

Notes techniques

RISQUE VIBRATOIRE CHEZ LES OPÉRATEURS D'ENGINS MOBILES: CARTOGRAPHIE DES POSTURES ET DES VIBRATIONS AU POSTE DE CONDUITE

En France, trois millions de conducteurs d'engins mobiles sont potentiellement exposés au risque vibratoire. Cet article présente les résultats d'une cartographie des postures et des vibrations réalisée en entreprise. Ils permettront la mise au point d'une méthode d'évaluation combinée du risque vibratoire utilisable par les professionnels de la prévention.

MAËL AMARI
INRS,
département
Ingénierie des
équipements
de travail

L'exposition prolongée aux vibrations de l'ensemble du corps augmente le risque de troubles lombalgiques en fonction des postures adoptées [1]. Les opérateurs d'engins mobiles travaillant en position assise sont souvent exposés à des niveaux vibratoires importants. Ces engins (tracteurs, bulldozers, pelles, chariots élévateurs, tondeuses autoportées, etc.) sont principalement utilisés dans le BTP, les transports, la logistique, les services, l'agriculture et les eaux et forêts [2]. En France, trois millions de travailleurs sont susceptibles d'être exposés régulièrement à ce type de contraintes mécaniques.

Pour faire progresser la prévention dans le domaine des vibrations de l'ensemble du corps, l'INRS cherche à développer une méthode d'évaluation du risque vibratoire prenant en compte la position et les mouvements du corps [3, 4]. Pour ce faire, des mesures simultanées des postures et des vibrations ont été réalisées en entreprise au poste de conduite d'engins mobiles vibrants.

Cet article présente le protocole expérimental et illustre les principaux résultats des mesures effectuées en entreprise. Les travaux de recherche à venir qui permettront de mettre au point une méthode d'évaluation combinée simple et utilisable directement par les préventeurs en entreprise sont également présentés.

Risques physiques de lombalgie professionnelle

Les vibrations des engins sont créées par les irrégularités du terrain sur lequel ils circulent.

Les déplacements imposés aux roues du véhicule se propagent jusqu'au siège du conducteur. Les vibrations sont transmises à l'ensemble du corps des conducteurs par l'intermédiaire de l'assise et du dossier. Les secousses sollicitent alors le dos, les épaules et le cou. À long terme, l'accumulation de ces contraintes mécaniques peut entraîner des effets néfastes sur la colonne vertébrale (fracture osseuse, usure des disques intervertébraux) ou les tissus qui l'entourent (muscles, nerfs, ligaments, etc.).

En France, certaines des pathologies liées à l'exposition aux vibrations sont reconnues comme maladies professionnelles (sciatique par hernie discale L4-L5 ou L5-S1, radiculalgie crurale par hernie discale L2-L3, L3-L4 ou L4-L5). Elles sont indemnisées au titre du tableau n°97 du régime général de la Sécurité sociale [5]. Avec 462 cas, ces troubles occupaient la 7^e place en nombre des maladies professionnelles reconnues en France en 2014, malgré une sous-déclaration très probable et difficile à quantifier (arrêt de travail pour lombalgie ou maladies non déclarées). Ils représentent un coût annuel minimum de 12 millions d'euros pour les entreprises du régime général.

La législation impose aux employeurs de respecter des prescriptions minimales de sécurité en termes d'exposition des travailleurs aux vibrations de l'ensemble du corps. La directive européenne n°2002/44/CE, transposée en droit français par le décret n°2005-746 du 4 juillet 2005, prescrit des valeurs limites d'exposition journalière.

RÉSUMÉ

Les opérateurs d'engins mobiles sont exposés à des vibrations de l'ensemble du corps susceptibles d'être à l'origine de troubles du rachis. La procédure actuelle d'évaluation du risque vibratoire ne tient pas compte de la position et des mouvements du corps des conducteurs.

