

- Vibration
- Engin
- Travail assis
- Posture
- Lombalgie
- Mesure

► Maël AMARI, Patrice DONATI, INRS, département Ingénierie des équipements de travail

OPÉRATEURS D'ENGINS MOBILES

VERS UNE PRISE EN COMPTE DE LA POSTURE DANS L'ÉVALUATION DU RISQUE VIBRATOIRE

Les enquêtes épidémiologiques démontrent un risque accru de lombalgie chez les opérateurs d'engins mobiles travaillant en position assise. Pour prévenir ce risque, l'INRS et ses homologues internationaux cherchent à développer une méthode d'évaluation du risque vibratoire intégrant l'ensemble des contraintes physiques auxquelles des opérateurs d'engins vibrants peuvent être exposés. Les efforts portent sur l'apport de connaissances nouvelles concernant la quantification ainsi que l'évaluation de la sévérité de la posture et des mouvements d'un conducteur dans un environnement vibrant (modélisation, épidémiologie, protocole d'évaluation, etc.). Aujourd'hui, les préventeurs n'en sont qu'à l'étape initiale de spécification des grandeurs descriptives de la posture et de l'environnement ergonomique du conducteur assis. L'objectif de cet article est de présenter, à travers une revue de littérature, les connaissances actuelles sur les principaux risques physiques à l'origine de troubles lombalgiques chez les opérateurs d'engins mobiles. Les grandeurs de référence qui déterminent la position et les mouvements du corps sont ensuite détaillées et illustrées par des mesures effectuées à l'aide d'un dispositif spécifique adapté au poste de conduite d'engins mobiles.

L'enquête SUMER estime que 10 % des travailleurs français sont exposés à des vibrations de l'ensemble du corps susceptibles de porter atteinte à leur santé [1]. Parmi l'ensemble des catégories professionnelles étudiées, les opérateurs d'engins mobiles du BTP, des transports, de la manutention ou de l'agriculture sont les travailleurs pour lesquels le taux de prévalence des déclarations de mal de dos est le plus élevé. Ils sont principalement exposés à des secousses,

des chocs, et des vibrations transmises à l'ensemble du corps par l'intermédiaire du siège sur lequel ils sont assis.

Certaines atteintes de la colonne vertébrale ou des tissus qui l'entourent, liées à l'exposition du corps aux vibrations, sont reconnues comme maladies professionnelles (sciatique par hernie discale L4-L5 ou L5-S1, radiculalgie crurale par hernie discale L2-L3 ou L3-L4 ou L4-L5). Elles sont indemnisées au titre du tableau n°97 du régime général

MOBILE MACHINE OPERATORS: POSTURE CONSIDERATION IN ASSESSING VIBRATION RISK

Epidemiological studies reveal a greater risk of low back pain (lumbago) for mobile machine operators working in a seated position. INRS and its international counterparts are seeking to prevent this risk by developing a vibration risk assessment method, which integrates all the physical stresses to which vibrating machine operators can be exposed. Research efforts are based on contributing new knowledge concerning quantification and evaluation of posture severity and operator movements in a vibrating environment (modelling, epidemiology, evaluation protocol, etc.). Prevention specialists are currently only at the initial stage of specifying descriptive quantities for the seated operator's posture and the ergonomic environment. The purpose of this paper is to present existing knowledge of the main physical risks causing low back disorders in mobile machine operators by reviewing the relevant literature. The reference quantities, which determine body position and movements are then detailed and illustrated by measurements taken using a specific device adapted to mobile machine driving stations

- Vibration
- Mobile machine
- Seated work
- Posture
- Low back pain
- Measurement

de la sécurité sociale [2]. Ces troubles lombalgiques, première cause de handicap chez les travailleurs de moins de 45 ans, occupaient en 2010 la 7^e place en nombre de maladies professionnelles déclarées en France [3].

Pour garantir un meilleur niveau de protection, des prescriptions minimales relatives à l'exposition des travailleurs aux vibrations sont définies par la directive 2002/44/CE du parlement européen et du conseil [4]. Ces prescriptions sont transposées en droit français par le décret n° 2005-746 du 4 juillet 2005 [5]. Elles imposent aux employeurs d'évaluer le risque vibratoire conformément aux dispositions de la norme ISO 2631-1:1997 [6]. La procédure tient compte de l'amplitude des vibrations, de leur durée, de leur contenu fréquentiel ainsi que de leurs directions par rapport à une posture statique de référence.

Même si ces paramètres sont essentiels pour l'évaluation du risque de mal de dos au poste de conduite de machines mobiles, d'autres facteurs ne doivent pas être négligés : l'ergonomie du poste de travail, les contraintes organisationnelles, le travail en position assise prolongée, ou encore les mouvements liés à la tâche de travail [6, 7]. En effet, il est supposé que les contraintes créées par les vibrations au niveau du dos, des épaules et du cou sont susceptibles d'être augmentées par des postures défavorables liées à la tâche de travail. Selon cette hypothèse, la prise en compte de la posture idéale décrite par la norme ISO-2631:1997 (buste droit, genoux à 90°, mains sur les genoux) ne serait pas suffisamment représentative des situations réelles [8]. Bien que les préconisations de cette norme soient basées sur une relation de cause à effet entre l'exposition aux vibrations et les lombalgies, les pondérations fréquentielles proposées sont issues d'un travail de laboratoire effectué sur des sièges standardisés très différents des sièges réels (assise plate et rigide, pas de dossier) [7, 9]. Enfin, la posture de l'opérateur est supposée statique par la norme durant toute la durée d'exposition. Ce n'est pas le cas dans la réalité.

