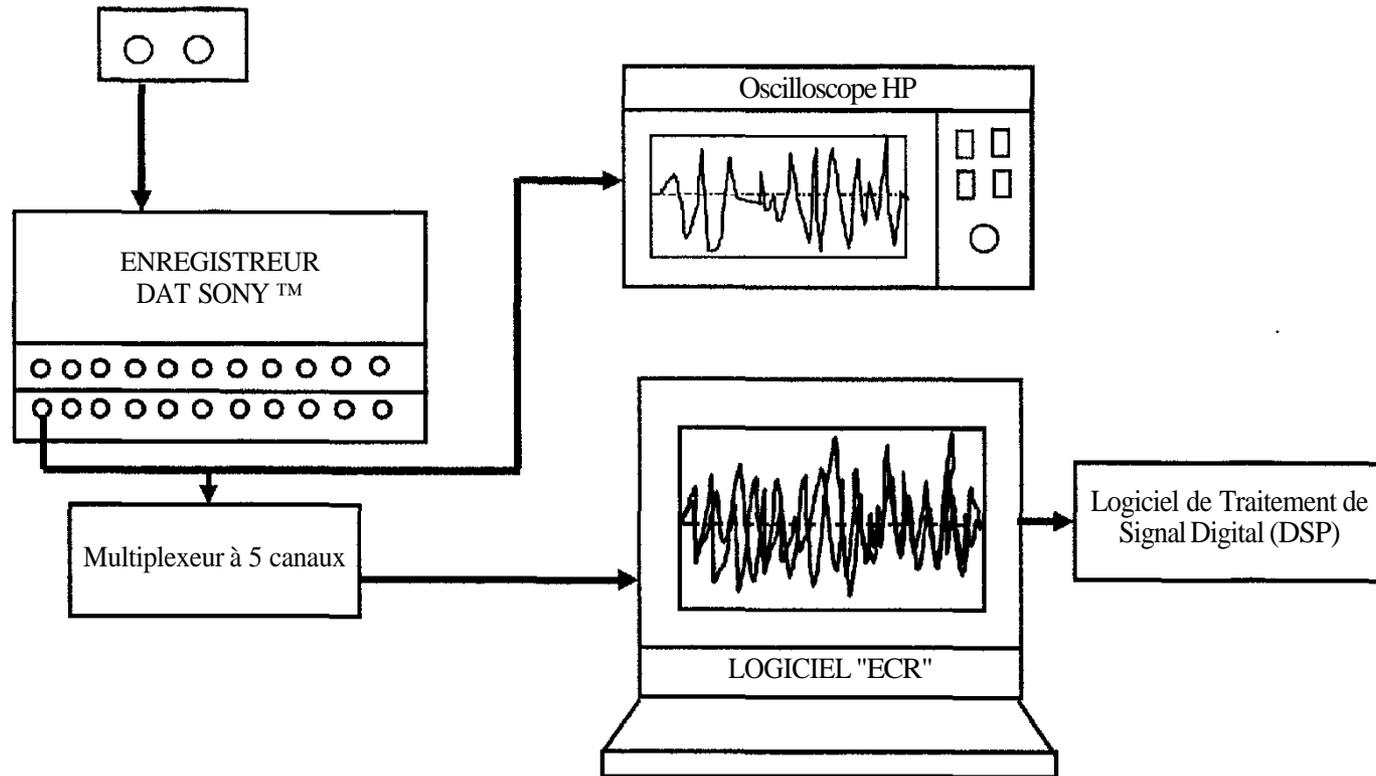


Figure 2: Schéma représentant les étapes de numérisation et d'analyse des signaux vibratoires.

#### 4.2.5 Détermination du facteur de crête

Par définition, le facteur de crête représente le rapport de la valeur instantanée crête pondérée à la valeur efficace des accélérations pondérées. Ainsi, la détermination de la valeur instantanée crête de l'accélération pondérée nécessite une analyse dans le domaine temporel, qui consiste à appliquer la pondération en fréquence directement au relevé accélérométrique et à rechercher la valeur crête du signal résultant.

Dans cette étude, la pondération du relevé accélérométrique est réalisée numériquement en appliquant les fonctions de transfert définies dans l'annexe A de la norme ISO 2631-1(1997) et qui représentent les équations de filtres numériques pour chacun des réseaux de pondération requis,  $W_d$ ,  $W_k$  et  $W_e$ . Comme il n'y a pas de définition précise de la façon dont la valeur instantanée crête de l'accélération pondérée doit être déterminée, il a été convenu de procéder au calcul du facteur de crête de deux façons. La première méthode établit la valeur crête comme étant la valeur maximale absolue de l'accélération pondérée de l'ensemble des segments. Dans la deuxième méthode, une approche statistique est préconisée selon laquelle la valeur instantanée crête des accélérations pondérées est déterminée en évaluant la fonction de densité de probabilité cumulée (FDPC) des accélérations instantanées pondérées des relevés accélérométriques. Un seuil de probabilité de 1 % est retenu pour caractériser la valeur instantanée crête des accélérations pondérées, signifiant ainsi que 99 % du temps, les valeurs instantanées des accélérations pondérées ont des amplitudes inférieures à la valeur crête ainsi déterminée.

Selon les deux méthodes, les accélérations instantanées crête pondérées sont déterminées pour chaque véhicule, condition d'essai et mode vibratoire en liant successivement tous les fichiers se rapportant aux segments retenus pour cette situation. Les facteurs de crête sont déterminés en divisant les valeurs de l'accélération crête pondérée ainsi déterminées (sur la base des fonctions de densité de probabilité cumulée (FPDC) ou de la valeur instantanée maximale absolue) par les valeurs de l'accélération efficace pondérée calculées selon la méthode décrite en 4.2.4.

## 5.0 RÉSULTATS

### 5.1 Caractéristiques spectrales des différents véhicules

#### 5.1.1 Autobus urbains

Les figures 3a à 3e illustrent en exemple, pour un autobus NewLook et un circuit donné, la dispersion des densités spectrales de puissance des accélérations établies à partir de chacun des segments de relevés accélérométriques retenus dont la durée est de 30 secondes, et ce, pour chacune des directions de mesure  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $\phi$  et  $\theta$  respectivement. Cette opération a été répétée pour chacun des autobus identifiés dans le tableau 1 (à l'exception d'un seul pour lequel une panne s'est produite lors des mesures) et des circuits retenus, donnant ainsi 38 combinaisons circuit-autobus. Pour chacune des combinaisons circuit-autobus, le nombre de segments retenus a varié entre 20 et 30 (10 à 15 minutes de données), à l'exception d'une seule combinaison pour laquelle le nombre de segments a été de seulement 9 (4.5 minutes). Au total, le nombre de segments définis par axe de mesure pour l'ensemble des données a été de 1 063, portant ce nombre à 5 315 pour l'ensemble des cinq directions de mesure.

La dispersion des DSP des accélérations illustrée dans les figures 3a à 3e démontre la variation importante dans le temps des caractéristiques spectrales des vibrations, mise en évidence à partir de segments consécutifs de relevés accélérométriques dont la durée est de 30 secondes. Évidemment, plus les segments sont de courte durée, plus les spectres correspondants sont susceptibles de présenter des variations importantes d'un segment à l'autre. Bien qu'il en soit ainsi, les variations semblent davantage porter sur l'amplitude que sur le contenu en fréquence lui-même. En effet, dans l'ensemble, les segments montrent généralement des pics dominants d'énergie apparaissant aux mêmes fréquences, ce qui contraste avec l'amplitude de ces pics qui semble varier beaucoup d'un segment à un autre.

Les figures 4a à 4e présentent en exemple, les courbes enveloppes et moyennes de la densité spectrale de puissance des accélérations se rapportant à la même combinaison circuit-autobus que celle pour laquelle les figures 3a à 3e sont présentées. On considère ainsi que la moyenne des courbes de la DSP établies sur des périodes de 30 secondes constitue une approximation valable du spectre de la DSP qui aurait été obtenu si cette fonction avait été évaluée en liant ensemble tous les segments retenus. Le spectre résultant ainsi obtenu est donc basé sur plusieurs minutes de données (généralement 10 à 15 minutes), donc plus susceptible de bien représenter les caractéristiques moyennes de l'environnement vibratoire propre à la combinaison

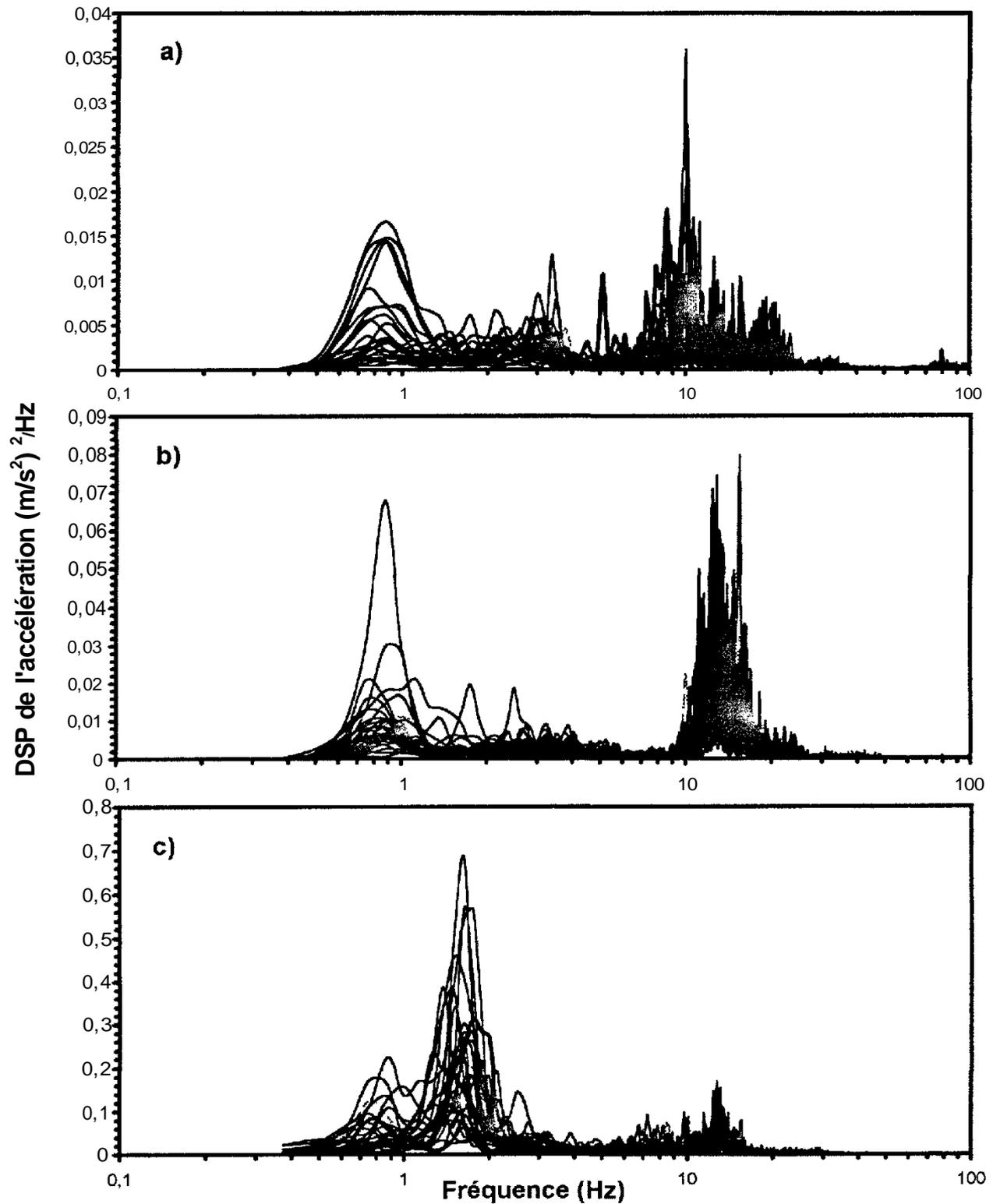


Figure 3: Dispersion dans le temps des spectres de la DSP des vibrations pour un autobus NewLook évoluant sur un des circuits (route 5-5). Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) latéral (y); c) vertical (z); d) de roulis ( $\phi$ ); et e) de tangage ( $\theta$ ).

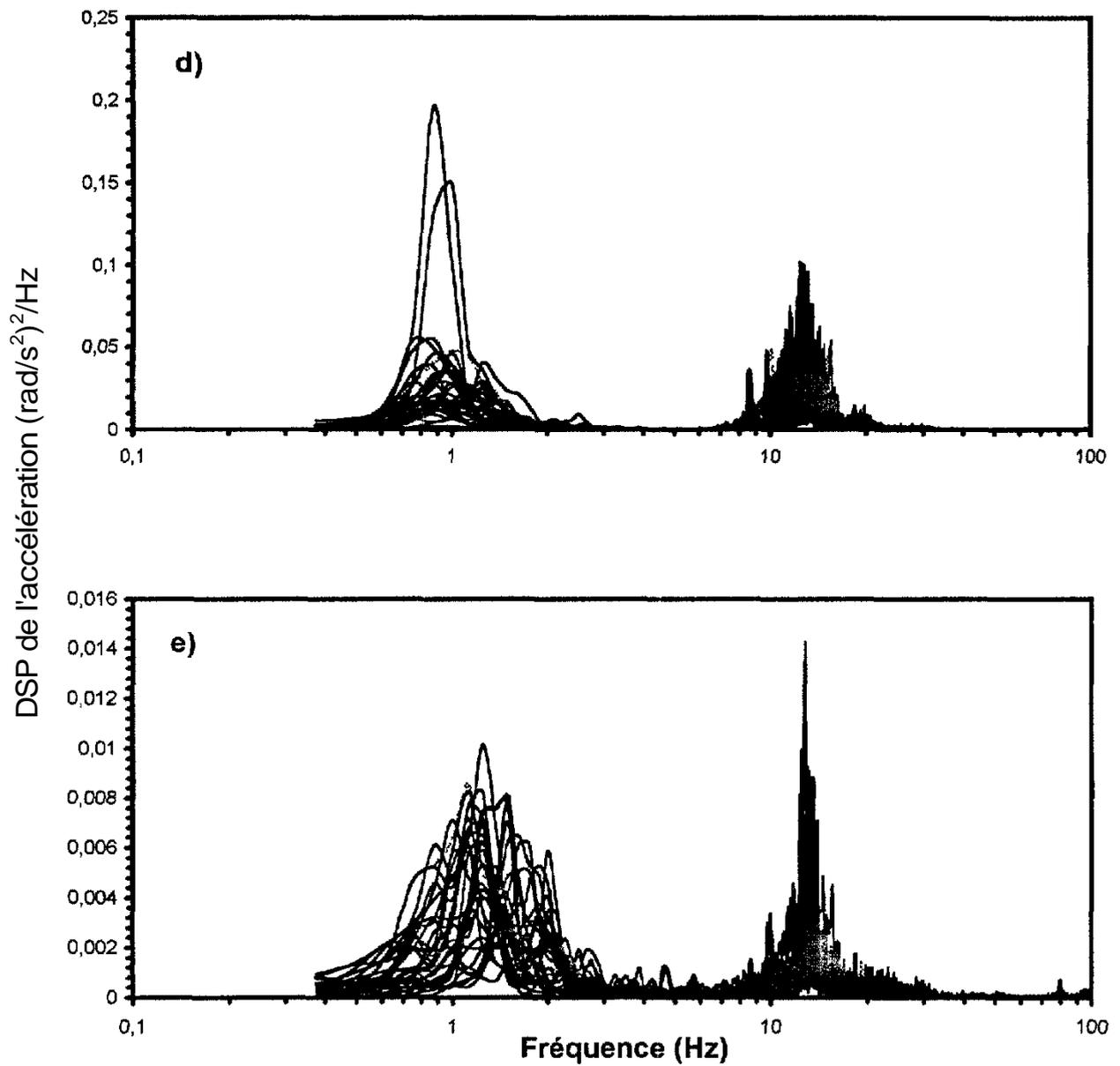


Figure 3 : Dispersion dans le temps des spectres de la DSP des vibrations pour un autobus NewLook évoluant sur un des circuits (route 5-5). Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) latéral (y); c) vertical (z); d) de roulis ( $\phi$ ); et e) de tangage ( $\theta$ ).

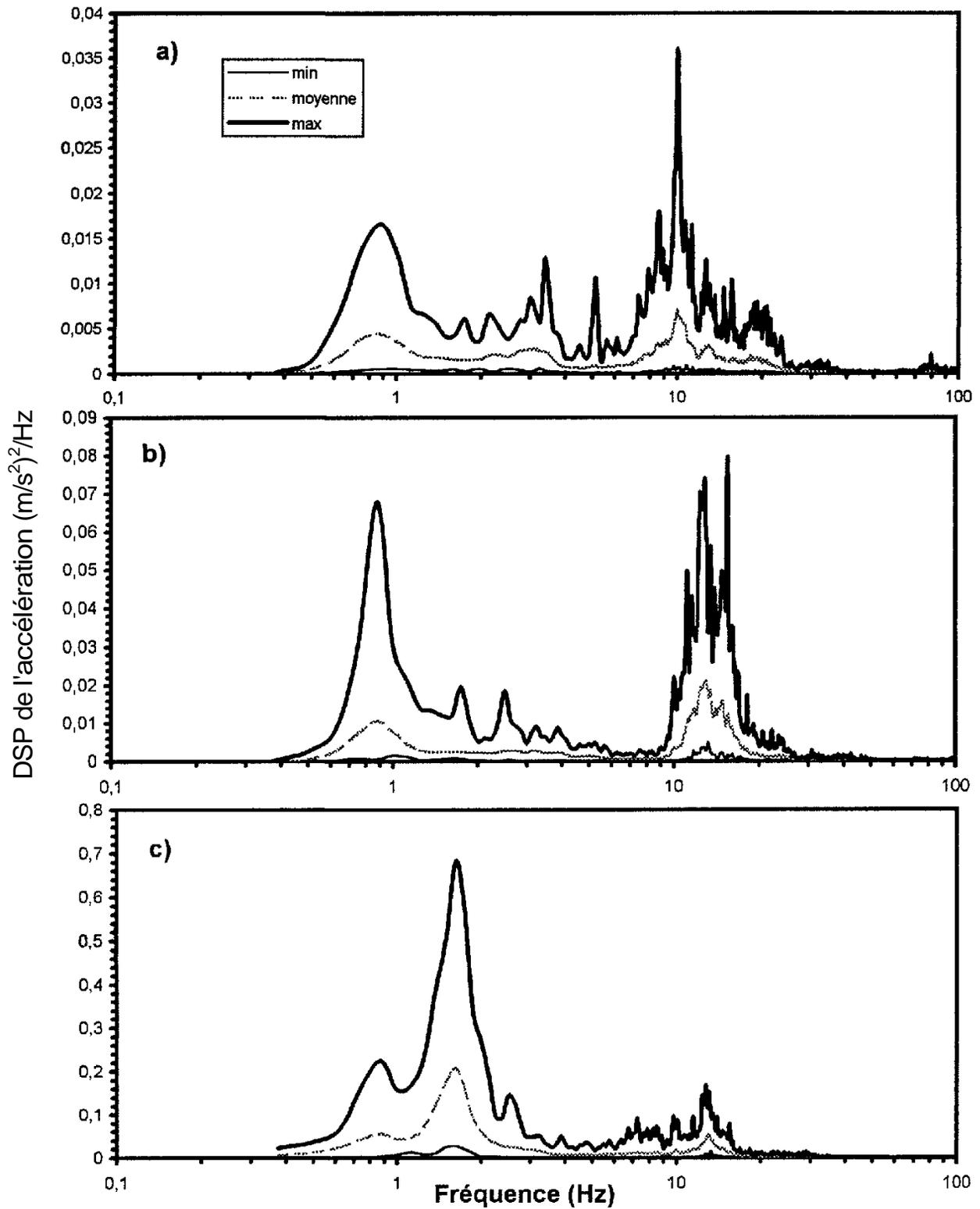


Figure 4 : Courbes enveloppes et moyenne des spectres de la DSP des vibrations pour un autobus NewLook évoluant sur un des circuits (route 5-5). Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) latéral (y); c) vertical (z); d) de roulis ( $\phi$ ); et e) de tangage ( $\theta$ ).

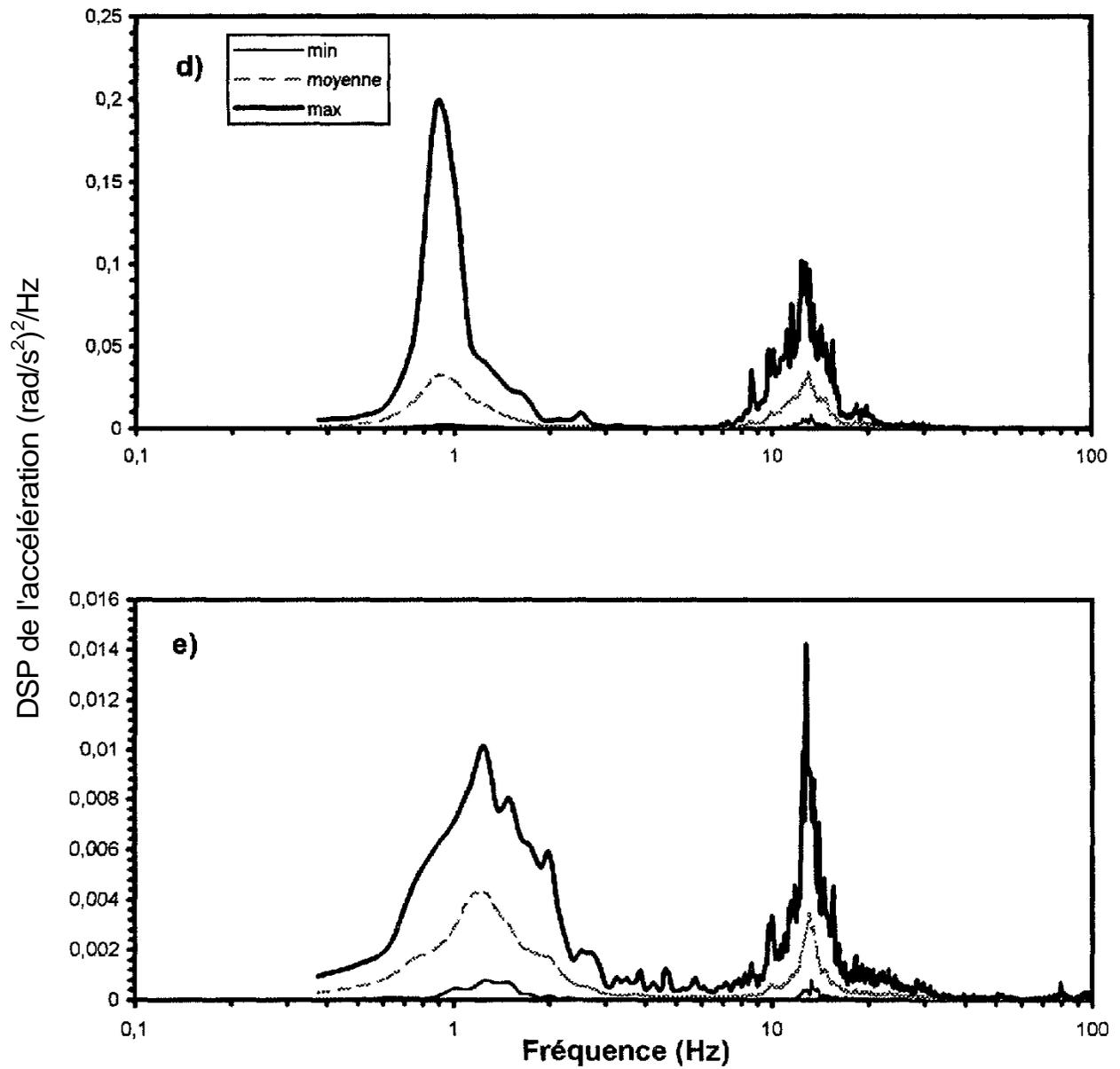


Figure 4: Courbes enveloppes et moyennes des spectres de la DSP des vibrations pour un autobus NewLook évoluant sur un des circuits (route 5-5). Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) latéral (y); c) vertical (z); d) de roulis ( $\phi$ ); et e) de tangage ( $\theta$ ).

circuit-autobus considérée. Quant aux courbes enveloppes, représentant la dispersion des valeurs de la DSP par rapport à la moyenne, celles-ci peuvent être considérées comme représentant les valeurs extrêmes de toutes celles qui auraient pu raisonnablement définir ces enveloppes si la durée des segments retenus avait été plus longue.

Les valeurs efficaces de l'accélération pondérée et non pondérée entre 0.5 et 80 Hz se rapportant au spectre moyen de la DSP établi pour chaque combinaison circuit-autobus, apparaissent dans les tableaux A.1 à A.5 de l'annexe A pour chacune des directions de mesure  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $\phi$  et  $\theta$  respectivement. Ces valeurs sont obtenues d'abord en représentant les spectres en bandes de fréquence de tiers d'octave pour chacun des segments retenus, puis en établissant la moyenne sur l'ensemble des segments à chacune des bandes de tiers d'octave et en calculant les valeurs efficaces de l'accélération pondérée et non pondérée selon la méthode décrite en 4.2.4.

Quant au calcul du facteur de crête, les deux méthodes décrites en 4.2.5 sont appliquées pour déterminer les valeurs de l'accélération crête pondérée en liant successivement tous les segments retenus pour chaque combinaison circuit-autobus et chaque direction de mesure. La valeur instantanée crête pondérée est ainsi obtenue sur la base de la valeur maximale absolue de l'accélération pondérée ( $f_c$  absolu) ou encore sur la base des fonctions de la densité de probabilité cumulée (FDPC) ( $f_c$  99<sup>e</sup> percentile). À titre d'exemple, les fonctions de la densité de probabilité cumulée sont présentées dans les figures 5a à 5e, pour chacune des directions de mesure  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $\phi$  et  $\theta$  respectivement, et pour la même combinaison circuit-autobus que celle pour laquelle les figures 3a à 3e sont présentées. Les facteurs de crête correspondants (99<sup>e</sup> perc.) ainsi que les valeurs absolues apparaissent dans les tableaux A.1 à A.5 de l'annexe A pour chaque combinaison circuit-autobus et chacune des directions de mesure. Les valeurs  $f_c$  99<sup>e</sup> percentile sont obtenues en divisant la valeur de l'accélération crête pondérée correspondant à un seuil de probabilité de 1 % de la FDPC par la valeur efficace de l'accélération pondérée. Quant au  $f_c$  absolu, les valeurs de facteurs de crête sont calculées sur la base de l'accélération pondérée maximale déterminée sur l'ensemble des segments.

Pour fins de comparaison et de validation de la méthode qui consiste à appliquer la pondération en fréquence directement au relevé accélérométrique pour rechercher la valeur crête du signal résultant, cette approche est aussi utilisée pour déterminer la valeur efficace de l'accélération pondérée par intégration directe du signal vibratoire pondéré dans le domaine temporel. En parallèle, la valeur efficace de l'accélération pondérée du même signal est évaluée dans le domaine fréquentiel en évaluant le spectre en fréquence en bandes de tiers d'octave, en appliquant les facteurs de pondération spécifiques à chacune des bandes de fréquence et en

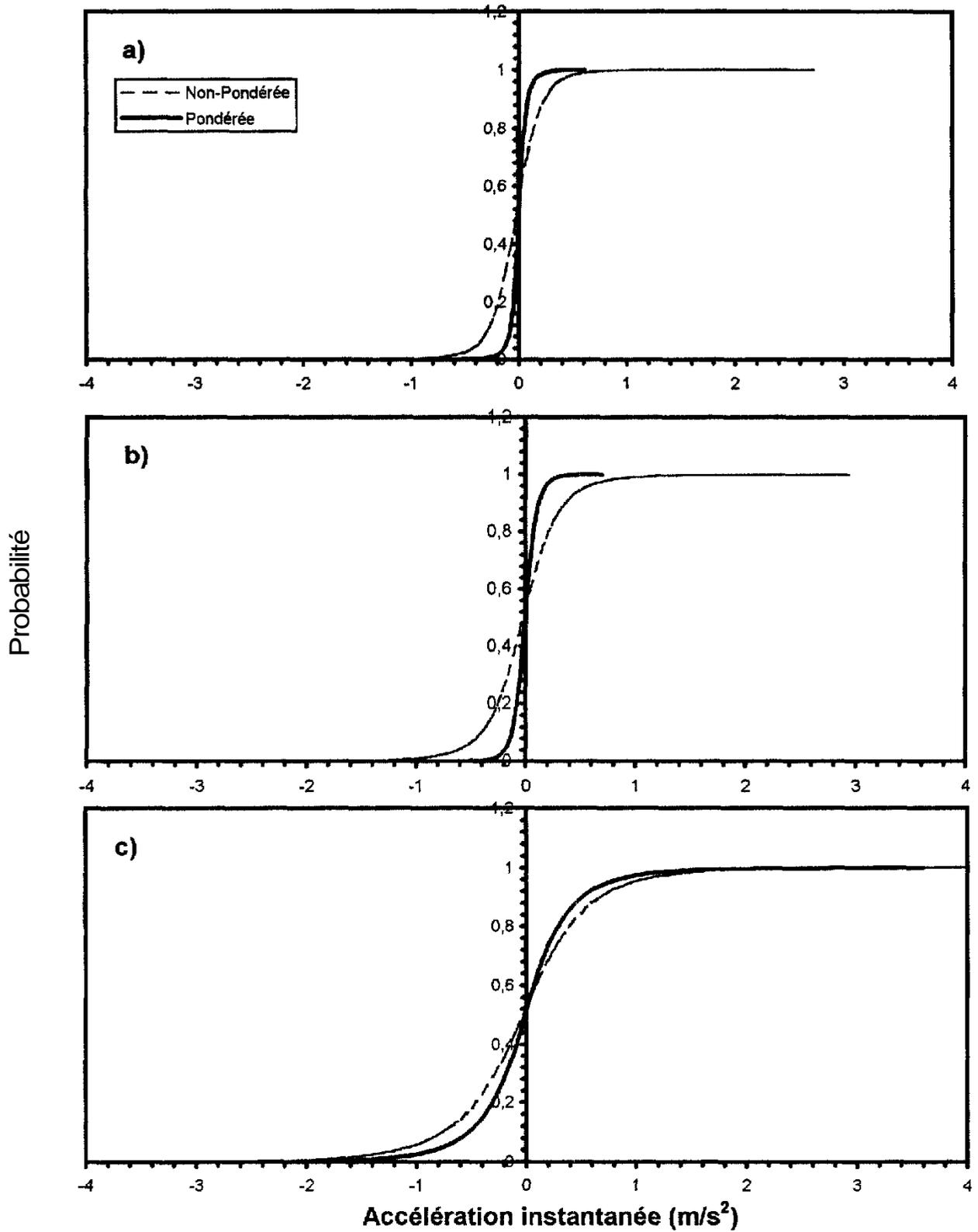


Figure 5: Fonctions de la densité de probabilité cumulée des accélérations instantanées pondérées et non pondérées pour un autobus NewLook évoluant sur un des circuits (route 5-5). Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) latéral (y); c) vertical (z); d) de roulis ( $\phi$ ); et e) de tangage ( $\theta$ ).

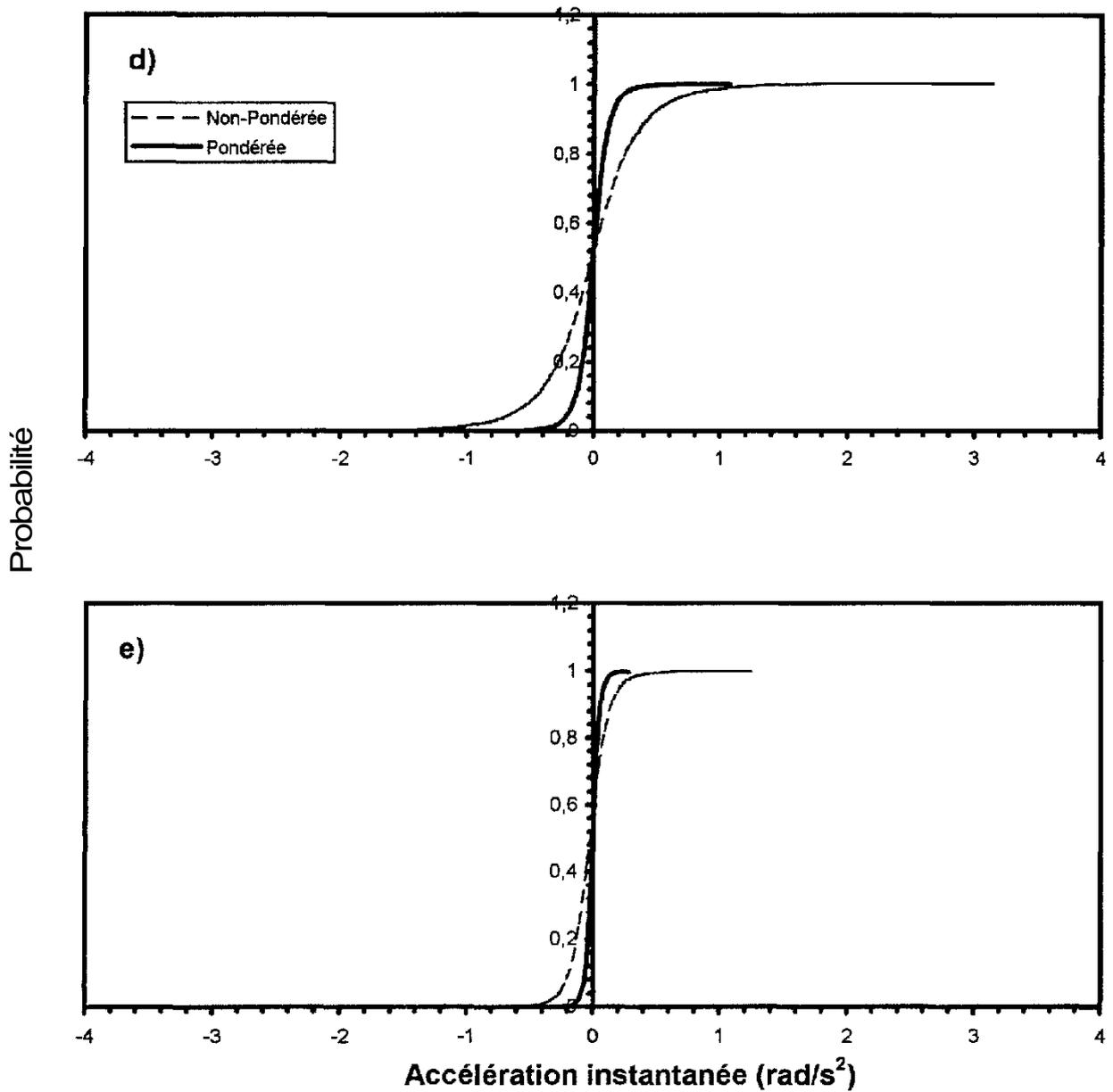


Figure 5: Fonctions de la densité de probabilité cumulée des accélérations instantanées pondérées et non pondérées pour un autobus NewLook évoluant sur un des circuits (route 5-5). Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) latéral (y); c) vertical (z); d) de roulis ( $\phi$ ); et e) detangage ( $\theta$ ).

calculant la somme énergétique de chacune des composantes entre 0.5 et 80 Hz. Les résultats présentés dans le tableau 5 démontrent que les deux méthodes de calcul mènent à des résultats identiques, indiquant par le fait même, que l'application de la pondération en fréquence dans le domaine temporel semble adéquate. De plus, ces résultats suggèrent que les spectres en fréquence moyens, même s'ils sont établis sur la base de segments dont la durée n'est que de 30 s, procurent une estimation suffisamment précise des accélérations efficaces déterminées en intégrant sur une plus longue période de temps comprenant l'ensemble des segments.

**TABLEAU 5: Comparaison des valeurs efficaces de l'accélération pondérée et non pondérée (0.5-80 Hz) telles que déterminées dans les domaines du temps et des fréquences**

AXE DE MESURE	ACCÉLÉRATION NON PONDÉRÉE ( $\text{ms}^{-2}$ ou $\text{rads}^{-2}$ )		ACCÉLÉRATION PONDÉRÉE ( $\text{ms}^{-2}$ ou $\text{rads}^{-2}$ )	
	Temporel	Fréquentiel	Temporel	Fréquentiel
x	0.26	0.24	0.10	0.10
y	0.31	0.32	0.10	0.10
<b>z</b>	0.62	0.64	0.45	0.46
$\phi$	0.38	0.39	0.13	0.13
$\theta$	0.13	0.13	0.06	0.06

### 5.1.2 Chenillettes de déneigement

Les figures 6a à 6e illustrent en exemple, pour une chenillette de déneigement et un mode opératoire (i.e. en transit, sans trémie), la dispersion des densités spectrales de puissance des accélérations établies à partir de chacun des segments de relevés accélérométriques retenus dont la durée est de 60 secondes, et ce, pour chacune des directions de mesure x, y, z,  $\phi$  et  $\theta$  respectivement. Cette opération a été répétée pour chacune des 20 combinaisons de chenillettes de déneigement/mode opératoire identifiées dans le tableau 2. Pour chacune de ces combinaisons, le nombre de segments retenus a varié entre 1 et 22 (1 à 22 minutes de données). Au total, le nombre de segments définis par axe de mesure pour l'ensemble des données a été de 172, portant ce nombre à 860 pour l'ensemble des cinq directions de mesure.

Tout comme pour les autobus urbains, la dispersion de la DSP des accélérations illustrée dans les figures 6a à 6e entre 0.375 et 100 Hz démontre la variation importante dans le temps des caractéristiques spectrales des vibrations dans les chenillettes de déneigement, mise en évidence à partir de segments consécutifs de relevés accélérométriques dont la durée est de 60 secondes. Bien qu'il en soit ainsi, les variations semblent davantage porter sur l'amplitude que sur le contenu en fréquence lui-même. En effet, dans l'ensemble, les segments montrent

généralement des pics dominants d'énergie apparaissant aux mêmes fréquences, ce qui contraste avec l'amplitude de ces pics qui semble varier beaucoup d'un segment à un autre. Par ailleurs, les spectres applicables aux chenillettes de déneigement se distinguent par la présence d'une quantité importante d'énergie à des fréquences comprises entre 10 et 80 Hz qui ne semble pas être spécifiquement liée à des modes vibratoires spécifiques à ces véhicules, mais qui proviendrait plutôt de la mécanique du véhicule et des chenilles.

Les figures 7a à 7e présentent les courbes enveloppes et moyennes de la densité spectrale de puissance des accélérations se rapportant à la chenillette de déneigement et au mode opératoire pour lesquels les figures 6a à 6e sont présentées. On considère ainsi que la moyenne des courbes de la DSP établies sur des périodes de une minute constitue une approximation valable du spectre de la DSP qui aurait été obtenu si cette fonction avait été évaluée en liant ensemble tous les segments retenus. Sauf exception, le spectre résultant ainsi obtenu est donc basé sur plusieurs minutes de données (atteignant 22 minutes), donc plus susceptible de bien représenter les caractéristiques moyennes de l'environnement vibratoire propre à la combinaison de chenillette de déneigement et de mode opératoire considéré. Quant aux courbes enveloppes, représentant la dispersion des valeurs de la DSP par rapport à la moyenne, celles-ci peuvent être considérées comme représentant les valeurs extrêmes de toutes celles qui auraient pu définir ces enveloppes si la durée des segments retenus avait été plus longue que 60s.

Les valeurs efficaces de l'accélération pondérée et non pondérée entre 0.5 et 80 Hz se rapportant au spectre moyen de la DSP établi pour chaque combinaison de chenillette de déneigement et de mode opératoire apparaissent dans les tableaux B.1 à B.5 de l'annexe B pour chacune des directions de mesure  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $\phi$  et  $\theta$  respectivement. Ces valeurs sont obtenues, d'abord en représentant les spectres en bandes de fréquence de tiers d'octave pour chacun des segments retenus, puis en établissant la moyenne sur l'ensemble des segments à chacune des bandes de tiers d'octave et en calculant les valeurs efficaces de l'accélération pondérée et non pondérée entre 0.5 et 80 Hz selon la méthode décrite en 4.2.4. En raison de l'énergie vibratoire importante mesurée au-delà de 10 Hz, les valeurs de l'accélération efficace non pondérée entre 0.5 et 80 Hz peuvent apparaître comme étant particulièrement élevées. L'application des courbes de pondération en fréquence a cependant comme effet de diminuer considérablement l'apport que cette énergie vibratoire peut avoir sur la valeur efficace de l'accélération pondérée entre 0.5 et 80 Hz, en raison de l'atténuation importante apportée par le corps humain à des fréquences excédant 10 Hz.

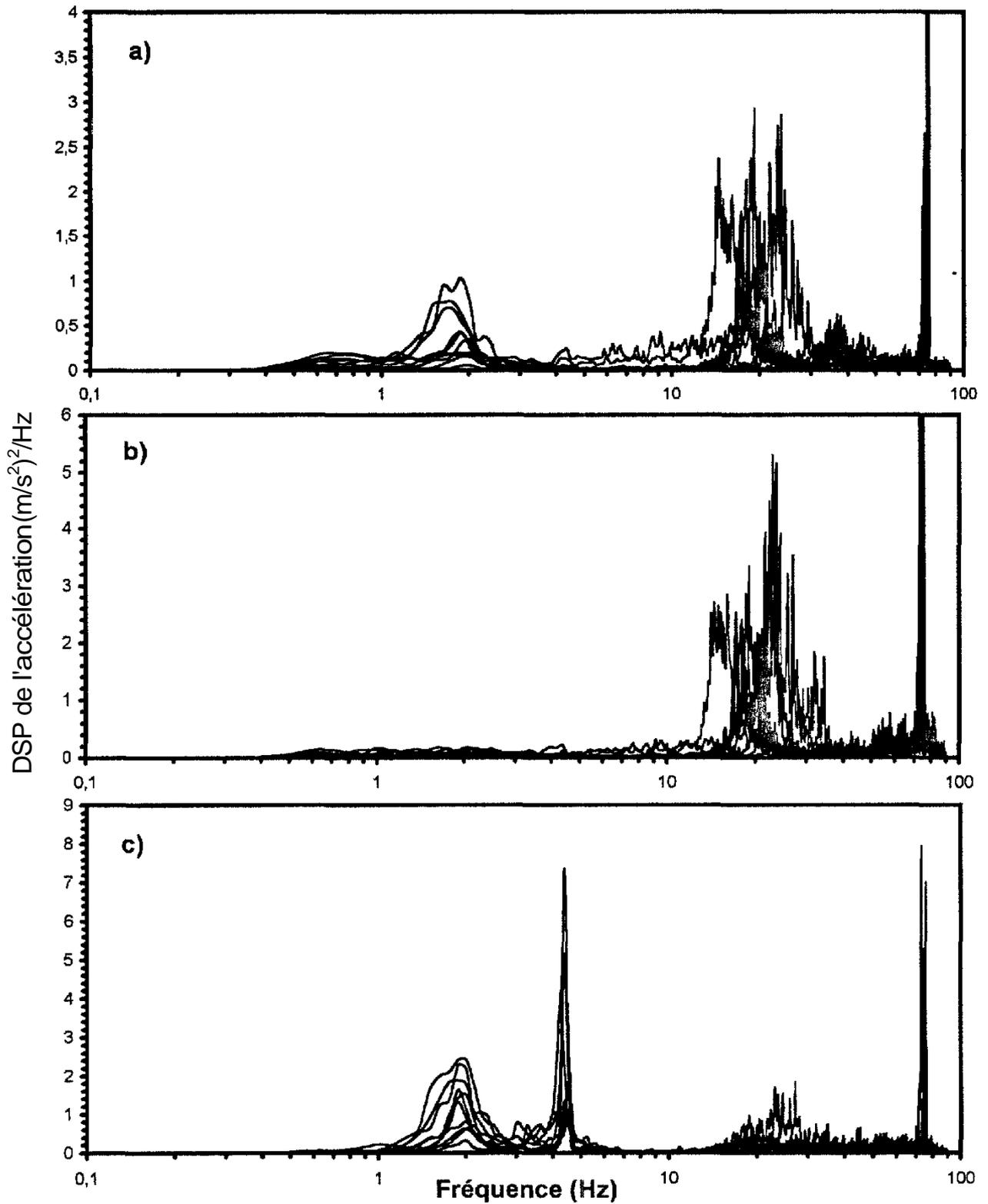


Figure 6: Dispersion dans le temps des spectres de la DSP des vibrations pour une chenillette de déneigement (#92248) se déplaçant sans trémie. Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) latéral (y); c) vertical (z); d) de roulis ( $\phi$ ); et e) de tangage ( $\theta$ ).

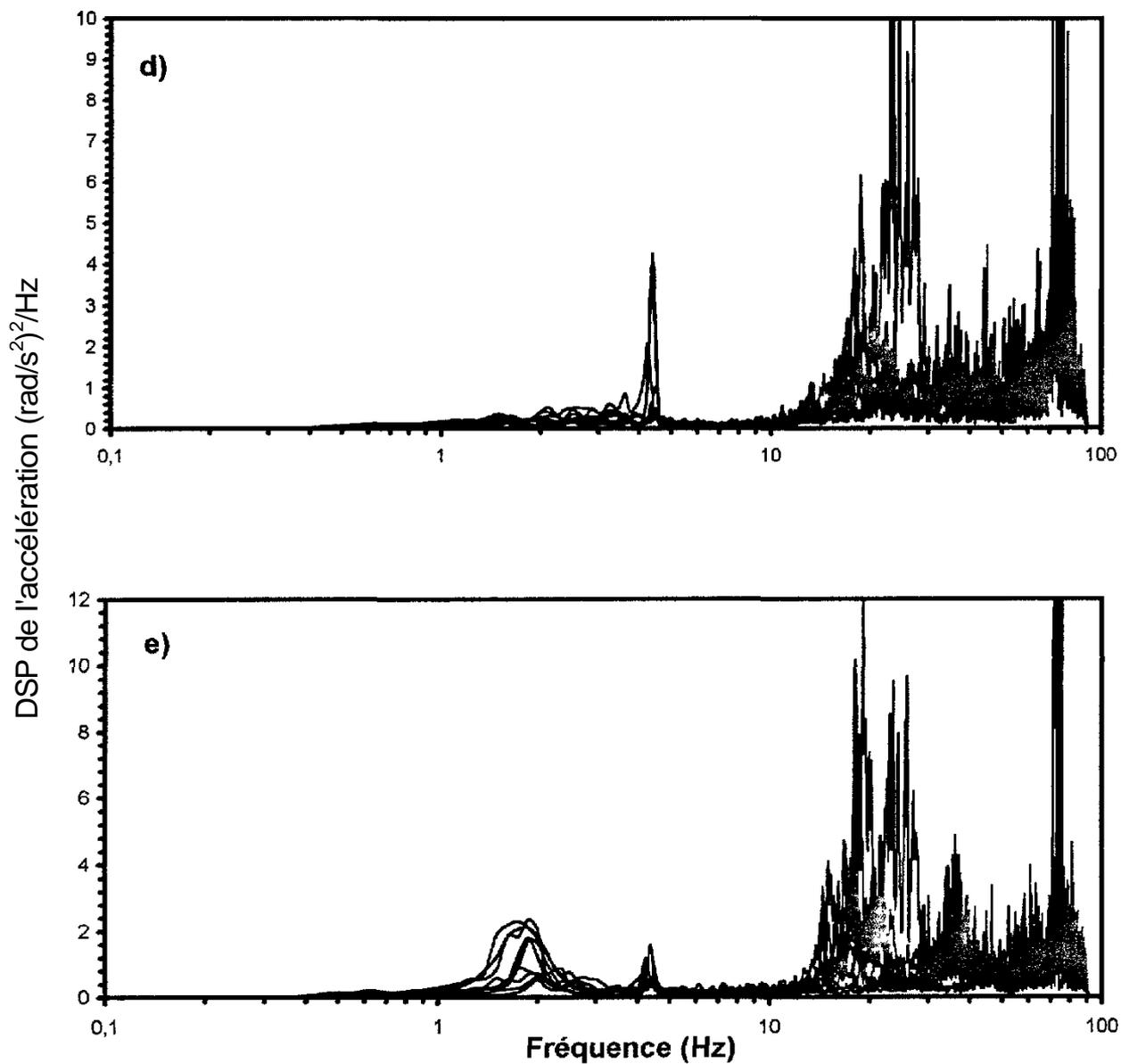


Figure 6 : Dispersion dans le temps des spectres de la DSP des vibrations pour une chenillette de déneigement (#92248) se déplaçant sans trémie. Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) latéral (y); c) vertical (z); d) de roulis ( $\phi$ ); et e) de tangage ( $\theta$ ).

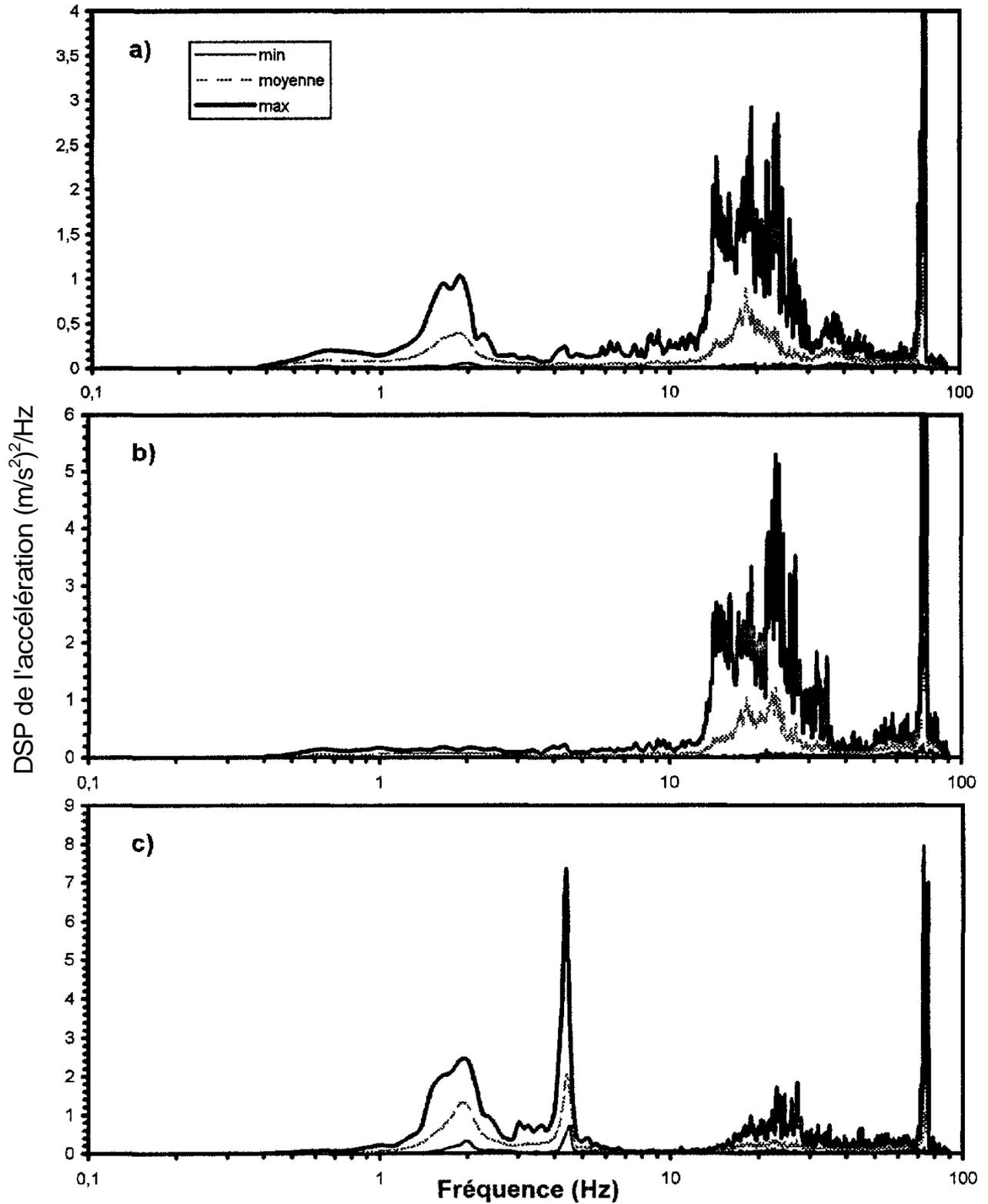


Figure 7: Courbes enveloppes et moyenne des spectres de la DSP des vibrations pour une chenillette de déneigement (#92248) se déplaçant sans trémie. Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) latéral (y); c) vertical (z); d) de roulis ( $\phi$ ); et e) de tangage ( $\theta$ ).

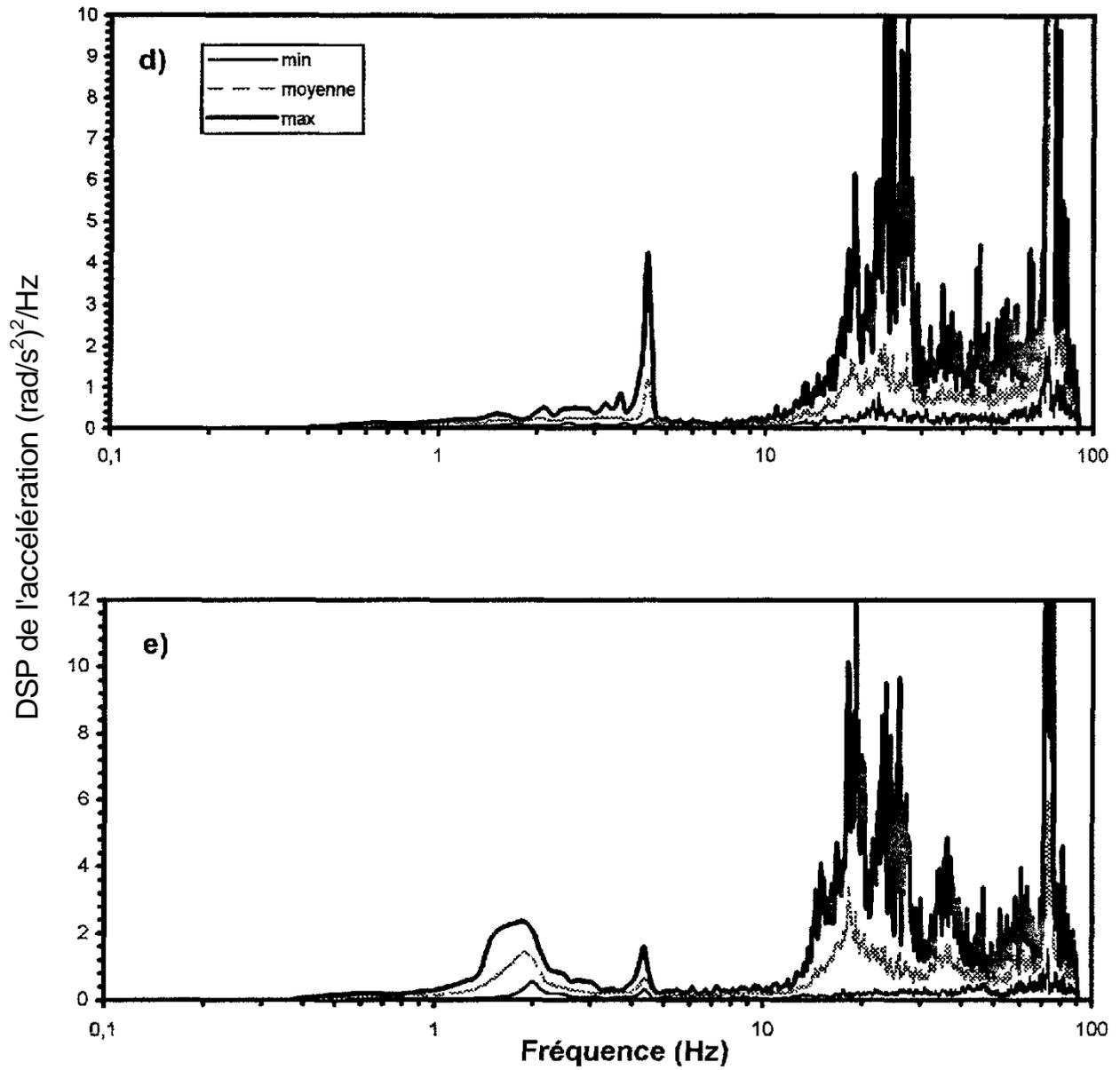


Figure 7: Courbes enveloppes et moyenne des spectres de la DSP des vibrations pour une chenillette de déneigement (#92248) se déplaçant sans trémie. Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) latéral (y); c) vertical (z); d) de roulis ( $\phi$ ); et e) de tangage ( $\theta$ ).

Quant au calcul du facteur de crête, les méthodes décrites en 4.2.5 sont appliquées pour déterminer les valeurs de l'accélération crête pondérée en liant successivement tous les segments retenus pour chaque combinaison de chenillette de déneigement et de mode opératoire et chaque direction de mesure. La valeur instantanée crête pondérée est ainsi obtenue sur la base de la valeur maximale absolue de l'accélération pondérée ( $f_c$  absolu) ou encore sur la base des fonctions de la densité de probabilité cumulée (FDPC) ( $f_c$  99<sup>e</sup> percentile). À titre d'exemple, ces fonctions sont présentées dans les figures 8a à 8e pour chacune des directions de mesure x, y, z,  $\phi$  et  $\theta$  respectivement, et pour la même combinaison de chenillettes de déneigement et de mode opératoire que celle pour laquelle les figures 6a à 6e sont présentées. Les valeurs correspondantes des facteurs de crête apparaissent dans les tableaux B.1 à B.5 de l'annexe B pour chaque combinaison de chenillettes de déneigement et de mode opératoire et chacune des directions de mesure. Les valeurs  $f_c$  99<sup>e</sup> percentile sont obtenues en divisant la valeur de l'accélération crête pondérée correspondant à un seuil de probabilité de 1 % de la FDPC par la valeur efficace de l'accélération pondérée. Quant au  $f_c$  absolu, les valeurs de facteurs de crête sont calculées sur la base de l'accélération pondérée maximale déterminée sur l'ensemble des segments.

### 5.1.3 Chariots élévateurs à conduite assise

Les figures 9a à 9e illustrent en exemple, pour un chariot élévateur dont la capacité de charge est de 2.5 tonnes (Hyster E50XL), la dispersion des densités spectrales de puissance des accélérations établies à partir de chacun des segments de relevés accélérométriques retenus dont la durée est de 60 secondes, et ce, pour chacune des directions de mesure x, y, z,  $\phi$  et  $\theta$  respectivement. Cette opération a été répétée pour chacun des six chariots élévateurs identifiés dans le tableau 3. Pour chacun des véhicules considérés, le nombre de segments retenus a varié entre 8 et 25 (8 à 25 minutes de données). Au total, le nombre de segments définis par axe de mesure pour l'ensemble des données a été de 115, portant ce nombre à 575 pour l'ensemble des cinq directions de mesure.

