

**Validation d'une méthode
de mesure des vibrations
mains-bras appliquée
aux foreuses à béquille**



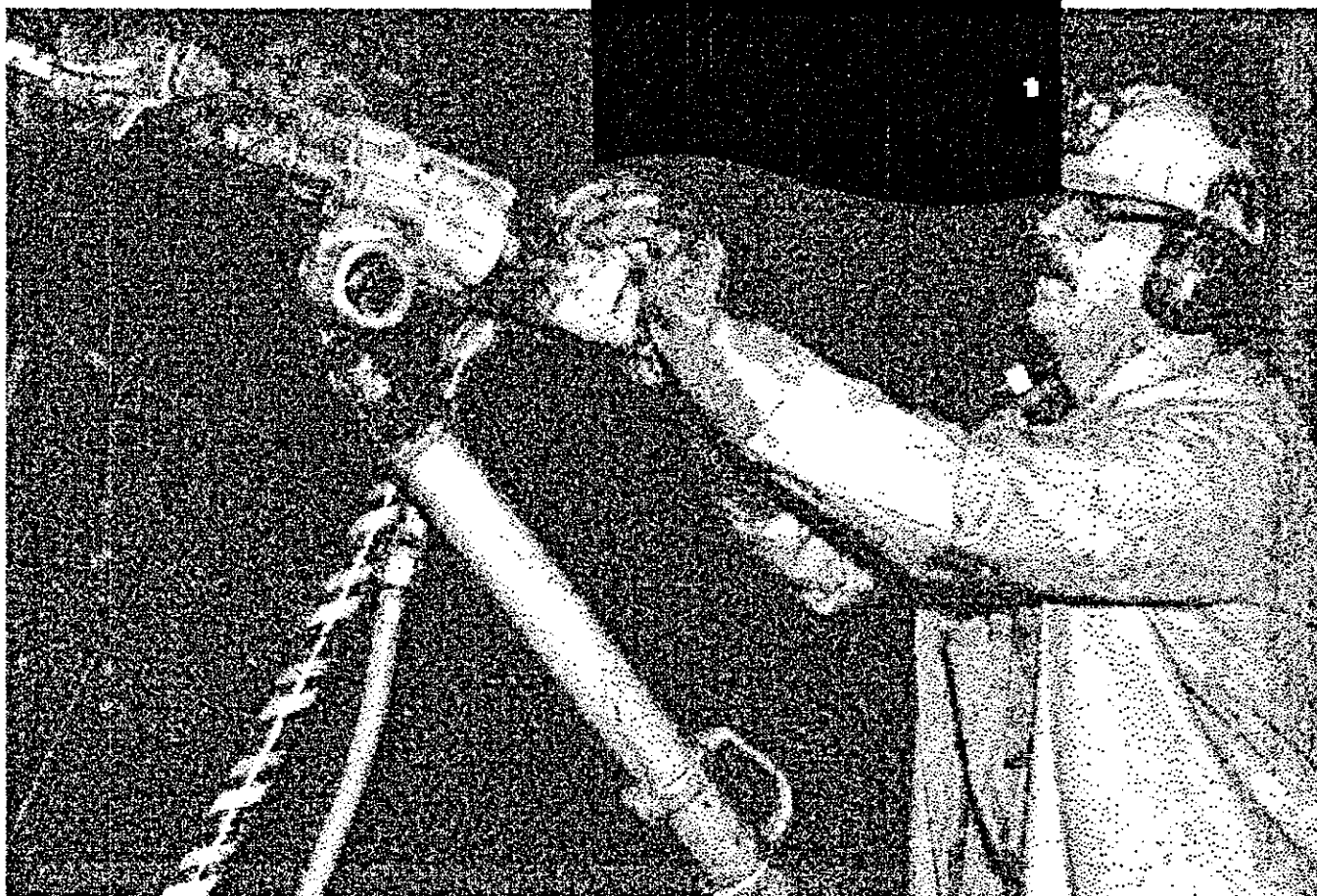
**ÉTUDES ET
RECHERCHES**

**Paul-Émile Boileau
Jérôme Boutin
Pierre Drouin**

Janvier 1994

R-080

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,

**Validation d'une méthode
de mesure des vibrations
mains-bras appliquée
aux foreuses à béquille**

**Paul-Émile Boileau, Jérôme Boutin
et Pierre Drouin
Programme sécurité-ingénierie, IRSST**

**ÉTUDES ET
RECHERCHES**

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, janvier 1994.
1^{er} trimestre 1994.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
1.0 INTRODUCTION	1
2.0 ÉTAT DES CONNAISSANCES	2
3.0 OBJECTIF	4
4.0 MÉTHODOLOGIE	5
5.0 RÉSULTATS	7
5.1 Établissement de la fréquence de résonance de la poignée	7
5.2 Établissement de la fréquence de résonance du bracelet	10
5.3 Étalonage du capteur laser de vibrations	13
5.4 Étalonage du capteur laser de vibrations par rapport à l'accéléromètre du bracelet	17
5.5 Validation du bracelet	25
6.0 DISCUSSION	30
7.0 LIMITATIONS INHÉRENTES AUX MESURES	35
8.0 VALIDATION SUR LE TERRAIN	37
9.0 CONCLUSION	41
REMERCIEMENTS	42
BIBLIOGRAPHIE	43

1.0 INTRODUCTION

En 1982, une étude effectuée par le CRIQ (Centre de recherche industrielle du Québec) estimait à 27 000, le nombre de travailleurs québécois sujets à utiliser une foreuse à béquille dans le cadre de leur travail (statistiques provenant de l'Association des mines et métaux du Québec). Dans une analyse récente, le "Mines Accident Prevention Association of Ontario" considérait le phénomène de Raynaud et la surdité professionnelle comme les deux maladies comportant le plus grand nombre de demandes d'indemnisation dans le secteur minier. Entre 1980 et 1988, plus de 2 000 demandes d'indemnisation ont été enregistrées dans les mines de l'Ontario en ce qui a trait au phénomène de Raynaud (blanchissement des doigts). Le rapport médical de l'état de santé des travailleurs de Chapais démontre bien l'importance du sujet compte tenu du pourcentage important de travailleurs présentant des symptômes du phénomène de Raynaud.

Depuis quelques années, l'IRSST a étudié les moyens de réduire les vibrations engendrées par les foreuses à béquille. Dans le cadre de ses activités, l'IRSST a effectué une étude comparative à la Division Opémiska de Minnova [1].

Les résultats obtenus dans cette étude ont permis de démontrer que :

- 1 - les niveaux de vibrations transmises aux mains des opérateurs de foreuses pneumatiques pouvaient être inférieurs pour un modèle de foreuse comparativement à ceux d'un autre;
- 2 - la façon de manipuler les foreuses affecte, de façon non négligeable, les niveaux de vibration transmis à l'opérateur;
- 3 - une poignée antivibration proprement adaptée permet une réduction considérable des niveaux de vibration transmis;
- 4 - la méthode de mesure des vibrations faisant usage d'un bracelet au niveau du poignet permet une comparaison entre différents types de foreuses, éliminant plusieurs problèmes d'ordre technique rencontrés avec la mesure de vibrations effectuée sur la poignée.

Parmi les recommandations concernant la suite à donner à ces travaux, on proposait la validation expérimentale de la technique de mesure des vibrations au niveau du poignet puisque l'ensemble des résultats repose sur cette technique qui, bien que possédant un potentiel intéressant, a été peu appliquée, et pour laquelle peu de données existent. Cet aspect fait d'ailleurs l'objet d'une des

recommandations formulées par un groupe de travail mis sur pied par MITEC ("Mining Industry Technology Council of Canada") pour établir un plan d'action visant à réduire l'impact des vibrations mains-bras et du bruit sur la santé des opérateurs de foreuses à béquille [2].

L'objectif de l'étude proposée consiste à valider expérimentalement la méthode de mesure des vibrations au niveau du poignet dans le but d'établir le degré d'exactitude des résultats obtenus lors des mesures à Minnova.

2.0 ÉTAT DES CONNAISSANCES

Le lien de causalité entre l'exposition aux vibrations des mains et l'affection vasculaire, tel le phénomène de Raynaud, est maintenant bien établi si l'on en juge par la littérature publiée sur le sujet [3,4,5]. D'ailleurs, la norme internationale ISO 5349 [6] qui représente le guide le plus largement reconnu pour mesurer et analyser les vibrations agissant sur le système mains-bras, fait référence à une relation dose-effet. Celle-ci permet d'estimer la prévalence, soit le percentile de population exposée susceptible de démontrer des symptômes associés au phénomène de Raynaud (e.g. blanchissement des doigts), ainsi que la période de latence, mesurée en années d'exposition avant l'apparition des premiers symptômes, lorsque l'on connaît le niveau de vibration équivalant à quatre heures d'utilisation d'outils vibrants par jour (niveau mesuré à l'interface entre la main et la surface vibrante).

Dans la norme actuelle, 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 [7,8]. 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;
- 2 - fixer l'accéléromètre directement sur la surface vibrante à un endroit situé le plus près possible de la main [3].

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 surface 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 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 avec laquelle la main est en contact (e.g. poignée d'outil).

Paradoxalement, l'augmentation de la force de préhension sur la poignée a pour effet d'amortir les vibrations à l'interface main-poignée tout en favorisant une meilleure transmissibilité des vibrations dans le système mains-bras à cause du meilleur couplage. Ce couplage entre la main et la poignée, et les facteurs qui l'influencent (i.e. force de préhension, orientation de la main et de l'avant-bras par rapport à la source excitatrice, etc.) sont sources de problèmes avec la méthode de mesure actuelle.

Une méthode de mesure de vibrations développée en Finlande fait usage d'un bracelet spécial pour évaluer les vibrations au niveau du poignet [9]. Bien que cette méthode ne soit pas celle préconisée dans la norme ISO 5349, son application par Pekkarinen et collègues [10] sur des tronçonneuses et des meuleuses a démontré que le niveau efficace non pondéré des vibrations mesurées au poignet était à toutes fins pratiques identique au niveau efficace pondéré des vibrations mesurées sur la poignée de l'outil, près de la main. La pondération définie dans la norme ISO 5349 exprime la différence de sensibilité relative de la main à différentes fréquences et de ce fait, ne peut être appliquée qu'aux mesures entre la main et la source de vibration. L'avantage à utiliser une telle méthode vient du fait que l'énergie vibratoire réellement absorbée par la main peut être mesurée tout en tenant compte de la force de préhension exercée.

Tout récemment, une méthode de mesure ne requérant aucun contact a été utilisée pour enregistrer les mouvements de la main [11]. Il s'agit d'un capteur laser de vibration dont le faisceau est dirigé sur un morceau de ruban réfléchissant placé sur la main. Cette méthode permet ainsi de mesurer les vibrations sur n'importe quelle surface sans que les caractéristiques des vibrations soient modifiées par la présence de capteurs et par leur mode de fixation. Cette technique se prête évidemment surtout à la mesure de vibrations en laboratoire, sous conditions contrôlées. Ce système constitue ainsi un mode de référence avec lequel d'autres méthodes de mesure, impliquant un contact avec la surface vibrante, peuvent être comparées.

Une étude comparative [1] des vibrations mains-bras engendrées par différents types de foreuses, certaines comportant un manche antivibratile, a pu mettre en évidence le potentiel d'utilisation d'une méthode de mesure faisant usage d'un bracelet au niveau du poignet. Le bracelet utilisé comportait une partie métallique sur laquelle étaient fixés trois accéléromètres miniatures orientés

selon un système de coordonnées biodynamiques. Cette partie rigide épousait un côté du poignet, tandis que l'autre côté était constitué d'un bracelet extensible servant à serrer la section rigide et les accéléromètres, sur le poignet.

Les résultats obtenus dans cette étude ont permis de démontrer, qu'en plus d'éliminer plusieurs problèmes d'ordre technique rencontrés avec la mesure des vibrations directement sur la poignée, cette méthode permet de prendre en compte les facteurs liés à l'opération même de l'outil et de faire ressortir les différences individuelles entre foreurs. En effet, l'étude a démontré qu'un foreur pouvait être exposé à des niveaux de vibration significativement différents (différence de 20 à 30 %) selon sa façon d'opérer les foreuses. Il en va de même du taux de pénétration qui peut être modifié selon l'opérateur (pouvant atteindre un taux 20% supérieur).

Une fois l'effet de l'opérateur éliminé, les résultats ont démontré une différence entre les différents modèles de foreuses, différence n'ayant pas pu être observée avec la mesure sur la poignée à cause de difficultés techniques (i.e. niveaux de vibrations tellement intenses que la linéarité de réponse de l'accéléromètre en est affectée, difficulté à fixer les accéléromètres suffisamment bien pour les empêcher de bouger sous l'influence des chocs et des vibrations).

Cependant, la méthode de mesure au niveau du poignet reste à être validée puisqu'on ne connaît pas encore si le bracelet ou la façon de le fixer modifie les caractéristiques des vibrations transmises au poignet, ni sur quelle gamme de fréquences on peut compter sur son application.

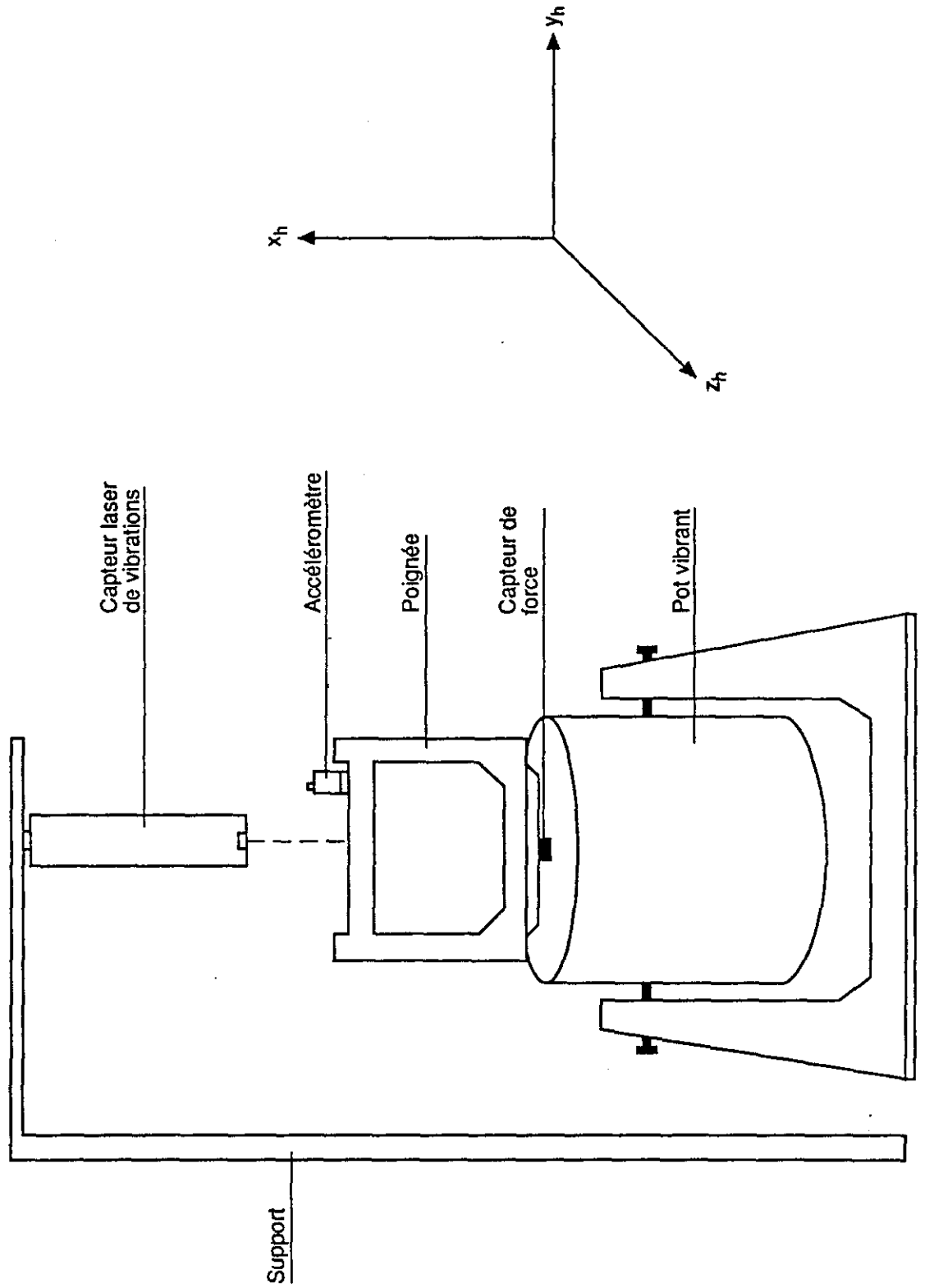
3.0 OBJECTIF

L'étude consiste à comparer les caractéristiques des vibrations (i.e. intensité, fréquence, cohérence) mesurées en utilisant des accéléromètres fixés à un bracelet attaché au poignet d'un individu avec les caractéristiques des vibrations mesurées directement sur le poignet à l'aide d'un capteur laser de vibrations. Ce dernier système a l'avantage de ne requérir aucun contact avec l'individu, éliminant ainsi les problèmes de couplage entre le capteur et le poignet. Cependant, le système est limité principalement à des applications en laboratoire où l'orientation du poignet peut être rigoureusement contrôlée. De plus, ce système ne permet qu'une mesure dans une seule direction à la fois. L'hypothèse de départ est donc que le capteur laser de vibrations procure une évaluation réaliste de l'énergie vibratoire réellement transmise au poignet. Ainsi, le bracelet est jugé valide s'il permet de reproduire exactement ou presque les vibrations telles que mesurées à l'aide du capteur laser.

