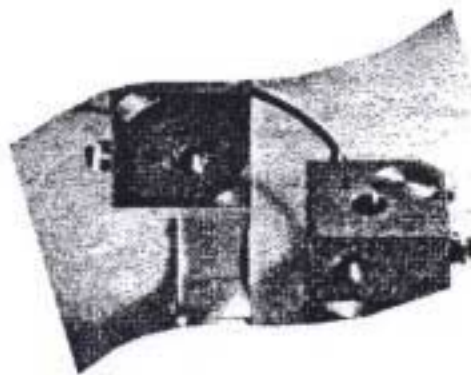


**Méthodologie pour évaluer
l'exposition des individus
aux vibrations main-bras
en milieu de travail**

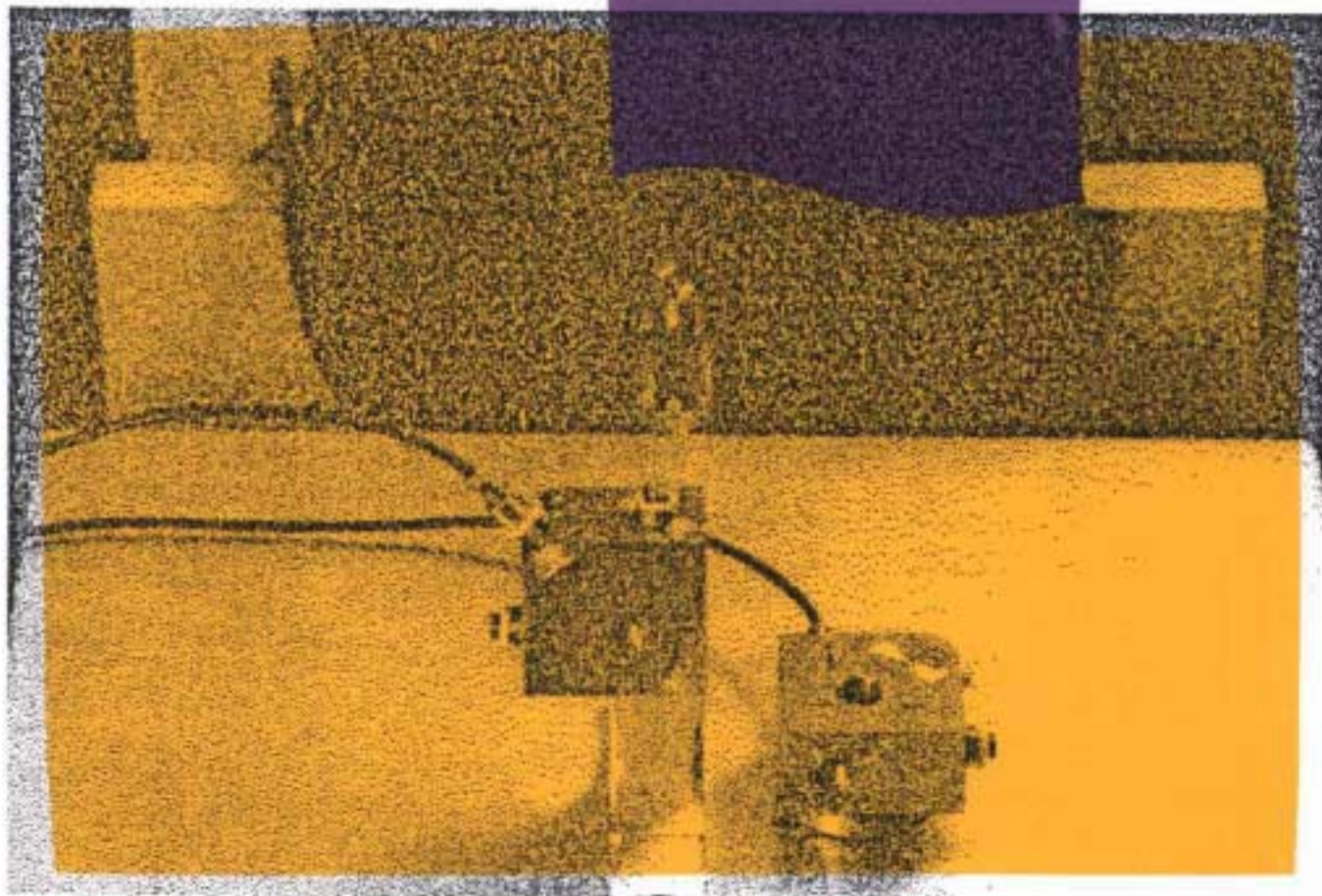


**ÉTUDES ET
RECHERCHES**

Paul-Émile Boileau
Henry Scory
Denis Turcot

Novembre 1988 RR-025

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

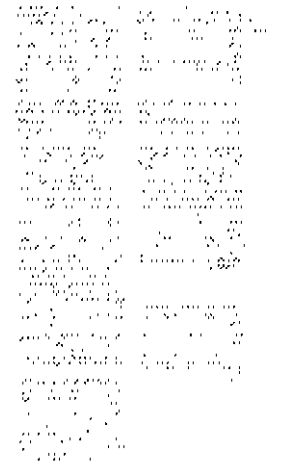
Cette version numérique vous est offerte à titre d'information seulement. Bien que tout ait été mis en œuvre pour préserver la qualité des documents lors du transfert numérique, il se peut que certains caractères aient été omis, altérés ou effacés. Les données contenues dans les tableaux et graphiques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

Méthodologie pour évaluer l'exposition des individus aux vibrations main-bras en milieu de travail

**Paul-Émile Boileau
Henry Scorq
Denis Turcot
Direction des laboratoires, IRSST**



RAPPORT

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

© Institut de recherche en santé et en sécurité du travail du Québec, novembre 1988.
4^e trimestre 1988.

TABLE DES MATIÈRES

<u>SECTION</u>	<u>PAGE</u>
1.- <u>INTRODUCTION</u>	9
2.- <u>EFFORTS DE NORMALISATION - REVUE DES NORMES EXISTANTES</u> ...	11
3.- <u>DÉTECTION DE LA CONTRAINTE VIBRATOIRE EN MILIEU DE TRAVAIL</u>	13
3.1 <u>Grandeur de base</u>	13
3.2 <u>Sélection de l'accéléromètre et recommandations</u>	13
3.3 <u>Direction des mesures et points de détection</u>	17
3.3.1 <u>Systèmes de coordonnées</u>	17
3.3.2 <u>Zones de fixation des accéléromètres et orientation pour différentes espèces d'outils</u>	20
3.4 <u>Fixation mécanique des accéléromètres</u>	21
3.4.1 <u>Problèmes reliés à l'utilisation d'adaptateurs</u>	21
3.4.2 <u>Évaluation en laboratoire de la transmissibilité des adaptateurs</u>	24
3.4.3 <u>Description d'adaptateurs pour fixer les accéléromètres servant à mesurer l'exposition aux vibrations mains-bras</u>	27
3.4.4 <u>Modes de fixation et assemblage des accéléromètres</u> .	30
a) <u>Machines rotatives ou alternatives</u>	30
b) <u>Machines percutantes ou roto-percutantes</u>	33
c) <u>Mode de fixation en présence de matériaux viscoélastiques</u>	35
3.5 <u>Liaison des accéléromètres</u>	37

TABLE DES MATIÈRES (suite)

<u>SECTION</u>	<u>PAGE</u>
4.- <u>CHAÎNES DE MESURE</u>	41
4.1 <u>Système d'acquisition à plusieurs canaux</u>	41
4.2 <u>Système portable à lecture directe</u>	44
5.- <u>EXIGENCES INSTRUMENTALES ET ÉTALONNAGE</u>	47
6.- <u>MESURAGE DES VIBRATIONS</u>	49
6.1 <u>Mode d'intégration linéaire</u>	49
6.2 <u>Approximation dans le cas de vibrations stationnaires</u>	50
6.3 <u>Mode d'intégration exponentielle</u>	51
6.4 <u>Approximation dans le cas de signaux intermittents</u>	51
6.5 <u>Approximation dans le cas de l'exécution de travaux variés</u>	52
7.- <u>CARACTÉRISTIQUES NON-VIBRATIONNELLES DE L'EXPOSITION ET GRILLE D'ÉVALUATION</u>	55
7.1 <u>Caractéristiques de la machine-outil</u>	55
7.2 <u>Caractéristiques de la/les tâche(s)</u>	55
7.3 <u>Expérience professionnelle du travailleur</u>	56

TABLE DES MATIÈRES (suite)

<u>SECTION</u>	<u>PAGE</u>
8.- <u>ANALYSE DES VIBRATIONS</u>	63
8.1 <u>Calcul de la valeur efficace de l'accélération pondérée</u> ..	63
8.1.1 Méthode d'intégration fréquentielle par bandes de tiers d'octave	63
8.1.2 Méthode d'intégration temporelle	65
8.2 <u>Estimation du risque associé à l'exposition aux vibrations</u>	65
8.3 <u>Évaluation du facteur de crête</u>	69
8.3.1 Méthode approximative de calcul du facteur de crête	69
8.3.2 Méthode exacte d'évaluation du facteur de crête	70
9.- <u>UN EXEMPLE: ÉVALUATION DE L'EXPOSITION AUX VIBRATIONS MAINS-BRAS SUR UNE MEULEUSE PORTATIVE</u>	73
9.1 <u>Application de la grille d'évaluation</u>	73
9.2 <u>Mesure de la valeur efficace de l'accélération pondérée</u> ..	73
9.3 <u>Mesure du facteur de crête</u>	82
9.4 <u>Application de la relation dose-effet</u>	82
9.5 <u>Recommandations sur des mesures préventives</u>	83
10. <u>CONCLUSION</u>	85
11. <u>RÉFÉRENCES</u>	87

LISTE DES FIGURES

<u>FIGURE</u>	<u>PAGE</u>
1 - Systèmes de coordonnées biodynamique et basicentrique pour mesurer l'exposition aux vibrations mains-bras dans les directions x_h , y_h et z_h	19
2a - Points de détection et orientation des axes de mesure pour quelques espèces de machines rotatives	22
2b - Points de détection et orientation des axes de mesure pour quelques espèces de machines percutantes	23
3a - Courbes de réponse en fréquence pour l'ensemble composé de l'adaptateur B & K et de la main (accéléromètres miniatures B & K 4374)	25
3b - Courbes de réponse en fréquence pour l'adaptateur B & K modifié à l'IRSST et muni d'accéléromètres B & K 4393. (adaptateur fixé rigidement sans intervention de la main)	25
4 - Montage expérimental utilisé pour mesurer la courbe de transmissibilité d'un adaptateur en direction y_h lorsque muni d'un accéléromètre triaxial	26
5 - Diagrammes techniques décrivant un adaptateur (a) cylindrique et (b) sphérique	28
6 - Courbes de réponse en fréquence pour deux adaptateurs munis d'accéléromètres B & K 4393.	29
7 - Courbes de réponse en fréquence pour deux adaptateurs munis d'un accéléromètre triaxial B & K 4321.	31
8 - Modes de fixation des accéléromètres sur les machines rotatives et alternatives	32

LISTE DES FIGURES (suite)

<u>FIGURE</u>	<u>PAGE</u>
9 - Modes de fixation des accéléromètres sur les machines percutantes et roto percutantes	34
10 - Courbes de réponse en fréquence de l'accéléromètre B & K 4393 avec et sans filtre mécanique	36
11 - Mode de fixation des accéléromètres sur une surface recouverte de matériau visco-élastique	38
12 - Courbe de pondération en fréquence pour le système mains-bras	42
13 - Chaîne d'instrumentation détaillée pour mesurer l'exposition aux vibrations mains-bras	43
14 - Grille d'évaluation de l'exposition aux vibrations mains-bras	57
15 - Susceptibilité d'atteinte du phénomène de Raynaud en fonc tion de la durée quotidienne et du nombre d'années d'exposition aux vibrations générées par une meuleuse pneumatique verticale en situation réelle de travail ($a_{h,w} = 20,5 \text{ ms}^{-2}$)	67
16 - Évaluation des facteurs de crête positif et négatif à partir de la densité de probabilité cumulée	71
17 - Grille d'évaluation de l'exposition aux vibrations mains- bras due à l'opération de meuleuses pneumatiques verticales	74
18 - Spectre en fréquence pondéré en bandes de 1/3 d'octave	81

LISTE DES TABLEAUX

<u>TABLEAU</u>	PAGE
1 - Liste des modèles et des caractéristiques d'accéléromètres utilisés dans différentes études pour mesurer l'exposition aux vibrations mains-bras pour différentes familles de machines/outils	14
2 - Sélection des accéléromètres pour mesurer l'exposition aux vibrations mains-bras sur différentes familles de machines/outils	18
3 - Valeurs limites d'exposition aux vibrations mains-bras proposées par la Conférence Américaine Gouvernementale d'Hygiénistes Industriels (ACGIH)	68
4 - Valeurs efficaces d'accélération pondérées mesurées sur chaque poignée d'une meuleuse pneumatique verticale, 12000 rpm	80

1.- INTRODUCTION

Certains outils ou machines percutantes, roto-percutantes, rotatives ou alternatives peuvent transmettre des vibrations intenses aux mains et aux bras de leurs utilisateurs. Sur le plan professionnel, l'utilisation habituelle et prolongée de machines vibrantes tenues à la main est à l'origine de troubles et lésions qui sont de plusieurs ordres [1]: vasculaire, nerveux, musculaire ou osseux. L'atteinte la plus connue est le phénomène de Raynaud, caractérisé par le blanchissement du bout des doigts. Dans les cas graves, les vaisseaux sanguins ne sont plus capables de se contracter et de se dilater, causant un ralentissement de la circulation sanguine, d'où le risque occasionnel d'entraîner la gangrène.

L'usage répandu d'outils vibrants portatifs de toutes sortes dans les différents secteurs d'activité économique (équipements de transport, fabrication de produits en métal, scieries, meubles, transformation des métaux, fabrication de machines), associé à une prise de conscience grandissante des risques physio-pathologiques liés à l'exposition aux vibrations mains-bras ont amené la Conférence américaine gouvernementale d'hygiénistes industriels des États-Unis ("ACGIH") à introduire des limites d'exposition pour les vibrations mains-bras dans leurs guides des TLVS (valeurs limites de tolérance aux agresseurs chimiques, physiques et biologiques) publiés depuis 1984 [2].

La méthodologie de mesure et d'évaluation de l'exposition aux vibrations transmises par les mains proposée dans ce guide est celle de la norme ISO 5349 [3] de l'Organisation internationale de normalisation. Cette norme découle des recommandations adoptées en 1986 par le Comité technique 108, sous-comité 4 de l'ISO: "Exposition des individus aux vibrations et chocs mécaniques".

La norme ISO 5349 spécifie les règles générales à observer pour mesurer, analyser et rapporter l'exposition aux vibrations mains-bras dont la fréquence varie entre 5 et 1500 Hz. Elle s'applique à la mesure de l'exposition aux vibrations résultant de l'opération de différentes catégories d'outils ou de machines tenues et guidées à la main sans toutefois accorder de distinction particulière entre les méthodes utilisées pour les

différentes catégories d'outils. Ceci constitue en soit un problème puisque cette norme représente le seul guide disponible pour évaluer l'environnement vibratoire à différents postes de travail, qui impliquent l'opération de machines ou d'outils dont les caractéristiques physiques et vibratoires peuvent varier beaucoup. Bien que la méthodologie de base soit essentiellement la même indépendamment des espèces d'outils ou de machines, des différences importantes dans la méthode de mesure peuvent s'avérer nécessaire entre différentes espèces d'outils, spécialement en ce qui a trait au choix de l'accéléromètre, à la direction des mesures, à l'emplacement du capteur sur l'outil, au mode de fixation du capteur, à la durée de la mesure, aux problèmes potentiels inhérents aux vibrations produites par l'outil. Cette lacune de la norme est d'ailleurs soulevée dans le document ISO 5349, qui stipule que des normes additionnelles devront être envisagées pour évaluer les vibrations d'outils ou de procédés particuliers.

Dans cette optique, la présente étude porte essentiellement sur la proposition d'une méthodologie pour mesurer, analyser et rapporter l'exposition aux vibrations mains-bras pour différentes machines ou outils rencontrés en milieu de travail. Ce rapport ne constitue cependant pas une proposition de norme mais vise plutôt à favoriser la tâche de ceux qui, oeuvrant pour l'amélioration de l'hygiène industrielle, sont appelés à évaluer l'environnement vibratoire à différents postes de travail. La méthodologie proposée est basée principalement sur la norme ISO 5349, de concert avec des rapports d'exposition aux vibrations publiés dans la littérature et des codes d'essais publiés par divers organismes de normalisation pour différentes catégories d'outils. Les résultats d'essais en laboratoire et des mesures effectuées en milieu de travail servent également de guide au développement de cette méthodologie.

2.- EFFORTS DE NORMALISATION - REVUE DES NORMES EXISTANTES

La mesure des vibrations transmises aux mains par des machines ou outils tenus et guidés à la main peut avoir comme objectif: i) l'évaluation du risque de troubles physiologiques résultant de l'exposition aux vibrations dans des conditions réelles d'utilisation des machines en milieu de travail ou ii) la comparaison des vibrations émises par des machines-outils d'une même espèce ou d'espèces différentes dans le but d'estimer des améliorations apportées par la prévention technique.

Depuis quelques années, plusieurs organismes internationaux se sont attardés au deuxième objectif en tentant d'élaborer des codes d'essais en laboratoire pour tâcher d'associer à différents types d'outils ou de machines un niveau de vibrations qui, similairement au bruit, caractériserait la machine ou l'outil et permettrait aux utilisateurs de choisir les outils les moins vibrants. Certains organismes ont fait des travaux considérables à ce niveau dont le Comité Européen des Constructeurs de Compresseurs, Pompes à Vide et Outils à Air Comprimé (PNEUROP), l'Institut National de Recherche et de Sécurité de France (INRS), l'Institut de l'Air et Gaz Comprimés des États-Unis (CAGI) et le Comité Allemand de normalisation VDI, FANAK C7.4.

Ces travaux se sont soldés par la publication par PNEUROP de deux propositions de codes d'essais [4,5], un pour les meuleuses portatives (PNEUROP 6610-1983), l'autre pour les marteaux burineurs (PNEUROP 661600-1985). De son côté, les travaux de l'INRS ont mené à la publication de trois normes AFNOR [6,7,8]: la première introduisant les règles générales pour élaborer des codes d'essais (AFNOR 90-320), la deuxième s'adressant aux machines portatives rotatives, à meuler, tronçonner, poncer, lustrer, polir, tenues et guidées à la main (AFNOR E90-321) et la troisième s'adressant aux machines percutantes telles que brise-béton, marteaux-piqueurs, fouloirs, machines à damer et burineurs (AFNOR E90-322). Le Comité Allemand VDI FANAK C7.4 a, quant à lui, publié la norme DIN 45675 dont la première partie traite de la procédure générale d'évaluation des vibrations [9], la deuxième s'adresse aux tronçonneuses (scies à chaîne), la troisième aux débroussailleuses, la qua-

trième aux perceuses percutantes, la cinquième aux marteaux percutants et la sixième aux perceuses à came. Des travaux se poursuivent par ce comité pour élaborer une norme traitant des meuleuses et des brise-béton.

Dans un effort commun de combiner les résultats de ces codes d'essais dans une seule et unique norme, le Comité technique 118, sous-comité 3 de l'ISO "Compresseurs, outils et machines pneumatiques" a reçu le mandat de produire une norme internationale décrivant des codes d'essais pour différents types d'outils. Un avant-projet de norme [10] (ISO/DIS 8662/1) a fait son apparition décrivant les principes de base des mesures. Cet avant-projet doit être suivi par une série de documents traitant d'outils ou de machines spécifiques.

Malgré le nombre important de codes d'essais produits à ce jour, quelques organismes (e.g. PNEUROF, INRS) poursuivent leurs travaux dans le but d'améliorer les méthodes décrites dans ces codes pour produire un degré de répétabilité encore meilleur des niveaux de vibration lorsque la machine ou l'outil est soumis à une série d'essais consécutifs dans des conditions identiques d'opération. La difficulté à atteindre un degré satisfaisant de répétabilité dans des conditions d'opérations similaires au milieu de travail constitue le problème fondamental à surmonter pour valider ces codes d'essais.

Nonobstant ces difficultés, les codes d'essais pour mesurer en laboratoire les vibrations émises pour les différentes machines ou outils comportent plusieurs éléments qui sont susceptibles de s'appliquer à l'évaluation de l'exposition aux vibrations dans des conditions réelles d'utilisation. Ces éléments, combinés à la norme ISO 5349 et à l'avant-projet de norme ISO/DIS 8041 [11] traitant de l'instrumentation, constituent les éléments de base à l'élaboration de la méthodologie proposée dans les sections qui suivent.

