

INTERACTIONS ENTRE FORCES DE COUPLAGE ET VIBRATIONS ÉMISES PAR UNE MEULEUSE PNEUMATIQUE

- Vibration
- Meuleuse
- Machine portative
- Préhension

► *Pierre LEMERLE, Alexandre KLINGLER, Nicolas TROMPETTE*
INRS, département Ingénierie des équipements de travail

► *Alessandra CRISTALLI, Manfred GEUDER*
NOVEL GmbH, Allemagne

INTERACTIONS BETWEEN COUPLING FORCES AND VIBRATION EMITTED BY A PNEUMATIC GRINDER

Gripping and pushing forces, also called coupling forces, have induced effects on vibration transmission in the upper limb. Assessment of vibration exposure, when using power tools, therefore requires the monitoring of these physical quantities. To date, there has been no reliable and accurate measuring devices nor procedures.

The study described in this paper applies the method of measuring the pressure distribution at the hand/handle interface to determine coupling forces by digital integration. Validation tests were conducted in the laboratory to evaluate the reliability and accuracy of such an approach.

An original experimental procedure was then developed and implemented to allow simultaneous force and vibration measurement according to the requirements of current standards.

The proposed method was applied to the case of a hand-held grinder for the purpose of studying correlations between coupling forces and emitted vibration.

- Vibration
- Grinder
- Hand-held machine
- Gripping

Les forces de poussée et de préhension, aussi appelées forces de couplage, ont des effets induits sur la transmission des vibrations dans le membre supérieur. L'évaluation de l'exposition vibratoire lors de l'utilisation d'outils énergisés nécessite donc de contrôler ces grandeurs physiques. A ce jour, il n'existe pas de méthode fiable permettant de réaliser des mesures précises.

Dans l'étude, objet de cet article, la technique de mesure de la distribution de pression à l'interface main/poignée a été utilisée pour déterminer les forces de couplage par intégration numérique. Des essais de validation ont été réalisés en laboratoire pour évaluer la fiabilité et la précision d'une telle approche.

Puis, une méthode expérimentale originale a été développée et mise en œuvre pour permettre les mesures simultanées de force et de vibration, conformément aux exigences des normes de mesurage en vigueur.

La méthode proposée a été appliquée au cas d'une meuleuse portative dans le but d'étudier les corrélations entre les efforts de couplage et les vibrations émises.

L'évaluation des vibrations émises par les machines portatives énergisées (brise-béton, meuleuses, perforateurs, fouloirs...) et transmises au membre supérieur requiert la mesure des efforts exercés par l'opérateur. Ces efforts, dits « de couplage », se composent de la force de préhension et de la force de poussée, comme défini dans la norme ISO 15230 [1].

Des études scientifiques ont démontré l'influence de ces efforts sur les vibrations transmises et sur l'exposition des opérateurs. Par exemple, la circulation sanguine périphérique dépend significativement de la pression locale de contact au niveau des doigts et, plus globalement, de la force de préhension [2, 3]. Par ailleurs, d'autres études ont démontré l'effet amplificateur de la force de préhension sur la transmission

des vibrations dans le membre supérieur [4, 5, 6].

En revanche, à ce jour, l'effet des efforts de couplage sur les vibrations émises par la machine n'a pas été mis en évidence. Dans quelle mesure une prise en main plus ou moins ferme d'une machine portative modifie-t-elle les vibrations émises ?

Le problème est soulevé dans la norme ISO 5349-1 [7] portant sur les mesures et l'évaluation de l'exposition aux vibrations transmises dans le système main-bras. Il y est indiqué que les efforts de couplage peuvent modifier significativement les niveaux de vibrations mesurés. Toute la difficulté réside dans la mesure simultanée des forces et des vibrations, sans modifier les conditions d'utilisation de la machine.

Habituellement, l'évaluation des efforts se fait en utilisant des poignées spécialement conçues et instrumentées, par des méthodes d'évaluation subjective ou bien par la technique de l'électro-myographie (EMG) consistant à mesurer l'activité électrique de certains muscles impliqués dans la préhension. Les méthodes subjectives sont utilisées depuis de nombreuses années. Malheureusement, leur fiabilité et leur précision sont relativement faibles.

Une alternative consiste à adapter des matrices de capteurs de pression fins et souples à la poignée de la machine. La mesure de la distribution de pression à l'intérieur de la main a également fait l'objet de précédentes études consacrées à la conception de poignées et autres récipients [8 - 11]. L'objectif de ces études était de limiter les concentrations de pression [12, 13] et d'établir des critères de conception fondés sur des valeurs limites de pression locales.

À l'heure actuelle, deux types de technologies sont utilisés pour la fabrication des matrices de capteurs de pression fines et souples :

■ La technologie semi-conductive, permet d'obtenir des capteurs fins et de taille réduite à un coût relativement abordable. Ces capteurs sont très utilisés dans les domaines de l'ergonomie et de la biomécanique pour contrôler la distribution des pressions de contact. Plusieurs études sur le confort postural ou la conception des fauteuils roulants rapportent un manque de fiabilité, notamment pour ce qui concerne les erreurs liées aux phénomènes d'hystérésis et de fluage [14, 15].

■ La technologie capacitive, permet également de produire des capteurs de pression fins et souples. Ce type de capteurs a été utilisé par Gurram et al. [16] pour étudier la distribution de pression à l'intérieur de la main pendant des mouvements de préhension et dans des conditions dynamiques. Les auteurs ont conclu à des résultats très encourageants quant à leur fiabilité. Ko et Wang [17], Dantigny [18, 19] et Feutry [20] ont également démontré les bonnes performances de la technologie en matière de sensibilité à la température, de précision et de robustesse.

Le but de l'étude était de concevoir une procédure adaptée et fiable pour calculer les efforts de couplage à partir des distributions de pression réalisées

à l'interface entre la main de l'opérateur et la poignée de la machine. Le second objectif consistait à mettre en oeuvre une méthode permettant de mesurer simultanément, et de manière synchronisée, les vibrations sur la poignée de la machine et les forces de couplage.

