

Laboratoire de Médecine du Travail et d'Ergonomie
 Faculté de Médecine de Monastir
Mastère en ergonomie
Monastir 15-12-10
COURS D'ACOUSTIQUE

Prof. J. Malchaire

1. **Fréquence** f cycles / seconde Hz
- oreille infrasons 2020.000 Hz ultrasons
 - voix 200 ... 4.000 Hz

2. **Vitesse de propagation :** C m/s
- air 340 m/s eau:450 m/s acier: 6 km/h

3. **Longueur d'onde**

$$\lambda = \frac{C}{f}$$

λ	longueur
100 Hz	340 cm
1000 Hz	34 cm
10.000 Hz	3,4 cm

4. **Amplitude**

- pression de crête Pascal 20 μ Pa (perception) 200 Pa (douleur)
 pression atmosphérique 760 mm Hg, 1013 mbar, 100 kPa
- Watts / m² 10⁻¹² W/m² 100 W/m² (douleur)

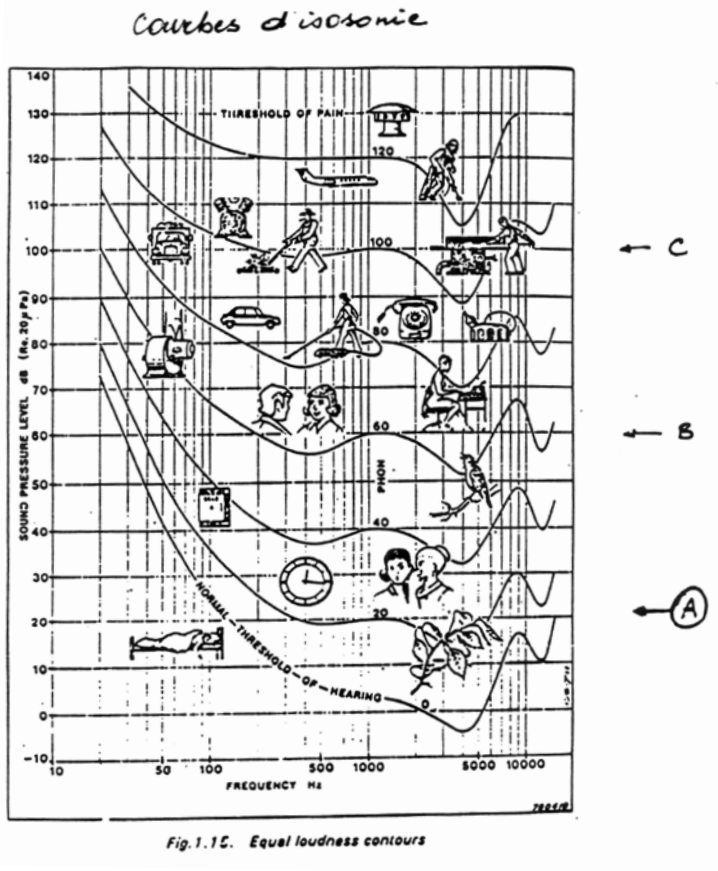
5. **Décibels**

à 1000 Hz	seuil de perception	20 μ Pa	10 ⁻¹² W/m ²
	seuil de douleur	200 Pa	100 W/m ²
	rapport	10 ⁷	10 ¹⁴

sensation d'intensité: logarithmique

$$N = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2 = \text{seuil de perception}$$

"Niveau" sonore ÷ référence



6. Addition de niveaux sonores

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20	100	1000
10log N	0	3	4,8	6	7	7,8	8,5	9	9,5	10	13	20	30
Incrément	0	3	1.8	1.2	1	0.8	0.66	0.58	0.51	0.45			

Accroissement < 0.5 dB si la différence arithmétique entre les 2 niveaux > 10 dB

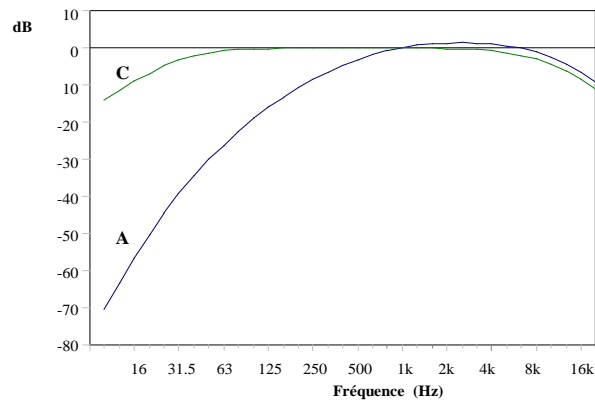
Niveau faible négligeable (à 0.5 dB de différence) si différence > 10 dB

Vrai point de vue:

- mesure si bruits indépendants
- auditif si ~ mêmes fréquences (masquage)

→ signaux d'alerte

- bruit ambiant aigu signal grave
- grave aigu modulé



7. dB(A)

- dB: niveau existant quelle que soit la fréquence avec infra et ultrasons
- dB(A): niveau sonore tel qu'entendu (essentiellement à bas niveaux); sert à évaluer la gêne, la surdité, ...
- (dB(C) mesure du bruit audible)

8. Analyses spectrales

- dB(A) niveau global pondéré en fréquences
- Si recherche causale, signaux d'alarme, absorption, isolement : **analyse en fréquences**

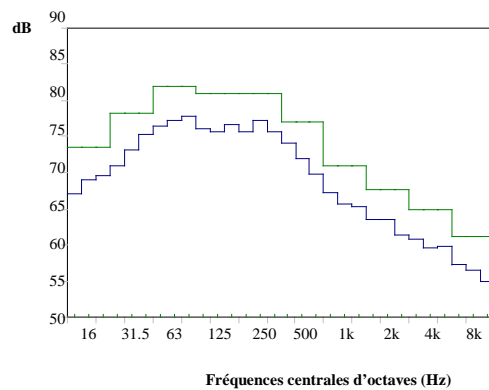
Analyse par octaves et tiers d'octave

Octave f_c : 31.5 63 125 250 500 1k 2k 4k 8k

Largeur: 70% de la fréquence centrale

$N_{1000\text{Hz}}$ = niveau total d'intensité aux fréquences comprises entre 707 et 1414 Hz

Spectres par bandes d'octaves (A) et de tiers d'octaves (B) du bruit de compresseur



Échelle discrète de n° d'octaves ou de 1/3 d'octave

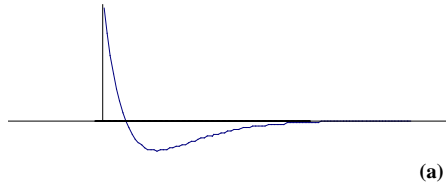
Pas d'interpolation

9. Champ Auditif : Seuils

Hz	125	250	500	1	2	3	4	6	8
seuils	45	25 ⁵	11 ⁵	7	9	10	9 ⁵	15 ⁵	13 ⁵

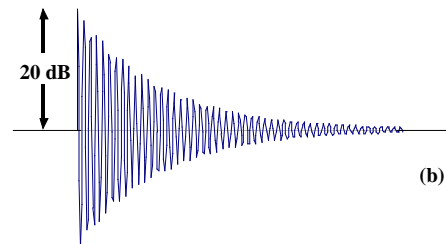
Zone conversationnelle: 250 - 4000 Hz, 55 dB(A) relaxée ... 90 dB(A) criée