Ces paramètres sont aujourd'hui considérés comme des cofacteurs importants. Pour cette raison, l'INRS mène

des travaux de recherche visant à mettre au point une méthode d'évaluation du risque vibratoire prenant en compte la posture. Dans ce contexte, une cartographie des postures et de l'exposition aux vibrations a été réalisée en entreprise dans plusieurs engins mobiles vibrants (tombereaux, pelles, chariots, etc.).

Des différences significatives ont été observées à la fois dans les vibrations et les

positions des opérateurs lors de la réalisation des activités réelles de travail. Elles ont permis d'identifier des postures représentatives de chaque type d'engin.

Ces résultats constituent une étape indispensable à la mise au point d'une meilleure méthode d'évaluation du risque vibratoire utilisable directement par les professionnels de la prévention.

Vibration risk in mobile plant operators: mapping of the postures and of the vibrations at the driver station

Mobile machinery operators are exposed to whole-body vibration that may lead to low-back pain. The current procedure for assessing vibration risks does not take account of the position and of the movements of the body. Those parameters are now considered to be important cofactors. For this reason, INRS is conducting research

work aimed at developing a vibration risk assessment method that takes posture into account. In this context, postures and exposure to vibration have been mapped at the workplace in various types of vibrating mobile plant (dumper trucks, excavators, forklift trucks, etc.). Significant differences have been observed both in the vibrations and in

the positions of the operators while they are performing work tasks. They have made it possible to identify postures representative of each type of vehicle. These results constitute an essential step in developing a better vibration risk assessment method that can be used directly by risk prevention professionals.

La méthode d'évaluation de la dose vibratoire est définie par la norme ISO-2631 [6]. Elle est estimée à partir de l'accélération équivalente $A(8)$ (plus grande valeur des accélérations pondérées des trois directions de l'espace) ainsi que de la durée d'exposition normalisée sur la base de 8 heures. Les valeurs de $A(8)$ doivent être comparées aux valeurs réglementaires: $0,5 \text{ m.s}^{-2}$ pour la valeur d'action et $1,15 \text{ m.s}^{-2}$ pour la valeur limite d'exposition.

S'il est aujourd'hui admis qu'une exposition prolongée aux vibrations de l'ensemble du corps peut être à l'origine de lombalgie professionnelle, de nombreux experts s'accordent également sur le fait qu'il ne s'agit pas du seul facteur de risque [7]. Le travail en position assise prolongée maintient l'individu dans une posture statique contrainte par l'ergonomie de l'habitacle de l'engin (forme et hauteur du siège, position des pédales, du volant ou des commandes, etc.). À cette position assise plus ou moins favorable s'ajoutent des mouvements liés à l'activité de travail: se retourner, se pencher, tourner ou lever la tête, descendre de l'engin pour manutentionner, etc. Bien que leurs effets à long

terme demeurent mal connus, il est admis que ces postures statiques et ces mouvements doivent être pris en compte dans l'évaluation du risque lombalgique des conducteurs exposés aux vibrations de l'ensemble du corps. L'alternance de sédentarité prolongée et de manutentions brèves peut, de plus, accentuer le risque de lombalgies.

Cartographie des postures et des vibrations

Des mesures simultanées de postures et de vibrations ont été réalisées dans des conditions représentatives de l'exposition quotidienne des opérateurs. Plusieurs entreprises ont été contactées par l'intermédiaire des centres de mesures physiques des Carsat. Des échanges ont permis de définir les modalités d'une intervention dans le cadre d'une action de type « études et recherche »: présentation de l'étude à la direction, aux salariés lors d'une réunion CHSCT, signature éventuelle d'une convention. Parmi l'ensemble des situations de conduite rencontrées, la priorité a été donnée aux engins les plus vibrants et aux travaux les plus courants. Selon les cas, les mesures ont pu être effectuées pendant ou hors des cycles de production.





© Mael Amari/INRS



© Mael Amari/INRS



© Mael Amari/INRS



© Mael Amari/INRS

FIGURE 1 →
Exemples
d'engins mobiles
vibrants mesurés:
tombereau + pelle
(en haut à gauche),
chargeuse (en
haut à droite),
chariot élévateur
(en bas à gauche),
niveleuse (en bas
à droite).

