



Dossier

VIBRATIONS MAINS – BRAS : DE NOUVELLES CONNAISSANCES POUR LA PRÉVENTION

❶ Vibrations mains – bras : où en est-on ?
P. 22

❷ Émission vibratoire de meuleuses :
expériences et modèle
P. 26

❸ Évaluation des valeurs d'émission vibratoire
des cloeuses : un dispositif de substitution
peut-il remplacer les opérateurs humains ?
P. 29

❹ Vibrations transmises aux membres
supérieurs : estimation de l'exposition
des travailleurs à des chocs répétés
P. 33

❺ Les caractéristiques vibratoires
d'outils de redressement
et de formage activés par ultrasons
P. 37

❻ Étude préliminaire sur l'activation
et l'anisotropie du muscle dans la
modélisation des vibrations mains – bras
P. 41

❼ Modélisation de la sténose artérielle
induite par les vibrations transmises
à la main : un moyen de prévenir
le risque vibratoire vasculaire ?
P. 45

Les vibrations générées par certaines machines portatives ou guidées à la main peuvent être à l'origine d'affections au niveau des mains et des bras.

En France, près de deux millions de travailleurs seraient concernés, essentiellement dans les secteurs du bâtiment, de la construction mécanique, de la métallurgie, de la réparation automobile ou de l'entretien d'espaces verts.

L'exposition à ces vibrations n'est pas inévitable; des mesures de prévention adaptées permettent de réduire efficacement les risques.

Ce dossier propose d'évoquer les travaux les plus récents conduits pour enrichir ces démarches, à la faveur de la 15^e Conférence internationale consacrée aux vibrations du système main – bras, organisée par l'INRS en juin 2023.

Avec la mise en lumière de six communications, les articles abordent les questions liées aux niveaux d'émissions vibratoires, aux moyens de les évaluer concrètement et à la prévision de certains effets sur la santé, en cas d'exposition aiguë ou chronique.

HAND-ARM VIBRATION: NEW KNOWLEDGE FOR PREVENTION – *The vibration generated by certain portable hand-held or hand-guided machines can cause hand and arm disorders. In France, close to 2 million workers are concerned, mainly in the building, mechanical construction, metalworking, car repairs and green space maintenance sectors. Exposure to these types of vibration is not unavoidable; suitable prevention measures can effectively reduce the risks.*

This dossier describes the most recent work conducted to improve these measures, which was presented at the 15th international conference on hand-arm vibration, held by INRS in June 2023. Highlighting six presentations, these articles address the issues related to vibration levels, the means of assessing them in practical terms and the prevention of certain health effects in the event of acute or chronic exposure.

VIBRATIONS MAINS – BRAS : OÙ EN EST-ON ?

Les vibrations transmises aux membres supérieurs sont responsables de pathologies pouvant être invalidantes pour les salariés exposés. Ce sujet de santé au travail mobilise les équipes de l'INRS depuis plusieurs années; des outils ou méthodes ont vu le jour pour améliorer la prévention de ces nuisances physiques. Cet article propose une synthèse des échanges de la Conférence internationale sur les vibrations mains – bras organisée en juin 2023 et qui ont guidé l'élaboration de ce dossier.

CHRISTOPHE
NOËL,
JACQUES
CHATILLON
INRS,
département
Ingénierie des
équipements
de travail

L'exposition aux vibrations peut présenter des risques pour la santé des salariés. On distingue deux modes d'exposition : les vibrations transmises à l'ensemble du corps, notamment lors de la conduite d'engins, et les vibrations transmises aux membres supérieurs, lors de l'utilisation de machines portatives.

Dans de nombreux secteurs d'activité (bâtiment, construction mécanique, métallurgie ou entretien des espaces verts par exemple), les travailleurs utilisent quotidiennement des machines vibrantes, portatives (meuleuses, burineurs...) ou guidées à la main (pilonneuses à percussion, dameuses vibrantes...). Une utilisation régulière de ces machines vibrantes est susceptible de provoquer des pathologies d'ordre neurologique (sensations d'engourdissement et de picotements des doigts et des mains), vasculaire (syndrome de Raynaud) ou ostéoarticulaire (troubles des articulations du poignet et du coude)¹.

Afin de faire état des dernières connaissances dans le domaine des vibrations main – bras, une conférence scientifique est organisée tous les quatre ans, sous l'égide du Comité consultatif international sur les vibrations main – bras. L'INRS était chargé de l'organisation de la 15^e édition de la Conférence internationale sur les vibrations main – bras (Ichav), qui s'est tenue à Nancy du 6 au 9 juin 2023.

Près de cent participants, dont des universitaires, des chercheurs, des médecins du travail, des fabricants de machines, des métrologues, des chargés de prévention, ainsi que des membres de groupes de normalisation ou d'agences gouvernementales, ont assisté aux quatre journées d'échanges. Quinze pays étaient représentés (classés par ordre du nombre de leurs délégués) : France, Suède, Allemagne, Royaume-Uni, Italie, Canada, États-Unis d'Amérique, Belgique, Chine, Espagne, Nigéria, Norvège, Pays-Bas, Suisse, Taiwan. Quarante scientifiques de spécialités différentes ont pré-

senté les dernières avancées de leurs recherches dans les disciplines suivantes : physiologie, biologie, effets sur la santé, épidémiologie, réduction des vibrations sur la machine, modélisation numérique, biomécanique, métrologie, et évaluation de l'exposition aux vibrations.

Un atelier de travail était également consacré aux chocs mécaniques transmis à la main (en anglais, *hand transmitted mechanical shock* – HTS) qui peuvent être générés par de nombreuses machines courantes, telles que les pistolets à clous, les clés à chocs et les marteaux-piqueurs. Ces chocs produisent des vibrations à des fréquences plus élevées que celles actuellement prises en compte dans les normes internationales traitant de la mesure des vibrations ou abordant les effets des vibrations sur la santé. Peu de connaissances sont disponibles à ce jour pour expliquer et quantifier le risque sur la santé des travailleurs soumis à une exposition régulière à des chocs mécaniques ou des vibrations stationnaires hautes fréquences transmis à la main, ce qui justifiait en partie l'organisation de cette session dédiée.

À la faveur des échanges de la Conférence, dont une synthèse des points marquants est présentée dans le *Focus* (Cf. p. 24), trois questions essentielles ont guidé la construction de ce dossier et seront développées dans les pages qui suivent.

Comment connaître les niveaux d'exposition induits par les machines ?

La « quantité de vibrations » émise par une machine est appelée l'émission vibratoire. La connaissance de cette quantité, qui dépend à la fois de la machine et de son usage, devrait permettre de choisir, pour un usage donné, la machine la moins vibrante du marché, afin de réduire à la source l'exposition des salariés. De plus, cette valeur pourrait être utilisée pour évaluer approximativement l'exposition des travailleurs si, d'une part, le temps d'exposition aux vibrations est connu, et si,

d'autre part, le protocole expérimental de laboratoire suivi pour estimer l'exposition vibratoire associée à la machine n'est pas trop éloigné de sa situation réelle d'utilisation. Les fabricants sont tenus, de par la « directive Machines » (en cours de remplacement par le nouveau règlement européen²), de déclarer la valeur d'émission vibratoire de leur machine. Ils peuvent effectuer la mesure de cette valeur en utilisant un même code d'essai, s'il en existe un relatif à une même famille de machines, afin que toutes les valeurs des machines issues des différents fabricants, mesurées dans des conditions identiques, puissent être comparées équitablement. Ces codes d'essai sont souvent difficiles à mettre en œuvre, ce qui peut décourager les fabricants. Premier exemple : les meuleuses, dont la valeur d'émission vibratoire doit être mesurée *via* un dispositif expérimental un peu complexe, suspendant la meuleuse équipée d'un disque avec un balourd. Des méthodes alternatives, fondées sur la simulation numérique, peuvent être développées pour obtenir ces valeurs d'émission vibratoire (Cf. p. 26-28). Ces méthodes apportent beaucoup de souplesse et de puissance et méritent d'être encore développées. Deuxième exemple : la caractérisation des valeurs d'émissions de bruit et de vibrations des cloueuses. Des méthodes de caractérisation standardisées existent, mais nécessitent trois opérateurs humains formés, ce qui conduit à une dispersion des résultats et une mise en œuvre difficile. Un dispositif de substitution a été développé pour caractériser ces valeurs sans la participation d'opérateurs. Il est présenté dans un article de ce dossier (Cf. p. 29-32), avec la comparaison des résultats obtenus par les deux méthodes.

Comment estimer précisément l'exposition des travailleurs quand on ne connaît pas leur activité exacte ? Comment l'estimer quand les doses sont consécutives à des chocs ?

L'estimation de l'exposition des travailleurs aux vibrations peut être effectuée par différentes méthodes, des plus simples (bases de données, outils simplifiés – tel l'outil OSEV développé par l'INRS et mis à disposition sur son site Internet³) aux plus compliquées (métrologie « normalisée »). Sur le terrain, des difficultés importantes peuvent se manifester. Premier exemple : la dose vibratoire reçue par un travailleur effectuant un ensemble discontinu de tâches l'exposant aux vibrations est souvent calculée sur la durée de la journée de travail (8 heures), en extrapolant à cette journée des observations effectuées pendant un temps de mesurage beaucoup plus court. Cette extrapolation s'effectue couramment en interrogeant le salarié et en se fiant à sa déclaration, ce qui peut conduire à des erreurs importantes. L'article sur l'estimation de l'exposition des travailleurs à

des chocs répétés (Cf. p. 33-36) montre qu'il est possible de réduire la source d'erreur liée à cette autodéclaration en se fiant à des indicateurs de production : combien de pièces ont été produites ? Quelle dose vibratoire induit la production d'une pièce ? L'étude réalisée sur le terrain, relatée dans l'article, met en évidence le fait que la réponse à ces deux questions amène à encadrer la valeur de l'exposition vibratoire quotidienne de manière beaucoup plus précise. Dans le cas de l'exposition des travailleurs à des chocs (et non pas à une excitation vibratoire « continue » comme celle générée par une machine portative rotative : perceuse, meuleuse...), son évaluation est délicate. Certains opérateurs, dans la construction navale par exemple, redressent des tôles avec des marteaux. Le cinquième article du dossier (Cf. p. 37-40) montre qu'en situation de travail, le fait de vouloir remplacer des outils vibrants par des outils moins vibrants nécessite d'évaluer précisément les gains vibratoires, et que cela repose sur une certaine expertise métrologique dans le cas de chocs.

Comment améliorer la connaissance des effets sur la santé des vibrations grâce à des outils numériques et de modélisation ?

Les effets sur la santé de l'exposition aux vibrations, même si certains sont décrits depuis de nombreuses années, peuvent être mieux connus à l'aide de différentes méthodes, notamment la simulation numérique couplée à des expérimentations en laboratoire validant les résultats des étapes de calcul. Par exemple, les efforts de serrage et de poussée ne sont pas pris en compte dans l'évaluation réglementaire de la dose vibratoire bien qu'ils soient susceptibles de contribuer au syndrome des vibrations main-bras. Pour mieux comprendre l'apparition des symptômes, le sixième article (Cf. p. 41-44) décrit l'utilisation d'un modèle de main basé sur la méthode des éléments finis, qui permettra à terme de simuler le comportement vibratoire de la main, en fonction du serrage et de la poussée. Par ailleurs, la dose vibratoire réglementaire protège insuffisamment les travailleurs au regard de pathologies vasculaires comme le syndrome de Raynaud d'origine vibratoire (maladie des doigts blancs). Ainsi, afin de mieux intégrer à terme ce risque vasculaire dans l'estimation de la dose vibratoire, l'INRS a construit une approche numérique en deux étapes (Cf. p. 45-48). Tout d'abord, une loi de régression a été établie entre l'amplitude de l'accélération de la vibration et la baisse induite des contraintes de cisaillement exercées par le sang sur les parois de l'artère. Ensuite, un modèle mécanobiologique a été développé pour simuler la sténose artérielle résultant de la réduction de ces contraintes de cisaillement. La sténose artérielle (rétrécissement du diamètre de



l'artère dû à une augmentation de l'épaisseur de ses parois) est une altération anatomique rencontrée à divers degrés chez les patients souffrant d'un syndrome de Raynaud d'origine vibratoire. ●

1. Les maladies professionnelles reconnues en lien avec ces troubles sont décrites aux tableaux n° 69 (du régime général) ou n° 29 (du régime agricole) de la Sécurité sociale. Voir : <https://www.inrs.fr/publications/bdd/mp.html>

2. Règlement (UE) 2023/1230 du Parlement européen et du Conseil du 14 juin 2023 sur les machines, abrogeant la directive 2006/42/CE du Parlement européen et du Conseil et la directive 73/361/CEE du Conseil; la Directive 2006/42/CE et le règlement vont « cohabiter » jusqu'à mi-2025.

Voir en particulier : Dossier – Machines : des acteurs au service de la prévention. Hygiène & sécurité du travail, 2023, 273, DO 42, pp. 18-44. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/publications/hst/dossier.html>

3. Voir : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=outil59>

POUR EN SAVOIR +

Les actes et le compte rendu de la Conférence sont accessibles sur : <https://www.inrs.fr/footer/actes-evenements/colloque-vibrations-mains-bras-2023.html>

FOCUS SUR...

Conférence internationale : synthèse des exposés présentés

Réponse physiologique

E. Ochsmann et al. (université de Lübeck, Allemagne) ont mené une étude pour savoir si une exposition à des chocs répétés de cadences variables (1, 4 ou 20 coups par seconde) pouvait induire des changements du seuil de perception vibratoire (VPT : *Vibration Perception Threshold*) et de la température cutanée des doigts. Les auteurs ont montré qu'une exposition à ces chocs produit des effets similaires à ceux provoqués par des vibrations stationnaires : une augmentation du VPT et une diminution de la température cutanée.

S. Gao et Y. Ye (université de Southampton, Royaume-Uni) ont analysé l'influence de la force de serrage sur le VPT. Ils ont montré que cette force de préhension influençait le VPT uniquement si l'intensité vibratoire était faible. Ainsi, pour les forts niveaux vibratoires, le serrage n'a pas d'influence sur la perception des vibrations.

La fréquence et l'amplitude des vibrations, ainsi que la pression exercée sur le bout des doigts lors de la préhension d'un outil, peuvent affecter les fonctions vasculaires et sensorielles. Or, de nombreuses interrogations demeurent sur la manière dont ces deux facteurs interagissent pour affecter le risque vibratoire. Ainsi, **K. Krajnak et al.** (Niosh, États-Unis) ont mené une étude sur des queues de rats pour examiner les effets des

vibrations et de la pression mécanique sur les fonctions vasculaires et neurologiques. Les auteurs ont prouvé que la pression mécanique provoque ses propres effets sur la physiologie vasculaire (augmentation du débit sanguin) et neurologique (sensibilité accrue des fibres nerveuses myélinisées aux stimulations électriques), en plus de ceux liés aux vibrations.

Réponse mécano-biologique

R. Dong et al. (Niosh, États-Unis) ont utilisé le même banc d'essai pour tester deux métriques supposées caractériser le risque vibratoire : une dose vibratoire basée sur la déformation mécanique et une autre basée sur la contrainte mécanique. Ces deux grandeurs sont issues de la théorie de la fatigue vibratoire.

C. Noël et al. (INRS, France) ont mis au point un modèle numérique couplant la mécanique des artères et la biologie vasculaire pour prédire la sténose artérielle induite par les vibrations.

Épidémiologie

Y. Sun et al. (IFA, Allemagne) ont exposé les résultats d'une étude cas-témoins pour identifier la relation exposition-réponse qui lie l'exposition aux vibrations main-bras et le risque de troubles musculosquelettiques (TMS) des extrémités supérieures (ostéoarthrose de la main, du coude, de l'épaule, maladie de Kienböck, ostéochondrose du coude, pseudarthrose du scaphoïde). Après ajustement des facteurs de confusion pertinents, des relations dose-réponse statistiquement significatives ont pu être établies entre les doses cumulées d'exposition aux vibrations main-bras et les TMS des membres supérieurs.

A. Turcot et al. (INSPQ, Canada) ont mis en évidence l'apparition de troubles vasculaires et neurologiques d'origine vibratoire chez les prothésistes dentaires et les dentistes, liés à l'utilisation de machines à très hautes fréquences (roulette et fraises, par exemple).



© Fabrice Dimier pour INRS/D23

Conférence internationale INRS sur les vibrations mains-bras.

Réduction des vibrations

O. Lundin et R. Hattel (Atlas Copco, Suède) ont démontré l'efficacité de certains matériaux élastomères pour réduire les vibrations émises par des clefs à chocs ou des burineurs, pour des fréquences supérieures à 1 000 Hz.

H. Lindell (Rise, Suède) a présenté un ensemble de solutions techniques pour réduire les vibrations émises par des marteaux-piqueurs pneumatiques, dans le secteur de la stabilisation des parois rocheuses (par exemple : pose de filets anti-éboulement). Trois systèmes de réduction des vibrations sont mis en œuvre : système ressort-amortisseur associé à un palan attaché au marteau-piqueur (le palan assure le contact entre la machine et la paroi à percer), poignées découplées par des ressorts spiralés, et dispositif spécial auto-ajusté d'absorption des vibrations (ATVA : *Auto-Tuning Vibration Absorber*) positionné sur le corps de la machine. Le niveau vibratoire de la machine équipée de ces trois systèmes est divisé environ par quatre par rapport à celui de la machine initiale.

Modélisation

P. Ottosson et al. (Rise, Suède) proposent un modèle des éléments finis 2D d'un doigt soumis à un choc. Le modèle prédit, en réaction à certains chocs, des pressions de l'ordre de 0,1 MPa, pouvant engendrer des phénomènes de cavitation fluide dans les tissus biologiques.

S. Vauthier et al. (INRS, France) ont simulé par éléments finis la propagation des vibrations dans une main serrant une poignée. La rigidité des muscles en fonction du serrage a été mesurée par une technique d'élastographie ultrasonore. Ce modèle prend en compte l'anisotropie des muscles de la main. L'activation musculaire a un effet prépondérant sur le transfert vibratoire entre la poignée vibrante et la main.

Q. Pierron (INRS, France) a établi des modèles numériques simplifiés des vibrations émises par les meuleuses électriques, dans le but de proposer à terme des alternatives aux tests normalisés d'émission vibratoire.

