

## CHAPITRE 5 LES BESOINS EN RECHERCHE AUJOURD'HUI ET DEMAIN



5.1 BRUIT ET VIBRATIONS : LA RECHERCHE AU SERVICE DE LA PRÉVENTION

5.2 LES EFFETS DES VIBRATIONS SUR LE SYSTÈME MUSCULO-TENDINEUX :  
BASES NEUROPHYSIOLOGIQUES

- Recherche
- Vibrations TMS
- Bruit

## 5.1.

## BRUIT ET VIBRATIONS : LA RECHERCHE AU SERVICE DE LA PRÉVENTION

► Collectif d'auteurs, INRS, IRSST, SUVA

Malgré certaines lacunes, nos connaissances actuelles semblent suffisantes pour assurer la protection de la grande majorité des travailleurs contre les lésions auditives liées au bruit ou contre le syndrome des doigts blancs dû aux vibrations. Néanmoins, des progrès restent à accomplir, dans le domaine du bruit, pour améliorer les connaissances relatives à certains aspects médicaux : adéquation des pondérations A et C à la prévention du risque pour l'audition des salariés, relations doses-effets et expositions multiples sont des sujets qui nécessiteraient des recherches expérimentales ou épidémiologiques. Du côté de l'ingénierie de prévention, la progression constante de l'informatique permet d'envisager sans cesse de nouveaux outils de simulation ou de diagnostic plus précis et plus puissants. Les nouveaux matériaux, l'étude de l'efficacité réelle des protecteurs individuels ou les nouvelles méthodes de mesurage des pertes auditives sont aussi des sujets de recherche actuels. Comme l'exposition aux vibrations est plus difficile à mesurer que l'exposition au bruit, il faut trouver des méthodes pratiques permettant de quantifier cette nuisance avec simplicité. En ce qui concerne les vibrations « ensemble du corps », les chercheurs élaborent des modèles biomécaniques afin de prédire la pression intra-discale à partir de la connaissance des caractéristiques de l'excitation vibratoire, de la posture et des mouvements de la personne exposée, de sa morphologie et de son âge. Dans le domaine des vibrations « main-bras », les travaux de recherche se focalisent sur des méthodes permettant l'évaluation des effets des interactions vibrations/efforts exercées par l'opérateur sur la machine (poussée et préhension).

La prévention des risques liés à une exposition au bruit ou aux vibrations peut très souvent s'appliquer, dans les entreprises, sans qu'il y ait besoin de résoudre des nouveaux problèmes par des recherches fondamentales. Les connaissances des effets principaux de ces nuisances sont souvent stabilisées depuis des années et beaucoup de solutions de réduction des risques liées au bruit et aux vibrations sont déjà connues par les spécialistes et techniquement applicables dans les entreprises. Pourtant, sur le terrain, les risques existent toujours et sont parfois

sous-estimés voire ignorés. Les actions d'information, de sensibilisation et d'incitation à l'amélioration des situations existant dans les entreprises sont donc une priorité pour les organismes de prévention comme l'INRS, l'IRSST, la SUVA.

Néanmoins, il reste encore des secteurs où les spécialistes des domaines du bruit ou des vibrations sont confrontés à des problèmes ou des questions qui ne pourront s'éclaircir qu'en entreprenant des recherches scientifiques. C'est particulièrement le cas des co-expositions bruit - agents ototoxiques mais aussi du

couplage des postures et des vibrations. Par ailleurs, l'ingénierie de prévention progresse par les études et recherches : de nouveaux systèmes d'évaluation ou de mesurage des risques ou bien de la réduction des nuisances sont obtenus grâce aux progrès de l'informatique, des matériaux, etc. C'est pourquoi cet article présente quelques unes des problématiques pour lesquelles les connaissances actuelles sont insuffisantes et nécessitent de progresser par le biais d'études techniques ou scientifiques.

## BRUIT

### EFFETS SUR L'HOMME

#### Pondération A

Les seuils de déclenchement d'actions et les limites d'exposition réglementaires au bruit, utilisent l'unité appelée décibel pondéré A [(dB (A))]. Le dB(A) permet de mesurer la sonie ou sensation auditive pour des sujets exposés à des intensités sonores modérées ; elle fut établie à partir de courbes isosoniques obtenues à 40 dB. Le dB(A) ne traduit donc pas la sonie des bruits perçus à forte intensité. Cette simplification et par là-même cette approximation de la sensation auditive ressentie par le sujet, se justifiait essentiellement par les difficultés de calculs. Cette difficulté n'existant plus aujourd'hui, on pourrait facilement redéfinir les niveaux de bruit de manière plus fidèle et proche de la sensation auditive humaine. La pondération A n'avait pas à l'origine vocation à protéger l'audition des sujets contre d'éventuelles lésions provoquées par une exposition à des bruits d'intensité élevée. On peut s'interroger aujourd'hui sur la pertinence de l'utilisation du dB(A) pour évaluer le risque de surdité lié aux bruits d'intensité élevée ou contre des bruits dont la composante en fréquences basses serait importante.

