

# Les vibrations

Prof. J. Malchaire

## DEFINITIONS

### • NOTIONS DE BASE

⇒ onde mécanique se propageant dans un milieu (si air, bruit)

⇒ vibration harmonique (existe à une seule fréquence  $f$ )

- $X(t) = X_{\max} \sin(2 \pi f t)$
- amplitude  $X(t)$  est soit
  - l'amplitude de déplacement  $d$  (en m)
  - l'amplitude de vitesse  $v$  (en  $\text{ms}^{-1}$ )
  - l'amplitude d'accélération  $a$  (en  $\text{ms}^{-2}$ )
- valeur moyenne énergétique = valeur efficace:  $X = X_{\max} / 2^{0.5}$ 
  - si  $a$  = amplitude efficace d'accélération
  - amplitude efficace de vitesse  $v = a / (2 \pi f)$
  - amplitude efficace de déplacement  $d = a / (2 \pi f)^2$
- grandeur la plus simple à mesurer est l'accélération mais

$f$	$a$	$v$	$d$
100 Hz	$10 \text{ ms}^{-2}$	$1.6 \text{ cm s}^{-1}$	0.025 mm
10 Hz	$10 \text{ ms}^{-2}$	$16 \text{ cm s}^{-1}$	2.5 mm
1 Hz	$10 \text{ ms}^{-2}$	$160 \text{ cm s}^{-1}$	25 cm

### • UNITÉS

⇒ fréquences des vibrations:

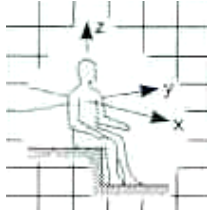
- vibrations corps total (engins roulants): 0.5 à 80 Hz
- vibrations mains bras (machines avec outil): 5 à 1500 Hz

⇒ amplitude des vibrations:

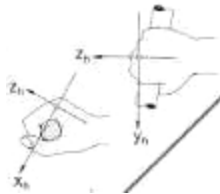
- mesure de l'accélération  $a$  en  $\text{ms}^{-2}$
- parfois utilise échelle en dB:  $N = 20 \log(a/a_0)$ , et  $a_0 = 10^{-6} \text{ ms}^{-2}$ 
  - $1 \text{ ms}^{-2} = 120 \text{ dB}$ ,  $10 \text{ ms}^{-2} = 140 \text{ dB}$ ,  $0.1 \text{ ms}^{-2} = 100 \text{ dB}$
  - doubler = plus 6dB:  $2 \text{ ms}^{-2} = 126 \text{ dB}$

⇒ directivité des vibrations:

- 3 axes X, Y et Z définis
  - par norme ISO2631 pour **CORPS TOTAL**



- par norme ISO5349 pour **MAINS BRAS**

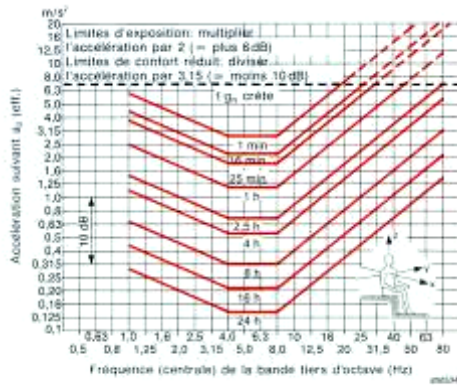
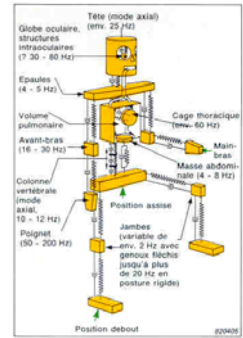


## SENSIBILITÉ DU CORPS ET DU SYSTÈME MAINS BRAS

⇒ accélération pondérée tient compte de cette sensibilité fréquentielle (analogue au dB(A) en acoustique)