Tout comme pour les autobus urbains et les chenillettes de déneigement, la dispersion de la DSP des accélérations illustrée dans les figures 9a à 9e entre 0.375 et 100 Hz démontre la variation importante dans le temps des caractéristiques spectrales des vibrations dans les chariots élévateurs à conduite assise, mise en évidence à partir de segments consécutifs de relevés accélérométriques dont la durée est de 60 secondes. Bien qu'il en soit ainsi, les variations semblent davantage porter sur l'amplitude que sur le contenu en fréquence lui-même. En effet, dans l'ensemble, les segments montrent généralement des pics dominants d'énergie apparaissant aux mêmes fréquences, ce qui contraste avec l'amplitude de ces pics qui semble varier beaucoup d'un segment à un autre.

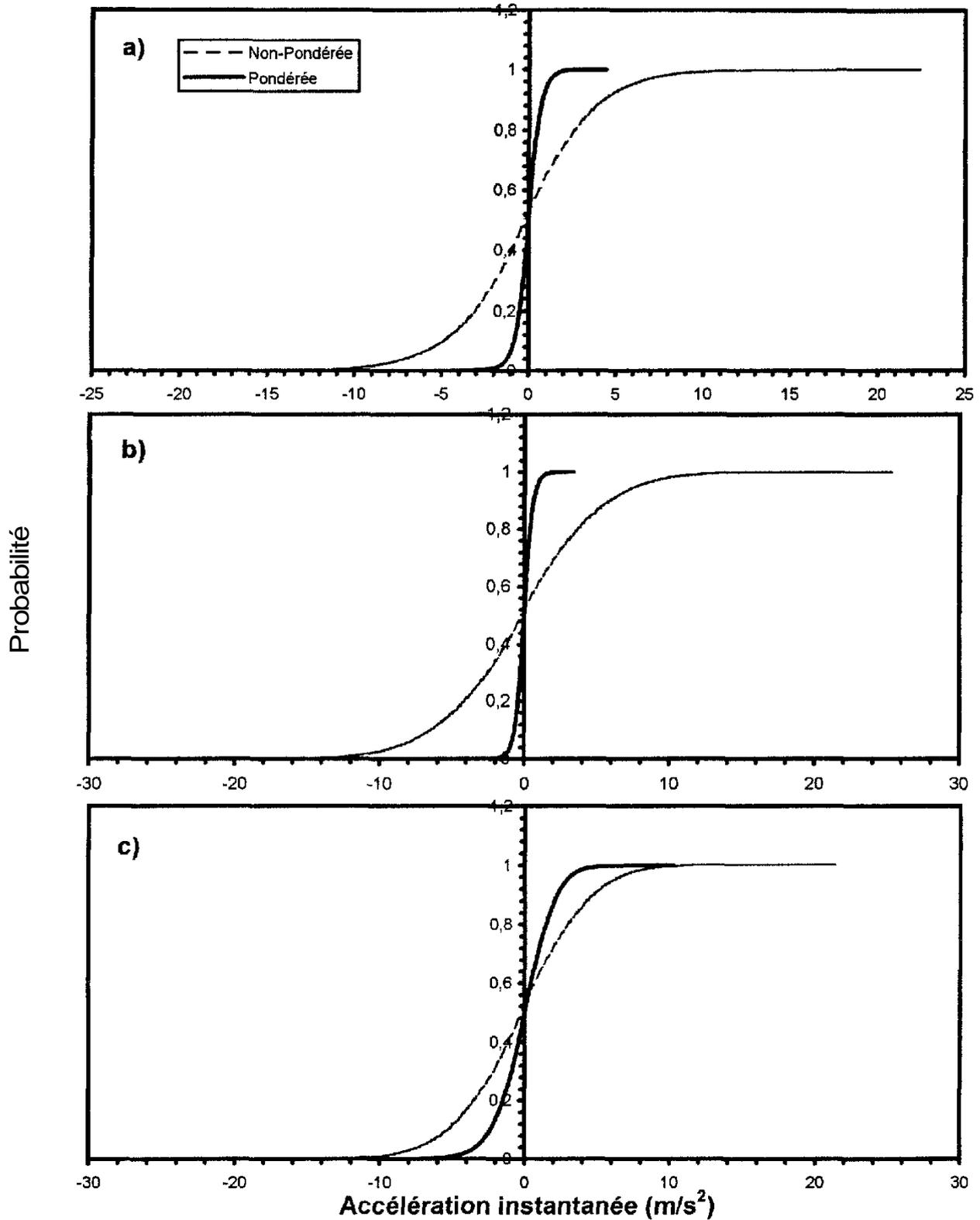


Figure 8: Fonctions de la densité de probabilité cumulée des accélérations instantanées pondérées et non pondérées pour une chenillette de déneigement (#92248) se déplaçant sans trémie. Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) latéral (y); c) vertical (z); d) de roulis ( $\phi$ ); et e) de tangage ( $\theta$ ).

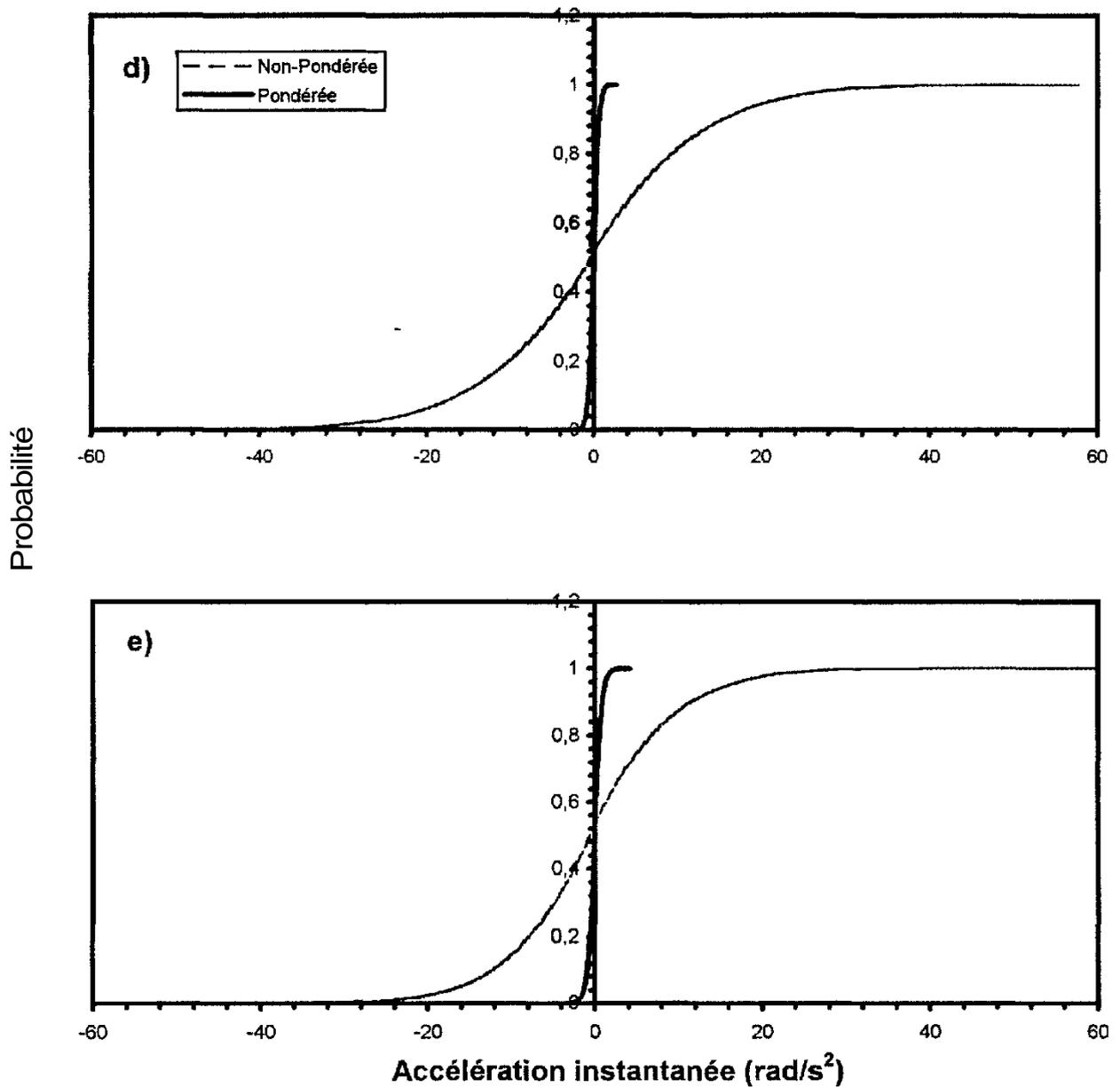


Figure 8 : Fonctions de la densité de probabilité cumulée des accélérations instantanées pondérées et non pondérées pour une chenillette de déneigement (#92248) se déplaçant sans trémie. Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) latéral (y); c) vertical (z); d) de roulis ( $\phi$ ); et e) de tangage ( $\theta$ ).

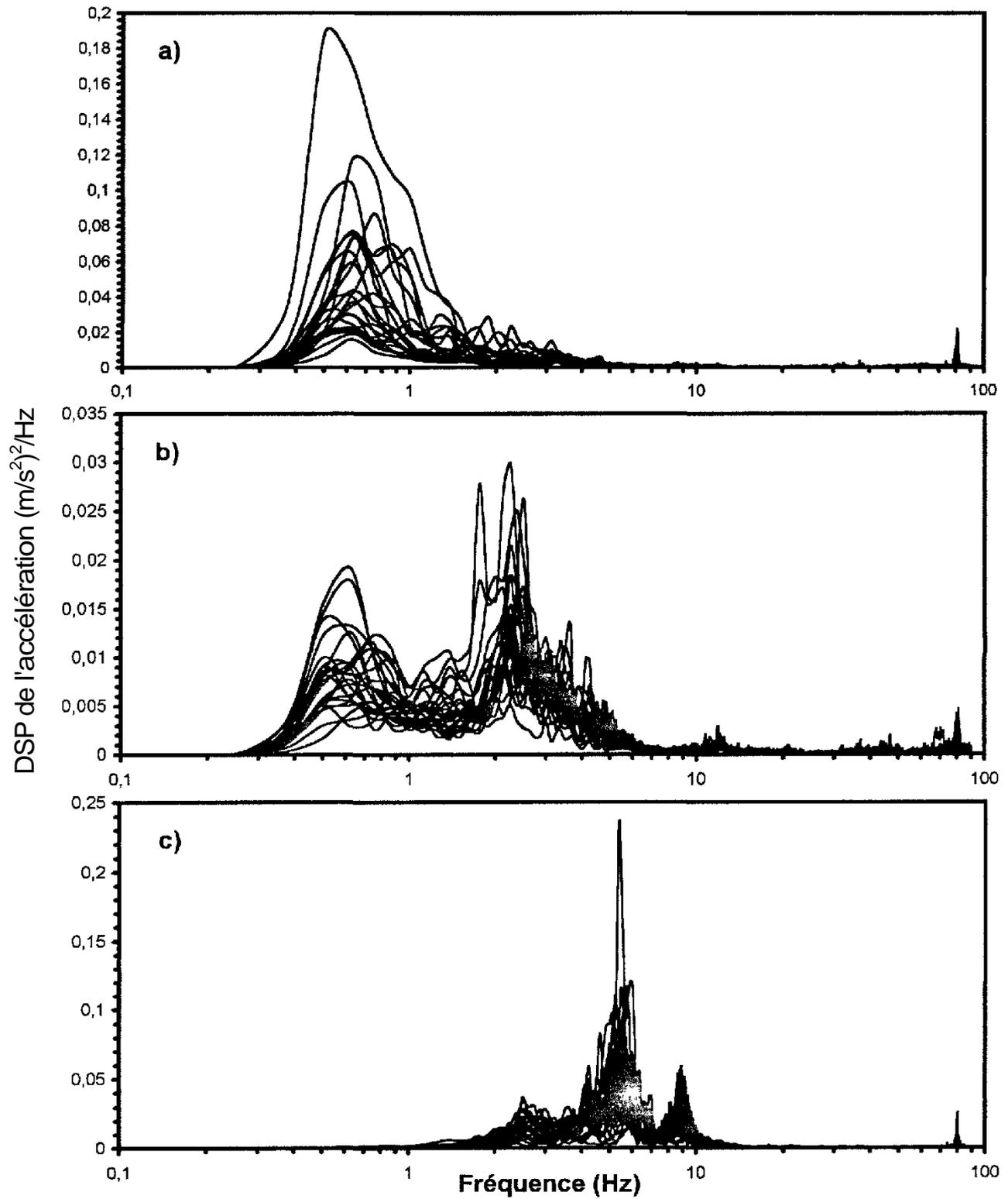


Figure 9: Dispersion dans le temps des spectres de la DSP des vibrations pour un chariot élévateur (Hyster E50XL) à conduite assise. Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) latéral (y); c) vertical (z); d) de roulis ( $\phi$ ); et e) detangage ( $\theta$ ).

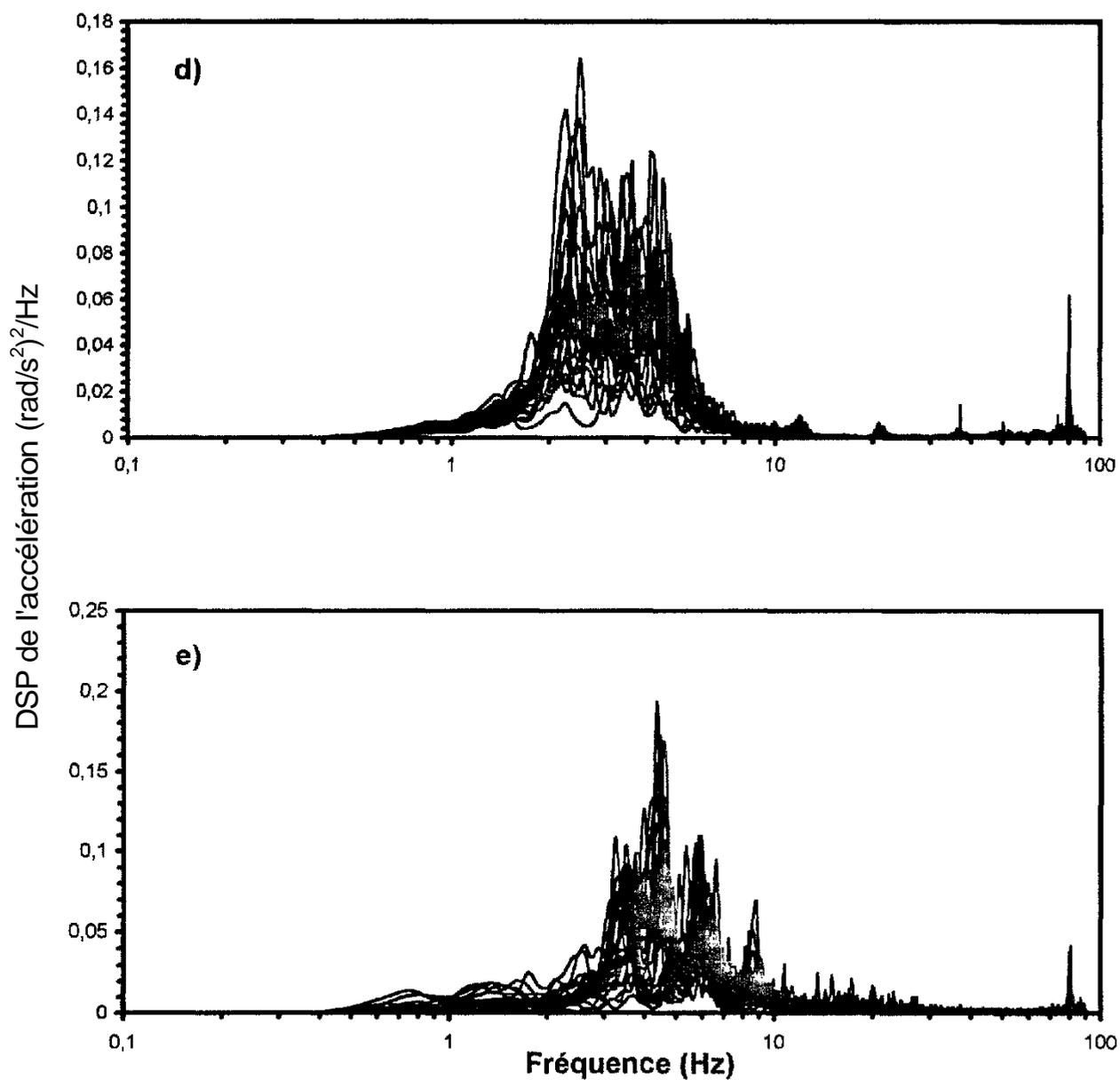


Figure 9 : Dispersion dans le temps des spectres de la DSP des vibrations pour un chariot élévateur (Hyster E50XL) à conduite assise. Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) latéral (y); c) vertical (z); d) de roulis ( $\phi$ ); et e) de tangage ( $\theta$ ).

Les figures 10a à 10e présentent en exemple, les courbes enveloppes et moyenne de la densité spectrale de puissance des accélérations se rapportant au chariot élévateur pour lequel les figures 9a à 9e sont présentées. On considère ainsi que la moyenne des courbes de la DSP établies sur des périodes de une minute constitue une approximation valable du spectre de la DSP qui aurait été obtenu si cette fonction avait été évaluée en liant ensemble tous les segments retenus. Sauf exception, le spectre résultant ainsi obtenu est donc basé sur plusieurs minutes de données (atteignant 25 minutes), donc plus susceptible de bien représenter les caractéristiques moyennes de l'environnement vibratoire propre au chariot élévateur considéré pour les tâches effectuées. Quant aux courbes enveloppes, représentant la dispersion des valeurs de la DSP par rapport à la moyenne, celles-ci peuvent être considérées comme représentant les valeurs extrêmes de toutes celles qui auraient pu définir ces enveloppes si la durée des segments retenus avait été plus longue que 60 s.

Les valeurs efficaces de l'accélération pondérée et non pondérée entre 0.5 et 80 Hz se rapportant au spectre moyen de la DSP établi pour chaque chariot élévateur apparaissent dans les tableaux C.1 à C.5 de l'annexe C pour chacune des directions de mesure  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $\phi$  et  $\theta$  respectivement. Ces valeurs sont obtenues d'abord en représentant les spectres en bandes de fréquence de tiers d'octave pour chacun des segments retenus, puis en établissant la moyenne sur l'ensemble des segments, à chacune des bandes de tiers d'octave, et en calculant les valeurs efficaces de l'accélération pondérée et non pondérée entre 0.5 et 80 Hz selon la méthode décrite en 4.2.4.

Quant au calcul du facteur de crête, les méthodes décrites en 4.2.5 sont appliquées pour déterminer les valeurs de l'accélération crête pondérée en liant successivement tous les segments retenus pour chaque chariot élévateur et chaque direction de mesure. La valeur instantanée crête pondérée est ainsi obtenue sur la base de la valeur maximale absolue de l'accélération pondérée ( $f_c$  absolu) ou encore sur la base des fonctions de la densité de probabilité cumulée (FDPC) ( $f_c$  99<sup>e</sup> percentile). À titre d'exemple, ces fonctions sont présentées dans les figures 11a à 11e pour chacune des directions de mesure  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $\phi$  et  $\theta$  respectivement et pour le même chariot élévateur que celui pour lequel les figures 9a à 9e sont présentées. Les valeurs correspondantes des facteurs de crête apparaissent dans les tableaux C.1 à C.5 de l'annexe C pour chaque véhicule et chacune des directions de mesure. Les valeurs  $f_c$  99<sup>e</sup> percentile sont obtenues en divisant la valeur de l'accélération crête pondérée correspondant à un seuil de probabilité de 1 % de la FDPC par la valeur efficace de l'accélération pondérée. Quant au  $f_c$  absolu, les valeurs de facteurs de crête sont calculées sur la base de l'accélération pondérée maximale déterminée sur l'ensemble des segments.

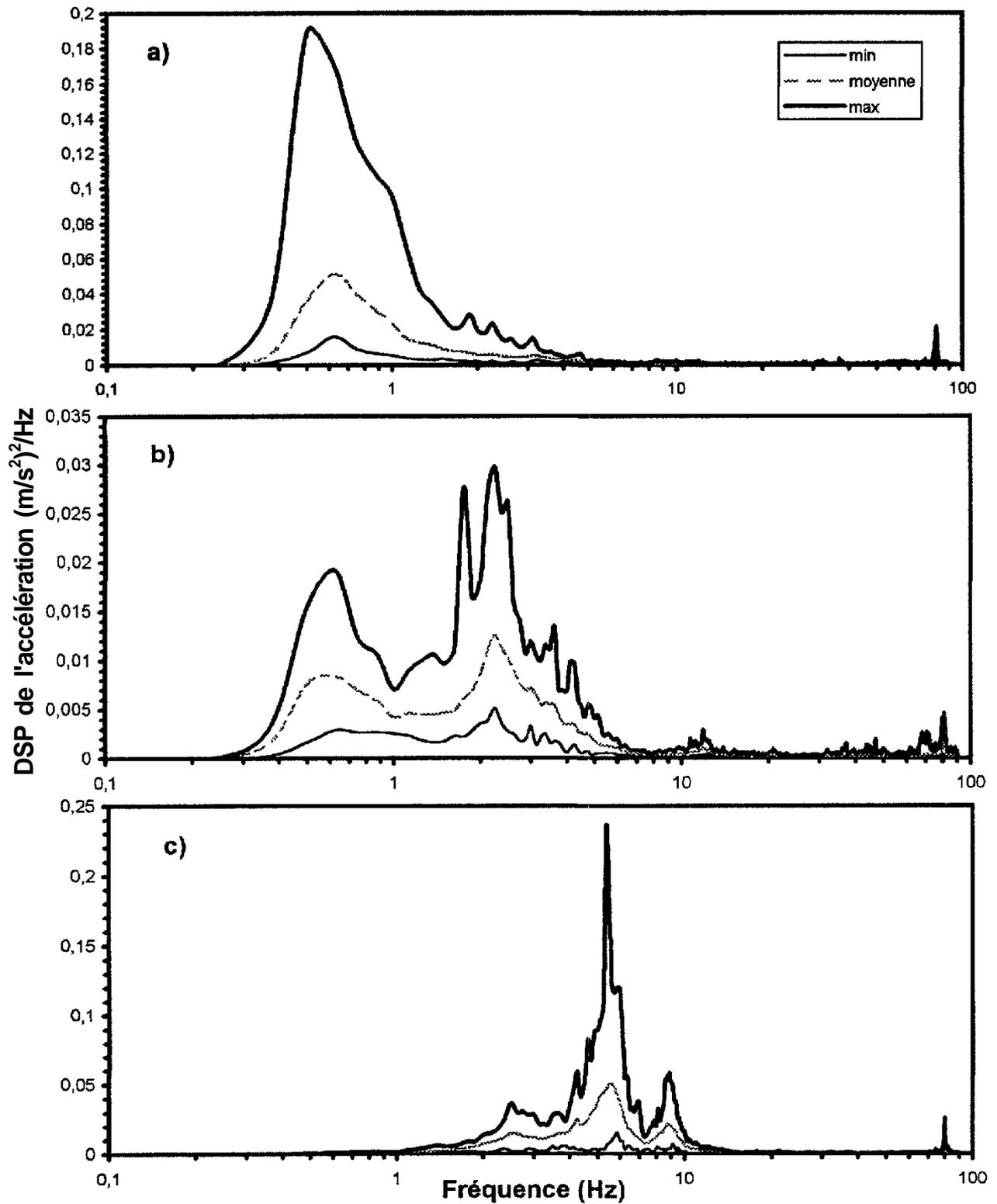


Figure 10: Courbes enveloppes et moyenne des spectres de la DSP des vibrations pour un chariot élévateur (Hyster E50XL) à conduite assise. Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) latéral (y); c) vertical (z); d) de roulis ( $\phi$ ); et e) de tangage ( $\theta$ ).

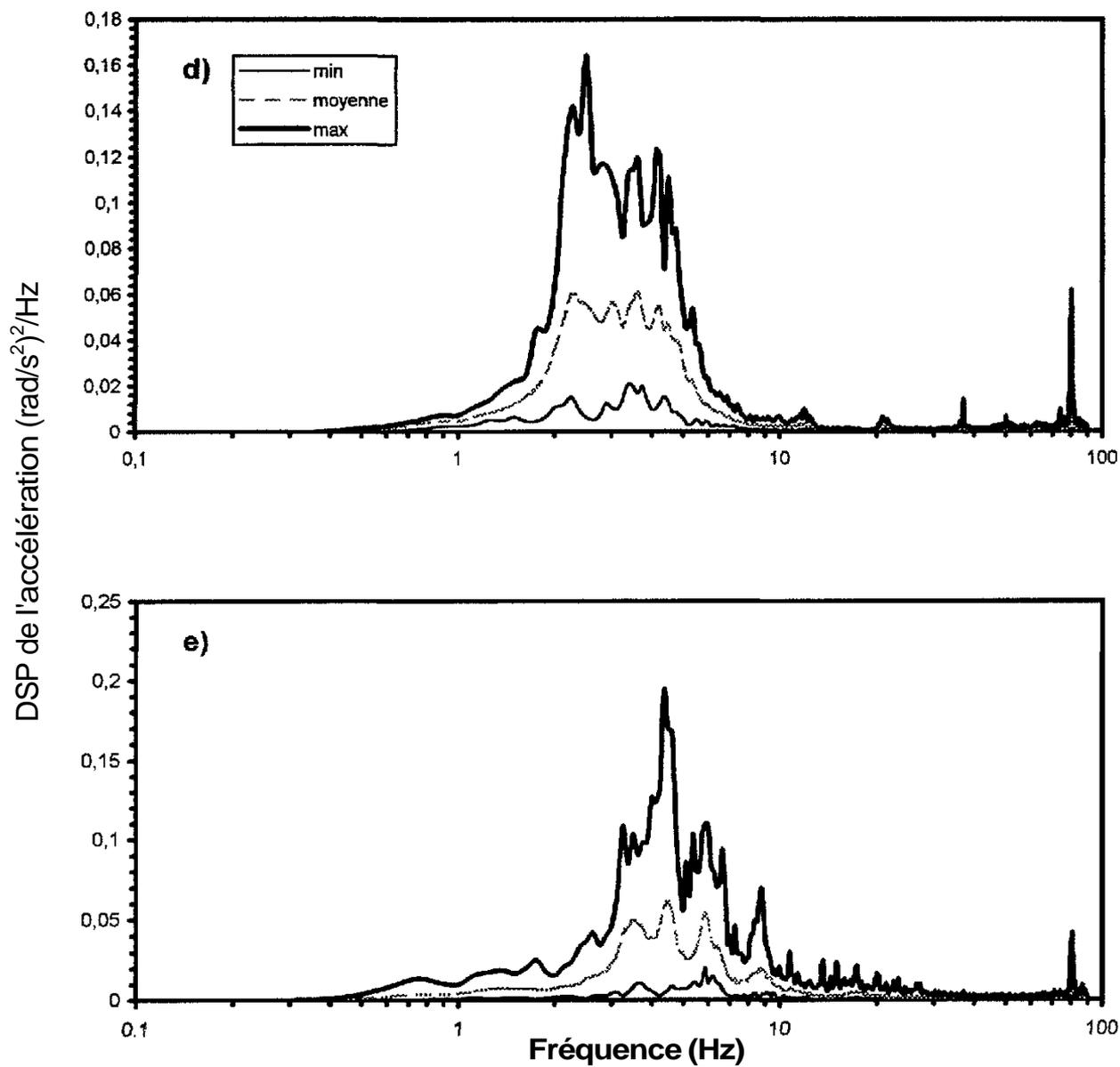


Figure 10: Courbes enveloppes et moyenne des spectres de la DSP des vibrations pour un chariot élévateur (Hyster E50XL) à conduite assise. Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) latéral (y); c) vertical (z); d) de roulis ( $\phi$ ); et e) de tangage ( $\theta$ ).

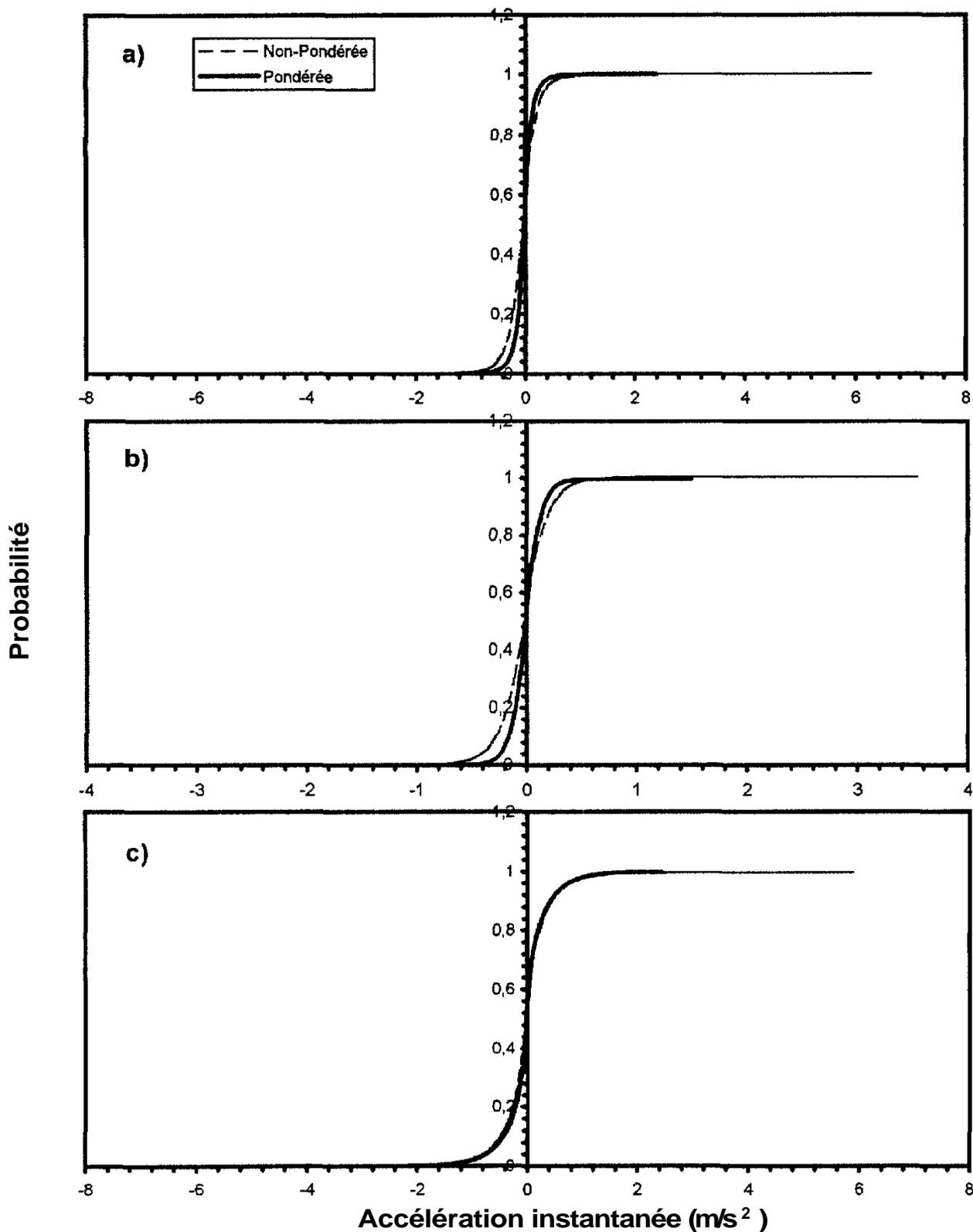


Figure 11: Fonctions de la densité de probabilité cumulée des accélérations instantanées pondérées et non pondérées pour un chariot élévateur (Hyster E50XL) à conduite assise. Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) latéral (y); c) vertical (z); d) de roulis ( $\phi$ ); et e) de tangage ( $\theta$ ).

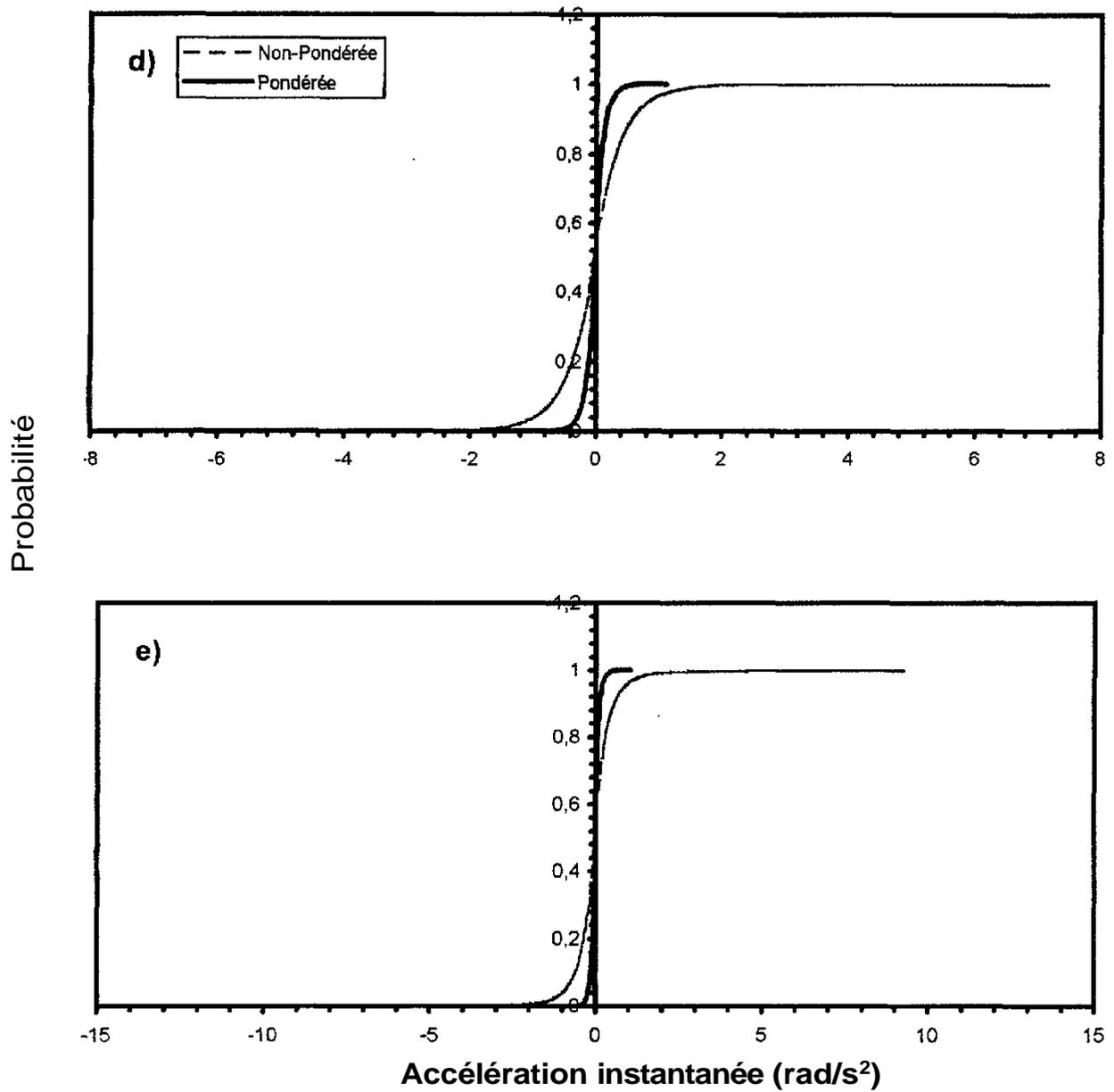


Figure 11: Fonctions de la densité de probabilité cumulée des accélérations instantanées pondérées et non pondérées pour un chariot élévateur (Hyster E50XL) à conduite assise. Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) latéral (y); c) vertical (z); d) de roulis ( $\phi$ ); et e) de tangage ( $\theta$ ).

#### 5.1.4 Chariots élévateurs à station debout

Les figures 12a à 12c illustrent en exemple, pour un modèle de chariot élévateur à station debout dont la capacité de charge est de deux tonnes (combinant trois véhicules Crown 1992), la dispersion des densités spectrales de puissance des accélérations établies à partir de chacun des segments de relevés accélérométriques retenus dont la durée est de 60 secondes, et ce, pour chacune des directions de mesure x, y, et z, respectivement. Cette opération a été répétée pour chacun des six modèles de chariots élévateurs identifiés dans le tableau 4, le tout étant représenté par dix véhicules. Pour chacun des modèles de véhicules considérés, le nombre de segments retenus a varié entre 9 et 69 (9 à 69 minutes de données). Au total, le nombre de segments définis par axe de mesure pour l'ensemble des données a été de 216, portant ce nombre à 648 pour l'ensemble des trois directions de mesure.

Tout comme pour les catégories de véhicules précédents, la dispersion de la DSP des accélérations illustrée dans les figures 12a à 12c entre 0.375 et 100 Hz démontre la variation importante dans le temps des caractéristiques spectrales des vibrations dans les chariots élévateurs à station debout, mise en évidence à partir de segments consécutifs de relevés accélérométriques dont la durée est de 60 secondes. Bien qu'il en soit ainsi, les variations semblent davantage porter sur l'amplitude que sur le contenu en fréquence lui-même. En effet, dans l'ensemble, les segments montrent généralement des pics dominants d'énergie apparaissant aux mêmes fréquences, ce qui contraste avec l'amplitude de ces pics qui semble varier beaucoup d'un segment à un autre.

Les figures 13a à 13c présentent à titre d'exemple, les courbes enveloppes et moyennes de la densité spectrale de puissance des accélérations se rapportant au modèle de chariot élévateur à station debout pour lequel les figures 12a à 12c sont présentées. On considère ainsi que la moyenne des courbes de la DSP établies sur des périodes de une minute constitue une approximation valable du spectre de la DSP qui aurait été obtenu si cette fonction avait été évaluée en liant ensemble tous les segments retenus. Sauf exception, le spectre résultant ainsi obtenu est donc basé sur plusieurs minutes de données (atteignant 69 minutes), donc plus susceptible de bien représenter les caractéristiques moyennes de l'environnement vibratoire propre au modèle de chariot élévateur considéré pour les tâches effectuées. Quant aux courbes enveloppes, représentant la dispersion des valeurs de la DSP par rapport à la moyenne, celles-ci peuvent être considérées comme représentant les valeurs extrêmes de toutes celles qui auraient pu définir ces enveloppes si la durée des segments retenus avait été plus longue que 60 s.

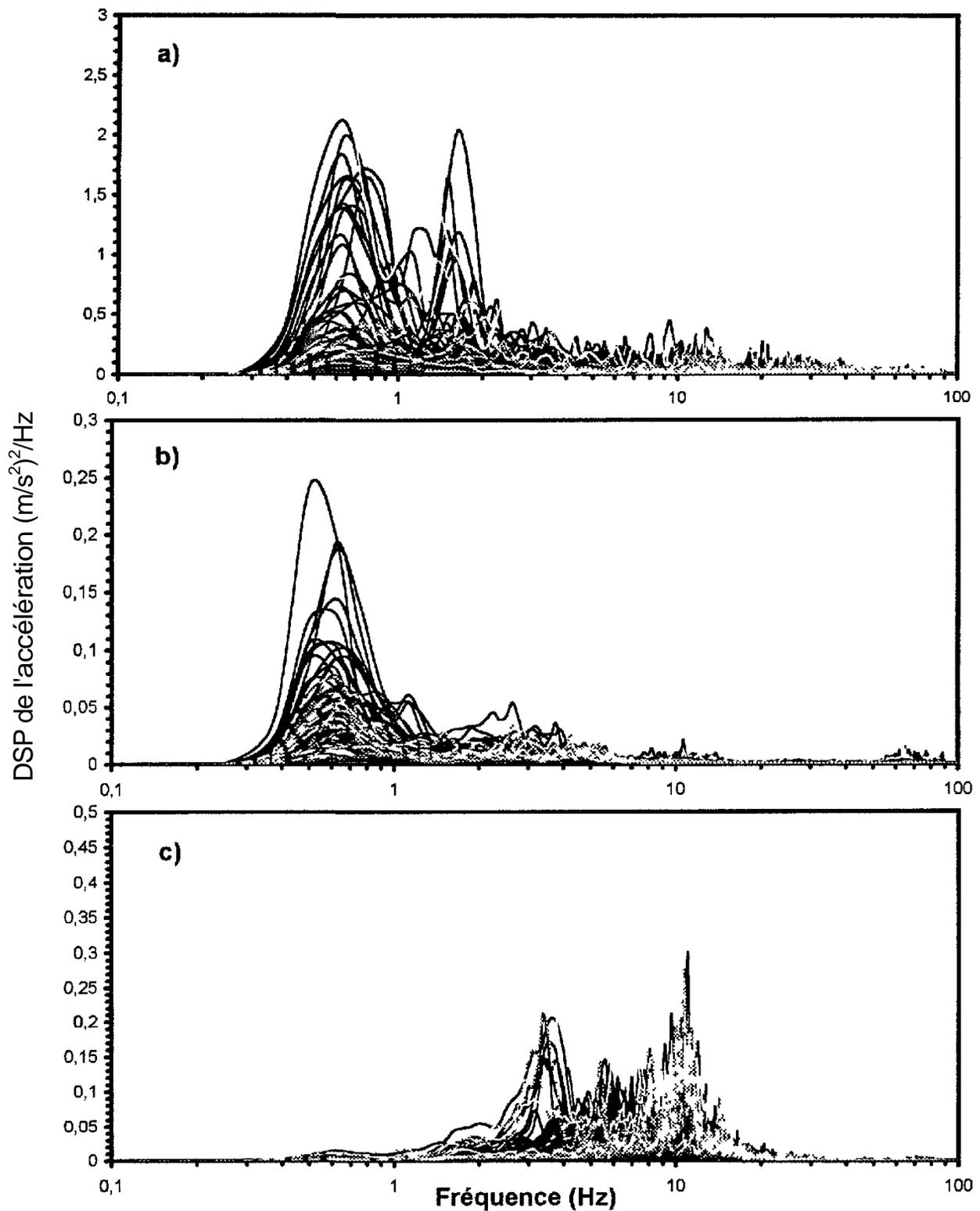


Figure 12: Dispersion dans le temps des spectres de la DSP des vibrations pour un modèle de chariot élévateur (Crown 1992) à station debout. Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) latéral (y); et c) vertical (z).

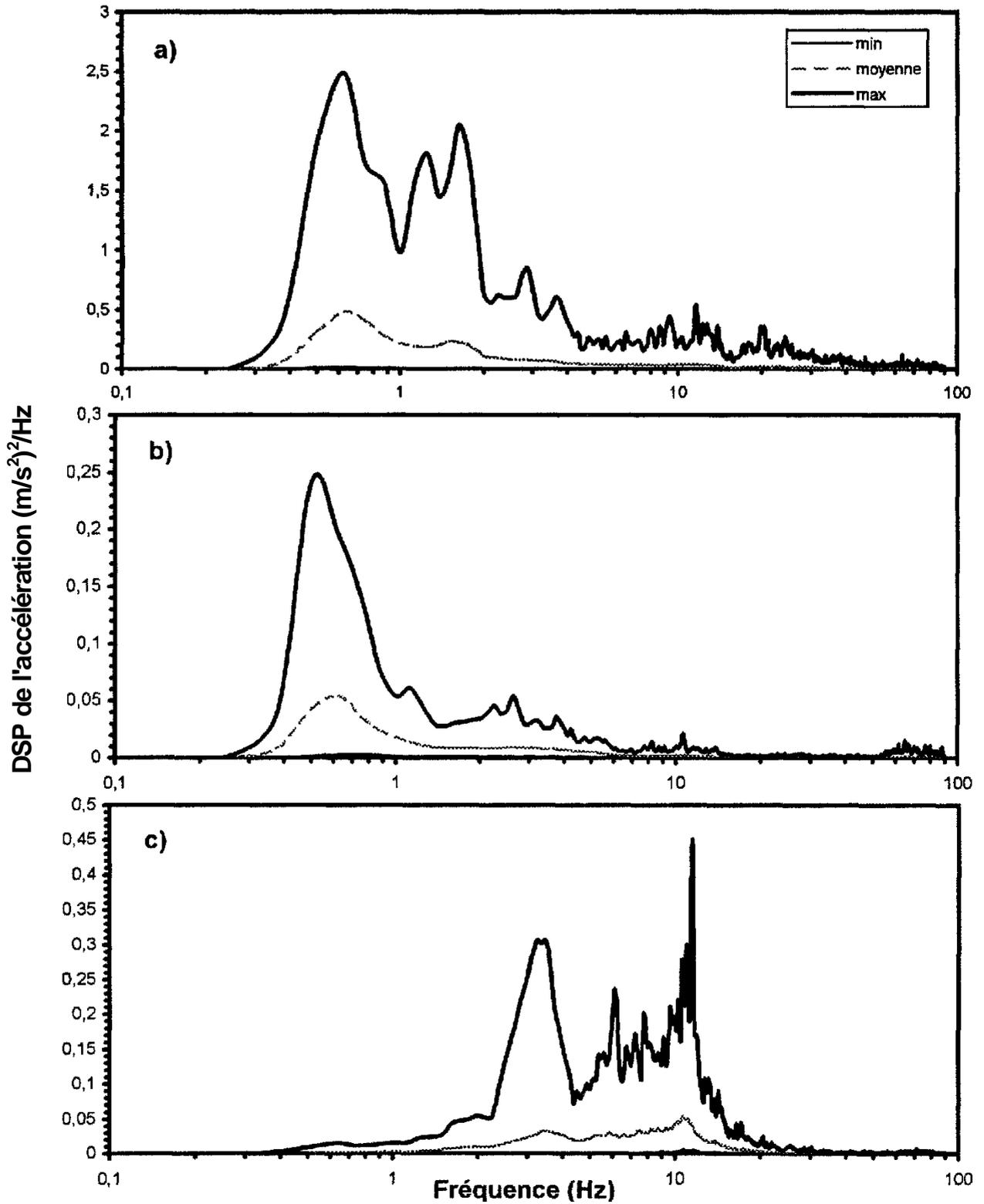


Figure 13: Courbes enveloppes et moyenne des spectres de la DSP des vibrations pour un modèle de chariot élévateur (Crown 1992) à station debout. Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) latéral (y); et c) vertical (z).

Les valeurs efficaces de l'accélération pondérée et non pondérée entre 0.5 et 80 Hz se rapportant au spectre moyen de la DSP établi pour chaque modèle de chariot élévateur apparaissent dans les tableaux D.1 à D.3 de l'annexe D pour chacune des directions de mesure x, y et z, respectivement. Ces valeurs sont obtenues d'abord en représentant les spectres en bandes de fréquence de tiers d'octave pour chacun des segments retenus, puis en établissant la moyenne sur l'ensemble des segments, à chacune des bandes de tiers d'octave, et en calculant les valeurs efficaces de l'accélération pondérée et non pondérée entre 0.5 et 80 Hz selon la méthode décrite en 4.2.4.

Quant au calcul du facteur de crête, les méthodes décrites en 4.2.5 sont appliquées pour déterminer les valeurs de l'accélération crête pondérée et non pondérée en liant successivement tous les segments retenus pour chaque modèle de chariot élévateur et chaque direction de mesure. La valeur instantanée crête pondérée est ainsi obtenue sur la base de la valeur maximale absolue de l'accélération pondérée ( $f_c$  absolu) ou encore sur la base des fonctions de la densité de probabilité cumulée (FDPC) ( $f_c$  99<sup>e</sup> percentile). À titre d'exemple, ces fonctions sont présentées dans les figures 14a à 14c pour chacune des directions de mesure x, y et z respectivement, et pour le même modèle de chariot élévateur que celui pour lequel les figures 12a à 12c sont présentées. Les valeurs correspondantes des facteurs de crête apparaissent dans les tableaux D.1 à D.3 de l'annexe D pour chaque modèle de véhicule et chacune des directions de mesure. Les valeurs  $f_c$  99<sup>e</sup> percentile sont obtenues en divisant la valeur de l'accélération crête pondérée correspondant à un seuil de probabilité de 1 % de la FDPC par la valeur efficace de l'accélération pondérée. Quant au  $f_c$  absolu, les valeurs de facteurs de crête sont calculées sur la base de l'accélération pondérée maximale déterminée sur l'ensemble des segments.

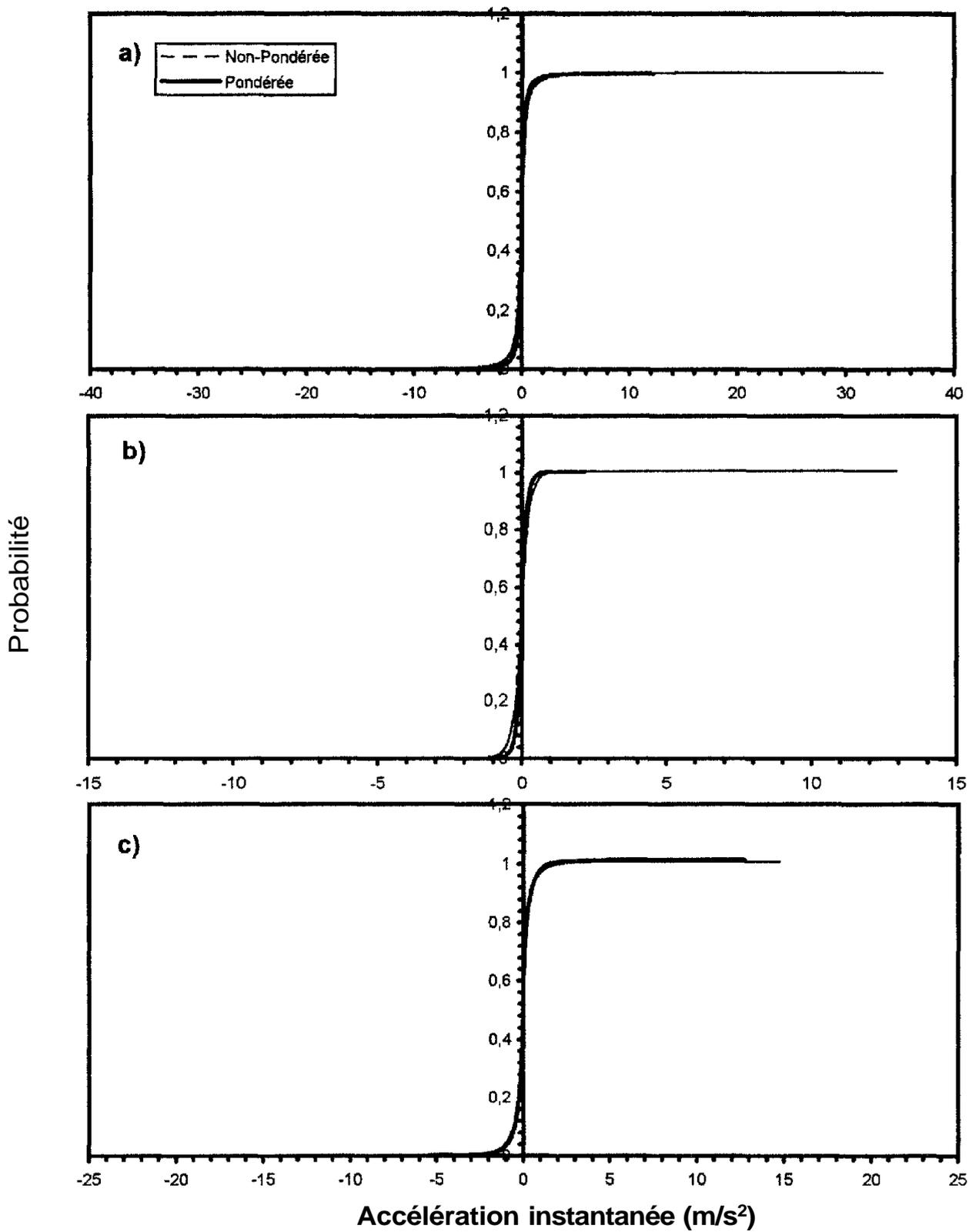


Figure 14: Fonctions de la densité de probabilité cumulée des accélérations instantanées pondérées et non pondérées pour un modèle de chariot élévateur (Crown 1992) à station debout. Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) latéral (y); et c) vertical (z).

## 5.2 Définition de l'environnement vibratoire des différentes catégories de véhicules

### 5.2.1 Autobus urbains

Sur la base des spectres moyens de la DSP de l'accélération définis pour chaque combinaison circuit-autobus et chaque direction de mesure (dont les figures 4a à 4e en sont des exemples), un regroupement peut être effectué en combinant tous les spectres moyens se rapportant à un même modèle de véhicule mais pour lesquels le parcours emprunté est différent. Ainsi, en regroupant dans un premier temps tous les spectres moyens de la DSP associés aux différents parcours empruntés par les autobus NewLook (10 spectres au total) et en procédant de même pour les autobus Classic (28 spectres au total), des plages applicables à chaque modèle de véhicule peuvent être déterminées définissant les limites dans lesquelles les valeurs moyennes de la DSP de l'accélération sont les plus susceptibles de se retrouver dans des situations de conduite normale des deux modèles de véhicules.

La figure 15a présente un exemple des spectres moyens de la DSP enregistrés selon l'axe vertical (axe z) entre 0.375 et 40 Hz pour huit combinaisons circuit-autobus de modèle NewLook, tandis que les courbes enveloppes correspondantes maximale, minimale et moyenne apparaissent dans la figure 15b. Pour la définition des classes spectrales, une limite supérieure en fréquence est fixée à 40 Hz, compte tenu du peu d'énergie vibratoire au-delà de cette fréquence, de leur faible apport sur le plan de l'exposition vibratoire et pour simplifier la définition de ces classes.

Globalement, l'ensemble des courbes individuelles de la figure 15a démontrent des caractéristiques spectrales moyennes similaires par rapport aux fréquences auxquelles apparaissent des pics d'énergie; cependant, des différences apparaissent au niveau des amplitudes. La dispersion des valeurs de la DSP moyenne est ainsi tributaire des variations liées aux différences entre véhicules d'un même modèle, entre conducteurs et circuits empruntés, et entre le nombre de passagers transportés. Le même type de comportement peut aussi être observé pour les autres modes vibratoires ( $x$ ,  $y$ ,  $\theta$  et  $\phi$ ). Les valeurs efficaces de l'accélération pondérée et non pondérée entre 0.5 et 40 Hz se rapportant aux courbes enveloppes maximale, minimale et moyenne de la DSP moyenne applicables aux différents modes vibratoires des autobus NewLook apparaissent dans le tableau 6. Il s'agit ainsi de valeurs efficaces déterminées sur la base de la moyenne et des valeurs maximales et minimales de spectres moyens de la DSP, chacun étant défini en combinant une série de segments vibratoires dont la durée est de 30s.

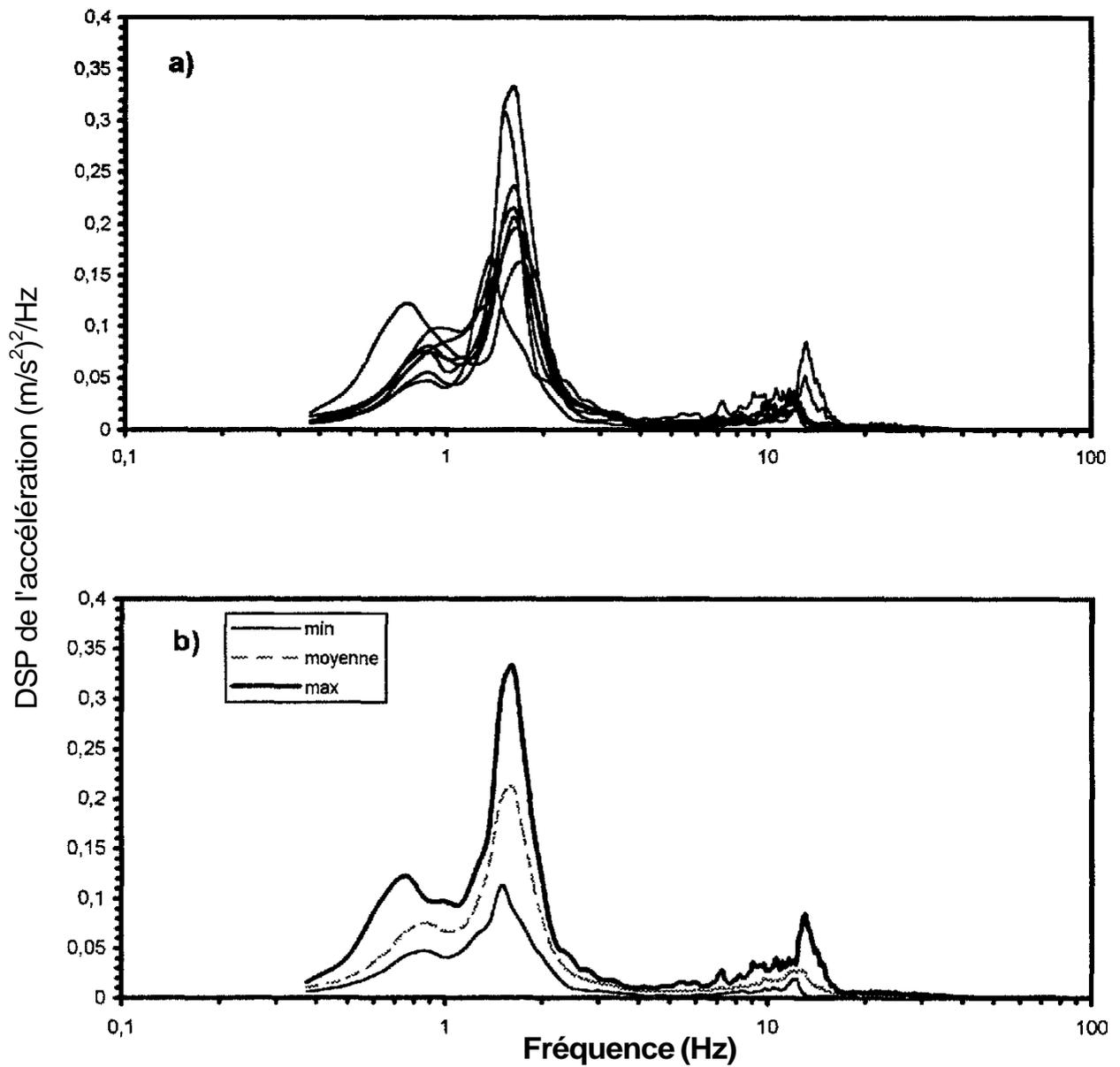


Figure 15: Spectres de la DSP des vibrations se rapportant à l'ensemble des mesures effectuées dans les autobus NewLook en direction verticale (z). a) Spectres individuels; b) Courbes enveloppes et moyennes.