#### Bruits impulsifs et pondération C

La pondération C, utilisée pour les bruits impulsifs (et de fortes intensités), n'est pas non plus sans poser de problèmes en termes de prévention des risques auditifs. Certes, elle prend en compte les basses fréquences, ce que la pondération A ignore, mais elle ne prend pas en compte les caractéristiques des bruits impulsifs que l'on sait dangereuses pour l'oreille. Dans la législation

européenne, la pondération C a été adoptée pour définir des niveaux de crête qu'il ne faut pas dépasser sous peine d'engendrer des traumatismes mécaniques au niveau du récepteur auditif périphérique, la cochlée. Cependant, il n'y a pas que le niveau crête qui est déterminant dans le traumatisme acoustique, la nature du bruit a son importance. Le bruit impulsionnel a des caractéristiques qui le rendent dangereux et qui ne sont pas prises en compte par la législation. Par exemple, les impulsions ne permettent pas au réflexe de l'oreille moyenne, ni au réflexe de l'oreille interne, de se déclencher. De plus, la réglementation ne prend pas en considération le nombre ni le rythme des impulsions reçues par l'oreille au cours d'une journée de travail. Ces défaillances de la législation méritent de nouvelles études pour améliorer la prévention de l'audition des salariés qui sont plutôt exposés à des bruits impulsionnels.

#### Relations dose-effet

La norme ISO 1999-1990 (Détermination de l'exposition au bruit en milieu professionnel et estimation du dommage auditif induit par le bruit) rend compte des connaissances disponibles en matière de relation «dose-effet». Elle repose essentiellement sur le principe d'iso-énergie ou, en d'autres termes, sur le principe permettant de quantifier une exposition sonore par une relation entre son niveau et sa durée. La question de la pertinence de ce principe reste entière dans une stratégie de prévention contre les effets du bruit.

De nouveaux métiers ont vu le jour ces dernières années. Les salariés impliqués dans ces nouvelles situations professionnelles sont parfois exposés au bruit, non plus dans le champ diffus d'une unité de fabrication bruyante mais, par exemple, sous un casque d'écoute (téléphonie, centres logistiques etc.). Comment relier les anciennes données épidémiologiques aux nouveaux environnements professionnels ?

#### Conclusion

Des études et des recherches sur tous les sujets évoqués dans ce paragraphe pourraient éclairer les spécialistes, normalisateurs, législateurs et personnes de terrain. Ce sont souvent des questions fondamentales et difficiles à résoudre, car les effets sur l'audition sont variables selon les individus et nécessitent, pour être étudiés, des approches statistiques lourdes et coûteuses. De plus, certaines

habitudes ou façons de raisonner (pondération A, pondération C, principe d'iso-énergie, par exemple), ancrées dans les normes, la réglementation ou les pratiques des spécialistes, seraient difficiles à faire évoluer, même si des résultats nouveaux de recherche révolutionneraient les connaissances actuelles sur le sujet.

### INGÉNIERIE DE PRÉVENTION

#### La puissance du calcul prévisionnel

Le calcul prévisionnel permet, comme son nom l'indique, de prévoir, par un calcul, le bruit rayonné par une source ou une structure donnée, ou bien le bruit transmis dans un local donné. Divers logiciels de calcul existent, pour des cas simples comme pour des cas compliqués (enclassements, fuites et ouvertures, diffractions par des écrans, etc.). Leur utilité n'est plus à prouver au stade de l'avant-projet (conception) comme au stade de la correction acoustique. Ces outils permettent en effet de simuler diverses solutions et par là même d'optimiser, d'un point de vue technique comme d'un point de vue économique (coût des solutions), des préconisations efficaces pour les entreprises. Même si des outils existent, la puissance croissante de l'informatique permet de les améliorer régulièrement, que ce soit en précisant les calculs, en améliorant les modèles, ou en facilitant ou en rendant plus réalistes les interfaces homme-machines. Des besoins en recherche apparaissent donc régulièrement sur ces sujets pour valider de nouveaux modèles ou de nouvelles approches pour ces simulations.