Réponse biomécanique

N. Raffler et T. Wilzopolski (IFA, Allemagne) ont étudié l'effet de la posture sur le niveau vibratoire et l'activité musculaire (mesurée par électromyographie). Les auteurs montrent que l'exposition aux vibrations reste inchangée quelle que soit la posture, mais que la charge musculaire est bien plus importante lorsque l'opérateur travaille vers le haut ou le bas, en comparaison avec une utilisation de la machine vers l'avant.

Effets sur la santé

T. Nilsson et al. (université d'Umeå, Suède) ont conduit une revue de littérature entre 1946 et 2020, qui a révélé une prévalence plus élevée de la maladie de Dupuytren chez les salariés exposés par rapport à ceux non exposés aux vibrations (le risque est doublé). Ces

auteurs ont également mené le même type d'analyse bibliographique pour l'arthrose de la main. Ils concluent qu'il n'est pas possible d'affirmer avec certitude que l'exposition à des machines vibrantes augmente de manière significative le risque d'arthrose de la main, quand celui-ci est évalué uniquement par radiographie.

H. Petterson et al. (université d'Umeå, Suède) ont comparé les données de la cohorte nationale suédoise sur le travail et la santé (*Swedish national cohort on work and health – Snow*) avec celles des infarctus. Les auteurs n'ont pas trouvé de lien entre l'exposition aux vibrations main-bras et l'infarctus du myocarde.

Mesure

M. Vincent et al. (École de technologie supérieure, Canada) ont présenté un banc d'essai automatique pour caractériser les valeurs d'émission vibratoire des cloueuses sans la participation des opérateurs humains prévus dans la méthode normalisée.

H. Lindell et al. (Rise, Suède) ont proposé des métriques mathématiques pour analyser les signaux de chocs comme ceux issus de clefs à chocs ou cloueuses, par exemple. Ces métriques servent de base aux comités de normalisation pour caractériser le choc d'un point de vue du traitement du signal.

F. Maître (Cramif, France) et **M. Amari** (INRS, France) ont décrit une méthode d'évaluation de la dose vibratoire quotidienne basée sur un comptage du nombre de chocs journaliers qui peuvent être estimés à partir des caractéristiques de production (nb de pièces fabriquées par exemple). Dans le domaine de la construction navale, **D. Aoustin** (Carsat Bretagne, France) a comparé la dose vibratoire reçue par un salarié utilisant des outils classiques dans ce secteur (marteau, burineur) à celle induite par des machines plus originales, conçues à partir d'une technologie ultrasonore.

Évaluation et contrôle de l'exposition

A. Delépine (INRS, France) a exposé le système de reconnaissance des maladies professionnelles en France, dans le cas particulier des vibrations main-bras.

R. Petitfour et al. (ACMS Île-de-France, France) ont décrit des exemples d'évaluation de la dose vibratoire dans les stations d'épuration des eaux usées et dans le service après-vente d'un vendeur de machines électroportatives, en utilisant l'outil Osev développé par l'INRS.

C. Petterson (Rise, Suède) a clôturé la conférence en présentant le projet « zéro blessure par vibration », qui vise à réduire le risque vibratoire en concevant des machines à faible émission vibratoire. L'originalité de ce projet est son approche holistique, pouvant conduire à la fabrication de machines moins vibrantes et impliquant la plupart des parties prenantes : les utilisateurs, les instances gouvernementales, les employeurs, les organisations patronales et syndicales, les fabricants de machines, les médecins du travail et les chercheurs en vibrations.

ÉMISSION VIBRATOIRE DE MEULEUSES : EXPÉRIENCES ET MODÈLE

Les fabricants de machines vibrantes doivent déclarer l'émission vibratoire de leur produit. Cette émission est évaluée *via* des codes d'essai qui sont parfois difficiles à mettre en œuvre. L'étude présentée ici montre, dans le cas des meuleuses, qu'un modèle numérique pourrait remplacer, dans certains cas, les essais expérimentaux et fournir une estimation assez réaliste de l'émission vibratoire.

QUENTIN
PIERRON
INRS,
département
Ingénierie des
équipements
de travail

Contexte

Les meuleuses électriques sont des outils vibrants susceptibles d'exposer les opérateurs à des doses de vibrations supérieures aux valeurs seuils réglementaires définies par le Code du travail (articles R. 4443-1 et R. 4443-2). Pour aider les entreprises à choisir des machines portatives moins vibrantes, les fabricants sont tenus de déclarer leur émission vibratoire. L'émission vibratoire est l'accélération efficace pondérée en fréquence a_{wv} , définie par la norme ISO 5349-1¹ (typiquement entre 3 et 8 m/s² pour les meuleuses [1-5]) et mesurée, pour les meuleuses, conformément au code d'essai EN 60745-2-3².

Une étude a été menée à l'INRS, avec l'objectif de développer et de valider un modèle simplifié qui calcule les accélérations d'une meuleuse lors d'un essai normalisé. À plus long terme, de tels modèles pourraient remplacer les codes d'essai. Ce modèle est fondé sur l'hypothèse que le maintien de la meuleuse n'a pas d'effet sur les vibrations de la machine [6-7]. Pour valider cette hypothèse, les résultats d'essais (les accélérations mesurées) ont été comparés avec ceux des calculs. En plus des essais normalisés durant lesquels un opérateur tient la meuleuse, des essais sans opérateur ont été effectués.

Expériences et mesures

Conformément au code d'essai EN 60745-2-3, les disques ont été fabriqués en aluminium et perforés de manière à créer le balourd (qui provoque des vibrations) préconisé par le texte normatif. Un câble fin en acier a été installé dans une poulie reliant la meuleuse à une masse, pour appliquer une force dirigée vers le haut et pour compenser le poids de la meuleuse. La meuleuse était tenue par un opérateur et lorsqu'elle était en marche,

le disque tournait librement, sans contact avec la matière à travailler. Trois opérateurs ont manipulé successivement la meuleuse et ont répété les essais trois fois. D'autres tests ont été effectués sans opérateur ; la meuleuse était simplement suspendue à un long ressort de 1930 N/m de raideur. La meuleuse testée était le modèle W12-125 Quick (de marque Metabo), pesant 2,4 kg et montée avec des disques de 125 mm de diamètre. Pour les essais, les accélérations ont été mesurées par au moins trois accéléromètres piézoélectriques triaxiaux PCB 356B21, collés sur la meuleuse à trois endroits suffisamment séparés. Les signaux de tension des accéléromètres ont été enregistrés numériquement par un frontal d'acquisition Dewesoft R2DB à une fréquence de 20000 Hz. Avant les essais, les positions respectives des accéléromètres ont été mesurées grâce à une cotation géométrique des meuleuses instrumentées, par le biais d'un scanner 3D (de marque Kréon).

Modèle numérique

Un modèle numérique a été développé en considérant le disque perforé et le corps de la meuleuse comme deux corps rigides reliés par une liaison pivot. Une vitesse de rotation constante ω a été supposée entre les deux corps rigides.

L'hypothèse principale de ce modèle était l'absence de force externe agissant sur la meuleuse : le poids comme les efforts de maintien. Les équations de la dynamique ont fourni un système de six équations et six degrés de liberté (position de la meuleuse dans l'espace et vecteur instantané de rotation noté \vec{Q}). Sa résolution et sa simplification ont donné le vecteur d'amplitude complexe de la première harmonique de l'accélération en régime permanent d'un point M sur la meule selon les égalités :



© Grégoire Maisonneuve pour l'INRS/2016

$$\textcircled{1} \quad \vec{a}_M = \frac{bal}{m_T} \omega^2 \vec{e}_r + i\omega \vec{\Omega} \wedge (\vec{CM} - \frac{m_G}{m_T} \vec{CG}_{woD})$$

$$\textcircled{2} \quad \vec{I}_T \vec{\Omega} = i\omega m_G \frac{bal}{m_T} \vec{CG}_{woD} \wedge \vec{e}_r$$

Dans ces équations :

bal : le balourd du disque perforé [homogène à une masse multipliée par une distance : kg.m],

m_T : la masse totale du système [kg],

\vec{e}_r : le vecteur tournant dans le plan du disque [sans unité],

$i = \sqrt{-1}$ [$i^2 = -1$],

C : le centre du disque [m],

m_G : la masse de la meuleuse sans le disque [kg],

G_{woD} : le centre de masse de la meuleuse sans le disque [m],

et \vec{I}_T : la somme du tenseur d'inertie des corps rigides écrit en leur centre de masse [composantes : kg.m²].

Tous les paramètres du modèle étaient connus et fournis par le fabricant à partir de la CAO détaillée.

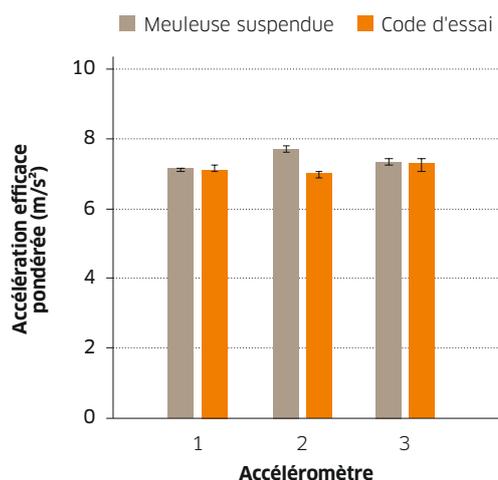
Résultats

Les accélérations ont été mesurées par trois accéléromètres. Tout d'abord, l'accélération efficace pondérée en fréquence a_{hv} , telle que définie dans la norme ISO 5349-1, a été calculée à partir des accélérations brutes mesurées à trois endroits différents et selon les deux tests :

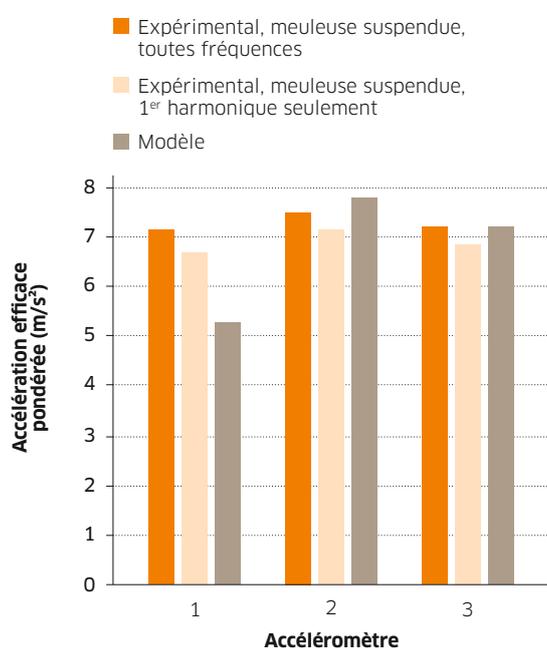
- selon le code d'essai normalisé (meuleuse tenue par un opérateur) ;
- lorsque la meuleuse est suspendue par un ressort (Cf. Figure 1).

Les accélérations a_{hv} étaient très proches, que la meuleuse soit suspendue ou tenue par un opérateur. Les très faibles valeurs de l'écart-type de l'accélération pondérée pour le code d'essai confirment que le maintien de la meuleuse par l'opérateur a peu d'effet sur le niveau vibratoire pondéré, dans ce cas. L'une des hypothèses du modèle (forces externes négligées) était donc valable pour cette meuleuse.

Ensuite, l'amplitude de l'accélération à la fréquence



← FIGURE 1 Accélérations expérimentales efficaces pondérées en fréquence a_{hv} , mesurées par les trois accéléromètres selon le code d'essai normalisé et pour la meuleuse suspendue par un ressort. Les lignes noires verticales au sommet des barres indiquent l'écart-type qui est très faible.



← FIGURE 2 Accélération efficace pondérée en fréquence a_{hv} , mesure avec trois accéléromètres, en tenant compte de l'ensemble du signal ou seulement de la première harmonique et résultats numériques du modèle (première harmonique) aux emplacements des accéléromètres.

de rotation (première harmonique) a été calculée via le modèle à l'emplacement des accéléromètres. Cette accélération calculée a été comparée sur la Figure 2 à l'accélération expérimentale obtenue avec la meuleuse suspendue. Le modèle montre des résultats relativement proches de ceux obtenus expérimentalement.

Tests avec une poignée antivibratile

Les tests décrits précédemment ont été effectués avec une meuleuse sans partie flexible. Des tests similaires ont été effectués sur une meuleuse (Bosch GWS 24-230 LVI) dont les deux poignées étaient flexibles (système de réduction des vibrations). Cette deuxième meuleuse était de grande taille, pesant 5,5 kg, avec des disques de 230 mm de diamètre. Cette fois, cinq accéléromètres ont été fixés (par collage) sur la meuleuse : quatre sur le corps de la machine et le cinquième sur la poignée antivibratile située à l'arrière de la machine.



FIGURE 3 →
Accélération efficace pondérée en fréquence a_{hv} mesurée pendant les essais normalisés et les essais avec la meuleuse suspendue. Les lignes noires au sommet des barres indiquent l'écart-type.

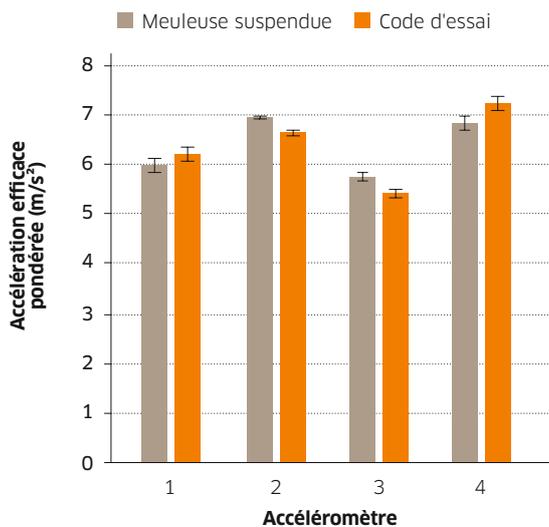
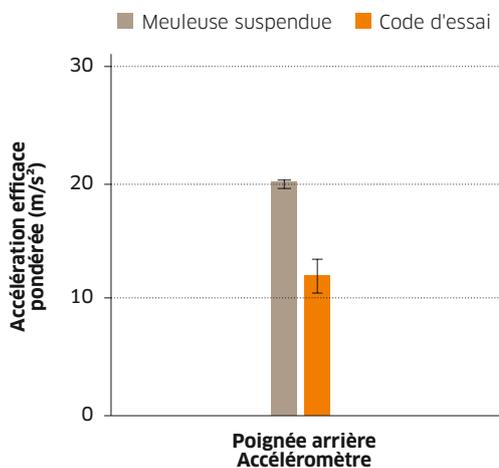


FIGURE 4 →
Accélération efficace pondérée en fréquence a_{hv} mesurée pendant les essais normalisés et les essais avec la meuleuse suspendue. Les lignes noires au sommet des barres indiquent l'écart-type.



Les accélérations efficaces pondérées en fréquence a_{hv} ont été évaluées avec un opérateur (code d'essai normalisé) et sans opérateur (meuleuse suspendue). Les accélérations mesurées avec les accéléromètres nos 1 à 4, situés sur le corps de la machine, sont

présentées sur la Figure 3. Les accélérations étaient très proches pour les deux essais, c'est-à-dire qu'un opérateur tienne ou non la meuleuse (barres beiges comparées aux barres orange). Comme pour le premier essai, le maintien de la meuleuse n'affecte donc pas les vibrations du corps de la meuleuse. Les accélérations mesurées avec l'accéléromètre situé sur la poignée flexible arrière sont présentées sur la Figure 4. Elles sont plus faibles lorsqu'un opérateur tient la meuleuse (essai normalisé) que sans opérateur (meuleuse suspendue). Cette diminution des vibrations pourrait s'expliquer par la déformation de la poignée flexible qui joue son rôle amortissant. Le modèle, qui suppose que la meuleuse est rigide, ne peut donc pas être utilisé pour estimer l'émission vibratoire dans ce cas.

Conclusions

En comparant la vibration a_{hv} d'une meuleuse suspendue à celle obtenue selon le code d'essai EN 60745-2-3 avec un opérateur qui tient la meuleuse, aucune différence n'a été observée. Ainsi, pour la meuleuse testée, il n'est pas nécessaire de prendre en compte la main de l'opérateur pour estimer l'émission vibratoire. Un modèle simple de meuleuse constitué de deux corps rigides a aussi été développé et a montré sa capacité à estimer l'émission vibratoire déclarée par les fabricants. Cependant, ce modèle ne peut pas être utilisé pour estimer l'émission vibratoire des meuleuses à poignées flexibles. ●

1. Norme NF EN ISO 5349-1 – Vibrations mécaniques. Mesurage et évaluation de l'exposition des individus aux vibrations transmises par la main. Partie 1 : Exigences générales. Afnor, 2002. Accessible sur : <https://m.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/> (document payant).
2. Norme NF EN 60745-2-3 – Outils électroportatifs à moteur. Sécurité. Partie 2-3 : règles particulières pour les meuleuses, lustreuses et ponçouses du type à disque. Afnor, 2011. Accessible sur : <https://m.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/> (document payant).

BIBLIOGRAPHIE

- [1] MIRBOD S.M., INABA R., IWATA H. – A study on the vibration-dose limit for Japanese workers exposed to hand-arm vibration. *Industrial health*, 1992, 30, pp. 1-22. Accessible sur : doi:10.2486/indhealth.30.1
- [2] BURSTRÖM L. ET AL. – Comparison of different measures for hand-arm vibration exposure. *Safety science*, 1998, 28, pp. 3-14. Accessible sur : doi:10.1016/S0925-7535(97)00059-3
- [3] JANG J.-Y. ET AL. – Quantitative exposure assessment for shipyard workers exposed to hand-transmitted vibration from a variety of vibration tools. *AIHA Journal*, 2002, 63, pp. 305-310. Accessible sur : doi:10.1080/15428110208984718
- [4] RIMELL A.N. ET AL. – Variation between manufacturers' declared vibration emission values and those measured under simulated workplace conditions for a range of hand-held power tools typically found in the construction industry. *International journal of industrial ergonomics*, 2008, 38, pp. 661-675. Accessible sur : doi:10.1016/j.ergon.2007.10.023
- [5] EDWARDS D.J. ET AL. – A field survey of hand-arm vibration exposure in the UK utilities sector. *Engineering, construction and architectural management*, 2020, 27, pp. 2179-2198. Accessible sur : doi:10.1108/ECAM-09-2019-0518
- [6] LEMERLE P., KLINGLER A., TROMPETTE N. ET AL. – Development and validation of an accurate testing procedure to measure coupling forces and characterize the man/machine interaction. In: *Proceedings of the 11th International Conference on hand-arm vibration*. Bologne, 2007, pp. 3-7.
- [7] LILJELIND I. ET AL. – Determinants explaining the variability of hand-transmitted vibration emissions from two different work tasks: grinding and cutting using angle grinders. *Annals of occupational hygiene*, 2013, 57, pp. 1065-1077.

