

CONGRÈS

COMPTE RENDU

3^e CONFÉRENCE INTERNATIONALE SUR LES RISQUES LIÉS À L'EXPOSITION AUX VIBRATIONS TRANSMISES À L'ENSEMBLE DU CORPS HUMAIN

7-9 juin 2005
Nancy (France)

L'INRS et le National Institute for Working Life (NIWL, Suède) ont organisé les 7 et 9 juin 2005 à Nancy, la 3^e conférence internationale sur les risques liés à l'exposition aux vibrations transmises à l'ensemble du corps humain. Cent cinquante professionnels originaires d'une douzaine de pays ont participé à cette conférence. Elle a précédé de peu l'application en France de la nouvelle directive sur les vibrations, directive¹ qui fixe des valeurs limites d'exposition à respecter par les employeurs. Une cinquantaine de communications ont été présentées. L'objet de cet article est de résumer les principales conclusions de ces journées qui ont notamment comporté des sessions sur l'épidémiologie, la modélisation de la réponse dynamique du corps humain, les types d'exposition, les systèmes de suspension, les stratégies de prévention.

► Patrice DONATI,
INRS, Département Ingénierie des équipements
de travail

ENQUÊTES ÉPIDÉMIOLOGIQUES

De nombreuses enquêtes épidémiologiques dont certaines remontent aux années 60 ont démontré que la conduite régulière de véhicules professionnels transmettant de sévères vibrations globales du corps s'accompagne d'un risque accru de douleurs. Néanmoins, rares sont les enquêtes ayant pu déterminer une relation dose/effet entre l'amplitude des vibrations et la probabilité de la pathologie. Les résultats des quatre enquêtes épidémiologiques présentés ci-dessous mettent en évidence le rôle combiné des différentes contraintes (posture, manutention, vibrations...) auxquelles sont soumis les conducteurs de ces véhicules.

Bovenzi et coll. examinent la prévalence des douleurs lombaires chez 598 conducteurs professionnels masculins employés dans des carrières, des docks, des papeteries et des services publics. Ils la comparent à un groupe témoin non exposé à des vibrations

globales du corps. Bien que l'exposition journalière aux vibrations soit inférieure ou légèrement supérieure à la valeur d'action A(8) de la directive « Vibrations » (en moyenne entre 0,28 et 0,61 m/s²), les douleurs lombaires sont significativement plus fréquentes chez les conducteurs que chez les témoins. De plus, ils notent que chez les conducteurs professionnels, la fréquence des douleurs lombaires sur 12 mois, des douleurs lombaires intenses et des inaptitudes lombaires augmente avec l'exposition aux vibrations.

En interrogeant par téléphone plus de 10 000 personnes, Hagberg et coll. obtiennent un taux de prévalence supérieur à 2 pour les symptômes musculo-squelettiques de la région lombaire, du cou, de l'épaule/bras et de la main chez les employés exposés à des vibrations globales du corps, au moins pendant la moitié de leur temps de travail. La principale découverte de cette étude trans-sectorielle réside dans la forte relation

¹ La directive européenne 2002/44/CE concerne les prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux vibrations. Cette directive complète la directive 98/37, dite directive « Machines », qui impose aux fabricants d'informer les acheteurs sur les intensités vibratoires des machines mobiles. La directive « Vibrations », appliquée en France depuis le 6 juillet 2005, fixe à 0,5 m/s² la « valeur d'action » pour une vibration transmise à l'ensemble du corps pendant huit heures et à 1,15 m/s² la « valeur plafond ». Entre ces deux plafonds, les employeurs doivent évaluer le risque vibratoire, informer les opérateurs des risques encourus, prévoir des visites médicales et mettre en œuvre un programme pour réduire les vibrations. Ils doivent par ailleurs prendre des dispositions pour maintenir celles-ci en deçà de la « valeur-plafond » (le législateur a néanmoins prévu sur ce dernier point une période dérogatoire de 5 ans).

Pour évaluer le risque vibratoire, les employeurs peuvent en premier lieu consulter les notices des constructeurs ou les banques de données concernant leurs équipements. (L'INRS a en préparation un guide de bonnes pratiques pour les y aider). Ils doivent ensuite rapprocher ces informations de la durée durant laquelle, chaque jour, les opérateurs sont soumis aux dites vibrations. Les employeurs ou les préventeurs de sécurité en entreprise peuvent faire appel s'il le faut à des techniciens spécialisés pour une mesure plus précise.

entre les vibrations globales du corps et les symptômes au niveau du cou, de l'épaule/bras et de la main, mais pas dans la région lombaire quand on prend en compte les possibles facteurs de confusion : manquement manuel de matériels et mauvaises postures. Ces contraintes ergonomiques paraissent plus importantes que les vibrations globales du corps pour la relation avec les symptômes lombaires.

