

Chapitre 2 : Acoustique physique :

-I- Acoustique musicale

A- La hauteur d'un son

L'oreille perçoit des sons aigus et des sons graves.

- Un son est d'autant plus aigu que sa fréquence est élevée.
- Un son est d'autant plus grave que sa fréquence est faible.

Remarque : Deux notes sont à l'octave si leurs fréquences sont doubles l'une de l'autre.

$f = 440\text{Hz}$ "la" du diapason

$f = 880\text{ Hz}$ "la" une octave plus haut.

- Les limites de l'oreille humaine :
l'oreille humaine ne perçoit ni les fréquences trop faibles (infrasons)
ni les fréquences trop fortes (ultrasons).

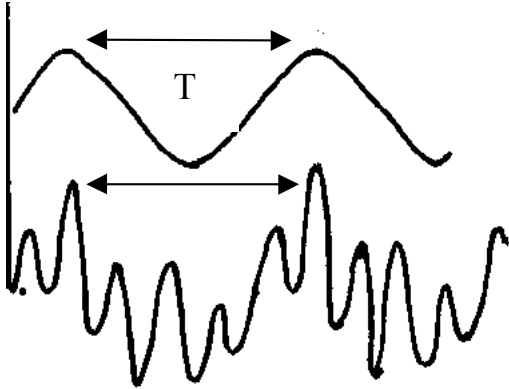
Les fréquences audibles sont limitées à un intervalle :
 $20\text{ Hz} < f < 20\ 000\text{Hz}$

Remarque : Ces fréquences correspondent à peu près aux fréquences émises par la voix humaine.

B- Le timbre d'un son :

Le son produit par une vibration sinusoïdale est désagréable à entendre.

Les instruments de musique ou la voix produisent des sons complexes, périodiques mais pas sinusoïdaux.



Son simple de période T

Son complexe de période T

La forme de la courbe est un des éléments qui fait qu'un violon ne donne pas la même sensation sonore qu'une guitare.

C- L'amplitude d'un son.

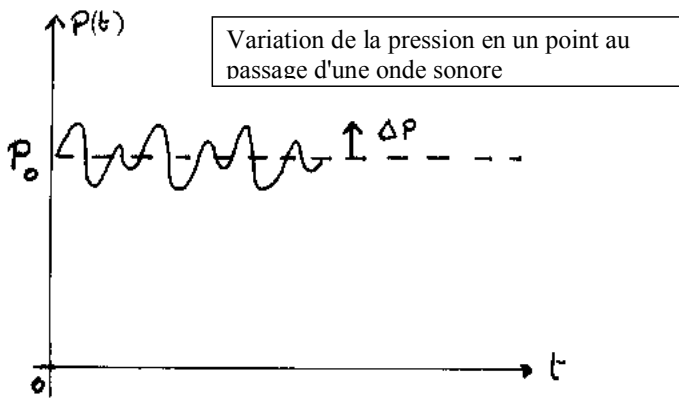
L'amplitude correspond à la valeur de la surpression maximale lors du passage de l'onde sonore. Plus l'amplitude est importante plus le son est fort.

Lorsqu'il n'y a pas de son, la pression est égale à p_0 la pression atmosphérique.

$$p_0 = 10^5 \text{ Pa (Pascal)}$$

Au passage d'une onde sonore cette pression peut augmenter (surpression) ou diminuer (dépression).

La variation de pression $\Delta p = p - p_0$ s'appelle
la pression acoustique



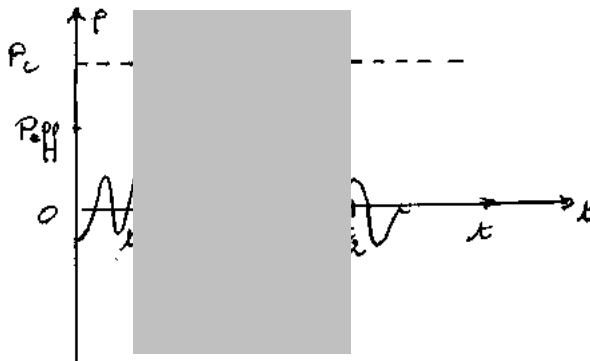
-II- Les grandeurs utilisées en acoustique :

A- La pression acoustique :

La pression acoustique correspond à la variation de pression de l'air (ou de tout autre milieu fluide) au passage de l'onde sonore.

La pression acoustique est en général une fonction périodique du temps.

