

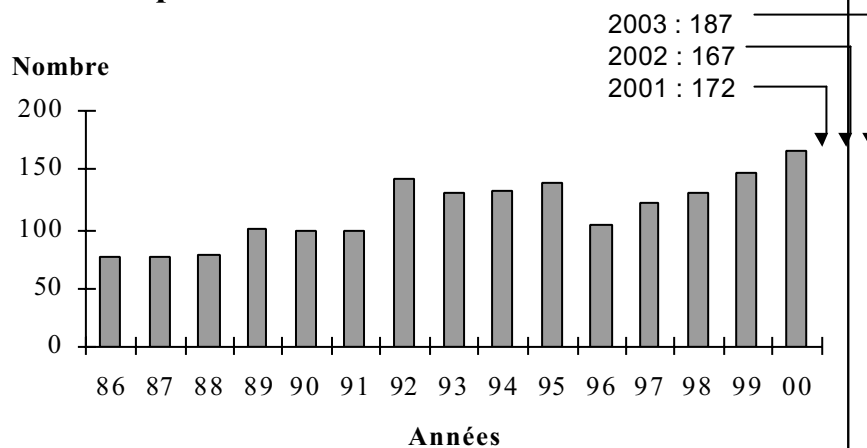
Les vibrations au travail

Salariés exposés aux vibrations (%) d 'après la seconde enquête européenne sur les conditions de travail

Exposition aux vibrations produites par des outils manuels ou des machines:	France (%)	Europe (%)
tout le temps ou presque	12	11 (E=19, S=5) (construction = 23, mines, manufactures = 20)
entre 3/4 et 1/2 du temps	5	6
1/4 du temps	6	7
jamais ou presque	77	76

Affections provoquées par les vibrations de certaines machine-outils

Evolution du nombre de maladies professionnelles du tableau 69



Déclarations au titre du Tableau 97 des maladies professionnelles

(affections chroniques du rachis lombaire dues aux vibrations)

- 2000 384
- 2001 383
- 2002 424
- 2003 421

Introduction

Nos connaissances

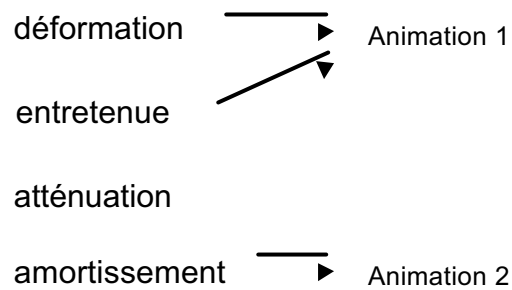
Action sur la situation

Conception

Organisation

Choix de matériel

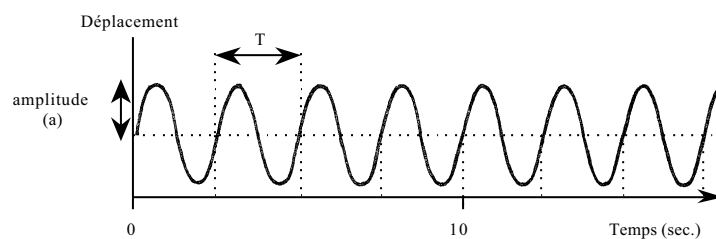
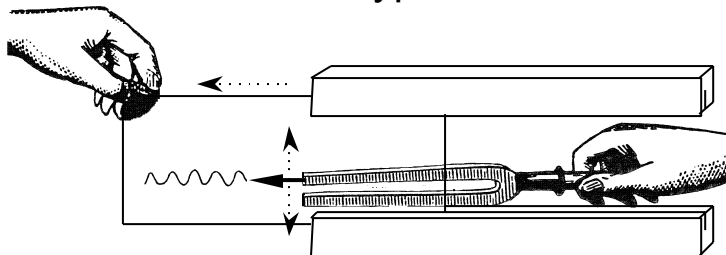
Définition et Unités



Unités

Fréquence (Hertz) Hz

Vibration de type sinusoïdal



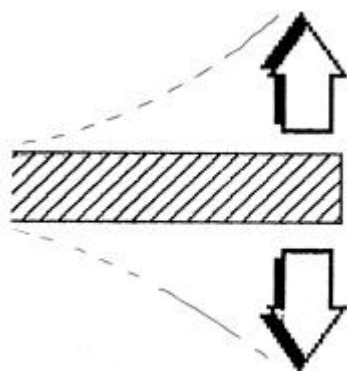
Période $T = 2,5 \text{ sec.}$

$$\text{Fréquence } f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2,5} = 4 \text{ Hz}$$

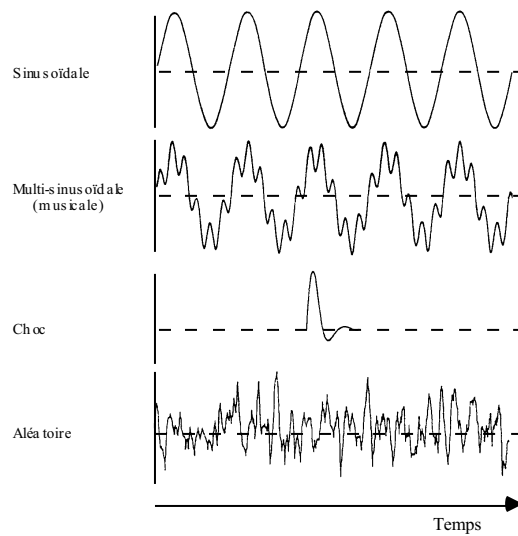
Unités

Fréquence (Hertz) Hz

Intensité $\longrightarrow$ Amplitude

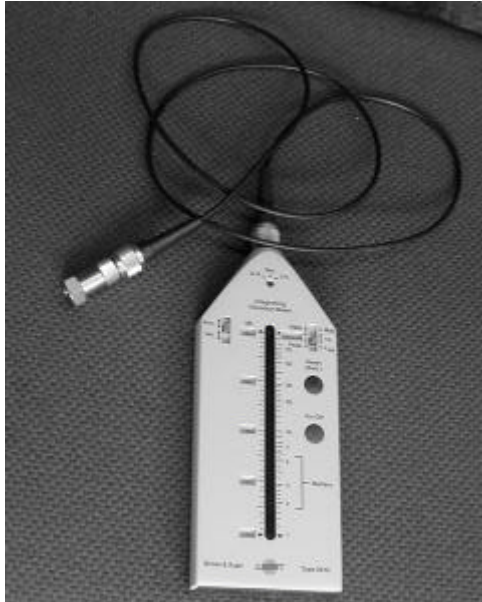


Exemple de différents types de vibrations,
d'après Griffin M.J. (1990)



Physiologie

- Pas de récepteur spécifique
- Vestibule
- Sensibilité cutanée, musculaire et articulaire



« Mesureur » de vibrations

Accéléromètre

Amplificateur

Affichage

Mesure des vibrations

- Accéléromètre
- Gammes de fréquence
d'accélération
- Sens de fonctionnement
- Résonance

Accéléromètre piezo-électrique

d'après un document B&K

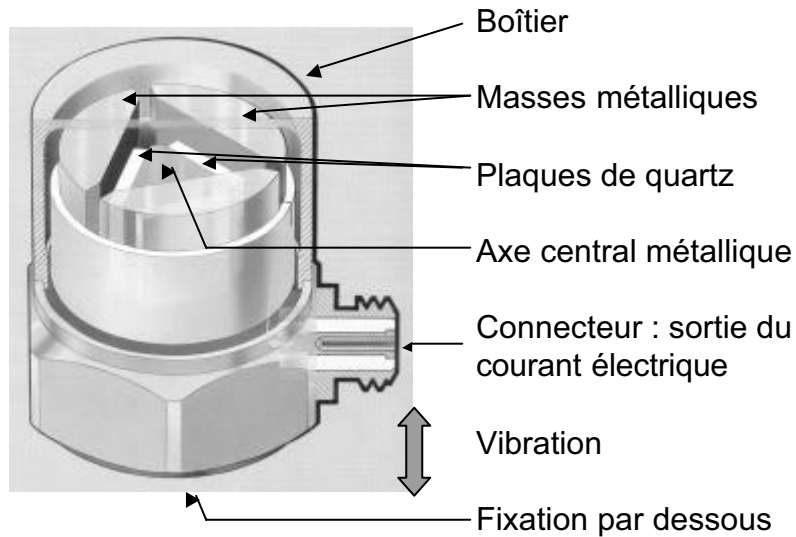
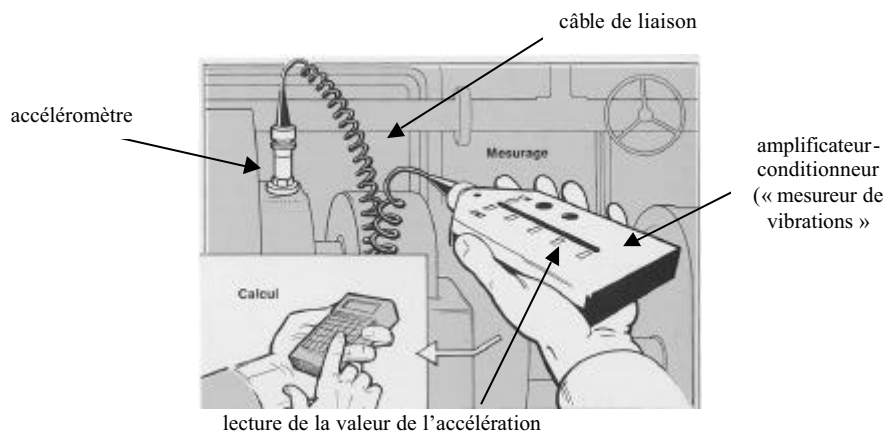
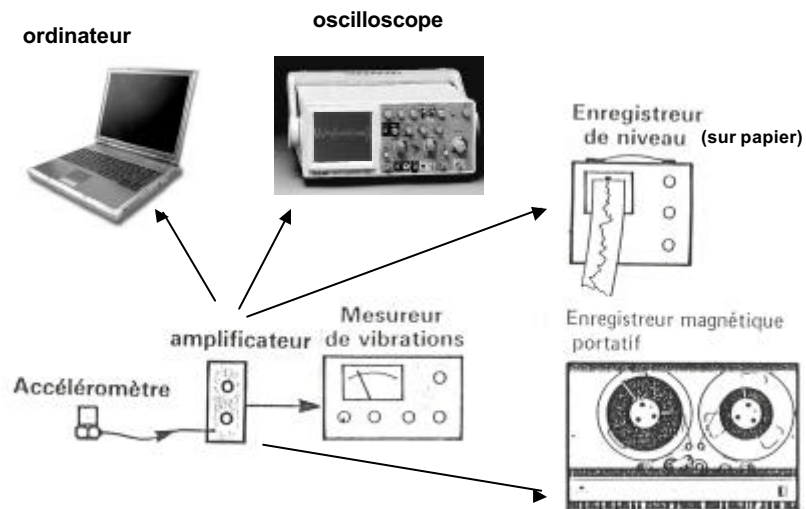


Schéma de l'utilisation d'un ensemble de mesure des vibrations

(d'après un document Brüel et Kjaer, 1990.

