

SOMMAIRE

CHAPITRE 1 : LE SIGNAL SONORE

1 DEFINITION DU SIGNAL SONORE	13
1.1 <i>Le son</i>	13
1.2 <i>Signal sonore</i>	14
1.3 <i>Critères d'appréciation du son</i>	14
1.4 <i>Notion de fréquence</i>	16
2 REPRESENTATION DU SIGNAL SONORE	16
2.1 <i>Les différentes représentations graphiques du signal sonore</i>	16
2.2 <i>Composantes principales d'un signal sonore</i>	20
3 MODELISATION MATHEMATIQUE DU SIGNAL SONORE	21
3.1 <i>Modélisation du son pur</i>	21
3.2 <i>Association de sons purs</i>	23
3.3 <i>Battements</i>	25
3.4 <i>Modélisation du son composé</i>	26
4 LES DIFFERENTES FAMILLES DE SONS COMPOSÉS	27
4.1 <i>Son harmonique</i>	27
4.2 <i>Son inharmonique</i>	28
4.3 <i>Le son bruité</i>	29
4.4 <i>Les bruits normalisés en acoustique (Bruit blanc – Bruit rose)</i>	30
5 CARACTERISTIQUES AUDITIVES PRINCIPALES D'UN SIGNAL SONORE HARMONIQUE	30
5.1 <i>La hauteur</i>	30
5.2 <i>Le timbre</i>	31
5.3 <i>L'intensité sonore</i>	32
5.4 <i>La durée</i>	32
6 RELATION HAUTEUR MUSICALE / FREQUENCE	32
6.1 <i>Correspondance entre hauteur musicale et fréquence</i>	32
6.2 <i>Relation de passage fréquence-hauteur musicale</i>	32
6.3 <i>Intervalles musicaux</i>	33

RESUME : LE SIGNAL SONORE	34
ANNEXE 1 : Fonction trigonométrique	35
ANNEXE 2 : Mouvement vibratoire	37
ANNEXE 3 : Evolution temporelle de la forme d'onde / spectre	39
ANNEXE 4 : Correction fréquentielle	41
EXERCICES : LE SIGNAL SONORE	44
CORRECTION DES EXERCICES : LE SIGNAL SONORE	47

CHAPITRE 2 : PROPAGATION DU SON en champ libre

1 ONDES	51
2 PROPAGATION DES ONDES SONORES DANS LE MILIEU AIR	51
2.1 <i>Nature du phénomène physique qui se propage</i>	51
2.2 <i>Le milieu Air</i>	52
2.3 <i>Pression acoustique – Vitesse acoustique</i>	53
3 SOURCE ISOTROPE - CARACTERISTIQUES ACOUSTIQUES	56
3.1 <i>Hypothèses de travail</i>	56
3.2 <i>Puissance acoustique d'une source isotrope (W)</i>	57
3.3 <i>Expression de l'amplitude de la pression acoustique en fonction de W</i>	57
3.4 <i>Intensité acoustique (I) d'une source isotrope</i>	57
3.5 <i>Relation entre pression acoustique et intensité acoustique</i>	58
4 SOURCE DIRECTIVE – CARACTERISTIQUES ACOUSTIQUES	58
4.1 <i>Notion sur le rayonnement des sources</i>	58
4.2 <i>Facteur d'encastrement Q_e</i>	59
4.3 <i>Facteur de directivité propre à la source Q_d</i>	60
4.4 <i>Facteur de directivité totale Q</i>	60
4.5 <i>Intensité acoustique (I) et pression acoustique (p) d'une source directive</i>	60
5 LES NIVEAUX SONORES	61
5.1 <i>Le décibel (dB)</i>	61
5.2 <i>Niveau de puissance d'une source</i>	62
5.3 <i>Niveau de pression acoustique</i>	63
5.4 <i>Détermination de la pression acoustique à partir du niveau de pression</i>	63
5.5 <i>Relation entre niveau d'intensité (ou de pression) et niveau de puissance pour une source isotrope</i>	64

