



Bruits et vibrations

Études et recherches

■ RAPPORT R-486



Détermination de l'émission vibratoire d'outils manuels percutants Faisabilité d'un système mécanique de substitution de personnes

*Jérôme Boutin
Pierre Marcotte
Juliana Jasinski*



Solidement implanté au Québec depuis 1980, l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) est un organisme de recherche scientifique reconnu internationalement pour la qualité de ses travaux.

NOS RECHERCHES

Mission *travaillent pour vous !*

Contribuer, par la recherche, à la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles ainsi qu'à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes.

Offrir les services de laboratoires et l'expertise nécessaires à l'action du réseau public de prévention en santé et en sécurité du travail.

Assurer la diffusion des connaissances, jouer un rôle de référence scientifique et d'expert.

Doté d'un conseil d'administration paritaire où siègent en nombre égal des représentants des employeurs et des travailleurs, l'IRSST est financé par la Commission de la santé et de la sécurité du travail.

Pour en savoir plus

Visitez notre site Web ! Vous y trouverez une information complète et à jour.

De plus, toutes les publications éditées par l'IRSST peuvent être téléchargées gratuitement. www.irsst.qc.ca

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

Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales

2007

ISBN 13 : 978-2-89631-106-4 (version imprimée)

ISBN 13 : 978-2-89631-107-1 (PDF)

ISSN : 0820-8395

IRSST - Direction des communications

505, boul. De Maisonneuve Ouest

Montréal (Québec)

H3A 3C2

Téléphone : (514) 288-1551

Télécopieur : (514) 288-7636

publications@irsst.qc.ca

www.irsst.qc.ca

Institut de recherche Robert-Sauvé
en santé et en sécurité du travail,
janvier 2007



Bruits et vibrations

Études et recherches

■ RAPPORT R-486

Détermination de l'émission vibratoire d'outils manuels percutants Faisabilité d'un système mécanique de substitution de personnes

Avis de non-responsabilité

L'IRSST ne donne aucune garantie relative à l'exactitude, la fiabilité ou le caractère exhaustif de l'information contenue dans ce document. En aucun cas l'IRSST ne saurait être tenu responsable pour tout dommage corporel, moral ou matériel résultant de l'utilisation de cette information.

Notez que les contenus des documents sont protégés par les législations canadiennes applicables en matière de propriété intellectuelle.

Jérôme Boutin, Service soutien à la recherche et à l'expertise, IRSST
Pierre Marcotte, Service de la recherche, IRSST
Juliana Jasinski, IRSST



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

CONFORMÉMENT AUX POLITIQUES DE L'IRSST

Les résultats des travaux de recherche publiés dans ce document
ont fait l'objet d'une évaluation par des pairs.

SOMMAIRE

L'utilisation d'outils manuels vibrants produit, selon la durée et l'intensité des vibrations, des troubles au niveau des membres supérieurs que l'on désigne sous le nom de syndrome des vibrations main-bras. Une façon de réduire ce risque est de diminuer l'exposition aux vibrations en utilisant des outils moins vibrants. Pour obtenir leur valeur d'émission vibratoire, on opère les outils sur des bancs d'essai spécialement conçus. Dans le cas des outils manuels percutants, des sujets humains doivent tenir les outils verticalement et les opérer selon un protocole bien établi. Les conditions expérimentales doivent être maintenues les plus constantes possible tout au long des essais de façon à réduire les variations dans les résultats. Il est connu que les individus ont des caractéristiques biodynamiques propres qui diffèrent les uns des autres et qui amène des variations dans les résultats obtenus. En plus de contribuer largement aux variabilités des résultats, ces sujets humains sont exposés à des niveaux de vibrations, qui selon les types d'outils, peuvent être non négligeables. Le recrutement, la disponibilité et l'entraînement des participants rendent difficile le déroulement de ce type d'évaluation.

Afin de trouver un substitut à l'implication humaine dans l'évaluation du niveau de l'émission vibratoire d'outils percutants, une démarche, basée sur la mesure des caractéristiques biodynamiques du système main-bras de six individus masculins, a permis d'obtenir les paramètres nécessaires pour définir un modèle simple d'un système mécanique capable de reproduire au mieux le comportement biodynamique recherché. L'optimisation de ces paramètres a permis d'identifier les éléments nécessaires à la réalisation de ce modèle pour finalement en faire un mécanisme compact à deux degrés de liberté. Une fois fabriqué, ce mécanisme de substitution a été installé sur deux marteaux burineurs pour être validé.

Des essais comparant les valeurs d'émission vibratoire de deux marteaux burineurs obtenues avec le mécanisme de substitution et en utilisant trois sujets humains ont démontré une répétabilité et une reproductibilité des résultats nettement supérieures avec le mécanisme de substitution, les coefficients de variation étant de 4 à 8 fois inférieurs à ceux obtenus avec les sujets humains. Il a également été constaté que le mécanisme de substitution de sujets humains sous-estime de seulement 6 % à 11 % le niveau de l'émission vibratoire obtenu à l'aide de sujets humains.

Ces résultats préliminaires montrent que le mécanisme de substitution offre un potentiel intéressant et qu'un tel système pourrait servir éventuellement de solution de remplacement efficace à la méthode normalisée actuelle impliquant l'utilisation de sujets humains.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier les personnes qui ont bien voulu collaborer à titre de sujets d'expérimentation aux différentes étapes nécessaires à la réalisation de cette étude. Nous tenons également à remercier Pierre Drouin pour sa participation à la fabrication du mécanisme de substitution.

TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE.....	I
REMERCIEMENTS.....	III
1. INTRODUCTION	1
2. OBJECTIFS DE L'ÉTUDE.....	3
3. MÉTHODOLOGIE.....	5
3.1 Évaluation de la réponse biodynamique du système main-bras	5
3.2 Optimisation d'un système masse-ressort-amortisseur à 2 degrés de liberté	7
3.3 Fabrication et validation du mécanisme de substitution	9
3.4 Comparaison des valeurs d'émission vibratoire obtenues avec le mécanisme de substitution et des sujets humains	11
4. RÉSULTATS.....	15
4.1 Masse apparente du système main-bras	15
4.2 Masse apparente du mécanisme de substitution	16
4.3 Comparaison des résultats obtenus avec le mécanisme de substitution et la méthode normalisée	18
4.3.1 Marteau burineur électrique.....	18
4.3.2 Marteau burineur pneumatique.....	21
5. CONCLUSION.....	25
6. BIBLIOGRAPHIE.....	27

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Caractéristiques mécaniques des composantes utilisées pour la fabrication du mécanisme de substitution	9
Tableau 2. Résultats comparatifs obtenus des sujets humains et du mécanisme de substitution pour le marteau burineur électrique	20
Tableau 3. Résultats comparatifs obtenus des sujets humains et du mécanisme de substitution pour le marteau burineur pneumatique	23

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Poignée instrumentée pour la mesure de la force de poussée et de préhension: (a) poignée complète; (b) intérieur de la poignée.....	6
Figure 2. Posture typique adoptée par les sujets lors de l'évaluation de la masse apparente du système main-bras.....	7
Figure 3. Représentation schématique d'un système à 2 degrés de liberté (2 DOF).....	8
Figure 4. Prototype du mécanisme de substitution à 2 degrés de liberté monté sur l'excitateur électrodynamique.....	10
Figure 5. Posture adoptée par les sujets pour le marteau-burineur électrique (a) et le marteau-burineur pneumatique (b).....	12
Figure 6. Installation du mécanisme de substitution sur le marteau burineur électrique (a) et le marteau burineur pneumatique (b).....	13
Figure 7. Module et phase de la masse apparente moyenne des 6 sujets pour différentes conditions.....	15
Figure 8. Masse apparente moyenne mesurée avec 6 sujets et comparaison avec celle obtenue à partir de la norme ISO 10068.....	16
Figure 9. Module et phase de la masse apparente du mécanisme de substitution selon différentes conditions.....	17
Figure 10. Validation du module et de la phase de la masse apparente du mécanisme de substitution.....	17
Figure 11. Spectre moyen de 5 essais obtenus avec le marteau burineur électrique pour le mécanisme de substitution (a) et les sujets humains (b).....	19
Figure 12. Spectre de l'émission vibratoire du marteau burineur électrique pour les sujets humains et le mécanisme de substitution.....	20
Figure 13. Spectre moyen de 5 essais obtenus avec le marteau burineur pneumatique pour le mécanisme de substitution (a) et les sujets humains (b).....	22
Figure 14. Spectre de l'émission vibratoire du marteau burineur pneumatique pour les sujets humains et le mécanisme de substitution.....	23

