TEST ACOUSTIQUE

Aucun document n'est autorisé. Les calculatrices et smartphones sont interdits pendant la durée de l'épreuve.
Il sera accordé une grande importance à la qualité et à la clarté de la présentation et au raisonnement. Tous les calculs intermédiaires ou la démarche (si vous n'avez pas le temps de mener les calculs) doivent être spécifiés. Le choix des formules utilisées pour le calcul devra être clairement justifié.

Dans tous les exercices, on prendra la vitesse du son $c_0 = \frac{1000}{3}$ m.s^{-1} et $\rho_0 c_0$=400 Rayls. Il faudra effectuer les calculs avec cette fraction pour c_0 afin de simplifier les applications numériques.

Rappel : $\log_{10}(x) = \frac{\ln(x)}{\ln(10)}$

Pour l'ensemble du test, on considérera pour simplifier que l'intensite acoustique I est égale :
-dans le cas d'ondes planes : à la pression efficace au carré divisée par $\rho_0 c_0$;
-dans le cas d'un champ diffus : à la pression efficace au carré divisée par $4\rho_0 c_0$.

Exercice 1 (5 points)

Pour cet exercice on supposera que $\ln(10^3) \approx 7$.

On considère une salle de volume $V = 500\text{m}^3$ avec des parois internes ayant une surface totale $S = 400\text{m}^2$ et un coefficient d'absorption Sabine moyen $\alpha_S = 0.1$ à 1000Hz.
On suppose que l'intensité acoustique $I(t)$ dans la salle décroît en fonction du temps t sous la forme :

$$I(t) = I_{max} e^{-\frac{t}{\tau}} \text{ avec } \tau = \frac{4V}{c_0 S \alpha_S}$$

Q1)Calculer le temps T_1 (en partant de $t = 0$s) qu'il faut pour que l'intensité acoustique diminue de 30dB à 1000Hz (on pourra diviser l'intensité initiale par l'intensité à $t = T_1$).

Q2)Comparer T_1 avec la valeur du temps de réverbération T_r donné par la formule de Sabine (on cherchera l'entier n tel que $T_r \approx nT_1$). Ce résultat était-il prévisible ?

Q3)On rajoute de la moquette sur une partie du sol (surface occupée par la moquette $S_m = 100\text{m}^2$). Le nouveau temps de réverbération T_2 mesuré sur place est 1s à 1000Hz. En déduire le coefficient d'absorption Sabine à 1000Hz de la moquette introduite.

Q4)Proposer une solution pour diminuer encore le temps de réverbération dans cette salle.

Exercice 2 (10 points)

Dans cet exercice, pour simplifier les applications numériques, on supposera :
$10\log_{10}(3) \approx 5$, $10\log_{10}(\pi) \approx 5$. $10\log_{10}(\frac{1}{\pi} + \frac{1}{15.7}) \approx -4$, $10\log_{10}(\frac{4}{62.8}) \approx -12$,
$10\log_{10}(\frac{4}{121.2}) \approx -15$, $10\log_{10}(27.5) \approx 15$, $10^{9.9} \approx 8.10^{9}$, $10^{8.7} \approx 5.10^{8}$.

Dans tout l'exercice, dans la relation pression-puissance, on approchera le terme du champ réverbéré par $\frac{4}{A}$

Deux salles composent un grand Hall (dimensions : Hauteur=5m, Longueurs=10m et 20m, Largeur=4.4m, cf Figure 2) sont séparées par une paroi qui comprend une partie en béton de 20m^2 avec un indice d'affaiblissement acoustique R_b de 40dB à 1000Hz et une porte de 2m^2 ayant un indice d'affaiblissement acoustique R_p de 20dB à 1000Hz.

Q5)Quel est l'indice d'affaiblissement acoustique de la paroi ?

La porte a été mal installée et mal coupée : il existe une lame d'air sous la porte (espacement entre le bas de la porte et le sol) de $\frac{440}{99}$cm (la porte a finalement une surface inférieure à 2m^2).

Q6)Sachant que cette porte mesure 1m de large, calculer l'indice d'affaiblissement acoustique de la paroi avec la porte mal posée et commenter le résultat.

On supposera dans la suite de l'énoncé que la porte est correctement installée (pas de lame d'air) et on prendra R_{paroi} = 30dB.