Des études préliminaires ont démontré les propriétés physiques intrinsèques de la technologie capacitive, en prenant en compte un grand nombre de paramètres comme la courbure, l'effet du cisaillement, les effets de bord, les irrégularités géométriques des surfaces en contact, la bande passante dynamique, la température, etc. [21].

Par la suite, des essais systématiques ont été réalisés avec une poignée instrumentée et un groupe de sujets humains. L'objectif était de vérifier la robustesse et la sensibilité de la méthode d'intégration numérique de la distribution de pression pour le calcul des efforts de couplage. Les résultats ont été jugés assez satisfaisants pour appliquer la méthode à une machine portable du commerce et dans des conditions d'utilisation réalistes. Auparavant, la méthode normalisée de mesurage des vibrations a dû être adaptée pour permettre une mesure simultanée des forces et des accélérations.

Enfin, les résultats ont été étudiés pour analyser les éventuelles corrélations entre ces deux grandeurs physiques.

MÉTHODE

DÉFINITIONS DES EFFORTS DE COUPLAGE

Les efforts de couplage participant à la tenue des machines portatives peuvent être décomposés en deux types de forces : la force de poussée et la force de préhension.

Selon les définitions de la norme ISO 15230, la force de poussée est la force exercée par l'opérateur sur la machine et projetée dans le plan de section de la poignée.

La force de préhension représente la force interne agissant au sein de la poignée. De manière simplifiée, la préhension est la force de serrage exercée

par l'opérateur. Son amplitude dépend de la direction d'observation x_α comme le montrent les définitions illustrées en Figure 1.

VALIDATION DE LA MÉTHODE D'INTÉGRATION DES DISTRIBUTIONS DE PRESSION

La première étape de validation a consisté à vérifier que les imprécisions de mesures de pression, conjuguées aux incertitudes du procédé d'intégration numérique permettaient de déterminer les efforts de couplage de manière suffisamment fiable.

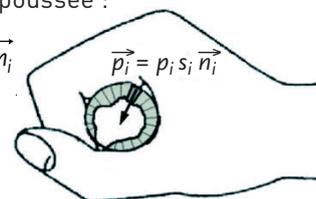
Pour ce faire, une poignée instrumentée a été réalisée. Son principe consiste à mesurer directement les efforts de poussée et de préhension à l'aide de capteurs de force et à comparer

FIGURE 1

Définitions des forces de couplage (selon la norme ISO 15230)
Coupling force definitions (ISO Standard 15230)

Force de poussée :

$$\vec{F}_p = \sum_i p_i s_i \vec{n}_i$$



avec :

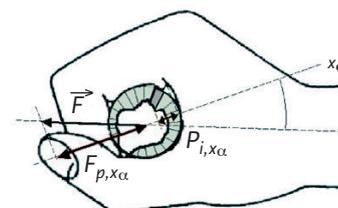
p_i : pression de contact sur l'élément de surface n° i .

s_i : surface de contact élémentaire.

\vec{n}_i : vecteur unitaire normal à la surface de contact.

Force de préhension selon la direction x_α :

$$F_{g\alpha} = \frac{1}{2} \left(\sum_i |p_{i,x_\alpha}| - F_{p,x_\alpha} \right)$$



avec :

F_{p,x_α} : projection de F_p selon la direction x_α (>0).

p_{i,x_α} : $p_i \cos(\alpha)$.

ces valeurs de référence aux résultats obtenus par intégration des pressions de contact. Plus précisément, la force de préhension est mesurée selon l'axe de symétrie de la poignée (axe Z).

Le support de la poignée est monté sur une cellule de force 6 composantes (SCHUNK Delta SI 660-60 ; F_{max} 1980 N) pour mesurer directement la force de poussée selon l'axe Z.

La poignée de référence est composée de deux demi-cylindres pleins reliés par deux guidages à douilles à billes pour réduire les forces de friction (cf. Figure 2). Deux capteurs de force unidirectionnels (Entran ELFS-T4M-500 N ; F_{max} 500 N) ont été insérés en parallèle aux guidages, dans le plan de symétrie, pour mesurer les forces d'interaction entre les deux demi-poignées. La force de préhension selon l'axe Z est alors obtenue en additionnant les efforts des deux capteurs, puis en soustrayant la composante de poussée mesurée par le capteur 6 composantes (cf. définition de la force de préhension Figure 1).

Une matrice de capteur de pression a été enroulée autour de la poignée de référence et les mesures directes des forces de poussée et de préhension ont été comparées aux résultats d'intégration numérique des distributions de pression selon les définitions normalisées présentées plus haut.

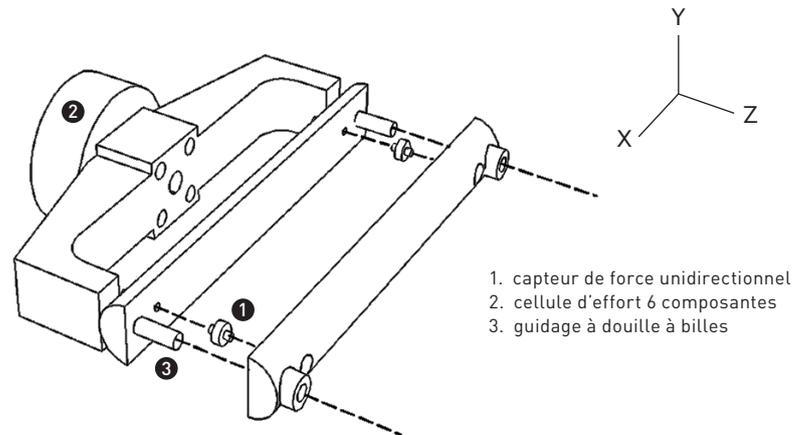
La longueur utile de la poignée est de 235 mm et son diamètre est de 40 mm.

La première étape a consisté à qualifier la poignée et à vérifier, en particulier, que la friction était suffisamment faible pour ne pas affecter les mesures de force de préhension. Des efforts de poussée ont été appliqués, manuellement, en différents points, le long de la demi-poignée extérieure. Dans tous les cas, la somme des efforts mesurés par les deux capteurs unidirectionnels était égale à la force transmise à la cellule de force, indépendamment du point d'application de la force de poussée, avec une erreur inférieure à 1 %. Plusieurs niveaux d'efforts ont été appliqués (50 N, 75 N, 100 N, 150 N), conduisant chacun à une très bonne corrélation entre les 2 mesures de force.