1. INTRODUCTION

Les outils manuels vibrants, que l'on retrouve largement dans les milieux de travail, transmettent à leurs utilisateurs une partie de l'énergie vibratoire qu'ils produisent. Cette énergie que l'on ressent sous forme de vibrations peut, en fonction de la durée d'exposition, de l'intensité et de la fréquence des vibrations, provoquer différents troubles au niveau des membres supérieurs. Ces troubles peuvent être de nature vasculaire, neurologique ou musculo-squelettique, lesquels sont associés au syndrome des vibrations main-bras. Parmi les premiers symptômes du syndrome des vibrations main-bras, on note un engourdissement et/ou des picotements peu fréquents dans les doigts, les mains ou les bras, ou un engourdissement et une perte de coloration au bout des doigts lorsque ceux-ci sont exposés au froid. Au fur et à mesure que l'affection progresse, les épisodes d'engourdissement, de picotement et de douleur deviendront plus fréquents, et le travailleur éprouvera de la difficulté à utiliser ses mains. L'atteinte la mieux documentée consiste en un trouble du système circulatoire appelée phénomène de Raynaud ou encore maladie des doigts blancs qui se manifeste par le blanchissement de l'extrémité des doigts. Un travailleur atteint du syndrome des vibrations main-bras peut être handicapé de façon permanente. Au Québec, il a été estimé qu'il pourrait y avoir plus de 100 000 travailleurs exposés à une dose vibratoire potentiellement à risque [1]. De plus, au fil des années un certain nombre de travailleurs ont été reconnus comme souffrant du syndrome de Raynaud et indemnisés par la CSST, et une étude a récemment été réalisée [2] pour documenter les différents cas survenus au Québec entre 1993 et 2002.

Bien qu'il existe des moyens indirects de diminuer l'exposition aux vibrations tels l'entretien adéquat des outils, le port de gants antivibratiles, les modifications des méthodes de travail et la formation; la façon la plus efficace de réduire cette exposition demeure l'utilisation d'outils moins vibrants. La tentative d'évaluer subjectivement le niveau de vibrations d'un outil se solde habituellement par une perception qui ne correspond pas à la réalité. L'effet des vibrations dépend assurément de son intensité, mais également de sa distribution dans le domaine des fréquences. Pour réussir à comparer les mêmes types d'outils entre eux, il existe des codes d'essais normalisés (série de normes ISO 8662) qui décrivent les méthodes à utiliser en laboratoire pour déterminer les valeurs d'émission vibratoire d'outils faisant partie d'une même catégorie et sur lesquelles peut être basée la sélection des modèles d'outils les moins vibrants.

Dans les codes d'essais normalisés, des sujets humains participent à la mise en œuvre du protocole d'essais en laboratoire. Les participants doivent généralement tenir les outils, les opérer dans des conditions bien définies et maintenir ces conditions constantes le plus possible tout au long des essais de façon à réduire les variations dans les résultats. Les caractéristiques biodynamiques du système main-bras, les forces appliquées sur l'outil, la posture et l'habileté des individus à maintenir les conditions d'opération constantes sont des facteurs qui influencent et entraînent des variations dans les résultats. En plus de contribuer largement aux variabilités des résultats obtenus, ces sujets humains sont exposés à des niveaux de vibrations qui peuvent ne pas être négligeables. Le recrutement, la disponibilité et l'entraînement des sujets sont aussi des irritants qui rendent difficile le déroulement de ce type d'évaluation. Le remplacement de sujets humains, par un système mécanique capable de fournir des caractéristiques équivalentes à celles procurées par le système main-bras, est une alternative très intéressante qui mérite d'être

considérée compte tenu de tous les avantages qu'elle procure, notamment celui d'offrir une plus grande flexibilité pour la réalisation des essais et de réduire les écarts liés aux variations interindividuelles. Cependant, peu de systèmes ont à ce jour été développés [3,4] qui permettent de reproduire adéquatement le comportement du système main-bras lorsque soumis aux vibrations transmises par l'intermédiaire d'une poignée. Cette étude vise à développer un tel système pour être intégré dans un banc d'essai destiné à déterminer les valeurs d'émission vibratoire des marteaux burineurs selon le protocole normalisé.

2. OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

Les objectifs de cette étude exploratoire consistent à évaluer la faisabilité de développer un mécanisme de substitution capable de simuler le système main-bras dans des conditions représentatives de celles appliquées lors de la réalisation des essais avec sujets humains.

Les objectifs spécifiques consistent à :

1. Déterminer les caractéristiques biodynamiques du système main-bras dans des conditions posturales et vibratoires précises et développer un modèle mécanique correspondant capable de simuler un tel comportement.
2. Basé sur le modèle, évaluer la possibilité de concevoir un prototype d'un système mécanique fonctionnel simple simulant le comportement biodynamique du système main-bras.
3. Concevoir et intégrer le système mécanique ainsi développé au banc d'essais défini pour déterminer les valeurs d'émission vibratoire des marteaux burineurs et le valider en comparant les résultats obtenus avec ceux découlant de l'utilisation de sujets humains.
4. Faire des recommandations quant à la possibilité d'utiliser un système mécanique pour remplacer les sujets humains dans les codes d'essai devant servir à caractériser les valeurs d'émission vibratoire des marteaux burineurs.

3. METHODOLOGIE

Pour entreprendre la réalisation du mécanisme de substitution, il est nécessaire d'obtenir dans un premier temps les caractéristiques biodynamiques du système main-bras que l'on désire simuler. Ces caractéristiques biodynamiques du système main-bras sont obtenues par l'intermédiaire d'une poignée instrumentée et avec la participation de six sujets. Les participants adoptent une posture représentative de l'usage d'un marteau burineur et serrent la poignée instrumentée d'une seule main pour différentes forces de couplage et pour deux excitations vibratoires contrôlées. La représentation moyenne des mesures réalisées sous l'ensemble des conditions est considérée comme étant les caractéristiques biodynamiques à reproduire.

Par la suite, les données moyennes obtenues sont traitées par un algorithme d'optimisation pour établir les paramètres idéaux d'un modèle mécanique masse-ressort-amortisseur simple et unidirectionnel à deux degrés de liberté tout en minimisant l'erreur quadratique avec les données expérimentales. La réalisation du mécanisme de substitution est l'implémentation la plus rapprochée du modèle mécanique qui tient compte des différentes contraintes et limites associées à ce type de développement.

Finalement, la valeur de l'émission vibratoire de deux types de marteaux burineurs est comparée à celle obtenue avec des sujets utilisant ces outils pour une même force de poussée. Les marteaux burineurs sont opérés dans un dissipateur d'énergie avec un burin artificiel afin d'établir des conditions d'opération contrôlées.

3.1 Évaluation de la réponse biodynamique du système main-bras

La réponse biodynamique du système main-bras est généralement caractérisée en termes d'impédance mécanique au point d'entrée (*driving-point mechanical impedance*). L'impédance mécanique s'oppose à la propagation ou au transfert de l'énergie vibratoire d'un point à l'autre et correspond à la fonction de transfert (module et phase) de la force et de la vitesse appliquées à l'entrée du système. Elle varie en fonction de la fréquence et s'exprime en Ns/m. Puisqu'il est difficile de se représenter concrètement l'impédance mécanique, on utilise également la notion de masse apparente qui est la fonction de transfert de la force et de l'accélération. Semblable à l'impédance mécanique, la masse apparente est une valeur complexe composée d'un module et d'une phase qui correspond, dans ce cas-ci, à la masse en régime dynamique du système main-bras. L'équation (1) définit la masse apparente.

$$M(j\omega) = \frac{G_{Fv}(j\omega)}{G_{vv}(j\omega)} \quad (1)$$

où G_{Fv} est le spectre croisé de la force avec l'accélération et G_{vv} est l'auto spectre de l'accélération.

Des mesures de la masse apparente du système main-bras sur la main dominante de six sujets masculins sont effectuées en laboratoire en faisant varier la force de couplage composée d'une

force de poussée et de préhension appliquées simultanément. Une poignée instrumentée cylindrique de 40 mm de diamètre est fixée sur un excitateur électrodynamique orienté à la verticale générant un mouvement vibratoire de translation de haut en bas. Deux capteurs de force insérés entre la poignée et un support fixé à la source de vibrations permettent de mesurer simultanément la force statique (de poussée) et la force dynamique produite par la réaction du système main-bras à la force de couplage exercée. Un accéléromètre intégré à la poignée instrumentée mesure et contrôle les vibrations produites à l'interface main-poignée. La force de préhension est également mesurée par deux capteurs de force installés entre les deux parties demi-cylindriques de la poignée instrumentée. La partie de la poignée découplée du support et sensible à la préhension est orientée de façon à ce que la force de poussée n'interfère pas avec la force de préhension. La figure 1 montre la poignée instrumentée et ses constituantes.