10. Bruits d'impact



Bruits Impulsifs

coup de feu à l'extérieur



Bruits d'impact

coup de marteau +...
résonnance

Paramètres jouant un rôle: temps de montée, niveau sonore de crête, durée, fréquence de répétition

Limites:

- 10 impacts à 150 dB (pas dB(A) !!!)
- 100 impacts à 140 dB
- 1000 impacts à 130 dB

11. Niveau équivalent, Niveau d'exposition personnelle

- $N_{A,eq}$: niveau équivalent: niveau continu qui, sur la même durée donne la même énergie acoustique totale
- NEP : niveau d'exposition personnelle: niveau continu qui pendant 8 heures, 40 heures par semaine donne la même énergie acoustique totale que l'exposition réelle

Exemple:

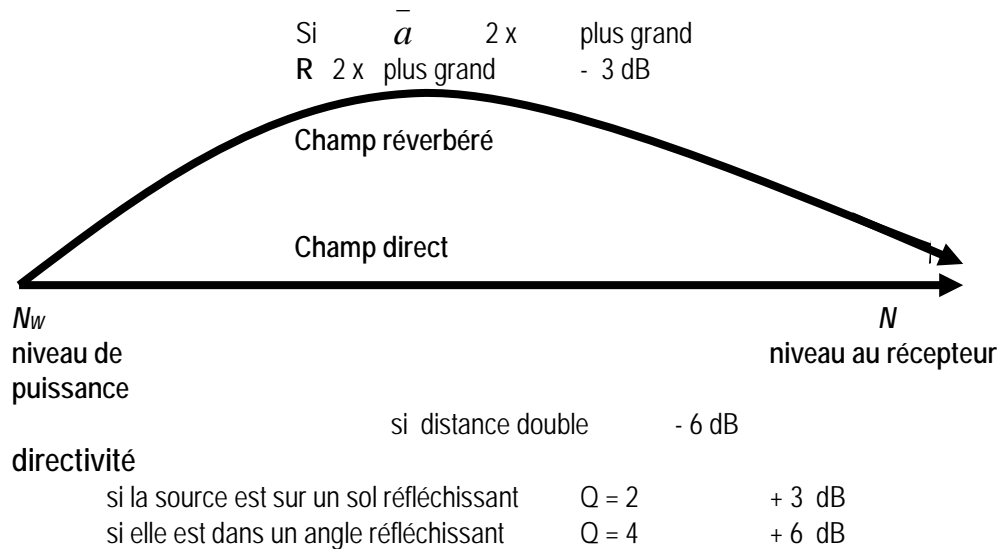
Ouvrier travaille 3 jours par semaine pendant 10h dont 9 effectives. Il travaille à 3 endroits:

- | | | | |
|-----------|---|-------------------|-------------|
| • endroit | 1 | NA,eq1 = 93 dB(A) | pendant 4 h |
| | 2 | NA,eq2 = 96 dB(A) | pendant 3 h |
| | 3 | NA,eq3 = 70 dB(A) | pendant 2 h |
| | | Total | 9 h |

- 93 dB(A) pendant 4 h = 93 dB(A) pendant 4 h
 - 96 dB(A) pendant 3 h = 93 dB(A) pendant 6 h
 - 70 dB(A) pendant 1 h négligeable
- TOTAL sur une journée = 93 dB(A) pendant 10 h
 = 10 sources de 93 dB(A) pendant 1h
 = 10/9 sources de 93 pendant 9h
 = +10 - 9.5 dB(A) de 93 = 93.5 dB(A)

$N_{EP} = 27/40$ de l'énergie totale → $3 \cdot 3 \cdot 3/4/10$ dB(A)
 → +14 - 6 - 10 de 93.5 dB(A)
 → 91.5 dB(A) environ

12. Propagation du bruit: propagation sphérique

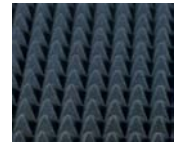


13. Matériaux acoustiques

Il est important de bien faire la distinction entre les 3 types de matériaux acoustiques.

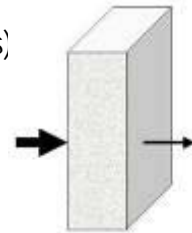
- **Matériaux absorbants:** laines minérales, mousses, bois expansé, matériaux poreux.

- ◇ Ils servent à réduire la réverbération du bruit à l'intérieur du local
- ◇ Le matériau doit être poreux pour absorber le bruit:
 - le béton n'absorbe rien (coefficient d'absorption = 0)
 - les matériaux poreux absorbent plus les bruits aigus (hautes fréquences)



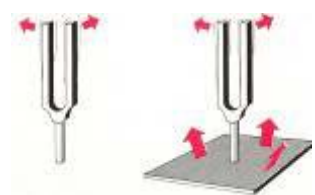
- **Matériaux isolants:** béton, briques, plâtre, matériaux lourds

- ◇ Ils empêchent le bruit de passer d'un local à l'autre
- ◇ Le matériau doit être lourd pour ne pas vibrer:
 - le mousse est très léger et n'isole pas du tout
 - les matériaux lourds bloquent mieux les bruits aigus (on entend les basses fréquences de la musique du voisin).



- **Matériaux résilients:** feutre, liège, caoutchouc, ressorts, ...

- ◇ Ils empêchent les vibrations mécaniques: la main sur la cloche ou sur la tôle qui vibre, arrête les vibrations et le bruit émis
- ◇ Le matériau doit être caoutchouteux et ne pas être écrasé
- ◇ Le béton n'arrête rien et un choc sur un mur est entendu partout
- ◇ Un mousse est écrasé et n'arrête rien
- ◇ Les matériaux caoutchouteux (les silent blocs) bloquent de nouveau mieux les vibrations rapides que lentes.



Très fréquemment les 3 matériaux doivent être utilisés ensemble

- Un silent bloc en-dessous de la machine pour que les vibrations ne se transmettent pas au sol et au bâtiment
- Un capot en matériau lourd pour arrêter le bruit au niveau de la machine
- Un matériau absorbant à l'intérieur du capot pour absorber et éliminer le bruit qui s'y accumule.