4.0 MÉTHODOLOGIE

Montage expérimental

Le montage expérimental consiste en une poignée d'aluminium montée sur un exciteur B&K 4812 dont la capacité est de 445 N (figure 1). Le tout est relié à un système de génération et d'amplification de signaux permettant de sélectionner le type d'excitation, son amplitude et sa gamme de fréquences. La poignée et le pot vibrant peuvent être orientés selon les axes de mesure requis. Une description détaillée de la poignée est donnée dans une section ultérieure. Un capteur de force installé à la base de la poignée permet de mesurer les vibrations d'entrée. Un accéléromètre est fixé sur la poignée, permettant de mesurer les vibrations auxquelles est exposée la main agrippant la poignée. Le capteur laser de vibrations est quant à lui monté sur un support et orienté de façon à ce que son faisceau soit perpendiculaire à la surface de contact dans la direction de mesure requise. La sortie de chacun des capteurs est reliée à un conditionneur/amplificateur et de là, à une des entrées d'un analyseur FFT bicanaux B&K 2032. Généralement, l'analyse consiste à comparer le spectre en fréquences de deux points de mesure dans une gamme de fréquences d'intérêt.

Figure 1 : Montage expérimental pour valider le bracelet selon l'axe x_h 

Principe de mesure

En faisant le rapport des deux spectres en fréquence, on obtient la fonction de transfert entre deux points de mesure, d'où l'on peut juger de leur différence ou similitude respective. Les deux points de mesure étant effectués par deux systèmes de mesure différents, ces deux systèmes sont jugés identiques si la fonction de transfert est unitaire dans une gamme de fréquences données. De plus, la fonction de cohérence doit également être unitaire puisqu'elle indique le degré de similitude (amplitude et phase) entre les signaux provenant des deux systèmes de mesure.

Le bracelet est donc jugé valide sur la gamme de fréquences pour laquelle la fonction de transfert et la cohérence sont le plus près possible de un, c'est-à-dire lorsque le spectre en fréquences des vibrations du poignet enregistrées par le capteur laser est le plus près de celui enregistré par l'accéléromètre du bracelet dans une direction donnée. Ici, le faisceau laser est dirigé sur l'os du poignet, à proximité du bracelet. Cependant, compte tenu des nombreuses variables susceptibles d'influencer les résultats et des erreurs expérimentales associées aux mesures, on fixe arbitrairement à 0.8 la limite inférieure de la fonction de cohérence pour laquelle les résultats sont considérés acceptables.

5.0 RÉSULTATS

5.1 Établissement de la fréquence de résonance de la poignée

Les figures 2a et 2b illustrent la poignée de façon schématique. Celle-ci consiste en un tube d'aluminium dont le diamètre est de 38 mm et l'épaisseur est de 6.35 mm. Le tube est relié à deux supports verticaux, eux-mêmes, supportés sur une base d'aluminium. La masse totale de la poignée est de 2.73 kg.

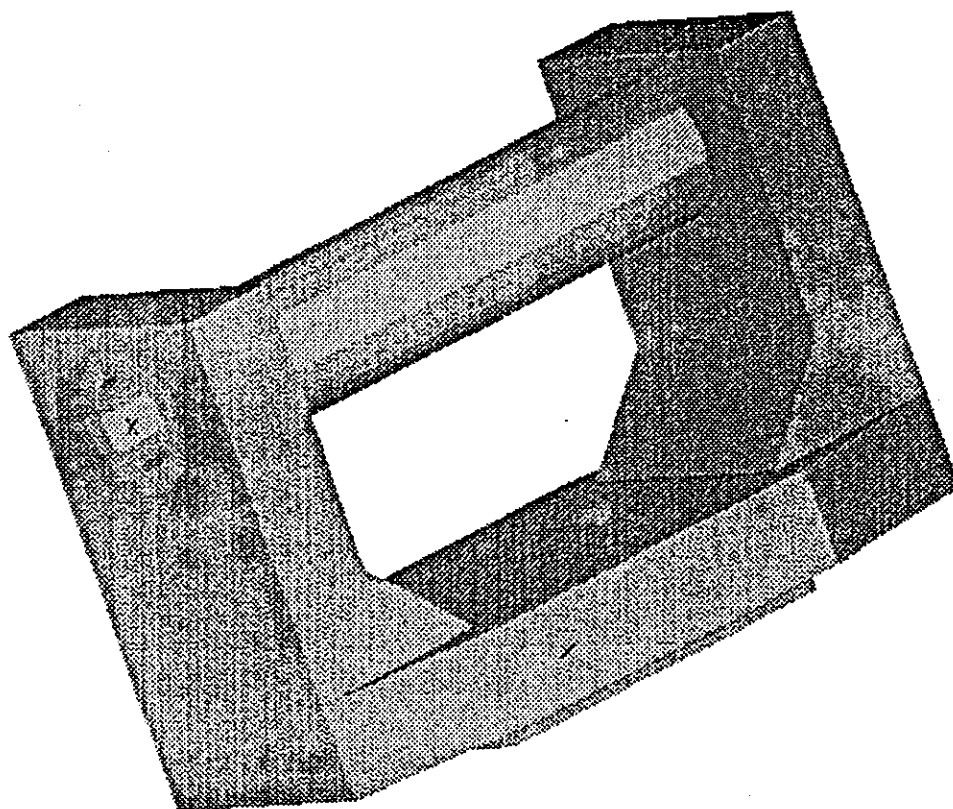


Figure 2 a) : Poignée utilisée pour valider le bracelet

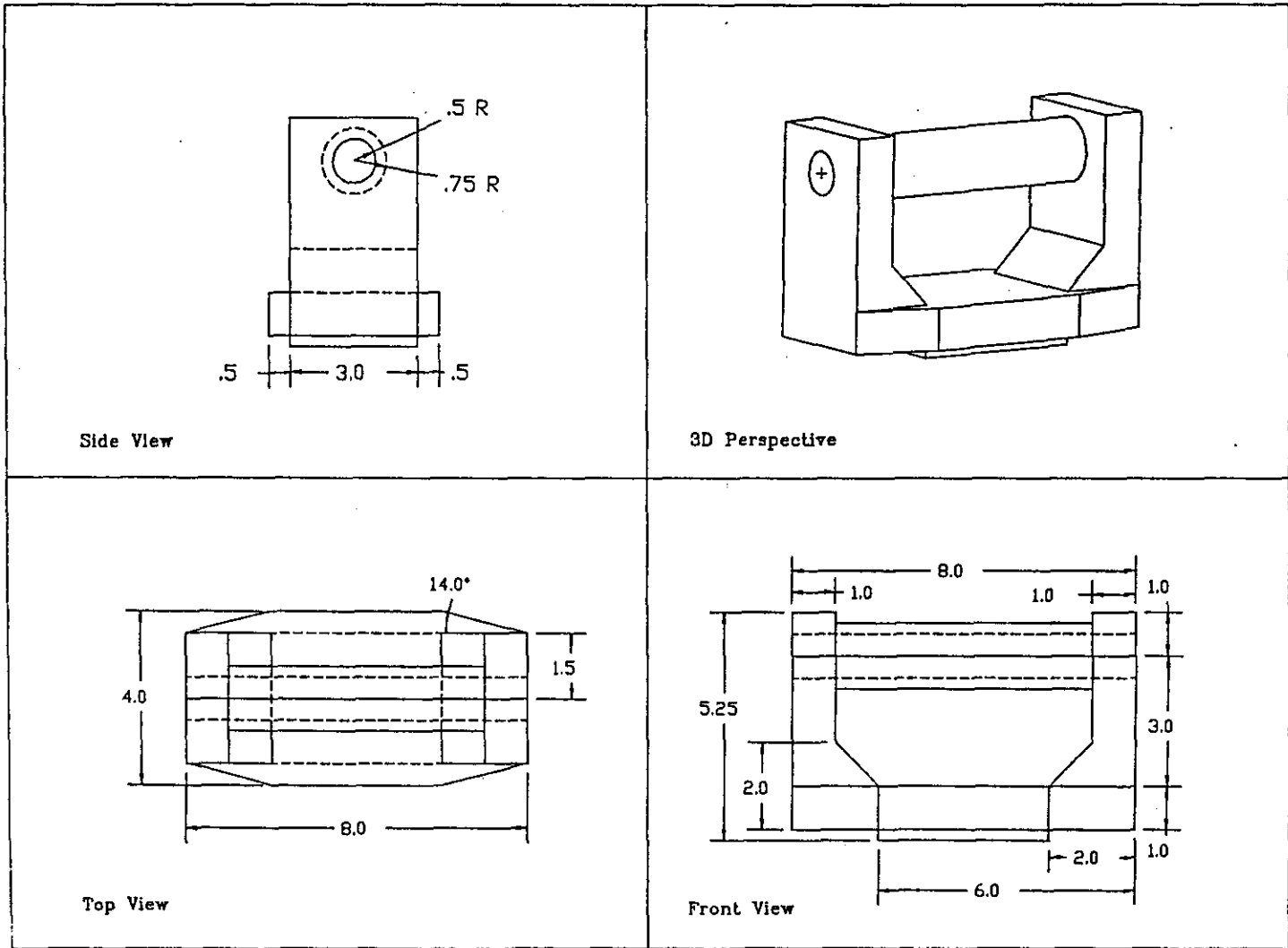


Figure 2 b) : Représentation schématique de la poignée

Une étude détaillée de la poignée établie à 1 673 Hz la fréquence de résonance liée au premier mode de vibration en direction x_h et à 1 974 Hz, la fréquence liée au deuxième mode. Ces fréquences se situent donc au-delà de la gamme de fréquences d'intérêt (fréquence centrale de bandes de tiers d'octave entre 6.3 et 1 250 Hz) pour évaluer l'exposition aux vibrations mains-bras, assurant ainsi que la poignée ne puisse modifier les caractéristiques des vibrations d'entrée. En direction z_h , la fréquence de résonance est évaluée en mesurant la fonction de transfert et la cohérence lorsque la poignée est soumise à une excitation pseudo-aléatoire (i.e. aléatoire mais comportant une certaine périodicité). Pour ce faire, le montage expérimental c'est-à-dire le pot vibrant illustré dans la figure 1, est basculé de façon à ce que l'excitation agisse en direction de l'axe de l'avant-bras (i.e. z_h). On trouve ainsi que la fréquence de résonance dans cette direction est de 2 628 Hz, excédant de loin les fréquences d'intérêt.

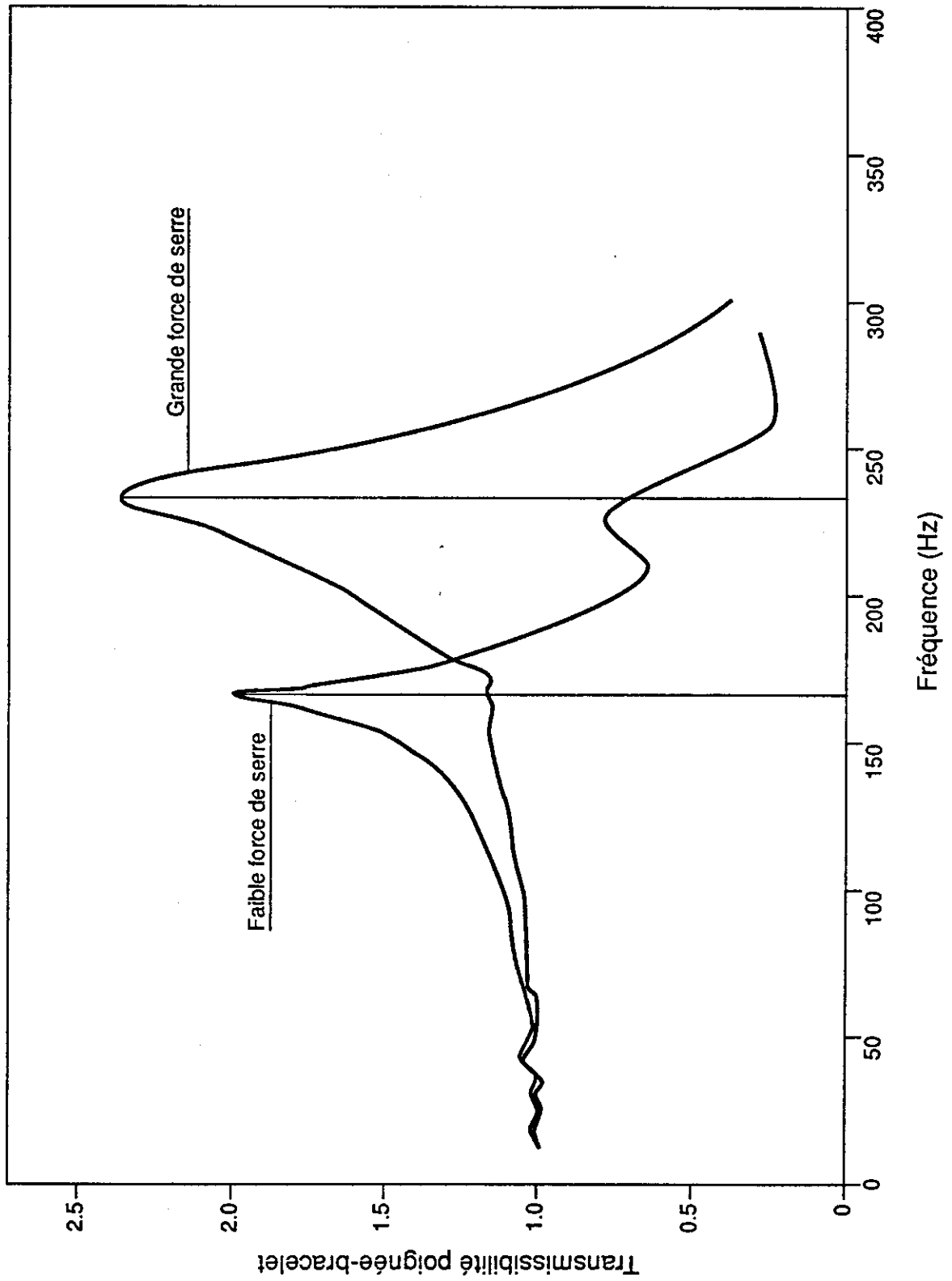
5.2 Établissement de la fréquence de résonance du bracelet

Bracelet original

La fréquence de résonance du bracelet est évaluée en fixant le bracelet, muni des trois accéléromètres, sur la poignée, cette dernière étant excitée de façon sinusoïdale ou pseudo-aléatoire. Le rapport de l'accélération mesurée sur le bracelet dans la direction de l'excitation à l'accélération mesurée à la base de la poignée permet d'évaluer la fréquence de résonance du bracelet. Évidemment, la force de serre du bracelet sur la poignée a une influence sur la fréquence de résonance mesurée. Pour les besoins des mesures, le bracelet doit avoir une fréquence de résonance se situant au-delà de la gamme de fréquences d'intérêt, soit au-delà de 200 Hz puisque l'on peut généralement s'attendre à ce que peu d'énergie vibratoire soit transmise au poignet au-delà de cette fréquence, du moins pour une très grande partie des outils vibrants couramment utilisés. On veut ainsi s'assurer que le bracelet ne modifie pas les caractéristiques des vibrations que l'on veut mesurer au poignet, modification qui serait due à une résonance du bracelet par exemple.

La figure 3 présente la fonction de transfert représentant le rapport de l'accélération mesurée au bracelet à celle mesurée à la base de la poignée lorsque le bracelet est attaché de façon très serrée et lorsqu'il est attaché de façon desserrée. Ici on rappelle que le bracelet original est constitué d'une partie métallique épousant parfaitement un côté du poignet, cette partie métallique étant maintenue fermement en contact avec l'os du poignet par l'intermédiaire d'un bracelet extensible. Trois accéléromètres miniatures sont fixés sur la partie métallique par l'intermédiaire d'un cube d'acier. La figure 4 illustre ce bracelet.