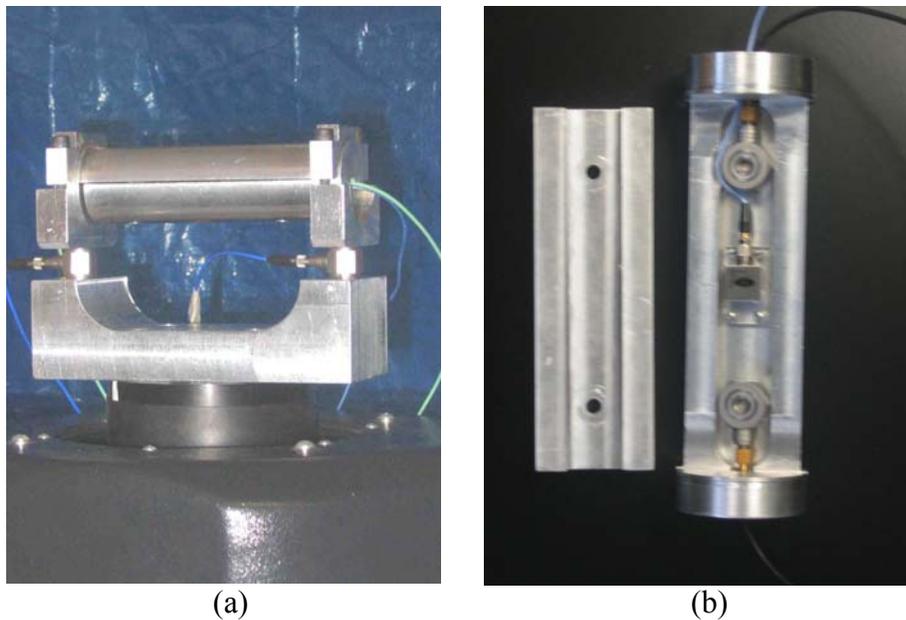


Figure 1. Poignée instrumentée pour la mesure de la force de poussée et de préhension: (a) poignée complète; (b) intérieur de la poignée.

L'excitation vibratoire appliquée aux sujets est générée dans la direction Z_h du système de coordonnées basicentriques [5] pour deux niveaux d'accélération efficace pondérée $a_{h,w}$ couvrant la plage de fréquences de 8 Hz à 1250 Hz. La densité spectrale de puissance est maintenue constante dans l'ensemble du spectre vibratoire par un asservissement de l'accélération. L'intensité vibratoire est ajustée pour obtenir deux niveaux d'accélération efficace pondérée, soit de $2,5 \text{ m/s}^2$ et $5,0 \text{ m/s}^2$. Chacun des six individus prend place sur une plate-forme ajustée en hauteur de façon à ce qu'il puisse maintenir la poignée d'une seule main et adopter une posture plutôt représentative de l'usage d'un marteau burineur. Cette posture consiste à courber légèrement le tronc vers l'avant, d'allonger le bras vers le bas sans le cambrier et serrer la poignée en appuyant avec la paume de la main sur le dessus de la poignée. Pour chaque sujet et spectre vibratoire, la force de préhension est maintenue constante à 30 N et la force de poussée est

exercée successivement à 80 N, 120 N et 160 N. Pour confirmer la validité de chacune des mesures, deux résultats d'essais de masse apparente dénotant une bonne similitude doivent être obtenus. Une mesure de la masse apparente de la poignée instrumentée seule est également réalisée pour tenir compte de la caractéristique intrinsèque de l'assemblage de la poignée pour chacune des deux excitations utilisées. Cette valeur est soustraite des mesures de masse apparente des sujets pour annuler l'effet de la poignée instrumentée et obtenir la masse apparente réelle. Le contrôle de la force de préhension et de poussée est assuré par un système d'affichage des forces mis à jour 4 fois par seconde qui permet au sujet de réagir pour corriger et maintenir les forces exigées à $\pm 3\%$. La durée de chaque mesure est d'au moins de 16 secondes. La figure 2 illustre la posture adoptée par un sujet lors de l'évaluation de la masse apparente.



Figure 2. Posture typique adoptée par les sujets lors de l'évaluation de la masse apparente du système main-bras

3.2 Optimisation d'un système masse-ressort-amortisseur à 2 degrés de liberté

Afin de concevoir un mécanisme de substitution simulant la réponse biodynamique du système main-bras, l'optimisation d'un système mécanique de substitution a été effectuée à l'aide d'un algorithme génétique. Un système à deux degrés de liberté, comprenant une seule masse, a été retenu pour simuler la dynamique du système main-bras. En effet, des essais d'optimisations préliminaires ont démontré qu'un système à un degré de liberté ne permettait pas de simuler de

façon satisfaisante la dynamique du système main-bras en basses fréquences, tandis que des systèmes à 3 et 4 degrés de liberté n'apportaient pas de gains appréciables au niveau de la dynamique du système pour les fréquences concernées, tout en étant beaucoup plus difficiles à mettre en œuvre. Donc, un système à deux degrés de liberté semblait être un compromis acceptable. Un tel système est représenté à la figure 3.

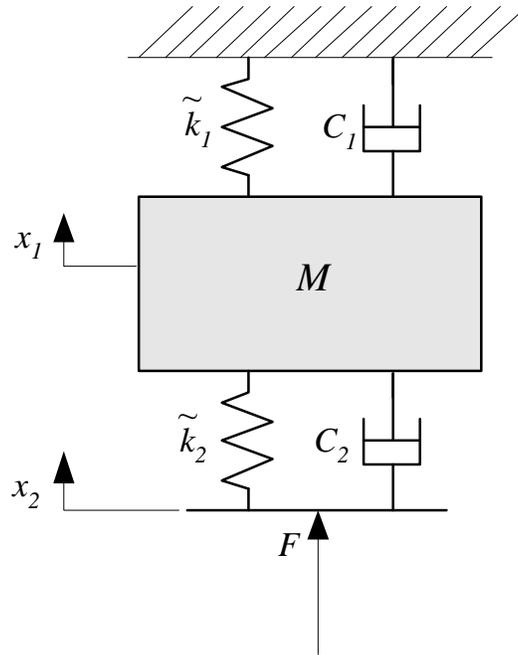


Figure 3. Représentation schématique d'un système à 2 degrés de liberté (2 DOF)

Il peut être démontré que la masse apparente au point d'entrée d'un tel système est donnée par [6] :

$$\frac{F}{\ddot{x}_2} = \frac{\tilde{k}_2 + j\omega C_2}{-\omega^2} - \frac{(\tilde{k}_2 + j\omega C_2)^2}{\omega^4 M - j\omega^3 (C_1 + C_2) - \omega^2 (\tilde{k}_1 + \tilde{k}_2)} \quad (2)$$

où $j = \sqrt{-1}$, ω est la fréquence angulaire, M est une masse en kg, \tilde{k}_1 et \tilde{k}_2 sont les constantes de rappel complexes des ressorts (N/m), tel que $\tilde{k} = k(1 + j\eta)$, η étant le facteur de perte des ressorts ($\eta = 0,005$ pour l'acier et l'aluminium) et finalement C_1 et C_2 sont les coefficients d'amortissement des amortisseurs (Ns/m). On note que le tilde « $\tilde{}$ » au-dessus d'une variable dénote une quantité complexe.

L'optimisation a été effectuée à l'aide d'un algorithme génétique implémenté sous MATLAB (« genetic algorithm optimization toolbox », GAOT) développé à l'Université de la Caroline du Nord [7]. Cinq paramètres ont été optimisés en parallèle par l'algorithme, soit la masse M , les constantes des ressorts k_1 et k_2 ainsi que les coefficients d'amortissement des amortisseurs C_1 et C_2 . La fonction coût (quantité à minimiser) qui a été utilisée pour l'optimisation est donnée par :

$$FC = \sum_f \left| \tilde{M}A_d(j\omega) - \tilde{M}A_o(j\omega) \right|^2 \quad (3)$$

où FC est la fonction coût, $\tilde{M}A_d(j\omega)$ est la masse apparente désirée (mesurée en laboratoire sur les sujets), en fonction de la fréquence, et $\tilde{M}A_o(j\omega)$ est la masse apparente obtenue avec le modèle à 2 degrés de liberté. La sommation a été effectuée pour couvrir la bande de fréquences f comprise entre 8 Hz et 200 Hz afin d'éviter de mettre de l'emphase aux fréquences plus élevées. Par ailleurs, chacun des paramètres optimisés a été soumis à des conditions limitant leurs valeurs à l'intérieur d'une certaine plage de valeurs admissibles.

