

# Les vibrations mécaniques

---

polycopié

Wissal BENHASSINE

07/10/2017

○ **Objectifs :**

- comprendre la notion d'ambiance vibratoire
- savoir mesurer les vibrations mécaniques
- savoir prévenir l'exposition aux vibrations

○ **Population cible :**

- résidents en médecine du travail,
- formation continue pour médecins du travail
- étudiants Master en Hygiène et sécurité industrielle

○ **Pré-requis :**

- notions mathématiques et physiques de base.

## Sommaire

1	PROPRIETES PHYSIQUES DES VIBRATIONS.....	3
1.1	Vibrations sinusoïdales .....	3
1.2	Vibrations périodiques.....	3
1.3	Vibrations aléatoires.....	3
1.4	Relation entre fréquences et amplitudes .....	4
1.5	Mécanismes d'apparition des vibrations et état de résonance .....	4
2	MESURES DES VIBRATIONS.....	5
2.1	Indications .....	5
2.2	Évaluation de l'exposition aux vibrations .....	6
2.2.1	Les capteurs .....	6
2.2.2	L'instrument de mesure.....	6
2.2.3	Mesurages réalisés chez l'homme .....	7
2.2.4	Rapport de mesurage .....	8
3	Protection contre les vibrations .....	8
3.1	Objectifs.....	8
3.2	Stratégie de protection.....	9
3.3	Protection des vibrations de basse et très basses fréquences transmises à l'ensemble du corps .....	9
3.4	Protection des vibrations de hautes fréquences .....	10
4	Bibliographie .....	10

# 1 PROPRIETES PHYSIQUES DES VIBRATIONS

Un corps est dit en vibration lorsqu'il est animé, en tout ou en partie, d'un mouvement oscillatoire par rapport à sa position d'équilibre.

Au cours d'un tel mouvement, la vitesse (et l'accélération) change en permanence et des transferts d'énergie mécanique ont lieu.

Il existe 3 types de vibrations : sinusoïdales, périodiques et aléatoires.

## 1.1 Vibrations sinusoïdales

Elle est obtenue dans le cas d'une masse fixée à un support via un ressort et écartée de sa position d'équilibre puis lâchée.

**Le spectre temporel** de cette vibration représente l'amplitude de la vibration en fonction du temps. Il permet de définir :

- La période (s) :  $T$
- La fréquence (Hz) :  $1/T$
- La valeur efficace : caractérise l'énergie vibratoire

L'amplitude est difficile à définir surtout s'il s'agit de vibration aléatoire mais elle peut se caractériser par :

- Le Déplacement : (sous unités du mètre)
- La Vitesse : m/s

L'Accélération s'exprime en  $m/s^2$  ; ( $g = 9.81 m/s$ ). Elle est préférée à la vitesse dans les très hautes fréquences et dont les déplacements sont de l'ordre de quelques microns

**Le spectre fréquentiel** représente l'amplitude (vitesse ou accélération) en fonction de la fréquence. En cas de vibration sinusoïdale, il est donc représenté par une barre unique.

## 1.2 Vibrations périodiques

Ce sont des mouvements qui se reproduisent identiques à eux même, à des intervalles de temps égaux (machines, marteaux piqueurs,)

Elles sont décomposables en une somme de fonctions sinusoïdales de fréquences et d'amplitude propres.

## 1.3 Vibrations aléatoires

On parle de vibrations aléatoires lorsque la position du point considéré ne peut être prédite à un instant déterminé.

Elles sont rencontrées dans le domaine des transports : poste de conducteur d'une chargeuse par exemple ; les vibrations sont liées aux irrégularités du terrain et au choc entre le godet de la chargeuse et tas.

Elles peuvent être décomposées en une somme infinie de vibrations sinusoïdales de fréquence différentes mais contigües.

**Le spectre temporel** permet de mettre en relation les événements et les vibrations générées

**Le spectre fréquentiel** permet d'identifier les fréquences prédominantes (autour de 2hz par exemple) ce qui est primordial pour déterminer les types des effets physiopathologiques.

#### 1.4 Relation entre fréquences et amplitudes

Fréquences et amplitudes son étroitement liées.