Dans ces conditions, des mesures ont été effectuées dans plusieurs types d'engins: chargeuse, chariot élévateur, niveleuse, pelle à chenilles, camion, tombereau, tondeuse autoportée, pelle à pneus, etc. (Cf. Figure 1). Des conducteurs volontaires ont pris place au poste de conduite et adopté une position de conduite naturelle. Les suspensions des sièges des engins ont été réglées à leur poids. Au total, 125 essais ont été réalisés. Chacune de ces mesures a été effectuée soit sur plusieurs engins de la même famille, soit en faisant réaliser une tâche de conduite sur un même engin par différents conducteurs.

Vibrations

Les vibrations de l'ensemble du corps ont été mesurées dans les trois directions de l'espace (x: avant-arrière, y: droite-gauche, z: haut-bas). Pour cela, une cupule accélérométrique contenant un accéléromètre tri-axe a été placée sur le siège des engins.

L'émission vibratoire des engins a été estimée par le calcul de l'accélération équivalente a_{eq} à la surface du siège: $a_{eq} = \sqrt{(1,4^2 a_{wx}^2 + 1,4^2 a_{wy}^2 + a_{wz}^2)}$ [m.s⁻²]; a_{wx} , a_{wy} et a_{wz} sont les valeurs efficaces des accélérations pondérées selon les filtres W_d (a_{wx} et a_{wy}) et W_k (a_{wz}) définis par la norme ISO-2631 pour prendre en compte la sensibilité du corps aux vibrations [6]. Ces valeurs efficaces ont été calculées sur la durée totale de chaque enregistrement.

Position et mouvements du corps

Les segments du corps pertinents pour la description de la posture d'un opérateur mobile exposé à des vibrations sont la tête, la cage thoracique, le bassin et les membres inférieurs. Leurs positions relatives définissent les postures susceptibles d'exercer une influence sur la réponse de la colonne vertébrale aux vibrations.

L'IFA¹, homologue allemand de l'INRS, a développé CUELA², un dispositif de mesure de la position et des mouvements de ces segments du corps (Cf. Figure 2). Il a été utilisé pour effectuer des mesures au poste de conduite tout au long de l'exécution des tâches. Ce système est composé d'accéléromètres, de gyroscopes, ainsi que de capteurs angulaires. Ils sont placés sur la tête, le thorax, le bassin et les membres inférieurs des conducteurs, au-dessus des vêtements des conducteurs et sont reliés par des câbles flexibles. Les deux capteurs d'angle sont placés sur le thorax et sont reliés à deux barres de torsion. Les extrémités de ces barres de torsion sont fixées sur le bassin et la tête, pour permettre de mesurer leurs rotations par rapport au thorax. Les barres de torsion sont télescopiques pour ne pas bloquer les mouvements dans les autres directions. Les conducteurs ont déclaré ne pas être gênés pour effectuer leur tâche de travail. Des enregistrements vidéo des conducteurs ainsi que de l'environnement des engins ont également été effectués.



© Philippe Castano pour l'INRS



← FIGURE 2
Conducteur équipé
du système CUELA
pour la mesure
de la position et
des mouvements
du corps.