Une étude comparable réalisée par Nishiyama et coll. chez 1 224 conducteurs de chariots élévateurs et 276 employés de bureau montrent que les douleurs lombaires présentent des coefficients de corrélation importants avec les conditions ergonomiques « néfastes ». Cependant, la plupart des éléments présentant une forte corrélation avec les douleurs lombaires sont également associés à des vibrations globales du corps.

Olanrewaju et coll. étudient 453 conducteurs exposés à des vibrations (voitures, bus, camions/camionnettes, tracteurs, engins de chantier...) et des contraintes ergonomiques très variées. Ils montrent que les conducteurs qui sont exposés à la combinaison d'au moins deux facteurs (vibrations, manutention ou posture) doivent être considérés comme un groupe présentant un haut risque de lombalgie contrairement à ceux qui sont exposés à un seul de ces facteurs.

MODÉLISATION DE LA RÉPONSE DYNAMIQUE DU CORPS HUMAIN

Une bonne façon d'étudier l'effet des vibrations et de la posture sur la colonne vertébrale consiste à élaborer un modèle biomécanique de cette dernière exposée à des vibrations, afin de pouvoir prédire la charge sur les disques intervertébraux. L'émergence de logiciels de plus en plus sophistiqués permet de construire des modèles complexes avec de nombreux degrés de liberté et de prendre en compte des non-linéarités caractéristiques des composantes du corps. Néanmoins, un modèle n'a de valeur que dans la mesure où il a été validé, ce qui n'est pas facile du fait de l'impossibilité de réaliser des mesures invasives pour des raisons éthiques évidentes. Aujourd'hui, plusieurs laboratoires travaillent sur ce thème qui devrait, dans quelques années, permettre une évaluation du risque vibratoire, plus objective qu'avec la méthode actuelle recommandée par la norme EN 14253², basée sur la perception subjective de l'effet des vibrations.

Wölfel distingue deux types de modèle : ceux qui visent à reproduire la réponse biodynamique du corps humain pris dans sa globalité (approche phénoménologique) et ceux qui collent à l'anatomie du corps (approche anatomique), comme l'illustre la *Figure 1*.

La première approche consiste à simuler le corps par des systèmes discrets composés de masses, de ressorts et d'amortisseurs à plusieurs degrés de liberté, dont les paramètres sont déterminés par des méthodes d'identification visant à coller au mieux aux mesures des fonctions d'impédance, de masse apparente, de transmissibilité, réalisées sur des volontaires.

C'est ainsi que Hinz et coll., ainsi que Mansfield et Maeda, étudient l'effet d'une exposition multidirectionnelle sur la masse apparente du corps assis. Huang et Griffin s'intéressent à l'effet de la contraction musculaire sur cette même fonction... Pour sa part, l'INRS (Fleury et Mistrot) vient de développer un modèle masse - ressort - amortisseur, représentatif du comportement dynamique d'un homme assis sur un siège soumis à des vibrations avant-arrière. Ce modèle doit contribuer à la conception, selon cet axe, de suspensions plus performantes, en particulier pour un siège de chargeuse.

Le but des modèles anatomiques est de simuler numériquement toutes les parties du corps potentiellement intéressantes pour l'évaluation du comportement vibratoire, ainsi que de calculer les quantités inconnues non accessibles à l'expérimentation, par exemple la charge en des points précis de la colonne lombaire. Un autre objectif concerne la prise en compte de la diversité des situations, en particulier en termes d'anthropométrie et de posture.

De Craecker construit un modèle numérique actif de colonne à l'aide du logiciel MATLAB[®], modèle qui se compose de deux corps rigides représentant les vertèbres et leur environnement, ainsi que de ressorts et amortisseurs représentant le comportement dynamique des disques intervertébraux et des ligaments de liaison. Le modèle comprend également des éléments actifs qui représentent les principaux muscles dorsaux. Une validation détaillée d'un modèle numérique est indispensable pour l'obtention de résultats fiables. Les transmissibilités du siège à la tête ont été mesurées sur six individus tests et comparées à celles du modèle. Les résultats du modèle présen-

tent une corrélation acceptable avec les résultats expérimentaux, mais ils doivent encore être améliorés en optimisant les propriétés physiques du modèle. Une attention particulière doit être accordée en outre à la non-linéarité des propriétés physiques et à la conception d'un contrôleur musculaire approprié.