Par la suite, quatre sujets humains (3 hommes, 1 femme) ont été utilisés pour la conduite d'essais systématiques.

FIGURE 2

Schéma de principe de la poignée de référence Outline diagram of reference handle



1. capteur de force unidirectionnel
2. cellule d'effort 6 composantes
3. guidage à douille à billes

Une matrice de capteurs de pression a été enroulée sur la partie utile de la poignée et les résultats d'intégration des distributions de pression ont été comparés aux mesures directes des forces de couplage.

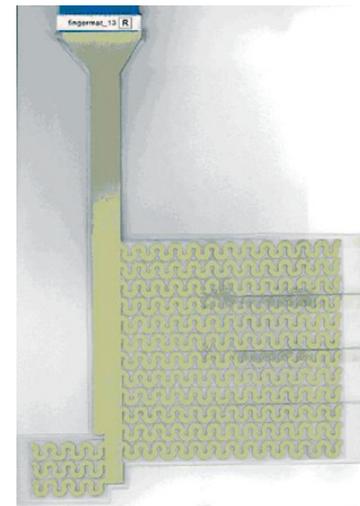
La matrice utilisée a une forme carrée et une taille de 12,5 cm sur 12,5 cm. Elle comprend une matrice additionnelle de taille inférieure (3,15 cm sur 4,2 cm) placée en opposition par rapport à la matrice principale et conçue pour accueillir le pouce (cf. Figure 3). La matrice complète, dont l'appellation commerciale est Fingermat¹, est composée de 156 capteurs élémentaires (surface d'un capteur : 1,05 cm sur 1,05 cm). Dans le cas de poignées non cylindriques, elle a été coupée dans le sens des doigts pour faciliter sa mise en place. La conception interne des connections électriques permet de réaliser ce type de modification sans aucun dommage pour la matrice.

Elle a été enduite d'un gel, utilisé pour l'échographie-doppler et dont l'une des propriétés mécaniques est de diminuer les frottements. Les définitions proposées dans la norme ISO 15230 (section 2.1) supposent des efforts tangentiels - ou forces de friction - nuls, tout au plus négligeables. Il était donc nécessaire de s'assurer du respect de ces hypothèses simplificatrices. Des essais ont également été conduits sans utilisation de gel pour évaluer l'effet des forces de friction *a posteriori*.

La consigne donnée aux sujets était, tout d'abord, d'exercer un effort de poussée pure, pendant quelques secondes,

FIGURE 3

Matrice de capteur de pression Fingermat Fingermat pressure sensor matrix



dans des conditions quasi-statiques. L'effort, appliqué sur la demi-poignée extérieure uniquement, garantissait ainsi une force de préhension nulle.

Puis, les sujets ont dû exercer un effort de préhension pure pendant quelques secondes. Enfin, des sollicitations combinées ont été réalisées.

Pour chaque essai, plusieurs niveaux d'effort ont été exercés.

¹ Modèle développé par l'université polytechnique des Marches (Ancone) et la société Novel GmbH dans le cadre du projet européen VIB-TOOL.

La *Figure 4* illustre un exemple de comparaison entre les mesures directes de forces de couplage et les résultats d'intégration des distributions de pression, exprimées en fonction du temps. Dans l'intervalle [0,10 s], un effort de poussée pure a été appliqué. Dans l'intervalle [10 s, 17 s], le sujet a serré la poignée sans exercer aucun effort de poussée. Dans l'intervalle [18 s, 25 s], des efforts de poussée et préhension ont été exercés simultanément.

Sept essais ont été réalisés, chacun durant environ 30 secondes. Tous les résultats sont présentés sur la *Figure 5*. Les forces de poussée et de préhension, calculées à partir des pressions selon les formules de la section 2.1, sont exprimées en fonction des valeurs correspondantes mesurées directement avec la poignée de référence.

On remarque une bonne corrélation sur l'ensemble des séries d'essais et pour les deux types de forces de cou-

plage. On observe, par exemple, moins de 20 % d'erreurs de distorsion linéaire (cf. *Tableau 1*). Ces erreurs proviennent à la fois des incertitudes de mesure des pressions et de la discrétisation spatiale résultant de la taille des capteurs élémentaires (1 capteur couvre 30°).

La campagne d'essais a montré que la matrice est sensible à la flexion : le simple fait de la tordre, par exemple pour la mettre en position autour de la poignée, produit des contraintes mécaniques internes interprétées par le système de mesure comme un chargement initial. Le logiciel de traitement des données, livré avec la matrice, propose une méthode de compensation de ce décalage d'origine. Cependant, du fait de la non-linéarité des capteurs, cette méthode de correction conduit à des erreurs résiduelles évaluées entre 30 % et 80 %. La méthode numérique consistant à sauvegarder en mémoire la distribution initiale de pression puis à la soustraire à chaque distribution de pression mesu-

rée ultérieurement, a été préférée. Elle a conduit à de meilleures corrélations comme l'illustre la *Figure 5*.

Les essais ont également démontré l'effet des efforts tangentiels (friction). Les mêmes essais réalisés sans l'usage de gel ultrasonique, ont conduit à des corrélations moins bonnes. Les différences ont été significatives, particulièrement pour les niveaux faibles d'efforts de préhension et de poussée. Dans certains cas, des écarts de l'ordre de 75 % ont été constatés.

