

ANALYSE DES VIBRATIONS GLOBALES DU CORPS LORS DES TRAVAUX DE PRÉPARATION DE TERRAIN

J.-M. Golsse, ing., M.FE

Octobre 1989



Rapport Technique

RT-90

ANALYSE DES VIBRATIONS GLOBALES DU CORPS LORS DES TRAVAUX DE PRÉPARATION DE TERRAIN

J.-M. Golsse, ing., M.FE

Rapport Technique N° RT-90

Octobre 1989

MOTS-CLÉS: *Vibration globale du corps, Analyse des vibrations, Préparation de terrain, Équipement de scarifiage, Véhicules moteurs, Véhicules à roues, Véhicules à chenilles.*

Traduit par Thérèse Sicard, ing.f.

This Technical Report is available in English.

Avant-propos

La présente étude évalue dans diverses conditions de fonctionnement, les niveaux de vibration auxquels sont exposés les opérateurs de machines combinant véhicule moteur et accessoire de préparation de terrain. Elle montre également comment les caractéristiques des machines et les paramètres opérationnels peuvent influencer ces niveaux.

Il est à noter que les résultats présentés ici se rapportent aux machines et aux conditions étudiées. Malgré une tentative en vue de généraliser ces résultats, une certaine prudence s'impose dans leur application.

Pour plus de clarté et de brièveté, les résultats qui ne présentaient qu'un intérêt limité ont été omis du rapport. De plus amples détails relatif à l'étude peuvent être obtenus en communiquant directement avec FERIC.

L'auteur aimerait exprimer ses remerciements, pour leur collaboration empressée, au personnel et aux entrepreneurs associés aux entreprises suivantes:

Produits Forestiers Canadien Pacifique, Division de Thunder Bay (autrefois Great Lakes Forest Products)
Stone-Consolidated Inc.
Déboisement Pelletier
Groupement Forestier de l'est du Lac Témiscouata
Produits Forestiers E.B. Eddy Ltée
Industries James MacLaren Inc.

L'auteur

Jean-Marie Golsse reçut en 1983 un B.Sc. (génie forestier) et en 1985 une Maîtrise en génie forestier (M.FE) de l'Université du Nouveau-Brunswick. Il s'est joint à la Division de l'Est de FERIC en 1986; il est membre du secteur Ingénierie et en charge du programme d'études ergonomiques.

L'auteur désire souligner tout particulièrement la contribution de Patricia Hope qui, autrefois membre du personnel de la Division de l'Est de FERIC, a été à l'origine de cette étude et a recueilli la plus grande partie des données sur le terrain.

Table des matières

	Page
AVANT-PROPOS	i
L'AUTEUR	i
TABLE DES MATIÈRES	ii
LISTE DES FIGURES	ii
LISTE DES TABLEAUX	ii
SOMMAIRE	iii
INTRODUCTION	1
MÉTHODOLOGIE	2
CONDITIONS DE L'ÉTUDE	2
Échantillon de machines	2
Conditions environnementales et opérationnelles	4
Opérateurs	5
RÉSULTATS ET DISCUSSION	5
Chronométrages	5
Vitesses de déplacement	5
Valeurs d'accélération pondérées	5
Facteurs de crête	6
Limite à la capacité réduite par fatigue	6
Analyse en composantes principales:	
machines et conditions opérationnelles	7
Modèle non linéaire	8
CONCLUSIONS	10
BIBLIOGRAPHIE	10
ANNEXE A - Valeurs efficaces et valeurs maximales d'accélération pondérées; tous les axes; gamme de fréquence de 1 à 80 Hz	11
ANNEXE B - Relations hyperboliques: valeurs efficaces d'accélération en fonction des rapports masse/vitesse ...	12

Liste des figures

	Page
Figure 1. Direction du système de coordonnées pour l'évaluation des vibrations mécaniques qui influencent le corps humain.	2
Figure 2. Cabine dans laquelle on a installé les appareils de mesure.	2
Figure 3. Groupe 1 - véhicule moteur à chenilles(machine 4).	3
Figure 4. Groupe 2 - véhicule moteur à roues avec accessoire monté à l'avant (machine 5).	4
Figure 5. Groupe 3 - véhicules moteurs à roues avec accessoi- res montés à l'arrière (machines 10 et 12).	4
Figure 6. Valeurs efficaces d'accélération du siège, suivant chacun des axes.	6
Figure 7. Valeurs maximales d'accélération du siège, suivant chacun des axes.	6
Figure 8. Relation hyperbolique pour les machines à roues, valeurs efficaces d'accélération a_x en fonction des rapports masse/vitesse, CI = 90%.	8
Figure 9. Relation hyperbolique pour les machines à chenilles, valeurs efficaces d'accélération a_z en fonction des rapports masse/vitesse, CI = 95%.	9

Liste des tableaux

Tableau 1. Caractéristiques des machines	3
Tableau 2. Conditions environnementales et opérationnelles ..	4
Tableau 3. Expérience et caractéristiques physiques des opérateurs	5
Tableau 4. Facteurs de crête	6
Tableau 5. Temps d'exposition admissibles avant d'atteindre la limite à la capacité réduite par fatigue	7
Tableau 6. Valeurs efficaces moyennes d'accélération au plancher (a_{ZF})	7

Sommaire

Des recherches récentes indiquent que les machines forestières hors route qui se déplacent à haute vitesse, particulièrement les débardeurs, engendrent habituellement des niveaux élevés de vibration globale du corps. Ces études montrent que les opérateurs de débardeurs sont exposés à des niveaux de vibration globale qui peuvent dépasser les normes admises par l'Organisation internationale de normalisation (ISO). On connaît cependant peu de choses relativement aux niveaux générés par les activités de préparation de terrain, en dépit du fait que les mêmes machines servent de véhicules moteurs.

Étant donné que les travaux de préparation de terrain imposent un déplacement continu sur la totalité de la superficie à traiter, on croit que l'exposition journalière aux vibrations globales du corps, pour des opérateurs d'équipement de préparation de terrain, peut être supérieure aux niveaux auxquels sont exposés les opérateurs de machines de récolte. FERIC a donc jugé à-propos d'effectuer une étude spécifique dans le but de mieux comprendre et de quantifier les niveaux de vibration globale générés lors de travaux de préparation de terrain. Ces vibrations furent mesurées sur un échantillon de véhicules moteurs afin de déterminer les niveaux journaliers d'exposition auxquels étaient soumis les opérateurs. L'échantillonnage des machines fut séparé en trois groupes distincts: les véhicules moteurs à chenilles; les véhicules moteurs à roues qui poussent des accessoires; et les véhicules moteurs à roues qui tirent des accessoires. L'influence des caractéristiques des machines, des vitesses de déplacement, et des conditions de terrain sur les niveaux de vibration globale du corps fut quantifiée à l'aide de la méthode d'analyse en composantes principales et d'un modèle hyperbolique non linéaire.