3.3 Fabrication et validation du mécanisme de substitution

Une fois les cinq paramètres obtenus par le processus d'optimisation, les éléments possédant les caractéristiques requises sont recherchés. Les ressorts sont choisis en fonction de leur constante de rappel mais également pour leur diamètre et leur longueur, afin de faciliter l'assemblage et réduire les dimensions hors tout du prototype. Le mécanisme doit être compact, robuste, facile à installer et à utiliser. Les éléments les plus difficiles à se procurer sont les amortisseurs. Un premier amortisseur pneumatique variable (*dashpot*) de dimension convenable fût mis à l'essai. Comme il était prévisible, l'amortisseur pneumatique avait un comportement plutôt élastique dès que sa fréquence d'activation dépassait quelques cycles par seconde. Puisqu'il n'était pas simple de trouver des amortisseurs ayant les caractéristiques désirées, nous avons entrepris de fabriquer deux amortisseurs hydrauliques de taille et de valeur de coefficient d'amortissement désirées. Des combinaisons du diamètre du piston interne et de la viscosité de l'huile des amortisseurs ont permis d'obtenir les coefficients d'amortissement appropriés. Le tableau 1 indique les valeurs expérimentales des caractéristiques mécaniques des cinq composantes utilisées pour la fabrication du mécanisme de substitution.

Tableau 1. Caractéristiques mécaniques des composantes utilisées pour la fabrication du mécanisme de substitution

M (kg)	k₁ (N/m)	k₂ (N/m)	C₁ (Ns/m)	C₂ (Ns/m)
3,3	3200	15000	130	340

Le déplacement de la masse est assuré par deux tiges d'acier qui glissent dans des roulements linéaires à chacune des extrémités du mécanisme. Des butées fixées aux embouts des tiges d'acier limitent le déplacement de la masse et assurent l'intégrité du mécanisme. L'ensemble du mécanisme a fait l'objet d'attentions particulières pour réduire au minimum le frottement créé par le déplacement relatif des différents éléments.

La validation du mécanisme de substitution est obtenue en se servant d'un exciteur électrodynamique comme source vibratoire. Le mécanisme est monté en direction verticale sur la base de l'exciteur. Un capteur de force dynamique est introduit entre le mécanisme et la base de l'exciteur électrodynamique. Un accéléromètre est également fixé à la base de l'exciteur. Par l'intermédiaire d'une structure métallique, une force est appliquée et mesurée sur la partie supérieure du mécanisme. La force de poussée correspond à la force appliquée sur la partie supérieure du mécanisme additionnée au poids du mécanisme lui-même. Les tests de validation sont réalisés pour deux niveaux d'accélération efficace pondérée $a_{h,w}$ de $2,5 \text{ m/s}^2$ et de $5,0 \text{ m/s}^2$ et des forces de poussée de 80 N, 120 N, et 150 N. L'excitation vibratoire est la même que celle décrite pour l'évaluation de la réponse biodynamique du système main-bras. La figure 4 montre la disposition et les différents éléments utilisés pour la validation du mécanisme de substitution.



Figure 4. Prototype du mécanisme de substitution à 2 degrés de liberté monté sur l'exciteur électrodynamique.

3.4 Comparaison des valeurs d'émission vibratoire obtenues avec le mécanisme de substitution et des sujets humains

La méthode d'essai utilisée pour opérer les marteaux burineurs est celle décrite dans la norme ISO 8662-2 [8]. Cette méthode permet d'obtenir la valeur de l'émission vibratoire dans des conditions contrôlées. Le burin normalement utilisé avec le marteau burineur est remplacé par un burin artificiel à embout plat dont les dimensions sont reliées au diamètre du burin d'origine. Le burin artificiel est introduit dans un cylindre de 40 mm de diamètre intérieur rempli d'une hauteur de 100 mm de bille d'acier de 4 mm de diamètre et d'une dureté supérieure à 63 HRC (Hardness Rockwell C). L'assemblage du cylindre et des billes d'acier constitue un dissipateur d'énergie que l'on fixe sur un socle de béton de 300 kg. Lorsque l'on opère le marteau burineur, une force de poussée suffisante doit être exercée pour enclencher la percussion de l'outil. Un adaptateur à collier de serrage muni d'un accéléromètre et d'un filtre mécanique est fixé sur la poignée de l'outil, près de la zone de préhension, pour obtenir le niveau d'accélération de l'outil.

Les mesures des émissions vibratoires avec trois sujets et le mécanisme de substitution sont réalisés sur deux marteaux burineurs : l'un pneumatique, l'autre électrique. La cadence de percussion du marteau burineur électrique (Bosch Hammer 11313EVS) d'une masse de 5,3 kg est ajustée à environ 40 coups/s par un contrôle situé sur le côté de l'outil. Cette cadence est également celle normalement observée sur le marteau burineur pneumatique (Atlas Copco RRF31-01) équipé d'un dispositif antivibratile et dont la masse est de 2,5 kg. La force de poussée appliquée sur le marteau burineur électrique est limitée à 150 N pour faciliter son opération. Pour le marteau burineur pneumatique, une force de poussée de 100 N est suffisante pour amener le dispositif antivibratile au milieu de sa plage utile. Un régulateur de pression tente de maintenir à 630 kPa la pression de l'air comprimé du marteau burineur en opération. Les sujets opèrent les outils en adoptant une posture similaire à celle tenue lors de l'évaluation de la réponse biodynamique et sont debout sur une balance. La force de poussée est obtenue par la différence de poids du sujet avant et pendant l'essai. Les sujets appliquent une force de poussée qui n'excède pas $\pm 3\%$ de la valeur fixée en réagissant à l'affichage de la force de poussée. Les sujets doivent accomplir une série de cinq essais consécutifs dont le coefficient de variation de l'accélération efficace pondérée $a_{h,w}$ mesurée sur la poignée en direction de l'axe de percussion n'excède pas 15 %. L'émission vibratoire du marteau burineur avec sujet est alors la moyenne des accélérations efficaces pondérées moyennes de chacun des trois sujets. Comme le montre la figure 5, il est important de préciser que les marteaux burineurs ne sont pas opérés de la façon habituelle, car les sujets doivent appliquer la force de poussée d'une seule main. Cette nuance permet d'éviter que des différences dans les résultats comparatifs entre les sujets et le mécanisme de substitution soient attribuables à l'usage incontrôlé des deux mains. On observe à la figure 5 (b) la position de la main gauche sur le corps du marteau burineur pneumatique. Cette main stabilise le mouvement latéral produit par le mécanisme antivibratile sans contribuer à la force de poussée. Afin de minimiser l'effet de décalage entre le burin et la poignée du marteau burineur électrique, un dispositif d'attache a été utilisé pour compenser le couple exercé sur le marteau burineur par les sujets et assurer ainsi un alignement convenable du burin artificiel dans le dissipateur d'énergie.

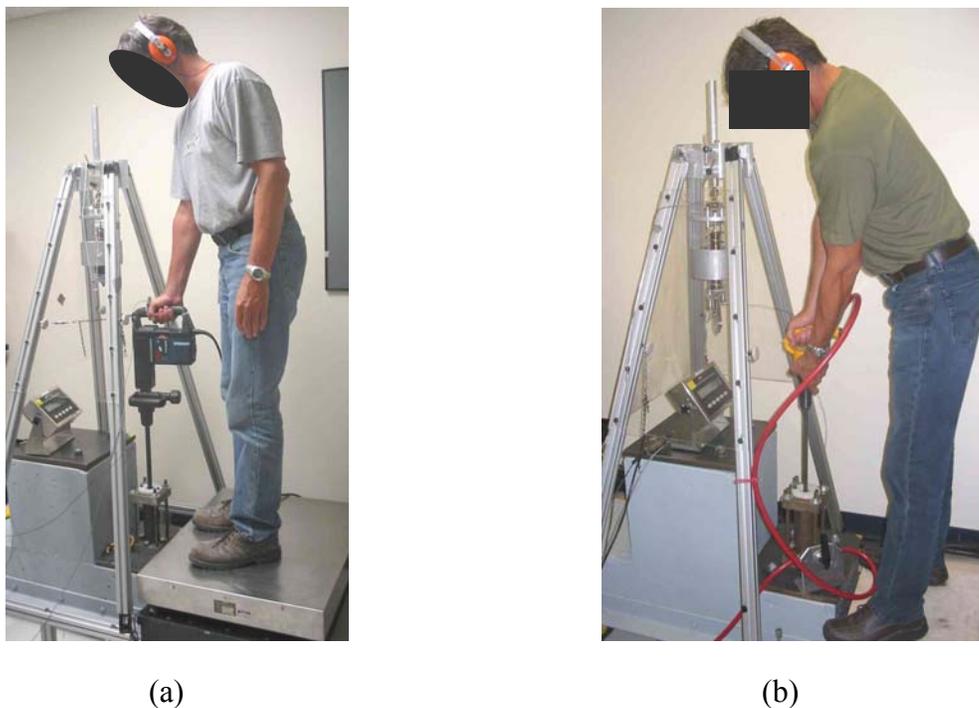


Figure 5. Posture adoptée par les sujets pour le marteau-burineur électrique (a) et le marteau-burineur pneumatique (b)