ADAPTATION DE LA MÉTHODE DE MESURE DES VIBRATIONS À UN MODÈLE DE MEULEUSE DU COMMERCE

En conclusion des essais de validation réalisés avec la poignée de référence, la méthode de détermination des efforts de couplage par intégration des pressions a été jugée suffisamment fiable pour une utilisation sur

FIGURE 4

Comparaison entre mesures directes de forces de couplage et intégrations des distributions de pression
Comparison between direct coupling force measurement and pressure distribution integration

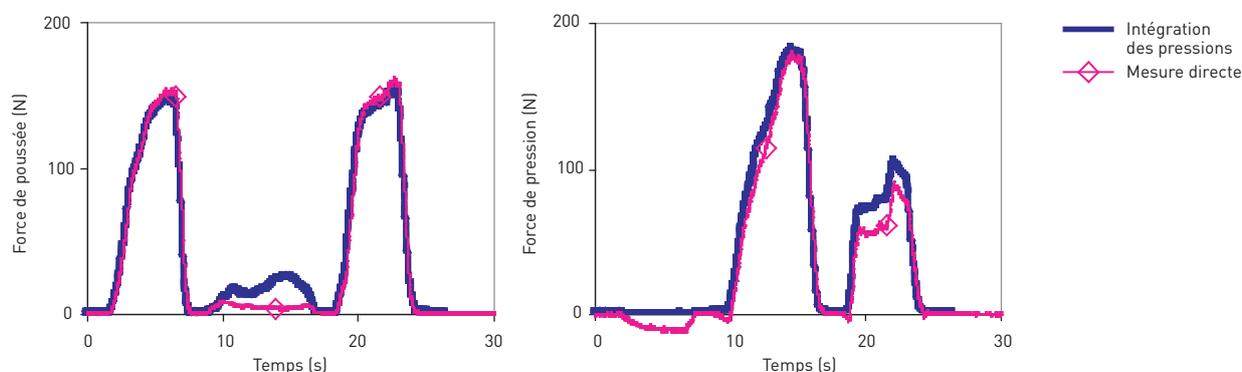


FIGURE 5

Intégration des distributions de pressions en fonction des mesures directes de forces de couplage
Pressure distribution integration based on direct coupling force measurement

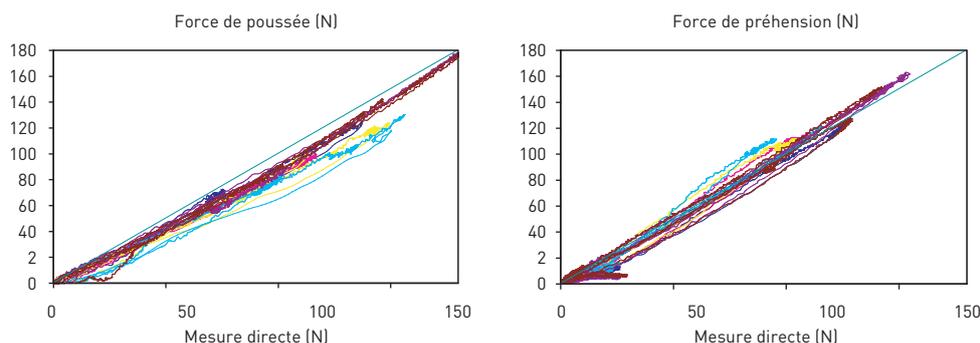


TABLEAU I

Coefficients de régression linéaire ; intégration des pressions/mesures directes
Coefficients of linear regression analysis; pressure integration vs direct measurements

POUSSEE		PREHENSION	
$y = 0,9964x - 3,4026$	$R^2 = 0,9859$	$y = 0,9244x - 2,5444$	$R^2 = 0,9961$
$y = 1,055x - 2,4486$	$R^2 = 0,9914$	$y = 0,8386x - 1,5966$	$R^2 = 0,9961$
$y = 1,0405x - 0,3779$	$R^2 = 0,9947$	$y = 0,836x - 2,3829$	$R^2 = 0,996$
$y = 1,0976x - 3,5783$	$R^2 = 0,9768$	$y = 0,8069x - 2,9493$	$R^2 = 0,9944$
$y = 1,068x - 5,4377$	$R^2 = 0,989$	$y = 0,9585x - 4,8835$	$R^2 = 0,9913$
$y = 1,0432x - 4,4853$	$R^2 = 0,9834$	$y = 0,9751x - 5,9895$	$R^2 = 0,9936$

une machine du commerce, dans des conditions d'essais représentatives des conditions réelles. Un modèle de meuleuse du commerce (meuleuse verticale pneumatique à palettes), non équipé d'équilibreur dynamique, a été choisi comme cas d'étude pour la mise en oeuvre de la méthode de mesure des forces de couplage.

L'objectif était alors de mesurer simultanément, et de manière synchronisée, les forces et les vibrations émises puis d'en étudier les corrélations éventuelles.

La meuleuse a dû être équipée et adaptée pour permettre cette mesure simultanée.

La norme ISO 5349-1 définit et spécifie la position et l'orientation des accéléromètres lors de la mesure des vibrations transmises au système main-bras : les mesures doivent être réalisées sur la surface vibrante aussi proche que possible du centre de la zone d'emplacement des mains.

Il est techniquement impossible d'insérer des accéléromètres à l'emplacement des mains sans affecter la mesure des distributions de pressions. Une alternative aurait consisté à revoir la conception de la matrice et à réserver une zone libre en son centre, mais cette solution n'aurait pas permis de mesurer la totalité des efforts de contact entre la main et la poignée. De plus, l'insertion d'un accéléromètre sur la poignée et sous la surface de la main modifie de manière notable les conditions d'utilisation de la machine.

Pour respecter les exigences de la norme ISO 5349-1, sans pour autant modifier les conditions d'utilisation de la meuleuse et, de plus, permettre une

mesure simultanée des forces et accélérations, deux accéléromètres ont été disposés de part et d'autre de la matrice. L'accélération au centre de la matrice a alors été déduite des accélérations mesurées par les deux capteurs en utilisant les relations géométriques :

$$\begin{cases} x_c = \frac{x_1 + x_2}{2} \\ y_c = \frac{y_1 + y_2}{2} \\ z_c = \frac{z_1 + z_2}{2} \end{cases}$$

Où (x_1, y_1, z_1) sont les coordonnées spatiales de l'accéléromètre n°1 ; (x_2, y_2, z_2) celles de l'accéléromètre n°2 et (x_c, y_c, z_c) les coordonnées spatiales du centre de la poignée.

