

Effets des positions de conduite sur l'exposition aux vibrations transmises à l'ensemble du corps

AUTEURS :

M. Amari, N. Perrin-Jegen, Département Ingénierie des Équipements de Travail, INRS

EN RÉSUMÉ

Les conducteurs d'engins mobiles sont exposés à des vibrations et à des postures défavorables susceptibles d'entraîner des troubles lombaires. Des mesures de la réponse dynamique (masse apparente et transmissibilité tête-siège) du corps exposé à des vibrations dans les directions avant-arrière, latérale et verticale ont été réalisées pour des positions pertinentes vis-à-vis des positions habituelles de conduite. Les déviations de la tête et du thorax dans le plan sagittal ont des effets importants : lors de vibrations dans les directions avant-arrière et verticale, la fréquence de résonance du corps augmente et, dans la direction verticale, la transmission des vibrations à la tête est également augmentée. Les déviations de la tête et du thorax dans le plan frontal ou horizontal ont des effets faibles ou non significatifs.

MOTS CLÉS

Vibration /
Conducteur /
Posture de travail /
Évaluation des
risques

INTRODUCTION

Les conducteurs d'engins (tracteurs, engins de chantier, chariots élévateurs...) sont exposés à des vibrations qui proviennent le plus souvent des irrégularités du terrain sur lequel ils circulent. Les secousses et les chocs se propagent des roues jusqu'au poste de conduite. Ils sont transmis au conducteur principalement par l'assise et le dossier du siège, mais également par le plancher de la cabine.

Des activités autres que les déplacements, comme la reprise au tas pour une chargeuse ou le gerbage pour un chariot élévateur peuvent également être sources de vibrations. Ces vibrations sollicitent le dos des conducteurs.

En France, 1 345 100 travailleurs sont régulièrement exposés à ce type d'environnement physique. Ils représentent 5,4 % du nombre total de salariés et exercent majoritairement dans les secteurs du BTP, des transports et de la logistique. Environ 90 % des conducteurs d'engins sont des hommes. Près de 30 % d'entre eux se déclarent

exposés à des vibrations plus de 20 heures par semaine [1].

L'exposition professionnelle aux vibrations transmises à l'ensemble du corps augmente le risque de lombalgies et de lomboradiculalgies [2 à 4]. Certaines des affections chroniques du rachis lombaire sont éligibles à la reconnaissance en maladies professionnelles depuis 1999 : sciatique par hernie discale L4-L5 ou L5-S1 et radiculalgie crurale par hernie discale L2-L3, L3-L4 ou L4-L5, toutes deux avec atteinte radiculaire de topographie concordante. Les victimes peuvent être indemnisées au titre du tableau n°97 du régime général de la sécurité sociale et 57 du régime agricole, sous réserve d'une durée d'exposition aux vibrations de 5 ans, avec un délai de prise en charge de 6 mois [5]. En moyenne, 440 cas sont reconnus chaque année au régime général [6]. Leur nombre est stable ces 20 dernières années. Ces cas représentent un coût direct annuel d'environ 20 M€ pour les entreprises. Ces chiffres sous-estiment probablement le véritable nombre de pathologies lombaires causées par les vibrations puisqu'elles peuvent être prises en charge au titre d'un

Effets des positions de conduite sur l'exposition aux vibrations transmises à l'ensemble du corps

autre risque (accident de travail ou tableau n°98 des maladies professionnelles). Plus de la moitié des lomboradiculalgies d'origine professionnelle ne seraient également pas déclarées [7].

La législation impose aux employeurs de respecter des prescriptions minimales de sécurité concernant l'exposition des salariés aux vibrations transmises à l'ensemble du corps [8]. Le Code du travail définit pour cela des valeurs limites d'exposition [9]. La méthode d'évaluation de l'exposition est définie par l'arrêté du 6 juillet 2005 suivant les préconisations de la norme internationale ISO-2631-1 [10, 11]. Pour évaluer le risque vibratoire, il convient ainsi d'estimer la dose vibratoire journalière, $A(8)$, reçue par le salarié. Cette valeur doit être comparée aux valeurs réglementaires :

– $0,5 \text{ m.s}^{-2}$ est la valeur limite pour les vibrations transmises au corps entier déclenchant l'action de prévention (VLA) ;

– $1,15 \text{ m.s}^{-2}$ est la valeur limite d'exposition pour les vibrations transmises au corps entier à ne jamais dépasser (VLE).

La dose vibratoire journalière est calculée à partir de la valeur d'émission vibratoire d'un véhicule a_{eq} (m.s^{-2}) ainsi que de la durée effective d'exposition des salariés T (h) rapportée à une période de référence T_0 de 8 heures :

$$A(8) = a_{eq} \sqrt{\frac{T}{T_0}} (\text{m.s}^{-2})$$

La valeur d'émission a_{eq} est un indicateur qui prend en compte la sensibilité du corps aux vibrations. Celle-ci est maximale à la fréquence de résonance du corps humain qui dépend du point d'entrée, de la direction, ainsi que de l'amplitude des oscillations. La valeur d'émission vibratoire est ainsi calculée par pondération fréquentielle de l'accélération mesurée au point d'entrée dans le corps pour tenir compte de sa sensibilité.