Les positions et les mouvements des segments du corps des conducteurs ont été décrits par les variations temporelles de 16 angles $\alpha_i(t)$ définis dans le tableau 1. Les angles d'inclinaison $\alpha_{1,2}(t)$, $\alpha_{6,7}(t)$ et $\alpha_{13 \rightarrow 16}(t)$ mesurent les positions respectives de la tête, du rachis thoracique, du rachis lombaire ainsi que du bassin. Ils sont définis dans le plan sagittal (qui divise le corps en deux parties gauche et droite) et frontal (qui divise le corps en deux parties avant et arrière). Les angles $\alpha_{11,12}(t)$ décrivent les inclinaisons du « tronc » dans ces deux plans. Ils sont définis comme les valeurs moyennes des angles d'inclinaison du rachis thoracique et du rachis lombaire. Les angles de flexion du cou $\alpha_{3,4}(t)$ et du dos $\alpha_{8,9}(t)$ mesurent les différences entre les inclinaisons des segments adjacents dans le plan frontal et le plan sagittal (respectivement entre la tête et le rachis thoracique, ainsi qu'entre le rachis thoracique et le rachis lombaire). Enfin, les angles de rotation $\alpha_5(t)$ et $\alpha_{10}(t)$ mesurent respectivement les rotations dans le plan transversal entre la tête et le rachis thoracique, ainsi qu'entre le rachis thoracique et le rachis lombaire. À titre d'exemple, la figure 3 présente les positions de la tête, du thorax et du bassin correspondant aux angles $\alpha_1(t)$, $\alpha_5(t)$, $\alpha_6(t)$ et $\alpha_{13}(t)$. Les positions statiques $\alpha_{i,static}$ sont estimées par la valeur moyenne des angles $\alpha_i(t)$

calculée sur toute la durée d'un essai. Les amplitudes des mouvements $\alpha_{i,dynamic}$ sont décrites par l'écart-type des angles $\alpha_i(t)$.

Discrimination des engins et identification des postures remarquables

Les mesures révèlent des différences d'exposition entre les véhicules tant d'un point de vue des vibrations que des positions statiques et des mouvements des conducteurs.

Vibrations

Les accélérations équivalentes a_{eq} varient d'un engin à l'autre (Cf. Tableau 2). Les contenus spectraux sont également représentatifs des spectres classiques d'émission de ces véhicules.

Posture

Des statistiques descriptives ont été réalisées sur toutes les valeurs de $\alpha_{i,static}$ et de $\alpha_{i,dynamic}$ pour chaque engin et chaque conducteur. La figure 4 présente les résultats sous la forme de boîtes à moustaches pour trois engins. Les données ont été groupées par degré de liberté puis par engin. Pour des raisons de lisibilité, les valeurs de $\alpha_{i,static}$ et $\alpha_{i,dynamic}$ sont uniquement présentées pour les degrés de liberté α_i qui (1) possèdent les écarts les plus importants



SEGMENT	MOUVEMENT	ANGLES	PLAN	POSITIF VERS
Tête	Inclinaison	$\alpha_{1,2}(t)$	Sagittal $\alpha_1(t)$ /Frontal $\alpha_2(t)$	Avant/Droite
Cou	Flexion Rotation	$\alpha_{3,4}(t)$ $\alpha_5(t)$	Sagittal $\alpha_3(t)$ /Frontal $\alpha_4(t)$ Transversal $\alpha_5(t)$	Avant/Droite Sens horaire
Rachis thoracique	Inclinaison	$\alpha_{6,7}(t)$	Sagittal $\alpha_6(t)$ /Frontal $\alpha_7(t)$	Avant/Droite
Dos	Flexion Rotation	$\alpha_{8,9}(t)$ $\alpha_{10}(t)$	Sagittal $\alpha_8(t)$ /Frontal $\alpha_9(t)$ Transversal $\alpha_{10}(t)$	Avant/Droite Sens horaire
Tronc	Inclinaison	$\alpha_{11,12}(t)$	Sagittal $\alpha_{11}(t)$ /Frontal $\alpha_{12}(t)$	Avant/Droite
Rachis lombaire	Inclinaison	$\alpha_{13,14}(t)$	Sagittal $\alpha_{13}(t)$ /Frontal $\alpha_{14}(t)$	Avant/Droite
Bassin	Inclinaison	$\alpha_{15,16}(t)$	Sagittal $\alpha_{15}(t)$ /Frontal $\alpha_{16}(t)$	Avant/Droite

TABLEAU 1 → Segments du corps et angles de déviation $\alpha_i(t)$ utilisés pour la description de la posture.