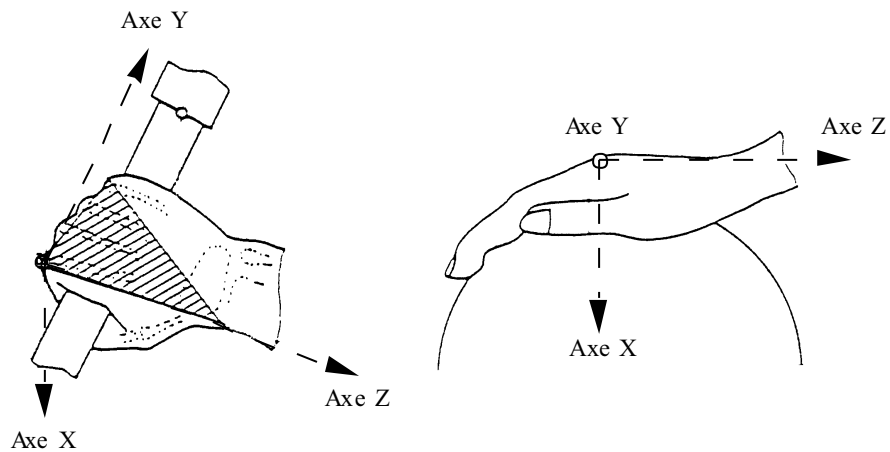


« stockage » des résultats de la mesure

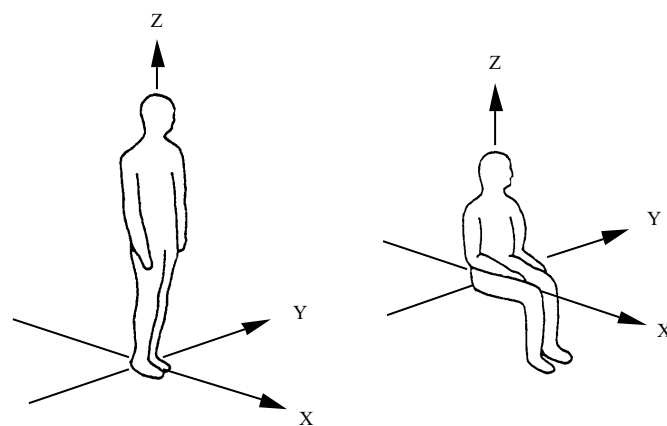


Propagation :
dans toutes les
directions

Système de coordonnées pour l'évaluation des vibrations mécaniques appliquées à la main, d'après NF E 90-402.



Système de coordonnées pour l'évaluation des vibrations mécaniques appliquées au corps entier, d'après la norme NF E 90-401-1.
Axe sagittal (X), Axe transversal (Y), Axe longitudinal (Z).



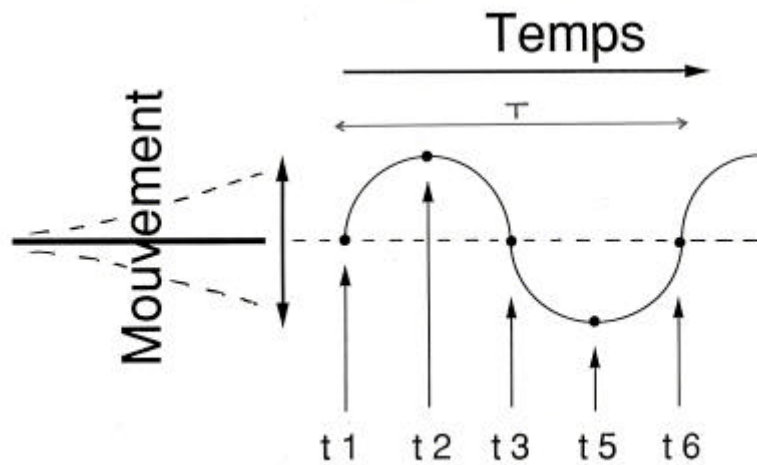
Accéléromètre tri-axial



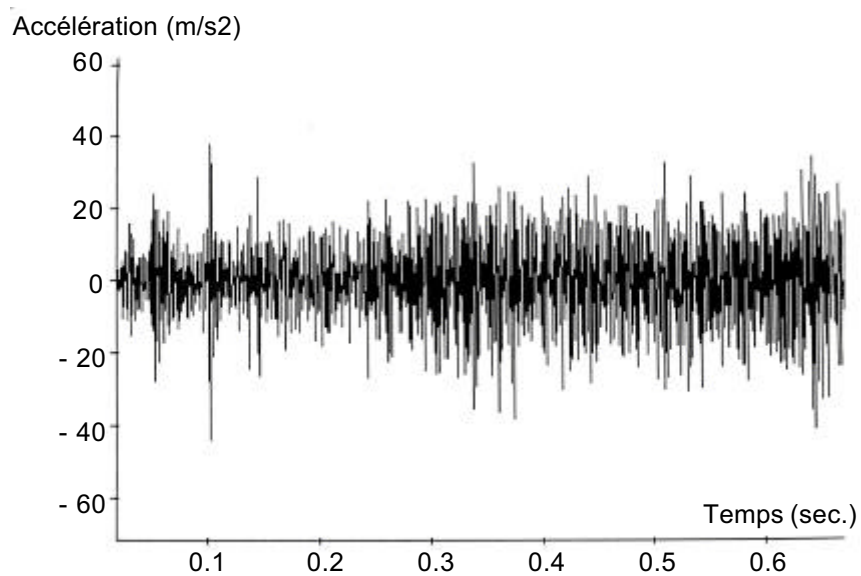
Représentation

- Accélération en fonction du temps

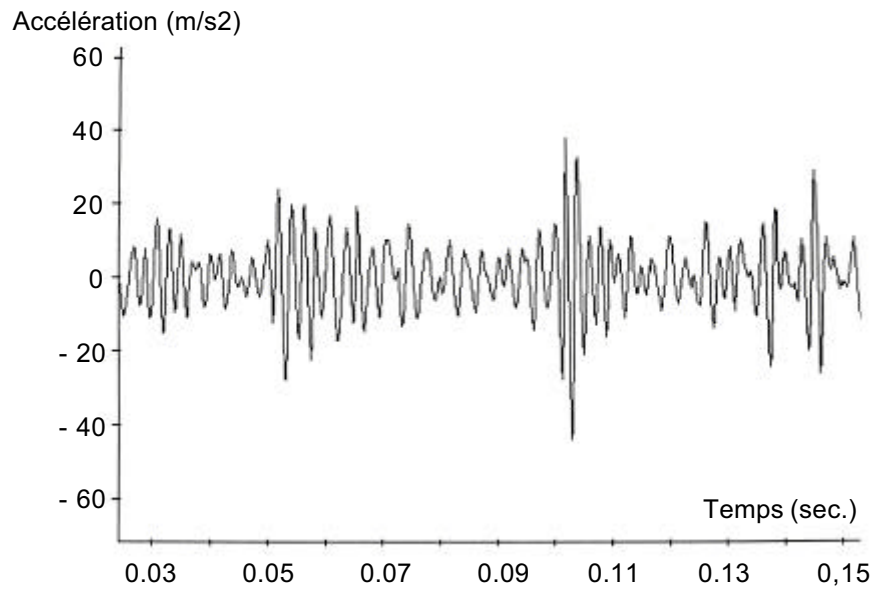
Évolution temporelle des vibrations



Représentation accélération - durée



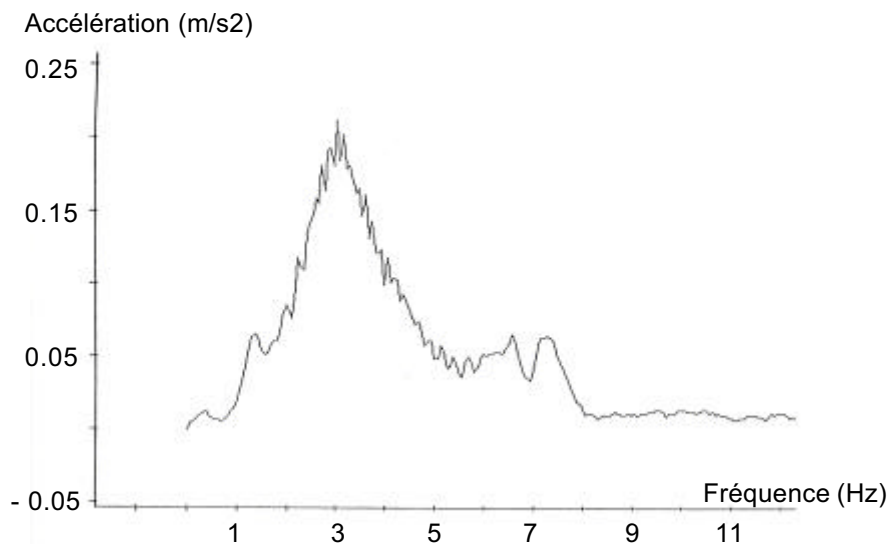
Représentation accélération - durée



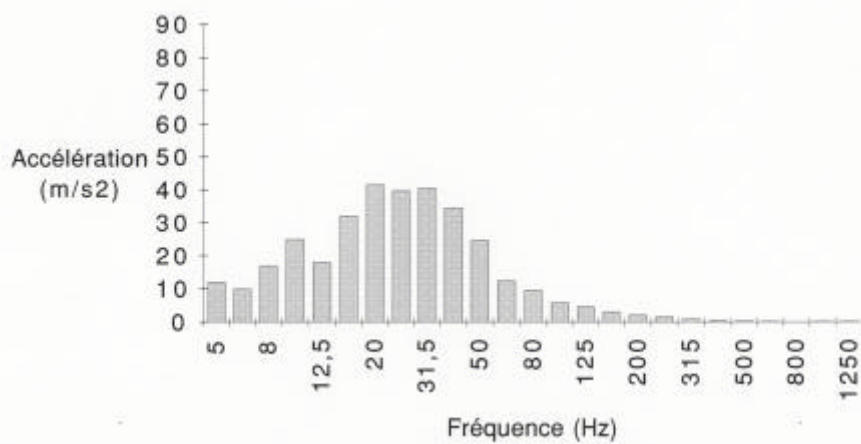
Représentation

- Accélération en fonction du temps
- Accélération en fonction de la fréquence (analyse spectrale)

Représentation accélération - fréquence (spectre)



Représentation accélération - fréquence en classes (bandes de 1/3 d'octave)



Les effets des vibrations dépendent :

- De leur intensité
- De leur composition (fréquence)
- De la durée d'exposition
- De l'axe de transmission au corps
- De la posture
- De l'état de l'opérateur
- De l'association à d'autres stimuli...?