CHAPITRE 1

Le signal sonore

Ce chapitre aborde la différence que l'on doit effectuer entre le son (ce qui peut être perçu par nos oreilles) et le signal sonore (ce qui peut être traité, stocké, transporté par le technicien du son). L'identification des caractéristiques physiques composant le signal sonore (amplitude, fréquences, durée) est détaillée, ainsi que la mise en relation avec les caractéristiques auditives (intensité, hauteur, timbre...). La relation signal sonore-son est d'autant plus délicate, que le signal sonore revêt des natures très différentes dans les différentes exploitations dont il fait l'objet (électrique, mécanique, acoustique).

1 DEFINITION DU SIGNAL SONORE

1.1 Le son

On définit par son, tout événement pouvant être reçu par nos oreilles. Cet événement vient d'une modification mécanique de notre environnement le plus proche : l'air. L'étude de cette modification mécanique de son origine (émission) à sa réception par notre oreille est l'**Acoustique** (Science du son).

Le son est la conséquence d'une interaction mécanique particulière (choc ou action entretenue) entre deux structures (doigt et corde de guitare, objet qui tombe sur le sol, le vent dans les feuilles d'un arbre...). Les éléments matériels qui produisent le son sont appelés la **source sonore**. La source sonore **vibre** (mouvement résultant de l'interaction mécanique). Chaque point de la source a un mouvement d'oscillation autour d'une position dite de repos (voir **fig 1-1**).