3.- DÉTECTION DE LA CONTRAINTE VIBRATOIRE EN MILIEU DE TRAVAIL

3.1 Grandeur de base

L'accélération efficace exprimée en mètres par seconde carrée (ms^{-2}) constitue la grandeur de base pour caractériser l'intensité de l'environnement vibratoire [3,12]. Bien que dans certaines études [13], l'énergie vibratoire dissipée dans le système mains-bras (fonction de la force dynamique, de la vitesse de la vibration et du déphasage entre la force et la vitesse) ait été proposée comme paramètre pouvant le mieux exprimer les effets nocifs des vibrations, c'est l'accélération qui a été retenue puisqu'elle permet une mesure simple et directe de la contrainte vibratoire tout en permettant d'être reliée à la force, à la vitesse et au déplacement du signal vibratoire [14]. Cependant, certaines questions persistent quant au choix de l'accélération comme indice de l'ordre de sévérité des vibrations surtout lorsqu'il est considéré qu'une augmentation de la force de préhension, de la force statique ou de la masse de la main sur l'outil contribuent à faire diminuer l'accélération mesurée sur la poignée alors que la transmissibilité des vibrations aux mains est en réalité augmentée [15].

3.2 Sélection de l'accéléromètre et recommandations

L'accéléromètre piézoélectrique est de loin le capteur le plus communément utilisé pour effectuer les mesures de vibrations aux mains et bras. Cette préférence envers ces capteurs est due à plusieurs facteurs, dont leur large gamme d'amplitude mesurable, qui pour certains modèles, peut atteindre un rapport de $10^6:1$ (120 dB) entre l'accélération instantanée maximale et minimale [15]. De plus, la linéarité et la stabilité de leur réponse sur une grande gamme de fréquences leur permet de mesurer facilement les vibrations mains-bras dont la fréquence d'intérêt varie entre 5 et 1500 Hz [3].

Dans le tableau 1, les résultats d'une recherche bibliographique sont présentés dans le but d'identifier les types de capteurs utilisés dans différentes études publiées dans la littérature, rapportant des mesures d'exposition aux vibrations mains-bras pour différentes espèces d'outils. Dans plusieurs cas, les modèles utilisés ne sont plus disponibles commercialement mais ont été remplacés par d'autres modèles équivalents. Les données du tableau permettent d'établir quelles devraient être les caractéristiques recherchées du capteur idéal pour chaque famille d'outils.

TABLEAU 1: LISTE DES MODÈLES ET DES CARACTÉRISTIQUES D'ACCÉLÉROMÈTRES UTILISÉS DANS DIFFÉRENTES ÉTUDES POUR MESURER L'EXPOSITION AUX VIBRATIONS MAINS-BRAS POUR DIFFÉRENTES FAMILLES DE MACHINES/OUTILS

FAMILLE	ESPÈCE	ACCÉLÉROMÈTRES	CARACTÉRISTIQUES				AUTEURS	
			Masse (g)	Sensibilité en tension (mV/ms ⁻²)	Fréquence de résonance (kHz)	Accélération maximale supportée (ms ⁻²)		
Machines rotatives	Meuleuse verticale avec meule disque	Columbia Research Modèle 6063 B & K 8307 (D) B & K 4375*	0.4	0.22	75	1 x 10 ⁵	Reynolds et coll. [16]	
			2.4	0.48	55	2.5 x 10 ⁵	Glass [17] Pekkarinen et coll. [18]	
			55	0.80	40	5 x 10 ³	Boileau et coll. [19]	
	Meuleuse horizontale	Columbia Research Modèle 6063	B & K 4321	55	0.80	40	5 x 10 ³	Reynolds et coll. [16]
				28	4.0	27	5 x 10 ⁴	Starck [20]
				11	0.80	42	6 x 10 ⁴	Starck [20]
				2	0.25	70	1.4 x 10 ⁵	Yamawaki [21]
				2	0.25	70	1.4 x 10 ⁵	Suggs et coll. [22]
				2	0.25	70	1.4 x 10 ⁵	Suggs et coll. [22]
				55	0.80	40	5 x 10 ³	Starck et coll. [23]
Machines percutantes	Marteau burineur	B & K 4375* B & K 8309* Endevco 2225	2.4	0.48	55	2.5 x 10 ⁵	Starck [20]	
			3	0.04	180	1 x 10 ⁶	Pekkarinen et coll. [18] Reynolds et coll. [16] Auerbach [24]	

* indique l'utilisation d'un filtre mécanique entre la structure et l'accéléromètre
(D) modèle d'accéléromètre "fin de série"

TABEAU 1: LISTE DES MODÈLES ET DES CARACTÉRISTIQUES D'ACCÉLÉROMÈTRES UTILISÉS DANS DIFFÉRENTES ÉTUDES (suite)
POUR MESURER L'EXPOSITION AUX VIBRATIONS MAINS-BRAS POUR DIFFÉRENTES FAMILLES DE MACHINES/OUTILS

FAMILLE	ESPÈCE	ACCÉLÉROMÈTRES	CARACTÉRISTIQUES				AUTEURS
			Masse (g)	Sensibilité en tension (mV/ms ⁻²)	Fréquence de résonance (kHz)	Accélération maximale supportée (ms ⁻²)	
Machines percutantes	Brise-béton	B & K 4374*	0.65	0.18	85	2.5 x 10 ⁵	Tasker [25] Reynolds [26] Bitsch et coll. [27]
		B & K 8309*	3	0.04	180	1 x 10 ⁶	
		B & K 4340* (D)	Triaxial				
	Marteau-piqueur	B & K 4344 (D)	2	0.25	70	1.4 x 10 ⁵	Farkkila et coll. [28] Farkkila et coll. [28]
		B & K 4371	11	0.80	42	6 x 10 ⁴	
Machines roto-percutantes	Perceuse à percussion	B & K 8307 (D)	0.4	0.22	75	1 x 10 ⁵	Glass et coll. [29] Rodgers et coll. [30]
		B & K 4369* (D)	14	1.8	32	1 x 10 ⁵	
	Marteau perforateur	B & K 8309*	3	0.04	180	1 x 10 ⁶	Reynolds [26] Suggs et coll. [22]
B & K 4344 (D)		2	0.25	70	1.4 x 10 ⁵		
Autres	Tournevis pneumatique	Bolt, Beranek and Newman, modèle 506					Radwin et coll. [31]
		B & K 4338 (D)					
	Guidon de motocyclette	B & K 4369* (D)	14	1.8	32	1 x 10 ⁵	Harrison et coll. [32] Bentley et coll. [33]
		B & K 4321	55	0.80	40	5 x 10 ³	
	Manettes d'un bélier mécanique					Boileau et coll. [34]	

* indique l'utilisation d'un filtre mécanique entre la structure et l'accéléromètre
 (D) modèle d'accéléromètre "fin de série"

D'après les données du tableau 1, plusieurs facteurs doivent être considérés lorsqu'il s'agit de sélectionner un accéléromètre. La masse du capteur et de son montage doit généralement être aussi faible que possible afin de ne pas modifier de façon importante les vibrations qui auraient été transmises aux mains avant l'installation du capteur. Compte tenu des données du tableau 1 et des recommandations faites dans les codes d'essais [7,8], les limites supérieures suivantes sont proposées pour la masse de l'ensemble composée du capteur et de son montage:

- i) 120 grammes lorsqu'il n'y a qu'un seul point de détection;
- ii) 100 grammes par ensemble lorsqu'il y a deux (2) points de détection.

La sensibilité de l'accéléromètre (mesurée en millivolts par mètre par seconde carrée mV/ms^{-2} ou en picocoulomb par mètre par seconde carrée pC/ms^{-2}) doit être sélectionnée en fonction des niveaux de vibrations susceptibles d'être mesurés. De façon générale, la mesure de vibrations sur des machines-outils percutants ou roto-percutants requiert un capteur dont la sensibilité est beaucoup moindre que pour des outils rotatifs ou alternatifs. Par exemple, dans le cas d'un marteau burineur, l'accélération instantanée sur le burin peut atteindre $6 \times 10^4 \text{ ms}^{-2}$ [16], nécessitant donc un accéléromètre de faible sensibilité et de forte résistance aux chocs. Le niveau d'accélération maximal pouvant être détecté sans détruire l'accéléromètre est généralement indiqué sur la fiche de celui-ci et peut atteindre 10^6 ms^{-2} pour certains modèles de capteur [16]. Il y a avantage à ce que l'accéléromètre soit en mesure de supporter une accélération de valeur crête supérieure à 10^5 ms^{-2} pour les machines-outils percutants et roto-percutants (tableau 1). Pour les autres familles de machines-outils, l'accéléromètre devrait être en mesure de supporter une accélération crête de plus de $5 \times 10^3 \text{ ms}^{-2}$.

Parmi les autres facteurs à considérer dans le choix de l'accéléromètre, il y a la fréquence de résonance qui doit normalement être supérieure à la fréquence maximale à mesurer, multipliée par un facteur d'au moins cinq. Compte tenu de la classe des fréquences d'intérêt pour l'exposition aux vibrations mains-bras, la fréquence de résonance des accéléromètres ne devrait pas être inférieure à 10 kHz pour éviter d'introduire des

non-linéarités dans la réponse, particulièrement lorsque l'accéléromètre est soumis à des chocs dont la période peut facilement être inférieure à 1ms [20]. Quant à la sensibilité transversale de l'accéléromètre, elle doit être maintenue aussi faible que possible; dans tous les cas, inférieure à 10% (20dB) de la sensibilité selon l'axe principal de détection [3].

Enfin, les accéléromètres doivent être insensibles aux transitoires de température qui risquent de produire des variations de la sensibilité en tension de l'accéléromètre, particulièrement aux basses fréquences [20]. Ces effets peuvent être minimisés par l'utilisation d'accéléromètres dont le montage est à cisaillement delta ("delta shear"); ces derniers étant rendus populaires par la firme Bruël & Kjaer. L'usage de ces accéléromètres est très répandu comme le démontrent les données apparaissant dans le tableau 1.

Le tableau 2 présente un sommaire des exigences que doivent rencontrer les accéléromètres pour mesurer l'exposition aux vibrations mains-bras pour différentes familles d'outils. Ce tableau est complété par des recommandations de modèles particuliers d'accéléromètres qui rencontrent ces exigences. Les recommandations faites sont basées sur des modèles d'accéléromètres B & K, utilisés dans nos laboratoires. Cependant, il peut s'avérer que d'autres marques et modèles d'accéléromètres existent qui rencontrent les exigences prescrites.

3.3 Direction des mesures et points de détection

3.3.1 Systèmes de coordonnées

La norme ISO 5349 définit deux systèmes de coordonnées pour mesurer l'exposition aux vibrations dans trois directions perpendiculaires x_h , y_h et z_h . Ces systèmes sont représentés figure 1. Le premier est le système de coordonnées biodynamique pour lequel l'origine se situe dans la tête du troisième métacarpien de la main tenant la machine, l'axe z_h étant défini par l'axe longitudinal de cet os.

L'axe x_h est alors perpendiculaire à la paume de la main tandis que l'axe y_h est dans le plan de la main. Ce système s'avère cependant difficile à utiliser puisque l'orientation des axes de mesure varie selon l'orientation

IRSS - RA-025

Annexe au rapport de recherche

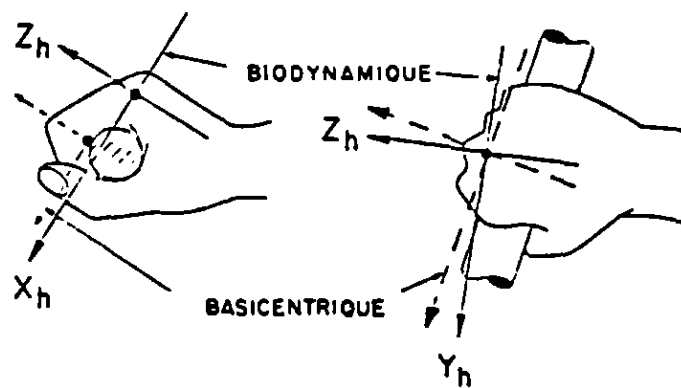
TABLEAU 2: SÉLECTION DES ACCÉLÉROMÈTRES POUR MESURER L'EXPOSITION AUX VIBRATIONS MAINS-BRAS SUR DIFFÉRENTES FAMILLES DE MACHINES/OUTILS

FAMILLE DE MACHINE/OUTIL	ACCÉLÉROMÈTRES PIÉZOÉLECTRIQUES EXIGENCES À RESPECTER						MODÈLES PROPOSÉS	
	Gamme d'amplitude mesurable (dB)	Masse (incluant son montage) un point / 2 points de mesure (g)	Accélération crête à supporter (ms ⁻²)	Fréquence de résonance (kHz)	Sensibilité transversale p.r. à l'axe dominant (%)	triaxial	uni-axial	
ROTATIVES (meuleuses, tronçonneuses, ponceuses, perceuses, scies circulaires)	100	120 / 100	5 x 10 ³	>10	<10	B&K 4321	B&K 4375**/ 4393(1) 4371/4384	
ALTERNATIVES (scies sauteuses, grignoteuses, ponceuses orbitales et alternatives, burins décalamineurs)	100	120 / 100	5 x 10 ³	>10	<10	B&K 4321	B&K 4375**/ 4393 4371/4384	
PERCUTANTES (clocheuses, marteaux piqueurs, brise-béton, perforateurs, burineurs, piqueurs)	120	120 / 100	10 ⁵	>10	<10	-	B&K 8309 * B&K 4375**/ 4393*	
ROTOPERCUTANTES (marteaux perforateurs, perceuses à percussion, burins décalamineurs)	120	120 / 100	10 ⁵	>10	<10	-	B&K 8309* B&K 4375**/ 4393*	

(1) Les accéléromètres qui sont regroupés (e.g. B&K 4375/4393) possèdent les mêmes caractéristiques mais la position ou le type de connecteur varie selon le modèle

* Accéléromètres à utiliser en conjonction avec un filtre mécanique

** L'accéléromètre B & K 4375 ne comporte pas de connecteur lui permettant d'échanger le câble. Son utilisation entraînerait la perte totale de l'accéléromètre si le câble était coupé ou détruit.



— Système biodynamique
- - - Système basicentrique

Figure 1: Systèmes de coordonnées biodynamique et basicentrique pour mesurer l'exposition aux vibrations mains-bras dans les directions x_h , y_h et z_h .

de la main. Un deuxième système de coordonnées, connu sous le nom de basicentrique est proposé, ayant comme origine un point à l'interface entre la main et la surface vibrante. Ce système permet de se référer à des axes typiques de la machine ou de l'outil (e.g. axe de rotation d'une machine rotative, axe de percussion d'une machine percutante, axe de la poignée). Dans le cas d'une main agrippant une poignée, l'axe y_h est parallèle à l'axe de la poignée. Cependant, l'orientation des axes x_h , y_h et z_h est très dépendante de la géométrie de la machine-outil.

3.3.2 Zones de fixation des accéléromètres et orientation pour différentes espèces d'outils

Bien que trois directions x_h , y_h et z_h soient spécifiées pour mesurer les vibrations mains-bras, la norme ISO 5349 n'exige en réalité que des mesures ne soient effectuées que dans une seule direction puisque c'est la composante directionnelle dominante des vibrations qui est utilisée pour évaluer l'importance de l'exposition par rapport à la relation "dose-effet" proposée dans l'annexe de cette norme. La composante dominante apparaît généralement selon l'axe de rotation d'une machine rotative ou l'axe de percussion d'une machine percutante. Il peut cependant y avoir des exceptions, [16] d'où l'importance d'effectuer quelques mesures préliminaires pour déterminer la direction vibratoire dominante.

Pour les mêmes raisons, la norme ISO 5349 n'exige que des mesures ne soient effectuées qu'à un seul des deux endroits où les mains sont en contact avec la machine ou outil, à la condition bien sûr de connaître lequel des deux endroits doit mener au niveau de vibration le plus important. En effet, certains résultats d'études démontrent par exemple qu'il y a généralement prédominance des vibrations sur la poignée avant d'une tronçonneuse [35,36], sur la poignée d'une meuleuse verticale sur laquelle il n'y a pas de gachette [19] ou encore sur le burin d'un marteau burineur [16]. Dans le cas de machines comportant des poignées symétriques (e.g. meuleuses verticales, brise-béton), il est préférable de ne mesurer que sur celle qui ne comporte pas la gachette servant à actionner l'outil [8]. Dans les autres cas, l'endroit où la main est le plus près de l'outil de la machine (e.g. meule, forêt) constitue l'endroit à privilégier pour les mesures.

Dans d'autres circonstances où les mesures sont effectuées dans le but de faire certaines recherches particulières ou d'évaluer l'exposition selon des normes qui considèrent l'effet cumulatif tridirectionnel des vibrations (e.g. AFNOR E90-402 [12]), il peut s'avérer nécessaire d'évaluer les vibrations selon trois directions à chacun des deux endroits où les mains sont en contact avec l'outil, rendant ainsi l'évaluation beaucoup plus complexe.

Des schémas de différentes espèces de machine-outil sont présentés dans les figures 2a et 2b sur lesquels sont indiqués les points de détection des vibrations ainsi que l'orientation des axes de mesure correspondant au système de coordonnées basicentrique.

3.4 Fixation mécanique des accéléromètres

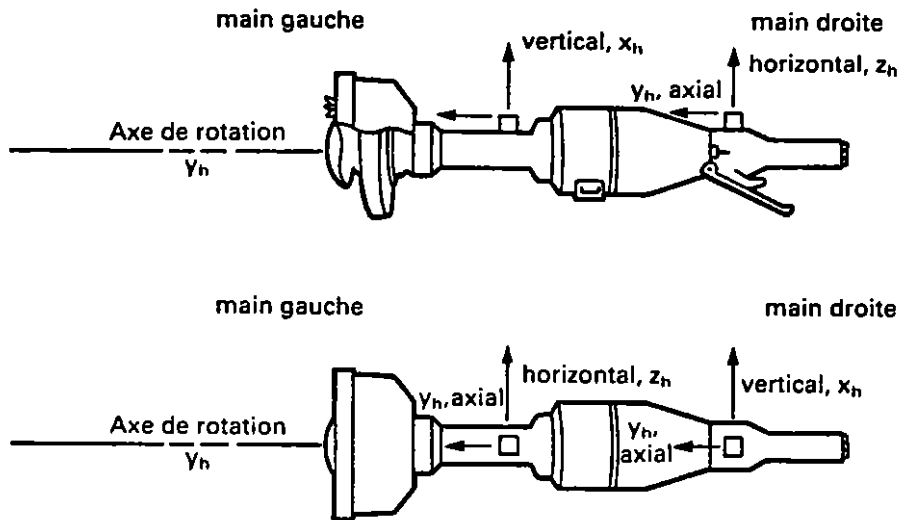
Afin d'évaluer les vibrations actuellement transmises aux mains, la mesure doit idéalement être effectuée à l'interface entre les mains et la surface vibrante puisque la force statique exercée pour maintenir la machine-outil, la force de préhension de la main ainsi que la masse de la main sont des facteurs susceptibles d'influencer les niveaux de vibrations [15,37]. Puisqu'il n'existe pas d'accéléromètres piézoélectriques suffisamment petits pour être insérés entre la main et la surface vibrante sans nuire à la personne exposée, deux solutions alternatives peuvent être considérées: 1- utiliser un adaptateur intercalé entre les doigts et sur lequel l'accéléromètre est monté, ou 2- fixer l'accéléromètre directement sur la surface vibrante à un endroit situé le plus près possible de la main [38].