On distingue deux valeurs remarquables :



p_c est la pression de crête : Pression acoustique maximale sur la durée de l'échantillon étudié.

p_{eff} est la pression efficace, elle se calcule par la formule :

$$p_{eff}^2 = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} p^2(t) dt$$

De façon générale : $p_{eff} < p_c$
et pour un son pur, sinusoïdal :

$$p_{eff} = \frac{p_c}{\sqrt{2}}$$

B- Energie sonore (ou acoustique) :

Comme nous l'avons vu au chapitre précédent, toute vibration est accompagnée d'énergie E.

Lorsque cette vibration produit un son, cette énergie est propagée en même temps que le son, on l'appelle "énergie sonore".

Il est évident que plus le son dure longtemps plus il y a d'énergie sonore donc pour comparer deux sons, nous ramenons cette énergie à la puissance sonore, c'est-à-dire l'énergie sonore propagée en 1 seconde.

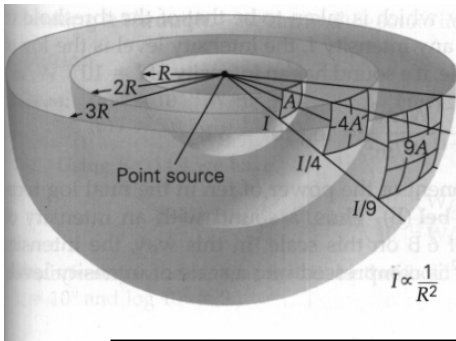
Puissance sonore P_w : Energie sonore propagée en 1 seconde

$$P_w = E/\Delta t$$

 La puissance sonore s'exprime en watts : W

C- L'intensité sonore :

Lorsqu'on se trouve à proximité d'une source sonore, le son est toujours plus fort que lorsqu'on s'en éloigne. Ce phénomène est dû à la répartition de l'énergie sonore dans l'espace.



Pour traduire ce phénomène, on définit une grandeur appelée "Intensité sonore" I .

$$I = P_w/A$$

P : Puissance de la source sonore (en watt : W)

A l'aire de la surface au point où se trouve l'auditeur (en m^2)
donc I est en W/m^2 ou $W.m^{-2}$

C'est l'intensité sonore qui traduit la force d'un son.

- Dans le cas de source sonore qui émet dans toutes les directions, le schéma montre que :

$$I = P_w/4\pi R^2$$

R étant la distance (en mètre) entre la source et l'auditeur.

- Dans le cas où la source émet surtout dans une direction (source d'ultrasons par exemple), il y a en plus un facteur de directivité Q :

$$I = Q.P_w/4\pi R^2$$

Remarque : En un point de l'espace, il n'est pas forcément facile de connaître la position de la source sonore, ni sa puissance. On peut calculer l'intensité sonore à partir de la pression sonore en un point à l'aide de la formule suivante :

$$I = p^2/\rho.v$$

Avec p : pression acoustique efficace au point considéré

ρ : masse volumique du milieu de propagation

v : vitesse du son dans le milieu de propagation

Les limites de l'audition humaine :

- $I < 1,0.10^{-12} W/m^2$, le son est trop faible pour être audible.
- $I > 1,0 W/m^2$, le son provoque une douleur dans l'oreille.

$I_0 = 1,0.10^{-12} W/m^2$ correspond au seuil d'audition (ou seuil d'audibilité) théorique.

D- Le niveau d'intensité sonore (ou niveau d'intensité acoustique) :

Il est très difficile de travailler avec les intensités sonores pour comparer la force de deux sons car on arrive toujours à des écarts très grands.

Exemple : le seuil de douleur est mille milliards de fois plus grand que le seuil d'audibilité !

Pour éviter ce problème, on définit une nouvelle grandeur : le niveau d'intensité sonore L qui s'exprime en décibel (dB).

Niveau d'intensité sonore d'un son d'intensité I

$$L = 10 \log(I/I_0)$$

Remarque : La fonction logarithme permet d'éliminer les trop grandes différences entre les intensités sonores : Soit $I = 1,0 W/m^2$ le seuil de douleur pour l'oreille

$$I/I_0 = 10^{12} \text{ mais } L = 10.\log(I/I_0) = 10*12 = 120 \text{ dB}$$

Le seuil de douleur correspond à un niveau d'intensité sonore égal à 120 dB

Le seuil d'audition théorique correspond à un niveau d'intensité sonore égal à 0 dB.