ÉVALUATION DES VALEURS D'ÉMISSION VIBRATOIRE DES CLOUEUSES : UN DISPOSITIF DE SUBSTITUTION PEUT-IL REMPLACER LES OPÉRATEURS HUMAINS ?

MAXIME
VINCENT,
THOMAS
DUPONT

Département
Génie
mécanique,
École de
technologie
supérieure,
Montréal,
Québec,
Canada

PIERRE
MARCOTTE,
THOMAS
PADOIS

Institut de
recherche
Robert-Sauvé
en santé et
en sécurité
du travail
(IRSST),
Montréal

MARC-ANDRÉ
GAUDREAU

Département
Génie
mécanique,
université
du Québec
à Trois-
Rivières,
Québec,
Canada

Les fabricants de machines vibrantes doivent déclarer l'émission vibratoire des équipements de travail qu'ils mettent sur le marché. Cette émission est évaluée *via* des codes d'essai qui sont parfois lourds à mettre en œuvre, comme dans le cas des cloueuses puisque plusieurs opérateurs sont sollicités.

L'étude présentée ici montre qu'un banc d'essai astucieux pourrait avantageusement se substituer aux essais normés utilisant des opérateurs humains.

Contexte

Les cloueuses portatives sont des outils largement utilisés dans l'industrie de la construction, car elles permettent un assemblage efficace et précis des structures en bois. Malheureusement, les cloueuses produisent également des niveaux élevés de bruit et de vibrations, qui peuvent représenter un risque significatif de développement de perte auditive ou de syndrome vibratoire. C'est pourquoi il est important de choisir et de concevoir des cloueuses qui produisent de faibles niveaux de bruit et de valeurs d'émission vibratoire pour prévenir les risques pour la santé. Une première étape présentée dans cet article serait de simplifier les méthodes d'évaluation des valeurs d'émission de bruit et d'émission vibratoire.

La norme ISO 28927-13:2022 décrit une méthode pour évaluer les valeurs d'émission vibratoire des outils de fixation tels que les cloueuses [1]. La procédure nécessite trois opérateurs formés pour fixer 50 clous chacun (cinq essais mesurés comportant chacun 10 clous à fixer) dans un morceau de bois de pin standardisé, ce qui est particulièrement long et coûteux (outre le temps de mesurage, l'expérimentateur doit aussi par exemple s'assurer de la posture de l'opérateur). Par conséquent, un dispositif de substitution de l'opérateur (noté DSO) a été développé pour simplifier et réduire le coût de la mesure des valeurs d'émission vibratoire [2-3], et aussi pour éviter d'exposer l'expérimentateur

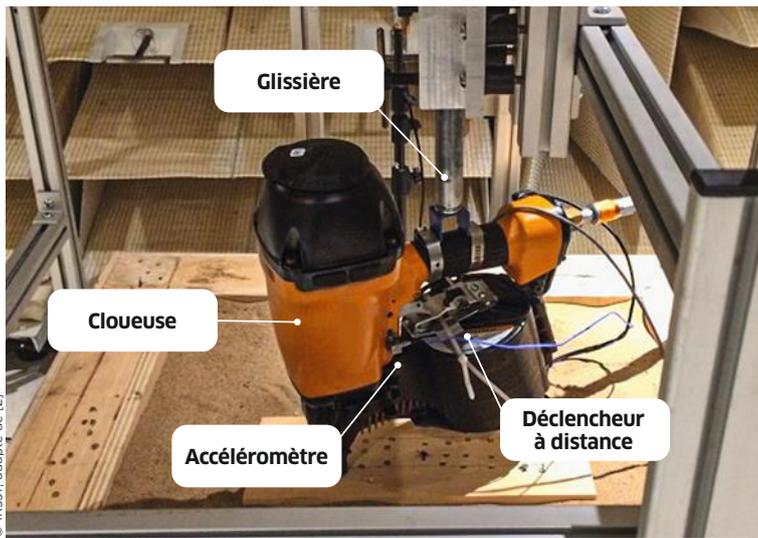
aux vibrations et aux bruits. En plus de la caractérisation des valeurs d'émission vibratoire, ce dispositif a également été utilisé pour déterminer les valeurs d'émission de bruit [2-4] et pour localiser les sources de bruit des cloueuses [2-5]. Les valeurs d'émission vibratoire du dispositif ont été comparées avec celles obtenues avec trois opérateurs pour sept cloueuses portatives différentes, en utilisant l'accélération efficace pondérée W_h (selon la norme ISO 5349-1 [6]). Cependant, une étude épidémiologique a suggéré que la pondération en fréquence W_{hf} [7], prenant en considération des fréquences plus élevées que celles du filtre W_h , est plus appropriée pour évaluer le risque de développer le syndrome de Raynaud induit par les vibrations [7].

L'étude présentée dans cet article visait à comparer, entre les trois opérateurs et le dispositif de substitution, les valeurs d'émission vibratoire des cloueuses mesurées, en utilisant les accélérations efficaces et les accélérations crêtes pondérées avec le filtre W_{hf} .

Matériel et méthode

Sept cloueuses différentes ont été utilisées pour l'étude : PR1, PR2, PB1, PB2, PB3 se réfèrent à des cloueuses pneumatiques; GB1 fait référence à une cloueuse à gaz (butane); et EB1 à une cloueuse électrique. Les conditions des mesures avec les opérateurs ont suivi la norme ISO 28927-13:2022 [1],





↑ FIGURE 1
Le dispositif de substitution au-dessus du banc de test décrit dans la norme ISO 28927-13:2022.

avec trois opérateurs fixant 10 clous sur 30 secondes pour 5 répétitions, soit un total de 50 clous par opérateur ou 150 clous pour chaque cloueuse testée.

Le dispositif de substitution est composé d'un cadre en aluminium au-dessus du banc de test proposé dans la norme ISO 28927-13:2022 [1], comme le montre la Figure 1. La poignée de la cloueuse est attachée à un support mobile, qui consiste en une glissière graissée restreignant le mouvement de la cloueuse uniquement dans la direction verticale. Un déclencheur à distance a été conçu pour actionner la gâchette de la cloueuse. Pour les mesures avec le DSO et celles avec les opérateurs, un accélé-

romètre triaxial (PCB 356B20) a été rigidement fixé au corps de la cloueuse, aussi près que possible de là où se trouve la main de l'opérateur en conditions d'utilisation normale. Le signal d'accélération a été enregistré avec une fréquence d'échantillonnage de 51,2 kHz.

Pour le dispositif de substitution, 10 clous ont été enfoncés avec chaque cloueuse [2]. Les signaux d'accélération ont été numériquement filtrés par la pondération en fréquence W_{hF} comme défini dans la spécification technique ISO/TS 15694 [8]. Il s'agit d'un filtre passe-bande avec un gain unitaire dans la plage de fréquences de 6,3 à 1250 Hz. Pour chaque cloueuse, l'accélération efficace 3 secondes pondérée par le filtre W_{hF} , $a_{hF,3s}$, l'accélération crête pondérée par le filtre W_{hF} , notée $a_{hF,Crête}$ et le facteur crête FC ont été calculés à partir des signaux d'accélération pour les trois opérateurs et le dispositif de substitution, selon les expressions ① à ③ :

$$\textcircled{1} \quad a_{hF,3s} = a_{hF} \sqrt{\frac{T}{3n}}$$

$$\textcircled{2} \quad a_{hF,Crête} = \max_{0 \leq t \leq T} |a_{hF}(t)|$$

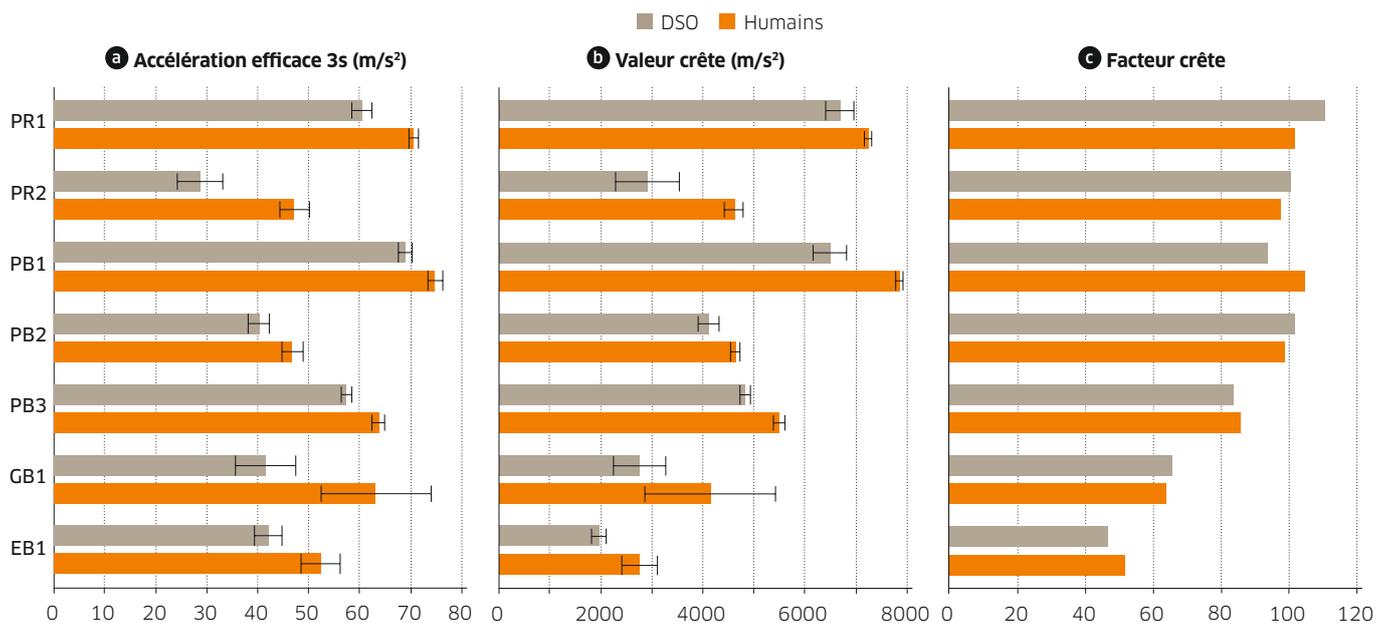
$$\textcircled{3} \quad FC = \frac{a_{hF,Crête}}{a_{hF,3s}}$$

Dans ces équations :

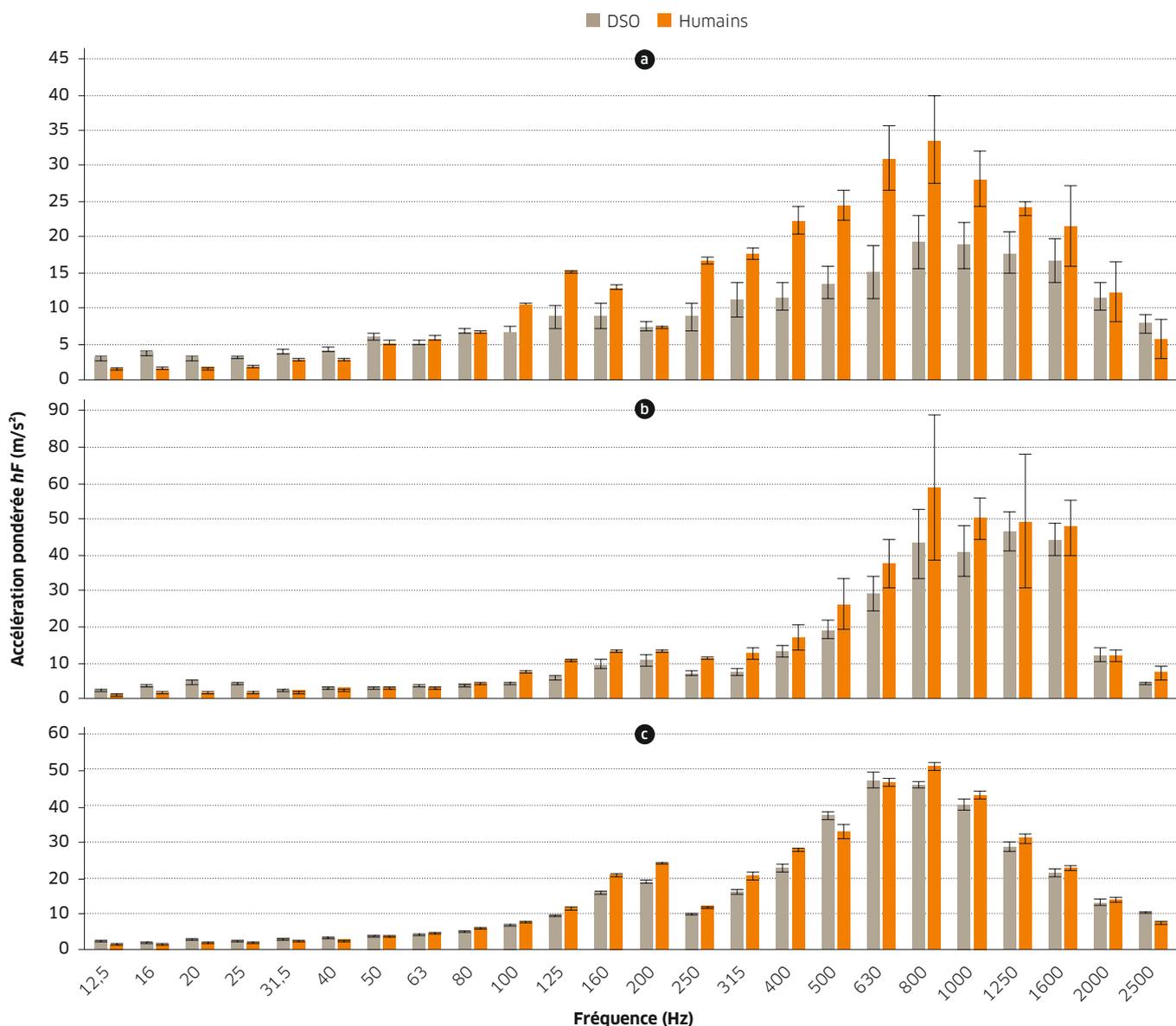
T [s] est le temps total de la mesure,

a_{hF} [$m \cdot s^{-2}$] est l'accélération efficace pondérée par le filtre W_{hF} ,

$a_{hF}(t)$ [$m \cdot s^{-2}$] est le signal temporel d'accélération pondérée par le filtre W_{hF} , et n est le nombre d'impacts (clous).



↑ FIGURE 2
Valeurs d'émission vibratoire obtenues pour les sept cloueuses testées en comparant les opérateurs et le dispositif de substitution (noté DSO sur cette figure) dans la direction du clou : (a) accélération efficace pondérée 3 secondes; (b) valeur crête; et (c) facteur crête. L'écart-type est affiché sous forme de barre d'erreur. La barre orange « Humains » correspond à la moyenne des trois opérateurs.



↑ FIGURE 3

Spectre en bandes de tiers d'octave de l'accélération moyenne pondérée hF pour (a) la cloueuse PR2, (b) la cloueuse GB1 et (c) la cloueuse PB3, avec la moyenne des trois opérateurs et le DSO. L'écart-type est affiché sous forme de barre d'erreur. La barre orange « Humains » correspond à la moyenne des trois opérateurs.

Les données obtenues avec les trois opérateurs ont été moyennées et l'écart type a été calculé (50 clous). Pour le dispositif de substitution, la moyenne et l'écart type ont été calculés sur les 10 clous. La différence relative a été calculée pour comparer les résultats entre les opérateurs et le dispositif de substitution (DSO).

Résultats

L'accélération efficace 3 secondes, la valeur crête et le facteur de crête de l'accélération pondérés par le filtre W_{hF} suivant la direction prédominante (direction du clou) sont présentés sur la Figure 2.

Les résultats montrent que l'accélération efficace pondérée 3 secondes et la valeur crête sont toujours sous-estimées avec le dispositif de substitution. Les différences relatives entre l'accélération efficace

pondérée 3 secondes obtenue avec les opérateurs et le dispositif de substitution varient de 8 % pour la cloueuse PB1 à 39 % pour la cloueuse PR2. Les différences pour toutes les autres cloueuses sont inférieures à 20 %, à l'exception des cloueuses GB1 et PR2, qui sont également associées à de plus grandes variabilités pour les accélérations efficaces pondérées 3 secondes et crêtes. La cloueuse présentant la différence relative la plus faible en matière d'accélération efficace pondérée 3 secondes et d'accélération crête est la cloueuse PB3, avec respectivement 10 % et 12 %.

Pour approfondir ces différences entre la moyenne des opérateurs et le dispositif de substitution, le spectre en bandes de tiers d'octave de l'accélération moyenne pondérée par le filtre W_{hF} a été calculé. Les valeurs d'émission vibratoire pour les cloueuses





© Gael Kerbaol/INRS/2023

Atelier de production d'emballages en bois : opérateur utilisant une cloueuse pneumatique.

PR2 et GB1 (dispositif de substitution et moyenne des trois opérateurs) sont comparées *Figure 3*. Les résultats pour la cloueuse PB3 sont également affichés à titre de référence.

Le spectre en bandes de tiers d'octave obtenu avec la cloueuse PR2 (*Cf. Figure 3a*) montre un bon accord entre les valeurs obtenues avec le dispositif de substitution et les opérateurs dans les basses fréquences jusqu'à 200 Hz. Pour les fréquences plus élevées, l'amplitude du spectre augmente à la fois pour le dispositif de substitution et les opérateurs, de même que la différence entre eux. Les valeurs les plus élevées se situent dans la plage de fréquences de 400 Hz à 1600 Hz. Des observations similaires peuvent être faites pour la cloueuse GB1 (*Cf. Figure 3b*). Pour les opérateurs, il est à noter que la barre d'erreur (c'est-à-dire l'écart-type) est très grande dans la plage de fréquences de 400 Hz à 1600 Hz, ce qui témoigne d'une grande variabilité entre les opérateurs. En comparaison, la cloueuse PB3 (*Cf. Figure 3c*) montre un bon accord entre le dispositif de substitution et les opérateurs pour l'ensemble du spectre de fréquences. Les valeurs d'émission vibratoire mesurées avec le dispositif de substitution sont toujours sous-estimées par rapport à celles mesurées avec les opérateurs. Cela pourrait être attribué à la conception même du dispositif de substitution, qui limite le mouvement à l'axe vertical uniquement.