Les courbes de pondération fréquentielle sont obtenues par la mesure de la réponse dynamique du corps humain aux vibrations. La masse apparente et la transmissibilité tête-siège du corps en sont des bons estimateurs. Ils sont calculés à partir de grandeurs mécaniques mesurées à l'extérieur du corps (forces, accélérations). Ils permettent l'identification des fréquences de résonance du corps humain.

La réglementation actuelle considère que la sensibilité du corps est maximale entre 0,3 et 4,1 Hz lors de vibrations avant-arrière ou latérales. Elle est maximale entre 1,7 et 25,6 Hz pour des vibrations verticales. Ces courbes ont été dérivées de mesures sur des sujets immobiles assis sur un siège rigide sans dossier.

Mais, les conducteurs d'engins mobiles sont également exposés à d'autres facteurs de risque de troubles lombaires, notamment la posture assise prolongée dans une position plus ou moins favorable selon l'habitacle (positions du siège, des pédales, du volant...) et les mouvements liés à la tâche de travail (se retourner, se pencher, tourner ou lever la tête pour conduire) [12, 13]. La méthode d'évaluation du risque vibratoire actuelle ne tient pas compte de ces contraintes par manque de connaissances stabilisées.

L'objectif de cette étude est de mesurer en laboratoire la réponse dynamique du corps en tenant compte de la diversité des positions de conduite adoptées par les conducteurs d'engins.

MÉTHODOLOGIE

SUJETS

Ont été recrutés 14 sujets masculins majeurs pour participer à cette expérience en tant que

volontaires. Aucun critère d'inclusion n'a été exigé. Les sujets ont passé une visite médicale pour s'assurer de l'absence de critères d'exclusion, à savoir de contre-indication médicale à l'exposition aux vibrations, sur la base des recommandations de la norme internationale ISO 13090-1 [14]. Les sujets ont également déclaré être en bonne santé le jour de l'expérience. Ils étaient âgés de $22,9 \pm 4,1$ ans, mesuraient $1,81 \pm 0,05$ m, pesaient $75 \pm 10,5$ kg et avaient un indice de masse corporelle de $23,1 \pm 3,7 \text{ kg.m}^{-2}$.

Cette expérience, qui s'est déroulée dans les laboratoires de l'INRS, a reçu un avis favorable d'un comité de protection des personnes qui participent à des recherches biomédicales [15]. Les sujets ont signé un formulaire de consentement libre et éclairé, pouvaient arrêter les essais sans se justifier et ont été indemnisés. Aucune information nominative n'a été enregistrée.

POSITION DU CORPS

Les positions des segments du corps sont décrites par 12 angles α_i conformément aux préconisations du rapport technique normalisé ISO/TR 10687 (figure 1 page suivante) [16] :

- les angles d'inclinaison $\alpha_{1,2}$, $\alpha_{6,7}$ et $\alpha_{11,12}$ mesurent les déviations respectives de la tête, du thorax et du bassin par rapport à la position de référence, dans les plans sagittal et frontal ;
- les angles de flexion des vertèbres cervicales $\alpha_{3,4}$ mesurent les différences entre les inclinaisons de la tête ($\alpha_{1,2}$) et du thorax ($\alpha_{6,7}$) ;
- les angles de flexion du dos ($\alpha_{8,9}$) mesurent les différences entre les inclinaisons du thorax ($\alpha_{6,7}$) et du bassin ($\alpha_{11,12}$) ;
- les angles de torsion α_5 et α_{10} mesurent respectivement les rotations dans le plan horizontal

entre la tête et le thorax, et le thorax et le bassin.

La position de référence est la position assise définie par la norme ISO 2631-1 pour l'évaluation réglementaire des vibrations transmises à l'ensemble du corps [10]. Les sujets se sont assis sur un siège rigide sans dossier. Ils avaient le dos droit et ont adopté une attitude détendue. Ils ont placé leurs mains sur leurs cuisses. La hauteur du repose-pied a été ajustée de manière à ce que leurs pieds reposent à plat.

Neuf positions ont été définies à partir des mesures d'exposition effectuées en conditions réelles d'utilisation des machines vibrantes les plus utilisées en entreprise [17, 18] et de valeurs limites pour l'acceptabilité d'une position de travail [12, 13]. Les valeurs des déviations de la tête et du thorax qui les composent sont présentées dans l'**encadré 1 page suivante**.

Les positions ont été décrites oralement par l'expérimentateur. La précision demandée était de +/-10°.

SOLLICITATIONS VIBRATOIRES

Les sujets ont été exposés à des vibrations de l'ensemble du corps sur un banc d'essai actionné par des vérins hydrauliques, équipé d'un siège sans dossier et d'un repose-pied réglable en hauteur. Les stimulus ont été présentés en ordre aléatoire. Des pauses régulières ont été effectuées tout au long des essais. Les sujets ont été exposés successivement à des vibrations dans les directions avant-arrière, latérale et verticale. Les stimulus étaient des signaux artificiels représentatifs des vibrations rencontrées dans les principales familles d'engins vibrants. Leur amplitude et leur contenu fréquentiel étaient contrôlés. Leur durée était de 90 secondes.

MESURES

La masse apparente $MA(f)$ est définie à la fréquence f comme le rapport de la force $F(f)$ (N) sur l'accélération $A(f)$ ($m.s^{-2}$) mesurées au niveau de l'assise :

$$MA(f) = \frac{F(f)}{A(f)} \quad (Kg)$$

La transmissibilité tête-siège $T(f)$ permet de mesurer la transmission des vibrations entre l'assise du siège et la tête :

$$T(f) = \frac{A_{tête}(f)}{A_{siège}(f)}$$

La fréquence de résonance de l'ensemble du corps est définie comme étant la fréquence correspondant à la valeur maximale de la masse apparente. La transmissibilité tête-siège décrit plus précisément les mouvements des vertèbres thoraciques et cervicales.