Dans ce contexte, les experts ont mis en place une démarche visant à intégrer l'ensemble des contraintes physiques auxquelles peuvent être exposés des travailleurs dans la procédure d'évaluation du risque vibratoire de la norme ISO 2631-1:1997. Les efforts portent sur l'ap-

port de connaissances nouvelles concernant la quantification (grandeurs de référence, mesures, etc.) ainsi que l'évaluation de la sévérité (modélisation, épidémiologie, protocole d'évaluation, etc.) de la posture et des mouvements d'un conducteur. Aujourd'hui, les experts n'en sont qu'à l'étape initiale de spécification des quantités descriptives de la posture et de l'environnement ergonomique d'un conducteur assis.

L'objectif de cet article est de présenter l'état d'avancement de cette démarche de prévention consistant à prendre en compte la posture dans l'évaluation de la sévérité vibratoire. Les connaissances actuelles qui concernent les principaux risques physiques à l'origine de troubles lombalgiques chez les opérateurs d'engins mobiles sont présentées à travers une synthèse de la littérature disponible sur le sujet. Les grandeurs de référence qui déterminent la position et les mouvements du corps sont ensuite détaillées et illustrées par des mesures effectuées à l'aide d'un dispositif spécifique adapté au poste de conduite d'engins mobiles.

RISQUES PHYSIQUES DE LOMBALGIE PROFESSIONNELLE

La lombalgie est une douleur du bas du dos qui peut être intense et handicapante. Elle n'est généralement pas proportionnelle à la gravité des lésions (atteintes de ligaments, muscles et tendons qui assurent le rôle locomoteur du rachis) mais peut rendre toute activité physique pénible, voire impossible. Les principaux facteurs de risque de lombalgie aiguë (durée < 6 semaines) ou chronique (durée > 3 mois) peuvent être regroupés en quatre catégories [10] :

■ les contraintes physiques : postures pénibles sous contraintes, manutentions manuelles, exposition aux vibrations, chutes, etc. ;

■ les paramètres individuels : corpulence (maigreur ou obésité), grossesse, anomalies anatomiques sévères, inactivité, tabac, etc. ;

■ les aspects psychologiques : conditions de travail jugées mauvaises, insatisfaction au travail, stress, contraintes psycho-sociales, etc. ;

■ l'absence de prévention ou de soins : manque de culture de prévention

dans l'entreprise, prise en charge inadéquate, etc.

Une analyse détaillée de l'activité des opérateurs d'engins mobiles montre qu'ils sont exposés à une combinaison de plusieurs facteurs de risque physique susceptibles d'augmenter la charge supportée par leur colonne vertébrale. L'un des plus importants est la station assise prolongée qui maintient l'individu dans une posture contrainte par les caractéristiques de l'habitacle de l'engin (forme et hauteur du siège, position des pédales, du volant ou des commandes). À cette position statique plus ou moins favorable s'ajoutent des mouvements liés à la tâche de travail à accomplir : se retourner, se pencher, tourner ou lever la tête. Dans certains cas, des contraintes supplémentaires peuvent également être présentes (force pour activer les commandes, manutention pendant ou juste après la conduite, etc.). D'autres facteurs peuvent enfin s'avérer traumatiques : l'état mental, le stress, la pénibilité perçue du travail sont autant de facteurs psychologiques susceptibles d'augmenter la tension et la fatigue musculaire créées par l'environnement physique dégradé de l'opérateur.

EXPOSITION AUX VIBRATIONS DU CORPS

Les effets des vibrations sur la santé sont très documentés [11, 12]. Les nombreuses études épidémiologiques disponibles font apparaître que l'exposition aux vibrations est associée au mal de dos dans toutes les activités étudiées [12 - 16]. Une relation de cause à effet est établie entre la dose vibratoire reçue et certaines pathologies (traumatismes du dos et du cou, hernie discale, etc.) [17].

POSTURE ASSISE MAINTENUE

La position de travail assise est définie comme une posture droite pour laquelle la tête et le torse sont verticaux, les jambes pliées à environ 90° par rapport au niveau des hanches et des genoux et les pieds posés sur le sol [18]. Il s'agit d'une posture maintenue, considérée « statique » par opposition à des mouvements plus rapides liés à la réalisation d'une tâche de travail.

Dans la plupart des activités, la posture assise peut être considérée comme moins contraignante que la posture debout. Pourtant, la littérature indique

une augmentation du risque de lombalgie et de sciatique pour les individus dont le travail impose une station assise prolongée [19]. Le taux de prévalence des déclarations de mal de dos est significativement plus élevé pour les activités qui nécessitent que le travailleur soit assis pendant plus de la moitié de son temps de travail [20]. L'existence d'une relation de cause à effet entre les caractéristiques de l'environnement de travail et le mal de dos est reconnue [21, 22].

De nombreuses hypothèses pour expliquer les mécanismes physiologiques mis en jeu existent. La plus courante est qu'une posture assise défavorable maintenue (colonne vertébrale courbée dans un sens ou dans l'autre), pendant une longue durée, conduirait à une pression intradiscale plus élevée, susceptible de porter atteinte à la colonne vertébrale [23]. La position du corps influencerait la charge de la colonne vertébrale [24]. L'amplitude de cette charge augmenterait significativement chez un sujet assis par rapport à un sujet debout. Mais, cette constatation est sujette à controverse : plusieurs études la confirment [25, 26] tandis que d'autres annoncent des résultats différents [27, 28]. Par exemple, une posture assise entraînerait une contrainte moins importante au niveau des disques inter-vertébraux que lorsque l'on se tient debout (10 % de moins) [28]. Une autre hypothèse est que le maintien d'une posture assise pendant une durée importante conduirait à une mauvaise nutrition des disques intervertébraux [23]. Changer souvent de position améliorerait alors la circulation des fluides irrigant les disques.