Remarque : En pratique on peut comparer des sons, soit à partir de leurs pressions, soit à partir de leurs puissances soit à partir de leurs intensités donc on peut trouver différentes grandeurs qui s'expriment en décibels :

Niveau de pression sonore : $L_p = 10 \log(p^2/p_0^2)$
 Niveau d'intensité sonore : $L_I = 10 \log(I/I_0)$
 Niveau de puissance : $L_w = 10 \log(P_w/P_{w0})$

$p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$
 $I_0 = 1 \cdot 10^{-12} \text{ W/m}^2$
 $P_{w0} = 1 \cdot 10^{-12} \text{ W}$

Pour les ondes sphériques vues au II-B on a la relation : $I = P_w / 4\pi R^2$
 donc

$L_p = L_I = L_w + 10 \cdot \log(1/4\pi R^2) = L_w - 10 \cdot \log(4\pi R^2)$

Quelques exemples :

POSSIBILITÉ DE CONVERSATION	SENSATION AUDITIVE	NIVEAU DE	BRUITS INTÉRIEURS	BRUITS EXTÉRIEURS	BRUITS DES VÉHICULES
A VOIX CHUCHOTÉE	Seuil d'audibilité	0	Laboratoire d'acoustique		
	Silence inhabituel	5	Laboratoire d'acoustique		
	Très calme	10	Studio d'enregistrement Cabine de prise de son		
		15		Feuilles légères agitées par vent doux dans jardin silencieux	
		20	Studio de radio	Jardin tranquille	
	Calme	25	conversation à voix basse à 1,50 m		
		30	Appartement dans quartier tranquille		
		35			Bateau à voile
A VOIX NORMALE	Assez calme	40	Bureau tranquille dans quartier calme		
		45	Appartement normal	Bruits minimaux le jour dans la rue	Transatlantique de 1 ^{re} classe
ASSEZ FORTE	Bruits courants	50	Restaurant tranquille	Rue tranquille	Auto silencieuse
		60	Grands magasins Conversation normale Musique de chambre	Rue résidentielle	Bateau à moteur
		65	Appartement bruyant		Automobile de tourisme sur route
	Bruyant mais supportable	70	Restaurant bruyant Musique	Circulation importante	Wagons-lits modernes
		75	Atelier dactylo Usine moyenne		Métra sur pneus
DIFFICILE	Pénible à entendre	85	Radio très puissante Atelier de tournage et d'ajustage	Circulation intense à 1 m	Bruits de métra en marche Klaxons d'autos
		95	Atelier de forgeage	Rue à trafic intense	Avion de transport à hélices à faible distance
OBLIGATION DE CHERCHER POUR SE FAIRE ENTENDRE	Très difficilement supportable	100	Scie à ruban Presse à découper de moyenne puissance	Marteau-piqueur dans rue à - 5m	Moto sans silencieux à 2m Wagon de train
		105	Roboteuse		Métra (intérieur de wagon de quelques lignes)
		110	Atelier de chaudronnerie	Rivage à 10 m	Train passant dans une gare
IMPOSSIBLE	Seuil de douleur Exige une protection spéciale	120	Banc d'essais de moteurs		Moteurs d'avion à quelques mètres
		130	Marteau-pilon		
		140	Turbo-réacteur au banc d'essais		

Exercice : a) Quel est le niveau d'intensité sonore donné par deux sources donnant chacune 60dB ?
 $L = 60\text{dB}$ et comme $L = 10 \cdot \log(I/I_0)$, $L' = 10 \cdot \log(2I/I_0) = 10 \log(2) + 10 \cdot \log(I/I_0) = 10 \cdot 0.3 + L = L + 3 = 63\text{dB}$
 b) Quel est le niveau d'intensité sonore donné par dix sources donnant chacune 60dB ?
 $L'' = 10 \cdot \log(10I/I_0) = 10 \log(10) + 10 \cdot \log(I/I_0) = 10 \cdot 1 + L = L + 10 = 70\text{dB}$
 c) Combien faut-il de sources donnant chacune 60dB pour obtenir un niveau d'intensité de 120dB ?
 $L''' = 10 \cdot \log(I'''/I_0)$ et $L = 10 \cdot \log(I/I_0)$ et $L''' - L = 10 \cdot \log(I'''/I_0) - 10 \cdot \log(I/I_0) = 10 \cdot \log((I'''/I_0) \cdot (I_0/I))$
 $L''' - L = 10 \cdot \log(I'''/I)$ donc $120 - 60 = 10 \cdot \log(I'''/I)$, soit $\log(I'''/I) = 60/10$ soit $I'''/I = 10^6$ et $I''' = 10^6 I$
 Il faudra donc un millions de sources de 60dB pour donner 120 dB !