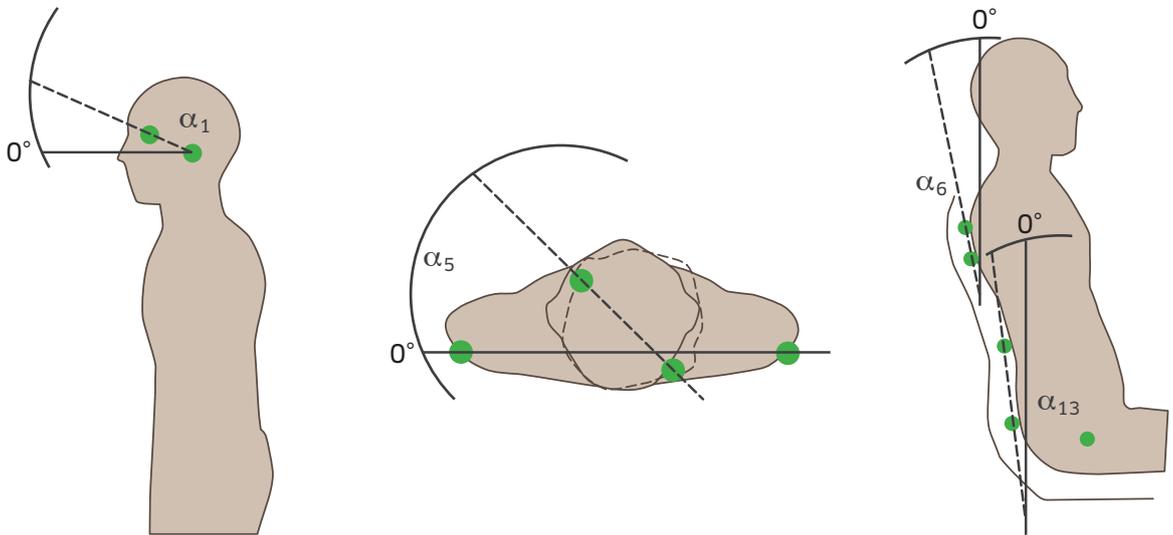


FIGURE 3 → Inclinaison sagittale de la tête $\alpha_1(t)$, rotation transversale entre la tête et le rachis thoracique $\alpha_5(t)$, inclinaison sagittale du rachis thoracique $\alpha_6(t)$ et lombaire $\alpha_{13}(t)$.

par rapport aux positions de référence, (2) révèlent les plus grandes différences entre les engins ou (3) font émerger les plus grandes différences entre les conducteurs. Il s'agit, d'une part, des indicateurs $\alpha_{1,3,6,8,13_static}$ qui correspondent respectivement aux inclinaisons statiques dans le plan sagittal de la tête, du cou, du rachis thoracique et du rachis lombaire et, d'autre part, à $\alpha_{5_dynamic}$ qui décrit les mouvements de torsion du cou dans le plan transversal. À titre d'exemple, les valeurs de α_{1_static} et $\alpha_{1_dynamic}$ ont également été comparées à des valeurs limites dérivées de la norme EN-1005 pour l'évaluation des postures et des mouvements au travail [8]. Pour chaque degré de liberté, trois catégories d'angles ont été définies: « acceptable » (vert), « acceptable sous conditions » (orange) et « inacceptable » (rouge). Selon ce critère, les positions ou les mouvements du corps sont considérés comme extrêmes si le sujet a ressenti une résistance pendant la réalisation d'une tâche. Le temps de maintien, la fréquence des mouvements sont également pris en compte. La norme s'appuie pour cela sur des données physiologiques

et d'endurance, mais ne tient pas compte des vibrations.

