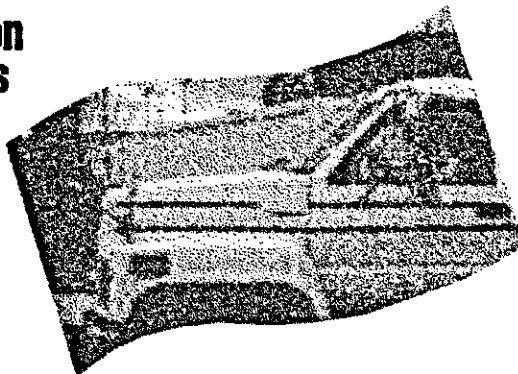


**Étude exploratoire de l'exposition
aux vibrations globales du corps
dans un véhicule ambulancier
de modèle GMC Top Kick**



**ÉTUDES ET
RECHERCHES**

**Paul-Émile Boileau
Subhash Rakheija**

Décembre 1998 R-209

RAPPORT



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

La recherche, pour mieux comprendre

L'Institut de recherche en santé et en sécurité du travail du Québec (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 finance, par subvention ou contrats, 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.

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

Il est possible de se procurer le catalogue des publications de l'Institut et de s'abonner à *Prévention au travail* en écrivant à l'adresse au bas de cette page.

ATTENTION

Cette version numérique vous est offerte à titre d'information seulement. Bien que tout ait été mis en œuvre pour préserver la qualité des documents lors du transfert numérique, il se peut que certains caractères aient été omis, altérés ou effacés. Les données contenues dans les tableaux et graphiques doivent être vérifiées à l'aide de la version papier avant utilisation.

Dépôt légal
Bibliothèque nationale du Québec

IRSST - Direction des communications
505, boul. de Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : (514) 288-1 551
Télécopieur: (514) 288-7636
Site internet : www.irsst.qc.ca
© Institut de recherche en santé
et en sécurité du travail du Québec,

Étude exploratoire de l'exposition aux vibrations globales du corps dans un véhicule ambulancier de modèle GMC Top Kick

Paul-Émile Boileau,
Programme sécurité-ingénierie, IRSST

Subhash Rakheija
Université Concordia

ÉTUDE
EXPLORATOIRE
DE L'EXPOSITION
AUX VIBRATIONS
GLOBALES
DU CORPS
DANS UN VÉHICULE
AMBULANCIER
DE MODÈLE
GMC TOP KICK

RAPPORT

RÉSUMÉ

Cette étude exploratoire comporte deux volets : le premier traitant de l'exposition aux vibrations globales du corps lors de divers types de déplacements ambulanciers; l'autre de l'évaluation du comportement dynamique d'un véhicule ambulancier GMC Top Kick et des éléments de sa suspension arrière lors de ces mêmes trajets. Le premier volet vise à déterminer si un lien peut être établi entre l'exposition aux vibrations à différents postes de travail dans le véhicule et les problèmes d'inconfort et autres malaises rapportés par le personnel ambulancier; le tout étant mis en relation avec les guides définis dans la norme internationale ISO 2631-1 (1997). Le deuxième volet vise à caractériser les fréquences de résonance du véhicule pour les différents modes de vibrations verticales, de roulis et de tangage, et à évaluer le comportement global des éléments de la suspension arrière du véhicule, incluant les amortisseurs. Les résultats suggèrent que l'exposition aux vibrations s'avère être plus problématique sur le plan santé pour le personnel assis sur les banquettes longitudinales et latérales dans le module arrière du véhicule, que pour ceux dans la cabine avant ou même du banc de tête ou encore debout à proximité de la tête de la civière. À chacun des six postes de travail considérés, le guide du confort de la norme ISO 2631-1 (1997) qualifie l'exposition aux vibrations de passablement inconfortable à inconfortable, le degré d'inconfort variant selon la position du poste de travail et la situation de conduite. Dépendant de la situation de conduite et de la durée d'exposition quotidienne, le pourcentage de population susceptible de ressentir des malaises aigus liés au mal des transports varie selon les postes de travail, mais semble être le plus important pour le conducteur et pour le passager de la banquette latérale. La fréquence de résonance du véhicule pour le mode de vibrations verticales est établie à 2.2 Hz, indiquant une suspension particulièrement rigide si l'on tient compte que la fréquence de résonance anticipée pour un véhicule dont le poids et la capacité de charge sont identiques est de moins de 1.4 Hz. Les faibles déplacements enregistrés de part et d'autre des amortisseurs sont aussi indicateurs de la trop grande rigidité de la suspension arrière qui comporte aussi des ressorts à lames et des ballons pneumatiques. De plus, le degré d'amortissement des amortisseurs a été établi à moins de 6%, bien que pour l'ensemble de la suspension, une part importante de l'amortissement global provienne aussi du frottement à sec entre les lames. Les résultats suggèrent que la suspension arrière est trop rigide, ce qui réduit considérablement la qualité vibratoire du trajet pour les passagers à bord.

REMERCIEMENTS

Cette étude constitue une réalisation conjointe du groupe CONCAVE de l'Université Concordia et du groupe Vibrations du Programme sécurité-ingénierie de l'IRSST. Le personnel de chacun de ces deux groupes de recherche a rigoureusement été impliqué dans chacune des étapes de l'étude, incluant la phase préparatoire, les mesures sur le terrain, le traitement et l'analyse des données, ainsi que la présentation des résultats. Aussi tenons nous à remercier sincèrement messieurs Danius Juras, Dale Rathwell, Harry Politis et Ion Stiharu du groupe CONCAVE ainsi que messieurs Jérôme Boutin, Pierre Drouin et Patrick Sauvé de l'IRSST pour leur contribution à diverses étapes de l'étude. Nos remerciements s'adressent également aux instigateurs de cette étude, notamment madame Liliane Gras, inspectrice à la CSST, ainsi que le comité paritaire de santé et sécurité du travail et la direction de la Corporation d'urgences-santé de la région de Montréal Métropolitain. Nous tenons enfin à souligner de façon particulière, le travail de monsieur Bernard Paradis, conseiller en prévention chez Urgences-Santé, qui a su piloter le dossier et servir d'intermédiaire entre nos organismes, ce qui lui a valu la tâche de conduire le véhicule ambulancier lors des essais sur le terrain.

TABLES DES MATIÈRES

1.0 INTRODUCTION	1
2.0 OBJECTIFS DE L'ÉTUDE	3
3.0 RÉALISATION DES ESSAIS	5
3.1 DESCRIPTION DU VÉHICULE ET DE SA SUSPENSION ARRIÈRE.....	5
3.2 CONDITIONS DE CONDUITE ET PARCOURS RETENU.....	7
3.3 IDENTIFICATION DES POINTS ET DES DIRECTIONS DE MESURES.....	8
3.3.1 <i>Exposition aux vibrations globales du corps</i>	8
3.3.2 <i>Comportement dynamique du véhicule</i>	10
3.4 DÉROULEMENT DES ESSAIS.....	11
3.5 ANALYSE DES DONNÉES : ÉVALUATION DE L'EXPOSITION AUX VIBRATIONS.....	11
3.5.1 <i>Guide sur l'effet des vibrations sur la santé</i>	17
3.5.3 <i>Guide sur l'effet des vibrations sur l'incidence du mal des transports</i>	19
3.6 ANALYSE DES DONNÉES : COMPORTEMENT DYNAMIQUE DU VÉHICULE.....	20
4.0 RÉSULTATS : EXPOSITION AUX VIBRATIONS GLOBALES DU CORPS	21
4.1 INFLUENCE DES CONDITIONS DE CONDUITE SUR LES NIVEAUX D'EXPOSITION AUX VIBRATIONS.....	26
4.2 ÉVALUATION DES EXPOSITIONS VIBRATOIRES EN RELATION AVEC LES EFFETS SUR LA SANTÉ.....	27
4.3 ÉVALUATION DES EXPOSITIONS VIBRATOIRES EN RELATION AVEC LES EFFETS SUR LE CONFORT.....	28
4.4 ÉVALUATION DES EXPOSITIONS VIBRATOIRES EN RELATION AVEC LES EFFETS SUR LE MAL DES TRANSPORTS.....	29
4.5 ÉVALUATION DE L'EXPOSITION AUX VIBRATIONS EN RÉGIME STATIONNAIRE.....	30
5.0 RÉSULTATS : COMPORTEMENT DYNAMIQUE DU VÉHICULE	33
5.1 DENSITÉ SPECTRALE DE PUISSANCE DES ACCÉLÉRATIONS VERTICALES DANS LE MODULE ARRIÈRE.....	33
5.2 DENSITÉ SPECTRALE DE PUISSANCE DES ACCÉLÉRATIONS VERTICALES DE L'ESSIEU ARRIÈRE.....	39
5.3 DENSITÉ SPECTRALE DE PUISSANCE DES ACCÉLÉRATIONS ANGULAIRES DU MODULE ARRIÈRE.....	45
5.5 SPECTRES TEMPORELS DES DÉPLACEMENTS ANGULAIRES DE ROULIS.....	55
5.6 SPECTRES TEMPORELS DES DÉPLACEMENTS ANGULAIRES DE TANGAGE.....	56
5.7 SPECTRES TEMPORELS DES ACCÉLÉRATIONS LATÉRALE ET VERTICALE DU MODULE ARRIÈRE.....	56
6.0 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	57

LISTE DES FIGURES

Figure 1a : Représentation du véhicule ambulancier de type GMC Top Kick	6
Figure 1b : Représentation schématique de la suspension arrière du véhicule	6
Figure 2: Identification des points et des axes de mesure lors de la première passe.....	12
Figure 3: Identification des points et des axes de mesure lors de la deuxième passe	13
Figure 4a: Dimensions associées au positionnement des points de mesure dans le véhicule.....	14
Figure 4b: Dimensions associées au positionnement des points de mesure sur l'essieu arrière.....	15
Figure 5 : Guide sur l'effet des vibrations sur la santé selon la norme ISO 2631-1 (1997)	18
Figure 6 : Densité spectrale de puissance des accélérations verticales dans le module arrière lors de déplacements sur des rues urbaines à 50 km/h	34
Figure 7 : Densité spectrale de puissance des accélérations verticales dans le module arrière lors de déplacements en situation d'urgence sur des rues urbaines à 70 km/h	35
Figure 8 : Densité spectrale de puissance des accélérations verticales dans le module arrière lors de déplacements sur des rues urbaines à 70 km/h	36
Figure 9 : Densité spectrale de puissance des accélérations verticales dans le module arrière lors de déplacements en situation d'urgence sur une autoroute à 100 km/h.....	37
Figure 10 : Densité spectrale de puissance des accélérations verticales dans le module arrière lors de déplacements sur une autoroute à 100 km/h.....	38
Figure 11 : Densité spectrale de puissance des accélérations verticales de l'essieu arrière lors de déplacements sur des rues urbaines à 50 km/h.....	40
Figure 12 : Densité spectrale de puissance des accélérations verticales de l'essieu arrière lors de déplacements en situation d'urgence sur des rues urbaines à 70 km/h	41
Figure 13 : Densité spectrale de puissance des accélérations verticales de l'essieu arrière lors de déplacements sur des rues urbaines à 70 km/h.....	42
Figure 14 : Densité spectrale de puissance des accélérations verticales de l'essieu arrière lors de déplacements en situation d'urgence sur une autoroute à 100 km/h.....	43
Figure 15 : Densité spectrale de puissance des accélérations verticales de l'essieu arrière lors de déplacements sur une autoroute à 100 km/h.....	44
Figure 16 : Densité spectrale de puissance des accélérations angulaires de roulis dans le module arrière lors de déplacements sur des rues urbaines à 50 km/h	46
Figure 17 : Densité spectrale de puissance des accélérations angulaires de tangage dans le module arrière lors de déplacements sur des rues urbaines à 50 km/h	47

Figure 18 : Densité spectrale de puissance des accélérations angulaires de lacet dans le module arrière lors de déplacements sur des rues urbaines à 50 km/h	48
Figure 19 : Spectres temporels des déplacements le long de l'axe de chacun des amortisseurs lors de déplacements sur des rues urbaines à 50 km/h	50
Figure 20 : Spectres temporels des déplacements le long de l'axe de chacun des amortisseurs lors de déplacements en situation d'urgence sur des rues urbaines à 70 km/h	51
Figure 21 : Spectres temporels des déplacements le long de l'axe de chacun des amortisseurs lors de déplacements sur des rues urbaines à 70 km/h	52
Figure 22 : Spectres temporels des déplacements le long de l'axe de chacun des amortisseurs lors de déplacements en situation d'urgence sur une autoroute à 100 km/h.....	53
Figure 23 : Spectres temporels des déplacements le long de l'axe de chacun des amortisseurs lors de déplacements sur une autoroute à 100 km/h.....	54

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : Guide du degré d'inconfort probable lié à l'exposition aux vibrations globales du corps (ISO 2631-1 1997)	19
TABLEAU 2 : Niveaux d'accélération globale pondérée (ms-2) mesurés à chacun des postes de travail	22
TABLEAU 3 : Facteur de crête absolu associé aux vibrations mesurées à chacun des postes de travail	23
TABLEAU 4 : Valeur de dose vibratoire (VDV) moyenne (ms-1.75) et écart-type à chacun des postes de travail sur la base de segments dont la durée est de une minute	24
TABLEAU 5 : Moyenne et écart-type de la dose vibratoire partielle-1 minute (ms-1.5) liée au mal des transports (MSDVz) à chacun des postes de travail	25
TABLEAU 6 : Moyenne et écart-type des accélérations efficaces pondérées aux postes de conducteur, passager avant et banc de tête	26
TABLEAU 7 : Effets sur la santé - évaluation de la durée d'exposition quotidienne requise pour atteindre les cotes d'alerte (Tea) et de danger (Ted) selon ISO 2631-1 (1997)	28
TABLEAU 8 : Effets sur le confort - application du guide défini dans la norme ISO 2631-1 (1997) à chacun des postes de travail	29
TABLEAU 9 : Mal des transports - estimation du pourcentage de population susceptible de démontrer des symptômes en fonction de la durée d'exposition quotidienne	30

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A : SPECTRES DE LA DENSITÉ SPECTRALE DE PUISSANCE DES ACCÉLÉRATIONS ANGULAIRES LORS DES DÉPLACEMENTS À 70 ET À 100 KM/H.....	A-1
ANNEXE B : SPECTRES TEMPORELS DES DÉPLACEMENTS ANGULAIRES DE ROULIS DU CHÂSSIS SOUS CHACUNE DES CONDITIONS DE CONDUITE.....	B-1
ANNEXE C : SPECTRES TEMPORELS DES DÉPLACEMENTS ANGULAIRES DE TANGAGE DU CHÂSSIS SOUS CHACUNE DES CONDITIONS DE CONDUITE.....	C-1
ANNEXE D : SPECTRES TEMPORELS DES ACCÉLÉRATIONS LATÉRALES ET VERTICALES DU CHÂSSIS SOUS CHACUNE DES CONDITIONS DE CONDUITE.....	D-1

1.0 INTRODUCTION

Plusieurs des véhicules ambulanciers utilisés par Urgences-Santé sont des camions de poids moyen de modèle GMC de type Top Kick sur lesquels des modules ont été installés servant au transport des patients. Ces véhicules, dont le châssis est à profil bas, possèdent un double système de suspension, constitué de ressorts à lame et de ballons pneumatiques et d'amortisseurs. Il est généralement admis que la capacité de charge de ce système de suspension est de beaucoup supérieur à la charge produite par le module arrière.

Or, depuis la mise en service de ces véhicules, de nombreuses plaintes ont été enregistrées de la part du personnel ambulancier à l'effet que dans des conditions particulières de conduite (i.e. vitesse, type de chaussée), les vibrations et les chocs ressentis dans le véhicule constituent une source importante d'inconfort et de malaises (e.g. mal des transports), sans compter qu'ils accentuent les risques de chutes et de heurts pour le personnel ayant à travailler dans les modules arrières lorsque le véhicule est en mouvement. D'autres sources d'inconfort et de malaises sont rapportées par le personnel, autant dans la cabine avant que dans le module arrière du véhicule, attribuées aux mouvements accentués de roulis et de tangage, de même qu'à l'intensité considérable des vibrations transmises directement du moteur aux passagers. Cette dernière source de vibrations provenant du moteur est également d'ailleurs à l'origine d'inconfort ressenti par le personnel lorsque les véhicules ambulanciers sont stationnés à différents endroits alors que le moteur est maintenu en état de marche.

Jusqu'à ce jour, des efforts considérables ont été déployés pour identifier et comprendre ce qui, dans le design des nouveaux véhicules de poids moyen de type Top Kick, serait à l'origine des problèmes rapportés lorsque convertis en véhicules ambulanciers. À cet égard, la suspension arrière de certains de ces véhicules a fait l'objet de diverses modifications initiées par Urgences-Santé. Parmi les plus importantes modifications, on note l'essai de différents types de suspension ayant des capacités de charge différentes, l'ajout de poids à l'arrière du véhicule, l'installation de valves pneumatiques à réponse plus rapide, la variation en hauteur des ballons pneumatiques, la diminution de la pression des pneus, des modifications au niveau des lames, etc. Malgré tous ces efforts, il a été difficile d'établir avec certitude l'influence que de telles modifications ont pu avoir sur l'incidence des problèmes rapportés par le personnel et sur le comportement dynamique du véhicule, puisqu'en l'absence de données quantitatives précises, seule une évaluation subjective difficile à contrôler pouvait permettre d'effectuer un jugement. Outre cette difficulté, il n'a pas encore été établi de façon rigoureuse jusqu'à quel point les problèmes d'inconfort et les malaises rapportés par le personnel ambulancier sont attribuables aux vibrations et aux chocs ressentis dans les véhicules. Peu ou pas d'information existe sur les caractéristiques des vibrations et des chocs (i.e. intensité, fréquences) transmis des essieux à l'habitacle des véhicules, ce qui permettrait d'évaluer le comportement dynamique de la suspension et du véhicule sur une base strictement quantitative. De telles informations apparaissent nécessaires pour juger de la performance de la suspension actuelle, situer l'ampleur du problème et identifier des pistes de solution potentiellement applicables pour améliorer la situation dans ces véhicules.

2.0 OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

L'étude, d'ordre strictement exploratoire, vise essentiellement à procurer des données de base pour donner un aperçu des niveaux d'exposition aux vibrations auxquels peuvent être soumis les passagers à bord d'un véhicule ambulancier Top Kick et pour investiguer le fonctionnement de la suspension arrière du véhicule. De façon plus spécifique, les données recueillies sur un seul véhicule sont utilisées pour :

- évaluer si un lien peut être établi entre l'exposition aux vibrations et aux chocs, et les problèmes d'inconfort et de malaises rapportés par le personnel ambulancier sur la base de mesures de vibrations effectuées conformément à la norme internationale ISO 2631-1(1997), et de l'application des guides associés à cette norme qui définissent les effets escomptés des vibrations et des chocs sur la santé, le confort et les malaises liés au mal des transport;
- évaluer le comportement dynamique du véhicule sous différentes conditions de conduite (variations de vitesse et de chaussée) rencontrées dans la réalité, et ce dans les directions verticale (z), longitudinale (x), latérale (y), ainsi qu'en roulis, tangage et lacet;
- évaluer la performance du système de suspension arrière actuelle du véhicule en direction verticale (z), ainsi qu'en roulis et en tangage, sous différentes conditions de conduite (variations de vitesse et de chaussée) rencontrées dans la réalité.

3.0 RÉALISATION DES ESSAIS

L'étude comporte deux parties : l'une traitant des mesures de l'exposition aux vibrations globales du corps à différents points du véhicule constituant des postes de travail pour le personnel ambulancier; l'autre traitant de mesures de vibrations effectuées principalement au châssis et sur l'essieu arrière du véhicule pour évaluer le comportement dynamique du véhicule et de la suspension. L'ensemble des mesures sont réalisées en utilisant un véhicule GMC de type Top Kick faisant partie de la flotte de véhicules ambulanciers d'Urgences-Santé et portant le numéro 324.

Dans le but de réaliser les mesures, le véhicule est amené à se déplacer sur un parcours préalablement sélectionné par les représentants d'Urgences-Santé et comportant des situations de conduite jugées comme étant représentatives de celles les plus couramment rencontrées lors des déplacements ambulanciers. En raison du nombre important de points et de directions de mesures ayant été identifiés (30 au total), le parcours est répété à deux reprises, chaque fois en modifiant l'emplacement et l'axe de mesure des capteurs, de façon à englober l'ensemble des mesures requises.

Cette étude exploratoire se limite donc à évaluer les vibrations dans leur ensemble, dans des conditions particulières de conduite jugées représentatives de la réalité. En ce sens, l'étude ne permet pas, par exemple, de distinguer la part des vibrations basses fréquences provenant des irrégularités de la route de celles dues spécifiquement à la manoeuvrabilité du véhicule, ce qui nécessiterait d'autres types d'essais effectués dans des conditions rigoureusement contrôlées.

3.1 Description du véhicule et de sa suspension arrière

Le véhicule GMC Top Kick retenu comme véhicule ambulancier comporte un essieu avant et un seul essieu arrière servant à la traction. Il s'agit d'un véhicule de poids moyen, dont la masse totale est de 6 460 kg : 3 450 kg étant supporté par l'essieu arrière et 3 010 kg par l'essieu avant. Le véhicule, représenté à la figure 1a, a un empattement de 4.41 m et une largeur de 2.3 m. L'essieu arrière comporte un système à doubles roues.

La suspension arrière de ce type de véhicule, représentée schématiquement à la figure 1b, est une suspension de type Hendrickson qui comporte en réalité deux systèmes de ressorts distincts en plus des amortisseurs. Il s'agit d'un système de ressorts à lames relativement rigides et d'un système de ballons pneumatiques destinés à maintenir la hauteur de roulement constante peu importe la charge transportée (à vide et en charge), tout en permettant d'évacuer complètement l'air des ballons pour atteler et dételer une remorque. Pour son utilisation en tant que véhicule ambulancier, ce dernier élément constituait un attrait important, puisqu'il permet, à partir d'une soupape pilote installée dans la cabine, d'abaisser la partie arrière du véhicule pour faciliter l'entrée et la sortie des civières.

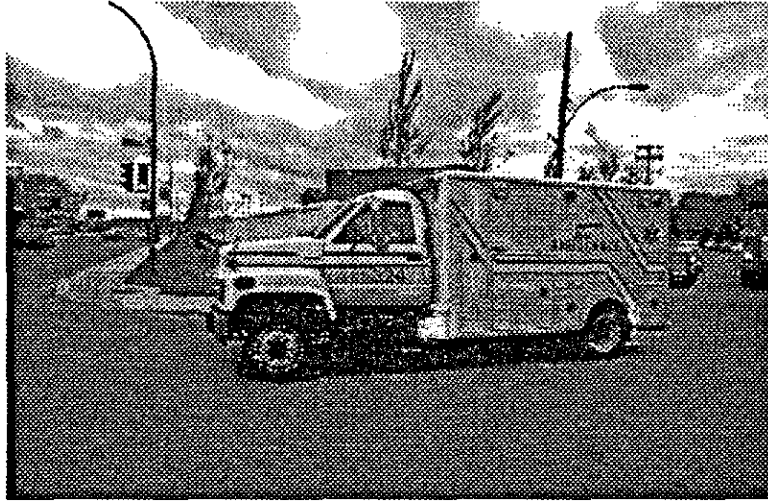


Figure 1a : Représentation du véhicule ambulancier de type GMC Top Kick

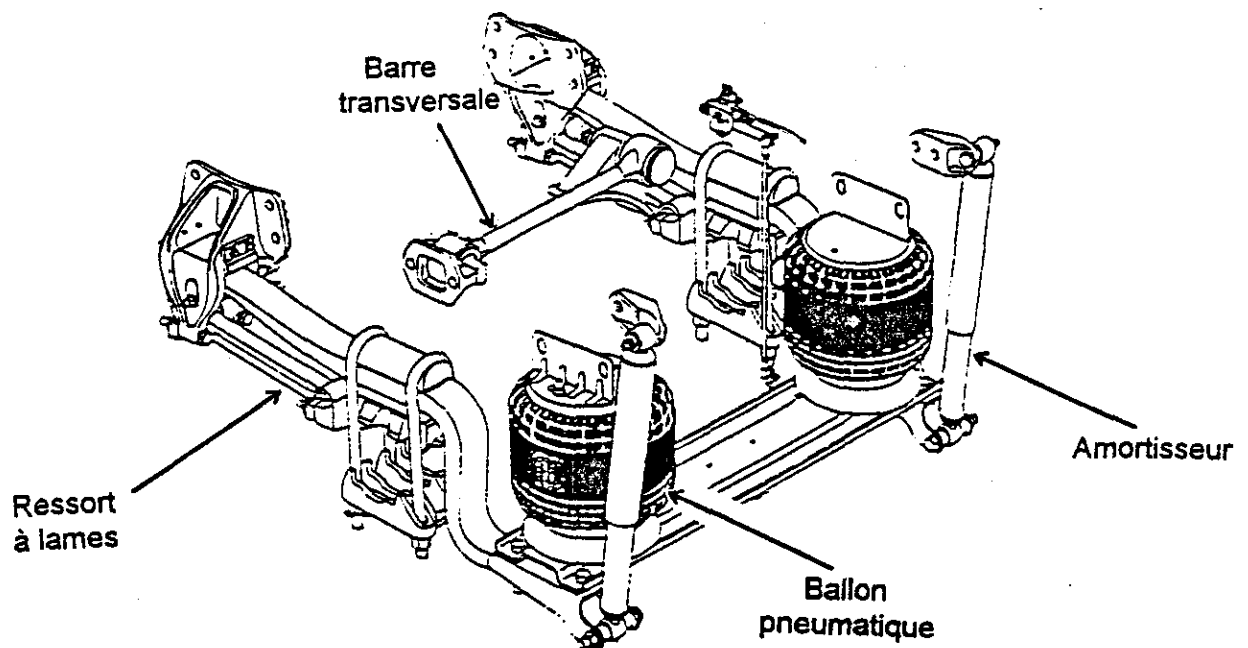


Figure 1b : Représentation schématique de la suspension arrière du véhicule

Le schéma de la figure 1b démontre que les ballons pneumatiques sont situés à l'arrière des systèmes de ressorts à lames. Les amortisseurs sont quant à eux situés de part et d'autre des ballons pneumatiques, tout en formant un angle d'environ 25° par rapport à la verticale. Il s'agit des éléments de la suspension situés le plus à l'arrière de toutes les composantes. Une barre transversale stabilisatrice située plus vers l'avant sert à contrôler le roulis pour une meilleure stabilité du véhicule.

3.2 Conditions de conduite et parcours retenu

Les conditions de conduite identifiées comme faisant partie de celles fréquemment rencontrées lors des déplacements ambulanciers sont regroupées comme suit :

- déplacements sur les rues urbaines à faible vitesse (≈ 50 km/h);
- déplacements sur les rues urbaines à vitesse moyenne (≈ 70 km/h);
- déplacements sur autoroute à ≈ 100 km/h;
- déplacements en situations d'urgence sur autoroute à ≈ 100 km/h;
- déplacements en situations d'urgence sur les rues urbaines à ≈ 70 km/h.

En situations d'urgence, les manoeuvres de freinages, d'accélération et de dépassements sont considérées comme étant plus brusques et plus fréquentes que lors de déplacements normaux se produisant à vitesse moyenne équivalente, et ce, de façon plus évidente pour les déplacements se produisant sur les rues urbaines que sur les autoroutes.

Un parcours a donc été identifié dans l'ouest de l'Île de Montréal par Urgences-Santé comportant des portions se rapportant à ces cinq types de déplacement. Le parcours, d'une durée approximative de 30 minutes, avait comme point d'origine le Centre Concave de l'Université Concordia sur la rue St-Jacques Ouest. La répartition et la durée des trajets s'établissent comme suit :

- **Déplacements sur les rues urbaines à faible vitesse** : à partir du Centre Concave, rues St-Jacques Ouest, Sherbrooke Ouest, Westminster, Ronald, St-Joseph, Georges V, Victoria, 1^{re} avenue et retour sur la rue St-Jacques en direction Est. **Durée approximative** : 16 minutes;
- **Déplacements sur les rues urbaines à vitesse moyenne** : à partir de la sortie 56 de l'autoroute 20 Ouest à la 55^e avenue. **Durée approximative** : 4 minutes;
- **Déplacements sur autoroute** : portion de l'autoroute 20 Ouest, de la 1^{re} avenue à la sortie 56 (autoroute 520). **Durée approximative** : 3 minutes;
- **Urgence sur autoroute** : portion de l'autoroute 20 Est, de la 55^e avenue à la sortie 64. **Durée approximative** : 3 minutes;

- **Urgence sur les rues urbaines** : à partir de la sortie 64 de l'autoroute 20 Est à la rue St-Jacques Ouest. **Durée approximative** : 2 minutes.

Les essais ont été réalisés le 20 mai 1997 sur des routes asphaltées alors que la chaussée était sèche. On établissait que la qualité de la chaussée pouvait représenter celle de la moyenne des rues de la région métropolitaine à cette époque de l'année.

En plus des conditions de conduite identifiées ci-dessus, on a voulu caractériser les vibrations ressenties dans le véhicule alors qu'il est stationné et que le moteur est maintenu en état de marche. Les essais ont donc été réalisés sous les conditions additionnelles suivantes :

- Véhicule stationnaire avec moteur en état de marche et vitesse de rotation maintenue à 800 rpm. Durée approximative : 3 minutes;
- Véhicule stationnaire avec moteur en état de marche et vitesse de rotation maintenue à 1400 rpm. Durée approximative : 2 minutes.

3.3 Identification des points et des directions de mesures

3.3.1 Exposition aux vibrations globales du corps

Les mesures de l'exposition aux vibrations globales du corps pour le personnel ambulancier doivent être effectuées au point prédominant d'entrée des vibrations dans le corps humain. Pour un individu assis, cette mesure est effectuée à l'interface entre la personne et le siège. Pour un individu debout, la mesure est effectuée à proximité des pieds du sujet. Or dans un véhicule ambulancier, on identifie cinq positions assises et une position debout comme constituant des postes de travail potentiels pour le personnel. Il s'agit :

- du siège de conducteur de l'ambulance ou « DS » pour « *driver seat* »;
- du siège du passager avant ou « PS » pour « *passenger seat* »;
- du banc de tête dans le module arrière ou « HS » pour « *head seat* »;
- du banc latéral (côté conducteur) dans le module arrière ou « LTS » pour « *lateral seat* »;
- de la banquette longitudinale (côté passager) dans le module arrière ou « LGS » pour « *longitudinal seat* ». Cette banquette, comportant trois places, seule la position la plus à l'arrière est retenue pour effectuer les mesures;
- du plancher du module à proximité de la tête de la civière ou « HF » pour « *head floor* ».

À chacune de ces positions, l'application de la norme ISO 2631-1 (1997) pour évaluer les effets liés à la santé et au confort requiert de mesurer les vibrations dans la gamme de fréquences 0.5 à 80 Hz dans

trois directions perpendiculaires. Ainsi, l'axe des x pointe vers l'avant de l'individu pour les mouvements positifs, vers l'arrière pour les mouvements négatifs. L'axe des y pointe vers la droite de l'individu pour les mouvements positifs, vers la gauche pour les mouvements négatifs. L'axe des z pointe vers le haut pour les mouvements positifs, vers le bas pour les mouvements négatifs. Pour les postes de travail identifiés par DS, PS, HS, LTS et LGS, cette définition des axes de mesure a été appliquée alors qu'un individu était assis à l'emplacement du point de mesure lors des essais. À chacun de ces points de mesure, un accéléromètre tri-axial de siège de type B&K 4322 a été utilisé à l'interface siège-individu permettant de mesurer les vibrations dans la gamme de fréquences entre 0.5 et 80 Hz. Il s'agit d'un disque interface semi-rigide dont la conception est conforme à la norme ISO 10326-1 (1992) et dans lequel est incorporé un accéléromètre piézoélectrique tri-axial sensible aux vibrations dans la gamme de fréquences concernées.

Pour la position HF située à proximité des pieds de l'individu assis au poste HS, on a considéré comme positifs, les axes x pointant vers l'avant du véhicule, y vers la droite du véhicule et z vers le haut. À ce point, un accéléromètre piézorésistif tri-axial de Analog Devices ayant une sensibilité de 500 mV/g a été fixé au plancher à l'aide d'un aimant, permettant les mesures globales de vibrations dans la gamme de fréquences entre 0.1 et 80 Hz, incluant les fréquences de 0.1 à 0.5 Hz associées au mal des transports.

Au total, les mesures décrites ci-dessus ont nécessité l'utilisation de 18 canaux de mesure identifiés dans ce rapport comme suit : DSX, DSY, DSZ, PSX, PSY, PSZ, HSX, HSY, HSZ, LTSX, LTSY, LTSZ, LGSX, LGSY, LGSZ, HFX2, HFY2, HFZ2. Pour chacun des canaux associés à un accéléromètre piézoélectrique, un amplificateur de charge B&K 2635 a été utilisé en tant que conditionneur de signaux, tandis qu'un générateur de tension approprié a été utilisé pour l'accéléromètre de type piézorésistif. Tous les signaux vibratoires ont été enregistrés sur ruban pour analyse subséquente en laboratoire.

Dans la norme ISO 2631-1 (1997), l'évaluation des effets liés au mal des transports est basée sur les vibrations dont la fréquence se situe entre 0.1 et 0.5 Hz, et qui agissent strictement en direction verticale (axe des z) pour les individus assis. En raison des très basses fréquences concernées, les accéléromètres piézoélectriques pouvant servir à mesurer l'exposition aux vibrations liée aux effets sur la santé et le confort ne répondent pas de façon adéquate à des fréquences inférieures à 0.5 Hz. C'est pourquoi, l'évaluation des vibrations liées au mal des transports a nécessité l'utilisation d'accéléromètres piézorésistifs capables de répondre à des vibrations dont la fréquence varie entre 0.1 et 0.5 Hz. Ces derniers ont été intégrés dans des gaines de caoutchouc dont les spécifications sont conformes à la norme ISO 10326-1 (1992), portant ainsi à cinq le nombre de canaux de mesure additionnels requis pour évaluer les vibrations de « basses fréquences » ou « bf », soit DSZbf, PSZbf, HSZbf, LTSZbf, LGSZbf. Le seul accéléromètre dont nous disposions étant capable de mesurer les vibrations dans toute la gamme de fréquences entre 0.1 et 80 Hz a été utilisé au point identifié par HF.

3.3.2 Comportement dynamique du véhicule

L'évaluation du comportement dynamique du véhicule et de la suspension dans les conditions de conduite définies précédemment requiert que des mesures de vibration soient effectuées à des endroits et selon des axes spécifiques au plancher et sur l'essieu du véhicule. De telles mesures permettent d'évaluer les mouvements de roulis, de tangage et de lacet du véhicule dans des situations représentatives des conditions de travail fréquemment rencontrées, et d'évaluer la performance et le comportement de la suspension arrière et des amortisseurs en direction verticale dans ces mêmes conditions. De plus, de telles mesures permettent d'identifier les fréquences dominantes des vibrations du véhicule pour chacun des modes vibratoires.

Pour la réalisation des mesures liées au comportement dynamique des véhicules, six points de mesure additionnels ont été identifiés, trois nécessitant le contrôle de l'accélération d'un seul axe de mesures, deux du déplacement selon un seul axe, tandis que l'autre point nécessitait le contrôle de l'accélération selon deux axes de mesure. La position et la direction des mesures associées aux sept canaux de mesure résultants sont identifiées comme suit :

- plancher du véhicule du côté extrême gauche, directement au-dessus de l'essieu arrière où seule l'accélération selon l'axe des z (vertical) est contrôlée, « **LFZ2** » pour « *left floor* »;
- plancher du véhicule du côté extrême droit, directement au-dessus de l'essieu arrière où seule l'accélération selon l'axe des z (vertical) est contrôlée, « **RFZ2** » pour « *right floor* »;
- essieu arrière, point central le long de l'axe latéral du véhicule où seule l'accélération selon l'axe des z (vertical) est contrôlée, « **AZ2** » pour « *axe z* »;
- plancher du véhicule, point central le long de l'axe latéral du véhicule où les accélérations selon les axes z (vertical) « **CFZ2** » et y (latéral) « **CFY2** » sont contrôlées, « **CF** » pour « *central floor* »;
- potentiomètre mesurant les déplacements relatifs de l'amortisseur gauche du véhicule, « **LP2** » pour « *left potentiometer* »;
- potentiomètre mesurant les déplacements relatifs de l'amortisseur droit du véhicule, « **RP2** » pour « *right potentiometer* ».

L'utilisation de l'accéléromètre sur l'essieu arrière du véhicule « **AZ2** » permet de mesurer les vibrations verticales de l'essieu. Les potentiomètres « **LP2** » et « **RP2** » permettent de mesurer le déplacement relatif des amortisseurs gauche et droit et d'estimer la course totale de la suspension, même s'il s'agit de la course relative des amortisseurs dont l'inclinaison est à 25° par rapport à la verticale. Les accéléromètres « **LFZ2** » et « **RFZ2** » sont utilisés pour déterminer les accélérations angulaires de roulis du véhicule. L'accéléromètre « **CFZ2** », de concert avec « **HFZ2** » utilisé pour mesurer l'exposition verticale au plancher près du banc de tête, permet l'évaluation des vibrations angulaires de tangage du véhicule. Enfin, l'accéléromètre « **CFY2** », de concert avec « **HFY2** » utilisé

pour mesurer l'exposition latérale au plancher près du banc de tête, permet l'évaluation des vibrations angulaires de lacet du véhicule. Enfin, les mesures effectuées aux points « CFZ2 », « LFZ2 », « RFZ2 » et « HFZ2 » permettent d'évaluer les vibrations verticales à différents endroits dans le module arrière du véhicule.