A fréquence basse : inférieures ou égales à 1-2 Hz

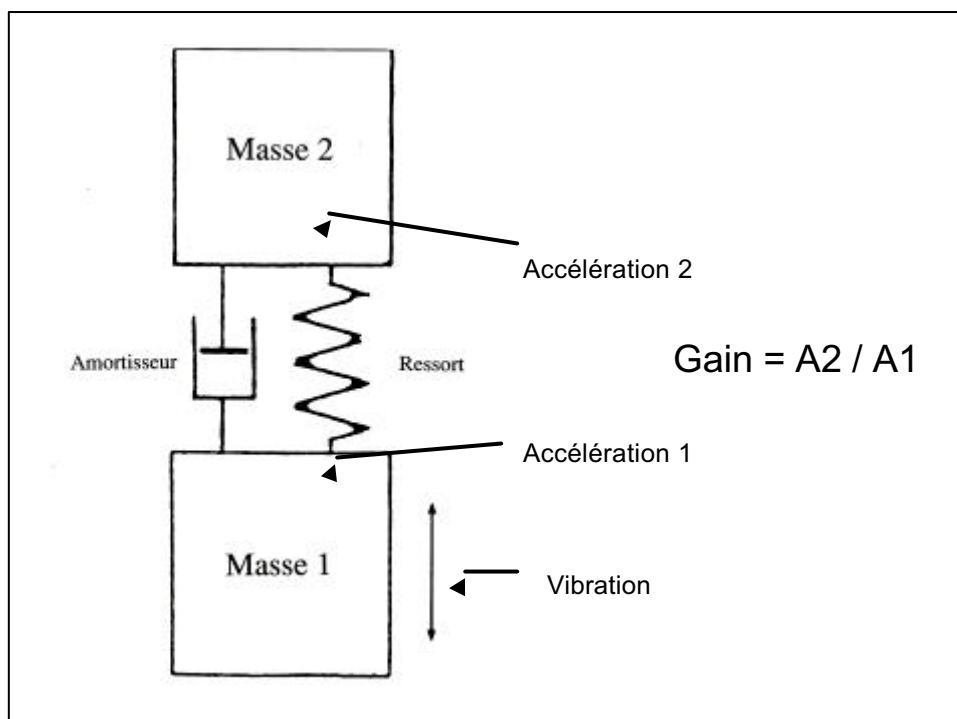
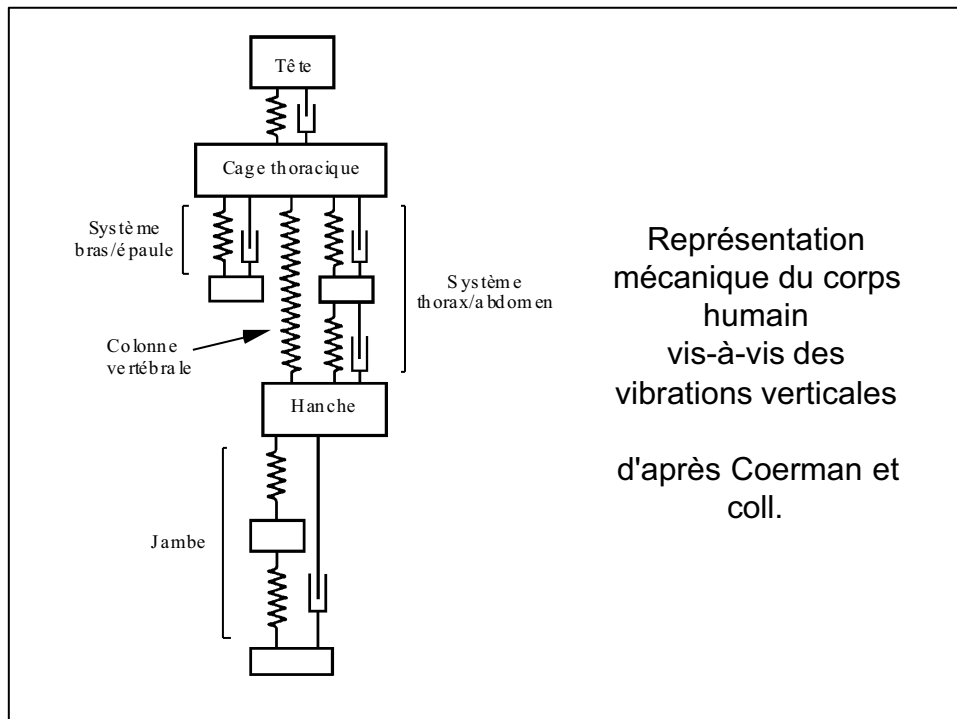
- Pas de déformation du corps
- Inconfort
- Participation à la cinétose

Cinétose ($F < 2 \text{ Hz}$)

- Conflit sensoriel
- Oscillations de basse fréquence
- Pluri-factoriel
 - odeurs
 - mouvements de la masse viscérale
 - alimentation
 - température ambiante
 - psychisme
- Effets visuels plus importants
- Entraînement - Anticipation

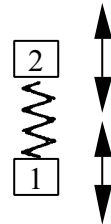
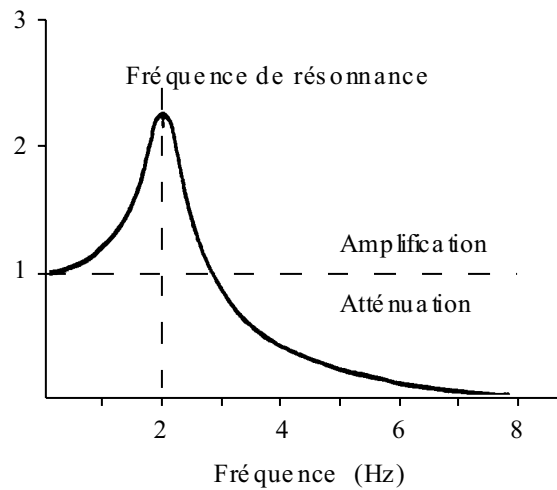
Propagation des vibrations

Comportement d'un système
déformable soumis aux vibrations



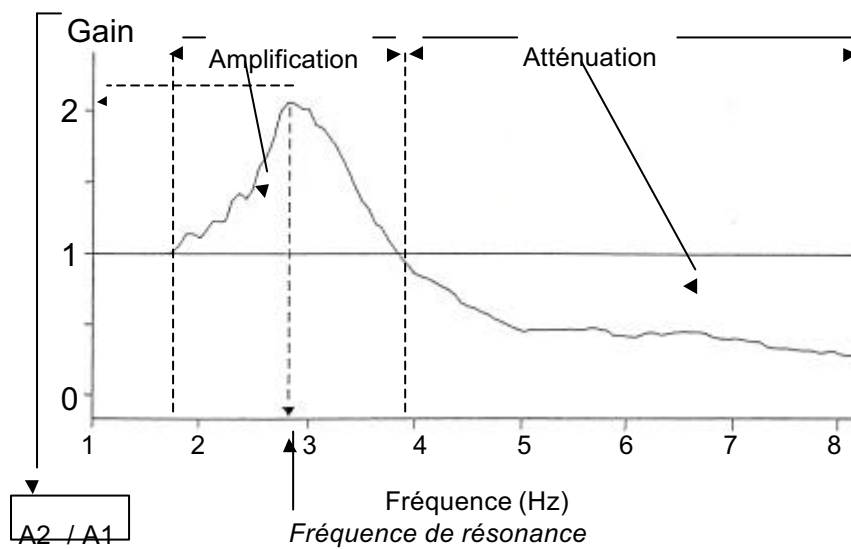
Modification de la transmission des vibrations,
entre 2 éléments (1 et 2) reliés par un ressort,
en fonction de la fréquence.

$$\text{Gain} = a_{(2)} / a_{(1)}$$



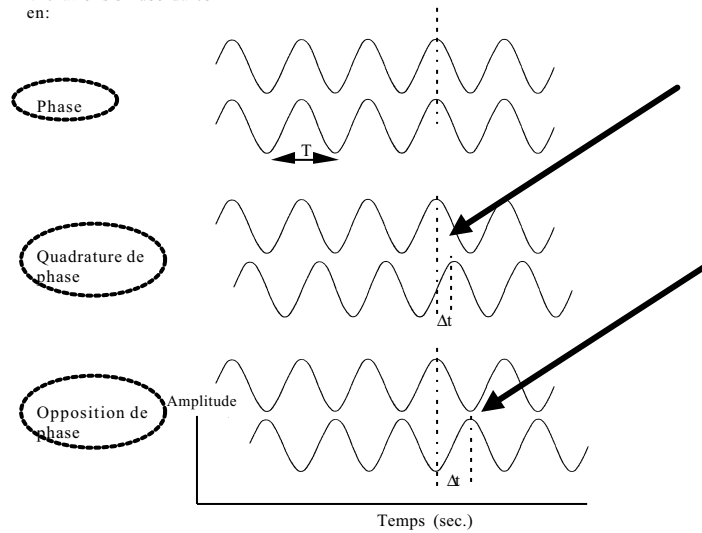
Courbe du gain Chassis - Siège

A1 A2



Évolution temporelle de deux vibrations

Vibrations sinusoïdales en:



Déphasage

$$\text{Déphasage} = \left[\frac{\Delta t}{T} \right] \times 360 \text{ degrés}$$

Quadrature de phase déphasage = 90 degrés

Opposition de phase déphasage = 180 degrés

Vibrations appliquées aux membres supérieurs par des outils
vibrants ou percutants

Bandes de fréquences 5 à 1500 Hz

Norme EN ISO 5349-1 et 2
NF E 90 - 402 - 1et 2

Types de phénomènes pathologiques

Troubles ostéo-articulaires

- Ils touchent les articulations de la main, du poignet, du coude et de l'épaule (voir l'annexe 1)
- Ils se rencontrent le plus souvent chez les opérateurs utilisant des machines percutantes (ex : marteau piqueur ...)
- Ils trouvent leur origine dans le phénomène mécanique des vibrations
- Ils consistent en nécrose osseuse, ramollissement et décalcification de l'os, modification des cartilages, formation d'épines osseuses.

Troubles angio-neurotiques

Le plus souvent localisés à la main

- des troubles circulatoires (dus à des insuffisances de circulation sanguine),
- le gonflement et œdème du poignet, avec rougeur et sensation de pesanteur du poignet.
- la perte passagère de sensibilité (phénomène du doigt mort)
- le développement du Syndrome de Raynaud (blanchissement et engourdissement des doigts, rougeurs, sensations de brûlure et de picotement) pendant le travail ou en dehors (exposition au froid ou à l'humidité).
- des troubles nerveux de la sensibilité tactile périphérique.