3.4.1 Problèmes reliés à l'utilisation d'adaptateurs

De ces deux solutions, l'utilisation de l'adaptateur a l'avantage de prendre en considération les effets liés à la force statique, à la force de préhension et à la masse de la main et de mesurer les vibrations à un point de contact entre la main et la structure vibrante. Pour être efficace, l'adaptateur doit cependant transmettre le plus fidèlement possible à l'accéléromètre les vibrations à l'interface de la main et de la surface

Figure 2a: Points de détection et orientation des axes de mesure pour quelques espèces de machines rotatives.

i) Meuleuses horizontales (Reynolds et coll. [16])



ii) Meuleuses verticales (Reynolds et coll. [16])

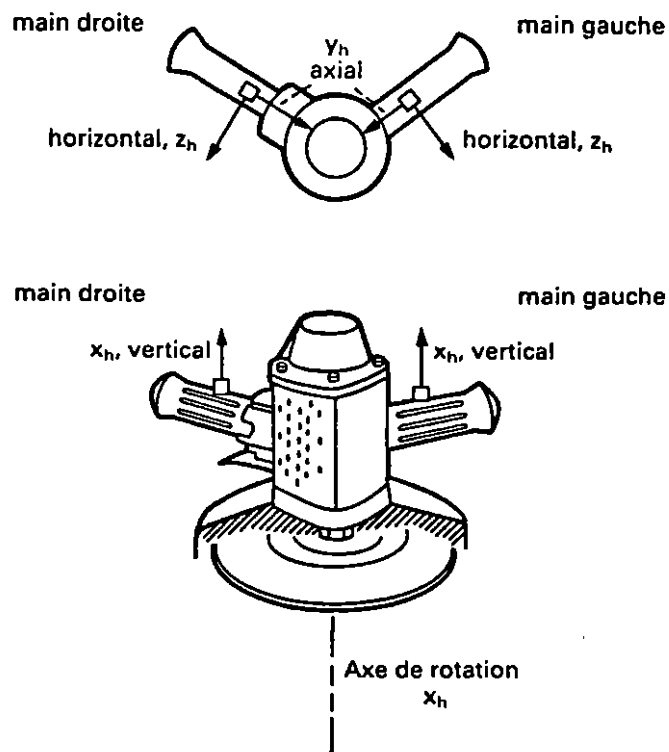
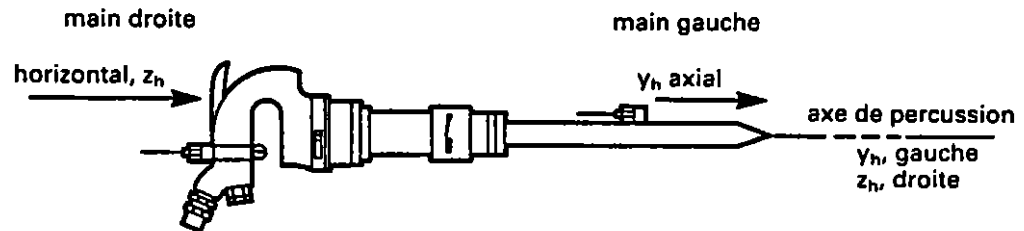
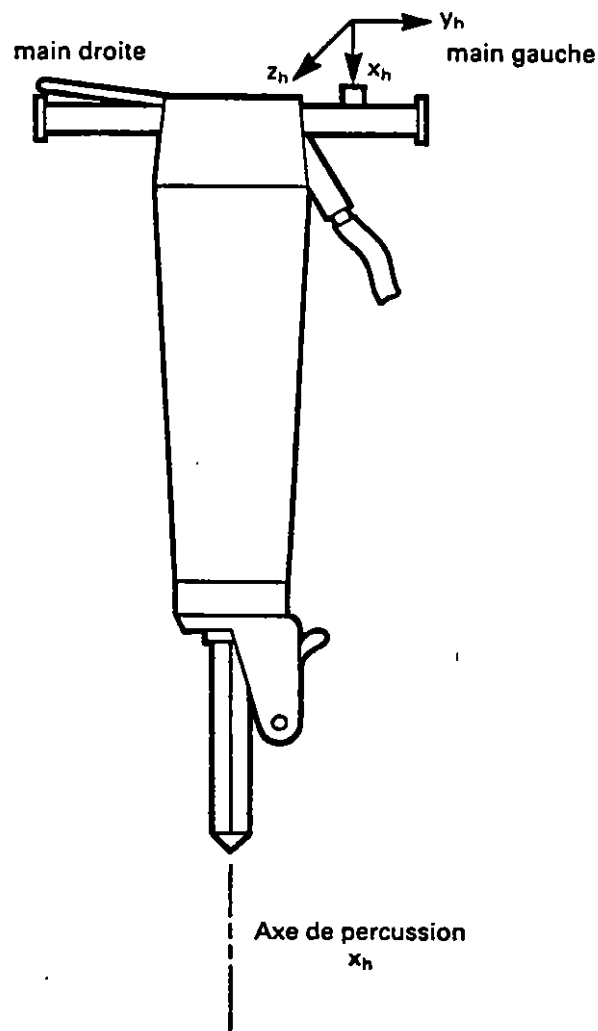


Figure 2b: Points de détection et orientation des axes de mesure pour quelques espèces de machines percutantes.

i) Marteaux burineurs (Reynolds et coll. [16])



ii) Brise-béton, marteaux-piqueurs



vibrante. Ceci requiert qu'il ait idéalement une transmissibilité unitaire dans la gamme de fréquences d'intérêt ainsi qu'une masse minimale par rapport à la surface vibrante.

Les travaux de Rasmussen [37] sur différents prototypes d'adaptateurs ont démontré que la majorité possédaient une fréquence de résonance dans la gamme de fréquences d'intérêt, notamment entre 5 et 1 500 Hz. Dans son étude, un seul adaptateur s'est avéré efficace pour reproduire fidèlement les vibrations en direction z_h lorsque l'adaptateur était maintenu à la main sur la surface vibrante. Cet adaptateur est maintenant commercialement disponible chez Brüel & Kjaer. Les courbes de réponse en fréquence produites par le fabricant apparaissent dans la figure 3a pour le système composé de l'adaptateur et de la main [39]. Ces courbes ont été produites en maintenant librement l'adaptateur sur une surface vibrante alors qu'il était muni de trois accéléromètres miniatures (B&K 4374).

Les courbes démontrent l'existence de quelques résonances aux plus hautes fréquences; c'est pourquoi l'utilisation de cet adaptateur est surtout recommandée pour les outils générant des vibrations de basses fréquences (moins de 300 Hz), la transmissibilité étant unitaire dans cette zone de fréquences.

3.4.2 Évaluation en laboratoire de la transmissibilité des adaptateurs

Nous avons modifié un adaptateur B&K afin de permettre l'utilisation d'accéléromètres B&K 4393 au lieu de B&K 4374. Les courbes de transmissibilité mesurées dans les directions x_h , y_h et z_h apparaissent dans la figure 3b. Ces courbes représentent la transmissibilité de l'adaptateur seulement, sans qu'il y ait intervention de la main. L'adaptateur modifié est alors maintenu rigidement sur la surface vibrante.

Le montage utilisé pour mesurer les courbes de transmissibilité selon les axes x_h et y_h est présenté dans la figure 4. Ce montage consiste en une plaque d'aluminium (masse de 1864 g) excité par un signal aléatoire (bruit rose) transmis par un excitateur électrodynamique de type B&K 4809. L'adaptateur, muni des accéléromètres, est fixé rigidement au centre de la plaque.

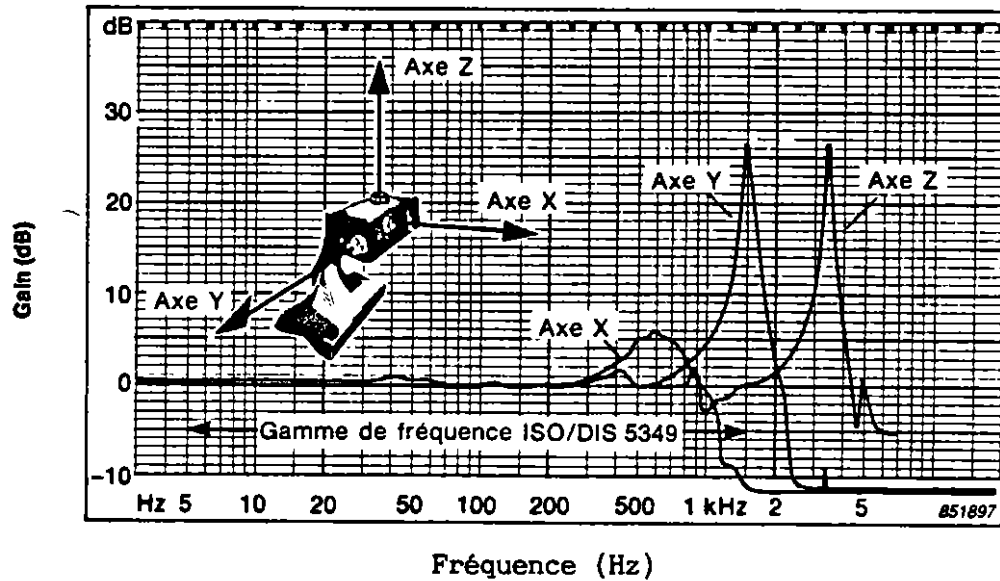


Figure 3a: Courbes de réponse en fréquence pour l'ensemble composé de l'adaptateur B & K et de la main (accéléromètres miniatures B&K 4374)

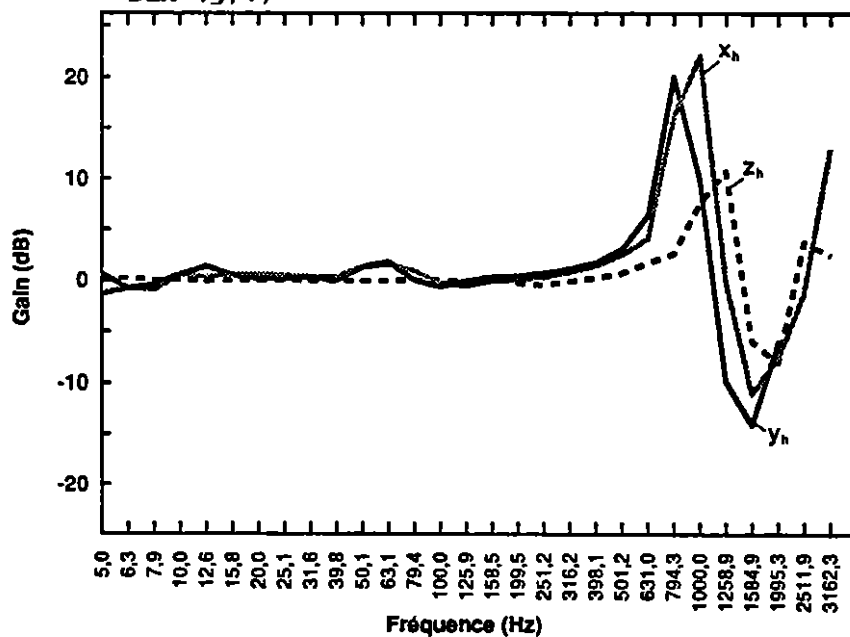


Figure 3b: Courbes de réponse en fréquence pour l'adaptateur B & K modifié à l'IRSST et muni d'accéléromètres B & K 4393 (adaptateur fixé rigidement sans intervention de la main)

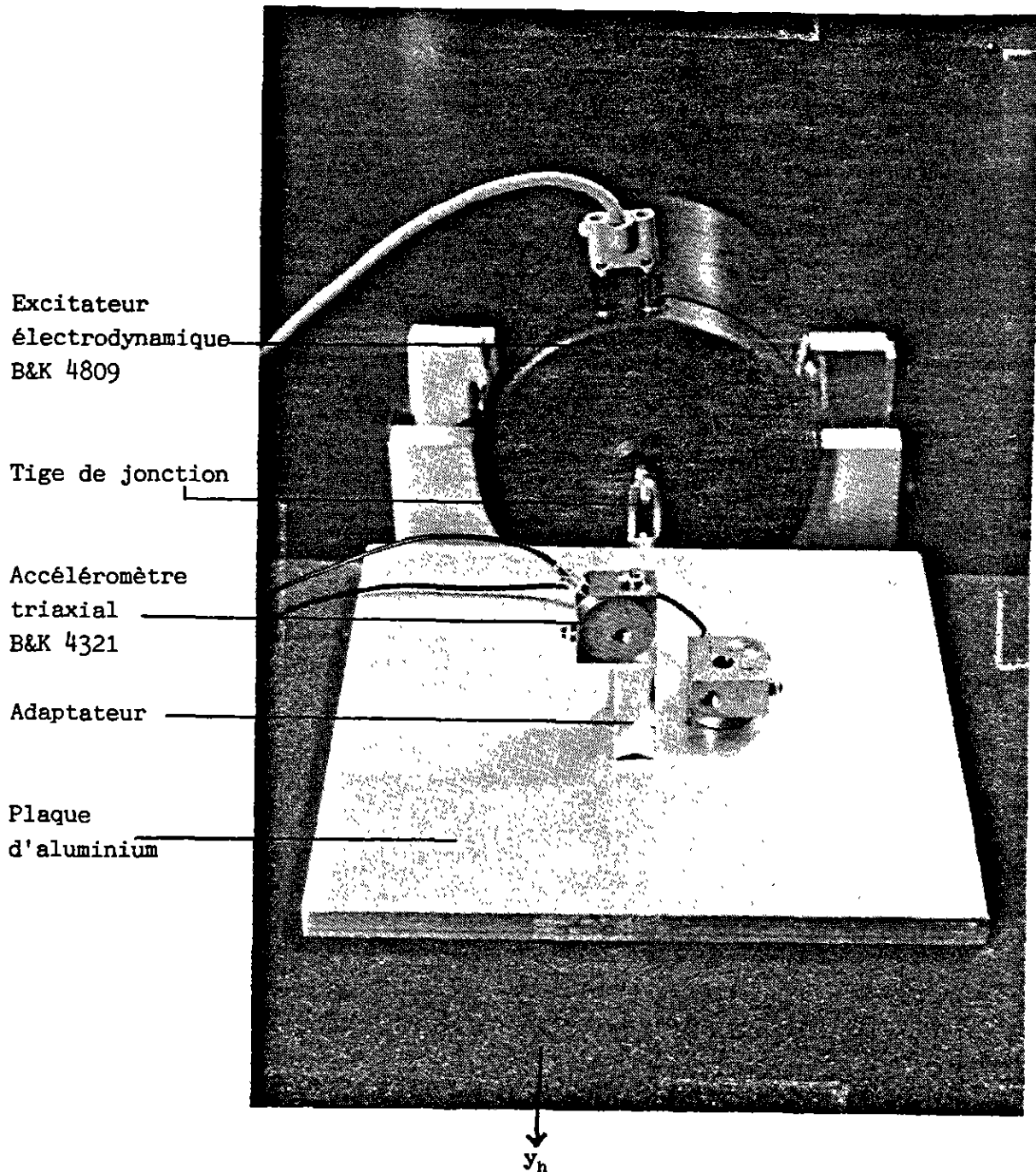


Figure 4: Montage expérimental utilisé pour mesurer la courbe de transmissibilité d'un adaptateur en direction y_h lorsque muni d'un accéléromètre triaxial.

Un capteur triaxial B&K 4321 fixé sur la plaque à proximité de l'adaptateur mesure les vibrations d'entrée. Le signal de sortie est mesuré par l'accéléromètre qui est monté sur l'adaptateur. L'orientation de l'adaptateur est changée selon l'axe x_h ou y_h mesuré. Pour obtenir la transmissibilité en direction z_h , l'adaptateur est monté directement sur l'excitateur.

Les courbes de transmissibilité de l'adaptateur Bruël & Kjaer modifié à l'IRSST démontrent que les fréquences de résonance du système adaptateur/accéléromètres apparaissent à des fréquences inférieures à 1500 Hz pour chacune des directions x_h , y_h et z_h . Au delà de 400 Hz, le signal vibratoire mesuré risque de varier de plus de 1 dB entre le niveau réel sur la poignée et le niveau mesuré. L'utilisation de cet adaptateur pour mesurer l'exposition aux vibrations mains-bras est donc problématique et non recommandable.

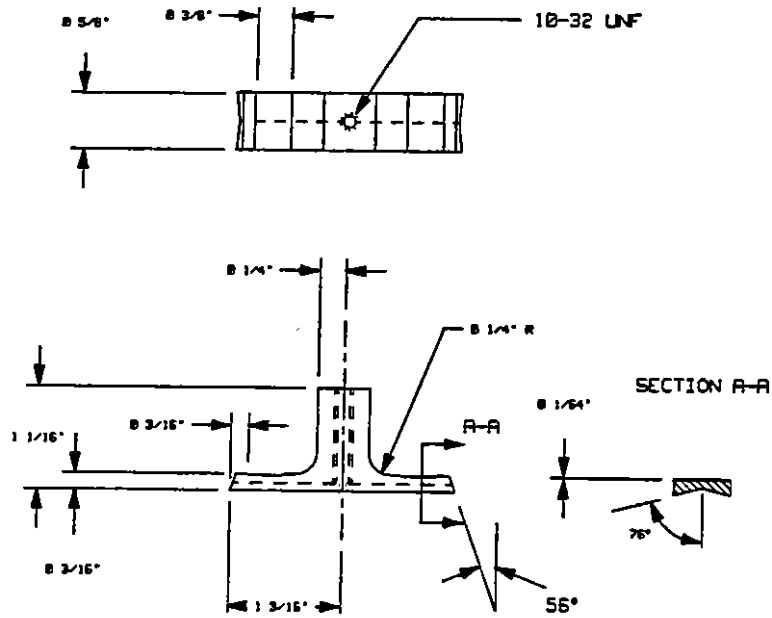
3.4.3 Description d'adaptateurs pour fixer les accéléromètres servant à mesurer l'exposition aux vibrations mains-bras

En se basant sur les recommandations de la norme AFNOR E 90-320 [6], nous avons conçu deux types d'adaptateur dont les diagrammes techniques apparaissent dans la figure 5. Le matériau utilisé est de l'aluminium.

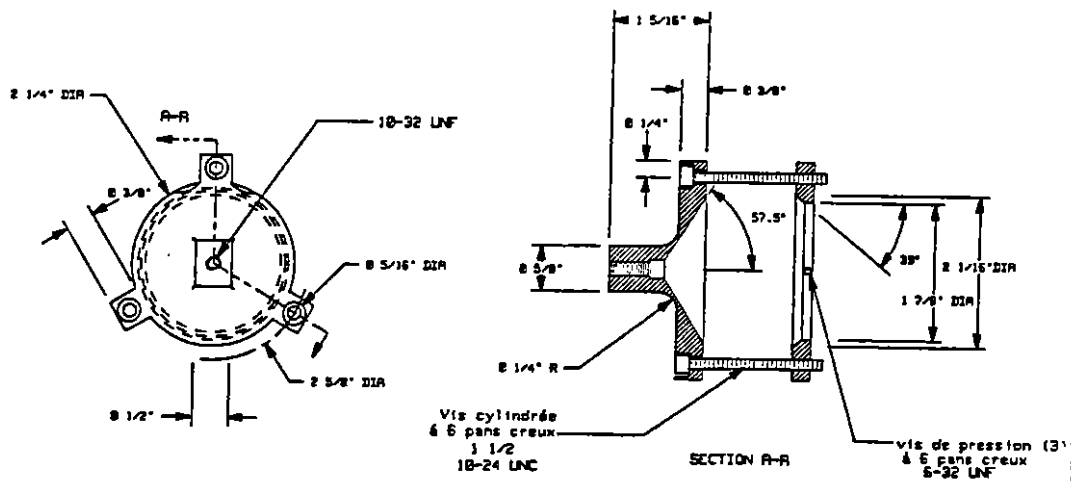
Le premier est conçu pour s'adapter à des zones de préhension de forme cylindrique, tandis que le deuxième, moins commun, est adaptable à une surface sphérique (e.g. manette d'un bélier mécanique [34]).

Ces deux types d'adaptateurs sont conçus de façon à ce qu'un cube comportant trois accéléromètres B&K 4393 puisse y être fixé. Lors de la mesure, l'adaptateur est intercalé entre les doigts, plus spécifiquement, entre le médium et l'annulaire.