ANALYSES

Les masses apparentes et transmissibilités tête-siège ont été déterminées pour la position de référence qui correspond à la réglementation actuelle ainsi que pour les 9 positions testées. Les résultats des positions testées ont été comparés à ceux de la position de référence. Les fréquences de résonance ont été déterminées pour chaque cas et comparées aux pondérations fréquentielles de la norme ISO 2631-1.

↓ **Figure 1**

> ANGLES DE DÉVIATION DÉFINIS PAR LE RAPPORT TECHNIQUE NORMALISÉ [16]

<p>α_1</p>	<p>α_1 : inclinaison de la tête dans le plan sagittal</p>	<p>α_2</p>	<p>α_2 : inclinaison de la tête dans le plan frontal</p>	<p>α_5</p>	<p>α_5 : rotation (torsion) entre la tête et le thorax dans le plan horizontal</p>
<p>$\alpha_{6,11}$</p>	<p>α_6 : inclinaison du thorax dans le plan sagittal α_{11} : inclinaison du bassin dans le plan sagittal</p>	<p>$\alpha_{7,12}$</p>	<p>α_7 : inclinaison du thorax dans le plan frontal α_{12} : inclinaison du bassin dans le plan frontal</p>	<p>α_{10}</p>	<p>α_{10} : rotation (torsion) entre le thorax et le bassin dans le plan horizontal</p>

Effets des positions de conduite sur l'exposition aux vibrations transmises à l'ensemble du corps

Concernant la fiabilité des postures, l'expérimentateur s'est assuré du maintien de la position jusqu'à la fin des vibrations. Une interface graphique de contrôle

des mesures a été développée spécifiquement pour cela. Les angles ont été mesurés grâce à des accéléromètres tri-axes fixés sur le bassin, le thorax et la tête des sujets.

Les capteurs étaient placés sur les vêtements pour le thorax et à l'arrière du crâne pour la tête. Les angles de flexion cervicale $\alpha_{3,4}$ et du dos $\alpha_{8,9}$ ont été calculés.

↓ Encadré 1

> DÉVIATIONS ANGULAIRES α_i DU BASSIN, DU THORAX ET DE LA TÊTE DES POSITIONS A À J : VALEURS ET ILLUSTRATIONS

La position A est la position de référence.

La position J est la position de référence + muscles dorsaux contractés.

		TÊTE		CERVICALES			THORAX		
		Inclinaison sagittale α_1	Inclinaison frontale α_2	Flexion sagittale α_3	Flexion frontale α_4	Torsion horizontale α_5	Inclinaison sagittale α_6	Inclinaison frontale α_7	
A		0	0	0	0	0	0	0	
B		45	0	45	0	0	0	0	
C		0	30	0	30	0	0	0	
D		0	0	0	0	45	0	0	
E		40	0	0	0	0	40	0	
F		80	0	40	0	0	40	0	
G		0	30	0	0	0	0	30	
H		0	50	0	20	0	0	30	
I		0	0	0	0	0	0	0	
J		0	0	0	0	0	0	0	

L'expérimentation présentée dans cet article a été réalisée sans dossier. Ces photographies ne rendent pas compte de la totalité des paramètres de l'étude mais uniquement de la position du corps.

RÉSULTATS

POSITION DE RÉFÉRENCE ET ESTIMATION DES EFFETS

Les résultats sont constitués des courbes des masses apparentes et transmissibilités tête-siège mesurées pour 14 sujets, 3 directions

et 10 positions. Pour des raisons de lisibilité, elles sont regroupées par segment du corps et par plan de déviation angulaire. Seuls les effets les plus importants sont rapportés mais toutes les positions de conduite testées ont eu des effets significatifs sur la masse apparente, la transmissibilité tête-siège ou la fréquence de résonance.

	DOS			BASSIN	
	Flexion sagittale α_8	Flexion frontale α_9	Torsion horizontale α_{10}	Inclinaison sagittale α_{11}	Inclinaison frontale α_{12}
	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0
	40	0	0	0	0
	40	0	0	0	0
	0	30	0	0	0
	0	30	0	0	0
	0	0	45	0	0
	0	0	0	0	0

TÊTE – INCLINAISONS SAGITTALES ET FRONTALES

La **figure 2 page suivante** présente les courbes moyennes de masses apparentes et transmissibilités tête-siège mesurées dans les trois directions lorsque les sujets ont incliné la tête de 45° dans le plan sagittal (position B) et de 30° dans le plan frontal (position C).

Dans la direction verticale, les maximums des courbes de masses apparentes des positions B (flexion) et C (inclinaison latérale) sont significativement différents de la position de référence. Dans les deux cas, l'inclinaison de la tête diminue la masse apparente à la fréquence de résonance. La position B fait également apparaître un deuxième pic de résonance à une fréquence moins élevée (2,6 Hz) que le premier (4,8 Hz).