Tous les niveaux d'accélération enregistrés étaient régulièrement plus élevés que les limites acceptables, telles que définies par la norme 2631-1978 de l'ISO. Le

temps d'exposition journalière admissible, évalué en fonction de "la limite à la capacité réduite par fatigue", était inférieur ou égal à 2,5 heures dans 100% des cas, compte tenu d'une journée normale de travail de 8 heures. En général, les véhicules moteurs à roues tirant des accessoires semblaient avoir des effets moins prononcés que l'un ou l'autre des deux autres groupes de machines.

Dans tous les cas, l'analyse en composantes principales montrait que les accessoires montés à l'avant produisaient des niveaux d'accélération plus élevés que les accessoires montés à l'arrière, et que les véhicules moteurs à chenilles généraient des niveaux plus élevés que les véhicules à roues. Dans cet échantillon, la rugosité du terrain constituait un facteur moins critique que la position de l'outil et le type de train de roulement des machines.

Le modèle non linéaire a révélé qu'il existait une forte corrélation entre les rapports masse/vitesse des machines et les valeurs efficaces d'accélération (valeurs moyennes quadratiques) dans les directions avant-arrière (axe des x) et verticale (axe des z). Suivant ces axes, les valeurs efficaces d'accélération diminuent à mesure que les rapports masse/vitesse augmentent. Cependant, au-dessus d'un rapport masse-vitesse spécifique, l'augmentation de la masse ou la réduction de la vitesse ne produit plus qu'une faible baisse d'accélération, à cause de la nature asymptotique du modèle hyperbolique. Aucune corrélation n'a été trouvée dans la direction latérale (axe des y).

Le rapport montre que même si les niveaux de vibration globale du corps sont plus sévères dans les travaux de préparation de terrain que dans les opérations de récolte, il devrait être possible de les réduire, grâce à une sélection judicieuse des machines qui assure entre autres la compatibilité entre le véhicule moteur et l'accessoire, ainsi qu'en travaillant à une vitesse de déplacement optimale.

Introduction

On sait que des conditions de travail défavorables peuvent engendrer chez le travailleur l'insatisfaction, la fatigue et d'éventuels problèmes de santé. Elles sont souvent à l'origine de taux élevés de rotation de la main-d'oeuvre ainsi que de faibles niveaux de productivité, et cela au détriment des employés aussi bien que de l'employeur.

Le corps humain est continuellement soumis à une multitude de facteurs potentiellement négatifs, comme les conditions atmosphériques, le bruit, et les niveaux de vibration. Certains de ces facteurs peuvent causer des dommages instantanés, parfois permanents (par exemple, la détonation d'un fusil tout près de l'oreille). D'autres sont plus subtils et entraînent des dommages physiologiques à long terme, à cause des effets combinés du temps d'exposition et de l'intensité. C'est généralement le cas des signaux vibratoires générés dans les véhicules lourds industriels, comme les bouteurs, les tracteurs, les chargeuses, et les camions qui ont à se déplacer sur des surfaces irrégulières.

Avec les machines hors route, les vibrations générées par le véhicule en mouvement affectent le corps humain tout entier; c'est pourquoi elles sont connues sous le nom de vibrations globales du corps. Ce terme est réservé aux vibrations qui se produisent dans la zone inférieure du spectre de fréquence (1 à 80 Hz), parce que le corps humain dans son ensemble est plus sensible aux vibrations produites dans cette gamme. Le temps d'exposition de l'opérateur à ces signaux vibratoires constitue aussi un élément important. Plus une personne est exposée longtemps à un niveau élevé de vibrations, plus elle est susceptible de ressentir des effets nocifs. C'est pourquoi l'Organisation internationale de normalisation (ISO) définit et limite les niveaux de vibration globale du corps en fonction de la fréquence et de la durée d'exposition, ainsi que de la direction des vibrations (ISO 2631-1978).

Dans l'industrie forestière, les vibrations globales du corps font l'objet de préoccupations particulières, puisque les techniques modernes de récolte et de sylviculture font appel à des machines non dotées de suspension et se déplaçant rapidement en terrain accidenté, condition qui génère des niveaux élevés de vibration dans la zone inférieure du spectre de fréquence.

Plusieurs études ont été effectuées dans le but de mesurer les niveaux de vibration globale du corps, sur la plupart des types de machines lourdes industrielles; quelques-unes portaient sur les machines utilisées dans les exploitations forestières (Hope, 1985; Rummer, 1986; Wilson et al., 1986; Golsse et Hope, 1987). Cependant, la plus grande partie de ces travaux traite de machines servant à la récolte des bois, en particulier les débardeurs, et on ne possède encore que peu d'information sur les niveaux de vibration globale du corps

générés dans les activités de préparation de terrain. Les études déjà réalisées montrent que les opérateurs de débardeurs sont régulièrement exposés à des niveaux excessifs de vibration globale du corps. Elles révèlent également que les opérateurs de débardeurs à pince sont soumis à des doses plus élevées que les opérateurs de débardeurs à câble, puisque ces machines passent proportionnellement plus de temps en déplacement.

On rencontre dans les activités de préparation de terrain les mêmes débardeurs et les mêmes conditions de terrain. Cependant, deux facteurs propres à ces dernières activités risquent d'engendrer pour les opérateurs des doses d'exposition aux vibrations encore plus sévères. En effet:

- a) la machine doit parcourir 100% de la superficie à traiter; ainsi l'opérateur ne peut choisir le trajet le plus facile;
- b) de plus, dans les activités de préparation de terrain, le cycle de travail implique un déplacement continu. L'opérateur ne peut donc se reposer des vibrations dues au mouvement tant que la machine n'est pas arrêtée ou brisée, ou tant qu'il n'a pas lui-même décidé de réduire sa productivité.

Les travaux de préparation de terrain prennent de plus en plus d'ampleur, en nombre et en durée, à travers tout le pays. Les opérateurs sont souvent des travailleurs à plein temps, qui retournent année après année accomplir la même tâche, acquérant ainsi un niveau toujours plus grand de compétence au travail. Cette situation est sans contredit à l'avantage de l'industrie. Toutefois, le taux actuellement élevé de rotation de la main-d'oeuvre, les faibles niveaux de productivité, et les frustrations du personnel de terrain (Ryans, 1984) sont peut-être des indices d'un milieu de travail peu favorable. On a aussi supposé qu'un manque de compatibilité entre le véhicule moteur et son accessoire pouvait être un des facteurs en cause. Toutes ces raisons ont amené FERIC à penser qu'il était important de comprendre davantage la nature des vibrations globales du corps générées lors de travaux de préparation de terrain. En 1985 et 1986, FERIC a mesuré les niveaux de vibrations dus au mouvement, auxquels étaient exposés les opérateurs d'un échantillon de véhicules moteurs utilisés dans des travaux de préparation de terrain.