3.4 Déroulement des essais

En raison du nombre important de points et de canaux de mesures, et compte tenu des limites quant au nombre de capteurs et canaux d'enregistrement disponibles, l'ensemble des essais sont réalisés en répétant deux fois le même parcours; chaque fois en contrôlant des canaux correspondant à des mesures différentes. Les figures 2 et 3 procurent une identification des principaux points et axes de mesure ayant été contrôlés lors de chacune des passes; la première étant entièrement axée sur la mesure de l'exposition aux vibrations, la deuxième sur une combinaison de mesures de l'exposition aux vibrations et du comportement dynamique du véhicule. Les dimensions associées à la position de chacun de ces points de mesure dans le véhicule sont rapportées dans les figures 4a et 4b.

Lors des essais, on s'assure que la soupape de contrôle des ballons pneumatiques soit placée en mode qui permet la mise à niveau du véhicule. Les essais se déroulent en parcourant le circuit identifié en 3.2 alors qu'un individu est assis à chacun des postes de conducteur (DS), passager avant (PS), banc de tête (HS), banquette latérale (LTS) et banquette longitudinale (LGS). De plus, un sixième individu est assis les pieds à proximité du banc de tête (HF). Lors du parcours, les signaux vibratoires correspondant à chaque canal de mesure sont enregistrés sur ruban en continu, tout en notant les positions du ruban correspondant aux arrêts, virages, etc. et en identifiant clairement les portions de signaux associées aux diverses conditions de conduite définies en 3.2. Au terme du parcours, le véhicule est stationné et le moteur est maintenu en état de marche pour permettre l'évaluation de l'exposition aux vibrations en régime stationnaire.

3.5 Analyse des données : évaluation de l'exposition aux vibrations

Pour chacune des deux passes et chacune des conditions de conduite considérées, un certain nombre de segments de signaux vibratoires dont la durée est de une minute sont identifiés visant à caractériser chacune des situations. Les analyses subséquentes sont effectuées sur la base des segments vibratoires ainsi retenus.

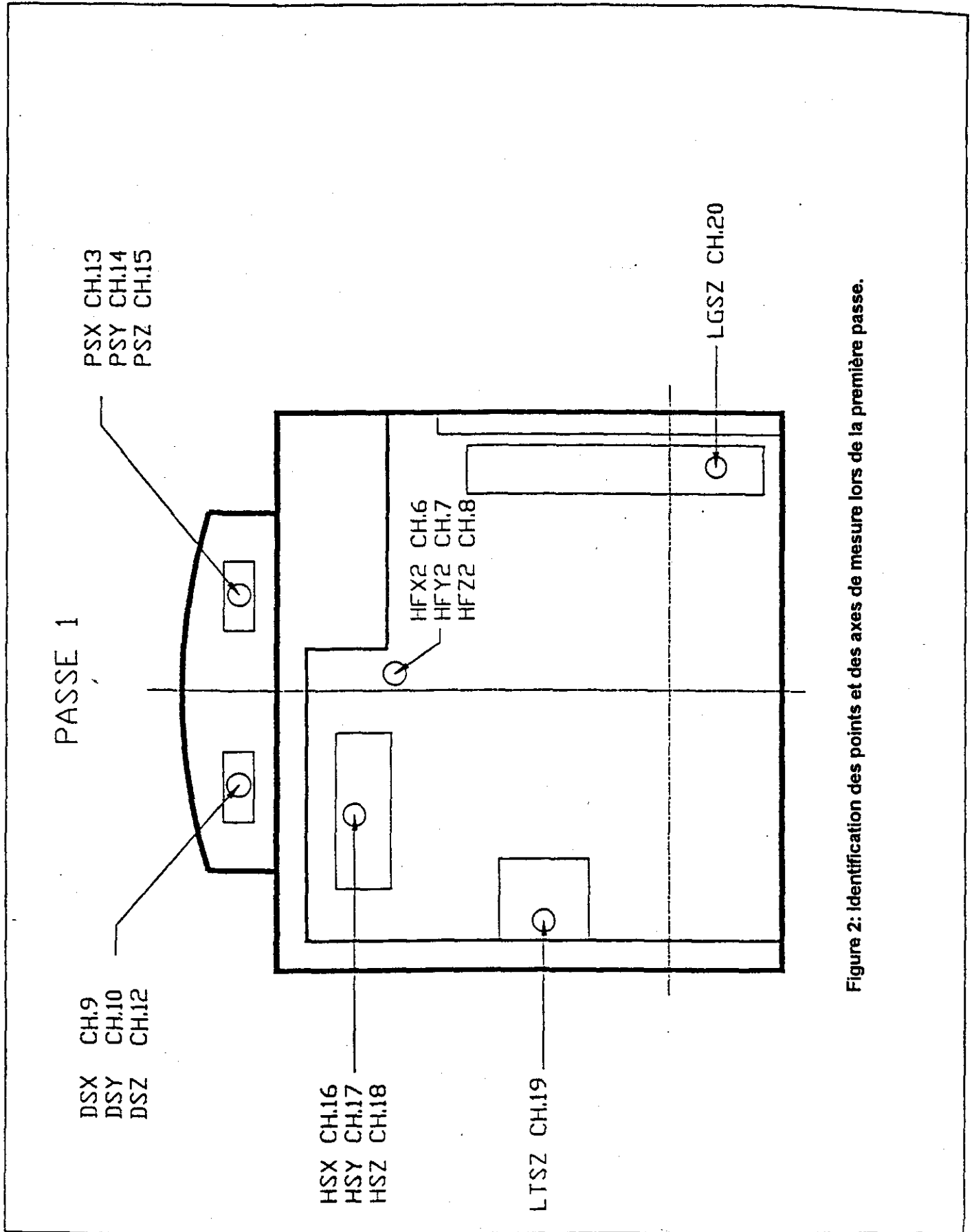


Figure 2: Identification des points et des axes de mesure lors de la première passe.

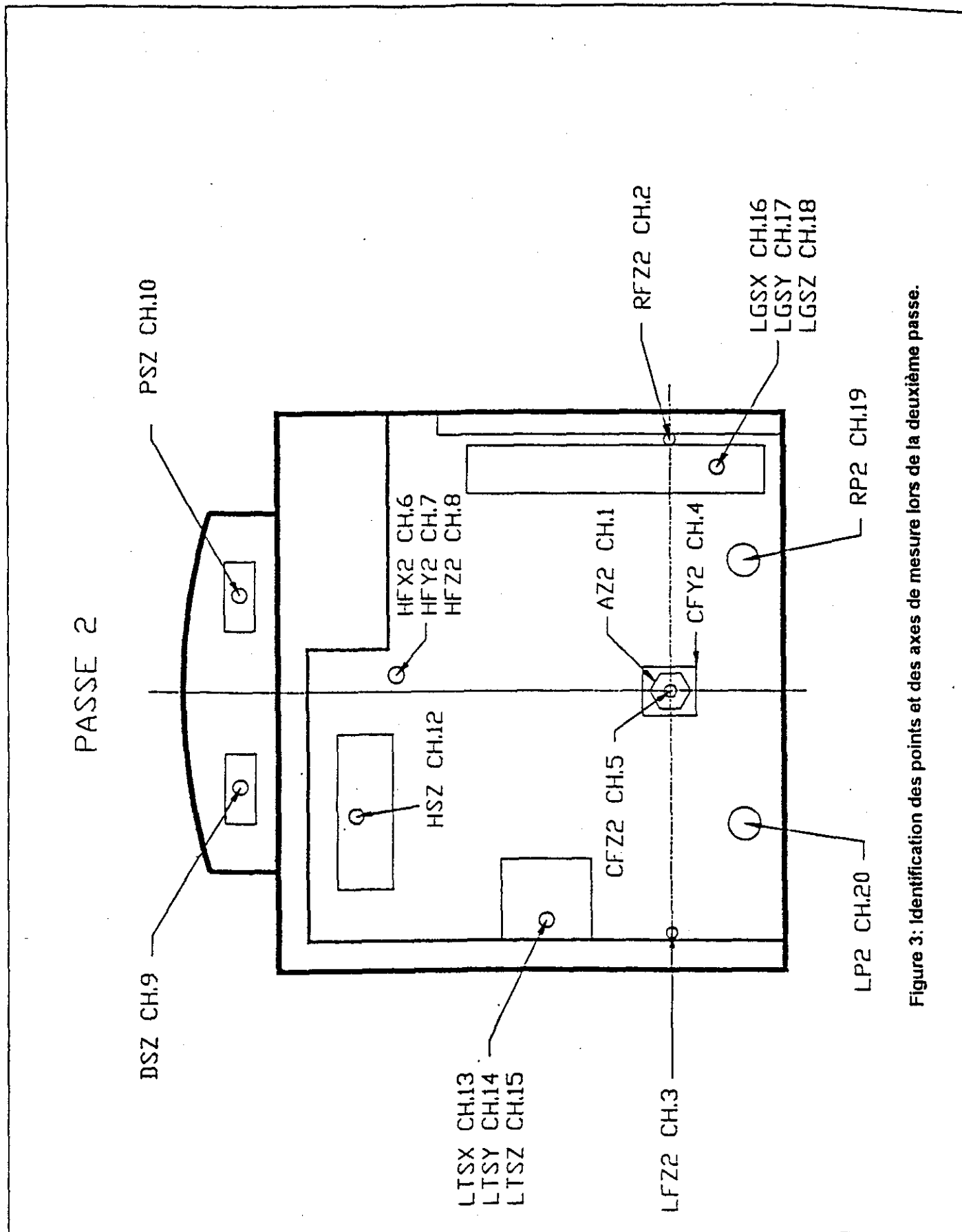


Figure 3: Identification des points et des axes de mesure lors de la deuxième passe.

DIMENSIONS POUR PASSES 1&2

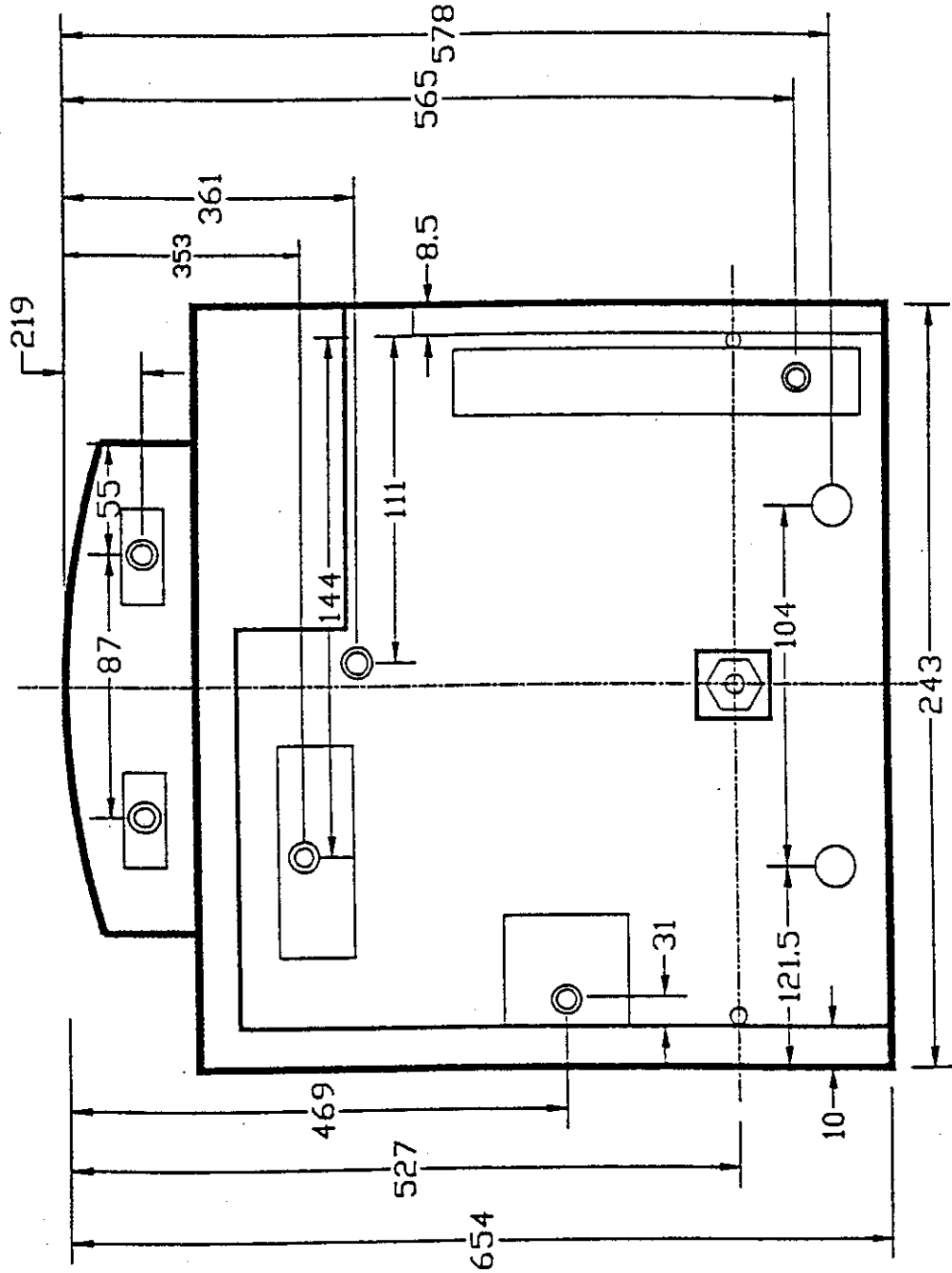
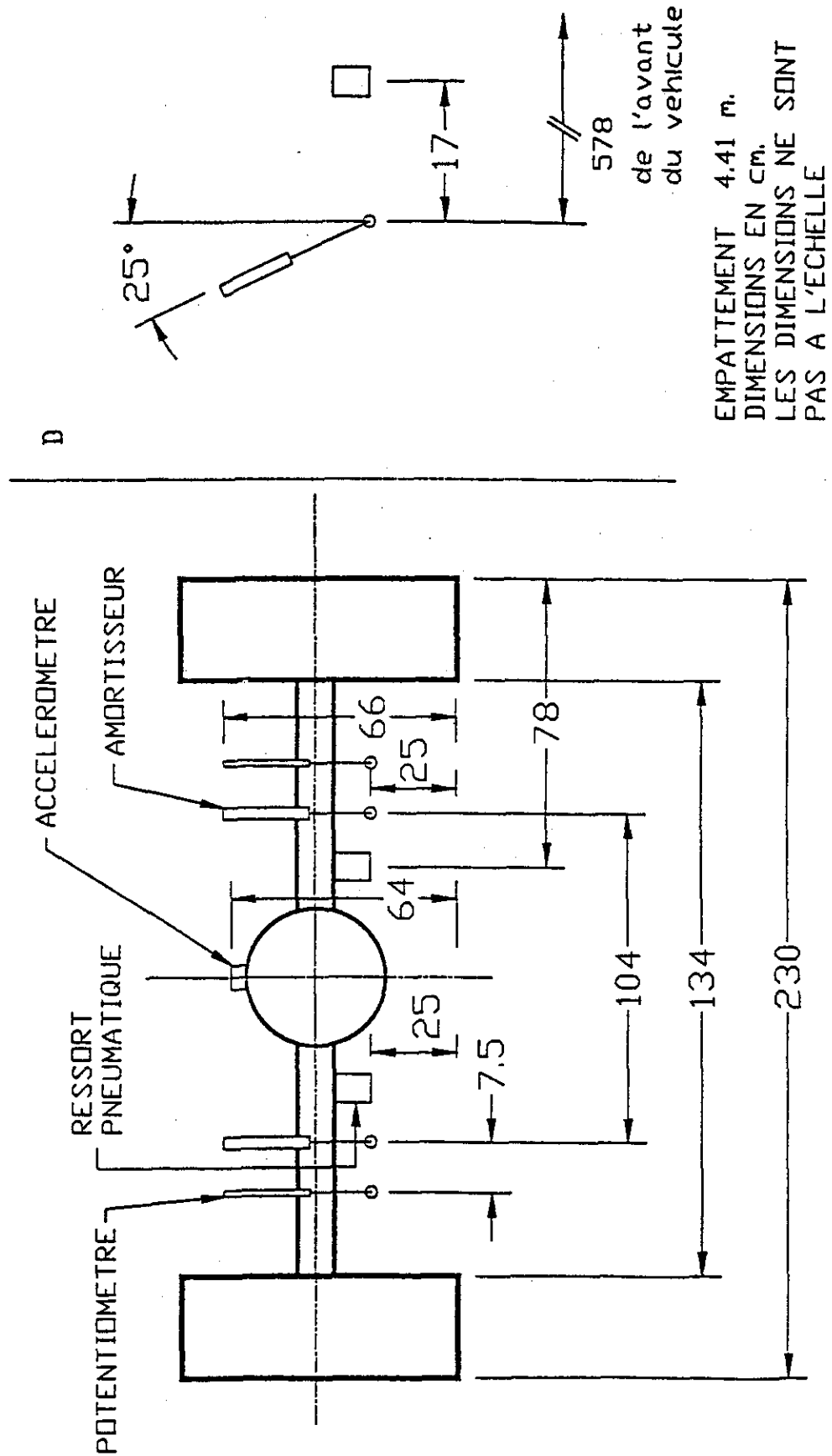


Figure 4a: Dimensions associées au positionnement des points de mesure dans le véhicule.

Dimensions en cm.

POSITIONNEMENT DE L'ACCELEROMETRE, DES POTENTIOMETRES, DES AMORTISSEURS
 ET DES RESSORTS PNEUMATIQUES SUR L'ESSIEU ARRIERE

Figure 4b: Dimensions associées au positionnement des points de mesure sur l'essieu arrière.



L'évaluation de l'exposition aux vibrations globales du corps nécessite de prime abord, selon les recommandations de la norme ISO 2631-1 (1997), la détermination de l'accélération efficace globale pondérée pour chacun des axes et des points de mesure. Pour l'évaluation de l'effet des vibrations sur le confort et la santé, les réseaux de pondération en fréquence W_k et W_d tels que définis dans la norme ISO 2631-1(1997) sont appliqués respectivement pour les vibrations agissant selon les directions z , ainsi que x et y , dans la gamme de fréquences 0.5-80 Hz. Ces réseaux de pondération prennent en considération la variation des effets escomptés des vibrations affectant les individus en fonction de la fréquence. Pour l'évaluation de l'effet des vibrations sur les manifestations liées au mal des transports, le réseau de pondération W_f est appliqué en concentrant uniquement sur les vibrations de 0.1 à 0.5 Hz agissant selon l'axe z .

Pour l'évaluation de l'effet des vibrations sur la santé et le confort, la norme ISO 2631-1 (1997) recommande d'appliquer une méthode d'évaluation additionnelle lorsque le signal vibratoire a une forte composante impulsionnelle caractérisée par des chocs. La composition impulsionnelle du signal est établie sur la base du facteur de crête, f_c , représentant le rapport de l'accélération instantanée crête pondérée à l'accélération efficace pondérée. La norme fixe à 9 la valeur seuil du facteur de crête au-delà duquel la méthode additionnelle d'évaluation doit être appliquée. Cette méthode, basée sur l'évaluation d'une « valeur de dose vibratoire » ou VDV (exprimée en $ms^{-1.75}$) repose sur l'évaluation de la racine quadratique de l'intégrale de l'accélération vibratoire instantanée élevée à l'exposant quatre. Ainsi, la valeur VDV est plus sensible aux pics d'intensité que la méthode de base exprimée par l'accélération efficace pondérée, cette dernière reposant sur l'évaluation de la racine carrée de l'intégrale de l'accélération instantanée élevée au carré. Il s'ensuit donc que pour évaluer l'effet des vibrations sur la santé et le confort, il soit minimalement requis d'évaluer l'accélération efficace globale pondérée (0.5 - 80 Hz), a_w , le facteur de crête, f_c et la valeur de dose vibratoire, VDV.

Pour l'évaluation de l'effet des vibrations sur le mal des transports, la norme ISO 2631-1 (1997) recommande de rapporter l'accélération globale pondérée entre 0.1 et 0.5 Hz, $a_w(0.1-0.5 \text{ Hz})$ et la valeur de dose du mal des transports, $MSDV_z$, qui en plus de dépendre sur $a_w(0.1-0.5 \text{ Hz})$, dépend aussi sur la durée totale d'exposition. Ainsi, plus la durée d'exposition est longue, plus la valeur de dose $MSDV_z$ a tendance à être élevée. Comme l'évaluation de la $MSDV_z$ est réalisée principalement par une intégration dans le temps, les segments vibratoires évoluant sur une période de temps de 60 s sont jugés suffisamment longs pour que les résultats soient considérés comme étant fiables, même s'il s'agit de vibrations de très basses fréquences (0.1 à 0.5 Hz). Cependant, on reconnaît qu'une évaluation dans le domaine des fréquences (e.g. évaluation du spectre en bandes de tiers d'octave) aurait nécessité l'utilisation de segments beaucoup plus longs pour assurer un niveau de confiance suffisamment élevé dans le cas des vibrations associées au mal des transports.

3.5.1 Guide sur l'effet des vibrations sur la santé

La figure 5 illustre deux zones pouvant servir à exprimer des limites d'exposition quotidienne pour minimiser les risques d'atteinte à la santé liés à l'exposition aux vibrations globales du corps. La première zone, représentée dans la figure par des traits hachurés et identifiée par l'équation (B.1), exprime ces limites sur la base de concepts qui régissaient les méthodes d'évaluation jusqu'à tout récemment, avant la sortie de la norme ISO 2631.1 (1997). La deuxième, représentée par des traits pointillés dans la figure et identifiée par l'équation (B.2), exprime ces limites sur la base des nouveaux concepts retenus, lesquels sont basés sur les plus récentes données scientifiques. La figure permet de constater que les concepts utilisés, anciens et nouveaux, mènent à des limites identiques lorsque la durée d'exposition quotidienne varie entre 4 et 8 heures (zone hachurée dans la figure). La tendance actuelle sur le plan de la normalisation européenne est de ne retenir que la zone identifiée par l'équation B.2 dans l'élaboration de limites d'exposition.

En utilisant comme limites les lignes pointillées correspondant à l'équation (B.2), on peut définir une cote d'alerte correspondant à la limite inférieure de la zone résultante et une cote de danger correspondant à la limite supérieure. En dessous de la cote d'alerte, il est improbable, sur la base des connaissances actuelles, que l'exposition aux vibrations puisse objectivement mener à des problèmes de santé. Dans la zone située entre la cote d'alerte et la cote de danger, il est recommandé de prendre des dispositions systématiques visant à réduire l'exposition aux vibrations pour ainsi limiter les risques d'atteinte à la santé. Au-delà de la cote de danger, les risques d'atteinte à la santé deviennent imminents. Il convient donc de ne pas dépasser la cote de danger sans précautions ou raisons particulières.

L'application des cotes d'alerte et de danger est effectuée sur la base de la composante directionnelle dominante de l'accélération efficace globale pondérée, $a_w(0.5-80 \text{ Hz})$, enregistrée sur un siège à l'interface siège-personne. Ces limites ne peuvent être appliquées à d'autres points de mesure en raison de l'absence de données sur les problèmes de santé ayant été rapportés en rapport avec d'autres postures. Ainsi, sur la base de l'accélération efficace globale pondérée mesurée, on peut, à partir de la zone définie dans la figure 5, estimer la durée d'exposition quotidienne requise pour atteindre la cote d'alerte (T_{ad}) et la cote de danger (T_{sd}). La cote d'alerte correspond à une VDV de $8.5 \text{ ms}^{-1.75}$, tandis que la cote de danger correspond à une VDV de $17 \text{ ms}^{-1.75}$. De telles données servent aussi à juger du degré d'exposition lorsque le facteur de crête est supérieur à 9 et que la méthode basée sur l'accélération efficace pondérée doit être complétée par celle basée sur le VDV.

3.5.1 Guide sur l'effet des vibrations sur le confort

La norme ISO 2631-1 (1997) ne définit aucune limite applicable aux effets des vibrations sur le confort, mais procure plutôt un guide établissant le degré d'inconfort susceptible d'être ressenti en fonction strictement des accélérations globales pondérées enregistrées aux différents points de mesure.

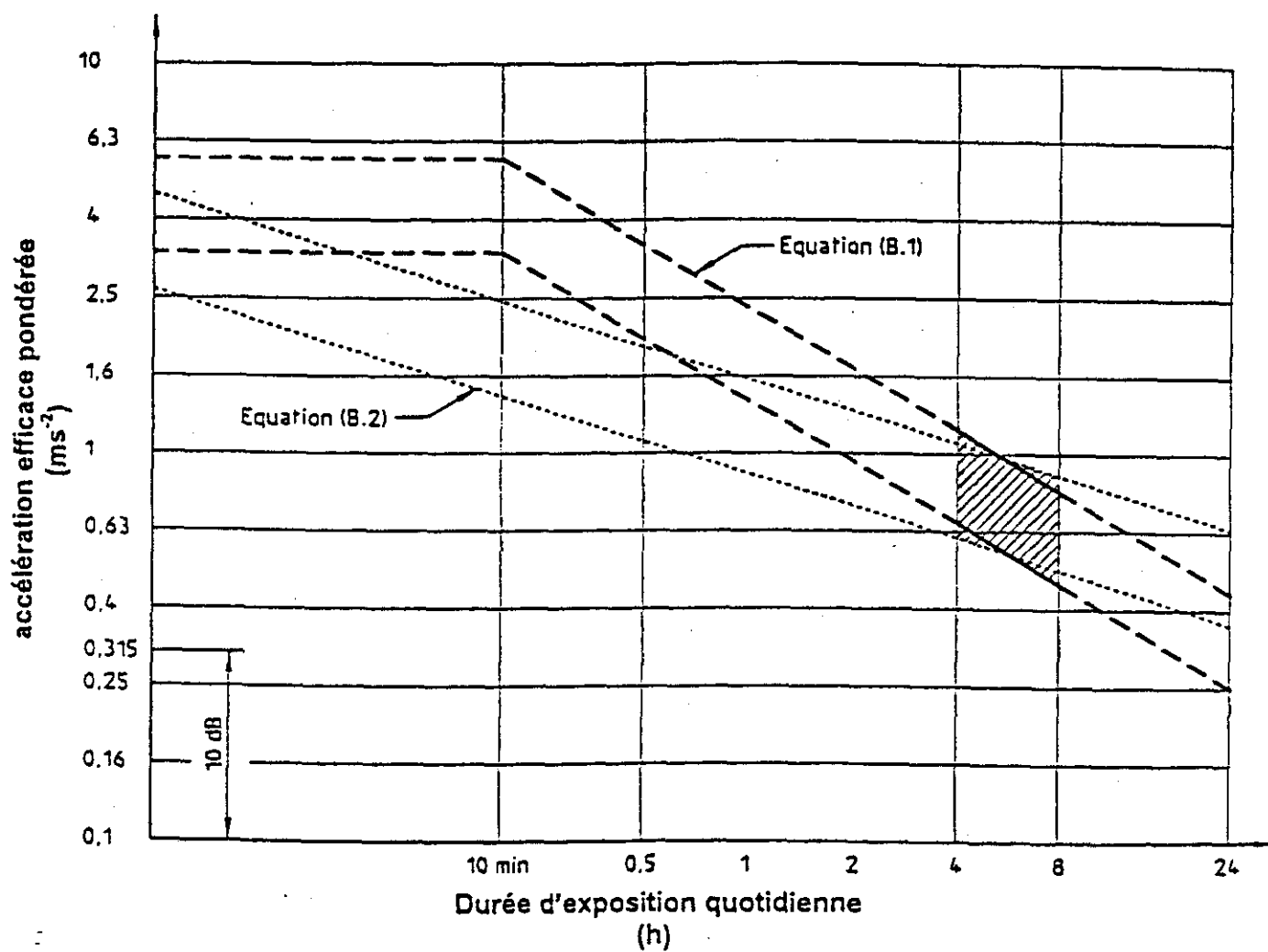


Figure 5: Guide sur l'effet des vibrations sur la santé selon la norme ISO 2631-1 (1997).

Pour l'évaluation des vibrations par rapport au confort, ces points de mesure peuvent comporter un ou plusieurs des sites suivants : le siège, le dossier et le plancher à proximité des pieds de l'individu. À chacun de ces points de mesure, les vibrations peuvent être mesurées selon chacune des trois directions x, y et z; et peuvent même inclure le roulis, le tangage et le lacet pour les mesures effectuées au niveau du siège. L'application du guide définissant les effets des vibrations sur le confort fait abstraction de la durée d'exposition, les réactions probables étant basées uniquement sur le vecteur somme des accélérations efficaces pondérées, a_{wv} , mesurées à un ou plusieurs points associés au poste de travail considéré. Dans cette étude, les vibrations ayant été mesurées uniquement au siège pour les postes assis et au plancher pour les postes debout, le vecteur somme a_{wv} est basé uniquement sur les composantes x, y et z des vibrations enregistrées à chacun de ces postes. Le tableau 1 reproduit les évaluations probables du degré d'inconfort ressenti en fonction du vecteur somme des accélérations efficaces pondérées a_{wv} , telles que proposées dans l'annexe C.2.3 de la norme ISO 2631-1 (1997).

TABLEAU 1 : Guide du degré d'inconfort probable lié à l'exposition aux vibrations globales du corps (ISO 2631-1 1997)

VECTEUR SOMME $a_{wv} (ms^{-2})$	JUGEMENT PROBABLE INCONFORT
<0.315	pas inconfortable
0.315 - 0.63	un peu inconfortable
0.5 - 1.0	passablement inconfortable
0.8 - 1.6	inconfortable
1.25 - 2.5	très inconfortable
>2.0	extrêmement inconfortable

3.5.2 Guide sur l'effet des vibrations sur l'incidence du mal des transports

La norme ISO 2631-1 (1997) inclut un guide qui permet d'estimer le pourcentage d'une population de travailleurs étant susceptible à 70 % de ressentir des nausées causées par les vibrations de très basses fréquences. Cet estimé est basé uniquement sur la mesure de l'accélération efficace pondérée $a_w(0.1-0.5 \text{ Hz})$ effectuée en direction verticale (z) et sur la durée d'exposition quotidienne, le tout se traduisant en une valeur de dose du mal des transports ou MSDV_z. En fait, la fraction (exprimée en pourcentage) d'une population susceptible de démontrer des symptômes liés au mal des transports est calculée en utilisant la relation suivante extraite de l'annexe D.2 de la norme ISO 2631-1 (1997) :

$$\% = 1/3 \text{ MSDV}_z = 1/3 a_w(0.1-0.5 \text{ Hz}) T_0^{1/2}$$

où T_0 représente la durée d'exposition quotidienne. À partir de la mesure de $a_w(0.1-0.5 \text{ Hz})$ ou du MSDV_z sur une durée limitée, il est donc possible, à partir de la relation ci-dessus, d'estimer le

pourcentage de personnes susceptibles d'être affectées par le mal des transports et ce, pour différentes durées d'exposition quotidienne T_0 variant entre 20 minutes et 6 heures.

3.6 Analyse des données : comportement dynamique du véhicule

L'analyse des données vise à identifier les fréquences de résonance du véhicule pour les différents modes vibratoires, à évaluer le comportement dynamique du véhicule sous les différentes conditions d'opération considérées et à évaluer le fonctionnement et la performance de la suspension arrière sous les différentes conditions d'opération. L'ensemble de ces analyses sont basées sur la détermination des spectres temporels et fréquentiels des vibrations enregistrées à différents points du véhicule lors de la conduite normale à 50, 70 et 100 km/h et lors de situations d'urgence à 70 et 100 km/h. Pour chacune des cinq situations de conduite considérées, l'analyse des données est basée sur la détermination :

- De la densité spectrale de puissance (DSP) des accélérations verticales du module arrière aux points LFZ, RFZ, CFZ et HFZ;
- De la densité spectrale de puissance (DSP) des accélérations verticales de l'essieu arrière au point AZ;
- De la densité spectrale de puissance (DSP) des accélérations angulaires du module arrière en roulis, tangage et lacet;
- Du spectre temporel du déplacement de chacun des amortisseurs aux points LP et RP;
- des spectres temporels des déplacements angulaires de roulis du module arrière (mouvements absolu et relatif par rapport à l'essieu);
- Du spectre temporel des déplacements angulaires de tangage du module arrière;
- Des spectres temporels des accélérations latérale et verticale du module arrière.

4.0 RÉSULTATS : EXPOSITION AUX VIBRATIONS GLOBALES DU CORPS

Les tableaux 2, 3, 4 et 5 présentent l'ensemble des résultats à chacun des six postes de travail, pour chacune des cinq conditions de conduite et des deux conditions stationnaires considérées dans le cadre des essais. Le tableau 2 renferme les niveaux d'accélération globale pondérée a_w établis sur la base de tous les segments vibratoires, d'une durée de une minute, retenus pour caractériser les vibrations sous chacune des conditions. Le nombre de segments retenus varie entre 2 et 7, dépendant des conditions considérées. À l'exception des canaux de mesure comportant un « bf » (i.e. basses fréquences), il s'agit de valeurs pondérées entre 0.5 et 80 Hz servant à évaluer les effets des vibrations sur la santé et le confort. Les canaux identifiés par « bf » sont associés aux vibrations liées au mal des transports pour lesquelles la gamme de fréquences d'intérêt est de 0.1 à 0.5 Hz. Le facteur de crête absolu rapporté dans le tableau 3 constitue la valeur maximale établie sur l'ensemble des segments vibratoires dont la durée est de une minute et qui caractérisent chacune des conditions y étant décrites. Le tableau 4 présente la moyenne et l'écart-type de la valeur de dose vibratoire (VDV) établie à partir des segments vibratoires dont la durée est de une minute pour chacune des conditions et des canaux de mesure dont la gamme de fréquences d'intérêt est de 0.5 à 80 Hz. Il s'agit donc de valeurs VDV-1 minute. Enfin, le tableau 5 renferme la moyenne et l'écart-type de la valeur de dose liée au mal des transports ($MSDV_z$) établie à partir de segments vibratoires dont la durée est de une minute pour les canaux de mesure dont la gamme de fréquence d'intérêt est de 0.1 à 0.5 Hz. On parle donc de $MSDV_z - 1$ minute.

TABLEAU 2: Niveaux d'accélération globale pondérée (ms^{-2}) mesurés à chacun des postes de travail.

Passe 1		Bas_vit	Autoroute	Vit_moy	Ur_autoroute	Ur_ville	Stat 800	Stat 1400
Norm	canal							
DSX	1	0.26	0.26	0.24	0.28	0.28	0.02	0.02
DSY	2	0.35	0.29	0.31	0.30	0.35	0.03	0.03
DSZ	3	0.52	0.54	0.53	0.66	0.60	0.03	0.03
PSX	13	0.20	0.22	0.20	0.23	0.24	0.02	0.02
PSY	14	0.31	0.24	0.28	0.25	0.29	0.03	0.02
PSZ	4	0.53	0.58	0.50	0.62	0.56	0.05	0.02
HSX	16	0.25	0.20	0.21	0.22	0.26	0.02	0.01
HSY	5	0.28	0.19	0.25	0.22	0.29	0.03	0.01
HSZ	6	0.54	0.54	0.52	0.58	0.59	0.05	0.03
LTSZ bf	7	0.07	0.06	0.06	0.05	0.12	0.01	0.00
LGSZ bf	8	0.07	0.06	0.05	0.05	0.10	0.00	0.00

Passe 2		Bas_vit	Autoroute	Vit_moy	Ur_autoroute	Ur_ville	Stat 800	Stat 1400
Norm	canal							
HFX2	6c	0.12	0.06	0.11	0.08	0.18	0.016	0.02
HFY2	7c	0.21	0.16	0.15	0.18	0.24	0.025	0.021
HFZ2 bf	8	0.06	0.06	0.08	0.03	0.09	0.003	0.003
HFZ2	8	0.42	0.49	0.49	0.62	0.49	0.060	0.032
DSZ bf	1	0.12	0.06	0.08	0.04	0.20	0.004	0.009
PSZ bf	2	0.09	0.06	0.08	0.03	0.14	0.005	0.004
HSZ bf	3	0.09	0.06	0.09	0.04	0.17	0.004	0.007
LTSX	13	0.31	0.21	0.21	0.21	0.36	0.028	0.033
LTSY	14	0.16	0.11	0.12	0.13	0.25	0.044	0.053
LTSZ	4	0.58	0.69	0.78	0.88	0.76	0.074	0.030
LGSX	5	0.35	0.25	0.30	0.30	0.39	0.022	0.012
LGSY	6	0.15	0.09	0.15	0.11	0.22	0.008	0.012
LGSZ	7	0.81	0.93	1.12	1.18	1.04	0.142	0.034

TABLEAU 3: Facteur de crête absolu associé aux vibrations mesurées à chacun des postes de travail.