#### Nouveaux outils de diagnostic

Pour préconiser des solutions de prévention technique en adéquation avec les contraintes socio-économiques, il est nécessaire de déployer des outils de diagnostic de plus en plus performants. Leur performance s'exprime en précision et en capacité à séparer les diverses contributions au bruit sur une machine bruyante comme dans un local bruyant. Là encore, la recherche peut apporter des progrès dans les capacités des systèmes de diagnostic (antennes acoustiques, par exemple) pour lesquels on est aujourd'hui capable de déployer de nombreux capteurs en parallèle avec des calculs en temps réel de plus en plus complexes.

### Nouvelles méthodes de détection des pertes auditives

On sait que certains solvants aromatiques pourraient inhiber le réflexe de protection acoustique de l'oreille moyenne (OM) chez le rat. Chez l'homme, le réflexe de l'OM se limite au réflexe stapédien que l'on peut étudier par l'impédancemétrie. Si on est capable d'évaluer la fatigabilité de ce réflexe stapédien, on pourrait mieux appréhender les risques auditifs encourus par des salariés exposés au bruit et à des agents ototoxiques et donc déployer une politique de prévention mieux adaptée à leur égard. Des recherches sont nécessaires pour valider ces méthodes et les améliorer.

### L'atténuation réelle des protecteurs auditifs

L'affaiblissement acoustique des protecteurs individuels contre le bruit (PICB) est mesuré en laboratoire au moyen d'une méthode normalisée qui établit l'atténuation maximale apportée par les protecteurs. Cependant, ce maximum n'est que rarement atteint par les utilisateurs sur le terrain. Il existe aujourd'hui sur le marché de la protection auditive professionnelle diverses solutions plus ou moins sophistiquées pour apprécier l'atténuation réelle apportée à l'individu par le port du PICB au poste de travail. Il est nécessaire de continuer à faire des études pour mieux estimer cette protection effective.

### Les nouveaux matériaux

À côté des matériaux classiques utilisés pour absorber les bruits dans les locaux bruyants, on trouve aujourd'hui de nouveaux matériaux spécifiques parfois répondant à plusieurs objectifs (thermique et acoustique, acoustique et nettoyable au jet haute-pression, etc.) ou complexes (absorbants-diffusants). Le comportement acoustique de tous ces matériaux est complexe et doit continuer à être étudié afin d'en connaître les vraies performances sur le terrain et de permettre leur amélioration.

## VIBRATIONS

Les préconisations du décret sur la prévention des vibrations supposent une relation directe de cause à effet entre l'exposition aux vibrations et les pathologies reconnues au titre des tableaux des

MP. Il est donc attendu des employeurs qu'ils agissent principalement sur la contrainte vibratoire. Mais les scientifiques s'accordent sur le fait que ces effets pathologiques ne sont pas causés que par la seule contrainte vibratoire mais aussi par les conditions de l'exposition : contraintes posturales chez les conducteurs d'engins vibrants, forces de poussée et de préhension entre l'outil et la main...

C'est pourquoi des travaux de recherche sont entrepris sur la meilleure façon de quantifier simultanément l'ensemble de ces contraintes pour une évaluation plus complète du risque vibratoire. Des systèmes d'évaluation ont été mis au point et sont en cours de perfectionnement. La normalisation internationale élabore des normes pour définir les grandeurs correspondantes.

### VIBRATIONS TRANSMISES À L'ENSEMBLE DU CORPS

Pour garantir un meilleur niveau de protection de la sécurité et de la santé des travailleurs, la directive 2002/44/CE du parlement européen et du conseil définit des prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux vibrations.

Des recherches en biodynamique et des études épidémiologiques montrent que l'exposition à des vibrations globales du corps augmente significativement la fréquence de certaines atteintes, notamment sur la colonne vertébrale et les nerfs qui lui sont liés (traumatismes, lombalgies, aggravation de pathologies existantes, etc.).

L'exposition de ces personnes aux vibrations transmises à l'ensemble du corps est évaluée ou mesurée selon les préconisations de la norme ISO-2631 [1]. Essentiellement, la procédure d'évaluation de l'exposition aux vibrations tient compte de l'amplitude des vibrations, de leur durée, de leur contenu fréquentiel ainsi que de leur direction par rapport à une posture statique de référence.

Si l'augmentation des valeurs de ces paramètres sont des facteurs essentiels du risque de mal de dos, les postures de travail, les mouvements, la tâche de travail, l'aménagement des postes, les contraintes organisationnelles interviennent tout autant et ne doivent pas être négligés.

Pour un opérateur d'engin mobile, la conduite expose non seulement à des vibrations globales du corps, mais également à plusieurs autres facteurs qui sollicitent le dos, les épaules et le cou. Les plus importants d'entre eux sont les postures contraignantes (station assise prolongée, torsion fréquente de la colonne vertébrale, etc.) ou encore la manutention de charge. Il est également reconnu que les contraintes posturales de ce type (buste penché vers l'avant ou contorsionné pour l'observation d'une tâche vers le bas) contribuent significativement à des valeurs de pression intradiscale élevées.

