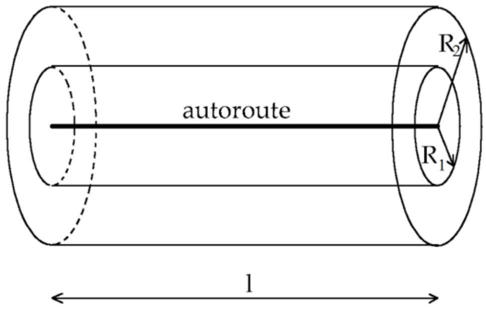
A. Questions

1. Si la source est de forme allongée (source filiforme), les ondes acoustiques émises sont de forme cylindrique (à condition de négliger les pertes acoustiques aux extrémités); la source n'est rien d'autre que l'axe de ces cylindres.



Source filiforme de longueur l >> λ

Soit I_1 l'intensité des ondes sonores mesurées à une distance R_1 de l'autoroute. La puissance des ondes sonores traversant une surface cylindrique S_1 de rayon R_1 autour de l'autoroute se calcule comme :

$$P_{\text{sonore}} = S_1 \cdot I_1 = l \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_1 \cdot I_1 [\text{W}]$$

Par le principe de la conservation de l'énergie, on sait que cette puissance est conservée sur un cylindre de rayon $R_2 > R_1$. On peut donc écrire :

$$P_{\text{sonore}} = l \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_1 \cdot I_1 = l \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_2 \cdot I_2$$

où I_2 est l'intensité sonore à une distance R_2.

Il vient alors que $I_2/I_1 = R_1/R_2$. Donc, dans le cas d'une source sonore linéaire, l'intensité sonore décroît de façon inversement proportionnelle à la distance. Exprimée en dB, cette atténuation donne :

$$\Delta L = 10 \cdot \log_{10}(I_2/I_1) = 10 \cdot \log_{10}(R_1/R_2)$$

À chaque doublement de la distance ($R_2 = 2 \cdot R_1$) correspond donc un affaiblissement de 3 dB puisque :

$$\Delta L = 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{R_1}{R_2}\right) = 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{1}{2}\right) = -3\text{dB}$$

Un trafic routier est assimilable à une source filiforme ; il s'atténue donc faiblement avec la distance (par comparaison à une source ponctuelle).

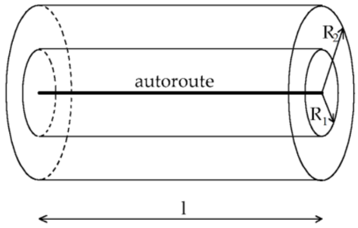
2. L'observateur placé sur un talus dominant la route voit en principe les véhicules et reçoit de ce fait le son direct auquel s'ajoute éventuellement une part de son réfléchi. L'observateur placé en contrebas (et qui ne voit donc pas les véhicules) ne reçoit que le bruit diffracté qui est plus faible que le son direct.

3. Un sol plat et réfléchissant agit comme un miroir pour les ondes sonores. Les auditeurs reçoivent donc en plus du son direct, le son réfléchi par le sol. L'augmentation de niveau sonore prévisible est d'au moins 3 dB (+ 6 dB si les ondes sont en phase, car la pression acoustique double dans ce cas, et donc l'intensité est multipliée par 4).

B. Problèmes

Problème 1 :

Premièrement, on doit se rendre compte qu'une autoroute peut être assimilée à une source sonore linéaire :



a) Soit I_1 l'intensité des ondes sonores mesurées à une distance R_1 de l'autoroute, et I_2 l'intensité mesurée à une distance R_2. La question 1 a permis de dériver la formule suivante pour l'atténuation de l'intensité sonore (en dB) en fonction de la distance à une source sonore linéaire :

$$\Delta L = 10 \cdot \log_{10}(I_2/I_1) = 10 \cdot \log_{10}(R_1/R_2)$$

Dans notre cas, on a : $R_1 = 25$ m et $R_2 = 1'000$ m, d'où $\Delta L = 10 \cdot \mathrm{Log}_{10}(25/1000) = -16$ dB.

À 1 km, le niveau sonore engendré par l'autoroute sera donc égal à 60 − 16 = 44 dB. Cette atténuation n'est qu'un effet géométrique, et est identique pour toutes les fréquences sonores.

b) On doit tenir compte qu'une partie de la puissance des ondes sonores se dégrade en chaleur dans le milieu qu'elles traversent. Cette atténuation supplémentaire dans l'air dépend de l'humidité, de la distance parcourue et de la fréquence des ondes sonores.

