

# Isolation acoustique

## Applications directes du cours

### 8 Décroissance du champ direct d'une source ponctuelle

1. Les résultats manquants sont obtenus par application des relations suivantes :

$$I_D = \frac{P_{\text{acoustique}}}{4\pi R^2}; \quad N_I = N_P; \quad I_D = \frac{p_D^2}{\rho_0 c}$$

$$p_{\text{acoustique}} = 4\pi R^2 I_D; \quad N_I = 10 \log \frac{I_D}{I_0}; \quad N_P = 20 \log \frac{p_D}{p_0};$$

$$R = \sqrt{\frac{P_{\text{acoustique}}}{4\pi I_D}}; \quad I_D = I_0 10^{\frac{N_I}{10}}; \quad p_D = p_0 10^{\frac{N_P}{20}}.$$

Tableau des résultats avec 2 chiffres significatifs

$P$ (W)	1,0	$1,0 \times 10^{-4}$	$4,0 \times 10^{-4}$	13	$1,0 \times 10^{-5}$
$R$ (m)	10	$5,6 \times 10^3$	1,0	1,0	8,9
$I$ (W.m <sup>-2</sup> )	$8,0 \times 10^{-4}$	$25 \times 10^{-14}$	$32 \times 10^{-6}$	1,0	$10 \times 10^{-9}$
$p$ (Pa)	0,56	$1 \times 10^{-5}$	0,11	20	$20 \times 10^{-3}$
$N_I$ (dB)	89	-6	75	120	40
$N_P$ (dB)	89	-6	75	120	40

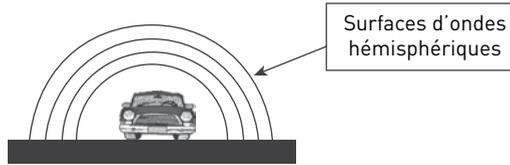
2. Les puissances acoustiques qui correspondent à des sources courantes dans un immeuble d'habitation vérifient :  $p_{\text{acoustique}} < 10 \text{ W}$

3. Facteurs physiques qui pourraient modifier ces résultats :

- absorption par l'air fonction de sa température, son humidité relative,
- effets du vent,
- atténuation due à l'absorption par le sol,
- les effets d'écran (mur antibruit, morlons, bâtiments...)

### 9 Bruit linéique produit par une route

1. Les surfaces d'ondes sonores générées par cette source linéique sont des demi-cylindres. Schéma montrant la route et les surfaces d'ondes :



2. Calcul de l'intensité acoustique ainsi que les niveaux d'intensité des ondes produites par application des deux formules suivantes :

$$I_D = \frac{P_{\text{acoustique}}}{\pi LR}, \text{ puis calcul des niveaux correspondants : } N_I = 10 \log \frac{I_D}{I_0}$$

Tableau des résultats avec 2 chiffres significatifs					
$R \text{ (m)}$	1,0	2,0	10	20	100
$I_D \text{ (W.m}^{-2}\text{)}$	$0,32 \times 10^{-3}$	$0,16 \times 10^{-3}$	$32 \times 10^{-6}$	$32 \times 10^{-6}$	$3,2 \times 10^{-6}$
$N_{I_d}$	85	82	75	72	65

3. Quand on multiplie la distance route-récepteur par 5, le niveau d'intensité acoustique décroît de 7 dB quel que soit le niveau d'intensité de départ.

## 10 Effets du vent sur le champ direct

1. Calcul de l'intensité acoustique des ondes à 10 m de l'éolienne.

$$I_D = I_0 10^{\frac{N_I}{10}}$$

$$\text{Application numérique : } I_1 = 1,0 \times 10^{-12} \times 10^{\frac{60}{10}} = 1,0 \times 10^{-6} \text{ W.m}^{-2}$$

$$\text{Résultat cité avec 2 chiffres significatifs : } I_1 = 1,0 \times 10^{-6} \text{ W.m}^{-2}$$

2. Calculons d'abord l'intensité acoustique à la distance  $d_2 = 1,0 \text{ km}$  :

La puissance acoustique  $P_{\text{acoustique}}$  de la source ainsi que l'angle solide d'émission  $\Omega$  restent identiques en  $d_1$  et en  $d_2$ . Nous pouvons donc écrire d'après la formule de définition de l'intensité du champ direct :

$$I_1 = \frac{P_{\text{acoustique}}}{4\pi d_1^2} \text{ et } I_2 = \frac{P_{\text{acoustique}}}{4\pi d_2^2}$$

$$\Leftrightarrow \frac{P_{\text{acoustique}}}{4\pi} = I_1 d_1^2 = I_2 d_2^2$$

$$\Leftrightarrow I_2 = \frac{I_1 d_1^2}{d_2^2}$$

$$\Leftrightarrow I_2 = \frac{d_1^2}{d_2^2} I_1$$

$$I_2 = \frac{d_1^2}{d_2^2} I_1$$

$$\text{Application numérique : } I_2 = \frac{10^2}{1\,000^2} \times 1,0 \times 10^{-6} = 1,0 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}$$

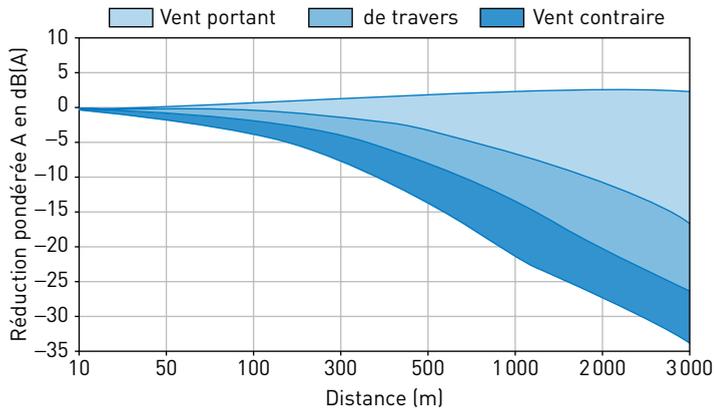
On en déduit ensuite le niveau d'intensité acoustique correspondant :

$$N_2 = 10 \log \frac{I_2}{I_0}$$

Application numérique :  $N_2 = 10 \log \frac{1,0 \times 10^{-8}}{1,0 \times 10^{-12}} = 40 \text{ dB(A)}$

Résultat cité avec 2 chiffres significatifs :  $N_2 = 40 \text{ dB(A)}$

Le graphe suivant donne les corrections à apporter en fonction du vent :