L'émission vibratoire de l'outil avec le mécanisme de substitution est obtenue en fixant, par un collier de serrage, le bas du mécanisme à la poignée du marteau burineur à l'endroit où les sujets appliquent la force de poussée. Comme le montre la figure 6, l'extrémité du haut du mécanisme est reliée à une structure métallique qui permet d'appliquer une force vers le bas sur le mécanisme. La force de poussée est obtenue par la somme de la force exercée par le poids du mécanisme et de la force appliquée sur le mécanisme par l'intermédiaire de la structure métallique. Un accéléromètre monté sur un filtre mécanique installé à la base du mécanisme mesure le niveau vibratoire. La moyenne de l'accélération efficace pondérée de cinq essais consécutifs donne l'émission vibratoire du marteau burineur avec le mécanisme de substitution. De façon similaire aux mesures effectuées avec les sujets, trois séries de cinq essais consécutifs sont réalisées pour évaluer la reproductibilité des résultats. Entre chaque série d'essais, le mécanisme de substitution est retiré et réinstallé de la poignée du marteau burineur. Le dispositif d'attache du marteau burineur électrique est également utilisé avec le mécanisme de substitution pour éliminer l'effet du couple et maintenir des conditions expérimentales similaires à celles des sujets.



(a)



(b)

Figure 6. Installation du mécanisme de substitution sur le marteau burineur électrique (a) et le marteau burineur pneumatique (b)

4. RÉSULTATS

4.1 Masse apparente du système main-bras

La figure 7 affiche les résultats de la masse apparente du système main-bras obtenus en utilisant une poignée instrumentée couplée à un excitateur électrodynamique. Chacune des courbes représente la masse apparente moyenne du système main-bras de six individus obtenue pour trois différentes forces de poussée et deux niveaux d'accélération efficace pondérée ($a_{hw,z}$). Seule la force de préhension est maintenue constante à 30 N. La posture adoptée par chacun des sujets lors de l'expérimentation étaient la même, soit debout, le tronc légèrement incliné vers l'avant, l'avant-bras en extension verticalement (sans cambrer) et la paume de la main en contact avec la poignée instrumentée. On note que dans la plage de fréquences de 20 Hz à 200 Hz, le module de la masse apparente augmente en fonction de la force de poussée et cela indépendamment du niveau de vibration. Pour les fréquences supérieures à 200 Hz, le module de la masse apparente est sensiblement le même peu importe les conditions expérimentales. Dans la plage de fréquences de 8 Hz à 20 Hz, à part pour une condition, les résultats sont également insensibles aux conditions expérimentales. La superposition des courbes pour les deux niveaux d'excitation vibratoire montre également une linéarité de la réponse du système main-bras en fonction de l'amplitude des vibrations.

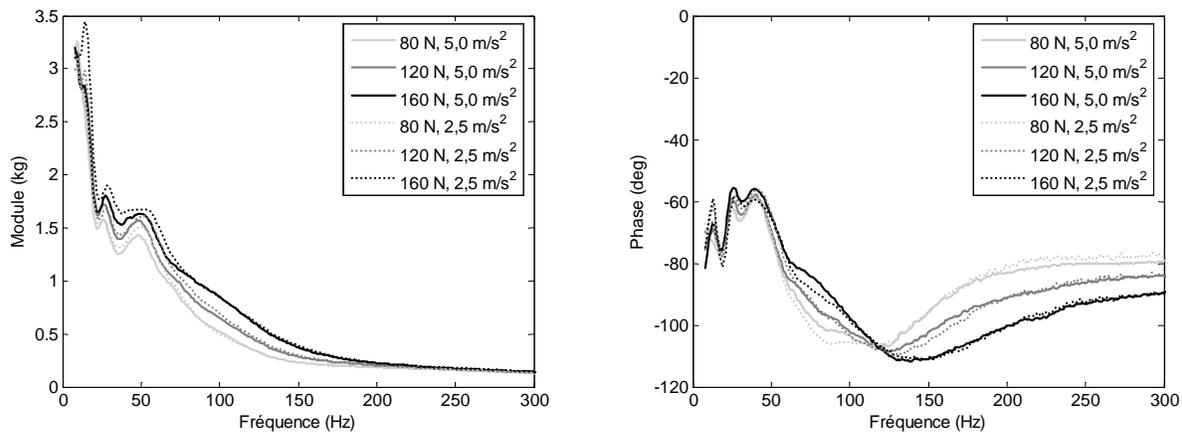


Figure 7. Module et phase de la masse apparente moyenne des 6 sujets pour différentes conditions

Pour obtenir les données nécessaires à la réalisation du mécanisme de substitution, la moyenne de l'ensemble des résultats expérimentaux est calculée. La figure 8 montre la moyenne du module et de la phase de la masse apparente. Cette courbe représente la réponse du système main-bras, pour la posture décrite précédemment et s'apparente à une force de poussée d'environ 120 N. Ce sont ces résultats moyens que le mécanisme de substitution tentera au mieux de reproduire. On observe également sur la figure 8 que les valeurs de la masse apparente calculées à partir des données d'impédance mécanique de la norme ISO 10068 [9] sont très différentes de

celles obtenues expérimentalement. Dans le cas des valeurs de masse apparente calculées à partir de la norme ISO 10068, seul l'avant-bras du sujet est dans l'axe vibratoire. Pour cette posture, la masse en mouvement est réduite par rapport à la posture du bras en extension.

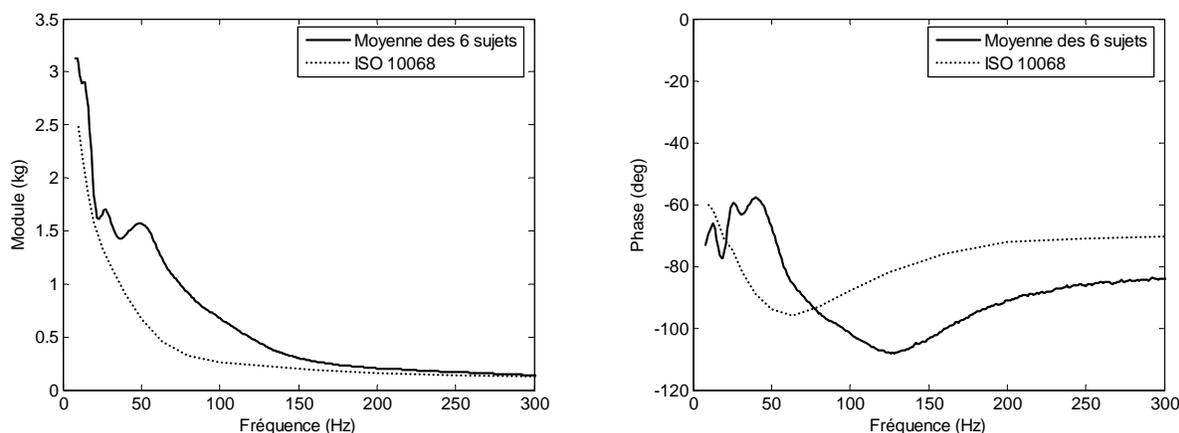


Figure 8. Masse apparente moyenne mesurée avec 6 sujets et comparaison avec celle obtenue à partir de la norme ISO 10068.