Pour ces raisons, il semble légitime de supposer que le risque pour les opérateurs d'engin est aggravé par des postures défavorables imposées par leur tâche de travail. Selon cette hypothèse, la prise en compte de la posture décrite par la norme ISO-2631 (buste droit, genoux à 90°, mains sur les genoux) pour l'évaluation de l'exposition vibratoire ne serait pas suffisamment représentative des situations réelles. Ainsi, les pondérations axiales proposées sont issues d'un travail de laboratoire effectué sur des sièges standardisés (assise plate, pas de dossier) très différents des sièges réels. De plus, la posture de l'opérateur est supposée statique par la norme durant toute la durée d'exposition. Ce n'est pas le cas en réalité.

Les recherches actuelles entreprises par des instituts experts visent à élaborer une méthode d'évaluation de la posture d'un opérateur assis au poste de conduite d'engins mobiles vibrants. Ces mesures de posture doivent pouvoir être effectuées simultanément à celles des vibrations de l'engin.

### VIBRATIONS TRANSMISES AUX MEMBRES SUPÉRIEURS

Dans le domaine des vibrations « main-bras », la validité des normes en vigueur sur l'évaluation de l'exposition (ISO 5349) est remise en question [2]. En particulier, le réseau de pondération en fréquences – dont le but est de corriger les valeurs mesurées d'exposition brutes pour tenir compte de l'effet des vibrations sur la santé – est contesté dans un certain nombre d'études épidémiologiques ou physiologiques publiées récemment. Or, ces courbes de pondération tendent à sous-estimer l'effet des vibrations de fréquences élevées. Par voie de conséquence, les dispositifs

techniques agissant à ces fréquences (gants, poignées absorbantes, etc) sont peu représentés sur le marché des équipements de protection.

L'étude des interactions entre les vibrations transmises au membre supérieur et les forces de couplage main/poignée qui se décomposent en forces de poussée et de préhension est une priorité. Ces études se sont concrétisées par la mise au point d'une méthode de mesurage aujourd'hui déclinée sous la forme d'une norme internationale (ISO 15230 [3]). Cette technique de mesurage doit être améliorée et adaptée afin de tenir compte au mieux des impératifs et difficultés liés à sa mise en œuvre pratique en entreprise. A cette fin, des travaux visant à analyser les limitations théoriques et fonctionnelles de cette méthode de mesurage sont actuellement en cours.

Par ailleurs, concernant les interactions vibrations/effort de couplage, plusieurs pistes d'études complémentaires sont aujourd'hui envisagées. L'approche de modélisation des phénomènes de propagation vibratoire dans le membre supérieur soumis à des sollicitations mécaniques doit permettre de développer la compréhension des interdépendances entre vibration et efforts de couplage. En parallèle et en tant que moyen de validation, des essais en laboratoire doivent permettre de caractériser cette interaction de manière empirique.

S'agissant plus spécifiquement des pathologies vasculaires de type phénomène de Raynaud, des travaux sont menés sur les potentielles interactions entre vibrations, efforts de couplage et leurs effets combinés sur l'hémodynamique du système vasculaire de la main.

L'essor des techniques dans le domaine de l'imagerie médicale, en particulier la technologie ultrasonore, doit permettre, dans un avenir proche, d'observer et quantifier les phénomènes vibratoires dans le membre supérieur, d'analyser leurs effets (modification du débit sanguin, du diamètre des artères par exemple). L'influence de la nature de l'excitation vibratoire (amplitude, fréquence, durée, direction) pourra ainsi être étudiée plus finement sur l'homme ou sur l'animal.

## BIBLIOGRAPHIE

[1] Norme Internationale. ISO-2631-1. Vibrations et chocs mécaniques. Evaluation de l'exposition des individus à des vibrations globales du corps -- Partie 1: Spécifications générales. 1997.

[2] Comité Européen de Normalisation (2001) Vibrations mécaniques - Mesure et évaluation de l'exposition aux personnes des vibrations transmises par la main - Partie 1: Exigences générales. EN ISO 5349-1:2001.