Ces équations ne supposent que l'hypothèse de rigidité de la poignée, c'est-à-dire une déformation négligeable dans l'intervalle de fréquence $[0,1000 \text{ Hz}]$. En dérivant ces relations deux fois, on obtient les relations liant l'accélération au centre de la poignée aux accélérations mesurées par les 2 capteurs :

$$\begin{cases} \gamma_{xc} = \frac{\gamma_{x1} + \gamma_{x2}}{2} \\ \gamma_{yc} = \frac{\gamma_{y1} + \gamma_{y2}}{2} \\ \gamma_{zc} = \frac{\gamma_{z1} + \gamma_{z2}}{2} \end{cases}$$

Cette méthode de mesure nécessite, dans un premier temps, de vérifier l'hypothèse de rigidité des poignées.

Des poignées cylindriques et consituées d'aluminium ont été substituées aux poignées d'origine pour faciliter le

recouvrement par la matrice. La gâchette d'admission d'air comprimé a été également remplacée par une vanne déportée sur le tuyau d'alimentation.

Un calcul éléments finis de la poignée seule dans des conditions de type encastrée/libre a permis d'estimer sa première fréquence propre aux alentours de 1280 Hz.

Analyse modale de la meuleuse

Une analyse modale, réalisée à l'aide d'un marteau de choc, a permis de vérifier que l'hypothèse d'indéformabilité de la poignée est respectée dans l'intervalle de fréquence $[0,1000 \text{ Hz}]$. Cinq accéléromètres ont été régulièrement espacés le long de la poignée principale de la machine, comme le montre la *Figure 6*.

La *Figure 7* illustre les fonctions de transfert mesurées aux cinq points d'observation dans les deux directions X et Y. Les chocs ont été effectués à l'extrémité de la poignée et dans la direction bissectrice des axes X et Y (cf. *Figure 6*). On peut remarquer que les hypothèses d'indéformabilité de la poignée sont extrêmement bien respectées dans l'intervalle de fréquence car la somme des fonctions de transfert aux points n°1 et n°5 est identique à la fonction de transfert mesurée au point n°3 (cf. *Figure 7*).

On distingue clairement, sur les fonctions de transfert, la présence de modes de résonance. En revanche, aucun de ces modes ne correspond à une déformation locale de la poignée. Les différences observées entre les cinq fonctions de transfert ne résultent que des rotations de la poignée : les distances entre les cinq points d'observation et le centre instantané de rotation interviennent comme des bras de levier et amplifient plus ou moins les accélérations émises.

Réponses forcées

La méthode de mesure des vibrations a ensuite été validée dans des conditions d'utilisation réalistes. Trois accéléromètres ont été utilisés (n°1, n°3 et n°5 pour reprendre la nomenclature de la *Figure 6*).

La consigne donnée à l'opérateur était de meuler une pièce métallique de manière usuelle, sans aucune prescription quant aux efforts à exercer.

FIGURE 6

Poignée de la meuleuse équipée de 5 accéléromètres
Grinder handle fitted with 5 accelerometers

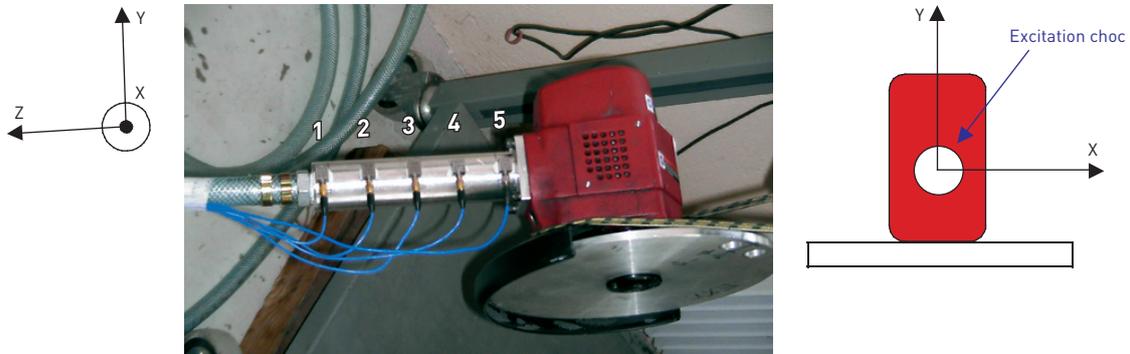


FIGURE 7

Fonctions de transfert mesurées sur la poignée ; 1) direction X ; 2) direction Y.
+ : somme des fonctions de transfert aux points 1 et 5, selon les hypothèses de corps rigides
Transfer functions measured on handle: 1) X direction; 2) Y direction.
+: combined transfer functions at points 1 and 5, based on solid body assumptions

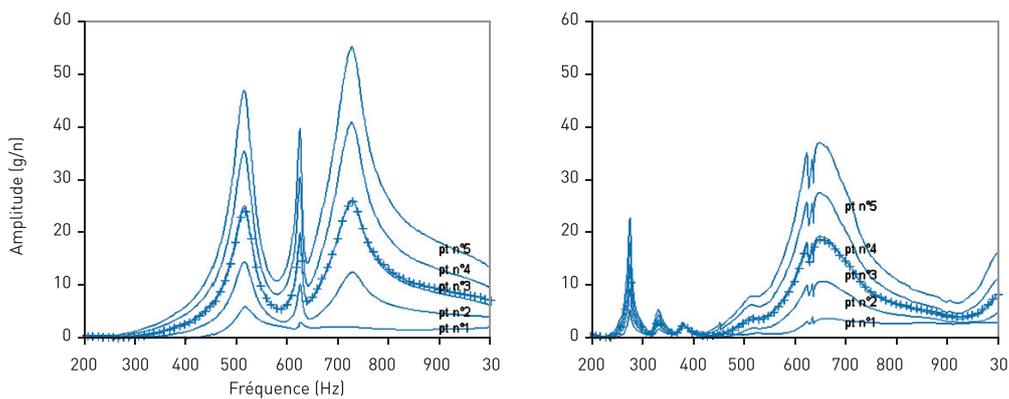
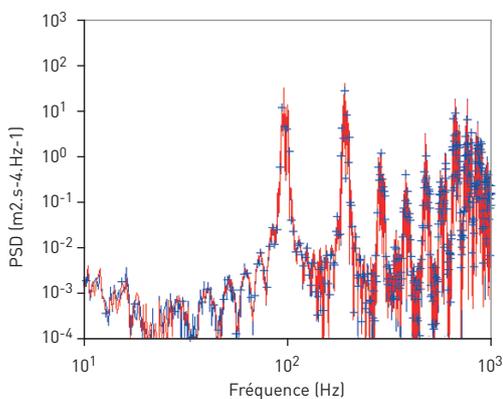