Passe 1		Bas_vit	Autoroute	Vit_moy	Ur_autoroute	Ur_ville	Stat 800	Stat 1400
Nom	canal							
DSX	1	6.75	8.53	7.15	6.04	5.94	4.99	4.35
DSY	2	8.41	5.32	5.01	6.02	5.27	5.80	5.59
DSZ	3	5.84	6.12	10.01	5.37	6.13	5.60	4.81
PSX	13	7.34	8.48	7.43	6.61	5.40	6.61	8.83
PSY	14	7.65	6.05	5.89	5.97	5.13	3.71	10.33
PSZ	4	6.85	6.50	(9.39)	8.54	5.09	6.40	5.83
HSX	16	7.06	7.60	6.55	6.33	6.03	5.83	9.60
HSY	5	8.47	5.72	5.20	6.57	5.92	5.26	6.66
HSZ	6	7.96	8.42	6.41	5.25	5.66	11.11	8.27
LTSZ bf	7							
LGSZ bf	8							

Passe 2		Bas_vit	Autoroute	Vit_moy	Ur_autoroute	Ur_ville	Stat 800	Stat 1400
Nom	canal							
HFX2	6c	8.99	6.58	8.18	5.00	8.29	4.13	4.18
HFY2	7c	5.79	5.33	4.94	4.63	4.90	8.25	3.66
HFZ2 bf	8							
HFZ2	8	8.20	8.21	6.33	6.00	7.50	2.88	4.24
DSZ bf	1							
PSZ bf	2							
HSZ bf	3							
LTSX	13	7.42	5.85	4.43	5.40	4.97	6.80	9.69
LTSY	14	6.13	8.14	6.27	6.51	6.54	6.92	7.81
LTSZ	4	10.01	9.80	9.04	8.64	7.26	2.56	6.95
LGSX	5	7.85	6.21	3.95	5.87	4.73	4.21	7.12
LGSY	6	6.10	8.97	5.14	5.14	6.66	7.77	9.53
LGSZ	7	8.76	8.77	6.87	6.01	8.71	5.05	6.39

TABEAU 4: Valeur de dose vibratoire (VDV) moyenne ($\text{ms}^{-1.75}$) et écart-type à chacun des postes de travail sur la base de segments dont la durée est de une minute.

Passe 1	Bas_vit		Autoroute		Vit_moy		Ur_autoroute		Ur_ville		Stat 800		Stat 1400			
	Nom	canal	moyenne	écart-type	moyenne	écart-type	moyenne	écart-type	moyenne	écart-type	moyenne	écart-type	moyenne	écart-type		
	DSX	1	1.07	0.32	1.16	0.26	1.02	0.20	1.11	0.15	1.20	0.05	0.06	0.01	0.07	0.002
	DSY	2	1.44	0.38	1.12	0.21	1.19	0.26	1.20	0.13	1.41	0.00	0.10	0.03	0.10	0.007
	DSZ	3	2.10	0.47	2.04	0.34	2.35	0.22	2.56	0.24	2.44	0.10	0.10	0.01	0.11	0.009
	PSX	13	0.84	0.25	0.95	0.22	0.83	0.32	0.92	0.21	1.00	0.21	0.08	0.05	0.08	0.013
	PSY	14	1.29	0.31	1.02	0.14	1.08	0.24	1.00	0.13	1.15	0.13	0.12	0.06	0.10	0.010
	PSZ	4	2.09	0.45	2.21	0.32	2.16	0.22	2.43	0.24	2.20	0.24	0.18	0.03	0.09	0.016
	HSX	16	1.01	0.32	0.87	0.20	0.80	0.25	0.85	0.17	1.13	0.07	0.08	0.02	0.06	0.008
	HSY	5	1.14	0.34	0.75	0.15	0.98	0.17	0.86	0.11	1.15	0.19	0.10	0.02	0.06	0.001
	HSZ	6	2.27	0.46	2.34	0.33	2.22	0.20	2.31	0.12	2.45	0.24	0.25	0.05	0.12	0.011
	LTSZ bf	7														
	LGSZ bf	8														

Passe 2		canal		canal		canal		canal		canal		canal		canal	
Nom	canal	moyenne	écart-type	moyenne	écart-type	moyenne	écart-type	moyenne	écart-type	moyenne	écart-type	moyenne	écart-type	moyenne	écart-type
HFX2	6c	0.61	0.21	0.26	0.02	0.60	0.02	0.31	0.02	1.00	0.05	0.06	0.00	0.06	0.002
HFY2	7c	0.82	0.26	0.62	0.06	0.64	0.07	0.67	0.07	0.99	0.15	0.11	0.03	0.08	0.003
HFZ2 bf	8														
HFZ2	8	1.73	0.57	2.03	0.29	2.13	0.19	2.52	0.19	2.06	0.47	0.20	0.001	0.12	0.002
DSZ bf	1														
PSZ bf	2														
HSZ bf	3														
LTSX	13	1.19	0.45	0.80	0.08	0.85	0.16	0.84	0.16	1.43	0.40	0.11	0.064	0.16	0.095
LTSY	14	0.66	0.21	0.47	0.04	0.52	0.11	0.57	0.11	1.14	0.06	0.18	0.111	0.26	0.121
LTSZ	4	2.54	0.69	2.97	0.57	3.56	0.32	3.76	0.32	3.36	0.83	0.24	0.011	0.12	0.009
LGSX	5	1.36	0.61	0.95	0.25	1.19	0.13	1.20	0.13	1.57	0.31	0.07	0.006	0.05	0.017
LGSY	6	0.62	0.21	0.42	0.08	0.63	0.00	0.46	0.00	0.99	0.17	0.03	0.011	0.06	0.038
LGSZ	7	3.44	0.98	3.87	0.68	5.20	0.12	4.93	0.12	4.45	1.60	0.44	0.008	0.13	0.029

4.1 Influence des conditions de conduite sur les niveaux d'exposition aux vibrations

- Sur la base des niveaux d'accélération efficace pondérée apparaissant dans le tableau 2, les conditions de conduite ne semblent pas influencer de façon importante les niveaux d'exposition aux vibrations contenues entre 0.5 et 80 Hz pour les postes de conducteur (DS), passager avant (PS) et banc de tête (HS). Pour ces postes, les variations du niveau $a_w(0.5-80 \text{ Hz})$ pour les cinq conditions de conduite sont, somme toute, minimales et ce, dans les trois directions de mesure x, y et z. On peut donc, pour ces postes, représenter les niveaux d'exposition aux vibrations par la moyenne des accélérations efficaces pondérées $a_w(0.5-80 \text{ Hz})$ enregistrées sous chacune des cinq conditions de conduite. Le tableau 6 présente la moyenne et l'écart-type des accélérations efficaces pondérées applicables à ces trois postes de travail pour chacune des directions x, y et z.
- Les niveaux d'accélération efficace pondérée apparaissant dans le tableau 2 indiquent cependant que les conditions de conduite ont une influence importante sur les niveaux d'exposition aux vibrations contenues entre 0.5 et 80 Hz aux postes situés dans le module arrière sur la banquette latérale (LTS), la banquette longitudinale (LGS) et au plancher à proximité du banc de tête (HF). À ces postes, l'exposition aux vibrations en direction verticale est la plus importante lors de déplacements en situations d'urgence sur autoroute; la plus faible lors des déplacements sur les rues urbaines à faible vitesse. La vitesse de conduite semble définitivement avoir une influence importante sur l'exposition vibratoire en direction verticale à ces postes de travail. L'exposition aux vibrations transversales (axes x et y) à ces mêmes postes de travail est quant à elle la plus importante lors de déplacements en situations d'urgence sur les rues urbaines, la plus faible lors des déplacements sur autoroute, ce qui serait attribuable aux manoeuvres requises en situations d'urgence, tels les dépassements, décélérations et accélérations successives qui accentuent les mouvements latéraux et longitudinaux, particulièrement pour le personnel affecté dans le module arrière.

TABLEAU 6 : Moyenne et écart-type des accélérations efficaces pondérées aux postes de conducteur, passager avant et banc de tête

POSTE DE TRAVAIL	$a_w(0.5-80 \text{ Hz}) \quad (\text{ms}^{-2})$		
	Axe x	Axe y	Axe z
CONDUCTEUR (DS)	0.26 ± 0.02	0.32 ± 0.03	0.57 ± 0.06
PASSAGER AVANT (PS)	0.22 ± 0.02	0.27 ± 0.03	0.56 ± 0.05
BANC DE TÊTE (HS)	0.23 ± 0.02	0.25 ± 0.04	0.55 ± 0.03

- Dans la gamme des fréquences 0.1 à 0.5 Hz, les valeurs d'accélération globale pondérée $a_w(0.1-0.5 \text{ Hz})$ apparaissant dans le tableau 2 suggèrent que les conditions de conduite ont une influence nette sur le degré d'exposition aux vibrations de très basses fréquences et ce, à chacun des six postes de travail considérés. Il apparaît que l'exposition aux vibrations de très basses fréquences (0.1 - 0.5 Hz) est généralement plus importante lors des déplacements en situations d'urgence sur les rues urbaines, moins importante lors des déplacements en situations d'urgence sur une autoroute.

4.2 Évaluation des expositions vibratoires en relation avec les effets sur la santé

- Sur la base des niveaux d'accélération globale pondérée apparaissant dans le tableau 2 pour les postes de travail LTS, LGS et HF, et dans le tableau 6 pour les postes DS, PS et HS, on constate que le degré d'exposition aux vibrations dont la fréquence est comprise entre 0.5 et 80 Hz est le plus important en direction verticale. La composante $a_w(0.5-80 \text{ Hz})$ mesurée en direction verticale (axe z) est donc retenue pour estimer l'importance de l'exposition par rapport aux problèmes de santé potentiels selon les cotes d'alerte et de danger définies dans la norme ISO 2631-1 (1997).
- À quelques exceptions près, le facteur de crête rapporté dans le tableau 3 pour les différents postes de travail et les différentes conditions de conduite est inférieur à 9. Un tel résultat suggère que la méthode basée sur l'évaluation de l'accélération efficace pondérée est suffisante pour juger de l'importance des niveaux d'exposition aux vibrations vis-à-vis les problèmes de santé. On peut donc, dans l'ensemble, faire abstraction des valeurs de dose vibratoire (VDV) apparaissant dans le tableau 4.

En utilisant les niveaux d'accélération globale pondérée $a_w(0.5-80 \text{ Hz})$ rapportés dans les tableaux 2 et 6 pour les vibrations agissant en direction verticale (axe z), on calcule la durée d'exposition quotidienne requise pour atteindre la cote d'alerte (T_{ea}) et la cote de danger (T_{ed}) telles que définies dans la section 3.5.1 et dans la norme ISO 2631-1 (1997). Pour les postes de travail LTS, LGS et HF pour lesquels le niveau d'exposition aux vibrations varie en fonction de la condition de conduite, ces valeurs sont estimées sur la base du niveau d'exposition le plus élevé enregistré (i.e. lors de déplacements en situations d'urgence sur une autoroute) et aussi du plus faible (i.e. lors des déplacements à basse vitesse sur des rues urbaines). Ces valeurs apparaissent dans le tableau 7 pour chacun des six postes de travail étudiés.

Les résultats apparaissant dans le tableau 7 indiquent que :

- Les postes de conducteur, de passager avant et de banc de tête mènent à des degrés d'exposition aux vibrations similaires entre 0.5 et 80 Hz. De façon générale, la durée d'exposition quotidienne requise pour atteindre la cote d'alerte pour ces postes atteindrait près de 4 heures, tandis que la cote de danger ne serait vraisemblablement jamais atteinte;

- Le poste de passager sur la banquette longitudinale mène aux degrés d'exposition les plus importants entre 0.5 et 80 Hz, le tout variant selon les conditions de conduite. Dans la pire des situations, la cote d'alerte à ce poste serait atteinte en aussi peu que 12 minutes lors de déplacements en situation d'urgence sur une autoroute et en un peu moins d'une heure lors de déplacements à basse vitesse sur des rues urbaines.

TABLEAU 7 : Effets sur la santé - évaluation de la durée d'exposition quotidienne requise pour atteindre les cotes d'alerte (Tea) et de danger (Ted) selon ISO 2631-1 (1997)

POSTE DE TRAVAIL	$a_w(0.5-80 \text{ Hz})$ (ms^{-2})	CONDITION DE CONDUITE	T_{ea} (h)	T_{ed} (h)
CONDUCTEUR (DS)	0.57	toutes	3.6	24
PASSAGER AVANT (PS)	0.56	toutes	3.8	24
BANC DE TÊTE (HS)	0.55	toutes	4.1	24
BANQUETTE LATÉRALE (LTS)	0.88	urgence autoroute	0.6	10
	0.58	basse vitesse	3.3	24
BANQUETTE LONGITUDINALE (LGS)	1.18	urgence autoroute	0.2	3.1
	0.81	basse vitesse	0.9	14
PLANCHER MODULE (HF)	0.62	urgence autoroute	2.6	24
	0.42	basse vitesse	12.1	24

- Le poste de passager sur la banquette latérale vient en second lieu d'importance quant aux degrés d'exposition entre 0.5 et 80 Hz. La durée requise pour atteindre la cote d'alerte varie entre 36 minutes lors de déplacements en situation d'urgence sur une autoroute à un peu plus de 3 heures lors de déplacements à basse vitesse sur des rues urbaines.
- Le poste impliquant un passager debout à proximité de la tête de la civière mène à des degrés d'exposition intermédiaires. Dans ce cas, la durée d'exposition quotidienne requise pour atteindre la cote d'alerte varie entre 2.6 et 12.1 h selon les conditions de conduite. Il faut cependant noter que le guide décrivant les cotes d'alerte et de danger n'est pas strictement applicable à ce cas puisque limité exclusivement aux postes impliquant une posture assise.

4.3 Évaluation des expositions vibratoires en relation avec les effets sur le confort

Sur la base des niveaux d'accélération globale pondérée apparaissant dans le tableau 2 pour les postes de travail LTS, LGS et HF, et dans le tableau 6 pour les postes DS, PS et HS, on calcule le vecteur somme a_{wv} en combinant les niveaux d'exposition vibratoires mesurés selon chacun des axes x, y et z. Ces valeurs sont présentées dans le tableau 8 pour les conditions de conduite indiquées et l'évaluation

du confort est effectuée en appliquant le guide proposé dans la norme ISO 2631-1 (1997) et reproduit dans le tableau 1.

TABLEAU 8 : Effets sur le confort - application du guide défini dans la norme ISO 2631-1 (1997) à chacun des postes de travail

POSTE DE TRAVAIL	$a_{wv}(0.5-80 \text{ Hz})$ (ms^{-2})	CONDITION DE CONDUITE	ÉVALUATION DU CONFORT
CONDUCTEUR (DS)	0.70	toutes	passablement inconfortable
PASSAGER AVANT (PS)	0.66	toutes	passablement inconfortable
BANC DE TÊTE (HS)	0.65	toutes	passablement inconfortable
BANQUETTE LATÉRALE (LTS)	0.91 0.68	urgence autoroute basse vitesse	inconfortable passablement inconfortable
BANQUETTE LONGITUDINALE (LGS)	1.22 0.90	urgence autoroute basse vitesse	inconfortable inconfortable
PLANCHER MODULE (HF)	0.65 0.48	urgence autoroute basse vitesse	passablement inconfortable un peu inconfortable

Dans l'ensemble, les expositions aux vibrations sont jugées comme variant de passablement inconfortables aux postes de conducteur, passager avant, banc de tête, plancher du module en situations d'urgence sur autoroute et banquette latérale à basse vitesse, à strictement inconfortables sur la banquette longitudinale et la banquette latérale lorsqu'en situations d'urgence sur une autoroute.

4.4 Évaluation des expositions vibratoires en relation avec les effets sur le mal des transports

- Sur la base de la moyenne des valeurs MSDV_z - 1 minute apparaissant dans le tableau 5 pour chacune des conditions de conduite, on constate que la contribution des vibrations dont la fréquence varie entre 0.1 et 0.5 Hz est la plus importante lors de déplacements en situations d'urgence sur des rues urbaines, au détriment des plus faibles lorsque l'urgence implique des déplacements sur l'autoroute.

- Les postes qui mènent aux plus fortes expositions aux vibrations de très basses fréquences sont ceux de la banquette latérale et du conducteur.

À titre d'exemple, on applique la relation définie dans l'annexe D de la norme ISO 2631-1 (1997) pour estimer le percentile de population de travailleurs susceptible de démontrer des symptômes associés au mal des transports pour la situation de conduite jugée comme étant la plus propice à l'introduction des vibrations dans la gamme de fréquence 0.1 à 0.5 Hz, soit la conduite en situations d'urgence sur les rues urbaines. Ces résultats sont présentés dans le tableau 9 pour chacun des postes de travail, en assumant des durées d'exposition quotidienne variant entre 0.5 et 4 heures, ce qui est conforme à la relation considérée être applicable pour des durées d'exposition variant entre 20 minutes et 6 heures.

TABEAU 9 : Mal des transports - estimation du pourcentage de population susceptible de démontrer des symptômes en fonction de la durée d'exposition quotidienne

POSTE DE TRAVAIL	MSDV _r - 1 minute (ms ^{-1.5})	% de population			
		0.5 h/j	1 h/j	2 h/j	4 h/j
CONDUCTEUR (DS)	1.55	2.8	4.0	5.7	8.0
PASSAGER AVANT (PS)	1.12	2.0	2.9	4.1	5.8
BANC DE TÊTE (HS)	1.30	2.4	3.4	4.8	6.7
BANQUETTE LATÉRALE (LTS)	1.57	2.9	4.1	5.7	8.1
BANQUETTE LONGITUDINALE (LGS)	1.33	2.4	3.4	4.8	6.9
PLANCHER MODULE (HF)	0.65	1.2	1.7	2.4	3.4

4.5 Évaluation de l'exposition aux vibrations en régime stationnaire

Sur la base des niveaux d'accélération globale pondérée rapportés dans le tableau 2 pour les situations où le véhicule est stationnaire et que le moteur est maintenu en état de marche à 800 et à 1400 rpm, on peut faire les observations suivantes :

- Généralement, la contribution des vibrations de très basses fréquences entre 0.1 et 0.5 Hz est nulle ou presque;
- Les niveaux d'exposition aux vibrations dans la gamme de fréquences variant entre 0.5 et 80 Hz, bien que très faibles, sont toujours plus importants en direction verticale;

- Les niveaux d'exposition aux vibrations sont les plus importants lorsque le moteur tourne à une vitesse de 800 plutôt que 1400 rpm;
- Sur le plan santé, aucun des niveaux enregistrés en régime stationnaire ne saurait représenter un risque, le niveau le plus élevé étant 0.14 ms^{-2} enregistré sur la banquette longitudinale;
- Sur le plan confort, aucun des niveaux enregistrés ne mène à un vecteur somme des accélérations qui soit suffisamment intense pour engendrer quelque degré d'inconfort qui soit, du moins selon l'application du guide défini dans la norme ISO 2631-1 (1997).

5.0 RÉSULTATS : COMPORTEMENT DYNAMIQUE DU VÉHICULE

L'analyse du comportement dynamique du véhicule est effectuée pour chacune des cinq situations de conduite considérées: déplacements sur rues urbaines à 50, puis à 70 km/h, déplacements sur autoroute à 100 km/h, déplacements en situations d'urgence sur rues urbaines à 70 km/h, puis sur autoroute à 100 km/h. Ces analyses sont effectuées sur la base d'un seul segment vibratoire enregistré sous chacune des conditions de conduite et dont la durée est de une minute. Cependant, une attention particulière a été portée afin de sélectionner un segment qui soit le plus représentatif de la situation de conduite considérée. D'ailleurs, le nombre de segments qui peuvent être associés au déplacement en continu du véhicule sans nécessiter d'arrêts est relativement faible dans des conditions impliquant la conduite en milieu urbain. Il est cependant difficile de généraliser les résultats obtenus à l'ensemble des situations pouvant être rencontrées en raison du nombre important de facteurs pouvant influencer les caractéristiques vibratoires, notamment la qualité de la chaussée, les manoeuvres impliquées et les variations de vitesse. Néanmoins, les résultats permettent de donner un aperçu du comportement vibratoire du véhicule et de la suspension sous certaines conditions spécifiques de conduite; ce qui peut être suffisant pour identifier des pistes de solution visant à améliorer la qualité vibratoire pour les opérateurs et les passagers du véhicule.

L'identification des fréquences dominantes dans cette partie de l'étude est effectuée strictement sur la base des fréquences auxquelles l'intensité vibratoire est caractérisée par un pic dominant distinct dans le spectre en fréquences des accélérations vibratoires. Quant à l'identification des modes vibratoires correspondant à ces fréquences, celle-ci repose essentiellement sur la correspondance de ces fréquences à des modes vibratoires connus pour des véhicules similaires ou à des expériences acquises dans l'analyse du comportement dynamique des véhicules. Seule une analyse modale aurait permis une identification plus précise de tous les modes vibratoires secondaires associés à tous les pics que l'on peut retrouver dans les spectres, ce qui allait clairement au-delà des travaux prévus dans le cadre de cette étude.

5.1 Densité spectrale de puissance des accélérations verticales dans le module arrière

Les figures 6 à 10 présentent les spectres de la densité spectrale de puissance (DSP) des accélérations vibratoires en direction verticale au plancher du module arrière à quatre différents points de mesure identifiés comme étant CFZ, LFZ, RFZ et HFZ; et ce, pour chacune des conditions de conduite indiquées. Sur la base de ces résultats, on établit que :

- Pour l'ensemble des situations de conduite, il n'y a pas de différence importante dans l'intensité des vibrations verticales enregistrées des deux côtés du véhicule aux points LFZ et RFZ. Ces vibrations sont d'intensité plus importante que celle mesurée au centre (CFZ) du véhicule en raison

Figure 6: Densité spectrale de puissance des accélérations verticales dans le module arrière lors de déplacements sur des rues urbaines à 50 km/h.

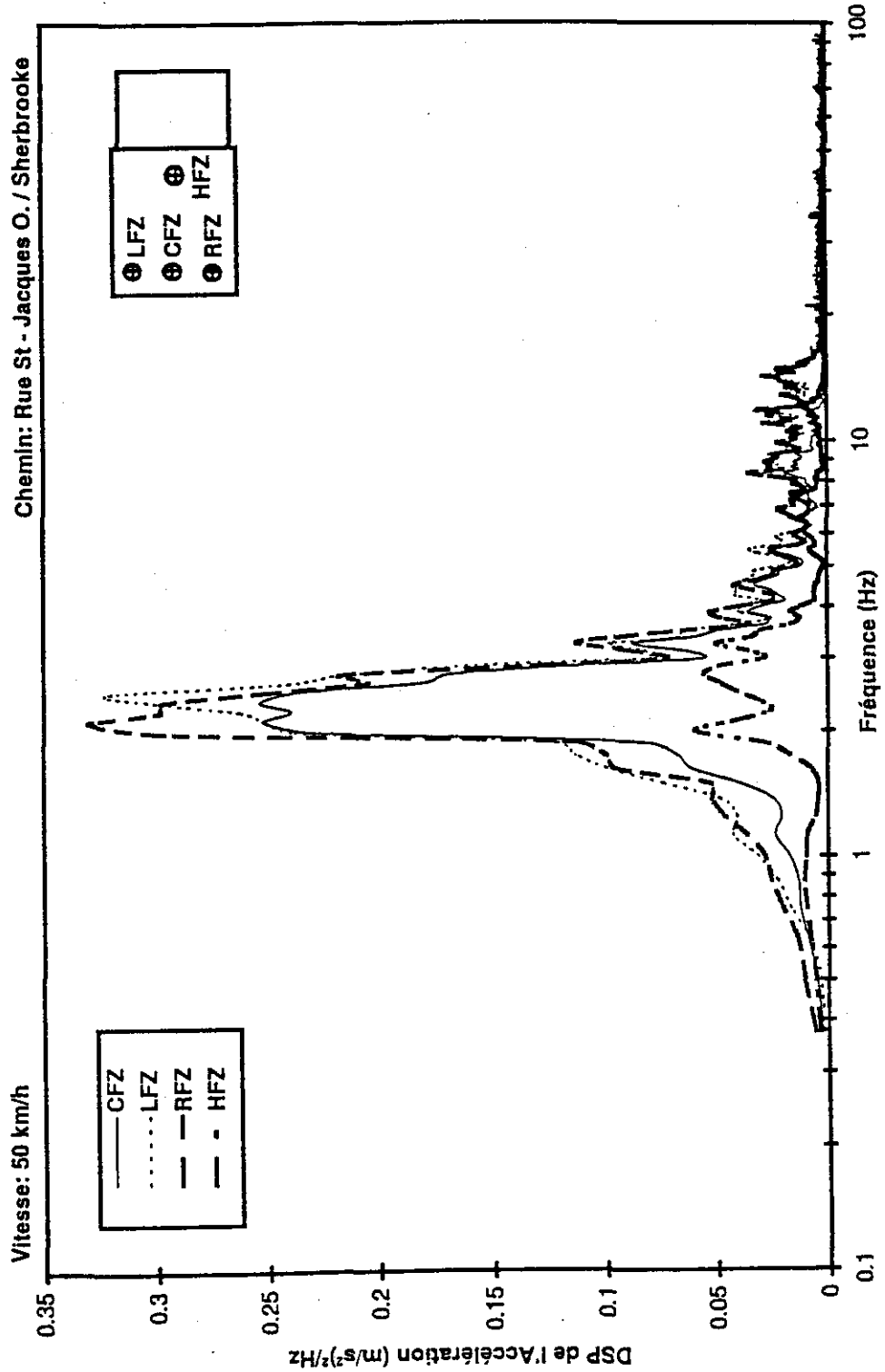


Figure 7: Densité spectrale de puissance des accélérations verticales dans le module arrière lors de déplacements en situation d'urgence sur des rues urbaines à 70 km/h.

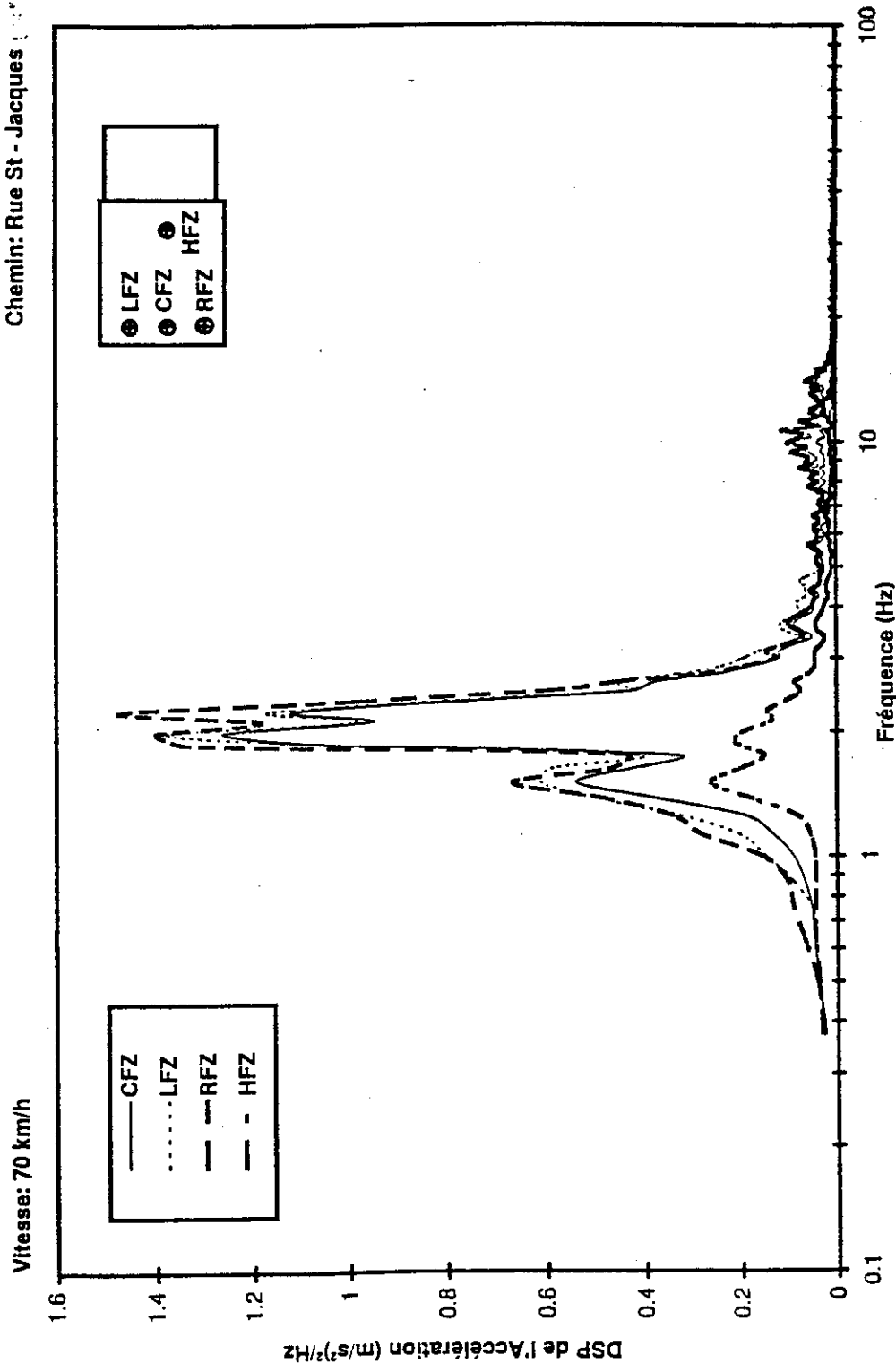


Figure 8: Densité spectrale de puissance des accélérations verticales dans le module arrière lors de déplacements sur des rues urbaines à 70 km/h.

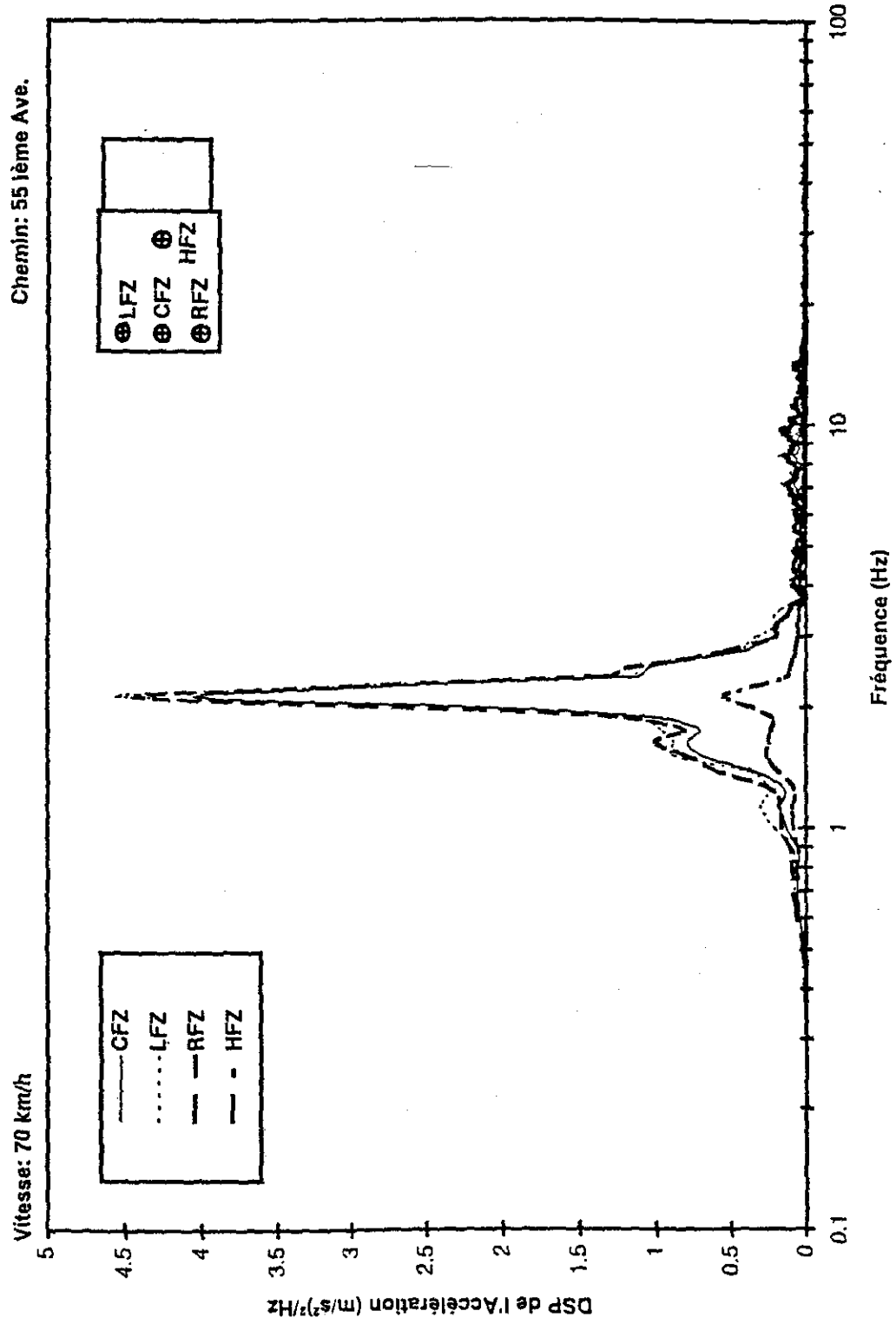


Figure 9: Densité spectrale de puissance des accélérations verticales dans le module arrière lors de déplacements en situation d'urgence sur une autoroute à 100 km/h.

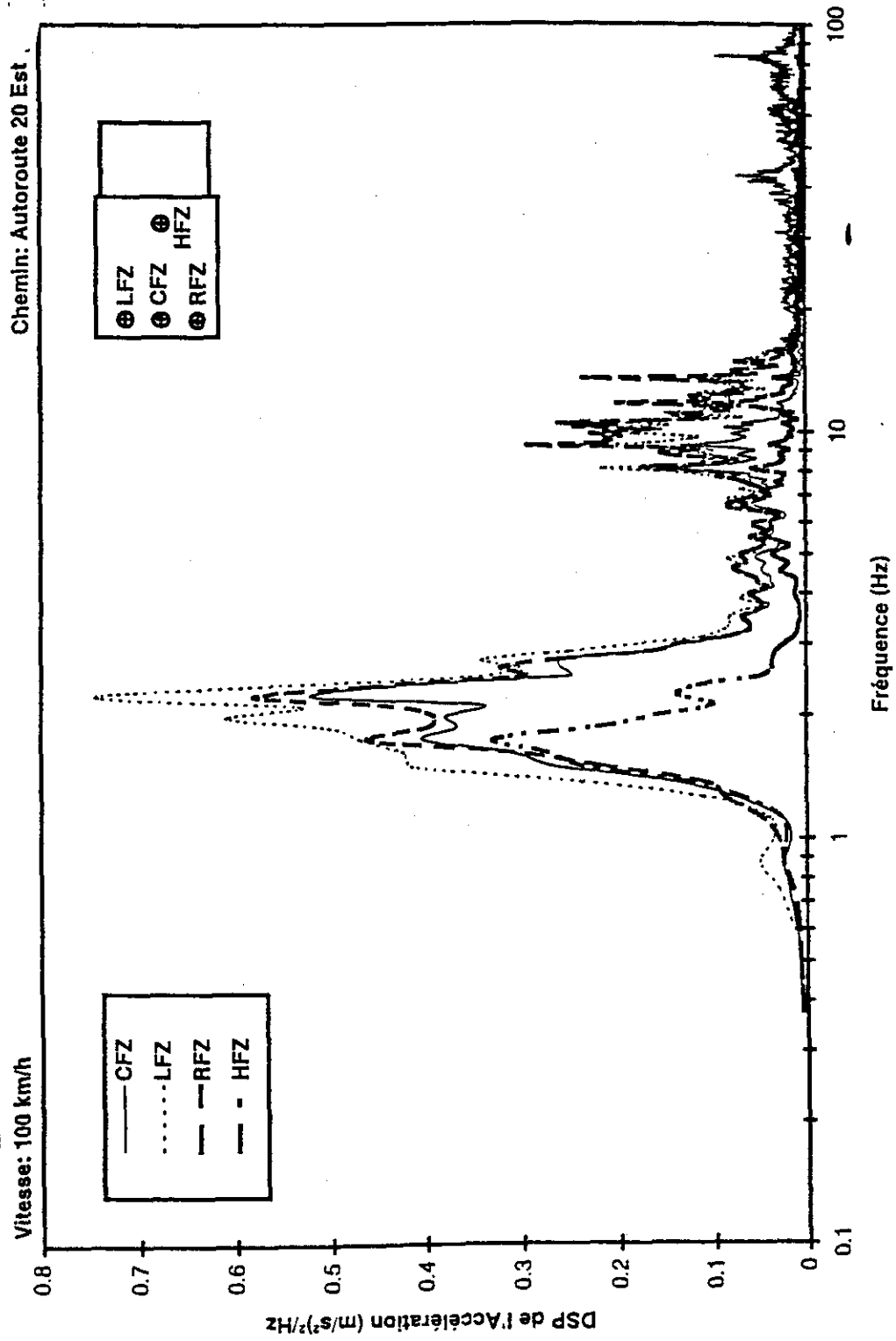
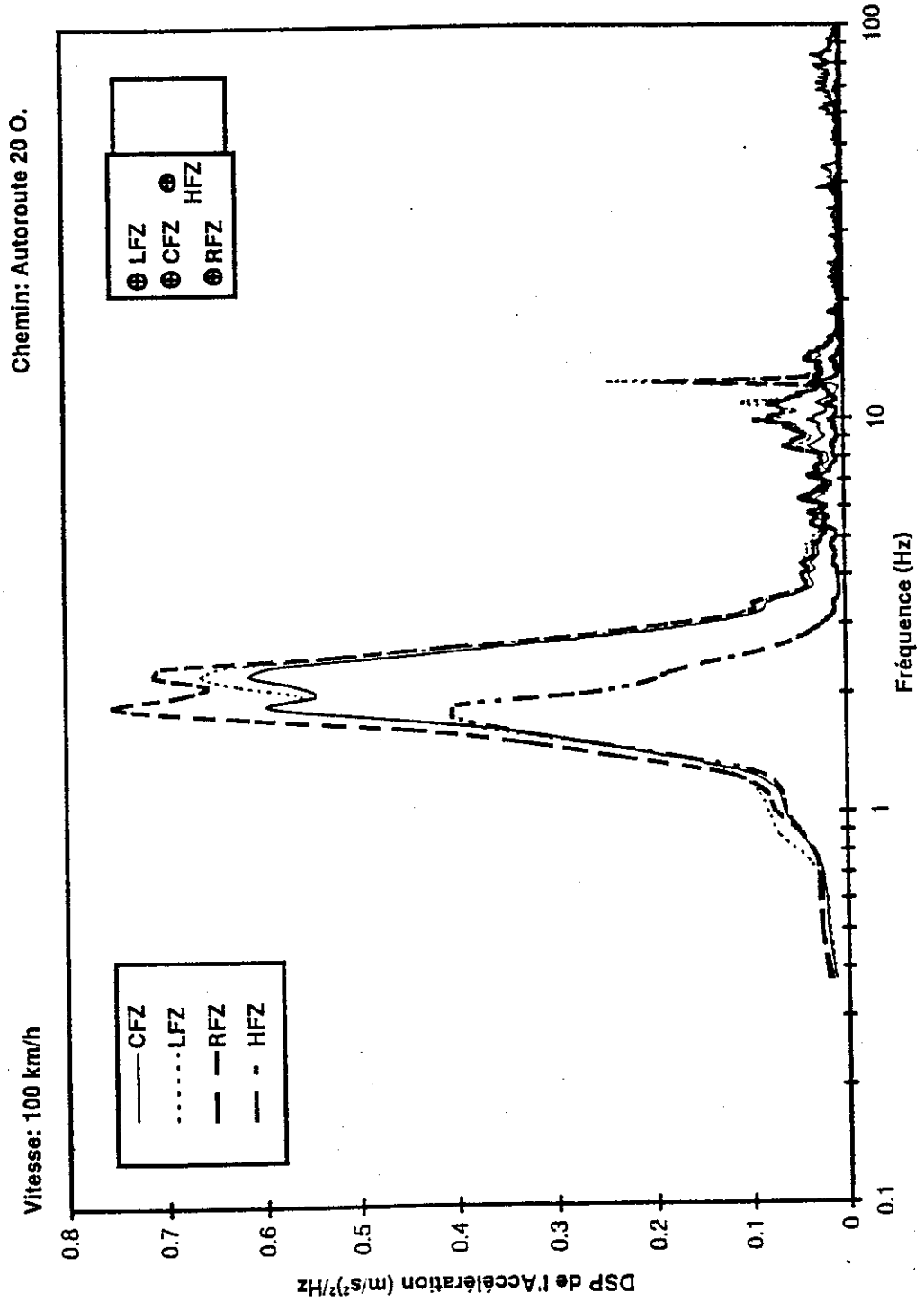


Figure 10: Densité spectrale de puissance des accélérations verticales dans le module arrière lors de déplacements sur une autoroute à 100 km/h.



de la contribution due au roulis. Par ailleurs, les vibrations enregistrées à l'avant près du banc de tête (HFZ) sont dans tous les cas, d'intensité la plus faible; ce qui serait vraisemblablement attribuable à la position du centre de rotation lié au tangage qui se retrouverait à proximité de ce point;

- Dans tous les cas, indépendamment de l'emplacement du point de mesure et de la situation de conduite, l'intensité vibratoire apparaît comme étant la plus importante à une fréquence approximative de 2.2 Hz. Cette fréquence constitue donc la fréquence de résonance du mode de vibrations verticales pour la masse suspendue du véhicule;
- Lors des déplacements à une vitesse de 100 km/h, un deuxième pic d'énergie vibratoire devient apparent à une fréquence variant entre 8 et 14 Hz, bien que beaucoup moins important que celui à proximité de 2.2 Hz. Ce pic secondaire correspondrait vraisemblablement à la fréquence de résonance du mode de vibrations verticales pour l'essieu arrière;
- L'intensité vibratoire transmise au module arrière en direction verticale apparaît en ordre décroissant d'importance pour les situations de conduite suivantes : déplacements sur rues urbaines à 70 km/h, urgence sur rues urbaines à 70 km/h, déplacements à 100 km/h (urgence et circulation normale) et déplacements à 50 km/h.