Figure 3 : Établissement de la fréquence de résonance
du bracelet original en direction X_h



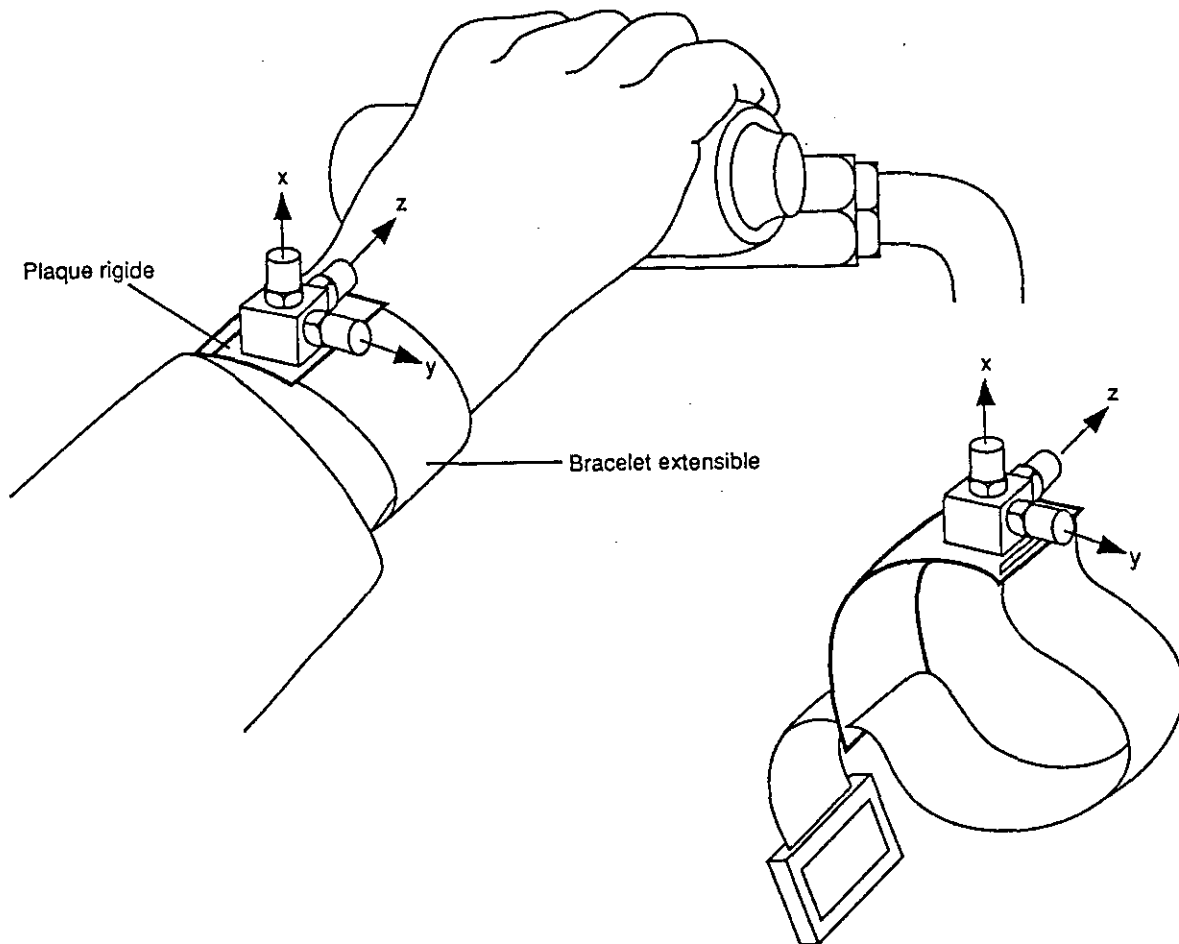


Figure 4 : Bracelet original pour mesurer les vibrations transmises au poignet

La fréquence de résonance du bracelet original en direction x_h est 233 Hz lorsque le bracelet est attaché très serré et 164 Hz lorsqu'il est desserré. La réponse en fréquence du bracelet serait donc linéaire à 10 % près jusqu'à 130 Hz dans le premier cas et jusqu'à 100 Hz dans le deuxième cas, ce qui est clairement insuffisant compte tenu de la gamme de fréquences d'intérêt, cette dernière se situant entre 6.3 et 1250 Hz pour les mesures de vibrations effectuées sur la poignée et généralement inférieure à 200 Hz pour les vibrations au poignet. Pour que la gamme de fréquences d'utilisation du bracelet puisse être augmentée, il faudrait que la fréquence de résonance du bracelet puisse être augmentée bien au-delà de 200 Hz. Ceci pourrait être accompli en modifiant le bracelet, notamment en diminuant sa masse et/ou en augmentant sa rigidité. C'est donc basé sur ces principes qu'un bracelet modifié a été conçu.

Bracelet modifié

Le bracelet modifié (figure 5) constitue en soi une montre dont le boîtier a été remplacé par une base en "plexiglass" sur lequel est fixé un bloc du même matériau comportant les trois accéléromètres. Le bracelet est de cuir et sa masse totale est sensiblement réduite comparative-ment au bracelet original. La fréquence de résonance de ce bracelet est évaluée de la même façon que précédemment. Cette fréquence s'établit à environ 1.2 kHz en direction x_h (figure 6) et la réponse en fréquence est clairement linéaire entre 8 et 400 Hz comme le démontrent la fonction de transfert et la cohérence présentées dans la figure 7.

5.3 Étalonnage du capteur laser de vibrations

Le capteur laser de vibrations de type B&K 3544 permet d'effectuer des mesures de vibrations dans la gamme de fréquence 0 Hz à 20 kHz sans contact requis avec la surface vibrante. L'amplitude des vibrations est mesurée en termes de déplacement ou de vitesse, excluant ainsi la mesure de l'accélération, paramètre plus normalement utilisé. Ceci constitue en soi un inconvénient lorsque les niveaux de vibrations sont de faible amplitude, particulièrement aux fréquences élevées où la vitesse caractérisant l'amplitude des vibrations devient difficilement discernable du bruit de fond comparativement à l'accélération. L'accéléromètre piézoélectrique normalement utilisé mesure quant à lui l'accélération, mais la vitesse peut être obtenue en intégrant le signal d'accélération par un appareil externe.

Figure 5 : Représentation du bracelet modifié

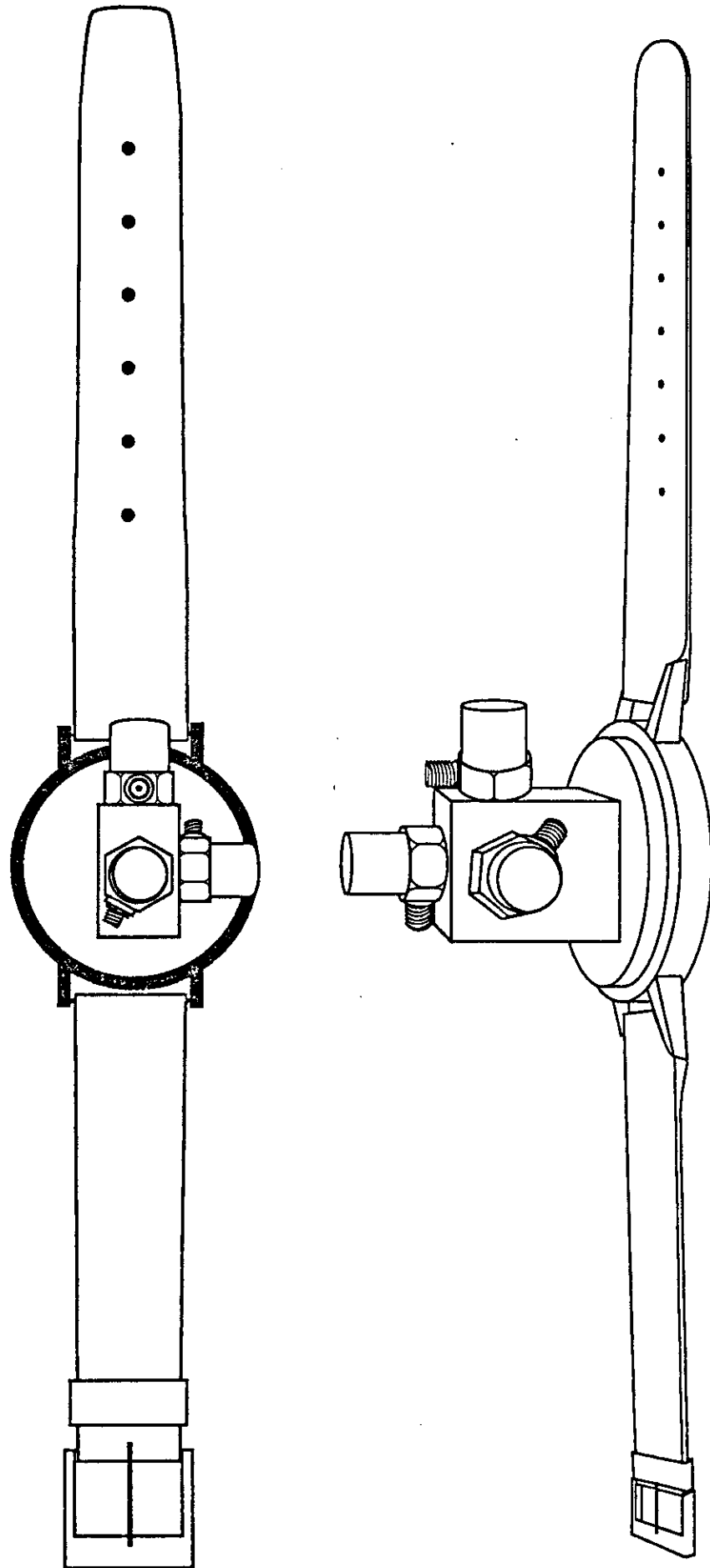


Figure 6 : Établissement de la fréquence de résonance
du bracelet modifié en direction x_h

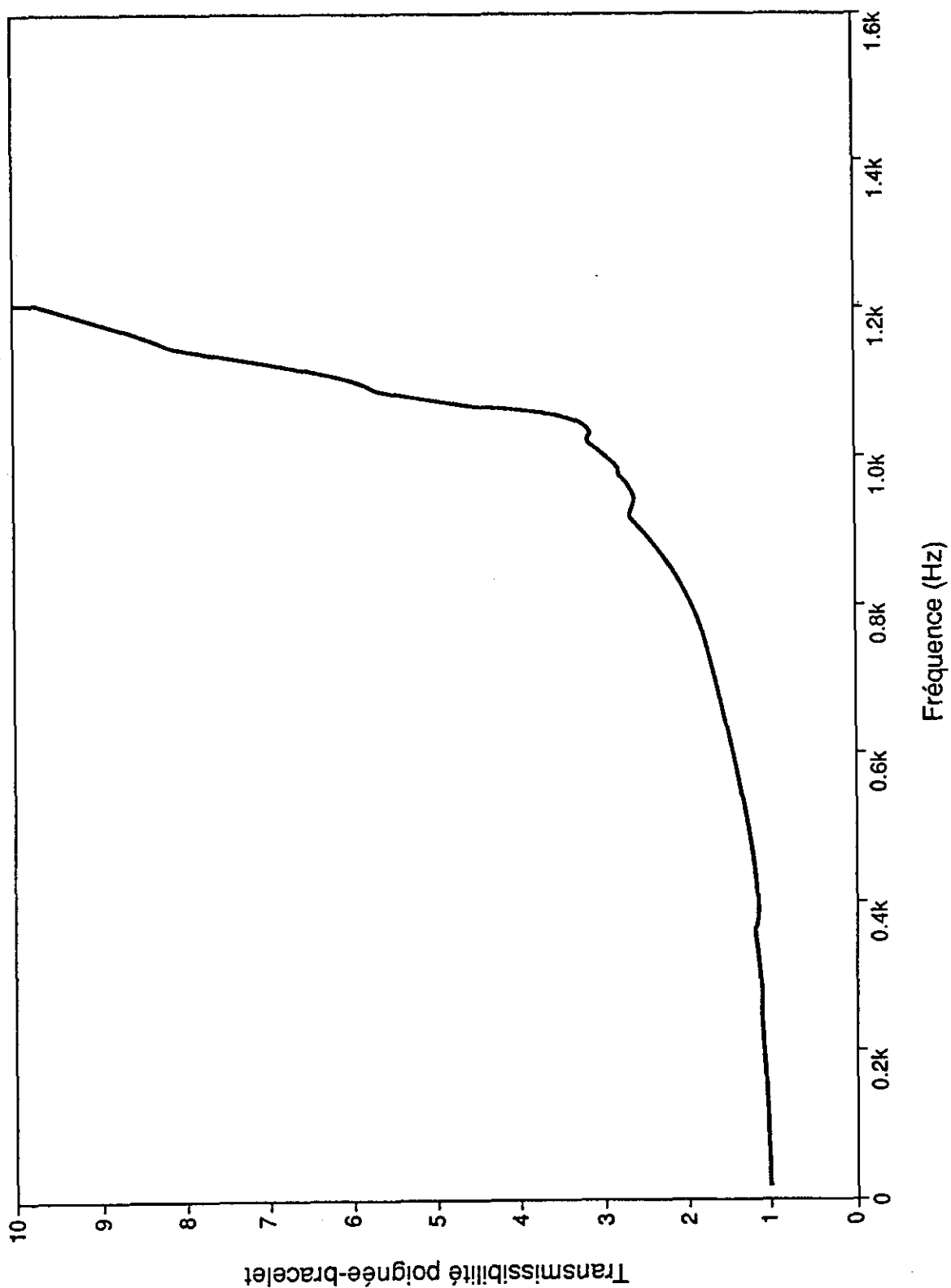
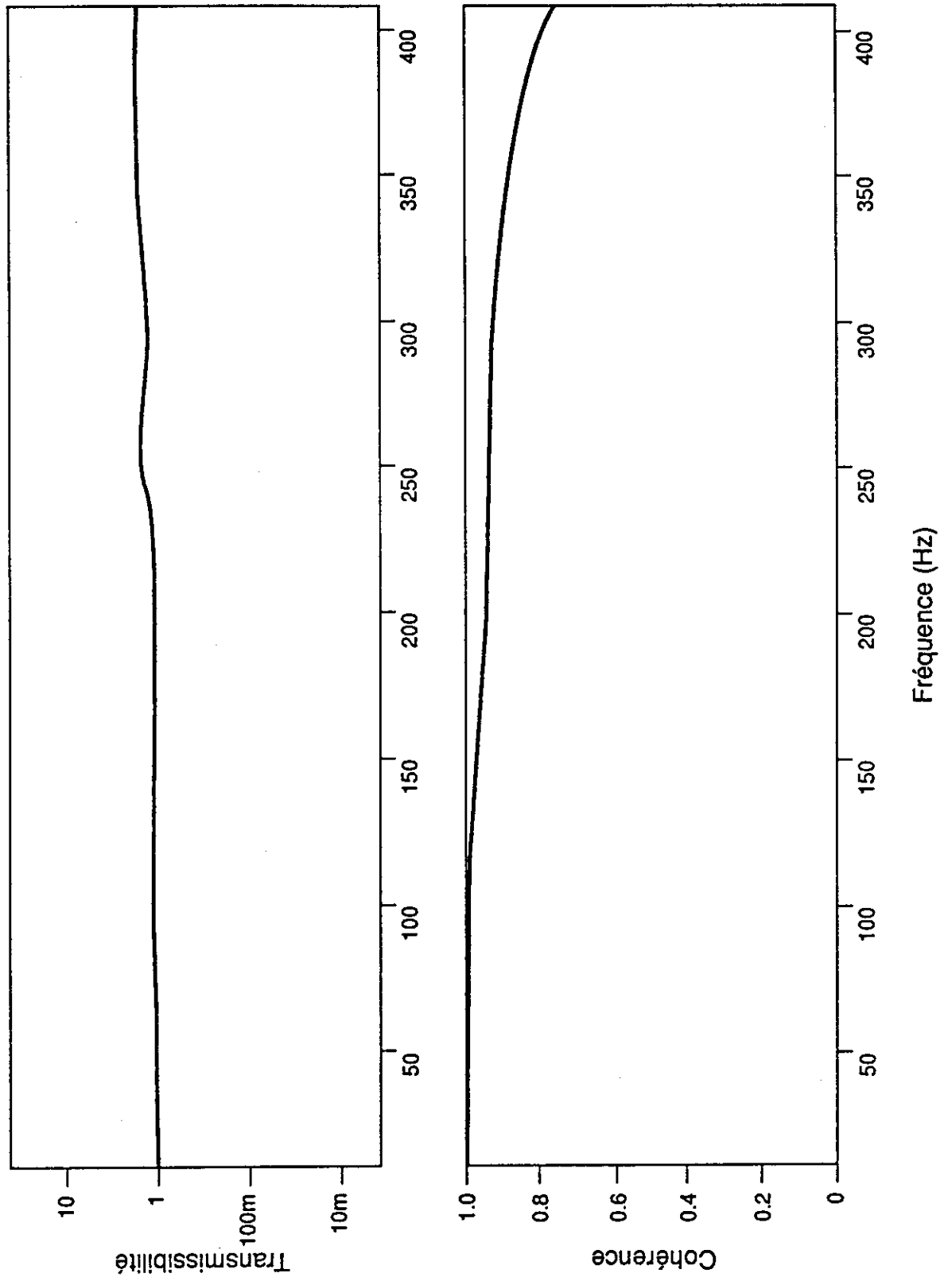


Figure 7 : Réponse en fréquence et cohérence du bracelet modifié en direction x_h .