Les différences d'amplitude des maximums dans la direction verticale se retrouvent sur la courbe de transmissibilité tête-siège. Dans la direction avant-arrière, la flexion de la tête dans le plan sagittal (position B) augmente significativement la transmissibilité tête-siège à la fréquence de résonance (2,7 Hz). L'effet de l'inclinaison de la tête est de moindre importance dans la direction latérale.

TÊTE ET THORAX – INCLINAISONS SAGITTALES

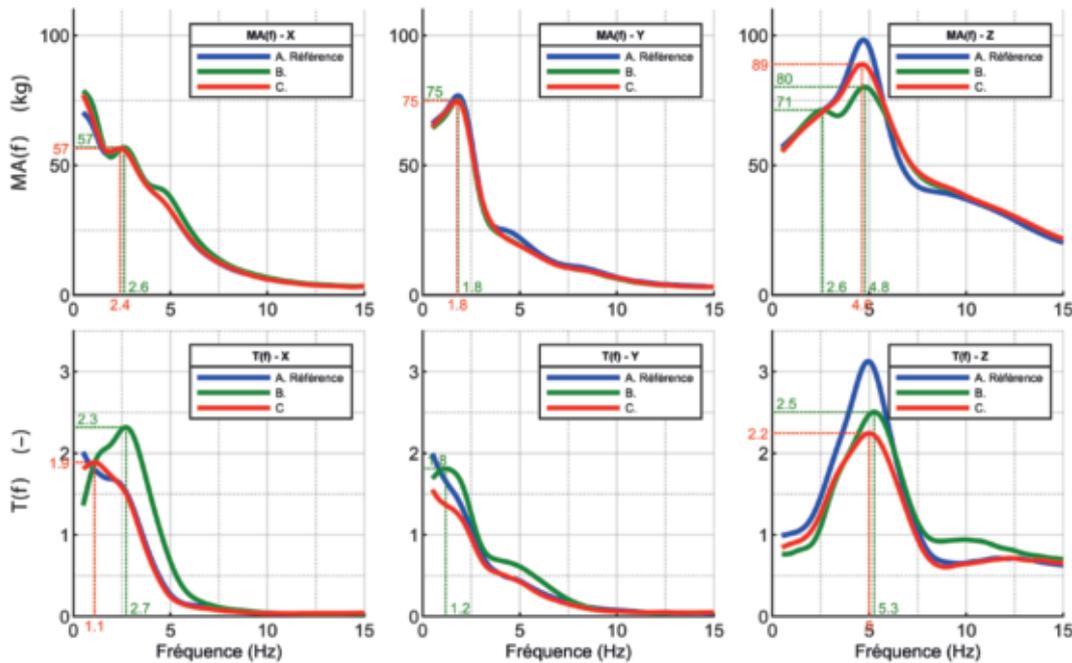
La **figure 3 page suivante** décrit les inclinaisons de la tête et du thorax dans le plan sagittal. La position de référence est comparée à l'inclinaison du thorax de 40° (position E) et à l'inclinaison simultanée de la tête de 80° et du thorax de 40° (position F). Les courbes pour lesquelles les sujets se tenaient en position de référence mais avec les muscles du dos contractés ont également été ajoutées (position J).

Les différences entre la position de référence et la position J sont très faibles sur les courbes de masse apparente.

Effets des positions de conduite sur l'exposition aux vibrations transmises à l'ensemble du corps

↓ Figure 2

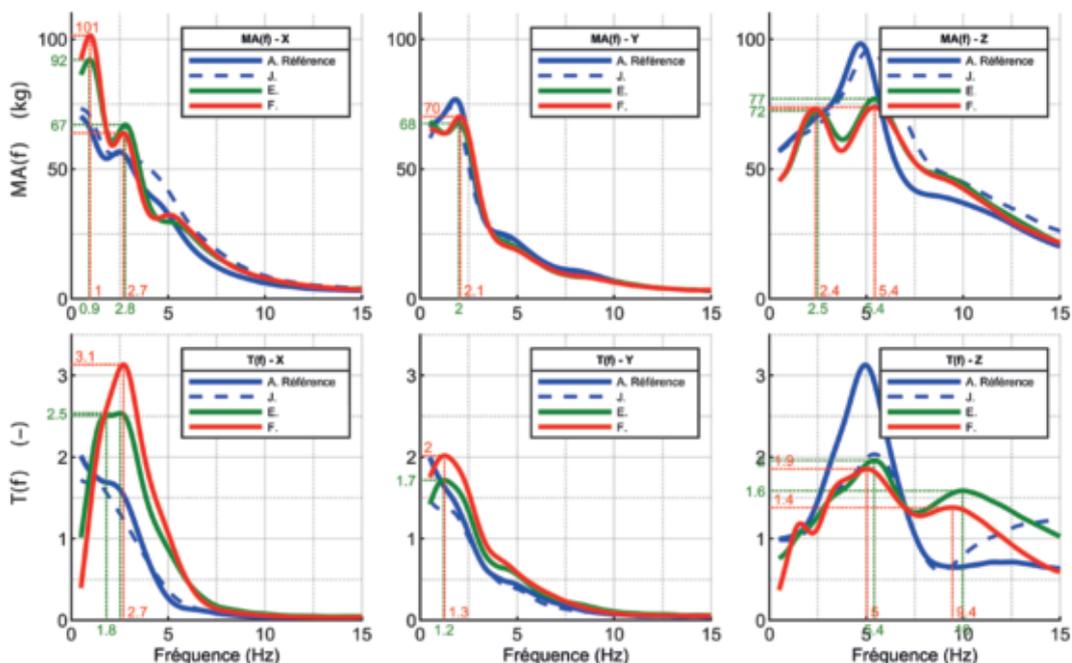
➤ COURBES MOYENNES DE MASSE APPARENTE (MA(f) en kg) ET TRANSMISSIBILITÉ TÊTE-SIÈGE (T(f) - RAPPORT D'ACCÉLÉRATIONS) POUR LES POSITIONS A, B ET C LORS DE VIBRATIONS AVANT-ARRIÈRE (X), LATÉRALES (Y) ET VERTICALES (Z)