Les courbes de transmissibilité de la combinaison adaptateur/accéléromètres sont présentés pour ces deux adaptateurs dans la figure 6 lorsque les accéléromètres utilisés sont de type B&K 4393. Afin de démontrer l'influence de la masse des capteurs sur la transmissibilité du système

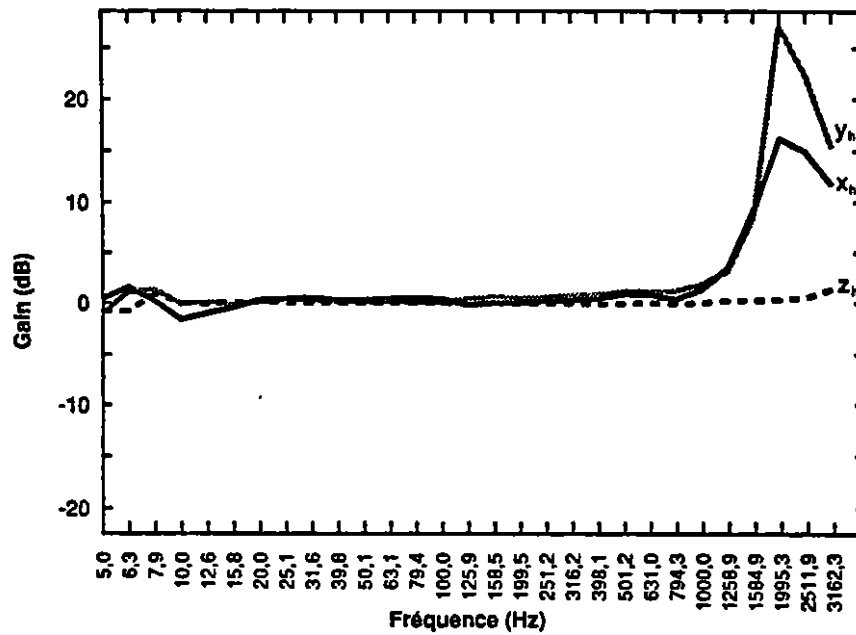


(a) cylindrique

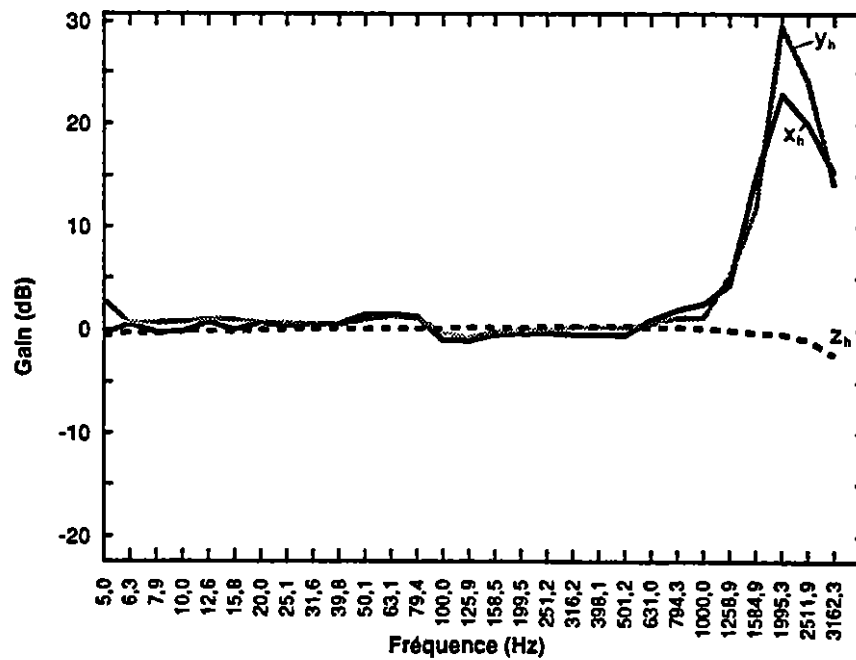


(b) sphérique

Figure 5: Diagrammes techniques décrivant un adaptateur (a) cylindrique et (b) sphérique.



a) Adaptateur cylindrique muni d'accéléromètres B&K 4393



b) Adaptateur sphérique muni d'accéléromètres B&K 4393

Figure 6: Courbes de réponse en fréquence pour deux adaptateurs munis d'accéléromètres B & K 4393

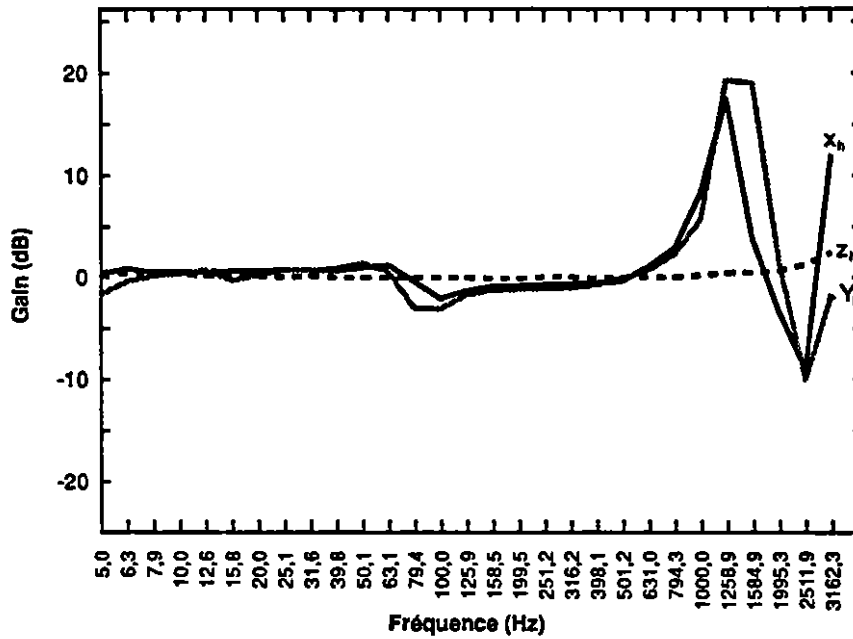
adaptateur/capteurs, ces mêmes courbes sont présentées dans la figure 7 alors que les trois accéléromètres B&K 4393 sont remplacés par un accéléromètre triaxial B&K 4321 dont la masse est plus de 20 fois supérieure. Des résonnances apparaissent alors à des fréquences beaucoup plus basses (inférieures à 1500 Hz) d'où l'importance de choisir des accéléromètres dont la masse est la plus faible possible.

3.4.4 Modes de fixation et assemblage des accéléromètres.

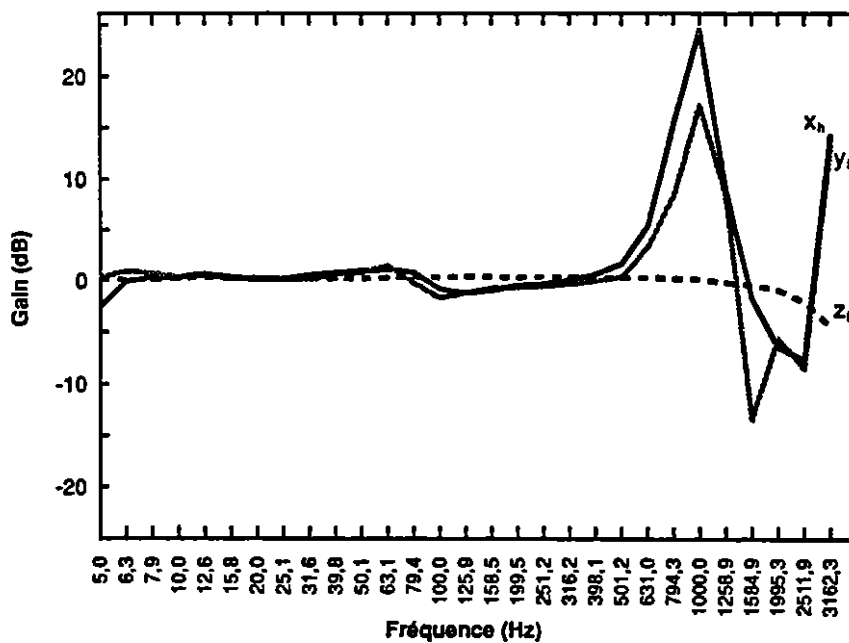
a) Machines rotatives ou alternatives

Dans le cas de l'évaluation de l'exposition vibratoire due à l'opération de machines rotatives ou alternatives, les modes proposés de fixation des accéléromètres sont illustrés dans la figure 8. De façon prioritaire, il est recommandé de fixer un adaptateur (voir figure 5) dans la zone de préhension de la main à l'aide de colliers de serrage et de maintenir l'adaptateur entre le médus et l'annulaire lors des mesures de vibrations. Dans les circonstances où cette procédure risque d'entraîner une gêne de l'opération de la machine ou que la géométrie de la surface vibrante ne permette pas l'utilisation d'un adaptateur, l'accéléromètre peut alors être fixé directement sur la surface à l'aide d'un goujon de fixation, à un endroit aussi près que possible de la zone de préhension.

Lorsqu'il n'est pas possible de mesurer dans la zone de préhension de la main, il est très important de fixer l'accéléromètre à un point aussi près que possible de la main puisque des différences importantes des niveaux de vibrations peuvent être notées dépendant de la position exacte du point de mesure sur la poignée d'une machine. Dépendant des bandes de fréquences observées, Eklund et coll. [39] rapportent des différences de niveaux de vibrations atteignant 16 dB entre des points de mesure situés d'une extrémité à l'autre d'une poignée d'une meuleuse à angle. Ces différences peuvent être



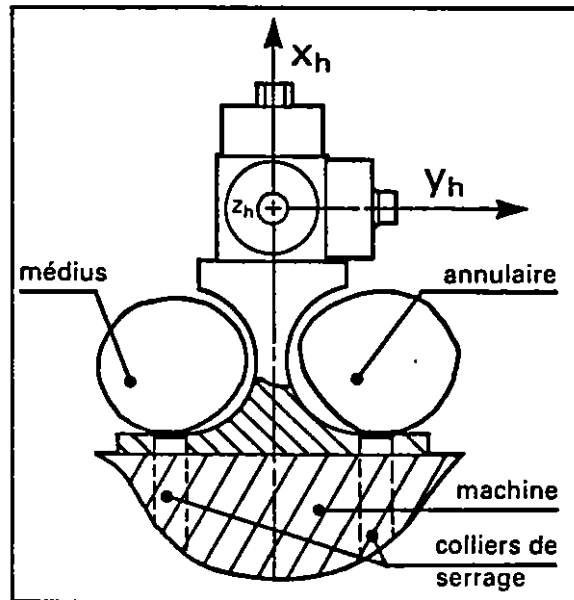
a) Adaptateur cylindrique muni d'un accéléromètre triaxial B&K 4321



b) Adaptateur sphérique muni d'un accéléromètre triaxial B&K 4321

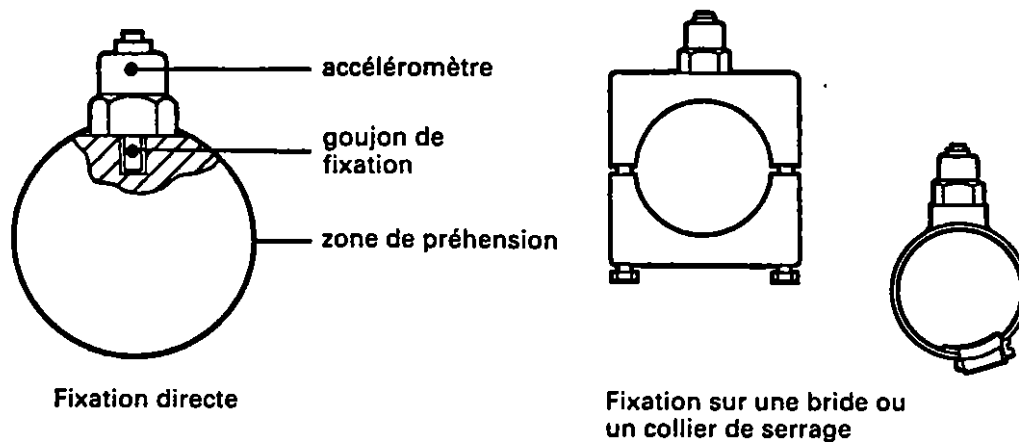
Figure 7 : Courbes de réponse en fréquence pour deux adaptateurs munis d'un accéléromètre triaxial B&K 4321

FIXATION DANS LA ZONE DE PRÉHENSION [7]



Fixation indirecte à l'aide d'un adaptateur

FIXATION À PROXIMITÉ DE LA ZONE DE PRÉHENSION [4,6]



Fixation directe

Fixation sur une bride ou un collier de serrage

Figure 8: Modes de fixation des accéléromètres sur les machines rotatives et alternatives

causées par la production d'ondes stationnaires dans la poignée de la machine, ce qui provoque l'apparition de ventres et de noeuds caractéristiques de ces ondes stationnaires.

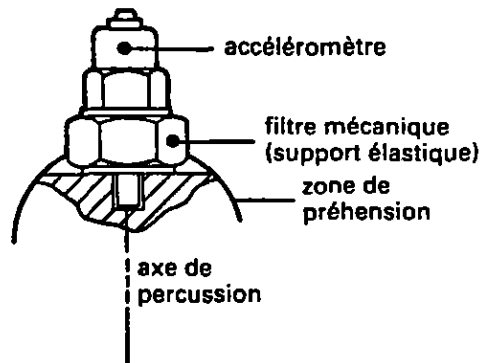
Dans le cas des meuleuses, la production d'un moment autour de leur axe longitudinal conduit à l'augmentation du niveau de vibration avec l'augmentation de la distance de l'axe de rotation.

b) Machines percutantes ou roto-percutantes

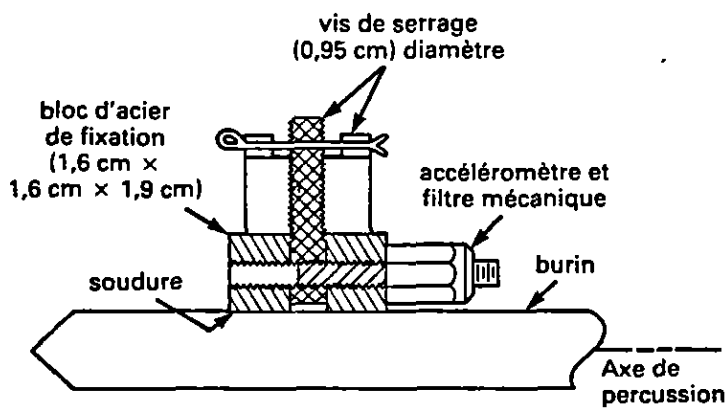
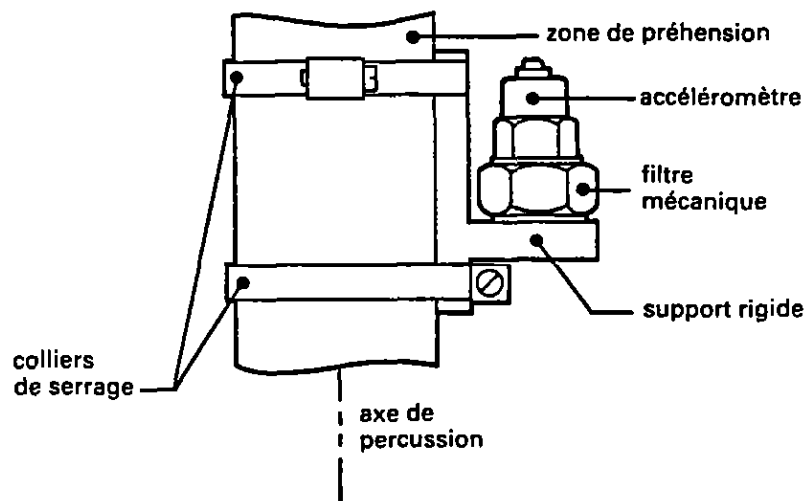
L'évaluation de l'exposition aux vibrations due à l'opération de machines percutantes ou roto-percutantes nécessite que l'accéléromètre soit très solidement fixé à la surface vibrante afin d'empêcher tout glissement qui pourrait survenir dû aux très importants niveaux d'accélération auxquels le capteur peut être soumis. Le mode de fixation à privilégier consiste à visser l'accéléromètre à l'aide d'un goujon de fixation à un endroit le plus près possible de la zone de préhension. Dans certaines circonstances, il peut s'avérer nécessaire d'avoir à requérir à l'utilisation de montages spéciaux ou supports afin d'orienter l'accéléromètre selon les axes de mesure requis (e.g. sur le burin d'un marteau burineur). Certains montages potentiels apparaissent dans la figure 9.

Un des problèmes associés à la mesure de vibrations sur des machines percutantes et roto-percutantes est l'apparition potentielle d'un décalage du zéro ("dc shift") de l'accéléromètre causé par les chocs très violents auxquels l'élément piézoélectrique est soumis. Dans de telles circonstances, l'accéléromètre risque d'être excité à ou près de sa fréquence de résonance, provoquant ainsi une rétention de charge qui peut faire apparaître, à basses fréquences, des niveaux de vibrations plus élevés qu'il n'existe réellement [38].

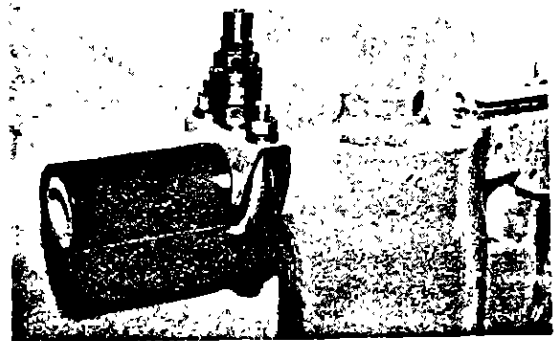
FIXATION DIRECTE AVEC FILTRE MÉCANIQUE [6]



FIXATION INDIRECTE AVEC FILTRE MÉCANIQUE [6, 25, 40]



Fixation sur le burin d'un marteau-burineur [40]



Fixation sur la poignée d'un brise-béton [25]

Figure 9: Modes de fixation des accéléromètres sur les machines percutantes et roto-percutantes

Pour remédier à cette situation, un filtre mécanique doit être intercalé entre la surface vibrante ou le support et l'accéléromètre dans le cas des vibrations émises par les machines percutantes et roto-percutantes [5, 6, 8, 16, 41]. Le filtre mécanique a pour effet de diminuer de 25 à 30dB l'amplitude de réponse de l'accéléromètre à sa fréquence de résonance, agissant comme un filtre passe-bas ayant une fréquence de coupure qui dépend des caractéristiques de l'accéléromètre [42]. Les courbes présentées sur la figure 10 représentent respectivement la réponse en fréquence d'un accéléromètre B&K 4393 et la réponse de ce même accéléromètre lorsqu'il est utilisé en conjonction avec un filtre mécanique. L'insertion du filtre a pour effet de faire décroître la gamme de fréquence utilisable de l'accéléromètre de 8000 à environ 1250 Hz, soit la fréquence à laquelle il y a déviation de la linéarité de la réponse du système composé de l'accéléromètre et du filtre mécanique.

Il est démontré dans la littérature [41] que la combinaison filtre mécanique/accéléromètre reproduit bien les vibrations émises par les machines percutantes.

De façon générale, le filtre mécanique est conçu de façon à permettre à un accéléromètre d'y être fixé par l'intermédiaire d'un goujon fileté. La combinaison filtre mécanique/accéléromètre doit ainsi être fixée à la surface vibrante ou au support selon les modes de fixation apparaissant sur la figure 9. Dans le cas de mesures triaxiales, l'utilisation du filtre mécanique doit tout au moins être faite selon la direction correspondant (ou se rapprochant le plus) à l'axe de percussion de la machine.

c) Mode de fixation en présence de matériaux viscoélastiques

Enfin, lorsque la zone de fixation comporte un revêtement de type visco-élastique, le matériau constitue avec l'accéléromètre un système masse-ressort-amortisseur qui, dépendant du degré d'élasticité, peut influencer considérablement la mesure des vibrations dont la fréquence est inférieure à 1000 Hz [5]. Dans de telles circonstances, il y a lieu soit de découper une section du matériau afin de permettre l'installation du capteur sur une surface rigide ou encore de fixer l'accéléromètre sur une plaque

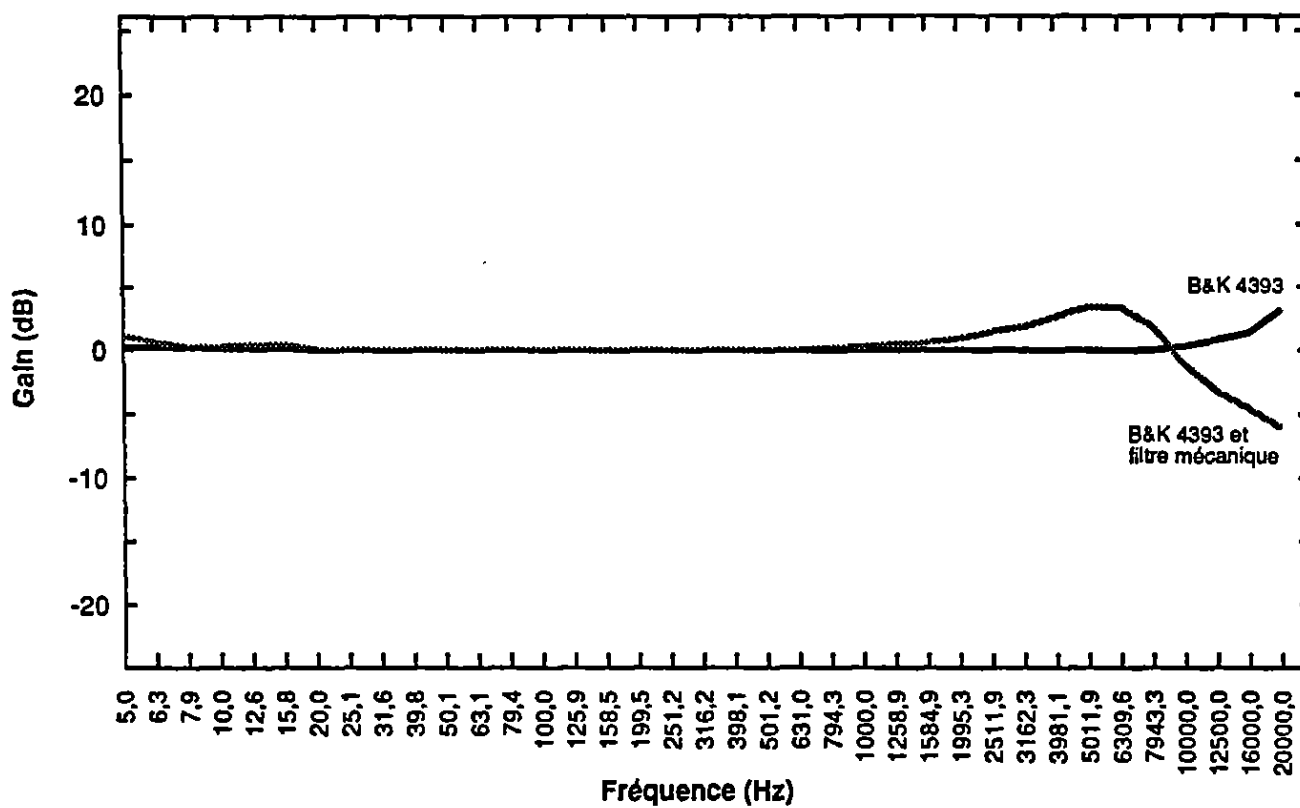


Figure 10: Courbes de réponse en fréquence de l'accéléromètre B&K 4393 avec et sans filtre mécanique.

métallique montée à un anneau de serrage autour du matériau ou d'utiliser un adaptateur tel que décrit figure 5. L'anneau de serrage ne doit pas être serré de façon excessive afin de représenter le mieux possible la force de préhension exercée par le travailleur. La figure 11 illustre le mode de fixation à utiliser dans de telles circonstances. Il a été démontré dans la littérature [24] que la force de serrage de l'anneau avait peu d'influence sur les niveaux de vibrations mesurés à basses fréquences et que le mode de fixation proposé permettait une mesure réaliste des vibrations transmises aux mains. Ce mode de fixation s'adresse donc particulièrement bien à la mesure de vibrations sur les outils percutants pour lesquels l'énergie vibratoire est concentrée à basses fréquences.