L'étalonnage du capteur laser de vibrations est effectué en comparant le spectre en fréquence de vitesse des vibrations mesurées par ce dernier avec le spectre produit à partir du signal intégré de l'accéléromètre placé à proximité du point de mesure du laser. Pour ce faire, la poignée est soumise à une excitation sinusoïdale ou pseudo-aléatoire, un accéléromètre est collé sur cette dernière, et le capteur laser opérant en mode vitesse est pointé à proximité de l'accéléromètre sur la poignée. La fonction de transfert, représentant le rapport du spectre de vitesse des vibrations vu par laser à celui vu par l'accéléromètre une fois le signal intégré, est obtenue dans une gamme de fréquences (8 à 400 Hz), cette gamme étant choisie considérant que peu d'énergie vibratoire devrait atteindre le poignet à des fréquences supérieures à 200 Hz. La fonction de cohérence est également évaluée, indiquant jusqu'à quel point les sorties des deux systèmes de mesure sont similaires. La fonction de transfert et la cohérence devraient être unitaires dans le cas de deux systèmes de mesure identiques, bien qu'ici on choisisse comme critère que la fonction de cohérence soit d'au moins 0.8.

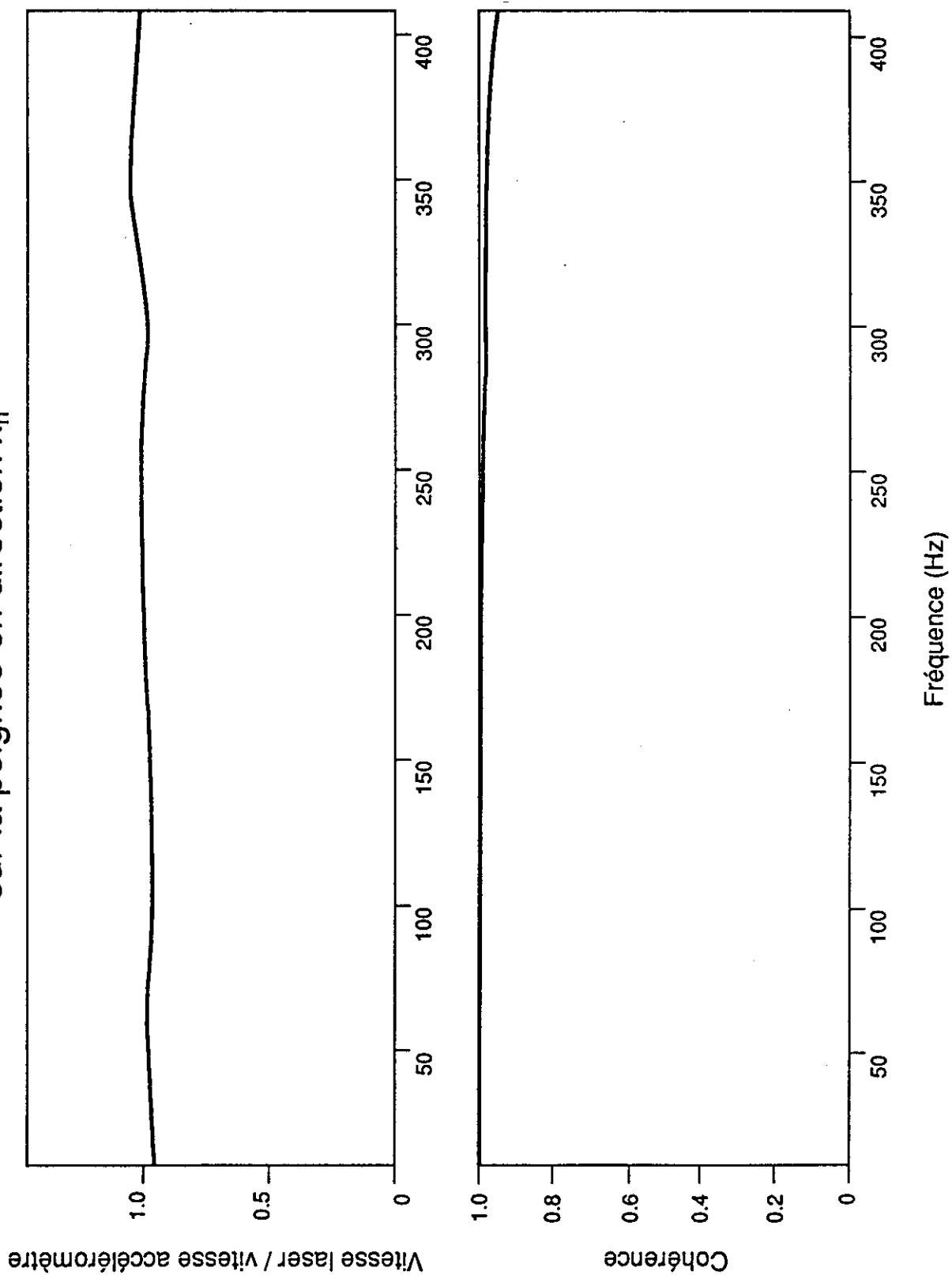
La figure 8 présente les résultats d'un test d'étalonnage effectué en direction x_h (verticale) pour une excitation pseudo-aléatoire. On y remarque que dans la gamme de fréquence de 8 à 400 Hz, la lecture obtenue par le capteur laser et par l'accéléromètre sont en bon accord avec une différence inférieure à 5%. Aux fréquences supérieures à 200 Hz, le niveau de bruit provoqué par le laser fait en sorte que la cohérence est légèrement diminuée et l'écart entre la vitesse mesurée par les deux systèmes est un peu plus élevé.

On peut donc présumer que lorsque les niveaux de vibrations sont suffisamment élevés, les deux systèmes de mesure provoquent des lectures identiques, du moins dans la gamme de fréquences dans laquelle l'énergie vibratoire transmise au poignet est susceptible d'être retrouvée.

5.4 Étalonnage du capteur laser de vibrations par rapport à l'accéléromètre du bracelet

Lorsque les mesures de vibrations sont effectuées au niveau du poignet, l'amplitude des vibrations est de beaucoup réduite comparativement aux vibrations sur la poignée à cause de l'atténuation apportée par la main. Comme le capteur laser provoque un bruit de fond considérable et, qu'en plus, il ne permet de mesurer l'amplitude des vibrations qu'en terme de la vitesse et du déplacement, il en résulte qu'à des fréquences excédant quelques dizaines de Hertz, le signal de vitesse des vibrations est de très faible amplitude, pouvant facilement se dissimuler dans le bruit de fond si le signal d'excitation n'est pas d'intensité suffisante.

Figure 8 : Comparaison: capteur laser de vibrations-accéléromètre pour les vibrations enregistrées sur la poignée en direction X_h



Face à cette limitation du système de mesure, il importe de connaître dans quelles conditions d'excitation et jusqu'à quelle fréquence on pourrait s'attendre à ce que les deux systèmes (i.e. laser et accéléromètre) fournissent une lecture identique lorsqu'ils mesurent à un point commun sur le bracelet.

Direction verticale (x_y)

On a voulu évaluer l'influence de la force de préhension et de l'opérateur (masse de la main et surface de contact) sur l'étendue de la gamme de fréquences utilisable du laser pour la mesure des vibrations au niveau du poignet.

Pour effectuer ces mesures, on excite la poignée avec un signal pseudo-aléatoire tandis qu'un individu maintient la poignée avec une certaine force qu'il juge subjectivement. Auparavant, on a pris soin d'informer le sujet sur la nécessité de maintenir une force de préhension constante. On lui indique les 3 forces de préhension à utiliser: faible (i.e. maintenant la poignée faiblement), moyenne (préhension normale) et grande (exerçant une grande force). Une période de sensibilisation est accordée.

On prend soin d'adopter une posture de façon à ce que l'avant-bras forme un angle de 90 degrés avec l'épaule. L'individu est assis et le coude n'est pas supporté. Le bracelet est porté au poignet et l'accéléromètre du dessus est orienté en direction de l'excitation. Le laser est pointé directement sur l'accéléromètre sur lequel est fixé un ruban réflecteur.

On forme la fonction de transfert et la cohérence en utilisant les signaux de vitesse du laser et du signal intégré de l'accéléromètre. Ces dernières devraient être unitaires dans le cas de deux systèmes de mesure parfaitement identiques. Pour limiter l'influence du bruit, un filtre passe-bas est inséré à la sortie de chacun des systèmes avec une fréquence de coupure fixée à 350 Hz. La fonction de transfert H_2 représente le rapport de la vitesse mesurée par l'accéléromètre à celle mesurée par le laser.

Les figures 9, 10 et 11 présentent la fonction de transfert H_2 et la cohérence obtenues avec un des individus pour des forces de préhension de la poignée jugées faible, moyenne et grande respectivement. De façon générale, les deux mesures sont identiques jusqu'à une fréquence de 150 Hz après quoi le bruit généré par le laser devient trop important par rapport aux niveaux de vibrations. On note cependant l'influence de la force de préhension sur la gamme de fréquences utilisables. En effet, plus la force de préhension augmente, meilleure est la transmissibilité des vibrations au poignet et plus grande est la gamme de fréquences utilisable.

Figure 9 : Comparaison : laser-acceleromètre du bracelet pour une faible force de préhension (direction x_h)

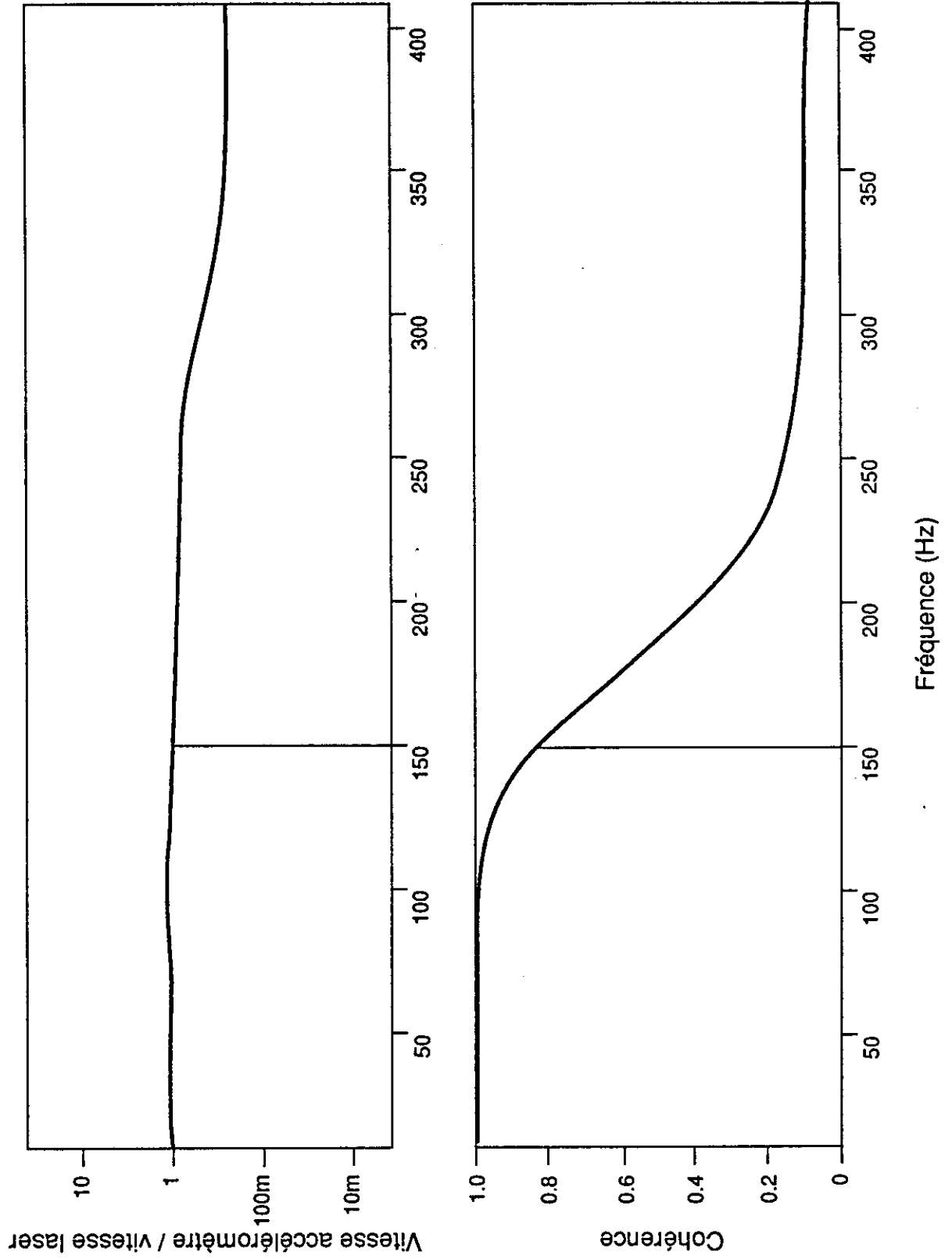


Figure 10 : Comparaison : laser-acceleromètre du bracelet pour une force de préhension moyenne (direction x_h)