3. Dans le cas du vent portant, ses effets peuvent augmenter le niveau d'intensité acoustique jusqu'à +3 dB(A).
4. Par lecture graphique, les corrections à apporter au niveau d'intensité acoustique à une distance  $d_1 = 10 \text{ m}$  de l'éolienne sont nulles.
5. En tenant compte des différentes conditions de vent possibles : vent portant, de travers ou contraire, les corrections à apporter à une distance  $d_2 = 1,0 \text{ km}$  de l'éolienne sont comprises entre -22 dB(A) et +3 dB(A). L'encadrement du niveau d'intensité acoustique à  $d_2 = 1,0 \text{ km}$  est donc le suivant :

$$18 \text{ dB(A)} < N_2 < 43 \text{ dB(A)}$$

## 11 Effet de la température sur le champ direct

1. Calcul de l'intensité acoustique à la distance  $d = 1,0 \text{ m}$  de chaque bande d'octave par application de la relation suivante :

$$I_D = I_0 10^{\frac{N_1}{10}}$$

Résultat cité avec 2 chiffres significatifs :

Tableau des résultats avec 2 chiffres significatifs						
Fréquence centrale (Hz)	125	250	500	1 000	2 000	4 000
$N_1$ (dB) à 1,0 m	66	71	75	67	55	62
$I$ ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ) à 1,0 m	$4,0 \times 10^{-6}$	$1,3 \times 10^{-5}$	$3,2 \times 10^{-5}$	$5,0 \times 10^{-6}$	$3,2 \times 10^{-7}$	$1,6 \times 10^{-6}$

2. Calculons d'abord l'intensité acoustique à la distance  $d' = 200$  m. La puissance acoustique  $P_{\text{acoustique}}$  de la source ainsi que l'angle solide d'émission  $\Omega$  restent identiques en  $d_1$  et en  $d_2$ . Nous pouvons donc écrire d'après la formule de définition de l'intensité du champ direct :

$$I_1 = \frac{P_{\text{acoustique}}}{4\pi d^2} \text{ et } I_2 = \frac{P_{\text{acoustique}}}{4\pi d'^2}$$

$$\Leftrightarrow \frac{P_{\text{acoustique}}}{4\pi} = I_1 d^2 = I_2 d'^2$$

$$\Leftrightarrow I_2 = \frac{I_1 d^2}{d'^2}$$

$$\Leftrightarrow I_2 = \frac{d^2}{d'^2} I_1$$

$$I_2 = \frac{d^2}{d'^2} I_1$$

Application numérique pour la bande d'octave centrée sur la fréquence centrale 125 Hz :

$$I_2 = \frac{1,0^2}{200^2} \times 3,9810717 \times 10^{-6} = 9,9526793 \times 10^{-11} \text{ W.m}^{-2}$$

On en déduit ensuite le niveau d'intensité acoustique correspondant :

$$N_2 = 10 \log \frac{I_2}{I_0}$$

Application numérique pour la bande d'octave centrée sur la fréquence centrale 125 Hz :

$$N_2 = 10 \log \frac{9,9526793 \times 10^{-11}}{1,0 \times 10^{-12}} = 19,97940 \text{ dB}$$

Résultat cité avec 2 chiffres significatifs :  $N_2 = 20$  dB

Les autres résultats sont consignés dans le tableau suivant :

Tableau des résultats avec 2 chiffres significatifs						
Fréquence centrale (Hz)	125	250	500	1 000	2 000	4 000
$I$ (W.m <sup>-2</sup> ) à 200 m	$10 \times 10^{-11}$	$3,1 \times 10^{-10}$	$7,9 \times 10^{-10}$	$1,3 \times 10^{-10}$	$7,9 \times 10^{-12}$	$4,0 \times 10^{-11}$
$N_1$ (dB) à 200 m	20	25	29	21	9	16

3. Au-delà de 2 000 Hz, l'atténuation du champ direct liée à l'humidité de l'air est d'autant plus importante que la température est faible. Avant 2 000 Hz, la situation est plus complexe, l'atténuation n'est pas une fonction décroissante de la température. Ceci est dû aux oscillations de relaxation des molécules présentes dans l'air (principalement O<sub>2</sub> et N<sub>2</sub>).
4. Par lecture graphique, puis en multipliant les valeurs lues par 2 pour tenir compte de la distance  $d' = 200$  m, on obtient le tableau des résultats suivants :

Tableau des résultats avec 2 chiffres significatifs						
Fréquence centrale (Hz)	125	250	500	1 000	2 000	4 000
$N_i$ (dB) à 200 m (sans atténuation)	20	25	29	21	9	16
Correction à apporter (dB)	0	0	0	-1	-3	-6
$N_i$ (dB) à 200 m (à -10 °C)	20	25	29	20	6	10

5. Calcul du niveau résultant correspondant à la dernière ligne du tableau de résultats ci-dessus :

$$N_{\text{Total}} = 10 \log \left( \sum 10^{\frac{N_i}{10}} \right)$$

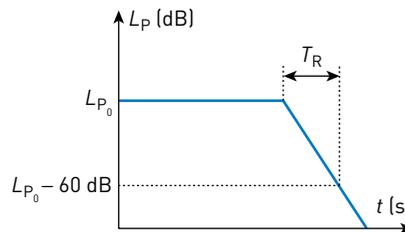
Application numérique :

$$\begin{aligned} N_{\text{total}} &= 10 \log \left( 10^{\frac{20}{10}} + 10^{\frac{25}{10}} + 10^{\frac{29}{10}} + 10^{\frac{20}{10}} + 10^{\frac{6}{10}} + 10^{\frac{10}{10}} \right) \\ &= 31,2271939 \text{ dB} \end{aligned}$$

Résultat cité avec 3 chiffres significatifs :  $N_{\text{total}} = 31 \text{ dB}$

## 12 Calcul d'un temps de réverbération

1. Le temps de réverbération  $T_R$  est défini comme le temps au bout duquel le niveau de pression acoustique du champ réverbéré aura chuté de 60 dB après arrêt de la source :



2. Calcul de l'aire équivalente d'absorption  $A_1$  de ce local en inversant la relation de Sabine :

$$A_1 = \frac{0,16V}{T_R}$$

Application numérique :

$$A_1 = \frac{0,16 \times 20 \times 10 \times 3,0}{1,5} = 64 \text{ m}^2$$

Résultat cité avec 2 chiffres significatifs :  $A_1 = 64 \text{ m}^2$

3. Le coefficient moyen d'absorption  $\alpha_1$  se calcule par application de la relation suivante :

$$\alpha_1 = \frac{A_1}{S_{\text{totale}}} = \frac{A_1}{2 \times (L + l)h + 2Ll}$$

Application numérique :

$$\alpha_1 = \frac{64}{2 \times (20 + 10) \times 3,0 + 2 \times 20 \times 10} = 0,110344828$$

Résultat cité avec 2 chiffres significatifs :  $\alpha_1 = 0,11$

4. Calcul de l'aire d'absorption équivalente  $A_s$  du sol :

$$A_s = \alpha_1 L l$$

Application numérique :

$$A_s = 0,110344828 \times 20 \times 10 = 22,06989655 \text{ m}^2$$

Résultat cité avec 2 chiffres significatifs :  $A_s = 22 \text{ m}^2$

5. Il est nécessaire de calculer la nouvelle aire équivalente d'absorption totale, puis d'appliquer la formule de Sabine pour trouver le nouveau temps de réverbération :