Dans le cas de vibrations de basses fréquences (véhicules, poids lourds : 1.5 à 12 Hz, tracteurs agricoles : 2à 4 Hz), les amplitudes de déplacement rencontrées sont de l'ordre de plusieurs centimètres voire de mètres dans le cas de très basses fréquences (navires : 0.06 à 0.09 Hz)

En revanche, les outils à main sont généralement caractérisées par de hautes fréquences (polisseuses à main (200 à 800 Hz) et par des déplacements qui ne dépassent pas quelques mm voire des micromètres.

#### 1.5 Mécanismes d'apparition des vibrations et état de résonance

L'apparition de vibrations peut être considérée comme la rupture de l'état d'équilibre d'un système secondaire à un lâcher, à un choc, à une instabilité ou à une vibration générée par une excitation entretenue.

Cette rupture d'équilibre peut être produite par le processus de transformation de la machine c'est – à – dire :

- le moyen par lequel le travail est réalisé (chocs de marteau piqueur)
- le mode de fonctionnement (machines rotatives, nature et irrégularités du sol)
- un mauvais fonctionnement ou un défaut de machines (les vibrations constituent un outil de diagnostic du fonctionnement de la machine)
- un phénomène aléatoire : vent, séisme
- des vibrations indispensables pour l'exécution du travail (meuleuses) ou au contraire des sous produits indésirables (véhicules)

Tout système mécanique soumis à des vibrations comporte obligatoirement :

- des masses
- des raideurs
- des amortisseurs

Prenons comme exemple corps humain (voir schéma)

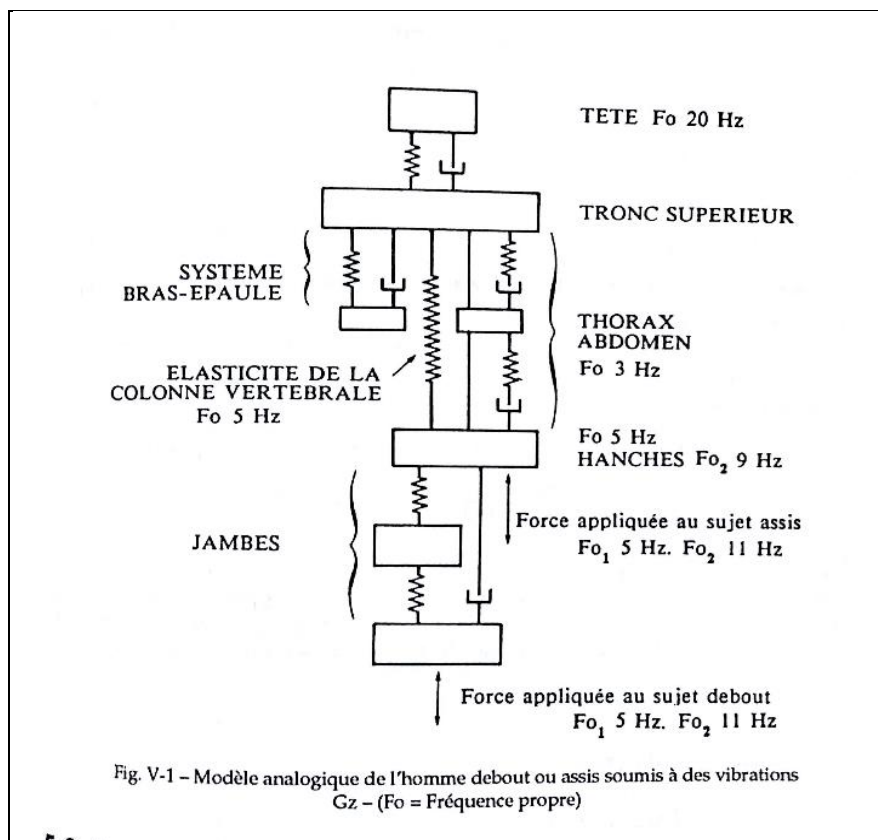
Si on soumet le système à une vibration forcée (excitation entretenue), on peut étudier la transmissibilité de la vibration (amplitude de la réponse par rapport à l'amplitude d'excitation) en fonction de la fréquence de stimulation.