Conclusions

Selon la comparaison des valeurs d'émission vibratoire entre le dispositif de substitution et les trois opérateurs (d'après la norme ISO 28927-13:2022), le dispositif de substitution pourrait offrir une bonne alternative, tout en simplifiant la procédure, en réduisant le nombre de clous nécessaires pour obtenir les valeurs d'émission vibratoire et en évitant d'exposer les opérateurs. Cependant, pour deux

des sept cloueuses testées, de grandes différences ont été observées entre les valeurs d'émission vibratoire mesurées avec les opérateurs et celles mesurées avec le dispositif de substitution, ainsi que de fortes variabilités intersujets. Ces grandes variabilités intersujets suggèrent que trois opérateurs sont insuffisants pour caractériser les valeurs d'émission vibratoire des cloueuses. De plus, la conception du dispositif de substitution, qui ne prend pas en compte la biodynamique de la main-bras dans l'impact des vibrations, pourrait générer des sous-estimations des valeurs d'émission vibratoire par rapport à celles mesurées en faisant appel aux opérateurs. Pour l'instant, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour comprendre les différences entre les valeurs d'émission vibratoire mesurées avec le dispositif de substitution et celles mesurées avec les opérateurs, et pour améliorer la représentativité humaine du dispositif de substitution. Ce dernier point est nécessaire pour améliorer la détermination des valeurs d'émission vibratoire, et pour aider les fabricants à construire des outils plus sûrs avec des vibrations plus faibles. ●

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **NORME ISO 28927-13** – *Machines à moteur portatives. Mesurage des vibrations au niveau des poignées. Partie 13 : Machines à enfoncer les fixations.* Genève, ISO, 2022. Accessible sur : <https://www.iso.org/fr/standard/75451.html> (document payant).
- [2] **GAUDREAU M.A. ET AL.** – *Cloueuses portatives : développement de méthodes de diagnostic vibratoire et acoustique.* Montréal, IRSST, 2018.
- [3] **MARCOTTE P. ET AL.** – *Characterization of nail guns impact vibration.* In: *Proceedings of the 26th international Congress on sound and vibration.* Montréal, 7-11 juillet 2019, 86, pp. 1132-1138.
- [4] **GAUDREAU M.A. ET AL.** – *Noise and vibration measurement of framing nailers: development and validation of a mechanized test bench.* In: *Proceedings of the 46th International Congress and Exposition on noise control engineering.* Hong Kong, 27-30 août 2017.
- [5] **PADOIS T. ET AL.** – *Identification of noise sources using a time domain beamforming on pneumatic, gas and electric nail guns.* *Noise Control. Eng. J.*, 2019, 67, pp. 11-22.
- [6] **NORME NF EN ISO 5349-1** – *Vibrations mécaniques. Mesurage et évaluation de l'exposition des individus aux vibrations transmises par la main. Partie 1 : Exigences générales.* Afnor, 2002. Accessible sur : [https://m.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/\(document payant\)](https://m.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/(document payant)).
- [7] **BOVENZI M. ET AL.** – *Frequency weightings of hand-transmitted vibration for predicting vibration-induced white finger.* *Scand. J. Work Environ. Health*, 2011, 37, pp. 244-252.
- [8] **NORME ISO/TS 15694** – *Vibrations et chocs mécaniques. Mesurage et évaluation des chocs simples transmis par les machines portatives et guidées à la main au système main-bras.* Genève, ISO, 2001. Accessible sur : <https://www.iso.org/fr/standard/40386.html> (document payant).

VIBRATIONS TRANSMISES AUX MEMBRES SUPÉRIEURS : ESTIMATION DE L'EXPOSITION DES TRAVAILLEURS À DES CHOCS RÉPÉTÉS

Le Code du travail définit une méthode d'évaluation du risque créé par l'exposition aux vibrations transmises aux membres supérieurs. Il revient à l'employeur d'évaluer la dose vibratoire journalière $A(8)$ reçue par le salarié. L'évaluation la plus précise de $A(8)$ consisterait à mesurer les vibrations sur une journée de travail complète. En pratique, les interventions des préventeurs se limitent à une courte période pour ne pas perturber la production en entreprise. La dose $A(8)$ est alors estimée à partir d'informations recueillies sur la tâche de travail.

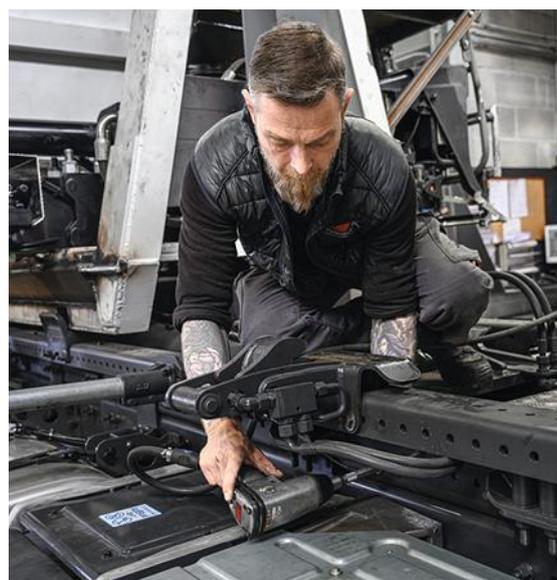
Pour les machines qui génèrent des vibrations contenant des chocs répétés, cette estimation est souvent biaisée. L'échantillon mesuré peut ne pas être représentatif de l'exposition quotidienne réelle. Cet article présente une méthode alternative d'estimation de $A(8)$ qui améliore l'évaluation du risque dans de telles situations. Sa formulation mathématique est présentée et illustrée par l'estimation de l'exposition d'un balisticien utilisant une arme à feu.

FRÉDÉRIC
MAÎTRE
Caisse
régionale
d'assurance
maladie
d'Île-de-
France
(Cramif)

MAËL AMARI
INRS,
département
Ingénierie
des
équipements
de travail

Contexte

Il revient à l'employeur d'évaluer la dose vibratoire journalière $A(8)$ reçue par le salarié. La méthode d'évaluation standardisée de l'exposition aux vibrations transmises aux membres supérieurs est définie par les normes ISO 5349-1 [1] et ISO 5349-2 [2]. L'exposition journalière aux vibrations $A(8)$ d'un opérateur doit être déterminée à partir de la valeur totale de vibration a_{hv} émise par la machine et de la durée d'exposition totale journalière T . Sur le terrain, l'évaluation de $A(8)$ est souvent effectuée sur une durée de travail limitée pour éviter de perturber la production. Certaines machines portatives génèrent des vibrations sous la forme de chocs répétés de fortes amplitudes (clé à choc, marteau à river, cloueur, etc.) [3]. Dans ce cas, la valeur totale de vibration a_{hv} et la durée d'exposition totale journalière T peuvent ne pas être représentatives de l'exposition réelle du travailleur. La variation de la production, le découpage des signaux par l'expérimentateur ou les informations limitées sur les activités quotidiennes influencent très significativement les résultats. L'estimation de l'exposition



© Gaël Kerbaol / INRS / 2023

quotidienne aux vibrations $A(8)$ est alors délicate et sa comparaison aux valeurs limites réglementaires peut s'avérer erronée (articles R.4441-1 à R.4447-1 du Code du travail).



© Gaël Kerbaol pour l'INRS/2020



L'objectif de cet article est de décrire une méthode d'estimation de l'exposition quotidienne aux vibrations A(8) adaptée à ces situations. Sa formulation mathématique est présentée et illustrée sur un cas réel d'intervention en entreprise.

Les trois grandeurs suivantes sont comparées :

- la dose vibratoire journalière A(8) réelle que l'on cherche à estimer, habituellement impossible à mesurer lors d'une intervention, mais connue dans le cadre de cette étude;
- l'estimation de la dose vibratoire journalière A(8) selon la méthode classique, calculée à partir de mesures sur un échantillon réduit de la tâche de travail et d'une estimation de la durée d'exposition effective aux vibrations;
- l'estimation de la dose vibratoire journalière A(8) selon la méthode alternative proposée dans cet article, calculée à partir du même échantillon et d'informations sur la répétition des chocs sur la journée de travail complète.

Méthode d'estimation alternative de l'exposition quotidienne aux vibrations Dose vibratoire journalière A(8)

L'exposition quotidienne aux vibrations A(8) transmises aux membres supérieurs d'un opérateur est définie suivant la méthode standardisée, par l'expression :

$$1 \quad A(8) = a_{hv} \cdot \sqrt{\frac{T}{T_0}} \quad (m.s^{-2})$$

a_{hv} ($m.s^{-2}$) est la valeur totale de vibration émise par la machine. T (s) est la durée d'exposition totale quotidienne de l'opérateur. $T_0 = 8 \times 3600$ (s) est la durée de référence pour une journée de travail. La valeur totale de vibration a_{hv} émise par la machine est définie par l'expression :

$$2 \quad a_{hv} = \sqrt{a_{hw_x}^2 + a_{hw_y}^2 + a_{hw_z}^2} \quad (m.s^{-2})$$

$a_{hw_{x,y,z}}$ ($m.s^{-2}$) est la valeur efficace de l'accélération pondérée par le filtre W_h [1], mesurée dans les directions x, y et z.

La valeur efficace de l'accélération pondérée $a_{hw_{x,y,z}}$ est définie par :

$$3 \quad a_{hw_{x,y,z}} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N |a_{hw_{x,y,z}}[n]|^2} \quad (m.s^{-2})$$

$a_{hw_{x,y,z}}[n]$ ($m.s^{-2}$) est la $n^{ième}$ valeur de l'échantillon de l'accélération pondérée par le filtre W_h . $N = T \times f_s$ est le nombre total d'échantillons. f_s (Hz) est la fréquence d'échantillonnage du signal.

Estimation de A(8) lors d'une intervention en entreprise

$a_{hv\text{échantillon}}$, $T_{\text{échantillon}}$ et $A(8)_{\text{échantillon}}$ sont les grandeurs relatives aux mesures effectuées sur une partie de la journée de travail. En particulier, $T_{\text{échantillon}}$ correspond à la durée sur laquelle la valeur totale de vibration de l'échantillon $a_{hv\text{échantillon}}$ est calculée.

$a_{hv\text{estimé}}$, $T_{\text{estimé}}$ et $A(8)_{\text{estimé}}$ sont les estimations des grandeurs inconnues a_{hv} , T et $A(8)$ relatives à la journée de travail complète.

- Estimation selon la méthode classique : $A(8)_{\text{estimé}}$ est habituellement calculée à partir de l'équation 1 comme suit :

$$4 \quad A(8)_{\text{estimé}} = a_{hv\text{échantillon}} \cdot \sqrt{\frac{T_{\text{estimé}}}{T_0}} \quad (m.s^{-2})$$

Installation de linteaux sur une toiture avec un cloueur pneumatique portatif.

↓ TABLEAU 1
Grandeurs caractéristiques de l'exposition quotidienne réelle du baliste, habituellement inconnues lors d'une intervention et que l'on cherche à estimer à partir d'un échantillon mesuré lors d'une intervention en entreprise.

TÂCHE DE TRAVAIL JOURNALIÈRE RÉELLE				
a_{hv}	T	A(8)	R	$A_r(8)$
($m.s^{-2}$)	(s)	($m.s^{-2}$)	(-)	($m.s^{-2}$)
2,1	3500	0,7	310	0,041

$a_{h\text{échantillon}}$	$T_{\text{échantillon}}$	$A(8)_{\text{échantillon}}$	$R_{\text{échantillon}}$	$A_r(8)_{\text{échantillon}}$
($m.s^{-2}$)	(s)	($m.s^{-2}$)	(tirs)	($m.s^{-2}$)
2,6	33,5	0,089	5	0,040

↑ **TABLEAU 2**
Grandeurs caractéristiques de l'échantillon mesurées lors de l'intervention en entreprise.

• Estimation selon la méthode alternative :

Selon la nature de la tâche de travail, il est parfois possible de connaître le nombre de répétitions (R) des chocs pendant la tâche de travail mesurée $R_{\text{échantillon}}$ et pendant la journée de travail complète $R_{\text{estimé}}$. $A(8)_{\text{estimé}}$ peut alors être calculée à partir de l'équation ⑤ comme suit :

$$\textcircled{5} \quad A(8)_{\text{estimé}} = \sqrt{R_{\text{estimé}}} \cdot A_r(8)_{\text{échantillon}} \quad (m.s^{-2})$$

$A_r(8)_{\text{échantillon}}$ ($m.s^{-2}$) représente l'exposition ou la dose vibratoire moyenne reçue par le salarié pour chaque choc r lors de l'échantillon. Elle est égale à la dose qui serait reçue pour chacun des $R_{\text{échantillon}}$ chocs de l'échantillon s'ils étaient tous identiques :

$$\textcircled{6} \quad A_r(8)_{\text{échantillon}} = \frac{A(8)_{\text{échantillon}}}{\sqrt{R_{\text{échantillon}}}} \quad (m.s^{-2})$$

Exemple d'intervention :
balisticien utilisant une arme à feu

Protocole expérimental

Dans un laboratoire de balistique, les vibrations générées par les tirs d'un fusil d'assaut automatique avec des munitions de calibre 7,62 mm ont été mesurées. Un accéléromètre piézoélectrique tri-axe a été fixé rigidement sur le corps du fusil. Les signaux d'accélération ont été enregistrés avec un frontal d'acquisition à une fréquence d'échantillonnage de 6 400 Hz.

Informations sur la tâche de travail

La tâche de travail habituelle du balisticien consiste à tirer « en mode semi-automatique (S-A) » ou « en rafale (R) ».

L'opérateur estime qu'il utilise le fusil d'assaut une heure et demie par jour (5 400 s). Il estime également tirer environ 300 balles par jour.

La réalité de l'exposition aux vibrations sur la journée complète, inconnue lors d'une intervention habituelle mais connue dans le cadre de cette étude, est présentée dans le *Tableau 1*.

Échantillon de la tâche de travail

Lors de l'intervention, des mesures ont été uniquement effectuées sur une période durant laquelle 5 balles ont été tirées en mode semi-automatique (S-A) en 33,5 s, pour ne pas trop interférer avec l'activité du balisticien.

La *Figure 1* présente la variation temporelle de l'accélération mesurée lors de l'intervention. Pour des raisons de lisibilité, seule l'accélération suivant l'axe y de l'accéléromètre est présentée (zone orange). Les vibrations de la tâche de travail complète, connues uniquement dans le cadre de cette étude, sont également représentées à titre indicatif (zone grise).

Le *Tableau 2* présente les valeurs associées à l'échantillon mesuré.

Estimations de la dose vibratoire journalière

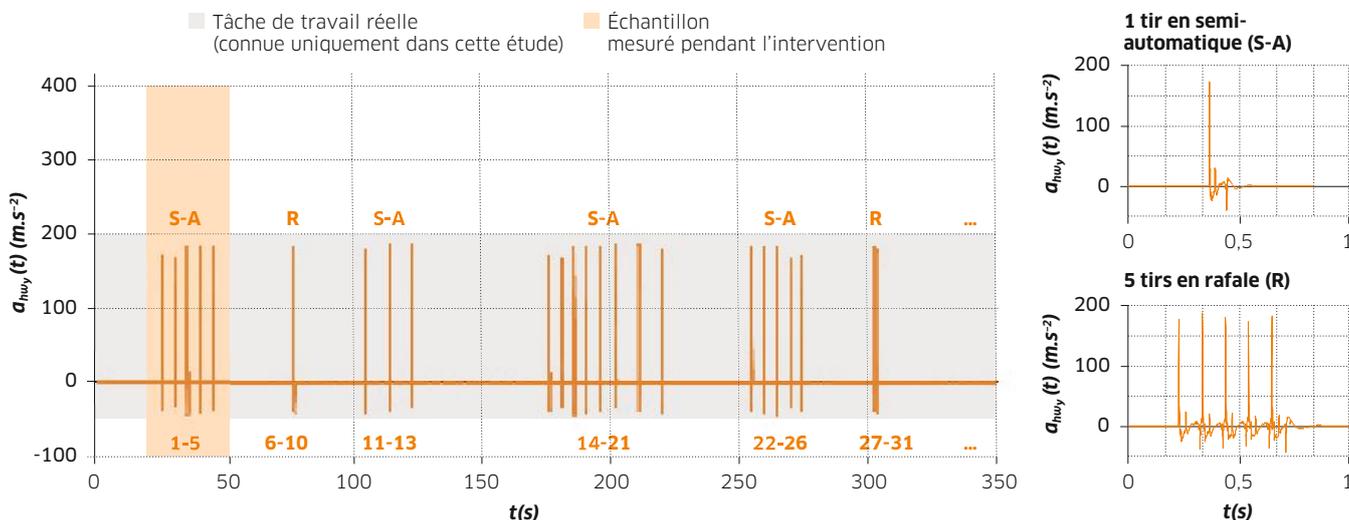
Le *Tableau 3* présente les estimations de la dose réelle à partir de l'échantillon selon la méthode classique et selon la méthode alternative.

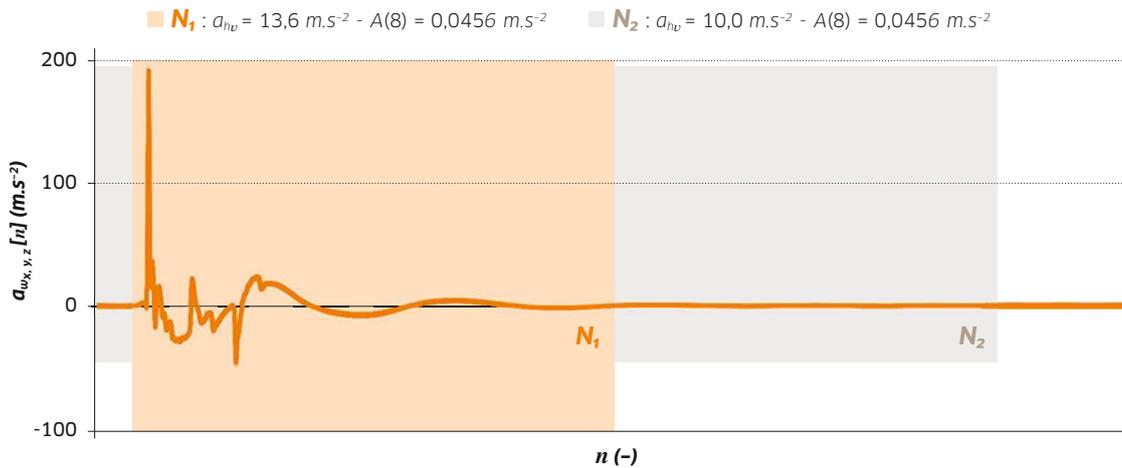
Discussion

Les équations ①, ② et ③ montrent que la valeur totale de vibration a_{hw} d'un signal impulsionnel varie avec son nombre de points d'échantillonnage N et donc avec la durée pendant laquelle il a été mesuré (Cf. *Figure 2*).