- Calcul de la nouvelle aire équivalente d'absorption totale :

$$A' = \sum_i \alpha_i S_i = \alpha_1 [2 \times (L + l) h + L l] + \alpha L l$$

Application numérique :

$$A' = 0,110344828 \times [2 \times (20 + 10) \times 3,0 + 20 \times 10] + 0,47 \times 20 \times 10 = 135,931034 \text{ m}^2$$

- Calcul du nouveau temps de réverbération :

$$T_R = \frac{0,16 V}{A'}$$

Application numérique :

$$T_R' = \frac{0,16 \times 20 \times 10 \times 3,0}{135,931034} = 0,706240487 \text{ s}$$

Résultat cité avec 2 chiffres significatifs :  $T_R' = 0,71 \text{ s}$

### 13 Champ direct et champ réverbéré

1. Calcul de l'aire équivalente d'absorption  $A_1$  de ce local en inversant la relation de Sabine :

$$A = \frac{0,16 V}{T_R}$$

Application numérique :

$$A = \frac{0,16 \times 25 \times 10 \times 3,0}{1,0} = 120 \text{ m}^2$$

Résultat cité avec 2 chiffres significatifs :  $A = 120 \text{ m}^2$

2. Calcul de l'intensité puis du niveau d'intensité dû au champ réverbéré vaut  $N_R = 105 \text{ dB}$

$$I_R = \frac{4 p_{\text{acoustique}}}{A}$$

Application numérique :

$$I_R = \frac{4 \times 1,0}{120} = 33,333333 \times 10^{-3} \text{ W.m}^{-2}$$

Résultat cité avec 2 chiffres significatifs :  $I_R = 33 \times 10^{-3} \text{ W.m}^{-2}$

On en déduit ensuite le niveau d'intensité acoustique correspondant :

$$N_r = 10 \log \frac{I_R}{I_0}$$

Application numérique :

$$N_r = 10 \log \frac{33,333333 \times 10^{-3}}{1,0 \times 10^{-12}} = 105,228787 \text{ dB}$$

Résultat cité avec 2 chiffres significatifs :  $N_r = 105 \text{ dB}$

3. Il est d'abord nécessaire de calculer l'intensité acoustique du champ direct, puis de calculer le niveau correspondant. On applique enfin la loi de composition des niveaux pour trouver le niveau global à 1,0 m :

- Calcul du champ direct à 1,0 m de la source :

$$I_D = \frac{P_{\text{acoustique}}}{4\pi d^2}$$

Application numérique :

$$I_D = \frac{1,0}{4\pi \times 1,0^2} = 79,5774715 \times 10^{-3} \text{ W.m}^{-2}$$

- Calcul du niveau d'intensité acoustique du champ direct :

$$N_b = 10 \log \frac{I_D}{I_0}$$

Application numérique :

$$N_r = 10 \log \frac{79,5774715 \times 10^{-3}}{1,0 \times 10^{-12}} = 109,007901 \text{ dB}$$

- Calcul du niveau global résultant à 1,0 m de la source :

$$N_{\text{Total}} = 10 \log \left( 10^{\frac{N_r}{10}} + 10^{\frac{N_b}{10}} \right)$$

Application numérique :

$$N_{\text{total}} = 10 \log \left( 10^{\frac{105,228787}{10}} + 10^{\frac{109,007901}{10}} \right) = 110,527354 \text{ dB}$$

Résultat cité avec 3 chiffres significatifs :  $N_{\text{total}} = 111 \text{ dB}$

4. Le niveau d'intensité acoustique du champ direct décroît quand on s'éloigne de la source, tandis que le champ réverbéré est constant. Le niveau global minimum d'intensité acoustique dans cette salle sera donc au moins égal au niveau d'intensité acoustique du champ réverbéré :

$$N_{\text{Total}_{\min}} > N_r = 105 \text{ dB}$$

**Remarque :** à 25 m de la source, le niveau d'intensité acoustique du champ direct ne vaut plus que 81 dB. Le champ réverbéré masque donc totalement le champ direct.

5. Le niveau d'intensité acoustique minimal étant au moins de 105 dB, il dépasse le seuil de mise en œuvre de protections auditives. La puissance acoustique de la source est donc trop importante, des conséquences auditives sont prévisibles pour les spectateurs s'ils ne portent pas de PICB.

## 14 Mur antibruit

1. Calcul du nombre de Fresnel pour chaque bande d'octave :

$$N = \frac{2f}{c}(d_1 + d_2 - d_3)$$

Résultats des applications numériques :

Tableau des résultats avec 3 chiffres significatifs						
Fréquence centrale (Hz)	125	250	500	1 000	2 000	4 000
N (pas d'unité)	0,816	1,63	3,26	6,53	13,1	26,1

2. Résultats des applications numériques :

Tableau des résultats avec 2 chiffres significatifs						
Fréquence centrale (Hz)	125	250	500	1 000	2 000	4 000
N (pas d'unité)	0,82	1,6	3,3	6,5	13	26
A (dB)	12	15	18	21	24	27

3. L'affaiblissement est le plus important pour les bandes d'octave centrées sur les fréquences les plus élevées, ce qui correspond aux sons les plus aigus. Ce mur antibruit est donc plus efficace pour les aigus que pour les graves.
4. Composition par bande d'octave du bruit arrivant au niveau de l'immeuble après pose du mur antibruit :

$$N_p' = N_p - A$$

Tableau des résultats avec 2 chiffres significatifs						
Fréquence centrale (Hz)	125	250	500	1 000	2 000	4 000
$N_p$ (dB)	63	67	70	73	70	65
A (dB)	12	15	18	21	24	27
$N_p'$ (dB)	51	52	52	52	46	38

5. Calcul du niveau de pression résultant après pose du mur antibruit :

$$N_{\text{Total}} = 10 \log \left( \sum 10^{\frac{N_i}{10}} \right)$$

Application numérique :

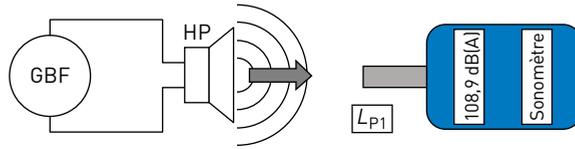
$$N_{\text{total}} = 10 \log \left( 10^{\frac{51}{10}} + 10^{\frac{52}{10}} + 10^{\frac{52}{10}} + 10^{\frac{52}{10}} + 10^{\frac{46}{10}} + 10^{\frac{38}{10}} \right)$$

$$= 57,96598 \text{ dB}$$

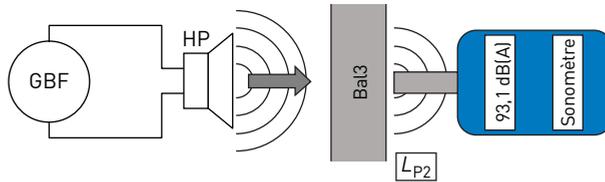
Résultat cité avec 3 chiffres significatifs :  $N_{\text{total}} = 58 \text{ dB} \leq 58 \text{ dB}$   
 Le mur antibruit satisfait donc tout juste le critère de l'énoncé.