4.2 Masse apparente du mécanisme de substitution

Une fois réalisé, le mécanisme de substitution est vérifié en le fixant sur l'excitateur électrodynamique. Pour un niveau d'accélération efficace pondérée de $2,5 \text{ m/s}^2$ et de $5,0 \text{ m/s}^2$, des forces de poussée de 80 N, 120 N et 150 N sont appliquées sur le mécanisme de substitution. Comme le montre la figure 9, on observe une légère différence de la masse apparente mesurée pour les deux niveaux vibratoires générés. La masse apparente mesurée avec un niveau d'accélération efficace pondérée de $5,0 \text{ m/s}^2$ est similaire peu importe la force de poussée tandis que celle obtenue avec le niveau d'accélération efficace pondérée de $2,5 \text{ m/s}^2$ fluctue légèrement. Le frottement présent dans les amortisseurs et dans les roulements linéaires n'est sûrement pas étranger à ce comportement. Plus les déplacements sont petits, plus le frottement présent entre le déplacement relatif des éléments du mécanisme affecte la réponse dynamique du mécanisme. Contrairement à la réponse biodynamique du système main-bras qui varie en fonction de la force de poussée et de préhension [10], le mécanisme de substitution a une seule réponse dynamique qui est caractérisée par les composantes utilisées pour sa conception. Le pic présent à la fréquence de 210 Hz est attribuable à une résonance du ressort k_2 . Cependant, il a été vérifié que cette résonance n'affecte pas de façon significative le niveau d'accélération de la bande tiers d'octave de 200 Hz.

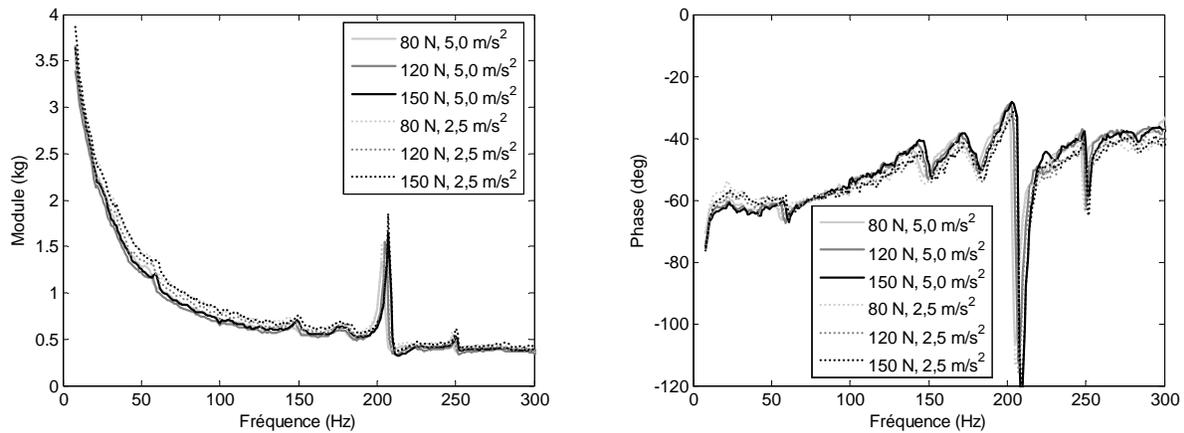


Figure 9. Module et phase de la masse apparente du mécanisme de substitution selon différentes conditions

À la réalisation du mécanisme de substitution, une masse non prévue s'ajoute à la base du modèle à 2 degrés de liberté. Comme le montre la figure 10, cette masse supplémentaire formée par la base du mécanisme et de l'assemblage des éléments reliés à la base fait en sorte que la réponse du mécanisme s'écarte du modèle à 2 degrés de liberté optimisé pour les fréquences supérieures à 100 Hz. On observe également que, pour une fréquence d'environ 40 Hz, le module et la phase de la masse apparente de la moyenne des 6 sujets et de celle du mécanisme sont à toutes fins identiques. Cette fréquence de 40 Hz correspond environ à la fréquence de percussion des deux marteaux burineurs utilisés.

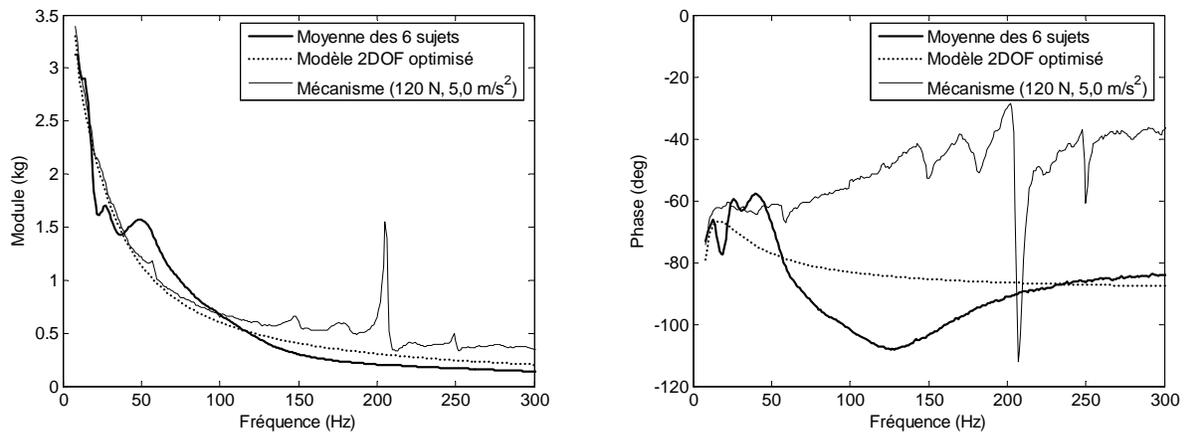


Figure 10. Validation du module et de la phase de la masse apparente du mécanisme de substitution

4.3 Comparaison des résultats obtenus avec le mécanisme de substitution et la méthode normalisée

Dans cette étape finale, le mécanisme de substitution est comparé à la méthode normalisée impliquant des sujets humains. Des comparaisons en termes de reproductibilité, de répétitivité et de similitude ou non des niveaux de vibrations sur la poignée des outils contribueront à juger du niveau d'efficacité du mécanisme de substitution.

4.3.1 Marteau burineur électrique

La figure 11 montre les spectres moyens en bandes de tiers d'octave de cinq essais obtenus avec le mécanisme de substitution (a) et ceux obtenus avec les sujets humains (b). Les niveaux d'accélération pondérée sont la moyenne de cinq essais consécutifs dont le coefficient de variation (CV) de l'accélération globale pondérée est inférieur à 15 %. Chaque essai est exécuté dans le dissipateur d'énergie pour une force de poussée de 150 N pour une même fréquence de percussion du marteau burineur. On observe à la bande de tiers d'octave de 40 Hz (fréquence de percussion) que la reproductibilité des trois séries du mécanisme de substitution est supérieure à celle obtenue avec les trois sujets humains. La variation importante du niveau de la bande de tiers d'octave de 40 Hz du sujet 3 caractérise bien le genre de difficultés qu'entraîne la participation de sujets dans ce type d'évaluation. Les niveaux d'accélération des bandes de tiers d'octave de 80 Hz à 160 Hz sont plus élevés pour les sujets que pour le mécanisme. La figure 12 représente les spectres tiers d'octave de l'émission vibratoire du marteau burineur électrique pour le mécanisme et les sujets. Ces spectres sont obtenus par la moyenne des trois séries d'essais du mécanisme et des trois sujets d'expérimentation et représentent la caractéristique vibratoire en charge de l'outil. À partir des spectres moyens, il est plus simple de constater la similitude des deux méthodes d'évaluation. Le tableau 2 présente, de façon détaillée, les résultats de l'accélération globale pondérée de l'ensemble des essais réalisés avec le marteau burineur électrique. On remarque que les coefficients de variation (CV) sont plus élevés avec les sujets qu'avec le mécanisme. Les coefficients de variation varient de 5,2 % à 8,5 % pour les sujets comparativement à 1,1 % à 2 % pour le mécanisme de substitution. La répétitivité et la reproductibilité des résultats sont nettement supérieures avec le mécanisme de substitution. Finalement, l'émission vibratoire obtenue avec le mécanisme de substitution sous-estime de 6,2 % celle obtenue par la méthode normalisée.