14. Appareils de mesure

- Réponse en fréquence : bande passante de 20 à 2000 Hz
- Gamme dynamique : 60-100 dB

15. Microphones

- Piézo-électriques, à condensateur, dynamiques
- Diamètre = 1", 1/2", 1/4"
- Gamme dynamique : 10 dB de 10 à 110 (1 pouce) ou 40 à 140 dB (1/2 pouce)
- Réponse en fréquence : omnidirectionnel jusqu'à 4000Hz, directionnel > 4000Hz

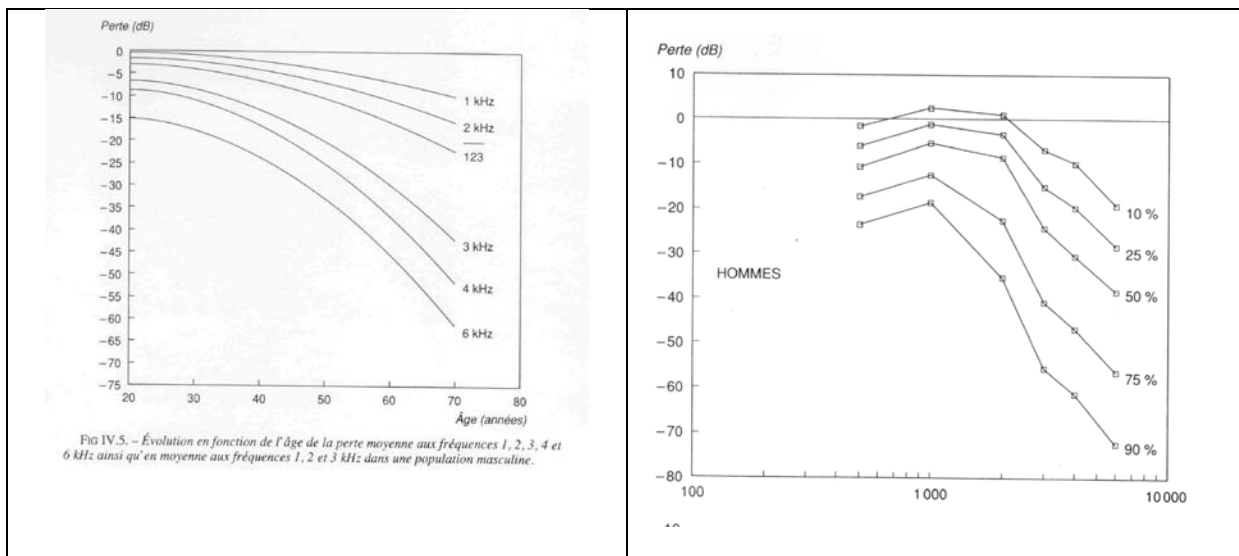
16. Sonomètre

- Type 0 impact, vibrations, analyse spectrale, N_{eq} ...
- 1
- 2 dB(A)
- (3)
 1. Amortissement : slow Fast peak
exponentiel 2 s 0.2 s 0.0001 s
 2. Filtre lin 20 - 20 kHz
A Bruit tel qu'entendu
C Bruit audible
 3. Etalonnage: 94 dB(A) à 1000 Hz
 4. Effet du vent (poussières)

17. Sonomètre Intégrateur (Dosimètre)

- Où? près de l'oreille du travailleur
- Durée? représentative!!!! étude des conditions de travail antérieure
 - Intervalle de stationnarité IS: période (Heures, jours) sur laquelle le travailleur rencontre toutes les circonstances de bruit
- QUI? Groupe Homogène d'Exposition GHE: groupe de travailleurs qui, sur le même IS, connaissent la même exposition au bruit
- Echantillonnage dans le GHE et sur le IS
- PAS de carte de bruit, mais carte des postes

18. Presbyacousie



19. Handicap social et invalidité

- Belgique déficit moyen : $P_{123} = (P_1 + P_2 + P_3) / 3$
- France AVANT : $P_{5124} = (2P_{500} + 4P_1 + 3P_2 + P_4) / 10$
- France > 2003 : $P_{5124} = (P_{500} + P_1 + P_2 + P_4) / 4$
- Seuil de handicap : $P_{123} = 35$ P_{5124} ancien = 27 dB
 P_{5124} nouveau = 28.5 dB
- Seuil d'invalidité : 50 35
 37 dB

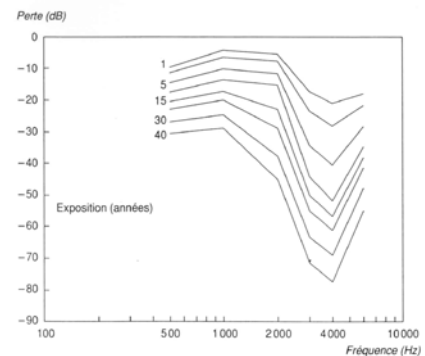


FIG IV.8. – Évolution typique des pertes auditives en fonction de la durée d'exposition à un bruit intense.

20. Évolution de la surdité en fonction du temps

Distributions des pertes 123 à l'âge de 60 ans après 40 ans à 90, 94, 98 dB(A)

Sens.	Presb.	90 dB(A)	94 dB(A)	98 dB(A)
95	51	62	72	86
90	43	53	62	75
80	33	41	50	61
70	27	35	42	52
60	21	28	34	43
50	15	21	27	35
40	13	18	23	30
30	10	14	19	25
20	7	11	14	19
10	2	4	7	10
5	-1	0	2	3

La figure donne le pourcentage de la population qui, dans telles conditions d'âge et d'exposition au bruit, risque d'atteindre le seuil de handicap social (35 dB) et le seuil d'invalidité (50 dB).

N_{EP} (dB(A))	80	82	84	85	86	88	90	92	94	95	96	98	100
Risque handicap (%)	19	20	20	21	22	23	26	29	34	37	40	47	55
Risque invalidité (%)	6	6	6	7	7	8	9	12	15	16	18	24	30

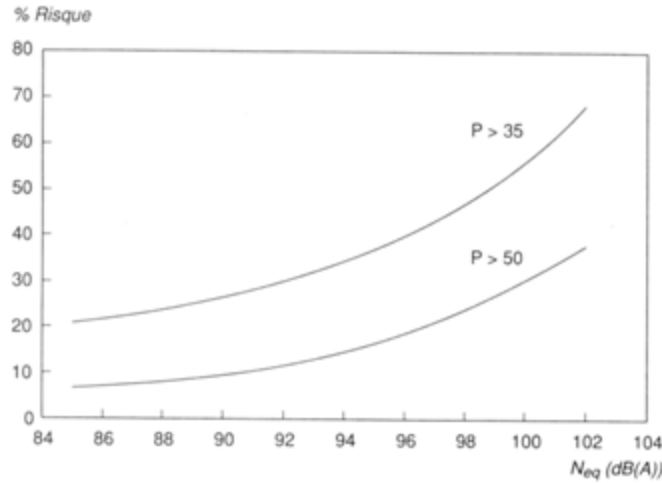
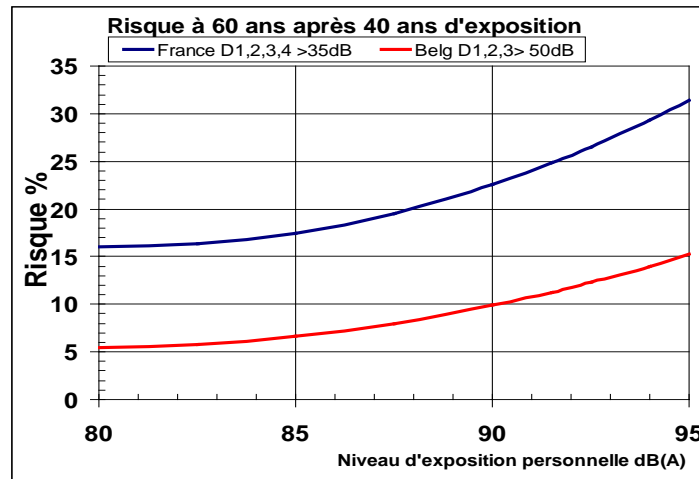


FIG IV.12. – Risque de surdité professionnelle en fonction du niveau équivalent (pourcentage de la population âgée de 60 ans avec 40 ans d'exposition au bruit, présentant plus de 35 dB ou 50 dB de déficit auditif moyen à 1, 2 et 3 kHz).