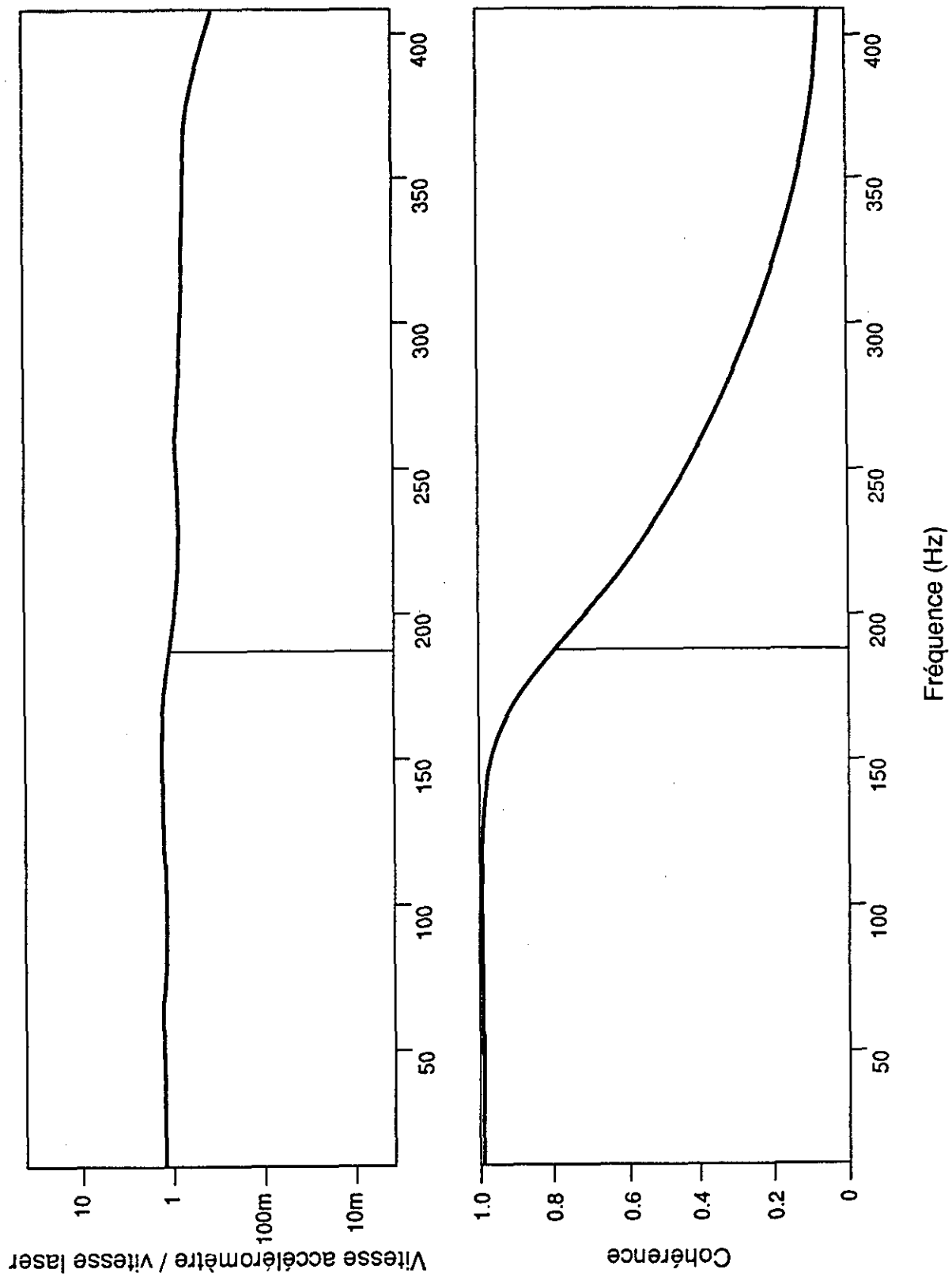
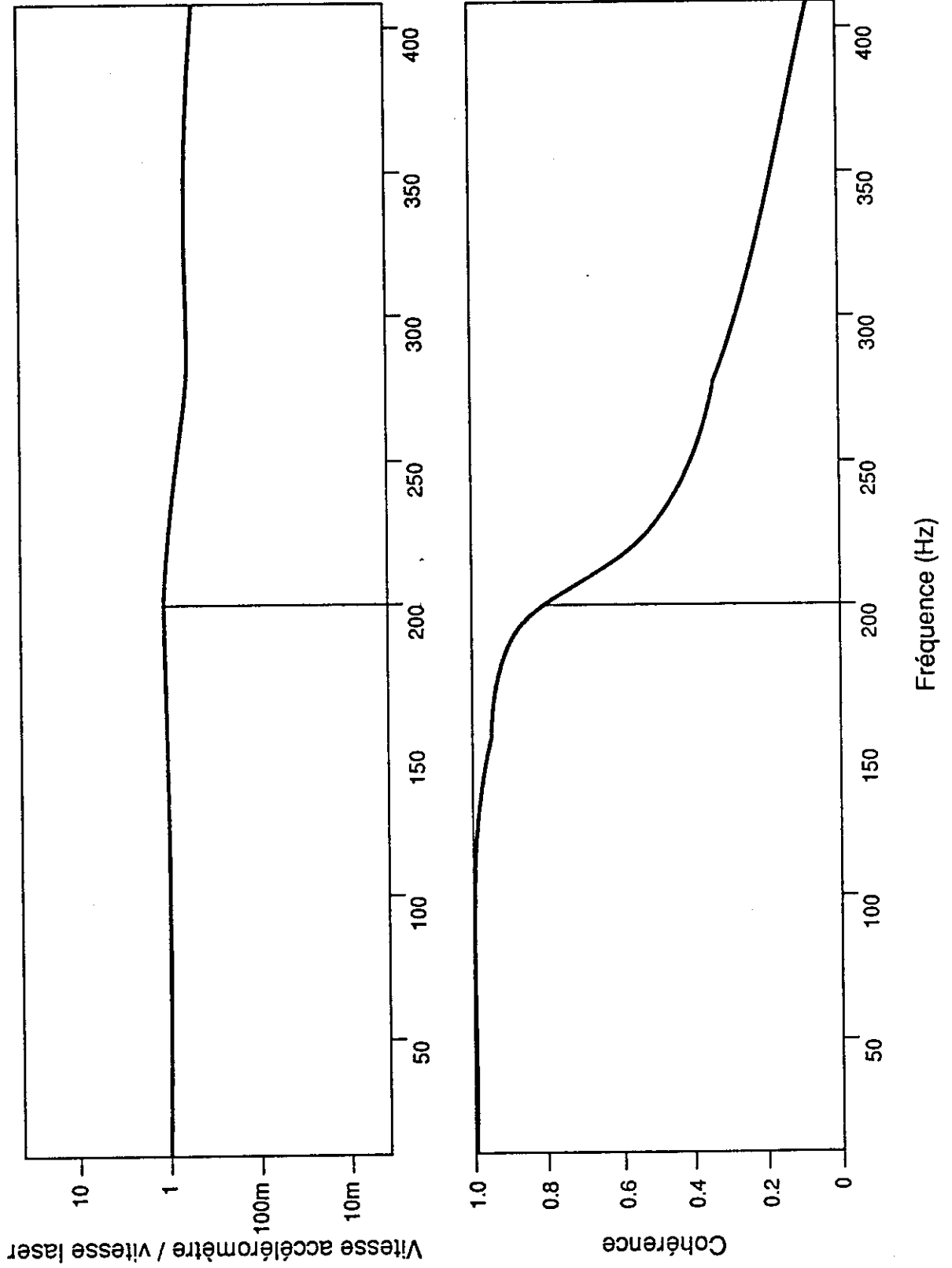


Figure 11 : Comparaison : laser-accéléromètre du bracelet pour une grande force de préhension (direction x_h)



En passant d'une force de préhension faible, à moyenne et à grande, l'accord entre les deux systèmes de mesure passe d'une fréquence maximale de 150 à 185 et à 200 Hz respectivement. Cette fréquence maximale est établie comme étant celle pour laquelle la fonction de cohérence est de 0.8. Au-delà de cette fréquence maximale, l'accord demeure relativement bon, bien que la cohérence diminue de façon drastique plus la fréquence augmente.

Pour les besoins de notre étude, on peut s'attendre à ce que l'énergie vibratoire susceptible d'atteindre le poignet ne dépasse pas 200 Hz. Or, les résultats obtenus ici nous indiquent que les conditions expérimentales fixées devraient convenir aux besoins de l'étude.

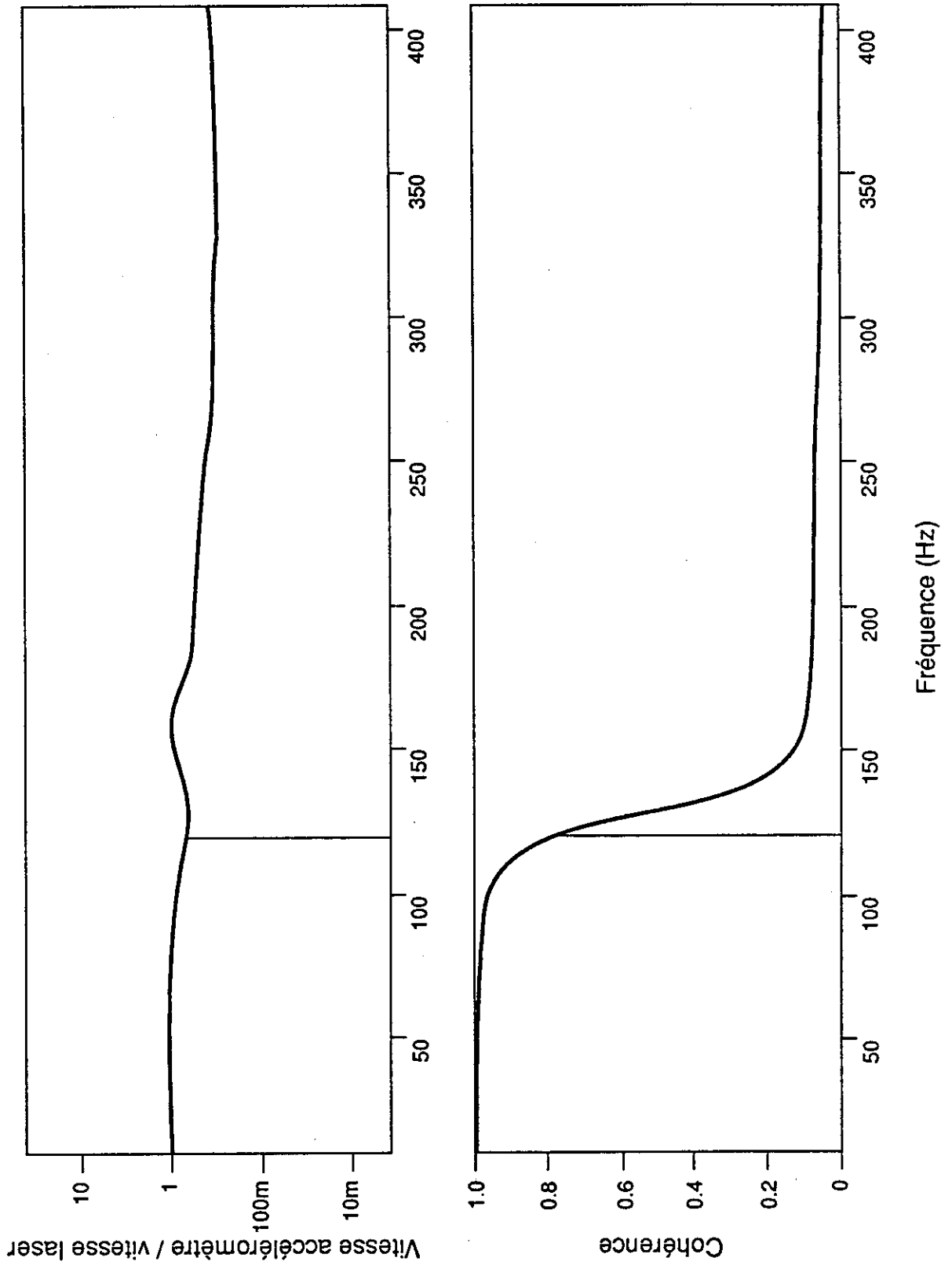
On a voulu également évaluer l'influence de l'opérateur sur les résultats obtenus. Pour ce faire, nous avons répété une série d'essais avec un deuxième individu ayant une main et un poignet de taille considérablement plus grande. La figure 12 illustre ce résultat pour une force de préhension moyenne où l'on voit que l'accord entre les deux systèmes est convenable jusqu'à 120 Hz, ce qui constitue une diminution par rapport à l'individu précédent pour une force de préhension comparable. Évidemment, puisque la main est plus grosse, plus grande est l'atténuation obtenue et moins intenses sont les niveaux de vibration au poignet pour une même excitation.

On peut donc conclure de ces résultats, que dû à des limitations inhérentes au capteur laser de vibrations, la validation de la méthode de mesure "bracelet" sera très influencée par l'intensité des vibrations transmises au poignet, en l'occurrence l'intensité de la source excitatrice, la force de préhension et la grosseur de la main et du poignet. D'après nos observations, il est très peu probable que ces facteurs jouent un rôle primordial à des fréquences inférieures à 120 Hz, ce qui signifie que la méthode de validation du bracelet par l'intermédiaire du laser devrait être efficace jusqu'à cette fréquence. Aux fréquences supérieures, on devra porter une attention spéciale aux facteurs susceptibles d'influencer le rendement de cette méthode de validation.

Direction longitudinale (z_b)

Pour effectuer les mesures dans cette direction (axe de l'avant-bras), la poignée est placée à l'horizontale de même que le pot vibrant. Le laser est pointé cette fois sur l'accéléromètre orienté selon l'axe de l'avant-bras. La procédure d'évaluation demeure la même que précédemment, c'est-à-dire que le spectre de vitesse des vibrations mesuré par le laser est comparé au spectre intégré des vibrations mesuré par l'accéléromètre, pour le même point de mesure au poignet.

Figure 12 : Comparaison : laser-acceleromètre du bracelet pour une force de préhension moyenne pour un individu de plus grande taille (direction x_h)



On note dans cette direction une diminution nette des niveaux de vibrations transmises au poignet comparativement à l'axe vertical, d'où le besoin de modifier l'amplitude de l'excitation pour avoir des signaux d'intensité adéquate au niveau du poignet. Les résultats indiquent un bon accord entre les deux systèmes de mesure jusqu'à une fréquence de 150 Hz (figure 13).

5.5 Validation du bracelet

La validation du bracelet consiste à comparer les caractéristiques des vibrations mesurées à l'aide des accéléromètres sur le bracelet, à celles mesurées sur le poignet à l'aide du capteur laser de vibrations. Étant donné que le laser représente une méthode de mesure sans contact, on estime que le bracelet est valide en autant que les résultats concordent avec ceux obtenus avec le laser. On s'assure donc ainsi que le bracelet ne modifie pas les vibrations transmises au poignet, puisqu'on mesure simultanément sur l'os du poignet à proximité du bracelet à l'aide du laser et au bracelet à partir de l'accéléromètre.

Pour les mesures en direction x_h , le laser est pointé directement sur l'os du poignet. En direction z_h , le laser est pointé sur une petite plaque métallique en forme de L collée sur le poignet puisque l'on doit mesurer selon l'axe de l'avant-bras. Comme il n'y a pas de protubérance au poignet qui permet un point de réflexion pour le laser, la plaque métallique est la seule solution pour faire une mesure dans cette direction.

La fonction de transfert mesurée ici, représente le rapport de vitesse obtenue par le signal intégré de l'accéléromètre, à la vitesse obtenue par le laser à un point près du bracelet. De même que précédemment, on considère le bracelet valable seulement pour la gamme de fréquences pour laquelle la fonction de cohérence est supérieure à 0.8.

Direction verticale (x_h)

Pour le premier individu, nous avons déterminé que le bracelet et le laser produisaient des résultats identiques ou acceptables jusqu'à une fréquence de 115 Hz lorsque la force de préhension était faible (figure 14), 150 Hz pour une force de préhension normale (figure 15) et 225 Hz pour une grande force de préhension (figure 16). Considérant que pour plusieurs des outils vibrants tenus et guidés à la main, la fréquence dominante des vibrations est inférieure à 150 Hz, on estime que le bracelet constitue un moyen efficace pour évaluer les vibrations. Dans le cas de la foreuse à béquille pneumatique par exemple, la fréquence dominante des vibrations

Figure 13 : Comparaison : laser- accéléromètre du bracelet pour une force de préhension moyenne (direction z_h)

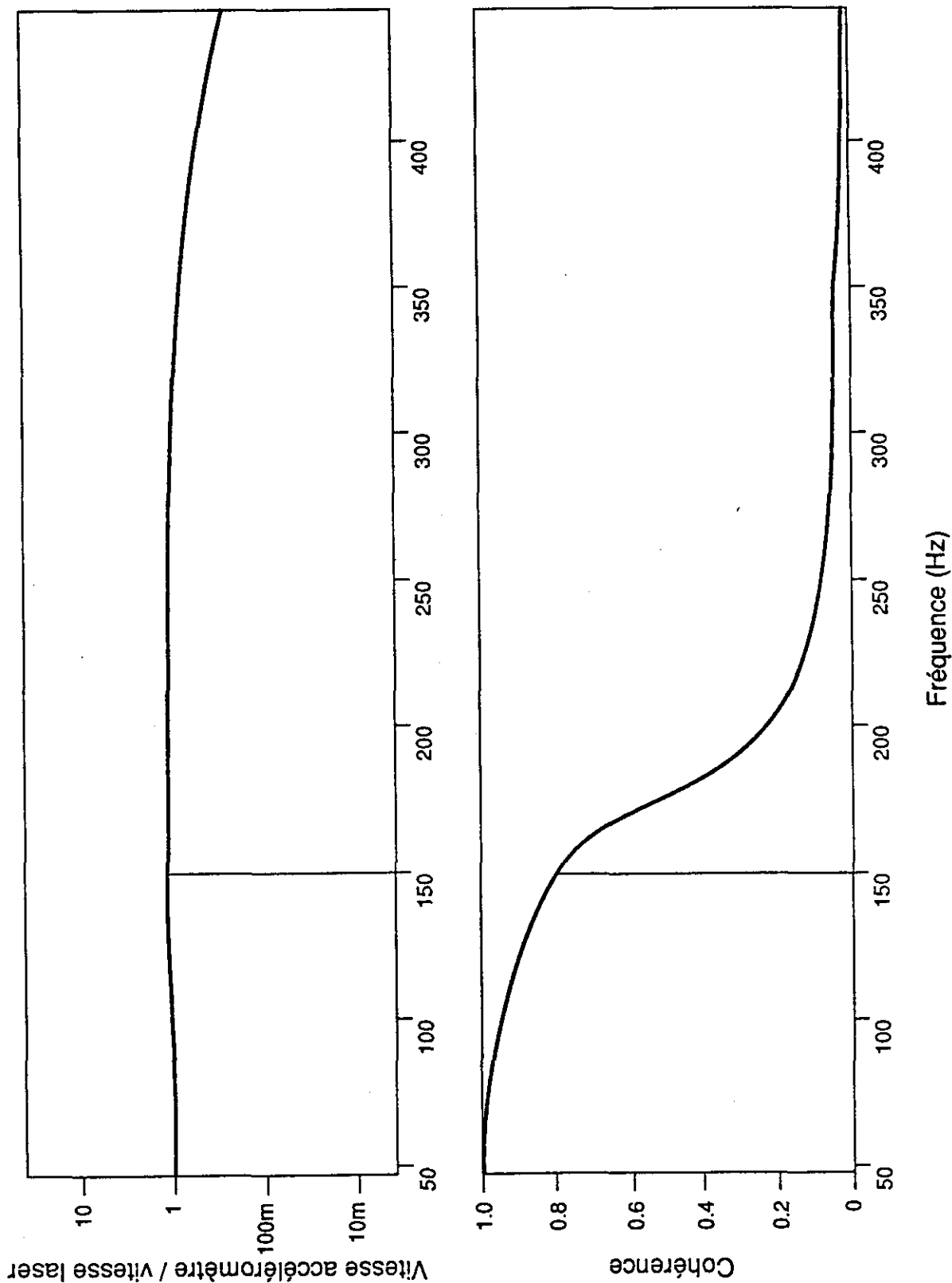


Figure 14 : Validation expérimentale du bracelet pour une faible force de préhension (direction x_h)