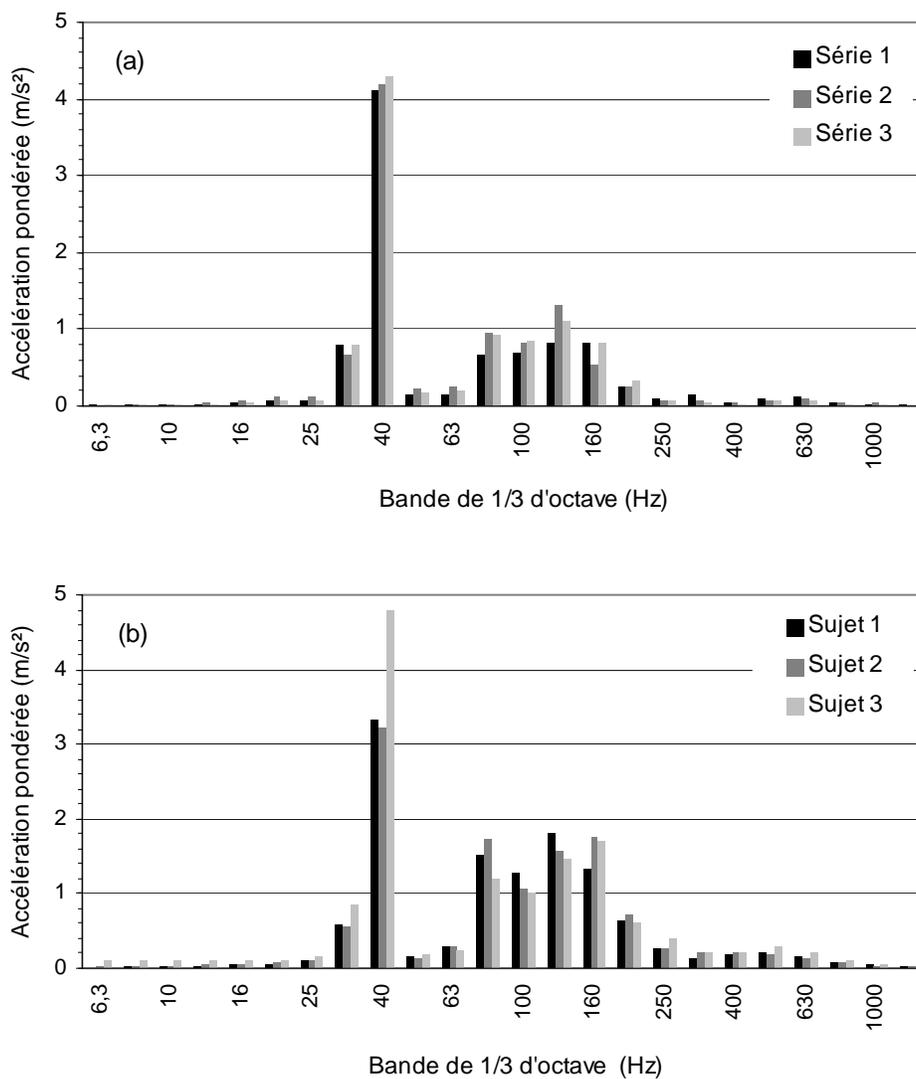


Figure 11. Spectre moyen de 5 essais obtenus avec le marteau burineur électrique pour le mécanisme de substitution (a) et les sujets humains (b)

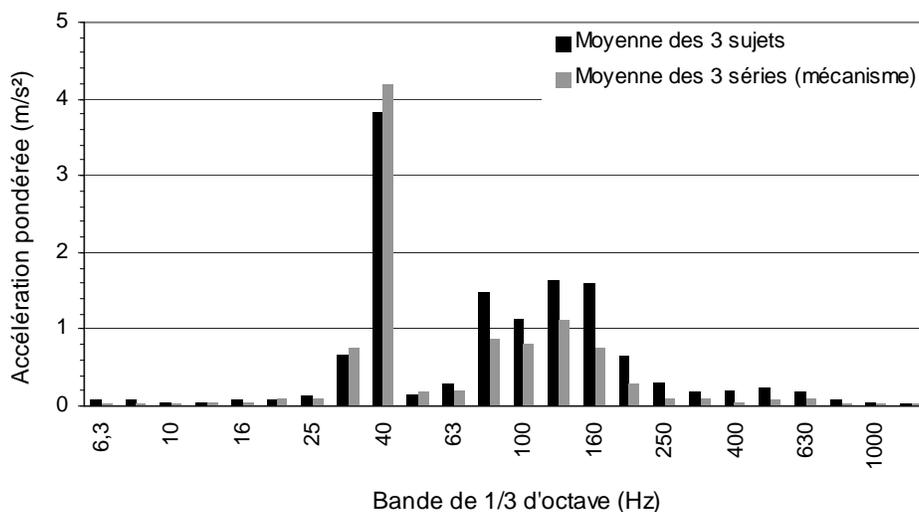


Figure 12. Spectre de l'émission vibratoire du marteau burineur électrique pour les sujets humains et le mécanisme de substitution

Tableau 2. Résultats comparatifs obtenus des sujets humains et du mécanisme de substitution pour le marteau burineur électrique

Essai	$a_{h,w}$ (m/s ²), direction Z_h						Écart (%)
	Sujet			Mécanisme			
	1	2	3	série 1	série 2	série 3	
1	5,12	4,63	5,80	4,43	4,51	4,75	
2	4,59	4,59	5,70	4,51	4,62	4,77	
3	4,16	4,75	5,95	4,34	4,78	4,76	
4	4,64	4,69	5,13	4,49	4,64	4,65	
5	4,21	4,15	5,38	4,34	4,64	4,68	
Moyenne	4,54	4,56	5,59	4,42	4,64	4,72	
CV (%)	8,5	5,2	6,0	1,8	2,0	1,1	
Émission vibratoire	4,90			4,60			-6,2

4.3.2 Marteau burineur pneumatique

On observe à la figure 13 les spectres tiers d'octave moyens de cinq essais obtenus par le mécanisme de substitution (a) et ceux obtenus avec les sujets humains (b). Les niveaux d'accélération pondérée sont la moyenne de cinq essais consécutifs dont le coefficient de variation (CV) de l'accélération globale pondérée est inférieur à 15 %. Chaque essai est exécuté dans le dissipateur d'énergie pour une force de poussée de 100 N. L'énergie vibratoire est principalement distribuée dans les deux bandes de tiers d'octave adjacentes de 40 Hz et 50 Hz parce que la fréquence de percussion moyenne du marteau burineur est d'environ de 44 Hz. La difficulté de maintenir l'alimentation pneumatique constante fait fluctuer cette fréquence de percussion moyenne, ce qui contribue à faire varier la répartition entre les deux bandes de tiers d'octave. La présence d'une amplitude élevée à la bande de tiers d'octave de 25 Hz du sujet 3 met en évidence de façon marquée l'effet secondaire que crée le dispositif antivibratile de cet outil. Ce phénomène ne se manifeste pas lorsque le mécanisme de substitution est fixé au marteau burineur. La figure 14 représente les spectres tiers d'octave de l'émission vibratoire du marteau burineur pneumatique pour le mécanisme et les sujets. Ces spectres sont obtenus par la moyenne des trois séries d'essais du mécanisme et des trois sujets d'expérimentation et représentent la caractéristique vibratoire en charge de l'outil. À l'exception de la bande de tiers d'octave de 25 Hz d'octave, les niveaux du spectre moyen provenant des sujets ne sont que très légèrement supérieurs à ceux obtenus par le mécanisme. Le tableau 3 présente de façon détaillée les résultats de l'accélération globale pondérée de l'ensemble des essais réalisés avec le marteau burineur pneumatique. On remarque que les coefficients de variation (CV) sont plus élevés avec les sujets qu'avec le mécanisme. Les coefficients de variation varient de 6,4 % à 14,5 % pour les sujets comparativement à 0,7 % à 1,8 % pour le mécanisme de substitution. Encore une fois, la répétitivité et la reproductibilité des résultats sont nettement supérieures avec le mécanisme de substitution. Finalement, l'émission vibratoire obtenue avec le mécanisme de substitution sous-estime de 10,6 % celle obtenue par la méthode normalisée.