De façon générale, aucune différence significative n'a pu être observée des caractéristiques spectrales moyennes de la DSP se rapportant aux modèles d'autobus NewLook et Classic. Conséquemment, il a été jugé approprié de combiner tous les spectres moyens de la DSP associés aux deux modèles d'autobus, sans plus de distinction. En effectuant ce rapprochement, on a voulu éliminer tout spectre individuel moyen présentant des irrégularités par rapport au comportement général observé pour l'ensemble des spectres. C'est ainsi que les données finales ont été réduites à 8 spectres moyens pour les autobus NewLook et à 27 spectres moyens pour le modèle Classic. Les figures 16a à 16e présentent une superposition de l'ensemble de ces 35 spectres moyens de la DSP pour chacune des directions de mesure  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $\phi$  et  $\theta$  respectivement. Les courbes enveloppes correspondantes maximale, minimale et moyenne des spectres moyens apparaissent quant à elles dans les figures 17a à 17e. Les valeurs efficaces de l'accélération pondérée et non pondérée entre 0.5 et 40 Hz se rapportant aux courbes enveloppes maximale, minimale et moyenne de la DSP moyenne associées aux différents modes vibratoires des modèles d'autobus NewLook, Classic et d'une combinaison des deux sont comparées dans le tableau 6. Ces résultats confirment que l'environnement vibratoire des deux modèles d'autobus comportent des caractéristiques vibratoires similaires.

De façon générale, les courbes enveloppes caractérisant les spectres de la DSP applicables aux autobus urbains présentent les caractéristiques suivantes pour les différents modes vibratoires indiqués:

- Axe  $x$ : mouvements de faible amplitude. Fréquence dominante du mode à proximité de 0.8 à 0.9 Hz. Un pic secondaire apparaît à proximité de 3 Hz, suivi de pics importants entre 8 et 12 Hz;
- Axe  $y$ : mouvements de faible amplitude. Fréquence dominante du mode entre 0.7 et 0.9 Hz. Pic important entre 10 et 12 Hz;
- Axe  $z$ : mode dominant des vibrations. Fréquence dominante du mode à proximité de 1.5 Hz. Pics secondaires entre 9 et 12 Hz;
- Axe  $\phi$ : fréquence dominante du mode à proximité de 0.8 Hz. Pics importants entre 10 et 12 Hz;
- Axe  $\theta$ : fréquence dominante du mode à proximité de 1.1 Hz. Pics secondaires entre 10 et 12 Hz.

Quant aux facteurs de crête établis à partir des relevés accélérométriques servant à définir les spectres de la DSP caractérisant l'environnement vibratoire des autobus urbains, leur valeur, déterminée à un seuil de probabilité de 1 % ( $f_c$  99<sup>e</sup> perc.), s'est avérée varier en moyenne entre 3.2 et 3.8 pour l'ensemble des cinq modes vibratoires considérés. Par ailleurs, les valeurs de facteur de crête basées sur la crête absolue varient entre 4.7 et 13, toute direction confondue.

Ces valeurs apparaissent dans les tableaux A.1 à A.5 pour chacun des autobus et circuit considérés pour définir l'environnement vibratoire des autobus urbains. Il en résulte donc que le facteur de crête absolu est beaucoup plus variable que le facteur de crête basé sur le 99<sup>e</sup> percentile, et beaucoup plus considérable, se situant à une valeur plus grande que 6 dans la majorité des cas, et ce, pour l'ensemble des directions de mesure. L'écart important entre ces valeurs est directement lié à la différence entre l'accélération crête correspondant à un seuil de probabilité de 1 % et celle correspondant à la valeur maximale absolue pour l'ensemble des segments. À titre d'exemple, les figures 18a et 18b illustrent les FDPC des accélérations verticales pondérées obtenues pour les autobus NewLook et Classic, respectivement pour les différents parcours empruntés. Bien que le niveau maximum pondéré absolu puisse avoir atteint les 6 à 7 ms<sup>-2</sup> pour certains parcours, ces niveaux se sont avérés être passablement inférieurs (2 à 3 ms<sup>-2</sup>) en appliquant un seuil de probabilité de 1 %.

**TABLEAU 6: Environnement vibratoire des autobus urbains - valeurs efficaces (0.5 - 40 Hz) de l'accélération pondérée et non pondérée pour les différents modes vibratoires**

MODÈLE	AXE DE MESURE	Valeur non pondérée $a$ (ms <sup>-2</sup> ou rads <sup>-2</sup> )			Valeur pondérée $a_w$ (ms <sup>-2</sup> ou rads <sup>-2</sup> )		
		Min	Moyen	Max	Min	Moyen	Max
NewLook et Classic (35 spectres)	x	0.15	0.25	0.38	0.06	0.10	0.15
	y	0.20	0.35	0.57	0.06	0.10	0.16
	z	0.40	0.68	1.04	0.28	0.49	0.76
	$\phi$	0.21	0.41	0.66	0.08	0.12	0.16
	$\theta$	0.07	0.14	0.22	0.04	0.08	0.11
NewLook (8 spectres)	x	0.17	0.24	0.33	0.07	0.10	0.13
	y	0.22	0.32	0.49	0.08	0.10	0.13
	z	0.44	0.64	0.87	0.31	0.46	0.65
	$\phi$	0.24	0.39	0.56	0.10	0.13	0.15
	$\theta$	0.08	0.13	0.19	0.04	0.06	0.08
Classic (27 spectres)	x	0.16	0.25	0.38	0.06	0.09	0.14
	y	0.21	0.36	0.56	0.06	0.10	0.15
	z	0.42	0.68	1.00	0.29	0.50	0.73
	$\phi$	0.23	0.42	0.63	0.08	0.12	6.16
	$\theta$	0.09	0.14	0.20	0.05	0.08	0.11

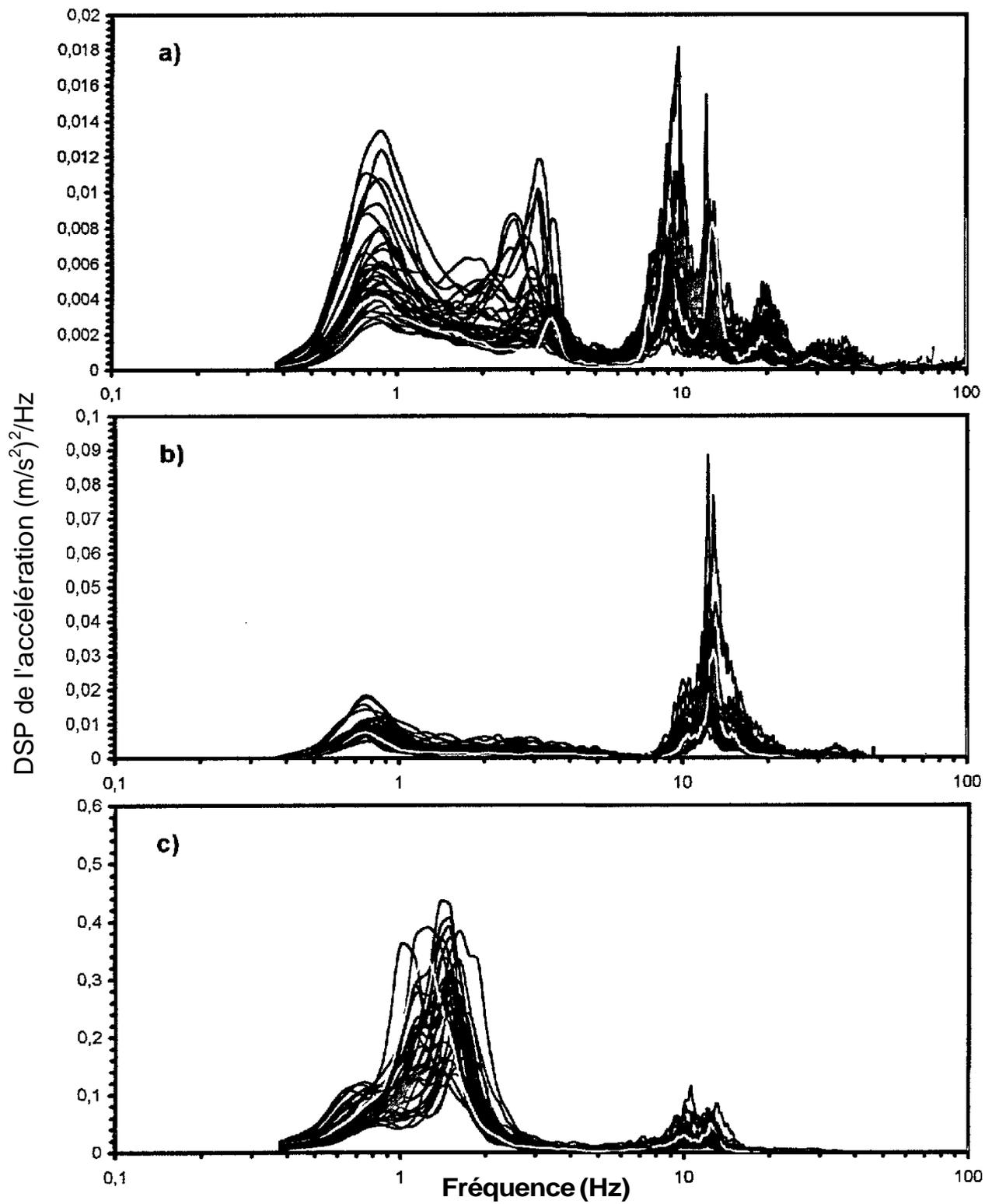


Figure 16: Spectres de la DSP des vibrations se rapportant à l'ensemble des autobus NewLook et Classic. Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) latéral (y); c) vertical (z); d) de roulis ( $\phi$ ); et e) de tangage ( $\theta$ ).

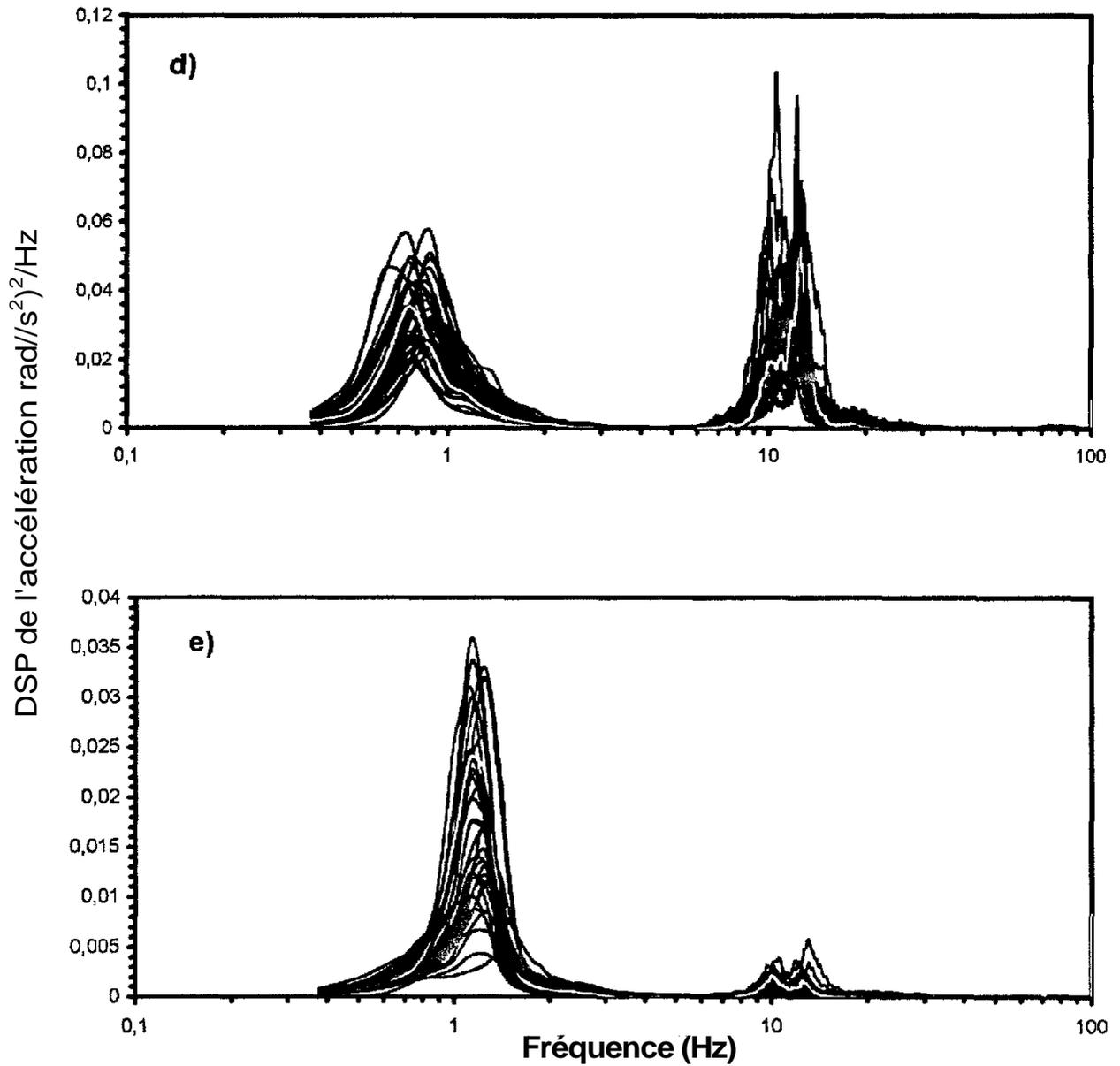


Figure 16: Spectres de la DSP des vibrations se rapportant à l'ensemble des autobus NewLook et Classic. Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) latéral (y); c) vertical (z); d) de roulis ( $\phi$ ); et e) de tangage ( $\theta$ ).

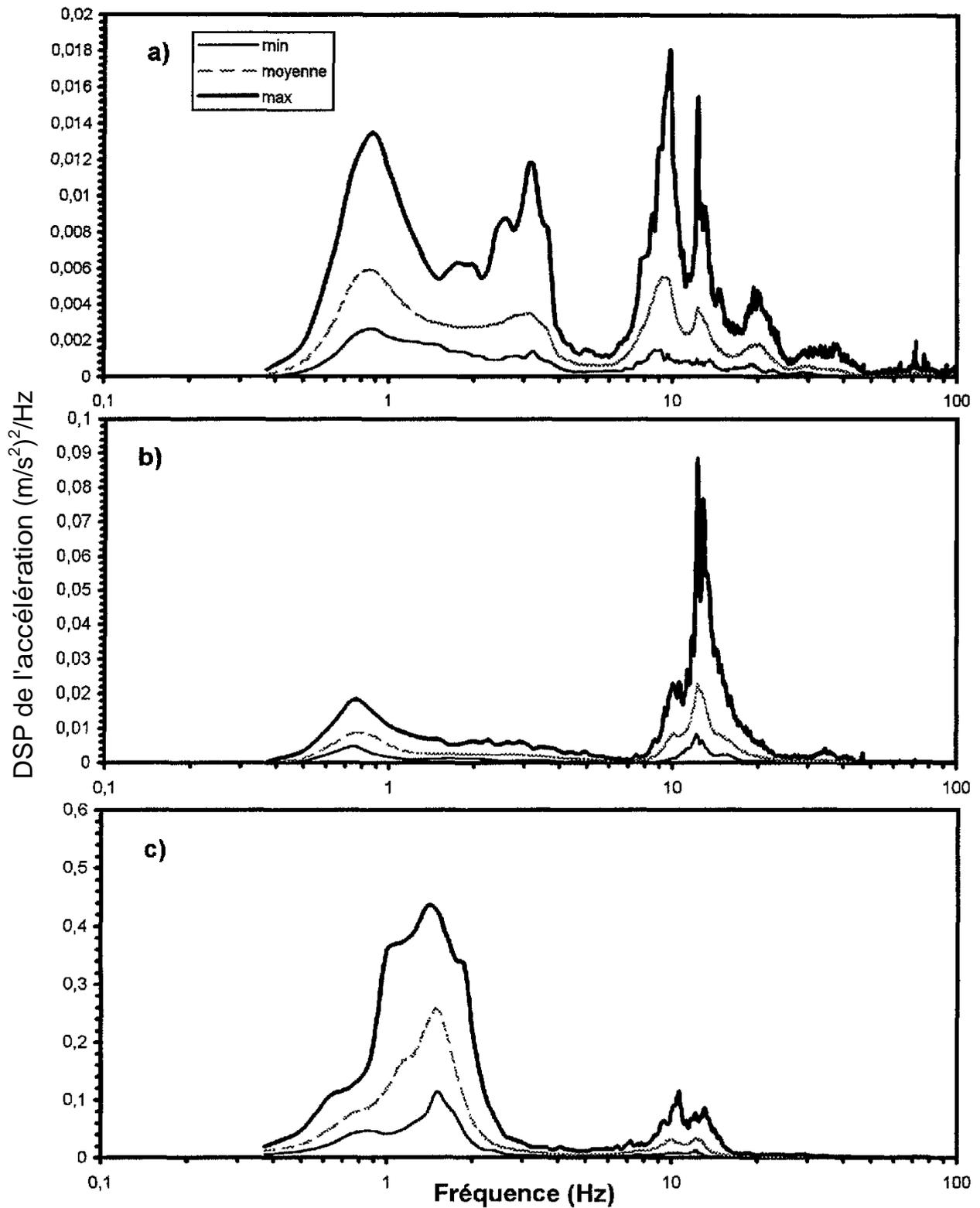


Figure 17: Courbes enveloppes et moyenne des spectres moyens de la DSP des vibrations se rapportant à l'ensemble des autobus NewLook et Classic. Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) latéral (y); c) vertical (z); d) de roulis ( $\phi$ ); et e) de tangage ( $\theta$ ).

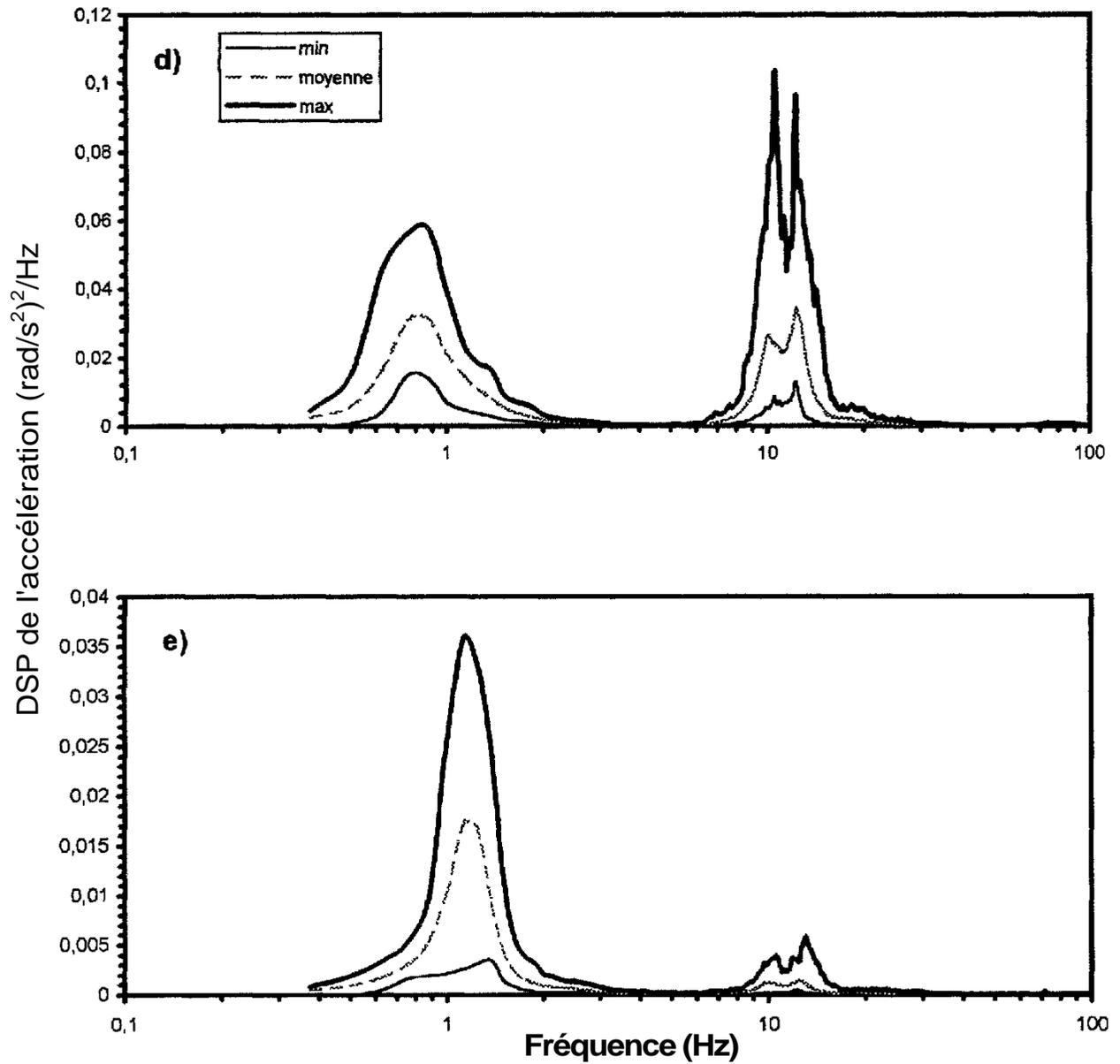


Figure 17: Courbes enveloppes et moyenne des spectres moyens de la DSP des vibrations se rapportant à l'ensemble des autobus NewLook et Classic. Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) latéral (y); c) vertical (z); d) de roulis ( $\phi$ ); et e) de tangage ( $\theta$ ).

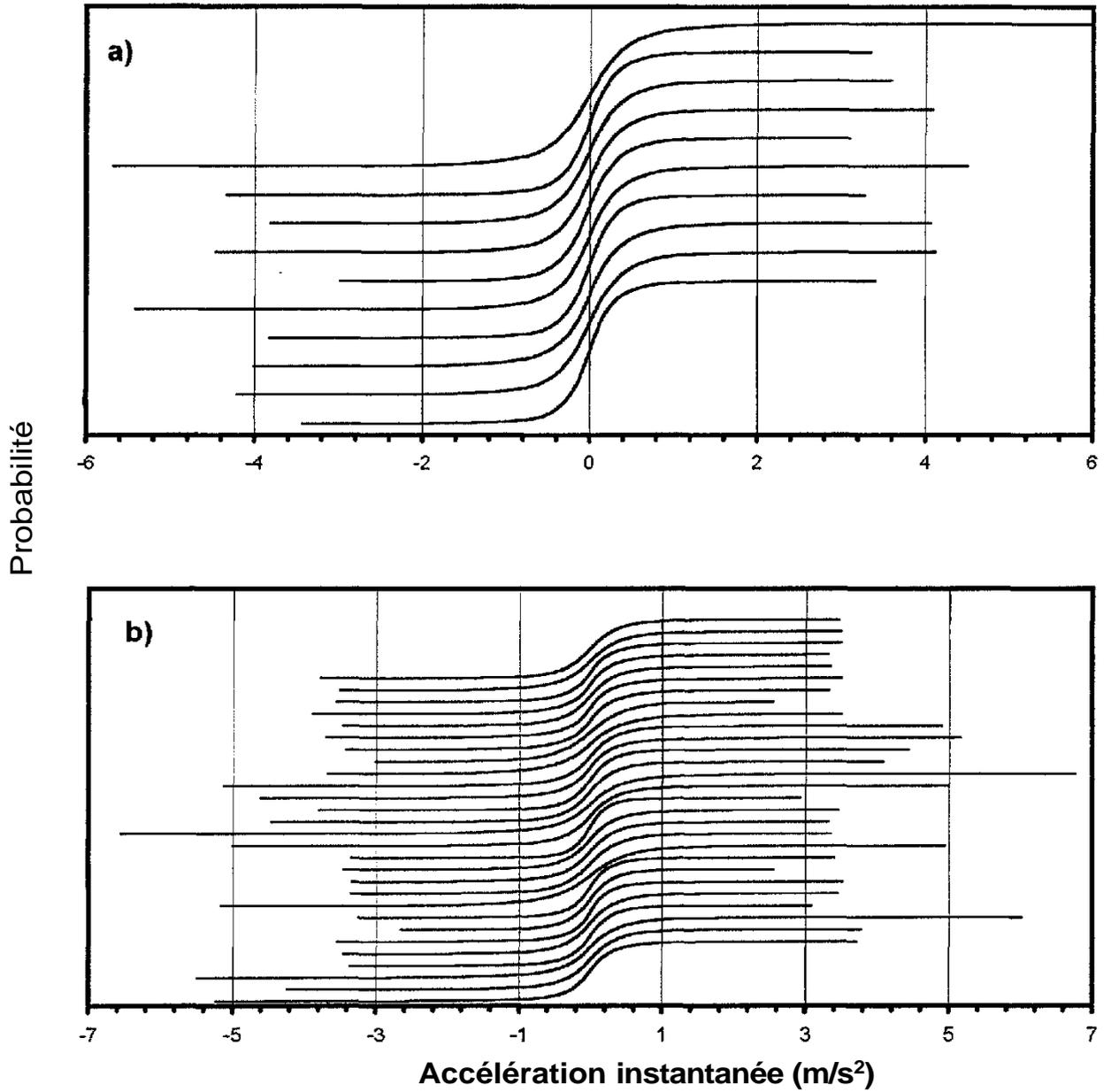


Figure 18: Fonctions de la densité de probabilité cumulée des accélérations instantanées pondérées en direction verticale pour a) les autobus NewLook; et b) les autobus Classic.

## 5.2.2 Chenillettes de déneigement

Sur la base des spectres moyens de la DSP de l'accélération définis pour chaque combinaison de chenillette de déneigement et de mode opératoire, et pour chaque direction de mesure (dont les figures 7a à 7e en sont des exemples), un regroupement peut être effectué en combinant tous les spectres moyens se rapportant aux chenillettes effectuant le même type d'opération. Ainsi, en regroupant dans un premier temps, tous les spectres moyens de la DSP associés à chacun des sept différents modes opératoires identifiés dans la section 3.2, des plages applicables à chaque type d'opération peuvent être déterminées définissant les limites dans lesquelles les valeurs moyennes de la DSP de l'accélération sont les plus susceptibles de se retrouver dans des situations de conduite normale associées à ces modes opératoires. Cette approche est apparue comme étant la plus plausible, compte tenu de la grande similitude entre les véhicules considérés et que le mode opératoire a été perçu comme ayant probablement le plus d'influence sur les caractéristiques des vibrations.

La figure 19a présente un exemple des spectres moyens de la DSP enregistrés entre 0.375 et 40 Hz selon l'axe vertical (axe z) lors des déplacements en transit libre effectués sans trémie par cinq chenillettes de déneigement sur des parcours et pour des conditions de conduite différentes. Les courbes enveloppes correspondantes maximale, minimale et moyenne des spectres moyens apparaissent dans la figure 19b. Globalement, l'ensemble des courbes individuelles moyennes de la figure 19a (totalisant 25 minutes de données) démontrent des caractéristiques spectrales similaires par rapport aux fréquences auxquelles apparaissent des pics d'énergie; cependant, des différences apparaissent au niveau des amplitudes. Pour un mode opératoire identique, la dispersion des valeurs de la DSP moyenne est ainsi tributaire des variations liées aux différences entre véhicules d'un même modèle, entre conducteurs et circuits empruntés. Le même type de comportement peut aussi être observé pour les autres modes vibratoires ( $x$ ,  $y$ ,  $\theta$  et  $\phi$ ). Les valeurs efficaces de l'accélération pondérée et non pondérée entre 0.5 et 40 Hz se rapportant aux courbes enveloppes maximale, minimale et moyenne de la DSP moyenne ainsi formées pour chacun des sept modes opératoires apparaissent dans le tableau 7 pour les différents modes vibratoires.

De façon générale, aucune différence significative n'a pu être observée des caractéristiques spectrales de la DSP moyenne se rapportant aux activités de déblaiement des trottoirs suite à des précipitations majeure et mineure et celles impliquant le chargement de la neige (opérations en avant et en arrière de la niveleuse). Dans ce contexte, il a été jugé approprié de combiner tous les spectres moyens de la DSP associés à ces quatre modes opératoires, sans plus de distinction. Les figures 20a à 20e présentent une superposition de l'ensemble de ces neuf spectres moyens de la DSP pour chacune des directions de mesure  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $\phi$  et  $\theta$  respectivement.

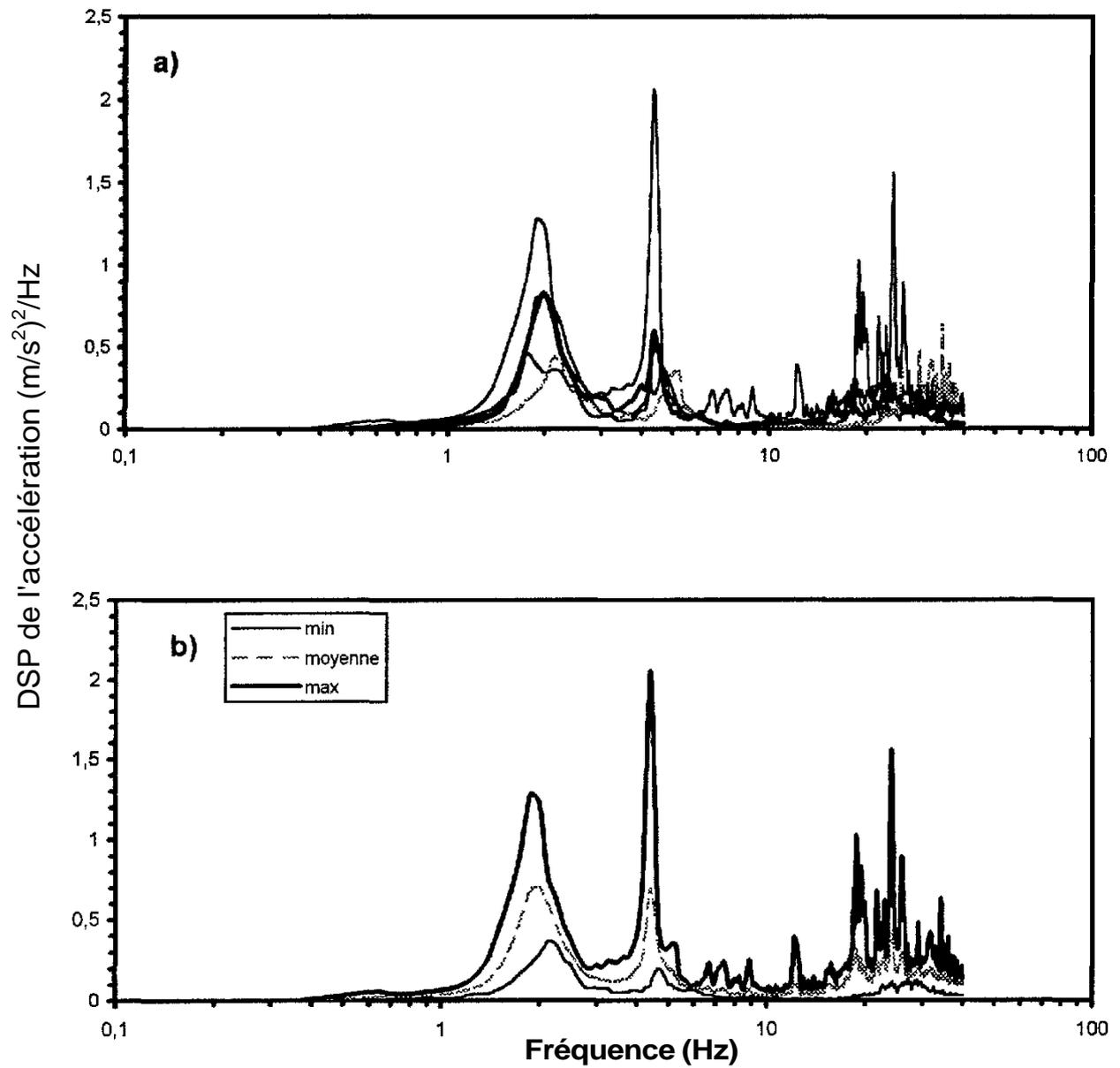


Figure 19: Spectres de la DSP des vibrations se rapportant à l'ensemble des mesures effectuées en direction verticale (z) lors des déplacements libres sans trémie, a) Spectres individuels; b) Courbes enveloppes et moyenne.

**TABLEAU 7 : Environnement vibratoire des chenillettes de déneigement - valeurs efficaces (0.5 - 40 Hz) de l'accélération pondérée et non pondérée pour les différents modes opératoires**

MODE OPÉRATOIRE	AXE DE MESURE	Valeur non pondérée $a$ ( $\text{ms}^{-2}$ ou $\text{rads}^{-2}$ )			Valeur pondérée $a_w$ ( $\text{ms}^{-2}$ ou $\text{rads}^{-2}$ )		
		Min	Moyen	Max	Min	Moyen	Max
CHARGEMENT AVANT (3 spectres)	x	1.24	1.63	2.03	0.52	0.74	0.97
	y	1.59	1.89	2.21	0.46	0.54	0.62
	z	1.94	2.43	2.81	1.23	1.72	2.05
	$\Phi$	3.78	4.50	5.26	0.34	0.54	0.66
	$\theta$	1.82	3.28	4.53	0.38	0.58	0.72
CHARGEMENT ARRIÈRE (2 spectres)	x	1.18	1.31	1.42	0.41	0.46	0.60
	y	1.23	1.49	1.70	0.34	0.37	0.40
	z	1.80	2.05	2.26	1.16	1.33	1.49
	$\Phi$	3.48	4.25	4.91	0.32	0.82	1.11
DÉBLAIEMENT MAJEUR (2 spectres)	$\theta$	2.03	2.43	2.77	0.41	0.91	1.22
	x	1.10	1.16	1.22	0.35	0.44	0.51
	y	1.61	1.76	1.90	0.38	0.43	0.46
	z	1.96	2.21	2.43	1.31	1.53	1.69
DEBLAIEMENT MINEUR (2 spectres)	$\Phi$	4.29	5.39	6.30	0.51	1.52	2.08
	$\theta$	2.26	3.34	4.15	0.59	1.50	2.04
	x	1.62	1.89	2.14	0.47	0.73	0.92
	y	1.86	2.13	2.40	0.42	0.59	0.72
	z	2.50	2.84	3.15	1.61	1.94	2.21
COMBINAISON CHARGEMENT ET DÉBLAIEMENT (9 spectres)	$\Phi$	4.90	5.46	5.97	0.49	0.84	1.05
	$\theta$	2.93	3.69	4.32	0.63	0.98	1.24
	x	1.05	1.54	2.27	0.35	0.62	1.03
	y	1.20	1.84	2.63	0.33	0.50	0.73
	Z	1.70	2.40	3.18	1.13	1.65	2.23
ÉPANDAGE D'ABRASIFS (3 spectres)	$\Phi$	3.37	4.71	6.31	0.31	0.69	1.24
	$\theta$	1.80	3.15	4.96	0.34	0.75	1.41
	x	0.94	1.06	1.17	0.48	0.54	0.60
	y	1.05	1.30	1.52	0.38	0.47	0.55
	z	1.98	2.35	2.72	1.41	1.70	1.91
TRANSIT SANS TREMIE (5 spectres)	$\Phi$	3.21	4.17	5.09	0.36	0.42	0.46
	$\theta$	1.71	1.98	2.21	0.50	0.61	0.71
	x	1.06	2.03	3.06	0.26	0.48	0.67
	y	1.22	3.38	5.87	0.23	0.49	0.78
	z	1.58	2.52	3.46	0.99	1.55	2.19
TRANSIT AVEC TREMIE (3 spectres)	$\Phi$	3.66	5.32	6.76	0.35	0.64	1.03
	$\theta$	4.21	5.97	7.51	0.48	0.72	1.02
	x	0.74	1.16	1.48	0.35	0.45	0.57
	y	1.32	2.49	3.74	0.20	0.40	0.55
	z	1.37	2.09	2.90	0.81	1.19	1.56
TOUS (20 spectres)	$\Phi$	3.06	4.48	5.98	0.24	0.43	0.59
	$\theta$	1.80	3.53	5.20	0.36	0.50	0.76
	x	0.69	1.57	3.28	0.25	0.56	1.06
	y	0.92	2.36	5.88	0.19	0.48	0.86
	z	1.20	2.38	4.00	0.75	1.57	2.60
	$\Phi$	2.64	4.73	7.50	0.23	0.60	1.36
	$\theta$	1.45	3.88	7.72	0.26	0.71	1.47

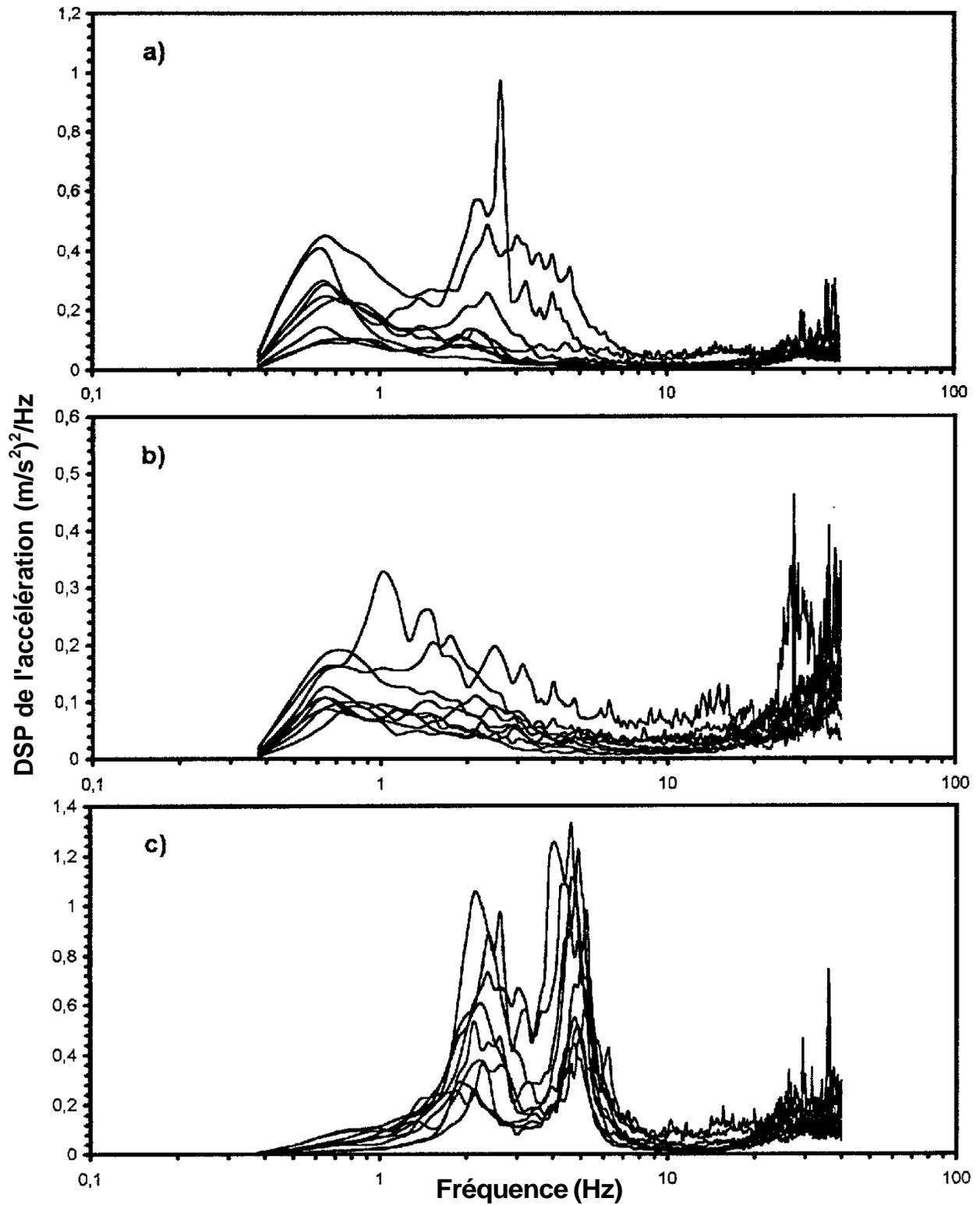


Figure 20: Spectres de la DSP se rapportant à l'ensemble des activités de déblaiement et de chargement de la neige par les chenillettes. Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) latéral (y); c) vertical (z); d) de roulis ( $\phi$ ); et e) de tangage ( $\theta$ ).

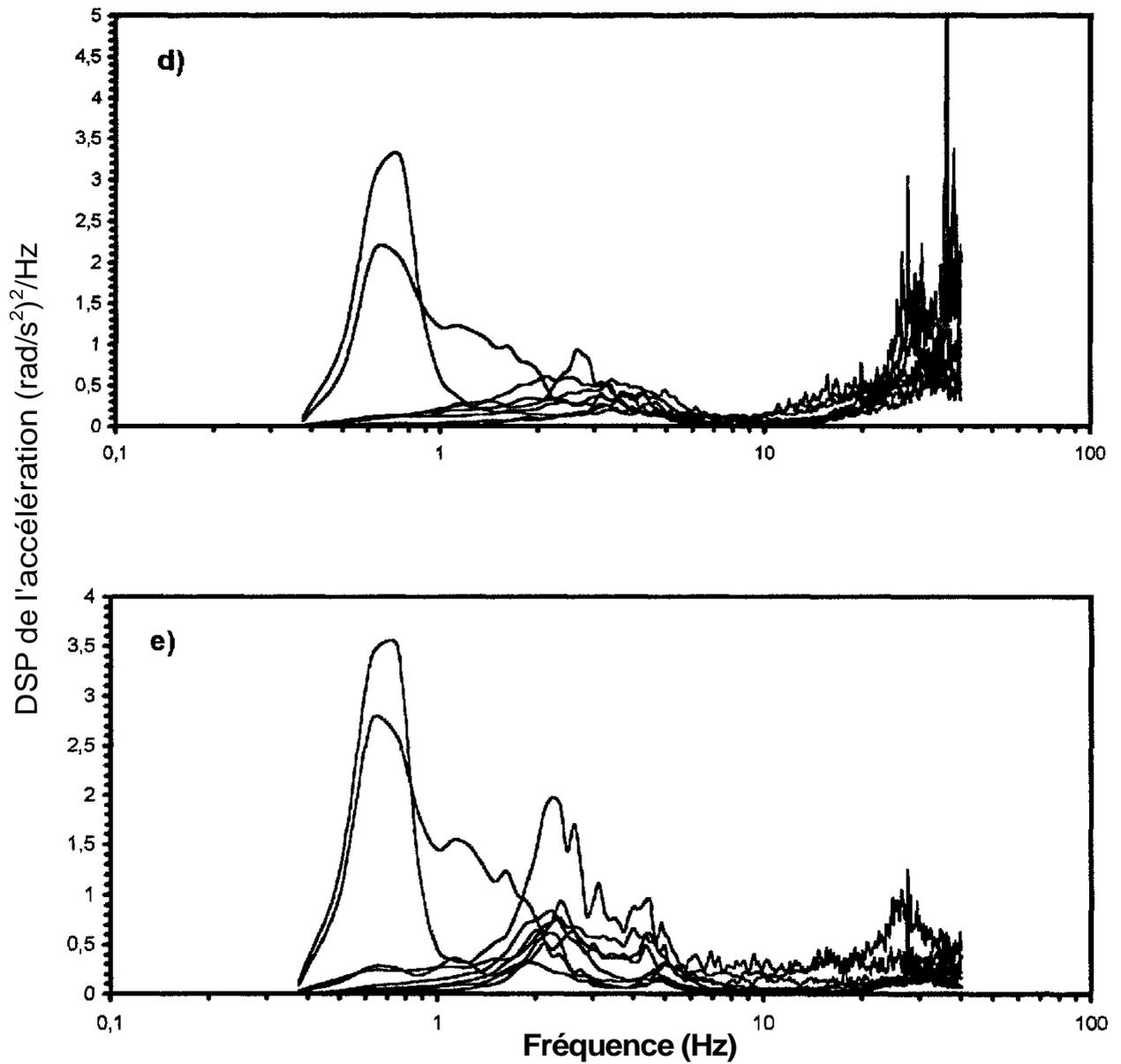


Figure 20: Spectres de la DSP se rapportant à l'ensemble des activités de déblaiement et de chargement de la neige par les chenillettes. Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) latéral (y); c) vertical (z); d) de roulis ( $\phi$ ); et e) de tangage ( $\theta$ ).

Les courbes enveloppes correspondantes maximale, minimale et moyenne apparaissent quant à elles dans les figures 21a à 21e. Les valeurs efficaces de l'accélération pondérée et non pondérée entre 0.5 et 40 Hz se rapportant aux courbes enveloppes maximale, minimale et moyenne de la DSP moyenne résultant de la combinaison des modes opératoires de déblaiement et de chargement apparaissent aussi dans le tableau 7. Ces résultats démontrent que les valeurs résultantes recoupent celles associées aux modes opératoires faisant partie de ce regroupement.

Pour les modes opératoires impliquant l'épandage d'abrasifs et les déplacements sans et avec trémie, les figures 22a à 22e, 23a à 23e et 24a à 24e représentent respectivement les courbes enveloppes applicables à ces trois autres modes opératoires, et pour lesquelles les valeurs de l'accélération efficace pondérée et non pondérée apparaissent dans le tableau 7. À des fins de simplification, le tableau 7 présente également les valeurs des accélérations efficaces pondérées et non pondérées qui résulteraient du regroupement des spectres se rapportant à l'ensemble des modes opératoires, sans plus de distinction.

De façon générale, l'ensemble des courbes enveloppes caractérisant les spectres de la DSP applicables aux chenillettes de déneigement entre 0.375 et 40 Hz pour les différents modes opératoires présentent les caractéristiques suivantes pour les différents modes vibratoires indiqués:

- Axe x: mouvements d'amplitude non négligeable. Fréquences dominantes du mode à proximité de 0.6 à 0.8 Hz et entre 1.5 et 3 Hz;
- Axe y: mouvements d'amplitude non négligeable. Fréquences dominantes du mode entre 0.6 et 0.8 Hz et entre 2 et 3 Hz;
- Axe z: mode dominant des vibrations. Fréquences dominantes du mode entre 1.5 et 2.5 Hz et entre 3 et 6 Hz. Ce dernier pic est probablement le plus caractéristique de ce type de véhicule;
- Axe  $\phi$  : mouvements d'amplitude non négligeable. Fréquences dominantes du mode entre 0.6 et 0.8 Hz et entre 3 et 5 Hz;
- Axe  $\theta$  : mouvements d'amplitude non négligeable. Fréquences dominantes du mode entre 0.6 et 0.8 Hz et entre 1.5 et 2.5 Hz.

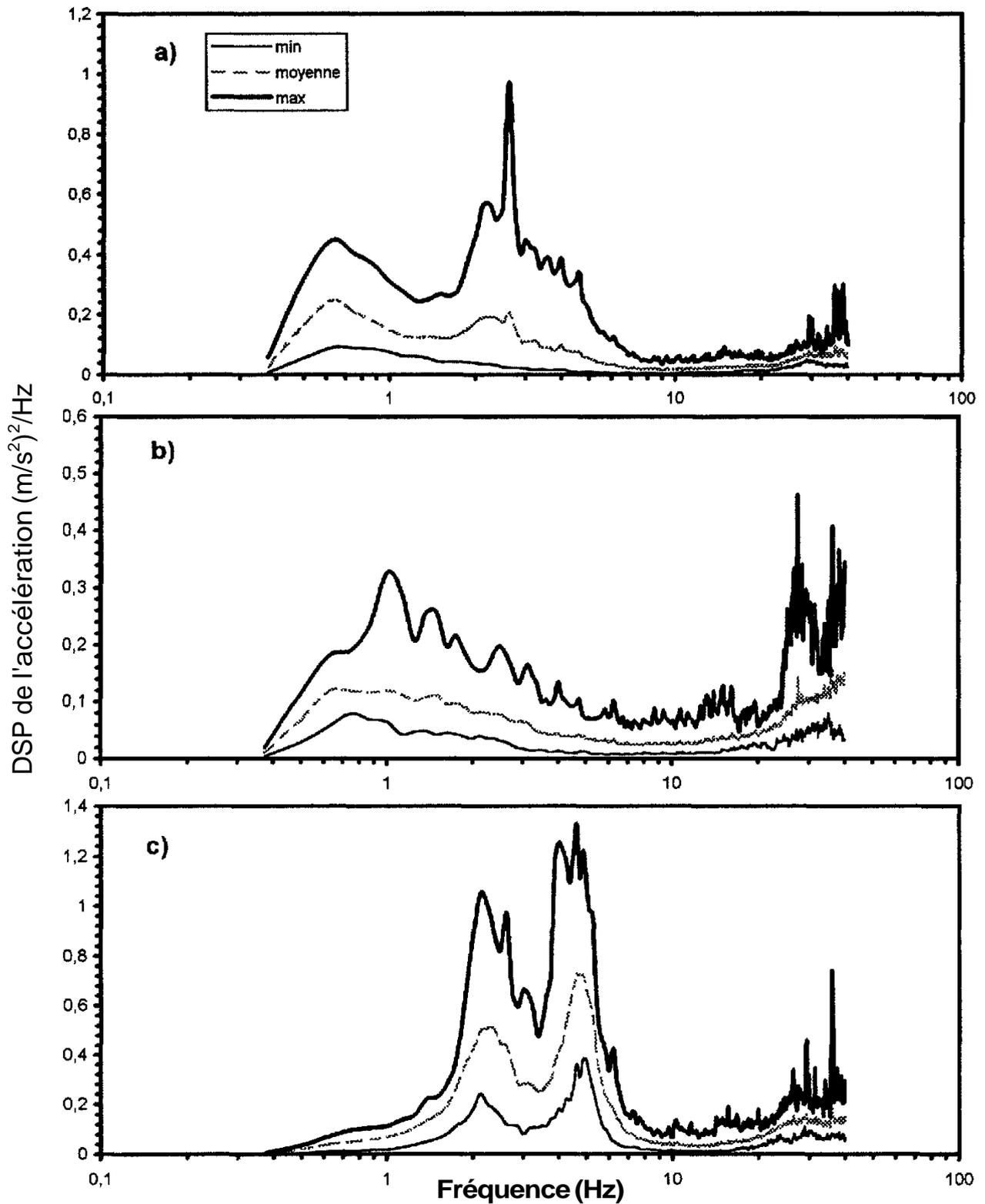


Figure 21: Courbes enveloppes et moyenne des spectres moyens de la DSP des vibrations se rapportant à l'ensemble des activités de déblaiement et de chargement de la neige par les chenillettes. Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) latéral (y); c) vertical (z); d) de roulis ( $\phi$ ); et e) de tangage ( $\theta$ ).

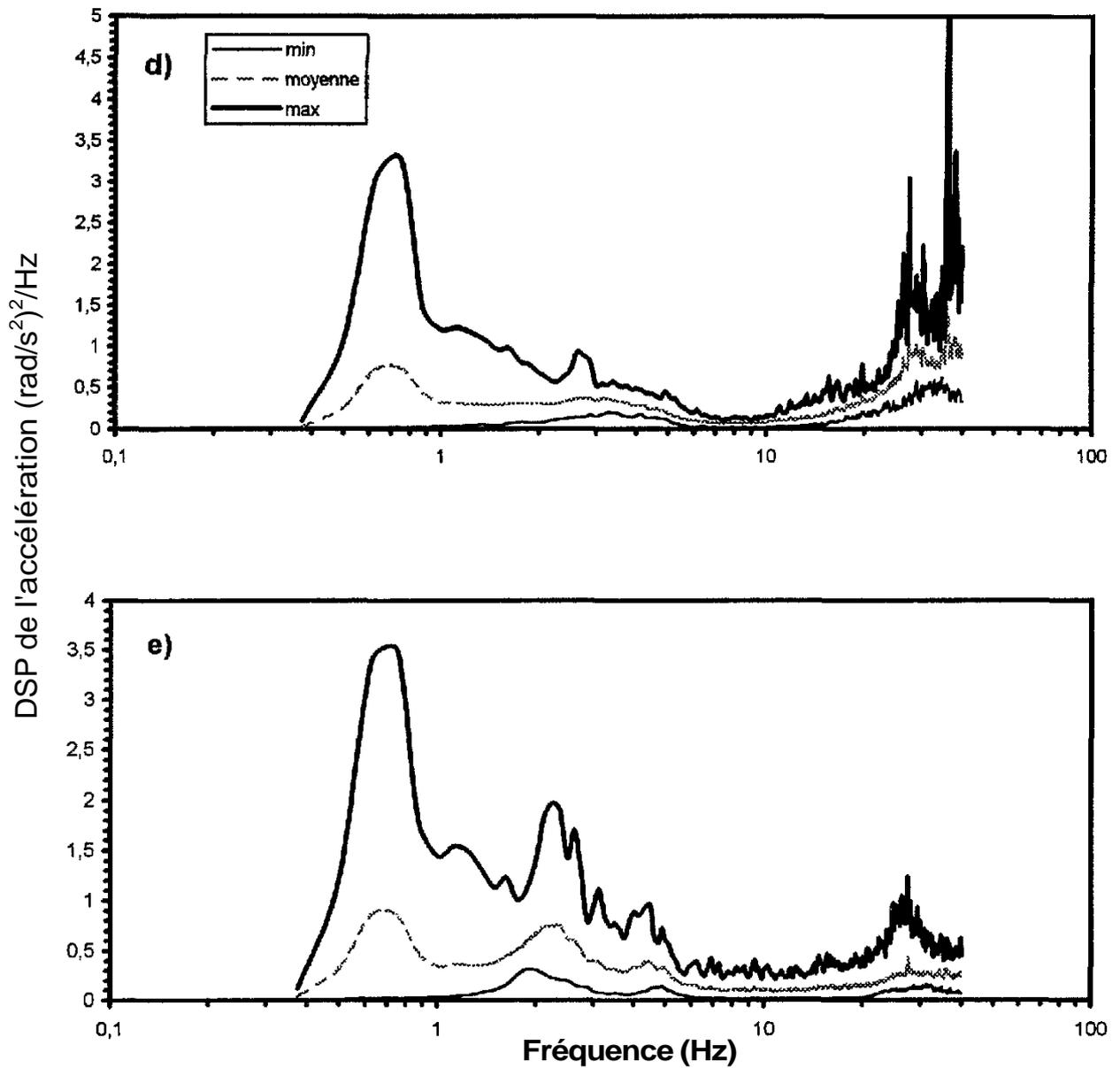


Figure 21: Courbes enveloppes et moyenne des spectres moyens de la DSP des vibrations se rapportant à l'ensemble des activités de déblaiement et de chargement de la neige par les chenillettes. Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) latéral (y); c) vertical (z); d) de roulis ( $\phi$ ); et e) de tangage ( $\theta$ ).

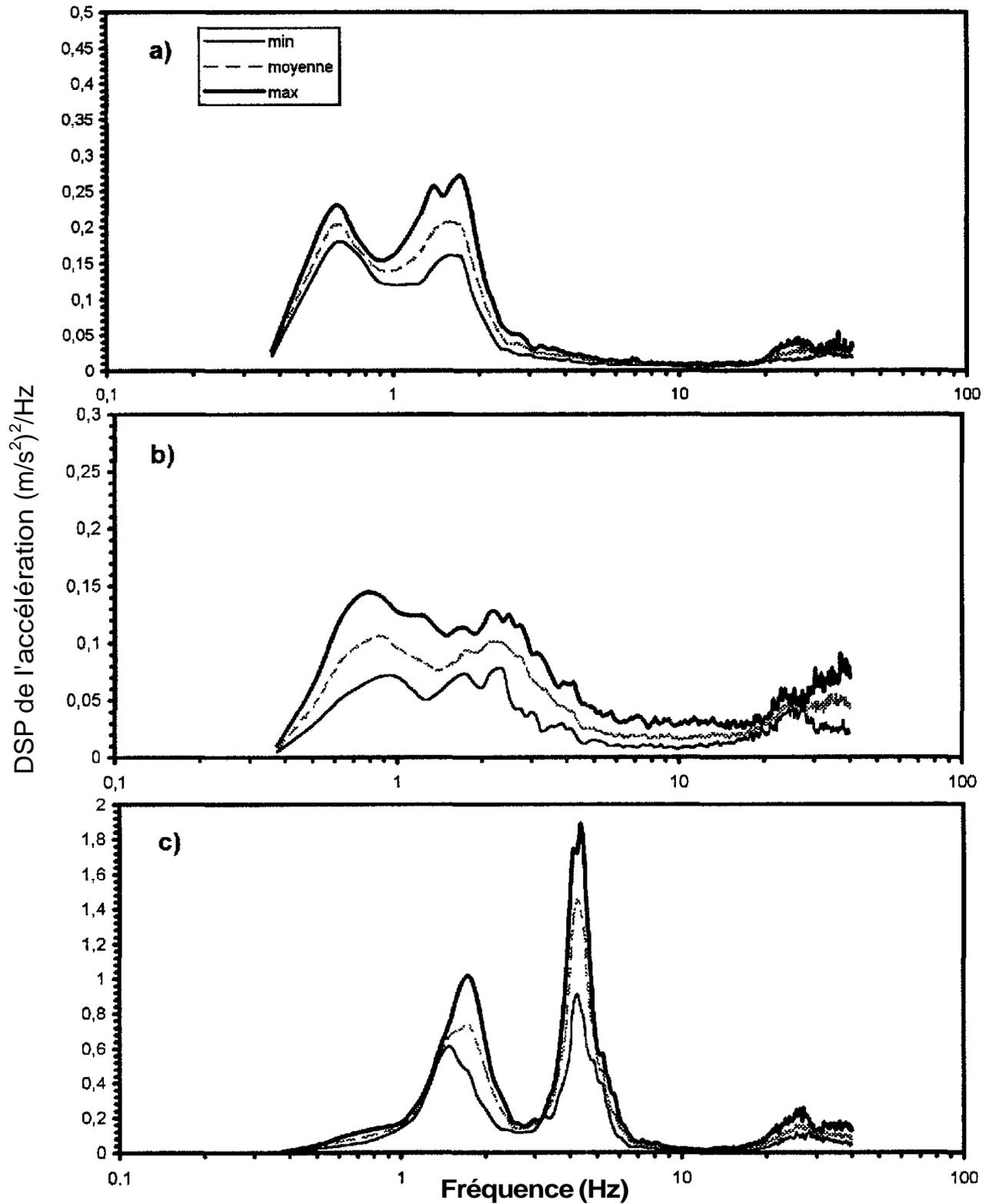


Figure 22: Courbes enveloppes et moyenne des spectres moyens de la DSP des vibrations se rapportant à l'ensemble des activités d'épandage d'abrasifs par les chenillettes de déneigement. Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) latéral (y); c) vertical (z); d) de roulis ( $\phi$ ); et e) de tangage ( $\theta$ ).