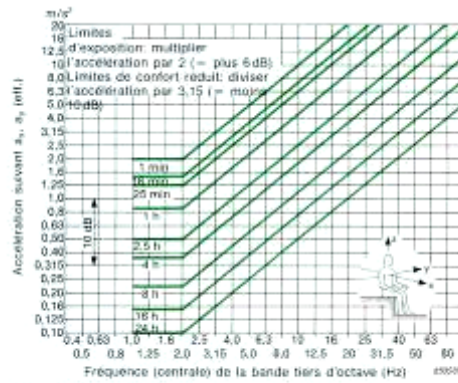
⇒ pondération différente selon

- **CORPS TOTAL**: différence entre Z et X,Y

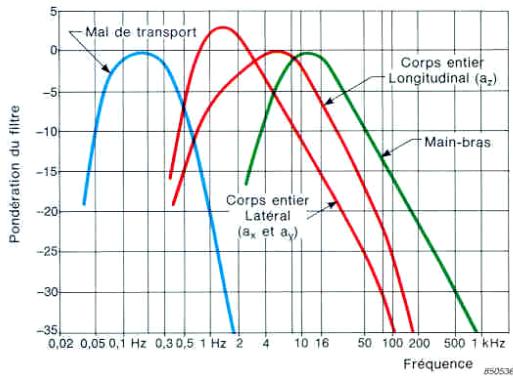
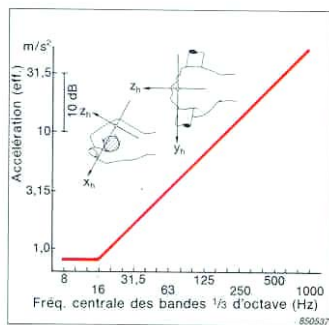


Limites d'accélération longitudinales ( $a_z$ ) en fonction de la fréquence et de la durée d'exposition "Limite de fatigue correspondant à une expertise diminuée" (ISO 2631)

is 3 a)

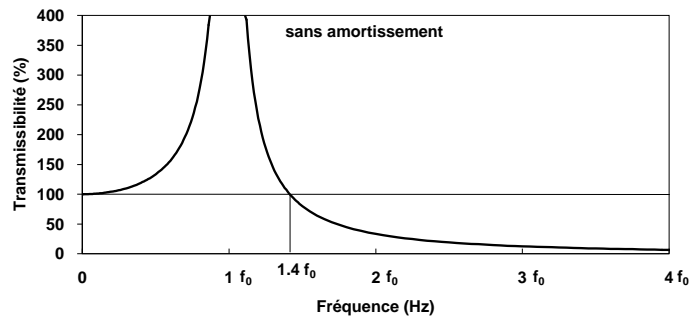


Limites d'accélération transversales ( $a_x, a_y$ ) en fonction de la fréquence et de la durée d'exposition "Limite de fatigue correspondant à une expertise diminuée" (ISO 2631)



## TRANSMISSION DES VIBRATIONS

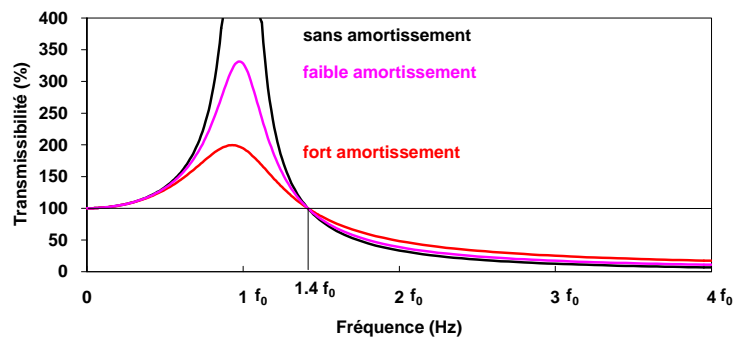
⇒ système masse-ressort, SANS amortisseur



- masse  $m$  en kg
- ressort de raideur  $k$  en newton/m (force de rappel du ressort)
- fréquence de résonance  $f_0 = (1/2\pi) (k/m)^{0.5} = 15.77 / (d_{st})^{0.5}$
- $d_{st}$  = déflexion statique en mètre = écrasement du ressort au repos sous la masse  $m$ 
  - $f_0 = 10$  Hz, écrasement  $d_{st} = 2$  mm
  - $f_0 = 5$  Hz, écrasement  $d_{st} = 10$  mm
  - $f_0 = 2$  Hz, écrasement  $d_{st} = 60$  mm
  - $f_0 = 1$  Hz, écrasement  $d_{st} = 250$  mm

⇒ système masse-ressort, AVEC amortisseur

- amortisseur rigidifie suspension lors de mouvements rapides.
- transmissibilité varie en fonction de la fréquence selon la rigidité de l'amortisseur.