L'étude avait pour objectifs:

- a) de déterminer les niveaux de vibration globale du corps auxquels étaient exposés les opérateurs de machines servant aux travaux de préparation de terrain;
- b) d'établir si ces niveaux dépassaient ceux qui étaient recommandés dans la norme ISO 2631-1978 et, si oui, de déterminer l'ampleur du problème;
- c) de définir l'influence sur les vibrations globales du corps de certaines caractéristiques des machines et de facteurs opérationnels particuliers.

Il est à noter que les résultats obtenus sont propres aux machines de l'échantillon et aux conditions de travail couvertes par l'étude. Le lecteur intéressé à de plus amples explications sur la théorie des vibrations globales du corps et sur les définitions utilisées est prié de consulter une étude antérieure de FERIC qui traite des niveaux de vibration globale éprouvés sur les débardeurs lors d'opérations de récolte (Golsse et Hope, 1987).

Méthodologie

Les signaux vibratoires sont habituellement mesurés en termes de niveaux d'accélération. Il était d'usage par le passé d'exprimer les accélérations en nombre de "g", 1 g étant la valeur de l'accélération normale due à la pesanteur. Cependant, nous utilisons dans le présent rapport l'unité métrique (SI), mètre par seconde carrée (m/s^2), pour des raisons d'uniformité avec d'autres rapports déjà publiés (1 "g" est égal à $9,807 \text{ m/s}^2$).

Les niveaux de vibration globale du corps furent enregistrés sur les machines de l'échantillon à l'aide d'un enregistreur magnétique à quatre voies, de haute qualité. Les données vibratoires transmises durant les mouvements de la machine étaient captées par des accéléromètres placés à deux endroits différents dans la cabine. Un accéléromètre uniaxial percevait les signaux au niveau du plancher de la machine sous le siège, dans la direction verticale (axe des z). Simultanément, un accéléromètre triaxial captait les signaux dans les directions avant-arrière (axe des x), latérale (axe des y), et verticale (axe des z), à l'interface opérateur-siège (figure 1). L'appareil triaxial était monté dans un coussin de siège de fabrication artisanale (figure 2).

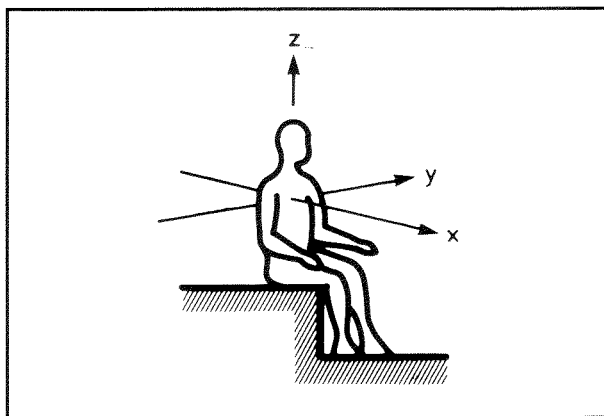
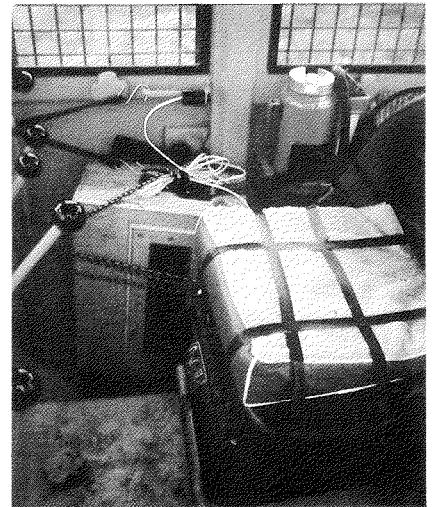


Figure 1. Direction du système de coordonnées pour l'évaluation des vibrations mécaniques qui influencent le corps humain (tiré de ISO 2631-1978).

Les données enregistrées étaient analysées par la suite dans la gamme de fréquence de 1 à 80 Hz, au moyen d'un analyseur numérique en temps réel. Ceci permettait le transfert des données brutes dans l'ordinateur

Figure 2.

Cabine dans laquelle on a installé les appareils de mesure. Le coussin de siège de fabrication artisanale contient l'accéléromètre triaxial et le boîtier en bois renferme l'enregistreur magnétique.



central de FERIC, afin de procéder au traitement des données conformément à la norme ISO 2631. Ce traitement comprenait la pondération des fréquences, la sommation des valeurs d'accélération pondérées dans la gamme de fréquence désirée, et le calcul d'une valeur pondérée globale selon chacun des axes, pour chacune des machines. Il est à noter que la méthode par pondération totale peut sur-estimer les niveaux admissibles de temps d'exposition, comparativement au niveau pondéré d'amplitude obtenu par la méthode d'analyse de la bande de fréquence dominante. Les deux méthodes sont cependant suggérées dans la norme. L'analyse statistique comprend l'analyse en composantes principales et l'emploi de modèles de régression hyperboliques non linéaires pour déterminer toute corrélation possible entre les caractéristiques des machines, les conditions de travail, et les niveaux d'accélération.

Conditions de l'étude

De juin 1985 à octobre 1986, FERIC procéda à des essais sur 12 machines combinées, véhicule moteur et accessoire, à neuf endroits différents en Ontario, au Québec et au Nouveau-Brunswick. Six compagnies-membres et (ou) entrepreneurs prirent part à l'étude, mettant à notre disposition des machines et des opérateurs engagés activement dans des opérations normales de préparation de terrain.

Échantillon de machines

Le tableau 1 présente des renseignements détaillés sur les machines étudiées. Elles sont réparties en trois groupes principaux:

- Groupe 1 - véhicules moteurs à chenilles (figure 3);
- Groupe 2 - véhicules moteurs à roues avec accessoires montés à l'avant (figure 4);
- Groupe 3 - véhicules moteurs à roues avec accessoires montés à l'arrière (figure 5).

Tableau 1. Caractéristiques des machines

groupe	numéro de la machine	type de véhicule moteur	type d'accessoire	emplacement de l'accessoire	train de roulement	véhicule moteur construit en	puissance du véhicule moteur (kW)	masse totale* (tonne)	empattement (m)	largeur de voie (m)	type de siège
1	1	buteur	Drags	arrière	chenilles	1977	231	38.5	3.15	2.13	suspension
	2	buteur	dents Young	avant	chenilles	1985	149	20.2	3.03	1.90	suspension
	3	buteur	dents Young	avant	chenilles	-	224	31.5	3.38	2.13	rigide
	4	buteur	pelle en V (C&H)	avant	chenilles	1979	149	24.1	3.03	1.90	rigide
2	5	débardeur	râteau artisanal à 4 dents	avant	pneus + chaînes	1979	82	8.8	2.90	2.29	suspension
	6	débardeur	râteau Force à 5 dents	avant	pneus + chaînes	1981	110	16.3	3.30	2.46	suspension
	7	débardeur	râteau Raumfix à 4 dents	avant	pneus + chaînes	1972	67	8.5	2.64	2.05	rigide
	8	débardeur	râteau artisanal à 4 dents	avant	pneus + chaînes	1975	67	7.7	2.64	2.05	rigide
3	9	débardeur	scarificateur à disques TTS	arrière	pneus + chaînes	1978	82	13.9	3.05	2.29	suspension
	10	débardeur	scarificateur à placeaux Bräcke	arrière	pneus + chaînes	1985	99	12.1	2.95	2.45	suspension
	11	débardeur modifié	Donaren 180D	arrière	pneus + chaînes	1978	104	16.1	5.03	2.36	rigide
	12	moissonneuse modifiée	scarificateur à cônes GLFP	arrière	pneus + chaînes	1985	175	47.0	5.33	3.77	suspension

Note: (*) inclut la masse de l'accessoire.