21. Comparaison des critères français et belge de réparation d'un déficit professionnel



22. Intérêt de réduction partielle du bruit

Soit $N_{A,eq} = 98$ dB(A)

légalement il faudrait diminuer à 85 dB(A), soit de 13 dB(A)

Quel est l'intérêt d'une diminution partielle à 94 dB(A)?

dB(A)	risque %	diminution absolue	diminution relative
98	24		
94 - 4 dB(A)	14	-10	- 40%
85 - 13 dB(A)	7	-17	-70%

diminution de - 4 dB(A) : pas chère, immédiate, efficace point de vue prévention

23. Sensibilité au bruit

% de la population de même âge, durée d'exposition et N_{EP} , présentant des pertes inférieures

24. Fatigue auditive Temporary Threshold Shift (TTS)

N_{EP} dB (A)	85	90	95	100	105
TTS 50%	1	4	8	12	18
TTS 90%	3	8	14	21	30

→ programmation journalière des examens audiométriques

- si $N_{EP} \leq 90$ dB(A) : 30' repos
- ≤ 100 dB(A) : 16 h repos
- ≥ 100 dB(A) : 2 jours repos

25. Directive Européenne (2006)

1. mesures: adéquates par méthodes appropriées
2. contrôle: réduction du bruit au niveau le plus bas **raisonnablement praticable**
3. si ≥ 80 dB(A) , 135 dB pic
information et formation des salariés, signalisation des zones à risque
moyens de protection disponibles, droit à la surveillance auditive
4. si ≥ 85 dB(A) , 137 dB pic
Justification, programme d'action, délimitation
réduction d'accès, obligation de protections individuelles

26. Surveillance de la fonction auditive

Directive Européenne: objectifs

- diagnostic de toute diminution de l'ouïe due au bruit
- conservation de la fonction auditive

→ Programme de lutte contre le bruit

+ Programme de Conservation de l'audition PCA

Au lieu de: Programme Dépistage des Surdités PDS

PCA

PDS

Objectif

Suivre l'évolution de chaque salarié
Dépister ceux risquant d'aboutir à un handicap ou invalidité

Déterminer ceux présentant pertes
 \geq limite indemnisable

Qui ?

Sujets: **non** atteints, mais susceptibles de l'être : **jeunes exposés depuis peu**

Sujets atteints
plus âgés exposés depuis longtemps

Mesures

N_{EP} individuel

sonométries simples: soumis - non soumis

Pas analyses spectrales

27. Programme Audiométrique

PCA	PDS
Évolution des pertes faibles	Dépassement d'un seuil élevé

a Audiomètres

- Tonal: option: par voie osseuse, audiométrie vocale, masking (à réserver aux examens ORL approfondis)
- Type : manuel: opérateur, examen adaptée, 4 - 8 minutes
- Gamme de fréquences
 - PDS: minimum 500, 1 k, 2 k, 3 k, 4 kHz
 - PCA: 250, 500, 1 k, 2 k, 3 k, 4 k, 6 k, 8 kHz
- Écouteurs : partie intégrante, non interchangeables, non permutables,
- Formation de l'opérateur

b Étalonnage de l'audiomètre (ISO 6189)

- Contrôle d'écoute tous les jours
- Contrôle subjectif d'étalonnage toutes les semaines (jours)
- Test électro acoustique tous les 3 mois par spécialistes
- Étalonnage complet tous les 2 ans par spécialistes
- Entretien des écouteurs : attention rangement, câbles, connecteurs, coussins, désinfection

c Conditions acoustiques des tests

Un bruit de fond trop élevé fausse l'évaluation des **faibles** pertes

d Préparation du test : Anamnèse et examen otologique: bouchons d'oreilles

e Installation du sujet

- siège confortable, immobile, silencieux
- surface neutre frontale, pas de vue de l'opérateur
- bouton poussoir pour réponse OUI - NON dès qu'il **PERÇOIT** le son (non pas "entend")
- démonstration sans les écouteurs par l'opérateur avec mots familiers
- placement des écouteurs par l'opérateur (ôter: lunettes, boucles d'oreille, cheveux, ...)

f test proprement dit : Méthode ascendante

- ordre des fréquences: 1k, 2k, 3k, 4k, 6k, 8k, 1k, 500, 250 - 250, 500, 1, 2, 3, 4, 6, 8
- changement de rythme, durées, interruptions ...
- durée optimale : 4 - 8 minutes : si trop long : fatigue, lassitude

g Sources d'erreurs

1. mauvais étalonnage de l'audiomètre
2. bruit ambiant trop élevé (faibles pertes)
3. mauvaise position des écouteurs
4. degré de familiarité du sujet
5. différence "percevoir" - "entendre"
6. méthode ascendante et descendante
7. nervosité, fatigue
8. manque de collaboration

h Programmation journalière

- si $N_{A,eq} < 90$ dB(A) 30 minutes de récupération
 90 - 100 16 heures
 > 100 2 jours

Port de moyens de protection circonstanciés (coquilles) le jour (et la veille) du test.

i Caractéristiques des Programmes de Conservation de l'Audition (PCA) et de Dépistage des Surdités (PDS)

Critère	PCA	PDS
Objectif	- suivre l'évolution de chaque salarié - dépister ceux risquant d'aboutir à un handicap ou une invalidité	- déterminer les salariés présentant des pertes supérieures au seuil d'invalidité
Quels Salariés	- sujets non atteints susceptibles de l'être - jeunes, exposés depuis peu	- sujets atteints - âgés, exposés depuis longtemps
Mesurages	- programme sonométrique complet - $N_{EX,d}$ pour chaque salarié	- simple classification - < 85, 85-90, > 90 dB(A)
Programme audiométrique		
But	évolution des faibles pertes	dépassement d'un seuil élevé
Fréquences	250, 500 Hz, 1, 2, 3, 4, 6, 8 kHz	1, 2, 3 kHz ou 0.5, 1, 2, 4 kHz
Procédure	rigoureuse	rigoureuse
Bruit de fond	faible: cabine souvent nécessaire	moins important
Programmation journalière	éviter les pertes temporaires	moins important
Interprétation	- sensibilité individuelle - prédiction du risque individuel	dépassement du seuil d'invalidité

j Programmation annuelle des examens audiométriques

Ancienneté	Classe $N_{EX,d}$		
	≤ 94 dB(A)	94 - 99 dB(A)	≥ 100 dB(A)
< 5 ans	2 ans	1 an	6 mois
5 - 20 ans	3 ans	2 ans	1 an
> 20 ans	4 ans	3 ans	2 ans