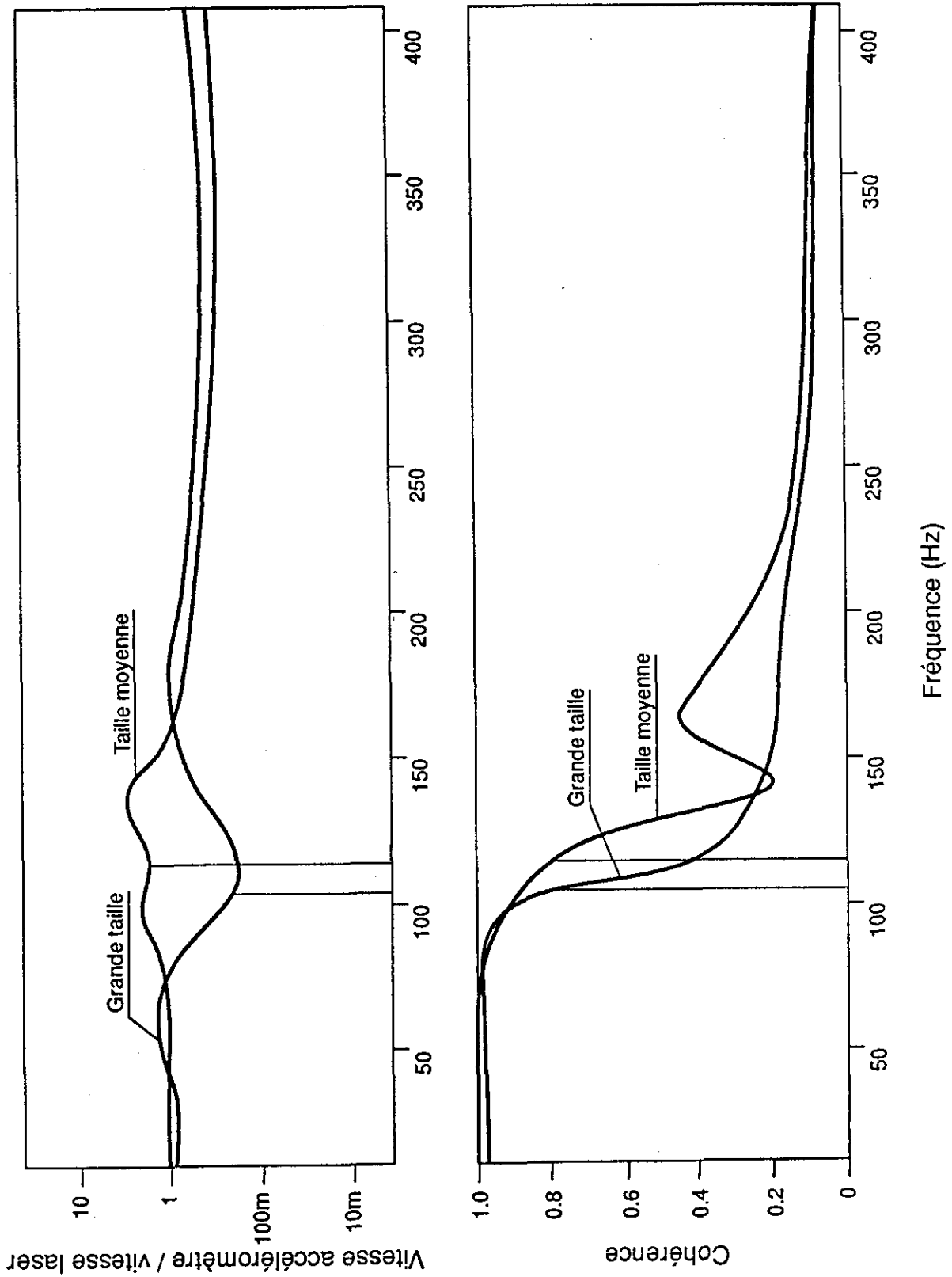


Figure 15 : Validation expérimentale du bracelet pour une force de préhension moyenne (direction x_h)

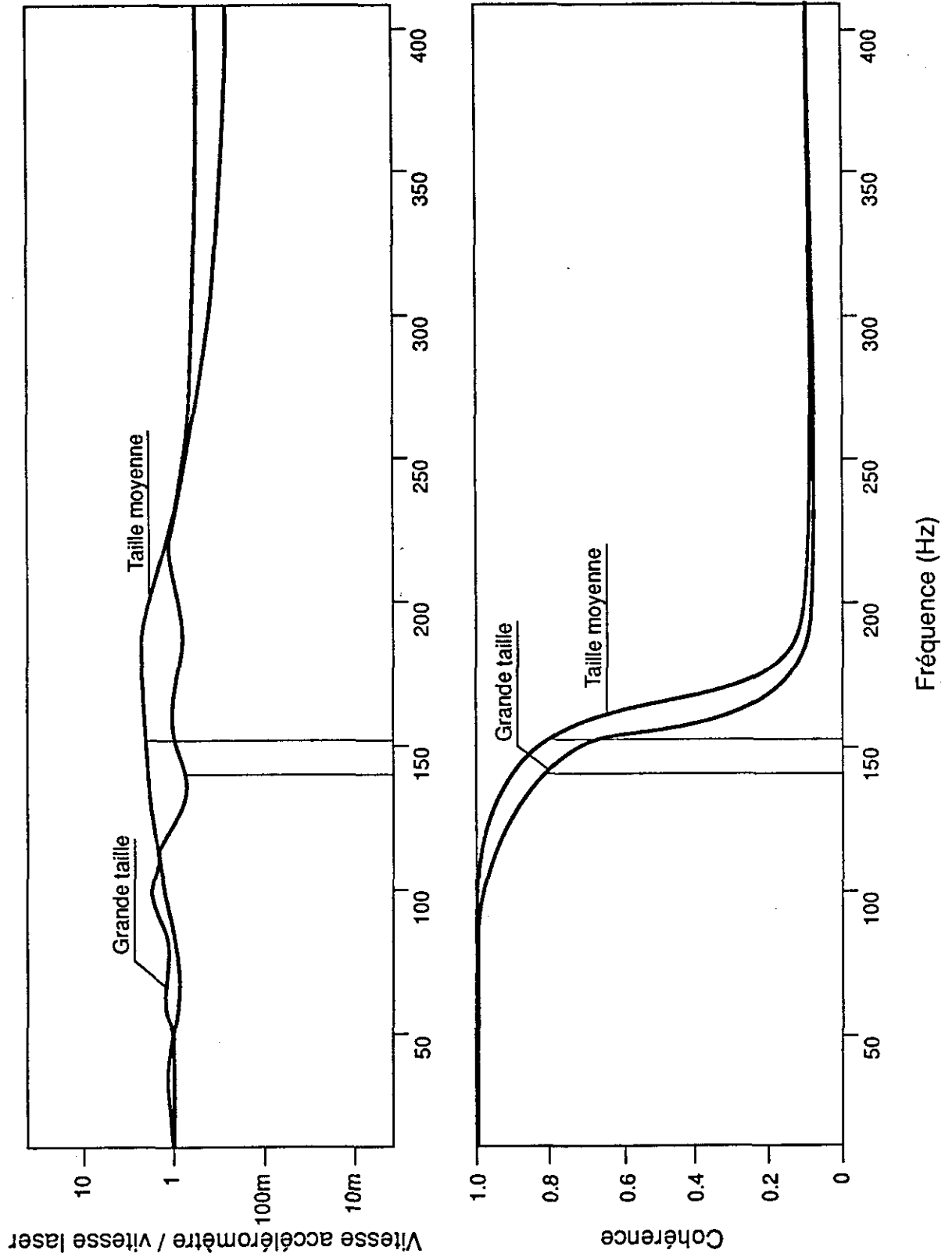
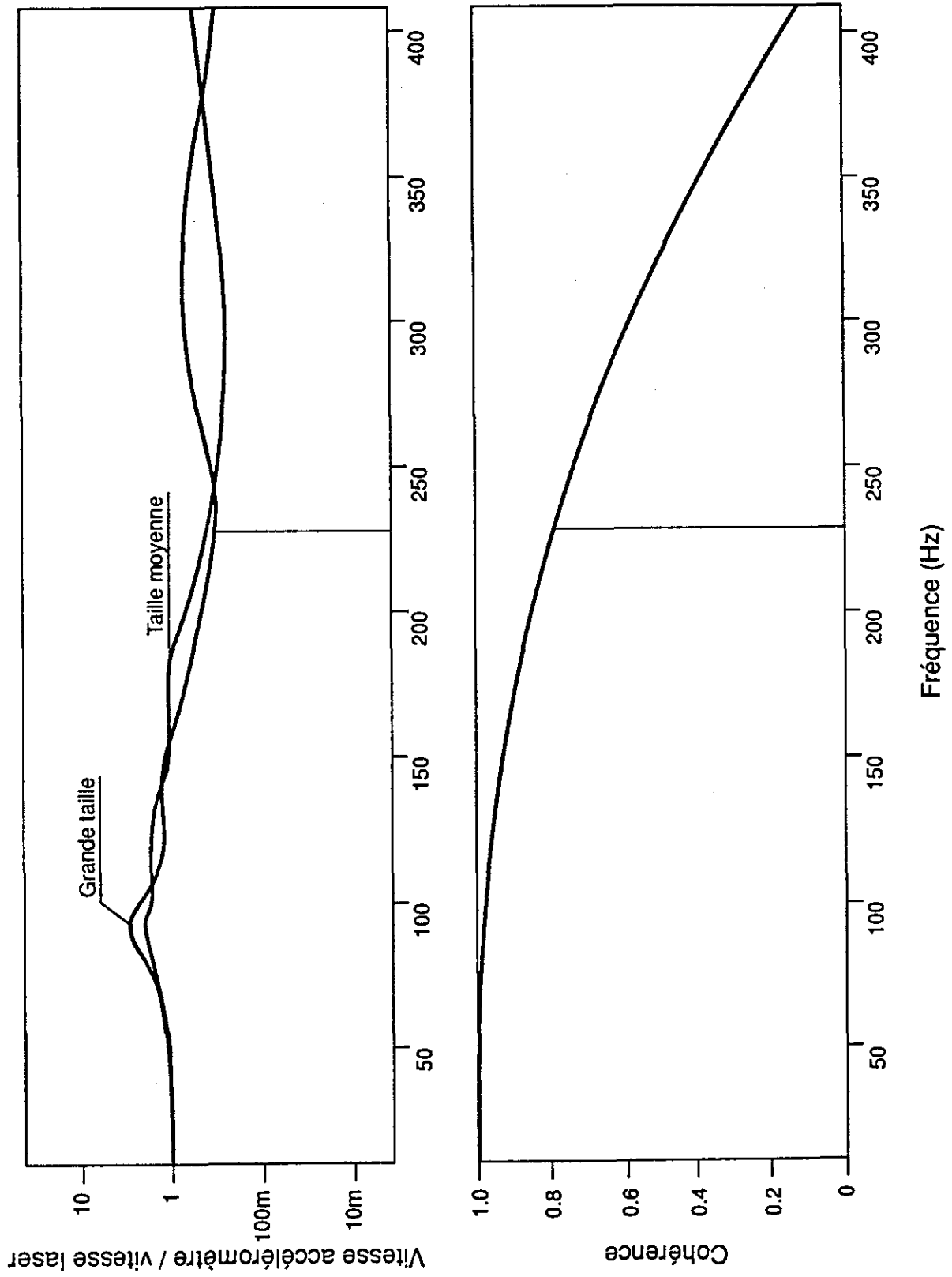


Figure 16 : Validation expérimentale du bracelet pour une grande force de préhension (direction x_H)



apparaît entre 30 et 40 Hz. C'est donc dire que le bracelet pourrait adéquatement servir à évaluer l'énergie vibratoire transmise au poignet. Pour le deuxième individu possédant une main plus massive, l'accord entre les deux systèmes apparaît jusqu'à 100 Hz pour une faible force de préhension, 140 Hz pour une force de préhension normale et 160 Hz pour une grande force de préhension.

Direction longitudinale (z_b)

Dans ce cas, étant donné la plus grande atténuation apportée par la main, l'intensité de l'excitation doit être modifiée. Dans un premier temps, un signal pseudo-aléatoire est utilisé dans la gamme de fréquences 10 à 100 Hz (figure 17), ensuite l'intensité est modifiée dans la gamme 40 à 400 Hz (figure 18). Pour le premier individu, on obtient un bon accord entre les systèmes, sauf autour de la fréquence de 80 Hz où la fonction de transfert et la cohérence tombent de façon drastique. Pour le deuxième individu, on obtient un bon accord jusqu'à une fréquence d'environ 145 Hz.

6.0 DISCUSSION

Les tableaux 1 et 2 présentent de façon abrégée l'ensemble des résultats concernant la fréquence de vibration maximale pour laquelle la méthode de mesure faisant appel au laser et au bracelet sont valables. Évidemment, cette fréquence semble dépendre de la force de préhension utilisée, de la direction dans laquelle les vibrations agissent et de l'individu serrant la poignée (taille de la main, grosseur du poignet). Ici on doit réaliser que la fréquence maximale d'utilisation du bracelet ne devrait pas dépasser la fréquence maximale d'utilisation du laser puisque le processus de validation dépend justement de l'opération du capteur laser.