A : référence
 B : inclinaison de la tête de 45° dans le plan sagittal
 C : inclinaison de la tête de 30° dans le plan frontal

↓ Figure 3

➤ COURBES MOYENNES DE MASSE APPARENTE (MA(f) en kg) ET TRANSMISSIBILITÉ TÊTE-SIÈGE (T(f) - RAPPORT D'ACCÉLÉRATIONS) POUR LES POSITIONS A, E, F ET J LORS DE VIBRATIONS AVANT-ARRIÈRE (X), LATÉRALES (Y) ET VERTICALES (Z)



A : référence
 E : inclinaison du thorax de 40° dans le plan sagittal
 F : inclinaison simultanée de la tête de 80° et du thorax de 40° dans le plan sagittal
 J : référence avec les muscles du dos contractés

La contraction des muscles du dos entraîne seulement une très légère augmentation de la fréquence de résonance dans la direction verticale (5,3 Hz). L'effet le plus sensible est sur la transmissibilité tête-siège dans cette même direction. Les vibrations sont moins transmises à la tête (transmissibilité égale à 2 à la fréquence de 5,3 Hz) à la fréquence de résonance que dans la position de référence (transmissibilité à 3,1 à la fréquence de 4,8 Hz). Elles sont également amplifiées pour les fréquences supérieures à 12 Hz. Les positions E et F influencent principalement les courbes de masse apparente et de transmissibilité tête-siège dans les directions avant-arrière et verticale. Dans la direction avant-arrière, deux pics apparaissent sur la courbe de masse apparente en position E

(0,9 et 2,8 Hz). C'est également le cas dans la position F (à 1 et 2,7 Hz). Dans les deux cas, les amplitudes des pics sont supérieures à celle de la position de référence. La transmissibilité tête-siège est alors également plus importante : 2,5 pour la position E et 3,1 pour la position F (< 2 dans la position de référence).

La même observation peut être effectuée dans la direction verticale. Deux pics apparaissent sur la courbe de masse apparente à 2,5 et 5,4 Hz pour la position E et 2,4 et 5,4 Hz pour la position F. Les amplitudes des pics sont cette fois inférieures à celle de la position de référence.

Les courbes de transmissibilité tête-siège s'aplatissent par rapport à la position de référence. Plusieurs pics apparaissent. Les vibrations de la tête sont amplifiées entre 1 et 15 Hz alors qu'elles

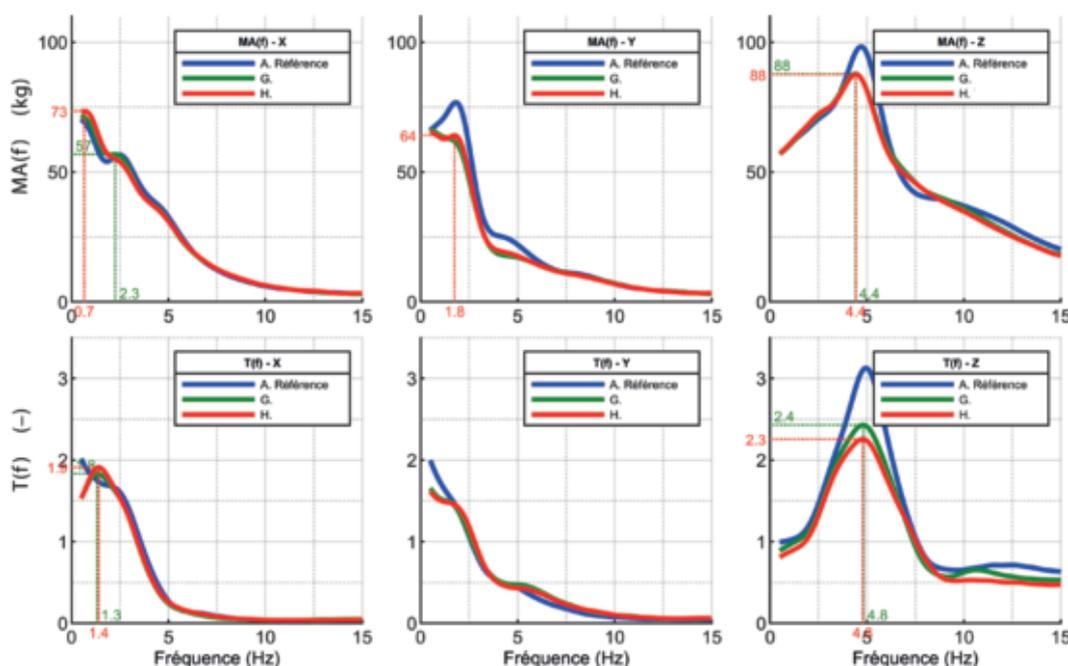
ne le sont plus à partir de 7,5 Hz en position de référence.