3.5 Liaison des accéléromètres

Les câbles de liaison entre l'accéléromètre et les instruments de mesure sont généralement traités pour éliminer le bruit en fonctionnement. Cependant, des bruits tribo-électriques peuvent apparaître aux basses fréquences dûs au mouvement mécanique du câble qui peut être particulièrement important lors de l'opération d'une machine. Il importe donc d'attacher les câbles aussi solidement que possible sur la machine ou autre pièce à l'aide de ruban adhésif pour éviter tout déplacement relatif du câble. Ceci implique nécessairement que le point d'attache soit le moins vibrant possible et que la longueur des câbles utilisés soit maintenue au minimum.

Un des problèmes notés lors de l'évaluation des vibrations sur des machines percutantes résulte des forts niveaux de vibration qui agissent sur les connecteurs du câble, les rendant moins serrés ou pouvant même causer leur rupture [15]. Pour éviter ce problème, il importe de vérifier fréquemment l'état du connecteur pour ne pas introduire des signaux parasites qui pourraient être interprétés comme étant des signaux vibratoires. De plus, la contamination des connecteurs par des particules de poussières ou des vapeurs de solvants se retrouvant dans certains milieux de travail a été identifiée comme étant la cause probable de variations importantes de répétabilité des niveaux de vibrations enregistrés [42]. Ainsi, il est recommandé de bien nettoyer les connecteurs avant toute mesure et chaque fois que le câble a à être branché à l'accéléromètre.

FIXATION SUR MATÉRIAU VISCO-ÉLASTIQUE [7,32]



Accéléromètre fixé à une mince plaque d'aluminium attaché à la poignée au moyen de ruban adhésif ou d'un collier de serrage.

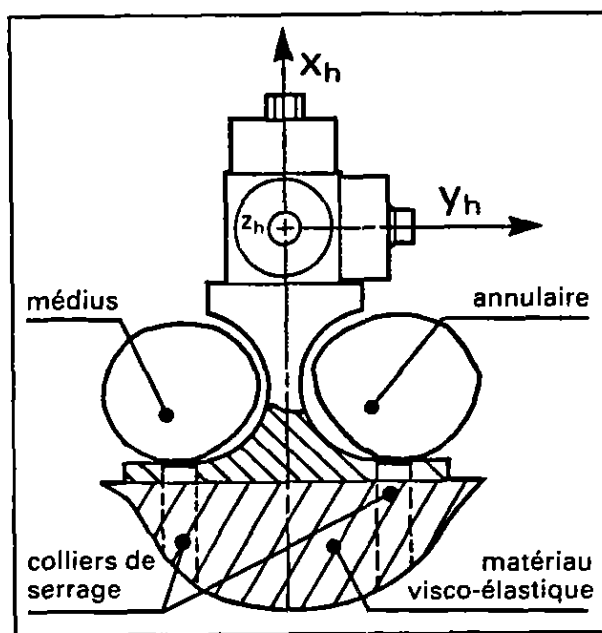


Figure 11: Mode de fixation des accéléromètres sur une surface recouverte de matériau visco-élastique.

Enfin, une autre source de bruit apparaissant à la fréquence de tension du secteur (i.e. 60 Hz) peut être introduite par des boucles de masse qui résultent de la circulation d'un courant électrique lorsqu'une différence de tension existe entre le point à la masse des différents instruments (incluant l'accéléromètre) composant la chaîne de mesure. Ce problème peut être résolu en mettant tous les instruments à la masse en un point commun et en isolant l'accéléromètre de la pièce vibrante à l'aide d'une rondelle de mica ou d'un goujon fileté isolé.

4.- CHAÎNES DE MESURE

L'évaluation de l'exposition aux vibrations mains-bras suivant les recommandations de la norme ISO 5349 nécessite une détermination de l'accélération globale du signal vibratoire, pondérée en fréquences pour des bandes de tiers d'octave dont la fréquence centrale varie entre 6.3 et 1250 Hz (24 bandes). La pondération en fréquences exprime la variation de sensibilité des individus en fonction de la fréquence des vibrations. L'avant-projet de norme ISO/DIS 8041 [9] spécifie les caractéristiques techniques de ce filtre de pondération dont la courbe de réponse en fréquences est reproduite graphiquement sur la figure 12.

L'accélération globale pondérée du signal vibratoire est obtenue d'abord en transformant le signal de charge à la sortie de l'accéléromètre en un signal en tension dans un préamplificateur. Ce signal est par la suite pondéré en fréquences dans un filtre analogique mains-bras pour être finalement intégré sur une période correspondant à la période de mesure. La valeur efficace du signal ainsi obtenue est l'accélération globale pondérée.

Deux systèmes de mesure peuvent être utilisés pour évaluer l'exposition vibratoire en milieu de travail et leur choix dépend de la complexité de la situation vibratoire ou de la quantité d'informations recherchées.

4.1 Système d'acquisition à plusieurs canaux

Le premier système est un système complet qui permet de caractériser l'environnement vibratoire simultanément selon six axes de direction (ie. trois directions pour chaque main). Ce système, représenté schématiquement sur la figure 13, comprend un enregistreur magnétique permettant d'emmagasiner les signaux pour une analyse ultérieure. La transmission des signaux entre les préamplificateurs et l'enregistreur peut être effectuée soit de façon directe par câbles ou soit par l'entremise d'un système de télémessure pour les situations se prêtant mal à l'utilisation, près du point de mesure, d'un enregistreur et autres instruments de laboratoire qui sont très sensibles aux contraintes environnementales.

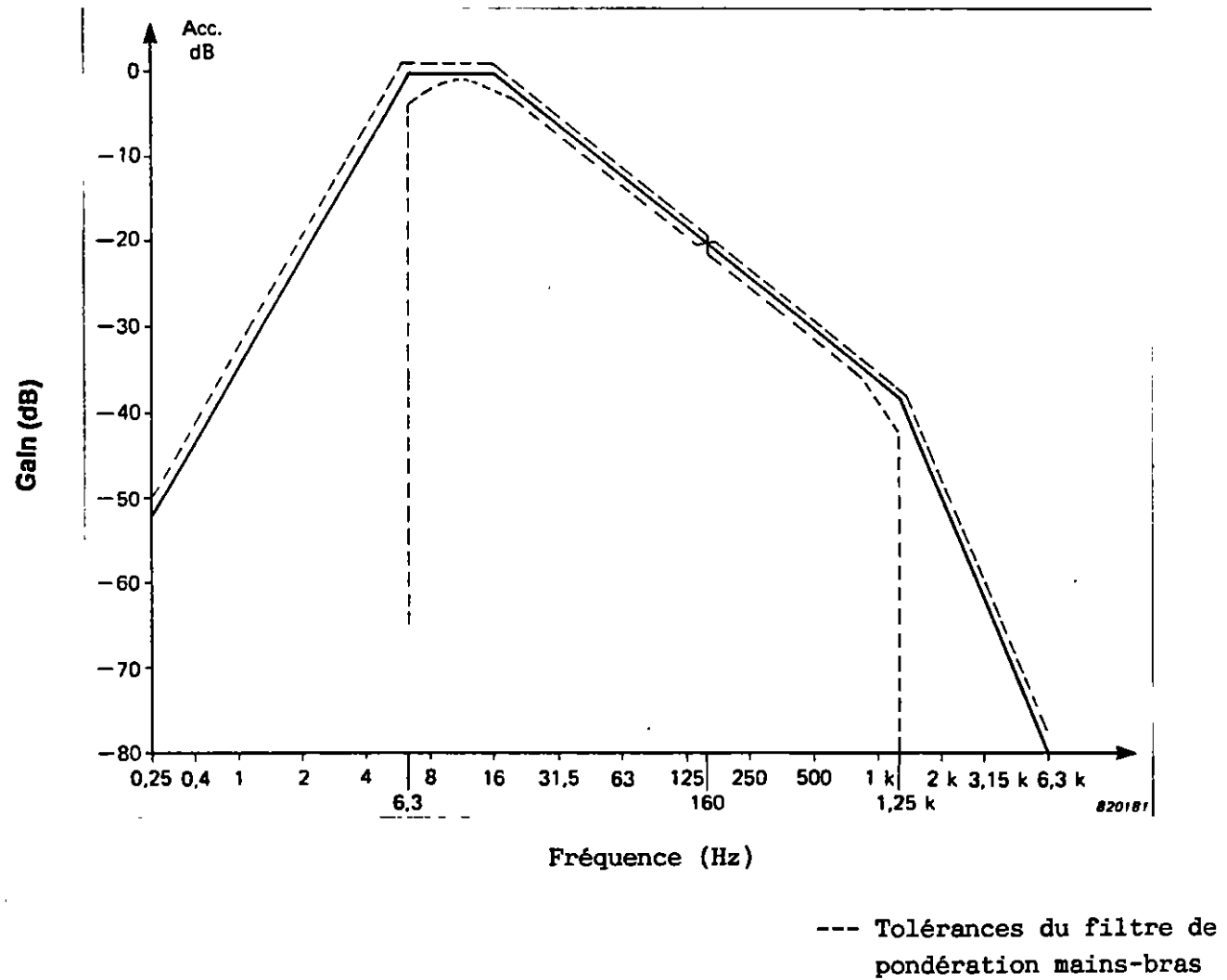


Figure 12: Courbe de pondération en fréquence pour le système mains-bras

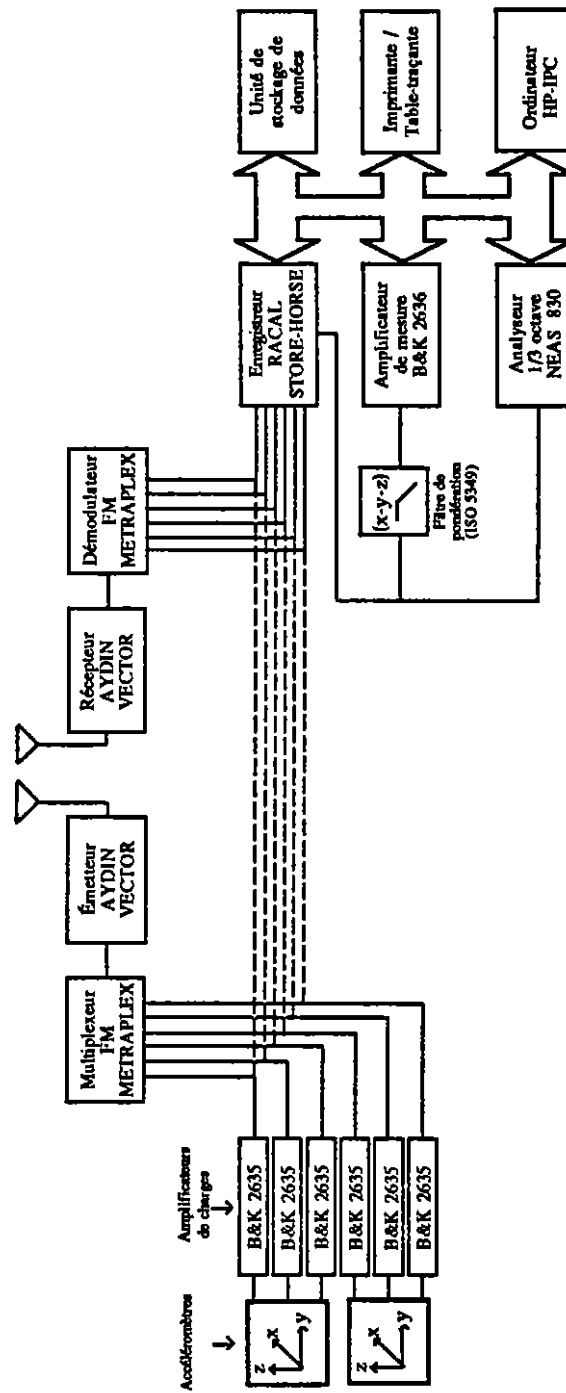


Figure 13: Chaîne d'instrumentation détaillée pour mesurer l'exposition aux vibrations mains-bras

Une fois que le signal est enregistré sur ruban magnétique, plusieurs types d'analyse sont possibles dont les plus communs sont l'évaluation du spectre en fréquences des vibrations en bandes de tiers d'octave (pondéré et non pondéré), l'évaluation du facteur de crête (rapport du niveau crête pondéré d'accélération au niveau efficace pondéré pour un segment de durée connue) et l'application de la relation dose-effet de la norme ISO 5349 au niveau global d'accélération pondérée mesurée selon l'axe dominant des vibrations.

Ce système représente en soi une chaîne d'instrumentation complexe conçue plus particulièrement pour des fins de recherche traitant de la métrologie des vibrations et de la prévention technique. Évidemment, il permet d'évaluer l'exposition aux vibrations en milieu de travail bien qu'il ne puisse être considéré comme un mesureur portable et que son opération doive être confiée à des expérimentateurs entraînés dans les techniques de mesure et d'instrumentation.

La gamme d'amplitudes mesurables par ce système varie selon la sensibilité de l'accéléromètre faisant partie de la chaîne d'instrumentation. Pour les cas impliquant la mesure d'accélération instantanées crêtes de niveaux élevés (e.g. outils percutants), la gamme d'amplitude mesurable peut être adaptée à la situation en ajustant l'amplificateur de charge à une sensibilité beaucoup moins grande que la sensibilité réelle de l'accéléromètre. Un facteur de correction doit alors être appliqué aux résultats, correspondant au rapport des sensibilités. L'inverse est également possible dans les cas impliquant des niveaux de vibrations de plus faible amplitude. Enfin, la gamme dynamique de la chaîne d'instrumentation entre la plus faible et la plus grande amplitude ne peut être supérieure à 63 dB lorsque le système de télémessure est utilisé [44].

4.2 Système portable à lecture directe

Il existe des instruments portables plus simples que le système décrit précédemment qui permettent d'obtenir le niveau global de vibrations, pondéré en fréquences selon les recommandations ISO 5349. Il s'agit d'intégrateurs de vibrations tels que les modèles B&K 2513 et 2513 WH 1972 qui possèdent le filtre de pondération mains-bras. Ces instruments sont compacts et se prêtent facilement à la mesure de vibrations en milieu de travail. Ils ne permettent cependant pas d'effectuer la mesure dans plus d'une seule

direction à la fois. De plus, aucune information ne peut être fournie sur le contenu en fréquences des vibrations. Hormis ces limitations, ils peuvent quant même être utilisés et rencontrer les exigences de mesure énoncés dans la norme ISO 5349, en autant que le niveau global d'accélération pondérée puisse être obtenu selon l'axe dominant. Ceci peut alors nécessiter plusieurs séries de mesures afin de déterminer la direction dominante.

Les intégrateurs de vibrations proposés sur le marché sont généralement construits en vue de fonctionner avec un accéléromètre bien précis, dont la sensibilité est connue. Ces instruments peuvent cependant aussi bien fonctionner avec d'autres accéléromètres ne comportant pas la même sensibilité. Dans de telles situations, un facteur de correction doit être appliqué à la lecture de l'instrument, correspondant au rapport de sensibilité de l'accéléromètre utilisé à celle de l'accéléromètre proposé avec l'instrument. L'étalonnage du système avec une source de vibrations connue est alors rendue nécessaire. Ces appareils peuvent avoir une gamme dynamique atteignant 60 dB (40 dB affiché).

Dans le cas de l'intégrateur de vibration B&K 2513, l'instrument comporte un filtre interne de pondération mains-bras et permet d'afficher directement la valeur efficace de l'accélération pondérée $a_{h,w}$ ainsi que la valeur crête de l'accélération pondérée. La période d'intégration recommandée est de 1 minute. L'utilisation d'un accéléromètre B & K 4393 avec cet instrument nécessite qu'un facteur de 10 dB soit enlevé aux niveaux affichés afin de tenir compte de la différence de sensibilité de cet accéléromètre avec celui qui est normalement utilisé avec l'instrument.

5.- EXIGENCES INSTRUMENTALES ET ÉTALONNAGE

Avant de procéder à la mesure, il est important de s'assurer que les exigences instrumentales soient rencontrées et de bien étalonner la chaîne de mesure incluant l'accéléromètre afin de permettre un contrôle de la qualité des résultats de mesure. Les exigences minimales à rencontrer se retrouvent dans la norme ISO 5349 et l'avant-projet de norme ISO/DIS 8041. Les instruments de mesure des vibrations mains-bras doivent ainsi rencontrer les exigences suivantes*:

- i) posséder une précision minimale caractéristique des instruments de classe 2;
- ii) avoir au minimum une pondération en fréquence définie entre 8 et 1 000 Hz, dont les caractéristiques ainsi que les tolérances sont données dans le tableau 8 du document ISO/DIS 8041 [11];
- iii) posséder au minimum un circuit de moyennage exponentiel dont la constante de temps est de 1 s ("slow") ainsi qu'un circuit de moyennage linéaire permettant l'évaluation de valeurs efficaces sur une période de 60 s ou plus;
- iv) procurer une lecture, qui après une période de réchauffement des instruments d'au moins 10 minutes, ne variera pas de plus de 0.3 dB pour les instruments de classe 1 et 0.5 dB pour les instruments de classe 2 après 1 heure d'opération continue;
- v) avoir un indicateur de surcharge pour indiquer lorsque les valeurs crêtes des signaux excèdent les limites fixées par l'instrumentation;
- vi) avoir un niveau de vibration minimum décelable qui soit au moins 5dB plus élevé que le niveau de bruit interne généré par les instruments;
- vii) posséder une sensibilité transversale inférieure à la sensibilité selon l'axe de détection par un facteur d'au moins 20 dB (10 %).

* Ces exigences s'adressent plus particulièrement aux instruments de mesure des vibrations à lecture directe.

Certains tests sont décrits dans le document ISO/DIS 8041 [11] qui permettent de vérifier si les exigences décrites ci-dessus sont rencontrées. Une méthode d'étalonnage des accéléromètres a été développée dans nos laboratoires [45] qui permet d'évaluer la réponse en fréquence de l'accéléromètre, sa sensibilité transversale ainsi que la gamme dynamique de mesure et la linéarité de la réponse. Avant d'évaluer les vibrations mains-bras, il est recommandé d'étalonner la chaîne complète d'instrumentation à une fréquence de 80 Hz pour un niveau de vibration de 1 ms^{-2} . Dans de telles conditions, la réponse du système doit être à $\pm 0.7 \text{ dB}$ pour les instruments de classe 1 et $\pm 1 \text{ dB}$ pour les instruments de classe 2. Lorsque l'accéléromètre est utilisé, l'étalonnage est effectué en utilisant une source mécanique de vibrations dont les caractéristiques sont connues (e.g. excitateur, pot vibrant). L'étalonnage peut également être effectué en substituant l'accéléromètre par un signal électrique dont la tension est transformée en charge par une capacité de valeur connue ($Q = CV$ où "Q" est la charge en coulomb, "C" est la capacité en farad et "V" est la tension en volt).

Avant chaque campagne de mesures, il est recommandé [6] d'obtenir la courbe de sensibilité relative de la chaîne de mesurage en utilisant un signal aléatoire de valeur efficace à 1 ms^{-2} (étalon proposé dans ISO/DIS 8041). Cette courbe devrait se situer à $\pm 1 \text{ dB}$ dans la gamme de fréquence d'intérêt. De plus, l'écart de linéarité à la fréquence de référence (80 Hz) devrait être inférieur à 2.5% entre 0.5 et 100 ms^{-2} . Cet écart pourrait être augmenté à 5% dans le cas où un filtre mécanique est utilisé.

6.- MESURAGE DES VIBRATIONS

6.1 Mode d'intégration linéaire

L'évaluation de la valeur efficace d'accélération pondérée $a_{h,w}$ est obtenue en intégrant les valeurs instantanées du signal pondéré d'accélération dans le temps, suivant la définition suivante [37]:

$$a_{h,w} = \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt \right\}^{1/2} \quad (1)$$

où:

T: durée d'intégration (s)
 $a_w(t)$: accélération instantanée du signal pondéré (ms^{-2})
 t: temps

L'équation (1) représente le mode d'intégration linéaire du signal vibratoire. La durée d'intégration, qui en quelque sorte représente la durée de la mesure, doit être convenablement choisie puisqu'elle a une influence directe sur l'erreur relative (e) associée à la valeur efficace telle que représentée par l'équation suivante:

$$e = \frac{1}{2 (\Delta f T)^{1/2}} \quad (2)$$

où:

Δf : largeur de bande du filtre (Hz)
 T: durée d'intégration (s)

Cette équation démontre la nécessité de fixer un temps d'intégration plus long pour mesurer des vibrations de basses fréquences dont la largeur de bande de tiers d'octave est donné par $\Delta f = 0.231 f$ (f est la fréquence centrale d'une bande de tiers d'octave). La fréquence minimale d'intérêt étant 6.3 Hz pour les vibrations mains-bras, le temps d'intégration ne

devrait pas être inférieur à 1 minute pour que l'erreur relative sur la valeur efficace soit de l'ordre d'environ 5%. À l'opposé, la durée de la mesure ne devrait pas excéder une minute par essais dans le cas d'outils percutants, afin d'éviter de soumettre l'accéléromètre à de trop fortes contraintes. Cependant, plusieurs essais consécutifs d'une durée d'une minute peuvent être envisagés.