Troubles musculaires

faiblesse musculaire (baisse de la force, en particulier force de préhension)

douleurs aux mains et aux bras

crampes, tremblements

par lésion des fibres musculaires et atteinte nerveuse périphérique

En conséquence :

Douleurs, en particulier lors des mouvements et lors de l'utilisation des outils

Moins bonne motricité manuelle et sensibilité

Gêne au travail, voire impossibilité

**Fréquence de résonance des
différentes parties du membre
supérieur,
d'après Peng S.L.**

Epaule	4 à 5 Hz
Bras	5 à 10 Hz
Avant-bras	16 à 30 Hz
Main	30 à 50 Hz

Fréquence de vibration de quelques outils

Type	Gamme de fréquence
Forets rotatifs	30 à 40 Hz
Outils pneumatiques	15 à 50 Hz
Instruments ménagers	30 à 60 Hz
Scies à main	50 à 200 Hz
Rasoirs électriques	200 Hz
Polisseuses et meules à main	200 à 800 Hz
Forets dentaires à air	1500 à 2000 Hz

Membre supérieur : 5 à 50 Hz

Mode de calcul

Analyse de la situation de travail

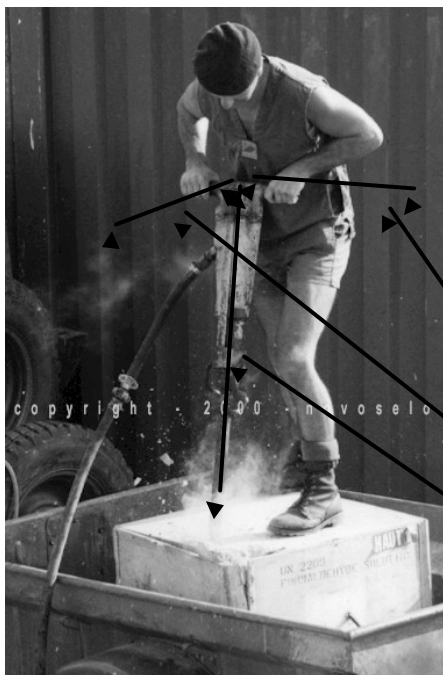
Analyse de la situation de travail

- Repérer sur plusieurs cycles de travail :
 - Machines vibrantes utilisées
 - Différents outils fixés sur la machine
 - Différentes matières travaillées
- Mesurer la durée d'exposition

Mode de calcul

Analyse de la situation de travail

Mesure



Mesure selon 3 axes
perpendiculaires les
uns aux autres

droite - gauche

avant - arrière

haut - bas

Mode de calcul

Analyse de la situation de travail

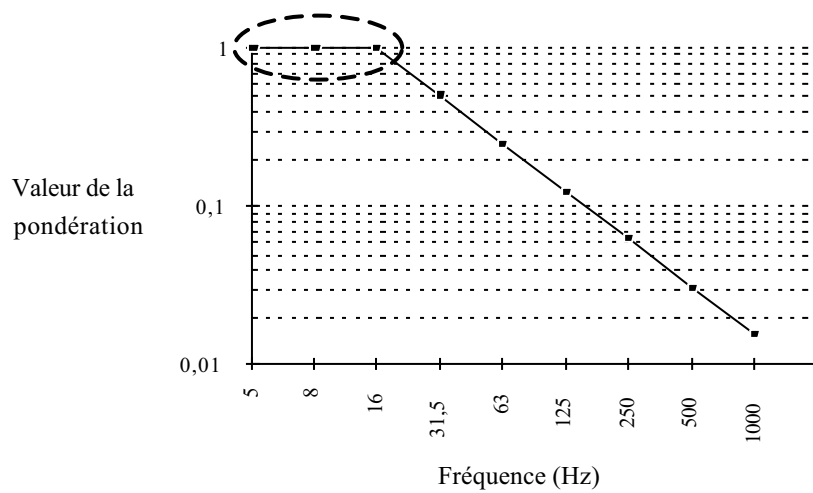
Mesure

Pondération des résultats

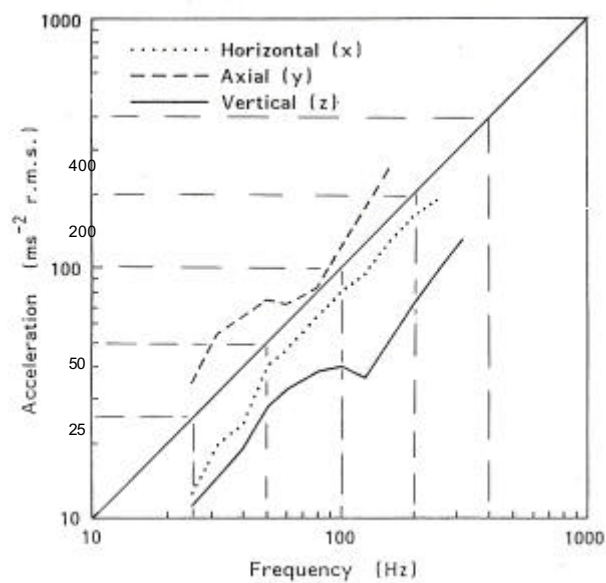
Pondérer les résultats...

- Prendre en compte la fréquence et l'accélération simultanément
- Privilégier les gammes de fréquence dangereuses et atténuer les autres

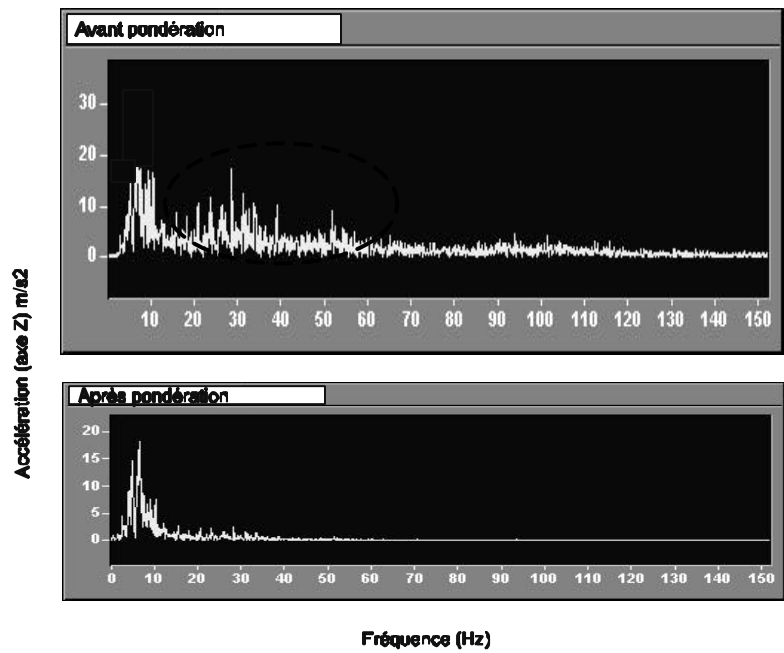
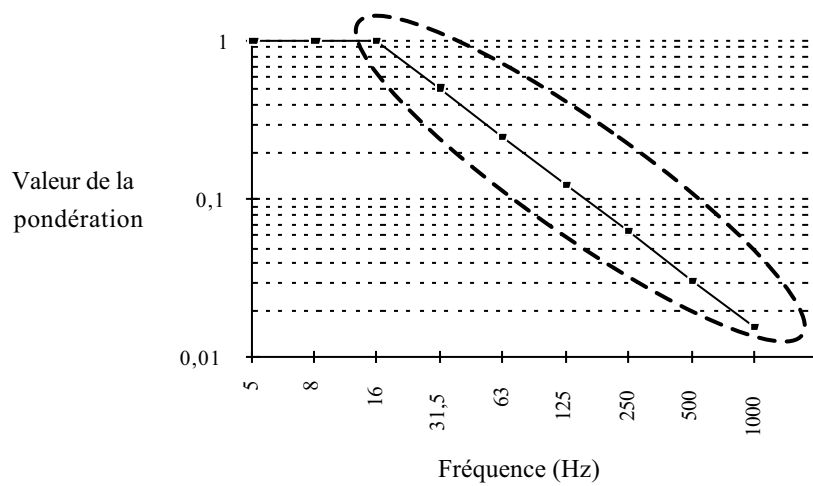
Pondération à appliquer à l'accélération
en fonction de la fréquence,
d'après NF E 90-402



Seuil de gêne à l'utilisation d'outils vibrants



Pondération à appliquer à l'accélération
en fonction de la fréquence,
d'après NF E 90-402



Enchaînement des calculs (1)

1 - élever au carré les
accélérations pondérées

$$\begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} \longrightarrow \begin{bmatrix} x_w^2 \\ y_w^2 \\ z_w^2 \end{bmatrix}$$

2 - faire la somme

$$x_w^2 + y_w^2 + z_w^2$$

3 - extraire la racine carrée
(accélération **é**quivalente)

$$a_{eq} = \sqrt{x_w^2 + y_w^2 + z_w^2}$$

Mode de calcul

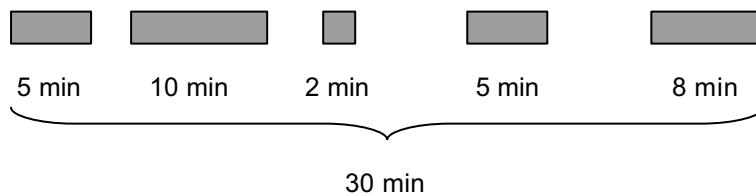
Analyse de la situation de travail

Mesure

Pondération des résultats

Calcul d'une accélération équivalente à une
exposition continue de 8 heures

Enchaînement des calculs (2)



4 - ramener à une durée d'exposition de 8 heures

$$a_{eq(8h)} = a_{eq} \sqrt{\text{durée} / 8}$$

30 min 460 min

(Note: Arrows in the original image point from '30 min' to the 'durée' term and from '460 min' to the '8' term in the formula.)

Enchaînement des calculs (3)

5 - en cas de plusieurs expositions :

Exemple : 4 outils ou même outil travaillant des matériaux différents,

► combiner les différentes expositions :

$$a_{eq(8h)} = \sqrt{a_{eq1}^2 + a_{eq2}^2 + a_{eq3}^2 + a_{eq4}^2}$$

Exemple

Au cours d'une journée de travail, un opérateur est exposé à :

une accélération b de 4 m/s² pendant 1h, $a_b = 4 \sqrt{1/8} = 1,41 \text{ m/s}^2$

une accélération c de 2 m/s² pendant 4h, $a_c = 2 \sqrt{4/8} = 1,41 \text{ m/s}^2$

une accélération d de 7 m/s² pendant 1h, $a_d = 7 \sqrt{1/8} = 2,47 \text{ m/s}^2$