E- Spectre de sensibilité de l'oreille humaine :

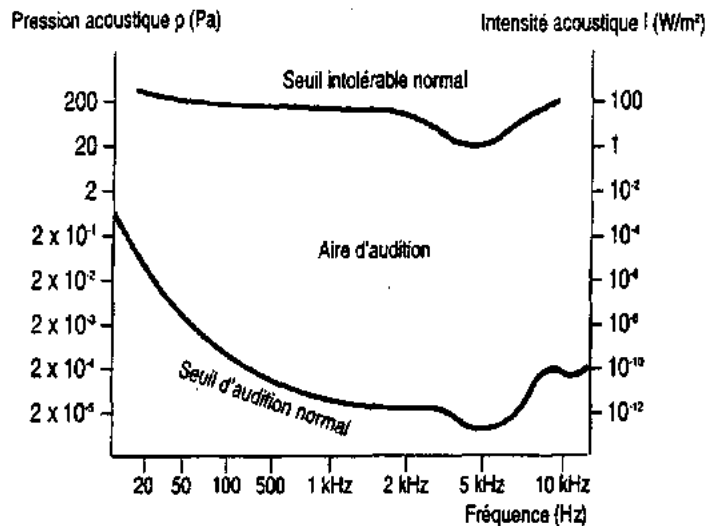


Fig. 7. — Aire d'audition du système auditif humain.

On voit sur ce graphe que la perception de l'oreille humaine dépend de la fréquence du son.

Seuil de douleur :

- à 50 Hz, on supporte les sons jusqu'à 200 Pa
- à 5000 Hz, on ne les supporte que jusqu'à 20 Pa

Seuil d'audibilité :

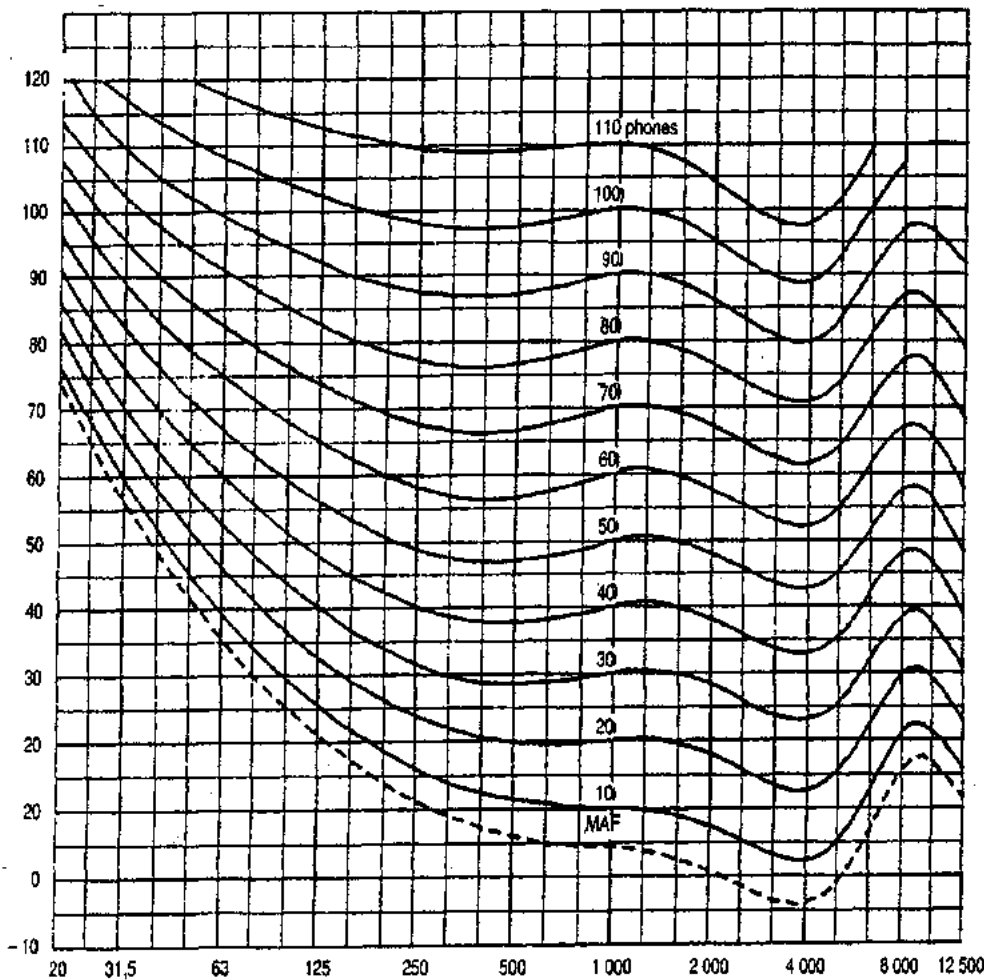
- à 50 Hz, un son de $2 \cdot 10^{-3}$ Pa n'est pas audible
- à 5000 Hz, un son $2 \cdot 10^{-5}$ Pa, cent fois plus faible est audible