La fréquence de résonance du mode de vibrations verticales étant établie à 2.2 Hz pour la masse suspendue, il en résulte que cette fréquence est considérablement plus élevée que celle normalement associée aux véhicules dont le poids et la capacité de charge sont similaires. En raison de la raideur imminente de la suspension, cette dernière ne permet pas d'atténuer adéquatement les vibrations de basses fréquences (i.e. moins de 3 - 4 Hz) qui s'avèrent une source importante de vibrations à l'interface entre les pneus et la chaussée. Pour être efficace, il conviendrait de diminuer la fréquence de résonance du mode de vibrations verticales en dessous de 1.4 Hz, ce qui impliquerait un assouplissement considérable de la suspension.

5.2 Densité spectrale de puissance des accélérations verticales de l'essieu arrière

Les figures 11 à 15 illustrent les spectres de la densité spectrale de puissance (DSP) des vibrations enregistrées en direction verticale au point AZ sur l'essieu arrière du véhicule. Ces spectres révèlent un pic dominant d'énergie à une fréquence se situant dans la gamme 10-13 Hz correspondant à la fréquence de résonance de la masse non suspendue, soit l'essieu. La composante vibratoire à la fréquence de résonance des vibrations verticales de la masse suspendue, soit à proximité de 2.2 Hz, est elle aussi évidente dans ces spectres, quoique de plus faible intensité que celle de l'essieu arrière. La variation de l'intensité vibratoire globale du spectre en vibrations de l'essieu (liée à l'aire sous la courbe de la DSP) en fonction des différentes situations de conduite suit une tendance similaire à celle observée dans le module arrière, l'intensité globale étant plus élevée lors de déplacements sur rues urbaines à 70 km/h, moins élevée lors de déplacements sur rues urbaines à 50 km/h.

Figure 11: Densité spectrale de puissance des accélérations verticales de l'essieu arrière lors de déplacements sur des rues urbaines à 50 km/h.

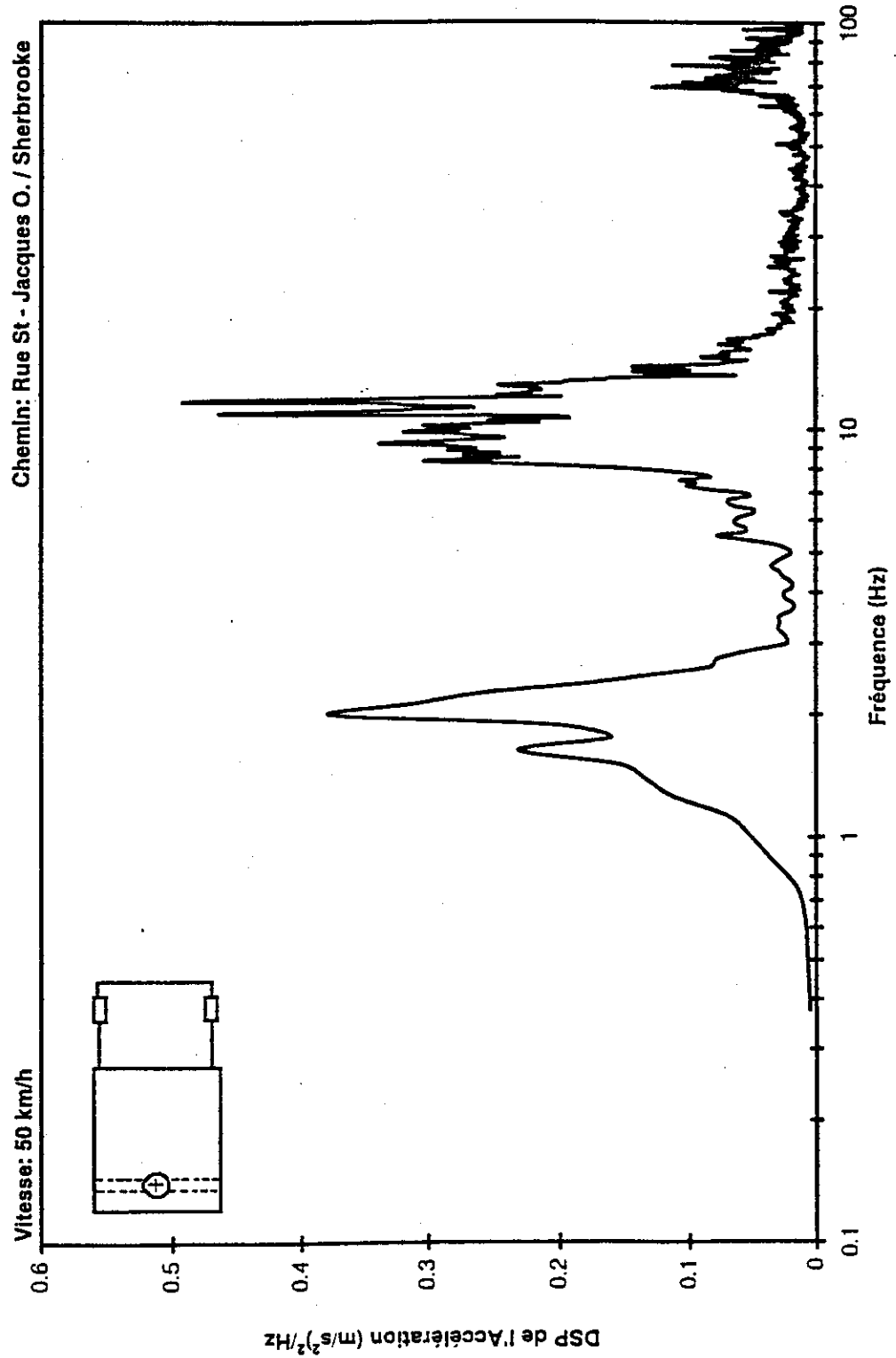


Figure 12: Densité spectrale de puissance des accélérations verticales de l'essieu arrière lors de déplacements en situation d'urgence sur des rues urbaines à 70 km/h.

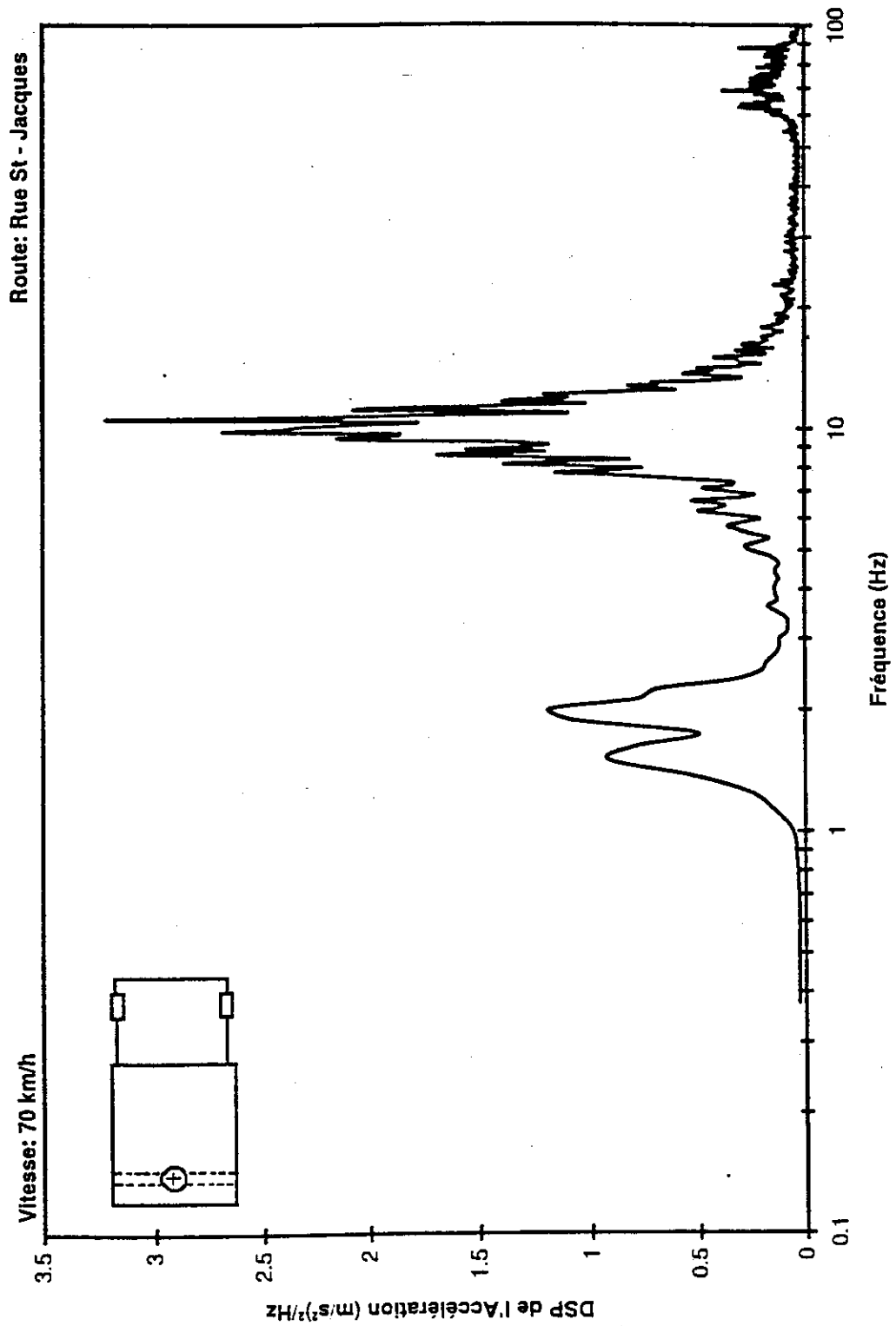


Figure 13: Densité spectrale de puissance des accélérations verticales de l'essieu arrière lors de déplacements sur des rues urbaines à 70 km/h.

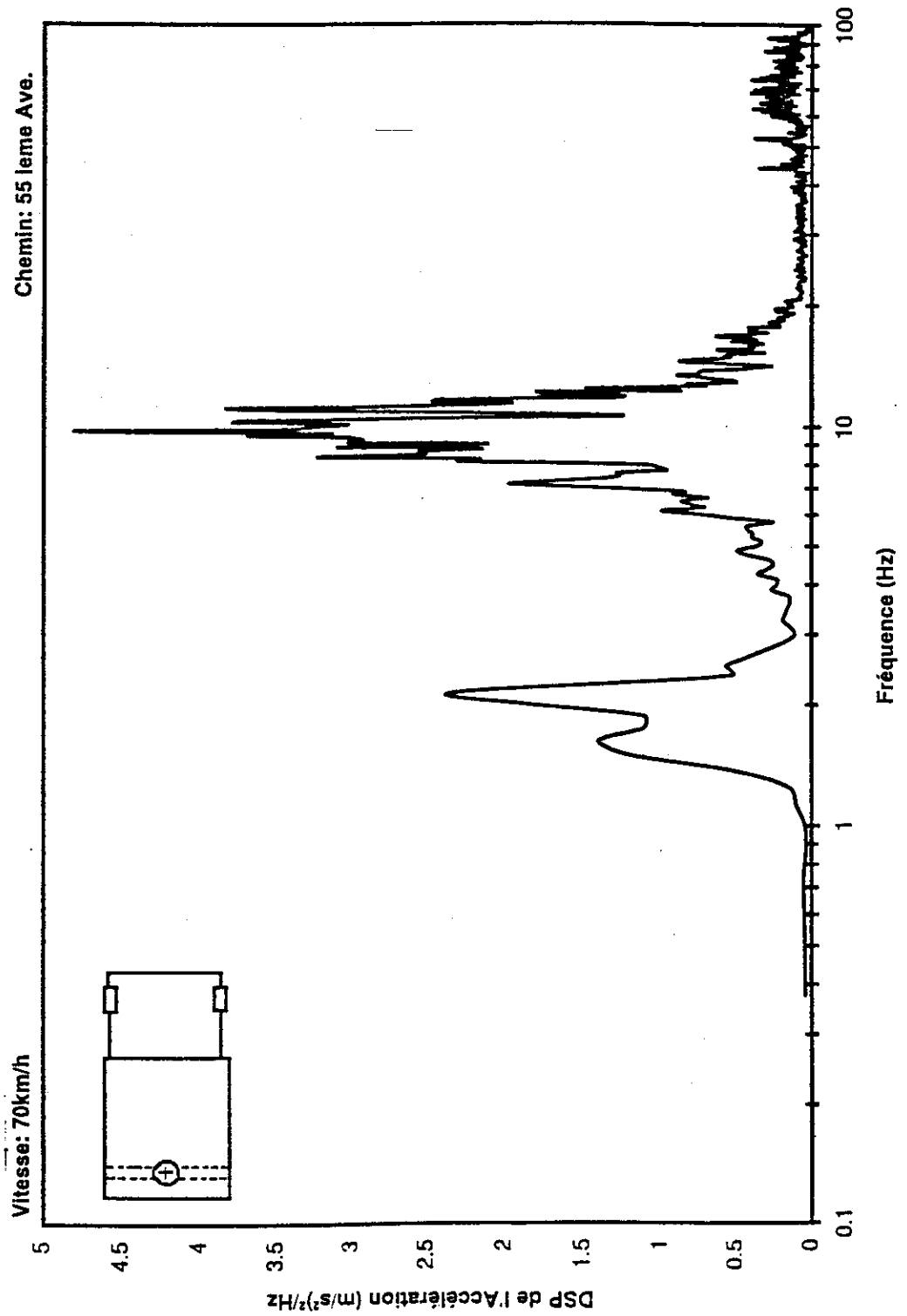


Figure 14: Densité spectrale de puissance des accélérations verticales de l'essieu arrière lors de déplacements en situation d'urgence sur une autoroute à 100 km/h.

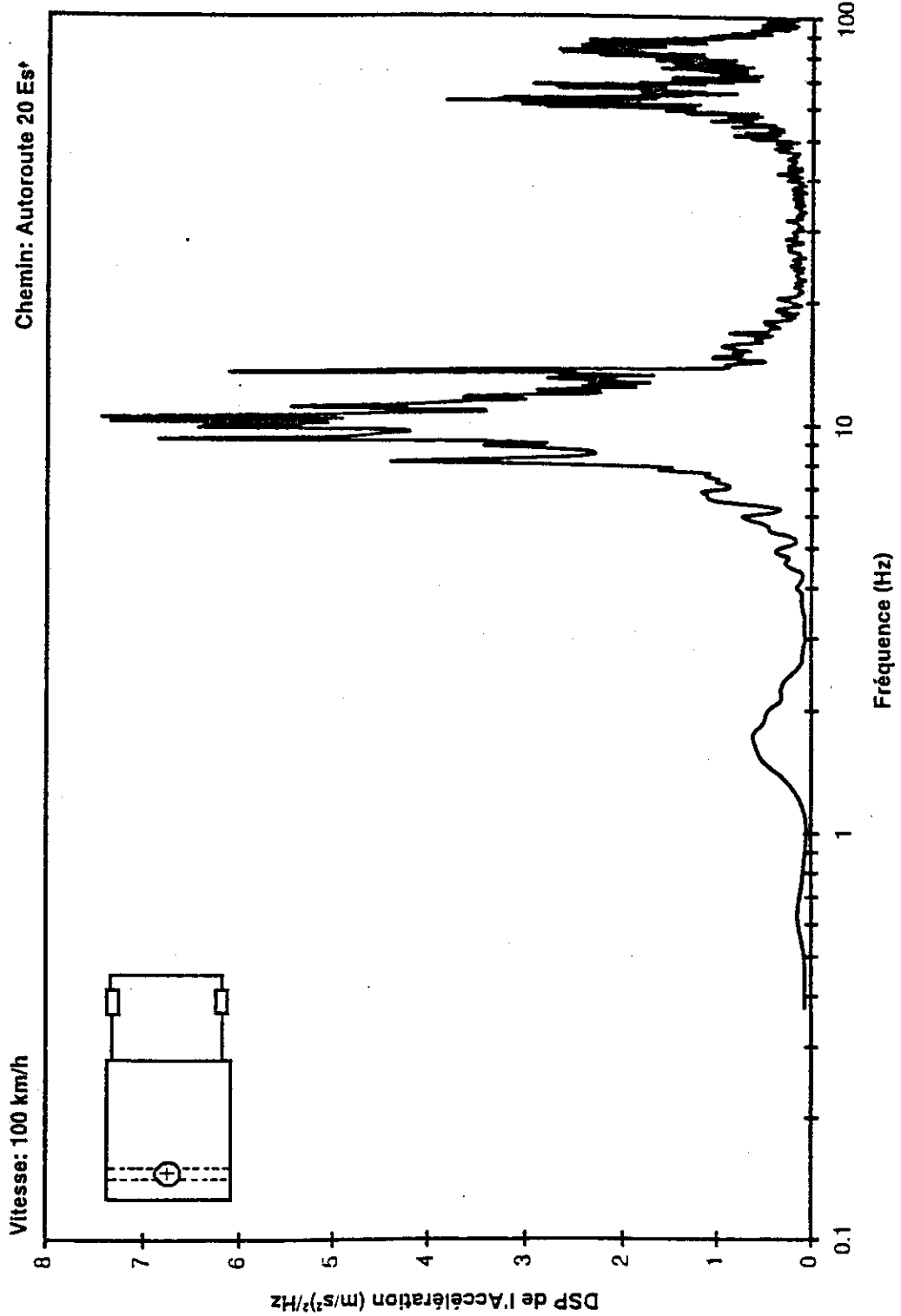
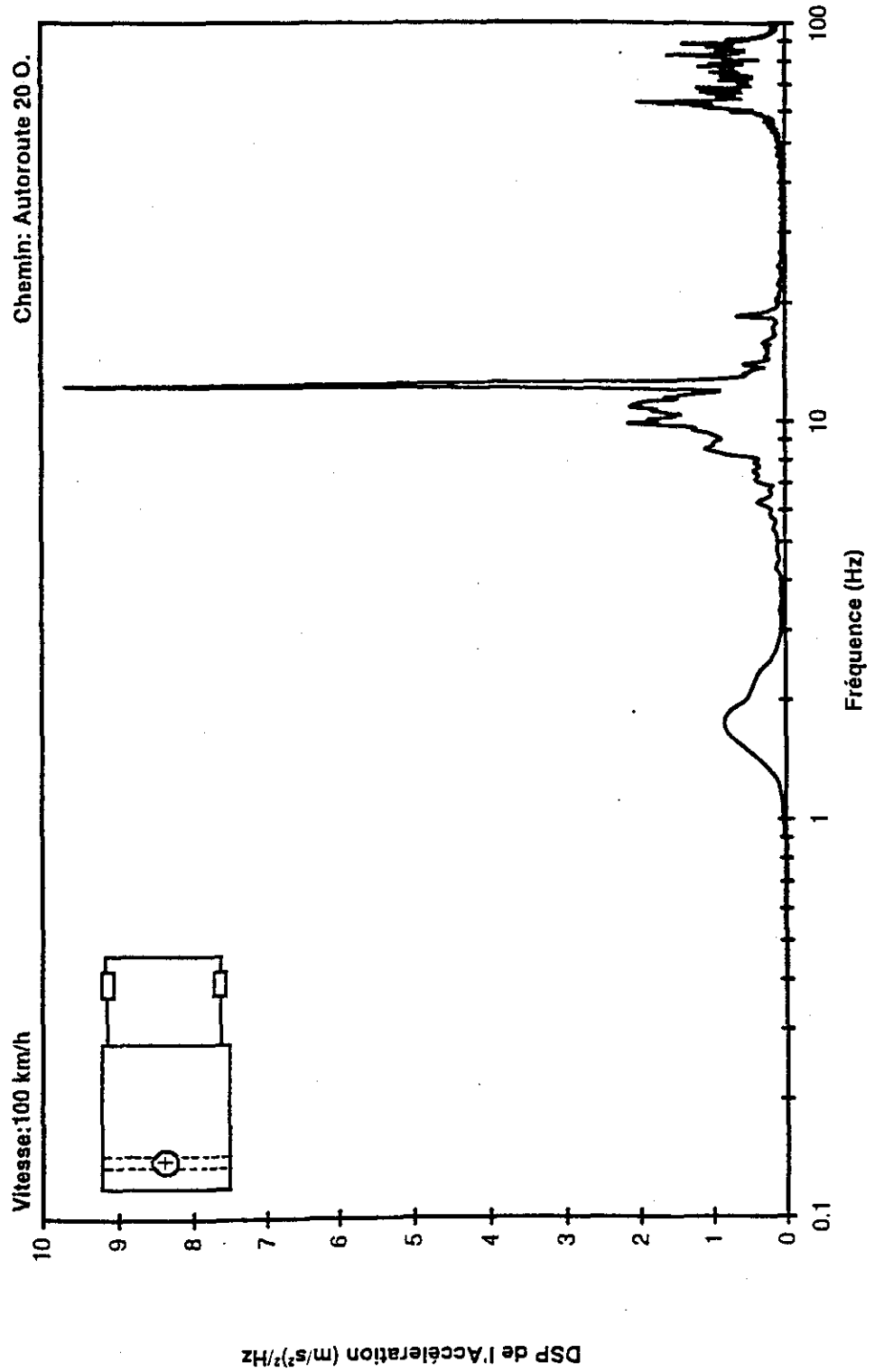


Figure 15: Densité spectrale de puissance des accélérations verticales de l'essieu arrière lors de déplacements sur une autoroute à 100 km/h.



5.3 Densité spectrale de puissance des accélérations angulaires du module arrière

Les figures 16 à 18 illustrent respectivement les spectres de la densité spectrale de puissance des accélérations angulaires de roulis, de tangage et de lacet enregistrés dans le module arrière lors de déplacements sur des rues urbaines à 50 km/h. Les spectres correspondants apparaissent dans l'annexe A pour les quatre autres situations de conduite. Sur la base de ces spectres, on constate que :

- La fréquence de résonance du mode de vibrations en roulis est de 1.4 Hz pour le module arrière et de 14 Hz pour l'essieu arrière. En roulis, la contribution du mode vibratoire des vibrations verticales est aussi évidente à 2.2 Hz;
- La fréquence de résonance du mode de vibrations en tangage est de 1.8 Hz;
- Les vibrations angulaires de lacet renferment une importante quantité d'énergie à proximité de 6 et de 14 Hz, que l'on associe aux modes de vibrations latérales du module arrière et de l'essieu arrière, respectivement. On retrouve également dans ces spectres la composante des vibrations verticales de l'essieu arrière à proximité de 11 Hz;
- Les vibrations angulaires de roulis, tangage et lacet sont, tout comme pour les vibrations linéaires, considérablement plus intenses lors des déplacements à 70 km/h (urgence et déplacements normaux). On retrouverait d'ailleurs à cette vitesse des conditions favorisant davantage les freinages, les accélérations et les manoeuvres de dépassement, particulièrement en situations d'urgence.

Figure 16: Densité spectrale de puissance des accélérations angulaires de roulis dans le module arrière lors de déplacements sur des rues urbaines à 50 km/h.

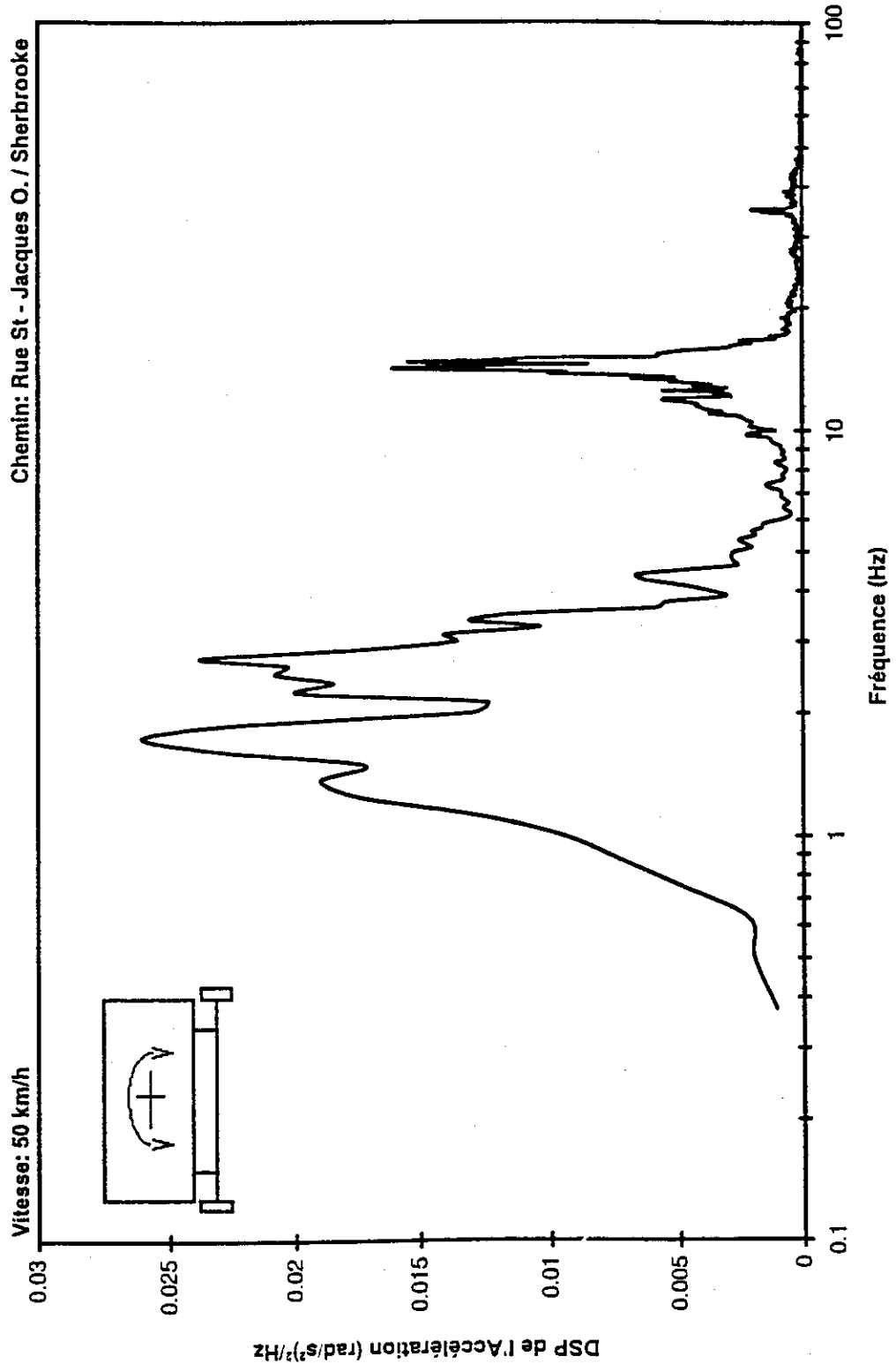


Figure 17: Densité spectrale de puissance des accélérations angulaires de tangage dans le module arrière lors de déplacements sur des rues urbaines à 50 km/h.

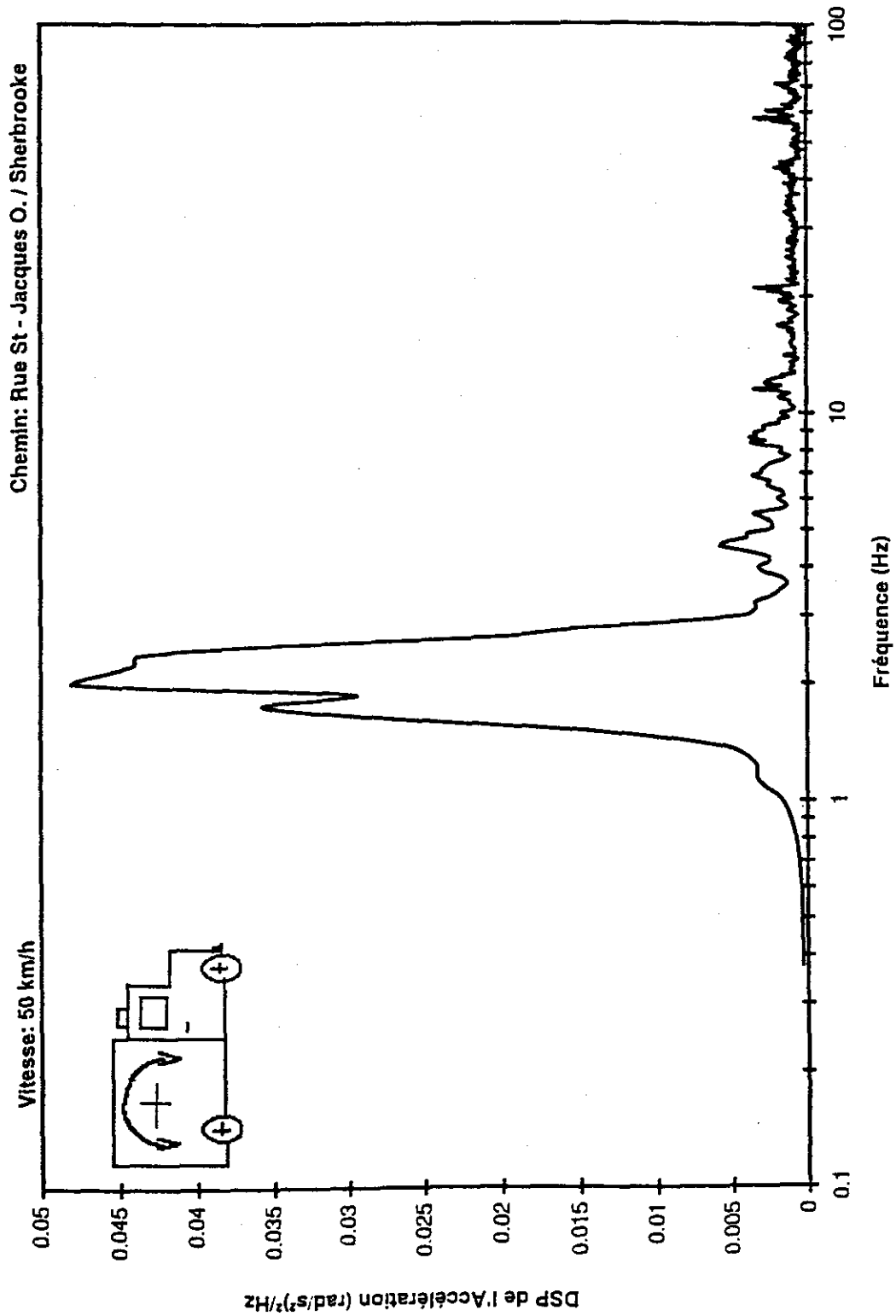
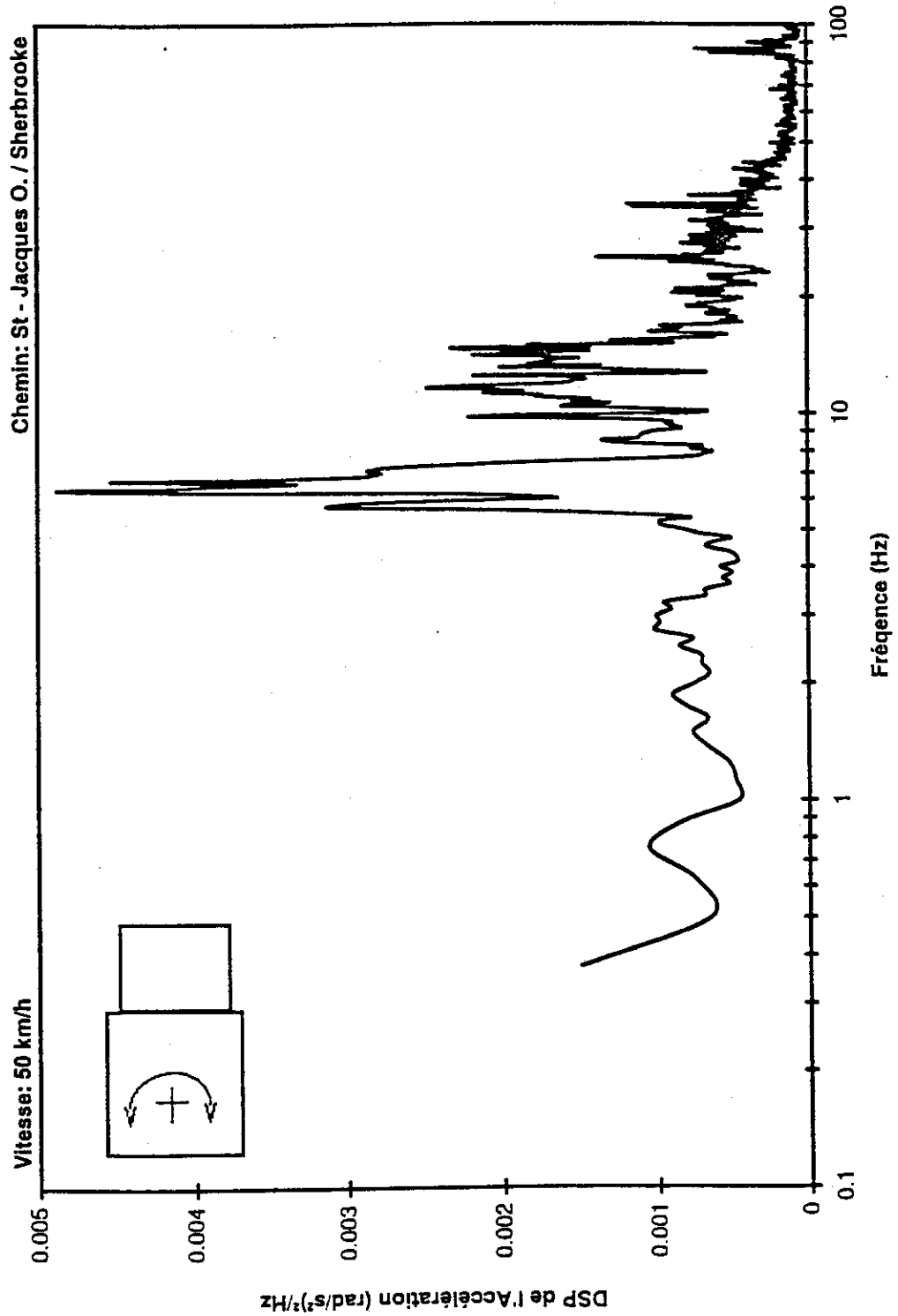


Figure 18: Densité spectrale de puissance des accélérations angulaires de lacet dans le module arrière lors de déplacements sur des rues urbaines à 50 km/h.