6.2 Approximation dans le cas de vibrations stationnaires

Lorsque le poste de travail à évaluer comporte des vibrations dont les caractéristiques ne varient pas de façon excessive dans le temps et que le mode d'opération de la machine-outil demeure relativement constant, l'évaluation de l'exposition aux vibrations mains-bras peut-être effectuée en prenant un nombre N de mesures d'une durée de 1 minute chacune et en présentant la moyenne de ces mesures, suivant l'expression suivante:

$$a_{h,w} = \left(\frac{\sum_{i=1}^N a_{h,w,i}^2}{N} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

où $a_{h,w,i}$: valeur efficace d'accélération pondérée évaluée sur chaque segment d'une durée d'une minute (ms^{-2})

Chacune des valeurs $a_{h,w,i}$ est évaluée selon l'expression (1) mais pourrait également être obtenue en utilisant un mode d'intégration exponentielle, plus commun chez les instruments de mesure du bruit.

L'écart-type associé à la valeur efficace d'accélération pondérée $a_{h,w}$ procure, en quelque sorte, une mesure du degré de stationnarité des signaux. En effet, lorsque la valeur efficace de l'accélération varie peu de minute en minute, l'écart-type (σ) devrait être calculé pour une série de N mesures, en utilisant la relation suivante:

$$\sigma = \pm \left(\frac{\sum_{i=1}^N (a_{h,w,i} - a_{h,w})^2}{N-1} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

En plus de servir d'indicateur de stationnarité des signaux, l'écart-type procure également une mesure de l'incertitude associée à l'accélération efficace pondérée rapportée.

6.3 Mode de moyennage exponentiel

Selon ce mode d'intégration, la valeur efficace d'accélération pondérée est donnée par:

$$a_{n,w} \text{ exp} = \left(\frac{1}{\tau} \int_{-\infty}^T a_w^2(t) e^{-(T-t)/\tau} dt \right)^{1/2} \quad (5)$$

où:

τ : constante de temps (fixée à 1s pour les vibrations mains-bras)

$a_w(t)$: accélération instantanée du signal pondéré (ms^{-2})

T: durée d'intégration (s)

t: temps

Lorsque la durée d'intégration est suffisamment longue, le mode d'intégration exponentielle devient équivalent au mode d'intégration linéaire. Ainsi, lorsque le signal de vibration est de courte durée et que l'exposition est interrompue par plusieurs temps d'arrêt, seul le mode d'intégration linéaire doit être utilisé. Le mode d'intégration exponentielle n'est alors qu'une approximation au mode linéaire d'intégration pour obtenir la valeur efficace et ne doit être utilisé que pour les situations où le signal vibratoire peut être obtenu de façon ininterrompue pour au moins une minute et que l'amplitude du signal vibratoire ne varie pas de façon substantielle avec le temps.

6.4 Approximation dans le cas de signaux intermittents

Lorsque le signal vibratoire est de courte durée (procédés terminés en quelques secondes seulement) et que son amplitude varie beaucoup en fonction du temps, l'évaluation de l'exposition nécessite que plusieurs segments comportant des vibrations soient combinés pour obtenir un temps d'intégration suffisamment long pour obtenir la valeur efficace. Ceci implique que le signal vibratoire soit idéalement enregistré afin qu'un discernement puisse

être fait, lors de l'analyse, entre les segments comportant ou non des vibrations. De plus, cette procédure a l'avantage de permettre d'estimer la durée de l'enregistrement par rapport à la durée quotidienne de travail. L'intégrateur de vibrations doit enfin avoir un temps d'intégration linéaire ajustable. Évidemment, l'analyse du poste de travail peut avoir à être effectuée sur plusieurs minutes afin d'obtenir une durée suffisamment longue pendant laquelle des vibrations sont actuellement émises.

6.5 Approximation dans le cas de l'exécution de travaux variés

Lorsque le poste de travail à évaluer comporte l'opération de différents types de machine-outils, des mesures doivent être effectuées afin de caractériser le niveau efficace d'accélération pondérée $a_{h,w,j}$ associé à l'opération de chaque type de machine-outil. Le niveau de vibration caractérisant l'exposition journalière peut ainsi être évalué en effectuant le calcul suivant:

$$a_{h,w} = \left\{ \frac{\sum_{j=1}^N a_{h,w,j}^2 t_j}{\sum_{j=1}^N t_j} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

où:

$a_{h,w,j}$ = accélération efficace pondérée correspondant à l'opération de la machine-outil j

t_j = durée d'exposition quotidienne associée à l'opération de la machine-outil j

N = nombre total de machines-outils utilisés quotidiennement.

Les niveaux de vibrations mesurés à un poste de travail peuvent difficilement être utilisés pour caractériser l'exposition aux vibrations main-bras pour un second opérateur effectuant le même travail à cause de la grande variabilité des niveaux de vibrations avec la technique de travail et les autres facteurs tels que la force de préhension, la vitesse d'opération de l'outil, l'usure de l'outil, etc. [29]. En effet, certaines études ont révélé que des différences de l'ordre de 20 dB pouvaient être notées à certaines fréquences lorsque différents travailleurs utilisaient le même type d'outil. Une autre étude propose que la transmissibilité des vibrations aux mains est fonction de la racine cubique de la force de préhension [20].

Comme il est très peu probable que chaque travailleur puisse maintenir des conditions identiques et constantes de travail lors d'opérations normales, il s'avère donc que les mesures effectuées ne peuvent que très sommairement représenter l'exposition typique pour l'ensemble des travailleurs effectuant le même type d'activité.

7.- CARACTÉRISTIQUES NON-VIBRATIONNELLES DE L'EXPOSITION ET GRILLE D'ÉVALUATION

En plus des mesures de vibration, l'évaluation de l'exposition vibratoire nécessite que des informations additionnelles soient fournies concernant la machine-outil, l'opérateur et la méthode de travail utilisée. L'information recueillie devrait être suffisante pour permettre de reproduire les mesures et d'obtenir des résultats aussi semblables que possible. De plus, ces informations devraient faciliter l'interprétation à donner aux niveaux de vibrations mesurés dans des conditions particulières.

7.1 Caractéristiques de la machine-outil

Les particularités de la machine et de l'outil utilisé doivent être prélevées pour inclure:

- i) le nom du fabricant
- ii) le type de machine/outil
- iii) le numéro du modèle
- iv) le numéro de série
- v) les conditions de fonctionnement i.e. vitesse de rotation, cadence de frappe, pression d'air
- vi) la masse et les dimensions de la machine et de l'outil
- vii) l'état de marche de la machine/outil incluant le nombre d'années d'utilisation
- viii) une description de toute modification apportée à la machine/outil
- ix) une description de la poignée et du matériau pouvant la recouvrir

7.2 Caractéristiques de la/les tâche(s)

Le mode d'utilisation de la machine-outil a également une influence déterminante sur les niveaux de vibration mesurés et sur l'interprétation à donner aux résultats de mesures. Ainsi, une description complète de la tâche devrait être effectuée pour inclure:

- i) une description de la/les pièce(s) traitée(s) incluant les dimensions;
- ii) le ou les type(s) d'opération(s) effectuée(s) e.g. meulage circulaire, par sautellement;

- iii) la/les posture(s) de travail utilisée(s) par le travailleur (angles du poignet, coude, épaule);
- iv) le nombre de pièces traitées dans une journée de travail;
- v) la durée d'exposition effective typique pour une journée de travail;
- vi) l'intermittence des opérations, les périodes de repos, etc. au cours de la journée et de l'année;
- vii) une évaluation du niveau de bruit environnant (si possible).

La durée d'exposition effective quotidienne représente un paramètre de grande importance lorsqu'il s'agit de juger de la sévérité de l'exposition aux vibrations.

La durée d'exposition effective constitue la durée pendant laquelle l'opérateur est actuellement soumis à des vibrations originant de la machine/outil, excluant tout temps d'arrêt, que ce soit pour le repos ou pour effectuer d'autres tâches.

Pour un travail régulier où les activités se répètent au cours de la journée, la durée d'exposition effective peut être estimée en observant le poste de travail sur une période fixe de travail et en rapportant ce temps à la durée réelle d'une journée de travail. Dans d'autres cas plus complexes où l'exposition est régulièrement interrompue ou que l'activité consiste en plusieurs tâches, la durée d'exposition effective doit être estimée à partir de périodes d'observation plus longues. De plus, il convient de s'assurer que les activités observées soient typiques des activités se déroulant au cours de journées "normales" de travail en basant les estimations sur des échantillons appropriés représentatifs des diverses conditions, durées et interruptions du travail.

7.3 Expérience professionnelle du travailleur

Enfin, l'expérience professionnelle du travailleur, incluant le nombre d'années d'expérience associé au travail observé, est un paramètre important à noter, non seulement pour estimer les risques d'atteinte physiologique à partir de relations "dose-effet" connus, mais aussi puisque l'expérience du travailleur pour opérer la machine-outil est susceptible d'influencer les niveaux de vibrations mesurés.

La figure 14 présente la grille d'évaluation proposée pour prélever l'information requise lors des mesures de l'exposition aux vibrations.

FIGURE 14

GRILLE D'ÉVALUATION
DE L'EXPOSITION AUX VIBRATIONS
MAINS-BRAS

DUE À L'OPÉRATION DE

(type de machine outil)

CHEZ

(nom de l'entreprise)

Institut de recherche en santé et en sécurité
du travail du Québec (IRSST)
505, boul. de Maisonneuve ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2

Mesures effectuées par: _____

DATE DE LA MESURE
____/____/____

I. DESCRIPTION DU POSTE DE TRAVAIL

- i Nombre de machine-outils impliqués: _____
- ii Liste des machines-outils utilisés et pourcentage de temps approximatif d'utilisation pour chacun:
- | Machine-outil | Pourcentage approx. |
|---------------|---------------------|
| _____ | _____ |
| _____ | _____ |
| _____ | _____ |
| _____ | _____ |
- iii But visé par l'opération de la/des machine(s)-outil(s):

- iv Mode d'opération de la machine-outil: _____

- v Patron d'exposition au cours de la journée:
 a) Durée de la journée de travail (h) _____
 b) Durée permise pour les repas, repos, etc. (h) _____
 c) Pourcentage de temps approx. pendant lequel des vibrations sont transmises aux mains du travailleur _____
- vi Description de la/des pièce(s) traité(s): _____

- vii Nombre approximatif de pièces traitées par journée de travail: _____
- viii Nombre approximatif de jours d'exposition par année: _____
- ix Description de la/des posture(s) de travail utilisée(s):

II. DESCRIPTION DE LA MACHINE-OUTIL (remplir pour chaque type de machine-outil utilisé)		<u>MACHINE</u>	<u>OUTIL</u>
i	Nom	_____	_____
ii	Fabricant	_____	_____
iii	Type	_____	_____
iv	Numéro du modèle	_____	_____
v	Numéro de série	_____	_____
vi	Masse	_____	_____
vii	Dimensions	_____	_____
viii	Conditions de fonctionnement (e.g. vitesse de rotation, cadence de frappe)	_____	_____
ix	Pression d'air	_____	_____
x	État de marche	_____	_____
xi	Nombre d'années d'utilisation	_____	_____
xii	Modifications apportées	_____	_____
xiii	Description de la/des poignée(s):	_____	

xiv	Diagramme de la machine-outil indiquant le/les point(s) de mesure ainsi que le/les axe(s) de mesure:	_____	

III. EXPÉRIENCE PROFESSIONNELLE DU TRAVAILLEUR/TRAVAILLEUSE

- i Age du travailleur/travailleuse _____
- ii Nombre d'années d'expérience au poste de travail observé:

- iii Nombre d'années d'exposition aux vibrations mains-bras en milieu de travail _____
- iv Évaluation subjective des vibrations par l'opérateur:

- v Problème vasculaire éprouvé par l'opérateur _____

- vi Utilisation d'équipement de protection ou d'une méthode de travail pour contrer les vibrations _____

IV. DESCRIPTION DES INSTRUMENTS DE MESURE DES VIBRATIONS

i Capteurs

Type	Marque	Modèle	No. de série	Point de mesure	Axe
_____	_____	_____	_____	_____	_____
_____	_____	_____	_____	_____	_____
_____	_____	_____	_____	_____	_____
_____	_____	_____	_____	_____	_____

ii Schéma synoptique de la chaîne de mesure (incluant marque et modèle des instruments)

iii Méthode d'intégration (choisir a ou b)
a) temporelle

Marque de l'intégrateur	Modèle	Filtre mains-bras (interne/externe)	Intégration (lin,exp.)	Constante de temps
_____	_____	_____	_____	_____

b) fréquentielle par bandes de 1/3 d'octave

. Amplificateurs de charge:

Canal	Axe	Marque	Modèle	No. de série	Sensibilité
_____	_____	_____	_____	_____	_____
_____	_____	_____	_____	_____	_____
_____	_____	_____	_____	_____	_____
_____	_____	_____	_____	_____	_____

. Analyseur: _____

V. ÉTALONNAGE ET MESURE

- i Méthode d'étalonnage de la chaîne de mesure: _____

- ii Fréquence d'étalonnage : _____ Hz
- iii Amplitude utilisée: : _____ ms^{-2}
- iv Linéarité de la réponse : _____ dB
- v Sensibilité transversale : _____ %
- vi Mode de fixation des capteurs: _____

- vii Durée de la mesure: _____
- viii Observations et commentaires: _____

8.- ANALYSE DES VIBRATIONS

L'analyse des vibrations consiste essentiellement à calculer la valeur efficace de l'accélération pondérée $a_{h,w}$ correspondant à l'axe et au point de détection où les vibrations sont dominantes. La valeur $a_{h,w}$ ainsi obtenue peut par la suite être utilisée dans la relation dose-effet proposée dans l'annexe A de la norme ISO 5349 afin d'estimer la susceptibilité d'atteinte du phénomène de Raynaud pour le travailleur dont le poste de travail est évalué.

8.1 Calcul de la valeur efficace de l'accélération pondérée

Il existe deux façons d'obtenir la valeur efficace de l'accélération pondérée, selon que le système de mesure et d'analyse utilisé permette ou non l'obtention du spectre en fréquences en bandes de tiers d'octave situées entre 6.3 et 1250 Hz.

8.1.1 Méthode d'intégration fréquentielle par bandes de tiers d'octave

Lorsque le spectre en bandes de fréquences de tiers d'octave peut être obtenu sans que le signal soit passé au préalable dans un filtre de pondération, la valeur efficace de l'accélération pondérée $a_{h,w}$ est calculée en pondérant numériquement chaque niveau d'accélération $a_{h,i}$ mesuré dans la bande i de fréquence de tiers d'octave entre 6.3 et 1250 Hz et en effectuant le calcul suivant:

$$a_{h,w} = \left\{ \sum_{i=1}^{24} (K_i a_{h,i})^2 \right\}^{1/2} \quad (7)$$

Le facteur de pondération K_i est donné dans le tableau 2 du document ISO 5349 [3] pour chaque bande de fréquence de tiers d'octave (24 bandes) entre 6.3 et 1250 Hz. L'évaluation de la valeur efficace selon cette procédure requiert une chaîne de mesure telle que représentée précédemment à la figure 13. Une variation de cette méthode consiste à pondérer d'abord le signal vibratoire dans un filtre analogique de pondération inséré à l'entrée de la chaîne de mesure. Les bandes de fréquences de tiers d'octave étant alors affectées de leur pondération respective, la valeur efficace de l'accélération pondérée peut donc être calculée à partir de:

$$a_{h,w} = \left\{ \sum_{i=1}^{24} a_{i,w}^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

où $a_{i,w}$ représente le niveau d'accélération pondérée mesuré dans la bande i de fréquence de tiers d'octave entre 6.3 et 1250 Hz.

La méthode d'intégration définie par les équations (7) et (8) est connue comme étant la méthode d'intégration fréquentielle par bande de 1/3 d'octave. Dans cette méthode, la valeur efficace de chaque composante $a_{h,i}$ ou $a_{i,w}$ est estimée par moyennage sur toute la durée T du signal échantillonné. Aussi, la durée totale T d'intégration devrait-elle être spécifiée lorsque cette méthode est utilisée.

Lorsque la mesure de vibration est effectuée sur une durée de plusieurs minutes, il est recommandable d'évaluer les spectres en fréquences pour chaque période de temps d'une durée d'une minute. La valeur efficace moyenne d'accélération peut ensuite être évaluée à chacune des bandes de fréquence en utilisant la relation:

$$\bar{a}_{h,i} = \left\{ \sum_{n=1}^N a_{h,i,n}^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

où:

$\bar{a}_{h,i}$: Valeur efficace moyenne de l'accélération dans la $i^{\text{ème}}$ bande de fréquence

$a_{h,i,n}$: Valeur efficace de l'accélération mesuré dans la $i^{\text{ème}}$ bande de fréquence lors la $n^{\text{ème}}$ mesure

N : nombre total de mesures d'une durée d'une minute.

L'écart-type σ peut également être calculé sur la valeur $a_{h,i}$ à chacune des bandes de fréquence. Ceci permet l'affichage d'un spectre moyen comportant un écart-type à chacune des bandes de fréquence (figure 18).

À partir des spectres en fréquences générés à chacune des minutes, la valeur efficace d'accélération globale pondérée $a_{h,w}$ peut être calculée pour chaque minute en utilisant l'équation (7). La valeur efficace moyenne $a_{h,w}$ peut

ainsi être obtenue en utilisant une relation similaire à l'équation (9) (i.e. $a_{h,i}$ est remplacé par $a_{h,w,i}$). De plus, l'écart-type associé à la valeur $a_{h,w}$ peut également être calculé, indiquant l'incertitude associée au niveau d'accélération globale pondérée.

8.1.2 Méthode d'intégration temporelle

La méthode d'intégration temporelle est la deuxième méthode d'intégration qui consiste successivement à pondérer les signaux temporels de façon analogique (e.g. filtre électrique) et à calculer la valeur efficace pondérée à l'aide d'un voltmètre intégrateur ou autre équipement portable tel que décrit dans la section 4. L'opération à effectuer est la suivante:

$$a_{h,w} = \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt \right\}^{1/2} \quad (10)$$

où $a_w(t)$ représente le signal temporel pondéré. La période d'intégration T doit également être spécifiée, étant directement reliée à l'erreur relative sur la valeur efficace (équation 2). Les limitations de cette méthode sont discutées dans la section 4.

8.2 Estimation du risque associé à l'exposition aux vibrations

La norme ISO 5349 ne spécifie pas de limites d'exposition mais propose plutôt une relation dose-effet qui permet d'estimer le percentile de population C (10 à 50 %) susceptible de présenter des symptômes reliés au phénomène de Raynaud en fonction du nombre d'années d'exposition continue T_f et de la valeur efficace de l'accélération pondérée $a_{h,w}$ mesurée et de la durée d'exposition quotidienne T . Cette relation est exprimée par l'équation suivante:

$$C = 2.77 \times 10^{-3} (a_{h,w} T_f)^2 T \quad (11)$$

pour $10 \leq C \leq 50$

où

- C : percentile de population susceptible de présenter des symptômes du phénomène de Raynaud (%)
- $a_{h,w}$: valeur efficace de l'accélération pondérée (ms^{-2})
- T_f : nombre d'années d'exposition (années)
- T : durée d'exposition quotidienne (h)

L'équation exprime le résultat d'une étude épidémiologique effectuée sur environ 40 populations de travailleurs exposés quotidiennement à des vibrations mains-bras sur des périodes variant entre une et 25 années. Cette relation est présentée graphiquement à la figure 2 de l'annexe A de la norme ISO 5349 [3] lorsque la durée d'exposition quotidienne est fixée à 4 heures, pour des percentiles de population variant entre 10 et 50%. Lorsque la valeur efficace de l'accélération pondérée $a_{h,w}$ est connue, l'équation (11) peut être utilisée pour évaluer l'effet de varier la durée d'exposition quotidienne T sur le nombre d'années d'exposition permis T_f afin d'atteindre un percentile fixe C de gens susceptibles de démontrer des symptômes du phénomène de Raynaud. Un exemple apparaît à la figure 15 dans le cas d'une meuleuse portative pour laquelle $a_{h,w}$ est 20.5 ms^{-2} .

La relation dose-effet annexée à la norme ISO 5349 est une relation basée sur des statistiques et en tant que tel, ne peut représenter avec certitude que toute population de travailleurs exposés à des vibrations provoquées par toute espèce de machine-outil saura répondre de la façon dictée par l'équation. Il est clair que plusieurs facteurs sont à considérer et qu'ils pourraient provoquer des différences importantes entre le comportement observé et celui prédit par l'équation (11), notamment, l'état de santé des individus, leur sensibilité aux vibrations, leur méthode de travail, l'intermittence de l'exposition au courant de la journée et de l'année. Sur ce dernier point, certains chercheurs [47,48] prétendent que les périodes de repos peuvent avoir des effets bénéfiques pour retarder l'apparition du phénomène de Raynaud. D'ailleurs, des facteurs de correction ont même été définis dans certains cas afin d'augmenter les limites de vibration permises lorsque le travail comportait des périodes de repos.

Cependant, faute de données épidémiologiques et médicales, ces facteurs de correction n'ont pu être intégrés dans les normes. De plus, il a été décidé de ne pas spécifier de limites d'exposition comme c'était le cas dans les avant-projets de la norme ISO 5349, laissant cette tâche plutôt au pouvoir législateur.