Ce n'est pas le cas de $A(8)$ dont la valeur ne varie pas avec le nombre de points du signal.

↓ **FIGURE 1**
Variations temporelles de l'accélération dans la direction sur le corps du fusil. À gauche : Portion du signal d'accélération mesuré durant une journée. À droite : Zoom du signal pour les deux types de tirs. Les pics visibles sur ces graphes correspondent chacun à un tir.





← FIGURE 2
Variation de a_{hv} en fonction du nombre de points d'échantillonnage N d'un signal impulsionnel. N est proportionnel à la durée du signal. La valeur de $A(8)$ ne varie pas.

Lorsque seule la durée d'exposition totale quotidienne $T_{estimé}$ peut être déterminée à partir des informations sur la tâche de travail, l'équation 4 montre que $A(8)_{estimé}$ dépend de $a_{hv\text{échantillon}}$. $A(8)_{estimé}$ est alors particulièrement sensible aux conditions de l'échantillonnage : émission de la machine, régularité de la cadence de travail tout au long de la journée. C'est le cas dans la méthode d'estimation classique de $A(8)$.

Lorsque les nombres de chocs de l'échantillon $R_{\text{échantillon}}$ et de la journée entière $R_{estimé}$ peuvent être déterminés à partir des informations sur la tâche de travail quotidienne, les équations 5 et 6 montrent que $A(8)_{estimé}$ dépend uniquement de la dose $A(8)_{\text{échantillon}}$. $A(8)_{estimé}$ est alors insensible à la régularité de la cadence de travail en dehors de l'échantillon. C'est le cas dans la méthode d'estimation alternative de $A(8)$.

En pratique, les conditions d'intervention ne sont pas toujours maîtrisées ; $a_{hv\text{échantillon}}$ varie au cours de la journée en fonction de la production (Cf. Figure 2). L'hypothèse de représentativité de l'échantillon n'est pas toujours satisfaite (Cf. Tableaux 1 et 3). $T_{estimé}$ est également difficile à déterminer, car elle représente la durée réelle d'exposition aux vibrations. Elle peut être très différente de la durée d'utilisation de la machine. L'estimation de l'exposition quotidienne aux vibrations $A(8)_{estimé}$ est alors fortement biaisée (Cf. Tableau 3).

Dans cet exemple, l'estimation de l'exposition vibratoire quotidienne $A(8)_{estimé}$ avec la méthode alternative conduit à des valeurs plus proches de celles de la tâche réelle que lorsque la méthode d'estimation classique est utilisée (Cf. Tableaux 1 à 3). Cela vient du fait que l'estimation du nombre de tirs quotidien $R_{estimé}$ par le balisticien est meilleure que celle de la durée d'exposition $T_{estimé}$. Plus généralement, lorsque cela est possible, l'estimation du nombre total de chocs $R_{estimé}$ est plus facile à réaliser et souvent bien plus précise que $T_{estimé}$. La dose vibratoire moyenne reçue par choc

MÉTHODE CLASSIQUE			MÉTHODE ALTERNATIVE			
$a_{hv\text{échantillon}}$	$T_{estimé}$	$A(8)_{estimé}$	$R_{estimé}$	$R_{\text{échantillon}}$	$A(8)_{\text{échantillon}}$	$A_r(8)_{estimé}$
(m.s ⁻²)	(s)	(m.s ⁻²)	(tirs)	(tirs)	(m.s ⁻²)	(m.s ⁻²)
2,6	5 400	1,1	300	5	0,090	0,7

lors de l'échantillon $A_r(8)_{\text{échantillon}}$ est aussi souvent représentative de l'ensemble des chocs. $A(8)_{estimé}$ est alors plus proche de l'exposition quotidienne réelle.

Conclusions

L'exemple proposé montre que la méthode d'estimation de l'exposition quotidienne aux vibrations $A(8)$ qui prend en compte le nombre de répétitions des chocs conduit à une exposition plus proche de l'exposition réelle que la méthode standardisée. Cela a également été le cas pour d'autres situations : clés à chocs, cloueurs, etc. Cette méthode facilite également la mise en place de solutions techniques de prévention, en reliant l'exposition de l'opérateur à la production plutôt qu'à sa cadence de travail. Elle est à privilégier pour évaluer le risque créé par des chocs répétés sur le lieu de travail, dès lors que les estimations du temps d'exposition sont sujettes à caution. Pour une journée type, la comparaison de la dose vibratoire journalière aux seuils réglementaires devient plus précise. ●

↑ TABLEAU 3
Estimations de la dose vibratoire journalière effectuées selon la méthode classique (équation n° 4) et selon la méthode alternative (équations n° 5-6) à partir de l'échantillon de la tâche de travail mesurée pendant l'intervention.

BIBLIOGRAPHIE

[1] NORME ISO 5349-1 – Vibrations mécaniques. Mesurage et évaluation de l'exposition des individus aux vibrations transmises par la main. Partie 1 : Exigences générales. Genève, ISO, 2001. Accessible sur : <https://www.iso.org/fr/standard/32355.html> (document payant).

[2] NORME ISO 5349-2 – Vibrations mécaniques. Mesurage et évaluation de l'exposition des individus aux vibrations transmises par la main. Partie 2 : Guide pratique pour le mesurage sur le lieu de travail. Genève, ISO, 2001. Accessible sur : <https://www.iso.org/fr/standard/27511.html>

[3] IFA REPORT – Hand-arm vibration: Exposure to isolated and repeated shock vibrations. Review of the international expert. Pékin, Workshop 2015.

LES CARACTÉRISTIQUES VIBRATOIRES D'OUTILS DE REDRESSEMENT ET DE FORMAGE ACTIVÉS PAR ULTRASONS

Le dressage et le formage de pièces métalliques sont des tâches typiques et habituelles dans les industries de la construction navale. Elles exposent les chaudronniers à des niveaux élevés de vibrations entraînant des risques pour la santé (troubles musculosquelettiques et syndromes vasculaires). Cet article relate la démarche d'accompagnement d'une entreprise dans l'évaluation du martelage activé par ultrasons comme solution alternative aux outils classiques de frappe. Des mesures vibratoires ont été réalisées sur le terrain. Elles ont été post-traitées en pondérant les signaux par deux filtres différents : le filtre réglementaire et le filtre vasculaire.

DIDIER Aoustin
Caisse d'assurance retraite et de la santé au travail (Carsat) de Bretagne

Contexte

Pour obtenir la forme finale d'un élément ou d'une pièce métallique, il est fréquent d'effectuer des opérations de dressage ou de formage. Ces activités sont courantes dans la construction aéronautique et navale. Elles sont classiquement réalisées par des procédés de martelage qui utilisent différents outils :

- une masse et une chasse à parer ;
- un marteau burineur pneumatique monté sur chariot ;
- un marteau à river pneumatique.

Ces opérations peuvent exposer les travailleurs à des niveaux sonores et vibratoires élevés. Une technologie émergente sur le marché est le marteau activé par ultrasons [1]. Un générateur haute fréquence alimente un émetteur piézoélectrique

généralisant des ondes mécaniques. Celles-ci sont amplifiées à la sonotrode et cette énergie est ensuite transmise à un média, qui est constitué d'impacteurs de type aiguille, pour les opérations de redressage-formage.

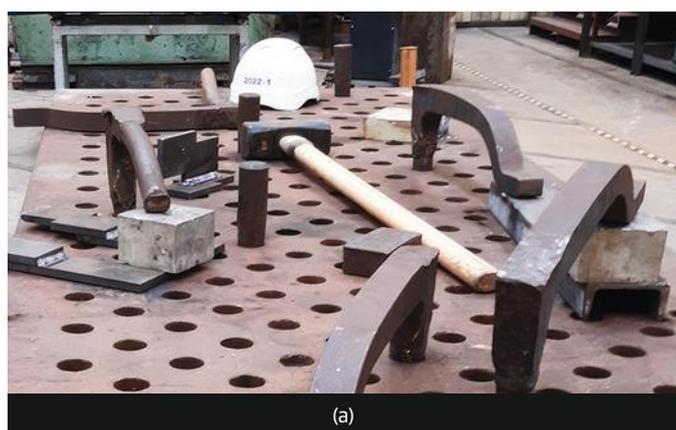
Pour accompagner une entreprise de construction navale dans sa démarche de prévention lors d'essais de qualification d'un procédé de martelage activé par ultrasons, des mesures pour caractériser les émissions vibratoires de cette technologie ont été réalisées et comparées à celles émises par des outils conventionnels.

Matériels et méthode

Outils testés et conditions d'essais

Dans un premier temps, la technique de martelage manuel avec masse et chasse à parer a été testée (Cf. Figure 1).

↓ FIGURE 1
Masse (a)
et chasse
à parer (b).



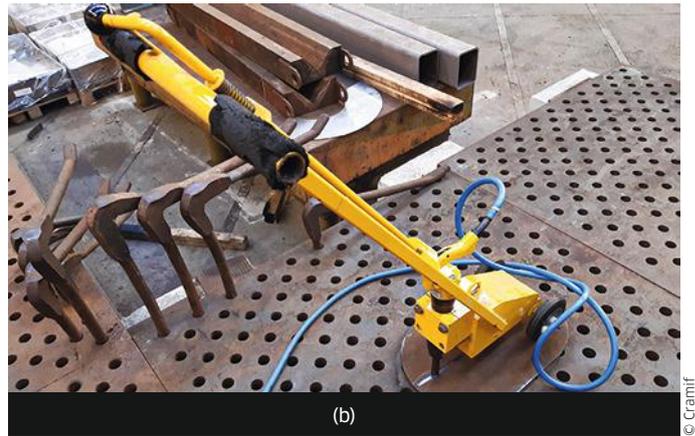
(a)



(b)



(a)



(b)

↑ FIGURE 2
Marteau à river
Atlas Copco
RRH 12 (a)
et marteau
burineur
Atlas Copco
RRC 75 B-01 (b).



(a)



(b)

FIGURE 3 →
Marteaux par
ultrasons :
Sonats Stress
Voyager PR10 avec
embout ER18-03
(a) et Sonats
Nomad (b).

Ensuite, les mesures ont porté sur l'émission vibratoire d'un marteau à river et d'un marteau burineur sur chariot (Cf. Figure 2).

Enfin, des mesures d'émission vibratoire de deux marteaux activés par ultrasons ont été effectuées (Cf. Figure 3).

Les pièces utilisées étaient constituées d'éléments métalliques en acier ou en aluminium, bridés sur un marbre d'essai dans l'atelier de chaudronnerie : (i) tôles d'acier et d'aluminium; et (ii) pièces en acier mécano-soudées.

Métrie

Les mesures des vibrations transmises à la main ont été réalisées conformément aux normes NF EN ISO 5349-1 et NF EN ISO 5349-2 [2-3], à l'aide d'un accéléromètre triaxial rigidement fixé à la poignée de la machine, au plus près de la paume de la main. Le conditionnement du signal de notre accéléromètre triaxial (modèle 356B20, PCB Piezotronics) et l'acquisition des données de vibration ont été réalisés à l'aide d'un frontal d'acquisition (Scadas XS, Siemens) avec une fréquence d'échantillonnage de 2560 Hz.

Traitement des données

→ Pondération fréquentielle des signaux vibratoires mesurés

Les signaux mesurés sur les trois axes sont pondérés en fréquence selon le facteur de pondération W_h tel que défini par la norme NF EN ISO 5349-1 [2]. Les accélérations pondérées correspondantes sont notées a_{hwx} , a_{hwy} et a_{hwz} .

Le fascicule de documentation FD ISO/TR 18570 [4] définit une méthode complémentaire de mesure des vibrations transmises aux mains. Celle-ci vise à améliorer l'évaluation des risques de troubles vasculaires (syndrome des doigts blancs nommé syndrome de Raynaud). Ce fascicule définit notamment une pondération fréquentielle W_p (Cf. Figure 4) pour filtrer les accélérations mesurées dans les trois axes x, y et z. Les accélérations pondérées correspondantes sont notées dans ce cas a_{px} , a_{py} et a_{pz} . Les pondérations W_h et W_p sont tracées en fonction de la fréquence, sur la Figure 4. Alors que l'atténuation induite par le filtre W_h décroît à partir de 20 Hz (elle décroît de 6 dB/octave), pour le filtre W_p , il n'y a pratiquement pas d'atténuation pour les fréquences se situant entre 50 Hz et 400 Hz (coefficient de pondération proche de l'unité). Ainsi, les accélérations filtrées avec le filtre W_h prennent majoritairement en compte l'énergie du signal en basses fréquences (inférieures à quelques dizaines de Hertz), alors que celles filtrées par le filtre W_p minimisent ces basses fréquences et favorisent la prise en compte des plus hautes fréquences.

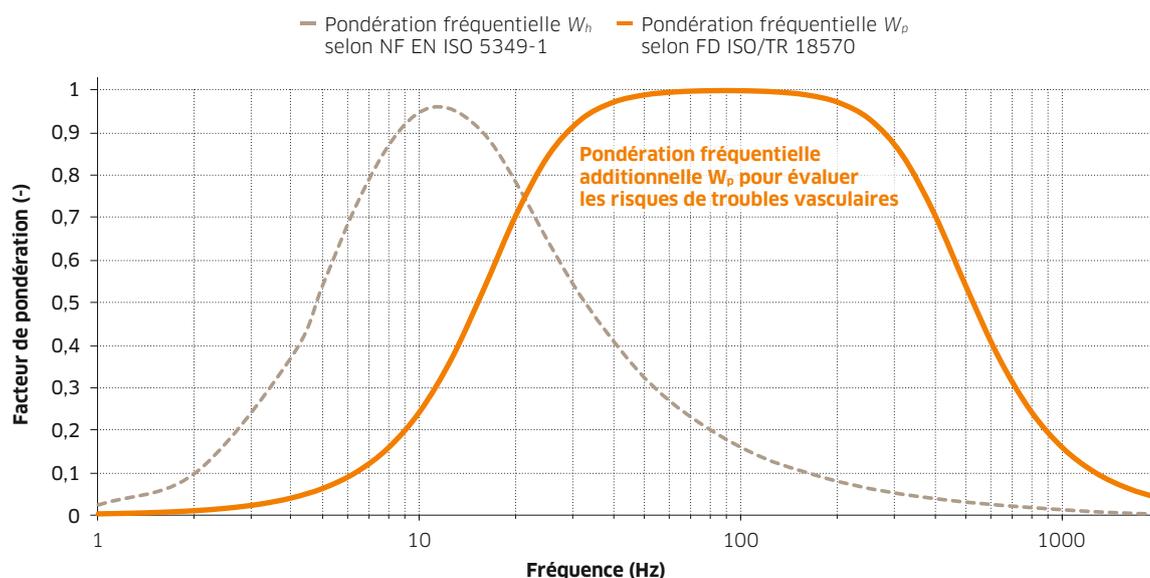
→ Détermination des niveaux d'émission vibratoire

Le niveau d'émission vibratoire a_{hv} calculé en fonction des accélérations pondérées par le filtre W_h s'écrit selon l'expression :

$$a_{hv} = \sqrt{a_{hwx}^2 + a_{hwy}^2 + a_{hwz}^2}$$

De même, le niveau d'émission vibratoire a_{pv} calculé en fonction des accélérations pondérées par le filtre W_p s'écrit selon l'expression suivante :

$$a_{pv} = \sqrt{a_{px}^2 + a_{py}^2 + a_{pz}^2}$$



← FIGURE 4
Courbes de pondérations W_h et W_p .

Résultats

Niveaux d'émission vibratoire des outils conventionnels

Les niveaux d'émission vibratoire des outils classiques utilisés par cette entreprise de construction navale pour le redressage et le formage des pièces ont été calculés (Cf. Tableau 1).

Remarque : seul le niveau pondéré avec le filtre W_h est disponible, car seul le niveau calculé selon la norme ISO-5349 [2] a été sauvegardé et pas les données brutes qui auraient pu permettre un calcul du niveau selon FD ISO/TR 18570 [4].

Niveaux d'émission vibratoire des marteaux à ultrasons

Les essais avec les machines de martelage par ultrasons ont été réalisés sur des tôles d'aluminium et d'acier, plusieurs mois après les essais sur machines conventionnelles. Les situations de travail évaluées ne sont donc pas *stricto sensu* identiques à celles rencontrées lors des mesures conventionnelles. La comparaison entre les niveaux d'émission vibratoire de ces machines ultrasons et des machines conventionnelles doit donc se faire avec prudence. Néanmoins, il est possible de comparer leurs ordres de grandeur. Par ailleurs, il est possible de comparer les différentes machines à ultrasons entre elles, et de connaître également l'influence sur le niveau d'émission vibratoire de telle ou telle option (tête à ultrasons). Les niveaux d'émissions vibratoires des outils de martelage activés par ultrasons testés pour le redressage et le formage des pièces sont présentés ci-contre (Cf. Tableau 2).

Discussion

Par rapport aux outils conventionnels, les résultats indiquent que les outils de martelage activés par ultrasons réduisent globalement les niveaux d'émission vibratoire (Cf. Tableaux 1 et 2). Cependant,

il existe de fortes variations selon le type de tête et d'embout utilisé pour une même pièce martelée avec des facteurs allant de 1 à 4 (Cf. Tableau 2). Pour les outils à ultrasons les plus vibrants, cela conduit à limiter les durées d'utilisation à un peu plus de 2 heures pour atteindre la valeur du seuil réglementaire d'action fixée à $2,5 \text{ m.s}^{-2}$. Des analyses complémentaires montrent un contenu

CONFIGURATION MESURÉE	NIVEAU VIBRATOIRE (m.s^{-2})
	a_{hv}
Marteau à river Atlas Copco RRH12	6,3
Marteau burineur Atlas Copco RRC 75B-01	3,3
Chasse à parer (7 coups – durée : 15 s)	12,9
Masse (5 shots – durée : 9 s)	21,9

↑ TABLEAU 1 Niveaux d'émission vibratoire des outils conventionnels.