$$A_{(8)} = \sqrt{1,4^2 + 1,4^2 + 2,5^2} = 3,17 \text{ \# } 3,2 \text{ m/s}^2$$

Mode de calcul

Analyse de la situation de travail

Mesure

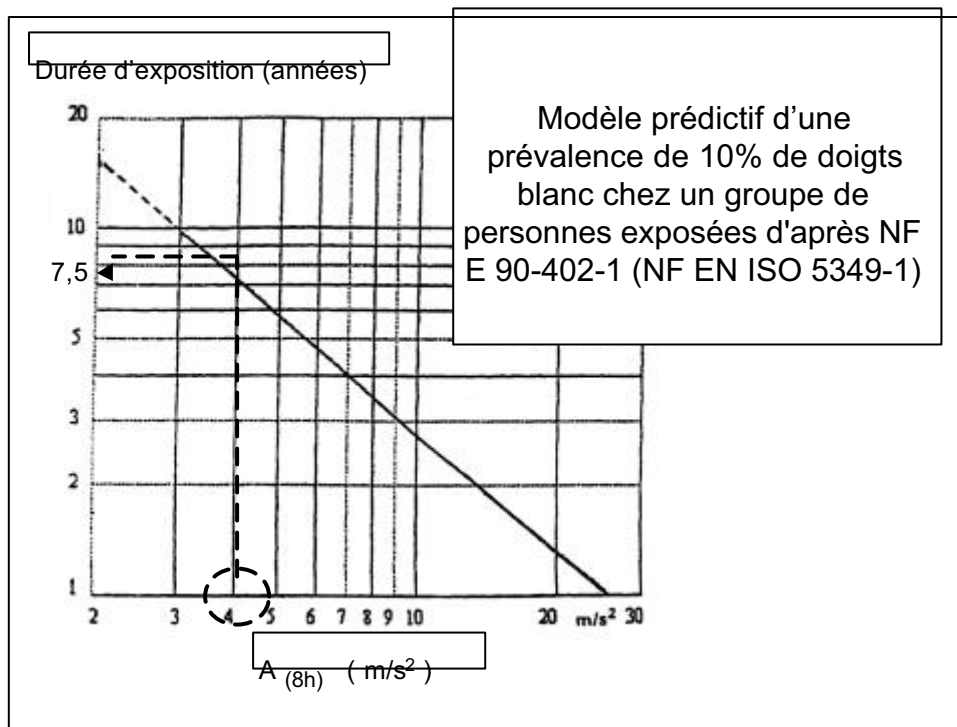
Pondération des résultats

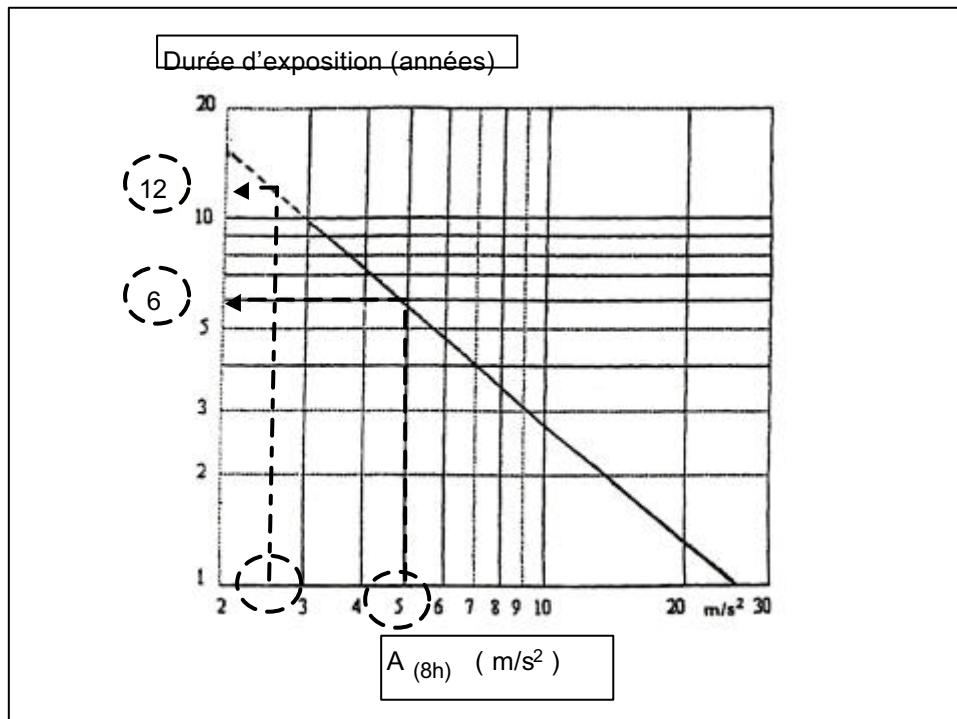
Calcul d'une accélération équivalente à une exposition continue de 8 heures

Évaluation du risque - immédiat
- à long terme

Exposition quotidienne

- Cote d'alerte = $2,5 \text{ m/s}^2$
- Cote de danger = 5 m/s^2





Quelques souhaits

- Mirbod (1998) 2,2 m/s² pour 8h
- Pelmeear (2000) 1,8 m/s² pour 8h
< 5 m/s² pour 1h
- Danemark objectif = 1 m/s²
danger = 3 m/s²
- Syndicats européens alerte = 1 m/s²
danger = 3 m/s²

Réduction des vibrations produites par les outils vibrants tenus à la main.

- Achat du matériel
- Entretien et utilisation (durée, efforts)
- Limitation de la transmission des vibrations
 - matériau atténuant la propagation
 - découplage par suspension
 - absorption active,
- Gants (bonne atténuation au-delà de 70-100 Hz, mais)

Vibrations appliquées à l'ensemble du corps
(conduite de véhicules ou de machines)

Bandes de fréquences 0,5 à 80 Hz

Norme ISO 3631 -1 à 4
NF EN 1032
NF E 90 - 453

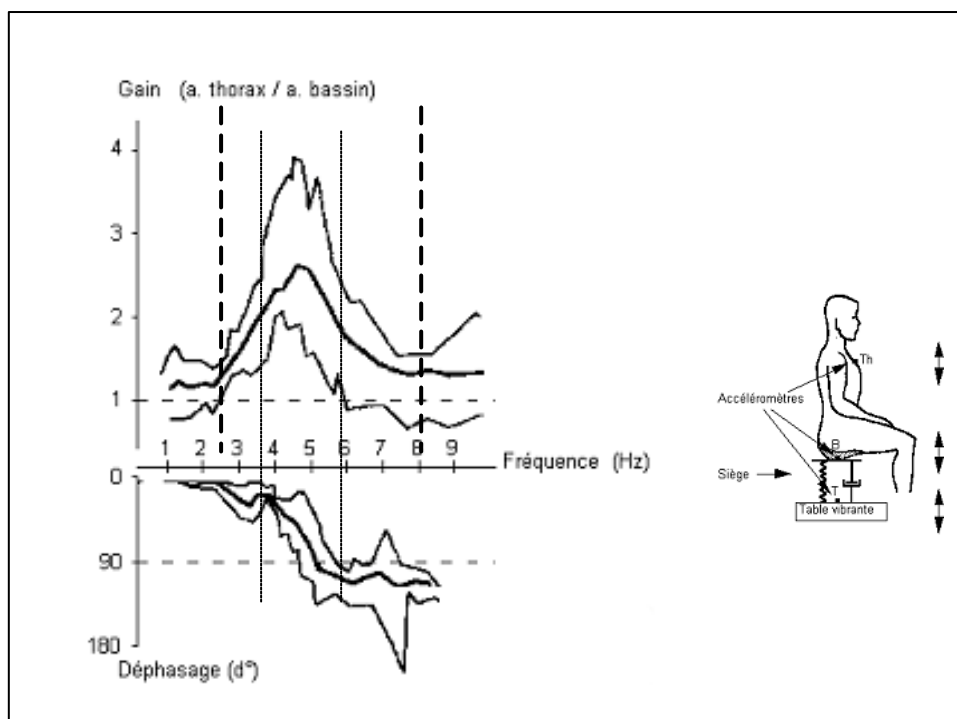
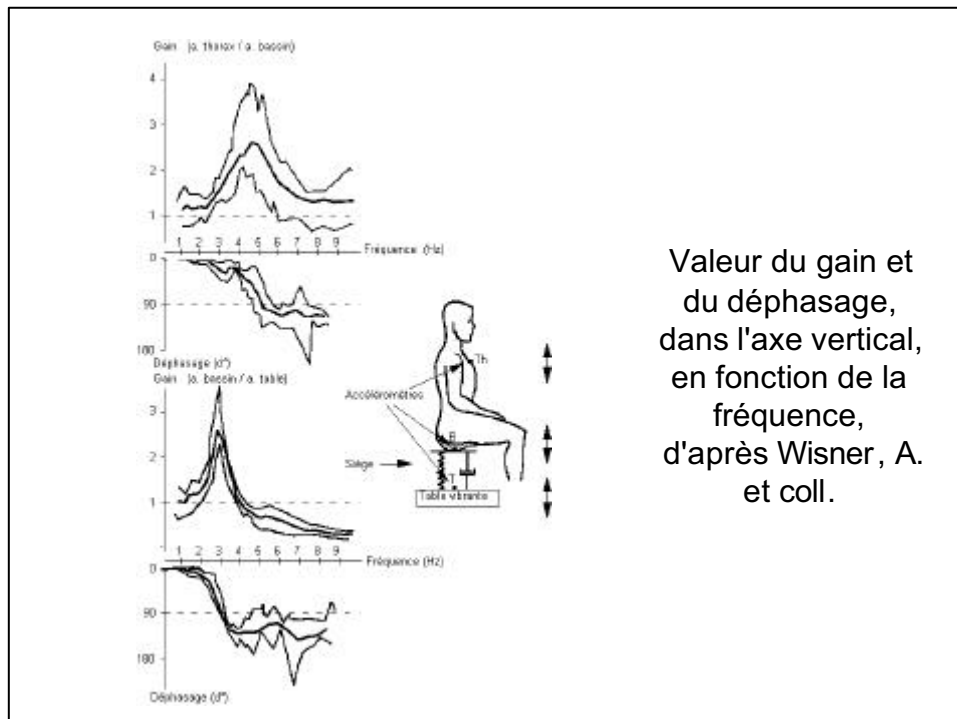
Fréquences prépondérantes et amplitudes d'accélération de divers véhicules