## MESURAGE DES VIBRATIONS

- ⇒ très complexe: pour des experts
- ⇒ normes de référence pour:
  - vibrations **corps total**: ISO2631



- vibrations **mains bras**: ISO5349



- **PRINCIPE D'EGALE ENERGIE**

⇒  $a^2 T = \text{constante}$

- exemple:  $(2\text{ms}^{-2})^2 480\text{min} = (2.8\text{ms}^{-2})^2 240\text{min}$

⇒ différents niveaux d'exposition

- exposition globale sur 480 minutes  $a^2 T = \text{somme des expositions partielles } a^2 T_i$
- $T = \text{somme des durées partielles d'exposition } T_i$

## REGLEMENTATION ET VALEURS LIMITES

- **DIRECTIVE EUROPEENNE (2002)**

- Vibrations **corps total**

Accélération d'exposition personnelle la plus grande de

$1.4 a_{wx}$  ,  $1.4 a_{wy}$  ,  $a_{wz}$

- valeurs limites

Valeurs d'action (informer, former, prévention)	Valeurs limites d'exposition
$0.5 \text{ ms}^{-2}$	$1.15 \text{ ms}^{-2}$

- Vibrations **mains bras**

- globalisation de l'accélération pondérée (ISO5349) des 3 axes avec la même pondération pour les 3 axes

$$= (a_{wz}^2 + a_{wx}^2 + a_{wy}^2)^{0.5}$$

- valeurs limites

Valeurs d'action (informer, former, prévention)	Valeurs limites d'exposition
$2.5 \text{ ms}^{-2}$	$5 \text{ ms}^{-2}$

## ORDRE DE GRANDEUR

- VIBRATIONS **CORPS TOTAL**

Type d'engins	$A_{weq} \text{ ms}^{-2}$	
	Moyenne	Maximum
Chargeuse pelleteuse	0,6	1,9
Niveleuse	0,7	1,5
Rouleau vibrant	0,8	1,5
Camion tout terrain	0,7	2,4
Chariot élévateur tout terrain	1,4	2,3
Chargeuse sur pneus	0,7	2,3
Chargeuse sur chenilles	0,9	2,0
Bouteur (bulldozer)	0,7	2,0
Tondeuse	0,6	1,0
Tracteur agricole et forestier	0,8	1,8
Chariot élévateur: < 2 T	0,9	2,2
2 à 10 T	0,8	1,5
> 10 T	0,6	2,0
Tracteur routier	0,7	1,1
Camion	0,6	1,4
Véhicule utilitaire	0,6	0,8
Camion grue	0,3	1,1
Portique, pont roulant	0,4	0,8
Locomotive	0,3	0,5
Bus	0,4	0,5
Voiture: route en bon état	0,3	0,5
route en mauvais état	0,5	1,0
Métro - train	0,5	0,6
Cokerie	0,2	0,8
Concasseur	0,6	1,1
Presse à béton	0,5	1,1
Presse lourde	0,4	0,8

- Des amplitudes plus faibles peuvent résulter:
  - d'un engin particulièrement en bon état;
  - de suspensions de qualité;
  - de chemins de roulage bien plans.
- Des amplitudes plus importantes résulteront:
  - d'un entretien défectueux;
  - de suspensions non appropriées ou dégradées;
  - de chemins de roulage irréguliers.

- **VIBRATIONS MAINS BRAS**

Machines		Accélération équivalente résultante ms <sup>-2</sup>		
		moyenne	minimum	maximum
Débroussailleuse	poignée arrière	7,0	2,6	18
	poignée avant	7,9	3,3	17
Tronçonneuse suspendue	poignée arrière	12,9	3,3	24,1
	poignée avant	7,3	3,9	14,6
Tronçonneuse NON suspendue	poignée arrière	29,9	7,8	46,8
	poignée avant	19,2	14,3	28,7
Perceuse - foreuse		10,9	5,0	21,8
Meuleuse droite		8,2	3,3	19,8
Meuleuse d'angle (disqueuse)		6,0	2,0	17,6
Meuleuse verticale		7,3	3,3	13,7
Ponceuse vibrante		8,2	3,3	11,2
Polisseuse		4,7	2,6	8,2
Grignoteuse		8,6	3,3	17,1
Perceuse à percussion		12,5	5,0	32,6
Pistolet à aiguilles		16,2	5,0	20,8
Rivetage	marteau à river	5,6	1,5	23,1
	tas de réaction	17,0	-	-
Marteau piqueur, burineur, ébarbeur		11,5	2,0	30,0
Meuleuse sur pied		8,4	2,0	32,5
Tournevis pneumatique, visseuse		4,8	1,8	7,8
Clé à chocs, boulonneuse		6,0	2,0	22,2
Clé à chocs hydropneumatique		3,6	1,0	6,5
Clé d'angles, serreuse		1,7	1,0	3,9
Clé à rochets		5,2	1,0	10,4
Foreuse de roche		15,0	-	32,0