Mischke et coll. travaillent sur la validation d'un modèle numérique. Comme les valeurs calculées par le modèle ne peuvent pas être mesurées directement in vivo, ils pratiquent des expériences in vitro sur des colonnes lombaires humaines excisées dans les conditions les plus réalistes possibles (en termes de fréquences, nombre de cycles, vitesse de chargement) car le comportement des matériaux constitutifs de la colonne n'est pas linéaire. Les forces et déformations calculées sont comparées aux résultats expérimentaux. Les résultats de ces expériences permettent aussi d'optimiser les paramètres physiques du modèle numérique.

De leur côté, Tamaoki et Yoshimura s'attachent à construire un mannequin qui imite le tronc humain depuis la région fémorale et se compose concrètement d'une colonne vertébrale (24 vertèbres, sacrum et disques intervertébraux), d'une tête, d'un thorax, de hanches, d'un bassin et de fémurs. Les os comme les vertèbres sont fabriqués à partir de préparations squelettiques humaines. Le rôle des caractéristiques viscoélastiques est confié aux disques intervertébraux et aux hanches. La masse correspondant aux viscères et aux tissus gras est intégrée au mannequin. Un matériau à base de silicone est fixé le long de la colonne pour la renforcer et simuler les muscles et les tendons. La hanche comprend une région fémorale constituée de mousse de polyuréthane dans laquelle sont montés le bassin et les fémurs.