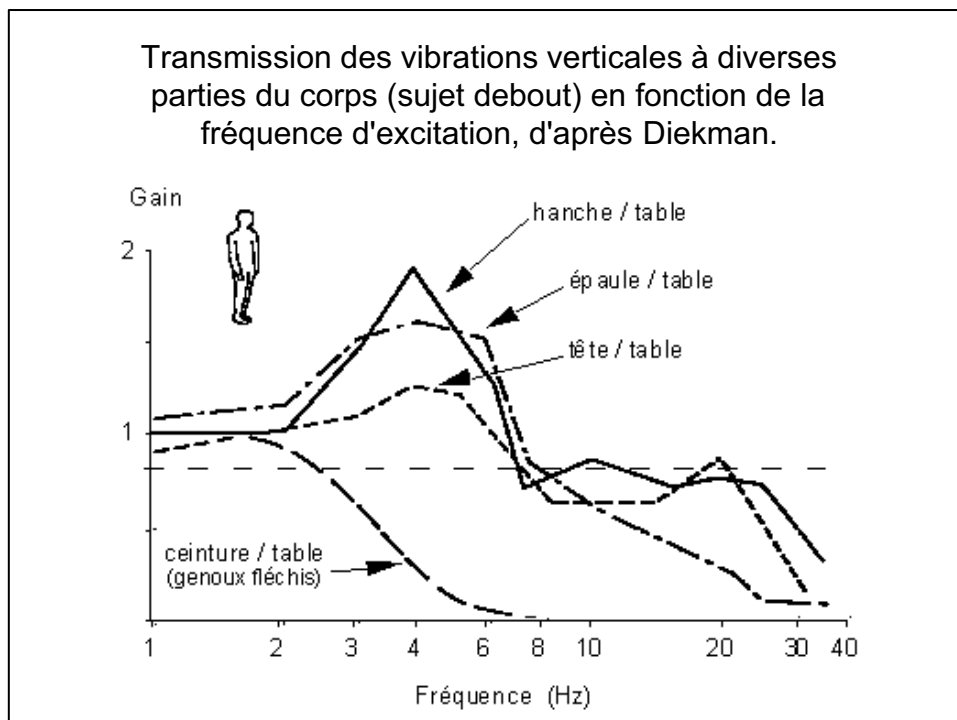
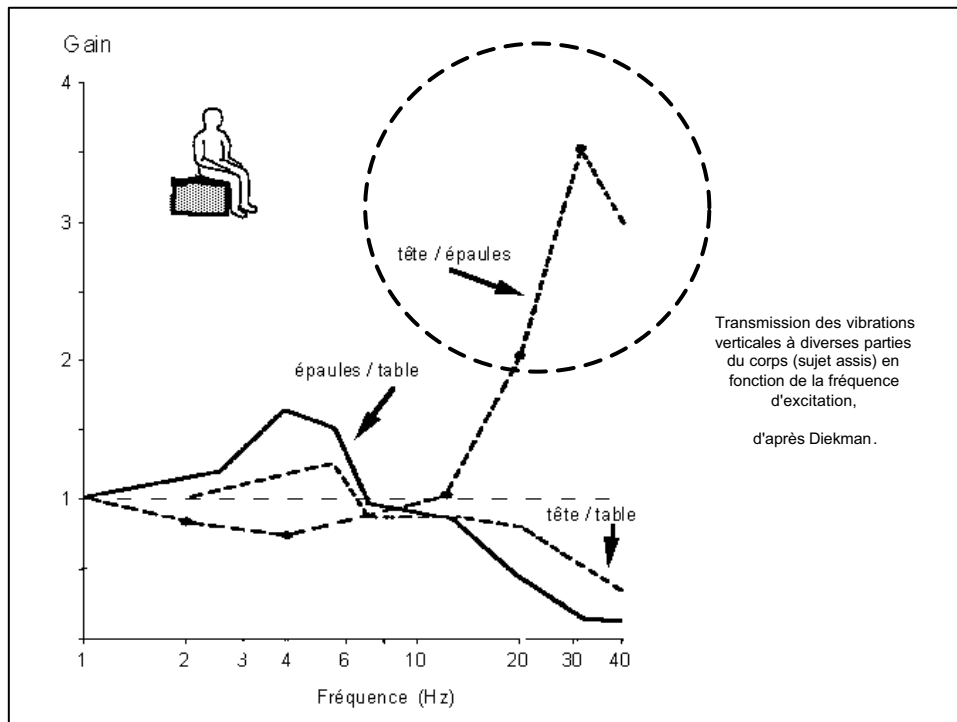
d'après « Les vibrations industrielles ». INRS ED 656, 1984.

Type de Véhicule	Conditions d'utilisation	Plages fréquentielles prépondérantes	Accélération équivalente
Chargeuse sur pneumatiques	Reprise au tas Roulement sur piste de chantier	1 à 10 Hz 1 à 3 Hz	1 à 2 m/s ² 1 à 2,5 m/s ²
Chargeuse sur chenilles	Décochage, reprise au tas	2 à 10 Hz	0,75 à 1,5 m/s ²
Camions tombereaux	Roulement sur piste de chantier	1 à 3 Hz	0,8 à 2,5 m/s ² selon la suspension
Décapeuse automotrice sur pneumatiques	Roulement sur piste de chantier	1 à 3 Hz	0,8 à 2,5 m/s ² selon la suspension
Tracteur sur pneumatiques	Poussage	1 à 10 Hz	1 à 2 m/s ²
Tracteur sur chenilles	Poussage	2 à 20 Hz	0,75 à 1,5 m/s ²
Tracteur agricole	Roulement sur chemin	2 à 4 Hz	1 à 2 m/s ²
Chariot élévateur	Roulement sur aire d'usine	3 à 10 Hz	0,5 à 1,5 m/s ²
Rouleau vibrant	Compactage de sols	10 à 30 Hz	1 à 5 m/s ²

Fréquences prépondérantes et amplitudes d'accélération de divers véhicules d'après INRS

Type de Véhicule	Conditions d'utilisation	Plages fréquentielles prépondérantes	Accélération équivalente
Tracteur routier	Roulement sur route	1,5 à 15 Hz	0,5 à 1,5 m/s ²
Poids lourd	Roulement sur route	1,5 à 12 Hz	
Voiture automobile	Roulement sur route	0,8 à 2 et 9 à 12 Hz	0,2 à 0,5 m/s ²
Autobus : suspension			
- classique	Roulement sur route	1,3 à 2 et 8 à 12 Hz	
- air	Roulement sur route	0,8 à 1,4 et 8 à 12 Hz	
Train	Roulement sur rail	1 à 8 Hz	
Hélicoptère	Vol	3 à 6 et 15 à 21 Hz	
Avion commercial	Vol	0,2 à 7 Hz	
Navire	En mer		
- roulis		0,1 à 0,3 Hz	
- tangage		0,06 à 0,2 Hz	





Constatations expérimentales

Fréquence de résonance moyennes :

Cœur	4 à 6 Hz	
Estomac	4 à 5 Hz	
Thorax	4 à 6 Hz	
Foie	3 à 8 Hz	
Rein	6 à 12 Hz	
Viscères	10 à 15 Hz	
Douleurs	thoraciques	5 à 7 Hz
	abdominales	4 à 9 Hz
	lombo - sacrées	8 à 12 Hz

Troubles digestifs

Perte d 'appétit

Constipation

Hémorroïdes

Ulcères

Plutôt moins important qu 'on ne le pensait

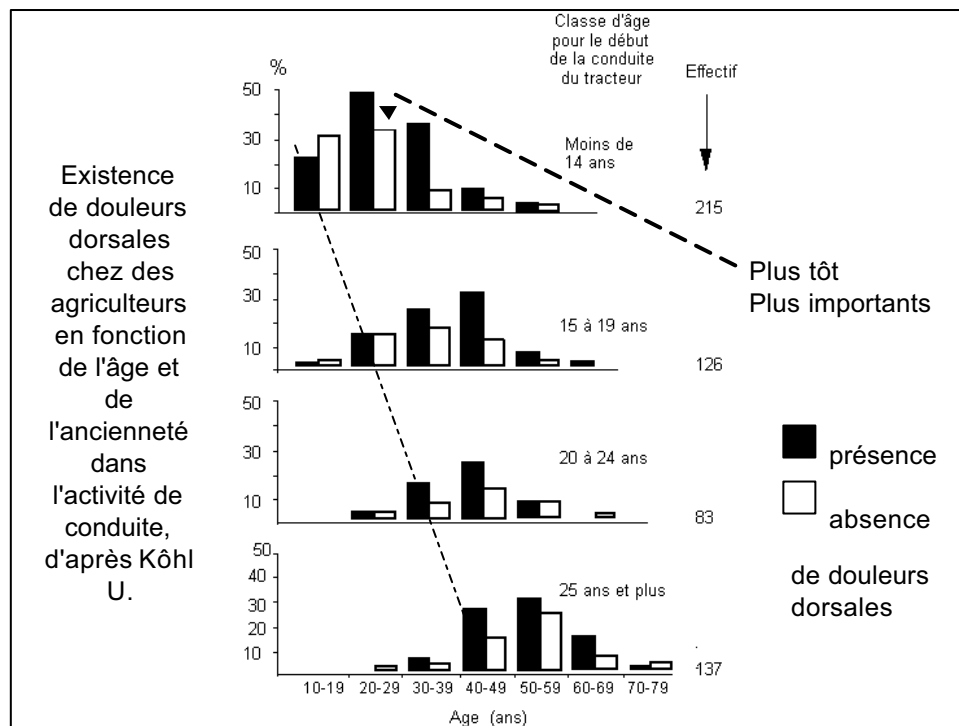
Troubles vertébraux

Hernie discale (tab 97 mal. Prof.)

Lombalgie

Cervicalgie

Aggravation des lésions pré-existantes



Troubles musculaires

Activité tonique musculaire

Douleur des muscles para-vertébraux

Troubles de la perception et de la motricité

Troubles de la réception et ou de la transduction sensorielle des stimuli physiques, de l'organisation des messages sensoriels

Masque ou interaction avec les messages sensori-moteurs dans le système nerveux

Test d'écriture

Les muscles ballottent beaucoup à 8 Hertz.

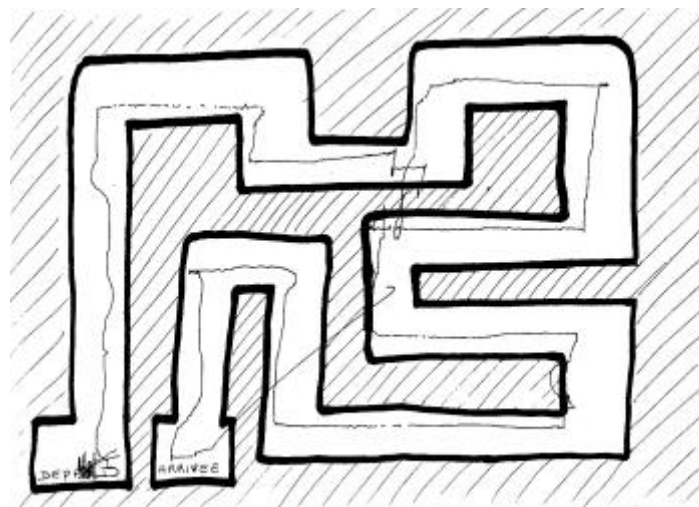
2 Hz Les muscles ballottent beaucoup à 8 Hertz.

4 Les muscles ballottent beaucoup à 8 Hertz.

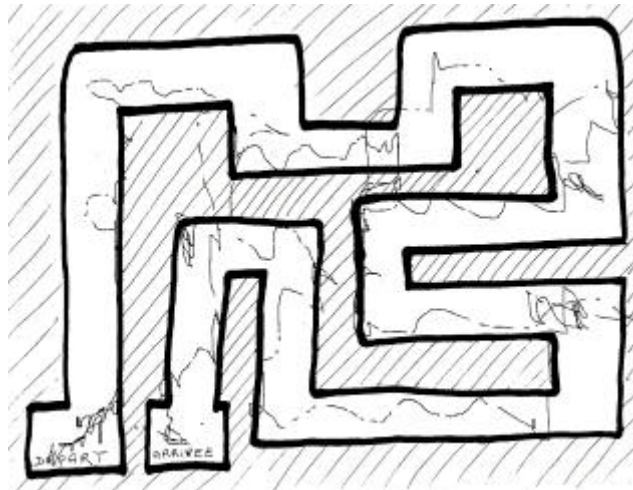
6 Les muscles ballottent beaucoup à 8 Hertz.