- Des amplitudes plus faibles peuvent résulter:
  - d'une machine particulièrement en bon état;
  - d'outils équilibrés;
  - de poignées anti-vibrations.
- Des amplitudes plus importantes résulteront:
  - d'un entretien défectueux;
  - d'outils mal équilibrés;
  - d'absence de suspension des poignées.

- **BASES DE DONNEES INTERNATIONALES**

site WEB en Suède: <http://umetech.niwl.se/>

## EFFETS DES VIBRATIONS

- **VIBRATIONS CORPS TOTAL**

- Effets sur la santé
  - Effets établis:
    - ◇ hernies discales chez les conducteurs assis pendant des durées importantes;
    - ◇ plaintes lombaires.
  - Effets suspectés:
    - ◇ pathologies ostéo-articulaires au niveau de la colonne lombaire;
    - ◇ problèmes gastro-intestinaux analogues à ceux rencontrés lors de problèmes de stress.
  - Effets non établis:
    - ◇ pas de relations entre
      - \* les plaintes lombaires des travailleurs,
      - \* leurs anomalies (principalement arthrose) de la colonne vertébrale.
    - ◇ Explication: vibrations mais aussi posture assise prolongée
- Critères du Fonds des Maladies professionnelles belge
  - Invalidité reconnue lorsque
    - ◇ plainte du travailleur au niveau lombaire;
    - ◇ arthrose lombaire constatée radiologiquement;
    - ◇ exposition professionnelle pendant au minimum 5 ans;
    - ◇ à une accélération d'exposition personnelle  $> 0,7 \text{ ms}^{-2}$ .

- **VIBRATIONS MAINS BRAS**

- Effets sur la santé: fonctions des fréquences de vibrations:
  - Machines de basses fréquences ( $< 60 \text{ Hz}$ ): telles que machines à percussion, marteaux-piqueurs, burineurs, ...
    - ◇ troubles ostéoarticulaires (géodes, arthrose...) au niveau des épaules ( $< 20 \text{ Hz}$ ), des coudes ( $< 40 \text{ Hz}$ ) et des poignets;
    - ◇ au niveau du poignet, du coude et de l'épaule ( $< 60 \text{ Hz}$ ) avec maladie de Kienböck (nécrose du semi-lunaire) ou de Kohler (pseudarthrose du scaphoïde).
  - Machines de moyennes fréquences (60 à 200 Hz) telles que les machines tournantes (4.000 à 12.000 tours/min): meuleuses verticales, polisseuses, ...
    - ◇ troubles vasculaires (« doigt blanc » ou syndrome de Raynaud) au niveau des phalanges des doigts ou de la paume de la main.
  - Machines de hautes fréquences ( $> 200 \text{ Hz}$ ) telles que les machines tournantes à haute vitesse ( $> 12.000 \text{ tours/min}$ ): polisseuses ou ébarbeuses, ...
    - ◇ troubles neurologiques au niveau des doigts et des mains: paresthésies, picotements, engourdissements, perte de sensibilité tactile et thermique.

NB: Des machines dont les fréquences dominantes sont basses peuvent générer des hautes fréquences et inversement

- Classification internationale (Echelle de Stockholm)
  - des troubles vasculaires

Stade	Degré	Description de la crise
0	-	Pas d'attaque
1	Léger	Attaques occasionnelles affectant seulement l'extrémité d'un ou plusieurs doigts
2	Moyen	Attaques occasionnelles affectant les deuxièmes et troisièmes phalanges (rarement les premières) d'un ou plusieurs doigts.
3	Sévère	Attaques fréquentes affectant toutes les phalanges de la plupart des doigts.
4	Très sévère	Comme au stade 3, avec des modifications trophiques de la peau à l'extrémité des doigts

- des troubles neurologiques

STADES	SYMPTOMES
0	Exposition aux vibrations, aucun symptôme
1	Paresthésies intermittentes avec ou sans douleur
2	Paresthésies intermittentes ou persistantes, réduction de perception sensitive
3	Paresthésies intermittentes ou persistantes, réduction de la discrimination tactile et/ou de la dextérité manuelle