FIGURE 8

Réponses en fréquence mesurées sur la poignée (axe Y). - : Réponse au point n°3, RMS=96.81 m/s² ; + : Somme des réponses aux points n°1 et n°5 selon les relations de corps rigides, RMS=99.6 m/s²
Frequency responses measured on handle (Y-axis): response at point n°3, RMS=96.81 m/s² ;
+: Combined responses at points n°1 and n°5, based on solid body assumptions, RMS=99.6 m/s²



L'accélération mesurée au point n°3 a été comparée à l'accélération déduite des mesures effectuées aux points n°1 et n°5 grâce aux relations de corps rigides. Comme le montre la Figure 8, les deux mesures conduisent à des résultats très semblables et permettent de conclure à la fiabilité de la méthode en tant que méthode de substitution à la norme ISO 5349-1.

Les réponses vibratoires exprimées dans le domaine temporel (non illustré dans cet article) ont également montré de très bonnes corrélations.

MESURES SIMULTANÉES ET SYNCHRONISÉES DES EFFORTS DE COUPLAGE ET VIBRATIONS

La méthode de mesure des vibrations développée et validée a alors été mise en oeuvre conjointement à la

mesure des efforts de couplage, afin d'étudier les possibles corrélations entre ces deux grandeurs.

La meuleuse présentée en *Figure 6* a été équipée de deux accéléromètres (accéléromètres triaxiaux PCB Piezotronics® modèle 356B20, positionnés aux points n° 1 et n° 5 sur la face supérieure de la poignée) et de la matrice de capteurs de pression Fingermat. Seule la poignée principale (poignée droite) a été instrumentée (cf. *Figure 9*).

La chaîne de mesure de pressions a été utilisée en tant que voie maître pour

déclencher l'acquisition des accélérations avec une fréquence d'échantillonnage de 4096 Hz. Des essais d'une durée de 8 secondes ont été réalisés.

Le même opérateur a effectué 2 types de tâches comme le surfaçage d'une pièce métallique plate et le tronçonnage d'une pièce de fonderie. Chaque opération a été répétée au moins 3 fois, avec des niveaux de poussée et de préhension différents.

Deux modèles de disque abrasif ont été utilisés.

RÉSULTATS

Tous les résultats d'essais sont présentés *Figure 10*.

Chaque essai a été découpé en intervalles de temps de poussée quasi-constante. Les valeurs moyennes de la force de poussée et de préhension Max (comme exprimé précédemment, la force de préhension dépend de la direction d'observation autour de l'axe Z ; « Maximum » fait ici référence à l'angle d'observation) sont déterminées sur ces intervalles de temps.

FIGURE 9

Opérations types. 1) Surfaçage ; 2) Tronçonnage
Typical operations: 1) Finishing; 2) Cutting



FIGURE 10

Forces de couplage et émissions vibratoires mesurées avec deux modèles de disques
Coupling forces and emitted vibration measured with 2 disk models

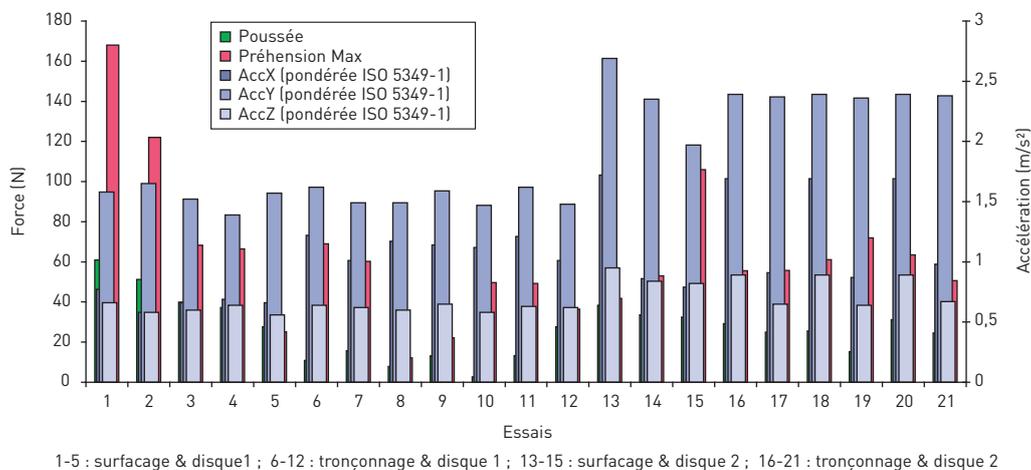


FIGURE 11

Mesures des niveaux d'émission vibratoire en 3 points d'observation sur la poignée principale
Vibration emission levels measured at 3 observation points on main handle