## 5.2.

# LES EFFETS DES VIBRATIONS SUR LE SYSTÈME MUSCULO-TENDINEUX : BASES NEUROPHYSIOLOGIQUES

Les vibrations sont connues pour être un facteur aggravant de la pénibilité au travail. L'objectif de cette présentation est de se focaliser sur ce facteur vibration, indépendamment des conditions de travail, afin de mieux cerner son impact sur le système musculo-tendineux. Lorsqu'un muscle est soumis à l'application d'une vibration, quelle soit localisée ou corps-entier, cela va entraîner un micro-étirement du muscle. Les muscles squelettiques sont pourvus de petits récepteurs sensibles à l'étirement : les fuseaux neuromusculaires (FNM). Ces FNM vont être sollicités par chaque étirement induit par les vibrations. L'information d'étirement du muscle va alors remonter jusqu'aux structures supérieures du cortex cérébral par le biais de neurones sensitifs, les afférences primaires. Les vibrations peuvent ainsi entraîner des illusions de mouvement et, plus précisément, d'étirement du muscle vibré. Parallèlement à cette fonction sensitive, les afférences primaires jouent également un rôle dans la mise en place de réflexes somatiques, dont le plus connu est le réflexe d'étirement : une percussion tendineuse (tendon rotulien par exemple) entraîne un étirement du muscle ; les FNM recueillent cette information et viennent directement activer les neurones moteurs du muscle étiré pour le contracter. Lors de l'application de vibrations, un réflexe similaire est mis en place puisque le muscle vibré va être le siège d'une contraction (ou réflexe) tonique vibratoire : il s'agit d'une contraction réflexe de très faible amplitude et liée à l'activité des FNM sollicités par les vibrations. Dans le même temps, les muscles antagonistes subissent une relaxation. Par ailleurs, de récents travaux ont démontré un effet excitateur des vibrations sur les sécrétions d'hormones de croissance et de testostérone : il semblerait que les afférences primaires sollicitées par des vibrations puissent activer directement l'hypophyse, centre endocrinien majeur.

L'utilisation de vibrations tendineuses est ainsi très appréciée des kinésithérapeutes en rééducation ainsi que dans le domaine de l'entraînement. Si les effets des vibrations sont bénéfiques dans ces domaines, c'est qu'elles sont contrôlées, notamment en durée (10 à 60 minutes maximum par jour). Dans le cadre du travail, l'exposition vibratoire est subie des heures durant. La répétition des contractions toniques vibratoires devient alors une source de fatigue supplémentaire pour le travailleur et vient donc ajouter à la pénibilité du travail.

Les vibrations sont connues pour être un facteur aggravant de la pénibilité au travail. Une vibration est un mouvement d'oscillation mécanique caractérisée par son amplitude et sa fréquence. Si dans le monde du travail ces paramètres sont

difficilement maîtrisables, ça n'est pas le cas dans les domaines de l'entraînement et de la rééducation pour lesquels l'utilisation de vibrations se généralise grâce à des plateformes vibrantes ou des dispositifs portables de stimulations tendineuses vibratoires.

► Thomas LAPOLE, EA 3300 :  
*Adaptations Physiologiques à l'Exercice et Réadaptation à l'Effort, UFR STAPS, Amiens*

L'objectif de cette présentation est de se focaliser sur ce facteur vibration, indépendamment des conditions de travail, afin de mieux cerner son impact sur le système musculo-tendineux. La présentation va donc se focaliser successivement sur les récepteurs sensibles à la vibration, leur réponse à ces vibrations, et les effets connus des vibrations en tant que mode de renforcement ou de rééducation. Enfin, à partir de différents travaux, il sera rapporté comment les vibrations peuvent induire une fatigue neuromusculaire et ainsi ajouter à la pénibilité du travail.

## LES RÉCEPTEURS SENSIBLES À LA VIBRATION

Il existe différents récepteurs sensoriels de notre organisme sensibles aux vibrations tels les récepteurs cutanés et les organes tendineux de Golgi. Mais les récepteurs les plus sensibles aux stimuli vibratoires sont les fuseaux neuromusculaires (FNM) (Sherrington 1894). Ce sont des mécanorécepteurs sensibles à l'étirement musculaire. Ils sont situés dans la partie charnue du muscle. Leur rôle est d'informer le système nerveux central de la longueur et des variations de longueur d'un muscle, par le biais notamment des afférences primaires (Matthews 1964). Le complexe FNM – afférence primaire – est d'ailleurs le point de départ de la boucle myotatique, composante à courte latence du réflexe d'étirement (Jaeger et col. 1982). Il est à noter également que les FNM font l'objet d'une innervation motrice dont le rôle est d'augmenter leur sensibilité, notamment lors de contractions volontaires (Vallbo 1974)