Par jour clair, cette atténuation supplémentaire par 100 m de distance vaut environ :

$$\begin{matrix} 0.16\mathrm{dB/100m} \text{ à } 500\mathrm{Hz} \\ 2\mathrm{dB/100m} \text{ à } 4'000\mathrm{Hz} \end{matrix} \text{ (Cf. annexe A 6.5)}$$

Dans notre cas, on aura donc pour une distance parcourue de $R_2 - R_1 = 975$ m, des atténuations supplémentaires de :

$$\begin{matrix} 9.75 \cdot 0.16 = 1.56\mathrm{dB} \text{ à } 500\mathrm{Hz} \\ 9.75 \cdot 2 = 19.5\mathrm{dB} \text{ à } 4'000\mathrm{Hz} \end{matrix}$$

Les fréquences hautes sont beaucoup plus atténuées.

De même par temps de brouillard, on a :

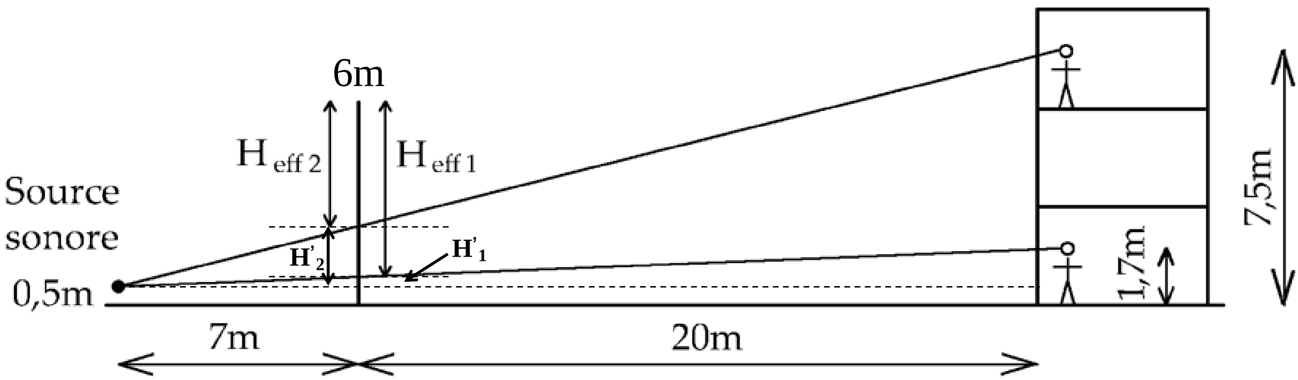
$$\begin{matrix} 1.6\mathrm{dB/100m} \text{ à } 500\mathrm{Hz} \\ 3\mathrm{dB/100m} \text{ à } 4'000\mathrm{Hz} \end{matrix} \qquad \text{(Cf. annexe A 6.5)}$$

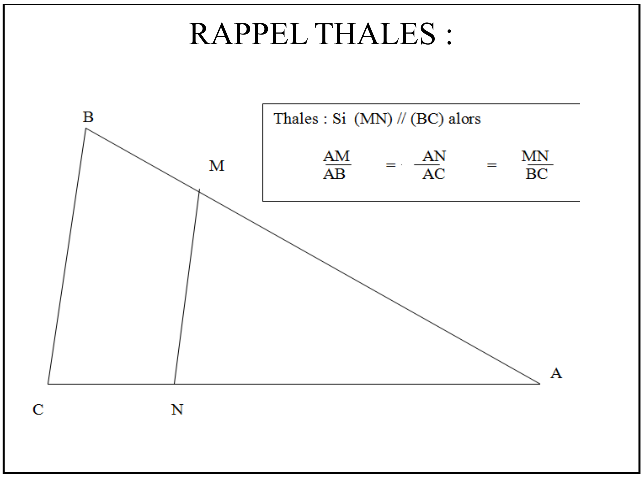
D'où des atténuations supplémentaires de :

$$\begin{matrix} 9.75 \cdot 1.6 = 15.6\mathrm{dB} \text{ à } 500\mathrm{Hz} \\ 9.75 \cdot 3 = 29.3\mathrm{dB} \text{ à } 4'000\mathrm{Hz} \end{matrix}$$

Problème 2 :

On a la situation suivante :





a)
La hauteur effective de la personne au rez-de-chaussée est la hauteur du mur **au-dessus** de la ligne directe entre la source sonore et la personne :

$$H_{\mathrm{eff}\,1} = 6\,m - H_1' - 0.5\,m$$

Avec le théorème de Thales (triangles semblables), on trouve la hauteur H_1' :

$$H_1' = (1.7\text{ m} - 0.5\text{ m}) \cdot \frac{7\,m}{7\,m+20\,m} = 0.31\,m$$

Par conséquence, on trouve la hauteur effective
$H_{\mathrm{eff}\,1}$ = 5.19 m pour l'auditeur au rez-de-chaussée.