De façon globale, les résultats indiquent que lorsque la force de préhension est faible, le bracelet est utilisable pour caractériser les vibrations dont la fréquence n'excède pas 100 Hz. Ceci tient compte de la limitation en fréquence du capteur laser qui sert de base pour valider le bracelet. On tient aussi compte de différences individuelles concernant la taille de la main et la grosseur du poignet. Dans certains cas, la fréquence maximale d'utilisation pourrait être supérieure; ainsi, la fréquence maximale rapportée ici constitue l'estimation la plus pessimiste de la gamme de fréquences pour laquelle le bracelet pourrait être applicable. Évidemment cette validation ne peut s'appliquer que dans la mesure que les niveaux de vibrations enregistrés au poignet soient

Figure 17 : Validation expérimentale du bracelet du bracelet dans la gamme de fréquences 10-100Hz (direction z_h)

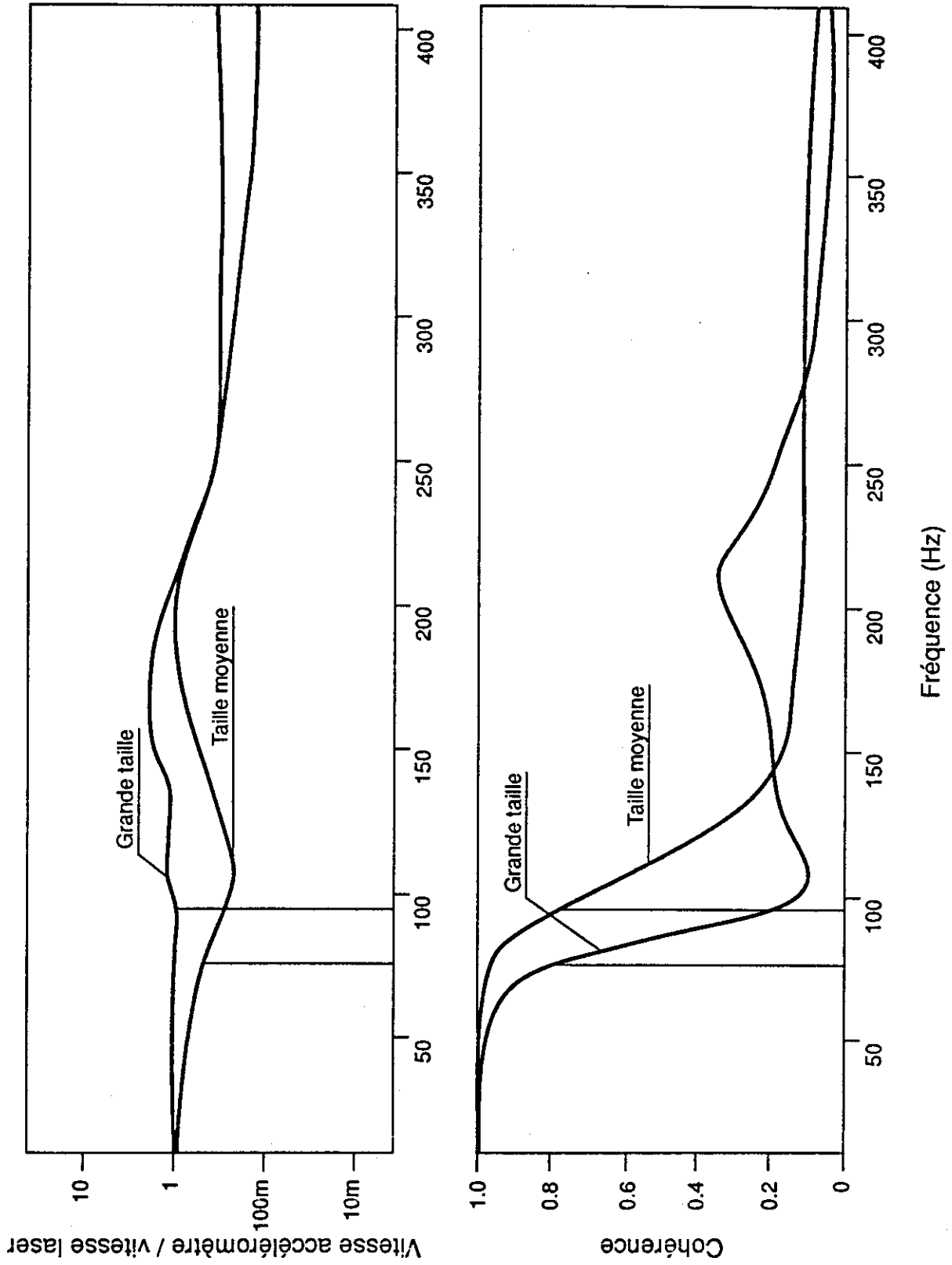


Figure 18 : Validation du bracelet dans la gamme de fréquences 40-400Hz (direction Z_h)

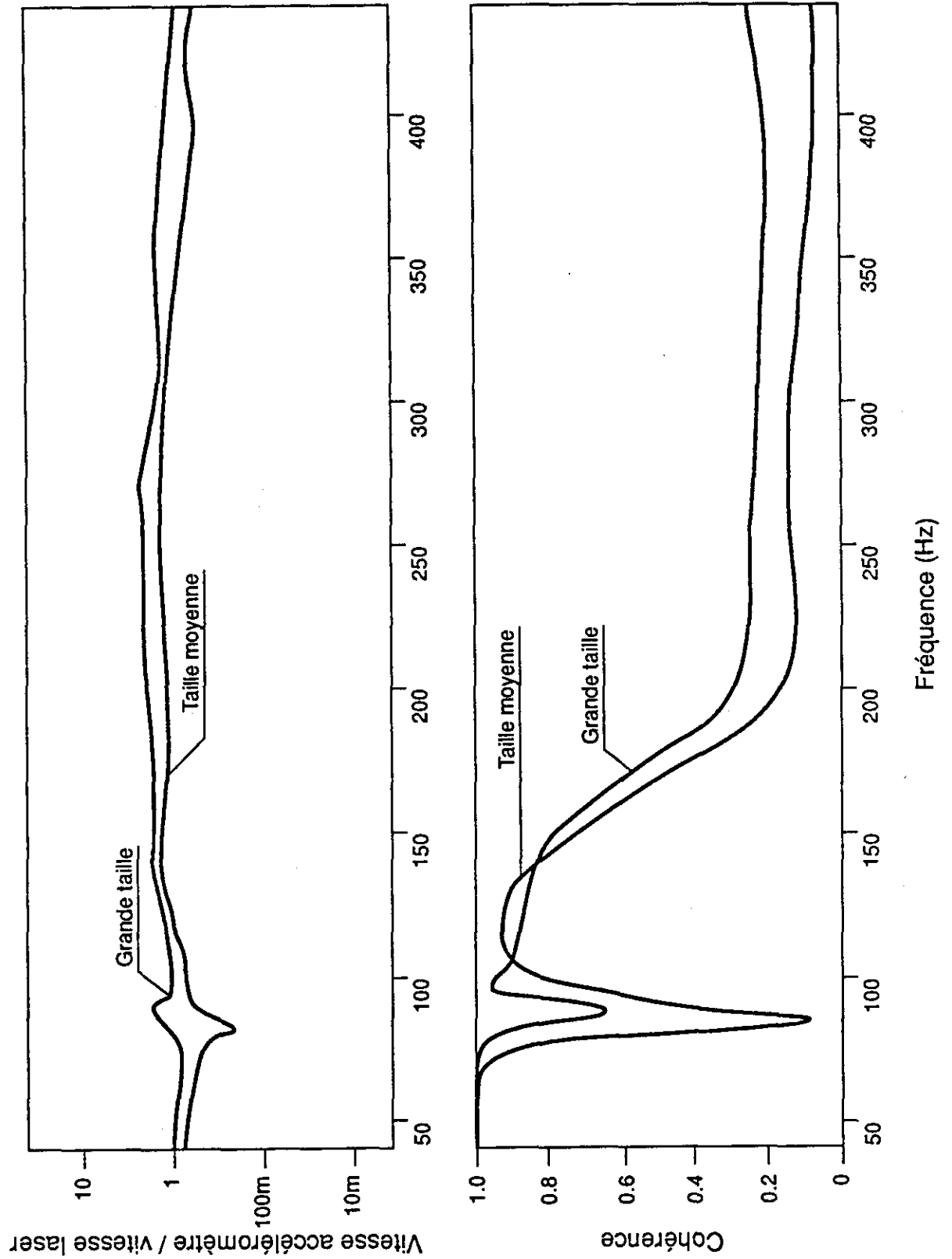


Tableau 1 : Fréquence maximale d'utilisation du laser et du bracelet

FORCE DE PRÉHENSION	VALIDITÉ DU LASER AU POIGNET		VALIDITÉ DU BRACELET	
	x_b (Hz)	z_b (Hz)	x_b (Hz)	z_b (Hz)
FAIBLE	150		115 (100)	
MOYENNE	185 (120)	150	150 (140)	145
GRANDE	200		225 (160)	

() : opérateur ayant une main de plus grande taille

Tableau 2 : Fréquence maximale d'utilisation du bracelet

FORCE DE PRÉHENSION	FRÉQUENCE MAXIMALE (Hz)
FAIBLE	100
MOYENNE	120
GRANDE	200

suffisamment intenses pour être décelables par les capteurs. Dans la réalité, des niveaux intenses de vibrations sont engendrés lors de l'opération des outils percutants ou roto-percutants.

Lorsque la force de préhension est moyenne ou normale, la fréquence maximale d'utilisation serait de 120 Hz, tandis qu'elle atteindrait 200 Hz lorsque la préhension est considérablement élevée. On doit cependant considérer que ces résultats sont basés sur l'application de la méthode sur seulement deux individus, qui bien que de différente taille, ne sauraient représenter l'ensemble de la population. De plus, ces résultats sont basés sur l'établissement d'une cohérence de 0.8, qui bien que statistiquement significative, implique que la méthode de mesure utilisant le bracelet n'est pas en accord absolu avec la méthode utilisant le laser et vice versa.

Dans l'ensemble on note que plus on serre la poignée, plus grande est la gamme de fréquences d'utilisation du bracelet. Par contre, plus massive est la main, moins grande est la gamme de fréquences d'utilisation du bracelet. On constate donc que l'intensité des vibrations transmises au poignet a une influence déterminante sur la gamme de fréquences sur laquelle le bracelet est utilisable.

Le bracelet serait-il utilisable pour estimer l'énergie vibratoire transmise au poignet d'un opérateur de foreuse à béquille?

Les études effectuées sur les foreuses à béquille pneumatiques ont démontré que l'énergie vibratoire dominait à la fréquence de percussion de la foreuse, soit aux environs de 40 Hz. On a pu démontrer que plus de 60% de l'énergie vibratoire totale entre 6.3 et 1 250 Hz se retrouvait à cette seule fréquence de percussion. Au-delà de 200 Hz, l'énergie vibratoire transmise au poignet est négligeable. Nos résultats indiquent que, dépendant de l'axe de mesure, entre 85 et 90% de l'énergie vibratoire globale se retrouverait à des fréquences inférieures à 100 Hz. Comme le bracelet semble capable de reproduire adéquatement les vibrations dont les fréquences se retrouvent en-deçà de 100 à 200 Hz, dépendant de la force de préhension exercée, il apparaîtrait vraisemblable que le bracelet puisse permettre un relevé suffisamment précis de l'énergie vibratoire réellement transmise au poignet lors de l'opération d'une foreuse à béquille.

Quel est l'effet escompté d'avoir modifié le bracelet sur les résultats obtenus préalablement?

La fréquence de résonance du bracelet original s'établit entre 164 et 233 Hz, dépendant de la force de serre exercée sur le poignet. Ceci implique donc une réponse en fréquence linéaire du bracelet original jusqu'à une fréquence variant entre 100 et 130 Hz. Au-delà de cette fréquence, le bracelet original aurait tendance à amplifier les niveaux de vibrations réellement transmis au poignet. Comme on a déjà estimé que ceci représentait entre 10 et 15 % de l'énergie vibratoire globale transmise au poignet (ce pourcentage étant lui-même surestimé due à l'amplification apportée par le bracelet original), il en résulte que la résonance du bracelet original ne peut avoir que très peu d'influence sur les niveaux de vibrations rapportés, ceux-ci étant presque entièrement basés sur les 85 à 90% de l'énergie vibratoire se retrouvant dans la gamme de fréquences dans laquelle la réponse en fréquences du bracelet original était elle-même linéaire.

Cependant, il était tout à fait justifié de modifier le bracelet original en conséquence, au cas où nous voudrions appliquer cette méthode de mesure à des outils susceptibles d'engendrer des niveaux importants de vibrations à des fréquences correspondant à la fréquence de résonance du bracelet original. Le bracelet modifié offre cette possibilité puisque la fréquence de résonance mesurée est tellement élevée comparativement à la gamme de fréquences dans laquelle l'énergie vibratoire est susceptible d'être retrouvée pour un très grand nombre d'outils vibrants.

7.0 LIMITATIONS INHÉRENTES AUX MESURES

Bien que dans l'ensemble, le bracelet semble efficace pour obtenir un estimé des niveaux de vibrations transmises au poignet, on se doit cependant bien de ne pas perdre de vue les conditions expérimentales pour lesquelles les résultats obtenus sont applicables. Il serait donc prématuré de tenter de généraliser ces résultats à l'ensemble des situations susceptibles d'être rencontrées lors de l'application de cette méthode de mesure. Aussi, on se doit de spécifier les conditions dans lesquelles les essais se sont déroulés et ce, dans le but d'identifier les limitations propres à ces résultats. On note donc les conditions suivantes susceptibles d'influencer les résultats, surtout en ce qui a trait à la gamme de fréquences sur laquelle la méthode du bracelet a été trouvée applicable :

- 1) poignée dont le diamètre est de 38 mm. Les caractéristiques de préhension et de posture pourraient changer pour un diamètre différent, modifiant ainsi la gamme de fréquences sur laquelle le bracelet est applicable;

- 2) la posture est telle que le coude n'est pas supporté et l'axe de mesure au poignet est le plus près possible de l'axe d'excitation. Des écarts importants entre la technique laser et le bracelet pourraient être notés si tel n'était pas le cas;
- 3) la force de préhension est seulement évaluée de façon subjective par les sujets et maintenue aussi constante que possible, d'où le risque de fluctuations au cours d'un essai, ce qui modifierait la gamme de fréquences utilisables;
- 4) le bracelet a seulement pu être validé pour les axes de mesure x_h et z_h susceptibles de représenter les axes dominants des vibrations dans la plupart des situations. La validation selon l'axe y_h serait également nécessaire, bien que le montage expérimental aurait à être modifié pour accommoder ces mesures;
- 5) les essais ont été réalisés avec deux sujets différents, démontrant des différences quant à la gamme de fréquences utilisables du bracelet. Les essais auraient donc avantage à être répétés avec un plus grand nombre de sujets de tailles différentes;
- 6) seules des excitations sinusoïdales et pseudo-aléatoire de grande amplitude ont été utilisées pour valider la technique, dues aux limitations inhérentes au capteur laser. Dans le cas de transitoires avec facteur de crête élevé, il serait intéressant de vérifier dans quelle mesure les résultats sont susceptibles d'être affectés;
- 7) la force de serre du bracelet sur le poignet a été fixée au maximum de tolérance des sujets, bien qu'elle ne fut pas mesurée. Pour des forces de serre différentes, il est probable que des modifications pourraient être notées, bien que la force de serre doive obligatoirement être maintenue au maximum pour que la technique du bracelet ait une signification;
- 8) les deux techniques (i.e. laser et bracelet) sont jugées identiques lorsque la cohérence entre les deux se maintient au dessus de 0.8, signifiant ainsi que les signaux vibratoires provenant des deux systèmes de mesure sont en accord à 80% et plus. Il est évident qu'une modification de ce critère entraînerait des changements quant à la gamme de fréquences utilisable. Cependant, on considère que, bien qu'arbitraire, une cohérence de 0.8 constitue une contrainte relativement sévère compte tenu des nombreuses variables susceptibles de modifier les résultats.

Basé sur les résultats obtenus dans cette étude, on peut être relativement confiant que, dans les gammes de fréquences définies (selon la force de préhension exercée), la méthode du bracelet s'avère un outil efficace pour effectuer des études comparatives dans des conditions définies, bien qu'à ce stade on ne soit pas en mesure de juger si les vibrations mesurées au niveau du poignet à l'aide du bracelet soient vraiment représentatives, en valeur absolue, de l'énergie vibratoire réellement transmise par l'intermédiaire de la main. D'autres études seront sûrement requises pour élucider ce point.

8.0 VALIDATION SUR LE TERRAIN

Une série de mesures a été effectuée dans le Laboratoire de recherche minière à Val d'Or dans le but de valider le bracelet en utilisant comme source d'excitation les vibrations engendrées lors de l'opération d'une foreuse à béquille pneumatique. La même technique de mesure que pour les essais en laboratoire a été utilisée lors du forage de trous horizontaux dans une galerie souterraine. Cette fois, un accéléromètre est fixé à la poignée de la foreuse pour mesurer les vibrations selon l'axe de percussion x_h . De même, l'avant-bras est orienté à angle droit avec l'axe de percussion pour que l'accéléromètre du bracelet mesurant en direction x_h , soit en ligne avec l'axe de percussion. Des trous successifs sont forés tandis que le laser est pointé soit sur l'accéléromètre de la poignée, soit sur l'accéléromètre du bracelet afin d'évaluer les limites de sensibilité du laser ou soit directement sur le poignet à proximité du bracelet afin de valider la technique de mesure.

La figure 19 illustre les spectres en fréquences de vitesse des vibrations mesurées par l'accéléromètre sur la poignée de la foreuse et par le laser pointant directement sur cet accéléromètre en direction x_h . La fréquence de percussion de 34 Hz ainsi que ses harmoniques y sont très apparentes dans les deux cas et l'amplitude des vitesses mesurées concorde en deçà de 10%, particulièrement aux fréquences inférieures à 150 Hz. Cependant, la cohérence entre les deux systèmes de mesure n'est significative qu'aux fréquences correspondant à la fréquence de frappe ainsi que ses harmoniques. On note également que la valeur efficace d'accélération à la fréquence de frappe serait de l'ordre de 40 ms^{-2} .