TÊTE ET THORAX – INCLINAISONS FRONTALES

La **figure 4** décrit les inclinaisons de la tête et du thorax dans le plan frontal. La position de référence est comparée à l'inclinaison du thorax de 30° (position G) et à l'inclinaison simultanée de la tête de 50° et du thorax de 30° (position H). Les positions G et H ont peu d'influence sur les courbes de masse apparente et de transmissibilité tête-siège. Les effets principaux concernent la direction verticale. Les courbes sont alors diminuées par rapport à la position de référence. Les fréquences de résonance sont inchangées (4,4 Hz pour G et H contre 4,8 Hz pour la position de référence).

↓ **Figure 4**

➤ COURBES MOYENNES DE MASSE APPARENTE (MA(f) en kg) ET TRANSMISSIBILITÉ TÊTE-SIÈGE (T(f) - RAPPORT D'ACCÉLÉRATIONS) POUR LES POSITIONS A, G ET H LORS DE VIBRATIONS AVANT-ARRIÈRE (X), LATÉRALES (Y) ET VERTICALES (Z)



A : référence
 G : inclinaison du thorax de 30° dans le plan frontal
 H : inclinaison simultanée de la tête de 50° et du thorax de 30° dans le plan frontal

Effets des positions de conduite sur l'exposition aux vibrations transmises à l'ensemble du corps

TÊTE ET THORAX – INCLINAISONS HORIZONTALES

La figure 5 présente les courbes de masse apparente et transmissibilité tête-siège lorsque les sujets ont tourné la tête de 45° vers la droite (position D) et le thorax de 45° vers la droite (position I).

Les positions D et I ont peu d'influence sur ces courbes.

Les effets principaux concernent la direction verticale. Les valeurs maximales des deux courbes sont diminuées par rapport à la position de référence.

Les fréquences de résonance sont inchangées. Par ailleurs, la transmission des vibrations à la tête est diminuée dans la direction avant-arrière.

DISCUSSION

LIMITES DE L'ÉTUDE

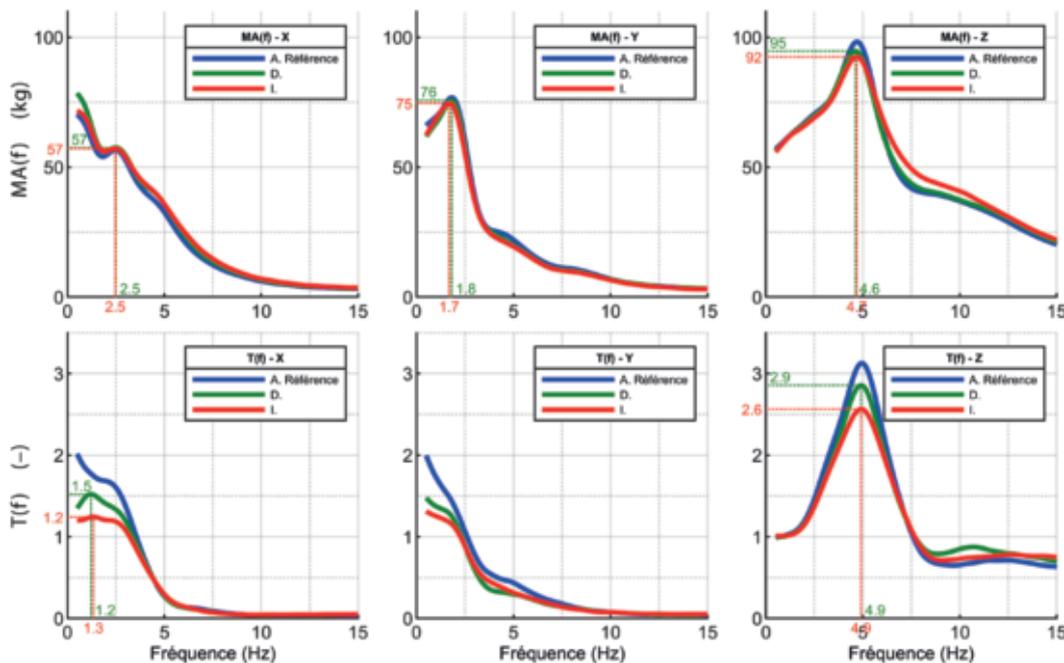
Les sujets étaient jeunes et leur expérience de conduite limitée. De ces points de vue, ils n'étaient pas représentatifs des populations de conducteurs précédemment étudiées [2 à 4]. Ceci, ainsi que leurs caractéristiques anthropométriques, n'a pas eu d'effet significatif sur les fréquences de résonance dans la position de référence.

Les courbes de masses apparentes et transmissibilités tête-siège mesurées dans les directions avant-arrière, latérale et verticale dans la position de référence ont été comparées à la norme ISO 5982 [19]. Elles étaient en cohérence avec la norme pour les directions avant-arrière et verticale.

Dans la direction latérale, la masse apparente dépasse légèrement la limite supérieure autour de la fréquence de résonance (1,8 Hz). La norme ne donne pas d'informations sur la transmissibilité tête-siège dans les directions avant-arrière et latérale. Dans la direction verticale, la valeur maximale de transmissibilité tête-siège est deux fois supérieure à celle de la courbe moyenne normalisée. La cause probable est le niveau plus faible de vibrations de cette expérience comparé à la norme. Dans les trois directions, les fréquences de résonance sont proches de celles attendues : autour de 2 Hz pour les directions avant-arrière et latérale et entre 4,5 et 5 Hz dans la direction verticale.