CONFIGURATION MESURÉE	NIVEAU VIBRATOIRE (m.s^{-2})	
	a_{hv}	a_{pv}
Tête PR10, tôle d'aluminium	4,6	26,0
Tête PR10, pièce en acier	4,8	28,1
Tête PR17, pièce en acier, poignée principale	1,0	9,5
Tête PR17, tôle d'aluminium, poignée principale	1,2	13,1
Tête PR17, tôle d'aluminium, accéléromètre sur la tête	1,5	14,4
Tête PR17, pièce en acier, accéléromètre sur la tête	1,3	14,8
Tête PR13, tôle d'aluminium	2,4	10,4
Tête PR13, tôle d'acier	1,7	13,1
Nomad, tôle d'aluminium, poignée arrière	4,7	14,6
Nomad, tôle d'acier, poignée arrière	4,9	23,1
Nomad, tôle d'aluminium, accéléromètre sur la tête	3,7	10,2
Nomad, tôle d'acier, accéléromètre sur la tête	4,0	18,7

↑ TABLEAU 2 Niveaux d'émission vibratoire des outils de martelage activés par ultrasons.



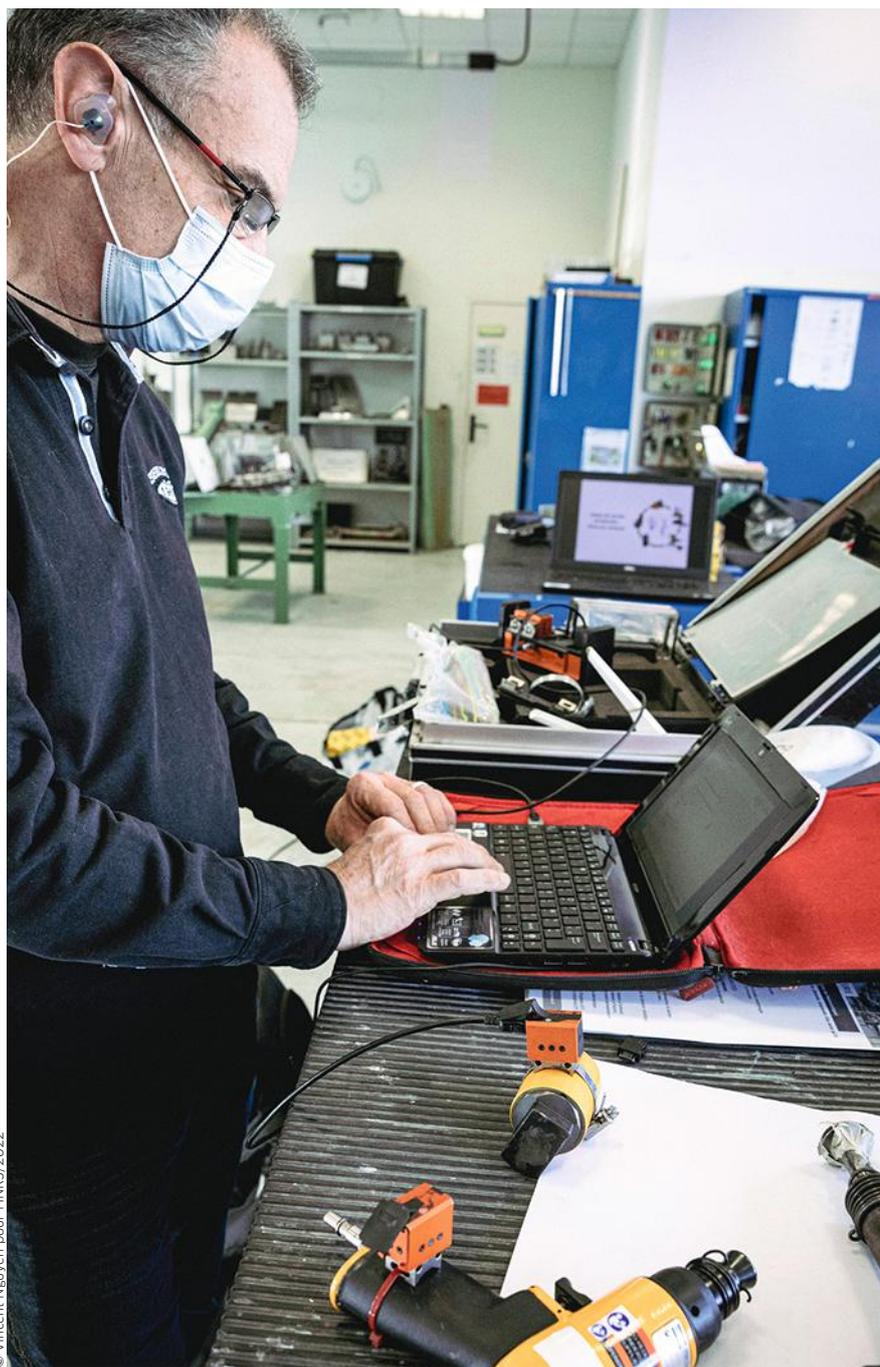
spectral important dans les hautes fréquences (50 à 500 Hz), ce qui explique les plus fortes valeurs de a_{pu} par rapport à a_{hv} .

De plus, des échanges avec l'entreprise ont montré que les tests de qualification des outils de martelage activés par ultrasons, face aux outils de dressage conventionnels, n'ont pas donné satisfaction en termes d'efficacité pour réaliser les tâches de formage ou martelage. Les opérateurs n'ont pas pu retrouver la même qualité de finition. Une plus longue adaptation et un meilleur entraînement à l'utilisation des machines à ultrasons seraient nécessaires, avant de conclure sur l'intérêt de telles machines pour ces opérations de formage ou de martelage.

Conclusions

La plupart des essais menés avec les marteaux activés par ultrasons indiquent des réductions des niveaux d'émission vibratoire lors du dressage et du formage des pièces métalliques. Malgré cela, cette technologie émergente de formage ne réduit pas dans tous les cas les vibrations en deçà des valeurs réglementaires. D'autre part, on observe que ces outils génèrent des vibrations haute fréquence significatives. De plus, les essais de ces nouvelles machines n'ayant pas donné satisfaction à l'entreprise de construction navale en termes de production, les procédés classiques ont pour le moment été conservés.

Des essais complémentaires ont été réalisés pour la tête PR10, montée sur le marteau par ultrasons Stress Voyager, chez le fabricant dans des conditions opérationnelles plus faciles à mettre en œuvre, plus reproductibles et mieux maîtrisées qu'en situation réelle. Néanmoins, les pièces travaillées étaient similaires à celles rencontrées dans les chantiers navals. Il a été constaté une réduction nette des niveaux d'émission vibratoire par rapport à ceux des machines conventionnelles. Ces derniers essais ouvrent donc des perspectives plutôt favorables pour l'adoption de ces nouvelles technologies dans les années à venir. ●



© Vincent Nguyen pour l'INRS/2022

BIBLIOGRAPHIE

[1] EUROPE TECHNOLOGIE GROUP – Procédé STRESSONIC® – Traitement de surface par impacts SONATS. Accessible sur : <https://sonats-et.com/stressonic-traitement-mecanique-par-impacts>

[2] NORME NF EN ISO 5349-1 – Vibrations mécaniques. Mesurage et évaluation de l'exposition des individus aux vibrations transmises par la main. Partie 1 : Exigences générales. Afnor, 2002. Accessible sur : <https://m.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/> (document payant).

[3] NORME NF EN ISO 5349-2 – Vibrations mécaniques. Mesurage et évaluation de l'exposition des individus aux vibrations transmises par la main.

Partie 2 : Guide pratique pour le mesurage sur le lieu de travail. Afnor, 2001. Accessible sur : <https://m.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/> (document payant).

[4] FASCICULE DE DOCUMENTATION FD ISO/TR 18570 – Vibrations mécaniques. Mesurage et évaluation de l'exposition des individus aux vibrations transmises par la main. Méthode supplémentaire pour l'évaluation du risque de troubles vasculaires. Afnor, 2018. Accessible sur : <https://m.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/> (document payant).

Capteurs de vibrations installés pour mesurer les vibrations de marteaux à riveter en classe de lycée professionnel.

ÉTUDE PRÉLIMINAIRE SUR L'ACTIVATION ET L'ANISOTROPIE DU MUSCLE DANS LA MODÉLISATION DES VIBRATIONS MAIN-BRAS

SIMON VAUTHIER, CHRISTOPHE NOËL
INRS,
département
Ingénierie des
équipements
de travail

JÉRÔME CHAMBERT, EMMANUELLE JACQUET
Université
de Franche-
Comté, CNRS,
institut
FEMTO-ST

NICLA SETTEMBRE
Département
de chirurgie
vasculaire,
CHRU Nancy,
Université de
Lorraine

HA HIEN PHUONG NGO, JEAN-LUC GENNISSON
BioMaps,
Université
Paris-Saclay,
CEA, CNRS,
Inserm

EMMANUEL FOLTÈTE
Supmicrotech,
CNRS, institut
FEMTO-ST

Les efforts de poussée et de serrage exercés par un opérateur pour tenir ou guider une machine ont une influence sur le niveau de vibrations transmises à la main. Une exposition prolongée à de forts niveaux présente un risque d'apparition du syndrome des vibrations main-bras. Ainsi, la compréhension des phénomènes impliqués dans la transmission des vibrations est un enjeu important dans la prévention des pathologies d'origine vibratoire. À cette fin, un modèle numérique de main est développé et cet article présente des premiers résultats issus de son exploitation.

Introduction

En France, environ 2,2 millions de salariés sont exposés à des vibrations transmises aux membres supérieurs. Or, une exposition prolongée à de forts niveaux vibratoires peut engendrer des troubles divers, regroupés sous la dénomination de syndrome des vibrations main-bras [1]. C'est pourquoi, la dose vibratoire journalière pouvant être reçue par les travailleurs est limitée par le Code du travail. L'évaluation réglementaire de cette dose [2] souffre néanmoins de lacunes : les efforts de serrage et de poussée exercés par l'opérateur ne sont pas pris en compte, alors même qu'ils influent sur la réponse dynamique du système main-bras.

Pour mieux comprendre l'influence de ces efforts de serrage ou de poussée sur la dose vibratoire, la propagation des vibrations dans des régions spécifiques de la main (muscles, tendons, chair, peau, par exemple) a été modélisée en laboratoire. À cette fin, un modèle de main basé sur la méthode des éléments finis a été développé. Ce modèle permet de simuler la réponse de la main au serrage et à la poussée pour différents niveaux d'effort, puis de calculer la réponse dynamique de la main aux vibrations.

L'une des premières étapes du développement fut de mesurer et d'inclure dans la modélisation la rigidification mécanique des muscles, liée à leur contraction associée à l'effort de serrage (plus on serre, plus le muscle devient raide en réponse au mécanisme d'activation musculaire par le système nerveux central). Pour caractériser l'augmentation de la raideur des muscles qui en découle,

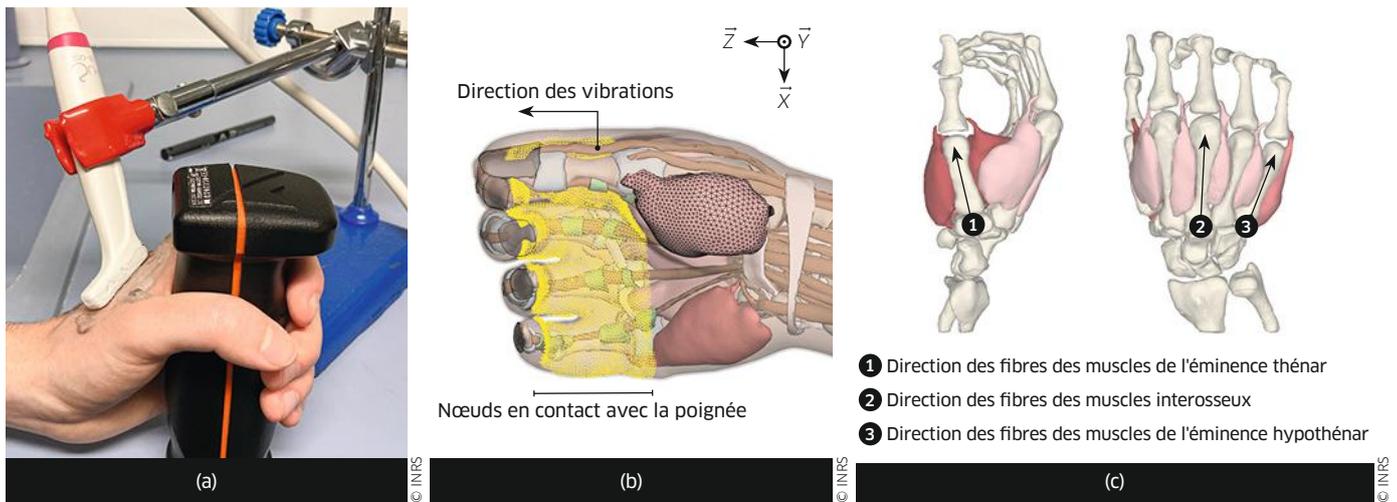
il existe une technique particulière d'imagerie médicale appelée élastographie ultrasonore (*Supersonic Shear Imaging, SSI*) [3]. Cette technique a été utilisée sur un des muscles de la main, le premier muscle interosseux dorsal (PMID) dans plusieurs conditions d'effort de serrage. Les muscles sont formés de fibres. La raideur du muscle dans la direction de ces fibres musculaires est différente de sa raideur dans la direction perpendiculaire aux fibres ; on parle d'anisotropie. L'élastographie SSI peut estimer les raideurs du muscle parallèlement et perpendiculairement à la direction des fibres musculaires. Les mesures ainsi faites ont été exploitées pour en déduire les lois de comportement mécanique du muscle, dans les directions parallèles et perpendiculaires aux fibres musculaires. Les paramètres de ces lois varient en fonction de l'activation musculaire. Les objectifs de la présente étude étaient, d'une part, de démontrer la faisabilité de la démarche qui combine l'élastographie et la modélisation par éléments finis et, d'autre part, de quantifier l'influence de l'activation musculaire sur la propagation des vibrations.

Matériel et méthode

Mesure de la raideur du muscle par la technique SSI

La raideur du muscle a été mesurée à l'aide d'un scanner ultrasonore Aixplorer® en mode SSI. Un dispositif expérimental a été mis en place pour mesurer la raideur du muscle choisi (PMID) d'un sujet volontaire, serrant une poignée instrumentée





↑ FIGURE 1
 (a) dispositif permettant de mesurer la raideur par élastographie (la sonde de l'échographe est en contact avec la main) et la force de serrage (poignée noire);
 (b) modèle éléments finis de la main;
 (c) directions des fibres musculaires.

avec des capteurs d'effort (Cf. Figure 1a). L'essai s'est déroulé de la façon suivante. La force de serrage maximale du sujet est mesurée à l'aide de la poignée instrumentée (sans mesure élastographique). Une série de sept niveaux allant de 0 à 30 % de cet effort maximal mesuré est alors définie (par pas de 5 %). Ensuite, l'expérimentateur oriente la sonde ultrasonore parallèlement ou perpendiculairement aux fibres musculaires, en s'aidant de l'image du muscle visible sur l'écran de l'échographe.

Le volontaire sur lequel on a fait la mesure est un homme de 23 ans, non-fumeur et en bonne santé. Il serre la poignée de façon à atteindre une consigne d'un niveau de serrage tiré aléatoirement dans la série de sept définie précédemment. Pour cela, il ajuste son niveau de serrage qui s'affiche sur un écran. Une fois la consigne atteinte et maintenue, l'expérimentateur mesure la raideur du muscle (la mesure est quasiment instantanée et les manipulations durent une dizaine de secondes). L'opération est répétée (après une phase de repos de quelques minutes) pour chacun des sept niveaux et les deux directions de mesure. Chaque mesure permet ainsi d'obtenir une cartographie de la raideur du muscle (la raideur du muscle n'est pas constante dans tout le muscle mais peut varier spatialement). Les travaux réalisés ont permis de déterminer une raideur moyenne calculée dans une surface de $5 \times 5 \text{ mm}^2$ (Cf. Figure 2 a et b – carré blanc). Cette recherche a reçu l'autorisation du CPP n° 2022-A01616-37 en date du 7 novembre 2022.

Modélisation par éléments finis des vibrations main-bras

Le modèle des éléments finis consiste à effectuer des calculs dans un ensemble de petits éléments représentant la main; ces petits éléments forment le maillage de la main. Le maillage du modèle a été construit à partir d'images fournies par un laboratoire extérieur et acquises par imagerie par résonance magnétique (IRM) de la main d'un volontaire,

qui est un homme de 28 ans [4]. Il est constitué de tétraèdres dont les dimensions sont d'environ 1 mm. La plupart des éléments anatomiques de la main sont inclus : peau, tissus, os, ligaments, tendons, etc. (Cf. Figure 1b). Les muscles sont divisés en trois groupes : interosseux, thénar et hypothenar. À chaque groupe est associée une direction décrivant approximativement l'orientation des fibres des muscles qui composent ce groupe; elle correspond à la direction principale du métacarpe le plus proche (Cf. Figure 1c). Concernant les conditions aux limites du modèle mécanique, les nœuds du maillage en contact avec la poignée ont été encastres dans toutes les directions, à l'exception de la direction d'excitation (Cf. Figure 1b). La poignée n'est pas incluse dans le modèle. Le modèle inclut une très petite partie des os de l'avant-bras (radius et ulna) et les tissus mous environnants. Il y a donc une mobilité possible entre la zone des carpes du poignet et celle du radius et de l'ulna. Les nœuds de l'extrémité du modèle (extrémité de la petite partie de l'avant-bras prise en compte) sont libres (le bras et l'avant-bras complets sont exclus de notre modèle).

Les paramètres des lois de comportement mécanique des muscles sont déduits des mesures par élastographie. Pour les autres éléments anatomiques de la main, les propriétés mécaniques sont issues de la littérature [4]. Trois scénarios de calcul, correspondant à trois états différents des muscles, ont été considérés :

- muscles non activés (pas de serrage) et comportement mécanique supposé identique dans les directions parallèle et perpendiculaire aux fibres musculaires (le muscle est alors dit isotrope);
- activation musculaire maximale (serrage maximal) et muscles supposés isotropes;
- activation musculaire maximale (serrage maximal) et muscles supposés anisotropes, caractérisés par des propriétés mécaniques différentes dans le sens des fibres musculaires et perpendiculairement à ces fibres.