5.4 Spectres temporels des déplacements des amortisseurs

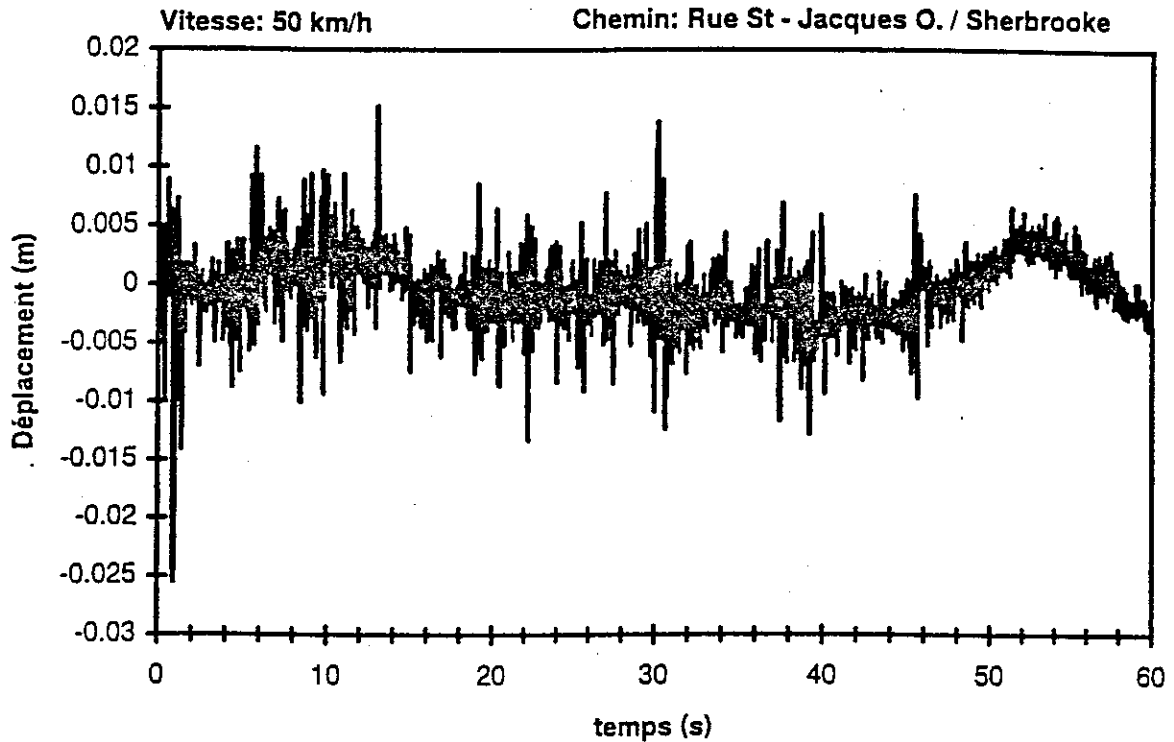
Les figures 19 à 23 illustrent les spectres temporels des déplacements le long de l'axe de chacun des amortisseurs gauche et droit tels que mesurés pour chacune des conditions de conduite indiquées. Ces déplacements sont mesurés à l'aide de potentiomètres aux points de mesure identifiés comme étant RP et LP. Sur la base de ces spectres, on peut établir que :

- À basse vitesse sur les rues urbaines (figure 19), les déplacements de part et d'autre des amortisseurs sont généralement très faibles, se maintenant la majorité du temps en deçà de ± 10 mm sur une possibilité totale pour ces amortisseurs de ± 140 mm. Les fluctuations liées aux manoeuvres du véhicule (i.e. freinage, virage, etc.) font en sorte que les déplacements peuvent varier instantanément. Pour les segments vibratoires considérés dans la figure 19, les déplacements atteignent une valeur instantanée maximale de 20 mm en compression (déplacements positifs) et 25 mm en extension (déplacements négatifs);
- À vitesse intermédiaire (70 km/h), les déplacements de part et d'autre des amortisseurs sont relativement plus élevés que pour les autres situations de conduite. On constate à la figure 21 que les déplacements en situation normale de conduite oscillent autour de 40 mm, atteignant un déplacement maximal de près de 120 mm en compression. Cependant, on attribuerait ce déplacement important de l'amortisseur gauche à un virage effectué vers la gauche. En situation d'urgence, la figure 20 indique un déplacement maximal de 80 mm en extension attribuable à un virage serré vers la droite;
- À vitesse élevée (100 km/h), les déplacements sont relativement faibles, se maintenant généralement en deçà de ± 20 mm. Ceci serait attribuable au fait que lors des déplacements sur l'autoroute, les manoeuvres liées au freinage et aux virages sont beaucoup moins fréquentes que lors des déplacements sur les rues urbaines. À l'occasion, les déplacements observés dans les figures 22 et 23 atteignent des valeurs variant de 40 à 50 mm, qui surviendraient à cause des manoeuvres occasionnelles du véhicule impliquant des freinages et des changements de voie.

Les résultats obtenus permettent de conclure que la suspension arrière du véhicule comportant les ressorts à lames, les ballons pneumatiques et les amortisseurs ne sont probablement pas adaptés pour ce type de véhicule, compte tenu des conditions dans lesquelles il est utilisé. La raideur excessive de la suspension comportant les lames et les ballons pneumatiques, jumelée à l'amortissement de type Coulomb qui résulte du frottement à sec entre les lames des ressorts et à l'amortissement de type visqueux procuré par les amortisseurs expliquent en partie les faibles déplacements se produisant de part et d'autre des amortisseurs. Cependant, les amortisseurs eux-mêmes ne semblent pas procurer un taux d'amortissement important. En effet, des essais réalisés en laboratoire sur un des amortisseurs ont démontré que le coefficient d'amortissement était de l'ordre de 5.82 kNs/m en extension et de 4.48 kNs/m en compression. Au-delà de la vitesse de transition, évaluée à 0.019 m/s en compression et à 0.043 m/s en extension, les coefficients d'amortissement deviennent plus faibles, réduisant à 1.06 kNs/m en extension et à 0.54 kNs/m en compression.

Figure 19: Spectres temporels des déplacements le long de l'axe de chacun des amortisseurs lors de déplacements sur des rues urbaines à 50 km/h.

POTENTIOMÈTRE DROIT



POTENTIOMÈTRE GAUCHE

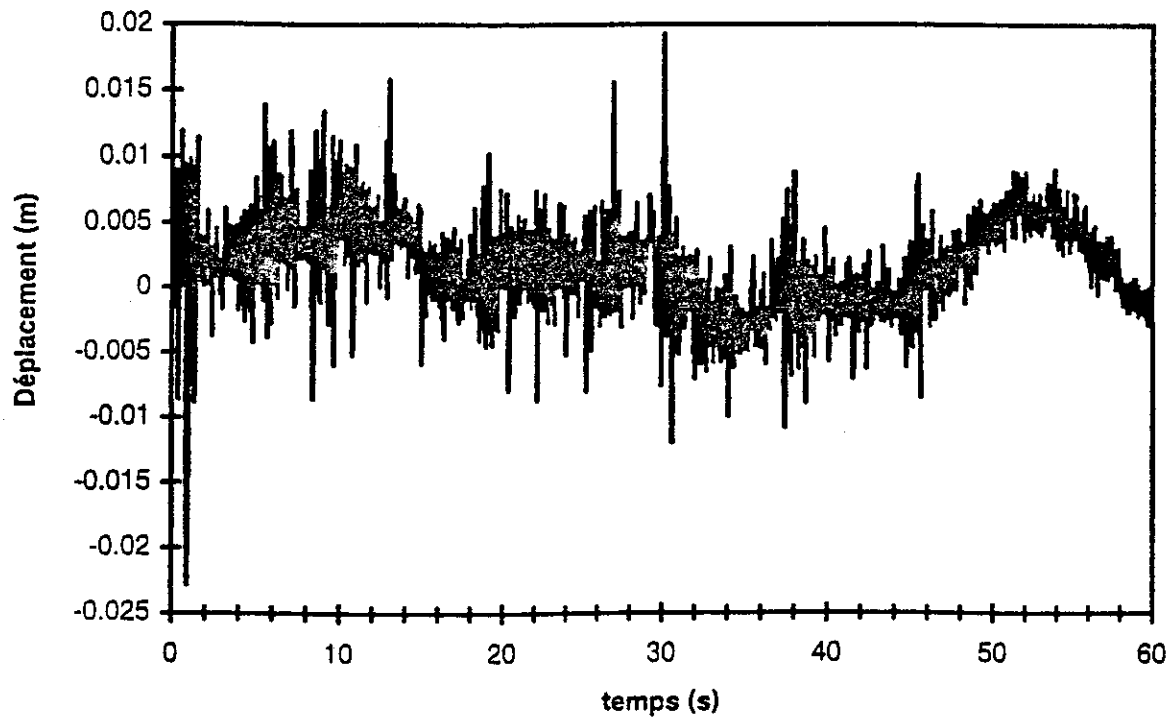
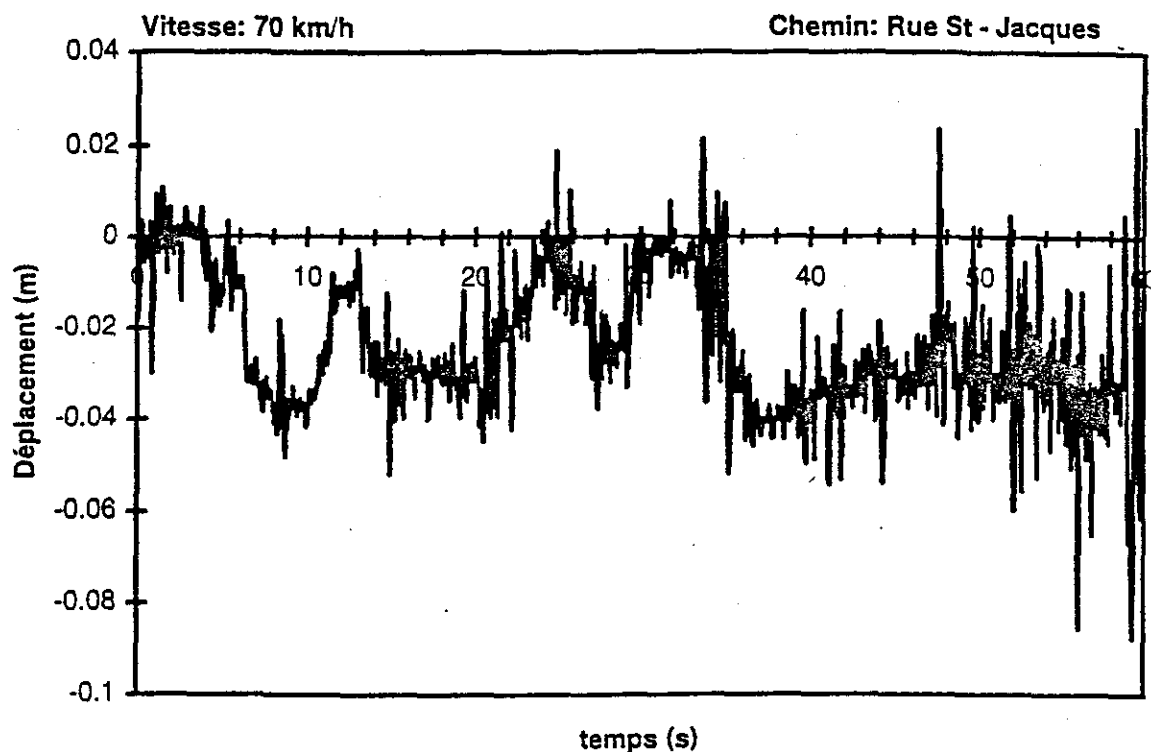


Figure 20: Spectres temporels des déplacements le long de l'axe de chacun des amortisseurs lors de déplacements en situation d'urgence sur des rues urbaines à 70 km/h.
POTENTIOMÈTRE DROIT



POTENTIOMÈTRE GAUCHE

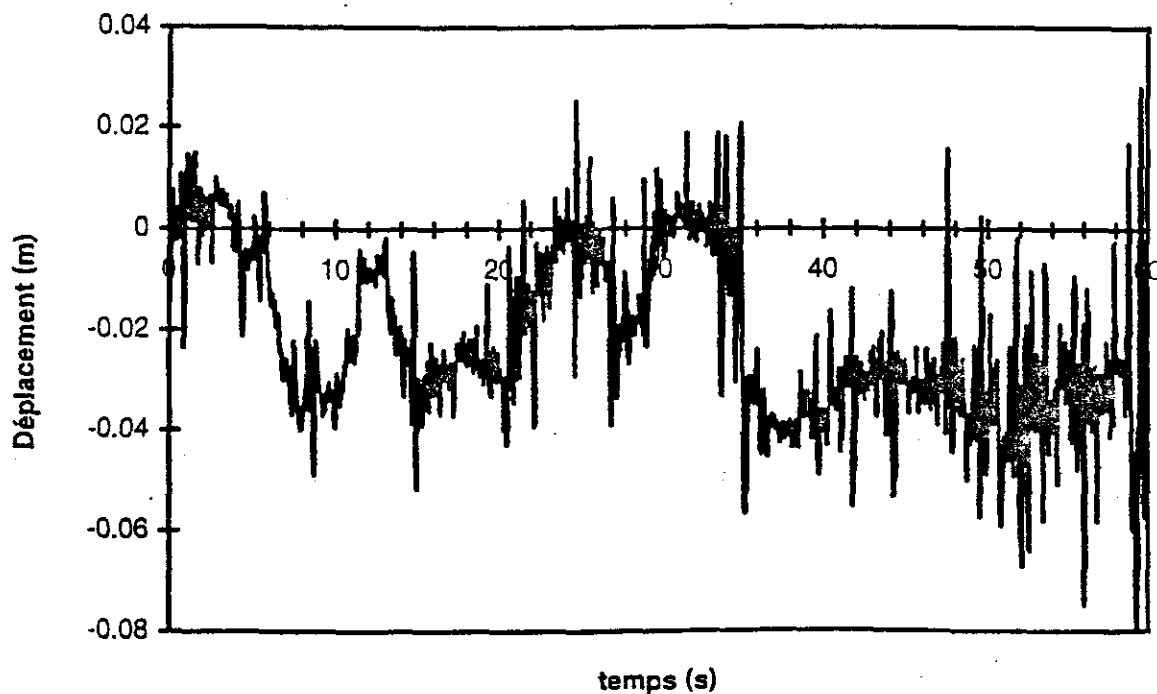


Figure 21: Spectres temporels des déplacements le long de l'axe de chacun des amortisseurs lors de déplacements sur des rues urbaines à 70 km/h.

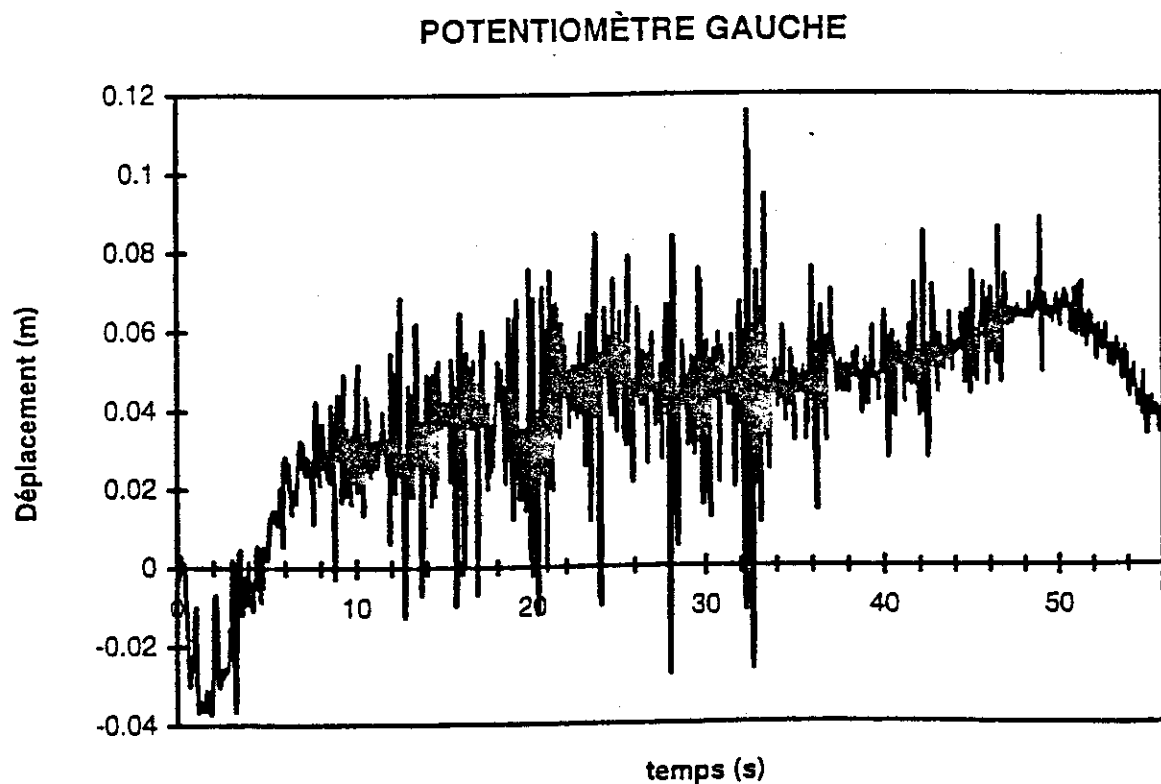
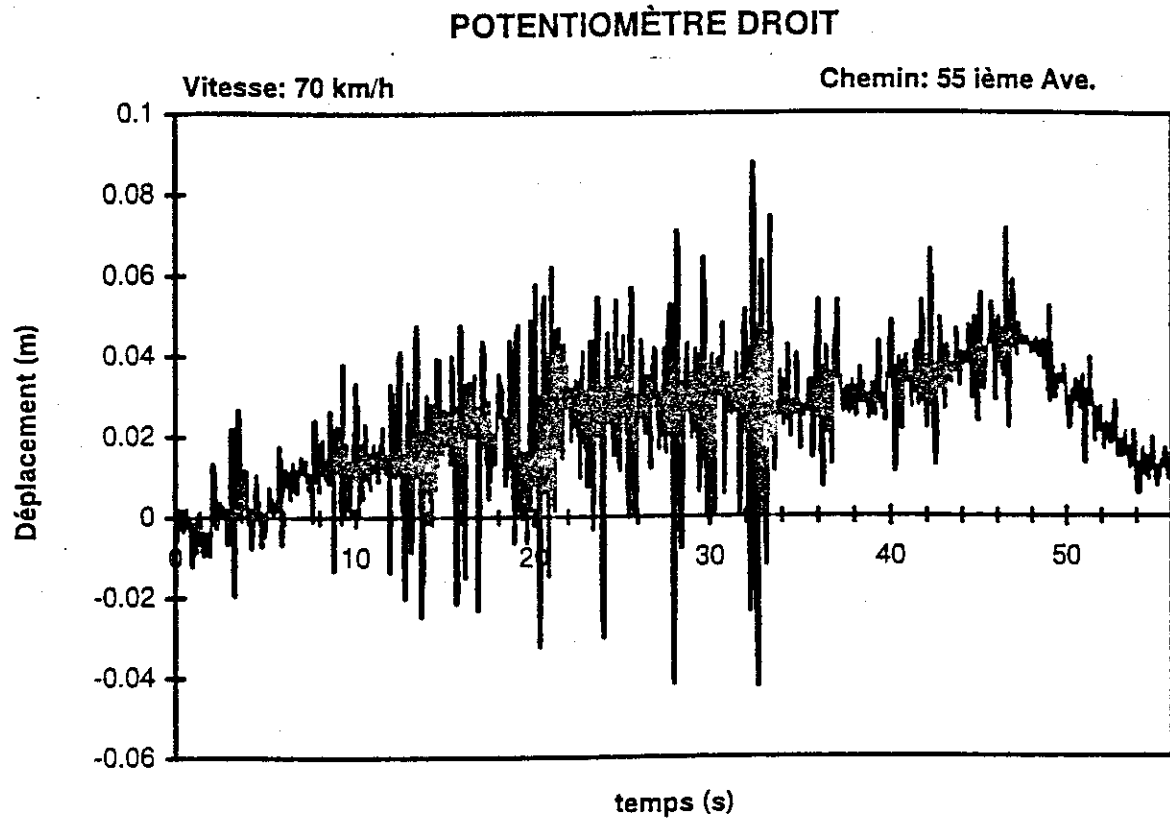
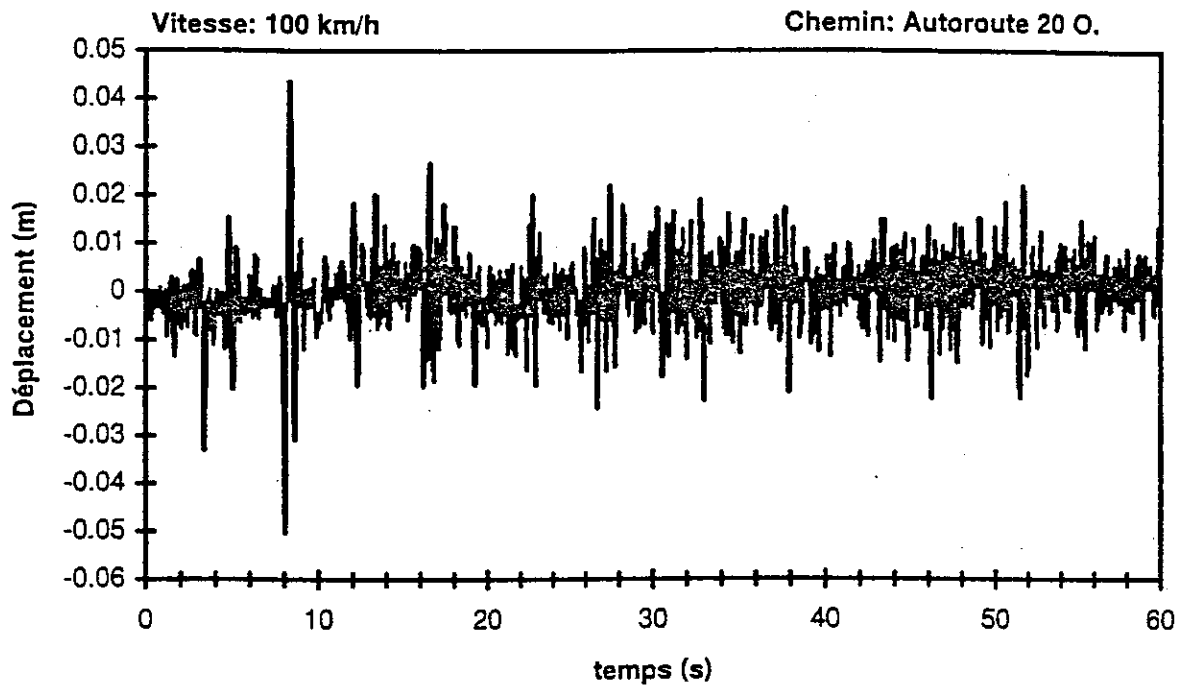
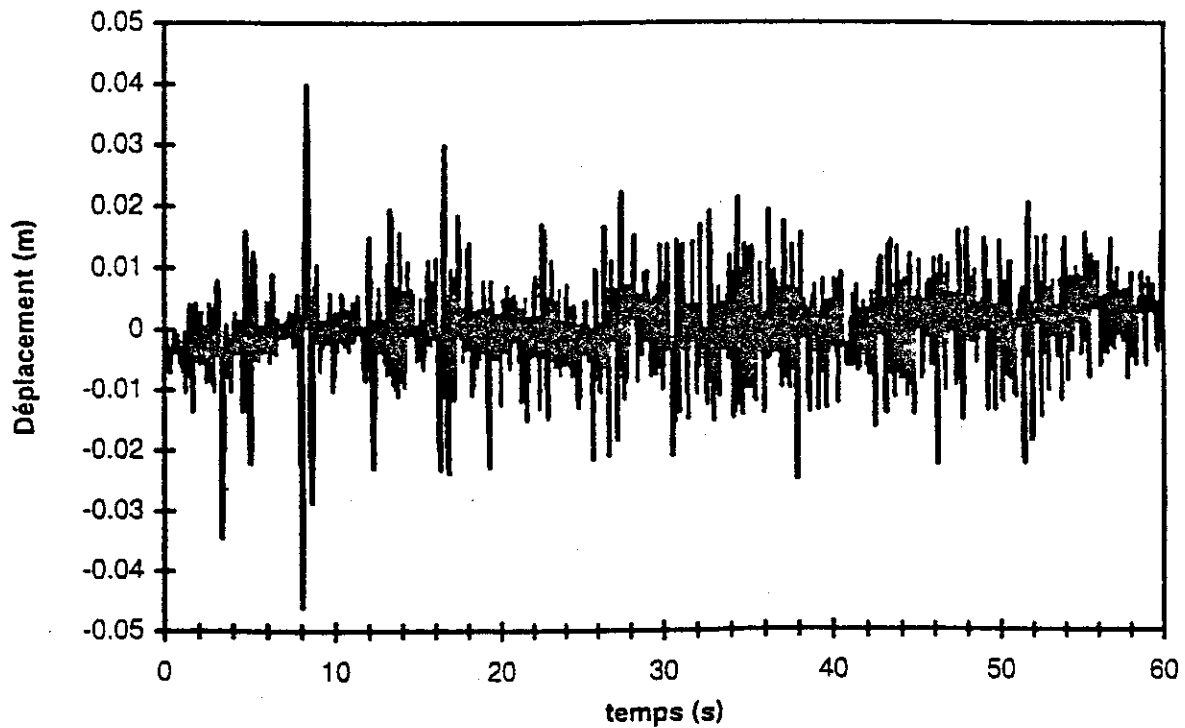


Figure 23: Spectres temporels des déplacements le long de l'axe de chacun des amortisseurs lors de déplacements sur une autoroute à 100 km/h.

POTENTIOMÈTRE DROIT



POTENTIOMÈTRE GAUCHE



Compte tenu que la charge sur l'essieu arrière soit d'environ 3 450 kg et que la fréquence de résonance du mode de vibrations verticales soit d'environ 2.2 Hz, il s'ensuit que le degré d'amortissement lié aux amortisseurs est inférieur à 6 %, ce qui n'est pas optimal. Cependant, compte tenu que l'amortissement de type Coulomb résultant du frottement à sec entre les lames soit généralement plus prononcé que celui des amortisseurs, on pourrait s'attendre à ce que le taux d'amortissement de la suspension arrière du véhicule soit beaucoup plus important, ce qui expliquerait que les déplacements de la suspension arrière ne soient pas plus prononcés que ceux démontrés dans les figures 19 à 23. En contrepartie, on ne pourrait affirmer que l'amortissement de type Coulomb soit si important, puisque ceci impliquerait que sous de faibles excitations vibratoires, les forces résultantes ne parviendraient pas à vaincre les forces de frottement, ce qui résulterait en une absence totale de déplacement de la suspension arrière. Clairement, un tel phénomène n'a pas été observé si l'on en juge par les déplacements illustrés dans les figures 19 à 23. De plus, en raison de la faible efficacité des ballons pneumatiques pour dissiper l'énergie vibratoire lorsque les mouvements exigent une extension, et pour procurer une meilleure manoeuvrabilité du véhicule, il est généralement recommandé que le degré d'amortissement en extension soit plus élevé que celui en compression. Ceci n'est pas le cas avec les amortisseurs faisant partie de la suspension du véhicule; bien que les caractéristiques techniques des ballons pneumatiques et des ressorts à lame n'aient pas été rendues disponibles pour juger s'il pourrait en être ainsi pour l'ensemble de la suspension. Quoi qu'il en soit, les résultats indiquent clairement que la suspension est beaucoup trop rigide, la cause exacte étant difficilement identifiable en l'absence de données techniques précises sur les principales composantes incluant les ressorts à lames et les ballons pneumatiques.

5.5 Spectres temporels des déplacements angulaires de roulis

Les spectres temporels des déplacements angulaires de roulis sont présentés dans l'annexe B pour chacune des situations de conduite considérées. Dans chacun des cas, le roulis du châssis est représenté sur la base de segments vibratoires dont la durée est de une minute, de même que le roulis du châssis par rapport à l'essieu arrière. Ces résultats indiquent généralement que, peu importe la situation de conduite, l'angle de roulis du châssis reste faible, la valeur la plus importante ayant été enregistrée lors de déplacements sur rues urbaines à basse vitesse, soit une valeur instantanée de 0.057 rad (3.26 degrés) probablement due à un virage. De faibles angles de roulis sont en partie attribuables à la très grande rigidité de la suspension, qui bien que n'étant pas optimale pour améliorer la qualité vibratoire d'un trajet pour les occupants du véhicule, a le mérite de procurer une bonne stabilité et une meilleure manoeuvrabilité du véhicule. Les caractéristiques de la barre anti-roulis pourraient aussi expliquer les faibles angles de roulis observés, bien que les données relatives à leurs caractéristiques n'aient pas été disponibles pour en juger.

5.6 Spectres temporels des déplacements angulaires de tangage

Les spectres temporels des déplacements angulaires de tangage sont reproduits dans l'annexe C pour chacune des situations de conduite considérées, tels qu'établis sur la base de segments vibratoires dont la durée est de une minute. L'angle de tangage demeure en général relativement faible, la valeur maximale de 0.025 rad (1.4 degré) ayant été enregistrée lors de situations d'urgence sur rues urbaines. Il faut cependant reconnaître que le comportement dynamique lié au tangage est fortement influencé par le freinage, ainsi que par la répartition de la raideur de la suspension et du poids du véhicule entre l'essieu avant et arrière. Les spectres temporels des déplacements angulaires de tangage apparaissant dans l'annexe C démontrent une fréquence dominante d'environ 0.5 Hz, qui ne doit cependant pas être confondue avec la fréquence à laquelle l'accélération angulaire de tangage est maximale, soit aux environs de 1.8 Hz tels que le démontrent les spectres de la DSP des accélérations apparaissant à l'annexe A.

5.7 Spectres temporels des accélérations latérale et verticale du module arrière

Les spectres temporels des accélérations vibratoires enregistrées aux points CFZ (vertical) et CFY (latéral) du module arrière pour chacune des situations de conduite considérées sont reproduits dans l'annexe D sur la base de segments vibratoires dont la durée est de une minute. En direction verticale, des accélérations vibratoires instantanées excédant 1 g (10 ms^{-2}) peuvent être enregistrées, particulièrement lorsque le véhicule se déplace à une vitesse d'environ 70 km/h sur les rues urbaines. De tels niveaux, bien que considérables, n'apparaissent cependant qu'occasionnellement sur une durée extrêmement courte. La majorité du temps, on constate que l'intensité instantanée des vibrations verticales se maintient en deçà de $\pm 3 \text{ ms}^{-2}$. Quant aux vibrations latérales, des niveaux instantanés aussi considérables que 8 ms^{-2} sont atteints lors de déplacements sur rues urbaines à 70 km/h. De telles accélérations doivent cependant être liées en partie aux manoeuvres effectuées lors de la conduite du véhicule. Cependant, de façon plus générale, le niveau instantané des vibrations latérales se maintient en deçà de $\pm 3 \text{ ms}^{-2}$.

6.0 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Sur le plan de l'exposition aux vibrations globales du corps (0.5 - 80 Hz), les niveaux d'exposition aux postes de conducteur (DS), de passager avant (PS) et de banc de tête (HS) sont à peu près identiques et leur variation selon les situations de conduite considérées est négligeable. En appliquant les guides d'exposition recommandés dans la norme ISO 2631-1 (1997), on estime qu'à ces postes, une durée d'exposition quotidienne atteignant près de quatre heures pourrait être tolérée avant que la situation ne soit jugée comme étant préoccupante quant à l'effet que les vibrations pourraient engendrer à plus ou moins long terme sur la santé (i.e atteinte de la cote d'alerte). Cependant, les niveaux de vibration enregistrés à ces postes, ne sauraient constituer un danger imminent d'atteinte à la santé, selon la cote de danger définie dans la norme ISO 2631-1 (1997). L'exposition vibratoire serait qualifiée tout au plus comme étant « passablement inconfortable » à ces trois postes de travail, selon le guide définissant l'effet des vibrations sur le confort dans la norme ISO 2631-1 (1997).

Pour le personnel affecté dans le module arrière sur la banquette latérale (LTS), la banquette longitudinale (LGS) ou encore, debout à proximité de la tête de la civière (HF), la situation est bien différente. D'abord, la situation de conduite affecte considérablement les niveaux d'exposition aux vibrations 0.5 - 80 Hz à ces postes, les niveaux les plus importants étant enregistrés en direction verticale lors de déplacements en situation d'urgence sur autoroute, tandis que les plus faibles apparaissent à basse vitesse lors de déplacements sur des rues urbaines. Le poste le plus à risque demeure sans contredit celui impliquant la banquette longitudinale sur laquelle les niveaux d'exposition sont qualifiés comme étant « inconfortables » pour toutes les conditions de conduite, tandis que la cote d'alerte pourrait être atteinte en aussi peu que 12 minutes d'exposition par jour lors de situations d'urgence sur autoroute, et en un peu moins d'une heure lors de déplacements à basse vitesse sur des rues urbaines. Le degré de sévérité de ces expositions doit toutefois être jugé en tenant compte de la durée d'exposition réelle anticipée à ces postes lors du travail régulier. Aussi doit-on reconnaître qu'en raison des divers facteurs susceptibles d'influencer les niveaux d'exposition aux vibrations, les valeurs présentées dans ce rapport ne sauraient constituer des absolues applicables à toutes les situations, mais servent plutôt à identifier et à juger de l'ampleur du problème.

Au niveau des vibrations de basses fréquences (0.1 - 0.5 Hz) associées au mal des transports, les postes menant aux plus fortes expositions sont ceux de la banquette latérale et du conducteur lors de déplacements en situation d'urgence sur des rues urbaines. Lors de tels déplacements, l'application du guide définie dans la norme ISO 2631-1 (1997) indique que le pourcentage de population qui, à 70 % serait susceptible d'avoir des nausées liées à une telle exposition, serait d'un peu moins de 3 % à raison d'une exposition quotidienne de 30 minutes, et de 8 % lorsque cette durée d'exposition atteindrait quatre heures. Quant aux vibrations enregistrées en régime stationnaire alors que le moteur est maintenu en état de marche, aucun des niveaux de vibrations enregistrés ne s'est avéré être suffisamment intense pour être associé à un problème quelconque de santé, de confort ou de mal des transports.

Sur le plan du comportement dynamique du véhicule, la fréquence de résonance pour les différents modes de vibration de la masse suspendue est établie à 2.2 Hz pour le mode vertical, 1.4 Hz pour le mode angulaire de roulis et 1.8 Hz pour le mode angulaire de tangage. La fréquence de résonance de l'essieu arrière est quant à elle établie dans la gamme de fréquence variant entre 10 et 13 Hz pour le mode de vibrations verticales. Bien qu'il soit admis que la fréquence de résonance ne change peu ou pas selon les situations de conduite, telle n'est pas la situation lorsque l'intensité est considérée. En effet, la vitesse de conduite, la qualité de la chaussée ainsi que les manoeuvres de freinage, de dépassements et de virages sont tous des facteurs affectant l'intensité des vibrations selon chacun des modes vibratoires comme en font particulièrement foi les spectres temporels des vibrations, dans lesquels les déplacements instantanés enregistrés peuvent notamment être associés à une manoeuvre quelconque du véhicule. Dans l'ensemble, les résultats indiquent une suspension du véhicule étant relativement rigide, qui se traduit par une fréquence de résonance passablement élevée (2.2 Hz) en mode de vibrations verticales, alors que le roulis est maintenu très faible. Normalement, compte tenu du poids et de la capacité de charge, un tel véhicule devrait avoir une fréquence de résonance inférieure à 1.4 Hz pour assurer une qualité vibratoire adéquate en mode vertical pour les passagers du véhicule. La suspension aurait donc avantage à être considérablement assouplie pour rencontrer cette exigence sur la fréquence de résonance.

Quant aux éléments de la suspension incluant les ressorts à lames, les ballons pneumatiques et les amortisseurs, les résultats des essais indiquent qu'ils favorisent généralement des déplacements très faibles de part et d'autre des amortisseurs, oscillant pour la plupart des situations de conduite autour de ± 20 mm sur une capacité totale de ± 140 mm. Les seules conditions qui semblent provoquer un déplacement significatif des amortisseurs sont associées à des manoeuvres du véhicule, telles les freinages et les virages. Il en résulte donc que la suspension du véhicule apparaît être trop rigide pour assurer un confort vibratoire adéquat et que les conditions d'amortissement provenant du frottement à sec entre les lames des ressorts (amortissement de type Coulomb) et des forces de type visqueux développées par les amortisseurs ne sont possiblement pas optimales. D'ailleurs, des essais réalisés en laboratoire ont indiqué un degré d'amortissement inférieur à 6 % pour les amortisseurs seuls, alors que pour l'ensemble de la suspension, l'amortissement global est fort probablement plus élevé. De plus, le coefficient d'amortissement en extension aurait avantage à être plusieurs fois supérieur à celui en compression alors que les essais réalisés sur les amortisseurs n'ont indiqué qu'une sensible supériorité. La non-disponibilité d'informations techniques concernant les ressorts à lames et les ballons pneumatiques n'a pas permis de cerner plus spécifiquement les éléments responsables du comportement observé de la suspension.