Au final, si certaines études épidémiologiques rapportent une augmentation des déclarations de lombalgies pour les activités dans lesquelles la majeure partie des contraintes physiques est d'être assis [21, 22], le taux de mal de dos chez les personnes assises demeure moins élevé que chez les personnes ayant des activités physiques plus contraignantes. Ainsi, pour les opérateurs d'engins mobiles, le risque de lombalgie lié uniquement à des positions de travail assises contraintes existe mais ne doit pas être surestimé.

MOUVEMENTS LIÉS À LA TÂCHE DE TRAVAIL

Dans la littérature, une posture défavorable est définie comme une posture non neutre au niveau du tronc (i.e.

flexion ou torsion). À l'inverse de la posture assise, une posture défavorable n'est pas nécessairement maintenue tout au long de l'activité professionnelle. Il peut s'agir de mouvements occasionnels réalisés par le travailleur : se pencher, tourner ou lever la tête, se retourner, actionner une commande, etc. La vitesse et la fréquence des mouvements revêtent une importance particulière.

Parmi l'ensemble des études épidémiologiques recensées, quatre sont particulièrement intéressantes vis-à-vis des mouvements réalisés par les opérateurs d'engins. Bovenzi et col. étudient l'occurrence du mal de dos sur une population d'opérateurs de tracteurs agricoles, exposés à des vibrations globales du corps ainsi qu'à des postures défavorables [12]. Les sujets sont interrogés à propos de différents symptômes (mal de dos, sciatique, douleur aiguë, douleur transitoire ou douleur persistante). Indépendamment de l'effet des vibrations, la déclaration de douleur lombaire est accrue lorsque l'exposition aux postures défavorables augmente (facteur 2). Dans une autre étude, les mêmes auteurs étudient à nouveau une population d'opérateurs de tracteurs agricoles [29]. La prévalence des symptômes de mal de dos déclarés est comparée à celle d'un groupe d'opérateurs de bus, uniquement exposés à des vibrations. Cette fois, l'exposition aux postures défavorables augmente le risque de mal de dos d'un facteur 5. Bridger et col. utilisent également un questionnaire pour évaluer les déclarations de mal de dos de pilotes et co-pilotes d'hélicoptère de la Royal Navy [30]. Le taux de prévalence de mal de dos est de 80 %. Les douleurs déclarées trouvent leur origine dans les contraintes posturales liées à la tâche de pilotage : se pencher vers l'avant (par opposition à s'asseoir bien droit) entraîne une très importante augmentation des déclarations (facteur 6). L'effet ne semble pas linéaire : un angle de flexion du tronc plus important n'augmente pas d'autant les déclarations (facteur 3 seulement). Enfin, Massaccesi et col. comparent un groupe de conducteurs de camion (assis normalement) et un groupe d'opérateurs de camions de nettoyage, amenés à conduire avec le cou et le tronc fléchis, penchés et tournés [31]. L'exposition aux postures défavorables (flexion sagittale et latérale du tronc et du cou, torsion, etc.) augmente le taux d'occurrence des douleurs dorsales d'un peu plus de 10 %. De plus, certains opérateurs sont exposés à des flexions sagit-

tales et latérales du tronc, des torsions, etc. alors que les autres ne sont exposés qu'à un seul de ces facteurs à la fois. Les auteurs observent que plusieurs types de mouvements simultanés sont plus nuisibles à la santé qu'un seul d'entre eux.

EXPOSITIONS COMBINÉES

Concernant les effets combinés, il apparaît qu'une posture de travail assise et maintenue, couplée à l'exposition aux vibrations, augmente le risque de mal de dos [12, 14, 32-34]. La position assise et l'exposition simultanée à des postures défavorables augmentent également de manière très significative le risque de mal de dos [17, 28, 34 - 36]. L'exposition simultanée à ces trois facteurs de risque conduit à l'augmentation la plus importante de ce risque [30]. En comparaison, l'augmentation du risque dû à la station assise seule demeure toujours très faible. Ainsi, le simple fait de s'asseoir ne représente quasiment aucun risque jusqu'au moment où le sujet est soumis à des vibrations ou à des postures défavorables.

Un modèle qualitatif a été développé pour décrire la relation entre le travail en position assise, les postures défavorables, les vibrations du corps et l'augmentation du risque pour la santé (cf. Figure 1) [37]. Bovenzi et col. ont tenté de démontrer qu'un tel effet existe chez les opérateurs de tracteurs agricoles. Ils ont analysé, de manière quantitative, les effets combinés des contraintes posturales défavorables et de la dose vibratoire [12]. Leur étude montre que les conducteurs de ces engins sont davantage susceptibles de déclarer une lombalgie que les travailleurs de la catégorie professionnelle de référence (facteur 4,5).

MESURE DE LA POSTURE ET DES MOUVEMENTS DU CORPS

GRANDEURS DESCRIPTIVES NORMALISÉES

L'élaboration d'une procédure normalisée qui permet de quantifier la posture d'un opérateur assis passe par la définition des grandeurs de référence, des segments du corps et des angles d'articulation à mesurer, de la position

des capteurs de mesure, du protocole de mesure, etc. À cet effet, le projet de norme ISO/PRF TR 10687:2011 rassemble les grandeurs descriptives pertinentes pour déterminer la posture pour une personne assise exposée aux vibrations globales du corps [38]. L'objectif est qu'une terminologie commune soit ainsi définie entre les différents laboratoires de recherche. Les contraintes posturales liées à la position du tronc doivent pouvoir être déterminées.