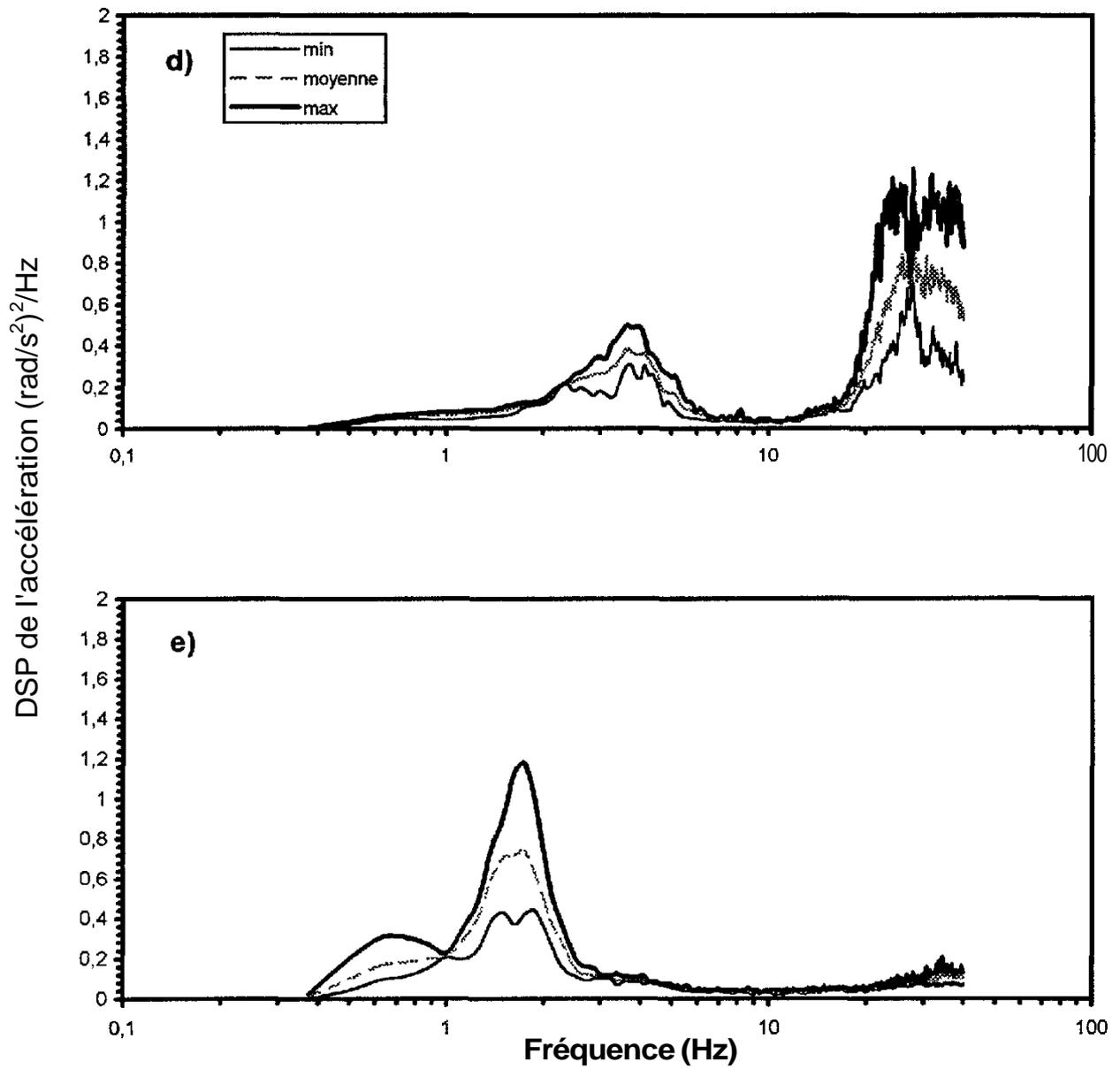


Figure 22: Courbes enveloppes et moyenne des spectres moyens de la DSP des vibrations se rapportant à l'ensemble des activités d'épandage d'abrasifs par les chenillettes de déneigement. Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) latéral (y); c) vertical (z); d) de roulis ( $\phi$ ); et e) detangage ( $\theta$ ).

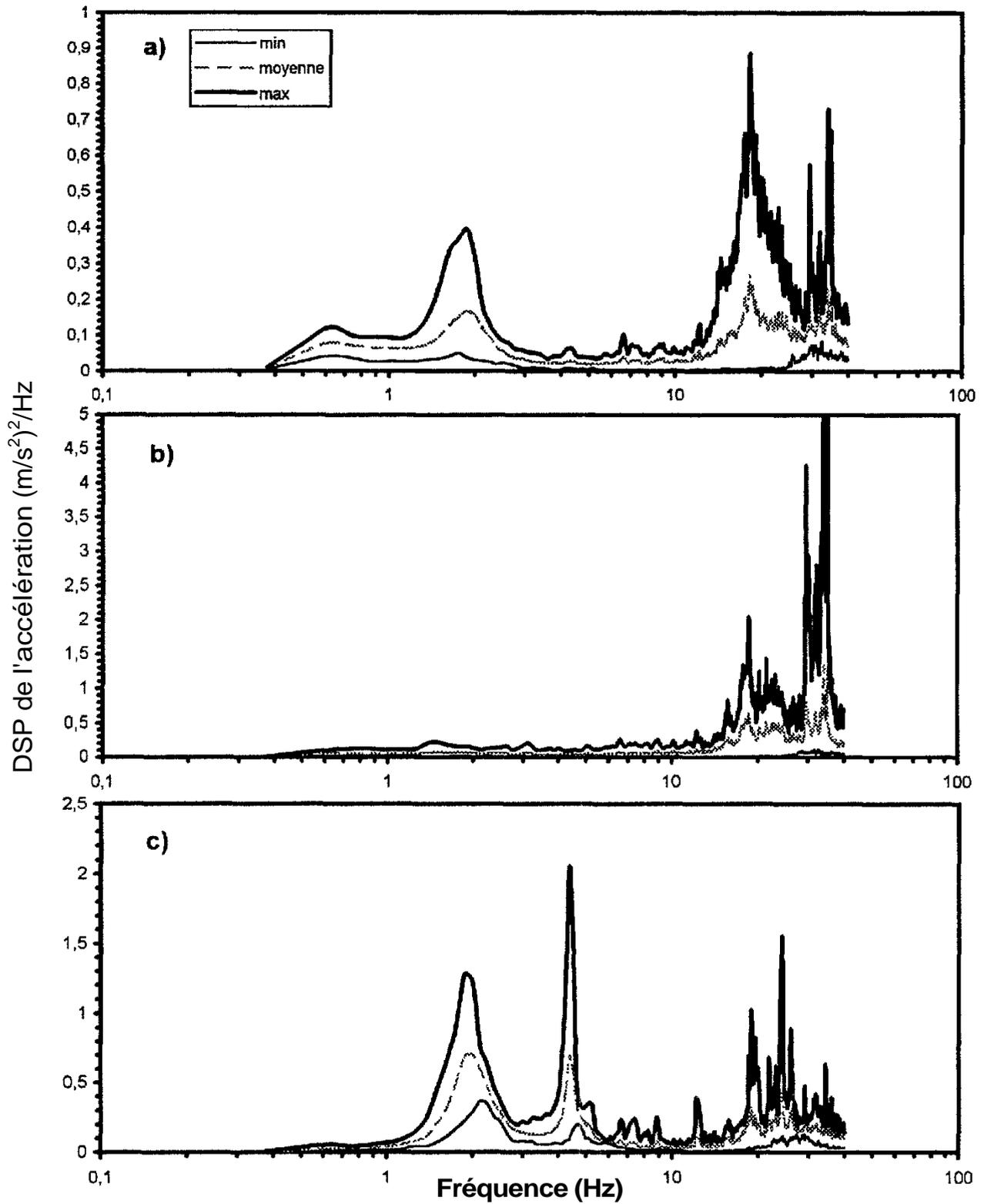


Figure 23: Courbes enveloppes et moyenne des spectres moyens de la DSP des vibrations se rapportant à l'ensemble des activités de déplacement libre sans trémie des chenillettes de déneigement. Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) latéral (y); c) vertical (z); d) de roulis ( $\phi$ ); et e) de tangage ( $\theta$ ).

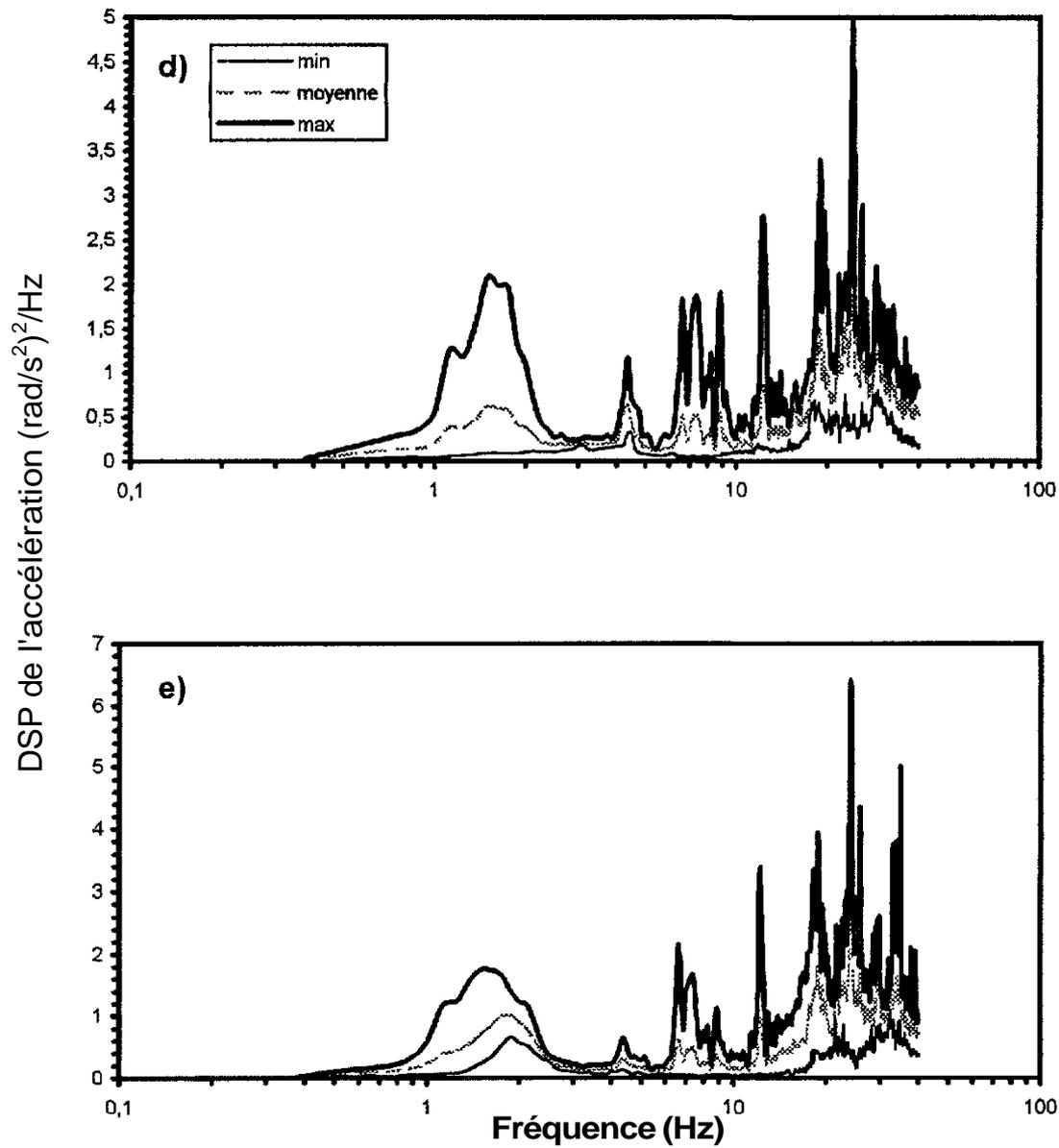


Figure 23: Courbes enveloppes et moyenne des spectres moyens de la DSP des vibrations se rapportant à l'ensemble des activités de déplacement libre sans trémie des chenillettes de déneigement. Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) latéral (y); c) vertical (z); d) de roulis ( $\phi$ ); et e) de tangage ( $\theta$ ).

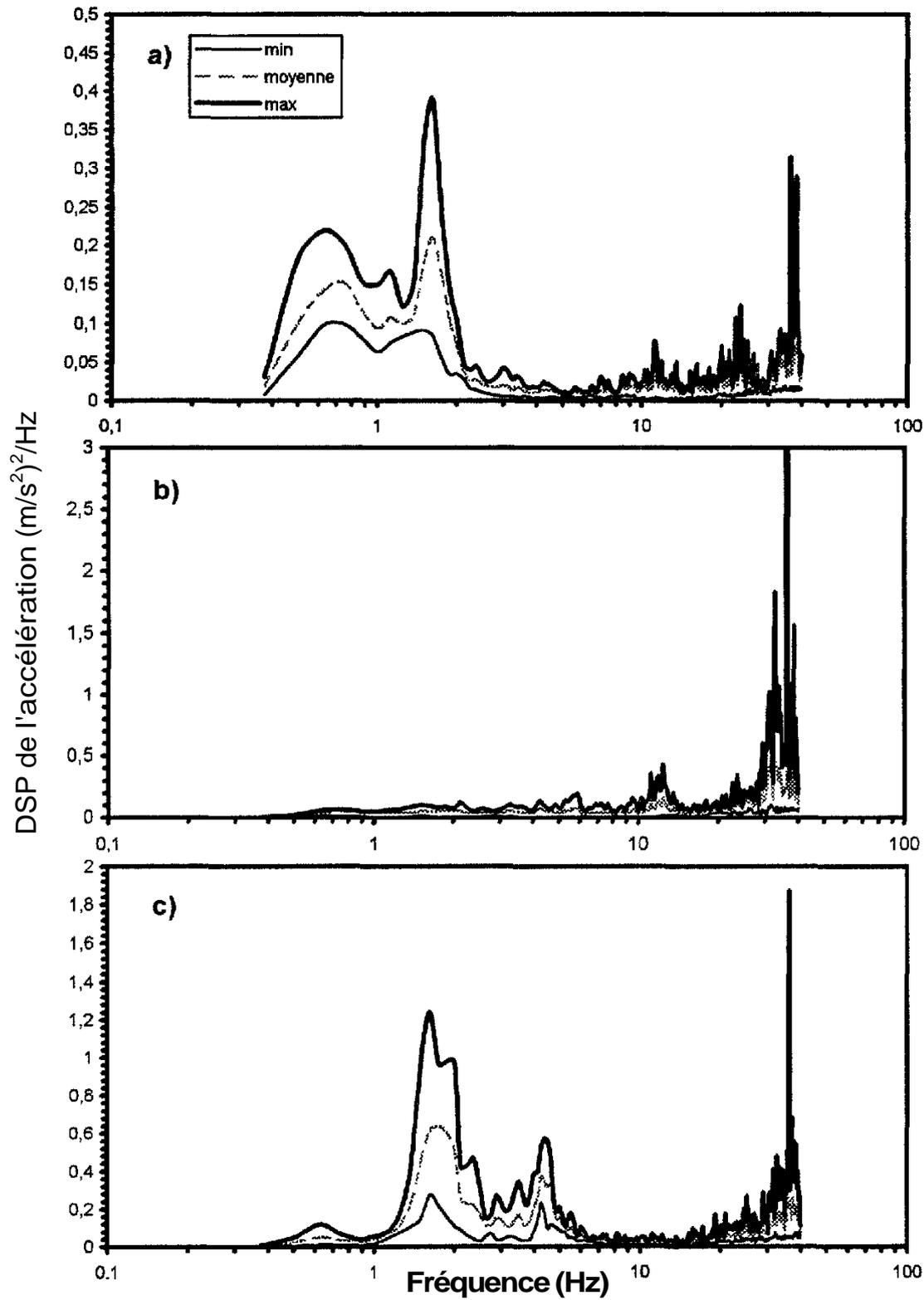


Figure 24: Courbes enveloppes et moyenne des spectres moyens de la DSP des vibrations se rapportant à l'ensemble des activités de déplacement libre avec trémie des chenillettes de déneigement. Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) latéral (y); c) vertical (z); d) de roulis ( $\phi$ ); et e) de tangage ( $\theta$ ).

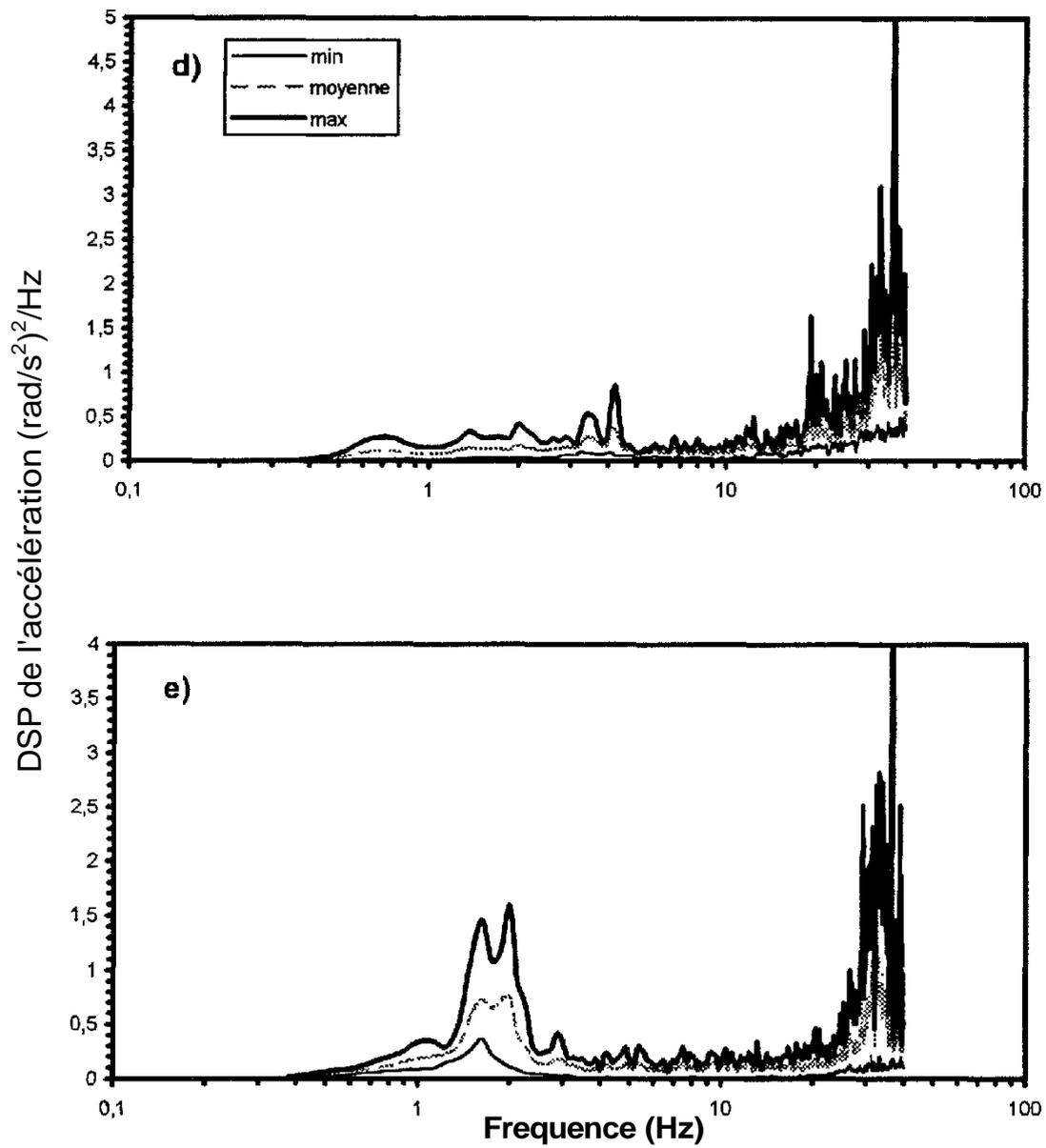


Figure 24: Courbes enveloppes et moyenne des spectres moyens de la DSP des vibrations se rapportant à l'ensemble des activités de déplacement libre avec trémie des chenillettes de déneigement. Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) latéral (y); c) vertical (z); d) de roulis ( $\phi$ ); et e) de tangage ( $\theta$ ).

L'ensemble des spectres en fréquences générés pour les différents modes opératoires et vibratoires démontre la présence d'énergie vibratoire importante à des fréquences excédant 10 Hz, qui ne serait pas liée à des interactions véhicule-terrain. On estime ainsi que cette énergie vibratoire pourrait être négligée en partie dans la définition de classes spectrales spécifiques aux véhicules. On limite ainsi la caractérisation de l'environnement vibratoire des véhicules à la gamme de fréquences comprises entre 0.375 et 40 Hz. Compte tenu des niveaux vibratoires importants enregistrés au-delà de 40 Hz, une différence importante est ainsi notée entre les valeurs efficaces de l'accélération pondérée et non pondérée calculée entre 0.5 et 40 Hz (tableau 7), et entre 0.5 et 80 Hz (tableaux B.1 à B.5), l'effet se faisant ressentir davantage sur les valeurs non pondérées.

Quant aux facteurs de crête établis à partir des relevés accélérométriques servant à définir les spectres de la DSP caractérisant l'environnement vibratoire des chenillettes de déneigement, leur valeur, déterminée à un seuil de probabilité de 1 % ( $f_c$  99<sup>e</sup> perc.), s'est avérée varier en moyenne entre 2.6 et 4.9 pour l'ensemble des cinq modes vibratoires considérés. Par ailleurs, les valeurs de facteur de crête basées sur la crête absolue varient entre 4.3 et 12.1, toute direction confondue, et il n'apparaît pas y avoir un axe pour lequel le facteur de crête est prédominant. Ces valeurs apparaissent dans les tableaux B.1 à B.5 pour chacune des chenillettes de déneigement et des modes opératoires considérés pour définir l'environnement vibratoire de ces véhicules. L'écart important entre ces valeurs est directement lié à la différence entre l'accélération crête correspondant à un seuil de probabilité de 1 % et celle correspondant à la valeur maximale absolue pour l'ensemble des segments.

### **5.2.3 Chariots élévateurs à conduite assise**

Sur la base des spectres moyens de la DSP de l'accélération définis pour chaque chariot élévateur et pour chaque direction de mesure (dont les figures 10a à 10e en sont des exemples), un regroupement peut être effectué en combinant tous les spectres moyens se rapportant aux chariots élévateurs présentant des caractéristiques similaires pour l'ensemble des modes vibratoires. Ainsi, en regroupant par observation, dans un premier temps, tous les spectres moyens de la DSP associés aux véhicules à fourche avec capacité de charge égale ou inférieure à 2.5 tonnes et diamètre moyen extérieur des roues  $D_m$  inférieur à 600 mm (Hyster E 40 XL, E 50 XL et Toyota 2FBCA20), puis aux véhicules à pinces avec capacité de charge entre 2.5 et 5 tonnes et diamètre moyen extérieur des roues  $D_m$  inférieur à 600 mm (Hyster E 50 XL et E 100 XL) et enfin, au véhicule à fourche avec capacité de charge entre 2.5 et 5 tonnes et diamètre moyen extérieur des roues  $D_m$  supérieur à 600 mm (Hyster H 65 XM), des plages applicables à chacune de ces trois catégories de véhicules peuvent être déterminées définissant les limites

dans lesquelles les valeurs moyennes de la DSP de l'accélération sont les plus susceptibles de se retrouver dans des situations de conduite de ces véhicules.

Les figures 25a à 25e, 26a à 26e et 27a à 27e présentent les spectres moyens de la DSP moyenne enregistrés entre 0.375 et 80 Hz pour chacune des trois catégories de véhicules selon chacun des axes de mesure considérés ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $\theta$  et  $\phi$ ). Les courbes enveloppes correspondantes maximale et minimale apparaissent également dans ces figures. Pour chaque mode vibratoire associés à ces catégories de véhicules, la dispersion des valeurs de la DSP moyenne est ainsi tributaire des variations liées aux différences entre véhicules d'une même catégorie, entre conducteurs, surface de roulement et opération effectuée. Les valeurs efficaces de l'accélération pondérée et non pondérée entre 0.5 et 40 Hz se rapportant aux courbes enveloppes maximale, minimale et moyenne de la DSP moyenne ainsi formées pour chacune des trois catégories de véhicules apparaissent dans le tableau 8 pour les différents modes vibratoires. Sont également présentées dans ce tableau, les valeurs qui résulteraient de la combinaison de tous les spectres se rapportant aux véhicules pour lesquels le diamètre moyen extérieur des roues  $D_m$  est inférieur à 600 mm, regroupant ainsi les deux premières catégories de véhicules.

De façon générale, l'ensemble des courbes enveloppes caractérisant les spectres de la DSP applicables aux chariots élévateurs à conduite assise présentent les caractéristiques suivantes pour les différents modes vibratoires indiqués:

- Axe  $x$ : niveaux non pondérés d'amplitude non négligeables, pouvant demeurer importants même avec pondération. Fréquence dominante du mode à proximité de 0.5 à 0.8 Hz;
- Axe  $y$ : mouvements non pondérés d'amplitude non négligeables, devenant négligeables avec pondération. Fréquences dominantes du mode entre 0.5 et 0.8 Hz, et entre 1.5 et 2.5 Hz;
- Axe  $z$ : mode dominant des vibrations. Fréquence dominante du mode entre 5 et 7 Hz;
- Axe  $\phi$ : mouvements d'amplitude généralement faibles. Fréquences dominantes du mode entre 1 et 7 Hz;
- Axe  $\theta$ : mouvements d'amplitude généralement faibles. Fréquences dominantes du mode entre 2 et 7 Hz.

Quant aux facteurs de crête établis à partir des relevés accélérométriques servant à définir les spectres de la DSP caractérisant l'environnement vibratoire des chariots élévateurs à conduite assise, leur valeur, déterminée à un seuil de probabilité de 1 % ( $f_c$  99<sup>e</sup> perc.), s'est avérée varier en moyenne entre 2.6 et 4.0 pour l'ensemble des cinq modes vibratoires considérés. Par ailleurs, les valeurs de facteur de crête basées sur la crête absolue varient entre 5.5 et 13.5, avec possiblement prédominance en direction de l'axe vertical. Ces valeurs apparaissent dans les tableaux C.1 à C.5 pour chacun des chariots élévateurs considérés pour définir l'environnement vibratoire de ces véhicules. L'écart important entre ces valeurs est directement lié à la différence entre l'accélération crête correspondant à un seuil de probabilité de 1 % et celle correspondant à la valeur maximale absolue pour l'ensemble des segments.

**TABLEAU 8: Environnement vibratoire des chariots élévateurs à conduite assise - valeurs efficaces (0.5 - 40 Hz) de l'accélération pondérée et non pondérée pour les différents modes vibratoires**

CATÉGORIE DE VÉHICULE	AXE DE MESURE	Valeur non pondérée $a$ ( $\text{ms}^{-2}$ ou $\text{rads}^{-2}$ )			Valeur pondérée $a_w$ ( $\text{ms}^{-2}$ ou $\text{rads}^{-2}$ )		
		Min	Moyen	Max	Min	Moyen	Max
A FOURCHE 2 - 2.5 tonnes $D_m \leq 600$ mm (61 spectres)	x	0.10	0.38	0.76	0.05	0.18	0.36
	y	0.14	0.36	0.67	0.08	0.19	0.34
	z	0.16	0.59	1.19	0.14	0.56	1.13
	$\phi$	0.15	0.59	1.20	0.04	0.13	0.25
	$\theta$	0.16	0.56	1.16	0.04	0.14	0.28
A PINCES 2.5 - 5 tonnes $D_m \leq 600$ mm (46 spectres)	x	0.12	0.33	0.81	0.06	0.18	0.44
	y	0.12	0.31	0.69	0.06	0.14	0.28
	z	0.18	0.49	0.98	0.15	0.45	0.69
	$\phi$	0.17	0.53	1.02	0.04	0.14	0.24
	$\theta$	0.18	0.54	1.00	0.04	0.12	0.23
COMBINAISON 2, 2.5 et 5 tonnes $D_m \leq 600$ mm (107 spectres)	x	0.08	0.32	0.86	0.04	0.18	0.45
	y	0.10	0.30	0.75	0.06	0.17	0.38
	z	0.13	0.52	1.23	0.12	0.50	1.20
	$\phi$	0.13	0.52	1.13	0.04	0.14	0.27
	$\theta$	0.12	0.52	1.20	0.03	0.13	0.30
À FOURCHE 3.25 tonnes $D_m > 600$ mm (8 spectres)	x	0.45	0.57	0.69	0.32	0.41	0.49
	y	0.35	0.40	0.46	0.15	0.18	0.21
	z	0.70	0.83	1.04	0.64	0.77	0.99
	$\phi$	0.74	0.84	0.97	0.23	0.26	0.30
	$\theta$	0.68	0.81	1.03	0.18	0.23	0.29

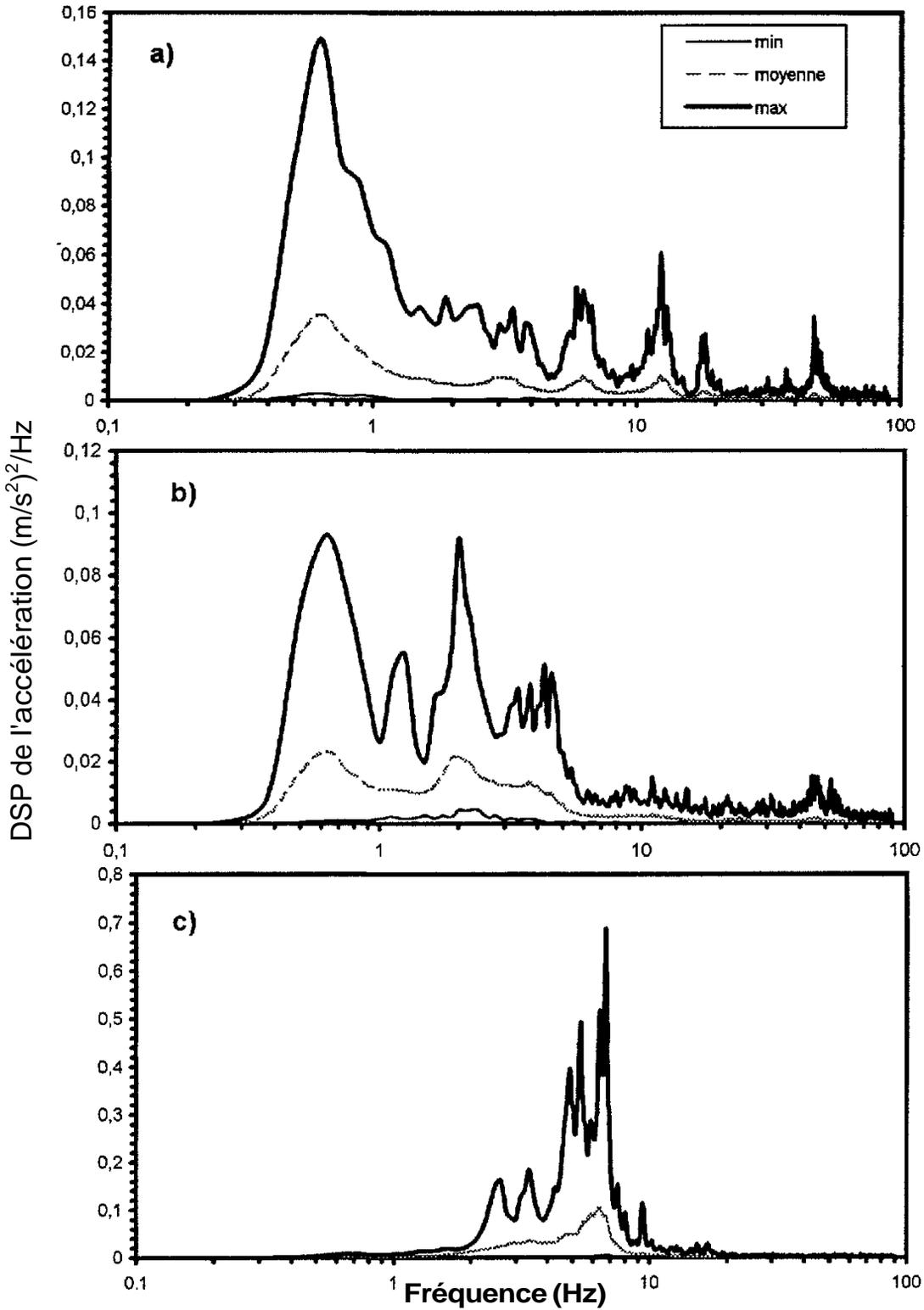


Figure 25: Courbes enveloppes et moyenne des spectres de la DSP moyenne des vibrations se rapportant à l'ensemble des chariots élévateurs à fourche avec capacité de charge égale ou inférieure à 2.5 tonnes et  $D_m < 600$  mm. Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) latéral (y); c) vertical (z); d) de roulis ( $\phi$ ); et e) de tangage ( $\theta$ ).

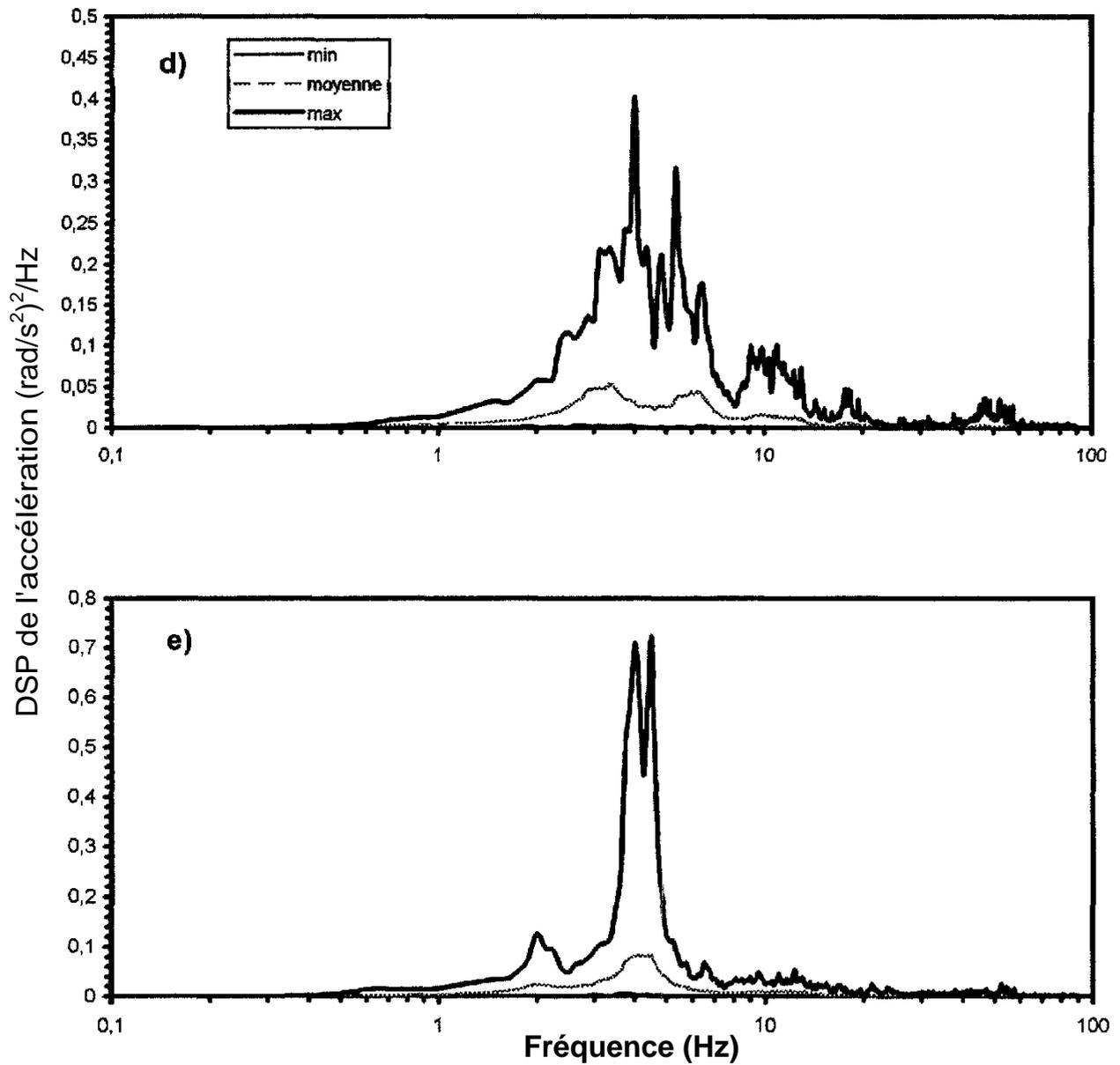


Figure 25: Courbes enveloppes et moyenne des spectres de la DSP moyenne des vibrations se rapportant à l'ensemble des chariots élévateurs à fourche avec capacité de charge égale ou inférieure à 2.5 tonnes et  $D_m \leq 600$  mm. Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) latéral (y); c) vertical (z); d) de roulis ( $\phi$ ); et e) de tangage ( $\theta$ ).

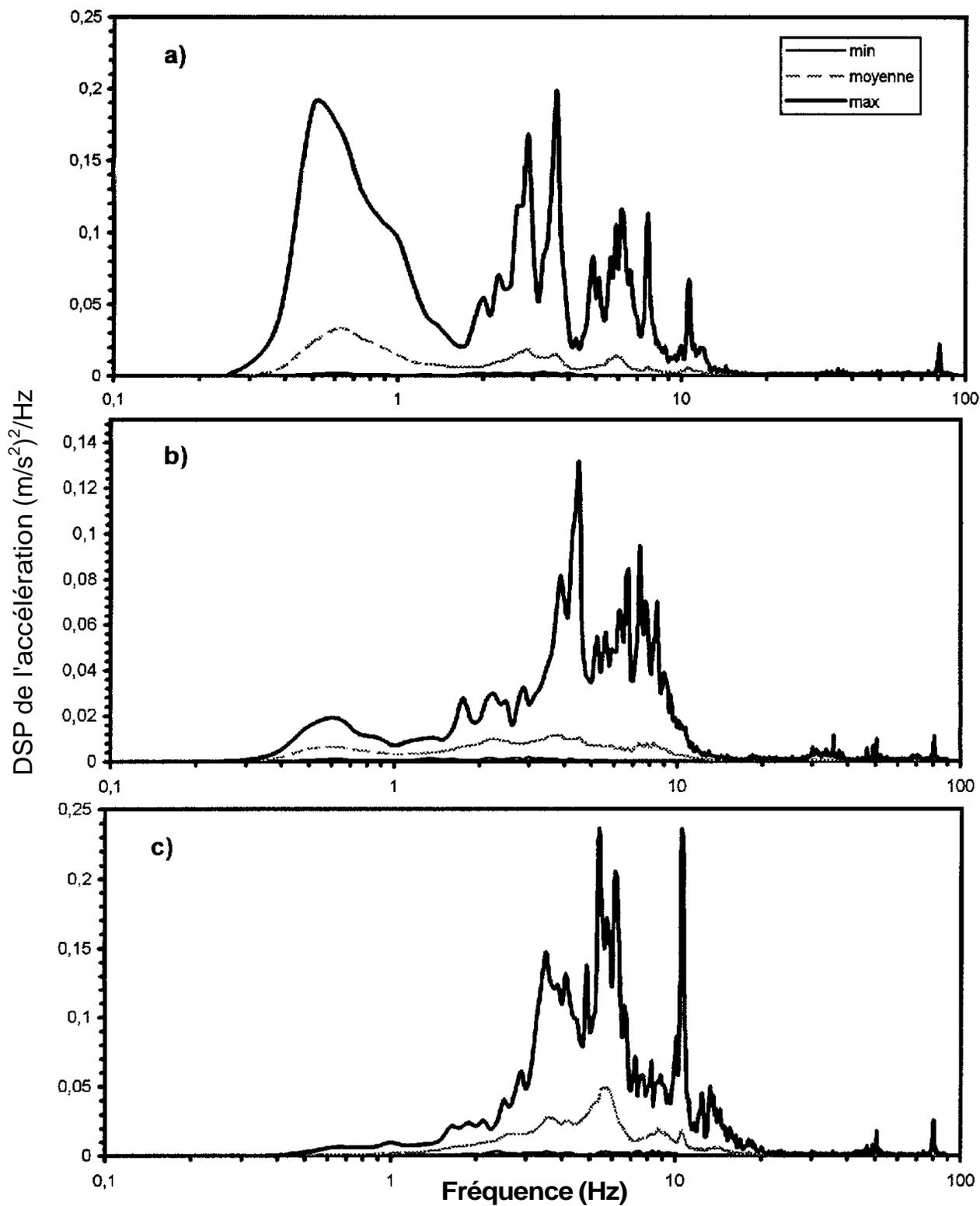


Figure 26: Courbes enveloppes et moyenne des spectres de la DSP moyenne des vibrations se rapportant à l'ensemble des chariots élévateurs à pinces avec capacité de charge entre 2.5 et 5 tonnes et  $D_m \leq 600$  mm. Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) latéral (y); c) vertical (z); d) de roulis ( $\phi$ ); et e) detangage ( $\theta$ ).

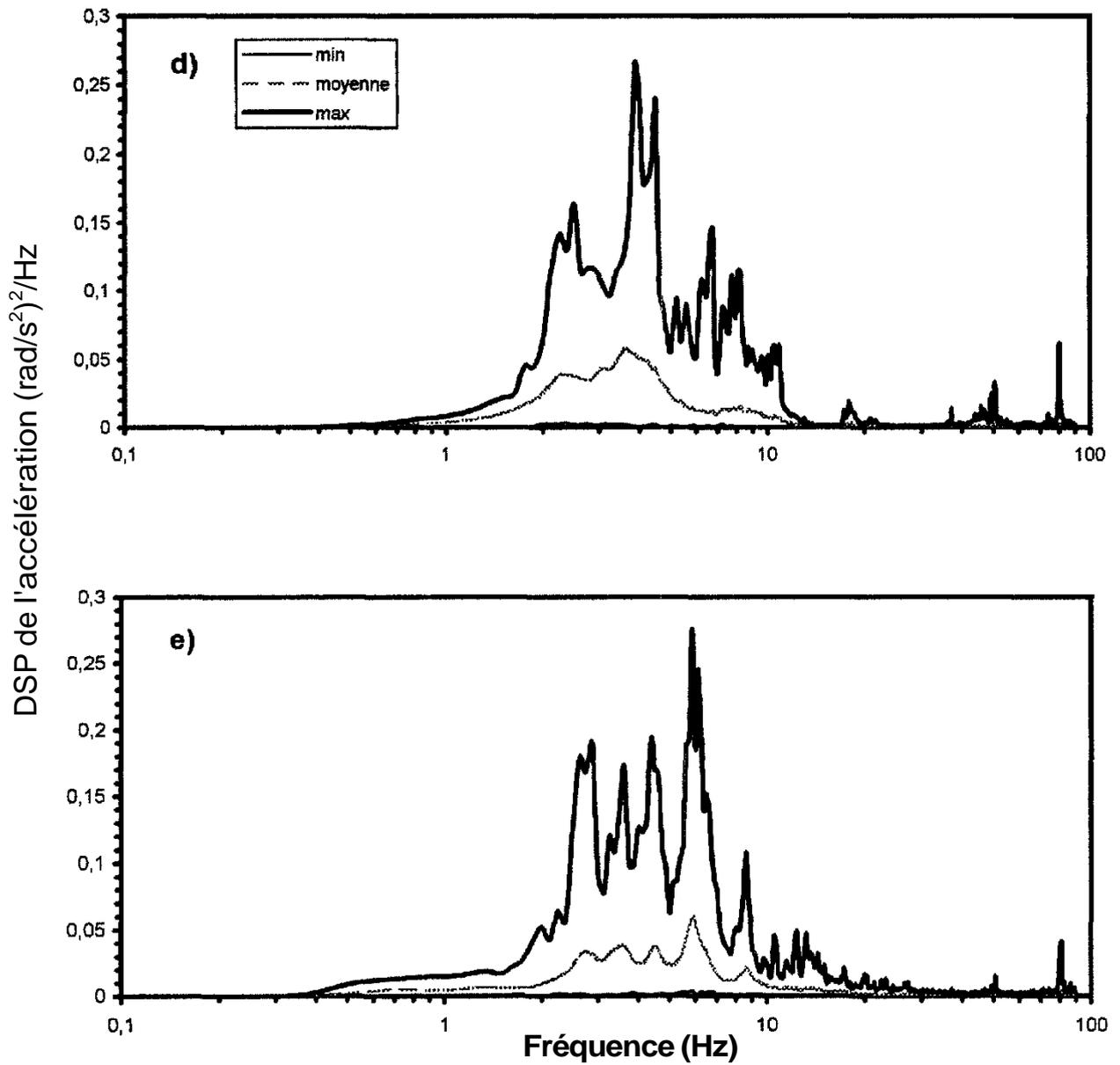


Figure 26: Courbes enveloppes et moyenne des spectres de la DSP moyenne des vibrations se rapportant à l'ensemble des chariots élévateurs à pinces avec capacité de charge entre 2.5 et 5 tonnes et  $D_m \leq 600$  mm. Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) latéral (y); c) vertical (z); d) de roulis ( $\phi$ ); et e) de tangage ( $\theta$ ).

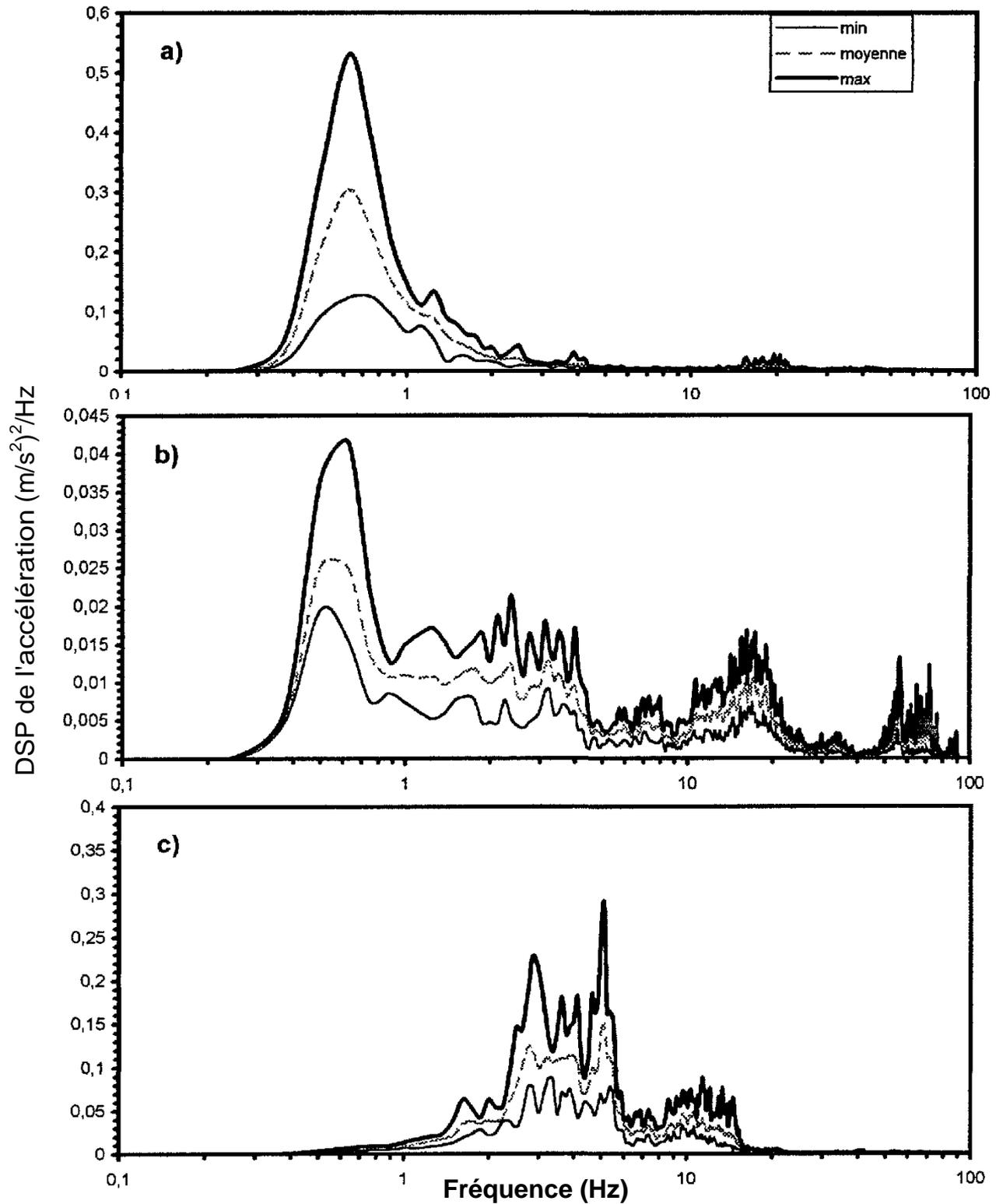


Figure 27: Courbes enveloppes et moyenne des spectres de la DSP moyenne des vibrations se rapportant au chariot élévateur à fourche avec capacité de charge de 3.25 tonnes et  $D_m > 600$  mm. Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) latéral (y); c) vertical (z); d) de roulis ( $\phi$ ); et e) de tangage ( $\theta$ ).

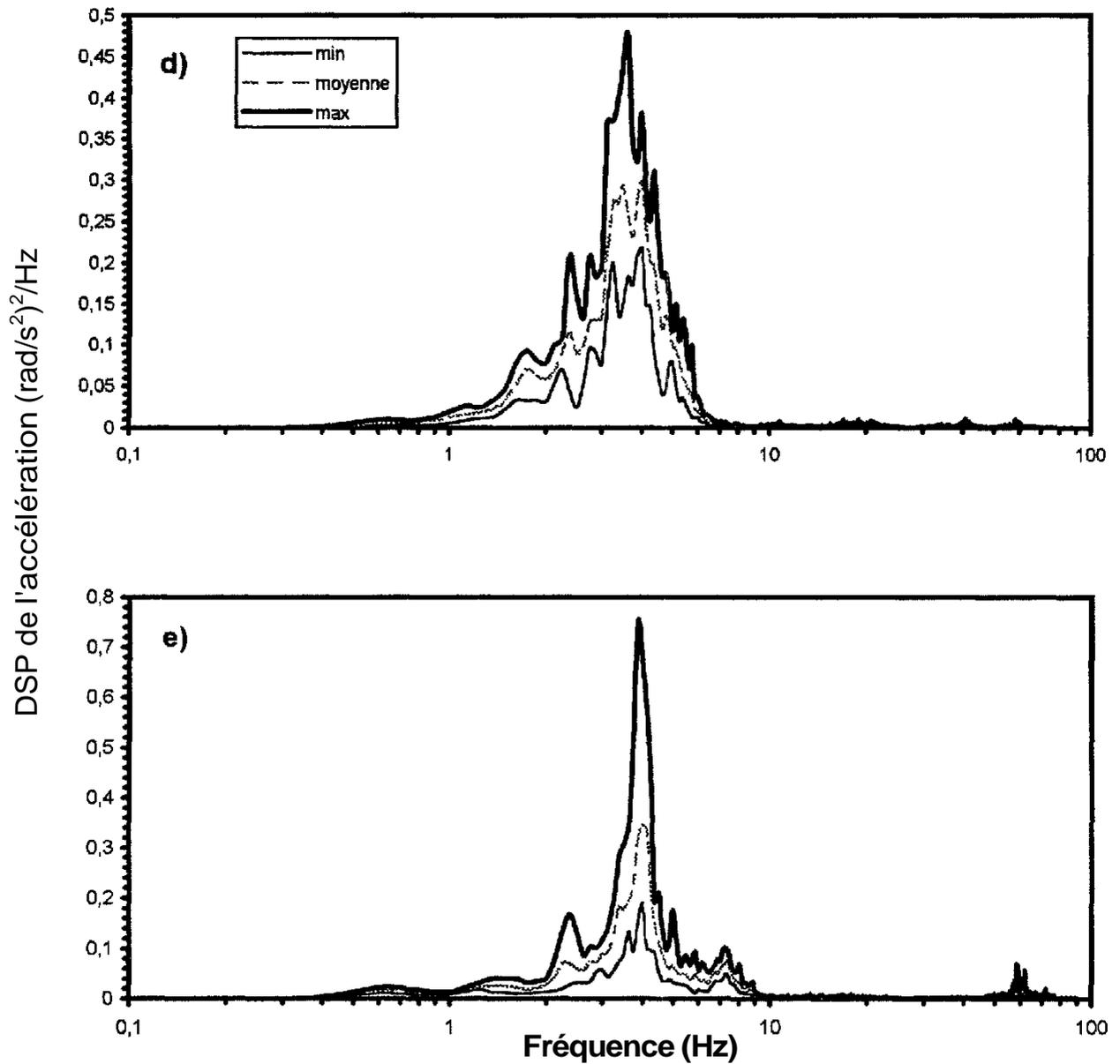


Figure 27: Courbes enveloppes et moyenne des spectres de la DSP moyenne des vibrations se rapportant au chariot élévateur à fourche avec capacité de charge de 3.25 tonnes et  $D_m > 600$  mm. Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) latéral (y); c) vertical (z); d) de roulis ( $\phi$ ); et e) de tangage ( $\theta$ ).

## 5.2.4 Chariots élévateurs à station debout

Sur la base des spectres moyens de la DSP de l'accélération définis pour chaque modèle de chariot élévateur à station debout et pour chaque direction de mesure (dont les figures 11 a à 13c en sont des exemples), un regroupement peut être effectué en combinant tous les spectres moyens se rapportant aux modèles de chariots élévateurs à station debout présentant des caractéristiques similaires pour l'ensemble des modes vibratoires. Ainsi, en regroupant par observation, dans un premier temps, tous les spectres moyens de la DSP associés aux modèles de chariots élévateurs dont la capacité de charge est de deux tonnes (trois véhicules Crown 1992, deux véhicules Clark 1994, deux véhicules Crown 1996 et un véhicule Clark 1990) et ceux dont la capacité de charge est de 2.5 tonnes (Clark 1992 et 1994), des plages applicables à chacune de ces deux catégories de véhicules peuvent être déterminées définissant les limites dans lesquelles les valeurs moyennes de la DSP de l'accélération sont les plus susceptibles de se retrouver dans des situations de conduite de ces véhicules.

Les figures 28a à 28c et 29a à 29c présentent les spectres moyens de la DSP moyenne enregistrés entre 0.375 et 80 Hz pour chacune des deux catégories de véhicules selon chacun des axes de mesure considérés (x, y, z). Les courbes enveloppes correspondantes maximale et minimale apparaissent également dans ces figures. Pour chaque mode vibratoire associé à ces catégories de véhicules, la dispersion des valeurs de la DSP moyenne est ainsi tributaire des variations liées aux différences entre véhicules d'une même catégorie, entre conducteurs, surface de roulement et opération effectuée. Les valeurs efficaces de l'accélération pondérée et non pondérée entre 0.5 et 40 Hz se rapportant aux courbes enveloppes maximale, minimale et moyenne de la DSP moyenne ainsi formées pour chacune des deux catégories de véhicules apparaissent dans le tableau 9 pour les différents modes vibratoires. Sont également incluses, les valeurs découlant d'un regroupement des spectres se rapportant aux deux catégories de véhicules.

De façon générale, l'ensemble des courbes enveloppes caractérisant les spectres de la DSP moyenne applicables aux chariots élévateurs à station debout présentent les caractéristiques suivantes pour les différents modes vibratoires indiqués:

- Axe x: mode dominant des vibrations avec l'axe z. Fréquence dominante du mode à proximité de 0.5 à 0.8 Hz;
- Axe y: mouvements relativement faibles. Fréquence dominante du mode entre 0.5 et 0.8 Hz;
- Axe z: mode dominant des vibrations avec l'axe x. Fréquences dominantes du mode entre 3 et 4 Hz et à proximité de 10 Hz.

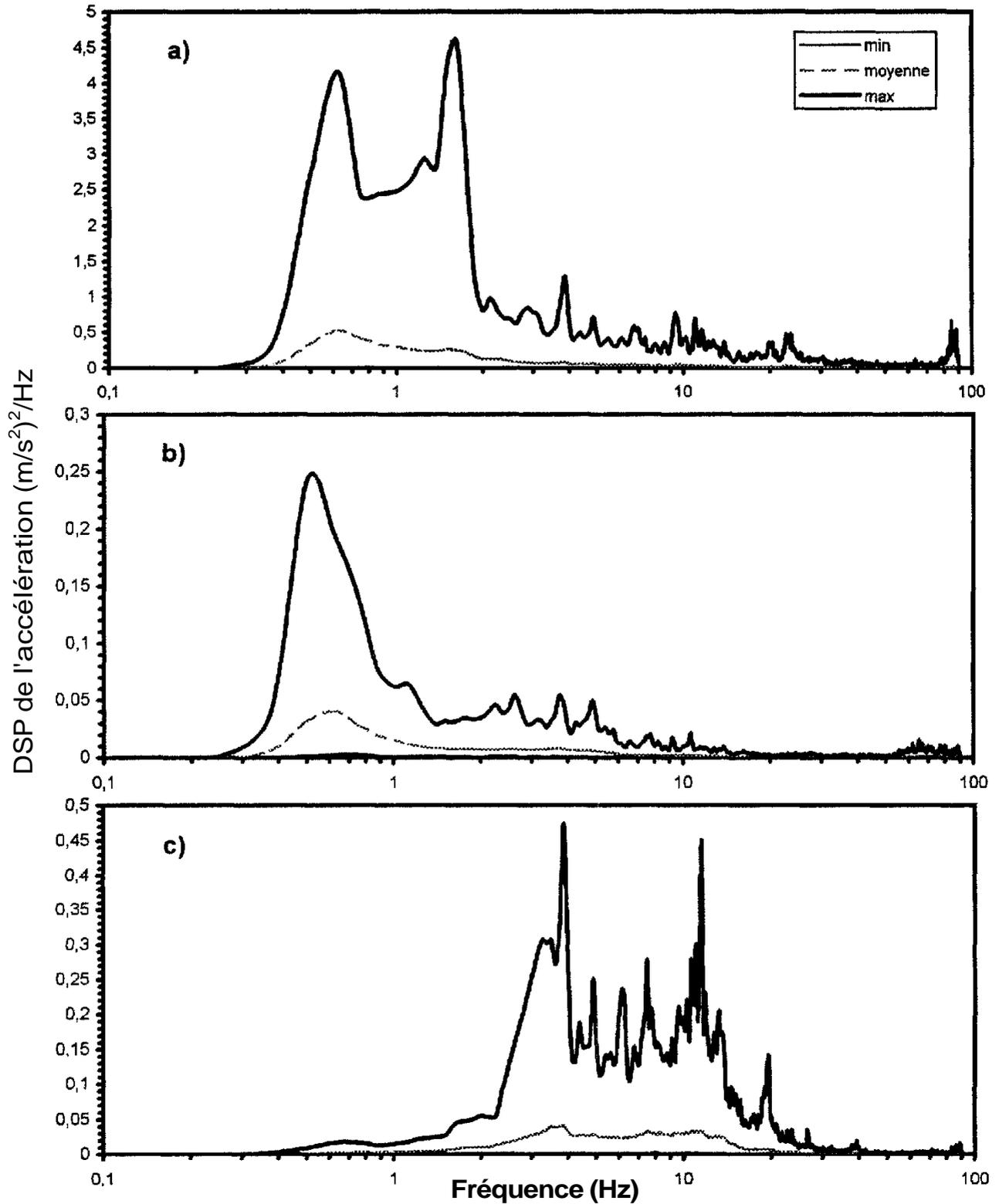


Figure 28: Courbes enveloppes et moyenne des spectres de la DSP moyenne des vibrations se rapportant à l'ensemble des chariots élévateurs à station debout dont la capacité de charge est 2 tonnes. Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) latéral (y); et c) vertical (z).