### LE RÉFLEXE TONIQUE VIBRATOIRE

#### Sensibilité des FNM aux vibrations

Différents travaux ont permis de mettre en évidence l'importante sensibilité des fuseaux neuromusculaires aux vibrations. Dès 1961, Hunt a démontré leur sensibilité à la vibration chez le chat et pour des fréquences allant jusqu'à 150 Hz. Chez l'animal, des études ont montré que les terminaisons primaires des FNM sont hautement sensibles à la vibration (Bianconi et Van der Meulen 1963). Ces mêmes conclusions ont été

apportées chez l'Homme (Burke et col. 1976). Chez l'Homme, Roll et Vedel (1982) ont montré que pour une stimulation d'amplitude 0,2 à 0,5 mm, les terminaisons primaires des FNM répondent cycle par cycle à la vibration jusqu'à environ 100 Hz ; au-delà, les réponses deviennent sous-harmoniques ou aléatoires. Certaines terminaisons primaires peuvent même décharger deux ou trois fois par cycle lorsque la vibration est à une fréquence inférieure à 100 Hz. Par ailleurs, lorsque la fréquence de vibration est constante, la fréquence de décharge des afférences primaires l'est également.

Lorsque l'exposition à la vibration est prolongée, il a été montré que la fréquence de décharge des afférences primaires est en revanche diminuée (Hagbarth et col. 1976). L'état de contraction préalable du muscle va également avoir un effet sur la réponse à la vibration de ces afférences (Burke et col. 1976). En effet, lorsque le muscle est étiré, ses afférences primaires sont davantage sensibles aux vibrations puisque celles-ci sont mieux transmises aux FNM par la mise sous tension du système musculo-squelettique. De même, lorsque le muscle est contracté de façon isométrique, la fréquence de décharge des afférences primaires augmente en présence de vibrations (Burke 1980), notamment par activation des motoneurones réglant la sensibilité des FNM.

Les récepteurs musculaires les plus sensibles à la vibration sont donc les terminaisons primaires des fuseaux neuromusculaires. Ces afférences vont ainsi être à l'origine du réflexe tonique vibratoire lorsque le muscle est soumis à vibrations.

#### Le réflexe tonique vibratoire

Lorsque le muscle ou son tendon est soumis à une vibration, il apparaît une contraction tonique réflexe du muscle vibré ainsi que la relaxation de ses antagonistes. Ce phénomène est qualifié de réflexe tonique vibratoire (RTV) (Eklund et Hagbarth 1966). Ce RTV peut être obtenu sur quasiment tous les muscles squelettiques, pour des fréquences de 20 à 200 Hz. Le RTV est un réflexe polysynaptique (Lance 1973) mettant en jeu les afférences primaires des FNM et aboutissant à l'activation involontaire des neurones moteurs et donc la contraction tonique réflexe des muscles vibrés.

Dans le même temps, l'information d'étirement du muscle va remonter jusqu'aux structures supérieures du cortex cérébral par le biais de neurones sensitifs. Les vibrations peuvent ainsi entraîner des illusions de mouvement et, plus précisément d'étirement, du muscle vibré (Roll et col. 1980).

La vibration d'un muscle est à la base d'un paradoxe puisque, comme nous venons de le décrire, elle entraîne un réflexe tonique vibratoire, mais elle entraîne également une inhibition de la boucle myotatique (Desmedt et Godaux 1978). L'hypothèse retenue maintenant est celle d'une inhibition présynaptique qui mettrait en jeu un interneurone inhibiteur, sous contrôle de voies descendantes supra-spinales et qui, lorsqu'il est activé, inhiberait les afférences primaires des FNM (Delwaide 1973).

Enfin, il a été montré que la sollicitation des fuseaux neuromusculaires par vibrations aurait un effet excitateur sur les sécrétions d'hormones de croissance et de testostérone par action des afférences primaires des FNM directement sur l'hypophyse, centre endocrinien majeur (Bosco et col. 2000 ; McCall et col. 2000).

## UTILISATION DE LA VIBRATION DANS LES DOMAINES DE L'ENTRAÎNEMENT ET DE LA RÉÉDUCATION

L'utilisation de vibrations tendineuses est depuis plusieurs années très appréciée des kinésithérapeutes car elles permettent d'induire, chez les sujets dont le membre est immobilisé, une illusion de mouvement par évocation de messages proprioceptifs proches de ceux induits par le mouvement réel. Cette technique permet notamment une meilleure mobilité articulaire, une moindre appréhension lors des premiers mouvements et donc une diminution du nombre de séances de rééducation nécessaires (Neiger et col. 1986). De plus, les vibrations présentent des effets antalgiques (Tardy-Gervet et col. 1994).