Des différences apparaissent entre les angles posturaux adoptés par les conducteurs dans ces trois engins. Elles induisent aussi parfois des changements de catégorie du point de vue des valeurs limites d'acceptabilité d'une posture de travail. Par exemple, les inclinaisons de la tête dans le plan sagittal (α_{1_static}) sont différentes dans le tombereau et dans la pelle à chenilles où la tête est plus penchée vers l'avant. Ces écarts sont « acceptables » pour les trois engins. L'angle de flexion cervicale dans le plan sagittal (α_{3_static}) dans la pelle est également différent de celui des deux autres engins. Ces flexions sont « acceptables » dans la pelle, mais ne le sont pas dans la chargeuse et le tombereau. Des différences apparaissent enfin entre les trois engins dans les mouvements de rotation du cou ($\alpha_{5_dynamic}$). Les mouvements sont de plus grande amplitude dans la chargeuse que dans les deux autres engins. Ils sont considérés comme « acceptables ». Plus généralement, des différences apparaissent

FAMILLE	ACCÉLÉRATION ÉQUIVALENTE [m.s ⁻²]
Chargeuse	1,0 ± 0,3
Chariot élévateur	0,5 ± 0,2
Pelle à chenilles	0,2 ± 0,1
Camion	0,3 ± 0,1
Tombereau	1,0 ± 0,1
Tondeuse autoportée	0,4 ± 0,2
Pelle à pneus	0,7 ± 0,1

← TABLEAU 2 Exemples d'accélération équivalente moyenne \bar{a}_{eq} mesurée pour certaines catégories d'engins.

entre les véhicules pour chaque degré de liberté. Par exemple, les conducteurs de chariot effectuent des mouvements de rotation dans le plan transversal ($\alpha_{5_dynamic}$) de plus grande amplitude que les conducteurs de camion ou de pelle (Cf. Figure 5). Certaines similitudes apparaissent également entre les véhicules en prenant en compte tous les degrés de liberté à la fois. De ce point de vue, les véhicules les plus semblables sont les camions et les tombereaux, ou encore les pelles à pneus et les pelles à chenilles, les chariots et les chargeuses. Ces observations s'expliquent par l'ergonomie de l'habitacle des engins (type de siège, rotation de la cabine, position des commandes, etc.) ainsi que par la nature des tâches (gerber en hauteur, se retourner pour regarder sur les côtés, etc.).

Vers une méthode d'évaluation combinée du risque vibratoire

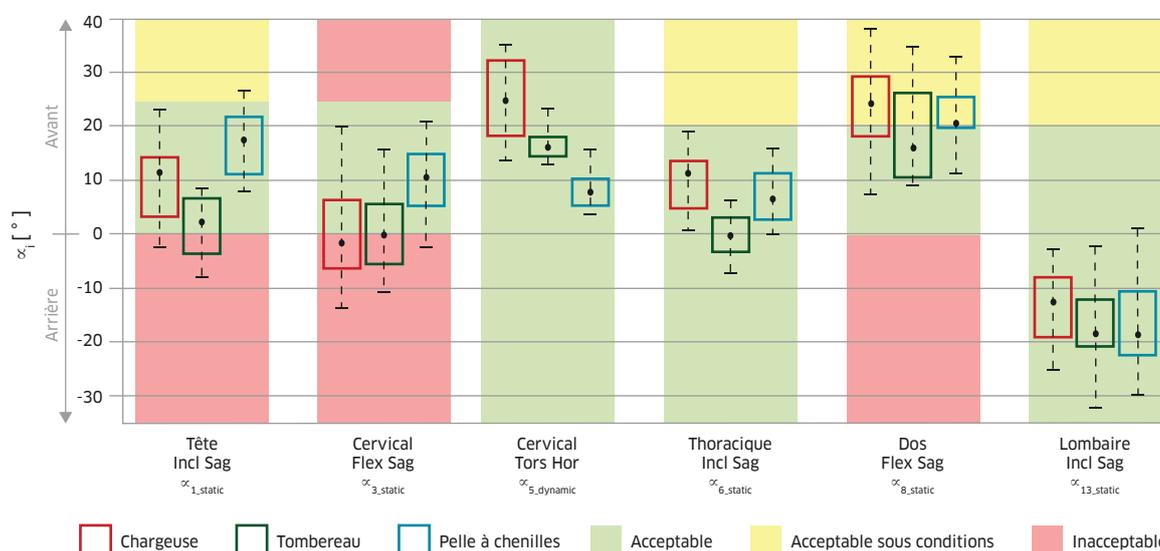
La cartographie des postures et des vibrations a permis de faire progresser les connaissances dans le domaine de la prévention des effets des vibrations sur la santé. Les positions et les mouvements des segments du corps susceptibles d'influencer la réponse biomécanique de la colonne vertébrale de conducteurs assis exposés à des vibrations ont été mesurés au poste de conduite dans des