La transmissibilité est donc variable selon la fréquence de la stimulation.

Cette transmissibilité devient très importante lorsque la stimulation est à une certaine fréquence caractéristique du système appelée fréquence de résonance.

Ce phénomène de résonance peut aboutir à la destruction du système par excès d'énergie fournie au système.

Fig.1: modèle analogique de l'homme soumis à des vibrations



## 2 MESURES DES VIBRATIONS

Pour prévenir les effets des vibrations, celles-ci doivent être identifiées et mesurées.

### 2.1 Indications

Les vibrations sont mesurées seulement dans les situations suivantes :

- Évaluer l'intensité vibratoire afin de comparer des matériels (mesures essai de type) lors de démarche d'acquisition de nouveaux matériels. Les valeurs obtenues sont comparées aux valeurs déclarées dans la réglementation. Des normes spécifiques existent pour différentes machines.
- Mettre en place un dispositif de surveillance des vibrations comme un outil de maintenance des machines. Ces vibrations sont un sous-produit de la transmission normale des forces cycliques à travers le mécanisme et peuvent être à l'origine d'une usure de la machine et de l'apparition de pannes. La mesure régulière des vibrations produites par une machine constitue un indicateur de son état de santé et de l'opportunité de sa maintenance.

## 2.2 Évaluation de l'exposition aux vibrations

Elle se déroule en 3 étapes

**Étape 1** : identifier les sources d'exposition et leur nature : transmission au corps entier/ système main-bras.

**Étape 2** : réaliser une analyse détaillée de tous les procédés et outils vibrant (voir norme FD CR 1032-2)

**Étape 3** : procéder aux mesures

### 2.2.1 Les capteurs

On utilise des capteurs de déplacements, de vitesse, d'accélération. L'accéléromètre piézoélectrique est le plus utilisé. Il se caractérise par : sa sensibilité, sa gamme de fréquence et d'amplitude et de sa masse.

- **La sensibilité** : pC/m.s<sup>-2</sup> (picoCoulomb) ou mV. Elle est max selon l'axe perpendiculaire à sa base, peu sensible aux vibrations transversales.
- **Gamme de fréquences et d'amplitudes** : plus il est gros, mieux est sa sensibilité mais la gamme de fréquence est réduite.
- **La masse** : elle doit rester inférieure à 10% de la masse du système générant la vibration.

L'accélérateur doit être fixé de façon solidaire au système générant des vibrations. Le mode de fixation ne doit pas réduire la gamme de fréquence, on doit utiliser par exemple : des goujons, des pastilles à coller, un collage direct par cire d'abeille ou par un aimant,

Des **phénomènes de surcharge** peuvent avoir lieu. Il suffit alors d'insérer un filtre mécanique entre le point de mesure et l'accéléromètre pour contrecarrer le phénomène.

Le serrage du capteur doit être réalisé avec précaution car il peut devenir une source d'erreurs de mesures.

Le **Phénomène de masse** : survient lorsque l'accéléromètre est fixé sur un objet connecté à la masse électrique. Pour contre carrer ce phénomène on peut utiliser une pastille assurant l'isolation électrique.

Les mouvements de câble du capteur provoquent des bruits triboélectriques d'où la nécessité de fixer le câble du capteur avec un ruban adhésif.

L'accéléromètre piézoélectrique est sensible à l'environnement : l'humidité (jonction câble-capteur), le bruit, les substances corrosives, les champs magnétiques, la température et les radiations nucléaires.

### 2.2.2 L'instrument de mesure

L'information apportée par l'accéléromètre doit être traitée à plusieurs niveaux du dispositif :

- **Étage de préamplificateur** permet d'insérer plusieurs mètres entre le capteur et l'instrument sans perte d'information et de normaliser la mesure en accélération.
- **Étage filtre passe-bande** permet l'analyse fréquentielle. Elle consiste en des filtres commutés dont la largeur de bande peut être constante (10; 3.16; .. Hz) ou à pourcentage de bande constante (octave, 1/3 d'octave). Ce type d'analyse permet de connaître l'accélération efficace pour chaque bande de fréquence.
- **Analyse globale** : le filtre est sélectionné selon le type de pondération. Ce type d'analyse fournit une seule information d'accélération (dite pondérée).
- **L'étage de détection et de moyennage** : calcule à partir de l'accélération instantanée :
  - Une accélération efficace pondérée  $a_{(w)}$
  - Moyennage : intégration linéaire ou exponentielle dont le temps peut être fixe ou modifiable.
- **L'étalonnage du matériel** : exécuté par le constructeur
- **La calibration du matériel**, avant et après chaque mesure à l'aide d'une source étalon.