## 15 Exploitation de résultats expérimentaux

- Schéma du dispositif permettant de réaliser l'expérience :
  - Mesure du niveau de pression acoustique sans plaque de BA13 :



- Mesure du niveau de pression acoustique avec la plaque de BA13 :

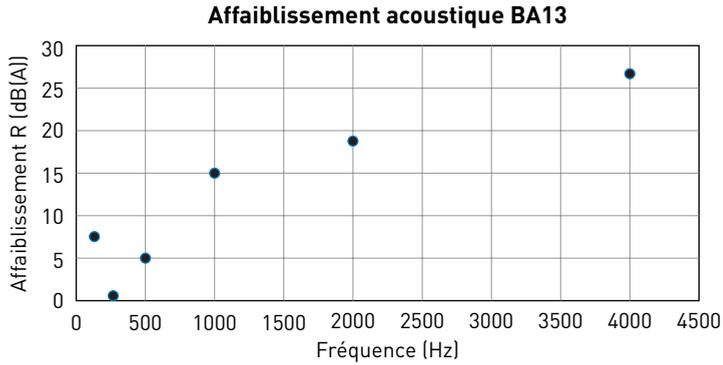


- Il est d'abord nécessaire de calculer, à partir des données expérimentales l'isolement brut de cette paroi pour chaque fréquence :

$$D = L_{P_1} - L_{P_2}$$

Tableaux des résultats pour le tracé						
Fréquence centrale (Hz)	125	250	500	1 000	2 000	4 000
$L_{P_1}$ avant paroi (dB(A))	67,4	86,4	117,8	108,9	102,3	106,9
$L_{P_2}$ après paroi (dB(A))	59,5	85,2	111,6	93,1	83,6	80,8
$D$ (dB(A))	7,9	1,2	6,2	15,8	18,7	26,1

En supposant que l'affaiblissement acoustique de cette paroi correspond à son isolement brut :  $R = D$



3. Sur la représentation graphique les points ne sont pas alignés, l'affaiblissement ne peut donc pas être une fonction linéaire de la fréquence.

4. L'application numérique de la relation fournie dans l'énoncé permet d'obtenir les résultats suivants :

$$\sigma = \rho e$$

Application numérique :

$$\sigma = 5,6 \times 13 \times 10^{-3} = 72,8 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^{-3}$$

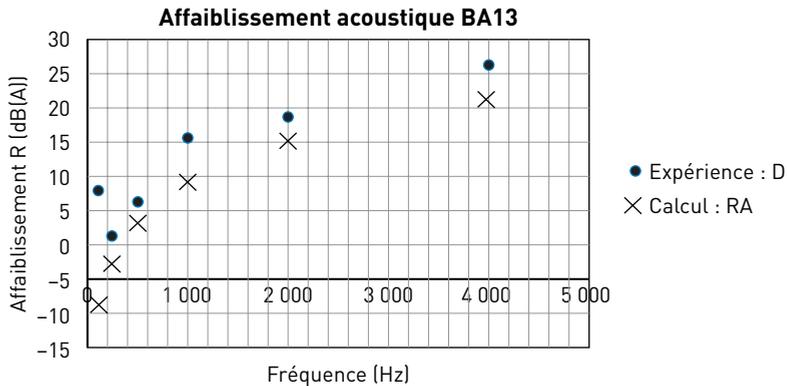
Résultat cité avec 3 chiffres significatifs :  $\sigma = 72,8 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^{-3}$

Tableaux des résultats avec 2 chiffres significatifs						
Fréquence centrale (Hz)	125	250	500	1 000	2 000	4 000
$R$ (dB(A))	7,9	1,2	6,2	16	19	26
$R_A$ (dB(A))	-8,8	-2,8	3,2	9,2	15	21

Les écarts entre les résultats expérimentaux et ceux fournis par la relation de calcul sont importants et non constants d'une fréquence à l'autre.

La relation de calcul de l'indice d'affaiblissement  $R_A$  ne permet donc pas de modéliser correctement les résultats de l'expérience, qui eux, correspondent à l'isolement brut.

Le graphe ci-dessous permet de visualiser les différences :



## 16 Affaiblissement d'une paroi composite

1. Calcul du coefficient de transmission de chacun des matériaux composant cette paroi par application de la relation suivante :

$$t = 10^{-\frac{R}{10}}$$

Tableau des résultats avec 2 chiffres significatifs			
Matériau	Voile béton	Isolant thermique	Enduit de finition
$R$ (dB)	55	5	3
$t$ (pas d'unité)	$3,2 \times 10^{-6}$	0,32	0,50

Calcul du coefficient de transmission pour l'ensemble des matériaux accolés :

$$t_{\text{paroi}} = \prod t_i = t_{\text{béton}} \times t_{\text{isolant thermique}} \times t_{\text{enduit}}$$

Application numérique :

$$t_{\text{paroi}} = 3,16228 \times 10^{-6} \times 0,316228 \times 0,501187 = 5,01187 \times 10^{-7}$$

Résultat cité avec 2 chiffres significatifs :  $t_{\text{paroi}} = 5,0 \times 10^{-7}$

2. Calcul de l'affaiblissement de la paroi composite :

$$R_{\text{paroi}} = 10 \log \left( \frac{1}{t_{\text{paroi}}} \right)$$

Application numérique :

$$R_{\text{paroi}} = 10 \log \left( \frac{1}{5,01187 \times 10^{-7}} \right) = 63,0000 \text{ dB}$$

Résultat cité avec 2 chiffres significatifs :  $R_{\text{paroi}} = 63 \text{ dB}$

3. Le calcul du coefficient de transmission de la paroi composite ne dépend pas de l'ordre des matériaux, la multiplication étant commutative. L'affaiblissement de la paroi composite ne dépend donc pas, lui non plus, de l'ordre des matériaux.

4. Les mesures au sonomètre permettent de connaître l'isolement brut d'une paroi :

$$D = N_{\text{avant}} - N_{\text{après}}$$

Application numérique :

$$D = 86 - 26 = 60 \text{ dB}$$

Résultat cité avec 2 chiffres significatifs :  $D = 60 \text{ dB}$

La comparaison donne :  $D = 60 \text{ dB} < R_{\text{paroi}} = 63 \text{ dB}$

L'isolement brut est donc inférieur à l'affaiblissement de la paroi. Cette situation très courante est prise en compte si on souhaite garantir un isolement brut minimum.