28. Les équipements de protection auditive

a Conditions de base :

- support inconditionnel de la direction, de la ligne hiérarchique et des syndicats
- programme continu d'information et de formation
- choix de moyens de protection "**APPROPRIÉS**" en concertation avec les travailleurs
- explication de la manière de les placer, entretenir, stocker

b Affaiblissement acoustique maximal

Fréquences (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Affaiblissement	45	50	55	50	40	50	50

- vibrations à basses fréquences, fentes, fuites, conduction osseuse

c Essais normalisés

10 sujets dont on mesure les seuils auditifs par voie aérienne avec et sans MPI

d Bouchons intraauriculaires

1. prémoulés : taille ? forme ?
2. moulés : silicone, cire mousse semi-poreuse, hygiène ?
3. prémoulé sur mesure

• **Atténuation théorique**

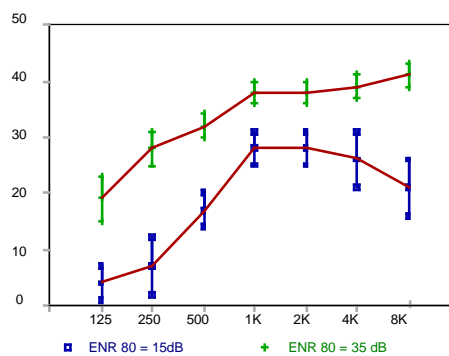
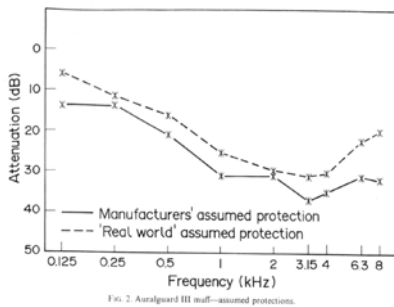
Description		Fréquences (Hz)						
		125	250	500	1000	2000	4000	8000
Laine minérale préformée	m	15	18	20	25	30	35	30
	s	5	6	4.5	4	4	4	4.5
Mousse semi-poreuse moulable	m	23	25	27	30	35	41	38
	s	6	5	6	6	4	4	6
bouchon sur mesure	m	20	20	25	29	33	36	32
	s	3	3	4	3	2	2	6

- **Aucune relation entre efficacité théorique et réelle !**
 - placement défectueux et déplacement avec mouvements des mâchoires
- **Correction**
selon différents auteurs, adopter (m-2s) ou (m-3s) ou 50% ou 30%
ou - 15 dB selon d'autres
- **Critères de choix**
 - pas de parties métalliques : (blessure, induction électromagnétique)
 - placé par le porteur selon technique appropriée
 - lavé
 - serre tête : bruit osseux, insertion insuffisante

e Coquilles

- **Critères d'efficacité :** épaisseur, poids, grandeur, pression autour de l'oreille, herméticité du coussin (plastique ou visqueux), serre tête ajustable

- **Atténuation théorique et réelle**



- **Corrections proposées**
 - 5 dB pour coquilles ordinaires
 - 15 dB si montée sur le casque

f Autres moyens de protection

1. **Combinaison bouchon-coquille**: limité par conduction osseuse
2. **MPI avec émetteurs de musique**
intéressant si le niveau de musique est limité à 82 dB(A)
! distraction, sécurité
3. **MPI avec communication**
intéressant avec même limitation
doivent passer les signaux de sécurité
4. **MPI actifs**
futur, cher, efficace surtout hautes fréquences

g Critères de choix

- Compromis inconfort dû au bruit
 inconfort dû au MPI
- Recherche du MPI **non pas** le plus efficace
 mais **le plus longtemps PORTÉ**

Réduction du niveau quotidien d'exposition sonore résultant du port d'un MPI pendant la fraction "p" du temps.

p	10 %	25 %	50 %	75 %	90 %	99 %
réduction	- 0.5	- 1.2	-3	- 6	- 10	-20

h Critères de choix avec les salariés

1. innocuité
 2. caractéristiques du travailleur (morphologie, anomalies)
 3. compatibilité avec autres MPIs (casques, masques, ...)
 4. facilité d'emploi: facile à placer, non encombrant
 - serre-tête autour du cou
 - coussin poreux
 5. caractéristique du bruit
 - continu : bouchons
 - variable : coquilles
 - intermittent : coquilles
 6. environnement
 - si chaud et humide : bouchons
 7. niveaux sonores
 - < 100 dB(A) n'importe quoi qui soit porté
 - > 100 dB(A) coquilles (bruit intermittent)
- Lutter contre la sur protection non portée

➔ **Coquilles légères, esthétiques et confortables**

i Vrais et faux problèmes invoqués

gênant, énervant, irritant	mal adapté
maux de tête	pression trop forte
transpiration dans l'oreille	tampons absorbants
air ridicule	surveiller l'esthétique
"le bruit fait partie du métier"	éducation
"on s'habitue"	habitude = surdité
interférence avec communication	MPI trop performant

A. Critères de confort acoustique

1. Confort intérieur vis-à-vis des sources de bruit internes au local, liées aux activités

La réverbération dans le local doit être contrôlée

La **durée de réverbération** T_{60} (secondes) est la durée nécessaire pour que le niveau sonore du champ réverbéré du local diminue de 60 dB lorsque la source sonore est brusquement arrêtée.

Elle est d'autant plus petite que l'absorption est plus élevée dans le local.

- dans les bureaux: la durée de réverbération T_{60} à 500 Hz doit être de 0,5 à 0,7 seconde
 - si la T_{60} est trop court, le son est peu prolongé et la conversation est comme à l'extérieur
 - si la T_{60} est trop long, la persistance des syllabes précédentes nuit à la compréhension
- dans les usines: la T_{60} doit être le plus court possible. En pratique, $T_{60} = 1$ s est un ordre de grandeur économiquement réaliste.

2. Confort acoustique vis-à-vis des sources de bruit étrangères aux activités

Il s'agit de limiter le bruit de fond (sans les bruits des activités) venant

- **des sources internes non liées** aux activités (ex.: ventilation)
- **des sources externes**: trafic, voisins, ascenseurs, ...

Les valeurs maximales du bruit de fond sont spécifiées en fonction de l'activité qui doit se passer dans le local et en fonction du type d'environnement où se trouve le local.