Les observations portaient sur quatre véhicules à chenilles et huit véhicules à roues. Les accessoires étaient soit poussés, soit tirés par le véhicule moteur. Dans cet échantillon, 75% des véhicules moteurs à chenilles et 50% des véhicules moteurs à roues poussaient leur accessoire.

Deux des quatre râteaux du groupe 2 étaient des accessoires de fabrication artisanale (ex: machine 5, figure 4). Le groupe 3 comprenait deux scarificateurs non motorisés (machines 9 et 10), et deux autres qui étaient motorisés (machine 11 et 12).

Deux buteurs et cinq machines à roues étaient dotés de sièges à suspension. Les cinq autres, généralement des modèles plus anciens, avaient des sièges rigides.



Figure 3. Groupe 1 - véhicule moteur à chenilles (machine 4).



Figure 4. Groupe 2 - véhicule moteur à roues avec accessoire monté à l'avant (machine 5).



Figure 5. Groupe 3 - véhicules moteurs à roues avec accessoires montés à l'arrière - [scarificateur à placeaux Bräcke (en haut), scarificateur à cônes motorisés GLFP (en bas) (machines 10 et 12)].

Conditions environnementales et opérationnelles

Le tableau 2 présente les conditions environnementales et opérationnelles rencontrés au cours de l'étude. Il comprend quatorze séries différentes de données puisque deux des douze machines furent observées dans deux conditions différentes de rugosité du sol.

Les conditions du site furent évaluées conformément au système de classification du terrain de l'ACPPP (Mellgren, 1980). En général, le terrain faisait preuve d'une bonne solidité (c'est-à-dire sec à frais), sauf pour les séries de données 1a et 1b, qui furent recueillies sur des sites présentant une épaisse couche organique (classe 4(3)). La rugosité du terrain variait des classes 1 à 3, alors que la pente était habituellement légère (classe 1).

Les vitesses de déplacement furent déterminées au moyen de chronométrages effectués durant les périodes d'enregistrement des vibrations. Dans l'ensemble, la vitesse moyenne s'élevait à 49,8 m/min (3,0 km/h), et variait entre 32 et 79 m/min (1,9 et 4,7 km/h).

Tableau 2. Conditions environnementales et opérationnelles

série de données	numéro de la machine	classe de terrain*	vitesses de déplacement	
			(m/min)	(km/h)
véhicule moteurs à chenilles				
1a	1	4(3). 2. 1.	38	2,3
1b	1	4(3). 3. 1.	55	3,3
2	2	2. 1. 1.	35	2,1
3	3	2. 1. 1.	43	2,6
4	4	1. 2. 1.	49	2,9
moyenne			44,0	2,64
véhicules moteurs à roues (accessoires montés à l'avant)				
5	5	2. 1. 1.	52	3,1
6	6	2. 1. 1.	33	2,0
7	7	1. 3. 2.	62	3,7
8	8	2. 2. 1.	51	3,1
moyenne			49,5	2,98
véhicules moteurs à roues (accessoires montés à l'arrière)				
9a	9	2. 1. 1.	63	3,8
9b	9	2. 2. 1.	45	2,7
10	10	3. 2. 1.	60	3,6
11	11	1. 2. 1.	79	4,7
12	12	1. 2. 1.	32	1,9
moyenne			55,8	3,35
moyenne globale			49,8	3,00

* (solidité du sol . rugosité du sol . pente)

Opérateurs

Le tableau 3 présente les renseignements d'ordre général qui se rapportent aux opérateurs. Étant donné le caractère saisonnier des travaux de préparation de terrain, leur expérience est mesurée en mois. Quarante-deux pourcent des opérateurs possédaient 12 mois d'expérience ou plus. Un des opérateurs du troisième groupe était novice dans la préparation de terrain, mais il avait conduit un débardeur pendant 18 ans.

Avec une taille moyenne de 172 cm et un poids moyen de 76,8 kg, cet échantillon de travailleurs forestiers se situe en-deçà du 50^e centile de la main-d'œuvre canadienne (Demirjian, 1980). Toutes ces données furent obtenues verbalement.

Tableau 3. Expérience et caractéristiques physiques des opérateurs

numéro de la machine	expérience (mois)	poids (kg)	taille (cm)
véhicules moteurs à chenilles			
1	> 12	89	175
2	10	73	176
3	6	82	150
4	> 12	71	175
véhicules moteurs à roues (accessoires montés à l'avant)			
5	> 12	65	170
6	> 12	70	175
7	2	80	175
8	> 12	79	175
véhicules moteurs à roues (accessoires montés à l'arrière)			
9	0	75	165
10	6	76	183
11	2	80	175
12	4	82	173
moyenne	-	76,8	172,2

Résultats et discussion

Chronométrages

Comme l'étude avait pour objectif d'évaluer les niveaux d'exposition aux vibrations globales du corps, elle ne comprenait pas de chronométrages détaillés des périodes de temps productif. Les opérateurs des machines servant à la préparation de terrain accomplissent généralement un travail productif durant 70 à 75% de la durée prévue du quart de travail. Ainsi, sur 8 heures, ils pourront être sujets à des vibrations globales dues à leur travail pendant 5 ou 6 heures.

Vitesses de déplacement

Les 14 séries de données montrent des variations considérables dans les vitesses de déplacement. Toutefois, la vitesse moyenne de déplacement par groupe de machines se situait entre une limite inférieure de 44 ($\pm 8,1$) m/min pour les véhicules moteurs à chenilles du groupe 1, et une limite supérieure de 55,8 ($\pm 17,9$) m/min pour les débardeurs à roues avec accessoires montés à l'arrière, dans le groupe 3. En outre, cette augmentation dans la vitesse moyenne de déplacement s'accompagnait d'une augmentation de l'écart-type (c'est-à-dire de la variation de la vitesse à l'intérieur de chaque groupe). Ces vitesses sont caractéristiques des activités de préparation de terrain, bien que des vitesses encore plus élevées aient parfois été enregistrées dans d'autres études de FERIC.