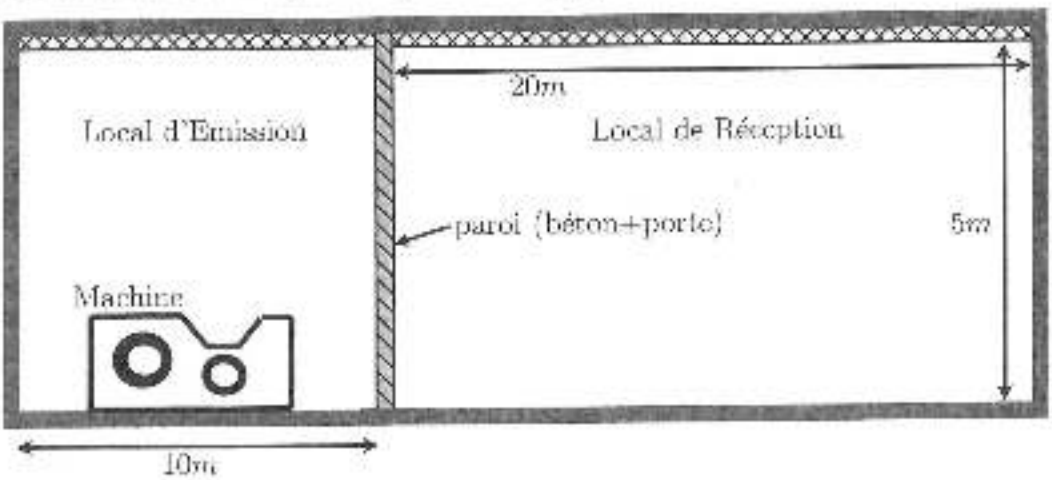


FIGURE 1 – Schéma du Hall avec machine présente dans la salle de gauche.

On installe une machine dans ce hall dans une des deux salles (cf Figure 2).

Toutes les parois sont des murs en béton de 20 cm d'épaisseur à l'exception du plafond qui est traité avec un matériau absorbant de coefficient d'absorption 1 à 1000Hz d'épaisseur négligeable. Le coefficient d'absorption Sabine des parois (béton, porte) est 0,1 à 1000Hz.

Q7)Calculer l'aire d'absorption équivalente dans la pièce d'Emission (pièce de gauche sur la vue de la Figure 2).

Q8)Pour caractériser le niveau de puissance de cette source sonore, on mesure le niveau de pression à 0.5m qui est de 95dB à 1000Hz. En déduire le niveau de puissance à 1000Hz de cette source en supposant que c'est une source omnidirectionnelle (avec un facteur de directivité de 1).

Q9)Calculer le niveau de pression réverbéré dans la salle d'Emission à 1000 Hz quand la machine fonctionne (on arrondira au dB) et en déduire l'intensité acoustique reverbérée.

Q10)Quelle serait la valeur de la puissance acoustique de la machine (à 1000 Hz) si cette machine étaient située dans une salle anéchoïque ?

Q11)En supposant l'absence de transmissions latérales et parasites, quelle est l'intensité transmise par la paroi à 1000Hz quand la machine fonctionne (on suppose que la porte est correctement installée : pas de lame d'air) ?

Q12)En supposant que la paroi devient une source sonore, quelle est la puissance transmise par cette paroi (quand la machine fonctionne) à 1000Hz ?

Q13)Quel est le niveau de pression au centre de la salle de Réception (salle de droite sur la vue de la Figure 2) quand la machine fonctionne dans la salle d'Emission (vous justifierez les hypothèses prises pour ce calcul) ? Est-ce acceptable ?

Q14)Proposer des solutions pour diminuer le niveau de pression déterminé à la question précédente.

Exercice 3 (5 points)

On désire "dimensionner" une flûte traversière et une clarinette. On se place sous hypothèse d'ondes planes harmoniques dans des tubes de longueur L en 1D (selon axe $\vec{x}$) comme montré sur la Figure 2.

On suppose que la pression p et la vitesse $\vec{v}$ sont reliées par l'équation suivante :

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} \text{ avec } p = p(x,t) \text{ et } \vec{v} = v(x,t)\vec{x}$$

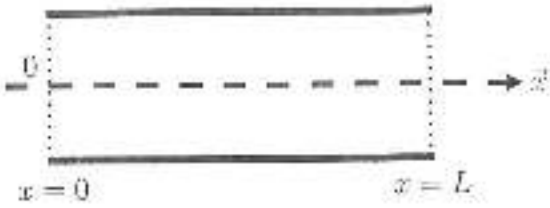


FIGURE 2 – Représentation 1D des tubes.

p et v étant solution de l'équation d'ondes, on obtient (avec $j^2 = -1$ et $\omega = 2\pi f$, f étant la fréquence en Hz)

$$p(x,t) = (Ae^{-jkx} + Be^{jkx})e^{j\omega t} \text{ et } v(x,t) = (Ce^{-jkx} + De^{jkx})e^{j\omega t}$$

où A, B, C, D sont des constantes qui dépendent des conditions aux limites et $k = \dfrac{\omega}{c_0}$.