4 types d'environnements sont définis:

- Résidentiel à plus de 500 m d'une voie de circulation importante
- Résidentiel urbain à moins de 500 m d'une voie de circulation importante
- Quartier commercial ou industries légères
- Centre de ville, industrie lourde, en proximité d'une autoroute ou aéroport

Valeurs limites du niveau équivalent N_{Aeq}

Environnement	I	II	III	IV
Bureau				
• Direction	30	35	40	45
• Cadre	35	40	45	50
• Ordinaire	40	45	50	55
Dactylographie	45	45	50	55
Salle				
• D'ordinateur	55	55	60	65
• De conférence	35	40	45	50
• De réunion	40	45	50	55
Restaurant	45	50	55	60
Laboratoire	55	55	60	60
Magasins	40	45	50	50
Usines, atelier	50 à 75			

3. Isolement acoustique souhaitable entre locaux

La norme décrit la catégorie d'isolement acoustique à assurer entre deux locaux en fonction de leur affectation réciproque

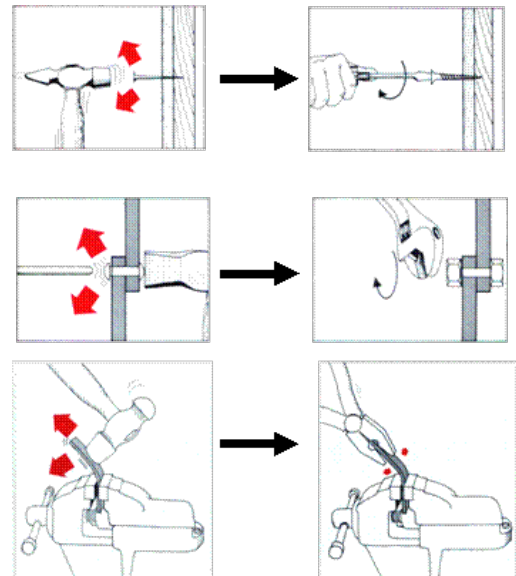
Local voisin	Locaux concernés			
	Locaux peu peuplés		Locaux peuplés	Locaux bruyants
	Direction	Cadre		
Escalier, ascenseur	45-51	45-51	-	-
Immeuble voisin	45-51	45-51	45-51	45-51
Locaux				
• de direction	37-45			
• de cadres	37-45	28-35		
• peuplés	45-51	52-57	28-35	
Salle de mécanographie	52-57	52-57	45-51	28-35

B. Lutte contre le bruit

1. Lutte contre le bruit à la source

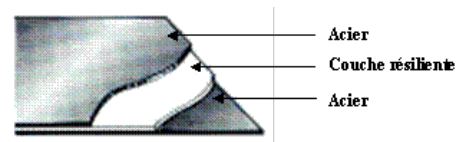
- Réduction des vibrations

- Equilibrer les parties tournantes pour éliminer les balourds
- Remplacer les engrenages droits par des engrenages hélicoïdaux de façon à réduire les chocs entre dents et les vibrations et bruits associés
- Désolidariser la machine par rapport à son environnement:
 - ◇ rigidifier tous les éléments de la machine (capot, ...)
 - ◇ utiliser des raccordements électriques, aérauliques ou hydrauliques souples
 - ◇ placer des "silent blocs" sous la machine pour empêcher la transmission des vibrations au sol.

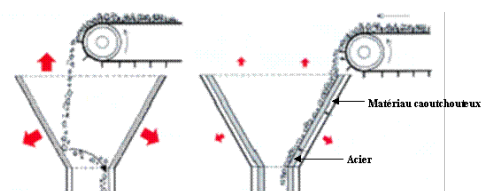


- Elimination ou réduction des chocs et impacts

- Réduire les distances de chute d'objets métal sur métal
- Placer un matériau **résilient** directement sur la surface ou en panneau sandwich pour amortir les chocs lors de chute d'objets.



- Incliner la plaque sur laquelle l'objet tombe de façon à réduire la discontinuité de mouvement de l'objet.
- Ne pas diriger un jet de détente de gaz ou d'air perpendiculaire à une surface
 - Rendre le jet oblique par rapport à la surface.



- **Echappements d'air d'un récipient sous pression**

- Utiliser un plus grand orifice de sortie pour réduire la vitesse
- Placer un silencieux sur cet orifice
- Ne pas diriger le jet d'air vers une paroi ou un objet.



- **Jets d'air**

- Rechercher une autre technique pour effectuer le travail
- Revoir les pressions et les débits
- Utiliser des pistolets spéciaux.



- **Bruit aéraulique**

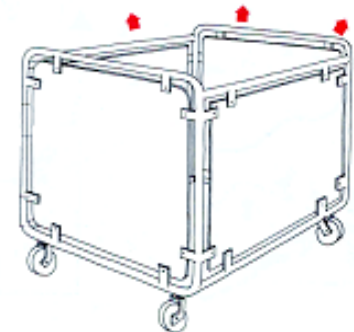
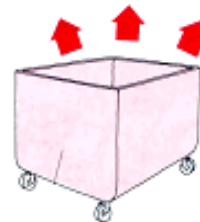
- Equilibrer les parties tournantes (voir point 1)
- Désolidariser la machine de son environnement (voir point 1)
- Placer des matériaux absorbants (silencieux) dans le conduit, sur le pourtour et longitudinalement
- Eliminer toute arête vive et toute discontinuité dans la veine d'air.

- **Surfaces et récipients métalliques**

Les vibrations venant des roues sont transmises aux parois métalliques du chariot, qui émettent un bruit important. C'est le cas de toute surface légère (capot, paroi métallique...) à laquelle une vibration est transmise.

Pour éliminer le bruit,

- supprimer la source de vibration:
 - ✦ pour le matériel roulant, niveler le sol et utiliser des roues de grand diamètre en caoutchouc
- supprimer la transmission des vibrations en désolidarisant les parois légères
- empêcher la paroi de résonner en la recouvrant d'un matériau résilient (caoutchouc, liège...)

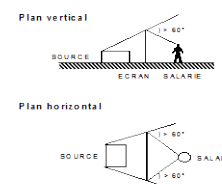
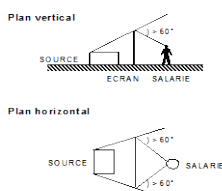


2. Placement d'un écran

En **champ libre**, le placement d'un **écran** entre la source et le salarié entraîne une atténuation complémentaire.

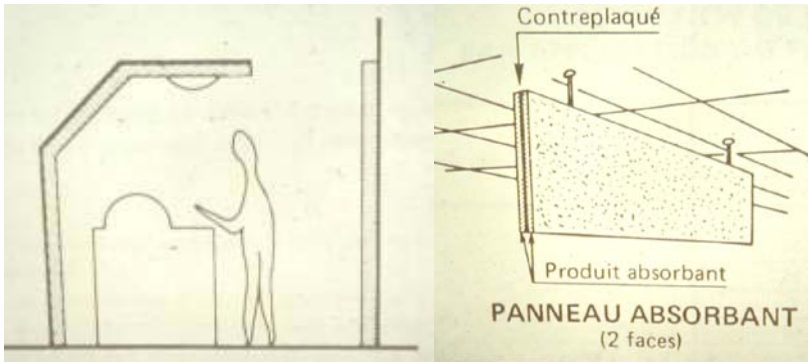
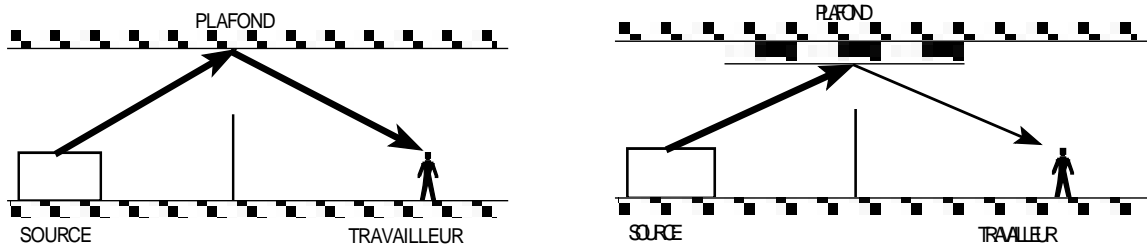
Il faut cependant que

- dans le plan horizontal, la longueur de l'écran
 - et dans le plan vertical, la hauteur de l'écran
- soient telles que les angles indiqués aux figures suivantes soient supérieurs à 60°.