Sur la base des résultats obtenus, il est toutefois recommandé de :

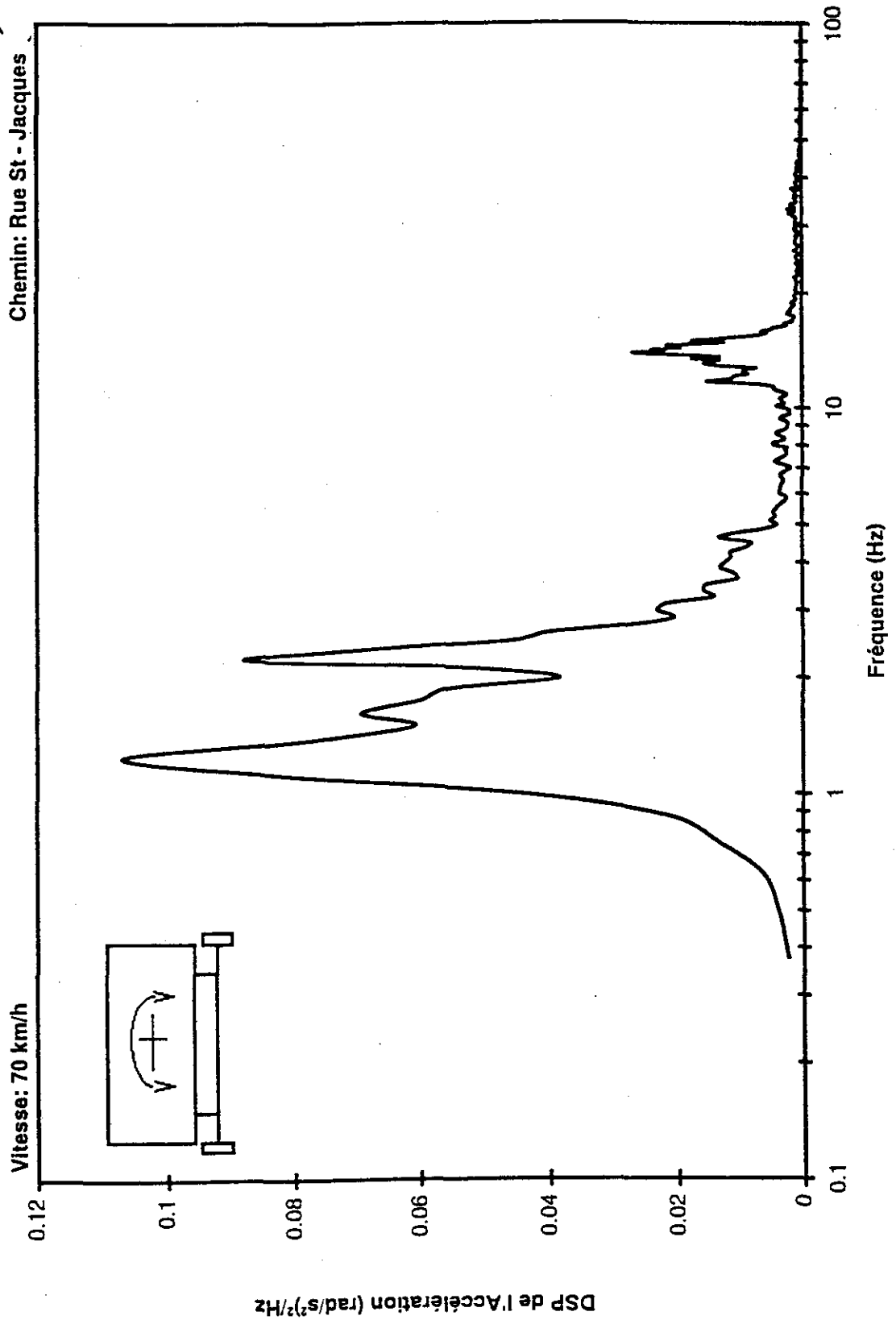
- 1) procéder à une évaluation de chacun des six postes de travail étudiés dans le but de déterminer les durées d'exposition quotidienne typiques associées à chacun de ces postes pour ainsi pouvoir juger du degré de sévérité des expositions sur la base des résultats rapportés;

- 2) considérer les modifications de la suspension arrière du véhicule composée de lames et de ballons pneumatiques dont le but serait de réduire la fréquence de résonance du mode de vibrations verticales de la masse suspendue de 2.2 à moins de 1.4 Hz. Il importe donc d'obtenir les caractéristiques physiques de ces éléments de la suspension en vue d'évaluer comment ils pourraient en diminuer la rigidité, tout en portant une attention particulière sur l'effet que de telles modifications pourraient avoir sur le roulis, la manoeuvrabilité et la stabilité du véhicule;
- 3) considérer une évaluation de la suspension avant du véhicule puisque toute modification de la suspension arrière doit aussi être accompagnée d'un ajustement équivalent de la suspension avant, le tout reposant sur une connaissance de la distribution de masse supportée par chacun des essieux;
- 4) revoir le choix d'amortisseurs qui permettraient de procurer un degré plus important d'amortissement, tout en ne négligeant pas l'amortissement procuré par les forces de frottement à sec de type Coulomb développé entre les lames des ressorts. Des considérations devraient aussi porter sur la nécessité de développer un amortissement global qui soit plus élevé en extension qu'en compression. Le choix des caractéristiques des amortisseurs doit d'autant plus tenir compte de la rigidité effective de la suspension arrière ainsi que de la fréquence de résonance de la masse suspendue pour le mode de vibrations verticales. De même, les amortisseurs avant doivent être sélectionnés en fonction des caractéristiques des amortisseurs arrière.
- 5) baser toute évaluation subséquente portant sur des modifications éventuelles apportées au système de suspension du véhicule sur une procédure d'évaluation semblable à celle utilisée dans le cadre de cette étude pour permettre d'évaluer l'impact de ces changements sur une base comparative.

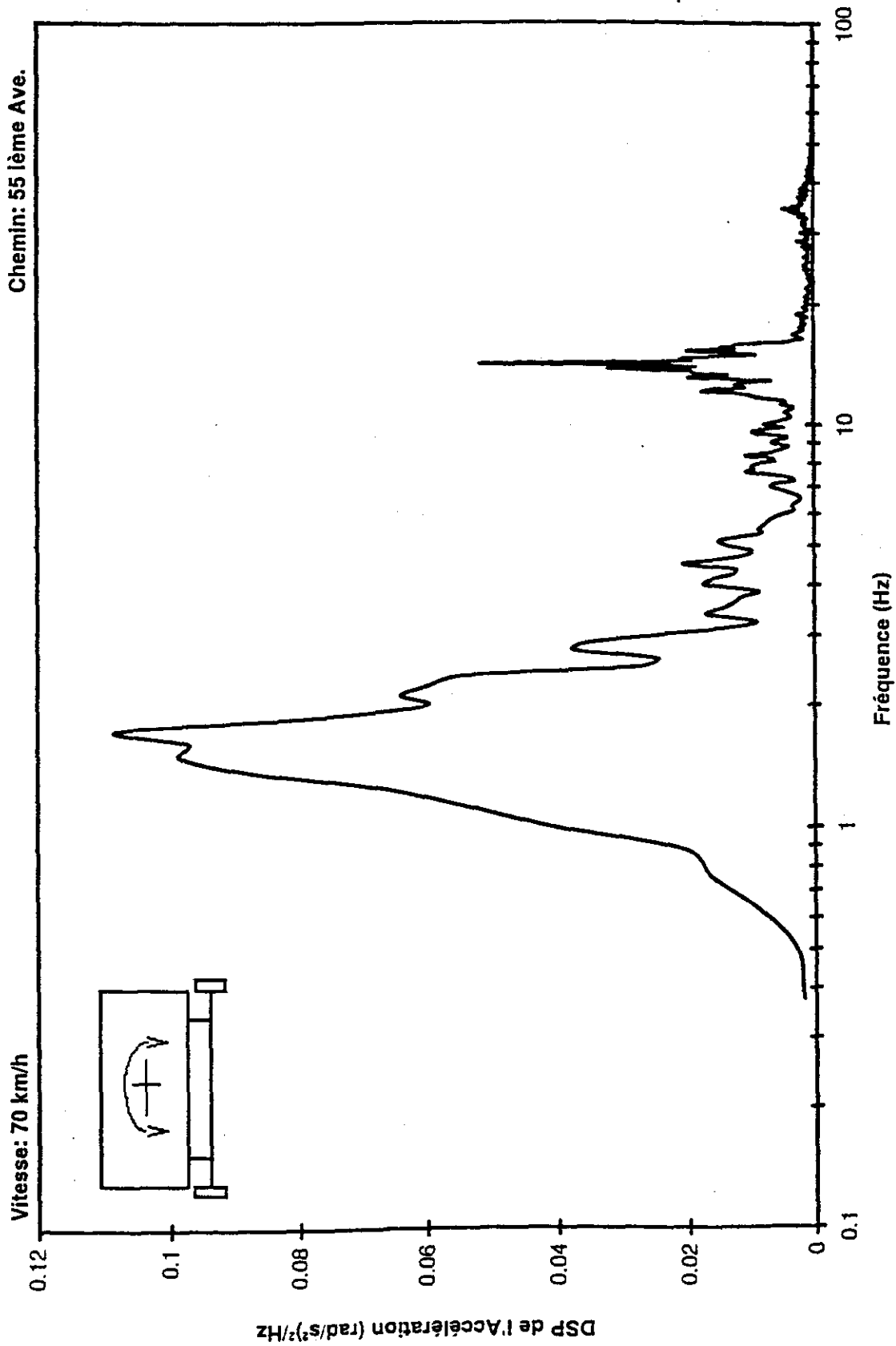
ANNEXE A

**SPECTRES DE LA DENSITÉ SPECTRALE DE PUISSANCE DES ACCÉLÉRATIONS
ANGULAIRES LORS DES DÉPLACEMENTS À 70 ET À 100 KM/H**

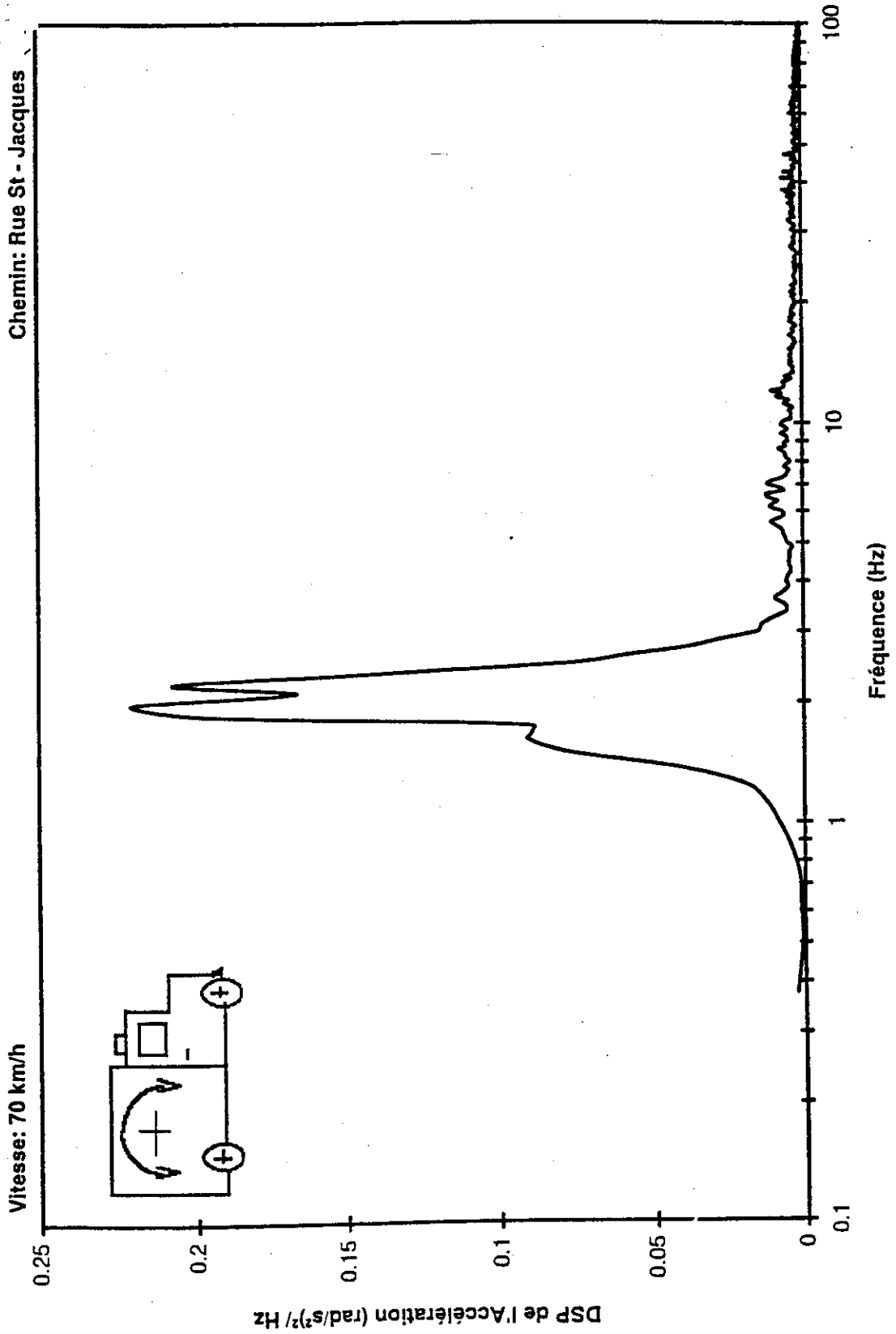
DSP DE L'ACCÉLÉRATION ROULIS



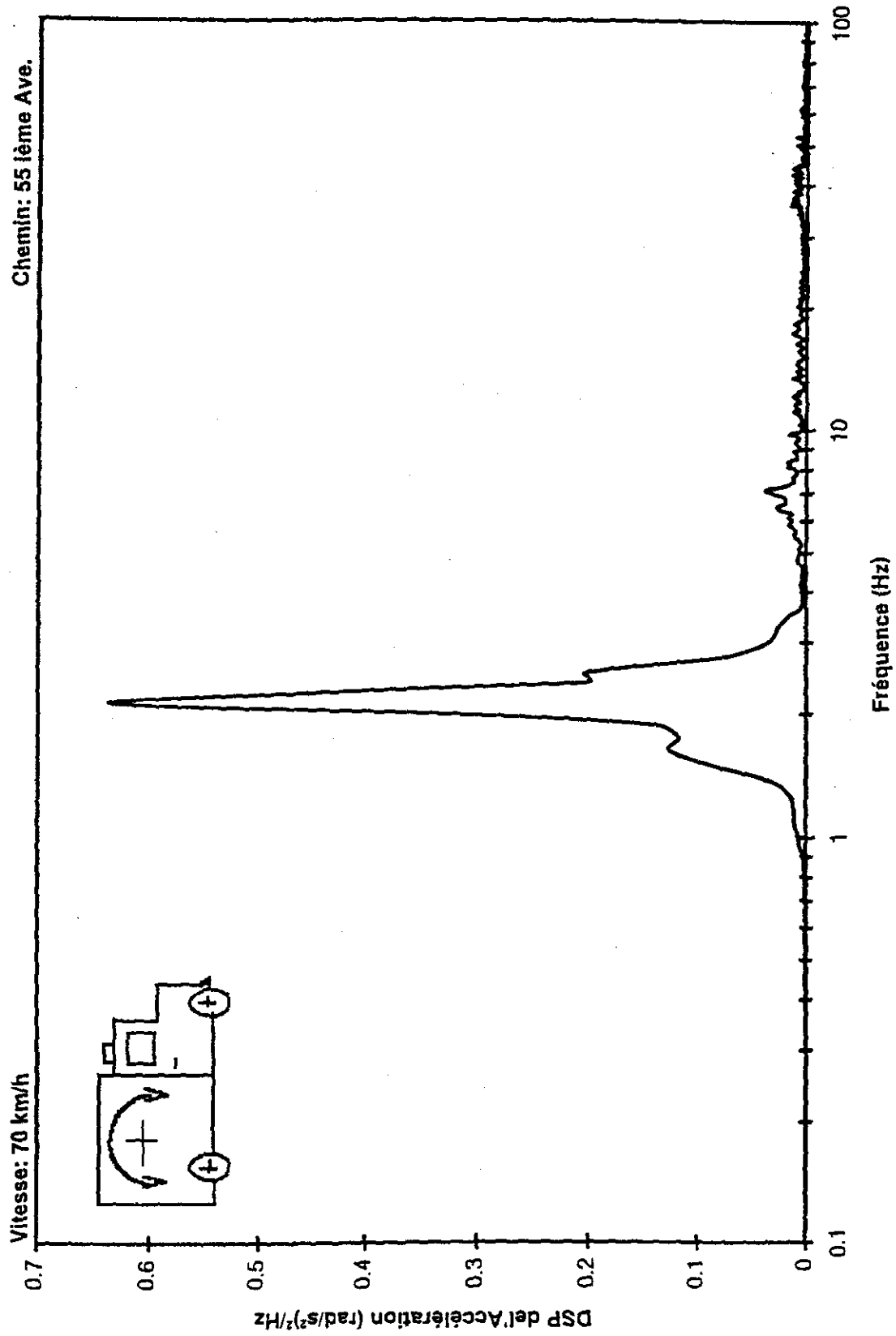
DSP DE L'ACCÉLÉRATION ROULIS



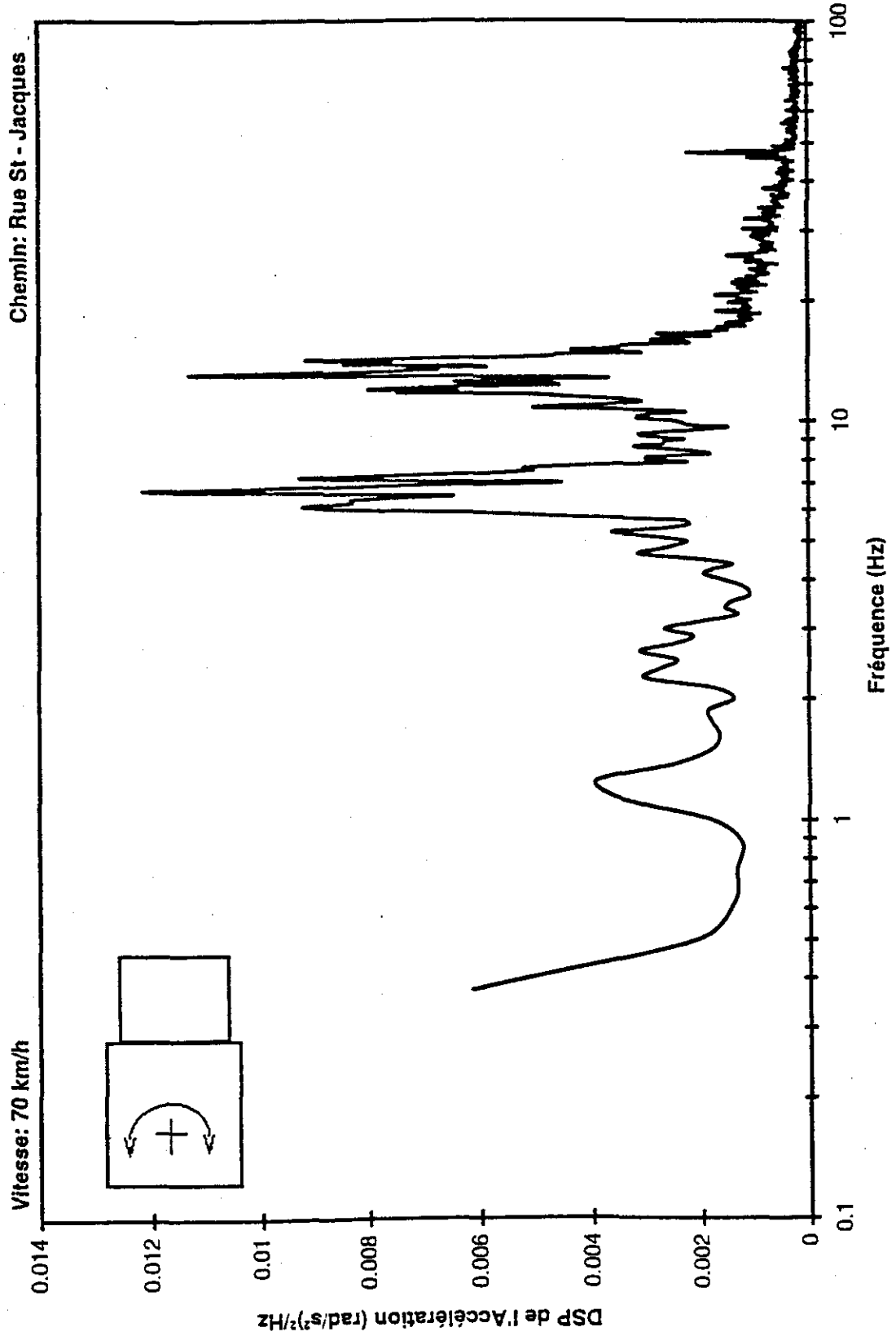
DSP DE L'ACCÉLÉRATION TANGAGE



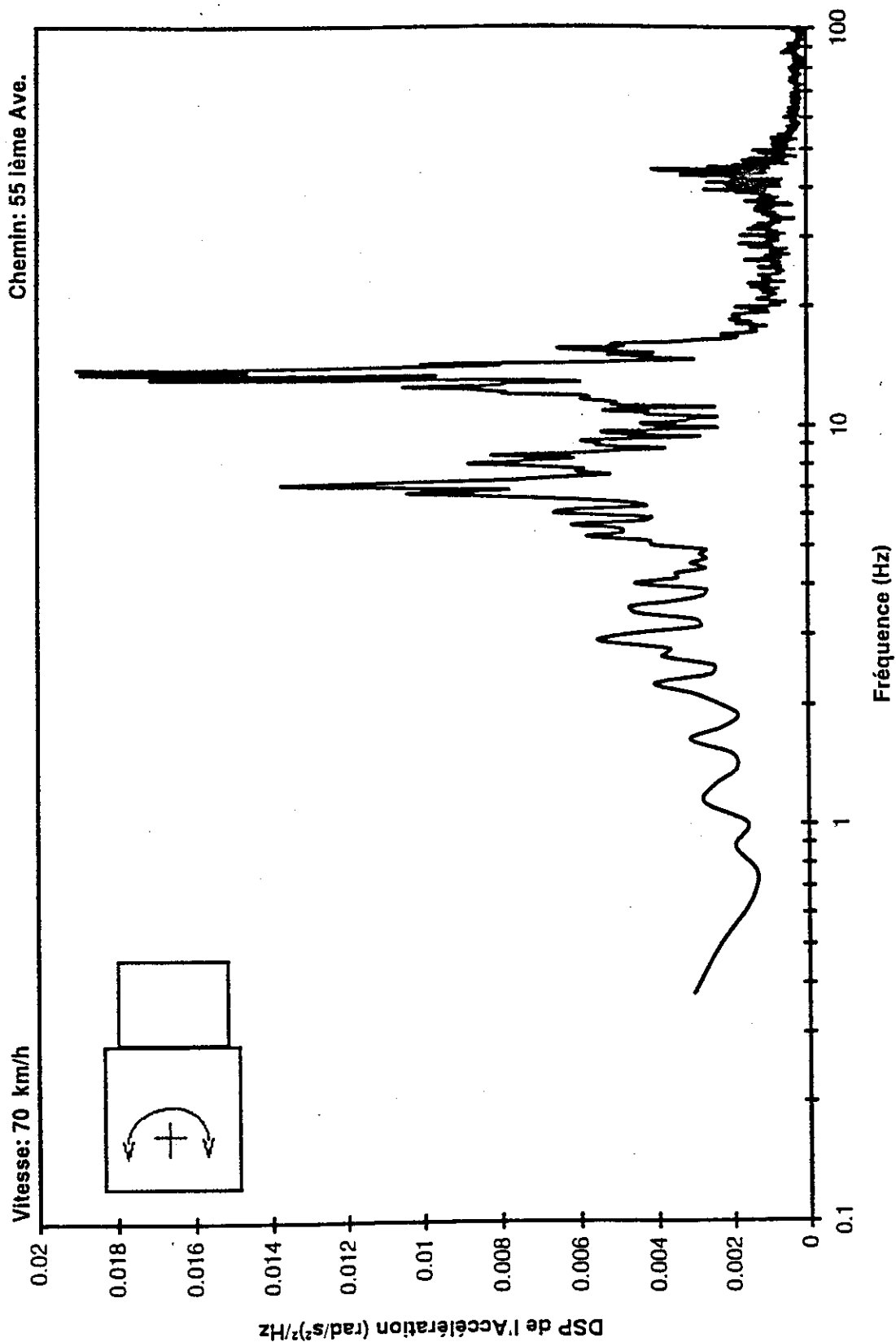
DSP DE L'ACCÉLÉRATION TANGAGE



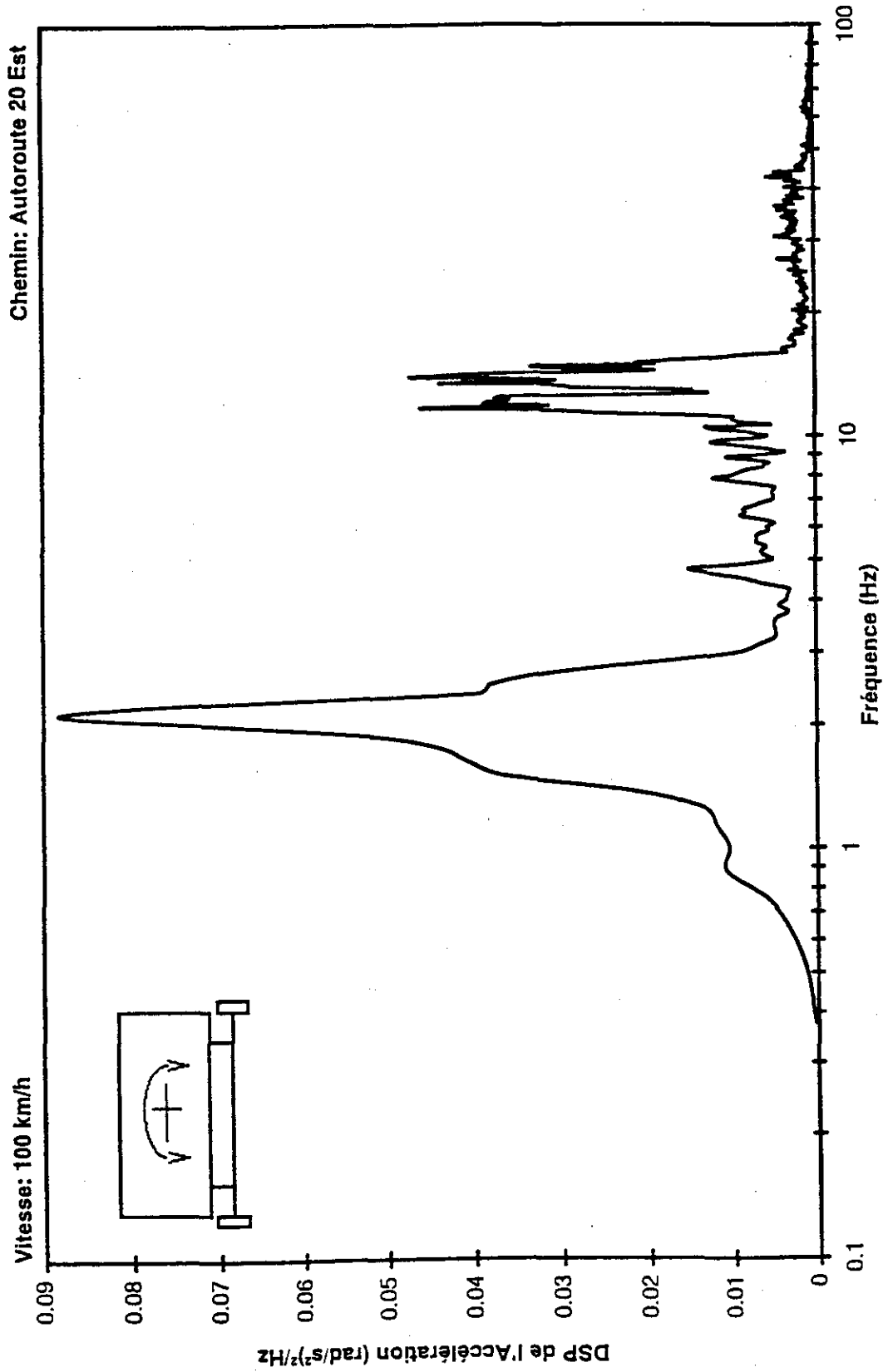
DSP DE L'ACCÉLÉRATION PAR DU MOUVEMENT DELACET



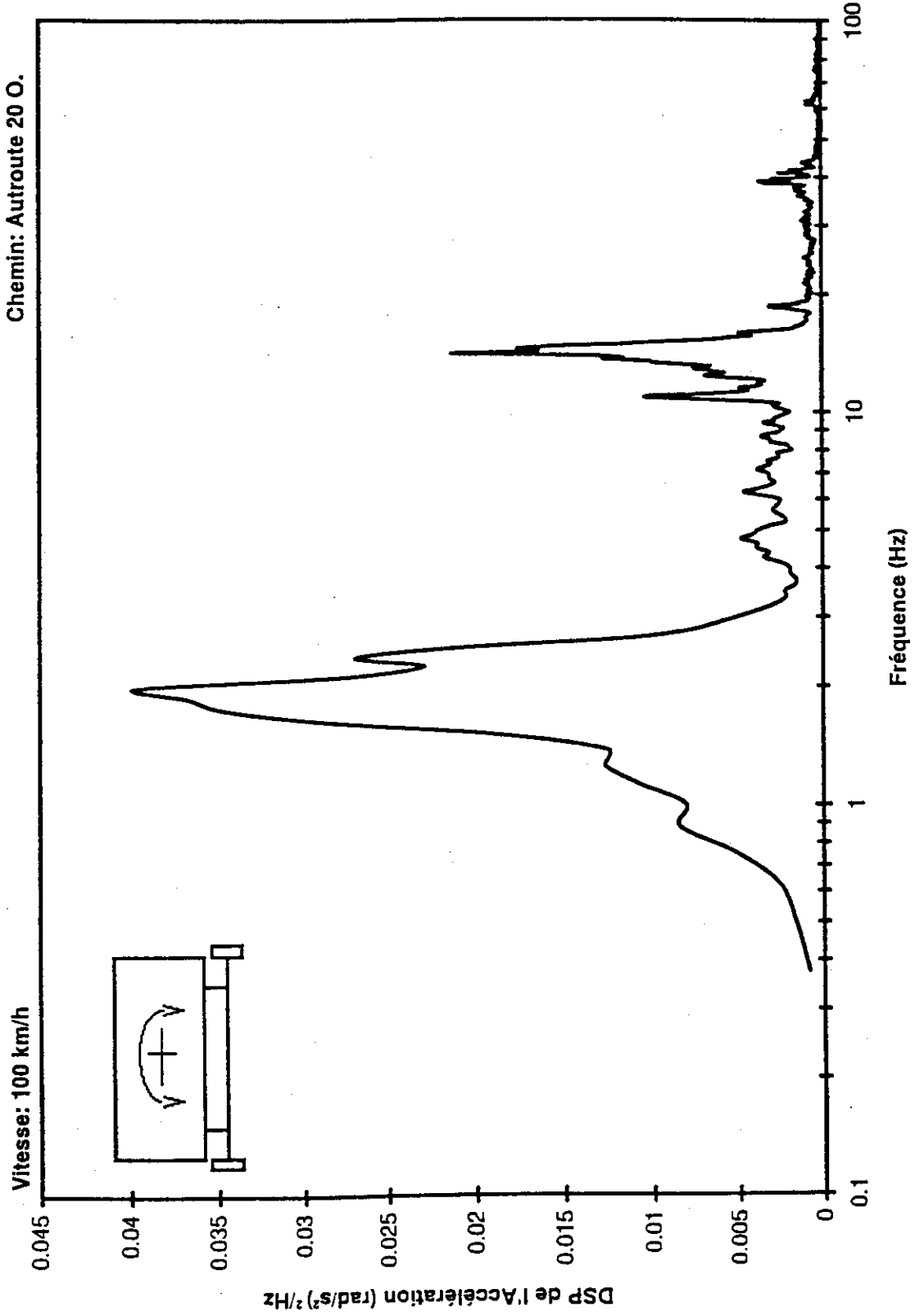
DSP DE L'ACCÉLÉRATION PAR DU MOUVEMENT DELACET