↓ Figure 5

➤ COURBES MOYENNES DE MASSE APPARENTE (MA(f) en kg) ET TRANSMISSIBILITÉ TÊTE-SIÈGE (T(f) - RAPPORT D'ACCÉLÉRATIONS) POUR LES POSITIONS A, D ET I LORS DE VIBRATIONS AVANT-ARRIÈRE (X), LATÉRALES (Y) ET VERTICALES (Z)



A : référence
 D : rotation de la tête de 45° dans le plan horizontal
 I : rotation du thorax de 45° dans le plan horizontal

POSITIONS DÉFAVORABLES

D'un point de vue statistique, chacune des 9 positions étudiées influence de manière significative la fréquence de résonance, la courbe de masse apparente ou celle de transmissibilité tête-siège. Les inclinaisons de la tête et du thorax dans le plan frontal (positions C, G et H) et horizontal (positions D et I) ont peu d'effet. C'est également le cas pour la contraction des muscles du dos dans la position de référence avec les muscles du dos contractés (position J).

Les effets les plus importants se manifestent pour des sollicitations dans les directions avant-arrière et verticale lorsque la tête (position B) et le thorax (position E) ou ces deux segments à la fois (position F) sont inclinés dans le plan sagittal :

- pour les courbes de masse apparente, ces positions se traduisent par une augmentation significative de la fréquence de résonance principale pour la direction verticale, accompagnée par une diminution de la masse apparente maximale. Il existe également l'apparition d'un second pic de plus basse fréquence (environ 1 Hz dans la direction avant-arrière et 2,5 Hz pour la direction verticale) ;
- la transmission des vibrations à la tête augmente très significativement dans la direction horizontale. Elle diminue à la résonance dans la direction verticale mais devient supérieure à 1 autour de 15 Hz.

PERTINENCE DE LA MÉTHODE RÉGLEMENTAIRE D'ÉVALUATION DU RISQUE

La pertinence de la méthode réglementaire d'évaluation du risque vibratoire peut être évaluée au regard de ces nouvelles connaissances. Pour cela, il convient de comparer les fréquences de

résonance obtenues dans les positions B, E et F aux pondérations fréquentielles normalisées :

- les fréquences de résonance du corps sont comprises entre 0,9 et 2,8 Hz pour les directions avant-arrière et latérale dans cette étude. Les pondérations sont maximales entre 0,3 et 4,1 Hz ;
- les fréquences de résonance du corps sont comprises entre 2,5 et 10 Hz pour la direction verticale dans cette étude. Selon la norme, le maximum de sensibilité du corps est compris entre 1,7 et 25,6 Hz. Ainsi, les pondérations utilisées dans la réglementation sont adaptées à la prise en compte des positions adoptées par les conducteurs pour la réalisation de leurs tâches de travail.

CONCLUSION

Les mesures des fréquences de résonance, masse apparente et transmissibilité tête-siège dans les trois directions ont donné une description exhaustive de la réponse dynamique du corps exposé aux vibrations dans 10 positions pertinentes vis-à-vis de l'exposition réelle des conducteurs d'engins vibrants et de l'effet des vibrations sur la colonne vertébrale.

Les déviations de la tête, du thorax ou des deux simultanément dans le plan sagittal ont les effets les plus importants dans les directions avant-arrière et verticale. On constate notamment une augmentation de la fréquence de résonance principale, combinée à l'apparition d'un second pic de résonance à plus basse fréquence. Dans la direction verticale, la transmissibilité tête-siège est également augmentée autour de 15 Hz. Les autres déviations angulaires (inclinaison dans le plan frontal, torsions dans le plan horizontal) ont des effets plus faibles.

D'un point de vue normatif, ces nouvelles connaissances seront valorisées par la mise au point d'un nouveau réseau de pondération fréquentiel normalisé spécifiquement dédié aux effets de la position du corps. Ce réseau pourra, à terme, être intégré à la réglementation pour une évaluation plus précise du risque vibratoire dans des conditions de conduite spécifique.

Les recherches à venir concerneront enfin les effets combinés de l'amplitude vibratoire et des caractéristiques ergonomiques des postes de conduite : siège avec dossier, assise déformable, volant... Une attention particulière sera portée aux déviations de la tête et du thorax dans le plan sagittal pour mieux décrire la nature des mouvements du corps (extension des vertèbres cervicales...) et affiner les hypothèses actuelles sur les mécanismes d'apparition des cervicalgies et des lombalgies professionnelles créées par les vibrations transmises à l'ensemble du corps

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier l'équipe pédagogique ainsi que les étudiants de l'Institut de Formation en Masso Kinésithérapie (IFMK) de Nancy pour leurs contributions essentielles aux essais.