- Dans un **local ordinaire**, cette atténuation peut être ruinée du fait des réflexions sur le plafond ou les murs:

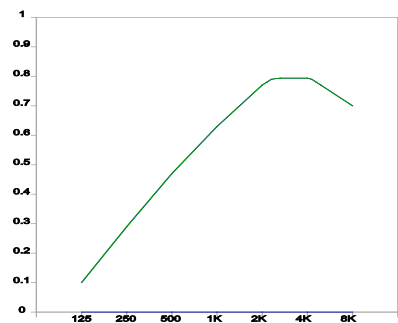
Il faut alors recouvrir la portion de plafond de matériaux très absorbants



3. Matériaux acoustiques absorbants

Coefficient d'absorption fonction de :

- la nature de la surface du matériau, son épaisseur et sa structure.
- l'absorption est en général meilleure à hautes fréquences, il est donc plus facile de réduire les bruits aigus que les bruits graves.
- 3 types: matériaux poreux, membranes et résonateurs
 - **Matériaux absorbants poreux** : laine de verre, de roche, mousses plastiques, bois expansé caractérisés par:
 - ✦ une très haute absorption à hautes fréquences
 - ✦ une absorption nettement plus faible à basses fréquences.



L'absorption à basses fréquences peut être augmentée en utilisant des panneaux poreux semi-rigides, placés à 20 à 40 cm de la paroi arrière.



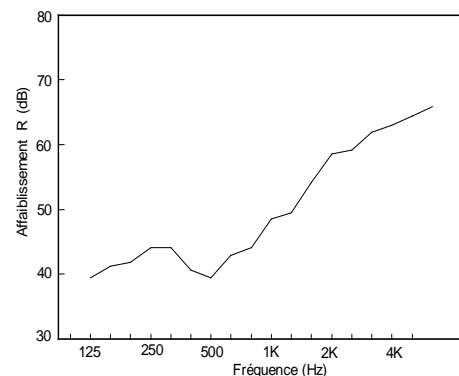
- **Matériaux membranes et résonateurs**: panneaux légers en bois, verre, métal caractérisés par:
 - ✦ une faible absorption à hautes fréquences
 - ✦ une absorption plus élevée à basses fréquences.
- En pratique, on essaie d'utiliser des matériaux membranes recouverts d'un matériau poreux:
 - Panneaux acoustiques autoportant de plafond, caractérisés par une absorption plus ou moins égale à toutes les fréquences.

- Coefficients d'absorption de matériaux classiques

	Basses fréquences 125 Hz	Moyennes fréquences 500 Hz	Hautes fréquences	
			2 kHz	4 kHz
Pierre, béton lisse	0,01	0,02	0,02	0,02
<i>Revêtement de sol dur</i>	<i>0,03</i>	<i>0,03</i>	<i>0,05</i>	<i>0,05</i>
Liège, blocs de bois, linoléum ou caoutchouc sur sol ou mur dur	0,05	0,05	0,1	0,1
Fenêtres verre 3 mm	0,2	0,1	0,05	0,02
Grandes fenêtres 7 mm	0,1	0,04	0,02	0,02
Plafonnage sur fond dur	0,03	0,03	0,04	0,04
Plafonnage sur vide	0,3	0,1	0,04	0,04
Plafonnage suspendu au plafond avec vide important	0,2	0,1	0,04	0,04
Contreplaqué sur fond dur	0,05	0,05	0,05	0,05
Idem sur vide ou chevron	0,3	0,15	0,1	0,05
Idem avec matériau absorbant dans vide	0,4	0,15	0,1	0,05
Panneaux bois comprimé 13 mm sur fond dur	0,05	0,15	0,3	0,3
Idem avec vide d'air ou monté sur chevrons	0,3	0,3	0,3	0,3
Carpette moyenne épaisseur sur sol en béton	0,1	0,3	0,5	0,5
Feutre sous membrane perforée sur fond dur	0,1	0,7	0,8	0,8
Panneaux bois non comprimé 25 mm sur fond dur	0,1	0,4	0,6	0,6
Idem 80 mm	0,2	0,8	0,8	0,8
Idem 25 mm sur vide	0,15	0,6	0,6	0,6
<i>Laine de verre 25 mm sur fond dur</i>	<i>0,2</i>	<i>0,7</i>	<i>0,9</i>	<i>0,8</i>
Idem 50 mm	0,3	0,8	0,9	0,9
Laine de verre 25 mm sur espace vide	0,4	0,8	0,9	0,8

4. Atténuation d'un matériau en paroi simple épaisseur

- Plus le matériau est lourd et plus l'affaiblissement acoustique est élevé.
- Typiquement l'affaiblissement varie en fonction de la fréquence selon la figure suivante:
 - plus important pour les sons aigus que pour les sons graves.
- L'ordre de grandeur de l'affaiblissement à 500 Hz :
 - Environ 40 dB pour une paroi de 100 kg/m²
 - Il augmente de 4 dB si on double le poids



- Il augmente de 4 dB si on double la fréquence.

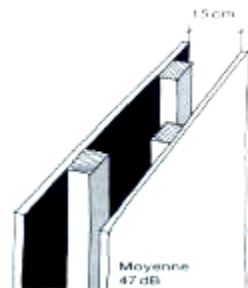
On constate donc que :

Poids kg/m ²	6	12.5	25	50	100	200	400
R ₅₀₀ dB	24	28	32	36	40	44	48

- On a vite quelque 20 dB d'atténuation, ce qui est rassurant pour le capotage des machines.
- Il est très difficile, avec des parois simples d'avoir 50 dB d'affaiblissement
- 3 catégories de matériaux :
 - Les matériaux **lourds** (béton lourd)
 - Le poids par m² est élevé et donc aussi l'affaiblissement
 - La fréquence critique est basse et alors la chute d'affaiblissement peu gênante.
 - Les matériaux **mi-lourds** (briques et surtout plâtre)
 - Le poids par m² est plus faible et donc aussi l'affaiblissement
 - La fréquence critique est proche de 500 Hz et il y a donc une chute d'affaiblissement telle que la voix humaine est moins atténuée.
 - Les matériaux **légers** (bois, briques creuses, verre...)
 - Le poids par m² et donc l'affaiblissement est nettement plus faible.

5. Affaiblissement d'un matériau en parois doubles

- Les parois doubles sont constituées de deux couches les plus désolidarisées possible.
- Elles permettent d'obtenir des affaiblissements aussi ou plus importants qu'une paroi simple en béton, tout en restant légères.
- Exemple: deux plaques de plâtre espacées de 10 cm.
- L'effet est susceptible d'être ruiné si les deux plaques sont solidarisiées par des supports rigides (ponts acoustiques).