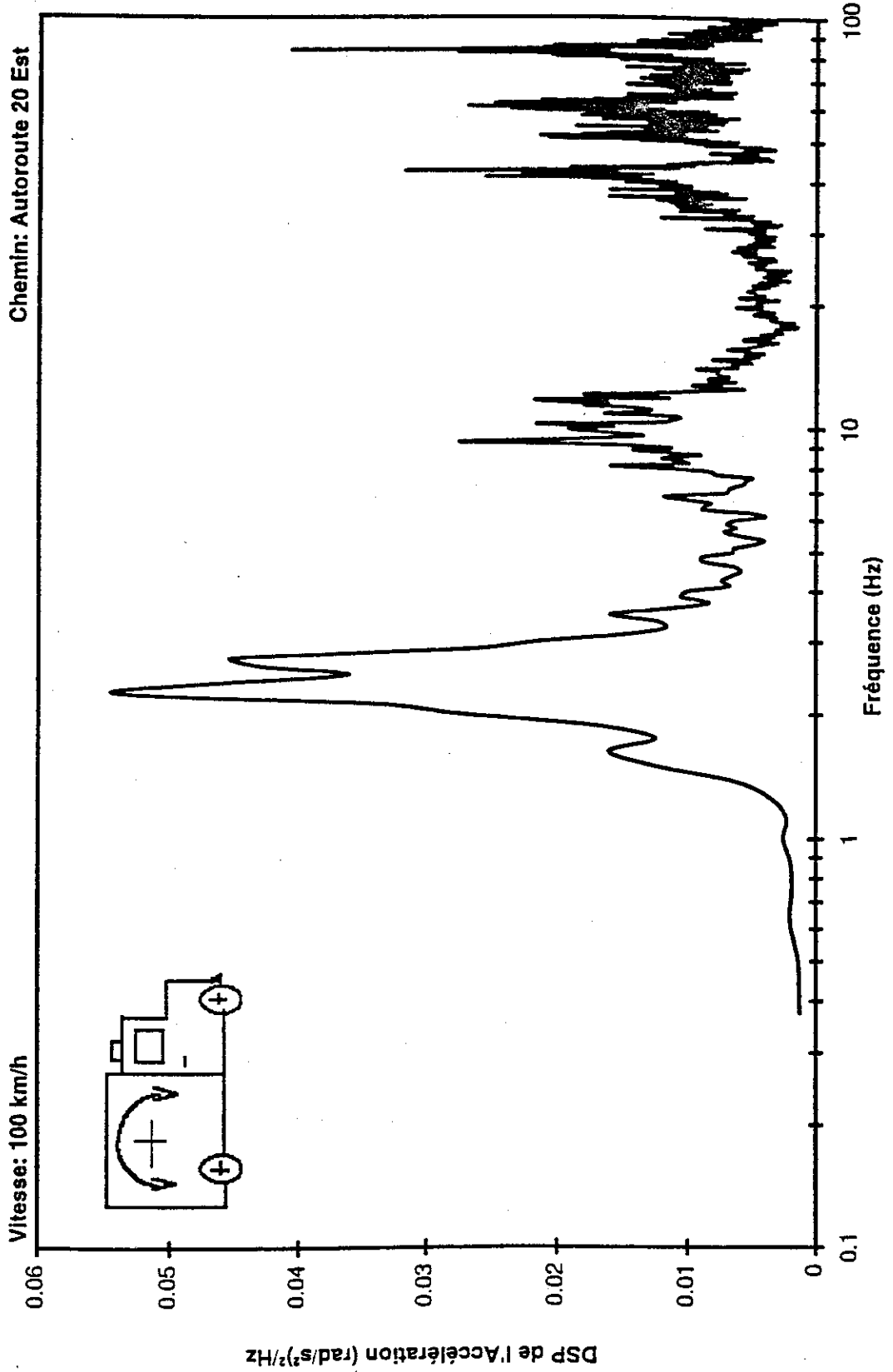
DSP DE L'ACCÉLÉRATION ROULIS



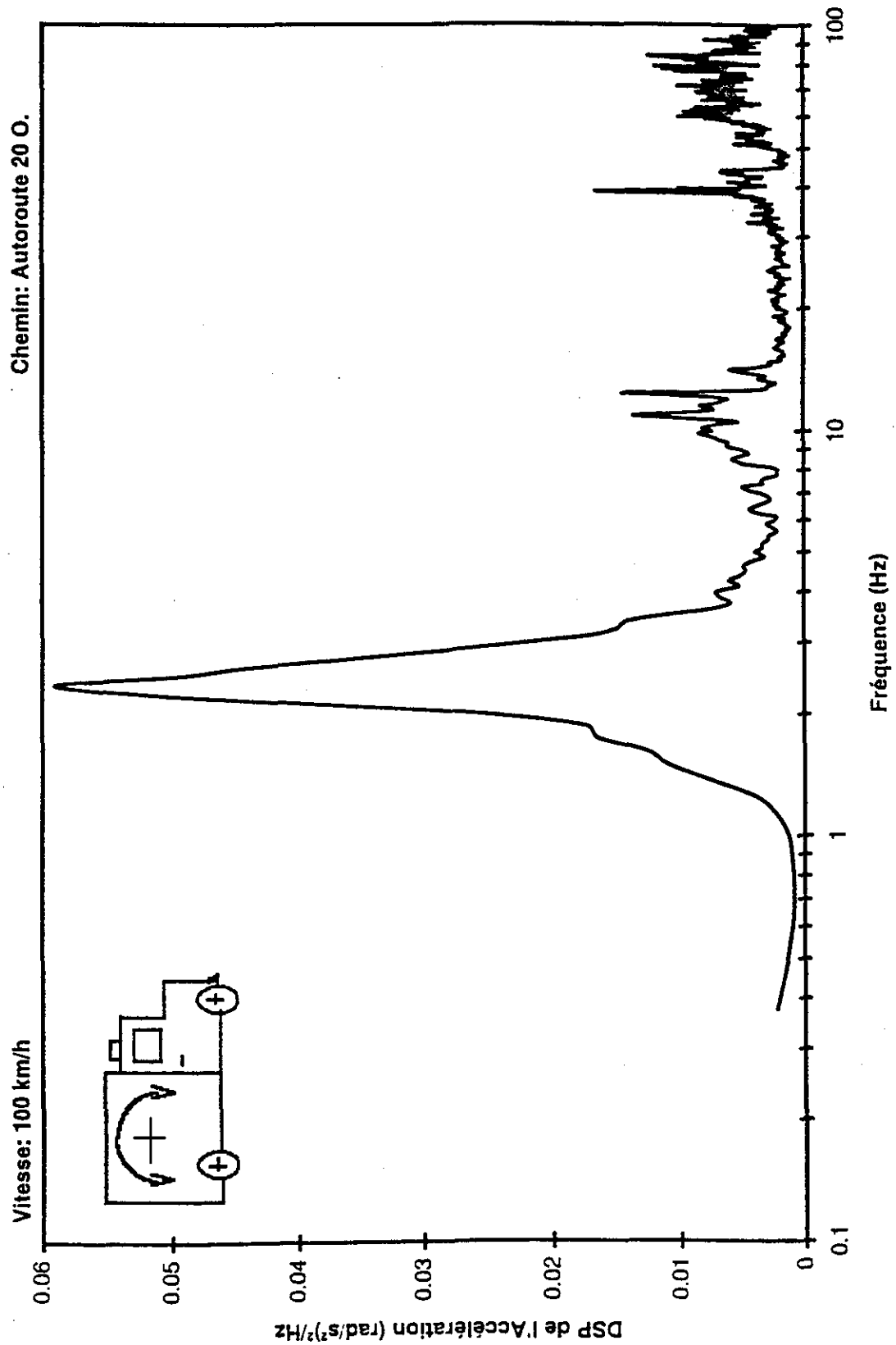
DSP DE L'ACCÉLÉRATION ROULIS



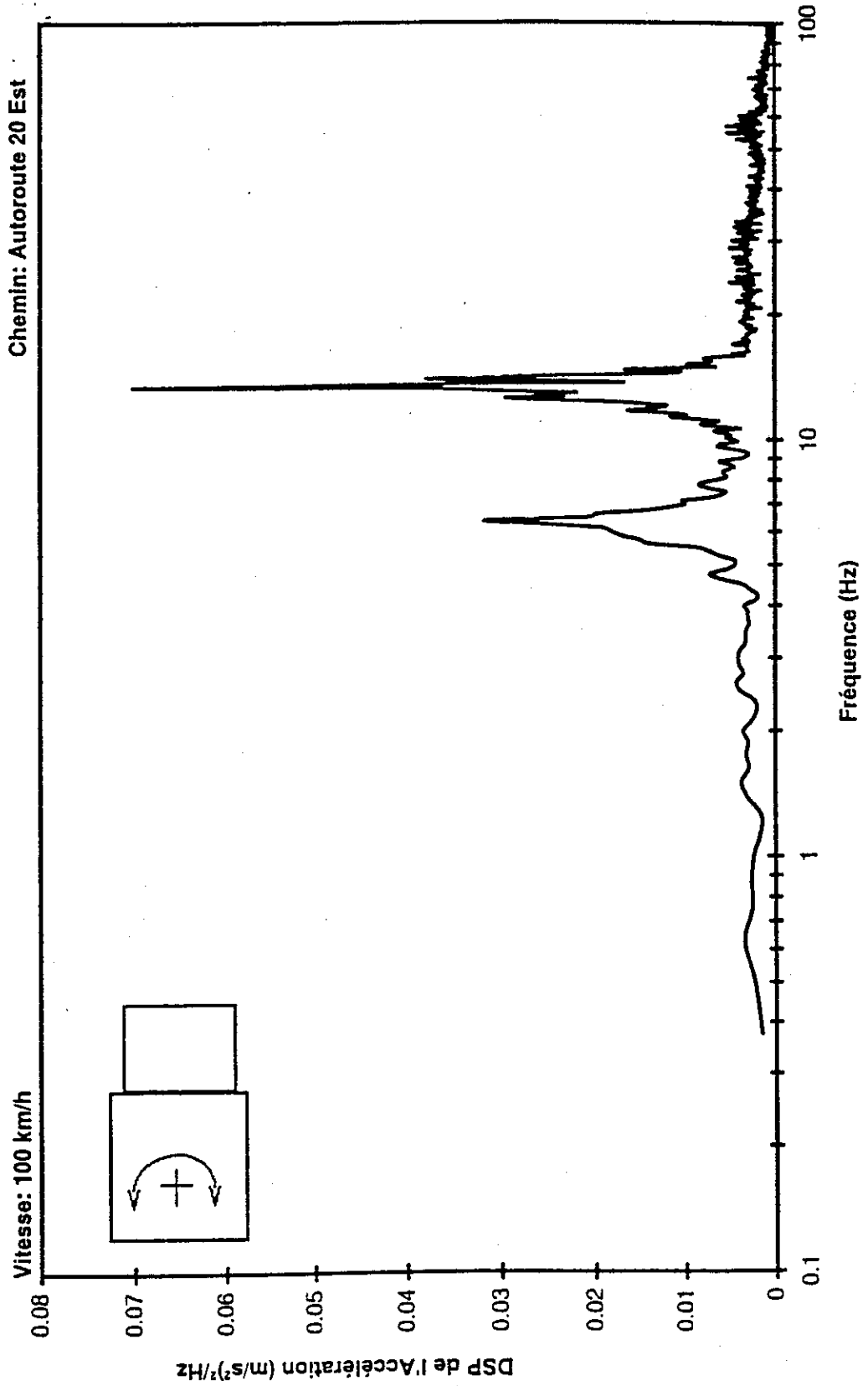
DSP DE L'ACCÉLÉRATION TANGAGE



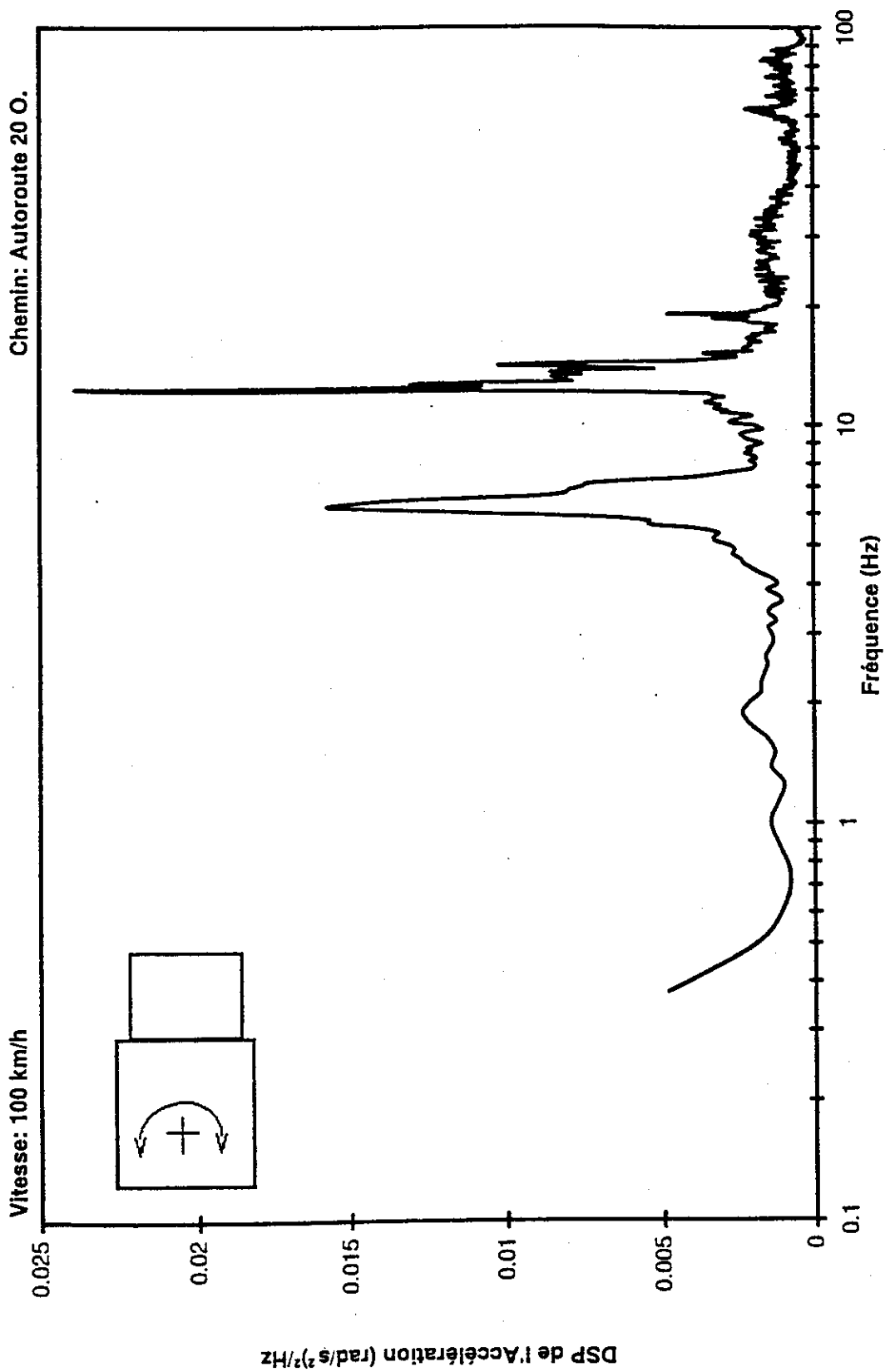
DSP DE L'ACCÉLÉRATION TANGAGE



DSP DE L'ACCÉLÉRATION PAR DU MOUVEMENT DELACET



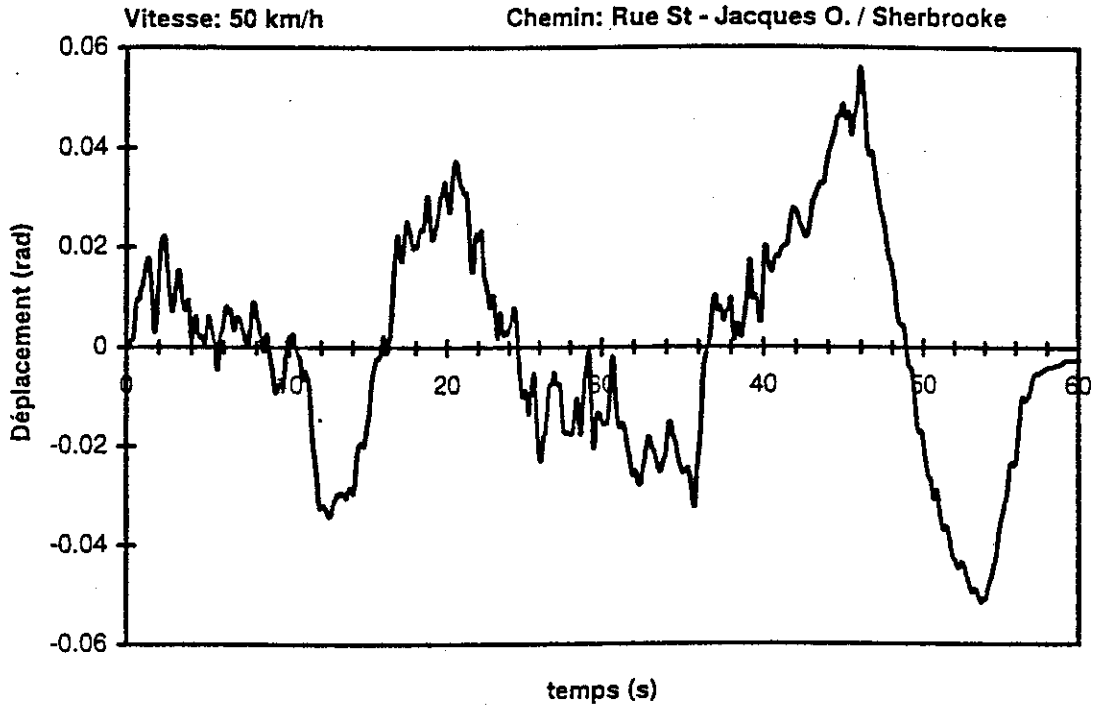
DSP DE L'ACCÉLÉRATION PAR DU MOUVEMENT DELACET