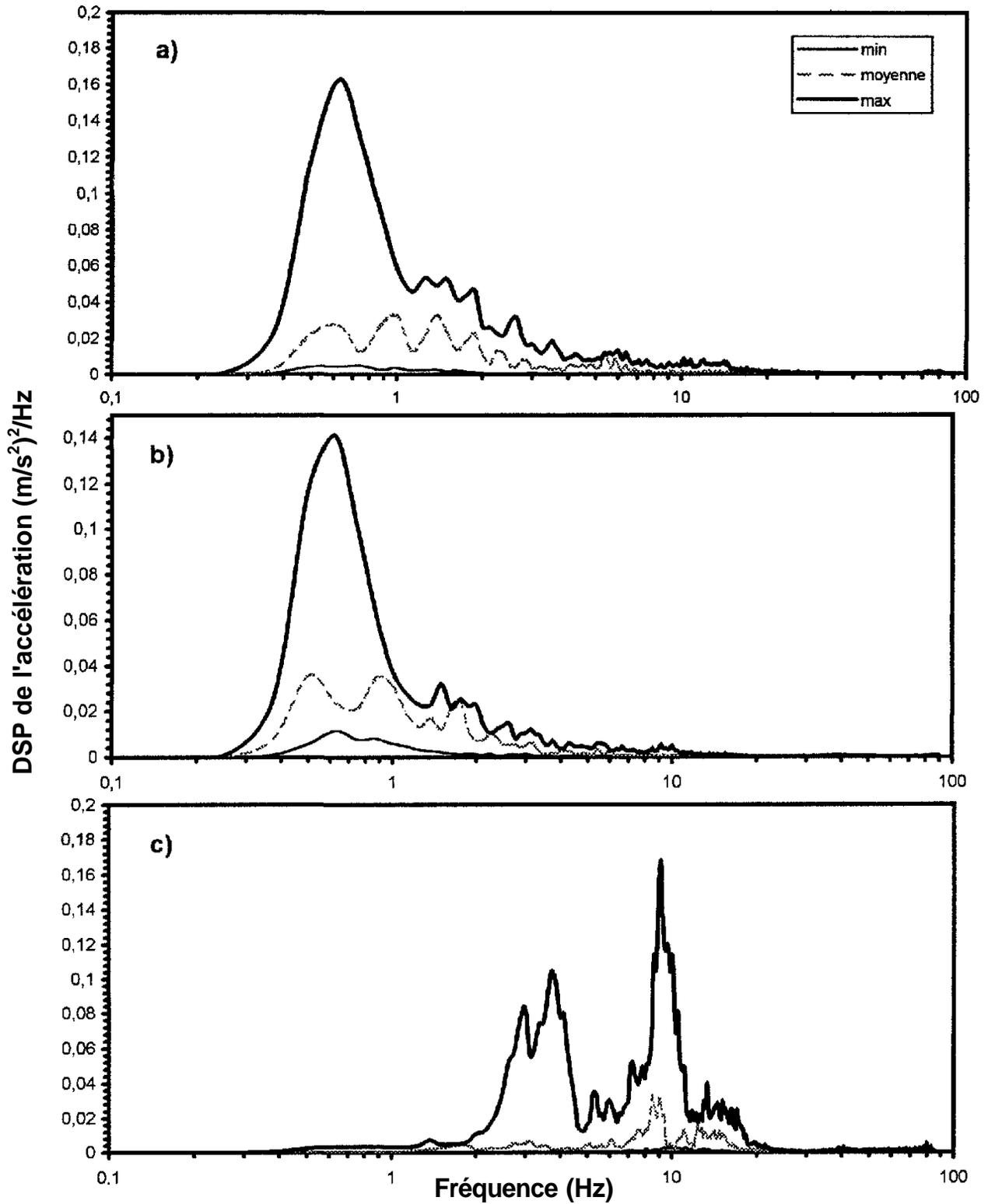


Figure 29: Courbes enveloppes et moyenne des spectres de la DSP moyenne des vibrations se rapportant à l'ensemble des chariots élévateurs à station debout dont la capacité de charge est 2.5 tonnes. Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) latéral (y); et c) vertical (z).

**TABLEAU 9: Environnement vibratoire des chariots élévateurs à station debout - valeurs efficaces (0.5 - 40 Hz) de l'accélération pondérée et non pondérée pour les différents modes vibratoires**

CAPACITÉ DE CHARGE (tonnes)	AXE DE MESURE	Valeur non pondérée a (ms <sup>-2</sup> ou rads <sup>-2</sup> )			Valeur pondérée a <sub>w</sub> (ms <sup>-2</sup> ou rads <sup>-2</sup> )		
		Min	Moyen	Max	Min	Moyen	Max
2 (185 spectres)	x	0.15	1.15	3.40	0.11	0.60	2.20
	y	0.10	0.27	0.60	0.07	0.17	0.39
	z	0.14	0.64	1.52	0.13	0.53	1.34
2.5 (31 spectres)	x	0.11	0.28	0.46	0.07	0.21	0.34
	y	0.12	0.22	0.35	0.09	0.18	0.27
	z	0.15	0.43	0.78	0.14	0.40	0.72
COMBINAISON 2 et 2.5 (216 spectres)	x	0.11	0.71	3.40	0.07	0.46	2.20
	y	0.10	0.24	0.60	0.06	0.18	0.39
	z	0.13	0.53	1.52	0.12	0.49	1.34

Quant aux facteurs de crête établis à partir des relevés accélérométriques servant à définir les spectres de la DSP caractérisant l'environnement vibratoire des chariots élévateurs à station debout, leur valeur déterminée à un seuil de probabilité de 1 % (f<sub>c</sub> 99<sup>e</sup> perc.) s'est avérée varier en moyenne entre 2.2 et 5.4, tandis que la variation s'est vue plutôt être entre 5.6 et 25.2 sur la base de la valeur crête absolue. Il s'agit ainsi d'un environnement vibratoire qui pourrait être qualifié comme étant hautement impulsionnel sur la base de la crête absolue, mais à caractère impulsionnel faible sur la base du 99<sup>e</sup> percentile. Les valeurs du facteur de crête basées sur la valeur absolue et le 99<sup>e</sup> percentile apparaissent dans les tableaux D.1 à D.3 pour chacun des modèles de chariots élévateurs considérés pour définir l'environnement vibratoire de ces véhicules. L'écart important entre ces valeurs est directement lié à la différence entre l'accélération crête correspondant à un seuil de probabilité de 1% et celle correspondant à la valeur maximale absolue pour l'ensemble des segments.

### 5.3 Élaboration des classes spectrales vibratoires

De façon générale, les courbes moyennes de la DSP moyenne définissent les spectres en fréquence moyens des vibrations enregistrées à proximité du point de fixation du siège ou encore des pieds du conducteur lors d'opérations courantes de conduite. Il s'agit ainsi des spectres qui définissent les caractéristiques de l'environnement vibratoire moyen spécifique aux catégories de véhicules visés. Par ailleurs, les courbes enveloppes maximales et minimales définissent les limites dans lesquelles les valeurs de la densité spectrale de puissance moyenne des accélérations vibratoires sont les plus susceptibles de se retrouver pour chaque véhicule faisant partie de la catégorie visée; la plage de valeurs tenant compte des différences entre véhicules,

modes opératoires et circuits parcourus. En ce sens, les spectres de la DSP définis par les courbes maximales et minimales sont peu susceptibles de représenter intégralement à toutes les fréquences les amplitudes des accélérations vibratoires qui pourraient être associées à un véhicule en particulier faisant partie de la catégorie visée. Par contre, la courbe enveloppe maximale pourrait permettre de définir un environnement vibratoire plus sévère que la moyenne, et donc constituer un majorant pour servir dans l'élaboration de codes d'essai en laboratoire pour évaluer la performance de sièges à suspension pour les véhicules visés. Cette pratique est d'ailleurs celle qui a été adoptée dans l'élaboration de la norme internationale ISO 7096 [9], applicable aux essais de sièges en laboratoire destinés aux engins de terrassement.

La représentation d'une classe spectrale pour chacun des modes vibratoires peut être réalisée par une courbe qui constitue une approximation au spectre de la DSP moyenne, obtenue en appliquant des fonctions d'optimisation et de lissage visant à limiter l'écart entre cette courbe et le spectre moyen établi sur la base des mesures. Pour des applications visant à définir des conditions vibratoires plus sévères que celles exprimées par le spectre moyen de la DSP, et pour des besoins de simplification, un facteur multiplicatif peut aussi être défini pour chaque mode vibratoire dans le but de représenter approximativement la courbe enveloppe maximale de la DSP par rapport à la courbe moyenne. Ce facteur multiplicatif est sélectionné de façon à ce que le spectre résultant donne une bonne approximation du spectre de la DSP maximale, particulièrement aux fréquences dominantes, et que l'accélération efficace pondérée représentée par ce spectre entre 0.5 et 40 Hz soit la plus près possible des valeurs pondérées maximales rapportées dans les tableaux 6 à 9 pour les différentes catégories de véhicules.

Mathématiquement, les courbes représentant la classe spectrale correspondant à l'amplitude des spectres de la DSP moyenne et sévère pour chacun des modes vibratoires peuvent être exprimées par l'équation suivante:

$$G_m(s) = \left\{ K_m \frac{s \prod_{i=1}^n (s^2 + A_{mi}s + B_{mi})}{\prod_{k=1}^p (s^2 + C_{mk}s + D_{mk})} \right\}^2 \quad [3]$$

où m représente le mode vibratoire (x, y, z,  $\phi$  ou  $\theta$ ), G(s) est la fonction exprimant l'amplitude de la DSP à la fréquence f, où  $s = jf$  et  $j = \sqrt{-1}$ . Les constantes n et p établissent l'ordre des fonctions requises pour obtenir une approximation valable des courbes, où  $n = p-1$ . La constante  $K_m$  assume différentes valeurs, selon que la DSP moyenne ou sévère soit requise. Les valeurs des constantes applicables aux courbes définissant l'amplitude de la DSP des

accélérations vibratoires, caractérisant les classes spectrales des différentes catégories de véhicules visés pour les différents modes vibratoires, apparaissent dans les sections suivantes relatives à chacune d'elles.

### 5.3.1 Autobus urbains

Les résultats obtenus dans les figures 17a à 17e suggèrent que l'environnement vibratoire des autobus urbains puisse être représenté par une seule et unique classe spectrale de vibrations pour chacun des modes vibratoires associés aux axes  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $\phi$  et  $\theta$ . Les figures 30a à 30e illustrent les courbes résultantes qui définissent la classe spectrale des autobus urbains entre 0.375 et 40 Hz pour les conditions moyennes (i.e. spectres moyens) et sévères (i.e. enveloppes maximales) pour chacun des modes vibratoires associés aux axes  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $\phi$  et  $\theta$ . Ces courbes sont également comparées dans ces figures aux spectres de la DSP moyenne et maximale tels qu'obtenus sur la base des mesures. Les valeurs des constantes (équation 3) applicables aux courbes définissant l'amplitude de la DSP des accélérations vibratoires, caractérisant la classe spectrale des autobus urbains pour les différents modes vibratoires et les différents degrés de sévérité de l'environnement apparaissent dans le tableau 10.

**TABLEAU 10: Valeurs des constantes applicables à l'équation de la DSP qui caractérise la classe spectrale des autobus urbains pour les différents modes vibratoires**

Mode vibratoire $m$	$K_m$		Numérateur		Dénominateur	
	Moyen	Sévère	$A_{mi}$	$B_{mi}$	$C_{mk}$	$D_{mk}$
$x$	0.46	0.67	2.74	22.89	6.46	88.36
			3.22	2.60	1.95	10.89
					0.44	0.64
$y$	0.46	0.66	-6.94	12.05	3.69	153.14
					0.42	0.56
$z$	1.19	1.59	2.09	35.61	5.09	110.25
					0.74	2.10
$\phi$	0.55	0.76	2.09	35.61	5.09	110.25
					0.74	2.10
$\theta$	0.10	0.14	14.95	55.88	4.45	138.06
					0.38	1.27

Par ailleurs, les valeurs efficaces de l'accélération pondérée et non pondérée entre 0.5 et 40 Hz se rapportant à la classe spectrale ainsi définie pour les autobus urbains, apparaissent dans le tableau 11 pour des conditions moyenne et sévère. Ces valeurs sont obtenues par intégration des équations définissant la DSP pour les différents modes vibratoires, tout en incluant, le cas échéant, les équations définissant les fonctions de transfert caractérisant les filtres de

pondération tels que précisés à l'annexe A de la norme ISO 2631-1(1997) [11]. En comparaison avec les valeurs des accélérations pondérées et non pondérées rapportées dans le tableau 6 pour caractériser l'environnement vibratoire des autobus urbains, on peut conclure que les valeurs découlant de la définition de la classe spectrale correspondante dans le tableau 11 sont en très bon accord, particulièrement pour les conditions moyennes. Les valeurs maximales de l'amplitude de la DSP ( $G_m(s)$  max) définissant cette classe spectrale pour les différents modes vibratoires apparaissent également dans le tableau 11 pour les conditions moyenne et sévère.

**TABLEAU 11: Classe spectrale des autobus urbains -valeurs efficaces de l'accélération pondérée et non pondérée (0.5 - 40 Hz) pour les différents modes vibratoires**

Mode vibratoire m	$G_m(s)$ max ( $ms^{-2}$ ) <sup>2</sup> /Hz ou ( $rads^{-2}$ ) <sup>2</sup> /Hz		Accélération non pondérée a ( $ms^{-2}$ ou $rads^{-2}$ )		Accélération pondérée a <sub>w</sub> ( $ms^{-2}$ ou $rads^{-2}$ )	
	Moyen	Sévère	Moyen	Sévère	Moyen	Sévère
x	0.0064 (0.875 Hz) 0.0037 (3 Hz) 0.0043 (9.625 Hz)	0.0134 (0.875 Hz) 0.0078 (3 Hz) 0.0091 (9.625 Hz)	0.23	0.33	0.10	0.14
y	0.0090 (0.75 Hz) 0.0184 (12.25 Hz)	0.0183 (0.75 Hz) 0.0377 (12.25 Hz)	0.33	0.47	0.09	0.13
z	0.245 (1.5 Hz) 0.0292 (10.875 Hz)	0.433 (1.5 Hz) 0.0517 (10.875 Hz)	0.69	0.92	0.48	0.65
φ	0.0301 (0.875 Hz) 0.0304 (11.5 Hz)	0.0582 (0.875 Hz) 0.0587 (11.5 Hz)	0.43	0.60	0.13	0.18
θ	0.0183 (1.125 Hz) 0.00123 (11.375 Hz)	0.0358 (1.125 Hz) 0.0024 (11.375 Hz)	0.14	0.19	0.08	0.11

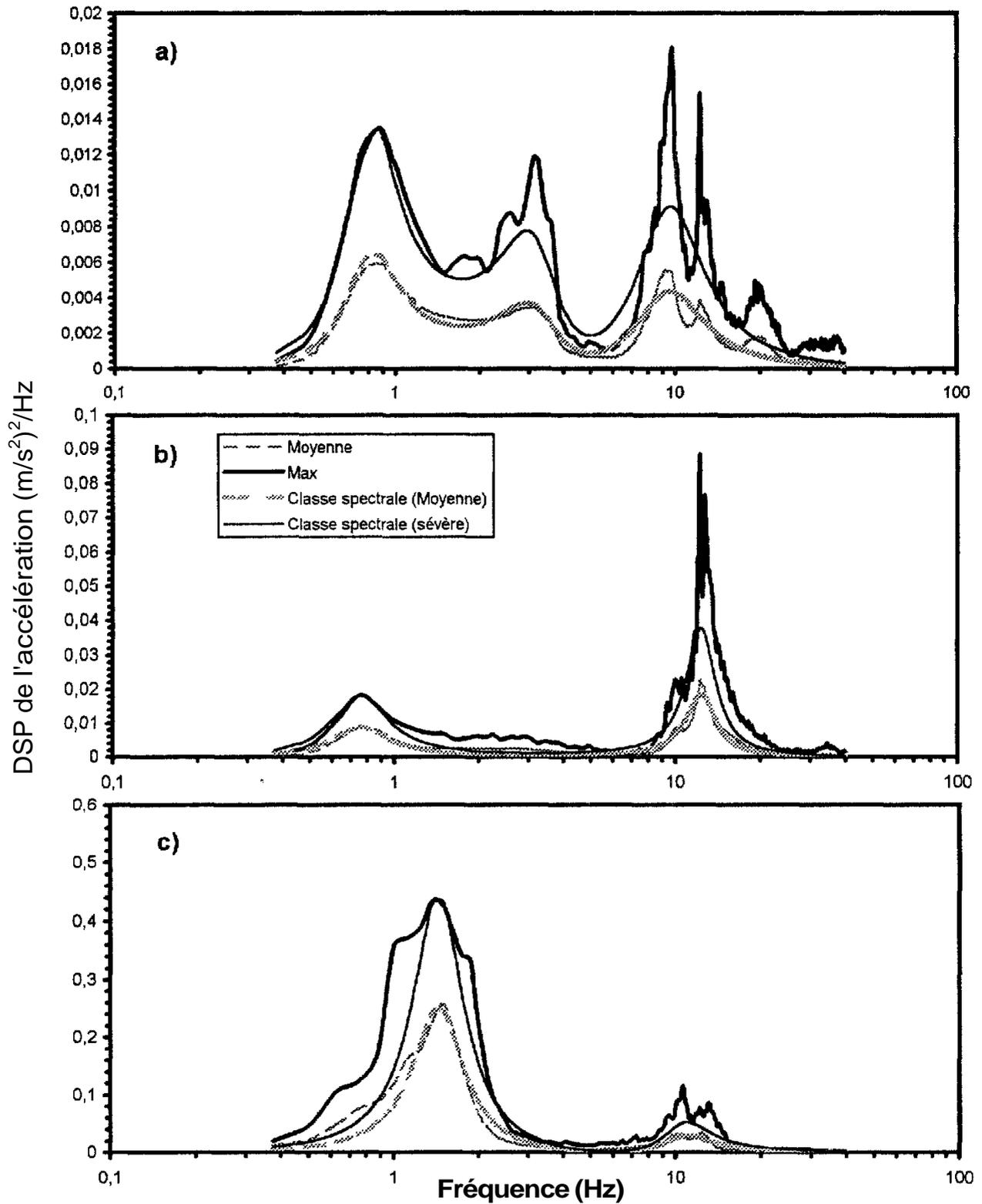


Figure 30: Spectres de la DSP définissant la classe spectrale des vibrations des autobus urbains pour des conditions moyenne et sévère. Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) latéral (y); c) vertical (z); d) de roulis ( $\phi$ ); et e) de tangage ( $\theta$ ).

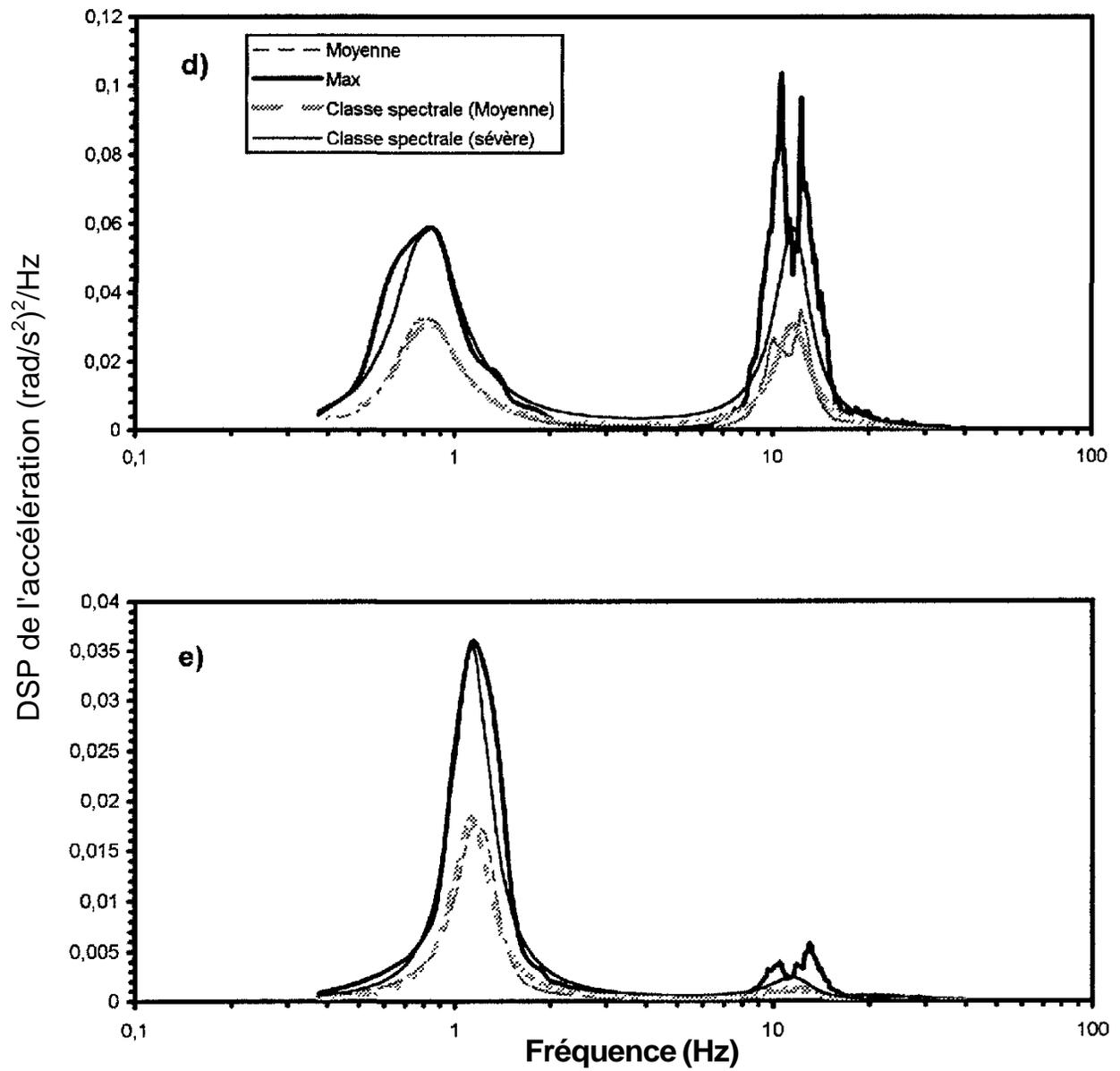


Figure 30: Spectres de la DSP définissant la classe spectrale des vibrations des autobus urbains pour des conditions moyenne et sévère. Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) latéral (y); c) vertical (z); d) de roulis ( $\phi$ ); et e) de tangage ( $\theta$ ).

### 5.3.2 Chenillettes de déneigement

Les figures 21 a à 21e, 22a à 22e, 23a à 23e et 24a à 24e représentent essentiellement les spectres de la densité spectrale de puissance qui servent à définir les classes spectrales des vibrations propres aux chenillettes de déneigement pour les différents modes opératoires et vibratoires. Dans ces figures, les courbes moyennes définissent les spectres en fréquence moyens des vibrations enregistrées à proximité du point de fixation du siège lors d'opérations courantes de conduite associées aux modes opératoires indiqués. Par ailleurs, les courbes enveloppes maximales et minimales définissent les valeurs extrêmes de la densité spectrale de puissance moyenne des accélérations vibratoires atteintes à chaque fréquence, en considérant tous les spectres moyens générés pour l'ensemble des chenillettes de déneigement soumis aux modes opératoires indiqués.

Les résultats présentés dans le tableau 7 ainsi que les caractéristiques spectrales rapportées pour les différents modes opératoires des chenillettes de déneigement suggèrent, qu'à des fins de simplification, l'environnement vibratoire de ces véhicules peut être représenté par une seule et unique classe spectrale de vibrations pour chacun des modes vibratoires associés aux axes  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $\phi$  et  $\theta$ , indépendamment des modes opératoires. Cette classe spectrale peut être définie pour chacun des modes vibratoires sur la base d'une courbe qui représente la moyenne des spectres définis pour chacun des modes opératoires, telle que représentée dans les figures 31 a à 31e.

La classe spectrale propre aux chenillettes de déneigement constitue une approximation aux spectres de la DSP moyenne apparaissant dans les figures 31 a à 31e, obtenue en leur appliquant des fonctions d'optimisation et de lissage visant à limiter l'écart avec le spectre mesuré. Pour des applications visant à définir des conditions vibratoires plus sévères que celles exprimées par le spectre moyen de la DSP, un facteur multiplicatif est aussi défini dans le but de représenter approximativement la courbe enveloppe maximale de la DSP ainsi que les valeurs d'accélération efficace pondérées rapportées dans le tableau 7. Les figures 32a à 32e illustrent les courbes résultantes qui définissent la classe spectrale des chenillettes de déneigement entre 0.375 et 40 Hz pour les conditions moyennes (i.e. spectres moyens) et sévères (i.e. enveloppes maximales) pour chacun des modes vibratoires associés aux axes  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $\phi$  et  $\theta$ , respectivement. Ces courbes sont également comparées dans ces figures aux spectres de la DSP moyenne et maximale tels qu'obtenus sur la base des mesures. Les valeurs des constantes applicables aux courbes définissant l'amplitude de la DSP des accélérations vibratoires caractérisant la classe spectrale des chenillettes de déneigement pour les différents modes vibratoires apparaissent dans le tableau 12.

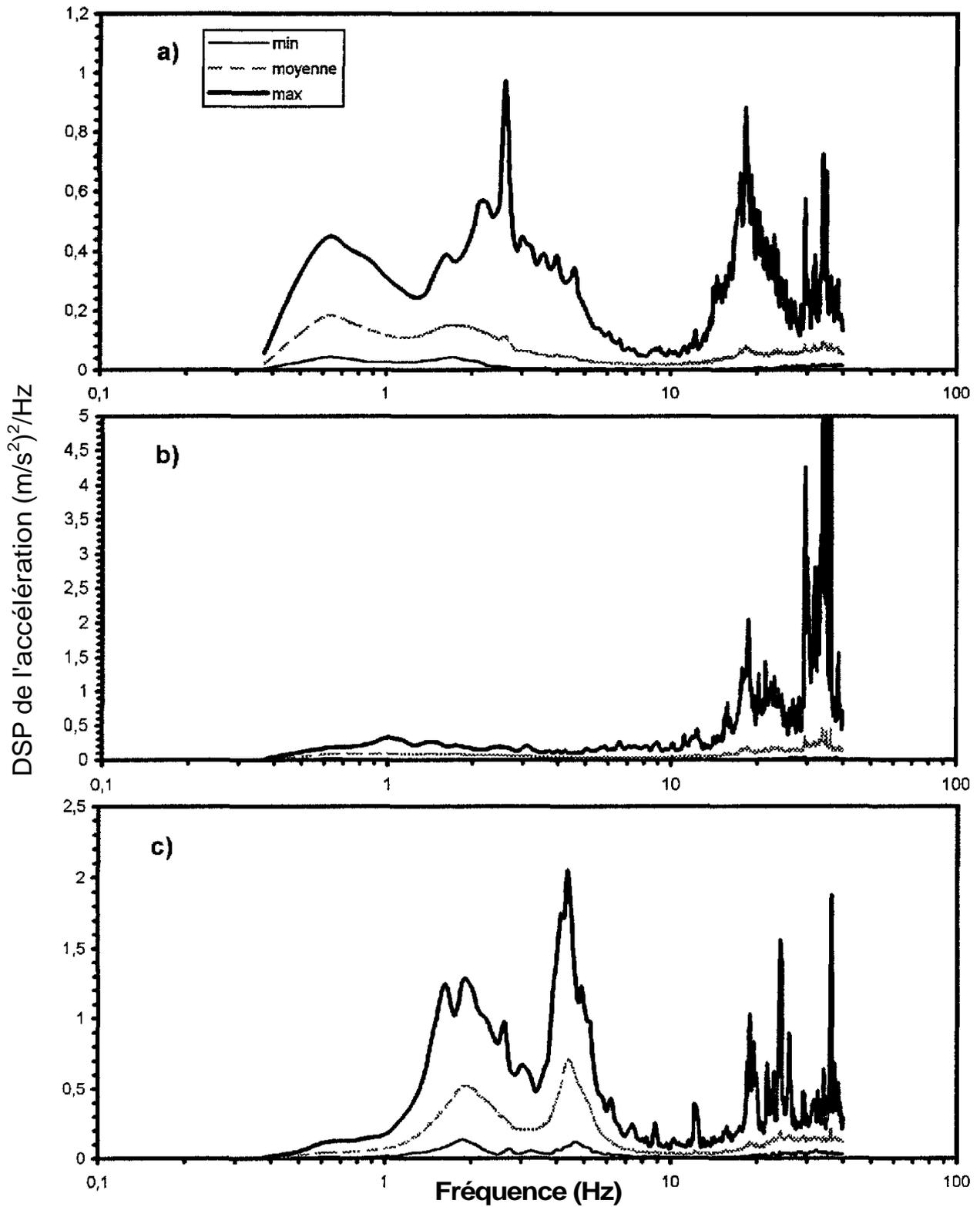


Figure 31: Courbes enveloppes et moyenne des spectres de la DSP des vibrations se rapportant à l'ensemble des chenillettes de déneigement et des modes opératoires. Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) latéral (y); c) vertical (z); d) de roulis ( $\phi$ ); et e) de tangage ( $\theta$ ).

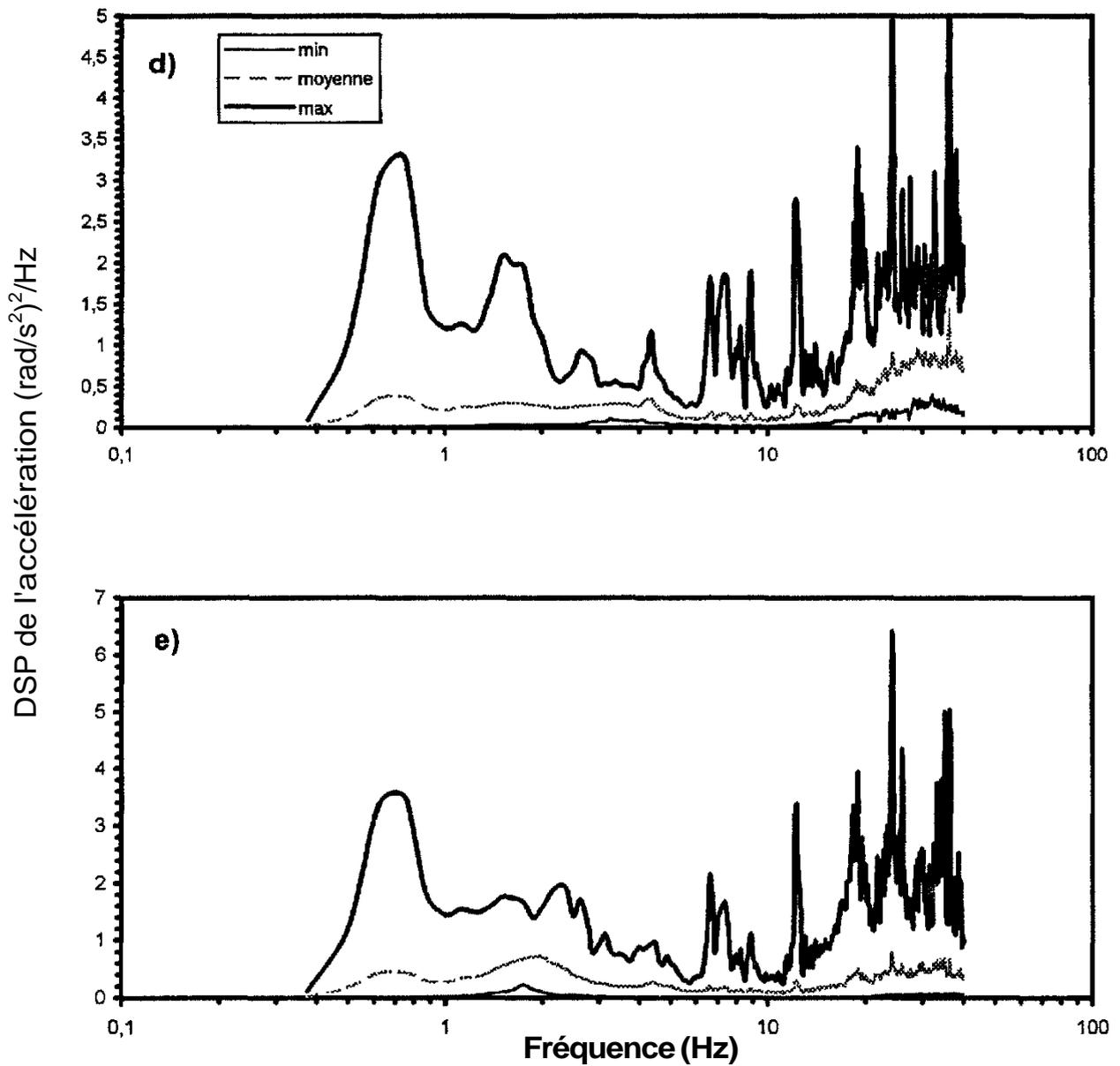


Figure 31: Courbes enveloppes et moyenne des spectres de la DSP des vibrations se rapportant à l'ensemble des chenillettes de déneigement et des modes opératoires. Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) latéral (y); c) vertical (z); d) de roulis ( $\phi$ ); et e) de tangage ( $\theta$ ).

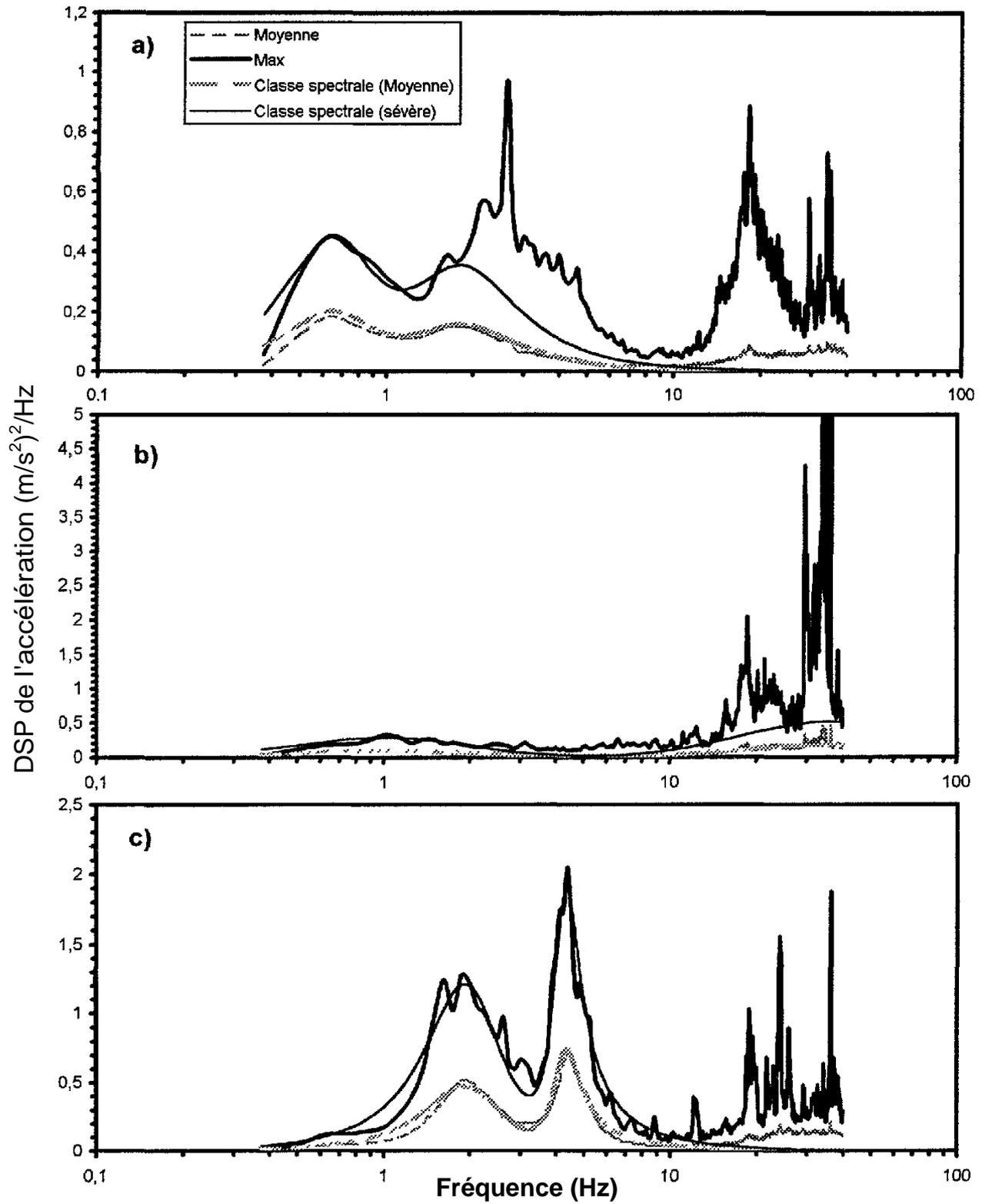


Figure 32: Spectres de la DSP définissant la classe spectrale des vibrations des chenillettes de déneigement pour des conditions moyenne et sévère. Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) latéral (y); c) vertical (z); d) de roulis ( $\phi$ ); et e) de tangage ( $\theta$ ).

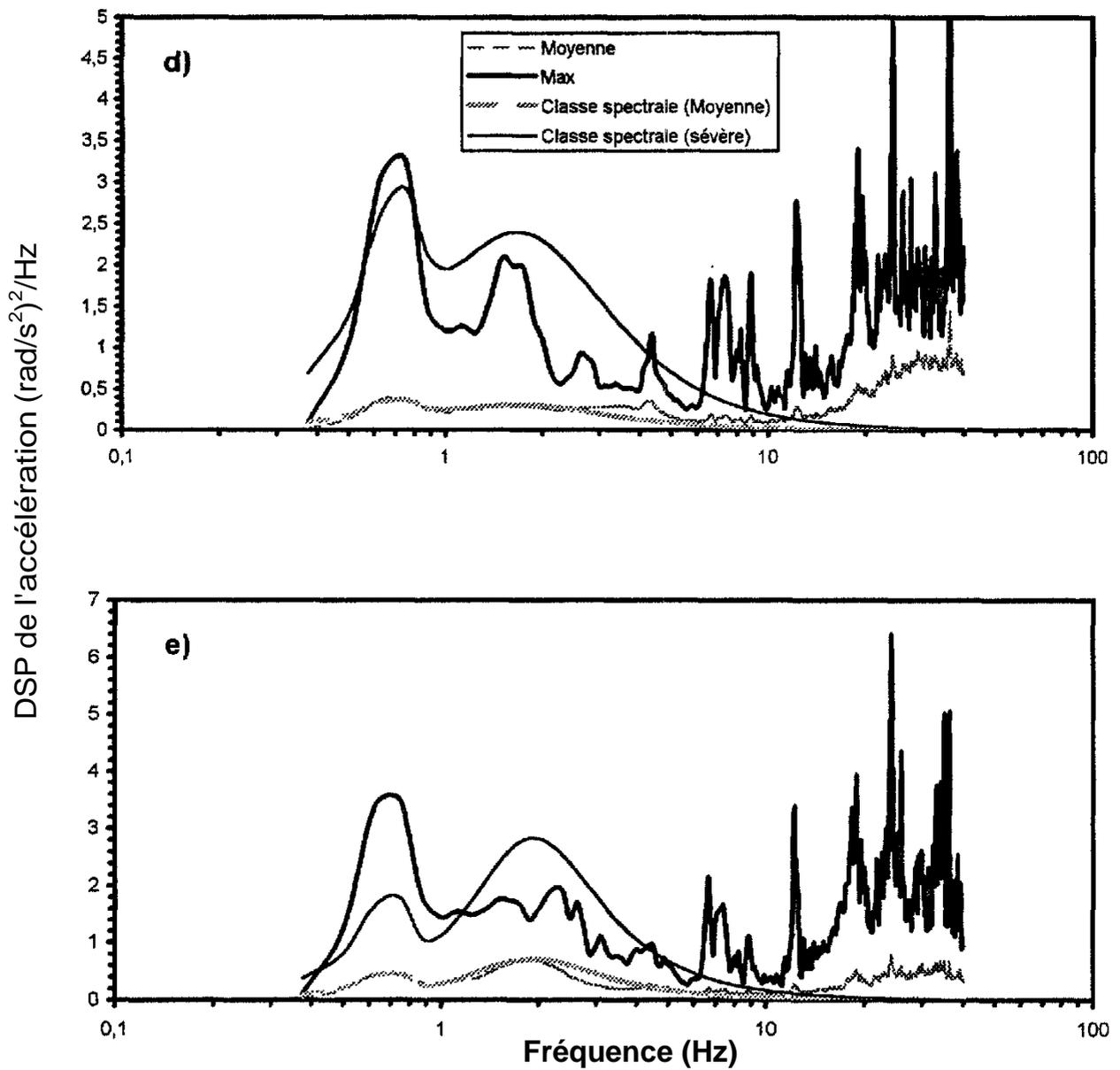


Figure 32: Spectres de la DSP définissant la classe spectrale des vibrations des chenillettes de déneigement pour des conditions moyenne et sévère. Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) latéral (y); c) vertical (z); d) de roulis ( $\phi$ ); et e) de tangage ( $\theta$ ).

**TABLEAU 12: Valeurs des constantes applicables à l'équation de la DSP qui caractérise la classe spectrale des chenillettes de déneigement pour les différents modes vibratoires**

Mode vibratoire $m$	$K_m$		Numérateur		Dénominateur	
	Moyen	Sévère	$A_{mi}$	$B_{mi}$	$C_{mk}$	$D_{mk}$
x	0.85	1.28	0.98	1.16	1.94	3.06
					0.62	0.46
y	31.07	52.82	3.67	27.46	53.29	710.07
					2.06	1.06
z	1.85	2.96	1.35	12.06	1.16	18.06
					1.61	4
$\phi$	1.59	4.46	0.47	0.65	2.82	2.64
					0.31	0.53
$\theta$	2.02	4.04	0.36	0.68	2.31	3.52
					0.26	0.53

Par ailleurs, les valeurs efficaces de l'accélération pondérée et non pondérée entre 0.5 et 40 Hz se rapportant à la classe spectrale ainsi définie pour les chenillettes de déneigement, apparaissent dans le tableau 13 pour des conditions moyenne et sévère. Ces valeurs sont obtenues par intégration des équations définissant la DSP pour les différents modes vibratoires, tout en incluant, le cas échéant, les équations définissant les fonctions de transfert caractérisant les filtres de pondération tels que précisés à l'annexe A de la norme ISO 2631-1(1997) [11]. En comparaison avec les valeurs des accélérations pondérées et non pondérées rapportées dans le tableau 7 pour caractériser l'environnement vibratoire pour l'ensemble des chenillettes de déneigement, on peut conclure que les valeurs découlant de la définition de la classe spectrale correspondante dans le tableau 13 sont généralement en très bon accord, particulièrement pour les conditions moyennes. L'écart le plus important est observé pour les conditions sévères, plus particulièrement lorsque la comparaison est effectuée sur la base de l'accélération efficace non pondérée. Les valeurs maximales de l'amplitude de la DSP définissant la classe spectrale ainsi que les fréquences auxquelles elles apparaissent pour les différents modes vibratoires sont également présentées dans le tableau 13.

### 5.3.3 Chariots élévateurs à conduite assise

Les figures 25a à 25e, 26a à 26e, et 27a à 27e représentent essentiellement les spectres de la densité spectrale de puissance qui servent à définir les classes spectrales des vibrations propres aux chariots élévateurs à conduite assise pour les différents modes vibratoires. Dans ces figures, les courbes moyennes définissent les spectres en fréquence moyens des vibrations enregistrées à proximité du point de fixation du siège lors d'opérations courantes de conduite

associées à ces véhicules pour les tâches considérées. Par ailleurs, les courbes enveloppes maximales et minimales définissent les valeurs extrêmes de la densité spectrale de puissance moyenne des accélérations vibratoires atteintes à chaque fréquence en considérant tous les spectres générés pour l'ensemble des chariots élévateurs appartenant aux mêmes catégories.

**TABLEAU 13: Classe spectrale des chenillettes de déneigement - valeurs efficaces de l'accélération pondérée et non pondérée (0.5 - 40 Hz) pour les différents modes vibratoires**

Mode vibratoire m	$G_m(s)$ max ( $ms^{-2}$ ) <sup>2</sup> /Hz ou ( $rads^{-2}$ ) <sup>2</sup> /Hz		Accélération non pondérée a ( $ms^{-2}$ ou $rads^{-2}$ )		Accélération pondérée $a_w$ ( $ms^{-2}$ ou $rads^{-2}$ )	
	Moyen	Sévère	Moyen	Sévère	Moyen	Sévère
x	0.201 (0.625 Hz) 0.158 (1.75 Hz)	0.452 (0.625 Hz) 0.355 (1.75 Hz)	0.77	1.16	0.58	0.87
y	0.0984 (1 Hz) 0.177 (34.625 Hz)	0.284 (1 Hz) 0.510(34.625 Hz)	2.38	4.04	0.44	0.75
z	0.472 (1.875 Hz) 0.739 (4.375 Hz)	1.21 (1.875 Hz) 1.89 (4.375 Hz)	1.57	2.51	1.38	2.20
$\phi$	0.374 (0.75 Hz) 0.305 (1.625 Hz)	2.93 (0.75 Hz) 2.39 (1.625 Hz)	1.18	3.32	0.83	2.32
$\theta$	0.447 (0.75 Hz) 0.708 (1.875 Hz)	1.79 (0.75 Hz) 2.83 (1.875 Hz)	1.62	3.25	0.75	1.50

Les résultats présentés dans le tableau 8 ainsi que les caractéristiques spectrales rapportées pour les différentes catégories de chariots élévateurs suggèrent, qu'à des fins de simplification, leur environnement vibratoire peut être représenté par tout au plus deux classes spectrales de vibrations associées aux axes x, y, z,  $\phi$  et  $\theta$ , l'une regroupant les véhicules à fourche et à pinces dont la capacité de charge est inférieure à cinq tonnes et le diamètre moyen extérieur des roues  $D_m$  est inférieur ou égal à 600 mm (catégorie I), l'autre spécifique au véhicule à fourche dont la capacité de charge est inférieure à cinq tonnes mais dont le diamètre moyen extérieur des roues  $D_m$  est supérieur à 600 mm (catégorie II). Les figures 33a à 33e représentent les courbes enveloppes et moyenne se rapportant à la première de ces classes spectrales, tandis que la deuxième est représentée par les courbes apparaissant dans les figures 27a à 27e.

Les classes spectrales sont quant à elles représentées, pour chacun des modes vibratoires, par une courbe qui représente la moyenne des spectres moyens définis pour chaque catégorie de

véhicules et constituent une approximation au spectre de la DSP moyenne, obtenue en appliquant des fonctions d'optimisation et de lissage visant à limiter l'écart entre cette courbe et les spectres mesurés. Pour des applications visant à définir des conditions vibratoires plus sévères que celles exprimées par les spectres moyens de la DSP, un facteur multiplicatif est aussi défini dans le but de représenter approximativement les courbes enveloppe maximale de la DSP. Les figures 34a à 34e et 35a à 35e illustrent les courbes résultantes qui définissent les classes spectrales I et II des chariots élévateurs entre 0.375 et 40 Hz pour les conditions moyennes (i.e. spectres moyens) et sévères (i.e. enveloppes maximales) pour chacun des modes vibratoires associés aux axes  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $\phi$  et  $\theta$ . Ces courbes sont également comparées dans ces figures aux spectres de la DSP moyenne et maximale tels qu'obtenus sur la base des mesures.

Les valeurs des constantes applicables aux courbes définissant l'amplitude de la DSP des accélérations vibratoires, caractérisant les deux classes spectrales des chariots élévateurs à conduite assise pour les différents modes vibratoires apparaissent dans le tableau 14. Par ailleurs, les valeurs efficaces de l'accélération pondérée et non pondérée entre 0.5 et 40 Hz se rapportant aux deux classes spectrales ainsi définies pour les chariots élévateurs à conduite assise, apparaissent dans le tableau 15 pour des conditions moyenne et sévère. Ces valeurs sont obtenues par intégration des équations définissant la DSP pour les différents modes vibratoires, tout en incluant, le cas échéant, les équations définissant les fonctions de transfert caractérisant les filtres de pondération tels que précisés à l'annexe A de la norme ISO 2631-1(1997) [11]. Les valeurs maximales de l'amplitude de la DSP définissant ces classes spectrales ainsi que les fréquences auxquelles elles surviennent pour les différents modes vibratoires apparaissent également dans le tableau 15.

De façon générale, un très bon accord est obtenu entre les valeurs de l'accélération efficace pondérée et non pondérée calculées à partir des spectres de la DSP définissant les deux classes spectrales (tableau 15) et les valeurs basées sur les mesures telles que rapportées dans le tableau 8. On note également que les vibrations associées à la classe spectrale II définissent un environnement vibratoire beaucoup plus sévère que celles de la classe I pour les conditions moyennes, tandis que la tendance est à l'inverse pour les conditions sévères.

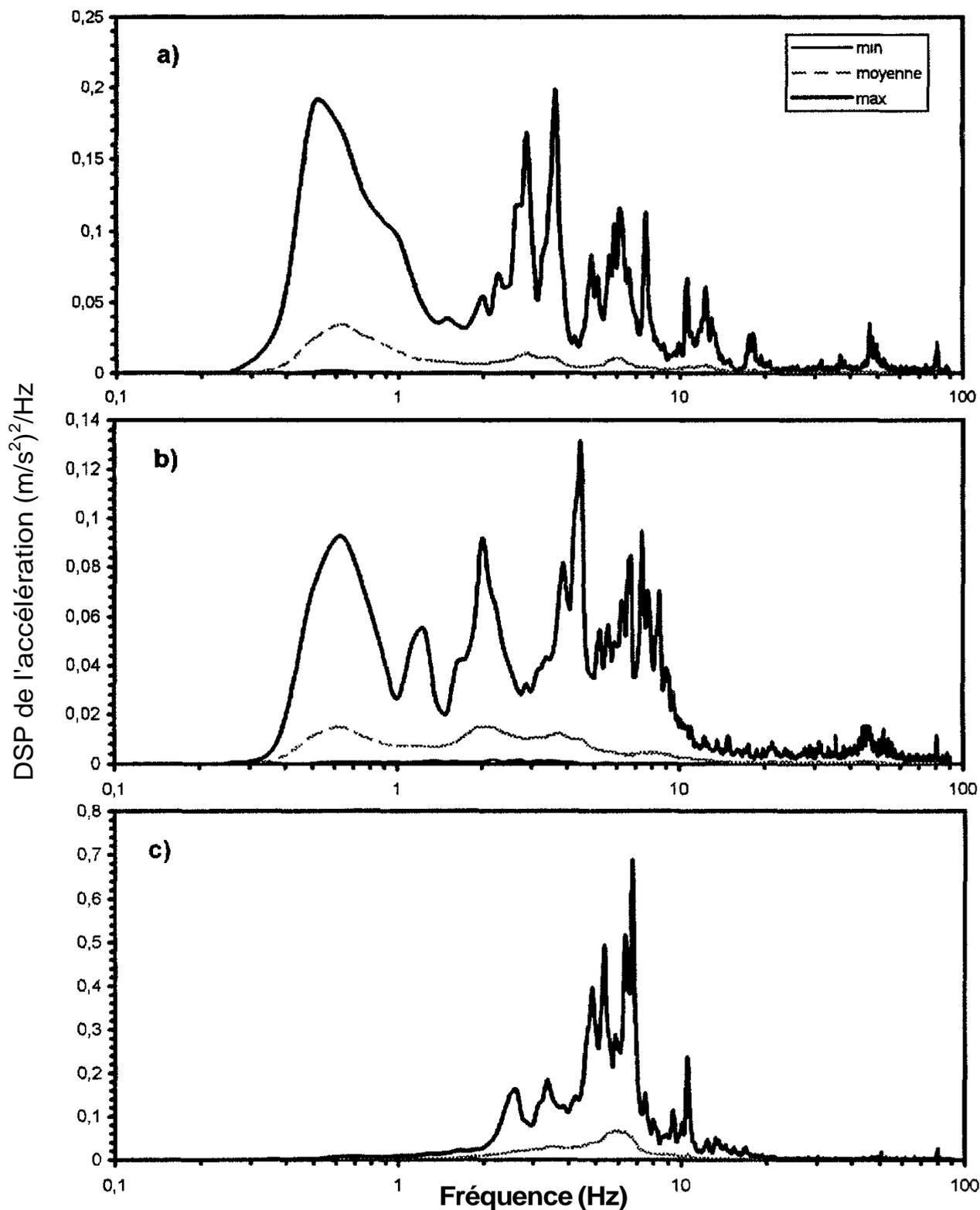


Figure 33: Courbes enveloppes et moyenne des spectres de la DSP des vibrations se rapportant à l'ensemble des chariots élévateurs à conduite assise de catégorie I. Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) latéral (y); c) vertical (z); d) de roulis ( $\phi$ ); et e) de tangage ( $\theta$ ).

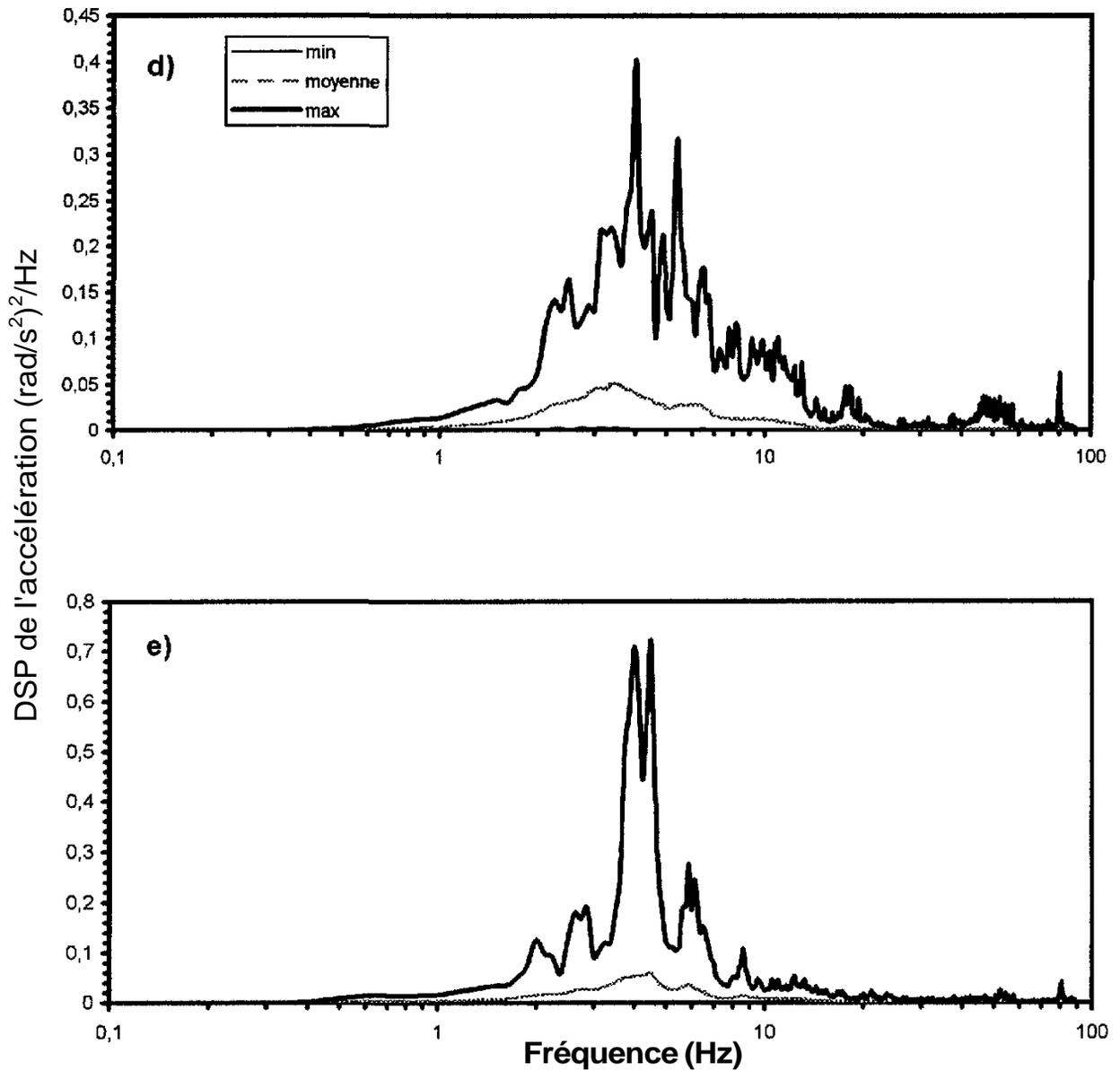


Figure 33: Courbes enveloppes et moyenne des spectres de la DSP des vibrations se rapportant à l'ensemble des chariots élévateurs à conduite assise de catégorie I. Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) latéral (y); c) vertical (z); d) de roulis ( $\phi$ ); et e) de tangage ( $\theta$ ).