## 17 Choix d'une sirène de signal d'évacuation

1. Les données techniques des constructeurs donnant un niveau de pression à une distance donnée correspondent toujours au champ direct.
2. Pour satisfaire aux exigences, le niveau de pression du champ direct provenant de la sirène doit satisfaire :

$$N_{p_{\min}} > 80 + 10 = 90 \text{ dB}$$

3. Pour répondre à cette question, il est nécessaire de procéder en deux étapes :
  - Calcul préalable des intensités acoustiques à partir des niveaux correspondants :

$$I_D = I_0 10^{\frac{N_1}{10}}$$

Applications numériques :

Tableau des résultats avec 2 chiffres significatifs				
Modèle	A	B	C	D
$N_p$ (dB) mesuré à 2,0 m de la sirène	85	95	110	120
$I_D$ ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ) à 2,0 m de la sirène	$3,2 \times 10^{-4}$	$3,2 \times 10^{-3}$	0,10	1,0

- Calculs des distances en appliquant la relation de l'intensité du champ acoustique direct :

$$I_D = \frac{P_{\text{acoustique}}}{4\pi d^2}$$

La puissance acoustique  $P_{\text{acoustique}}$  de chaque sirène ainsi que l'angle solide d'émission  $\Omega$  restent identiques à toute distance. Nous pouvons donc écrire :

$$I_{2,0\text{m}} = \frac{P_{\text{acoustique}}}{4\pi d_{2,0\text{m}}^2} \text{ et } I_{\min} = \frac{P_{\text{acoustique}}}{4\pi d_{\text{Max}}^2}$$

$$\Leftrightarrow \frac{P_{\text{acoustique}}}{4\pi} = I_{2,0\text{m}} d_{2,0\text{m}}^2 = I_{\min} d_{\text{Max}}^2$$

$$\Leftrightarrow d_{\text{Max}}^2 = \frac{I_{2,0\text{m}} d_{2,0\text{m}}^2}{I_{\min}}$$

$$\Leftrightarrow d_{\text{Max}} = \sqrt{\frac{I_{2,0\text{m}} d_{2,0\text{m}}^2}{I_{\min}}}$$

$$d_{\text{Max}} = \sqrt{\frac{I_{2,0\text{m}} d_{2,0\text{m}}^2}{I_{\min}}}$$

avec :  $I_{\min} = I_0 \times 10^{\frac{N_{p_{\min}}}{10}} = 1,0 \times 10^{-12} \times 10^{\frac{90}{10}} = 1,0 \times 10^{-3} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$   
 $d_{2,0\text{m}} = 2,0 \text{ m}$

Application numérique :

Tableau des résultats avec 3 chiffres significatifs				
Modèle	A	B	C	D
$N_p$ (dB) mesuré à 2,0 m de la sirène	85	95	110	120
$I_D$ ( $W.m^{-2}$ ) à 2,0 m de la sirène	$3,2 \times 10^{-4}$	$3,2 \times 10^{-3}$	0,10	1,0
$d_1$ (m)	2,0	2,0	2,0	2,0
$I_1$ ( $W.m^{-2}$ )	$1,0 \times 10^{-3}$	$1,0 \times 10^{-3}$	$1,0 \times 10^{-3}$	$1,0 \times 10^{-3}$
$d_{Max}$ (m)	1,12	3,56	20,0	63,2

Les résultats trouvés sont bien conformes aux données de l'énoncé :

Modèle	A	B	C	D
Distance maximale (m)	1,1	3,6	20	63

4. Dans un lieu clos, le champ réverbéré vient se superposer au champ direct. Le niveau de pression résultant des deux champs sera donc toujours supérieur ou égal au niveau de pression du seul champ direct. Les distances maximales seront donc probablement supérieures en présence de champ réverbéré.

## 18 Affaiblissement de parois en parallèle

1. Calcul de la surface du mur par laquelle peuvent se transmettre les ondes acoustiques :

$$S_{\text{mur}} = Lh - S_p - S_f$$

Application numérique :

$$S_{\text{mur}} = 6,0 \times 3,0 - 2,0 - 2,5 = 13,5 \text{ m}^2$$

Résultat cité avec 3 chiffres significatifs :  $S_{\text{mur}} = 13,5 \text{ m}^2$

2. Calcul du coefficient de transmission de chacun des matériaux composant cette paroi par application de la relation suivante :

$$t = 10^{-\frac{R}{10}}$$

Applications numériques :

Tableau des résultats avec 2 chiffres significatifs			
matériau	Mur	Fenêtre	Porte
$R$ (dB)	55	40	42
$t$ (pas d'unité)	$3,2 \times 10^{-6}$	$1,0 \times 10^{-4}$	$6,3 \times 10^{-5}$

Calcul du coefficient de transmission pour l'ensemble mur + fenêtre + porte en parallèle :

$$t_{\text{Total}} = \frac{\sum t_i S_i}{S_{\text{Totale}}} = \frac{t_{\text{mur}} S_{\text{mur}} + t_{\text{fenêtre}} S_{\text{fenêtre}} + t_{\text{porte}} S_{\text{porte}}}{Lh}$$

Application numérique :

$$t_{\text{Total}} = \frac{3,16228 \times 10^{-6} \times 13,5 + 1,00000 \times 10^{-4} \times 2,5 + 6,30957 \times 10^{-4} \times 2,0}{6,0 \times 3,0}$$

$$= 2,32712 \times 10^{-5}$$

Résultat cité avec 2 chiffres significatifs :  $t_{\text{Total}} = 2,3 \times 10^{-5}$

3. Calculer l'indice d'affaiblissement pour l'ensemble mur + fenêtre + porte.

$$R_{\text{Total}} = 10 \log \left( \frac{1}{t_{\text{Total}}} \right)$$

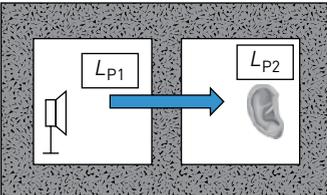
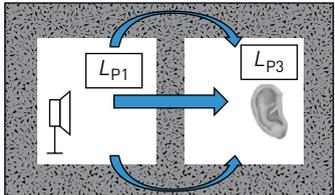
Application numérique :

$$R_{\text{Total}} = 10 \log \left( \frac{1}{2,32712 \times 10^{-5}} \right) = 46,3318 \text{ dB}$$

Résultat cité avec 2 chiffres significatifs :  $R_{\text{Total}} = 46 \text{ dB}$

4. Différence entre isolement brut et indice d'affaiblissement de l'ensemble :

- L'indice d'affaiblissement d'une paroi correspond au meilleur résultat que l'on peut attendre concernant l'isolation acoustique d'une paroi,
- L'isolement brut est mesuré pour une paroi dans son environnement. Les transmissions acoustiques latérales inévitables induisent un isolement brut toujours inférieur ou égal à l'indice d'affaiblissement.

