

4

Ondes Sonores

1. Production et propagation

1.1. Source sonore

Une source sonore est une *surface vibrante* mettant en mouvement le milieu environnant.

Exemples :

1. Voix humaine : *Cordes vocales*.
2. Haut-parleur : *Vibration d'une membrane*.

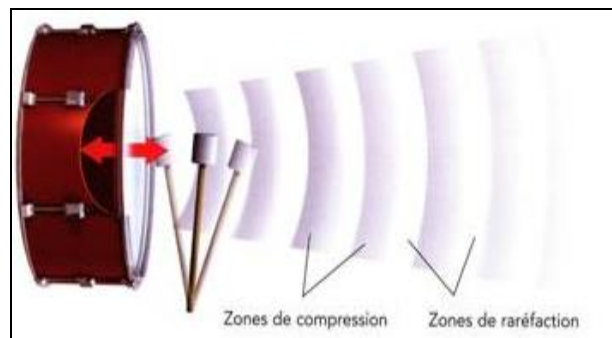
1.2. Production

Le son est produit par des *corps en vibration*. Les vibrations provoquent alors une perturbation de la pression du milieu. L'onde sonore est donc une onde de vibration mécanique.

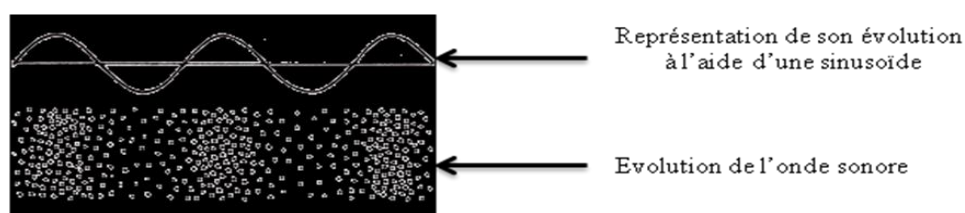
1.3. Propagation

Une onde sonore est la propagation de proche en proche d'une perturbation caractérisée par une vibration des molécules du milieu autour de leurs positions d'équilibre. Ainsi, les molécules s'entrechoquent entre elles pour transmettre la déformation subissant ainsi de micro-déplacements. Ces molécules reviennent à leur position initiale une fois la perturbation passée.

Lors de la propagation, l'onde sonore se déplace en créant des zones de compression (plus dense) et de dépression (moins dense) des molécules de l'air. l'onde sonore est *longitudinale*: la direction de propagation et la direction de déformation du milieu sont les mêmes.



(a)



(b)

Fig.1– Production de sons lorsqu'on frappe un tambour. Les variations de pression engendrées par les vibrations de la membrane du tambour créent des zones de compression et de raréfaction, c'est-à-dire une onde longitudinale.

2. Fréquence et perception sonore

L'oreille humaine peut percevoir des sons dont les fréquences sont comprises entre 20 Hz et 20 000 Hz. Cependant la sensibilité maximale correspond à 1 000 ou 2 000 Hz.

- Un infrason est une onde acoustique de fréquence inférieure à 20 Hz.
- Un ultrason est une onde acoustique de fréquence supérieure à 20 kHz.

La hauteur d'un son est la qualité liée à la fréquence du son. Les sons graves correspondent aux fréquences basses, et les sons aigus aux fréquences hautes.

- Son grave : 20 à 500 Hz;
- Son medium : 500 à 4000 Hz;
- Son aigu : 4 à 20 KHz.

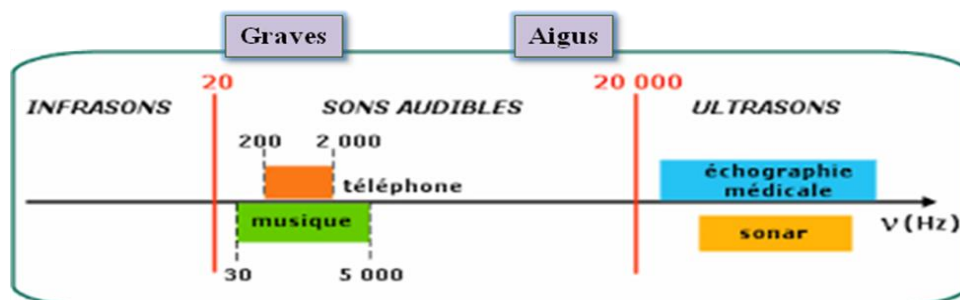
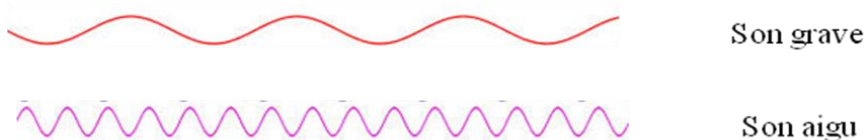


Fig.2 – Echelle de fréquences des ondes acoustiques.

Exemples :



3. Timbre d'un son

Le timbre, l'une des qualités du son, permet de distinguer les sons émis par différents instruments.

3.1. Son pur

Un signal qui se reproduit identique à lui-même à intervalle de temps régulier est un signal périodique. Un signal sinusoïdal est un signal périodique particulier.

Si un microphone capte un son et que le signal électrique visualisé est parfaitement sinusoïdal, alors ce son est appelé *son pur*.