Lors de déplacements hors route, on s'attend généralement à ce que les niveaux de vibration globale du corps augmentent en même temps que la vitesse de déplacement. Cependant, comme on le verra plus loin, les données provenant des accéléromètres montés sur le plancher montraient que le niveau moyen de vibration pour le 3^e groupe de machines était beaucoup moins élevé que celui du 2^e groupe, et même que celui du 1^{er} groupe. C'est là une indication très forte qu'en plus de la vitesse de déplacement, la conception de la machine et la combinaison véhicule moteur-accessoire constituent des facteurs importants.

Valeurs d'accélération pondérées

La figure 6 exprime sous forme graphique les valeurs efficaces d'accélération (ou valeurs moyennes quadratiques) pondérées, enregistrées suivant les trois axes au niveau du siège; la figure 7 exprime les valeurs maximales correspondantes. Les données numériques, ainsi que les données obtenues suivant l'axe vertical au niveau du plancher des machines (a_{ZF}), apparaissent sous forme de tableau à l'annexe A.

La figure 6 montre que dans 70% des cas les valeurs d'accélération suivant l'axe des x ou l'axe des y (a_x ou a_y) étaient plus élevées que suivant l'axe des z (a_z). Cependant, tous les boteurs du groupe 1 qui poussaient des accessoires avaient des valeurs d'accélération prépondérantes suivant l'axe des z (a_z).

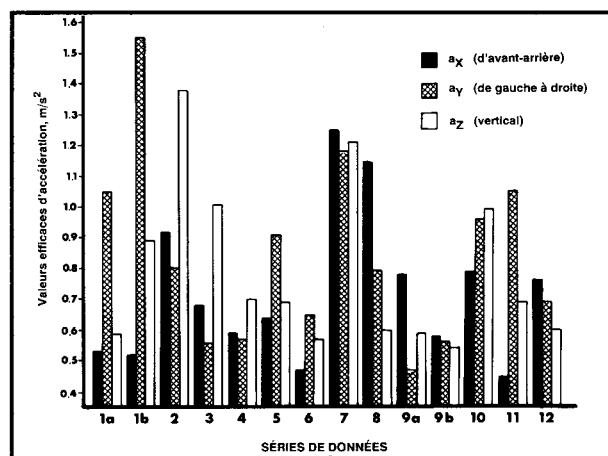


Figure 6. Valeurs efficaces d'accélération du siège, suivant chacun des axes.

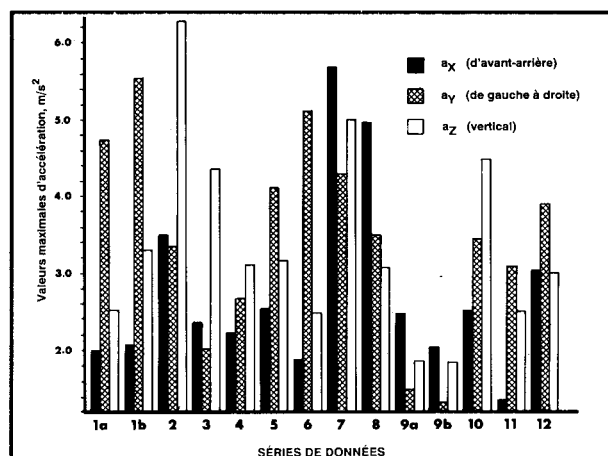


Figure 7. Valeurs maximales d'accélération du siège, suivant chacun des axes.

Facteurs de crête

Les facteurs de crête, qui représentent le rapport des valeurs maximales aux valeurs efficaces d'accélération, servent à définir la rugosité d'un parcours donné. Les valeurs calculées pour l'échantillon (tableau 4) sont si élevées dans la plupart des cas (c'est-à-dire supérieures à 3) qu'il est possible que la norme ISO 2631-1978 elle-même ne puisse s'appliquer à ces données. En outre, les limitations de l'instrumentation ne permettaient pas de mesurer une véritable valeur de crête instantanée, mais plutôt une valeur maximale intégrée sur quelques millisecondes. Par conséquent, les véritables facteurs de crête seraient encore plus élevés que ceux qui apparaissent au tableau. Qu'ils soient

exprimés en valeurs efficaces ou en facteurs de crête, ces résultats indiquent que les opérateurs étaient exposés à des niveaux de vibration globale du corps situés bien au-dessus des limites admises par l'ISO, durant la période de temps où eurent lieu les enregistrements.

Tableau 4. Facteurs de crête

groupe	série de données	facteurs de crête pour chacun des axes (au niveau du siège)		
		axe des X	axe des Y	axe des Z
véhicules moteurs à chenilles				
1	1a	3,8	4,5	4,3
	1b	4,0	3,6	3,8
	2	3,4	4,2	4,5
	3	3,5	3,6	4,2
	4	3,8	4,6	4,5
véhicules moteurs à roues (accessoires montés à l'avant)				
2	5	4,0	4,5	4,6
	6	4,0	7,9	4,4
	7	4,5	3,6	4,1
	8	4,3	4,4	5,1
	véhicules moteurs à roues (accessoires montés à l'arrière)			
3	9a	3,2	3,2	3,1
	9b	3,5	2,3	3,5
	10	3,2	3,6	4,5
	11	3,0	2,9	3,8
	12	4,0	5,7	5,0

Limite à la capacité réduite par fatigue

La norme ISO permet aussi de comparer les niveaux de vibration globale du corps en fonction d'une "limite à la capacité réduite par fatigue". Cette limite spécifie la période de temps, au cours d'une journée de travail de 8 heures, durant laquelle les opérateurs de machines peuvent soutenir ces niveaux avant que la fatigue n'affecte négativement leur efficacité et par suite leur productivité. Les résultats de la comparaison apparaissent au tableau 5. Le lecteur ne doit pas oublier qu'ici encore la méthode de pondération globale utilisée pour calculer le "temps admissible" peut sous-estimer le temps d'exposition permis. Néanmoins, le fait que tous les temps d'exposition admissibles soient très bas indiquent hors de tout doute la présence d'un problème.

Pour un axe donné, le temps d'exposition admissible, selon la limite à la capacité réduite par fatigue, était au mieux limité à 8 heures d'exposition durant les 8 heures théoriques du quart de travail (série de données 9b, axe des z seulement). Cependant, le temps d'exposition admissible était inférieur ou égal à 2,5 heures dans tous les cas, quand on tenait compte de celui des trois axes

qui présentait les niveaux les plus sévères. C'était normalement l'axe des y (latéral).

Le tableau 5 présente également un temps d'exposition moyen par groupe de machines, pour chacun des axes. Même si les différences ne sont pas significatives en ce qui a trait à la longueur de la journée de travail d'un opérateur, il semble que les machines du groupe 3 permettaient une durée d'exposition légèrement plus longue que les autres, même avec une vitesse de déplacement moyenne plus élevée.