Indice d'affaiblissement $R$	Isolement acoustique brut $D$
	
$R = L_{P1} - L_{P2}$	$D = L_{P1} - L_{P3} < R$

## 19 Champ réverbéré

1. Calcul de l'aire équivalente d'absorption  $A_1$  de ce local en inversant la relation de Sabine, puis en l'appliquant à chaque bande d'octave :

$$A = \frac{0,16V}{T_R}$$

Applications numériques :

Tableau des résultats avec 2 chiffres significatifs						
$f_{\text{centrale}}$ (Hz)	125	250	500	1 000	2 000	4 000
$T_R$ (s)	1,1	1,0	0,90	0,90	0,85	0,80
$A$ (m <sup>2</sup> )	47	51	57	57	60	64

2. Calcul du niveau d'intensité acoustique par application pour chaque bande d'octave de la relation de calcul fournie dans l'énoncé :

$$L_r = 10 \log \left( \frac{P_{\text{acoustique}}}{1,0 \times 10^{-12}} \right) + 6 \text{ dB} - 10 \log A$$

Applications numériques

Tableau des résultats avec 2 chiffres significatifs						
$f_{\text{centrale}}$ (Hz)	125	250	500	1 000	2 000	4 000
$P_{\text{acoustique}}$ (W)	$1,0 \times 10^{-3}$					
$A$ (m <sup>2</sup> )	47	51	57	57	60	64
$L_{IR}$ (dB)	79	79	78	78	78	78

3. Calcul du niveau global d'intensité acoustique du champ réverbéré :

$$N_{\text{Total}} = 10 \log \left( \sum 10^{\frac{N_i}{10}} \right)$$

Application numérique :

$$\begin{aligned} N_{\text{total}} &= 10 \log \left( 10^{\frac{79,32}{10}} + 10^{\frac{78,91}{10}} + 10^{\frac{78,45}{10}} + 10^{\frac{78,45}{10}} + 10^{\frac{78,20}{10}} + 10^{\frac{77,94}{10}} \right) \\ &= 86,3502302 \text{ dB} \end{aligned}$$

Résultat cité avec 2 chiffres significatifs :  $N_{\text{total}} = 86 \text{ dB}$

4. Le niveau de pression acoustique du champ réverbéré, dans les hypothèses retenues par Sabine ne dépend pas du point de mesure dans la pièce. Cette valeur est donc valable en tout point de la pièce. Dans une situation plus réelle, le niveau de pression acoustique du champ réverbéré est souvent plus important quand on se rapproche d'une paroi.

## 20 Choix d'un matériau absorbant

1. Calcul de l'aire équivalente d'absorption  $A_{\text{tot}}$  de ce local en inversant la relation de Sabine :

$$A_{\text{tot}} = \frac{0,16V}{T_R}$$

Application numérique :

$$A_{\text{tot}} = \frac{0,16 \times 6,0 \times 4,0 \times 3,0}{1,0} = 11,52 \text{ m}^2$$

Résultat cité avec 3 chiffres significatifs :  $A_{\text{tot}} = 11,5 \text{ m}^2$

**2.** Calcul de l'aire équivalente d'absorption du plafond :

$$A_{\text{plafond}} = A_{\text{tot}} - A_{m+s}$$

Application numérique :

$$A_{\text{plafond}} = 11,52 - 8,4 = 3,12 \text{ m}^2$$

Résultat cité avec 2 chiffres significatifs :  $A_{\text{plafond}} = 3,1 \text{ m}^2$

**3.** Il est nécessaire de calculer les nouvelles aires totales d'absorption par la formule de Sabine :

$$A_{\text{tot}} = \frac{0,16V}{T_R}$$

Application numérique :

Tableau des résultats avec 3 chiffres significatifs		
$V \text{ (m}^3\text{)}$	72	72
$T_R \text{ (s)}$	0,5	0,6
$A_{\text{tot}} \text{ (m}^2\text{)}$	23,0	19,2

On en déduit ensuite l'aire minimale d'absorption du plafond correspondante :

$$A_{\text{plafond}} = A_{\text{tot}} - A_{m+s}$$

Application numérique :

Tableau des résultats avec 3 chiffres significatifs		
$V \text{ (m}^3\text{)}$	72	72
$T_R \text{ (s)}$	0,5	0,6
$A_{\text{tot}} \text{ (m}^2\text{)}$	23,0	19,2
$A_{m+s} \text{ (m}^2\text{)}$	8,4	8,4
$A_{\text{plafond}} \text{ (m}^2\text{)}$	14,6	10,8

La nouvelle aire équivalente d'absorption du plafond doit donc appartenir à l'intervalle suivant :

$$A_{\text{plafond}} \in [10,8 \text{ m}^2; 14,6 \text{ m}^2] \Leftrightarrow 10,8 \text{ m}^2 < A_{\text{plafond}} < 14,6 \text{ m}^2$$

**4.** Calcul du coefficient d'absorption du plafond nécessaire pour le choix du matériau des nouvelles dalles du plafond :

$$\alpha_{\text{plafond}} = \frac{A_{\text{plafond}}}{Ll}$$

Application numérique :

Tableau des résultats avec 2 chiffres significatifs		
$T_R$ (s)	0,5	0,6
$A_{\text{plafond}}$ (m <sup>2</sup> )	14,6	10,8
$\alpha_{\text{plafond}}$	0,61	0,45

Le coefficient d'absorption du matériau à choisir doit donc satisfaire :

$$\alpha_{\text{plafond}} \in [0,45 ; 0,61] \Leftrightarrow 0,45 < \alpha_{\text{plafond}} < 0,61$$

Le seul matériau qui satisfait le critère correspond aux dalles en métal 2.

Matériau	Dalles en bois 1	Dalles en métal 1	Dalles minérales	Dalles en métal 2	Dalles en bois
$\alpha_w$	0,10	0,95	0,70	0,55	0,65

## Exercices d'entraînement

### 21 Loi de masse

- Le tableau des résultats suivant indique le sens de variation de l'indice d'affaiblissement :

Tableau de variation des indices d'affaiblissement						
$f_{\text{centrale}}$ (Hz)	125	250	500	1 000	2 000	4 000
BA 13	↘		↗			
2 × BA 13	↘	↗		↘	↗	
3 × BA 13	↘	↗			↘	

L'indice d'affaiblissement n'est donc pas toujours croissant avec la fréquence dans les 3 cas envisagés.

- Par lecture graphique, on obtient :

Valeurs des indices d'affaiblissement						
$f_{\text{centrale}}$ (Hz)	125	250	500	1 000	2 000	4 000
BA 13	8	1	6	16	19	26
2 × BA 13	11,5	2	11	19	19	25
3 × BA 13	15	7	15	20	22	21,5

- Pour les bandes d'octave centrées sur les fréquences centrales comprises entre 125 et 2 000 Hz, l'indice d'affaiblissement acoustique augmente avec le nombre de parois. L'association de plusieurs parois identiques permet toujours d'améliorer (ou d'égaliser dans un cas) l'isolation acoustique.