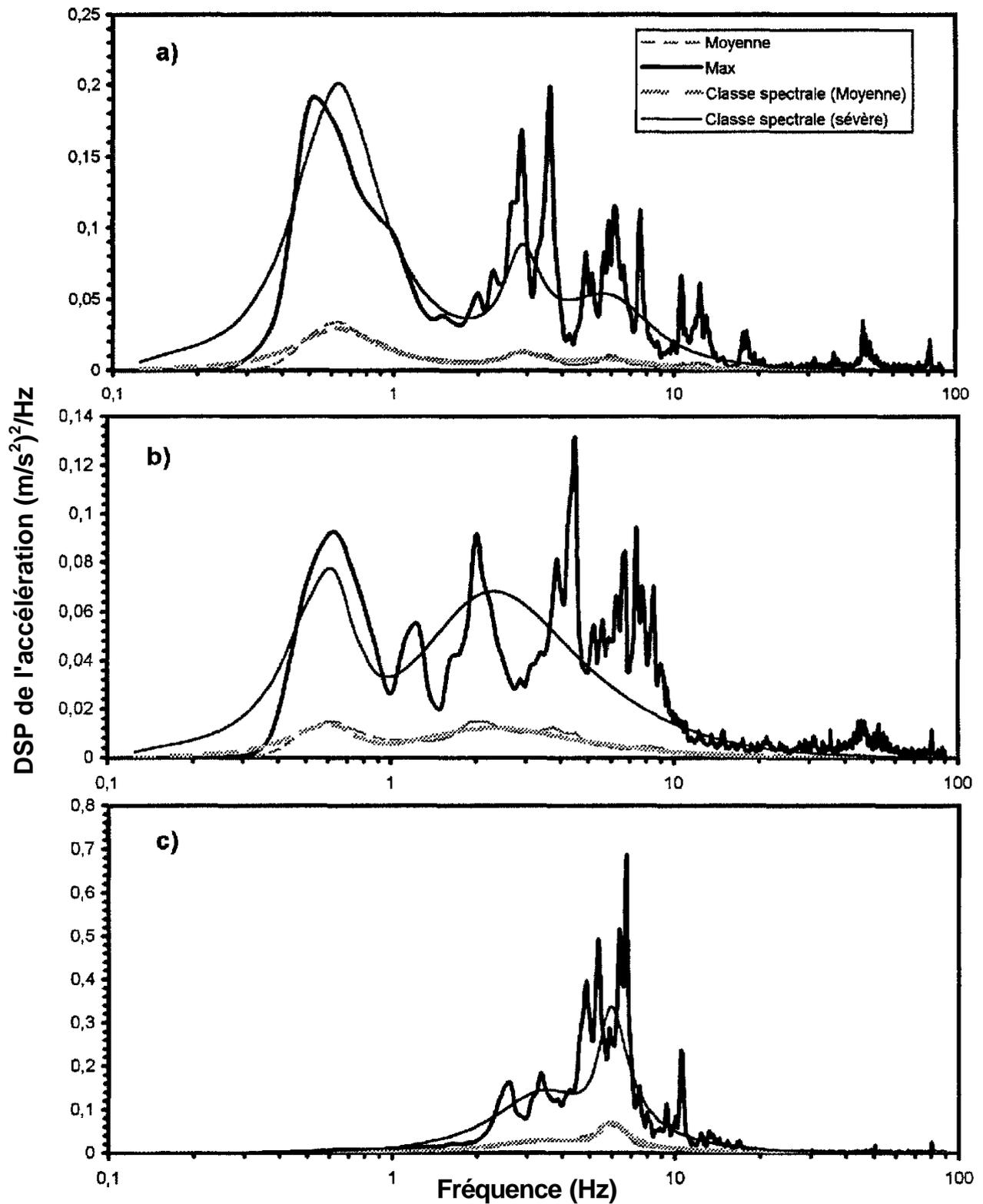


Figure 34: Spectres de la DSP définissant la classe spectrale des vibrations des chariots élévateurs à conduite assise de catégorie I pour des conditions moyenne et sévère. Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) latéral (y); c) vertical (z); d) de roulis ( $\phi$ ); et e) de tangage ( $\theta$ ).

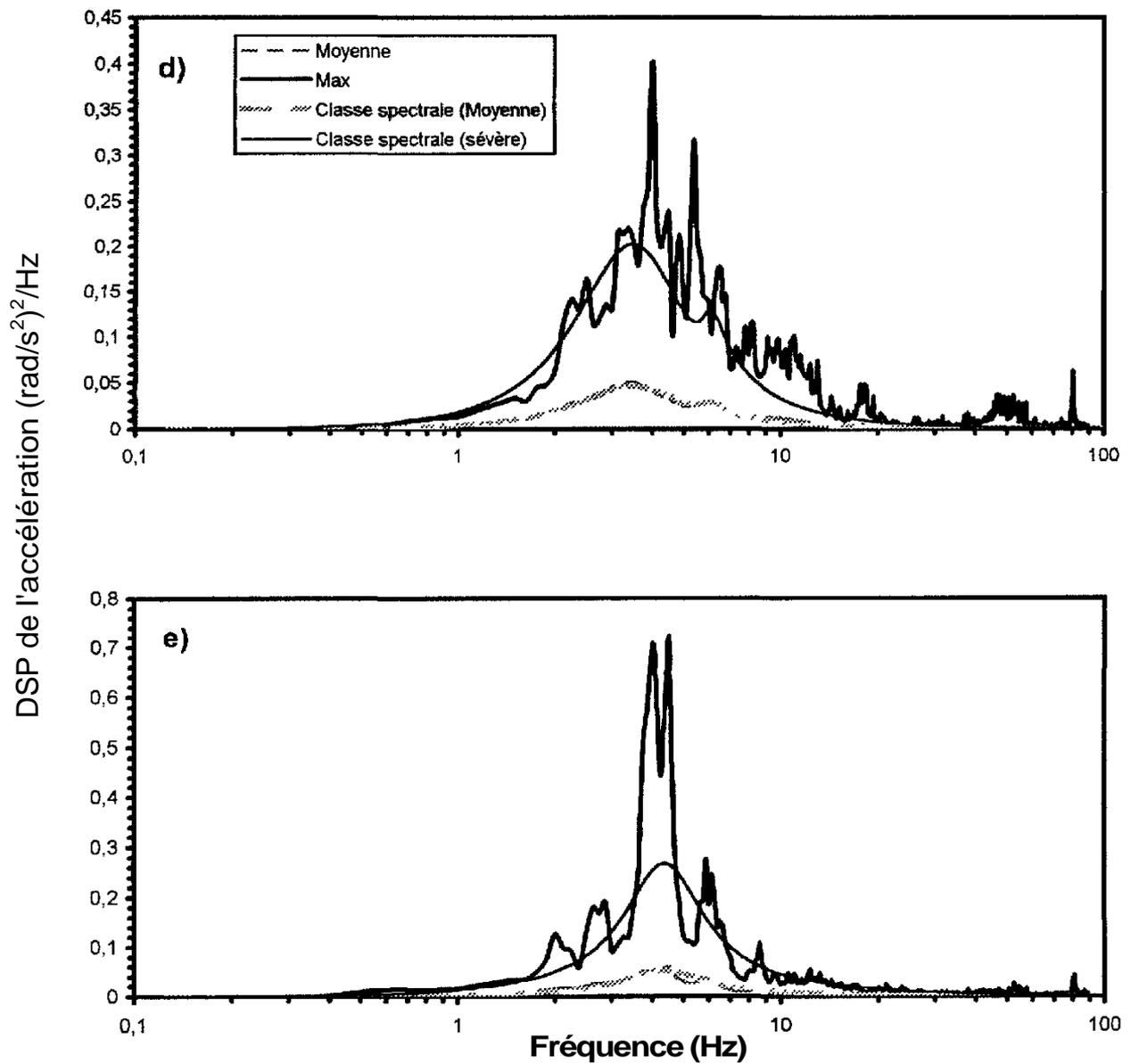


Figure 34: Spectres de la DSP définissant la classe spectrale des vibrations des chariots élévateurs à conduite assise de catégorie I pour des conditions moyenne et sévère. Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) latéral (y); c) vertical (z); d) de roulis ( $\phi$ ); et e) de tangage ( $\theta$ ).

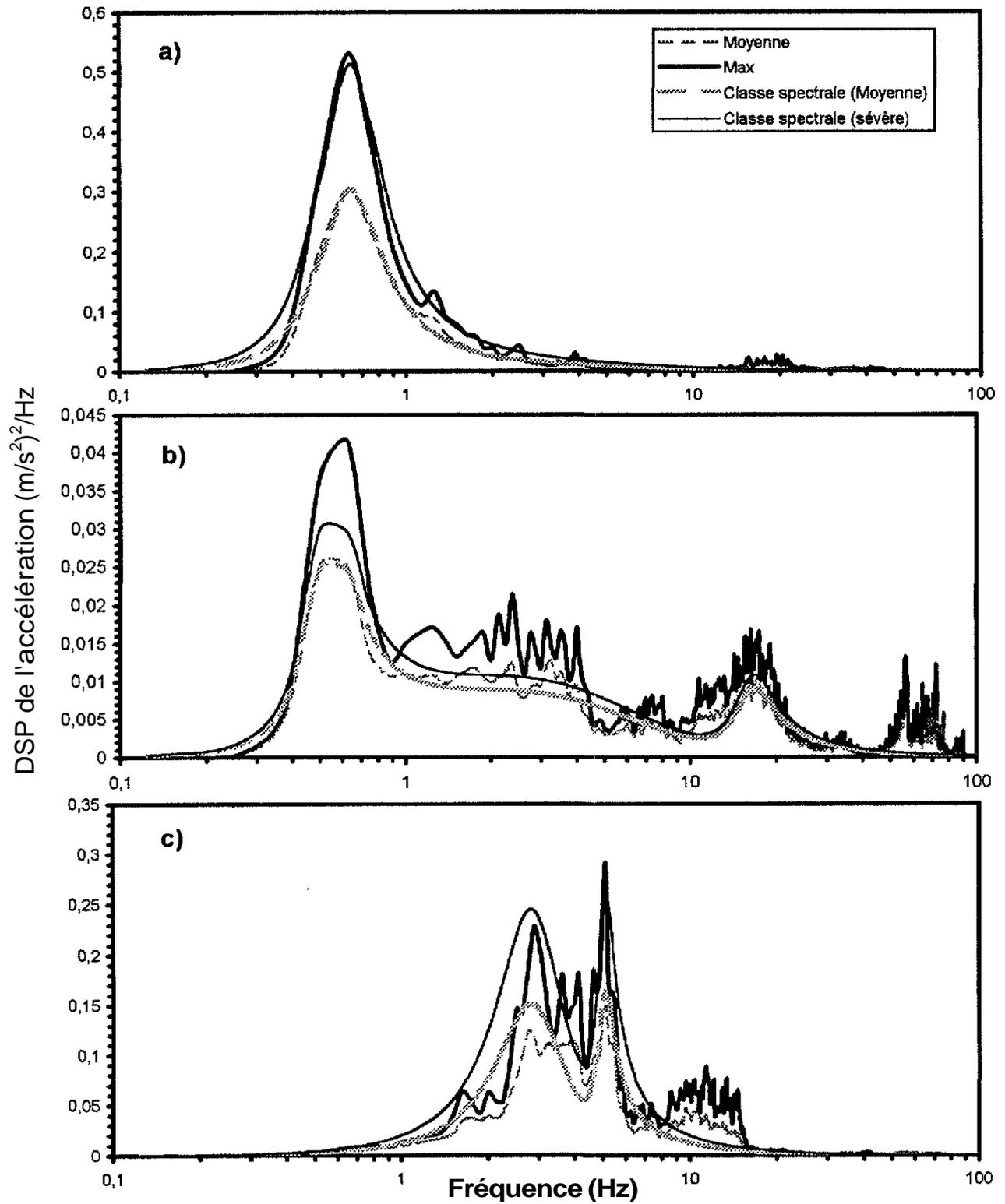


Figure 35: Spectres de la DSP définissant la classe spectrale des vibrations des chariots élévateurs à conduite assise de catégorie II pour des conditions moyenne et sévère. Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) latéral (y); c) vertical (z); d) de roulis ( $\phi$ ); et e) de tangage ( $\theta$ ).

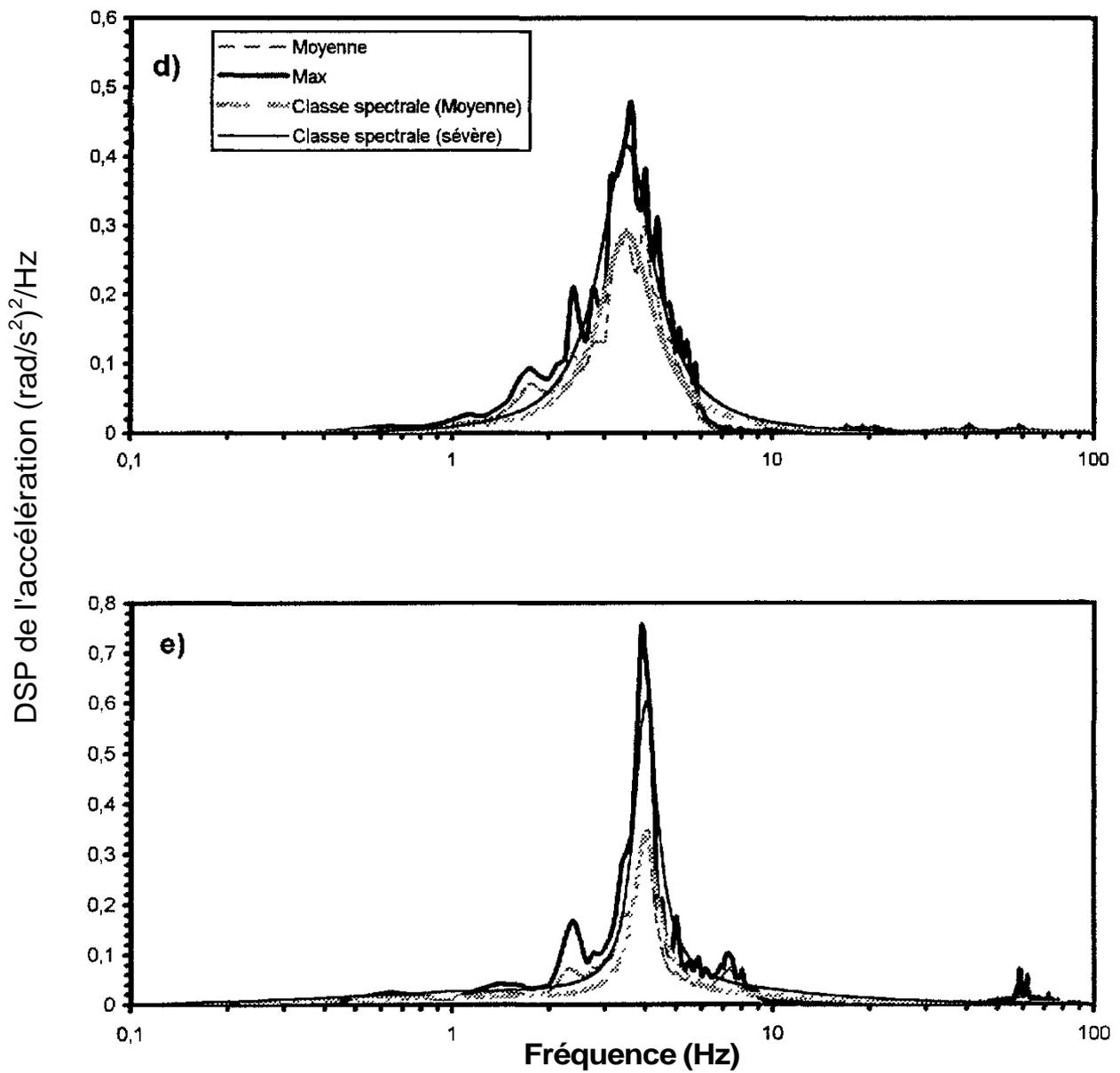


Figure 35: Spectres de la DSP définissant la classe spectrale des vibrations des chariots élévateurs à conduite assise de catégorie II pour des conditions moyenne et sévère. Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) latéral (y); c) vertical (z); d) de roulis ( $\phi$ ); et e) de tangage ( $\theta$ ).

**TABLEAU 14: Valeurs des constantes applicables à l'équation de la DSP qui caractérise les classes spectrales des chariots élévateurs à conduite assise pour les différents modes vibratoires**

Mode vibratoire m	$K_m$		Numérateur		Dénominateur	
	Moyen	Sévère	$A_{mi}$	$B_{mi}$	$C_{mk}$	$D_{mk}$
Ix	0.45	1.17	-2.37	8.92	5.49	36
			3.47	6.64	1.06	8.27
					0.53	0.39
Iy	0.57	1.36	4.47	4.99	3.52	4.52
			0.63	0.73	4.01	4.02
					0.38	0.39
Iz	0.86	1.89	2.36	27.24	1.69	34.52
					3.66	13.14
I $\phi$	0.80	1.67	1.37	34.53	1.23	36
					3.51	12.25
I $\theta$	1.32	2.97	5.94	8.84	3.06	19.14
					3.06	2.34
IIx	0.73	0.95	0.055	$7.68 \times 10^{-4}$	0.41	0.39
					0.46	0.053
IIy	1.12	1.23	7.42	157.66	6.78	260.02
			1.13	0.32	3.46	2.99
					0.28	0.28
IIz	0.99	1.26	1.11	21.30	0.85	25
					2.02	8.27
II $\phi^*$	0.91	1.09	-s	1	1.69	12.25
II $\theta$	1.95	2.64	3.45	13.18	0.85	16
					0.75	0.14

\* Cas d'exception où le numérateur doit être égal à s

Les deux classes spectrales définies dans cette étude pour caractériser les vibrations verticales des chariots élévateurs à conduite assise peuvent être mises en relation avec les classes spectrales proposées dans le projet de norme européen pr EN 13490 [5] pour caractériser l'environnement vibratoire de ces mêmes véhicules. Ce projet de norme propose quatre classes spectrales IT I à IT IV, dont la distinction est faite en fonction des types de chariots élévateurs (incluant les pneumatiques), mais principalement du diamètre moyen extérieur des roues. Ainsi, la classe IT I serait applicable aux chariots élévateurs avec roues pleines ou pneumatiques, et diamètre moyen extérieur des roues  $D_m$  inférieur ou égal à 645 mm. La classe IT II s'appliquerait aux chariots élévateurs avec roues pleines ou pneumatiques, et diamètre moyen extérieur des roues  $D_m$  entre 645 et 900 mm. La classe IT III serait applicable aux chariots élévateurs munis de pneus gonflés ou pleins et dont le diamètre moyen extérieur des roues  $D_m$  est entre 900 mm et 1200 mm. Enfin, la classe IT IV serait applicable aux chariots élévateurs de type tout-terrain, munis de pneus gonflés.

**TABLEAU 15: Classes spectrales des chariots élévateurs à conduite assise - valeurs efficaces de l'accélération pondérée et non pondérée (0.5 - 40 Hz) pour les différents modes vibratoires**

Mode vibratoire m	$G_m(s)$ max ( $ms^{-2}$ ) <sup>2</sup> /Hz ou ( $rads^{-2}$ ) <sup>2</sup> /Hz		Accélération non pondérée a ( $ms^{-2}$ ou $rads^{-2}$ )		Accélération pondérée $a_w$ ( $ms^{-2}$ ou $rads^{-2}$ )	
	Moyen	Sévère	Moyen	Sévère	Moyen	Sévère
I <sub>x</sub>	0.030 (0.625 Hz) 0.013 (2.9 Hz)	0.201 (0.625 Hz) 0.089 (2.9 Hz)	0.31	0.82	0.18	0.47
I <sub>y</sub>	0.014 (0.625 Hz) 0.012 (2.25 Hz)	0.077 (0.625 Hz) 0.068 (2.25 Hz)	0.30	0.72	0.17	0.40
I <sub>z</sub>	0.070 (6 Hz)	0.34 (6 Hz)	0.58	1.27	0.54	1.18
I <sub>φ</sub>	0.046 (3.5 Hz) 0.029 (6.1 Hz)	0.203 (3.5 Hz) 0.125 (6.1 Hz)	0.52	1.10	0.14	0.29
I <sub>θ</sub>	0.053 (4.4 Hz)	0.268 (4.4 Hz)	0.56	1.27	0.12	0.27
II <sub>x</sub>	0.303 (0.625 Hz)	0.511 (0.625 Hz)	0.54	0.71	0.43	0.56
II <sub>y</sub>	0.025 (0.5 Hz) 0.009 (16.8 Hz)	0.03 (0.5 Hz) 0.011 (16.8 Hz)	0.43	0.48	0.18	0.19
II <sub>z</sub>	0.151 (2.75 Hz) 0.164 (5.1 Hz)	0.244 (2.75 Hz) 0.265 (5.1 Hz)	0.82	1.05	0.72	0.92
II <sub>φ</sub>	0.289 (3.5 Hz)	0.416 (3.5 Hz)	0.87	1.04	0.24	0.29
II <sub>θ</sub>	0.331 (4 Hz)	0.603 (4 Hz)	0.88	1.19	0.21	0.29

Considérant que les chariots élévateurs utilisés dans cette étude ont tous des pneus rigides, que leur capacité de charge est inférieure à cinq tonnes et que le diamètre moyen extérieur des roues est inférieur à 645 mm, il en résulte que les caractéristiques des véhicules utilisés dans cette étude pourraient être associées aux véhicules de classe IT I du projet de norme pr EN 13490 [5]. Cependant, une analyse détaillée des spectres mesurés pour les véhicules de catégorie I (diamètre moyen extérieur des roues inférieur à 600 mm) utilisés dans cette étude démontre une nette différence avec ceux appartenant à la catégorie II dont le diamètre moyen extérieur des roues est supérieur à 600 mm. Si on utilisait comme ligne de démarcation, un diamètre moyen extérieur des roues fixé à 600 mm pour distinguer entre les classes IT I et IT II, il serait possible de faire un rapprochement entre les caractéristiques des véhicules de catégorie I telle que définie dans cette étude et celles de la classe IT I, tandis que les caractéristiques de la catégorie II correspondraient à celles de la classe IT II. Dans une version précédente du projet de norme

pr EN 13490, la limite sur le diamètre moyen extérieur des roues distinguant les véhicules de classe IT I de ceux de IT II était d'ailleurs fixée à 600 mm au lieu de 645 mm dans la version la plus récente. Conséquemment, les figures 36a et b comparent les classes spectrales IT I et IT II telles que définies dans le document pr EN 13490 [5] aux classes spectrales I z et II z, telles que déterminées dans cette étude, pour caractériser les vibrations verticales dans les chariots élévateurs. Il en résulte que les classes spectrales IT I et IT II sont davantage associables aux spectres de la DSP définissant un environnement vibratoire sévère dans les classes I z et II z, bien que des différences importantes existent entre les deux, les principales étant rapportées dans le tableau 16.

**TABLEAU 16: Comparaison des caractéristiques des classes spectrales IT I et IT II définies dans pr EN 13490 avec les classes I z et II z définies dans cette étude**

CARACTERISTIQUES	CLASSE SPECTRALE		CLASSE SPECTRALE	
	IT I	I z	IT II	II z
$a_w$ ( $\text{ms}^{-2}$ )	1.5	1.18	1.0	0.92
Gamme de fréquences (Hz)	0.708-22.39	0.45-50.4	0.708-22.39	0.45-50.4
Fréquence dominante (Hz)	5.0	6.0	3.2	2.75 et 5.1
DSP max. ( $\text{ms}^{-2}$ ) <sup>2</sup> Hz	0.58	0.34	0.40	0.24 et 0.26

Globalement, la classe I z se distingue de la classe IT I par un apport plus important de vibrations à des fréquences inférieures à 3 Hz et par une fréquence dominante apparaissant à 6 Hz plutôt que 5 Hz. L'intensité vibratoire entre 3 et 15 Hz est aussi nettement inférieure pour la classe I z que pour la classe IT I. Quant aux classes II z et IT II, la différence est marquée par l'apparition d'un double pic d'énergie à des fréquences de 2.75 et 5.1 Hz pour la classe II z plutôt que d'un seul pic à 3.2 Hz pour la classe IT II. Bien que le niveau d'accélération efficace pondérée  $a_w$  soit similaire pour les classes II z et IT II, cette dernière est caractérisée par une intensité vibratoire nettement supérieure à la fréquence dominante que l'intensité vibratoire apparaissant aux deux pics distincts dans la classe II z. Aussi, la classe II z présente t'elle de l'énergie vibratoire plus importante à des fréquences inférieure à 2.5 Hz et supérieure à 5 Hz que la classe IT II. Quant aux différences entre les classes IT I et I z et IT II et II z, on ne peut que présumer qu'elles pourraient être liées à des différences entre les chariots élévateurs utilisés au Québec et ceux utilisés en Europe, et aux différents modes opératoires de ces véhicules dans les entreprises concernées.

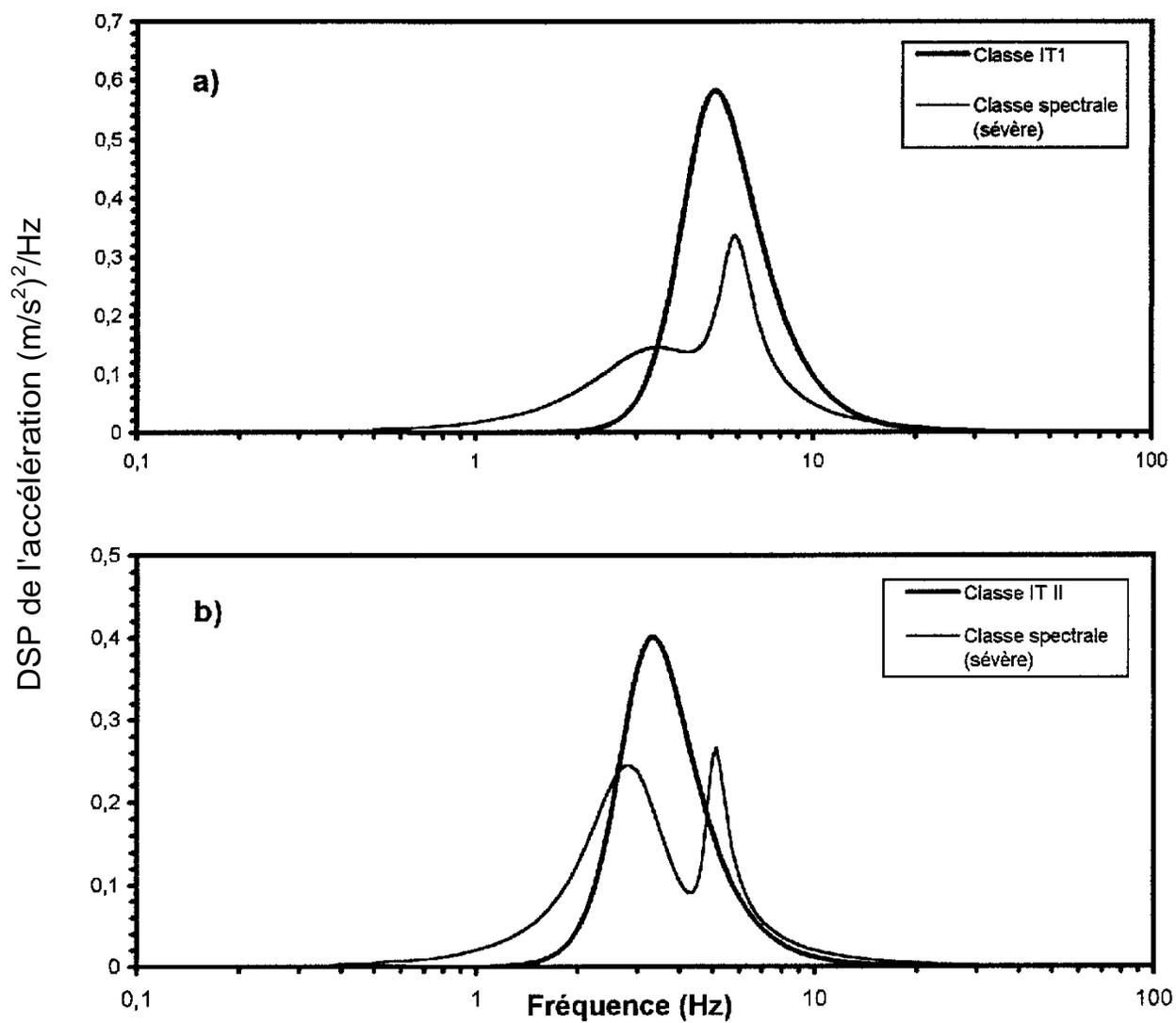


Figure 36: Comparaison des spectres de la DSP définissant les caractéristiques vibratoires des chariots élévateurs à conduite assise pour des conditions sévères, telles que proposées dans cette étude et dans le pr EN 13490. a) Classes IT I et Iz; b) Classes IT II et IIz.

### 5.3.4 Chariots élévateurs à station debout

Les figures 28a à 28c, et 29a à 29c représentent essentiellement les spectres de la densité spectrale de puissance qui servent à définir la classe spectrale des vibrations propres aux chariots élévateurs à station debout pour les différents modes vibratoires. Dans ces figures, les courbes moyennes définissent les spectres en fréquence moyens des vibrations enregistrées à proximité des pieds du conducteur lors d'opérations courantes de conduite associées à ces véhicules pour les tâches considérées. Par ailleurs, les courbes enveloppes maximales et minimales définissent les valeurs extrêmes de la densité spectrale de puissance moyenne des accélérations vibratoires atteintes à chaque fréquence en considérant tous les spectres générés pour l'ensemble des chariots élévateurs appartenant aux mêmes catégories.

Les résultats présentés dans le tableau 9 ainsi que les caractéristiques spectrales rapportées pour les différentes catégories de chariots élévateurs à station debout suggèrent, qu'à des fins de simplification, leur environnement vibratoire puisse être représenté par une seule et unique classe spectrale de vibrations associées aux axes x, y et z, regroupant tous les véhicules considérés. Les figures 37a à 37c représentent les courbes de la DSP résultantes de ce regroupement.

La classe spectrale correspondante est représentée pour chacun des modes vibratoires par une courbe qui représente la moyenne des spectres moyens définis pour chaque catégorie de véhicules, le tout constituant une approximation au spectre de la DSP moyenne, obtenue en appliquant des fonctions d'optimisation et de lissage visant à limiter l'écart entre cette courbe et la moyenne des spectres mesurés. Pour des applications visant à définir des conditions vibratoires plus sévères que celles exprimées par les spectres moyens de la DSP, un facteur multiplicatif est aussi défini dans le but de représenter approximativement les courbes enveloppe maximale de la DSP. Les figures 38a à 38c illustrent les courbes résultantes qui définissent la classe spectrale des chariots élévateurs à station debout entre 0.375 et 40 Hz pour les conditions moyennes (i.e. spectres moyens) et sévères (i.e. enveloppes maximales) pour chacun des modes vibratoires associés aux axes x, y et z. Ces courbes sont également comparées dans ces figures aux spectres de la DSP moyenne et maximale tels qu'obtenus sur la base des mesures.

Les valeurs des constantes applicables aux courbes définissant la DSP des accélérations vibratoires caractérisant la classe spectrale des chariots élévateurs à station debout pour les différents modes vibratoires apparaissent dans le tableau 17.

**TABLEAU 17: Valeurs des constantes applicables à l'équation de la DSP qui caractérise les classes spectrales des chariots élévateurs à station debout pour les différents modes vibratoires**

Mode vibratoire m	$K_m$		Numérateur		Dénominateur	
	Moyen	Sévère	$A_{mi}$	$B_{mi}$	$C_{mk}$	$D_{mk}$
x	1.39	6.51	0.12	$3.5 \times 10^{-3}$	0.56	0.39
					0.60	0.09
y	0.49	1.13	-0.35	0.03	0.38	0.39
					0.34	0.03
z	1.24	3.22	4.84	48.88	5.11	85.56
					4.57	14.06

Par ailleurs, les valeurs efficaces de l'accélération pondérée et non pondérée entre 0.5 et 40 Hz se rapportant à la classe spectrale ainsi définie pour les chariots élévateurs à station debout, apparaissent dans le tableau 18 pour des conditions moyenne et sévère. Ces valeurs sont obtenues par intégration des équations définissant la DSP pour les différents modes vibratoires, tout en incluant, le cas échéant, les équations définissant les fonctions de transfert caractérisant les filtres de pondération tels que précisés à l'annexe A de la norme ISO 2631-1(1997) [11].

**TABLEAU 18: Classe spectrale des chariots élévateurs à station debout - valeurs efficaces de l'accélération pondérée et non pondérée (0.5 - 40 Hz) pour les différents modes vibratoires**

Mode vibratoire m	$G_m(s)$ max ( $ms^{-2}$ ) <sup>2</sup> /Hz ou ( $rads^{-2}$ ) <sup>2</sup> /Hz		Accélération non pondérée a ( $ms^{-2}$ ou $rads^{-2}$ )		Accélération pondérée $A_w$ ( $ms^{-2}$ ou $rads^{-2}$ )	
	Moyen	Sévère	Moyen	Sévère	Moyen	Sévère
X	0.191 (0.625 Hz)	4.22 (0.625 Hz)	0.72	3.38	0.46	2.16
y	0.047 (0.625 Hz)	0.247 (0.625 Hz)	0.27	0.62	0.18	0.42
z	0.021 (3.5 Hz) 0.029 (9.5 Hz)	0.14 (3.5 Hz) 0.195 (9.5 Hz)	0.59	1.54	0.50	1.30

Les valeurs maximales de l'amplitude de la DSP définissant cette classe spectrale ainsi que les fréquences auxquelles elles surviennent pour les différents modes vibratoires apparaissent également dans le tableau 18. De façon générale, un très bon accord est obtenu entre les valeurs de l'accélération efficace pondérée et non pondérée calculées à partir des spectres de la DSP définissant la classe spectrale (tableau 17) et les valeurs basées sur les mesures telles que rapportées dans le tableau 9.

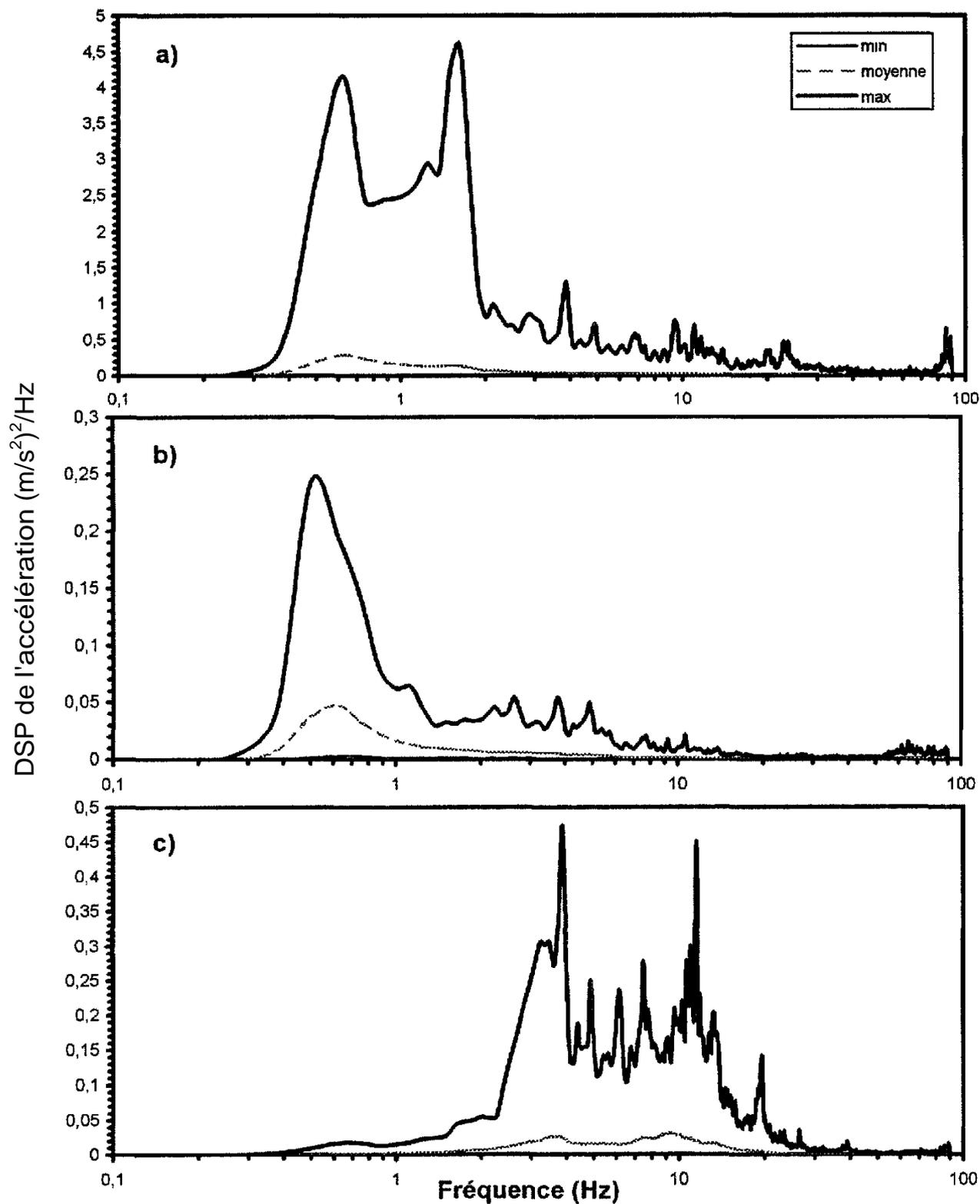


Figure 37: Courbes enveloppes et moyenne des spectres moyens de la DSP des vibrations se rapportant à l'ensemble des chariots élévateurs à station debout. Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) latéral (y); et c) vertical (z).

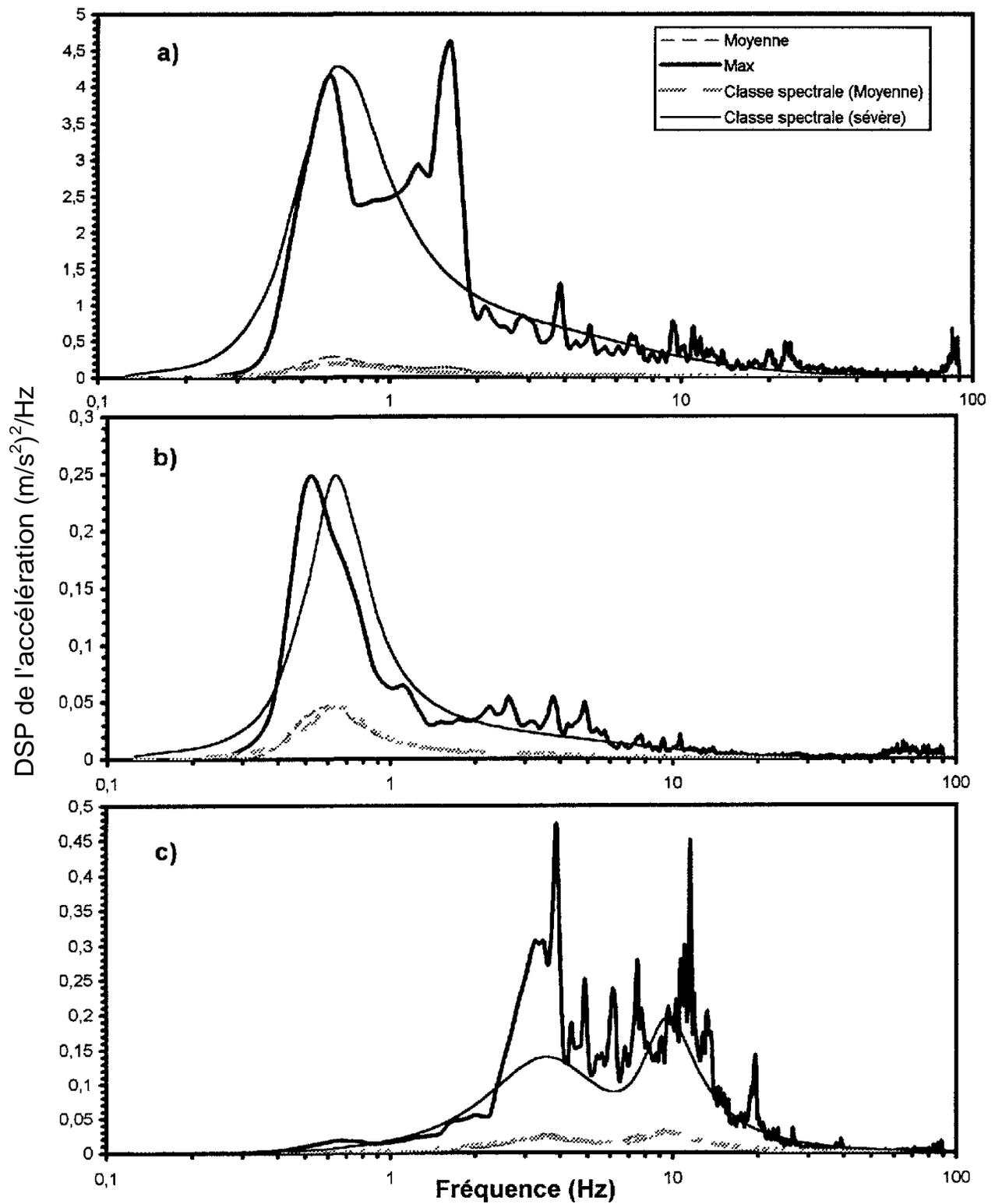


Figure 38: Spectres de la DSP définissant la classe spectrale des vibrations des chariots élévateurs à station debout pour des conditions moyenne et sévère. Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) latéral (y); et c) vertical (z).

## 5.4 Sommaire des classes spectrales vibratoires

Un sommaire des caractéristiques spectrales des vibrations définies pour chacune des catégories de véhicules étudiés apparaît dans l'annexe E pour chacun des modes vibratoires considérés. Ainsi, cinq classes spectrales (figures E-1 à E-5) ont été définies dans cette étude: une pour les autobus urbains, une pour les chenillettes de déneigement, deux pour les chariots élévateurs à conduite assise et une pour les chariots élévateurs (transpalettes) à station debout. Dans tous les cas, les classes spectrales ont été définies pour des conditions vibratoires moyennes et sévères, et couvrent l'ensemble des modes vibratoires x, y et z, ainsi que le roulis et le tangage, sauf pour les chariots élévateurs à station debout.

De façon sommaire, les caractéristiques de ces classes spectrales des vibrations se résument comme suit:

### Autobus urbains: modèles Classic et NewLook

- ❑ Axe x: niveaux de faible amplitude. Pic dominant d'énergie à 0.875 Hz, suivi de pics secondaires à 3 et à 9.625 Hz;
- ❑ Axe y: niveaux de faible amplitude. Fréquence dominante du mode à 0.75 Hz avec pic importante 12.25 Hz;
- ❑ Axe z: mode dominant des vibrations. Fréquence dominante du mode à 1.5 Hz avec pic secondaire à 10.875 Hz;
- ❑ Axe  $\phi$  : mouvements plus importants que pour x et y. Pics d'amplitude similaire à 0.875 et à 11.5 Hz;
- ❑ Axe  $\theta$  : mouvements négligeables. Pic dominant à 1.125 Hz, suivi d'un pic secondaire à 11.375 Hz.

### Chenillettes de déneigement: Bombardier SW-48

- ❑ Axe x: mouvements importants. Pic dominant à 0.625 Hz, suivi d'un pic secondaire à 1.75 Hz;
- ❑ Axe y: niveaux d'exposition les plus faibles. Pic d'énergie à 1 Hz, suivi d'un pic très important à 34.625 Hz;
- ❑ Axe z: mode dominant d'exposition. Pic d'énergie à 1.875 Hz, suivi du pic le plus important à 4.375 Hz;
- ❑ Axe  $\phi$  : mouvements non négligeables. Pics d'énergie à 0.75 et à 1.625 Hz;
- ❑ Axe  $\theta$  : mouvements non négligeables. Pics d'énergie à 0.75 et à 1.875 Hz.

**Chariots élévateurs à conduite assise de type I:** modèles Hyster et Toyota à pinces et à fourche, avec capacité de charge inférieure à cinq tonnes et diamètre moyen extérieur des roues inférieur ou égal à 600 mm.

- ❑ Axe x: niveaux peuvent être considérables. Pic dominant à 0.625 Hz, suivi d'un pic secondaire à 2.9 Hz;
- ❑ Axe y: mouvements plus faibles dont l'ordre de grandeur est similaire à celui des mouvements angulaires de roulis et de tangage. Pics d'énergie à 0.625 et à 2.25 Hz;
- ❑ Axe z: axe dominant des vibrations caractérisé par un pic distinct à 6 Hz;
- ❑ Axe  $\phi$  : mouvements plus faibles. Pics d'énergie à 3.5 et à 6.1 Hz;
- ❑ Axe  $\theta$  : mouvements plus faibles. Pic d'énergie à 4.4 Hz.

**Chariots élévateurs à conduite assise de type II:** modèle Hyster à fourche, avec capacité de charge inférieure à cinq tonnes et diamètre moyen extérieur des roues supérieur à 600 mm.

- ❑ Axe x: niveaux les plus importants après ceux de l'axe z. Pic dominant d'énergie à 0.625 Hz;
- ❑ Axe y: mouvements de faible amplitude. Pics d'énergie à 0.5 et à 16.8 Hz;
- ❑ Axe z: axe dominant des vibrations caractérisé par deux pics d'amplitude similaire à 2.75 et à 5.1 Hz;
- ❑ Axe  $\phi$  : mouvements plus faibles. Pic d'énergie à 3.5 Hz;
- ❑ Axe  $\theta$  : mouvements plus faibles. Pic d'énergie à 4 Hz.

**Chariots élévateurs à station debout:** modèles Crown et Clarke dont la capacité de charge est de 2 et 2.5 tonnes.

- ❑ Axe x: mode de vibration aussi important que pour l'axe z. Fréquence dominante du mode à 0.625 Hz;
- ❑ Axe y: mouvements de faible amplitude. Pic d'énergie à 0.625 Hz;
- ❑ Axe z: mode de vibration dominant avec l'axe x. Pics d'énergie à 3.5 et à 9.5 Hz.

## **5.5 Simulation des classes d'excitation verticale**

Une des applications principales motivant la définition de classes spectrales présentant les caractéristiques des vibrations anticipées dans différentes catégories de véhicules réside en leur utilisation dans le cadre d'essais en laboratoire visant à évaluer l'efficacité d'atténuation escomptée des vibrations par des sièges à suspension destinés à être utilisés dans de tels véhicules. Comme la grande majorité des sièges n'ont qu'une suspension visant à atténuer les vibrations verticales, les méthodes actuelles définissant de tels codes d'essais concentrent

essentiellement sur cette seule direction. Pour réaliser de tels essais, les classes spectrales des vibrations définies en terme de la DSP doivent être reproduites mécaniquement par un simulateur de vibrations à la base des sièges.

Bien que les valeurs apparaissant dans les tableaux 11, 13, 15 et 18 constituent les cibles à atteindre pour représenter les excitations vibratoires caractérisant les différentes catégories de véhicules, toute reproduction de ces excitations sur simulateur de vibrations est susceptible d'engendrer des déviations des valeurs mesurées par rapport aux valeurs cibles en raison de la réponse en fréquence du système. Ces déviations résultent entre autres des difficultés à reproduire mécaniquement les signaux temporels d'accélération vibratoire nécessaires pour que le spectre en fréquence résultant corresponde au spectre de la DSP représentant la classe spectrale. Afin d'évaluer avec quelle précision il est possible de reproduire les spectres de la DSP représentant les classes d'excitation verticale définies dans cette étude, des travaux ont été effectués visant à comparer les spectres de la DSP reproduits sur la plate-forme d'un simulateur de vibrations avec les spectres requis pour les conditions sévères, qui sont normalement retenues puisqu'elles constituent un majorant lorsqu'il s'agit d'évaluer l'efficacité de sièges à suspension en laboratoire.

Les cinq classes spectrales définissant les vibrations verticales associées aux différentes catégories de véhicules considérées ont été reproduites sur un simulateur de vibrations constitué de vérins hydrauliques, d'une plate-forme et d'un mécanisme de contrôle asservi. Le simulateur de vibrations globales du corps utilisé a une course totale de  $\pm 100$  mm et doit répondre à des signaux de déplacement. Ainsi, les expressions de la DSP des accélérations représentées par l'équation 3 doivent être transformées dans le domaine temporel pour produire les signaux de déplacement devant être imposés au simulateur pour reproduire les classes spectrales désirées. Ceci est effectué numériquement en utilisant le logiciel Matlab pour rechercher la fonction de transfert qui doit être imposée à un signal de bruit blanc pour produire un signal d'accélération dont l'amplitude du spectre correspondant de la DSP se rapproche le plus de celle donnée par l'équation 3. Ce signal d'accélération est généré avec une fréquence d'échantillonnage de 1024 Hz et des blocs de données dont la durée est de 16 s. Le spectre en fréquence correspondant est évalué dans une gamme de fréquence de 50 Hz, avec une résolution en fréquence de 0.0625 Hz en utilisant 24 moyennes. Une fois le relevé accélérométrique requis identifié, ce dernier est soumis à une double intégration pour produire le signal de déplacement le plus apte à engendrer un spectre de la DSP des accélérations qui soit le plus conforme possible à celui dont l'amplitude est décrite par l'équation 3. La figure 39 illustre de façon schématique le processus de génération des excitations vibratoires sur le simulateur de vibrations.

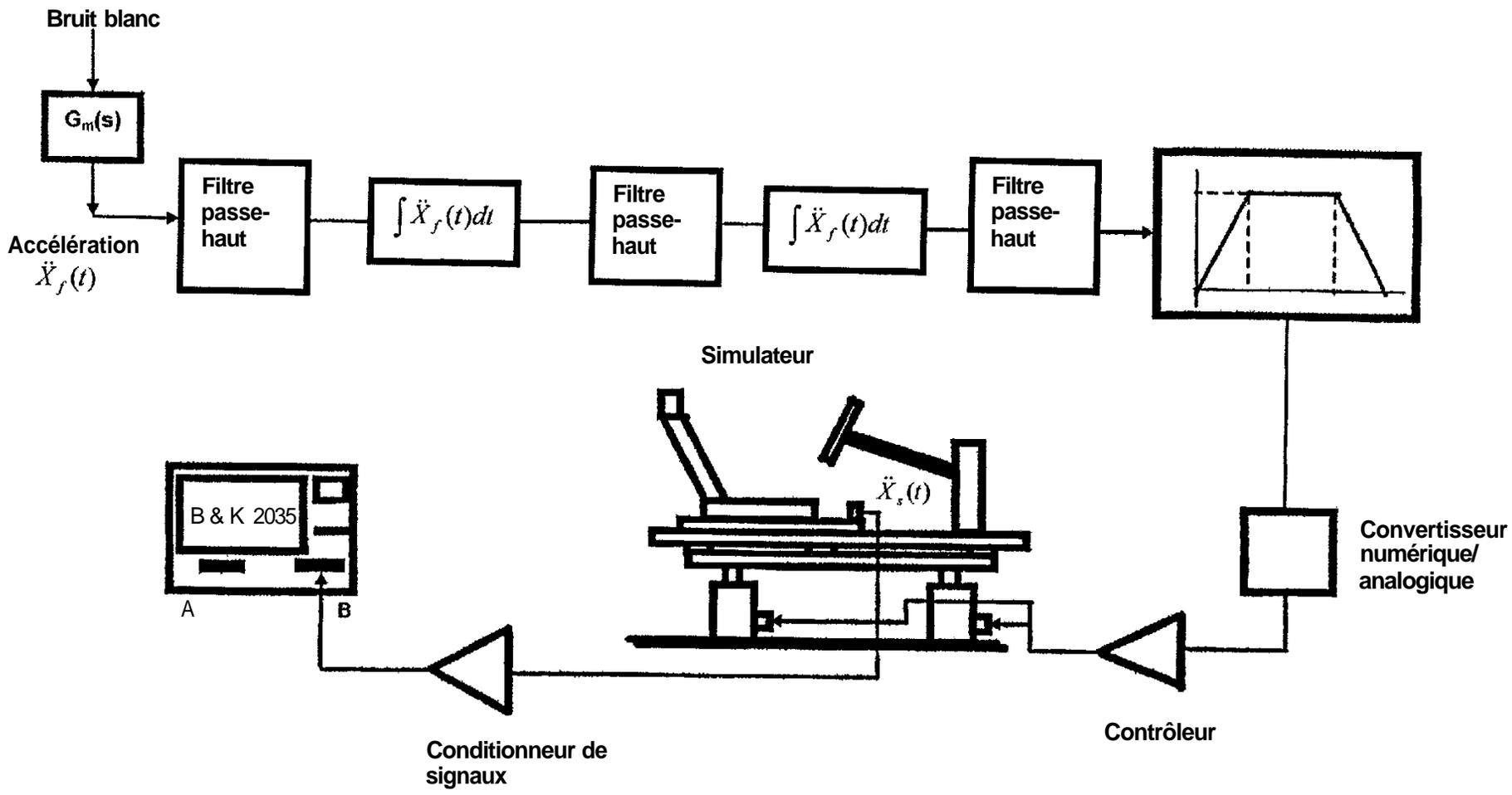
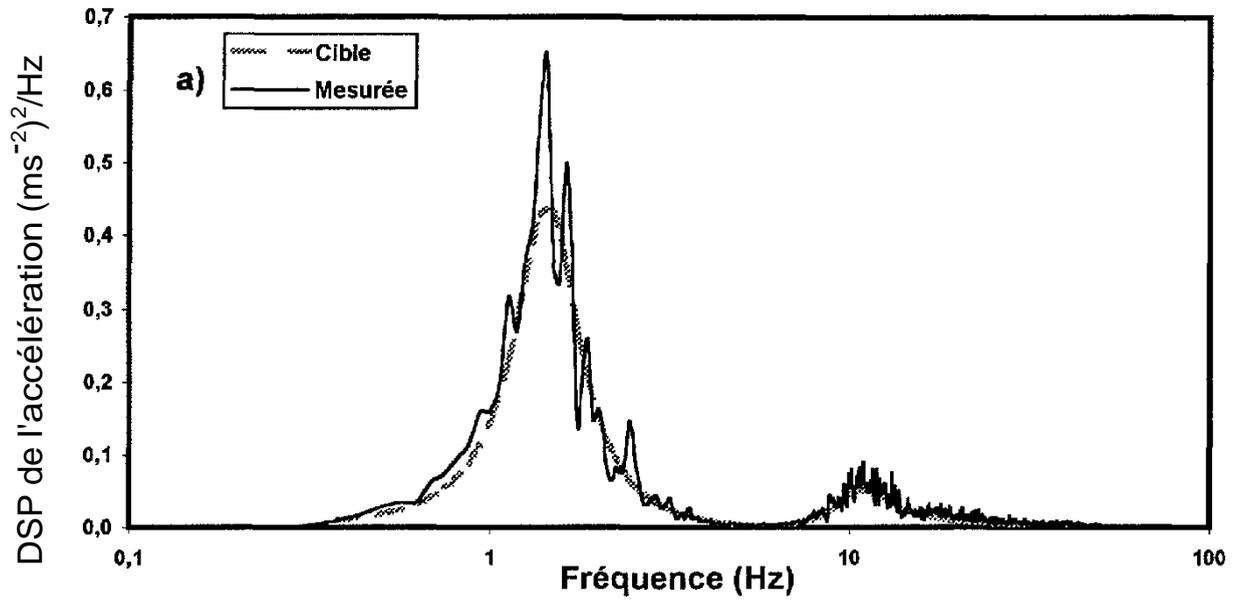
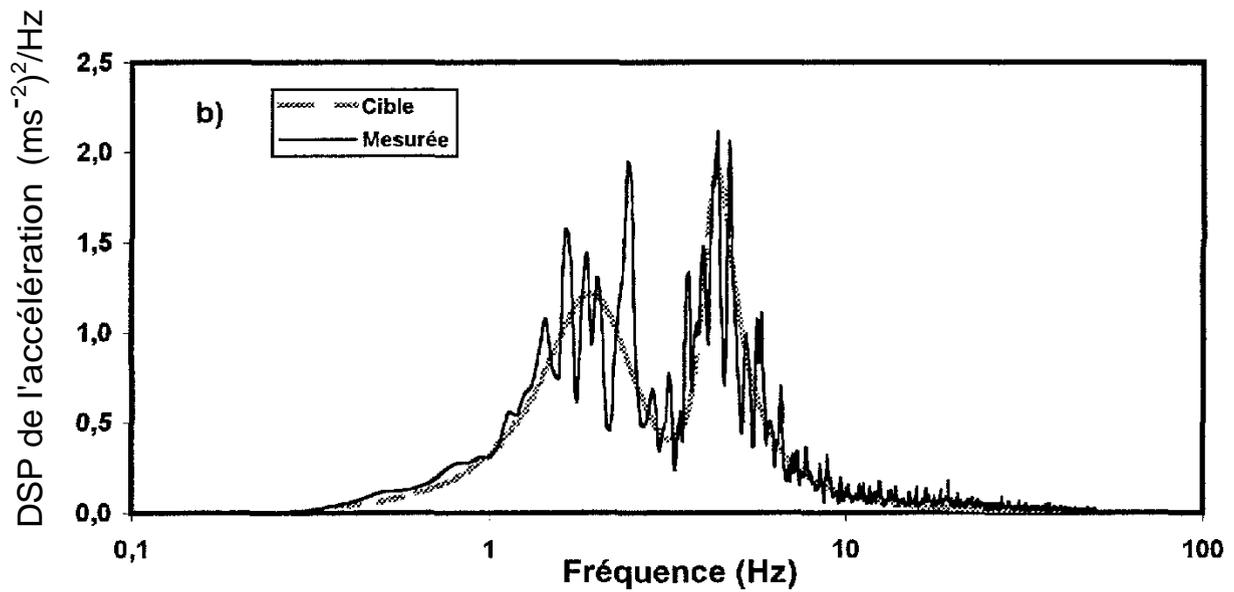


Figure 39 : Représentation schématique du processus de traitement et de x génération des signaux vibratoires de déplacement pour reproduire les classes spectrales de vibrations verticales sur le simulateur de vibrations globales du corps.

Les figures 40a à 40e illustrent, pour chaque catégorie de véhicules, les spectres de la DSP des vibrations verticales reproduits sur la plate-forme du simulateur pour les conditions sévères, de même que les spectres représentant les cibles à atteindre. Les valeurs efficaces correspondant aux accélérations pondérées et non pondérées des vibrations reproduites y sont également indiquées et comparées aux valeurs cibles fixées. On note généralement un accord se situant en deçà de  $\pm 10\%$  entre les valeurs cibles et les valeurs mesurées de l'accélération efficace, cet accord étant beaucoup plus important sur la base des valeurs pondérées. Compte tenu de l'absence de lissage pour les spectres mesurés, certaines valeurs de la DSP apparaissant à quelques fréquences peuvent sembler dévier de façon significative des valeurs cibles. Cependant, dans l'ensemble, un excellent accord est obtenu sur la gamme complète du spectre en fréquences mesuré. Quant à la génération des spectres qui caractérisent les conditions moyennes, ceux-ci n'ont qu'à être produits en appliquant un facteur d'atténuation au signal de déplacement qui corresponde au rapport des accélérations pondérées associées aux conditions moyennes à celles attribuées aux conditions sévères, telles que présentées dans les tableaux 11, 13, 15 et 18.