La colonne vertébrale est composée de 24 vertèbres : 7 vertèbres cervicales, 12 thoraciques et 5 lombaires possédant des degrés différents de mobilité [39] :

- à cause de sa grande mobilité, il est plus facile de décrire les mouvements de la partie cervicale de la colonne vertébrale par la position de la tête (flexion ou extension sagittale, flexion latérale et rotation axiale) ;

- la partie thoracique de la colonne vertébrale se distingue très clairement de la partie lombaire d'un point de vue de la mobilité. Pour cette raison, les mouvements de ces deux parties doivent être étudiés séparément ;

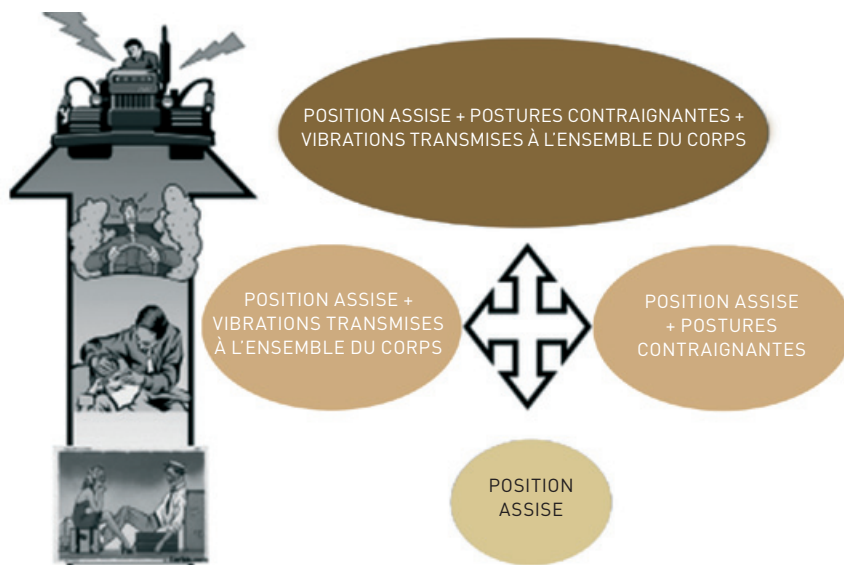
- la partie inférieure de la colonne vertébrale est fortement liée au pelvis. Le basculement d'avant en arrière de celui-ci entraîne une courbure de la partie lombaire de la colonne vertébrale. Il est suffisant de mesurer la flexion/extension sagittale et la flexion latérale. À ce niveau, la rotation axiale est négligeable pour une personne assise.

Les points de référence choisis dans la norme ISO/PRF TR 10687:2011 correspondent à des points repérables sur la peau ou sur les habits de la personne (cf. Figure 2). Des lignes et des plans peuvent être définis à partir de ces points pour décrire la position des différents segments du corps. Les positions relatives de ces segments définissent à leur tour des postures. De cette manière, les angles entre les lignes et les plans définis par rapport à un repère de coordonnées peuvent être corrélés à des mouvements de ces parties de la colonne vertébrale qui sont considérées comme indépendantes les unes des autres.

Les mouvements élémentaires selon lesquels peuvent être décomposés les mouvements d'une personne sont présentés dans le *Tableau I*. Ils sont accompagnés de la liste des points nécessaires à leur description [38].

FIGURE 1

Facteurs de risque lombalgique - Modèle qualitatif [37]



ESTIMATION DE LA SÉVÉRITÉ

L'organisme allemand de prévention des risques professionnels (IFA¹) a développé un dispositif permettant de mesurer la position du corps des conducteurs d'engins (CUELA²) [40]. Ce dispositif permet une mesure statique et dynamique de la position des jambes, du tronc et de la tête. Il est composé d'accéléromètres (Analog Devices - ADXL 103/203), de gyroscopes (muRata - ENC-03R) et d'un enregistreur numérique multicanal, à carte mémoire, fixé sur les vêtements du sujet. Celui-ci peut se déplacer librement et n'est pas gêné dans sa tâche de conduite. La mesure des vibrations peut être réalisée simultanément. Les enregistrements sont synchronisés à l'aide d'un signal d'horloge. La Figure 3 présente le positionnement du dispositif sur le corps d'un conducteur.

Chaque angle ou position de segment du corps est mesuré en utilisant trois accéléromètres orientés selon un repère ortho-normal. Les signaux des gyroscopes sont utilisés pour corriger les perturbations des accéléromètres, entraînées par de grands déplacements de basse fréquence ou de forte amplitude de vibrations (précision +- 5°).

Le *Tableau II* présente sept angles mesurés par le dispositif CUELA. L'IFA a également développé une méthode

pour estimer la sévérité présumée de la posture. Des catégories d'angles (« Neutre », « Modéré », « Sévère ») sont associées à chacun des degrés de liberté. Elles sont basées sur les recommandations des normes ISO 11226:2002 et EN 1005-4:2005 [18, 41]. Elles reposent uniquement sur des critères ergonomiques comme le confort articulaire, la tension musculaire ou le coût cardiaque et ne tiennent pas compte des effets sur la santé vis-à-vis du risque vibratoire.

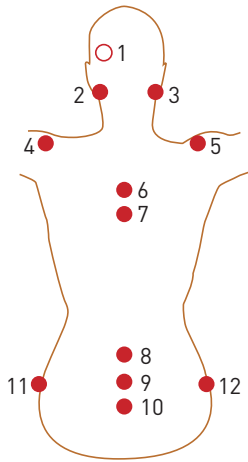
Le pourcentage du temps de travail passé dans chaque catégorie d'angle est mesuré pour chaque degré de liberté. Si le pourcentage de temps passé dans la catégorie « Sévère » $t_{s,i}$ est supérieur à 30 %, ce degré de liberté est considéré comme sévère ($c_i = 1$). La sévérité de l'ensemble des degrés de liberté est estimée par :

$$S_p = \sum_{i=1}^7 c_i ; c_i = \begin{cases} 0 & \text{si } \frac{t_{s,i}}{T} < 30 \% \\ 1 & \text{si } \frac{t_{s,i}}{T} > 30 \% \end{cases}$$

¹ IFA : Institute for Occupational Safety and Health of the German Social Accident Insurance
² CUELA : Computer-assisted recording and long-term analysis of musculoskeletal loads