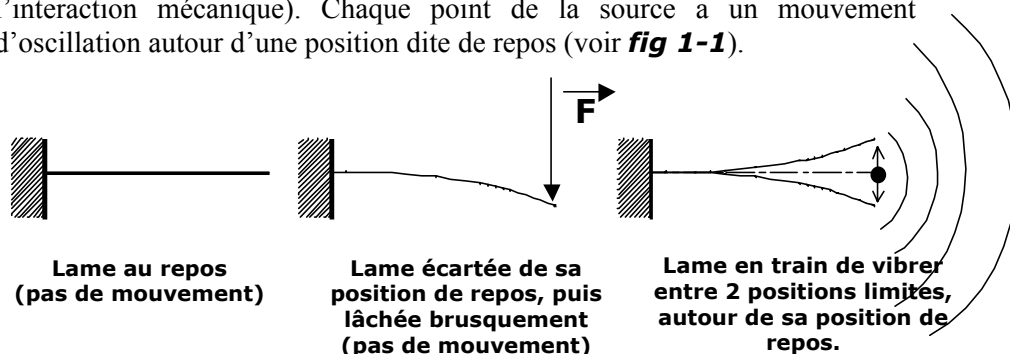


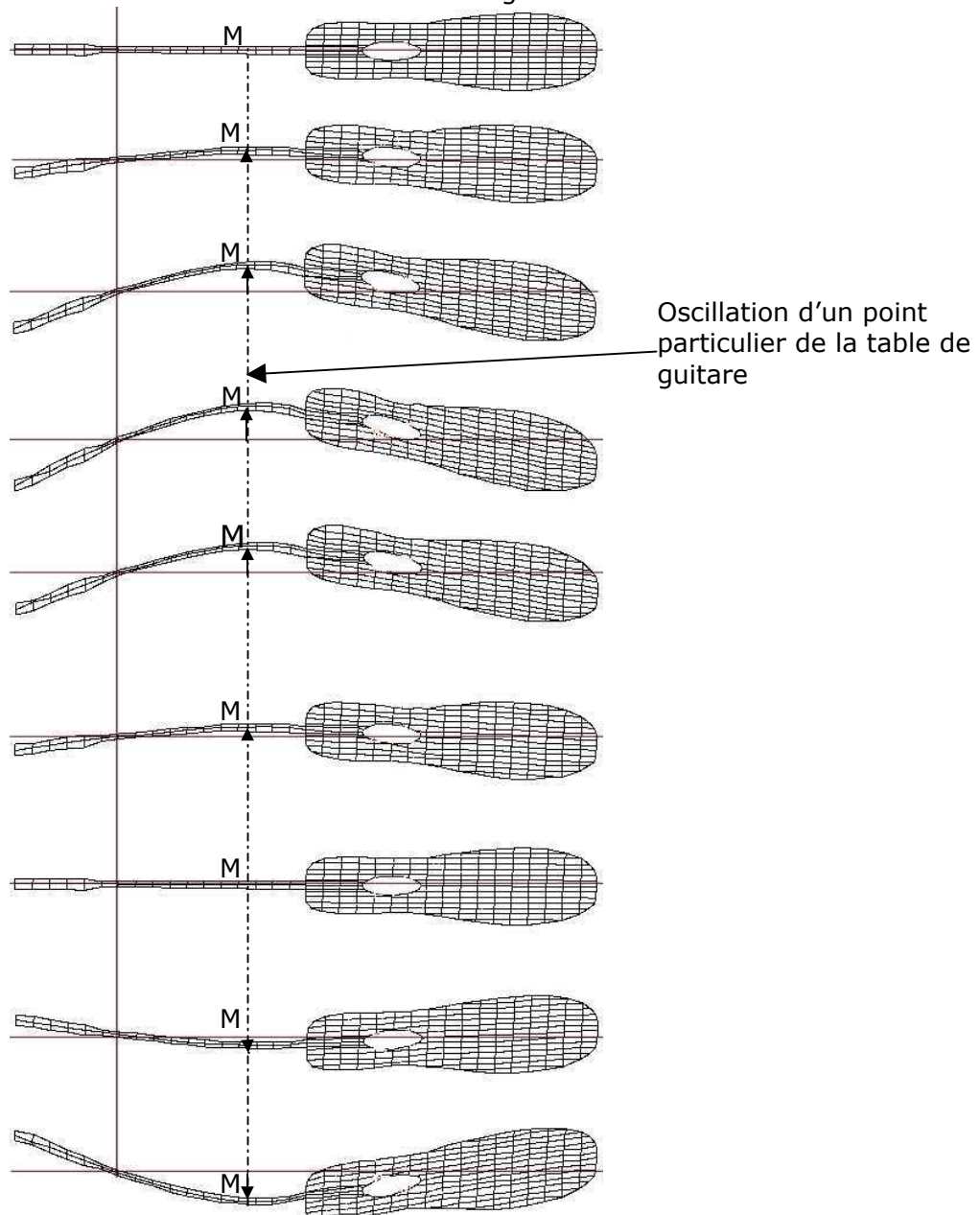
fig1-1 : Emission d'un son provoquée par une lame vibrante.

Toute caractéristique du son aura pour modèle ce mouvement particulier qui en est l'origine : **le mouvement vibratoire ou mouvement d'oscillation**.

Mouvement vibratoire

Un corps est en mouvement vibratoire, si les points qui le constituent évoluent de manière cyclique autour d'une position dite d'équilibre (ou de repos). Le mouvement de chaque point est qualifié d'oscillation.

Evolution du mouvement de vibration de la table de guitare en fonction du temps



Si l'ensemble des points du corps oscillent de manière identique, le mouvement vibratoire et le mouvement d'oscillation sont confondus. C'est le cas du haut-parleur notamment.

Exercices

Le signal sonore

Exercice 1

Soit un signal sonore de période $T = 0,01$ s et d'amplitude 5.

- 1) **Calculer** la fréquence fondamentale de ce signal.
- 2) **Déterminer** de la question précédente, la valeur des fréquences des harmoniques de rang $n = 4$ et $n = 6$.
- 3) **Calculer** l'amplitude des 2 harmoniques précédents si le rapport entre l'amplitude de la fondamentale et l'amplitude de rang n varie selon n^2 .