- Pour la bande d'octave centrée sur 4 000 Hz (sons aigus) l'indice d'affaiblissement acoustique diminue quand le nombre de parois augmente. L'isolation acoustique est donc moins bonne quand on associe plusieurs parois identiques de BA13.
3. Calcul par bandes d'octave du niveau de pression après 3 parois accolées de BA13, c'est-à-dire de l'isolement brut (aucune indication sur l'environnement de la paroi) :

$$N_{p_{\text{après}}} = N_{p_{\text{avant}}} - D$$

Valeurs des niveaux de pression après les 3 parois accolées						
$f_{\text{centrale}}$ (Hz)	125	250	500	1 000	2 000	4 000
$N_p$ avant paroi (dB(A))	67,4	86,4	117,8	108,9	102,3	106,9
$D$ (dB(A)) pour $3 \times$ BA 13	15	7	15	20	22	21,5
$N_p$ après paroi (dB(A))	52,4	79,4	102,8	88,9	80,3	85,4

4. Calcul du niveau de pression global après 3 parois accolées de BA13.

$$N_{\text{Total}} = 10 \log \left( \sum_i 10^{\frac{N_i}{10}} \right)$$

Application numérique :

$$N_{\text{total}} = 10 \log \left( 10^{\frac{52,4}{10}} + 10^{\frac{79,4}{10}} + 10^{\frac{102,8}{10}} + 10^{\frac{88,9}{10}} + 10^{\frac{80,3}{10}} + 10^{\frac{85,4}{10}} \right)$$

$$= 103,09034 \text{ dB(A)}$$

Résultat cité avec 3 chiffres significatifs :  $N_{\text{total}} = 103 \text{ dB(A)}$

5. L'application numérique de la relation fournie dans l'énoncé permet d'obtenir les résultats suivants :

- Calcul préalable de la masse surfacique pour 3 plaques :

$$\sigma = 3\rho e$$

Application numérique :

$$\sigma = 3 \times 5,6 \times 13 \times 10^{-3} = 218,4 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^{-3}$$

- Application numérique de la relation donnée dans l'énoncé :

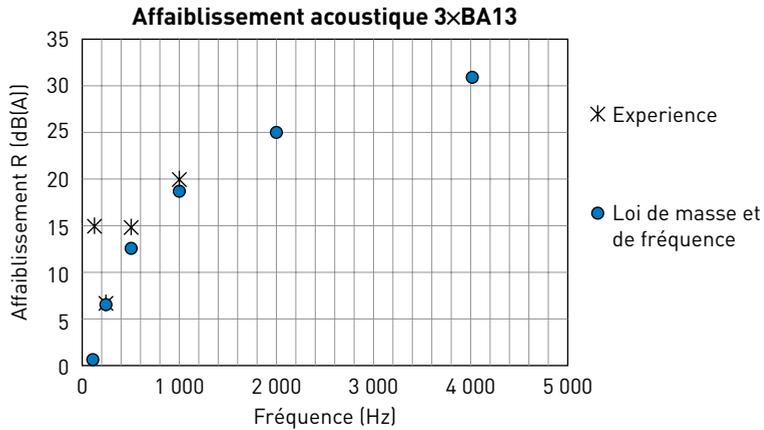
$$R = 20 \log(10\sigma f) - 48$$

Tableaux des résultats avec 2 chiffres significatifs						
Fréquence centrale (Hz)	125	250	500	1 000	2 000	4 000
$R$ (dB(A))	0,72	6,7	12,8	19	25	31
$D$ (dB(A)) pour $3 \times$ BA 13	15	7	15	20	22	21,5

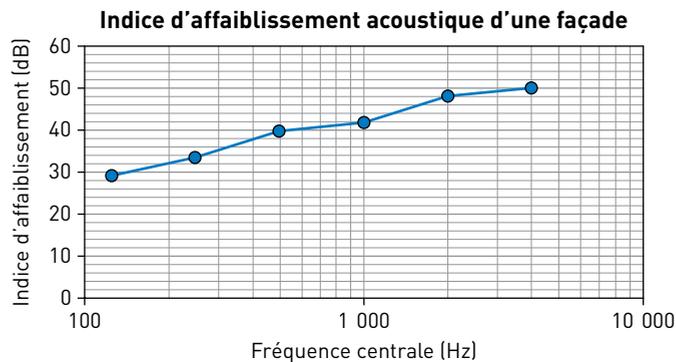
Pour les bandes d'octave centrées sur 250, 500, 1 000 et 2 000 Hz, les valeurs sont assez proches. Par contre pour les bandes d'octave centrées sur 125 et

4 000 Hz, la loi de masse et de fréquence ne modélise pas correctement les résultats expérimentaux.

Le graphe suivant représente les différents résultats :



## 22 Réglementation acoustique



### 1. Analyse de la décomposition par bandes d'octave

Classification	très graves	graves	médium	médium	aigus	très aigus
Fréquence centrale (Hz)	125	250	500	1 000	2 000	4 000
$N_p$ (dB) extérieur	66	69	69	67	60	52

C'est donc dans les graves et les médiums que les niveaux de pression sont les plus élevés.

2. Les mesures de niveau de pression s'effectuent à l'aide d'un sonomètre.

3. Il est nécessaire de calculer le niveau de pression acoustique du bruit routier en façade du bâtiment :

$$N_{\text{Total ext}} = 10 \log \left( \sum_i 10^{\frac{M_i}{10}} \right)$$

Application numérique :

$$N_{\text{Total ext}} = 10 \log \left( 10^{\frac{66}{10}} + 10^{\frac{69}{10}} + 10^{\frac{69}{10}} + 10^{\frac{67}{10}} + 10^{\frac{60}{10}} + 10^{\frac{52}{10}} \right)$$

$$= 74,15608 \text{ dB}$$

Résultat cité avec 3 chiffres significatifs :  $N_{\text{Total ext}} = 74 \text{ dB}$

On en déduit la catégorie de bruit extérieur, ainsi que l'indice minimum d'affaiblissement que doit satisfaire la façade :

Catégorie	Niveau de pression global acoustique extérieur	Indice d'affaiblissement minimum de la façade
3	Entre 70 et 76 dB	38 dB

4. Par lecture graphique, on obtient les indices d'affaiblissement acoustique par bandes d'octave. Puis on applique la relation :

$$N_{\text{P intérieur}} = N_{\text{P extérieur}} - R_A$$

Tableau des résultats avec 2 chiffres significatifs						
Fréquence centrale (Hz)	125	250	500	1 000	2 000	4 000
$N_p$ (dB) extérieur	66	69	69	67	60	52
$R$ (dB)	34	40	42	48	50	34
$N_p$ (dB) intérieur	32	29	27	19	10	18

5. Calcul du niveau de pression global à l'intérieur du logement.

$$N_{\text{Total int}} = 10 \log \left( \sum_i 10^{\frac{N_{\text{ext}}}{10}} \right)$$