conditions de travail réelles. Pour chaque famille d'engins mesurés, des différences entre les postures adoptées par les conducteurs ont été observées à la fois dans les positions statiques et dans les mouvements. Certaines de ces différences se sont révélées significatives du point de vue de la procédure d'évaluation du risque décrite par la norme EN 1005 [8].

Une des limites de cette étude concerne la représentativité des résultats obtenus. Pour des raisons de coût (matériel et en temps), le nombre d'essais réalisés demeure limité. La cartographie sera complétée au fur et à mesure des futures interventions de l'INRS en entreprise. Certains engins seront étudiés en priorité (tracteurs, tondeuses, chariots élévateurs, etc.).

Les efforts de recherche portent désormais sur la mise au point d'une méthode d'évaluation combinée du risque vibratoire prenant en compte la position et les mouvements du corps. Cette méthode d'évaluation devra être la plus simple possible et utilisable directement par des acteurs de la prévention en entreprise.

Les travaux actuels concernent l'estimation des sévérités relatives des postures en présence de vibrations. Les mouvements du rachis soumis à des vibrations sont complexes. L'ergonomie de



← FIGURE 4 Illustration des positions angulaires α_{1_static} (position statique) et $\alpha_{1_dynamic}$ (mouvements) des segments du corps de 12 conducteurs mesurées dans 3 engins. Critères d'acceptabilité des déviations angulaires des segments dérivés de la norme EN-1005.