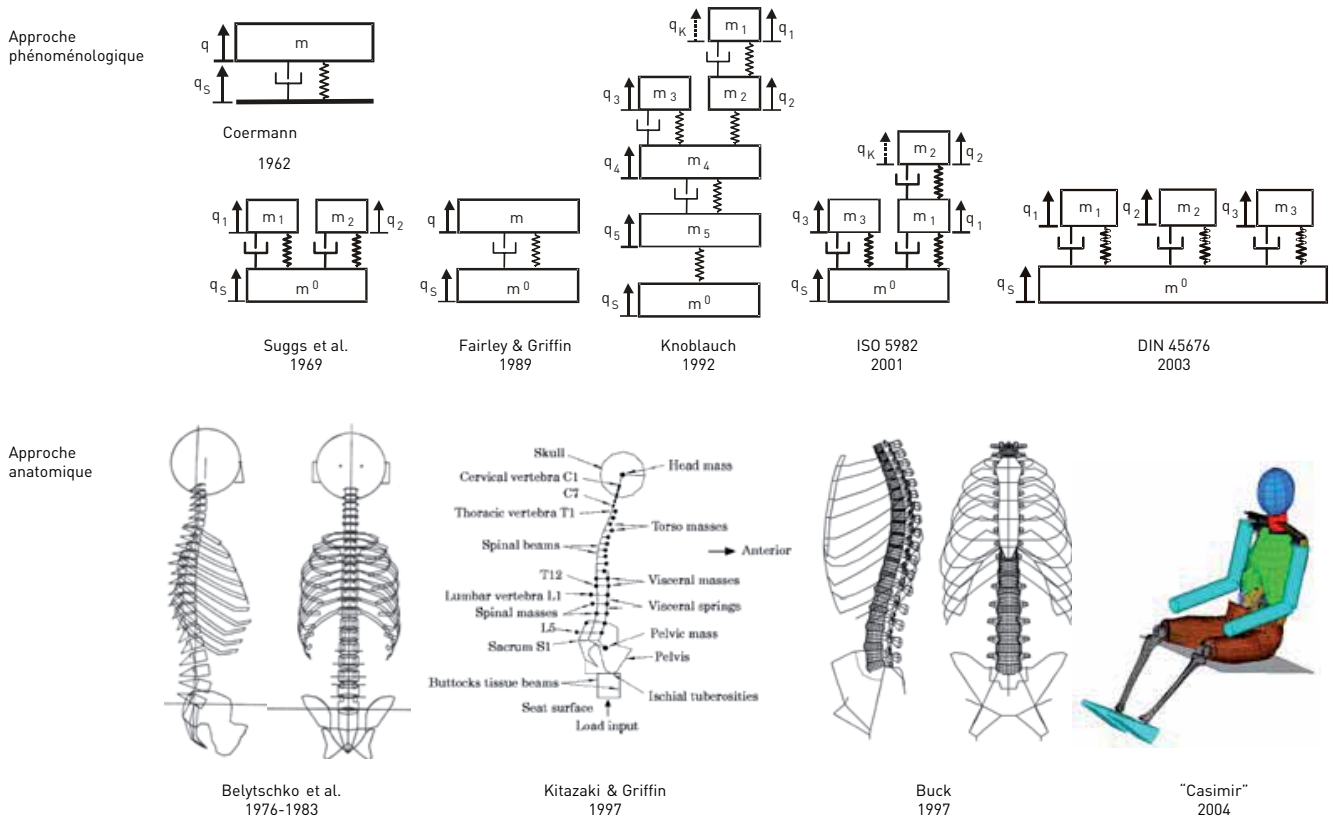
EXPOSITION AUX VIBRATIONS

L'amplitude des vibrations aux postes de travail de la plupart des engins vibrants a fait l'objet, par le passé, de nombreuses mesures en situation réelle. Mais ces mesures étaient généralement réalisées sur des périodes courtes. La reprise au niveau national de la directive "Vibrations"¹ nécessite de connaître la situation des

² EN 14253, *Vibrations mécaniques — Mesure et calcul de l'exposition professionnelle à des vibrations globales du corps dans un souci sanitaire — Guide pratique.*

FIGURE 1

Deux approches de la modélisation extraites de l'article de Wölfel présenté dans les actes de la conférence de Nancy.



expositions vibratoires par rapport aux valeurs d'action fixée à $A(8) = 0,5 \text{ m/s}^2$ et limite de $1,15 \text{ m/s}^2$, moyennées sur des durées de travail de 8 heures.

L'INRS (Galmiche et coll.) a lancé avec les Centres de Mesures Physiques des CRAM, une étude sur les engins de chantier en carrière et en terrassement en vue d'évaluer les niveaux de vibrations par type d'activité. L'étude comporte des mesures avec 400 engins de chantier différents. On constate que la valeur limite de $1,15 \text{ m/s}^2$ a été dépassée pour 90 % des décapeuses, 50 % des finisseurs, 29 % des bouteurs, 28 % des dumpers, 14 % des compacteurs tandem, 10 % des tombeaux articulés, 9 % des chargeuses, 8 % des niveleuses, rarement sur les pelles. La valeur moyenne est supérieure à $0,5 \text{ m/s}^2$ pour tous les engins sauf pour les pelles supérieures à 25 tonnes et les compacteurs mono bille.

Newell et Mansfield ont cherché à évaluer, avec une chargeuse sur chenilles, l'ampleur et les causes (style de conduite,

de la surface de la route, de la charge) de la variabilité des mesures de vibrations. L'objectif est de définir une stratégie de prélèvement qui tienne compte de la probable variabilité des accélérations pendant la durée du travail. Pinto et Stacchini effectuent un travail analogue en mesurant une cinquantaine de chariots élévateurs, des chargeuses sur roues, des camions, des bus utilisés dans des carrières, docks, papeteries, ou pour les transports et les services publics. Les variations des caractéristiques de la machine et de la chaussée semblent constituer les principales sources d'incertitude dans l'évaluation du risque lié aux vibrations globales du corps dans toutes les conditions de terrain examinées.

Schäfer et Ellegast mesurent simultanément le niveau d'exposition aux vibrations et les postures adoptées par les opérateurs dans différents secteurs d'activité (grues, ponts roulants et chariots élévateurs). Les postures ont été mesurées avec le système CUELA développé par le BGIA (Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz). Il permet de relever les

angles de la tête, du tronc, du bassin, des hanches et des genoux qui sont associés aux signaux des vibrations. Les schémas vibrations-posture calculs montrent que, dans certains cas, d'importantes vibrations globales du corps sont associées à des postures extrêmes. Ces schémas constituent la base d'une évaluation plus différenciée des expositions aux vibrations.

DÉVELOPPEMENT DE SYSTÈMES DE SUSPENSION

Si le risque vibratoire s'avère excessif, il peut être réduit de différentes façons. On peut intervenir à la source en nivelant les surfaces de roulement, en utilisant des pneus plus souples, une suspension basse fréquence du châssis ou de la cabine, des sièges suspendus...