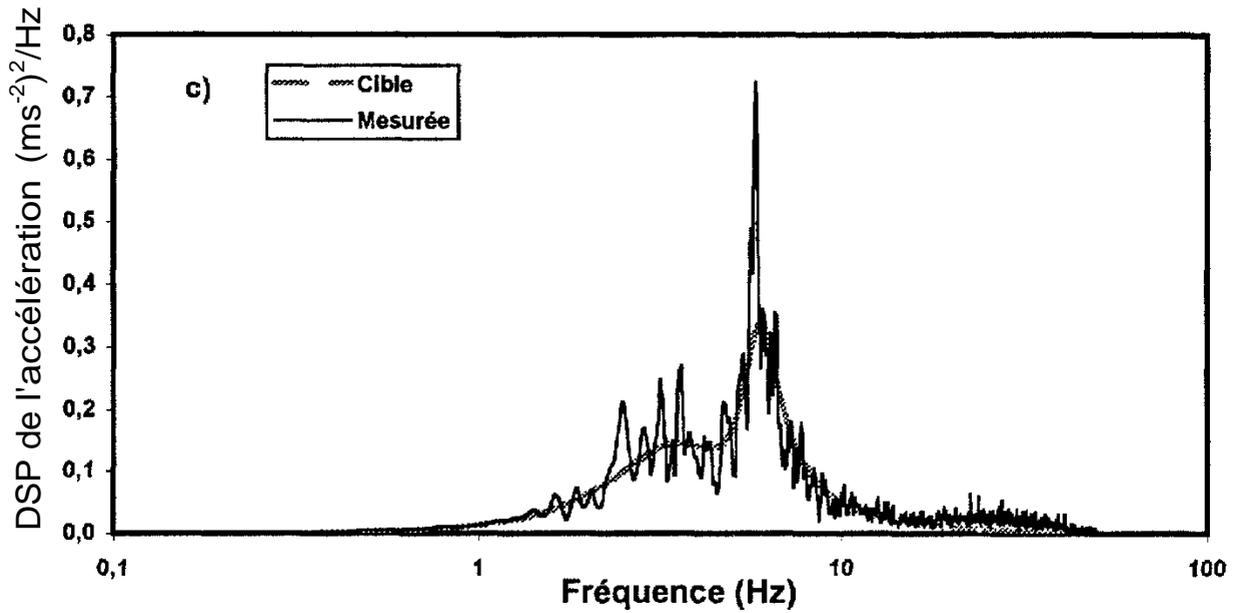


	<u>Cible</u>	<u>Mesurée</u>
Accélération RMS Non-Pondérée (m/s <sup>2</sup> ):	0,92	1,02
Accélération RMS Pondérée (m/s <sup>2</sup> ):	0,65	0,71

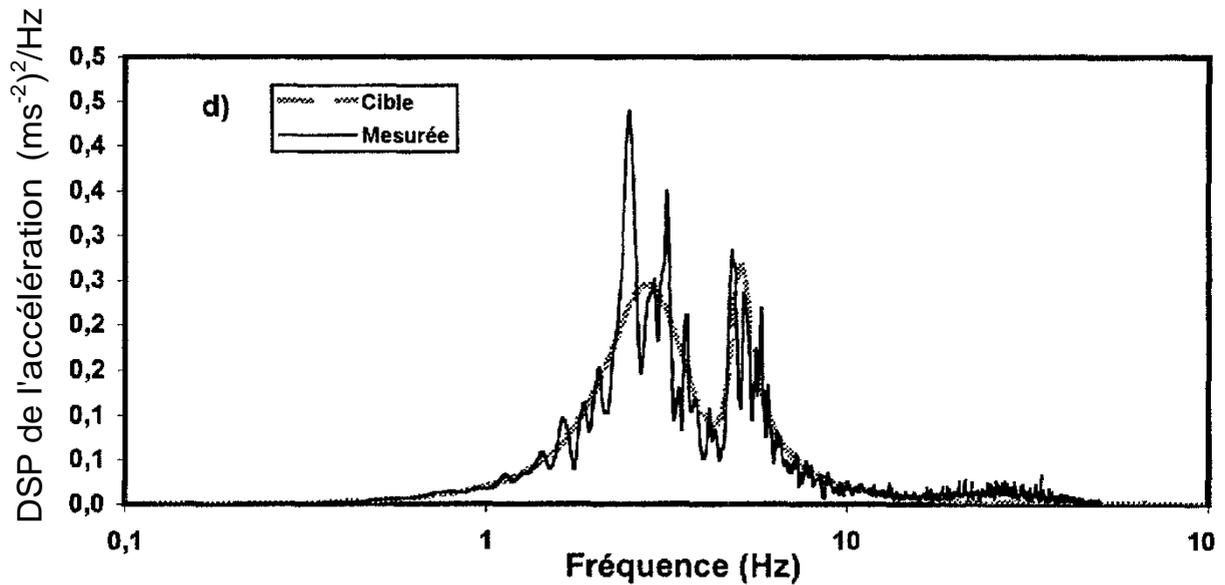


	<u>Cible</u>	<u>Mesurée</u>
Accélération RMS Non-Pondérée (m/s <sup>2</sup> ):	2,51	2,70
Accélération RMS Pondérée (m/s <sup>2</sup> ):	2,2	2,27

Figure 40: Comparaison des classes de vibrations verticales reproduites sur le simulateur de vibrations avec les valeurs cibles pour a) les autobus urbains; b) les chenillettes de déneigement; c) les chariots élévateurs à conduite assise de catégorie I; d) les chariots élévateurs à conduite assise de catégorie II; e) les chariots élévateurs à station debout.



	<u>Cible</u>	<u>Mesurée</u>
Accélération RMS Non-Pondérée ( $\text{m/s}^2$ ):	1,27	1,42
Accélération RMS Pondérée ( $\text{m/s}^2$ ):	1 18	1,23



	<u>Cible</u>	<u>Mesurée</u>
Accélération RMS Non-Pondérée ( $\text{m/s}^2$ ):	1,05	1,12
Accélération RMS Pondérée ( $\text{m/s}^2$ ):	0,92	0,91

Figure 40: Comparaison des classes de vibrations verticales reproduites sur le simulateur de vibrations avec les valeurs cibles pour a) les autobus urbains; b) les chenillettes de déneigement; c) les chariots élévateurs à conduite assise de catégorie I; d) les chariots élévateurs à conduite assise de catégorie II; e) les chariots élévateurs à station debout.

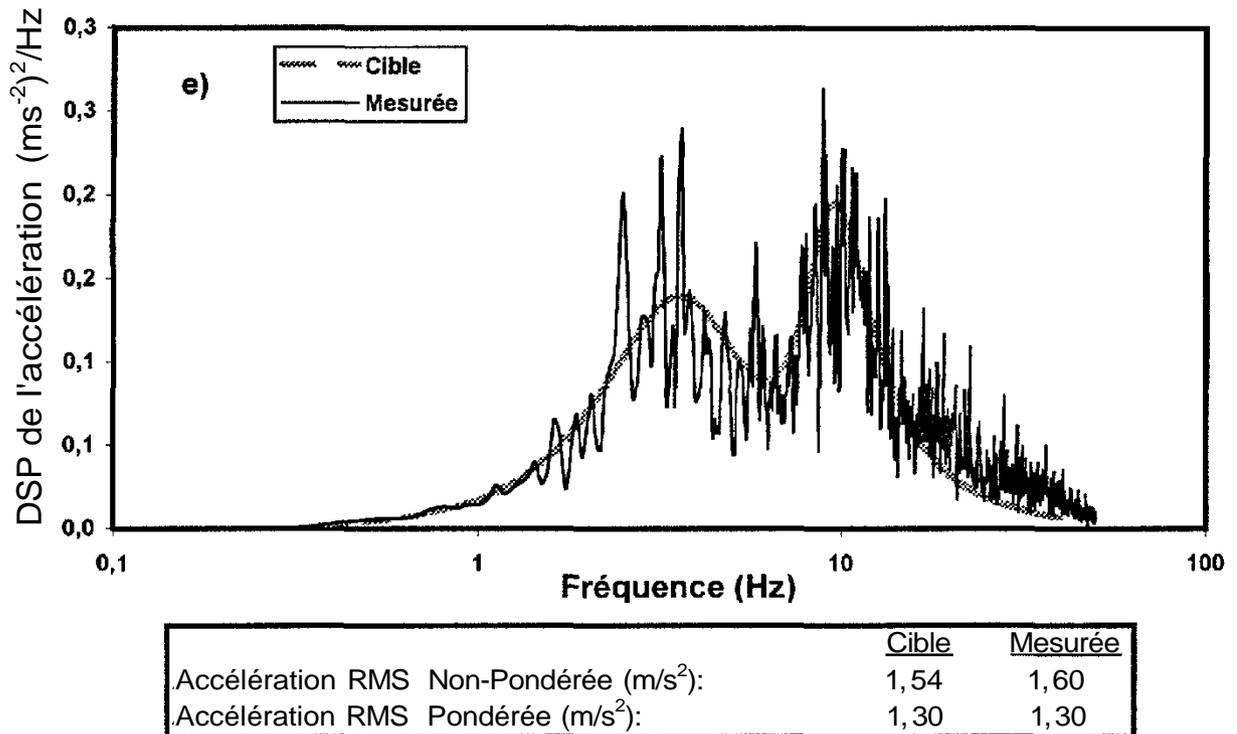


Figure 40: Comparaison des classes de vibrations verticales reproduites sur le simulateur de vibrations avec les valeurs cibles pour a) les autobus urbains; b) les chenillettes de déneigement; c) les chariots élévateurs à conduite assise de catégorie I; d) les chariots élévateurs à conduite assise de catégorie II; e) les chariots élévateurs à station debout.

## 5.6 Modèle analytique: chenillettes de déneigement

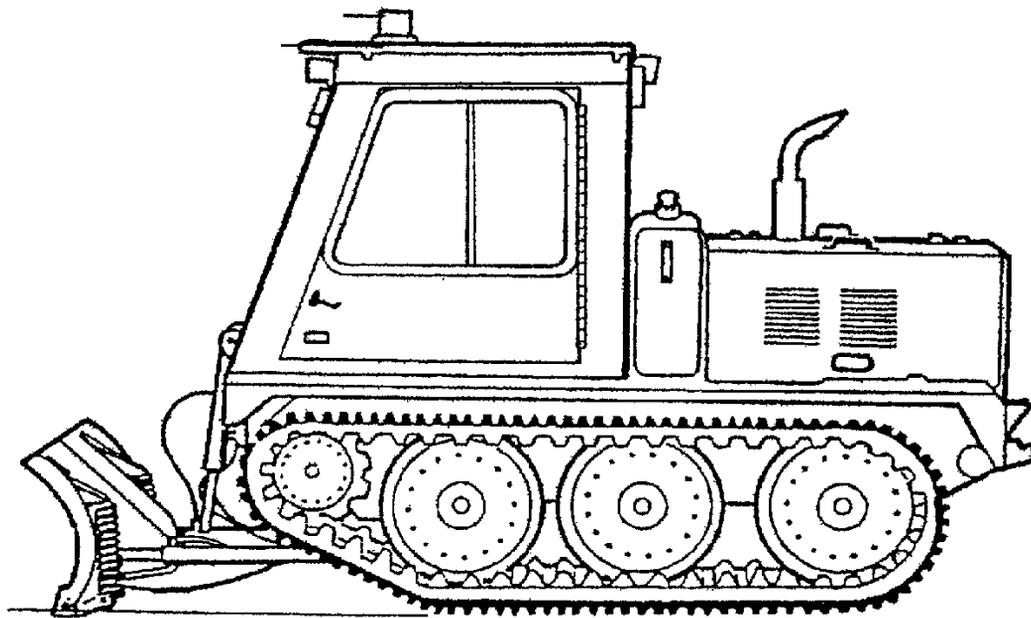
Cette section présente une synthèse d'un travail de simulation qui a été effectué afin de développer et valider un modèle mathématique d'une chenillette de déneigement, le tout devant servir à identifier comment des modifications apportées à la conception du véhicule pourraient mener à une diminution des niveaux d'exposition aux vibrations pour les conducteurs. Il s'agit ici d'une version abrégée du travail, pour lequel de plus amples détails, incluant le développement des équations différentielles du mouvement, peuvent être retrouvés dans la référence [12].

Un modèle analytique représentant une chenillette de déneigement (figure 41 a) munie d'une cabine et d'un siège suspendus est développé en combinant des modèles caractérisant six sous-systèmes, en l'occurrence i) le conducteur et le siège; ii) la cabine et sa suspension (plots élastiques); iii) les trois paires de roues opérant sur les chenilles; iv) la lame servant à pousser la neige; v) le caisson du véhicule; et vi) les chenilles procurant des interactions avec la surface de roulement. Le modèle résultant, représenté dans la figure 41 b comporte ainsi 12 degrés de liberté répartis comme suit: 3 pour le conducteur et le siège (mouvements verticaux de la suspension du siège  $z_s$ , du coussin  $z_0$ , et de la masse de l'individu  $z_1$ ), 3 pour la masse de la cabine (mouvements verticaux  $z_c$ , longitudinaux  $X_c$  et de tangage  $\theta_c$ ), 2 pour les roues (mouvements de tangage de la paire de roues avant  $\theta_{w1}$  et des deux paires de roues subséquentes opérant en tandem  $\theta_{w23}$ ), 1 pour les mouvements de tangage  $\theta_b$  de la lame par rapport à son point d'attache, et 3 pour le caisson du véhicule (mouvements verticaux  $z_h$ , longitudinaux  $x_h$ , et de tangage  $\theta_h$ ).

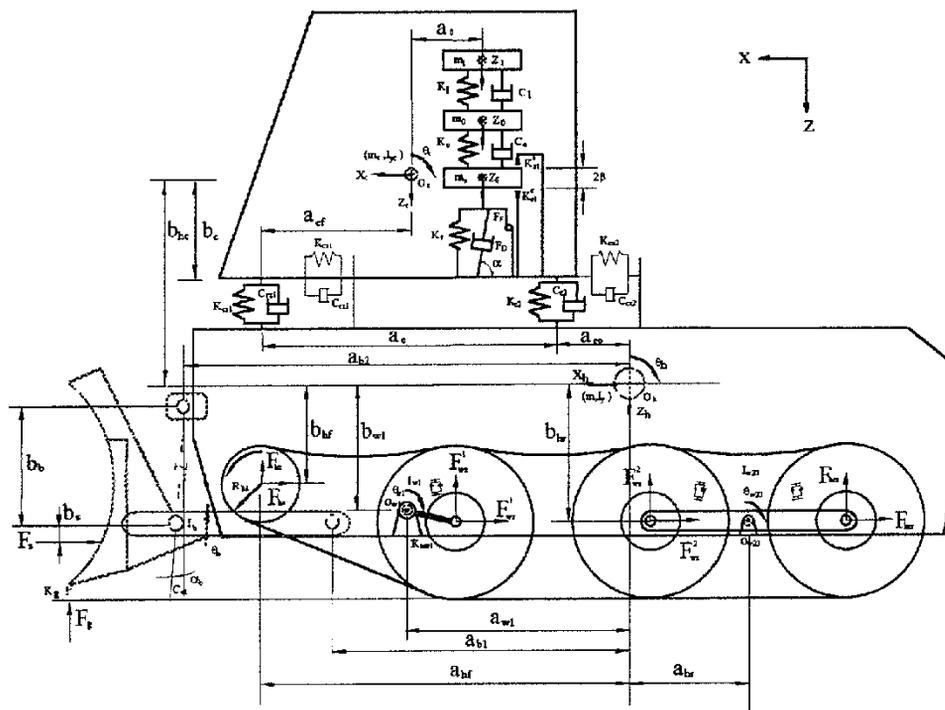
L'analyse des chenilles et de leurs interactions avec la surface de roulement est effectuée en intégrant les forces normales (empreintes) agissant entre elles et le terrain et qui sont transmises aux roues, tout en tenant compte des tensions agissant sur les chenilles et des forces résultantes transmises aux roues et aux pignons d'engrenage des roues d'entraînement. On représente ainsi les chenilles comme des boucles continues avec des propriétés élastiques linéaires sur lesquelles les forces provenant des interactions avec le terrain produisent des changements de tension ayant des répercussions sur la longueur de la chenille entre la roue d'entraînement et la première roue, et entre les roues subséquentes. Les équations du mouvement doivent donc tenir compte de ces forces et de ces tensions pour évaluer leur effet sur la longueur de la chenille entre chacune des roues à tout instant.

Le modèle analytique résultant comporte aussi les simplifications suivantes:

- Les mouvements de roulis du véhicule sont considérés comme étant négligeables;
- Le véhicule se déplace sur un terrain non déformable à vitesse constante;



(a)



(b)

Figure 41: Schéma représentant a) une chenillette de déneigement; et b) le modèle analytique correspondant.

- La masse du véhicule est uniformément répartie sur l'ensemble des roues;
- Les chenilles constituent des ceintures élastiques continues capables de transmettre seulement des forces de tension;
- Le conducteur peut être représenté par un système à un seul degré de liberté;
- Les propriétés élastiques du coussin, des butées de fin de course du siège et des roues, de la suspension de la cabine et des chenilles sont linéaires;
- Les amortisseurs du siège à suspension ont des propriétés symétriques en extension et en compression;
- Les modes de vibrations structurelles de la cabine sont négligeables;
- La suspension de la cabine est constituée de quatre plots élastiques représentés par des combinaisons en parallèle de ressort-amortisseur orientées selon les axes vertical et longitudinal;
- La première paire de roues est reliée au caisson du véhicule par un bras d'entraînement « trailing road arm », tandis que les deux paires de roues subséquentes sont supportées en tandem par un bras de raccordement « walking beam »;
- La force de contact verticale entre la lame et le sol est constante et de type élastique;
- La force de contact horizontale entre la lame et la neige lors des opérations de déblaiement est considérée comme étant égale à la force de compaction de la neige, elle-même variant selon la densité et la profondeur de la neige;
- La force exercée sur la lame par le cylindre hydraulique est négligeable lors des opérations de déblaiement à vitesse constante;
- La composante tangentielle de la force agissant à l'interface terrain-roue-chenille est négligeable.

Les équations différentielles du mouvement se rapportant au modèle à 12 degrés de liberté représentant une chenillette de déneigement sont définies de façon explicite en [12] et peuvent être utilisées pour estimer les caractéristiques des vibrations prévues dans le véhicule sous l'influence de certaines conditions particulières. La solution des équations différentielles du mouvement nécessite entre autres que la rugosité du terrain soit connue, représentant l'excitation vibratoire à l'interface entre le sol, les chenilles et les roues. La rugosité du terrain n'étant pas établie pour les trottoirs, les profils de rugosité définis pour décrire les routes secondaires [13] sont utilisés pour solutionner les équations différentielles du mouvement applicables à des conditions de déblaiement et en simple transit, pour une chenillette de déneigement se déplaçant à une vitesse constante fixée à 8 km/h. Ces profils de rugosité définissent les coordonnées verticales de l'élévation du terrain à des points distancés de 0.3 m sur une distance parcourue horizontalement. La validation du modèle ainsi définie est effectuée en comparant les spectres en fréquence des vibrations verticales, longitudinales et de tangage découlant du calcul de la réponse de la cabine avec les spectres résultant des mesures effectuées directement dans un

véhicule possédant une cabine suspendue (plots de caoutchouc) et procédant à des opérations de déblaiement et en transit libre. Les figures 42 et 43 illustrent une comparaison des spectres de la DSP résultants pour les conditions de déblaiement et de transit libre, respectivement. La tendance observée entre les spectres calculés et mesurés suggère qu'il y ait un accord raisonnable entre les prévisions du modèle et les spectres mesurés, et ce, plus particulièrement pour les vibrations verticales et dans les conditions de transport libre. On pourrait donc conclure à la validité du modèle ainsi développé pour représenter les chenillettes de déneigement.

Ce modèle peut par la suite être utilisé pour étudier l'influence que certains paramètres de conception du véhicule pourraient avoir sur les caractéristiques des vibrations transmises dans la cabine. C'est ainsi qu'une étude paramétrique (pour laquelle de plus amples détails sont rapportés dans [12]) a été effectuée visant à évaluer l'influence sur les niveaux d'exposition aux vibrations escomptés de certains paramètres de conception dont les caractéristiques (raideur, amortissement) des plots de caoutchouc entre le caisson et la cabine, la raideur de la suspension de la roue avant, la raideur des roues, la raideur longitudinale de la chenille et la tension initiale de la chenille. Les valeurs considérées pour chacun de ces paramètres sont identifiées dans le tableau 19, où les valeurs nominales sont indiquées en caractère gras.

**TABLEAU 19: Valeurs des paramètres de conception considérés dans l'étude paramétrique du modèle des chenillettes de déneigement**

Paramètre	Valeurs
Suspension de la cabine - Constante de raideur (kN/m)	245, <b>327</b> , 409
- Coefficient d'amortissement kN/m/s)	150, <b>200</b> , 250
Raideur de la suspension de la roue avant (kN/m/rad)	7.41, <b>9.88</b> , 12.36
Raideur des roues (kN/m/rad)	306,460, <b>613</b> ,766,919
Raideur longitudinale de la chenille (kN/m)	225, <b>300</b> , 375
Tension initiale de la chenille (kN)	7.5, <b>10</b> , 12.5

Parmi les différents paramètres étudiés, la raideur des roues apparaît comme ayant le plus d'influence sur l'accélération efficace pondérée des vibrations agissant en direction verticale. De façon générale, une raideur des roues plus faible est requise pour réduire les niveaux d'accélération efficace pondérée à un niveau minimal. Les résultats présentés dans la figure 44 indiquent qu'en réduisant de moitié la raideur des roues, l'accélération efficace pondérée des vibrations transmises au siège peut être réduite de près de 50 %, tout en causant une légère amplification des vibrations de la cabine due à une amplification des vibrations dans la gamme de fréquences 2 - 4 Hz. En second rang d'importance pour réduire les vibrations verticales

transmises au siège, apparaît la diminution de la raideur de la suspension de la cabine. La figure 45 indique qu'en réduisant de 25 % la raideur de la suspension, l'accélération efficace pondérée peut être diminuée de plus de 30 % par rapport à sa valeur nominale. Quant aux autres paramètres considérés, il semble qu'une augmentation du coefficient d'amortissement de la cabine ainsi qu'une diminution de la raideur longitudinale de la chenille et une augmentation de la longueur du bras d'entraînement peuvent mener à de modestes réductions de l'accélération efficace pondérée des vibrations verticales transmises au siège. Quant à l'influence des paramètres étudiés sur les vibrations longitudinales transmises au siège et sur les mouvements de tangage du véhicule, elle apparaît comme étant relativement faible pour l'ensemble des paramètres considérés.

Les résultats ont démontré que la qualité vibratoire du trajet pourrait être améliorée de façon significative principalement en utilisant des roues à raideur réduite (possiblement gonflées). Par ailleurs, l'utilisation de chenilles possédant une raideur longitudinale réduite et une suspension de cabine moins rigide avec plus d'amortissement, permettrait de réduire davantage les niveaux d'exposition aux vibrations verticales transmises au conducteur. Enfin, une diminution sensible pourrait aussi être obtenue en augmentant la longueur du bras d'entraînement « trailing arm » intégré à la suspension de la roue avant.

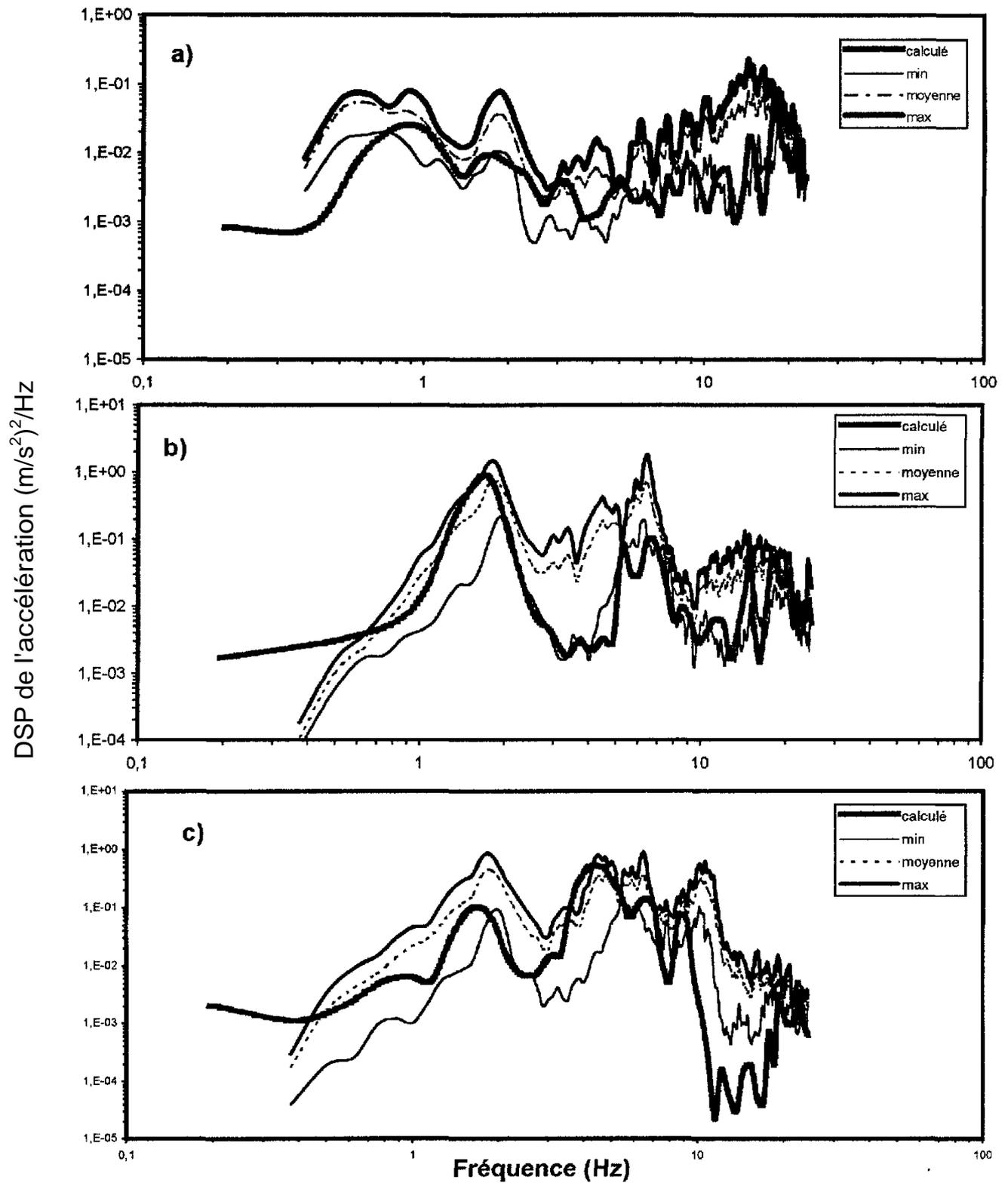


Figure 42: DSP des accélérations de la cabine calculées à partir du modèle et comparaison avec les résultats des mesures effectuées pour des conditions de transit libre. Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) detangage ( $\theta$ ); c) vertical (z).

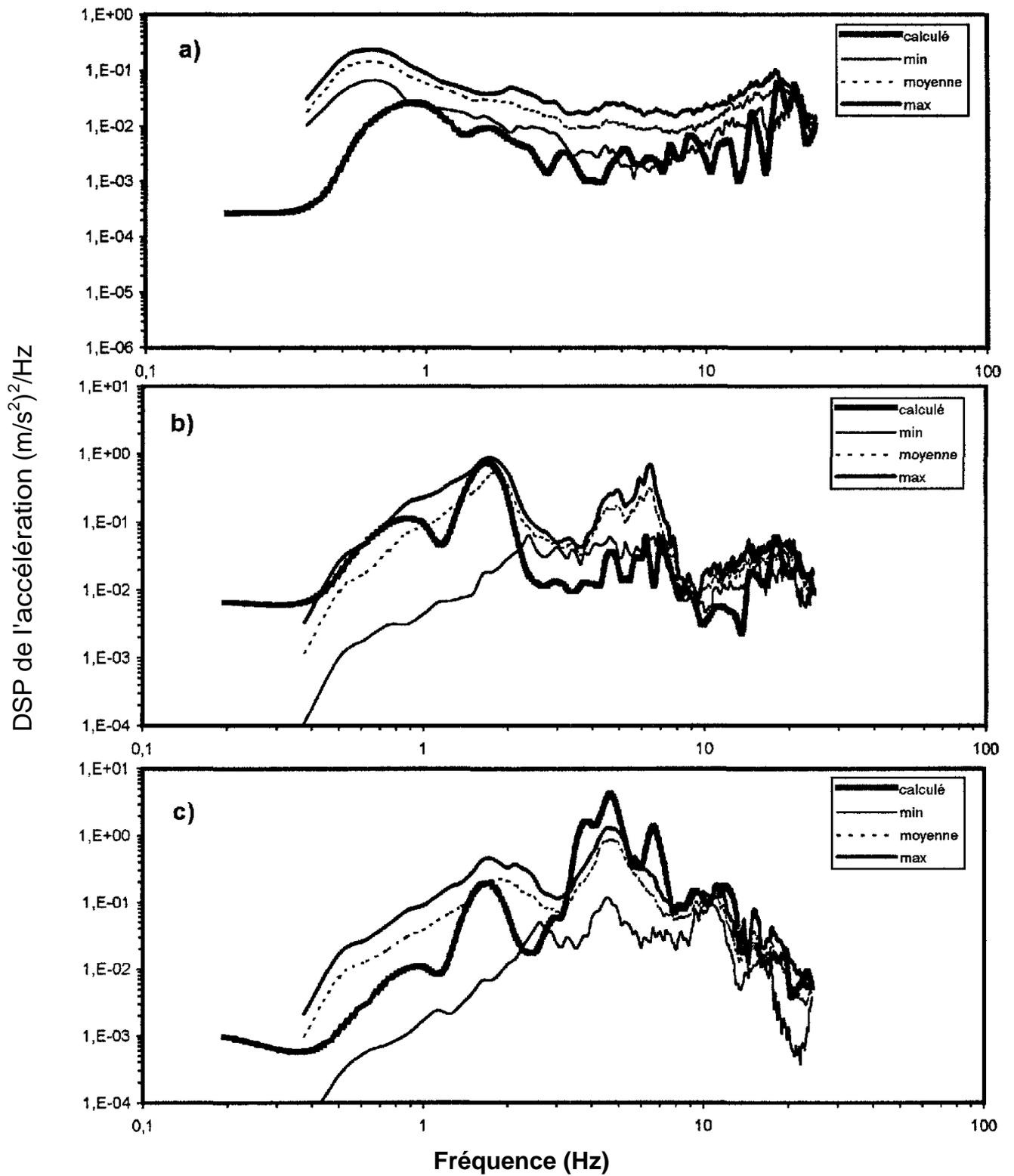


Figure 43: DSP des accélérations de la cabine calculées à partir du modèle et comparaison avec les résultats des mesures effectuées pour des conditions de déblaiement. Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) de tangage ( $\theta$ ); c) vertical (z).

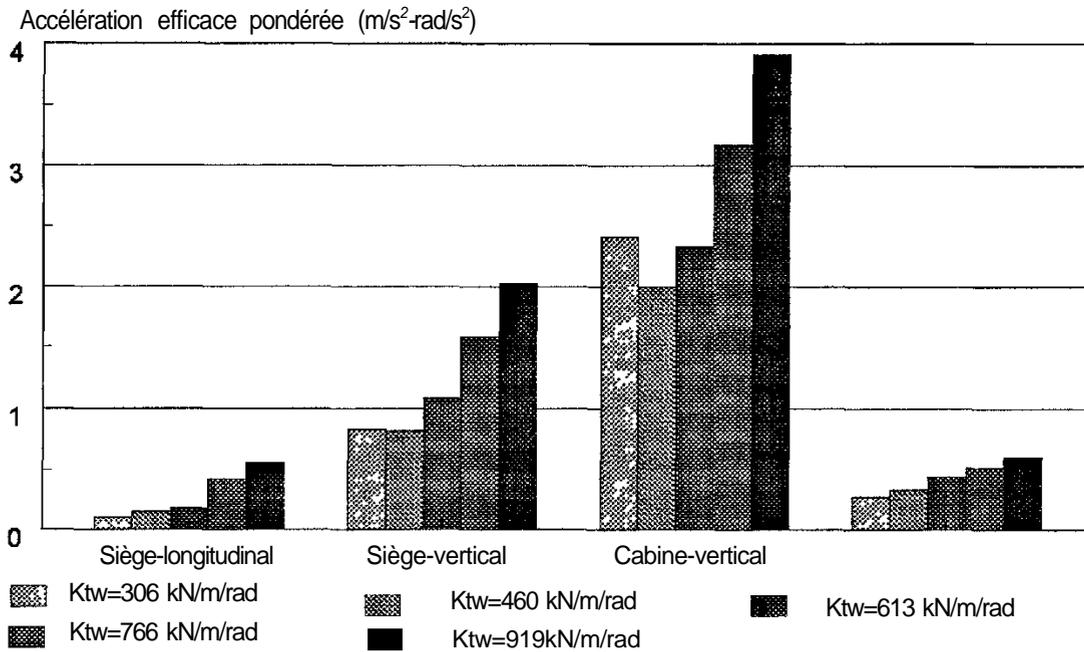


Figure 44: Influence de la raideur des roues sur l'accélération efficace pondérée des vibrations transmises dans le véhicule (opérations de déblaiement, vitesse=8 km/h).

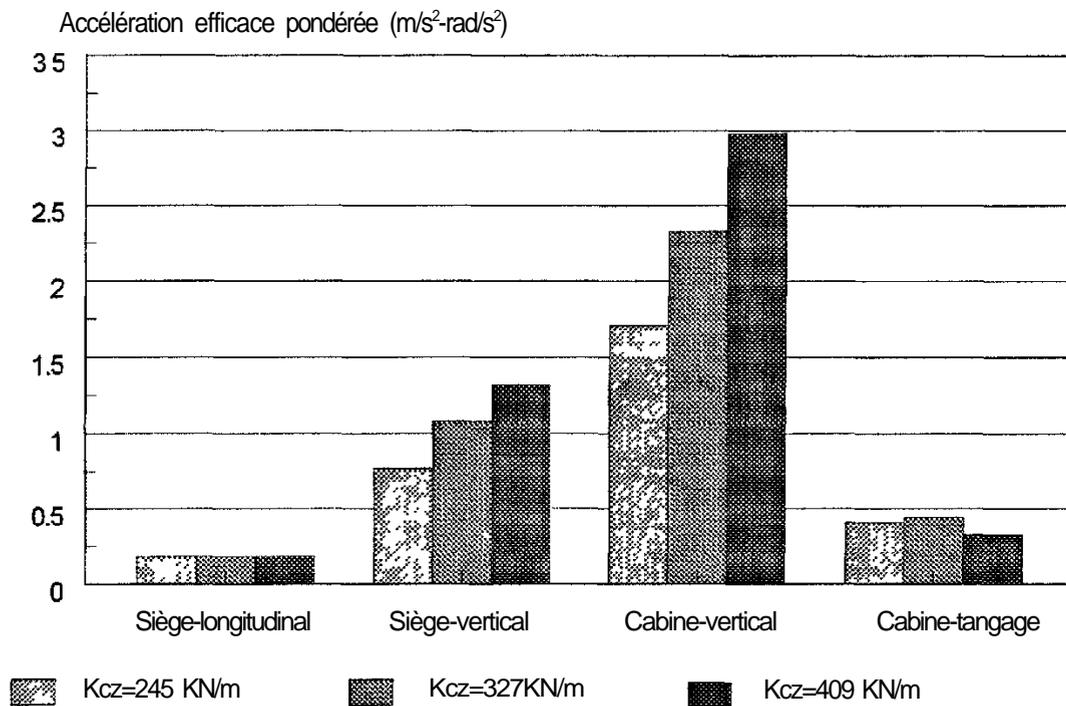


Figure 45: Influence de la raideur de la suspension de la cabine sur l'accélération efficace pondérée des vibrations transmises dans le véhicule (opérations de déblaiement, vitesse=8 km/h).

## 6.0 DISCUSSION ET CONCLUSION

Dans l'ensemble, cinq classes spectrales ont pu être définies pour caractériser l'environnement vibratoire dans l'habitacle des quatre catégories de véhicules étudiés, soit les autobus urbains de modèles Classic et NewLook, les chenillettes de déneigement de type Bombardier SW-48, les chariots élévateurs à conduite assise avec capacité de charge inférieure à 5 tonnes et diamètre moyen extérieur des roues inférieur et supérieur à 600 mm et les chariots élévateurs à station debout (transpalettes) avec capacité de charge de 2 et 2.5 tonnes. Dans tous les cas, les classes spectrales expriment l'amplitude de la densité spectrale de puissance (DSP) des accélérations en fonction de la fréquence dans la gamme comprise entre 0.5 et 40 Hz.

Les classes spectrales sont définies pour des conditions vibratoires moyenne et sévère; la première étant basée sur la moyenne des spectres en fréquence établie pour l'ensemble des véhicules faisant partie d'une même catégorie, tandis que la deuxième correspond à la courbe enveloppe maximale des spectres moyens qui définit les valeurs extrêmes de la DSP à chaque fréquence telles que déterminées en considérant l'ensemble des véhicules. Les spectres en fréquence de la DSP représentant les classes spectrales constituent des approximations aux spectres mesurés dans des conditions normales d'opération des véhicules, obtenues en appliquant des fonctions d'optimisation et de lissage qui résultent en une équation mathématique exprimant l'amplitude de la DSP moyenne en fonction de la fréquence. Pour les conditions sévères, les classes spectrales sont représentées par la même expression en appliquant toutefois un facteur multiplicatif à celle qui définit les classes spectrales pour les conditions moyennes.

Bien que les vibrations verticales (axe z. ) soient, en général, les vibrations prédominantes pour l'ensemble des véhicules considérés, les classes spectrales ont été définies pour d'autres modes vibratoires incluant les vibrations longitudinales (axe x), latérales (axe y), de roulis ( $\phi$ ) et de tangage ( $\theta$ ) pour tous les véhicules, à l'exception des chariots élévateurs à station debout pour lesquels seuls les trois mouvements de translation x, y et z ont été considérés. De façon générale, les valeurs efficaces de l'accélération pondérée et non pondérée correspondant aux spectres définissant les classes spectrales entre 0.5 et 40 Hz sont en excellent accord avec les valeurs moyennes et maximales établies sur la base des mesures.

À l'exception des chariots élévateurs à conduite assise, il a été possible de représenter l'environnement vibratoire des autres catégories de véhicules par une seule et unique classe spectrale, peu importe les différences liées aux marques et modèles de véhicules impliqués, des conditions d'opération et des parcours empruntés. Ceci a été particulièrement plus évident à

réaliser pour les autobus urbains pour lesquels il a été plus facile à identifier des caractéristiques spectrales similaires pour l'ensemble des 35 combinaisons circuit-autobus retenues. Dans le cas des chenillettes de déneigement, les différences liées au mode d'opération (déblaiement, épandage d'abrasifs, chargement, transit libre) se sont avérées avoir des conséquences sur les caractéristiques spectrales, bien que dans l'ensemble ces effets ont pu être négligés pour définir une seule et unique classe spectrale. En ce qui a trait aux chariots élévateurs à station debout, certaines différences sont apparues entre les véhicules dont la capacité de charge était de 2 et de 2.5 tonnes, bien qu'elles aient pu être négligées en définissant une seule et unique classe spectrale. Quant aux chariots élévateurs à conduite assise, les caractéristiques des vibrations ont pu être regroupées en deux classes spectrales selon que le diamètre moyen extérieur des roues ait été inférieur/égal ou supérieur à 600 mm (capacité de charge inférieure à 5 tonnes).

Les caractéristiques des vibrations verticales dans les chariots élévateurs à conduite assise ont pu être mises en relation avec les classes spectrales IT I et IT II, définies dans un projet de norme européen pr EN 13490, applicable aux chariots élévateurs possédant des caractéristiques similaires, mais pour lesquels un diamètre moyen extérieur des roues inférieur ou supérieur à 645 mm présente le point de démarcation entre les deux classes. Dans cette étude, il est apparu que les caractéristiques spectrales des chariots élévateurs ayant un diamètre moyen extérieur des roues inférieur à 645 mm ne pouvaient pas être regroupées sous une même classe spectrale en considérant l'ensemble des modes vibratoires  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $\phi$  et  $\theta$ , mais qu'il était possible de le faire pour des véhicules ayant un diamètre moyen extérieur des roues inférieur à 600 mm. C'est ainsi que deux classes spectrales I et II ont pu être définies, selon que le diamètre moyen extérieur des roues était inférieur ou supérieur à 600 mm. Une comparaison des classes spectrales Iz et IIz telles que définies dans cette étude avec les classes IT I et IT II proposées dans le pr EN 13490 ont démontré des différences significatives, particulièrement en ce qui a trait à l'intensité des vibrations apparaissant aux fréquences dominantes et aussi en ce qui concerne la distribution en fréquence de l'énergie vibratoire, bien que globalement, la somme énergétique sur l'ensemble du spectre soit comparable pour les classes respectives. Ces différences pourraient très bien être attribuables à l'utilisation de véhicules, de conditions de conduite et de surface de roulement qui se distinguent nettement de celles retenues ici pour la définition des classes spectrales.

Dans rétablissement des classes spectrales, deux méthodes ont été appliquées dans cette étude pour établir le facteur de crête qui caractériserait le caractère impulsionnel des vibrations dans l'ensemble des directions de mesure considérées. Des différences évidentes sont apparues selon les deux modes de calcul, le premier se basant sur l'évaluation de l'accélération crête absolue déterminée sur un ensemble de segments vibratoires, le deuxième identifiant plutôt

l'accélération crête sur la base d'un seuil de probabilité de 1%, constituant la valeur sous laquelle 99 % des accélérations instantanées crête sont susceptibles de se retrouver. Dans l'ensemble, le facteur de crête absolu s'est révélé être au moins deux fois plus élevé (atteignant 10 fois) que celui basé sur le 99<sup>e</sup> percentile et varier beaucoup plus d'un véhicule à un autre. Par contraste, le facteur de crête basé sur le 99<sup>e</sup> percentile s'est avéré être beaucoup plus stable pour l'ensemble des véhicules et modes vibratoires considérés. Il est évident par ailleurs que seul le facteur de crête absolu fait ressortir des véhicules et modes vibratoires pour lesquels le seuil fixé à 9 pour mettre en évidence les vibrations de type impulsionnel et les chocs dans la norme ISO 2631-1 (1997) serait excédé. Ceci apparaît être plus probable pour les modes vibratoires x et z dans les autobus urbains, x et z dans les chariots élévateurs à conduite assise, et x, y et z dans les chariots élévateurs à station debout. Cette dernière catégorie de véhicules présente le caractère impulsionnel des vibrations le plus élevé des types de véhicules étudiés, les chenillettes de déneigement le plus faible.

Par ailleurs, de tous les véhicules considérés, les chenillettes de déneigement sont généralement ceux pour lesquels les niveaux d'exposition vibratoire sont les plus importants, et ce, sur l'ensemble des directions de mesure. Un modèle analytique à 12 degrés de liberté a été développé et validé pour représenter une chenillette de déneigement afin d'estimer les niveaux d'exposition vibratoire prévus dans l'habitacle du véhicule dans des conditions précises d'excitation et pour des caractéristiques précises de conception. Les résultats d'une étude paramétrique faisant usage de ce modèle ont démontré qu'il y aurait possibilité d'améliorer la qualité vibratoire du trajet en munissant la cabine d'une suspension (e.g. plots de caoutchouc) passablement plus souple que celle utilisée sur certains prototypes actuels, en utilisant un siège à suspension approprié, en utilisant des roues à raideur réduite (possiblement gonflées) ainsi que des chenilles avec une raideur longitudinale réduite et en augmentant la longueur du bras d'entraînement « trailing arm » intégré à la suspension de la roue avant.

Enfin, les vibrations verticales définissant les cinq classes spectrales de vibrations développées dans cette étude pour des conditions sévères ont pu être reproduites sur un simulateur de vibrations globales du corps à partir des équations développées pour définir la densité spectrale de puissance (DSP) propre à chacune de ces classes. L'écart entre les valeurs cibles de l'accélération efficace et les valeurs reproduites sur le simulateur s'est généralement maintenu en deçà de  $\pm 10\%$ , cet écart étant beaucoup moins important sur la base des valeurs pondérées. L'utilisation de ces excitations vibratoires telles que reproduites sur le simulateur de vibrations pourront permettre ainsi de vérifier en laboratoire, l'adaptabilité de certains sièges à suspension verticale dans les catégories de véhicules visés et d'estimer aussi les niveaux d'exposition vibratoire auxquels les conducteurs de tels véhicules sont susceptibles d'être soumis. Il est aussi

permis de croire que les classes spectrales développées dans cette étude pourront éventuellement être considérées dans des projets de normes visant à définir des méthodologies pour vérifier l'adaptabilité de sièges à suspension dans les véhicules visés et pour élaborer des spécifications et exigences.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] Norme internationale ISO 10326-1 (1992). Vibrations mécaniques - Méthode en laboratoire pour l'évaluation des vibrations du siège de véhicule - Partie 1: Exigences de base. 8p.
- [2] Norme nationale du Canada CAN/CSA-M5007-94. Tracteurs agricoles à roues-Siège du conducteur-Mesurage en laboratoire des vibrations transmises. Association canadienne de normalisation, Rexdale, Ontario, Canada. 14 p.
- [3] Norme nationale du Canada CAN/CSA-M7096-94. Engins de terrassement et forestiers-Siège de l'opérateur-Vibrations transmises. Association canadienne de normalisation, Rexdale, Ontario, Canada. 14 p.
- [4] Danière, P., Boulanger, P., Donati, P., Galmiche, J.P. Environnement acoustique et vibratoire aux postes de conduite des chariots élévateurs. Cahiers de notes documentaires, INRS, n°148, 1992, 345-358.
- [5] Document pr EN 13490 (1999). Mechanical vibration. Industrial trucks. Laboratory evaluation and specification of operator seat vibration in the vertical direction.
- [6] Boulanger, P., Donati, P., Galmiche, J.P., Christ, E. L'environnement vibratoire au poste de conduite des camions. Cahiers de notes documentaires, INRS, n° 146, 1992, 35-42.
- [7] Boulanger, P., Donati, P., Galmiche, J.P. L'environnement vibratoire au poste de conduite des mini-engins de chantier. Centre de recherche de l'INRS, Vandoeuvre, 1995, 18p.
- [8] Norme internationale ISO 5007. "Agricultural Wheeled Tractors-Operator's Seat-Laboratory Measurement of Transmitted Vibration", Première édition, 1990, 13p.
- [9] Norme internationale ISO 7096. "Earth-Moving Machinery-Operator Seat-Transmitted Vibration", Première édition, 1982, 14 p.
- [10] Norme française NF R 18-401. Véhicules routiers. Vibrations transmises par les sièges des véhicules utilitaires de plus de 12 tonnes de PTAC. Méthodes d'essai. Paris-La Défense, AFNOR, décembre 1990, 12p.
- [11] Norme internationale ISO 2631-1(1997). Mechanical vibration and shock-Evaluation of human exposure to whole-body vibration-Part 1: General requirements. Second edition corrected and reprinted.
- [12] Rakheja, S., Wang, K., Bhat, R., Boileau, P.-É. Enhancement of ride vibration environment of tracked sidewalk snowplows: Vehicle modelling and analysis. Soumis pour publication dans International Journal of Vehicle Design, 1999.
- [13] Damien, T.M. et coll. Pavement Profiling Various Pavements: Ottawa/Smith Falls. John Emery Geotechnical Engineering Report, 1992.

## **ANNEXE A**

# **MESURES DE VIBRATIONS DANS LES AUTOBUS URBAINS**

**TABLEAU A. 1: Caractéristiques des vibrations entre 0.5 et 80 Hz pour chaque combinaison circuit-autobus pour le mode de vibrations longitudinales (x)**

AUTOBUS	CIRCUIT	ACCÉLÉRATION EFFICACE (ms <sup>-2</sup> )		FACTEUR DE CRÊTE f <sub>c</sub> 99 <sup>e</sup> perc. Absolu		NOMBRE DE SEGMENTS DE 30 s
		a	a <sub>w</sub>			
NewLook 7761	5-5	0.24	0.08	3.7	7.4	30
	54-1	0.30	0.08	3.8	11.5	30
NewLook 7764	50-2	0.22	0.09	3.8	8.1	30
NewLook 7812	30-3	0.21	0.09	4.0	8.2	25
NewLook 7852	43	0.25	0.11	3.9	9.0	20
	47-2	0.26	0.11	4.4	8.7	20
NewLook 7864	16-2	0.30	0.13	3.6	9.0	30
	10-1	0.27	0.11	3.8	9.8	30
Classic 9095	42-9	0.28	0.09	3.8	7.9	30
	15-5	0.27	0.10	3.6	7.6	30
Classic 9061	6-1	0.26	0.09	3.8	9.7	30
	47-2	0.21	0.07	4.2	7.9	27
Classic 9063	15-3	0.24	0.08	4.0	8.4	30
	49	0.22	0.09	3.8	7.8	30
Classic 9065	13-3	0.25	0.09	4.0	8.6	30
	41	0.21	0.10	4.8	7.4	22
Classic 9067	42-4	0.26	0.08	3.7	6.2	30
	54-3	0.32	0.08	3.3	10.4	30
Classic 9069	2-1	0.22	0.09	4.5	8.7	27
	20-4	0.22	0.10	3.7	7.3	30
Classic 8300	73-6	0.28	0.10	3.2	7.7	30
	75-4	0.29	0.10	3.3	7.8	30
Classic 9407	29-1	0.23	0.09	3.3	9.2	30
	28-7	0.23	0.09	3.6	7.0	30
Classic 8301	3-4	0.28	0.09	3.7	7.9	30
	17-2	0.25	0.08	4.0	7.7	30
Classic 941 5	83-7	0.28	0.08	3.5	8.0	30
	81-3	0.29	0.09	3.3	8.3	30
Classic 8601	19-3	0.28	0.11	3.9	10.4	30
	71-2	0.30	0.13	4.1	9.4	20
Classic 9502	73-6	0.29	0.13	3.4	7.7	30
	71-4	0.28	0.12	3.2	6.8	9
Classic 8312	123-4	0.37	0.13	3.8	10.8	30
	170-2	0.36	0.10	4.0	10.5	21
Classic 9518	21-4	0.22	0.11	3.4	8.9	30

**TABLEAU A.2: Caractéristiques des vibrations entre 0.5 et 80 Hz pour chaque combinaison circuit-autobus pour le mode de vibrations latérales (y)**

AUTOBUS	CIRCUIT	ACCÉLÉRATION EFFICACE (ms <sup>-2</sup> )		FACTEUR DE CRÊTE f <sub>c</sub> 99 <sup>e</sup> perc . Absolu		NOMBRE DE SEGMENTS DE 30 s
		a	a <sub>w</sub>			
NewLook 7761	5-5	0.35	0.11	3.2	6.5	30
	54-1	0.48	0.11	3.2	7.2	30
NewLook 7764	50-2	0.26	0.10	3.1	6.8	30
NewLook 7812	30-3	0.26	0.09	3.1	9.0	25
NewLook 7852	43	0.28	0.09	3.0	6.1	20
	47-2	0.29	0.10	2.9	7.7	20
NewLook 7864	16-2	0.30	0.11	3.0	7.9	30
	10-1	0.27	0.11	3.9	9.3	30
Classic 9095	42-9	0.40	0.11	3.2	7.0	30
	15-5	0.36	0.12	3.0	5.4	30
Classic 9061	6-1	0.39	0.14	3.3	10.9	30
	47-2	0.30	0.09	3.0	8.1	27
Classic 9063	15-3	0.34	0.11	3.3	5.9	30
	49	0.28	0.10	3.2	6.9	30
Classic 9065	13-3	0.33	0.10	3.3	6.0	30
	41	0.22	0.07	2.8	5.3	22
Classic 9067	42-4	0.38	0.10	3.2	7.9	30
	54-3	0.50	0.10	3.5	8.4	30
Classic 9069	2-1	0.30	0.10	3.3	6.6	27
	20-4	0.29	0.11	3.1	6.0	30
Classic 8300	73-6	0.33	0.12	3.3	6.9	30
	75-4	0.34	0.11	3.2	6.4	30
Classic 9407	29-1	0.29	0.09	3.2	5.7	30
	28-7	0.31	0.09	3.2	7.0	30
Classic 8301	3-4	0.34	0.10	3.3	7.4	30
	17-2	0.29	0.08	3.1	7.5	30
Classic 9415	83-7	0.32	0.09	3.2	7.1	30
	81-3	0.34	0.09	3.1	6.2	30
Classic 8601	19-3	0.34	0.10	3.0	5.8	30
	71-2	0.38	0.11	3.2	5.7	20
Classic 9502	73-6	0.37	0.12	3.2	7.3	30
	71-4	0.39	0.10	3.1	5.2	9
Classic 8312	123-4	0.49	0.14	3.1	6.6	30
	170-2	0.48	0.12	3.2	7.0	21
Classic 9518	21-4	0.28	0.09	3.2	6.8	30

**TABLEAU A.3: Caractéristiques des vibrations entre 0.5 et 80 Hz pour chaque combinaison circuit-autobus pour le mode de vibrations verticales (z)**

AUTOBUS	CIRCUIT	ACCELERATION EFFICACE (ms <sup>-2</sup> )		FACTEUR DE CRÊTE f <sub>c</sub> 99 <sup>e</sup> perc . Absolu		NOMBRE DE SEGMENTS DE 30 s
		a	a <sub>w</sub>			
NewLook 7761	5-5	0.64	0.48	3.3	7.5	30
	54-1	0.80	0.62	3.8	12.1	30
NewLook 7764	50-2	0.53	0.39	3.5	8.6	30
NewLook 7812	30-3	0.57	0.38	3.6	8.7	25
NewLook 7852	43	0.57	0.41	3.4	7.6	20
	47-2	0.66	0.46	3.5	8.9	20
NewLook 7864	16-2	0.68	0.49	3.4	8.3	30
	10-1	0.53	0.37	3.5	9.1	30
Classic 9095	42-9	0.82	0.67	3.5	10.1	30
	15-5	0.75	0.58	3.3	10.4	30
Classic 9061	6-1	0.72	0.50	3.5	9.8	30
	47-2	0.60	0.40	3.6	13.0	27
Classic 9063	15-3	0.72	0.49	3.2	7.7	30
	49	0.61	0.40	3.6	11.1	30
Classic 9065	13-3	0.64	0.46	3.5	8.1	30
	41	0.45	0.30	3.5	9.7	22
Classic 9067	42-4	0.72	0.52	3.5	9.6	30
	54-3	0.72	0.54	3.9	9.5	30
Classic 9069	2-1	0.59	0.41	3.6	8.6	27
	20-4	0.58	0.39	3.2	6.6	30
Classic 8300	73-6	0.71	0.51	3.6	6.8	30
	75-4	0.67	0.48	3.5	6.9	30
Classic 9407	29-1	0.71	0.50	3.2	6.7	30
	28-7	0.70	0.48	3.4	6.9	30
Classic 8301	3-4	0.71	0.50	3.7	7.0	30
	17-2	0.59	0.41	3.3	7.5	30
Classic 9415	83-7	0.71	0.49	3.4	7.0	30
	81-3	0.75	0.55	3.5	6.3	30
Classic 8601	19-3	0.66	0.46	3.4	7.4	30
	71-2	0.76	0.54	3.0	4.7	20
Classic 9502	73-6	0.69	0.48	3.5	7.0	30
	71-4	0.70	0.50	3.4	6.7	9
Classic 8312	123-4	0.93	0.67	3.3	7.4	30
	170-2	0.84	0.63	3.2	5.5	21
Classic 9518	21-4	0.53	0.38	3.3	9.0	30

TABLEAU A.4: Caractéristiques des vibrations entre 0.5 et 80 Hz pour chaque combinaison circuit-autobus pour le mode de vibrations de roulis ( $\phi$ )

AUTOBUS	CIRCUIT	ACCELERATION EFFICACE (rads <sup>-2</sup> )		FACTEUR DE CRÊTE $f_c$		NOMBRE DE SEGMENTS DE 30 s
		a	$a_w$	99 <sup>e</sup> perc.	Absolu	
NewLook 7761	5-5	0.40	0.12	3.2	8.9	30
	54-1	0.52	0.12	3.5	6.6	30
NewLook 7764	50-2	0.31	0.12	3.2	9.1	30
NewLook 7812	30-3	0.28	0.11	3.0	6.9	25
NewLook 7852	43	0.36	0.14	3.3	7.6	20
	47-2	0.36	0.12	3.1	6.1	20
NewLook 7864	16-2	0.42	0.14	3.4	5.2	30
	10-1	0.39	0.14	3.8	8.7	30
Classic 9095	42-9	0.58	0.12	3.2	5.3	30
	15-5	0.51	0.13	3.4	6.6	30
Classic 9061	6-1	0.43	0.15	3.2	5.9	30
	47-2	0.34	0.10	3.0	6.8	27
Classic 9063	15-3	0.41	0.15	3.1	5.1	30
	49	0.33	0.13	3.0	5.7	30
Classic 9065	13-3	0.37	0.12	3.5	7.2	30
	41	0.24	0.09	3.4	4.7	22
Classic 9067	42-4	0.44	0.12	3.1	6.6	30
	54-3	0.51	0.11	3.2	7.0	30
Classic 9069	2-1	0.0.32	0.11	3.7	7.4	27
	20-4	0.32	0.12	3.1	7.2	30
Classic 8300	73-6	0.38	0.13	3.4	6.5	30
	75-4	0.38	0.13	3.3	6.0	30
Classic 9407	29-1	0.42	0.13	3.1	7.0	30
	28-7	0.40	0.12	3.2	7.0	30
Classic 8301	3-4	0.41	0.14	3.4	9.3	30
	17-2	0.36	0.13	3.6	8.2	30
Classic 9415	83-7	0.41	0.12	3.2	12.7	30
	81-3	0.47	0.14	2.9	6.5	30
Classic 8601	19-3	0.39	0.12	2.9	4.8	30
	71-2	0.45	0.14	3.3	5.8	20
Classic 9502	73-6	0.46	0.14	3.0	6.6	30
	71-4	0.48	0.13	2.9	5.2	9
Classic 8312	123-4	0.53	0.15	3.2	6.1	30
	170-2	0.52	0.12	2.6	6.8	21
Classic 9518	21-4	0.35	0.10	3.4	6.1	30

**TABLEAU A.5: Caractéristiques des vibrations entre 0.5 et 80 Hz pour chaque combinaison circuit-autobus pour le mode de vibrations de tangage ( $\theta$ )**