FIGURE 2

Points de référence de la norme ISO/PRF TR 10687:2011



Où :

- 1 : canthus latéral gauche
- 2 : tragus gauche
- 3 : tragus droit
- 4 : acromion gauche
- 5 : acromion droit
- 6 : vertèbre cervicale C7
- 7 : vertèbre thoracique T3
- 8 : vertèbre lombaire L5
- 9 : vertèbre lombaire L3
- 10 : vertèbre lombaire L1
- 11 : grand trochanter (g)
- 12 : grand trochanter (d)

TABLEAU I

Angles élémentaires pour la description des mouvements de la colonne vertébrale

Segment du corps	Mouvement / angle	Points de référence
Tête / Vertèbres cervicales	Flexion/Extension sagittale	1 à 3
	Flexion latérale	1 à 3
	Rotation axiale	1 à 5
Vertèbres thoraciques	Flexion/Extension sagittale	6 à 7
	Position du dossier	6 à 7
	Flexion	6 à 7
Vertèbres lombaires	Rotation axiale	4 à 7
	Flexion/Extension sagittale	8 à 10
	Position du dossier	8 à 10
Pelvis	Flexion latérale	8 à 10
	Courbure (cyphose, lordose)	8 à 10
	Basculement	11 à 12
	Rotation axiale	11 à 12

FIGURE 3

Disposition des capteurs du système CUELA sur les vêtements d'un conducteur



T représente la durée totale d'enregistrement, la sévérité du $i^{\text{ème}}$ degré de liberté. La durée totale de temps écoulé dans une catégorie d'angle « Sévère » T_{Sp} est estimée par sommation des pourcentages de temps passé dans la catégorie « Sévère » pour chacun des degrés de liberté. La valeur obtenue varie entre 0 et 700 %. 0 % signifie qu'aucun angle mesuré pour chacun des degrés de liberté ne s'est trouvé dans la catégorie « Sévère ». Une valeur de 700 % signifie au contraire que les 7 angles mesurés sont sévères pendant 100 % du temps.

SÉVÉRITÉ DE L'EXPOSITION COMBINÉE POSTURES – VIBRATIONS

Conformément aux recommandations de la norme ISO-2631-1:1997, la mesure des vibrations est effectuée dans trois directions à la surface du siège (x : avant-arrière, y : latéral, z : vertical) avec une cupule accélérométrique (PCB – 356B41) (cf. Figure 4). Ces capteurs sont reliés à un frontal d'acquisition autonome (Head Acoustics - Datarec4 : DIC6Bfilter + LMF2FE Rec) permettant l'enregistrement des mesures.

L'évaluation de l'exposition aux vibrations s'effectue par le calcul de l'accélération globale instantanée a_v :

$$a_v = \sqrt{1.4^2 a_{wx}^2 + 1.4^2 a_{wy}^2 + a_{wz}^2} [m.s^{-2}]$$

a_{wx} , a_{wy} et a_{wz} sont les accélérations instantanées pondérées en fréquence pour tenir compte de la sensibilité du corps aux vibrations [6]. a_v combine les accélérations selon les trois directions de l'espace. Trois catégories sont créées a priori pour décrire la sévérité de l'exposition vibratoire [40, 42]. La catégorie

TABLEAU II

Angles et segments du corps mesurés par CUELA

Posture	Inclinaison Tête (sagittal)	Flexion Cou (sagittal)	Flexion Cou (latéral)	Inclinaison Tronc (sagittal)	Inclinaison Tronc (latéral)	Flexion Dos (sagittal)	Flexion Dos (latéral)
Neutre (N)	0 - 25° < 0° (si support)	0 - 25°	-10° - 10°	0 - 20° < 0° (si support)	0° - 10°	0° - 20°	0° - 10°
Modéré (M)	25° - 85°	-	-	20° - 60°	10° - 20°	20° - 40°	10° - 20°
Sévère (S)	< 0° > 85°	< 0° > 25°	< -10° > 10°	< 0° > 60°	< -20° > 20°	< 0° > 40°	< -20° > 20°

FIGURE 4

Dispositif expérimental pour la mesure des postures et des vibrations



« Faible » inclut toutes les valeurs de a_v inférieures à 0.5 m.s⁻². La catégorie « Moyen » comprend les valeurs comprises entre 0.5 m.s⁻² et 1.5 m.s⁻². Enfin, la catégorie « Fort » regroupe toutes les valeurs supérieures à 1.5 m.s⁻².

Le **Tableau III** présente le critère global combinant les catégories d'angles (« Neutre », « Modéré », « Sévère ») et de vibrations (« Faible », « Modéré » et « Fort »).

De la même manière que pour la description de la posture seule, si la durée mesurée du temps passé de la $i^{\text{ème}}$ combinaison dans la catégorie de risque combiné « Elevé » est supérieure à 30 % du temps de mesure (T), la combinaison des vibrations et de l'angle en question est considérée à risque ($C_i=0$). Le nombre de combinaisons à risque est défini comme suit :

$$S_{pV} = \sum_{i=1}^7 C_i ; C_i = \begin{cases} 0 & \text{si } \frac{t_{E,i}}{T} < 30 \% \\ 1 & \text{si } \frac{t_{E,i}}{T} > 30 \% \end{cases}$$

Enfin, les pourcentages de temps passé dans une catégorie à risque combiné élevé sont sommés (T_{SpV}). Dans le meilleur des cas, aucune combinaison d'angles et de vibrations à risque combiné élevé n'est observée ($T_{SpV} = 0\%$). Dans le cas le plus défavorable, la totalité des combinaisons sont à risque combiné élevé pendant 100 % du temps de mesure ($T_{SpV} = 700\%$).