Lorsque le laser est pointé sur l'accéléromètre du bracelet en direction x_h , on obtient un bon accord entre les deux systèmes de mesure jusqu'à une fréquence d'environ 100 Hz (voir figure 20). Cependant, la cohérence n'est bonne qu'à la fréquence de frappe ainsi qu'aux deux

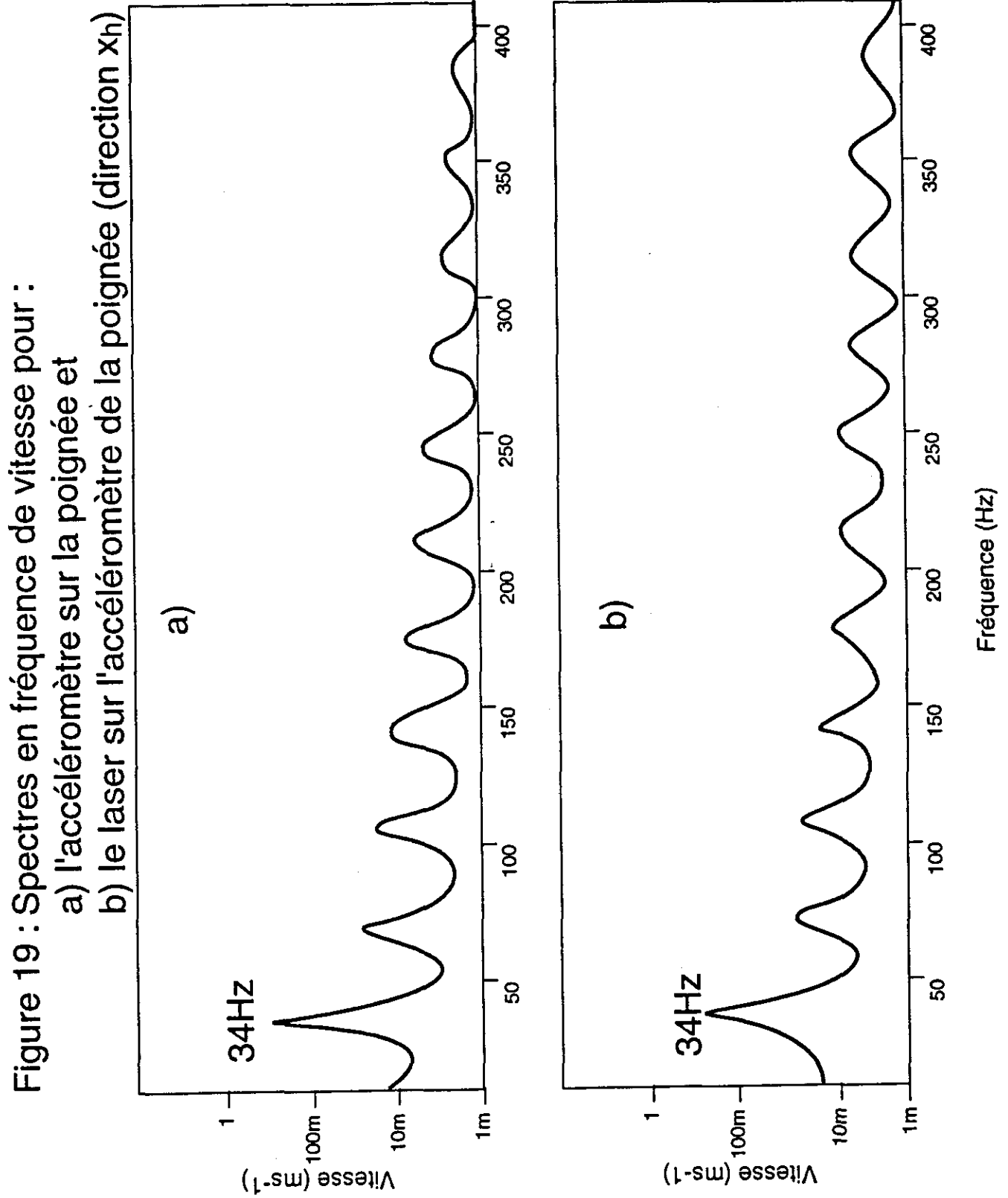


Figure 20 : Comparaison : laser-acceleromètre du bracelet lors de l'opération d'une foreuse à béquille (direction x_h)

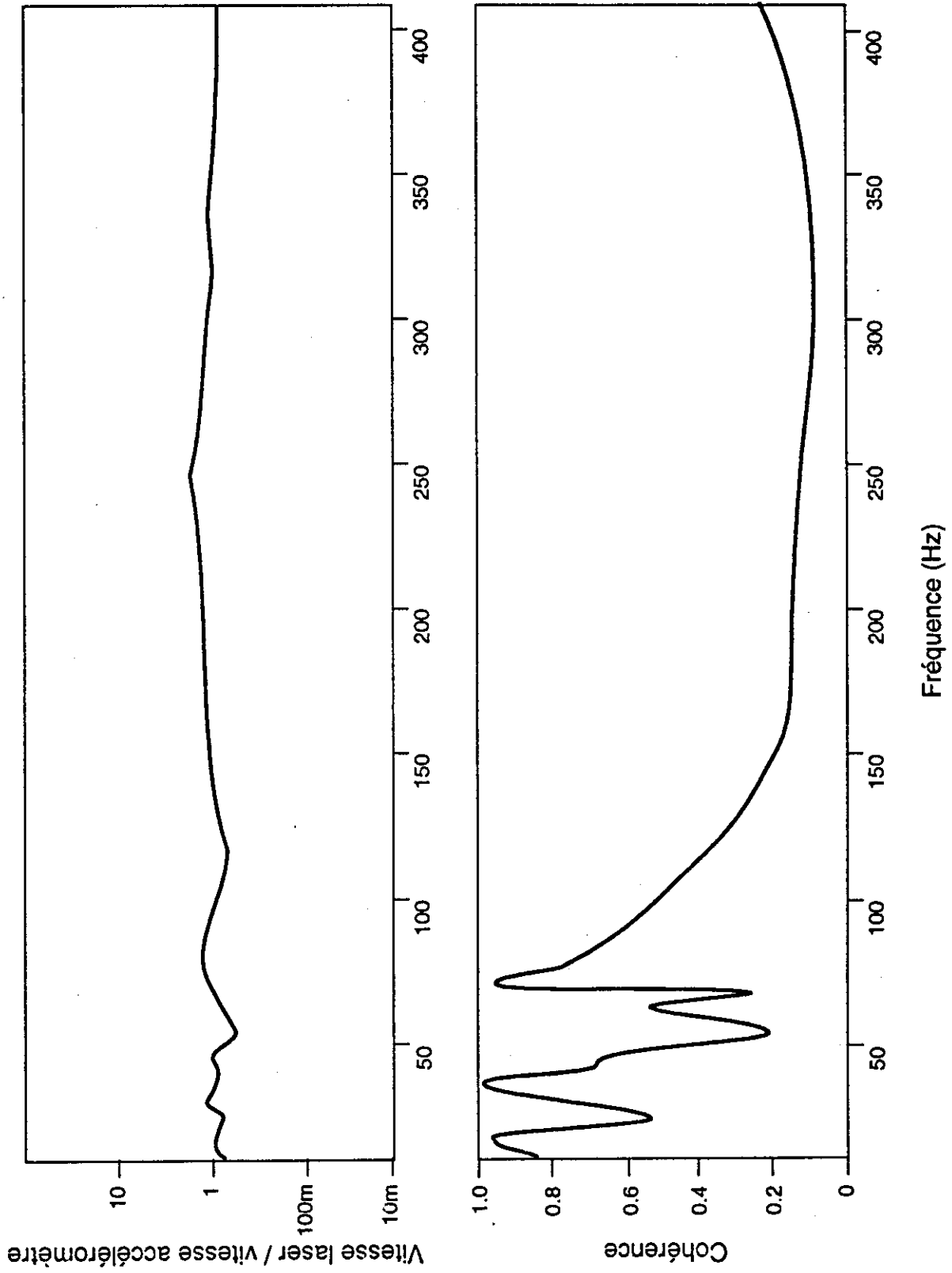
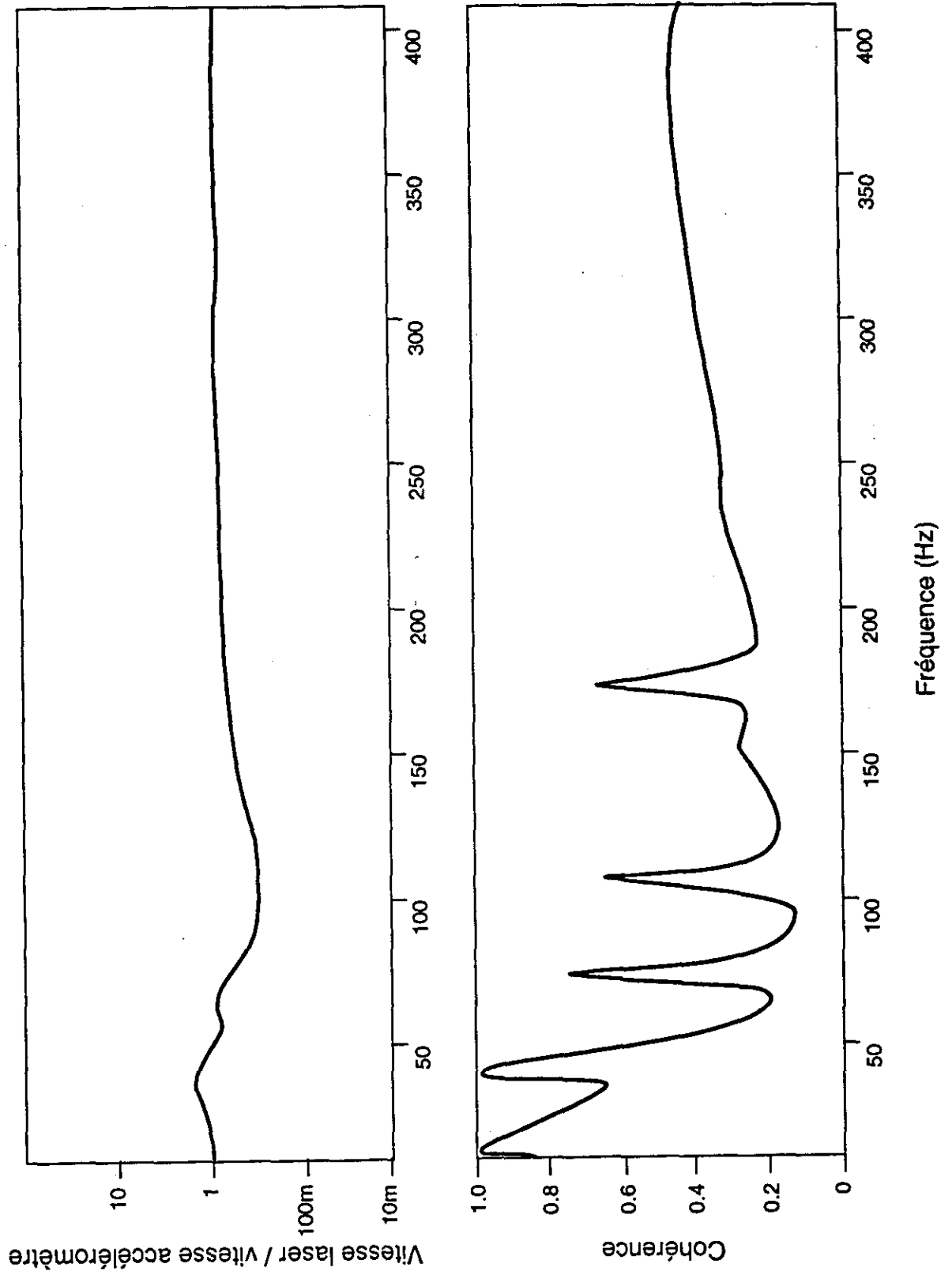


Figure 21 : Validation du bracelet lors de l'opération d'une foreuse à béquille (direction x_h)



harmoniques suivantes pour lesquelles la cohérence est supérieure à 0.8.

On déduit donc que sous une excitation réelle correspondant à des vibrations de chocs successifs, la méthode de mesure utilisant le laser devrait être valable à la fréquence de frappe ainsi qu'aux premiers harmoniques où l'énergie vibratoire est la plus concentrée.

La figure 21 présente la fonction de transfert ainsi que la cohérence obtenues lorsque le laser est pointé directement sur le poignet de l'opérateur de foreuse à proximité du bracelet. On constate que bracelet et laser procurent des résultats similaires jusqu'à une fréquence légèrement supérieure à la fréquence de frappe, signifiant que la méthode du bracelet serait applicable dans de tels cas puisque la plus grande partie de l'énergie vibratoire transmise au poignet apparaît à cette fréquence. Nous avons cependant tenté de valider la méthode selon les axes transversaux avec peu de succès dû au fait que l'on ne soit pas capable d'obtenir un degré de réflexion suffisant du faisceau laser dans ces directions, le point de référence étant l'os du poignet.

9.0 CONCLUSION

Une méthode de mesure des vibrations mains-bras faisant usage d'un bracelet au niveau du poignet a été validée expérimentalement dans des conditions contrôlées. Un bracelet original avait déjà été conçu et mis en application pour comparer différents types de foreuses à béquille pneumatiques, certaines comportant un manche dit "antivibration", et pour évaluer l'influence des opérateurs et des configurations de travail sur l'énergie vibratoire transmise au poignet des opérateurs. La présente étude a démontré que ce bracelet original comportait une fréquence de résonance pouvant varier entre 164 et 233 Hz dépendant de la force de serre, mais que ceci était peu susceptible de modifier les mesures déjà effectuées sur les foreuses à béquille puisque l'énergie vibratoire mesurée au poignet des individus se retrouvait principalement à des fréquences inférieures à cette fréquence de résonance. Le bracelet a tout de même été modifié pour remédier à cette situation.

La fréquence maximale d'utilisation du bracelet modifié a pu être établie dans cette étude : 100 Hz lorsque la force de préhension est jugée faible, 120 Hz pour une force de préhension moyenne et 200 Hz pour une grande force de préhension. Dans le cas d'une foreuse à béquille, il est estimé qu'environ 60% de l'énergie vibratoire globale transmise au poignet se retrouve à

la fréquence de percussion, soit aux environs de 40 Hz. De plus, entre 85 et 90% de l'énergie vibratoire globale transmise au poignet est de moins de 100 Hz. Or, les résultats obtenus dans cette étude indiquent qu'effectivement la méthode du bracelet devrait être applicable dans de telles situations, et permettre des mesures comparatives assez directes du type effectué pour les foreuses à béquille. Cependant, compte tenu des limitations soulevées dans ce rapport, il serait probablement prématuré de généraliser les résultats obtenus à l'ensemble des outils ou situations de travail, ou encore pour obtenir un estimé des niveaux absolus de vibrations transmis au poignet des opérateurs.

REMERCIEMENTS

Nous désirons transmettre nos remerciements au groupe CONCAVE de génie mécanique de l'Université Concordia qui nous a permis d'utiliser leur laboratoire de vibrations, incluant l'excitateur de vibrations. En particulier, nous voulons remercier messieurs Subhash Rakheja et Raghu Gurram qui nous ont assistés lors de la collecte des données.

De plus, nous tenons à remercier le laboratoire de recherche minière du ministère de l'Énergie, Mines et Ressources Canada (CANMET) à Val d'Or et en particulier monsieur Raymond Gaétan qui a fait les arrangements nécessaires pour que nous puissions utiliser ces facilités.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Boileau, P.-É., Les vibrations engendrées par les foreuses à béquille à la Division Opémiska de Minnova. Rapport "Étude et bilan de connaissances", IRSST, 1990, 43 p.
- [2] Report of the Task Force on Vibration and Noise in Mining : Hand-Guided Rock Drills. Prepared for the Mining Industry Technology Council of Canada. Mai 1989.
- [3] Taylor, W., Brammer, A.J. 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 & Sons, 1982, p. 1-12.
- [4] Dupuis, H., Schafer, N. Effects of Impulse Vibration on the Hand-Arm System, Scand J. Work Environ Health, Vol.12, No,4, 1986 p. 320-322.
- [5] Farkkila, M., Starck, J., et coll. Vasospastic Symptoms caused by Assymmetrical Vibration Exposure of the Upper Extremities to a Pneumatic Hammer, Scand J. Work Environ Health, Vol. 4, 1978, p. 330-335.
- [6] Norme internationale ISO 5349. Vibrations mécaniques - Principes directeurs pour le mesurage et l'évaluation de l'exposition des individus aux vibrations transmises par la main. Première édition. 1986-05-15.
- [7] Rasmussen, G. Measurement Techniques for Hand-Arm Vibration. Dans Proceedings of the International Occupational Hand-Arm Vibration Conference, NIOSH, Cincinnati, Ohio. 1977, p. 173-175.
- [8] Rasmussen, G. 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 & Sons, 1982, p. 89-96.
- [9] Starck, J., Pekkarinen, J., Chun, L.C. Transmission of Vibration from Tool Handle to the Wrist and to the Head, Kurume University Symposium "Vibration Stress and the Autonomic Nervous System", mai 1989, 34 p.
- [10] Pekkarinen, J., Starck, J., Pyykko, I. High-Speed Digital Method to Measure Impulsive Hand-Arm Vibration, Proc. 3rd International Symposium of the ISSA, Vienna, avril 1989, p. 47-50.
- [11] Griffin, M.J. Handbook of Human Vibration. Academic Press, London, 1990, p. 677.