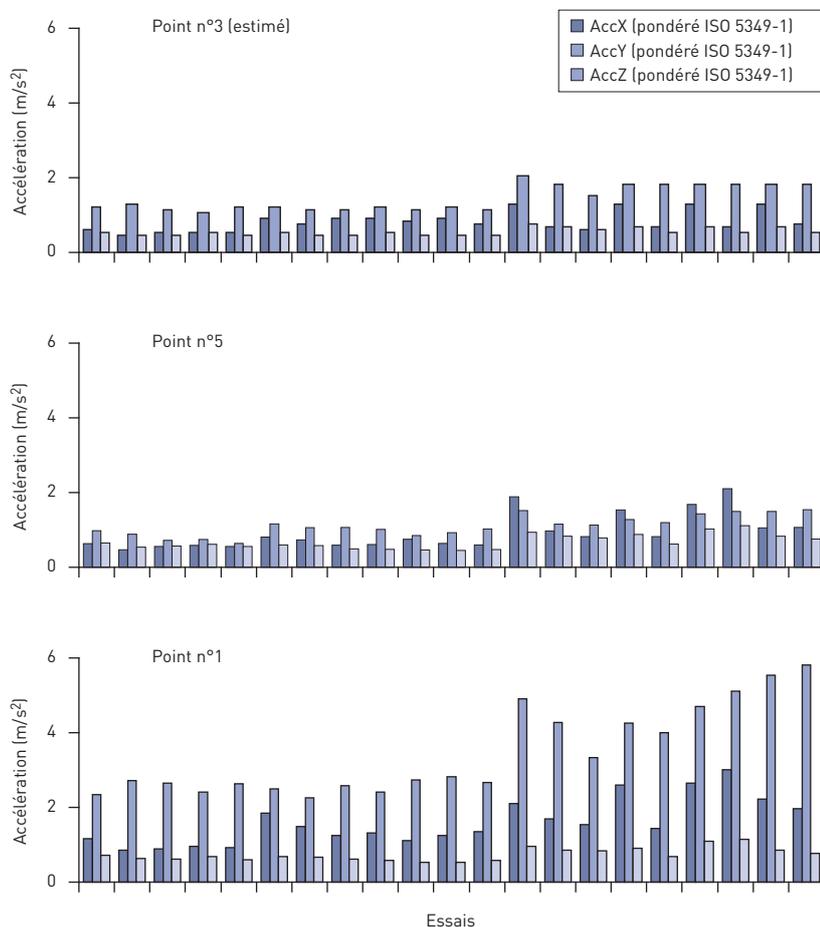
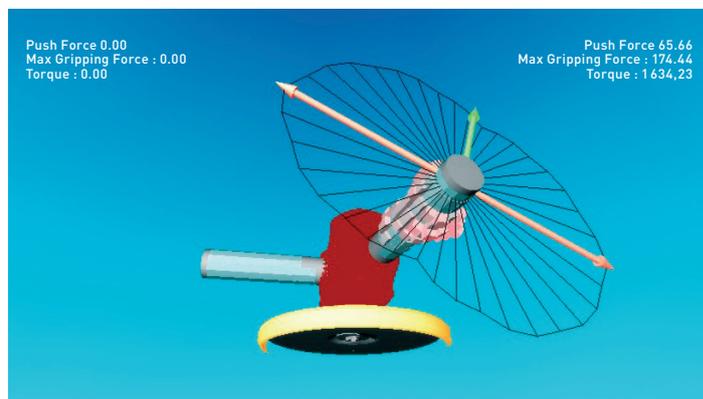


FIGURE 12

Représentation des forces de poussée (vert) et de préhension (rouge) moyennes pour une opération de surfacage (essai n°1)
Representation of average pushing (green) and gripping (red) forces for a finishing operation (test n°1)



La *Figure 10* présente également les valeurs efficaces des accélérations pondérées² dans les 3 directions au centre de la poignée.

Pour la même série d'essais, les valeurs des accélérations pondérées aux extrémités de la poignée sont présentées *Figure 11* et comparées aux valeurs estimées au milieu de la poignée (point n° 3) selon les relations de corps rigides.

On remarque que l'accélération peut varier d'un rapport de 1 à 4, selon la position du point d'observation sur la poignée.

La *Figure 12* illustre la distribution de pressions sur la surface de la poignée et donne l'orientation des forces de poussée et de préhension moyenne pour un essai de surfacage. On constate que la poussée est exercée vers le haut, ce qui est cohérent car l'opérateur, même s'il exerce un effort de poussée dirigée vers la surface de contact, doit maintenir le poids de la machine. Le diagramme polaire donne une idée de l'évolution de la force de préhension en fonction de la direction d'observation. On observe que la direction de préhension maximale est perpendiculaire à la direction de poussée, résultat non prévisible.

DISCUSSION

Les résultats (cf. *Figure 10*) montrent clairement que l'émission vibratoire n'est pas affectée par l'intensité des efforts de couplage.

Par exemple, la force de poussée est augmentée d'un rapport de 2 et la force de préhension d'un rapport de 6,7 entre l'essai n° 5 et l'essai n° 1. Cependant, pour ces mêmes essais, l'accélération reste pratiquement inchangée dans les 3 axes. Les mêmes conclusions sont valables pour les essais de tronçonnage.

L'accélération verticale (axe Y) est quasiment constante et indépendante du type de tâche réalisée ou de la force exercée. En revanche, elle dépend du

² Selon les réseaux de pondérations de la norme ISO 5349-1 [7].

modèle de disque utilisé. Le disque n° 2 étant moins bien équilibré que le disque n° 1 et la meuleuse n'étant pas équipée d'un équilibreur dynamique, les vibrations verticales sont augmentées de manière significative dans la seconde série d'essais (environ 55 %).

Les mêmes observations sont valables pour l'axe X.

Dans la direction horizontale (axe X) le niveau de vibration semble dépendre du type de tâche exécutée.

De manière générale, les niveaux vibratoires sont relativement faibles pour ce type de machine. Par exemple, le fabricant déclare, dans les spécifications techniques de la meuleuse, des valeurs d'émission vibratoire de 3,1 et 4,6 m/s².

Dans tous les cas, c'est l'axe Y qui est prépondérant.

CONCLUSION

Cette étude propose une méthode nouvelle pour mesurer simultanément et précisément les efforts de couplage homme/machine et les vibrations émises sur la poignée.

La fiabilité et la précision de la méthode ont été vérifiées de manière systématique. La technologie capacitive a été utilisée pour mesurer les distributions de pression à l'interface entre la main et la poignée de la machine. Dans une seconde étape, les valeurs de pression sont traitées numériquement pour calculer les forces de poussée et de préhension.

La procédure est suffisamment souple pour être utilisée dans des conditions d'essai proches du terrain.

Une campagne d'essais a été réalisée avec une meuleuse pneumatique du commerce. Les résultats ont montré l'absence de corrélation entre les forces de couplage et les accélérations émises par la machine.

De telles conclusions ne sont cependant pas transposables à d'autres catégories de machines, telles que le brise-béton par exemple.