Tableau 5. Temps d'exposition admissibles avant d'atteindre la limite à la capacité réduite par fatigue

groupe	séries de données	temps admissible (heures) par axe		
		axe des X	axe des Y	axe des Z
véhicules moteurs à chenilles				
1	1a	2,5	1,0	4,0
	1b	2,5	0,3	2,5
	2	1,0	2,5	1,0
	3	2,5	2,5	2,5
	4	2,5	2,5	2,5
temps moyen		2,2	1,8	2,5
véhicules moteurs à roues (accessoires montés à l'avant)				
2	5	2,5	1,0	2,5
	6	2,5	2,5	4,0
	7	1,0	1,0	1,0
	8	1,0	1,0	4,0
temps moyen		1,8	1,3	2,9
véhicules moteurs à roues (accessoires montés à l'arrière)				
3	9a	2,5	4,0	4,0
	9b	2,5	2,5	8,0
	10	2,5	1,0	2,5
	11	4,0	1,0	2,5
	12	2,5	2,5	2,5
temps moyen		2,8	2,2	3,9

Analyse en composantes principales: machines et conditions opérationnelles

Les 14 séries de données couvrent un grand nombre de variables comme la masse de la machine, la vitesse, l'empattement, de même que les conditions de rugosité du sol, variables qui toutes affectent les niveaux d'accélération enregistrés. Par conséquent, il était difficile d'utiliser les techniques de corrélation classiques pour quantifier ces influences; c'est pourquoi nous avons choisi la méthode d'analyse en composantes

principales qui permet d'évaluer plus sûrement toute relation possible.

L'analyse en composantes principales est une méthode statistique mise au point pour décrire et analyser l'interdépendance structurelle d'une série de variables. Dans cette méthode, une série de variables (par exemple, la rugosité, la vitesse, la masse et les niveaux d'accélération) est transformée en une combinaison linéaire des variables originales, en assignant à chacune d'elles une pondération générée par ordinateur (Takeuchi et al., 1982). Graphiquement, la nouvelle variable composite peut être tracée sur un axe, alors qu'une autre variable (ou une variable composite différente) peut être tracée sur un autre axe. Naturellement, cette méthode complexe d'analyse fait appel à l'informatique pour l'évaluation des résultats.

L'analyse montre que certaines variables relatives aux machines et aux facteurs opérationnels pouvaient être classifiées en fonction de l'accroissement des niveaux d'accélération suivant l'axe vertical, au plancher de la machine. Dans le tableau 6, ces niveaux sont comparés selon le type de véhicule moteur utilisé, et selon l'emplacement de l'outil de préparation de terrain sur ces véhicules moteurs. En général ils montrent que, pour tous les véhicules moteurs, les accessoires montés à l'avant causaient des niveaux moyens d'accélération plus élevés que ceux montés à l'arrière, et que les niveaux de vibration pour les véhicules moteurs à chenilles étaient plus élevés que pour les véhicules à roues.

Tableau 6. Valeurs efficaces moyennes d'accélération au plancher (a_{ZF})

machine combinée de préparation de terrain	valeurs efficaces moyennes d'accélération a_{ZF} (m/s ²)	écart-type
accessoires montés à l'avant (poussés)	0,92	0,36
accessoires montés à l'arrière (tirés)	0,62	0,11
véhicules moteurs à chenilles (qui poussent)	0,96	0,29
véhicules moteurs à chenilles (qui tirent)	0,67	0,11
véhicules moteurs à roues (qui poussent)	0,90	0,45
véhicules moteurs à roues (qui tirent)	0,60	0,12

L'analyse en composantes principales révèle également:

- que les véhicules ayant une faible masse et se déplaçant à vitesse élevée avaient une tendance à produire des valeurs a_{ZF} plus élevées que les véhicules à masse élevée se déplaçant à basse vitesse;

b) et qu'une basse vitesse, un grand empattement, et une faible rugosité assuraient des niveaux d'accélération plus faibles, mais que la rugosité n'était pas aussi critique que l'emplacement de l'outil sur le véhicule moteur et que le type de train de roulement de ce dernier. [Cela s'explique peut-être par les variations relativement faibles de la gamme de rugosité].

L'analyse n'apporte pas d'élément intéressant relativement à l'influence des sièges à suspension, même si sept des 12 véhicules moteurs étaient dotés de ce type de siège. Sans doute la présence dans l'échantillon de quelques sièges à suspension mal adaptés et le fait que les tests furent effectués dans des conditions non contrôlées sont responsables du caractère peu concluant des résultats à cet égard. FERIC étudie actuellement une sélection de sièges à suspension dans un environnement contrôlé, afin de déterminer leur efficacité relative à amortir les vibrations.

Modèle non linéaire

L'analyse en composantes principales indique également qu'il existe une forte corrélation non linéaire entre le rapport masse/vitesse des machines et trois des fichiers de données des valeurs efficaces d'accélération (à savoir: a_X , a_Z , a_{ZF}). Aucune corrélation semblable ne fut trouvée suivant l'axe latéral (fichier de données a_Y). Les séries de données, regroupées selon les véhicules à roues et les véhicules à chenilles, ont été entrées dans un modèle de régression hyperbolique de la forme $y = (a + b\alpha)/(c + d\alpha)$

où:

- y est la valeur efficace d'accélération (en m/s^2) suivant l'un des axes a_X , a_Z et a_{ZF} ;
- a , b , c et d sont des paramètres de régression estimés par ordinateur;
- et α est le rapport de la masse sur la vitesse (en tonnes par m/min).

Des courbes de régression semblables à celles des figures 8 et 9 furent obtenues dans chacun des cas. Les équations, les courbes ainsi que les niveaux de confiance, apparaissent à l'annexe B. Deux séries de données (à savoir: 4 et 12) furent rejetées des analyses pour les raisons suivantes:

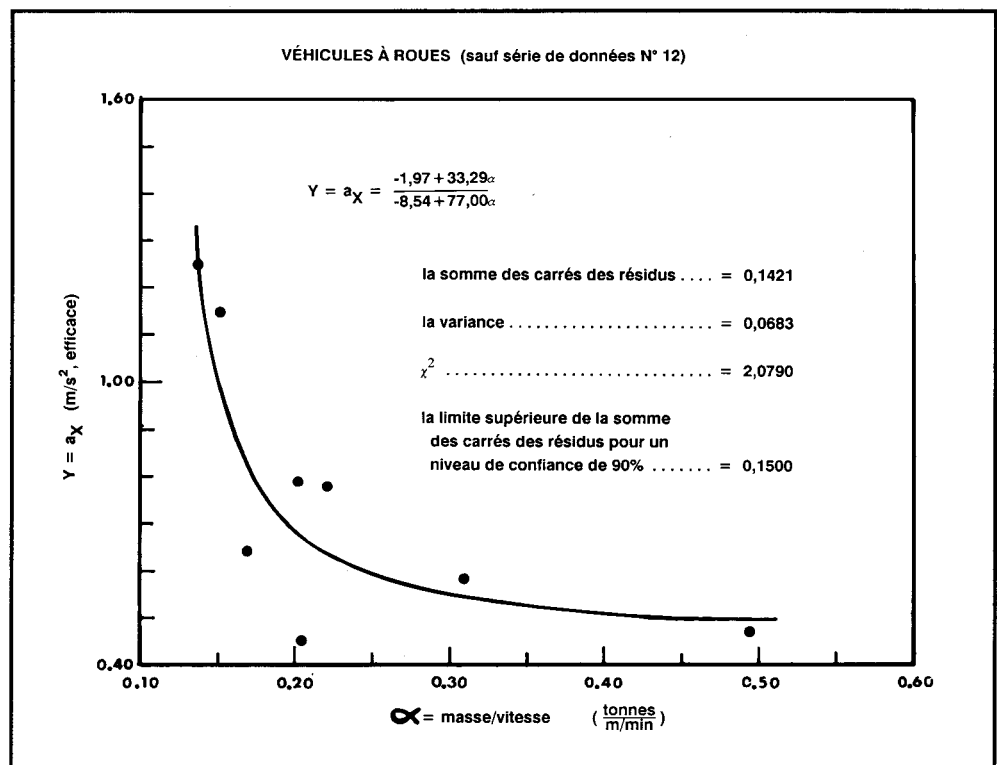
- La série de données 4 (véhicule à chenilles 4) était incomplète et ne pouvait entrer dans la modélisation.
- Le scarificateur à cônes GLFP (série de données 12) était atypique de la classe des véhicules à roues, à cause de sa forte masse et de sa faible vitesse de déplacement.

Les niveaux de confiance de ces intervalles variaient de 75% dans le cas des valeurs d'accélération a_Z des véhicules à roues, à 99% dans le cas des valeurs d'accélération a_{ZF} des mêmes machines. Ils permettent donc d'apporter les commentaires suivants relativement à l'échantillon de machines observées:

- Les valeurs d'accélération diminuent à mesure que le rapport masse/vitesse augmente. Ceci indique qu'une baisse de la vitesse pour une masse constante, ou une augmentation de la masse pour une vitesse de travail constante, devrait permettre de

Figure 8.

Relation hyperbolique pour les machines à roues, valeurs efficaces d'accélération a_X en fonction des rapports masse/vitesse, CI = 90%.



réduire les niveaux d'accélération. Naturellement, l'inverse est également vrai.

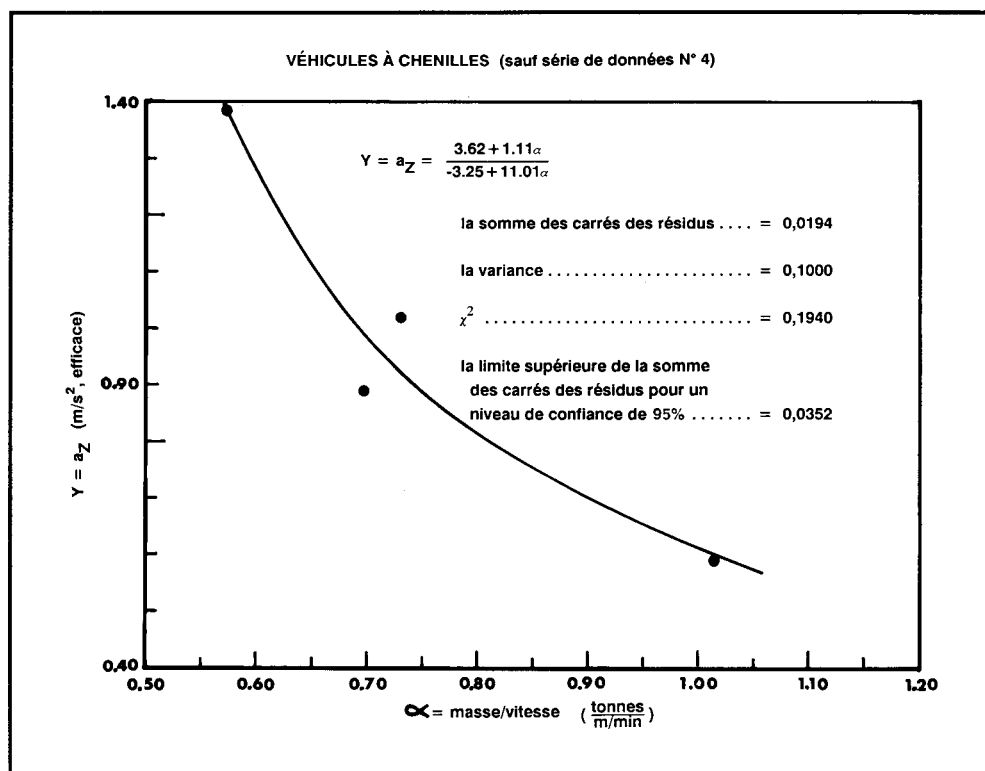
- En général, les machines à chenilles présentaient des valeurs d'accélération de beaucoup plus élevées que les machines à roues, *compte tenu des mêmes rapports masse/vitesse*; c'est sans doute un indice que les trains de roulement à chenilles offrent une moins grande efficacité d'amortissement. On en conclut donc que les deux groupes de machines sont des populations séparées qui doivent être considérées indépendamment.
- Suivant tous les axes, il est possible de réduire les niveaux d'accélération des véhicules moteurs à roues de façon significative, en augmentant la masse des machines ou en réduisant leur vitesse de déplacement *jusqu'à un rapport masse/vitesse de 0,3*. Au-dessus de ce rapport, des changements semblables dans la masse ou la vitesse ne permettront pas de réduction appréciable des niveaux d'accélération.
- De même pour les véhicules moteurs à chenilles, aucune réduction appréciable d'accélération ne peut être réalisée *au-dessus d'un rapport masse/vitesse de 0,7* dans la direction avant-

arrière (axe des x). On ne constate *cependant* aucun point de fléchissement analogue dans la direction verticale (axe des z), de sorte que tout accroissement dans le rapport masse/vitesse offrira l'avantage d'une réduction des niveaux d'accélération (figure 9).

Bien que limité à cet échantillon de machines, le modèle de régression hyperbolique montre que le rapport masse/vitesse pourrait servir d'indice pour prévoir l'exposition des opérateurs aux niveaux de vibration globale du corps, dans les directions avant-arrière et verticale. Ainsi, si on utilise un véhicule moteur à roues de 7 tonnes, une réduction dans la vitesse de déplacement de 60 à 40 m/min permettra d'abaisser les niveaux de vibration de $2,89 \text{ m/s}^2$ à $0,76 \text{ m/s}^2$ dans la direction avant-arrière. On pourra ainsi accroître le temps d'exposition admissible de moins d'une minute à environ 2,5 heures. Cependant, étant donné la nature asymptotique de la courbe hyperbolique, de plus amples réductions dans les vitesses de déplacement n'apporteront pas de baisse appréciable des niveaux d'accélération. Il faut par conséquent trouver d'autres moyens de diminuer les vibrations globales du corps lors des travaux de préparation de terrain.