Exercice 2

Soit le signal dont la fonction mathématique est : $x(t) = 3.\sin(200.t + \varphi)$

- 1) **Calculer** la fréquence f du signal. En déduire sa période T .
- 2) **Dériver**, par rapport au temps t , $x(t)$ (on notera $v(t)$ cette fonction dérivée).
- 3) **Dériver**, par rapport au temps t , $v(t)$ (on notera $a(t)$ cette fonction dérivée).
- 4) **Calculer** le rapport entre les amplitudes de $a(t)$ et $x(t)$ d'une part et entre $v(t)$ et $x(t)$ d'autre part. Conclusion.

Exercice 3

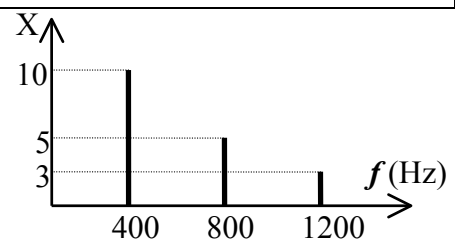
L'oreille humaine est sensible à la variation de la pression atmosphérique. La variation minimale que peut percevoir l'oreille humaine est de 2.10^{-5} Pa, la pression atmosphérique étant de 10^5 Pa. De plus cette variation doit se faire pour des fréquences comprises entre 16 Hz et 20 000 Hz (pour une bonne oreille). C'est ce que l'on nomme le domaine audible.

Décrire l'expression $p(t)$ du signal minimum pour les fréquences limites du domaine audible.

Exercice 4

Soit le spectre suivant :

Donner l'expression mathématique $X(t)$ de ce signal.



Exercice 5

Soit le signal :

$$X(t) = 10.\sin(400.t) + 15.\sin(500.t) + 8.\sin(600.t) + 6.\sin(700.t) + 4.\sin(800.t)$$

- 1) **Tracer** le spectre de $X(t)$.
- 2) **Est-ce** un signal harmonique ? Si oui **déterminer** la fréquence fondamentale.

On peut écrire le système d'équations suivant :

$$f_{\text{fond}} = \frac{C}{4.L} = 55 \text{ Hz}$$

$$f_{\text{fond}'} = \frac{C}{4.(L + l)} = 58,27 \text{ Hz} \quad (l \text{ étant la longueur à rajouter pour faire l'accord)}$$

$$\text{On obtient : } \frac{f_{\text{fond}}}{f_{\text{fond}'}} = \frac{(L + l)}{L}$$

$$\text{D'où : } l = L. \left[\frac{f_{\text{fond}}}{f_{\text{fond}'}} - 1 \right] = -7,96 \text{ cm}$$

(il faut donc diminuer la longueur du tuyau de 7,96 cm, ce qui correspond à un déplacement d'environ 4 cm pour la coulisse d'accord).

5) Longueur de la coulisse correspondant au troisième piston

Le calcul est similaire à la question précédente. On abaisse le son de trois demi-tons en activant le troisième piston, ce qui revient à ajouter la longueur l_3 à la longueur du tuyau. D'où le système d'équation :

$$f_{\text{fond}} = \frac{C}{4.L} = 58,27 \text{ Hz}$$

$$f_{\text{piston3}} = \frac{C}{4.(L + l_3)} = 58,27. \left(\sqrt[12]{2} \right)^{-3} = 49,06 \text{ Hz} \quad (l_3 \text{ étant la longueur de la coulisse recherchée)}$$

$$\text{On obtient : } \frac{f_{\text{fond}}}{f_{\text{piston3}}} = \frac{(L + l_3)}{L}$$

$$\text{D'où : } l_3 = L. \left[\frac{f_{\text{fond}}}{f_{\text{piston3}}} - 1 \right] = 26,65 \text{ cm}$$

6) Evaluation de la puissance sonore dans la trompette :

Remarque : on considère pour les différents calculs de pressions leurs valeurs efficaces.