Les muscles ont une anisotropie particulière, car il y a une symétrie de rotation autour de l'axe des fibres ; ils sont dits isotropes transverses.

Pour chaque scénario de modélisation, une analyse harmonique a été menée à l'aide d'un calcul par superposition modale (base modale de 500 modes) sur la plage 10-400 Hz. Une accélération sinusoïdale dont la fréquence varie entre 10 et 400 Hz est appliquée aux nœuds du maillage en contact avec la poignée, simulant ainsi la vibration de l'outil. Les modes propres sont assimilables à la carte d'identité vibratoire d'un système mécanique. Lorsque l'on souhaite calculer la réponse à une excitation sinusoïdale d'un système dans une gamme de fréquences donnée, il est possible de calculer les modes propres dans cette gamme de fréquences (c'est la base modale), puis la réponse vibratoire se calcule à partir des modes propres précédents. De l'amortissement modal a été ajouté au système (c'est-à-dire que chaque mode s'amortit avec une constante de temps qui lui est propre. L'amortissement modal est un scalaire décroissant de 0,17 à 0,02 avec la fréquence jusqu'à 200 Hz et constant à la valeur 0,02 au-delà). C'est un outil mathématique pour tenir compte de la viscosité des tissus de la main, c'est-à-dire de leur capacité à dissiper les vibrations.

Les calculs ont été exécutés avec le logiciel de simulation par éléments finis LS-Dyna® (Ansys®).

À l'issue des simulations, l'impédance mécanique¹ du système main-bras qui a été calculée avec le modèle développé a été comparée à celle donnée dans la norme ISO 10068 [5]. Deux autres grandeurs ont été extraites des simulations : la transmissibilité des vibrations entre le point d'entrée de la poignée et un point à l'intérieur de l'index (une artère passe à cet endroit dans la réalité, bien qu'elle ne soit pas modélisée), et la moyenne des transmissibilités entre le point d'entrée et l'ensemble des nœuds du PMID. La transmissibilité vibratoire entre un point d'entrée et de sortie des vibrations est définie comme le ratio de l'accélération au point de sortie

sur l'accélération au point d'entrée. Si la transmissibilité vaut 1, alors toute la vibration à l'entrée se retrouve à la sortie; si elle est supérieure à 1, la vibration à la sortie est amplifiée.

Résultats

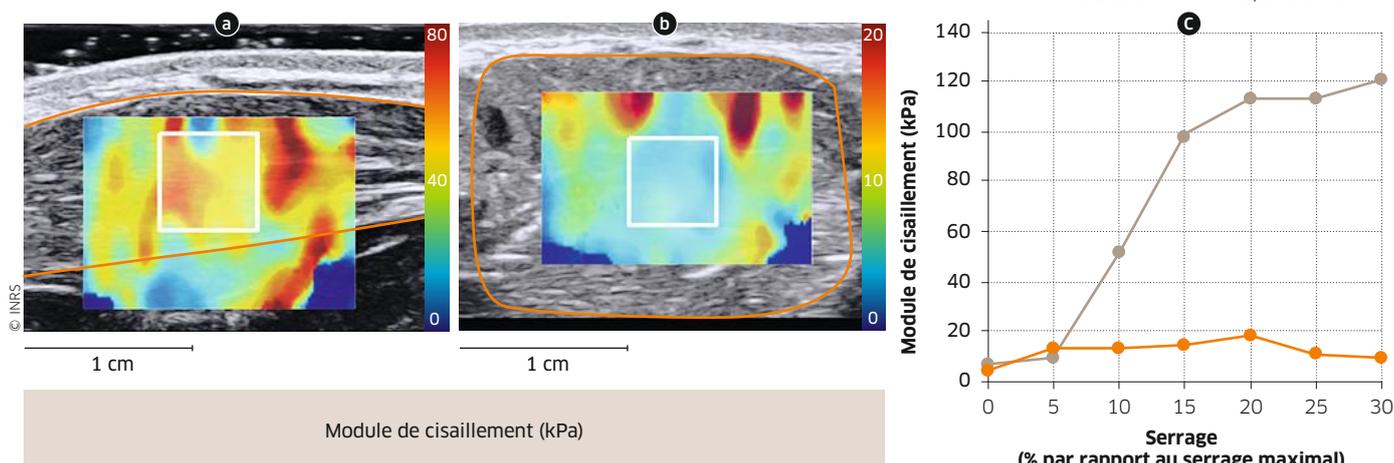
Effets de la force de serrage et de l'anisotropie du muscle sur la raideur

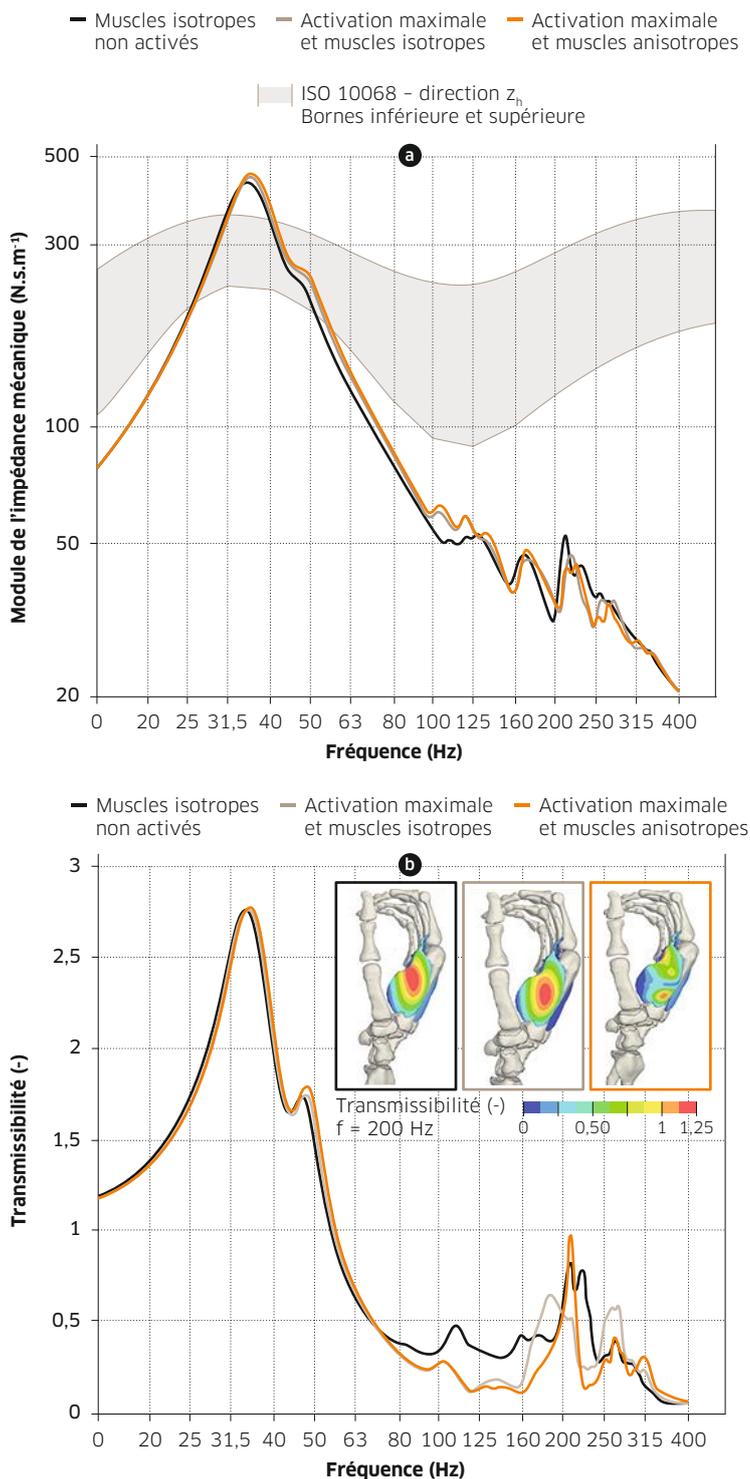
En physique des matériaux, le module de cisaillement est une grandeur utilisée pour caractériser la raideur d'un matériau. C'est le module de cisaillement qui est mesuré par élastographie ultrasonore. Les mesures par élastographie ont montré que le module de cisaillement du muscle évoluait différemment en fonction de la direction des fibres (Cf. Figure 2c). Parallèlement aux fibres, le module de cisaillement dépend fortement du serrage, et est multiplié par plus de 10 entre 0 et 30 % de force, avec une forte augmentation entre 5 et 15 %. Perpendiculairement aux fibres, le module reste approximativement constant sur toute la plage de serrage. Ces mesures ont permis d'identifier les paramètres du modèle par éléments finis.

Effets de l'activation musculaire sur l'impédance mécanique au point d'entrée du système main-bras et sur la transmissibilité locale

À partir des mesures des modules de cisaillement (Cf. Figure 2), il est possible de déduire les propriétés mécaniques du muscle et ainsi, de mettre en œuvre le modèle éléments finis. La résonance du poignet autour de 35 Hz est observable à la fois sur les simulations et sur l'impédance moyenne de la norme ISO 10068 [5] (Cf. Figure 3a). Cette impédance normalisée correspond à une impédance moyenne mesurée sur une cohorte de sujets. Aux fréquences plus élevées, les impédances simulées diffèrent de la norme. L'activation musculaire a un effet marqué au-delà de 100 Hz sur la transmissibilité à l'intérieur du muscle, changeant l'amplitude et la fréquence des pics (Cf. Figure 3b).

↓ FIGURE 2 Exemples de mesures de module de cisaillement par SSI dans le PMID : (a) parallèlement et (b) perpendiculairement aux fibres. Le fond représente l'image des tissus de la main fournie par l'échographe avec le muscle détourné en orange. Le carré blanc représente l'aire de moyennage du module; (c) moyenne des modules de cisaillement parallèlement et perpendiculairement aux muscles en fonction de la force de serrage.





↑ FIGURE 3
(a) impédances mécaniques calculées par le modèle éléments finis comparées à la norme ISO 10068; (b) transmissibilité vibratoire moyenne entre la poignée et le PMID.

Discussion – Conclusions

La technique d'élastographie SSI a permis de mesurer la raideur du premier muscle interosseux dorsal en fonction du serrage. Grâce à ces mesures, il a été démontré que la raideur dépendait fortement de l'activation musculaire et de l'orientation des fibres. Plusieurs sources d'incertitude sont apparues au cours des essais et pourraient être responsables de la potentielle dispersion entre les mesures qui seront réalisées dans le futur : l'hétérogénéité des

muscles et l'orientation de la sonde entre autres. Avant d'étendre les essais à une cohorte de sujets, une attention particulière devra donc être portée sur la nécessité de rendre le dispositif plus robuste et quantifier ces erreurs de mesure.

Les simulations ont montré que l'activation du muscle a un effet significatif sur la transmission des vibrations au-delà de 100 Hz à l'intérieur des muscles. L'écart entre les impédances calculées à l'aide du modèle et l'impédance moyenne de la norme ISO 10068 [5] est probablement dû aux nombreuses simplifications du modèle. Les prochaines étapes de la modélisation seront d'ajouter des conditions aux limites plus réalistes et des lois de comportement mécanique plus complexes prenant en compte par exemple la dissipation visqueuse des tissus mous de la main. En outre, la superposition modale présente de fortes limitations et la complexification du modèle nécessitera d'utiliser d'autres méthodes de résolution numérique.

En conclusion, il est tout à fait possible d'utiliser non seulement cette technique SSI pour mesurer la raideur des muscles en fonction du serrage, mais aussi et surtout, d'utiliser ces mesures pour alimenter un modèle par éléments finis complexe de main. Le modèle élaboré a permis de simuler la réponse dynamique de la main aux vibrations et d'estimer localement les effets de l'activation musculaire sur la propagation des vibrations à l'intérieur de la main. ●

1. L'impédance mécanique est une grandeur caractéristique d'un système mécanique (ici, la main) liée à sa résistance à transmettre la vibration.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] BOVENZI M. – Medical aspects of the hand-arm vibration syndrome. *International journal of industrial ergonomics*, 1990, 6, pp. 61-73. Accessible sur : [doi.org/10.1016/0169-8141\(90\)90051-3](https://doi.org/10.1016/0169-8141(90)90051-3)
- [2] NORME NF EN ISO 5349-1 – Vibrations mécaniques. Mesure et évaluation de l'exposition des individus aux vibrations transmises par la main. Partie 1 : Exigences générales. Afnor, 2002. Accessible sur : <https://m.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/> (document payant).
- [3] BOUILLARD K., NORDEZ A, HUG F. – Estimation of individual muscle force using elastography. *PLoS One*, 2011, 6. Accessible sur : [doi:10.1371/journal.pone.0029261](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0029261)
- [4] NOËL C. ET AL. – A multiscale approach for predicting certain effects of hand-transmitted vibration on finger arteries. *Vibration*, 2022, 5, pp. 213-237. Accessible sur : [doi:10.3390/vibration5020014](https://doi.org/10.3390/vibration5020014)
- [5] NORME ISO 10068 – Vibrations et chocs mécaniques. Impédance mécanique du système main-bras au point d'entrée (indisponible en français). Titre anglais : *Mechanical vibration and shock-mechanical impedance of the human hand-arm system at the driving point*. Genève, ISO, 2012. Accessible sur : <https://www.iso.org/fr/standard/53714.html> (document payant).

MODÉLISATION DE LA STÉNOSE ARTÉRIELLE INDUITE PAR LES VIBRATIONS TRANSMISES À LA MAIN : UN MOYEN DE PRÉVENIR LE RISQUE VIBRATOIRE VASCULAIRE ?

Les effets sur la santé des vibrations transmises au système main – bras s’installent au long cours. Il est difficile de les connaître précisément, sans l’apport d’études épidémiologiques qui peuvent s’avérer complexes à mener. De ce fait, la modélisation est de plus en plus utilisée pour prédire l’évolution du vivant. Cet article présente une modélisation de la dégradation d’une artère de la main, qui a permis d’obtenir de précieuses indications sur les conséquences délétères des vibrations, et qui pourrait *in fine* contribuer à une meilleure prévention du risque vasculaire vibratoire.

CHRISTOPHE NOËL,
MAHA REDA
INRS,
département
Ingénierie des
équipements
de travail

EMMANUELLE JACQUET
Université
de Franche-
Comté, CNRS

NICLA SETTEMBRE
Département
de chirurgie
vasculaire,
CHRU Nancy,
Université de
Lorraine

Contexte

Une exposition prolongée à des vibrations de niveau élevé transmises à la main est susceptible d’engendrer des troubles vasculaires tels que le syndrome de Raynaud d’origine vibratoire, appelé également maladie des doigts blancs (*Vibration White Finger* – en anglais VWF). Un grand nombre d’études physiologiques, histologiques et épidémiologiques [1] ont mis en évidence que la dose réglementaire d’exposition aux vibrations main – bras, évaluée selon la norme ISO 5349 [2], tend à sous-estimer les lésions vasculaires induites par les vibrations.

Afin de définir, à terme, une dose d’exposition vibratoire qui refléterait mieux ces atteintes sur les artères, des travaux ont été conduits sur la base de deux éléments de réflexion [3]. Tout d’abord, une première hypothèse a été posée selon laquelle les vibrations peuvent diminuer la contrainte de cisaillement¹ (*Wall Shear Stress* – WSS) exercée par le sang sur la couche interne de l’artère, directement en contact avec le sang. Une seconde hypothèse, induite grâce à plusieurs études dans des domaines différents de celui des vibrations [4], est qu’une baisse répétée de ce WSS pourrait entraîner un rétrécissement du diamètre de la lumière des artères des doigts (sténose artérielle). Cette sténose artérielle a été observée chez les travailleurs souffrant d’un syndrome de Raynaud d’origine vibratoire. Elle est une caractéristique, parmi d’autres,

de ce trouble vasculaire. L’approche en deux étapes a dès lors consisté à :

- évaluer la relation entre les propriétés des vibrations (fréquence, amplitude) et la diminution du WSS;
- tenter de lier cette baisse de WSS induite par les vibrations et la sténose artérielle résultante, *via* un modèle de calcul qualifié de « mécano-biologique », car il implique à la fois des notions de mécanique et de biologie des artères.

Le présent article vise à établir comment cette stratégie pourrait *in fine* ouvrir la voie à une nouvelle façon de prévenir le risque vasculaire vibratoire.

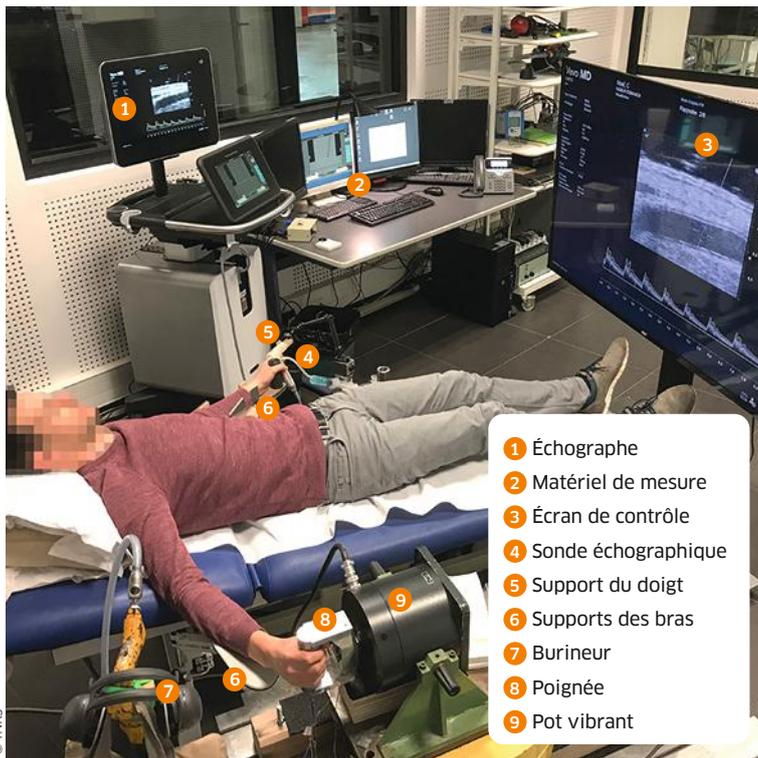
Matériel et méthode

Évaluation de la baisse du WSS induite par les vibrations

Dans la palme de la main et les doigts se trouvent des capteurs sensoriels qui permettent de ressentir les vibrations. Quand le cerveau reçoit, *via* ces capteurs biologiques, l’information qu’une vibration est entrée dans la main, il envoie un signal chimique qui cause la fermeture des très petites artères de l’ensemble des extrémités. Ainsi, quand la main gauche est vibrée, le flux sanguin de la main droite est aussi réduit. La réduction de ce débit sanguin entraîne une diminution du WSS dans l’artère de l’index, qui a été mesurée.