APPLICATION : MESURES DANS TROIS VEHICULES DIFFERENTS

Une série de mesures embarquées a été effectuée pour estimer la pertinence du choix de ces grandeurs pour discriminer la sévérité de différentes tâches de travail. Les postures et l'exposition aux vibrations du corps des conducteurs ont été mesurées simultanément dans

TABLEAU III

Combinaison des postures et vibrations

Risque combiné	Posture		Vibrations
Faible (F)	Neutre ou modérée	Et	Faible
Possible (P)	Neutre ou modérée	Et	Modéré
Élevé (E)	Sévère	Ou	Sévère

trois véhicules (cf. **Figure 5**). Le **Tableau IV** décrit les tâches de travail effectuées avec chaque véhicule. La durée des mesures dépend de la nature de la tâche de travail. Des enregistrements vidéo ont été effectués pour l'analyse de la tâche de travail, l'observation des mouvements des conducteurs, ainsi que la vérification de l'alignement des capteurs de posture.

POSTURE ET MOUVEMENTS DU CORPS

Le **Tableau V** rassemble les données de postures mesurées dans les trois véhicules, comparées aux résultats publiés par l'IFA [42]. Pour chaque degré de liberté, les pourcentages des durées mesurées dans chacune des catégories « Neutre », « Modéré » et « Sévère » (S) sont présentés. Ces résultats sont accompagnés des valeurs des indicateurs de sévérité et pour chacun des véhicules mesurés.

La posture adoptée par le conducteur du véhicule utilitaire est très majoritairement neutre pour tous les degrés de liberté mesurés (à l'exception de la flexion sagittale du dos, jugée modérée à 80 % du temps). Aucun angle n'est maintenu dans la catégorie « Sévère » plus de 30 % du temps. La posture adoptée lors de la conduite du chariot élévateur est également neutre pour la plus grande partie des degrés de liberté considérés (sauf les flexions latérales du dos (M) et du cou (S)). Enfin, la conduite de la tondeuse autotractée expose à des postures plus défavorables. En effet, à l'exception de l'inclinaison du tronc et de la flexion latérale du dos, tous les angles mesurés sont jugés « sévères » pendant plus de 30 % des durées mesurées. Ces observations sont similaires à celles effectuées par l'IFA dans des véhicules équivalents. La comparaison des valeurs confirme ces observations.

FIGURE 5

Véhicules utilisés pour la simulation de tâches de travail



EXPOSITION AUX VIBRATIONS

Le *Tableau VI* présente les valeurs efficaces d'accélération $a_{v_{rms}}$ calculées sur toute la durée T des enregistrements. Ce tableau présente également des valeurs d'accélération $a_{v_{rms}}$ mesurées par l'IFA dans des conditions expérimentales similaires (« Van », « Forklift truck », « Tractor ») [42]. Les accélérations mesurées sont inférieures à celles de l'IFA. Ces écarts peuvent s'expliquer par les différences entre les surfaces de roulement des engins mesurés ou la nature des tâches de travail.

EXPOSITIONS COMBINÉES

Le *Tableau VII* synthétise les résultats de l'évaluation combinée de la posture et des vibrations. Pour chaque véhicule et pour chaque degré de liberté, les pourcentages des durées mesurées dans les catégories de risque combiné « Faible » (F), « Possible » (P) et « Elevé » (E) sont

TABLEAU IV

Conducteurs et protocole expérimental

N°	Posture		Durée	Conducteur		
	Type	Tâche		Âge	Taille	Poids
1	Véhicule utilitaire (Renault - Traffic)	Conduite sur autoroute et route de campagne	2 x 45 min	56 ans	1,90 m	78 kg
2	Chariot élévateur (Yale - GLP20A)	Manœuvres de chargement et déchargement, roulage en marche avant (chargé et non chargé), levage de charge	3 x 30 min	58 ans	1,70 m	65 kg
3	Tondeuse autotractée (Jonh Deere - F725)	Tonte de plusieurs parcelles, manœuvres en marche avant et en marche arrière, roulage entre différentes zones de travail	4 x 30 min	58 ans	1,70 m	65 kg

TABLEAU V

Mesures de posture comparées à celles de l'IFA pour des véhicules analogues [42]

	Posture	Mesures INRS			Mesures IFA		
		Véhicule utilitaire (%)	Chariot élévateur (%)	Tondeuse autotractée (%)	Van (%)	Forklift truck (%)	Tractor (%)
Inclinaison Tête (sagittal)	N	96	70	40	98	84	89
	M	3	13	28	1	7	10
	S	1	17	32	1	9	1
Flexion Cou (sagittal)	N	90	65	70	94	77	64
	M	0	0	0	0	0	0
	S	10	35	30	6	23	36
Flexion Cou (latéral)	N	95	87	68	99	80	80
	M	0	0	0	0	0	0
	S	5	13	32	1	20	20
Inclinaison Tronc (sagittal)	N	95	94	90	100	100	92
	M	4	6	10	0	0	8
	S	1	0	0	0	0	0
Inclinaison Tronc (latéral)	N	97	99	15	100	100	5
	M	3	1	3	0	0	0
	S	0	0	82	0	0	95
Flexion Dos (sagittal)	N	0	90	0	0	94	0
	M	80	10	15	87	6	8
	S	20	0	85	13	0	92
Flexion Dos (latéral)	N	98	5	85	100	10	97
	M	2	70	13	0	49	3
	S	0	25	2	0	41	0
Sp		0	1	5	0	1	3
T_{Sp} (%)		37	90	263	21	93	244

présentés. Le nombre de degrés de liberté à risque combiné élevé est également présenté (S_{pv}), ainsi que la somme des pourcentages de temps passé dans les catégories de risque « Elevé » (T_{Spv}).