Déterminons la pression incidente : $p_r = p_i.(1 - (k.r)^2)$

Et avec $|p_i| = |p_r| + |p_t|$

On arrive à l'expression : $|p_i| = p_i.(1 - (k.r)^2) + |p_t|$

D'où : $p_i = \frac{p_t}{1 - (1 - (k.r)^2)} = 260 \text{ Pa}$ (ce qui correspond à un niveau de pression : 142 dB !!)

La puissance acoustique est définie par : $W_{\text{acous}} = I.S = \frac{p^2}{\rho.C}.S$ (avec $S = \pi.r^2$; nous sommes en ondes planes).

Avec $\rho.C = 400$, on obtient une puissance acoustique : $W_{\text{acous}} = 0,12 \text{ watt}$

Exercice 8 :

1) Microphone dynamique hypercardioïde

a) $M_{\theta} = k.(0,35 + \cos\theta)$, calculer k .

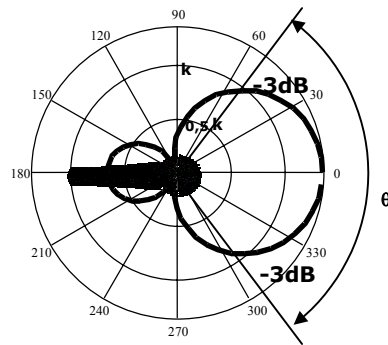
Dans l'axe, on mesure une efficacité de $M_{\text{axial}} = 2,5 \text{ mV/Pa}$, ce qui signifie que pour $\theta = 0^\circ$, $M_{0^\circ} = M_{\text{axial}} = k.(0,35 + 1)$

$$\Leftrightarrow k = \frac{2,5}{1,35} = 1,85 \text{ mV/Pa}$$

b) Angle de directivité à -3 dB de ce microphone.

Il faut déterminer θ° tel que : $20.\log\frac{M_{\theta}}{1} - 20.\log\frac{M_{\text{axial}}}{1} = -3\text{dB}$

$$\begin{aligned} \Rightarrow 20.\log\frac{M_{\theta}}{M_{\text{axial}}} &= -3\text{dB} \\ \Rightarrow \frac{M_{\theta}}{M_{\text{axial}}} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \Rightarrow k.(0,35 + \cos\theta) &= \frac{1}{\sqrt{2}}.k.(0,35 + 1) \\ \Rightarrow \cos\theta &= \frac{1}{\sqrt{2}}.(0,35 + 1) - 0,35 \\ \Rightarrow \theta &= 53^\circ \end{aligned}$$



2) Microphone dynamique supercardioïde

$M_{\theta} = k'.(\frac{\sqrt{2}}{2} + \cos\theta)$ (k' étant une constante).

a) Coefficient k'

Dans l'axe, on mesure une efficacité de $M_{\text{axial}} = 3,8 \text{ mV/Pa}$, ce qui signifie que pour

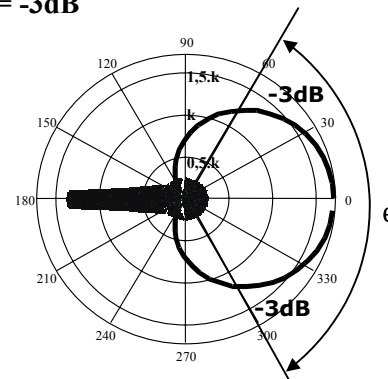
$$\theta = 0^\circ, M_{0^\circ} = M_{\text{axial}} = k'.(\frac{\sqrt{2}}{2} + 1) \Rightarrow k' = \frac{3,8}{\frac{\sqrt{2}}{2} + 1} = 5,37 \text{ mV/Pa}$$

b) Angle de directivité à -3 dB

Il faut déterminer θ° tel que : $20.\log\frac{M_{\theta}}{1} - 20.\log\frac{M_{\text{axial}}}{1} = -3\text{dB}$