Figure 9.

Relation hyperbolique pour les machines à chenilles, valeurs efficaces d'accélération a_z en fonction des rapports masse/vitesse, CI = 95%.



Conclusions

Les niveaux des vibrations globales du corps générés par une sélection de 12 machines servant à des travaux de préparation de terrain ont été mesurés et analysés.

Parmi les machines évaluées, les niveaux de vibration produits par les débardeurs à roues qui tirent leur accessoire (groupe de machines 3) étaient relativement plus faibles que ceux des machines à chenilles et des véhicules à roues qui poussent leurs accessoires.

Dans tous les cas cependant, il fut établi que les niveaux d'accélération étaient beaucoup plus élevés que les niveaux admissibles définis par la norme ISO 2631-1978. Le temps d'exposition spécifié par la limite à la capacité réduite par fatigue était dans tous les cas inférieur ou égal à 2,5 heures de travail par quart de 8 heures.

Des relations hyperboliques non linéaires entre le rapport de la masse de la machine sur sa vitesse de déplacement, et les niveaux de vibration globale du corps suivant les axes vertical et avant-arrière furent quantifiés pour les véhicules à roues et pour les véhicules à chenilles. D'après les résultats de l'étude, il semble que ces variables pourraient aider à prévoir les niveaux de vibration globale d'une machine donnée, dans une utilisation particulière. Il faudra cependant recueillir encore un grand nombre de données pour certifier la validité de ces relations, pour l'ensemble de la population canadienne de machines servant aux travaux de préparation de terrain.

Les personnes responsables d'activités de préparation de terrain concentrent habituellement leurs efforts à trouver la machine idéale en fonction de la tâche à accomplir. On n'a toutefois accordé que peu d'attention à l'interface opérateur-machine, et cela surtout à cause du manque d'information sur le sujet. Si l'industrie souhaite conserver à son emploi, année après année, les opérateurs qui ont acquis une certaine compétence dans les travaux de préparation de terrain, elle devra se pencher sur les effets de vibrations excessives dues au mouvement et trouver des moyens de les réduire, de façon à améliorer davantage le bien-être de l'opérateur et les niveaux de production dans l'ensemble. Il semble toutefois qu'au-delà d'un rapport spécifique masse/vitesse, ni la réduction de la vitesse de la machine, ni l'emploi d'une machine plus lourde n'arriveront à diminuer de façon significative les niveaux de vibration. Aussi les recherches doivent-elles se poursuivre dans le but de mettre au point de nouveaux concepts susceptibles d'assurer de plus amples réductions des vibrations. Dans ce contexte, les points qui pourraient faire l'objet de recherches com-

prennent: l'étude de l'influence des pneus à haute portance sur les niveaux de vibration globale du corps, la sélection du siège à suspension "optimal", la mise au point de cabines intégrant un système de suspension, et le développement de véhicules moteurs mieux adaptés aux opérations sylvicoles.

Bibliographie

- Demirjian, A. 1980. Rapport d'anthropométrie: taille, poids et mesures corporelles. Un rapport de Nutrition Canada, Ottawa. 134 p.
- Hope, P.A. 1985. A human factors analysis of skidder operations in Northern Ontario: A Preliminary investigation. M.Sc. Thesis, Univ. of Guelph, Guelph, Ont. 126 p.
- Golsse, J.-M.; Hope, P.A. 1987. Analyse des vibrations globales du corps sur les débusqueurs. Inst. can. de rech. en génie for., Pointe-Claire, Qué. Rapport technique N° RT-77. 25 p.
- ISO (Organisation internationale de normalisation), 1978. Estimation de l'exposition des individus à des vibrations globales du corps. ISO 2631- 1978 (E), Suisse. 15 p.
- Mellgren, P.G. 1980. Classification du terrain pour la foresterie du Canada. L'Assoc. can. des prod. de pâtes et papier, Div. des bois et forêts, Montréal, Qué. W.S.I. 2840F. 13 p.
- Rummer, R.B. 1986. Whole-body vibration of forest equipment operators: a review of past research and present needs. pp. 1131-1139. Dans: Trends in ergonomics/Human Factors III, Part B, North-Holland. Amsterdam, Pays-Bas.
- Ryans, M. 1984. Les véhicules moteurs en sylviculture. Inst. can. de rech. en génie for., Pointe-Claire, Qué. Fiche technique No FT-79. 18 p.
- Takeuchi, K.; Yanai, H.; Mukherjee, B.N. 1982. The foundations of multivariate analysis. Wiley Eastern Limited, New Delhi, Inde. 458 p.
- Wilson, J.N.; Kirk, T.G.; Tremblay, M.L.; Burton, R.T. 1986. Whole-body vibration in off-road forestry vehicles. Am. Soc. Agric. Eng., St-Josephs, MI. Paper No. 86-1611. 14 p.

Annexe A

Valeurs efficaces et valeurs maximales d'accélération pondérées; tous les axes; gamme de fréquence de 1 à 80 Hz

séries de données	valeurs d'accélération (m/s ²)							
	a _X au siège		a _Y au siège		a _Z au siège		a _Z au plancher	
	efficace	maximum	efficace	maximum	efficace	maximum	efficace	maximum
véhicules moteurs à chenilles								
1a	0,53	2,00	1,05	4,75	0,59	2,55	0,59	2,85
1b	0,52	2,10	1,55	5,56	0,89	3,34	0,74	3,50
2	0,92	3,51	0,80	3,36	1,38	6,26	1,28	0,55
3	0,68	2,38	0,56	2,02	1,02	4,37	0,89	4,03
4	0,59	2,22	0,57	2,64	0,70	3,12	0,71	(estimation)
véhicules moteurs à roues (accessoires montés à l'avant)								
5	0,64	2,56	0,91	4,10	0,69	3,18	0,80	4,10
6	0,74	1,89	0,65	5,12	0,57	2,49	0,62	3,22
7	1,25	5,66	1,18	4,28	1,21	5,00	1,56	7,42
8	1,15	4,99	0,79	3,50	0,60	3,06	0,61	3,14
véhicules moteurs à roues (accessoires montés à l'arrière)								
9a	0,78	2,46	0,47	1,51	0,59	1,84	0,65	1,84
9b	0,58	2,04	0,56	1,31	0,53	1,83	0,56	1,74
10	0,79	2,54	0,96	3,43	0,99	4,45	0,74	3,69
11	0,45	1,37	1,05	3,08	0,69	2,59	0,62	2,71
12	0,76	3,06	0,69	3,90	0,60	3,00	0,42	1,91

Annexe B

Relations hyperboliques: valeurs efficaces d'accélération en fonction des rapports masse/vitesse