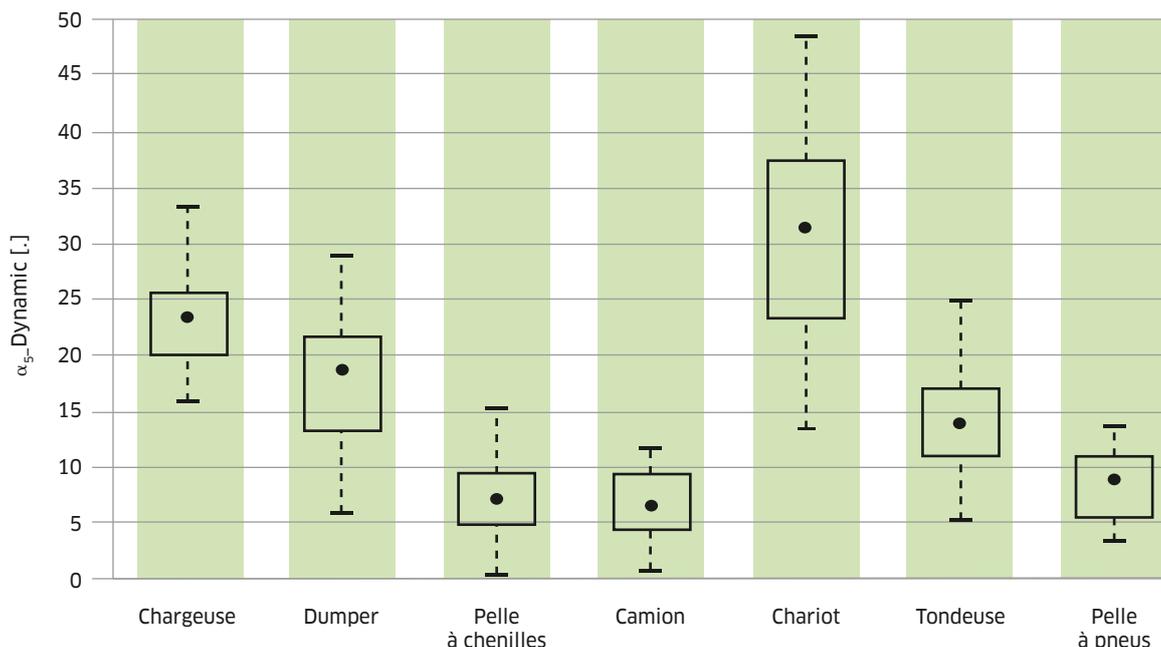


FIGURE 5 → Mouvements de rotation du cou ($\alpha_{s_dynamic}$ = écart-type ($\alpha_s(t)$) calculés pour sept engins [°] - Valeurs limites EN 1005 (vert: « Acceptable »).

l'habitacle, le type de siège, la tension musculaire pour le maintien de la posture ou les mouvements, le contexte cognitif sont autant de paramètres susceptibles de modifier le comportement dynamique du corps des conducteurs. La réponse dynamique du corps est donc étudiée en laboratoire dans des conditions contrôlées. Des essais se déroulent sur un banc d'essai permettant de reproduire des vibrations. Des sujets volontaires seront exposés à des vibrations de l'ensemble du corps dans les trois directions de l'espace (x, y et z). Les caractéristiques de l'environnement sont les plus proches possible de celles des cabines d'engins:

- les vibrations sont dans les gammes d'amplitudes (0,1-2,0 m.s⁻²) et de fréquences (0,2-15 Hz) rencontrées dans les principales familles d'engins vibrants;
- la position du corps et les mouvements des sujets sont contrôlés et mesurés. Les segments

du corps et les degrés de liberté étudiés seront définis par familles d'engins à partir des résultats de la cartographie.

De cette manière, les contributions de chacun des paramètres posturaux à l'augmentation du risque vibratoire seront prises en compte: amplitude des positions angulaires des segments, amplitude et fréquence des mouvements, degrés de liberté concernés, etc. Les sévérités des postures remarquables dans les principales familles d'engins seront intégrées aux évaluations combinées du risque vibratoire en partant du principe que les plus grandes contraintes mécaniques entre les vertèbres apparaissent aux fréquences de résonance des segments concernés. ●

1. IFA: Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung

2. CUELA: Computer-Unterstützte Erfassung und Langzeit-Analyse von Belastungen des Muskel-Skelett-Systems

BIBLIOGRAPHIE

[1] *Vibrations et mal de dos - Guide de bonnes pratiques en application du décret Vibrations*, INRS, ED 6018, 2012.

[2] *Réduction des vibrations au poste de conduite d'engins de chantier. Travailler sans secousses*, INRS, ED 6130, 2012.

[3] AMARI M., DONATI P. Opérateurs d'engins mobiles: vers une prise en compte de la posture dans l'évaluation du risque vibratoire. *Hygiène & sécurité du travail*, 227, ND 2359, 2012.

[4] AMARI M. Effets sur la santé des vibrations transmises à l'ensemble du corps. *Hygiène & sécurité du travail*, 233, compte rendu de congrès, 2013.

[5] *Les maladies professionnelles. Guide d'accès aux tableaux du régime général et du régime agricole de la Sécurité sociale*, INRS, ED 835, 2010.

[6] Norme internationale ISO 2631-1. Vibrations et chocs mécaniques. Évaluation de l'exposition des individus à des vibrations globales du corps - Partie 1: Spécifications générales, 2004.

[7] *Travail et lombalgie. Du facteur de risque au facteur de soin*, INRS, ED 6087, 2011.

[8] Norme européenne EN 1005-4. Sécurité des machines: Performance physique humaine - Partie 4: évaluation des postures et mouvements lors du travail en relation avec les machines, 2005.