Cette sollicitation musculaire involontaire est également très souvent employée dans le domaine sportif et, plus particulièrement, celui du fitness avec l'utilisation de plates-formes vibrantes : l'idée étant d'induire de multiples contractions réflexes pour renforcer le muscle. En effet, bon nombre d'études rapportent des gains de force grâce à l'application de vibrations par l'intermédiaire de telles plates-formes... l'occasion pour ses utilisateurs de s'entretenir et/ou se renforcer sans trop d'efforts (Luo et col. 2005). De plus, de tels protocoles permettent d'améliorer la posture, élément intéressant chez des populations vieillissantes soumises à des risques de chute (Rittweger 2010).

## VIBRATIONS ET FATIGUE

---

Les bienfaits des vibrations dans le domaine de l'entraînement tiennent au fait qu'elles induisent une certaine fatigue neuromusculaire. Dès lors, cette fatigue traduit l'efficacité des vibrations en tant que stimulus pouvant induire un renforcement musculaire, pour peu que les différents paramètres d'application soient corrects.

Ainsi, lorsque l'on surimpose des vibrations durant la production d'une force, il a été rapporté une augmentation de la force maximale isométrique durant les premières secondes (Curry et Clelland 1981). Les mêmes observations ont été rapportées lors de contractions sous maximales (Bongiovanni et col. 1990). En revanche, si l'exposition aux vibrations est prolongée, on observe une perte de force et de temps de maintien (Bongiovanni et col. 1990 ; Rittweger et col. 2003 ; Samuelson et col. 1989). Cela résulterait d'inhibitions pré-synaptique et/ou épuisement dans la transmission des informations excitatrices issues des afférences primaires des FNM (Bongiovanni et col. 1990).

Les vibrations sont également envisagées dans le domaine sportif comme une méthode d'échauffement musculaire. Ainsi, il a été montré immédiatement après 4 minutes d'exercices sur plate-forme vibrante une légère augmentation de la force et de la puissance musculaire (Torvinen et col. 2002). De nouveau, si l'exposition est prolongée, il y a diminution de la force maximale (Jackson et Turner 2003 ; Kouzaki et col. 2000 ; Ushiyama et col. 2005). L'explication serait une atténuation de l'activité des afférences primaires par inhibition pré-synaptique et/ou aug-

mentation de leur seuil de décharge et/ou diminution de la transmission synaptique (Curtis et Eccles 1960 ; Hayward et col. 1986 ; Hultborn et col. 1987).