Exercice : Transformez les valeurs d'intensités acoustiques en niveau d'intensité acoustique.

Courbes isotoniques ou courbes égal niveau acoustique (Courbes de Fletcher et Munson) :

Tous les points situés sur une même ligne correspondent à des sons perçus de la même façon par l'oreille humaine.

Par exemple, un son de 65dB à 50Hz nous semblera aussi fort qu'un son de 40 dB à 1000Hz.



On exprime le **Niveau acoustique de sensation sonore** en **phones** ou **dB(A)**.

L'oreille humaine n'a pas la même sensibilité à toutes les fréquences. Elle est plus sensible aux sons entre 2000 Hz et 5000 Hz (phénomène de résonance avec le tympan) et beaucoup moins sensible aux basses et aux hautes fréquences.

Niveau de référence : à $f = 1000$ Hz alors $N(\text{phones}) = L(\text{dB})$.

Tous les autres niveaux à des fréquences différentes sont comparés à ce niveau

BTS EC 98 ACOUSTIQUE 1^{ère} partie

Les valeurs des différents niveaux de puissance, d'intensité et de pression seront toujours arrondies à l'unité la plus proche. Les données à utiliser sont fournies en fin d'exercice.

Une source sonore de puissance acoustique $5 \cdot 10^{-2}$ W émet dans un local un son de fréquence $f = 1000$ Hz.

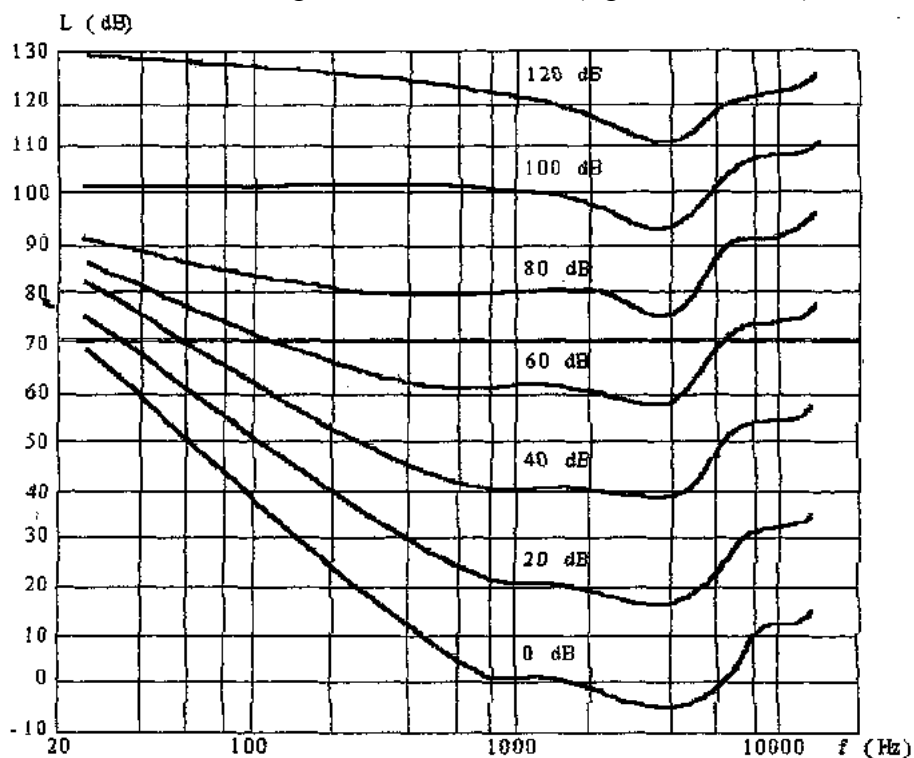
1 / Déterminer le niveau de puissance L_W de cette source.