Pour le véhicule utilitaire, les valeurs d'angle de tous les degrés de liberté appartiennent en très grande majorité à la catégorie de risque « Faible ». Il en est de même pour le chariot élévateur même si cette répartition est moins nette (flexion latérale du dos (S)). Enfin, bien que son niveau vibratoire soit moins élevé que celui du tracteur, la tondeuse autotractée fait majoritairement appa-

raître une catégorie de risque « Elevé ». Au final, les résultats obtenus sont discriminants d'un véhicule à l'autre.

CONCLUSION

D'un point de vue épidémiologique, les principales contraintes physiques susceptibles d'aggraver le risque de lombalgie professionnelle d'un opérateur d'engin mobile sont les vibrations, la position assise maintenue, les mouvements liés à la tâche

de travail et, ce, indépendamment de l'influence d'autres facteurs comme la force physique à déployer ou encore d'autres aspects psychologiques relatifs aux conditions de travail. La détermination quantitative de la manière dont l'exposition à ces facteurs affecte le risque de lombalgie reste à effectuer.

Concernant la description de la posture et des mouvements, les experts se sont accordés sur des grandeurs de référence permettant de définir une terminologie commune entre les laboratoires de recherche (ISO/PRF TR 10687:2011). La mesure de ces grandeurs peut être réalisée simultanément à celle des vibrations à l'aide d'un dispositif mis au point par l'organisme allemand de prévention des risques professionnels (IFA). Cet organisme a également élaboré une méthode pour estimer leur sévérité supposée à partir de critères ergonomiques (confort articulaire, tension musculaire, coût cardiaque, etc.). Les essais effectués montrent que les résultats sont discriminants d'une situation de travail à l'autre.

Les travaux à venir porteront sur la validation d'une méthode d'estimation de la sévérité des postures et des mouvements vis-à-vis de l'effet des vibrations sur la santé. Il conviendra pour cela d'identifier les grandeurs posturales de référence les plus pertinentes (modélisation, épidémiologie) et de confronter les résultats aux expositions réelles des travailleurs sur le terrain.

Reçu le : 23/02/2012

Accepté le : 23/04/2012

TABLEAU VI

Valeurs efficaces des accélérations pondérées a_v et a_{wv} sur toute la durée des enregistrements comparées aux résultats de l'IFA [42]

	Mesures INRS			Mesures IFA		
	Véhicule utilitaire	Chariot élévateur	Tondeuse autotractée	Van	Forklift truck	Tractor
$a_{wx_{rms}} [m.s^{-2}]$	0.25	0.18	0.61	0.34	0.24	0.81
$a_{wy_{rms}} [m.s^{-2}]$	0.10	0.10	0.21	0.14	0.12	0.17
$a_{wz_{rms}} [m.s^{-2}]$	0.09	0.20	0.17	0.14	0.23	0.22
$a_{v_{rms}} [m.s^{-2}]$	0.39	0.35	0.92	0.53	0.45	1.17

TABLEAU VII

Mesures de posture comparées à celles de l'IFA pour des véhicules analogues [42]

	Risque combiné	Mesures INRS			Mesures IFA		
		Véhicule utilitaire (%)	Chariot élévateur (%)	Tondeuse autotractée (%)	Van (%)	Forklift truck (%)	Tractor (%)
Inclinaison Tête (sagittal)	F	70	68	39	77	71	53
	P	24	19	31	19	18	35
	E	6	13	30	4	11	12
Flexion Cou (sagittal)	F	68	65	34	73	60	34
	P	19	15	33	19	15	23
	E	13	20	33	8	25	43
Flexion Cou (latéral)	F	73	70	50	77	60	42
	P	23	13	26	20	18	27
	E	4	17	24	3	22	31
Inclinaison Tronc (sagittal)	F	72	65	22	78	77	3
	P	26	29	6	20	20	2
	E	2	6	72	2	3	95
Inclinaison Tronc (latéral)	F	80	74	49	78	76	53
	P	15	19	33	20	20	35
	E	5	7	18	2	4	12
Flexion Dos (sagittal)	F	62	70	39	68	77	2
	P	28	26	30	17	20	3
	E	10	4	31	15	3	95
Flexion Dos (latéral)	F	95	28	40	78	45	53
	P	5	25	10	20	12	35
	E	0	47	50	2	43	12
Sp		0	1	5	0	1	4
T _{Sp} (%)		40	114	258	36	111	300

BIBLIOGRAPHIE

[1] European Agency for Safety and Health at Work, European risk observatory report. Workplace exposure to vibration in Europe: an expert review. ISSN 1830-5946.

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

[3] Caisse Nationale de l'Assurance Maladie des Travailleurs Salariés, D.D.R.P., Risque MP 2010 : sinistralité détaillée par CTN, n° de risque, n° de tableau MP et syndrome. 2010.

[4] Directive 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.