Q15)Déterminer la relation entre A et C et entre B et D.

On se place dans le cas d'un tube ouvert aux deux extrémités (en $x = 0$ et en $x = L$) qui est le modèle de la flûte.

Q16)Déterminer quelles sont les conditions aux limites en $x = 0$ et en $x = L$.
Q17)En déduire une condition sur k (et donc sur f) pour avoir une pression non nulle dans le tube (on exprimera d'abord B en fonction de A).
Q18)En déduire l'expression de la pression correspondante à la fondamentale et aux deux premières harmoniques et tracer leur allure (la pression dépendra encore de l'une des constantes, par exemple A).
Q19)On choisit de "dimensionner" une flûte traversière en do3 (fréquence fondamentale $f \approx 250$Hz) et une autre en do4 (située à l'octave supérieure à la précédente). Calculer les longueurs que devraient avoir les deux flutes. Est-ce réaliste ?

On se place dans le cas d'un tube ouvert d'un côté (en $x = 0$) et fermé de l'autre (en $x = L$) (modèle de la clarinette).

Q20)Déterminer quelles sont les conditions aux limites en $x = 0$ et en $x = L$.
Q21)En déduire une condition sur k (et donc sur f) pour avoir une pression non nulle dans le tube et montrer que l'on a que des harmoniques impaires.
Q22)En déduire l'expression de la pression correspondante à la fondamentale et aux deux premières harmoniques et tracer leur allure
Q23)On choisit de "dimensionner" une clarinette en "si bémol" (la fréquence fondamentale est le ré2 : $f \approx \dfrac{1000}{6}$ Hz. Calculer la longueur que doit avoir la clarinette. Est-ce réaliste ?

Résumé des principales formules (Sources : luc.jaouen@matelys.com)

Pression et niveau de pression acoustiques

$L_p = 10\log\dfrac{p^2_{eff}}{p^2_{ref}}$ (dB)

$p_{ref} = 2\cdot 10^{-5}$ Pa.

$L_{pg} = 10\log\sum_i 10^{L_{pi}/10}$ (niveau global en dB)

$$p^2_{eff} = \frac{1}{T}\int_{-T/2}^{T/2} p(M,t)^2 dt \quad \text{Pa}^2$$

T période en seconde

Impédance acoustique

$$Z(M,t) = \frac{p(M,t)}{\mathbf{v}(M,t)\cdot\mathbf{n}(M)}$$

Sources acoustiques

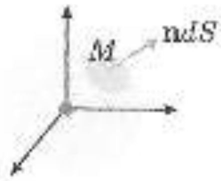
Une source se qualifie par
- son spectre de puissance en fréquence
- sa directivité

Puissance W et niveau de puissance L_W

$W = \int_S \mathbf{I}(M)\cdot\mathbf{n}dS$

$W_{ref} = 10^{-12}$ Watt

$L_W = 10\log\dfrac{W}{W_{ref}}$



Le vecteur intensité est défini comme

$$\mathbf{I} = \frac{1}{T}\int_{-T/2}^{T/2} p(M,t)\cdot\mathbf{v}(M,t)dt$$

Correction
(Source et récepteur dans le même local)

Temps de réverbération (formule de Sabine) $T_r = \dfrac{0.16V}{A}$ en seconde
(durée de décroissance du niveau de bruit de 60 dB)

Aire d'absorption équivalente $A = \sum_i \alpha_i S_i$ m^2

α_i Coefficient d'absorption Sabine de chaque matériau

S Surface de traitée par chaque matériau

Isolation
(Source et récepteur séparés par une paroi)

Indice d'affaiblissement acoustique $R = -10\log(\tau)$ en dB
(Transmission Loss - TL - en anglais)

Transparence acoustique $\tau = \dfrac{\text{Intensité transmise}}{\text{Intensité incidente}}$

Pour une paroi composite : $\tau = \dfrac{\sum_i \tau_i S_i}{\sum_i S_i}$

Isolement standardisé entre deux locaux : $D_{nT} = L_p^E - L_{p,n}^R = D_b + 10\log\left(\dfrac{T_r}{T_{ref}}\right)$ Tref=0.5s

Relation pression - puissance

Niveau de puissance de la source

facteur de directivité de la source

Coeff. d'absorption moyen des matériaux de la salle (souvent négligé par rapport à 1)

$$L_p \simeq L_W + 10\log\left(\underbrace{\frac{Q}{4\pi r^2}}_{\text{Terme de champ direct}} + \underbrace{\frac{4(1-\alpha)}{A}}_{\text{Terme de champ réverbéré}}\right)$$

Niveau de pression (mesuré au sonomètre)

Distance source à récepteur

Terme de champ réverbéré (non nul si on est dans un espace clos)