2/ En supposant cette source omnidirectionnelle et ponctuelle, déterminer le niveau d'intensité L_I en un point M situé à 5 mètres de cette source. On se placera dans l'hypothèse du champ direct.

3/ A quelle distance de la source le niveau d'intensité est-il inférieur de 6 dB à celui déterminé au point M ?

BTS EEC 94Acoustique (7 points)

La sensation sonore transmise au cerveau dépend du niveau d'intensité sonore et de la fréquence de vibration. On donne les courbes d'égalité sensation sonore (figure ci-dessous).



- À 1000 Hz, quels sont les seuils d'audibilité et de douleur?
 - Quel est le niveau sonore d'un son de 40 Hz qui produit la même sensation sonore qu'un son de 40 dB et de fréquence 1000 Hz ?
 - Pour quels niveaux de pression la sensibilité de l'oreille est-elle la moins dépendante de la fréquence?
- Quel est le nom de l'appareil qu'utilisent les professionnels de l'isolation phonique pour mesurer le niveau sonore ?
- La célérité du son dans l'air étant de 340 m/s, calculer la longueur d'onde d'un son de fréquence 1000 Hz.
- Un son passe de l'air dans l'eau. Parmi les grandeurs suivantes, préciser celles qui ne changent pas, celles qui augmentent et celles qui diminuent :
célérité - longueur d'onde - fréquence - amplitude
- Quelle est, en décibels, la diminution du niveau d'intensité acoustique lorsqu'il y a doublement de la distance de l'auditeur à la source ?
- Un observateur mesure le niveau d'intensité $L = 86$ dB d'une source A. Une autre source B émet alors un son qui se superpose au premier ; l'observateur mesure le niveau L résultant et trouve $L = 93$ dB :

Calculer le niveau L_B du son émis par B que l'observateur pourrait mesurer si la source B agissait seule.

7. Calculer le niveau de puissance acoustique produit par une source sonore de puissance $W=0,05$ watt ; on prendra $W_0=10^{-12}$ W.
8. Définir le facteur τ de transmission d'une paroi.
9. Calculez l'indice d'affaiblissement acoustique R d'une paroi homogène quand $\tau = 0,5$.

Les questions 8 et 9 seront traitées dans le chapitre suivant.

BTS BTP 99

I - ACOUSTIQUE (8 points)

Sachant que les symboles des grandeurs fondamentales sont :

L pour la longueur, T pour le temps, M pour la masse ;

1) Exprimer les dimensions :

- d'une masse volumique : ρ ,
- d'une vitesse : v ,
- d'une accélération : a ,
- d'une force : F ,
- d'une pression : p ,
- d'une énergie : E .

2) L'intensité acoustique en un point situé près d'une source sonore peut être calculée à partir de deux relations différentes :

- soit la relation (1)

$$I = \frac{p^2}{\rho v} \quad \text{avec :}$$

p : pression acoustique efficace au point considéré,

ρ : masse volumique du milieu où se trouve le point considéré,

v : vitesse de propagation du son dans le milieu où se trouve le point considéré.

- soit la relation (2)

$$I = \frac{P}{S}$$

a) Expliquer ce que représente P et S dans la relation (2).

b) Montrer que la dimension de I est la même dans chacune des deux relations (1) et (2).

c) Calculer l'intensité acoustique en un point M, situé dans l'air à 20°C, à 10 m d'une source sonore, de puissance 0,05 W, émettant uniformément dans toutes les directions.

d) Déduire du résultat de la question précédente le niveau acoustique et la pression acoustique efficace au point M.

Vérifier que cette dernière valeur est identique à celle que l'on obtiendrait en utilisant la relation (1).

3) En fait la pression acoustique en M varie en fonction du temps suivant la relation

$$p_M = p\sqrt{2} \sin(2000\pi t) \quad \text{avec :}$$

p : pression acoustique efficace en M.

a) Calculer l'amplitude, la pulsation et la période de la pression p_M .

b) La fréquence du son émis est la même que celle de p_M . À quelle catégorie de sons appartient-il ? Est-il audible par l'oreille humaine? Justifier votre réponse.

Données pour tout l'exercice :

- pression acoustique de référence : $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa,
- intensité acoustique de référence : $I_0 = 1 \cdot 10^{-12}$ W.m⁻²,
- vitesse du son dans l'air à 20°C : 340 m.s⁻¹,
- masse volumique de l'air à 20°C : 1,2 kg.m⁻³