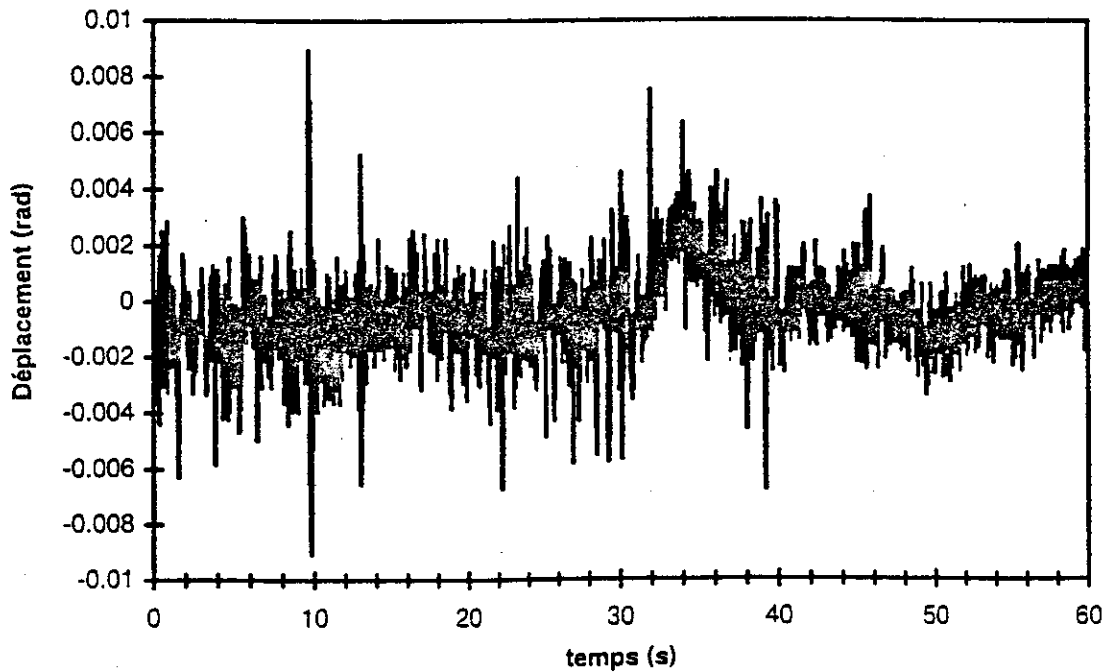
ANNEXE B

SPECTRES TEMPORELS DES DÉPLACEMENTS ANGULAIRES DE ROULIS DU CHÂSSIS SOUS CHACUNE DES CONDITIONS DE CONDUITE

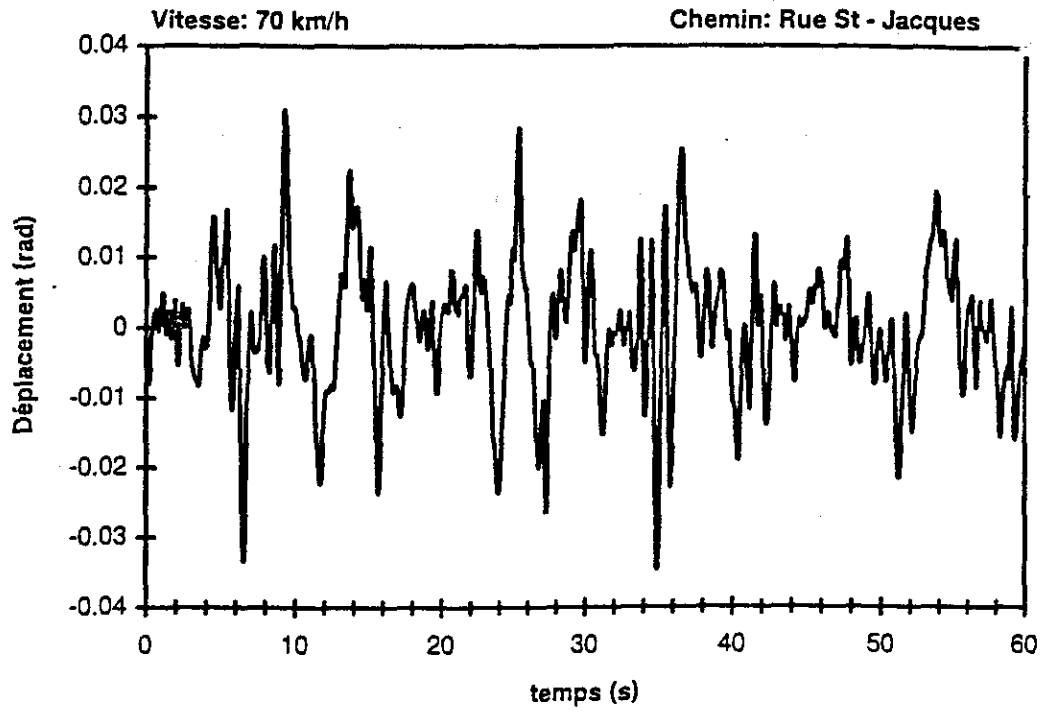
ROULIS DU CHASSIS



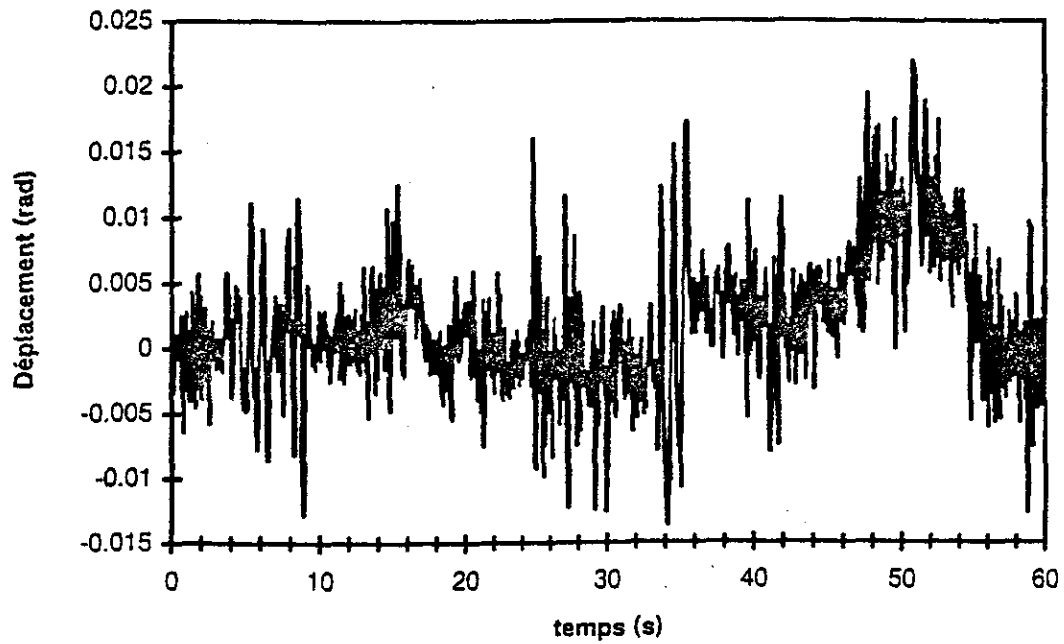
ROULIS DU CHASSIS RELATIF À L'ESSIEU



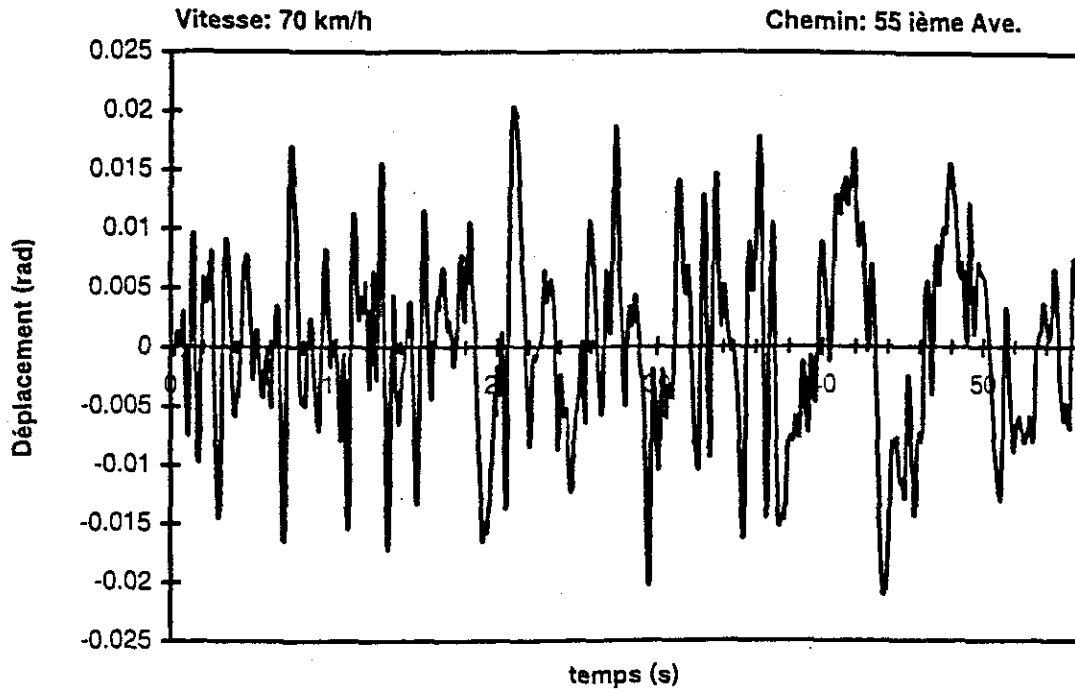
ROULIS DU CHASSIS



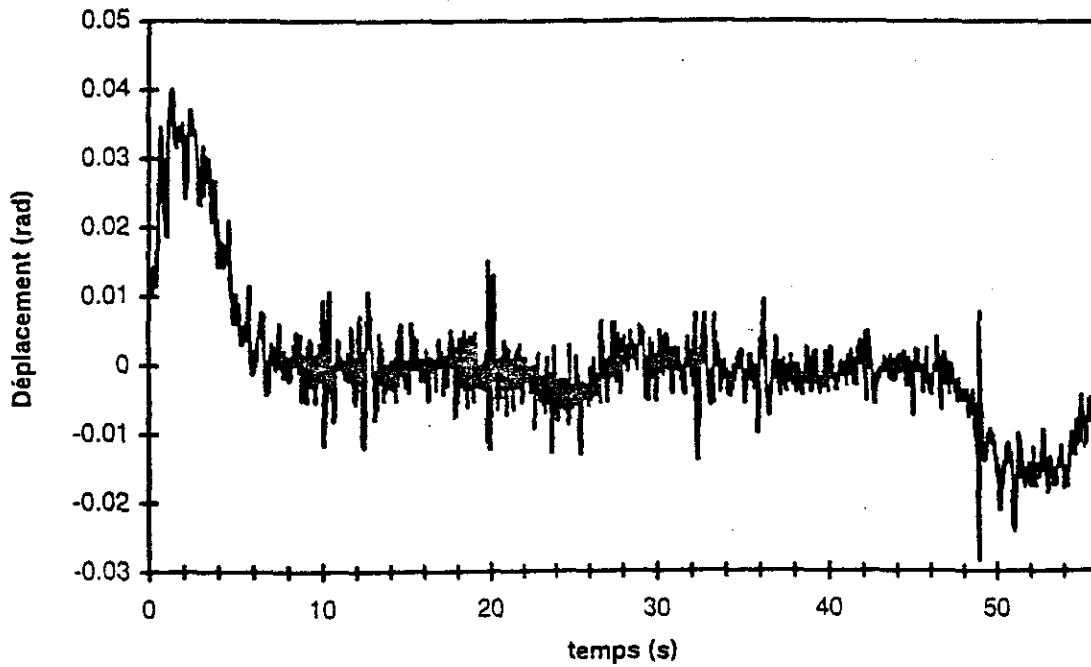
ROULIS DU CHASSIS RELATIF À L'ESSIEU



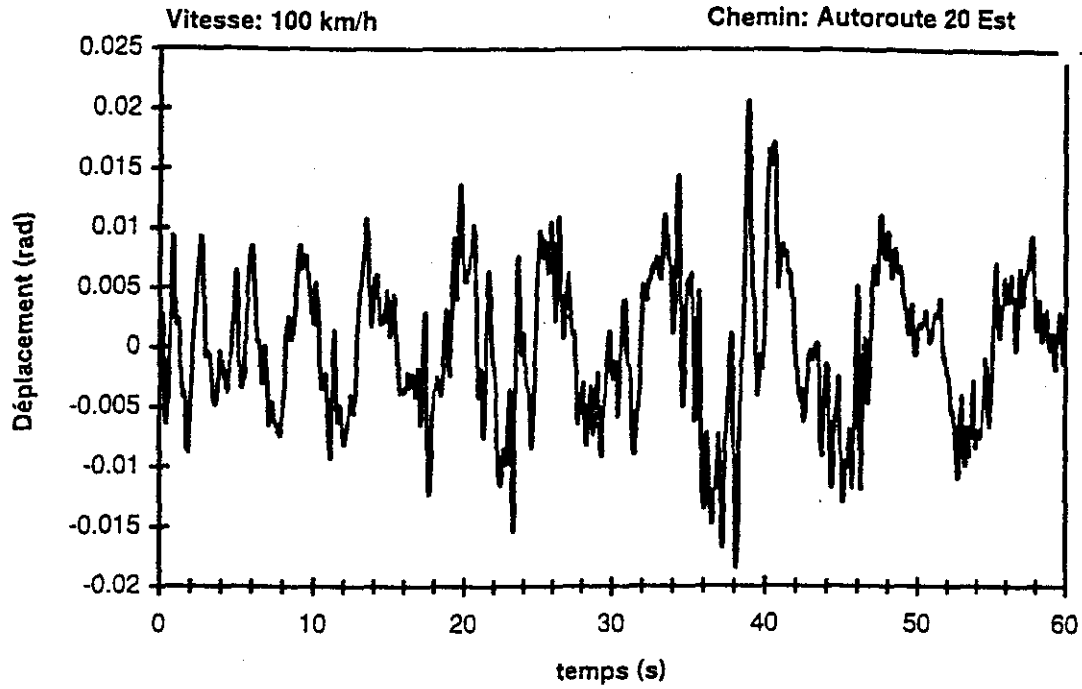
ROULIS DU CHASSIS



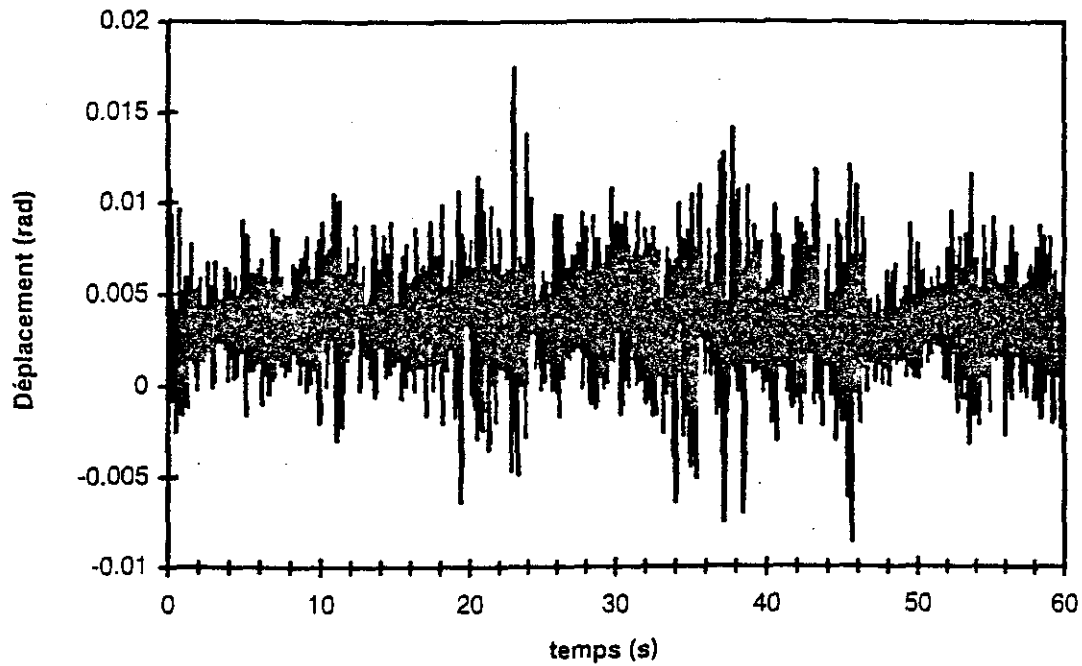
ROULIS DU CHASSIS RELATIF À L'ESSIEU



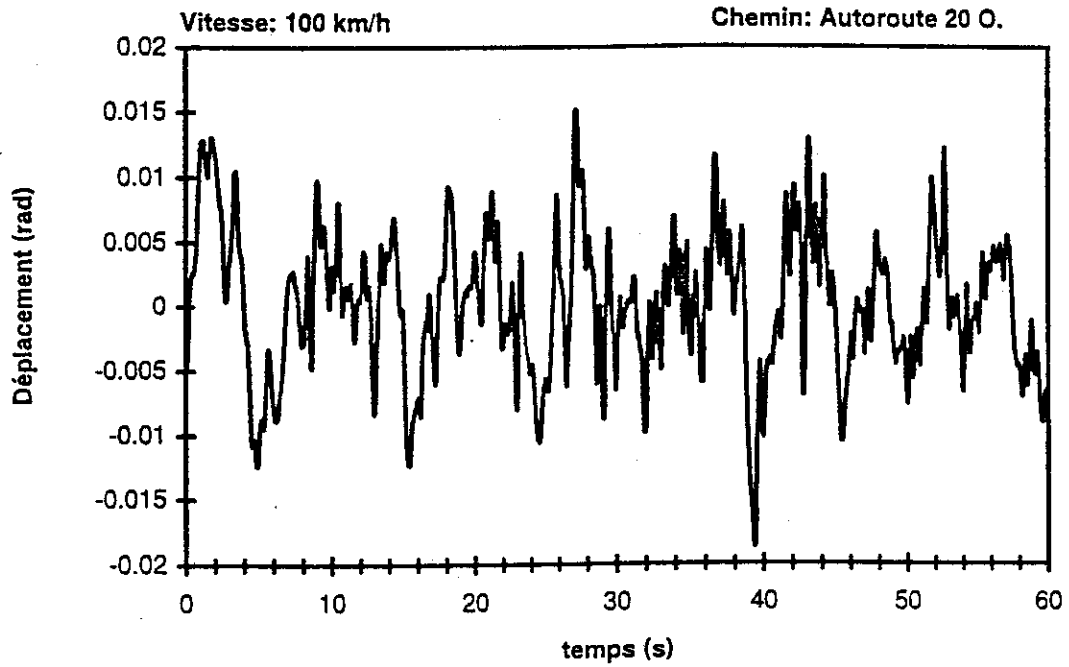
ROULIS DU CHASSIS



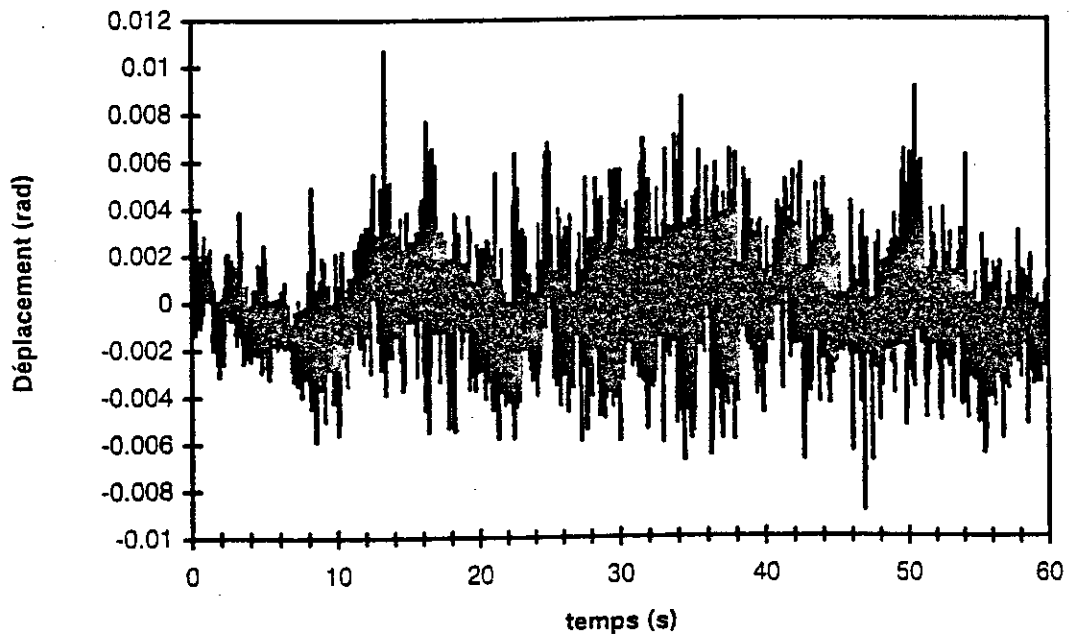
ROULIS DU CHASSIS RELATIF À L'ESSIEU



ROULIS DU CHASSIS



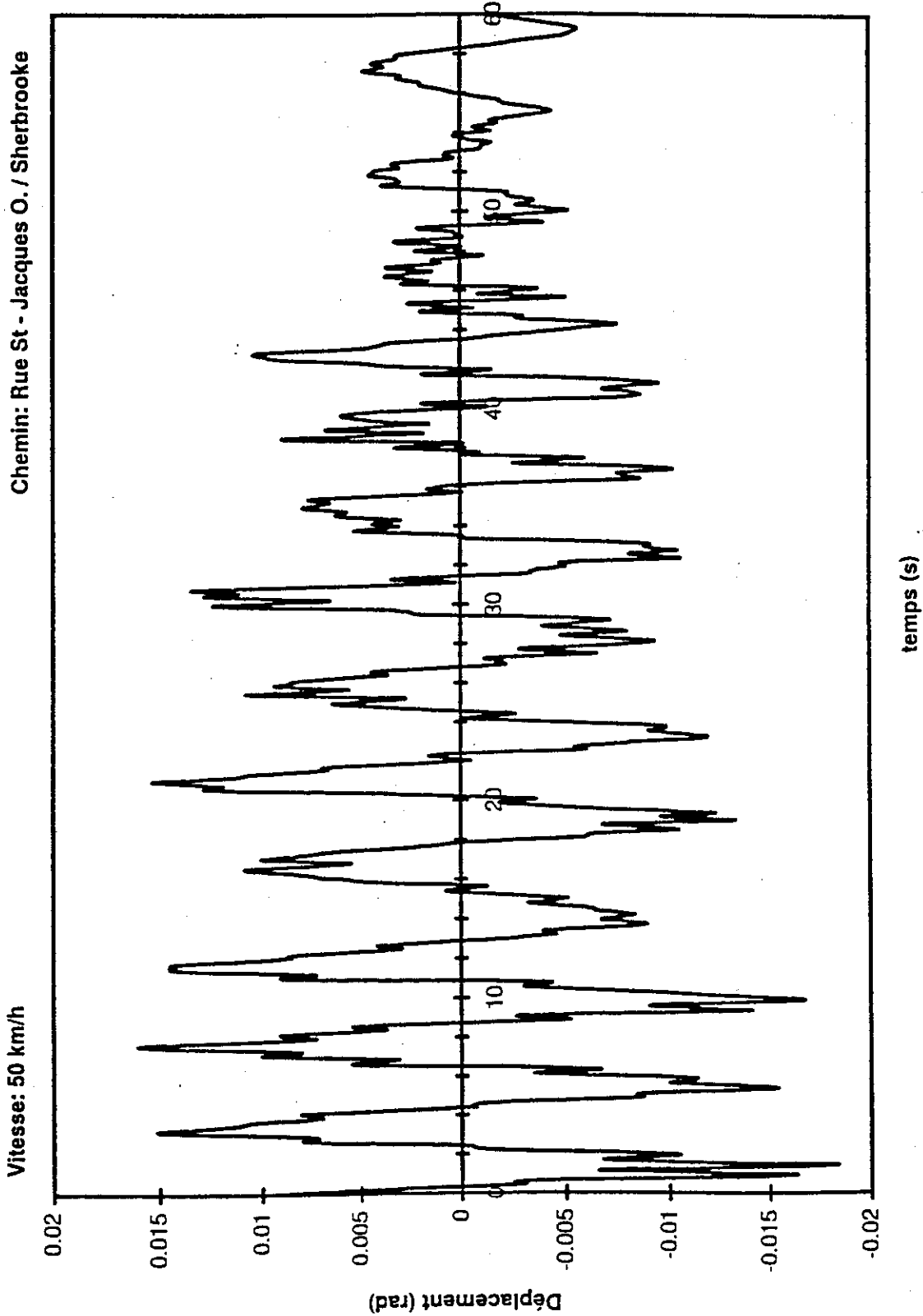
ROULIS DU CHASSIS RELATIF À L'ESSIEU



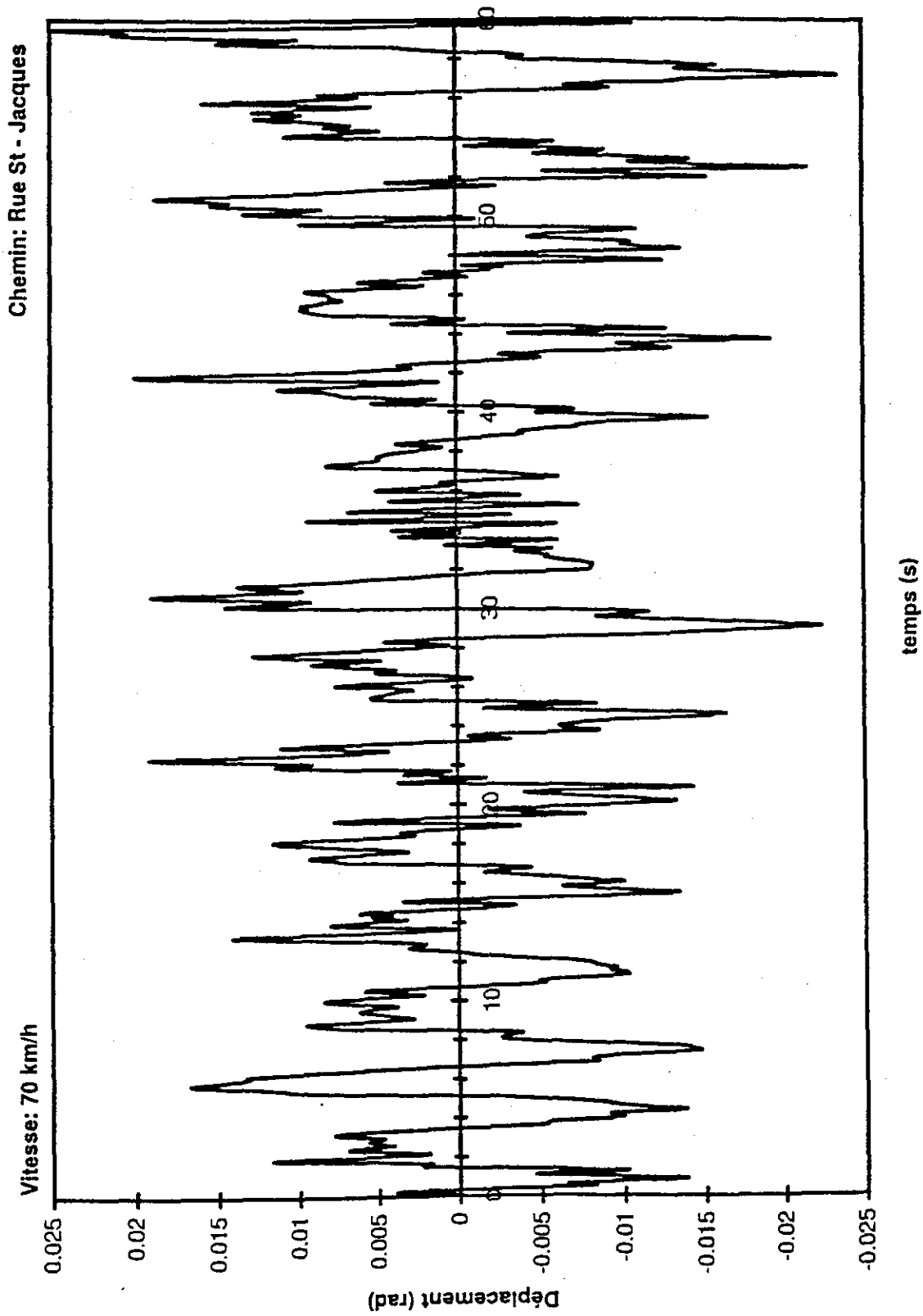
ANNEXE C

**SPECTRES TEMPORELS DES DÉPLACEMENTS ANGULAIRES DE TANGAGE DU
CHÂSSIS SOUS CHACUNE DES CONDITIONS DE CONDUITE**

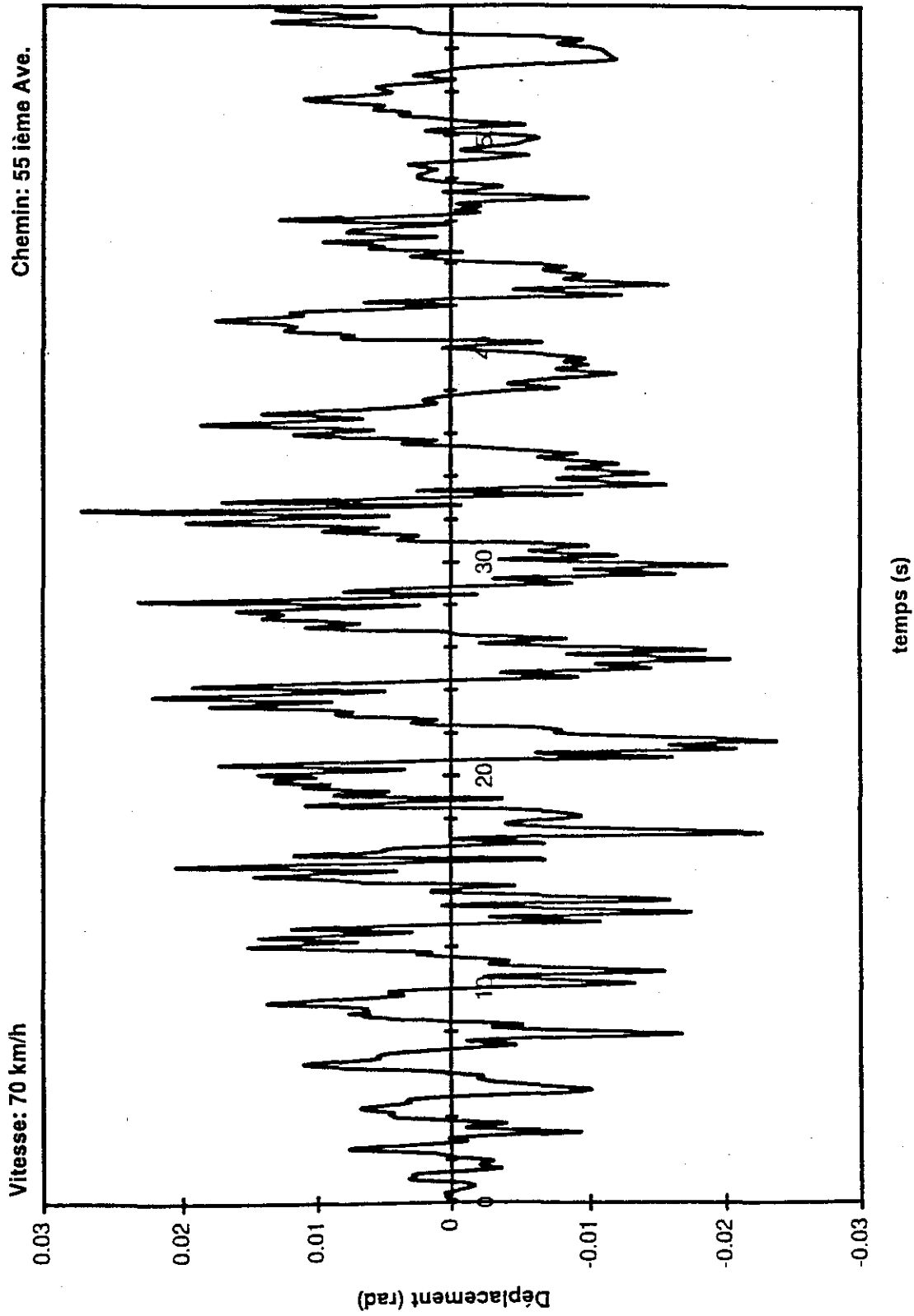
TANGAGE AU CHASSIS



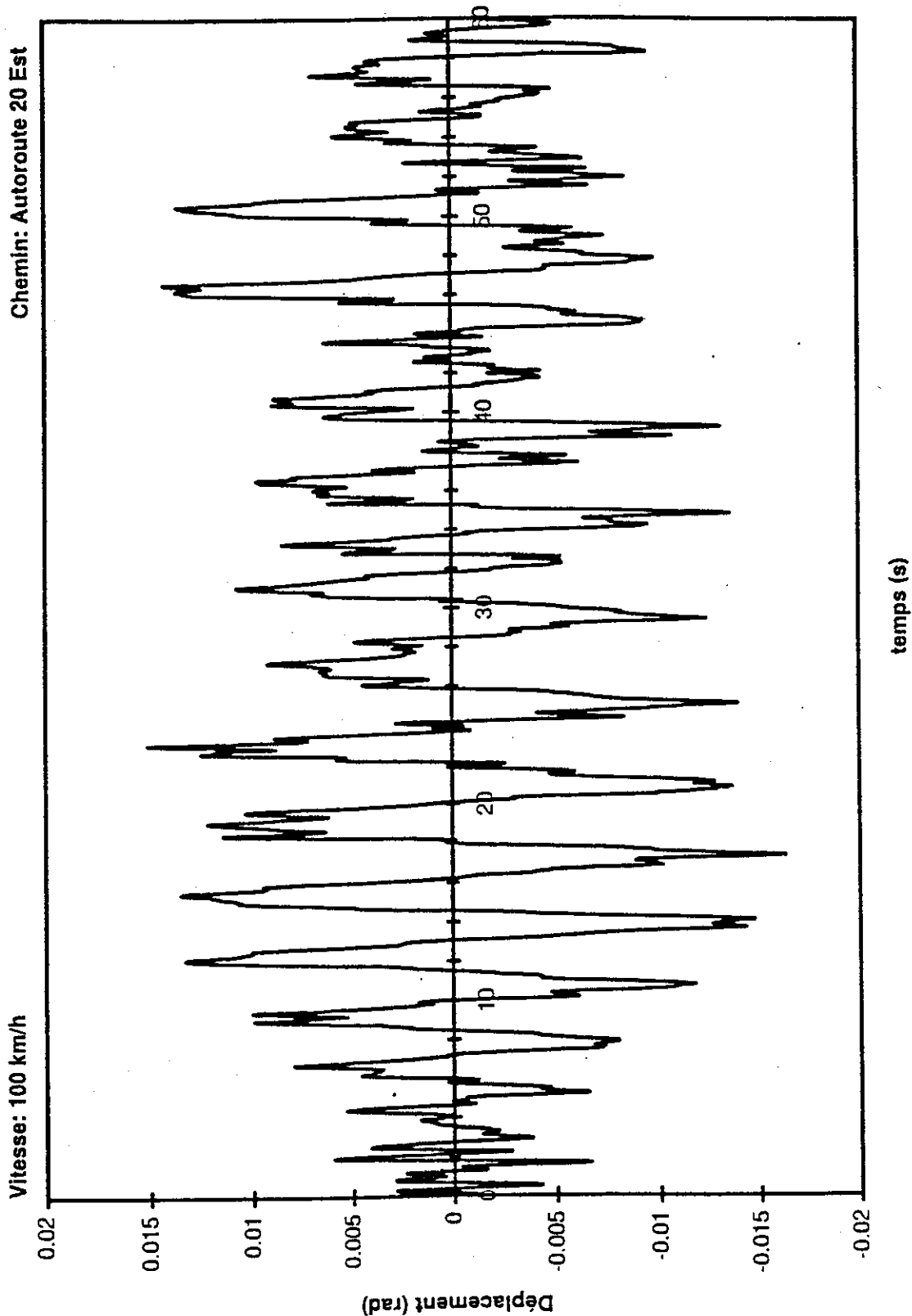
TANGAGE AU CHASSIS



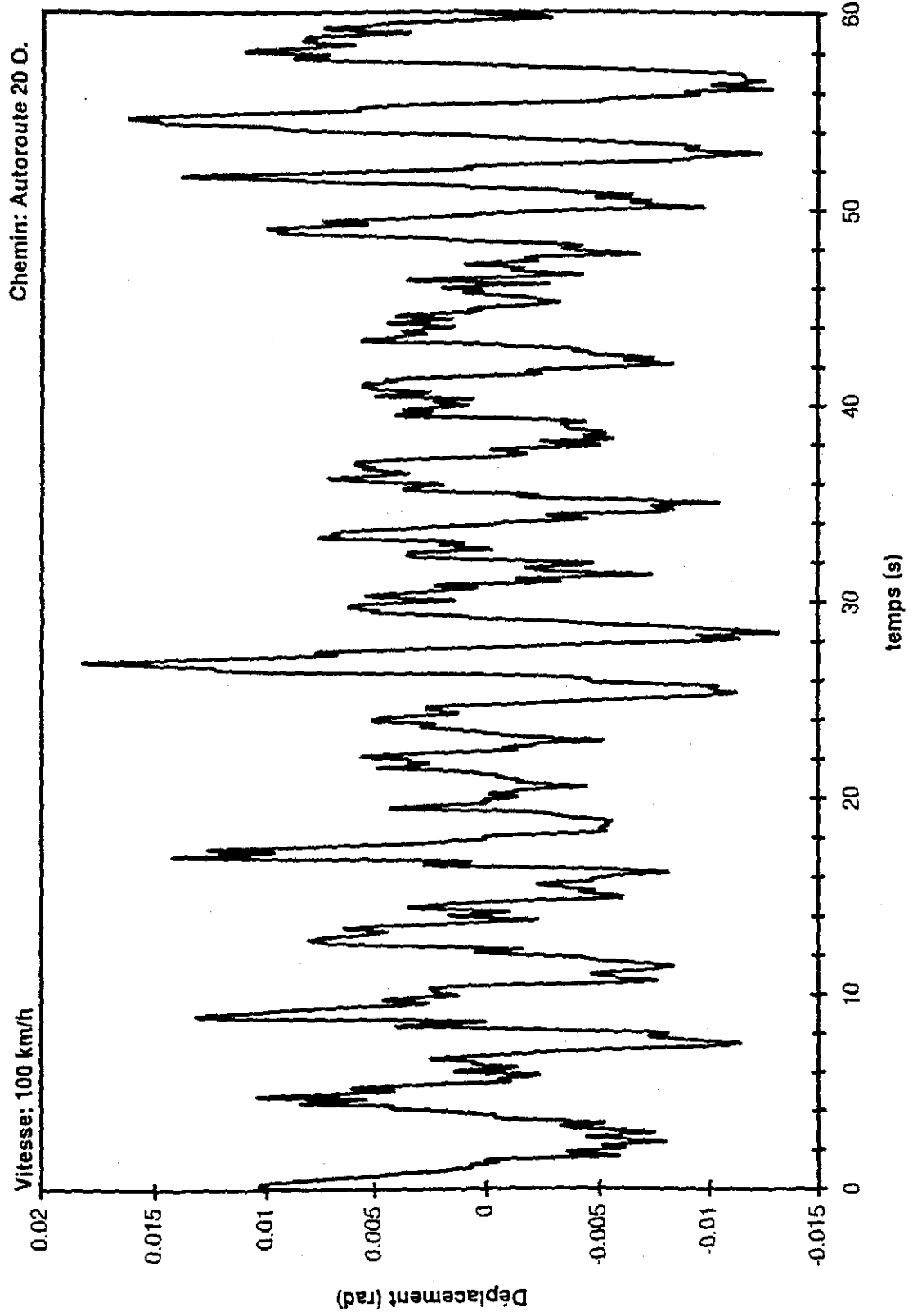
TANGAGE AU CHASSIS



TANGAGE AU CHASSIS



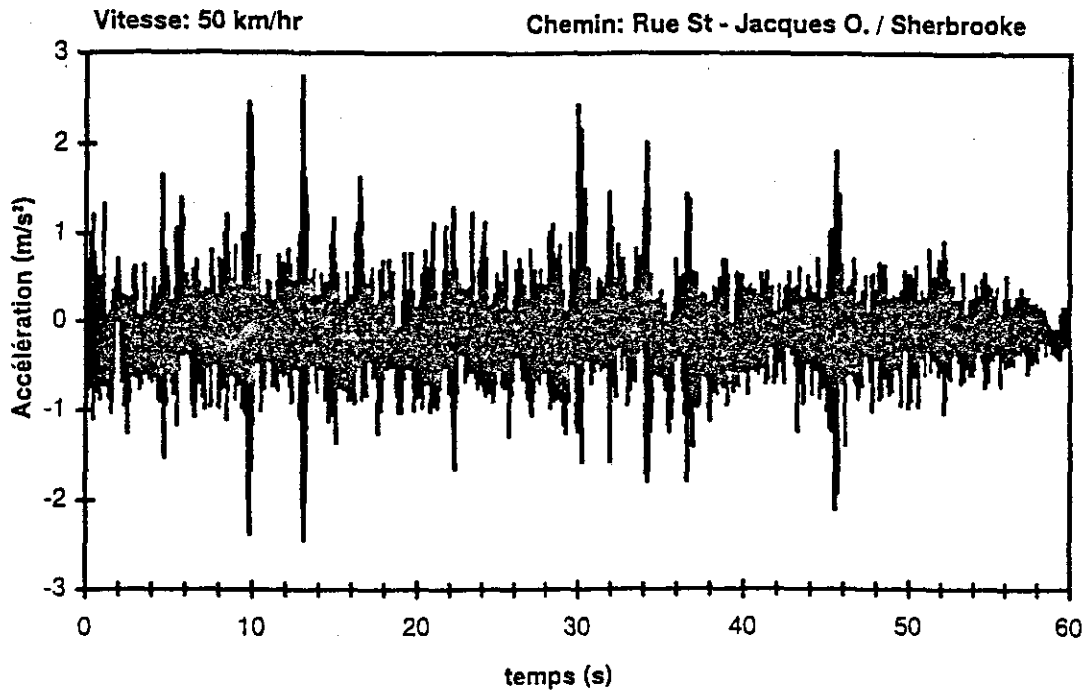
TANGAGE AU CHASSIS



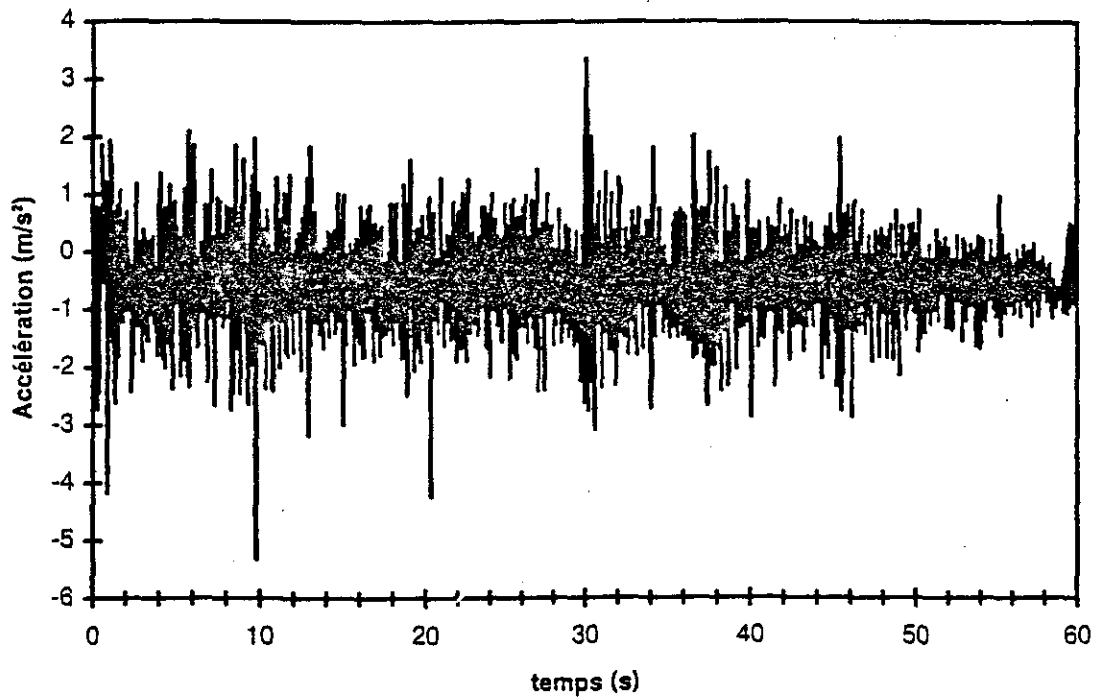
ANNEXE D

**SPECTRES TEMPORELS DES ACCÉLÉRATIONS LATÉRALES ET VERTICALES DU
CHÂSSIS SOUS CHACUNE DES CONDITIONS DE CONDUITE**

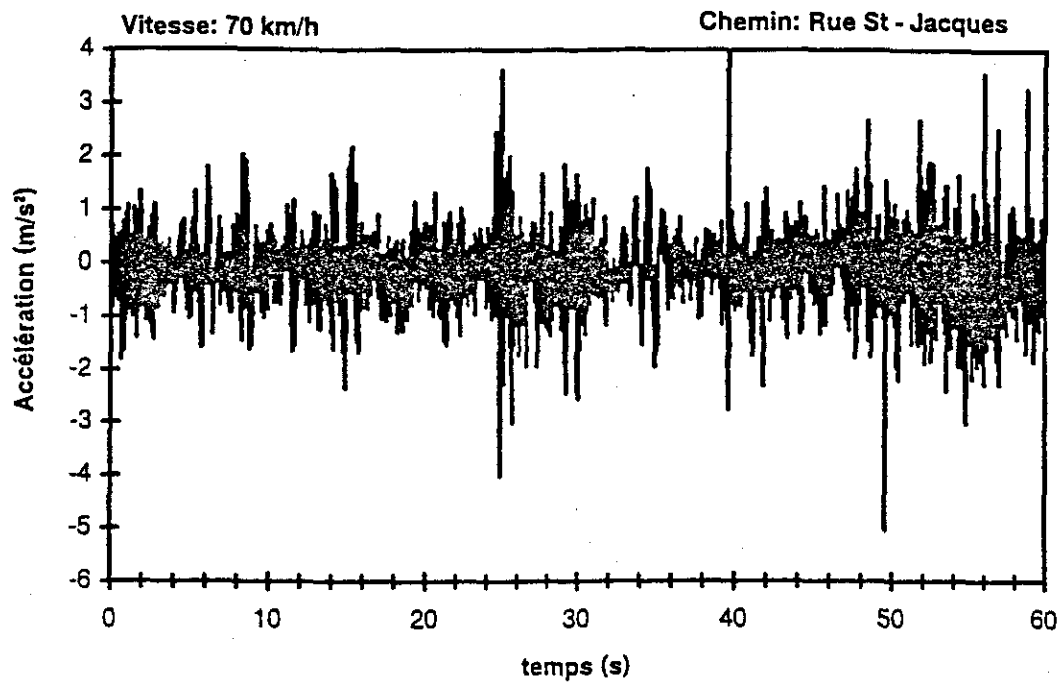
ACCÉLÉRATION LATÉRALE DU CHASSIS



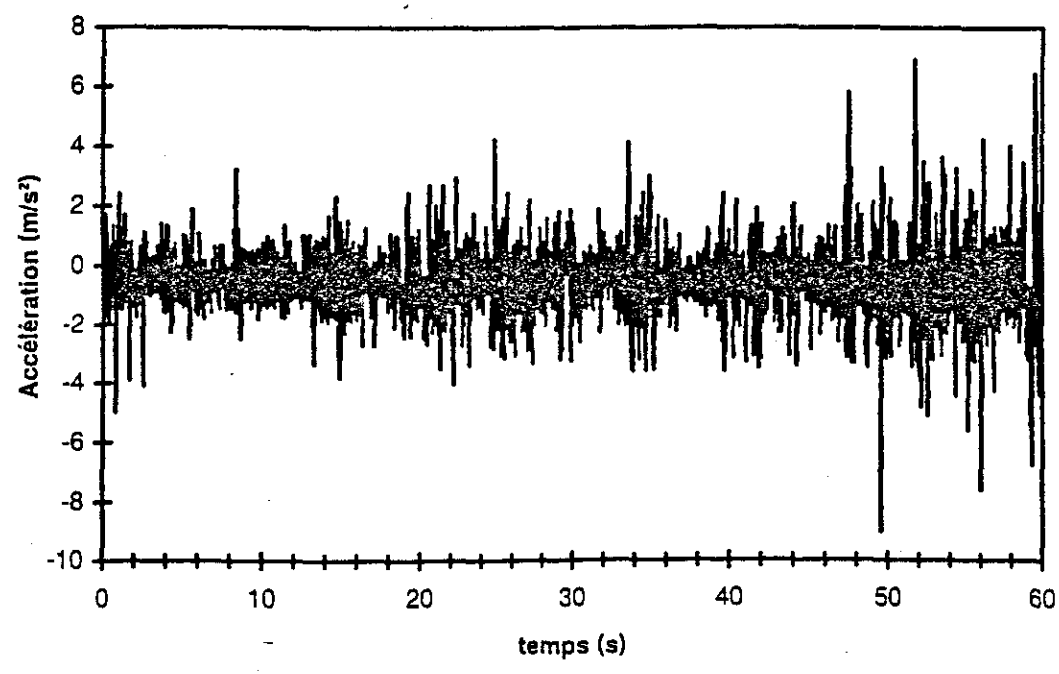
ACCÉLÉRATION VERTICALE DU CHASSIS



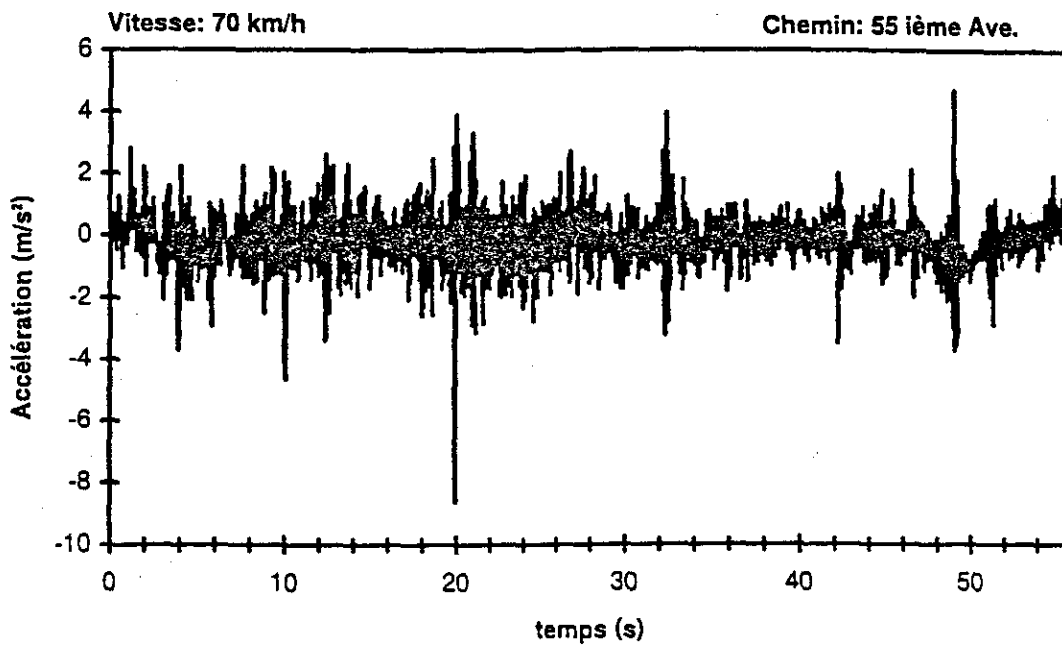
ACCÉLÉRATION LATÉRALE DU CHASSIS



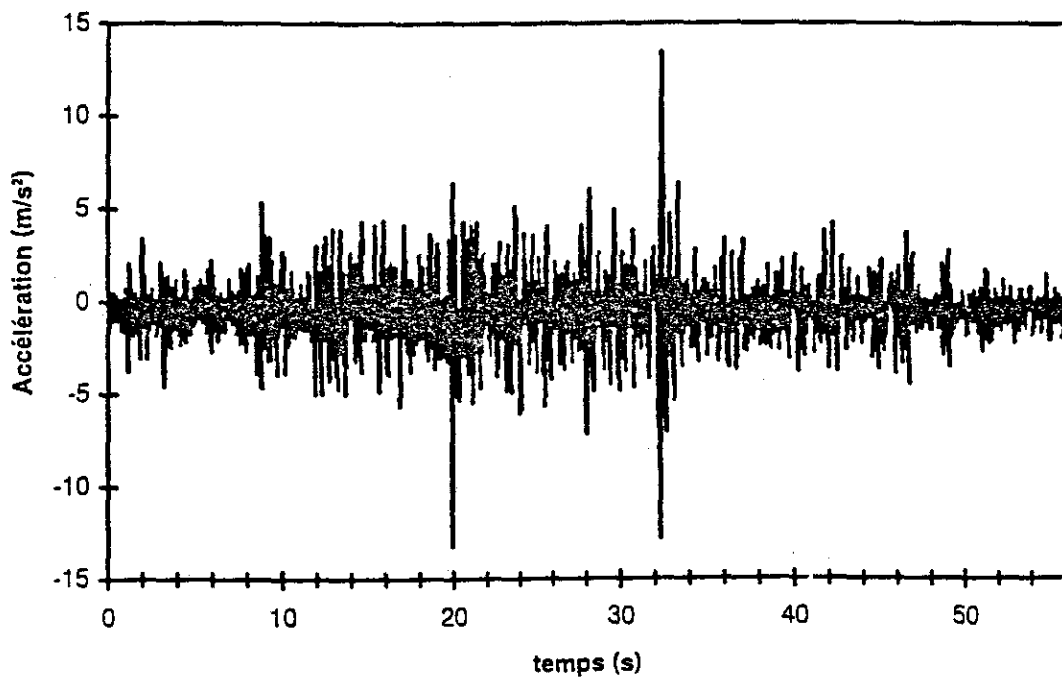
ACCÉLÉRATION VERTICALE DU CHASSIS



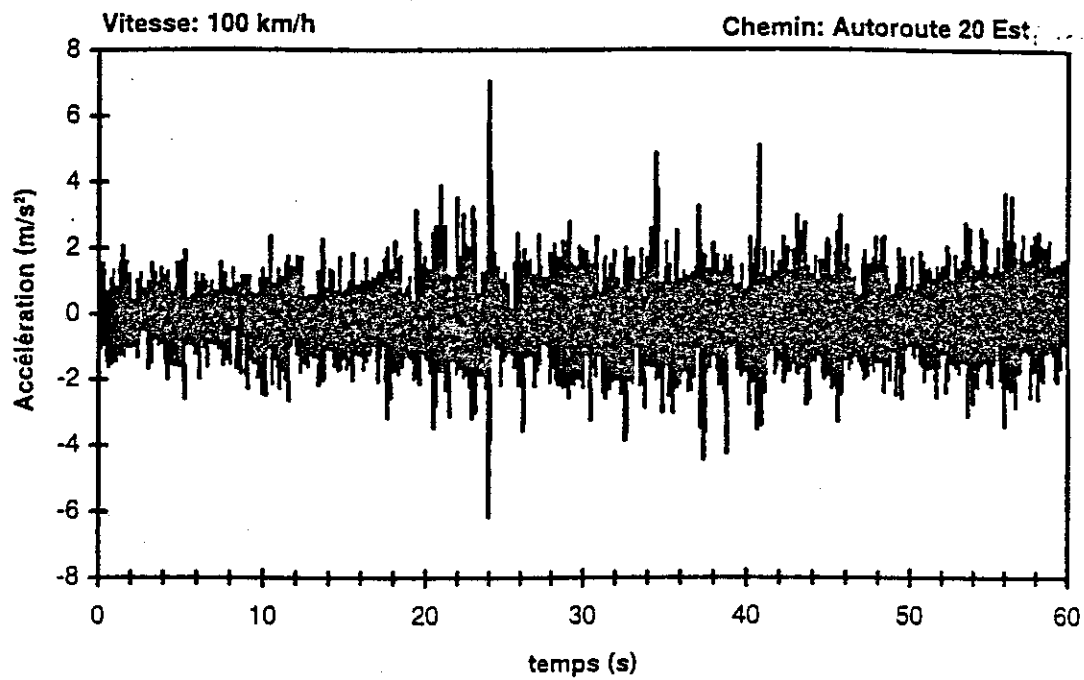
ACCÉLÉRATION LATÉRALE DU CHASSIS



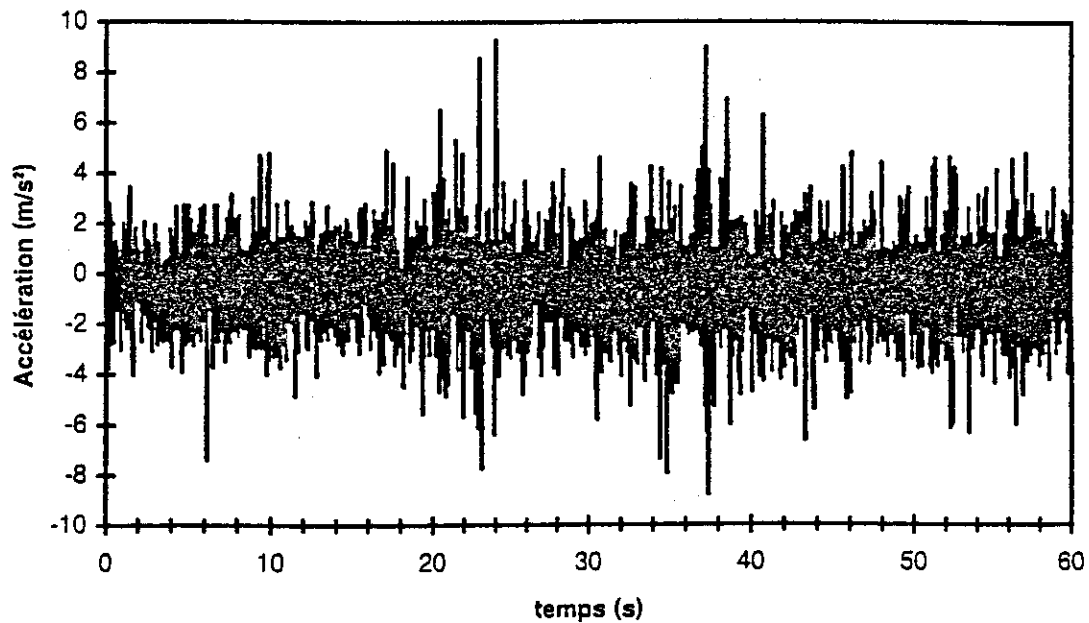
ACCÉLÉRATION VERTICALE DU CHASSIS



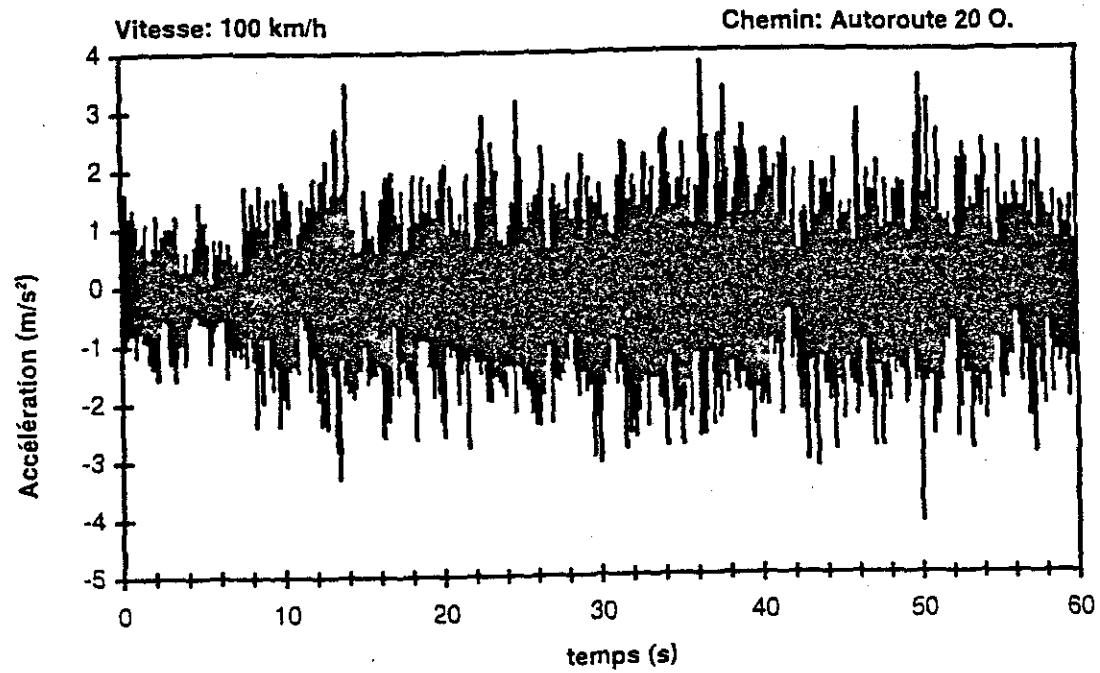
ACCÉLÉRATION LATÉRALE DU CHASSIS



ACCÉLÉRATION VERTICALE DU CHASSIS



ACCÉLÉRATION LATÉRALE DU CHASSIS



ACCÉLÉRATION VERTICALE DU CHASSIS