- [5] 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).
- [6] Norme Internationale, *Vibrations et chocs mécaniques. Evaluation de l'exposition des individus à des vibrations globales du corps - Partie 1 : Spécifications générales*. 1997. ISO-2631-1.
- [7] GRIFFIN M.J., *Handbook of human vibration*. Academic press, 1996.
- [8] ELLEGAST R.P. and K. J., *Portable posture and motion measuring system for use in ergonomic field analysis*. Ergonomic Software Tools in Product and Workplace Design, 2000: p. 47-54.
- [9] BELLMANN M.A., *Perception of whole-body vibrations: from basic experiments to effects of seat and steering-wheel on the passenger's comfort inside vehicles*. Oldenburg University, 2002.
- [10] MEYER J.P., *Travail et lombalgie. Du facteur de risque au facteur de soin*. INRS, 2011. ED 6087.
- [11] Norme Européenne, *Safety of machines - Human physical performance - Part. 4: Evaluation of working postures and movements in relation to machinery*. DIN EN 1005-4, 2005.
- [12] BOVENZI M. and BETTA A., *Low-back disorders in agricultural tractor drivers exposed to whole-body vibration and postural stress*. Applied Ergonomics, 1994. 25(4): p. 231-241.
- [13] MIYAMOTO M., et al., *An Epidemiologic Study of Occupational Low Back Pain in Truck Drivers*. Journal of Nippon Medical School, 2000. 67(3): p. 186-190.
- [14] BOVENZI M. and ZADINI A., *Self-Reported Low Back Symptoms in Urban Bus Drivers Exposed to Whole-Body Vibration*. Spine, 1992. 17(9): p. 1048-1059.
- [15] JOHANNING E., *Back disorders and health problems among subway train operators exposed to whole-body vibration*. Scandinavian journal of work, environment & health, 1991. 17(6): p. 414-9.
- [16] MAGNUSSON M.L., et al., *Are Occupational Drivers at an Increased Risk for Developing Musculoskeletal Disorders?*, Spine, 1996. 21(6): p. 710-717.
- [17] KEYSERLING W.M., PUNNETT L., and FINE L.J., *Trunk Posture and Back Pain: Identification and Control of Occupational Risk Factors*. Applied Industrial Hygiene, 1988. 3(3): p. 87 - 92.
- [18] Norme Internationale, *Ergonomie - Evaluation des postures de travail statiques*. ISO 11226:2000.
- [19] KELSEY J.L., *An epidemiological study of acute herniated lumbar intervertebral discs*. Rheumatology, 1975. 14(3): p. 144-159.
- [20] MAGORA A., *Investigation of the relation between low back pain and occupation. 3. Physical requirements: sitting, standing and weight lifting*. IMS Ind Med Surg, 1972. 41(12): p. 5-9.
- [21] LEVANGIE P.K., *Association of Low Back Pain With Self-Reported Risk Factors Among Patients Seeking Physical Therapy Services*. Physical Therapy, 1999. 79(8): p. 757-766.
- [22] VINGARD E. et al., *To what extent do current and past physical and psychosocial occupational factors explain care-seeking for low back pain in a working population? Results from the Musculoskeletal Intervention Center-Norrtälje Study*. Spine (Phila Pa 1976), 2000. 25(4): p. 493-500.
- [23] BONGERS P. and BOSCHUIZEN H.C., *Low back pain and whole-body vibration; a review of the literature on the pathological mechanisms. Back disorders and whole-body vibration at work*, 1990.
- [24] LIIRA J.P., et al., *Long-term back problems and physical work exposures in the 1990 Ontario Health Survey*. Am J Public Health, 1996. 86(3): p. 382-387.
- [25] ANDERSSON B.J., ORTENGREN R., *Myoelectric back muscle activity during sitting*. Scand J. Rehabil. Med. Suppl., 1974. 3: p. 73-90.
- [26] LEHMAN K.R., PSIHOGIOS J.P. and MEULENBROEK R.G.J., *Effects of sitting versus standing and scanner type on cashiers*. Ergonomics, 2001. 44(7): p. 719-738.
- [27] MARRAS W.S., et al., *Biomechanical risk factors for occupationally related low back disorders*. Ergonomics, 1995. 38(2): p. 377 - 410.
- [28] WILKE H.J., et al., *New in vivo measurements of pressures in the intervertebral disc in daily life*. Spine (Phila Pa 1976), 1999. 24(8): p. 755-62.
- [29] BOVENZI M., *Low back pain disorders and exposure to whole-body vibration in the workplace*. Seminars in Perinatology, 1996. 20(1): p. 38-53.
- [30] BRIDGER S. et al., *Task and postural factors are related to back pain in helicopter pilots*. Vol. 73. 2002, Alexandria, VA, ETATS-UNIS: Aerospace Medical Association.
- [31] MASSACCESI M. et al., *Investigation of work-related disorders in truck drivers using RULA method*. Applied Ergonomics, 2003. 34(4): p. 303-307.
- [32] BONGERS P.M. et al., *Back pain and exposure to whole body vibration in helicopter pilots*. Ergonomics, 1990. 33(8): p. 1007 - 1026.
- [33] BOSCHUIZEN H.C., BONGERS P.M. and HULSHOF C.T.J., *Self-Reported Back Pain in Fork-Lift Truck and Freight-Container Tractor Drivers Exposed to Whole-Body Vibration*. Spine, 1992. 17(1): p. 59-65.
- [34] BURDORF A. and ZONDERVAN H., *An epidemiological study of low-back pain in crane operators*. Ergonomics, 1990. 33(8): p. 981 - 987.
- [35] JOHANNING E., *Evaluation and management of occupational low back disorders*. 2000, John Wiley & Sons, Inc. p. 94-111.
- [36] SEIDEL H. and HEIDE R., *Long-term effects of whole-body vibration: a critical survey of the literature*. International Archives of Occupational and Environmental Health, 1986. 58(1): p. 1-26.
- [37] LIS A. et al., *Association between sitting and occupational LBP*. European Spine Journal, 2007. 16(2): p. 283-298.
- [38] *Projet de Norme internationale, «Vibrations mécaniques - Description et détermination des postures assises en référence à des vibrations transmises à l'ensemble du corps»*, ISO/PRF TR 10687, 2011.
- [39] KNUTZEN K.M., *Kinematics of human motion*. American Journal of Human Biology, 1998. 10(6): p. 808-809.
- [40] HERMANN I. et al., *Simultaneous field measuring method of vibration and body posture for assessment of seated occupational driving tasks*. International Journal of Industrial Ergonomics, 2008. 38(3-4): p. 255-263.
- [41] Norme Européenne. *Safety of machinery - Human physical performance - Part 4: Evaluation of working postures and movements in relation to machinery*. DIN EN 1005-4, 2005.
- [42] RAFFLER N. et al., *Assessing Combined Exposures of Whole-body Vibration and Awkward Posture: Further Results from Application of a Simultaneous Field Measurement Methodology*. Industrial Health, 2010. 48(5): p. 638-644.