## CONCLUSION

---

On peut aisément comprendre les effets bénéfiques des vibrations sur le système musculo-tendineux lorsque l'exposition est contrôlée, notamment en durée (10 à 60 minutes maximum par jour). Dans le cadre du travail, l'exposition vibratoire est subie des heures durant. La répétition des contractions toniques vibratoires devient alors une source de fatigue supplémentaire pour le travailleur et vient donc ajouter à la pénibilité du travail.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] BIANCONI R, VAN DER MEULEN MJ (1963) The response to vibration of the end organs of mammalian muscle spindles. *J Neurophysiol* 26:177-190
- [2] BONGIOVANNI LG, HAGBARTH KE, STJERNBERG L (1990) Prolonged muscle vibration reducing motor output in maximal voluntary contractions in man. *J Physiol* 423:15-26
- [3] BOSCO C, IACOVELLI M, TSARPELA O, CARDINALE M, BONIFAZI M, TIHANYI J, VIRU M, DE LORENZO A, VIRU A (2000) Hormonal responses to whole-body vibration in men. *Eur J Appl Physiol* 81 (6):449-454
- [4] BURKE D (1980) Muscle spindle activity induced by vibration in man: Implications for the tonic stretch reflex. Spinal and supraspinal mechanisms of voluntary motor control and locomotion. Basel: Karger
- [5] BURKE D, HAGBARTH KE, LOFSTEDT L, WALLIN BG (1976) The responses of human muscle spindle endings to vibration of non-contracting muscles. *J Physiol* 261 (3):673-693
- [6] CURRY EL, CLELLAND JA (1981) Effects of the asymmetric tonic neck reflex and high-frequency muscle vibration on isometric wrist extension strength in normal adults. *Phys Ther* 61 (4):487-495
- [7] CURTIS DR, ECCLES JC (1960) Synaptic action during and after repetitive stimulation. *J Physiol* 150:374-398
- [8] DELWAIDE PJ (1973) Human mono-synaptic reflexes and presynaptic inhibition: An interpretation of spastic hyperreflexia. New developments in electromyography and clinical neurophysiology. Basel: Karger.
- [9] DESMEDT JE, GODAUX E (1978) Mechanism of the vibration paradox: excitatory and inhibitory effects of tendon vibration on single soleus muscle motor units in man. *J Physiol* 285:197-207
- [10] EKLUND G, HAGBARTH KE (1966) Normal variability of tonic vibration reflexes in man. *Exp Neurol* 16 (1):80-92
- [11] HAGBARTH K, BURKED, WALLIN G, LOFSTEDT L (1976) Single unit spindle responses to muscle vibration in man. *Prog Brain Res* 44:281-289
- [12] HAYWARD LF, NIELSEN RP, HECKMAN CJ, HUTTON RS (1986) Tendon vibration-induced inhibition of human and cat triceps surae group I reflexes: evidence of selective Ib afferent fiber activation. *Exp Neurol* 94 (2):333-347
- [13] HULTBORN H, MEUNIER S, MORIN C, PIERROT-DESEILLIGNY E (1987) Assessing changes in presynaptic inhibition of I a fibres: a study in man and the cat. *J Physiol* 389:729-756
- [14] HUNT CC (1961) On the nature of vibration receptors in the hind limb of the cat. *J Physiol* 155: 175-186
- [15] JACKSON SW, TURNER DL (2003) Prolonged muscle vibration reduces maximal voluntary knee extension performance in both the ipsilateral and the contralateral limb in man. *Eur J Appl Physiol* 88 (4-5):380-386
- [16] JAEGER RJ, GOTTLIEB GL, AGARWAL GC, TAHMOUSH AJ (1982) Afferent contributions to stretch-evoked myoelectric responses. *J Neurophysiol* 48 (2):403-418
- [17] KOUZAKI M, SHINOHARA M, FUKUNAGA T (2000) Decrease in maximal voluntary contraction by tonic vibration applied to a single synergist muscle in humans. *J Appl Physiol* 89 (4):1420-1424
- [18] LANCE JW (1973) The reflex effects of muscle vibration. New developments in electromyography and clinical neurophysiology. Basel: Karger,
- [19] LUO J, MCNAMARA B, MORAN K (2005) The use of vibration training to enhance muscle strength and power. *Sports Med* 35 (1):23-41
- [20] MATTHEWS PBC (1964) Muscle Spindles and Their Motor Control. *Physiol Rev* 44:219-288
- [21] MCCALL GE, GRINDELAND RE, ROY RR, EDGERTON VR (2000) Muscle afferent activity modulates bioassayable growth hormone in human plasma. *J Appl Physiol* 89 (3):1137-1141
- [22] NEIGER H, GILHODES JC, TARDY-GERVET MF, ROLL JP (1986) Rééducation sensori-motrice par assistance proprioceptive vibratoire. *Kinesither* 252 (1-2):6-21
- [23] RITTWEGER J, MUTSCHELK-NAUSS M, FELSENBURG D (2003) Acute changes in neuromuscular excitability after exhaustive whole body vibration exercise as compared to exhaustion by squatting exercise. *Clin Physiol Funct Imaging* 23 (2):81-86
- [24] RITTWEGER J (2010) Vibration as an exercise modality: how it may work, and what its potential might be. *Eur J Appl Physiol* 108(5): 877-904
- [25] ROLL JP, Gilhodes JC, Tardy-Gervet MF (1980) [Perceptive and motor effects of muscular vibrations in the normal human: demonstration of a response by opposing muscles]. *Arch Ital Biol* 118 (1):51-71
- [26] SAMUELSON B, JORFELDT L, AHLBORG B (1989) Influence of vibration on endurance of maximal isometric contraction. *Clin Physiol* 9 (1):21-25
- [27] SHERRINGTON CS (1894) On the Anatomical Constitution of Nerves of Skeletal Muscles; with Remarks on Recurrent Fibres in the Ventral Spinal Nerve-root. *J Physiol* 17 (3-4):210-212-258
- [28] TARDY-GERVET MF, GUIEU R, RIBOT-CISCAR E, ROLL JP (1994) Les vibrations mécaniques transcutanées : une méthode de contrôle sensoriel de la douleur. *Kinésithérapie scientifique* 333 (12)
- [29] TORVINEN S, KANNU P, SIEVANEN H, JARVINEN TA, PASANEN M, KONTULAINEN S, JARVINEN TL, JARVINEN M, OJA P, VUORI I (2002) Effect of a vibration exposure on muscular performance and body balance. Randomized cross-over study. *Clin Physiol Funct Imaging* 22 (2):145-152
- [30] USHIYAMA J, MASANI K, KOUZAKI M, KANEHISA H, FUKUNAGA T (2005) Difference in aftereffects following prolonged Achilles tendon vibration on muscle activity during maximal voluntary contraction among plantar flexor synergists. *J Appl Physiol* 98 (4):1427-1433
- [31] VALLBO AB (1974) Human muscle spindle discharge during isometric voluntary contractions. Amplitude relations between spindle frequency and torque. *Acta Physiol Scand* 90 (2):319-336