b)
La personne au deuxième étage est située à une hauteur de 2.9 m + 2.9 m + 1.7 m = 7.5 m. Ce qui donne une hauteur effective **$H_{\mathrm{eff}\,2}$ = 3.69 m**, car :

$$H_{\mathrm{eff}\,2} = 6\,m - (7.5\text{ m} - 0.5\text{ m}) \cdot \frac{7\,m}{7\,m+20\,m} - 0.5\,m = 3.69\,m$$

c)
À partir des hauteurs effectives $H_{eff\ 1}$ et $H_{eff\ 2}$, on calcule dans les deux cas les fréquences caractéristiques :

$$f_c = \frac{a \cdot c}{2 \cdot H_{\text{eff}}^2} \text{[Hz]} \quad \text{(cf. annexe A 6.6)}$$

où dans notre cas : a = 7 m et c = 340 m/s.

On trouve ainsi : $f_{c1} \approx 44\ Hz$ et $f_{c2} \approx 87.4\ Hz$

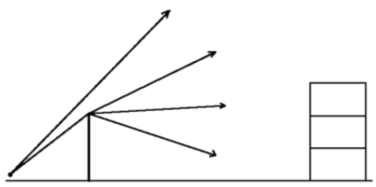
On peut alors dresser le tableau d'atténuation du son en fonction de la fréquence pour les deux étages (cf. annexe A 6.6) :

Rez-de-chaussée :			f_{c1}						
fréquence [Hz]	11	22	44	88	176	352	704	1'408	>1'408
atténuation [dB]	−8	−9	−11	−13	−16	−19	−21	−24	−24

Deuxième étage :				f_{c2}					
fréquence [Hz]	11	21,9	43,7	87,4	174,8	349,6	699,2	1'398	>2'797
atténuation [dB]	−7	−8	−9	−11	−13	−16	−19	−21	−24

On remarque que les fréquences basses sont beaucoup moins bien atténuées par le mur anti-bruit. Ceci provient du phénomène de diffraction des ondes sonores : pour des ondes de longueurs d'onde comparables aux dimensions de l'obstacle, il y a diffraction, c'est-à-dire que ces ondes sonores contournent l'obstacle :

On remarque aussi que les fréquences caractéristiques sont différentes pour chaque étage. Ainsi la protection anti-bruit n'est pas aussi efficace au deuxième étage qu'au rez-de-chaussée.



<u>Problème 3 :</u>

Des ondes stationnaires peuvent apparaître entre le plafond et le plancher, qui sont distants d'une hauteur h. On sait qu'une onde stationnaire apparaît si la longueur de l'espace où elle se manifeste est un multiple entier de sa demi-longueur d'onde. Ceci se traduit donc par la relation:

$$h = n \cdot \lambda/2$$

où h = 2,65 m ; n = 1, 2, 3, 4, … ; λ = longueur d'onde de l'onde stationnaire [m].

Pour calculer les fréquences correspondant à ces longueurs d'onde, on utilise la relation $\lambda \cdot f = c$, où λ = longueur d'onde [m] ; f = fréquence [s^{-1}] = [Hz] ; c = vitesse des ondes sonores = 340 m/s. En combinant ces deux précédentes relations, on trouve donc les fréquences des ondes stationnaires :

$$f_{\text{ondes stationnaires}} = \frac{n \cdot c}{2 \cdot h} = n \cdot 64.15 \text{ Hz} \qquad \text{où } n = 1, 2, 3, 4, \ldots$$

Dessinons les ondes stationnaires avec n = 1 puis n = 2. Il faut premièrement se rendre compte qu'il y a deux grandeurs qui caractérisent l'onde acoustique : la vitesse acoustique (=vitesse des molécules d'air induite par l'onde sonore) ainsi que la pression acoustique p.

Premièrement on dessine les nœuds et les ventres de la vitesse acoustique. Comme les molécules d'air situées juste contre le plafond ou contre le plancher sont en quelque sorte « bloquées » dans leur mouvement, on a des nœuds pour la vitesse acoustique en ces points.

Deuxièmement, on doit dessiner les nœuds et les ventres de la pression acoustique. C'est moins évident, mais si l'on se rappelle le principe de conservation de l'énergie, on s'en tire bien… Il faut donc se rappeler que l'énergie totale s'écrit $E = E_{\text{potentielle}} + E_{\text{cinétique}}$. L'énergie cinétique est proportionnelle à v^2 (vitesse acoustique dans notre cas) et l'énergie potentielle est proportionnelle à p^2 (pression acoustique). L'énergie E étant uniformément répartie dans l'espace compris entre le plancher et le plafond, E = constante. Pour un nœud de la vitesse acoustique on observera donc un ventre de la pression acoustique et réciproquement. On a donc les situations suivantes :