Un dispositif expérimental a été développé pour évaluer le WSS induit par les vibrations dans une





- 1 Échographe
- 2 Matériel de mesure
- 3 Écran de contrôle
- 4 Sonde échographique
- 5 Support du doigt
- 6 Supports des bras
- 7 Burineur
- 8 Poignée
- 9 Pot vibrant

↑ FIGURE 1
Banc d'essais pour mesurer le WSS.

artère de l'index gauche au niveau de l'articulation située entre la deuxième et la troisième phalange [5]. La main droite, elle, était soumise à des vibrations mécaniques. Cette recherche a reçu l'autorisation du CPP n° 2018-A00614-651 en date du 6 décembre 2018.

Le dispositif développé (Cf. Figure 1) était principalement constitué d'un échographe avec une grande résolution spatiale (30 micromètres) et d'un pot vibrant. Au total, 24 volontaires² en bonne santé et non-fumeurs, âgés de 19 à 39 ans (moyenne d'âge : 25,1 ans) ont participé à la campagne de mesures du WSS à température ambiante contrôlée (23 °C ± 0,5 °C). Le protocole consistait à estimer le WSS pendant trois phases consécutives de 10 secondes (s) chacune : repos, exposition aux vibrations, et retour au calme. La vibration était une accélération harmonique pure à 125 Hz pour six

amplitudes : 1, 2, 5, 10, 20 et 40 m.s⁻² en valeur efficace, non pondérée par le filtre de pondération de la norme ISO 5349 [2]. Les données brutes mesurées étaient le diamètre de l'artère obtenu avec l'échographe et la vitesse maximale du sang acquise par mesure Doppler. Diamètre et vitesse étaient ensuite introduits dans un modèle de mécanique d'écoulement de fluide pulsé pour en déduire le WSS. Les moyennes temporelles des WSS (*Time Averaged WSSs* – *TAWSSs*) sur chacune des trois phases de 10 s ont ensuite été calculées.

Modélisation de la sténose artérielle induite par les vibrations

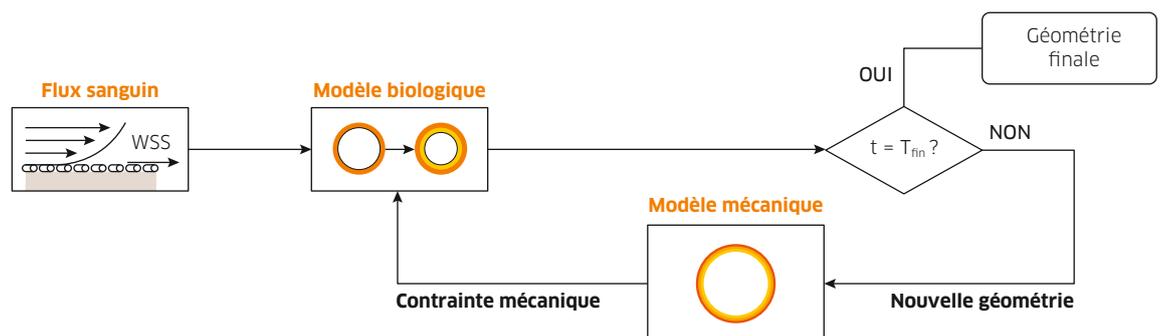
Les simulations mécano-biologiques de la sténose artérielle s'appuient sur le couplage d'un modèle d'agents (*agent-based model* – *ABM*) simulant, sur des temps longs (années d'exposition aux vibrations), certains mécanismes biologiques conduisant à la diminution du diamètre de l'artère et d'un modèle de biomécanique pour prédire les forces mécaniques à l'intérieur de l'artère (Cf. Figure 2). Chacun de ces modèles est adapté de la littérature. Pour construire le modèle biologique, nous avons formulé l'hypothèse selon laquelle la sténose artérielle résulte de la prolifération et de la migration de certaines cellules de la paroi de l'artère qui s'accumulent vers la partie la plus interne de l'artère (intima). Cette accumulation de cellules, associée à une génération excessive de collagène, tend à boucher l'artère. Le système multi-agents (ABM) décrit les phénomènes biologiques impliqués dans la sténose de l'artère au niveau cellulaire et moléculaire [6]. Ces phénomènes sont en partie influencés, d'une part par les valeurs du WSS, introduites comme données d'entrée, et d'autre part par les contraintes mécaniques dans l'artère qui sont simulées par le modèle mécanique.

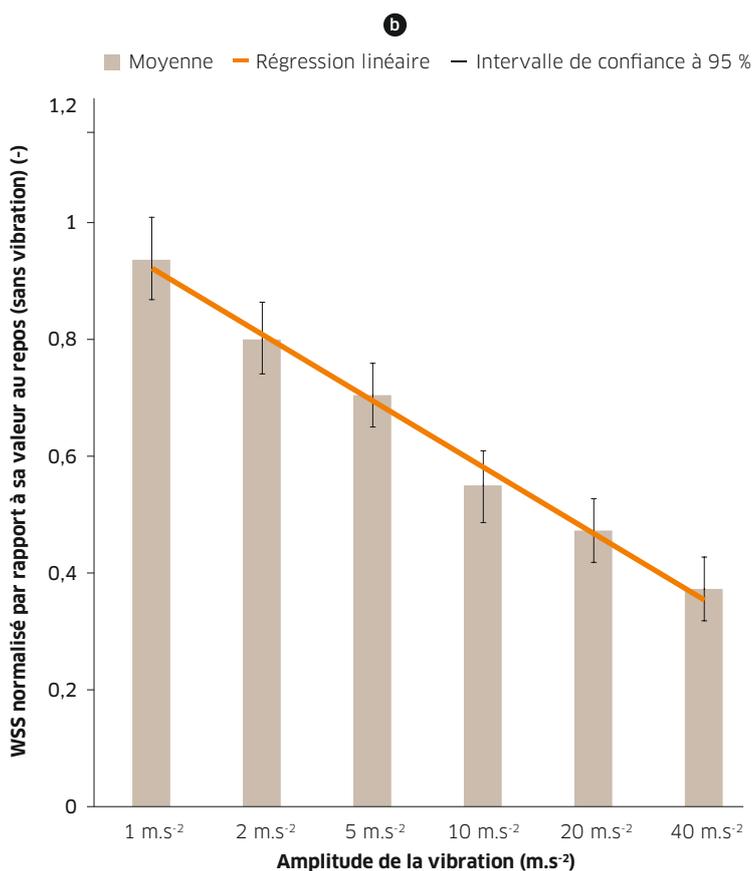
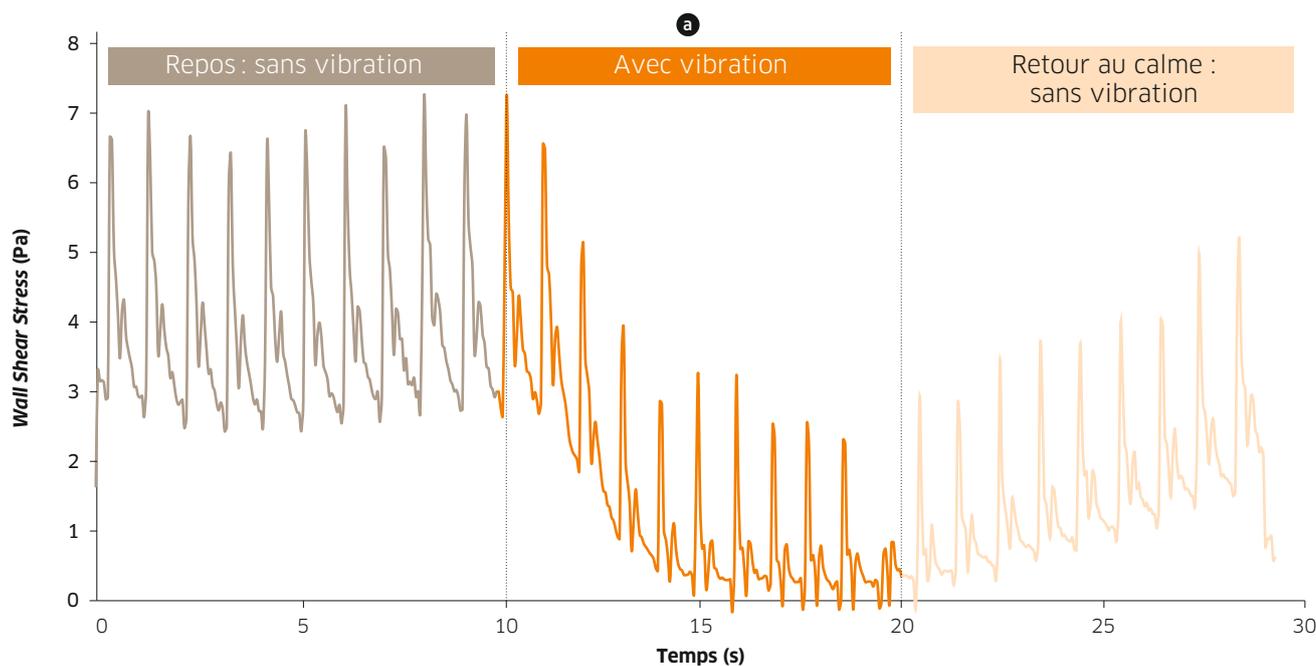
Résultats

Effet aigu des vibrations sur l'hémodynamique artérielle

La diminution du WSS relative à une exposition aux vibrations se produit quelques

FIGURE 2 →
Schéma synoptique de la modélisation mécano-biologique pour simuler la croissance artérielle chronique.





↑ FIGURE 3

Effets des vibrations sur le flux sanguin :

- (a) baisse du WSS consécutive à l'exposition à une vibration d'amplitude 40 m.s⁻² à 125 Hz;
- (b) influence de l'amplitude des vibrations sur la baisse relative de WSS.

secondes après le début de l'excitation vibratoire (Cf. Figure 3a). Les oscillations rapides (environ 1 s) observées dans ce signal correspondent au cycle systole-diastole (pouls) du sujet. La baisse du WSS peut être appréciée en regardant l'évolu-

tion temporelle de l'enveloppe de la courbe tracée (Cf. Figure 3a).

Les TAWSSs normalisés par rapport à l'état sans vibration (Cf. Figure 3b) dépendent de l'amplitude de la vibration de manière statistiquement significative. Ils suivent une loi de régression linéaire log₂ de l'amplitude de la vibration (Cf. droite orange sur la Figure 3b). Cette étude a également montré que la baisse du WSS n'est pas influencée par la fréquence des vibrations.

Réponse chronique de l'artère à l'échelle tissulaire et moléculaire due à la chute du WSS induite par les vibrations

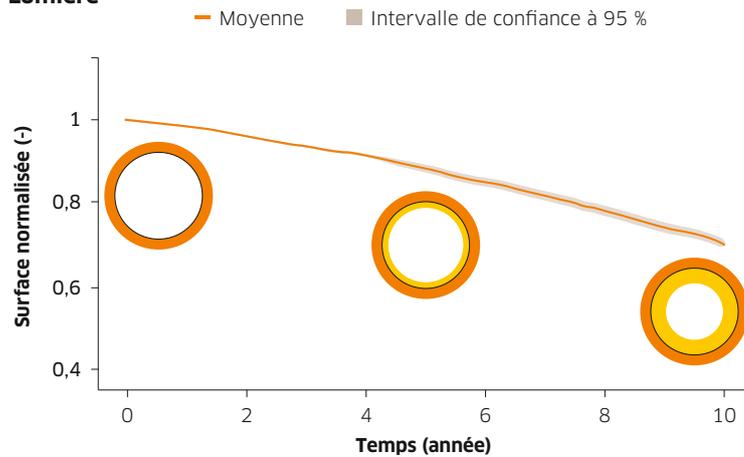
Selon le modèle mécano-biologique utilisé pour simuler le cas d'un travailleur exposé tout au long de sa carrière, la surface normalisée de la lumière artérielle (Cf. Figure 4) diminue continuellement avec le nombre d'années d'exposition aux vibrations. La réduction de cette surface est de 12 % à 5 ans et de 30 % après 10 ans d'exposition.

Abaques de prédictibilité de la sténose artérielle

Le degré de sténose artérielle (exprimé en pourcentage) est défini comme la surface de la lumière de l'artère rapportée à sa valeur initiale. L'abaque de prédiction de la sténose artérielle obtenu à l'aide des simulations mécano-biologiques (Cf. Figure 5) mentionne un degré de sténose artérielle de 20 % pour un travailleur exposé aux vibrations 2,5 heures par jour pendant 10 ans. D'après le modèle, ce même niveau de sténose est également atteint après 15 ans de travail pour une exposition quotidienne aux vibrations d'environ 1 h 10 minutes.

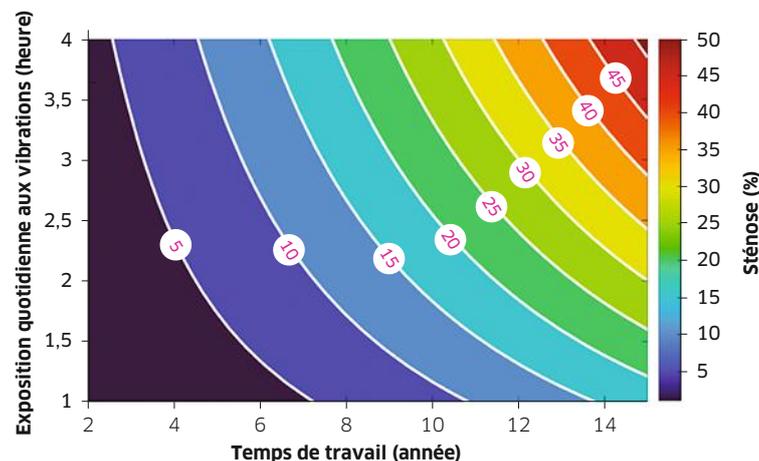


Lumière



↑ FIGURE 4

Simulation de l'évolution de la surface normalisée de la lumière artérielle au cours de la vie professionnelle lors d'une exposition aux vibrations pendant 4 heures par jour. La zone jaune correspond aux cellules de l'artère qui ont migré vers la partie interne de l'artère.



↑ FIGURE 5

Degré de sténose (%) calculé en fonction des années de vie professionnelle et de la durée d'exposition quotidienne à une vibration d'amplitude 40 m.s⁻² (valeur efficace non pondérée) à 125 Hz.

Discussion

Le stade de développement du syndrome de Raynaud d'origine vibratoire peut être classé en fonction du degré de sténose artérielle : type 0 : artère saine, type I : sténose < 50 %, type II : sténose > 50 %, type III : obstruction de l'artère, et type IV : obstruction d'artères en amont du doigt. Le modèle développé dans cette étude prévoit une sténose d'environ 30 % après 10 ans d'exposition à une vibration d'amplitude 40 m.s⁻² (non pondérée) pendant 4 heures par jour, conduisant ainsi à une sténose de type I.

Par ailleurs, la baisse de WSS est liée à l'amplitude de la vibration qui est prise en compte dans le modèle. Ainsi, en mesurant sur le terrain l'accélération émise par une machine vibrante, la chute de WSS générée par cette machine peut être calculée. Si, de plus, le cycle d'exposition quotidien aux vibrations est connu, notre modèle mécano-biolo-

gique permettra d'estimer le degré de sténose et, donc, le stade du syndrome de Raynaud lié à une exposition chronique aux vibrations.

Ce modèle prend en compte uniquement une partie des mécanismes physiopathologiques conduisant au syndrome de Raynaud d'origine vibratoire et devra être conforté par des tests complémentaires, sur artères *exo vivo* par exemple.

Conclusion

Il a été possible d'établir une relation entre l'amplitude des vibrations et la baisse du WSS. Le modèle mécano-biologique élaboré a ensuite été en mesure de prévoir la sténose artérielle chronique provoquée par ces modifications du débit sanguin. Le degré de sténose associé à l'état pathologique reste à définir. Le lien entre l'amplitude des vibrations, l'exposition quotidienne aux vibrations, la durée de vie professionnelle et la sténose qui en résulte pourra être utilisé pour élaborer une nouvelle définition de la dose vibratoire. ●

1. Il s'agit d'une contrainte liée à la viscosité d'un liquide, qui résulte ici des forces de frottement du sang sur les parois de l'artère.
2. Vingt hommes et quatre femmes ont participé aux essais. Pour les femmes, l'imagerie n'a pas bien fonctionné, car la résolution spatiale de l'échographe n'était pas assez importante au regard de la taille de leurs artères.

BIBLIOGRAPHIE

[1] FASCICULE DE DOCUMENTATION FD ISO/TR 18570 – Vibrations mécaniques. Mesurage et évaluation de l'exposition des individus aux vibrations transmises par la main. Méthode supplémentaire pour l'évaluation du risque de troubles vasculaires. Afnor, 2018. Accessible sur : <https://m.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/> (document payant).

[2] NORME NF EN ISO 5349-1 – Vibrations mécaniques. Mesurage et évaluation de l'exposition des individus aux vibrations transmises par la main. Partie 1 : Exigences générales. Afnor, 2002. Accessible sur : <https://m.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/> (document payant).

[3] NOËL C., SETTEMBRE N., REDA M., JACQUET E. – A multiscale approach for predicting certain effects of hand-transmitted vibration on finger arteries. *Vibration*, 2022, 5, pp. 213-237. Accessible sur : <https://doi.org/10.3390/vibration5020014>

[4] HUMPHREY J.D. – Vascular adaptation and mechanical homeostasis at tissue, cellular, and sub-cellular levels. *Cell Biochem. Biophys.*, 2008, 50, pp. 53-78. Accessible sur : <https://doi.org/10.1007/s12013-007-9002-3>

[5] NOËL C., SETTEMBRE N. – Assessing mechanical vibration-altered wall shear stress in digital arteries. *J. Biomech.*, 2022, 131, p. 110893. Accessible sur : <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2021.110893>

[6] REDA M., NOËL C., SETTEMBRE N. ET AL. – An agent-based model of the vibration-induced intimal hyperplasia. *Biomech. Model. Mechanobiol.*, 2022, 21, pp. 1457-1481. Accessible sur : <https://doi.org/10.1007/s10237-022-01601-5>