D'autre part, dans la pratique et pour rester dans le cadre des meuleuses pneumatiques, il n'est pas rare de constater que certains opérateurs exercent des efforts pouvant dépasser largement les niveaux mesurés dans le cadre de cette étude. Même si ces modes opératoires se distinguent d'un usage normal de la machine, des efforts intenses peuvent peut-être influencer sur les vibrations émises, un cas extrême étant l'arrêt complet de la rotation du disque.

De plus, l'émission vibratoire des machines n'est pas directement comparable aux vibrations transmises dans le membre supérieur, même si elle en est à l'origine. L'impédance du membre supérieur joue un rôle important dans la propagation des ondes vibratoires.

À l'avenir, cette méthode sera mise en oeuvre pour analyser les interactions forces/accélérations sur d'autres types de machines. Ces informations, jusqu'à présent inaccessibles, permettront de faire évoluer les critères ergonomiques dès le stade de la conception.

Remerciements :

La première partie de cette étude (développement d'une méthode de mesure des forces de couplage) a été co-financée par la commission européenne dans le cadre d'un projet de recherche européen - contrat VIB-TOOL (n°. G6RD-CT-2002-00843), coordonné par l'université polytechnique des Marches à Ancone en coopération avec le conseil national de la recherche en Italie-CNR, la société Novel GmbH, l'université de Southampton, l'institut Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz-Bonn et le fabricant de machines portatives Breakers A/S, DK.

Reçu le : 10/09/2007

Accepté le : 12/09/2007

BIBLIOGRAPHIE

- [1] ISO standard 15230:2007 – Definition and guidelines for the measurement of the coupling forces for operators exposed to hand-arm-vibration. 2000-03-10.
- [2] E. HARTUNG, H. DUPUIS, M. SCHEFFER – Effects of grip and push forces on the acute response of the hand-arm system under vibrating conditions. *International Archive of Occupational and Environmental Health*; 64:463-7, 1993.
- [3] M. BOVENZI, A. J. L. WELSH, A. DELLA VEDOVA and M. J. GRIFFIN – Acute effects of force and vibration on finger blood flow. *Occupational and Environmental Medicine*; 63:84-91, 2006.
- [4] S. RIEDEL – Consideration of Grip and Push forces for the Assessment of Vibration Exposure. *Central European Journal of Public Health, Prague, Vol. 3 (JHEMI vol. 39) 1995, 139-141, 1995.*
- [5] I. PYYKKO, M. FARKKILA, J. TOIVANEN, O. KORHONEN, and J. HYVARINEN – Transmission of vibration in the hand-arm system with special reference to changes in compression force and acceleration. *Scandinavian Journal of Work, Environment and Health*, 2, 87-95, 1976.
- [6] P. MARCOTTE, Y. ALDIEN, P. É. BOILEAU, S. RAKHEJA and J. BOUTIN – Effect of handle size and hand-handle contact force on the biodynamic response of the hand-arm system under zh-axis vibration. *Journal of Sound and Vibration, Volume 283, Issues 3-5, 20 May 2005, Pages 1071-1091.*
- [7] ISO standard 5349-1 – Mechanical vibration – Measurement and evaluation of human exposure to hand-transmitted vibration – Part 1: General requirements, 2001.
- [8] G. FELLOWS, A. FREIVALDS – The use of force sensing resistors in ergonomic tool design. In *Proceedings of Human Factors Society, 33rd annual meeting*, pp. 713-717, 1989.
- [9] R. BISHU, W. WANG, and AA. CHIN – Force distribution at the container hand/handle interface using force-sensing resistors. *International Journal of Industrial Ergonomics* 11, 225-231, 1993.
- [10] M. H. YUN, K. KOTAMI, and ELLIS – Using force sensitive resistors to evaluate hand tool grip design. *Din Proceedings of the Human Factors Society, 36th annual meeting*, pp. 806-810, 1992.
- [11] G. BJÖRING, L. JOHANSSON, and G. HÄGG – The pressure distribution in the hand when holding powered drills. The effects of vibrations, push forces, two hand grip and direction – a pilot study. *Advances in Occupational Ergonomics and Safety*, S. Kumar Ed., IOS Press, pp. 436-438, 1998.
- [12] C. FRANSSON-HALL, A. KILBOM – Sensitivity of the hand to surface pressure. *Applied Ergonomics*, 24: 181-189, 1993.
- [13] L. JOHANSSON, A. KJELLBERG, A. KILBOM, and G. HÄGG – Perception of surface pressure applied to the hand. *Ergonomics* 42 (10), 1274-1282, 1999.
- [14] M. FERGUSON-PELL, and M.D. CARDI – Prototype development and comparative evaluation of wheelchair pressure mapping system. *Assist Technol*, 5:78-91, 1993.
- [15] R. GURRAM, G.J. GOUW and S. RAKHEJA – Grip Pressure Distribution under Static and Dynamic Loading, *Trans. of Society of Experimental Mechanics*, 33(3): 1993, pp 169-174.
- [16] R. GURAM, S. RAKHEJA, and G.J. GOUW – A study of hand grip pressure distribution and EMG of finger flexor muscles under dynamic loads. *Ergonomics* 38 (4), 684-699, 1995.
- [17] Q. WANG, and W.H. KO – Modeling of Touch Mode Capacitive Sensors and Diaphragms. *Sensors and Actuators A*, 75 230-241, 1999.
- [18] F. DANTIGNY – Caractérisation de capteurs de pression pour la mesure de forces de poussée et de préhension exercées sur une poignée d'outil, 1998. Document de travail INRS MAV-DT-375/FD.
- [19] F. DANTIGNY – Mesures des forces de poussée et de préhension exercées sur une poignée d'outil – Document de travail INRS MAV-DT-375/FD, 1998.
- [20] D. FEUTRY – Mesure de la distribution de pression à l'interface main-poignée d'outils à main et évaluation des forces de couplage. Document de travail INRS IET-NP/02DT-002/Dfy, 2002.
- [21] VIB-TOOL – European Project N° G6RD-CT-2002-843. Progress report, year 2, reporting period from 1/12/2003 to 30/11/2004, 72 p.