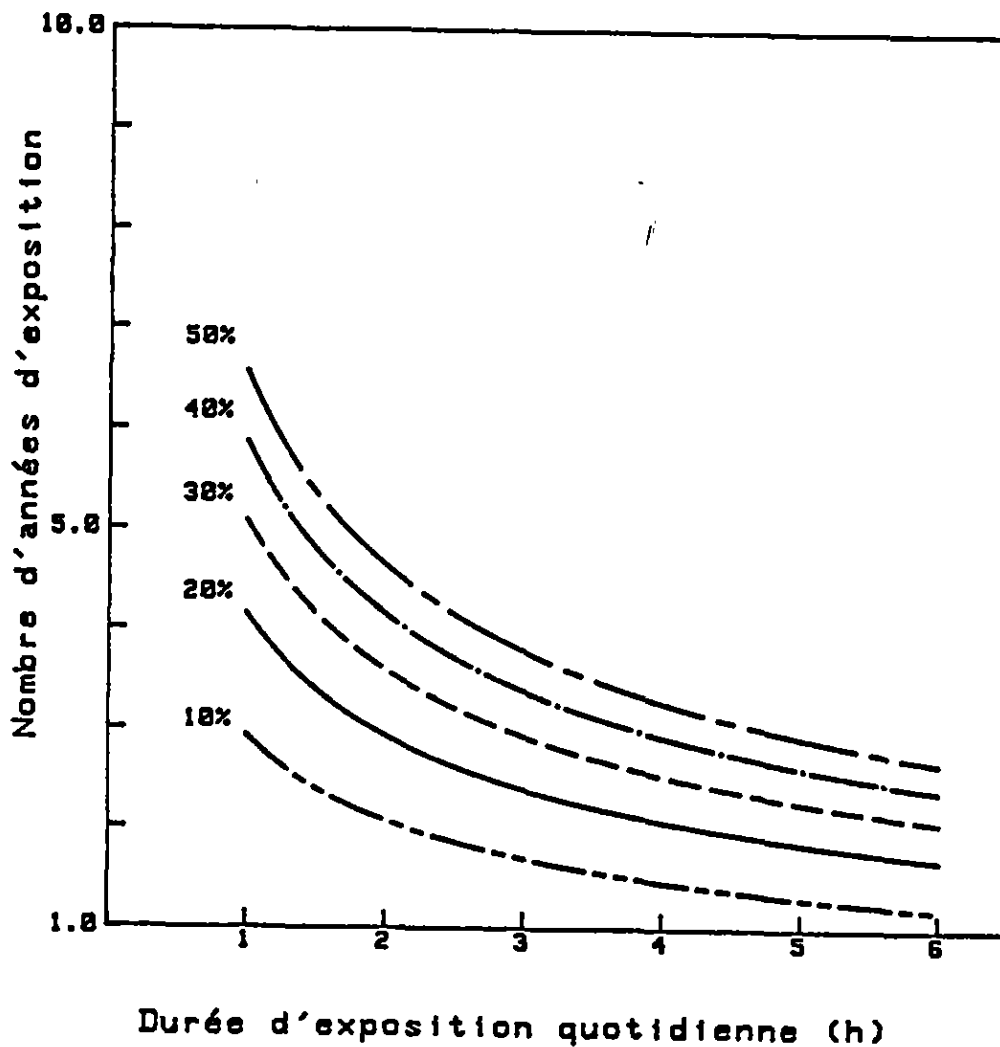


Figure 15: Susceptibilité d'atteinte du phénomène de Raynaud en fonction de la durée quotidienne et du nombre d'années d'exposition aux vibrations générées par une meuleuse pneumatique verticale en situation réelle de travail ($a_{h,v} = 20.5 \text{ ms}^{-2}$)

La Conférence Américaine Gouvernementale d'Hygiénistes Industriels des États-Unis ("ACGIH") publie depuis 1984 des valeurs limites d'exposition (TLV) en ce qui concerne l'exposition aux vibrations mains-bras. Ces limites sont représentées en terme de la valeur efficace de l'accélération pondérée $a_{h,w}$ permise en fonction de la durée d'exposition quotidienne (continue ou intermittente). Elles représentent les conditions selon lesquelles la majorité des travailleurs exposés ne devraient pas progresser au delà de la phase 3 dans la grille de classification Taylor-Pelmeur des doigts blancs dûs aux vibrations [1]. Cette phase est caractérisée par un blanchissement important des doigts, avec épisodes fréquents l'été et l'hiver. Ces limites sont reproduites dans le tableau 3.

La relation dose-effet annexée à la norme ISO 5349 exprime la relation qui existe entre le niveau de vibration, la durée d'exposition et le percentile de population susceptible de démontrer les premiers symptômes caractérisés par le blanchissement d'au moins un bout de doigt. En ce sens, cet état correspond à la phase 1 dans la grille de classification Taylor-Pelmeur.

TABLEAU 3: Valeurs limites d'exposition aux vibrations mains-bras proposées par la Conférence Américaine Gouvernementale d'Hygiénistes Industriels (ACGIH)

DURÉE D'EXPOSITION QUOTIDIENNE (h)	VALEUR EFFICACE DE L'ACCÉLÉRATION PONDÉRÉE SELON L'AXE DOMINANT ($a_{h,w}$) (ms^{-2})
4 - 8	4
2 - 4	6
1 - 2	8
< 1	12

La valeur des TLVS apparaissant dans le guide de l'ACGIH exprime un niveau de vibration de trois fois inférieur à la valeur efficace d'accélération pondérée requise pour produire une susceptibilité d'atteinte fixée à 50% d'une population de travailleurs après 5 à 6 années d'exposition. De là réside le lien entre les valeurs TLVS et la relation (11) annexée à la norme ISO 5349.

8.3 Évaluation du facteur de crête

L'évaluation du facteur de crête (f_c) des signaux vibratoires, bien qu'elle ne soit pas exigée dans la norme ISO 5349, permet néanmoins d'apprécier, par rapport à la valeur efficace du signal, l'aspect impulsionnel des vibrations. De façon générale, le facteur de crête f_c est défini comme le rapport de la valeur crête de l'accélération pondérée à la valeur efficace de l'accélération pondérée du signal temporel.

8.3.1 Méthode approximative de calcul du facteur de crête

Ainsi, le facteur de crête peut être obtenu directement à partir du spectre temporel pondéré du signal vibratoire en divisant la valeur de crête (positive ou négative) par la valeur efficace. Cependant, comme la valeur calculée est susceptible de dépendre de la période d'intégration T utilisée pour obtenir la valeur efficace d'accélération pondérée, il est recommandable de fixer cette période à 1 minute, bien qu'aucune règle précise ne soit définie à cet égard.

Le calcul du facteur de crête de la façon décrite ci-dessus ne devrait être utilisé, à toute fin pratique, que lorsque le signal vibratoire est périodique ou qu'il est conforme à un processus gaussien [49]. Cependant, cette procédure est souvent utilisée même si ces conditions ne sont pas respectées.

L'évaluation du facteur de crête peut donc être effectuée pour chaque segment de signal vibrationnel d'une durée d'une minute. La valeur efficace d'accélération pondérée est évaluée à chaque minute en utilisant une des méthodes décrites en 8.1.1 et 8.1.2. La valeur de crête du signal pondéré est également obtenue à chaque minute en utilisant un détecteur de crête approprié. Le rapport de l'accélération crête pondérée à l'accélération efficace pondérée permet de calculer un facteur de crête à chaque minute. Enfin, le facteur de crête moyen et son écart-type peuvent être évalués.

8.3.2 Méthode exacte d'évaluation du facteur de crête

De façon rigoureuse, le facteur de crête (positif et négatif) devrait être obtenu à partir de la courbe de densité de probabilité cumulée $P(\mu)$ qui exprime le rapport de la valeur du temps pendant lequel l'amplitude du signal est inférieur à une valeur fixe (a), au temps total d'observation.

Cette courbe est généralement exprimée en fonction du produit du facteur de crête (f_c) et de l'accélération instantanée (a) (i.e. af_c). Un seuil de probabilité de 1% peut être fixé pour déduire le facteur de crête positif et négatif [6].

On a alors:

$$\begin{aligned} P(af_c^+) &= 0.99 \\ P(af_c^-) &= 0.01 \end{aligned} \tag{12}$$

Les facteurs de crête positif et négatif sont identiques pour une courbe de densité cumulée symétrique. La figure 16 illustre le mode d'obtention du facteur de crête à partir de la procédure décrite.

Les points de vue varient encore beaucoup dans la littérature concernant l'influence du degré impulsionnel des vibrations (caractérisé par le facteur de crête) sur l'apparition ou le développement du phénomène de Raynaud.

Certaines études concluent qu'il n'existe pas de différences significatives entre les effets causés par des vibrations de type impulsionnel et non-impulsionnel [50], du moins lorsque les périodes d'exposition sont courtes. D'autres études indiquent que le risque de développer le phénomène de Raynaud augmente lorsque les vibrations sont de type impulsionnel [51], c'est pourquoi, l'évaluation du facteur de crête devrait être faite dans la mesure du possible, tant que des précisions n'auront pas été apportées sur son influence potentielle.

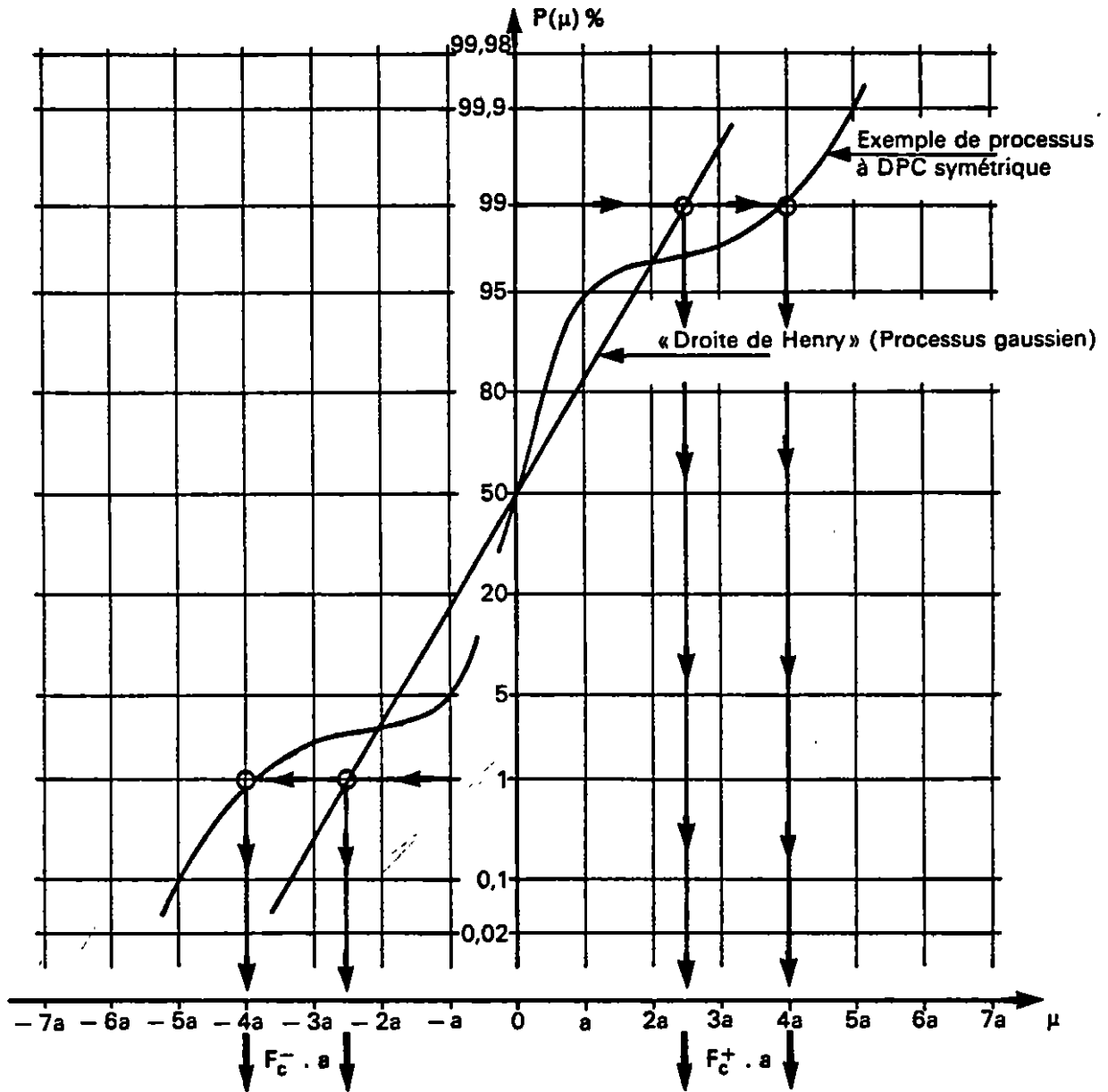


Figure 16: Évaluation des facteurs de crête positif et négatif à partir de la densité de probabilité cumulée

9.- UN EXEMPLE: ÉVALUATION DE L'EXPOSITION AUX VIBRATIONS MAINS-BRAS SUR UNE MEULEUSE PORTATIVE

9.1 Application de la grille d'évaluation

La méthode d'évaluation de l'exposition aux vibrations mains-bras décrite dans ce rapport a été appliquée en milieu de travail sur une meuleuse pneumatique verticale utilisée dans un chantier naval lors de la construction de dômes de sonar de bateaux. Les détails relatifs au poste de travail, à la machine-outil, au travailleur, aux instruments de mesure, à l'étalonnage et à la mesure apparaissent dans la grille d'évaluation de la figure 17.

Dans ce cas particulier, un système de mesure comportant 6 canaux d'enregistrement est utilisé pour mesurer simultanément les vibrations sur les deux poignées de la meuleuse dans chacune des directions x_h , y_h et z_h . L'adaptateur cylindrique est utilisé en conjonction avec un accéléromètre triaxial et est fixé à la poignée à l'aide d'un collier de serrage.

9.2 Mesure de la valeur efficace de l'accélération pondérée

La valeur efficace de l'accélération pondérée est obtenue par intégration par bandes de fréquence de 1/3 d'octave. Un spectre en bandes de fréquences de 1/3 d'octave est présenté à la figure 18, représentant les vibrations pondérées numériquement pour l'axe dominant y_h des vibrations obtenues sur la poignée gauche lors de conditions réelles de travail. La valeur efficace de l'accélération pondérée est alors 20.5 ms^{-2} selon cette direction. Les valeurs efficaces obtenues selon les 5 autres orientations apparaissent dans le tableau 4. La période d'intégration utilisée est de 4 minutes.

FIGURE 17

GRILLE D'ÉVALUATION
DE L'EXPOSITION AUX VIBRATIONS
MAINS-BRAS

DUE À L'OPÉRATION DE
MEULEUSES PNEUMATIQUES VERTICALES

CHEZ

Chantier naval A

Institut de recherche en santé et en sécurité
du travail du Québec (IRSST)
505, boul. de Maisonneuve ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2

DATE DE LA MESURE

87 / 08 / 26
A M J

I. DESCRIPTION DU POSTE DE TRAVAIL

i Nombre de machine-outils impliqués: 1

ii Liste des machines-outils utilisés et pourcentage de temps approximatif d'utilisation pour chacun:

Machine-outil	Pourcentage approx.
<u>Meuleuse verticale, 12000 rpm</u>	<u>100</u>
_____	_____
_____	_____
_____	_____

iii But visé par l'opération de la/des machine(s)-outil(s):
Rectifier des cordons de soudure et polir la surface touchée
Le meulage est effectué sur des dômes de sonar devant être installés sous des bateaux.

iv Mode d'opération de la machine-outil: Le meulage est effectuée à un angle avec la pièce afin de dégager l'excédent de soudure. La surface est par la suite polie, d'abord en utilisant un meulage circulaire puis enfin, en faisant sursauter la meule sur la surface.

v Patron d'exposition au cours de la journée:

a) Durée de la journée de travail (h) 8

b) Durée permise pour les repas, repos, etc. (h) 1.5 approx.

c) Pourcentage de temps approx. pendant lequel des vibrations sont générés par la machine-outil 60

vi Description de la/des pièce(s) traité(s): Dôme de sonar de bateau dont l'acier de type MIL-S-22698, Classe U, Grade DH 36. Le diamètre du dôme est de 10-15 pieds.

vii Nombre approximatif de pièces traitées par journée de travail: 1 *chaque dôme nécessite environ 4000 heures de meulage.

viii Nombre approximatif de jours d'exposition par année: 200 - 240 mais peut varier selon la charge de travail au cours de l'année.

ix Description de la/des posture(s) de travail utilisée(s):
Quatre configurations potentielles de travail: meulage de revers avec la meuleuse au bout des bras, meulage directement de face, meulage sur un plancher, meulage sur une surface courbe rejointe du dessous.

II. <u>DESCRIPTION DE LA MACHINE-OUTIL</u> (remplir pour chaque type de machine-outil utilisé)			
		<u>MACHINE</u>	<u>OUTIL</u>
i	Nom	<u>Meuleuse pneumatique</u>	<u>Meule</u>
ii	Fabricant	<u>Cleco</u>	<u>Wright Abrasives</u>
iii	Type	<u>Verticale</u>	<u>Boisseau conique: forte granulométrie</u>
iv	Numéro du modèle	<u>-----</u>	<u>-----</u>
v	Numéro de série	<u>DS 66</u>	<u>-----</u>
vi	Masse	<u>12 lbs approx.</u>	<u>2 lbs approx.</u>
vii	Dimensions	<u>-----</u>	<u>4/3x2x5/8-18</u>
viii	Conditions de fonctionnement (e.g. vitesse de rotation, cadence de frappe)	<u>12000 rpm</u>	<u>12000 rpm max.</u>
ix	Pression d'air	<u>90 psi</u>	<u>-----</u>
x	État de marche	<u>Bon</u>	<u>Excellent</u>
xi	Nombre d'années d'utilisation	<u>Plus de 10 ans</u>	<u>Neuf</u>
xii	Modifications apportées	<u>Aucune</u>	<u>Aucune</u>
xiii	Description de la/des poignée(s):	<u>Poignées métalliques symétriques ne comportant pas de matériau visco-élastique, gachette sur la poignée droite de la meuleuse.</u>	
xiv	Diagramme de la machine-outil indiquant le/les point(s) de mesure ainsi que le/les axe(s) de mesure:	<u>_____</u> <u>_____</u> <u>_____</u>	

III. EXPÉRIENCE PROFESSIONNELLE DU TRAVAILLEUR/TRAVAILLEUSE

- i Age du travailleur/travailleuse: 35 ans
- ii Nombre d'années d'expérience au poste de travail observé:
15 ans
- iii Nombre d'années d'exposition aux vibrations mains-bras en milieu de travail: 15 ans
- iv Évaluation subjective des vibrations par l'opérateur:
Les vibrations sont ressenties surtout lorsque le meulage est effectué en faisant sursauter la meule sur la surface.
- v Problème vasculaire éprouvé par l'opérateur: Engourdissements ressentis au niveau des doigts mais pas de problèmes vasculaires diagnostiqués comme tels.
- vi Utilisation d'équipement de protection ou d'une méthode de travail pour contrer les vibrations: Gants utilisés avant tout comme moyen de sécurité et pour protéger les mains contre le froid.

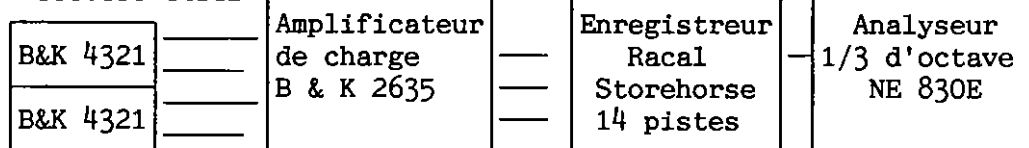
IV. DESCRIPTION DES INSTRUMENTS DE MESURE DES VIBRATIONS

i Capteurs

Type	Marque	Modèle	No. de série	Point de mesure	Axe
Accéléromètre	B&K	4321	1173731	poignée gauche	z_h
				y	x_h
				z	y_h
Accéléromètre	B&K	4321	1173730	poignée droite	z_h
				y	x_h
				z	y_h

ii Schéma synoptique de la chaîne de mesure (incluant marque et modèle des instruments)

Accéléromètres



iii Méthode d'intégration (choisir a ou b)

a) temporelle

Marque de l'intégrateur	Modèle	Filtre mains-bras (interne/externe)	Intégration (lin,exp.)	Constante de temps

b) fréquentielle par bandes de 1/3 d'octave

. Amplificateurs de charge:

Canal	Axe	Marque	Modèle	No. de série	Sensibilité
gauche 1	z_h	B&K	2635	1156073	3.16mV/ms^{-2}
2	y_h	B&K	2635	1156074	3.16mV/ms^{-2}
3	x_h	B&K	2635	1156076	3.16mV/ms^{-2}
droite 1	z_h	B&K	2635	1156071	3.16mV/ms^{-2}
2	y_h	B&K	2635	921788	3.16mV/ms^{-2}
3	x_h	B&K	2635	1156070	3.16mV/ms^{-2}

. Analyseur: Norwegian Electronics, Type 830

V. ÉTALONNAGE ET MESURE

- i Méthode d'étalonnage de la chaîne de mesure: Excitateur de vibration portatif de type B&K 4294.
-
- ii Fréquence d'étalonnage : 160 * Hz
- iii Amplitude utilisée: : 10 ms⁻²
- iv Linéarité de la réponse : ± 1 dB
- v Sensibilité transversale : 5 %
- vi Mode de fixation des capteurs: Adaptateur cylindrique installé sur la poignée à l'aide de colliers de serrage.
-
- vii Durée de la mesure: 4-5 minutes
- viii Observations et commentaires: _____

- * La fréquence d'étalonnage recommandée est en réalité 80Hz à un niveau de 1 ms⁻².