AUTOBUS	CIRCUIT	ACCELERATION EFFICACE ( $\text{rads}^{-2}$ )		FACTEUR DE CRÊTE $f_c$		NOMBRE DE SEGMENTS DE 30 s
		a	$a_w$	99 <sup>e</sup> perc	Absolu	
NewLook 7761	5-5	0.14	0.05	3.6	5.6	30
	54-1	0.18	0.07	3.2	6.6	30
NewLook 7764	50-2	0.10	0.04	2.9	5.3	30
NewLook 7812	30-3	0.11	0.06	3.2	9.1	25
NewLook 7852	43	0.11	0.06	3.5	7.7	20
	47-2	0.13	0.07	3.5	6.5	20
NewLook 7864	16-2	0.14	0.07	3.6	6.6	30
	10-1	0.13	0.07	4.2	8.3	30
Classic 9095	42-9	0.17	0.08	3.6	7.0	30
	15-5	0.16	0.08	3.5	6.9	30
Classic 9061	6-1	0.16	0.09	3.2	6.0	30
	47-2	0.12	0.07	3.4	6.7	27
Classic 9063	15-3	0.14	0.08	3.4	8.0	30
	49	0.12	0.06	3.1	6.6	30
Classic 9065	13-3	0.14	0.08	3.9	7.0	30
	41	0.09	0.06	3.8	7.6	22
Classic 9067	42-4	0.15	0.09	4.0	8.6	30
	54-3	0.17	0.09	3.6	7.7	30
Classic 9069	2-1	0.12	0.06	3.9	6.6	27
	20-4	0.11	0.06	4.0	6.0	30
Classic 8300	73-6	0.14	0.07	3.2	6.3	30
	75-4	0.13	0.06	3.7	6.8	30
Classic 9407	29-1	0.14	0.08	3.1	5.8	30
	28-7	0.15	0.09	2.9	5.1	30
Classic 8301	3-4	0.15	0.08	3.4	6.0	30
	17-2	0.13	0.07	3.2	6.6	30
Classic 9415	83-7	0.15	0.09	3.6	5.6	30
	81-3	0.17	0.10	3.2	4.9	30
Classic 8601	19-3	0.14	0.07	3.0	5.8	30
	71-2	0.16	0.08	3.0	5.1	20
Classic 9502	73-6	0.15	0.09	3.4	5.1	30
	71-4	0.15	0.09	3.3	4.6	9
Classic 8312	123-4	0.19	0.08	3.3	5.6	30
	170-2	0.18	0.10	3.2	5.4	21
Classic 9518	21-4	0.11	0.06	3.1	6.0	30

## **ANNEXE B**

# **MESURES DE VIBRATIONS DANS LES CHENILLETES DE DÉNEIGEMENT**

**TABLEAU B.1: Caractéristiques des vibrations entre 0.5 et 80 Hz pour chaque combinaison de chenillette de déneigement et mode opératoire pour le mode de vibrations longitudinales (x)**

MODE OPÉRATOIRE	VÉHICULE	ACCÉLÉRATION EFFICACE (ms <sup>-2</sup> )		FACTEUR DE CRÊTE f <sub>c</sub>		NOMBRE DE SEGMENTS DE 60 s
		a	a <sub>w</sub>	99 <sup>e</sup> perc.	Absolu	
Déblaiement majeur	89508	1.70	0.54	3.0	6.5	6
Déblaiement majeur	88584	1.92	0.37	2.9	10.2	22
Déblaiement mineur	92254	3.90	0.49	3.2	6.6	3
Déblaiement mineur	92248	2.74	0.94	2.7	4.4	3
Chargement avant	89508	1.50	0.53	3.0	5.0	13
Chargement avant	88578	2.14	0.67	2.9	7.1	16
Chargement avant	92248	2.46	0.98	3.0	7.0	20
Chargement arrière	92254	1.84	0.41	3.2	6.7	8
Chargement arrière	88578	1.58	0.54	3.0	6.7	6
Épandage d'abrasifs	88578	1.60	0.52	3.3	6.6	7
Épandage d'abrasifs	90462	1.29	0.55	2.9	6.1	14
Épandage d'abrasifs	90460	1.75	0.58	3.0	5.6	21
Transit sans trémie	89508	3.37	0.46	2.8	6.1	3
Transit sans trémie	88578	4.18	0.52	3.3	4.8	7
Transit sans trémie	92248	3.76	0.68	2.9	6.5	10
Transit sans trémie	88584	2.84	0.30	2.8	4.3	2
Transit avec trémie	88578	1.78	0.42	3.3	4.2	2
Transit avec trémie	90462	3.19	0.48	4.9	6.2	1
Transit avec trémie	90460	2.84	0.55	3.7	5.7	4

**TABLEAU B.2: Caractéristiques des vibrations entre 0.5 et 80 Hz pour chaque combinaison de chenillette de déneigement et mode opératoire pour le mode de vibrations latérales (y)**

MODE OPÉRATOIRE	VEHICULE	ACCELERATION EFFICACE (ms <sup>-2</sup> )		FACTEUR DE CRÊTE f <sub>c</sub> 99 <sup>e</sup> perc. Absolu		NOMBRE DE SEGMENTS DE 60 s
		a	a <sub>w</sub>			
Déblaiement majeur	89508	2.87	0.42	3.2	6.6	6
Déblaiement majeur	88584	3.05	0.46	3.1	8.2	22
Déblaiement mineur	92254	4.25	0.43	2.9	5.8	3
Déblaiement mineur	92248	3.84	0.74	2.7	5.1	3
Chargement avant	89508	2.47	0.50	3.2	7.7	13
Chargement avant	88578	2.85	0.54	2.8	7.2	16
Chargement avant	92248	3.39	0.62	3.4	9.9	20
Chargement arrière	92254	2.11	0.38	3.1	6.6	8
Chargement arrière	88578	2.06	0.38	3.0	6.0	6
Épandage d'abrasifs	88578	2.30	0.42	3.9	8.3	7
Épandage d'abrasifs	90462	1.71	0.45	3.0	5.6	14
Épandage d'abrasifs	90460	2.54	0.54	2.8	6.1	21
Transit sans trémie	89508	6.96	0.76	2.9	5.4	3
Transit sans trémie	88578	4.04	0.39	3.0	5.7	7
Transit sans trémie	92248	4.88	0.54	3.0	7.1	10
Transit sans trémie	88584	4.12	0.33	3.0	5.7	2
Transit avec trémie	88578	2.60	0.21	2.6	4.6	2
Transit avec trémie	90462	7.24	0.48	3.3	4.6	1
Transit avec trémie	90460	4.70	0.53	2.9	8.2	4

**TABLEAU B.3: Caractéristiques des vibrations entre 0.5 et 80 Hz pour chaque combinaison de chenillette de déneigement et mode opératoire pour le mode de vibrations verticales (z)**

MODE OPÉRATEUR	VÉHICULE	ACCÉLÉRATION EFFICACE (ms <sup>-2</sup> )		FACTEUR DE CRÊTE f <sub>c</sub> 99 <sup>e</sup> perc. Absolu		NOMBRE DE SEGMENTS DE 60 s
		a	a <sub>w</sub>			
Déblaiement majeur	89508	3.03	1.44	2.9	6.9	6
Déblaiement majeur	88584	3.21	1.71	2.9	7.4	22
Déblaiement mineur	92254	4.83	1.91	2.6	6.6	3
Déblaiement mineur	92248	3.81	2.27	2.8	9.7	3
Chargement avant	89508	2.37	1.28	3.4	7.3	13
Chargement avant	88578	3.30	1.86	2.8	7.0	16
Chargement avant	92248	3.61	2.05	3.1	11.3	20
Chargement arrière	92254	2.61	1.30	3.1	6.9	8
Chargement arrière	88578	2.33	1.43	3.1	8.3	6
Épandage d'abrasifs	88578	2.76	1.55	3.0	7.6	7
Épandage d'abrasifs	90462	2.67	1.78	2.9	8.3	14
Épandage d'abrasifs	90460	3.26	1.84	2.9	6.3	21
Transit sans trémie	89508	4.28	1.74	3.1	4.9	3
Transit sans trémie	88578	3.74	1.48	2.8	6.8	7
Transit sans trémie	92248	3.95	1.84	2.7	5.6	10
Transit sans trémie	88584	4.93	1.82	2.8	4.9	2
Transit avec trémie	88578	2.52	0.95	2.8	6.4	2
Transit avec trémie	90462	6.56	1.86	3.1	4.8	1
Transit avec trémie	90460	5.16	1.59	2.6	5.0	4

**TABLEAU B.4: Caractéristiques des vibrations entre 0.5 et 80 Hz pour chaque combinaison de chenillette de déneigement et mode opératoire pour le mode de vibrations de roulis ( $\phi$ )**

MODE OPÉRATOIRE	VEHICULE	ACCÉLÉRATION EFFICACE (rads <sup>-2</sup> )		FACTEUR DE CRÊTE $f_c$ 99 <sup>e</sup> perc. Absolu		NOMBRE DE SEGMENTS DE 60 s
		a	a <sub>w</sub>			
Déblaiement majeur	89508	8.13	2.06	2.9	5.6	6
Déblaiement majeur	88584	7.02	0.53	3.6	7.0	22
Déblaiement mineur	92254	12.84	1.08	2.8	5.2	3
Déblaiement mineur	92248	8.37	0.64	2.7	5.7	3
Chargement avant	89508	5.74	0.36	2.9	9.4	13
Chargement avant	88578	7.56	0.60	3.4	7.4	16
Chargement avant	92248	8.15	0.63	3.4	10.1	20
Chargement arrière	92254	6.84	1.16	2.8	5.2	8
Chargement arrière	88578	4.89	0.37	2.8	19.3	6
Épandage d'abrasifs	88578	6.20	0.41	3.0	7.0	7
Épandage d'abrasifs	90462	5.28	0.42	3.2	7.5	14
Épandage d'abrasifs	90460	6.65	0.44	3.0	7.5	21
Transit sans trémie	89508	12.24	1.01	3.3	5.3	3
Transit sans trémie	88578	9.83	0.41	2.6	8.6	7
Transit sans trémie	92248	12.68	0.54	2.7	5.0	10
Transit sans trémie	88584	11.26	0.47	2.9	5.7	2
Transit avec trémie	88578	6.74	0.26	2.7	5.4	2
Transit avec trémie	90462	20.72	0.66	3.1	4.6	1
Transit avec trémie	90460	13.06	0.45	2.9	5.6	4

**TABLEAU B.5: Caractéristiques des vibrations entre 0.5 et 80 Hz pour chaque combinaison de chenillette de déneigement et mode opératoire pour le mode de vibrations de tangage ( $\theta$ )**

MODE OPÉRATOIRE	VEHICULE	ACCÉLÉRATION EFFICACE ( $\text{ms}^{-2}$ )		FACTEUR DE CRÊTE $f_c$		NOMBRE DE SEGMENTS DE 60 s
		a	$a_w$	99 <sup>e</sup> perc.	Absolu	
Déblaiement majeur	89508	5.12	2.06	2.8	7.4	6
Déblaiement majeur	88584	6.05	0.61	3.2	5.8	22
Déblaiement mineur	92254	6.72	1.13	2.6	4.2	3
Déblaiement mineur	92248	8.21	0.91	3.3	5.3	3
Chargement avant	89508	2.42	0.38	3.3	6.6	13
Chargement avant	88578	6.20	0.59	3.2	6.1	16
Chargement avant	92248	7.59	0.70	3.4	11.1	20
Chargement arrière	92254	4.35	1.27	2.7	4.6	8
Chargement arrière	88578	3.22	0.46	3.2	12.1	6
Épandage d'abrasifs	88578	3.92	0.59	3.7	6.7	7
Épandage d'abrasifs	90462	3.27	0.60	2.9	4.8	14
Épandage d'abrasifs	90460	3.55	0.68	2.9	4.8	21
Transit sans trémie	89508	7.19	0.96	3.5	4.7	3
Transit sans trémie	88578	7.56	0.57	2.9	8.1	7
Transit sans trémie	92248	9.68	0.74	3.0	5.7	10
Transit sans trémie	88584	9.84	0.53	3.1	5.7	2
Transit avec trémie	88578	4.58	0.37	3.7	6.1	2
Transit avec trémie	90462	10.74	0.70	2.9	4.9	1
Transit avec trémie	90460	8.07	0.66	2.9	4.6	4

## **ANNEXE C**

# **MESURES DE VIBRATIONS DANS LES CHARIOTS ÉLÉVATEURS À CONDUITE ASSISE**

**TABLEAU C.1: Caractéristiques des vibrations entre 0.5 et 80 Hz pour chaque chariot élévateur à conduite assise pour le mode de vibrations longitudinales (x)**

CHARIOT ÉLEVATEUR	CC (tonnes)	ACCÉLÉRATION EFFICACE (ms <sup>-2</sup> )		FACTEUR DE CRÊTE f <sub>c</sub>		NOMBRE DE SEGMENTS DE 60 s
		a	a <sub>w</sub>	99 <sup>e</sup> perc.	Absolu	
Hyster E 40XL 1990	2	0.42	0.20	3.2	7.5	25
Hyster E50XL 1992	2.5	0.38	0.16	2.8	11.3	22
Toyota 2FBCA20 1988	2	0.33	0.18	3.6	9.0	14
Hyster E 50XL 1990	2.5	0.28	0.18	2.9	13	25
Hyster E100XL 1993	5	0.39	0.19	3.2	7.3	21
Hyster H65XM 1996	3.25	0.61	0.44	3.4	7.2	8

**TABLEAU C.2: Caractéristiques des vibrations entre 0.5 et 80 Hz pour chaque chariot élévateur à conduite assise pour le mode de vibrations latérales (y)**

CHARIOT ÉLEVATEUR	CC (tonnes)	ACCELERATION EFFICACE (ms <sup>-2</sup> )		FACTEUR DE CRÊTE f <sub>c</sub>		NOMBRE DE SEGMENTS DE 60 s
		a	a <sub>w</sub>	99 <sup>e</sup> perc.	Absolu	
Hyster E40XL 1990	2	0.34	0.21	2.8	7.6	25
Hyster E50XL 1992	2.5	0.39	0.21	2.9	5.5	22
Toyota 2FBCA20 1988	2	0.35	0.16	2.6	13.5	14
Hyster E50XL 1990	2.5	0.23	0.13	3.8	11.4	25
Hyster E100XL 1993	5	0.40	0.16	3.1	8.6	21
Hyster H65XM 1996	3.25	0.48	0.18	3.1	6.2	8

**TABLEAU C.3: Caractéristiques des vibrations entre 0.5 et 80 Hz pour chaque chariot élévateur à conduite assise pour le mode de vibrations verticales (z)**

CHARIOT ÉLEVATEUR	CC (tonnes)	ACCÉLÉRATION EFFICACE (ms <sup>-2</sup> )		FACTEUR DE CRÊTE f <sub>c</sub>		NOMBRE DE SEGMENTS DE 60 s
		a	a <sub>w</sub>	99 <sup>e</sup> perc.	Absolu	
Hyster E40XL 1990	2	0.60	0.59	3.4	8.8	25
Hyster E50XL 1992	2.5	0.55	0.52	3.0	11.1	22
Toyota 2FBCA20 1988	2	0.60	0.56	2.7	11.2	14
Hyster E50XL 1990	2.5	0.44	0.41	3.8	8.2	25
Hyster E100XL 1993	5	0.56	0.51	3.5	10.4	21
Hyster H65XM 1996	3.25	0.82	0.74	4.0	10.2	8

**TABLEAU C.4: Caractéristiques des vibrations entre 0.5 et 80 Hz pour chaque chariot élévateur à conduite assise pour le mode de vibrations de roulis ( $\phi$ )**

CHARIOT ÉLÉVATEUR	CC (tonnes)	ACCÉLÉRATION EFFICACE ( $\text{rads}^{-2}$ )		FACTEUR DE CRÊTE $f_c$		NOMBRE DE SEGMENTS DE 60 s
		a	$a_w$	99 <sup>e</sup> perc.	Absolu	
Hyster E 40XL 1990	2	0.52	0.11	3.0	8.2	25
Hyster E 50XL 1992	2.5	0.65	0.13	3.6	10.5	22
Toyota 2FBCA20 1988	2	0.58	0.16	3.2	7.0	14
Hyster E50XL 1990	2.5	0.53	0.15	3.2	7.2	25
Hyster E100XL 1993	5	0.53	0.12	2.7	8.8	21
Hyster H65XM 1996	3.25	0.90	0.38	3.4	5.8	8

**TABLEAU C.5: Caractéristiques des vibrations entre 0.5 et 80 Hz pour chaque chariot élévateur à conduite assise pour le mode de vibrations de tangage( $\theta$ )**

CHARIOT ÉLÉVATEUR	CC (tonnes)	ACCELERATION EFFICACE ( $\text{rads}^{-2}$ )		FACTEUR DE CRÊTE $f_c$		NOMBRE DE SEGMENTS DE 60 s
		a	$a_w$	99 <sup>e</sup> perc.	Absolu	
Hyster E40XL 1990	2	0.54	0.14	3.8	6.9	25
Hyster E50XL 1992	2.5	0.48	0.11	3.2	6.3	22
Toyota 2FBCA20 1988	2	0.64	0.16	3.1	11.8	14
Hyster E50XL 1990	2.5	0.58	0.12	3.3	10.9	25
Hyster E100XL 1993	5	0.52	0.13	3.0	8.0	21
Hyster H65XM 1996	3.25	0.91	0.23	3.5	7.4	8

## **ANNEXE D**

# **MESURES DE VIBRATIONS DANS LES CHARIOTS ÉLÉVATEURS À STATION DEBOUT**

**TABLEAU D.1: Caractéristiques des vibrations entre 0.5 et 80 Hz pour chaque modèle de chariot élévateur à station debout pour le mode de vibrations longitudinales (x)**

CHARIOT ÉLÉVATEUR	CC (tonnes)	ACCÉLÉRATION EFFICACE (ms <sup>-2</sup> )		FACTEUR DE CRÊTE f <sub>c</sub>		NOMBRE DE SEGMENTS DE 60 s
		a	a <sub>w</sub>	99 <sup>e</sup> perc.	Absolu	
Crown 1992	2	1.23	0.70	5.4	17.4	69
Crown 1996	2	1.37	0.93	4.6	15.8	41
Clark 1990	2	0.99	0.64	4.4	14.4	20
Clark 1994	2	1.41	0.70	3.8	14.1	55
Clark 1992	2.5	0.28	0.22	3.5	9.5	9
Clark 1994	2.5	0.30	0.21	3.5	13.3	22

**TABLEAU D.2: Caractéristiques des vibrations entre 0.5 et 80 Hz pour chaque modèle de chariot élévateur à station debout pour le mode de vibrations latérales (y)**

CHARIOT ÉLÉVATEUR	CC (tonnes)	ACCÉLÉRATION EFFICACE (ms <sup>-2</sup> )		FACTEUR DE CRÊTE f <sub>c</sub>		NOMBRE DE SEGMENTS DE 60 s
		a	a <sub>w</sub>	99 <sup>e</sup> perc.	Absolu	
Crown 1992	2	0.34	0.20	2.8	10.8	69
Crown 1996	2	0.25	0.16	3.3	13.1	41
Clark 1990	2	0.23	0.17	3.7	7.1	20
Clark 1994	2	0.31	0.18	2.5	10.3	55
Clark 1992	2.5	0.22	0.17	4.6	6.7	9
Clark 1994	2.5	0.25	0.19	3.6	5.6	22

**TABLEAU D.3: Caractéristiques des vibrations entre 0.5 et 80 Hz pour chaque modèle de chariot élévateur à station debout pour le mode de vibrations verticales (z)**

CHARIOT ÉLÉVATEUR	CC (tonnes)	ACCELERATION EFFICACE (ms <sup>-2</sup> )		FACTEUR DE CRÊTE f <sub>c</sub>		NOMBRE DE SEGMENTS DE 60 s
		a	a <sub>w</sub>	99 <sup>e</sup> perc.	Absolu	
Crown 1992	2	0.66	0.61	2.2	21	69
Crown 1996	2	0.55	0.52	4.2	16.6	41
Clark 1990	2	0.55	0.50	3.4	17.8	20
Clark 1994	2	0.77	0.66	3.5	12.2	55
Clark 1992	2.5	0.32	0.28	4.0	13.9	9
Clark 1994	2.5	0.50	0.46	3.0	25.2	22

## **ANNEXE E**

# **RÉSUMÉ DES CLASSES SPECTRALES DE VIBRATIONS DÉFINIES POUR L'ENSEMBLE DES VÉHICULES**

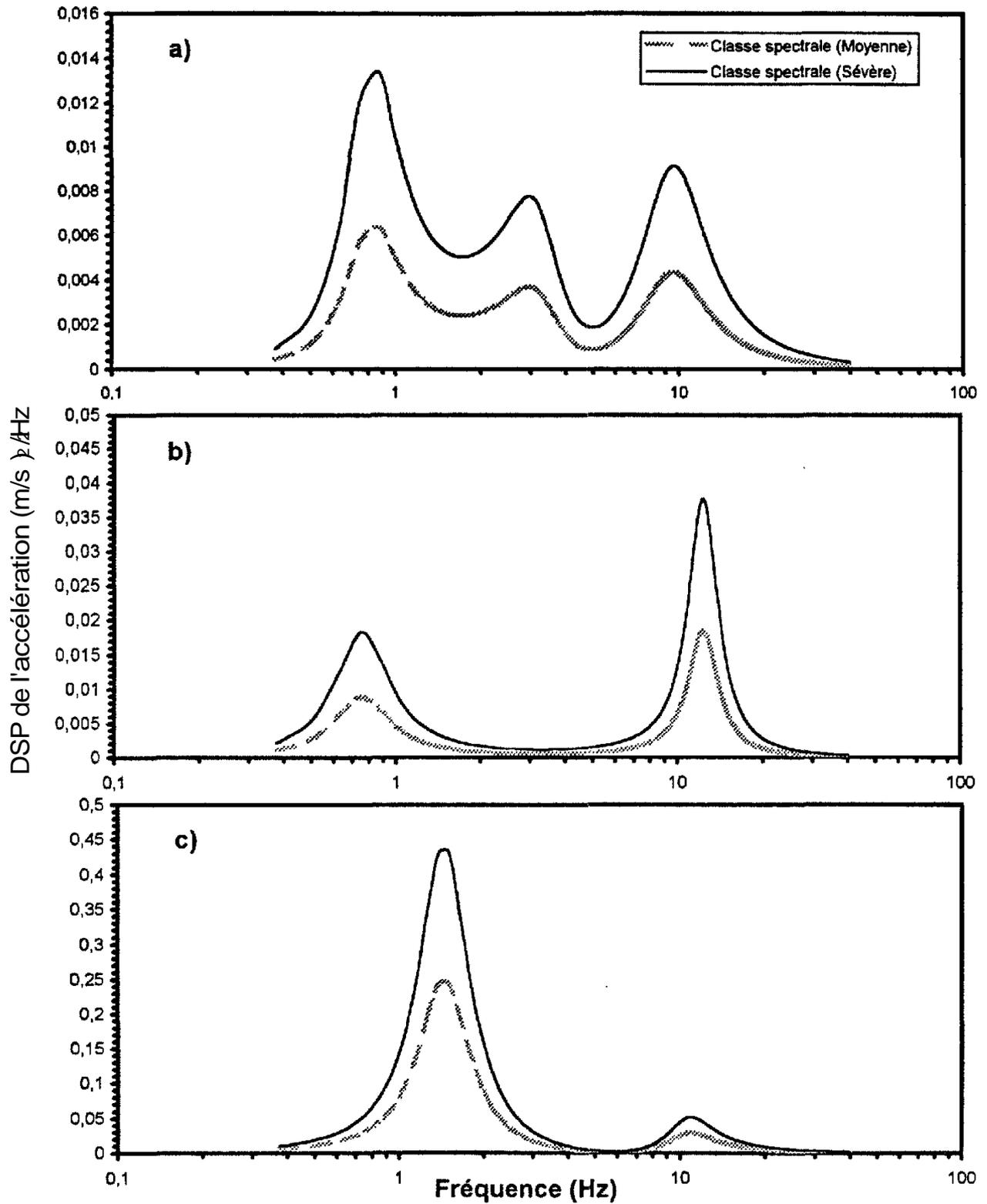
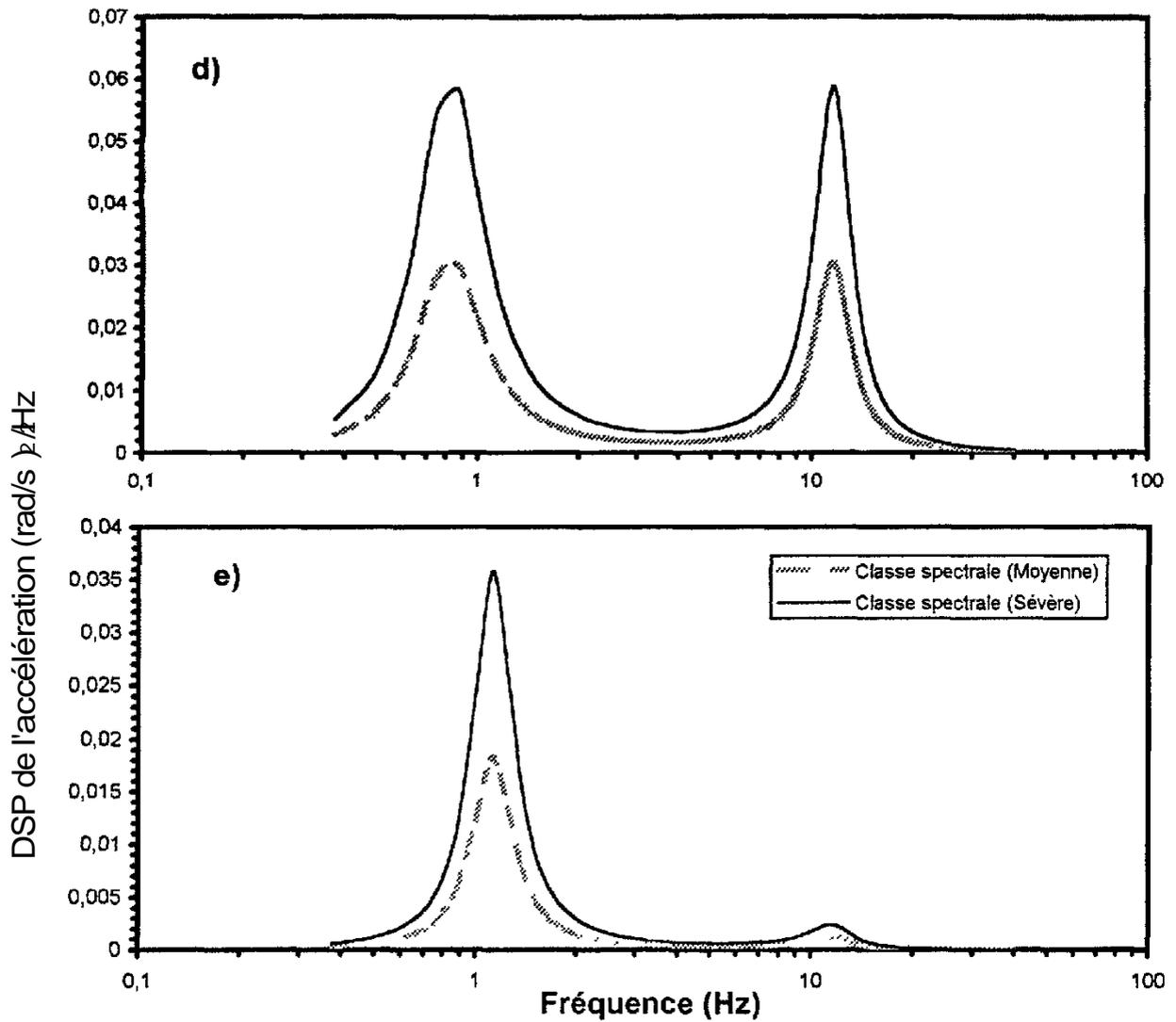


Figure E-1: Spectres de la DSP définissant la classe spectrale des vibrations des autobus urbains pour des conditions moyenne et sévère. Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) latéral (y); c) vertical (z); d) de roulis ( $\phi$ ); et e) de tangage ( $\theta$ ).



Mode vibratoire m	Accélération non pondérée a ( $\text{m/s}^2$ ou $\text{rad/s}^2$ )		Accélération pondérée $a_w$ ( $\text{m/s}^2$ ou $\text{rad/s}^2$ )	
	Moyenne	Sévère	Moyenne	Sévère
x	0,23	0,33	0,10	0,14
y	0,33	0,47	0,09	0,13
z	0,69	0,92	0,48	0,65
$\phi$	0,43	0,60	0,13	0,18
$\theta$	0,14	0,19	0,08	0,11

Figure E-1: Spectres de la DSP définissant la classe spectrale des vibrations des autobus urbains pour des conditions moyenne et sévère. Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) latéral (y); c) vertical (z); d) de roulis ( $\phi$ ); et e) de tangage ( $\theta$ ).

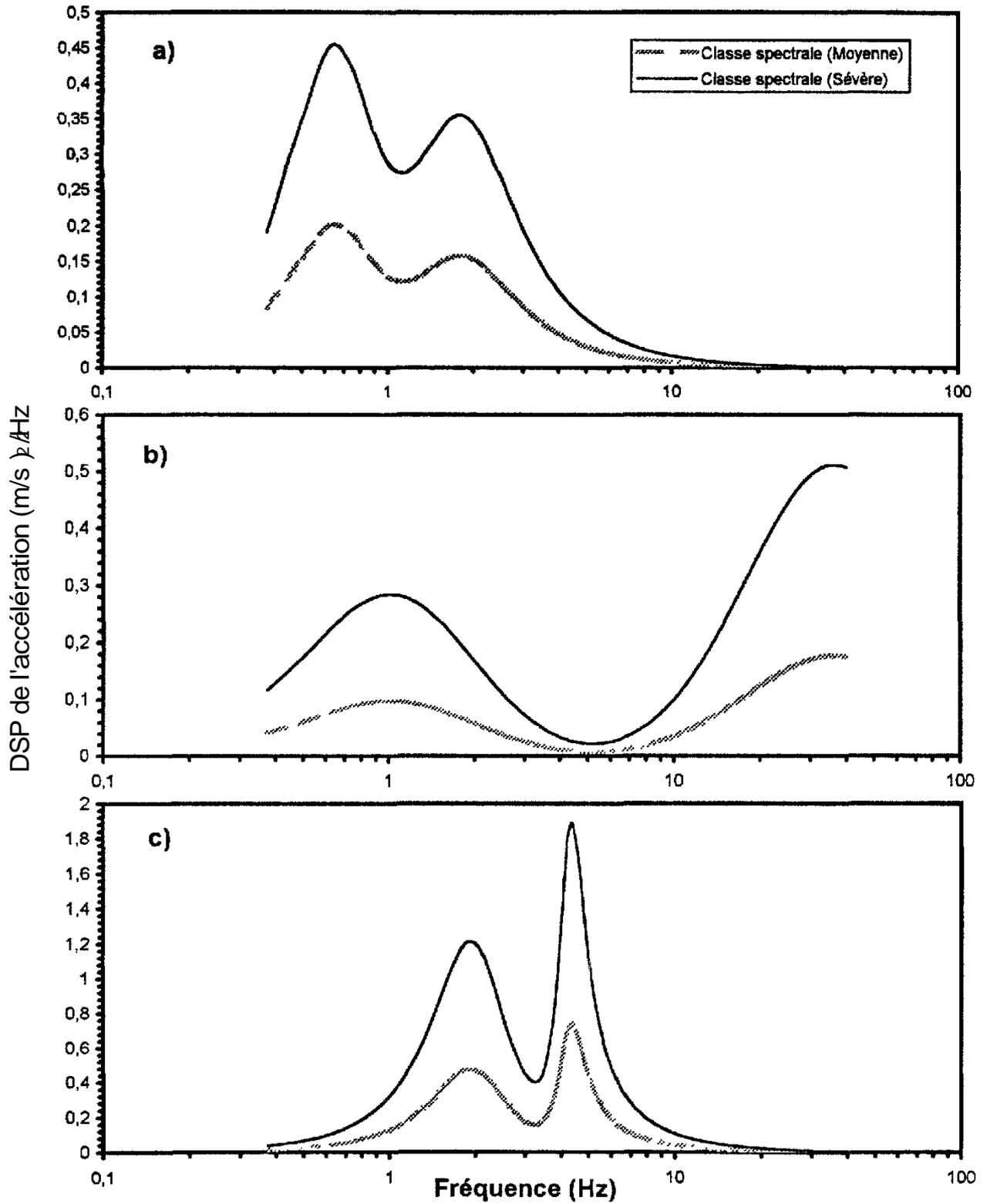
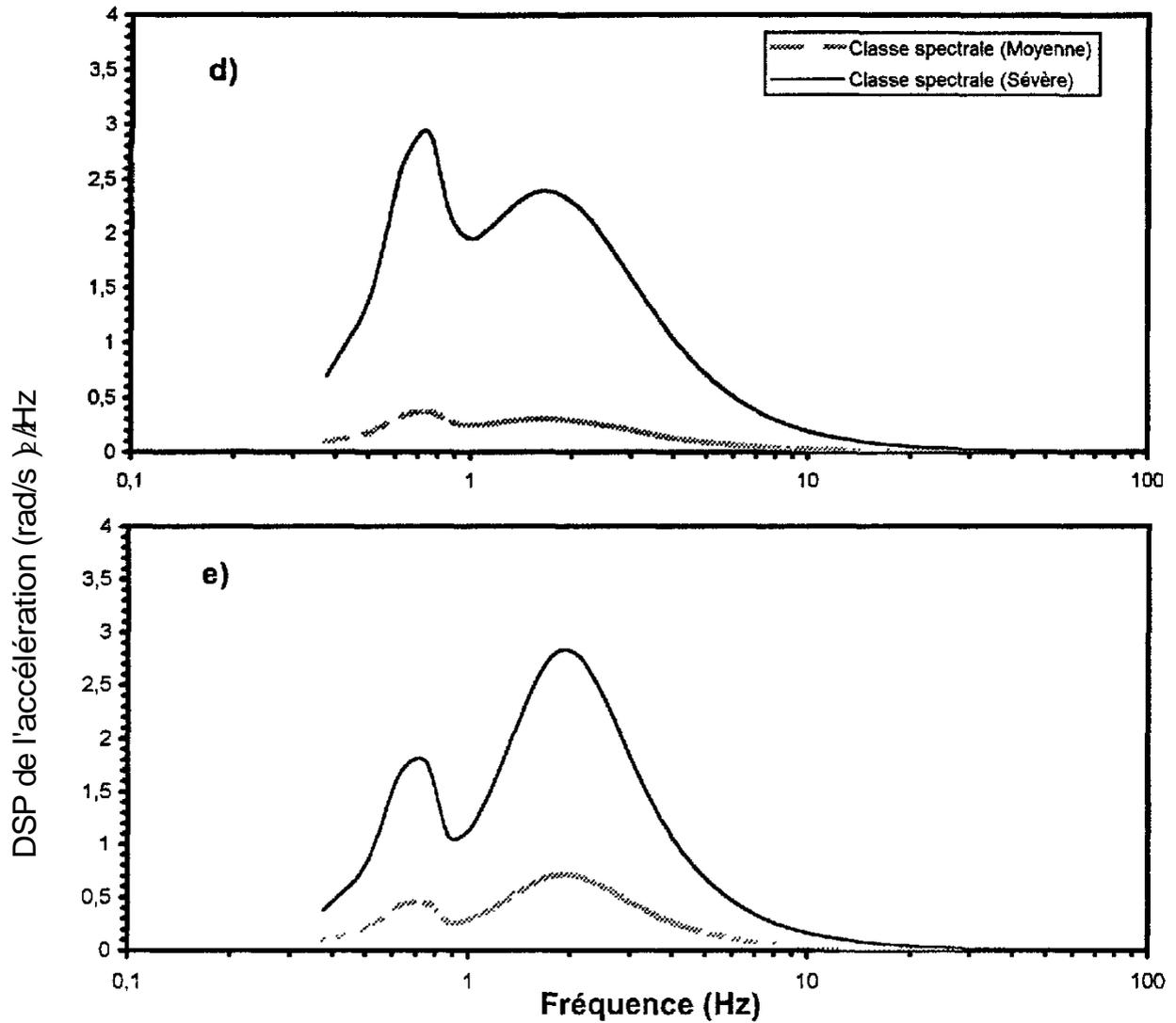


Figure E-2: Spectres de la DSP définissant la classe spectrale des vibrations des chenillettes de déneigement pour des conditions moyenne et sévère. Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) latéral (y); c) vertical (z); d) de roulis ( $\phi$ ); et e) de tangage ( $\theta$ ).



Mode vibratoire m	Accélération non pondérée a (m/s <sup>2</sup> ou rad/s <sup>2</sup> )		Accélération pondérée a <sub>w</sub> (m/s <sup>2</sup> ou rad/s <sup>2</sup> )	
	Moyenne	Sévère	Moyenne	Sévère
x	0,77	1,16	0,58	0,87
y	2,38	4,04	0,44	0,75
z	1,57	2,51	1,38	2,20
φ	1,18	3,32	0,83	2,32
θ	1,62	3,25	0,75	1,50

Figure E-2: Spectres de la DSP définissant la classe spectrale des vibrations des chenillettes de déneigement pour des conditions moyenne et sévère. Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) latéral (y); c) vertical (z); d) de roulis (φ); et e) de tangage (θ).

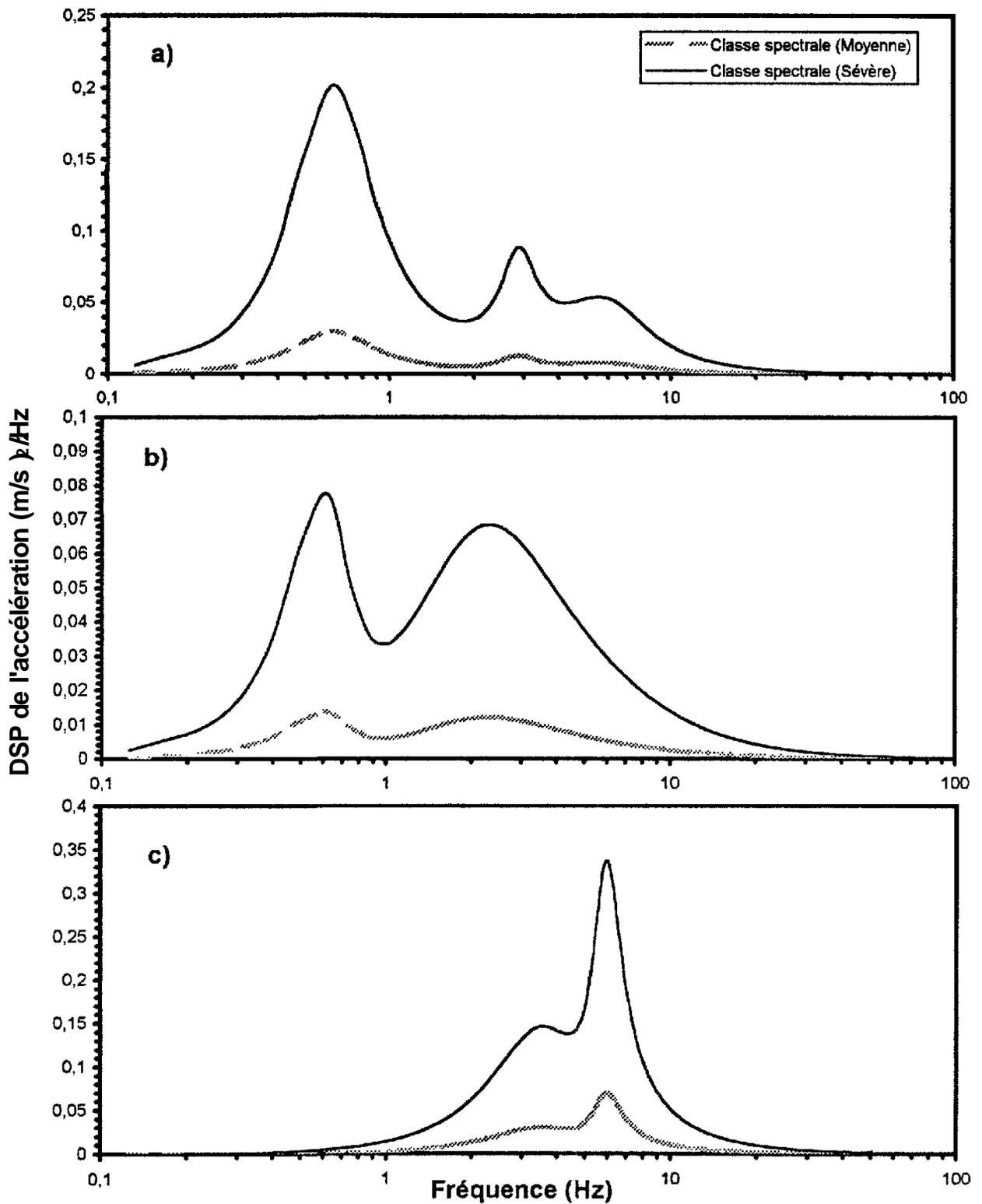
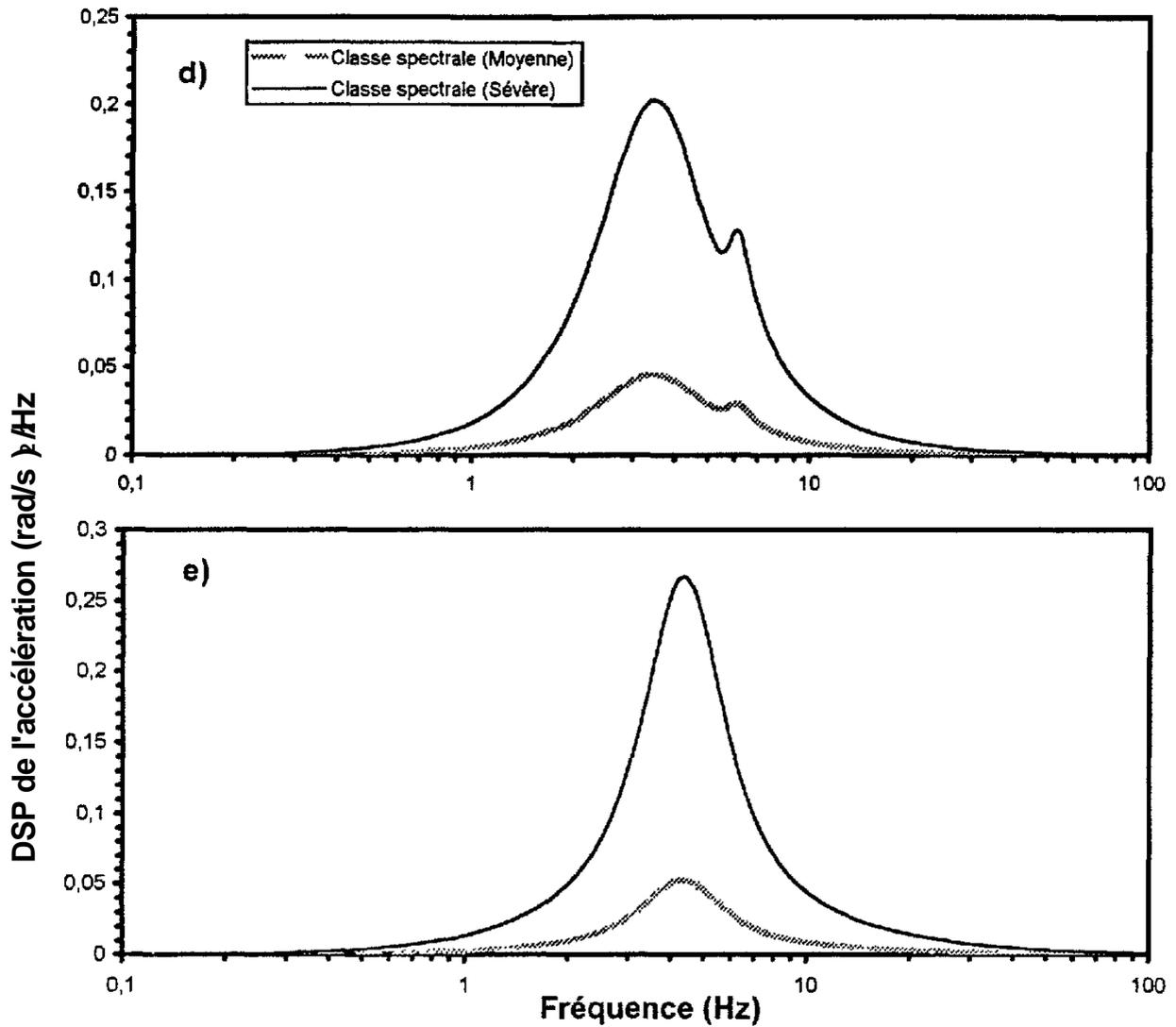


Figure E-3: Spectres de la DSP définissant la classe spectrale des vibrations des chariots élévateurs à conduite assise de catégorie I pour des conditions moyenne et sévère. Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) latéral (y); c) vertical (z); d) de roulis ( $\phi$ ); et e) de tangage ( $\theta$ ).



Mode vibratoire m	Accélération non pondérée a (m/s <sup>2</sup> ou rad/s <sup>2</sup> )		Accélération pondérée a <sub>w</sub> (m/s <sup>2</sup> ou rad/s <sup>2</sup> )	
	Moyenne	Sévère	Moyenne	Sévère
x	0,31	0,82	0,18	0,47
y	0,30	0,72	0,17	0,40
z	0,58	1,27	0,54	1,18
φ	0,52	1,10	0,14	0,29
θ	0,56	1,27	0,12	0,27

Figure E-3: Spectres de la DSP définissant la classe spectrale des vibrations des chariots élévateurs à conduite assise de catégorie I pour des conditions moyenne et sévère. Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) latéral (y); c) vertical (z); d) de roulis (φ); et e) de tangage (θ).

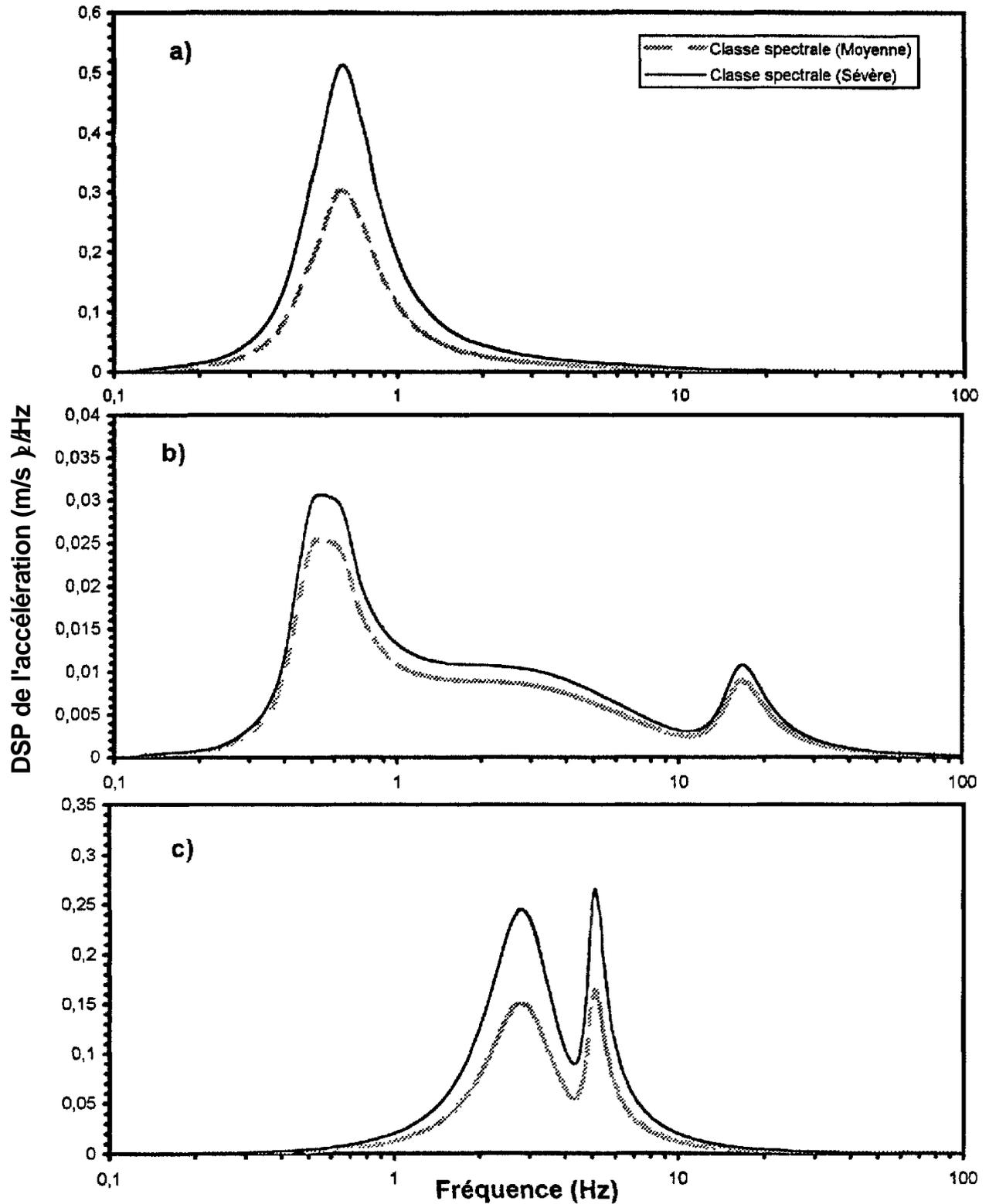
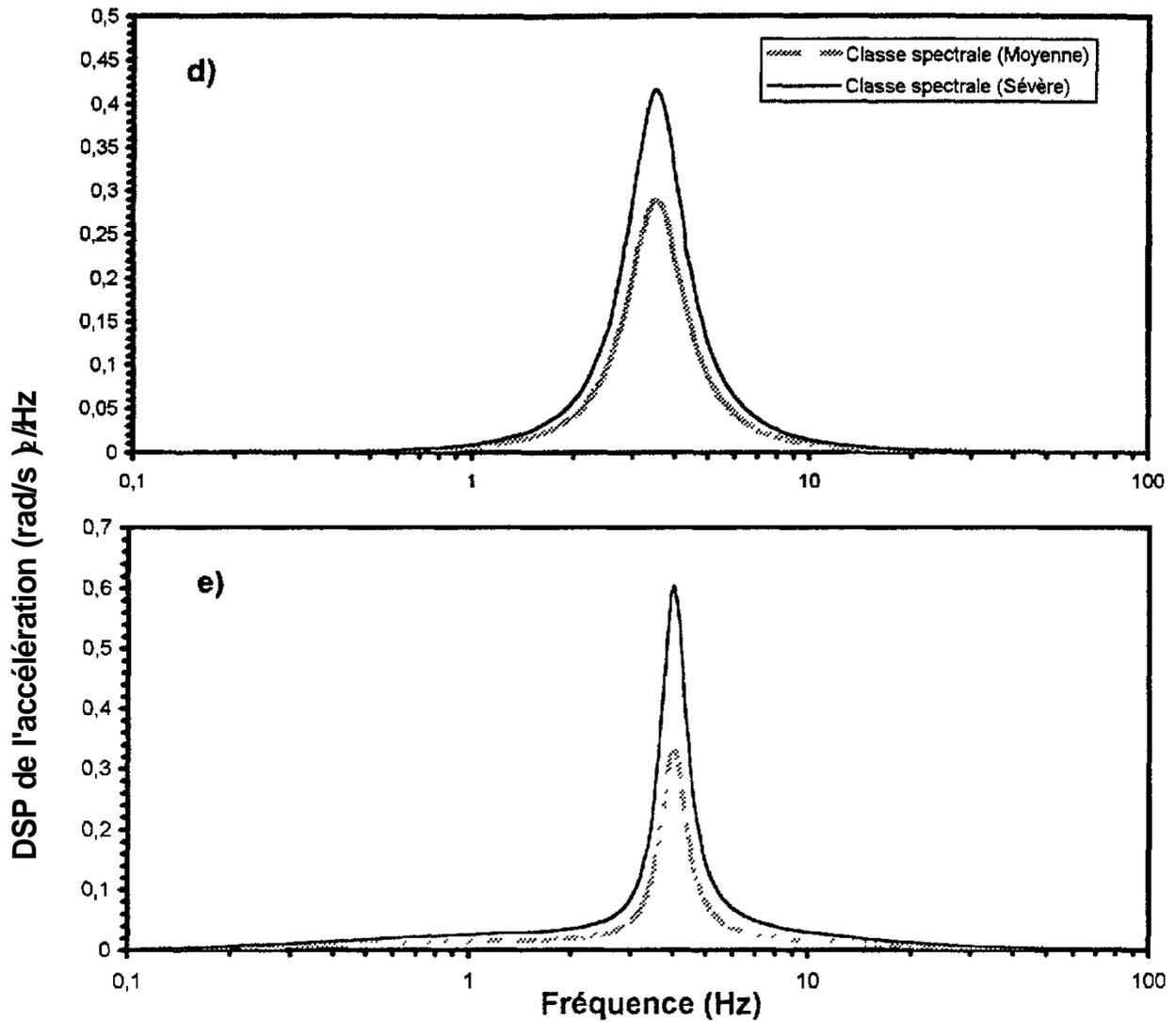
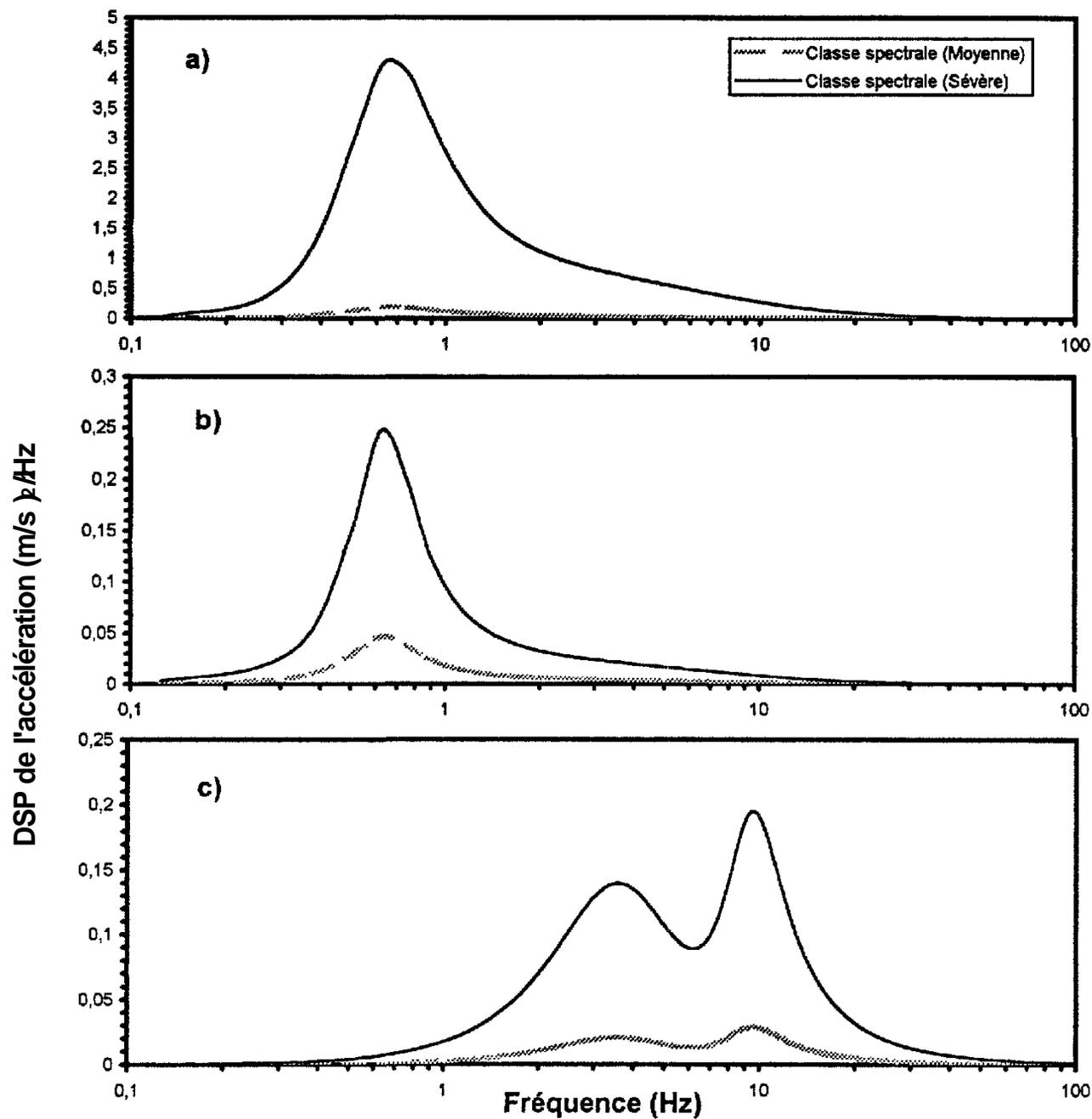


Figure E-4: Spectres de la DSP définissant la classe spectrale des vibrations des chariots élévateurs à conduite assise de catégorie II pour des conditions moyenne et sévère. Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) latéral (y); c) vertical (z); d) de roulis ( $\phi$ ); et e) de tangage ( $\theta$ ).



Mode vibratoire m	Accélération non pondérée a (m/s <sup>2</sup> ou rad/s <sup>2</sup> )		Accélération pondérée a <sub>w</sub> (m/s <sup>2</sup> ou rad/s <sup>2</sup> )	
	Moyenne	Sévère	Moyenne	Sévère
x	0,54	0,71	0,43	0,56
y	0,43	0,48	0,18	0,19
z	0,82	1,05	0,72	0,92
φ	0,87	1,04	0,24	0,29
θ	0,88	1,19	0,21	0,29

Figure E-4: Spectres de la DSP définissant la classe spectrale des vibrations des chariots élévateurs à conduite assise de catégorie II pour des conditions moyenne et sévère. Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) latéral (y); c) vertical (z); d) de roulis (φ); et e) de tangage (θ).



Mode Vibratoire m	Accélération non pondérée a (m/s <sup>2</sup> ou rad/s <sup>2</sup> )		Accélération pondérée a <sub>w</sub> (m/s <sup>2</sup> ou rad/s <sup>2</sup> )	
	Moyenne	Sévère	Moyenne	Sévère
	x	0,72	3,38	0,46
y	0,27	0,62	0,18	0,42
z	0,59	1,54	0,50	1,30

Figure E-5: Spectres de la DSP définissant la classe spectrale des vibrations des chariots élévateurs à station debout pour des conditions moyenne et sévère. Modes de vibrations a) longitudinal (x); b) latéral (y); et c) vertical (z).