Les constructeurs de chariots et d'engins de chantier travaillent activement sur la conception de nouvelles solutions antivibratiles. Ainsi, Scheunemann et Tödter étudient l'influence des caractéristiques

des chariots à fourches en porte à faux sur l'émission vibratoire. Roley passe en revue l'évolution des systèmes de suspension mis au point par les constructeurs d'engins de chantier. Aujourd'hui, les constructeurs proposent un contrôle de marche pour chargeuse ou chargeuse pelleteuse qui comprend un accumulateur placé dans le circuit hydraulique des bras de levage, de sorte que les bras et la charge puissent servir d'absorbeurs dynamiques et réduire les niveaux de vibrations. Roley souligne que dans tous les cas la technique ne remplace pas le conducteur qui doit être formé à la bonne utilisation des aides à la conduite pour pouvoir bénéficier des avantages de ceux-ci.

Pour sa part, l'INRS a collaboré avec la Mutualité Sociale Agricole pour l'optimisation des suspensions de sièges pour les voitures légères (sulkies) utilisées dans les courses de trot attelé (3 000 jockeys concernés). Lemerle et coll. ont modélisé le sulky et sa suspension. Des calculs ont alors été conduits à l'aide de ce modèle qui a été couplé à un modèle numérique de sujet assis développé pour les besoins de cette étude (il s'agit d'un modèle articulé paramétrable en taille et en poids). Un sulky prototype a été réalisé et confirme les résultats des calculs.

Les fabricants de sièges n'envisagent plus de développer un nouveau modèle de siège sans passer par une simulation numérique. Meyer déclare que le modèle simplifié d'un siège à suspension par un système ressort – masse – amortisseur (ressort et amortisseur linéaires, masse rigide), étendu en tenant compte du frottement du système, ne suffit pas. Le

ressort pneumatique n'est (pratiquement) linéaire que dans une course de déplacement limitée du système. De plus, la force d'amortissement agissant sur l'ossature du siège – le cadre supérieur du système de suspension – n'est pas proportionnelle à la vitesse relative du système. Le frottement présente l'indésirable effet de « stick-slip ». La performance des simulations est devenue telle que la validation du modèle autorise la même fonction de transmissibilité, les mêmes signaux d'accélération, de vitesse et de déplacement en fonction du temps, avec seulement des écarts faibles. On peut ainsi simuler une situation réaliste, étudier l'effet d'une course excessive et d'une butée de fin de course et substituer la simulation à une grande partie du travail expérimental.

STRATÉGIE DE PRÉVENTION

La réglementation, exigeant que soit contrôlée l'exposition à des vibrations globales du corps sur le lieu de travail et transposant la directive européenne 2002/44/CE¹, est entrée en vigueur au mois de juillet 2005. Les principales obligations concernent les employeurs et consistent à :

- identifier les risques liés aux vibrations globales du corps et leurs moyens de contrôle ;
- minimiser les expositions et les risques associés ;
- fournir des informations et des formations aux employés exposés à ces vibrations.

Brereton passe en revue les conseils donnés aux employeurs par l'HSE (Health & Safety Executive, homologue britan-

nique du réseau Prévention français). Il propose de :

- traiter les vibrations globales du corps comme l'une des principales causes de douleurs lombaires. Les employeurs doivent identifier les causes possibles de douleurs lombaires à un poste (postures inconfortables ou gênes, manutention manuelle de matériaux, vibrations, etc.) et hiérarchiser les mesures en fonction du risque probable de chacune d'elles. Pour les vibrations, les employeurs doivent identifier les mesures disponibles et recourir à des études de risques et d'exposition pour déterminer la praticabilité raisonnable de ces mesures ;
- choisir des équipements appropriés ;
- entretenir les machines et les routes.

De son côté, le réseau de Prévention français, constitué de la CNAMTS, des CRAM et de l'INRS a préparé la reprise en droit national de la directive « Vibrations ». Ainsi, Lebreton de la CRAM de Bretagne présente l'activité d'un groupe « Vibrations » qui, fort de 10 années d'existence, mène des actions de sensibilisation et de conseils vers les utilisateurs d'engins : détermination des niveaux vibratoires, hiérarchisation des situations les plus vibrantes, choix de sièges adaptés, formation aux réglages...

Pour plus d'informations : Vous pouvez vous procurer l'ensemble des présentations de la conférence de Nancy en adressant votre demande à P. Donati (patrice.donati@inrs.fr).