Exemple: 2 plaques de plâtre séparées de 15 cm et supportées chacune par des montants séparés

6. Affaiblissements acoustiques de structures courantes

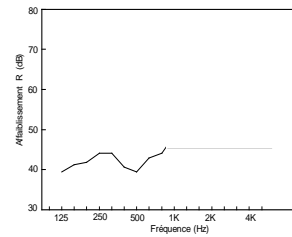
Parois simples	Poids	R dB
10 mm plâtre	8	26
25 mm plâtre	22	31
10 cm blocs de plâtre + 2X 13 mm plafonnage	115	40
10 cm briques pleines + 2X 13 mm plafonnage	210	40
23 cm briques pleines + 2X 13 mm plafonnage	490	52
15 cm béton plein + 2X 13 mm plafonnage	390	52
20 cm bloc de béton sans recouvrement	150	43

Parois doubles	Poids	R dB
2x16 mm plâtre sur chevron 10 cm sans absorbant intérieur	26	34
Idem avec 50 mm absorbant intérieur	29	38
Idem monté sur matériau résilient sans absorbant intérieur	26	39
Idem avec 50 mm absorbant intérieur	29	49
2X16 mm plâtre sur U métallique 6 cm sans absorbant intérieur	21	36
Idem avec 50 mm absorbant intérieur	23	44

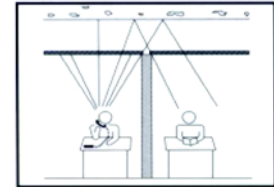
7. Pertes d'affaiblissement par des fentes, trous, ...

• Phénomène:

- Un trou ou une fente laisse passer toute l'énergie sonore incidente
- Un trou de 1 dm² laisse passer autant de bruit qu'un matériau d'affaiblissement 40 dB et de 100 m² de surface
- Un trou ruine donc l'atténuation des matériaux acoustiques et d'autant plus qu'il est grand, ce qui se traduit par un spectre d'isolement facilement reconnaissable parce que plafonné au lieu de croissant en fonction de la fréquence.

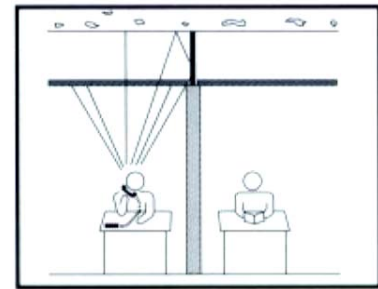


Exemple: La paroi de séparation ne va que jusqu'au faux-plafond. Ce faux-plafond, en matériau absorbant, n'isole pas. Le bruit se réfléchit sur le plafond en dur et arrive dans le local voisin



• Recommandations:

- **Supprimer** ou réduire au minimum les **trous**, les **fentes** ou les éléments de faible affaiblissement:
 - ✦ les orifices dans les capots;
 - ✦ les passages de canalisation, en particulier de gaines de ventilation dans les murs;
 - ✦ les boîtes électriques;
 - ✦ les fentes autour des portes et fenêtres;
 - ✦ les espaces derrière les chambranles de portes;
 - ✦ ...



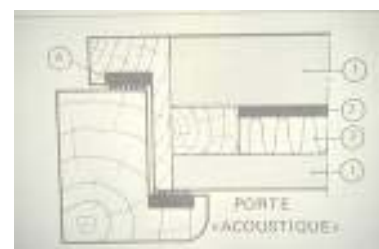
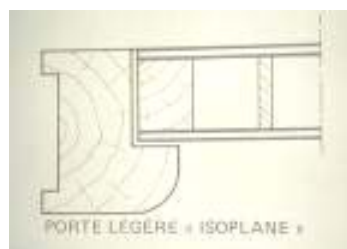
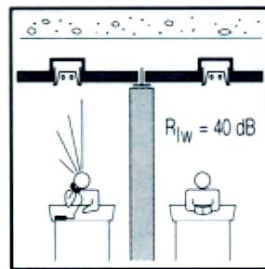
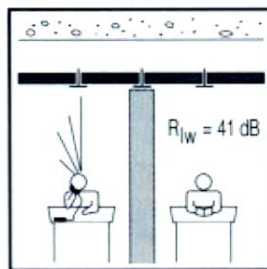
• Soigner la finition

- Toutes les fentes et tous les trous *apparents et non apparents* doivent être colmatés avec des matériaux isolants (béton, plâtre, ...) et non des matériaux absorbants.

Exemple: La paroi de séparation a été prolongée au-dessus du faux-plafond, jusqu'à la structure par un élément en dur

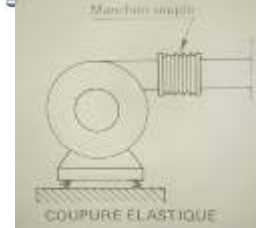
Exemple: 1. Le faux-plafond a été alourdi de manière à être isolant

2. Le pont acoustique par les luminaires a été éliminé au moyen d'une structure lourde recouvrant chaque luminaire



8. Réduction de la transmission des vibrations (matériaux résilients)

- **Problème** : Les vibrations d'une machine sont transmises à une tôle ou une paroi (sol, mur, ...) qui vibre et rayonne le bruit.
- Les **matériaux résilients** sont destinés à bloquer la transmission des vibrations. Il s'agit par ordre d'efficacité de plus en plus importante :
 - du feutre ou du liège
 - du caoutchouc
 - de ressorts
 - de coussins d'air (le plus efficace).
- Ils sont présentés sous forme de blocs («silent blocs»), de tapis, ou de tapis sous un bloc de béton (dalle flottante: voir stabilité ci-dessous).
- Les matériaux résilients **aggravent** la transmission des vibrations autour d'une fréquence dite de résonance f_0 qui est fonction:
 - du poids de la machine
 - des caractéristiques du matériau.
- donc calcul par un SPECIALISTE
- **Efficacité réelle**



Un système antivibratoire devient inutile si:

- le matériau résilient est complètement écrasé (ce qui est plus facile à voir pour un ressort que pour un tapis de caoutchouc)
- des connexions rigides existent entre la machine et l'extérieur (conduites d'eau, d'air, d'électricité, ...)
- des débris accumulés près des socles court-circuitent le matériau résilient
- le matériau a vieilli trop rapidement (caoutchouc à hautes températures, corrosion par ozone, ...).
- **Propagation des vibrations vers le local inférieur**
 - Placer un *revêtement résilient* sur le sol:.
 - **Dalle ou plancher flottant**
 - **Plafond léger**

9. Capotage

- Le capot d'une machine ne peut être efficace pour réduire le bruit que si:
 - Il est constitué d'un matériau suffisamment lourd
 - Il est recouvert à *l'intérieur* d'un matériau absorbant
 - Les ouvertures sont réduites au minimum
 - Il est désolidarisé de la machine et/ou constitué ou recouvert d'un matériau résilient (bois plutôt que tôle, tôle recouverte de caoutchouc, ...).