Ce qui revient à écrire que :

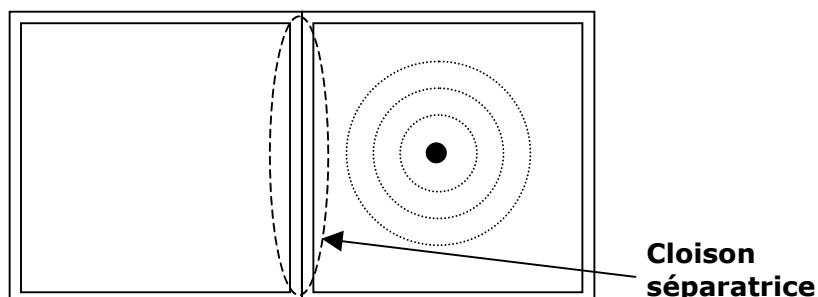
$$\begin{aligned} k'.(\frac{\sqrt{2}}{2} + \cos\theta) &= \frac{1}{\sqrt{2}}.k'.(\frac{\sqrt{2}}{2} + 1) \\ \Rightarrow \cos\theta &= \frac{1}{\sqrt{2}}.(\frac{\sqrt{2}}{2} + 1) - \frac{\sqrt{2}}{2} = 0,5 \\ \Rightarrow \theta &= 60^\circ \end{aligned}$$



9.3 Principe de l'isolement acoustique

On définira par local source, l'endroit où est produit le son et par local récepteur, l'endroit où l'on souhaite se protéger du bruit.

fig6-14 : Définition de l'étude pour la détermination de l'isolement.



On distingue trois grandeurs mesurées qui peuvent caractériser l'isolement :

- l'isolement brut **D** (la plus simple à mettre en œuvre, puisqu'elle consiste à faire les mesures in situ) ;
- l'isolement normalisé **D_n** (identique à l'isolement brut, mais tenant compte de termes correctifs) ;
- l'indice d'affaiblissement acoustique **R** (plus théorique que les deux précédents, puisqu'il caractérise le pouvoir séparateur de la cloison, ou d'un matériau spécifique de construction. Ce type de mesure ne peut se faire qu'en laboratoire).

9.3.1 Isolement brut **D**

L'isolement brut représente l'isolement réel qui existe entre le local source et le local récepteur. Pour le déterminer il faut donc le mesurer. Pour ce faire on utilise un sonomètre et une source de bruit rose que l'on dispose dans le local source. Après déclenchement de la source, on mesure le niveau **L_S** en dBA dans le local source et dans une zone où le champ réverbéré est majoritaire (pour obtenir un niveau constant) puis on mesure le niveau **L_R** dans le local de réception toujours en dBA. La valeur de l'isolement brut est alors :

$$D = L_S - L_R \quad \boxed{E6-14}$$

Le problème de l'isolement brut est qu'il est tributaire des caractéristiques d'absorption du local de réception puisqu'on mesure majoritairement un niveau réverbéré. Le pouvoir séparateur de la cloison séparant les deux locaux n'est pas parfaitement évalué.

Le contrôle de l'isolement doit nécessairement se baser sur une mesure mais doit pouvoir pondérer son résultat par les caractéristiques d'absorption du local de réception.

9.3.2 Isolement normalisé **D_n**

L'isolement normalisé représente l'isolement mesuré tenant compte des caractéristiques d'absorption du local de réception.

En effet, l'un des facteurs qui influencent le niveau acoustique reçu est la quantité de matériaux absorbants dans la pièce, ce qui se traduit par le temps de réverbération propre à ce local **RT₆₀** et qu'il faut en conséquence mesurer. Plus ce temps est grand, plus le niveau augmente. Le terme correctif de l'isolement brut est défini par :

$$+10 \log (RT_{60}/RT_{0,60})$$

où **RT_{0,60}** est le temps de réverbération de référence fixé à 0,5 s par la norme.