### 2.2.3 Mesurages réalisés chez l'homme

- **Directions et gamme de fréquences** : la plage de fréquence considérée pour les vibrations transmises à l'ensemble du corps quel que soit l'axe mesuré est de :
  - Pour corps entier : 0.5 (0.1 marine) à 80 Hz, dans 3 directions.
  - Pour système main-bras : 8 à 1000 Hz.
- **Le point de mesure** : doit être aussi près que possible de la zone par laquelle les vibrations sont transmises au corps ou à la main. Pour le corps → siège de l'opérateur, planché ; pour la main → voir liste norme ISO 5349-2 (2001).
- **Durée** : 1mn au moins, 3 fois. Si les opérations sont de très courte durée → durée cumulée des différentes mesures doit dépasser 1mn. Pour le mal de transport → 4 mn au moins.
- On mesure :
  - **Les amplitudes et fréquences.**
  - **Facteur de crête.**
  - **Accélération équivalente** et son estimation à 4h (T4) et à 8h (T8) d'exposition :  $a_{eq}(4) = (T/T4)^{1/2} \times a_{eq}(T)$ .
    - T4 : 4 heures d'exposition
    - T : durée de la mesure en Heure
    - $a_{eq}(T)$  : accélération équivalente obtenue pour la durée T

- L'analyse de l'exposition vibratoire doit prendre en compte l'ensemble des tâches :

$$a_{eq}(T) = \sqrt{(\sum a_{eqi}^2 \times t_i) / \sum t_i}$$

Exemple :

supposons

$$a_{eq}(T_1) = 15 \text{ m.s}^{-2} \text{ avec } T_1 = 30 \text{ mn}$$

$$a_{eq}(T_2) = 12 \text{ m.s}^{-2} \text{ avec } T_1 = 1\text{h}00 \text{ mn}$$

$$a_{eq}(T_3) = 5 \text{ m.s}^{-2} \text{ avec } T_1 = 1\text{h}30 \text{ mn}$$

alors,

$$a_{eq}(T) = [(15^2 \times 0.5) + (12^2 \times 1) + (5^2 \times 1.5)]^{1/2} = 9.90$$

$$a_{eq}(T_8) = (3/8)^{1/2} \times 9.9 = 6.06 \text{ m.s}^{-2}$$

## 2.2.4 Rapport de mesurage

Il doit comporter :

- Les résultats de mesure :
  - Valeur efficace pondérée suivant les axes
  - Valeur totale
  - Durée d'exposition
- Spécifications de l'appareillage :
  - Analyseur
  - Capteur
  - Calibreur
- La norme de référence
- Les conditions environnementales : T°, humidité relative, bruit, ..
- Position des accélérateurs : par un schéma
- Date et durée de mesurage
- Informations sur les conditions vibratoires : spectres, évolution dans le temps,
- La posture
- La position des mains et des bras, l'angle des articulations poignet-coude-épaule.
- Profil de l'exposition : machine utilisée, opération, durée moyenne et fréquence de l'opération

## 3 Protection contre les vibrations

### 3.1 Objectifs

- Diminution de la production de vibrations (lors de l'achat des équipements)
- Limitation de la transmission des vibrations : l'isolation vibratoire entre la machine et son support permet de limiter l'intensité vibratoire et le bruit également.
- Diminution des durées d'exposition : les effets physiopathologiques augmentent avec la durée de l'exposition, cependant il n'y a pas de normes vu :
  - La Complexité des effets physiologiques.



- La Méconnaissance de l'influence de l'intensité vibratoire , du spectre de fréquence, de la durée de l'exposition quotidienne ou cumulée d'une vie professionnelle.
- Sensibilisation des opérateurs
  - Aux risques des vibrations sur leur santé en tenant compte de leurs caractéristiques : antécédents pathologiques, tabagisme, médicaments,
  - À l'intérêt de l'utilisation des divers moyens mis à leurs dispositions.