8 Les muscles ballottent beaucoup à 8 Hertz.

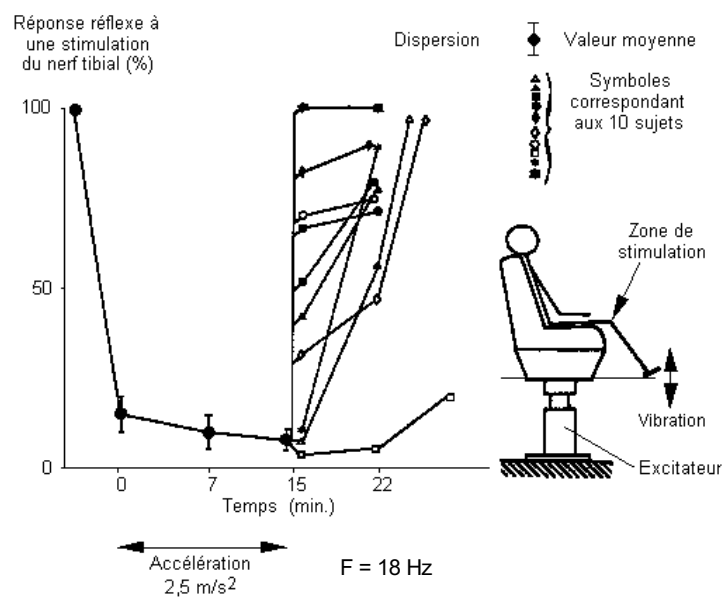
Test de précision : 2 Hz



Test de précision : 4 Hz



Influence des vibrations sur l'efficacité d'un réflexe moteur d'après Roll J-P. et coll. (1980)



Augmentation des erreurs pendant l'application de vibrations :

- Activités sensori-motrices (poursuite, positionnement, force) altérées par la perturbation de leur contrôle et la survenue de mouvements involontaires
- Peu ou pas d'effet sur le temps de réaction (s'il y a réaction)
- Surtout si la tête ou les membres impliqués vibrent
- Surtout si la tâche est fine
- Surtout si la fréquence est basse (< 20 Hz)

Troubles visuels :

- 1 à 10 Hz : difficulté croissante pour l'oeil à suivre les mouvements, possibilité de vision double.
 - < 5 Hz : difficulté du système vestibulo-oculaire à compenser les mouvements de la tête
 - > 5 Hz : transmission des vibrations à la tête
- 10 à 20 Hz : conflits entre la fréquence de vibration et la fréquence de fusion des images par le cortex visuel.
- Au-delà de 20 Hz : résonance du globe oculaire, altération des mouvements compensatoires de l'oeil en fonction des mouvements du corps.
- Variabilité interindividuelle très importante

Autres ...

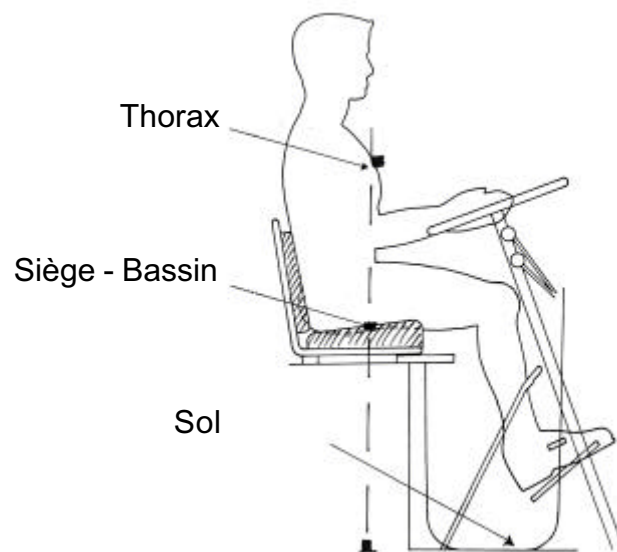
- **Respiration** • entre 2 et 15 Hz, gêne respiratoire (surtout vers 5-6 Hz) , hyper ventilation (surtout vers 6 Hz, avec résonance intrathoracique), élévation de la consommation d 'oxygène,
- **Parole** • fortement altérée en dessous de 20 Hz, surtout entre 4 et 10 Hz (max. si $a > 3 \text{ m/s}^2$), par modification du fonctionnement musculaire laryngé et du flux d 'air expulsé des poumons, ainsi que par des mouvements incontrôlés de la mâchoire inférieure,
- **Cœur et vaisseaux** • variabilité et légère augmentation de la fréquence cardiaque et de la pression artérielle,
- **Vigilance** • activation puis perturbation avec la durée, et augmentation de la charge mentale,
- **Activité mentale** • conclusions contradictoires, mais difficulté de mise en geste

Conséquences

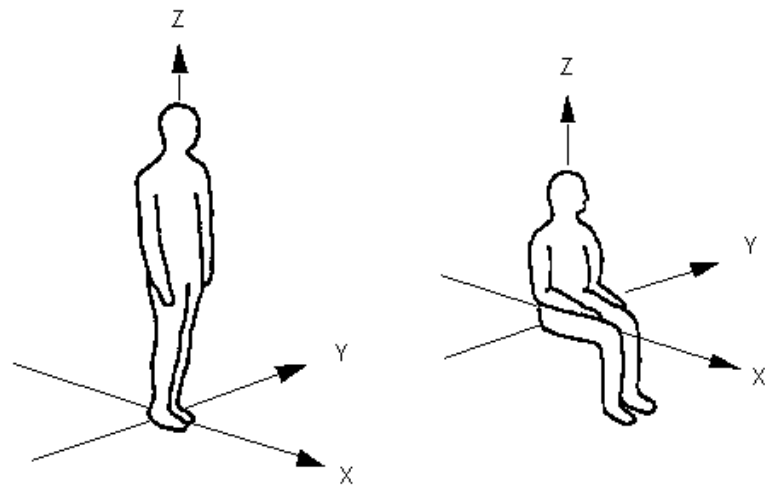
- Baisse des performances visuelles
- Imprécision des mouvements
- Fatigue
- Baisse générale de la performance

La mesure

Position des accéléromètres dans une étude de transmission des vibrations



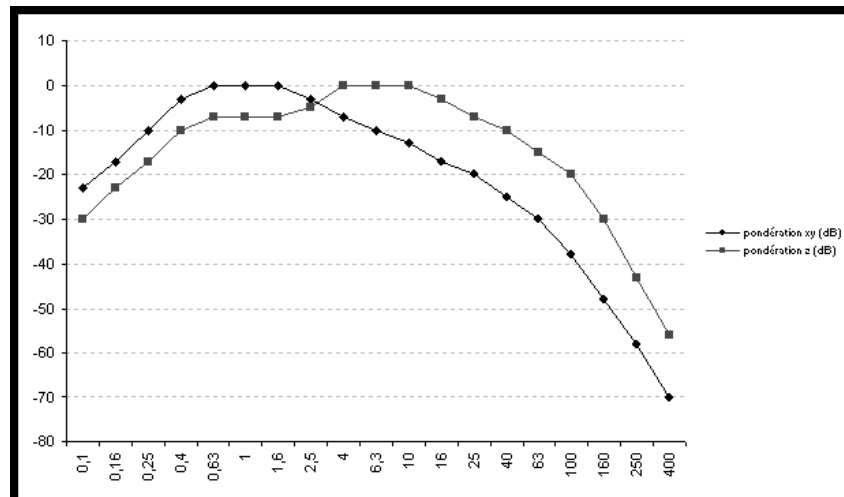
Mesure tri-axiale des vibrations



Étapes dans la mesure

- Mesure de l'accélération (3 axes)
- Pondération

Pondération de l'accélération d'après ISO 2631-1



Calcul de l'accélération pondérée

1. Axe dominant :

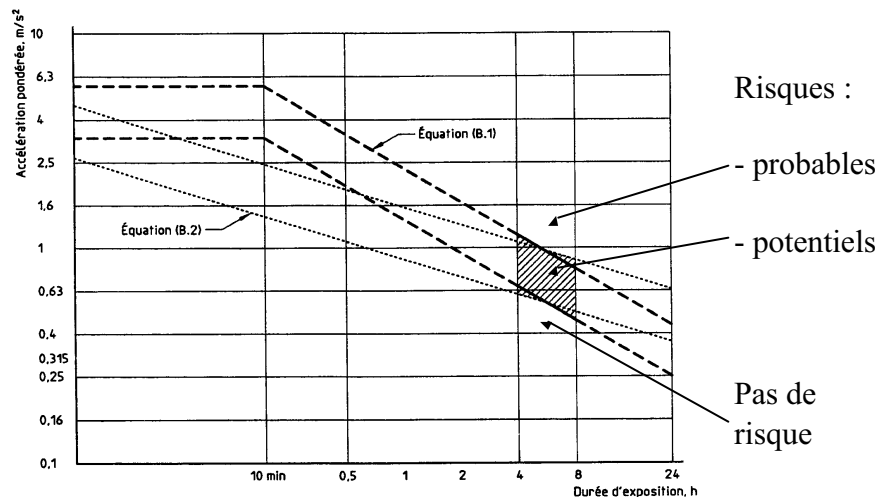
(accélération pondérée sur chacun des 2 autres axes, multipliée par 1,4 dans le cas de X et Y, est inférieure à 66% de sa valeur).

⇒ l'accélération selon cet axe est la seule à utiliser

2. Pas d'axe dominant, l'accélération pondérée est :

$$A_w = \sqrt{[(1.4a_{wx})^2 + (1.4a_{wy})^2 + a_{wz}^2]}$$

Évaluation du risque, d'après ISO 2631-1



Évaluation du risque (d'après ISO 2631-1)

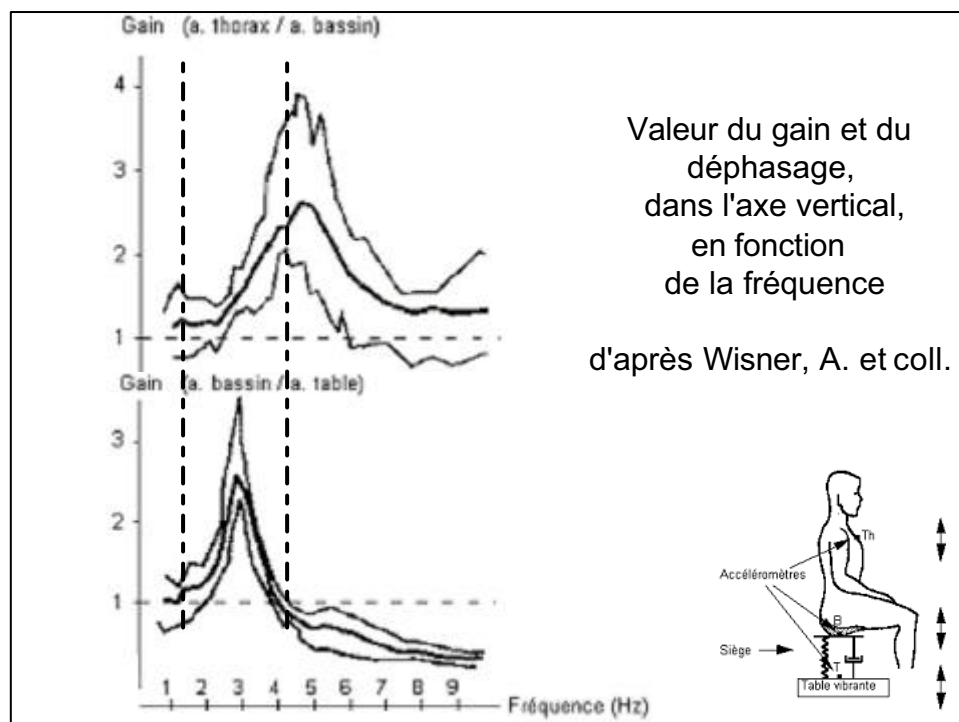
- somme des expositions de durée t durant la journée de travail:

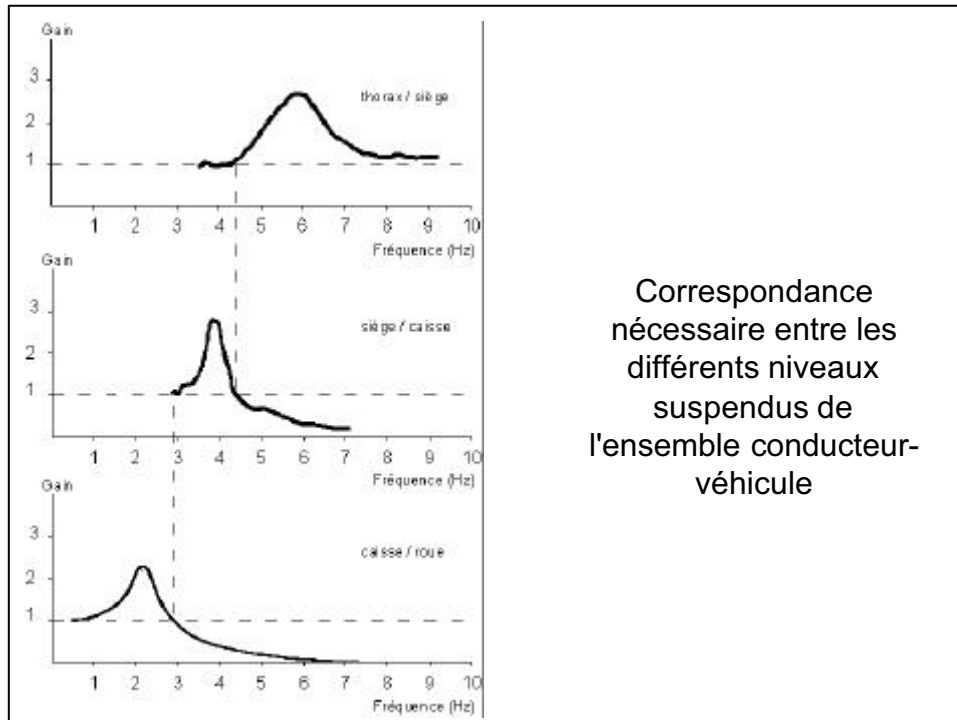
$$a_{eq T} = \sqrt{\frac{\sum (a_i^2) t_i + (a_2^2) t_2 + \dots}{\sum t_1 + t_2 + \dots}}$$

2 ou 4

- comparaison (accélération, durée) à l'abaque de détermination de la durée quotidienne d'exposition

Protection contre les vibrations

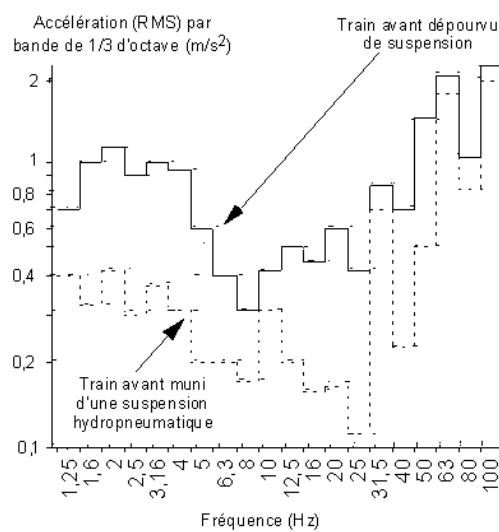
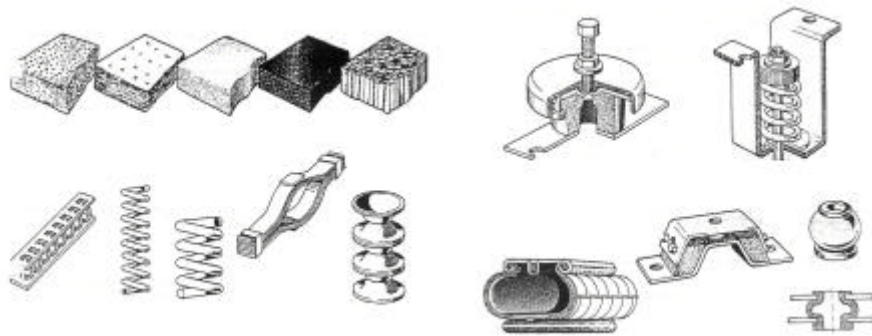




Le siège (d 'après NF U 03 - 040 et E 58 - 074) et réglementation européenne

- Action à partir de $0,5 \text{ m/s}^2$
- Accélération inférieure à $1,15 \text{ m/s}^2$ en vertical,
- $\text{Gain} \leq 2$

Isolateurs anti-vibratiles

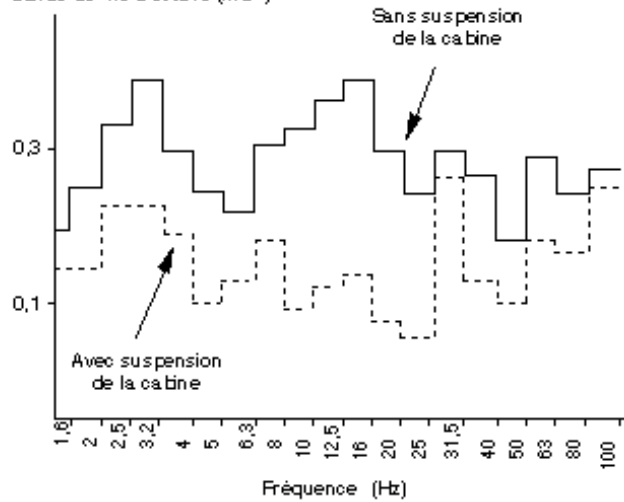


Influence de la suspension sur la transmission des vibrations au poste de conduite, d'après INRS

Les vibrations industrielles. ED 656. (1984)



Accélération (v. efficace) par
bande de 1/3 d'octave (m/s^2)



Influence de
la suspension
de la cabine
sur la
transmission
des vibrations

d'après INRS.
Les vibrations
industrielles.
ED 656.
(1984)

Exemple : tracteur agricole

d'après : Les vibrations industrielles. ED 656. (1984) INRS

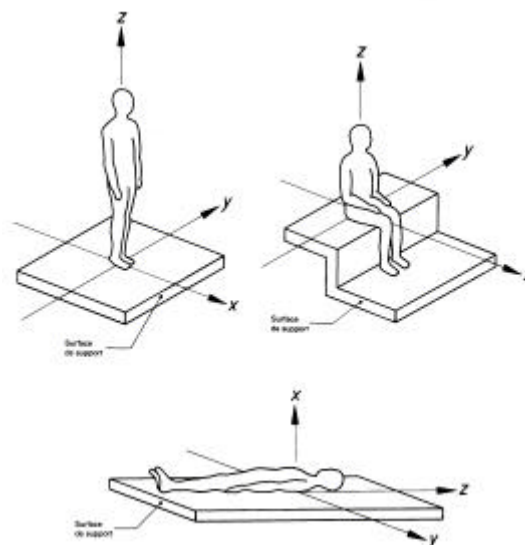


Accélération (m/s^2)	Cabine	Champ labouré (6km/h)	Prairie (18 km/h)
• verticale	• conventionnelle	1,25	1,75
	• suspendue	0,45	0,45
• tangage	• conventionnelle	1,75	1,70
	• suspendue	0,80	0,70

Vibrations dans les bâtiments (1 à 80 Hz)

Limites de confort

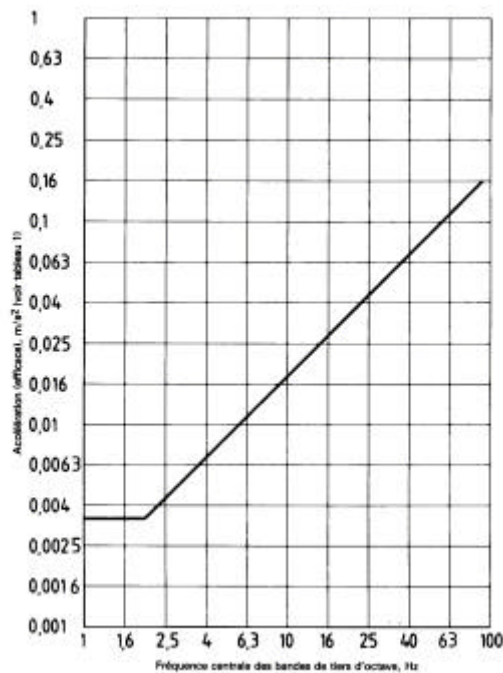
Axes de coordonnées basicentriques pour les vibrations
mécaniques influençant le corps humain
d'après ISO 2631-2



Calcul de l'accélération efficace (ou RMS) :

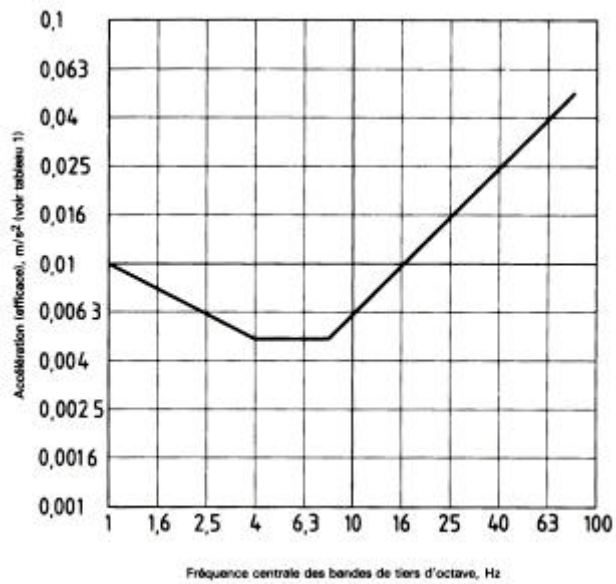
Pour un axe donné, valeur de l'accélération
pondérée en fonction de la fréquence
(filtrage) :

$$a_w = [a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 + \dots / d_1 + d_2 + d_3]^{1/2}$$



Vibrations dans les
bâtiments :
limite de confort

accélération selon
les axes X et Y



Vibrations dans les
bâtiments :
limite de confort
accélération selon
l'axe Z