POINTS À RETENIR
ET BIBLIOGRAPHIE
EN PAGE SUIVANTE



Effets des positions de conduite sur l'exposition aux vibrations transmises à l'ensemble du corps

POINTS À RETENIR

- Les conducteurs d'engins sont exposés à des vibrations susceptibles d'entraîner des troubles lombaires.
- La réglementation actuelle ne tient pas compte de la position et des mouvements du conducteur au poste de conduite.
- Des sujets ont été exposés à des vibrations dans des positions pertinentes vis-à-vis de l'exposition aux postes de conduite et des effets des vibrations sur la colonne vertébrale.
- La réponse dynamique du corps a été mesurée dans les directions avant-arrière, latérale et verticale.
- Dans les directions avant-arrière et verticale, la fréquence de résonance du corps et la sensibilité aux basses fréquences augmentent lors des déviations de la tête et du thorax dans le plan sagittal.
- Dans la direction verticale, lors de l'inclinaison du tronc, la transmission des vibrations à la tête est augmentée.

BIBLIOGRAPHIE

- 1 | MATINET B, ROSANKIS E, LÉONARD M - Les expositions aux risques professionnels par famille professionnelle. *Synth Stat.* 2020 ; 34 : 1-313.
- 2 | BOVENZI M, PINTO I, STACCHINI N - Low back pain in port machinery operators. *J Sound Vib.* 2002 ; 253 (1) : 3-20.
- 3 | KITTUSAMY NK, BUCHHOLZ B - Whole-body vibration and postural stress among operators of construction equipment: a literature review. *J Safety Res.* 2004 ; 35 (3) : 255-61.
- 4 | BOVENZI M, RUI F, NEGRO C, D'AGOSTIN F ET AL. - An epidemiological study of low back pain in professional drivers. *J Sound Vib.* 2006 ; 298 (3) : 514-39.
- 5 | Affections chroniques du rachis lombaire provoquées par les vibrations de basses et moyennes fréquences transmises au corps entier. Régime général Tableau 97. In: Tableau des maladies professionnelles. INRS, 1999 (<http://www.inrs.fr/mp>).
- 6 | Rapport annuel 2019 de l'Assurance Maladie Risques professionnels. Eléments statistiques et financiers. Assurance maladie, 2020 (<https://assurance-maladie.ameli.fr/etudes-et-donnees/2019-rapport-annuel-assurance-maladie-risques-professionnels>).
- 7 | RIVIÈRE S, ALVÈS J, SMAILL S, ROQUELAURE Y ET AL. - Estimation de la sous-déclaration des TMS en France : évolution entre 2009 et 2015. *Bull Epidémiol Hebd.* 2021 ; 3 : 42-48.
- 8 | Directive 2002/44/CE du Parlement européen et du Conseil du 25 juin 2002 concernant les prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (vibrations) (seizième directive particulière au sens de l'article 16, paragraphe 1, de la directive 89/391/CEE) - Déclaration conjointe du Parlement européen et du Conseil. In: EUR-Lex. Parlement européen et Conseil de l'Union européenne, 2002 (<https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2002/44/oj>).
- 9 | Décret n° 2005-746 du 4 juillet 2005 relatif aux prescriptions de sécurité et de santé applicables en cas d'exposition des travailleurs aux risques dus aux vibrations mécaniques et modifiant le Code du travail (deuxième partie) ; Décrets en Conseil d'Etat. In: Légifrance. Premier Ministre, 2005 (<https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT00000261989>).
- 10 | Mechanical Vibration and shock. Evaluation of human exposure to whole-body vibration. Part 1: General requirements. International Standard ISO 2631-1:1997. Geneva: International Organization for Standardization (ISO) ; 1997 : 15 p.
- 11 | Arrêté du 6 juillet 2005 pris pour l'application des articles R. 231-118, R. 231-120 et R. 231-121 du Code du travail. In: Légifrance. Ministère chargé de l'emploi, 2005 (<https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT00000262405>).
- 12 | Ergonomics. Evaluation of static working postures. International Standard ISO 11226:2000 (E). Geneva: International Organization for Standardization (ISO) ; 2000 : 8 p., 2 p.
- 13 | Safety of machinery. Human physical performance. Part 4: Evaluation of working postures and movements in relation to machinery. International Standard ISO SR EN 1005-4:2005. Geneva: International Organization for Standardization (ISO) ; 2005 : 26 p.
- 14 | Mechanical vibration and shock. Guidance on safety aspects of tests and experiments with people. Part 1: Exposure to whole-body mechanical vibration and repeated shock. - Annex C Medical contraindications to participation in experiments involving whole-body mechanical vibration and repeated shock. International Standard ISO 13090-1:1998. Geneva: International Organization for Standardization (ISO) ; 1998 : 28 p.
- 15 | Loi n° 2012-300 du 5 mars 2012 relative aux recherches impliquant la personne humaine. In: Légifrance. Président de la République, 2012 (<https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000025441587>).
- 16 | Mechanical vibration. Description and determination of seated postures with reference to whole-body vibration. Technical Report. International Standard ISO/TR 10687:2012. Geneva: International Organization for Standardization (ISO) ; 2012 : 21 p.
- 17 | HERMANNIS I, RAFFLER N, ELLEGAST RP, FISCHER S ET AL. - Simultaneous field measuring method of vibration and body posture for assessment of seated occupational driving tasks. *Int J Ind Ergon.* 2008 ; 38 (3-4) : 255-63.
- 18 | AMARI M, CARUEL E, DONATI P - Inter-individual postural variability in seated drivers exposed to whole-body vibration. *Ergonomics.* 2015 ; 58 (7) : 1162-74.
- 19 | Mechanical vibration and shock. Range of idealized values to characterize human biodynamic response under whole-body vibration. English version NF ISO 5982:2019(E). Geneva: International Organization for Standardization (ISO) ; 2019 : 44 p.