Tableau 4: Valeurs efficaces d'accélération pondérée mesurées sur chaque poignée d'une meuleuse pneumatique verticale, 12000 rpm.

Axe/Poignée	$a_{h,w}$ (ms^{-2})
x_h gauche	13.1
y_h gauche	20.5
z_h gauche	5.2
x_h droite	10.7
y_h droite	4.6
z_h droite	2.4

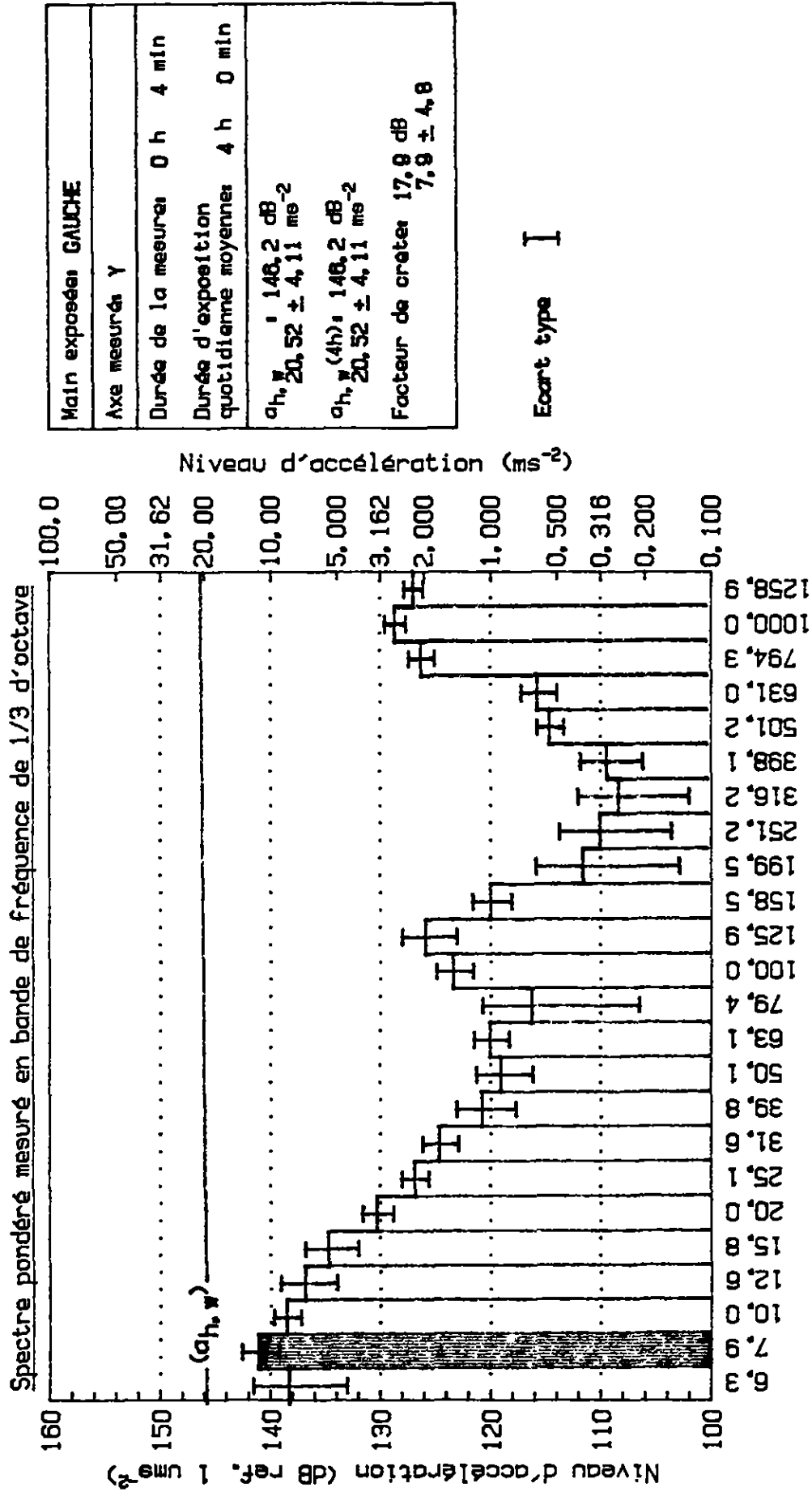


IRSST
Institut de recherche
en santé et en sécurité
du travail du Québec

Projet: CH. NAVAL A
Date de la mesure: 87-08-28

Objet: MEULEUSE PNEUMATIQUE VERTICALE
Type: CLECO (1200RPM)

Commentaires: TENUE EN OBLIQUE VERS LE HAUT (A PLAT)



Main exposées	GAUCHE
Axe mesurés	Y
Durée de la mesure	0 h 4 min
Durée d'exposition quotidienne moyenne	4 h 0 min
$a_{h,y}$	148,2 dB
	$20,52 \pm 4,11 \text{ ms}^{-2}$
$a_{h,y} (4h)$	148,2 dB
	$20,52 \pm 4,11 \text{ ms}^{-2}$
Facteur de crête	$17,9 \text{ dB}$
	$7,9 \pm 4,8$

Ecart type I

Figure 18: Spectre en fréquence pondéré en bandes de 1/3 d'octave

Le spectre présenté dans la figure 18 représente la moyenne d'une série de spectres évalués chacun sur une durée d'une minute. Cette moyenne est obtenue à partir de l'équation (9). L'écart type représente alors, pour chaque bande de fréquence, l'écart qui existe entre le niveau moyen de vibrations évalué à chacune des minutes. La valeur efficace d'accélération pondérée $a_{h,w}$ est obtenue en intégrant les niveaux pondérés de vibration sur toute la gamme de fréquences entre 6.3 et 1250 Hz. L'accélération efficace pondérée obtenue en direction y_h est de 20.5 ms^{-2} lors de l'opération de la meuleuse pneumatique. L'écart-type associé à cette valeur est 4.1 ms^{-2} . La fréquence dominante du spectre pondéré en fréquences apparaît dans la bande de fréquence de tiers d'octave centré sur 8 Hz, qui est indiqué par des traits noirs sur le spectre.

9.3 Mesure du facteur de crête

Le facteur de crête apparaît également dans les données de la figure 18. Celui-ci est obtenu pour chaque segment de vibrations d'une durée d'une minute, en divisant l'accélération crête du signal par la valeur efficace. L'écart-type sur le facteur de crête moyen est aussi indiqué. Pour le cas présenté, le facteur de crête varie beaucoup de minute en minute, présumément à cause des différentes façons selon lesquelles la meuleuse est opérée (tantôt par sautellement, tantôt en polissant la pièce). Ceci se répercute par une très large valeur d'écart-type sur la valeur moyenne du facteur de crête, soit 7.9 ± 4.8 (on devrait rapporter 8 ± 5).

9.4 Application de la relation dose-effet

La relation dose-effet de l'équation 11 appliquée au cas à l'étude indique que plus de 50% des travailleurs exposés démontreraient des signes de blanchissement des doigts après un peu plus de trois années d'utilisation de la meuleuse si elle était opérée à raison d'une durée effective de quatre heures par jour.

La relation entre le nombre d'années d'exposition T_r et la durée d'exposition quotidienne T apparaît graphiquement à la figure 15 pour ce cas particulier où $a_{h,w}$ est 20.5 ms^{-2} . Ce niveau, qui est associé à l'axe dominant des vibrations, est plus de cinq fois supérieur à la valeur limite fixée par l'ACGIH pour une durée d'exposition quotidienne de 4 heures. Ainsi des mesures préventives auraient avantage à être envisagées afin de réduire les risques pour les travailleurs.

9.5 Recommandations sur des mesures préventives

Des mesures préventives sont proposées en annexe dans la norme ISO 5349 qui pourraient s'appliquer au cas étudié. Celles-ci comprennent:

- L'implantation d'un système de surveillance médicale incluant des examens médicaux.
- Le maintien des équipements en bon état de fonctionnement, selon les instructions du fabricant.
- L'interruption de périodes prolongées d'exposition continue en prévoyant des périodes pendant lesquelles l'opérateur n'est pas soumis aux vibrations de la machine-outil.
- L'utilisation d'une force minimale de préhension par l'opérateur de façon à réduire la transmission des vibrations aux mains.
- Le port de gants dont le but principal est de garder les mains au chaud, le froid et l'humidité étant des facteurs importants dans le développement de problèmes vasculaires.

De plus, une étude effectuée sur des meuleuses portatives [19] a permis d'identifier les mesures suivantes comme moyens de prévention possibles:

- Les modèles de meuleuses les moins vibrants devraient être utilisés tels que les modèles à faible vitesse de rotation. Une analyse de productivité devrait cependant compléter l'évaluation de la meuleuse.
- Comme la meule semble être à l'origine de niveaux importants de vibrations, des démarches devraient être envisagées afin d'identifier si une meule parfaitement équilibrée au départ est susceptible de provoquer des niveaux d'exposition aux vibrations moins élevés comme le laisse supposer la littérature traitant du sujet.
- Dans la mesure du possible, une méthode de meulage privilégiant le meulage à angle avec la pièce devrait être encouragée tandis que l'utilisation du meulage par sautellement devrait être restreinte.

10.- CONCLUSION

Une méthodologie est présentée pour établir la contrainte vibratoire agissant sur le système mains-bras lors de l'utilisation de machines-outils tenus et guidés à la main. Cette méthodologie se base essentiellement sur les principes énoncés dans la norme ISO 5349 mais elle comporte beaucoup plus de précision sur la façon actuelle d'effectuer les mesures que la norme elle-même peut préciser. En ce sens, elle devrait permettre aux hygiénistes en santé et sécurité du travail d'effectuer et d'interpréter des mesures de vibrations générées par la plupart des machines-outils vibrants rencontrés en milieu de travail.

11.- RÉFÉRENCES

- [1] Brammer, A.J. (1984) Exposition de la main aux vibrations dans le secteur industriel. Rapport CNRC no. 22845. 65 p.
- [2] ACGIH 1987. Hand-arm (segmental) vibration. Dans Threshold Limit Values and Biological Exposure Indices for 1987-1988. American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 85-90.
- [3] Norme ISO 5349 (1986). Mechanical vibration - Guidelines for the Measurement and the Assessment of Human Exposure to Hand Transmitted Vibration.
- [4] Code d'essai PNEUROP 6610 (1983). Code d'essai pour la mesure des vibrations des meuleuses portatives tenues à la main.
- [5] Code d'essai PNEUROP 661600 (1985). Code d'essai pour la mesure des vibrations engendrées par les burineurs.
- [6] Norme française AFNOR E90-320 (1985). Mesurage, en laboratoire, des vibrations transmises à l'homme par les machines tenues et guidées à la main. Règles générales pour l'élaboration de codes d'essais particuliers.
- [7] Norme expérimentale AFNOR E90-321 (1983). Code d'essais pour le mesurage, en laboratoire, des vibrations émises par les machines portatives rotatives, à meuler, tronçonner, à disque, poncer, lustrer, polir, tenues et guidées à la main.
- [8] Norme française AFNOR E90-322 (1985). Mesurage, en laboratoire, des vibrations transmises à l'homme par les machines tenues et guidées à la main. Machines percutantes telles que brise-béton, marteaux-piqueurs, fouloirs, machines à damer et burineurs.
- [9] Norme Allemande DIN 45675 (1987). Exposure to mechanical vibration transmitted to the hand/arm system; general guidelines for measurement.

- [10] Draft International Standard ISO/DIS 8662/1. (1986). Hand Portable Power Tools -Measurement of Vibration at the Handle. Part I: General.
- [11] Draft International Standard ISO/DIS 8041 (1987) Human Response to Vibration. Measuring Instrumentation.
- [12] Norme expérimentale AFNOR E90-402. (1980). Vibrations et chocs mécaniques. Guide pour l'évaluation de l'exposition des individus à des vibrations transmises par les mains.
- [13] Anderson, J.S., Boughtflower, R.A.C. (1978) Measurement of the Energy Dissipated in the Hand and Arm Whilst Using Vibratory Tools, Applied Acoustics, 11, 219-224.
- [14] Hempstock, T.I., O'Connor, D.E. (1975) Evaluation of Human Exposure to Hand-Transmitted Vibration, Applied Acoustics, Vol. I, 87-99.
- [15] Rasmussen, G. (1977). Measurement Techniques for Hand-Arm Vibration. Dans Proceedings of the International Occupational Hand-Arm Vibration Conference, NIOSH, Cincinnati, Ohio. 173-175.
- [16] Reynolds, D.D., Basel, R., Taylor, W. (1984) A Study of Hand Vibration on Chipping and Grinding Operators, Part I: Vibration Acceleration Levels Measured on Pneumatic Tools used in Chipping and Grinding Operations, Journal of Sound and Vibration, Vol. 95, No. 4, 479-397.
- [17] Glass, S.W. (1979). Vibration Analysis of High Cycle 5400 Hand Grinders used on Flat Steel Plates. Rapport ISBN 91-7464-065-B. Stockholm. 27 p.
- [18] Pekkarinen, J., Starck, J. (1986) Digital High-Speed Sampling of Combined Exposure to Noise and Vibration. Scand J Work Environ Health, Vol. 12, No. 4, 327-331.

- [19] Boileau, P.-E., Scory, H., Boutin, J. (1988). Exposition aux vibrations mécaniques engendrées par les meuleuses portatives. Rapport/Étude Bilan de connaissance, IRSST, Montréal, (Québec), 29 P.
- [20] Starck, J. (1984). Characteristics of Vibration, Hand Grip Force, and Hearing Loss in Vibration Syndrome. Publications of the University of Kuopio, Finland. 167 p.
- [21] Yamawaki, S. (1977). Reduction of Vibration in Power Saws in Japan. Dans Proc. of the International Occupational Hand Arm Vibration Conference, NIOSH, Cincinnati, Ohio. 209-217.
- [22] Suggs, C.W., Hanks, J.M., Roberson, G.T. (1982). Vibration of Power Tool Handles. Dans Vibration Effects on the Hand and Arm in Industry par A.J. Brammer et W. Taylor, John Wiley et Sons. 245-251.
- [23] Starck, J., Farkhila, M., et coll. (1983) Vibration Syndrome and Vibration in Pedestal Grinding. British J. Ind. Medicine, Vol. 40, 426-433.
- [24] Auerbach, E.I. (1982). An Investigation of Chipping Hammer Vibration. Dans Vibration Effects on the Hand and Arm in Industry par A.J. Brammer et W. Taylor, John Wiley & Sons. 311-315.
- [25] Tasker, E.G. (1986). Assessment of Vibration Levels Associated with Hand-Held Roadbreakers. Scand J. Work Environ Health, Vol. 12, No.4, 407-412.
- [26] Reynolds, D.D. (1980) Hand Tool Vibration Associated with Jack Leg Drills, Jack Hammers and Slushers. NIOSH, Cincinnati, Ohio. PB82-151812. 115 p.
- [27] Bitsch, J., Donati, P., Poirot, R., Roure, L. (1986). Elaboration of a Standard Procedure for the Measurement of Vibration Emitted by Percussive Tools. - Application to Breakers. Scand J. Work Environ Health, Vol. 12, No. 4, 347-350.

- [28] Farkkila, M., Starck, J. et coll. (1978). Vasospastic Symptom Caused by Asymmetrical Vibration Exposure of the Upper Extremities to a Pneumatic Hammer. Scand J. Work Environ Health, Vol. 4, 330-335.
- [29] Glass, S.W., Sundin, S. (1980). Factors Affecting Vibration Levels in Impact Drills. Stockholm. ISBN 91-7464-076-3. 37 p.
- [30] Rodgers, L.A., Eglin, D., Hart, W.F.D. (1982) Rock-Drill Vibration and White Fingers in Miners. Dans Vibration Effects on the Hand and Arm in Industry par A.J. Brammer et W. Taylor, John Wiley et Sons. 317-323.
- [31] Radwin, R.G., Armstrong, T.J. (1985). Assessment of Hand Vibration Exposure on an Assembly Line. Am. Ind. Hyg. Assoc. J., Vol. 46, No. 4, 211-229.
- [32] Harrison, R.T., Murphy, W.A. (1982). Motorcycle Handlebar Vibration. Dans Vibration Effects on the Hand and Arm in Industry par A.J. Brammer et W. Taylor, John Wiley et Sons, 239-244.
- [33] Bentley, S., O'Connor, D.E. et coll. (1982). Vibration White Finger in Motorcycle Speedway Riders. Dans Vibration Effects on the Hand and Arm in Industry par A.J. Brammer et W. Taylor, John Wiley et Sons, 189-192.
- [34] Boileau, P.E., Scory, H. (1988) Exposition de la main aux vibrations sur les manettes d'un bélier mécanique. Rapport Étude/Bilan de connaissance, IRSST, Montréal, Québec, 17 p.
- [35] Lombard, R., Holt, S. (1982) Measurement of Chain Saw Handle Vibration. Dans Vibration Effects on the Hand and Arm in Industry par A.J. Brammer et W. Taylor, John Wiley et Sons, 203 - 209.
- [36] Reynolds, D.D., Wilson, F.L. (1982) Mechanical Test Stand for Measuring the Vibration of Chain Saw Handles During Cutting Operations. Dans Vibration Effects on the Hand and Arm in Industry par A. J. Brammer et W. Taylor, John Wiley et Sons, 211 - 224.

- [37] Rasmussen, G. (1982). Measurement of Vibration Coupled to the Hand-Arm System. Dans Vibration Effects on the Hand and Arm in Industry par A.J. Brammer et W. Taylor, John Wiley et Sons, 89 - 96.
- [38] Taylor, W, Brammer, A.J. (1982) Vibration Effects on the Hand and Arm in Industry: An Introduction and Review. Dans Vibration Effects on the Hand and Arm in Industry par A.J. Brammer et W. Taylor, John Wiley et Sons, 1 - 12.
- [39] Eklund, L., Kiglborg, S., O'Connor, D.E. (1984) Vibration Levels Along the Support Handle of a Portable Angle Grinder-Arbete Och Hälsa, ISBN91-7464-235-9. 29 p.
- [40] Reynolds, D.D., Wasserman, D.E., Basel, R et coll. (1982) Vibration Acceleration Measured on Pneumatic Tools used in Chipping and Grinding Operations. Dans Vibration Effects on the Hand and Arm in Industry par A.J. Brammer et W. Taylor, John Wiley et Sons, 225 - 238.
- [41] O'Connor, D.E., Lundquist, B. (1982) Method for Measuring the Vibration of Impact Pneumatic Tools. Dans Vibration Effects on the Hand and Arm in Industry par A.J. Brammer et W. Taylor, John Wiley et Sons, 97 - 101.
- [42] Catalogue de produits Bruël et Kjaer (1986)
- [43] Kitchener, R. (1977). The Measurement of Hand-Arm Vibration in Industry. Dans Proceedings of the International Occupational Hand-Arm Vibration Conference, NIOSH, Cincinnati, Ohio. 153-159.
- [44] Scory, H. Boutin, J., Boileau, P.-E. (1987) Automated Systems for Evaluation of Exposure to Whole-Body Vibrations. Poster présenté à la American Industrial Hygiene Conference, Montréal, Québec. 9 p.
- [45] Méthodes d'étalonnage 15-A. (1987). Méthode d'étalonnage des accéléromètres. Méthodes de Laboratoires, IRSST, Montréal (Québec). 15 p.
- [46] Donati, P., Bitsch, J., Prost, G. (1986). Mesures, interprétation et prévention technique des vibrations transmises à l'homme. Arch. mal. prof., Vol. 47, no. 8, 591 - 596.

- [47] Hempstock, T.I., O'Connor, D.E. (1977). Evaluation of Human Exposure to Hand-Transmitted Vibration. Dans Proceedings of the International Occupational Hand-Arm Vibration Conference, NIOSH, Cincinnati, Ohio. 129-135.
- [48] Brammer, A.J. (1982). Threshold Limit for Hand-Arm Vibration Exposure Throughout the Workday. Dans Vibration Effects on the Hand and Arm in Industry, Edité par A.J. Brammer et W. Taylor, John Wiley & Sons. 291 - 301.
- [49] Bendat, J.S., Piersol, A.G. (1986). Random Data. Analysis and Measurement Procedures. 2^e édition. John Wiley & Sons. 48 - 57.
- [50] Dupuis, H., Schäfer, N. (1986). Effects of impulse vibration on the hand-arm system. Scand J Work Environ Health, Vol. 12, no. 4., 320 - 322.
- [51] Starck, J., Pyykkö, I. (1986). Impulsiveness of vibration as an additional factor in the hazards associated with hand-arm vibration. Scand J Work Environ Health, Vol. 12, no. 4. 323-326.