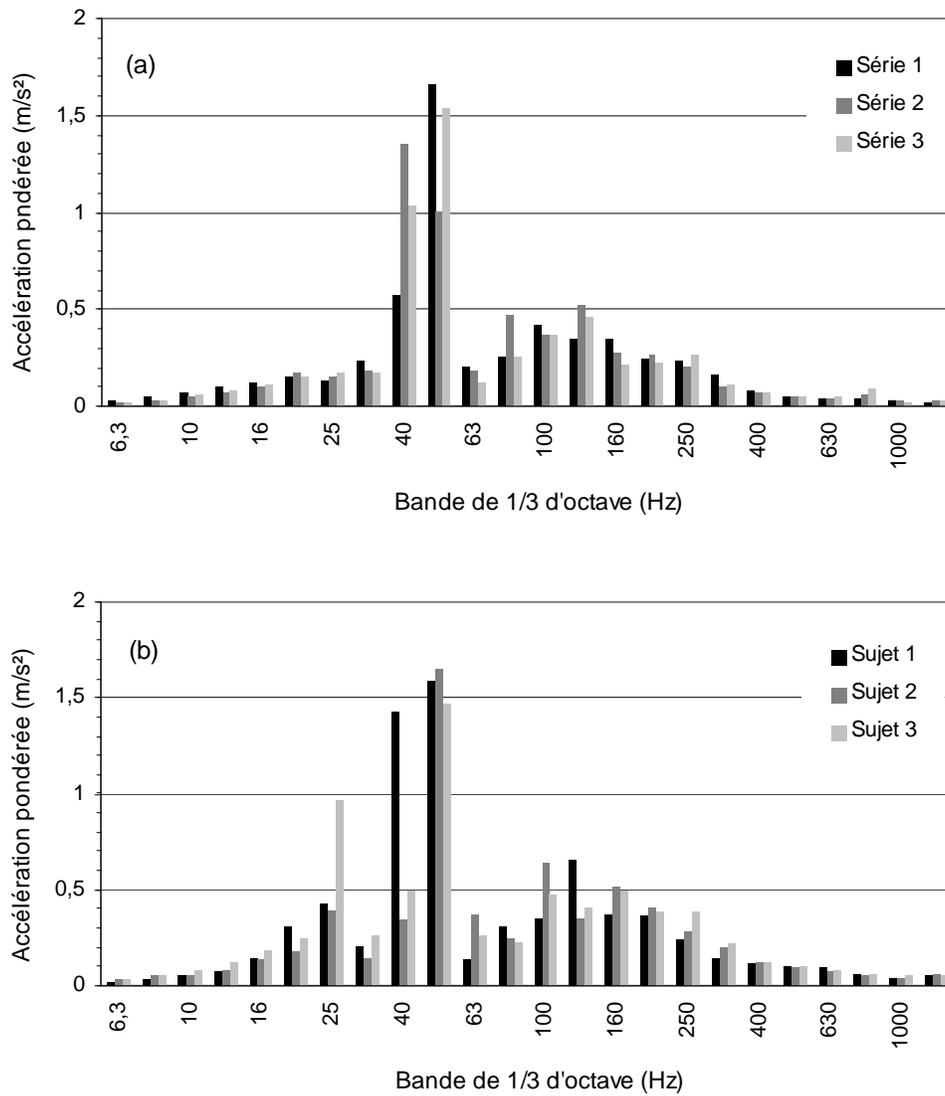


Figure 13. Spectre moyen de 5 essais obtenus avec le marteau burineur pneumatique pour le mécanisme de substitution (a) et les sujets humains (b)

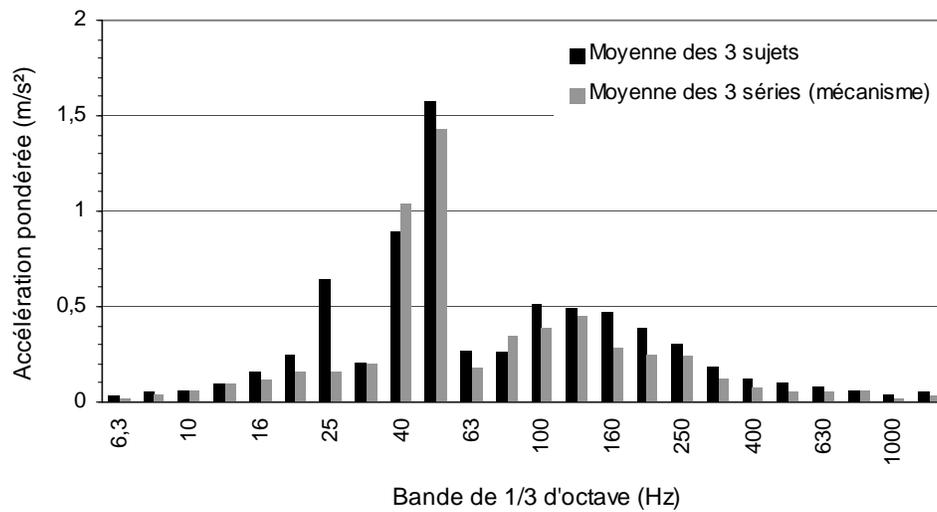


Figure 14. Spectre de l'émission vibratoire du marteau burineur pneumatique pour les sujets humains et le mécanisme de substitution

Tableau 3. Résultats comparatifs obtenus des sujets humains et du mécanisme de substitution pour le marteau burineur pneumatique

Essai	$a_{h,w}$ (m/s ²), direction Z_h						Écart (%)
	Sujet			Mécanisme			
	1	2	3	série 1	série 2	série 3	
1	2,67	1,99	1,80	1,95	1,95	1,97	
2	2,30	2,18	2,53	1,95	1,94	2,01	
3	2,61	2,08	2,20	1,98	1,93	2,07	
4	2,42	1,93	2,28	1,92	1,96	2,05	
5	2,10	2,26	1,84	1,98	1,96	2,03	
Moyenne	2,42	2,09	2,13	1,96	1,95	2,03	
CV (%)	9,6	6,4	14,5	1,3	0,7	1,8	
Émission vibratoire	2,21			1,98			-10,6

5. CONCLUSION

Cette étude a permis, à l'aide d'une démarche basée sur la mesure de la caractéristique biodynamique du système main-bras de sujets humains, d'obtenir pour une posture représentative de l'utilisation d'un marteau burineur, les données essentielles à l'optimisation d'un modèle mécanique à deux degrés de liberté capable de s'approcher au mieux de la réponse biodynamique réelle recherchée. À partir des résultats de l'optimisation, un mécanisme s'inspirant du modèle mécanique a été fabriqué et mis à l'essai. Les résultats comparatifs sur deux marteaux burineurs démontrent que le mécanisme de substitution sous-estime de seulement 6 à 11 % la valeur d'émission vibratoire obtenue par la méthode d'évaluation normalisée. Par contre, des gains importants ont été notés en termes de répétitivité et de reproductibilité des résultats. En effet, on a mesuré avec le mécanisme de substitution des coefficients de variation entre les séries d'essais de 4 à 8 fois inférieurs que ceux obtenus avec la méthode impliquant les sujets humains. Bien qu'il s'agisse de comparaisons basées sur l'usage d'une seule main et de résultats préliminaires, il n'en demeure pas moins que le mécanisme de substitution réduit considérablement la variabilité des résultats des essais et qu'il pourrait servir éventuellement de solution de remplacement efficace à la méthode d'essai normalisée actuelle.

6. BIBLIOGRAPHIE

- [1] Richard, Martin (2002) Estimation du nombre de travailleurs québécois exposés à des vibrations aux mains au-delà du seuil d'intervention, Lévis, Direction de la santé publique Chaudière-Appalaches, document interne, octobre 2002
- [2] Duguay, Patrice et Massicotte, Paul (2006) Lésions professionnelles reliées aux vibrations mains-bras au Québec, 1993 à 2002 : Partie I - portrait général à partir des données informatiques de la CSST. IRSST, Rapport R-446, 47 pages.
- [3] Hansson, J.E. et Kihlberg, S. (1983) A test rig for the measurement of vibration in hand-held power tools. *Applied Ergonomics*, 14 (1), 11-18.
- [4] Kinne, J., Schenk, T. et Knoll, P. (1998) Automatic test stand for the measurement of the vibration emission of hand held machines. Proceedings of the 8th International Conference on Hand-Arm Vibration, 9-12 juin 1998, Umeå, Suède.
- [5] International Organization for Standardization (2001) Mechanical vibration – Measurement and evaluation of human exposure to hand-transmitted vibration – Part 1: General requirements. International Standard, ISO 5349-1.
- [6] Boutin, J., Marcotte, P., Boileau, P.-É. et Jasinski, J. (2005) Design and validation of a mechanical system simulating hand-arm dynamic properties for use in a test set-up for evaluating the vibration emission values of chipping hammers. in 40th United Kingdom Conference on Human Response to Vibration, 13-15 septembre, Liverpool, England.
- [7] Houck, C., Joines, J. et Kay, M.. (1995) A genetic algorithm for function optimization: a Matlab implementation. North Carolina State University, Rapport NCSU-IE TR 95-09.
- [8] International Organization for Standardization (1992) Hand-held portable power tools – Measurement of vibrations at the handle – Part 2: Chipping hammers and riveting hammers. International Standard, ISO 8662-2.
- [9] International Organization for Standardization (1998) Mechanical vibration and shock – Free, mechanical impedance of the human hand-arm system at the driving point. International Standard, ISO 10068.
- [10] Marcotte, P., Aldien, Y, Boileau, P.-E., Rakheja, S. et Boutin, J. (2005) Effect of handle size and hand-handle contact force on the biodynamic response of the human hand-arm system under z_h -axis vibration. *Journal of Sound and Vibration*, 283, 1071-1091.