Application numérique :

$$N_{\text{Total int}} = 10 \log \left( 10^{\frac{32}{10}} + 10^{\frac{29}{10}} + 10^{\frac{27}{10}} + 10^{\frac{19}{10}} + 10^{\frac{10}{10}} + 10^{\frac{18}{10}} \right)$$

$$= 34,81863 \text{ dB}$$

Résultat cité avec 2 chiffres significatifs :  $N_{\text{Total int}} = 35 \text{ dB}$

6. L'indice d'affaiblissement global de la paroi vaut :

$$R_A = N_{\text{total extérieur}} - N_{\text{total intérieur}}$$

Application numérique :

$$R_A = 74 - 35 = 29 \text{ dB}$$

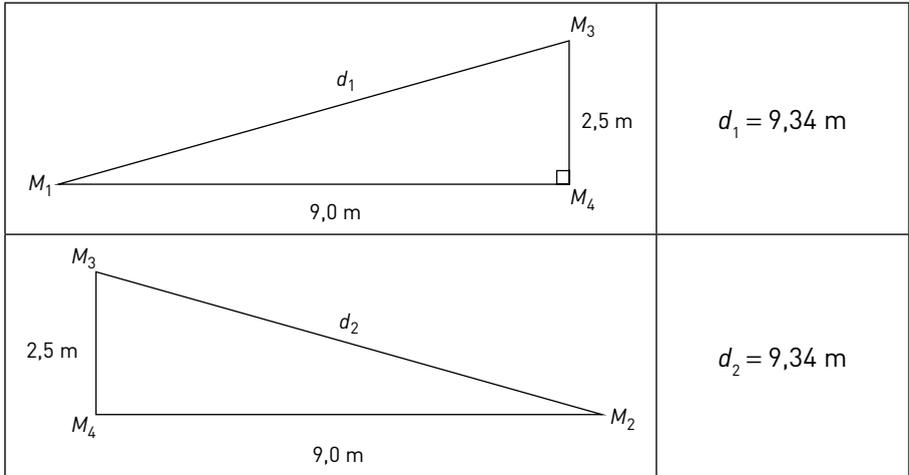
$$R_A < 38 \text{ dB}$$

La façade ne répond pas aux exigences de la réglementation.

## 23 Comparaison de méthodes de calcul pour un mur antibruit

### ■ Méthode de Maekawa :

1. Les distances  $d_1$  et  $d_2$  sont obtenues par résolution des triangles suivants :



Calcul du nombre de Fresnel pour chaque bande d'octave :

$$N = \frac{2f}{c} (d_1 + d_2 - d_3) \text{ avec } c = 347 \text{ m.s}^{-1}$$

Résultats des applications numériques :

Tableau des résultats avec 3 chiffres significatifs						
Fréquence centrale (Hz)	125	250	500	1 000	2 000	4 000
$N$	0,491	0,982	1,96	3,93	7,86	15,7

2. Calcul de l'affaiblissement acoustique de ce mur antibruit pour chaque bande d'octave :

$$A = 10 \log(20 N)$$

Résultats des applications numériques :

Tableau des résultats avec 2 chiffres significatifs						
Fréquence centrale (Hz)	125	250	500	1 000	2 000	4 000
$N$	0,49	0,98	2,0	3,9	7,9	15,7
$A$ (dB)	10	13	16	19	22	25

3. Composition par bande d'octave du bruit arrivant au niveau de l'immeuble après pose du mur antibruit :

$$N_p' = N_p - A$$

Tableau des résultats avec 2 chiffres significatifs						
Fréquence centrale (Hz)	125	250	500	1 000	2 000	4 000
$N_p$ (dB)	76	75	71	70	68	62
$A$ (dB)	10	13	16	19	22	25
$N'_p$ (dB)	66	62	55	51	46	37

Calcul des niveaux de pression résultant avant et après pose du mur antibruit :

$$N_{\text{Total}} = 10 \log \left( \sum 10^{\frac{N_i}{10}} \right)$$

Application numérique :

Tableau des résultats avec 2 chiffres significatifs	
$N_p$ total (dB)	$N_{p_{\text{total}}} = 80$ dB
$N'_p$ total (dB)	$N'_{p_{\text{total}}} = 68$ dB

L'indice d'affaiblissement global du mur vaut :

$$R_A = N_{\text{total}_{\text{extérieur}}} - N_{\text{total}_{\text{intérieur}}}$$

Application numérique :

$$R_A = 80 - 64 = 16 \text{ dB}$$

Résultat cité avec 2 chiffres significatifs :  $R_{A_{\text{Maekawa}}} = 16$  dB

#### ■ Méthode de Lauber :

#### 4. Calcul de la fréquence critique :

$$f_c = \frac{ac}{2b^2}$$

Application numérique :

$$f_c = \frac{9,0 \times 347}{2 \times 2,5^2} = 249,84 \text{ Hz}$$

Résultat cité avec 3 chiffres significatifs :  $f_c = 250$  Hz

#### 5. Tableau d'affaiblissement par bandes d'octave par la méthode de Lauber.

Tableau des résultats par bandes d'octave						
Fréquence centrale (Hz)	125	250	500	1 000	2 000	4 000
$A$ (dB)	9	11	13	16	19	22

6. Composition par bandes d'octave du bruit arrivant au niveau de l'immeuble après pose du mur antibruit :

$$N'_p = N_p - A$$

Tableau des résultats avec 2 chiffres significatifs						
Fréquence centrale (Hz)	125	250	500	1 000	2 000	4 000
$N_p$ (dB)	76	75	71	70	68	62
$A$ (dB)	9	11	13	16	19	22
$N'_p$ (dB)	67	64	58	54	49	40

Calcul des niveaux de pression résultant avant et après pose du mur antibruit :

$$N_{\text{Total}} = 10 \log \left( \sum 10^{\frac{N_i}{10}} \right)$$

Application numérique :

Tableau des résultats avec 2 chiffres significatifs	
$N_p$ total (dB)	$N_{p_{\text{total}}} = 80$ dB
$N'_p$ total (dB)	$N'_{p_{\text{total}}} = 69$ dB

L'indice d'affaiblissement global du mur vaut :

$$R_A = N_{\text{total}_{\text{extérieur}}} - N_{\text{total}_{\text{intérieur}}}$$

Application numérique :

$$R_A = 80 - 69 = 11 \text{ dB}$$

Résultat cité avec 2 chiffres significatifs :  $R_{A_{\text{Lauber}}} = 11$  dB

7. En comparant les résultats obtenus par les deux méthodes :

$$R_{A_{\text{Maekawa}}} = 16 \text{ dB} > R_{A_{\text{Lauber}}} = 11 \text{ dB}$$

Le cas le moins favorable à retenir est celui donné par la méthode de Lauber :

$$R_{A_{\text{Lauber}}} = 11 \text{ dB}$$