### 3.2 Stratégie de protection

La protection est d'ordre technique et organisationnel

- ☞ Lorsque les vibrations sont produites par un processus de transformation (dents de tronçonneuse, marteaux piqueurs, ) → on ne peut pas agir sur la production des vibrations mais seulement limiter les transmissions;
- ☞ Si les vibrations proviennent du mode de fonctionnement de l'engin (véhicule) ou de forces alternatives non équilibrées dans une machine → on agit directement à la source en planifiant le terrain, en équilibrant les forces etc.
- ☞ S'il s'agit de vibrations (phénomènes) aléatoires (séisme, vents,), le seul mode d'actions sera de faire en sorte que les fréquences de **résonance** des structures à protéger ne soient pas du domaine de la stimulation : la fréquence de résonance d'un bâtiment d'une centrale nucléaire doit être > 10Hz pour limiter les dégâts provoqués par un séisme dont les fréquences sont < à 10Hz.

### 3.3 Protection des vibrations de basse et très basses fréquences transmises à l'ensemble du corps

La stratégie consiste à :

#### A. Diminuer la production de vibrations !

- a) Il est plus facile de réduire l'intensité que de modifier les fréquences
- b) Améliorer et entretenir l'état des routes, des chemins agricoles, des cours des usines ;
- c) Diminuer la vitesse des véhicules pour réduire l'énergie à dissiper au moment du choc
- d) Choix du véhicule et modalités d'utilisation :
  - Préférer les chariots électriques aux chariots à moteur thermiques
  - Étaler la charge par un liquide sur toute la longueur de la citerne ; remplir en premier puis vider en dernier les citernes externes ;
  - Éviter de faire circuler les engins à vide (+ 20% de vibrations / engins chargés).

#### B. Optimiser la tâche : Pour limiter les postures traumatisantes du rachis, les outils de commande doivent être adapté à la taille de l'opérateur; le siège +++.

- C. Protéger l'opérateur
  - Durée d'exposition : voir normes
  - Recommandations médicales : ceinture abdominales, musculature, repas peu abondants

### 3.4 Protection des vibrations de hautes fréquences

- ☞ Éliminer le risque vibratoire
  
- ☞ Diminuer la production et la transmission de vibrations
  - Choix des outils
  - Utilisation et entretien des outils
  - Poignées antivibratiles et matériaux résilients
  - Gants
- ☞ Optimiser la tâche : Lorsque les facteurs de crête sont importants, l'opérateur compensant par une force de préhension importante pour ne pas lâcher la pièce
  
- ☞ Protéger l'opérateur
  - Réduction de la durée d'exposition : < à 4h
  - Recommandations médicales
    - surveillance médicale (site [human-vibration.com](http://human-vibration.com))
    - sensibilisation aux risques et aux moyens de protection

## 4 Bibliographie

1. **Catilina P., Roure-Mariotti M.-C.** *Médecine et Risques au Travail. Guide du médecin en milieu de travail.* Paris : MASSON, 2002. ISBN : 2-225-83699-X.
  
2. **Harichaux.P et Libert.JP.** *ERGONOMIE ET PREVENTION DES RISQUES PROFESSIONNELS - tome 1 - l'environnement physique du travail et ses contraintes.* Paris : CHIRON éditeur, 2003. ISBN : 2-7027-0791-2.
  
3. **Millanvoye.M.** LES AMBIANCES PHYSIQUES AU POSTE DE TRAVAIL. [auteur du livre] FALZON.P. *ERGONOMIE.* PARIS : PUBLICATIONS UNIVERSITAIRES DE FRANCE, 2004.
  
4. **BROCA.A et MAURO.S.** CONCEPTION DU POSTE DE TRAVAIL ET AMBIANCES PHYSIQUES. [auteur du livre] CAZAMIAN.P, HUBAULT.F et NOULIN.M. *TRAITE D'ERGONOMIE.* TOULOUSE : OCTARES, AOUT 1996 (3e édition).

Dernière mise à jour : Octobre 2017