Un son pur est sinusoïdal et son spectre ne présente qu'une unique harmonique: *le fondamental*.

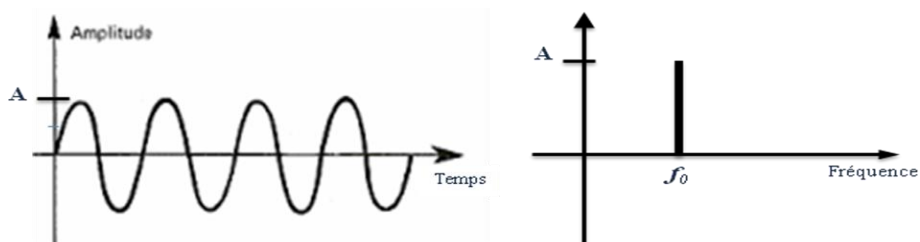


Fig.3 – Spectre d'un son pur.

Exemple : Le diapason émet un son pur.

3.2. Son complexe

Il est possible de décomposer un signal sonore de fréquence f , associé à la propagation d'une onde périodique non sinusoïdale, en une somme infinie de signaux sinusoïdaux: c'est la décomposition de Fourier du signal. La représentation de l'amplitude des harmoniques en fonction de la fréquence constitue le *spectre acoustique*. Les harmoniques sont des signaux sinusoïdaux de fréquences $f_n = n \times f$. Le nombre n est un entier positif appelé *rang de l'harmonique*.

Remarques :

- Le signal sonore délivré par un instrument de musique est le plus souvent complexe.
- La fréquence d'un son complexe est la fréquence du fondamental.
- Pour repérer une période sur l'enregistrement, repérer le maximum (ou le minimum). La période va d'un maximum au maximum suivant. Sa valeur se lit donc sur l'axe des abscisses.

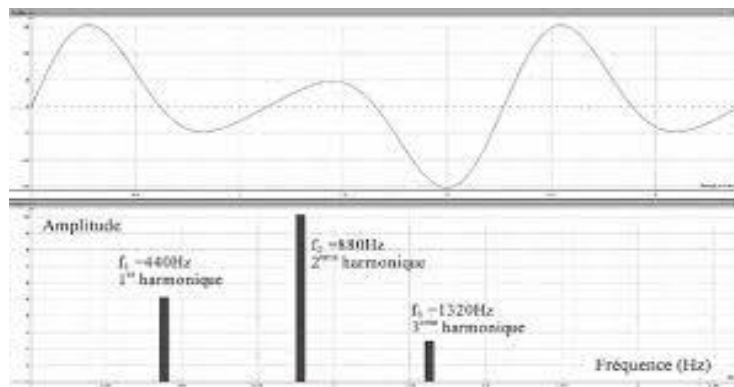


Fig.4 – Spectre d'un son complexe.

3.3. Hauteur d'un son

La hauteur d'un son est une qualité liée à la fréquence du son. Elle correspond à la fréquence f de l'onde périodique considérée. C'est la fréquence du fondamental dans la décomposition de Fourier de cette onde.

Exemples :

1. L'analyse du timbre du basson est illustrée sur la figure 5. C'est un instrument au son très timbré, jusqu'à la 10^{ième} harmonique (Fig. 5.a). Le spectre acoustique obtenu (Fig. 5.b) porte en abscisses le numéro des harmoniques et en ordonnées l'intensité de chacune d'elles. On obtient alors une série de *raies acoustiques* correspondant au son émis par le basson.

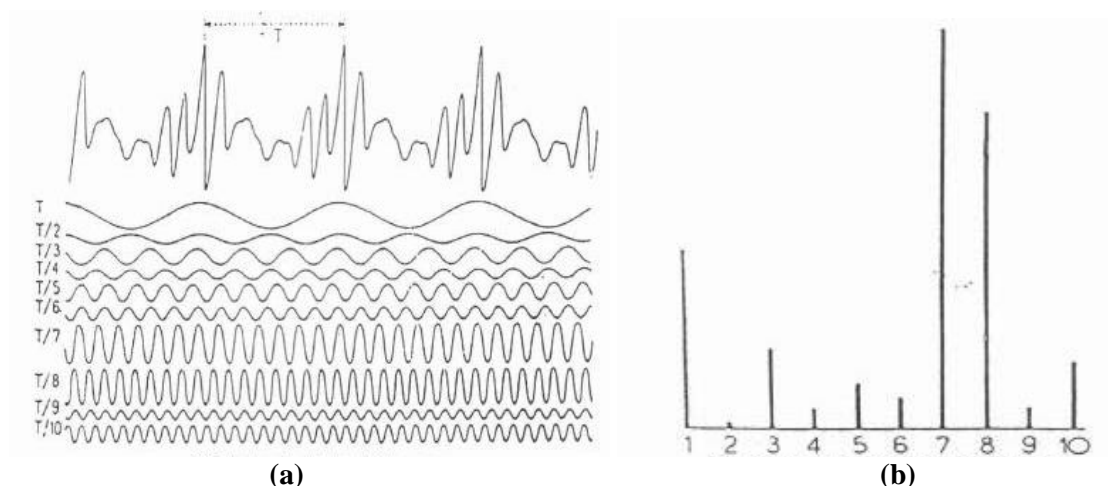
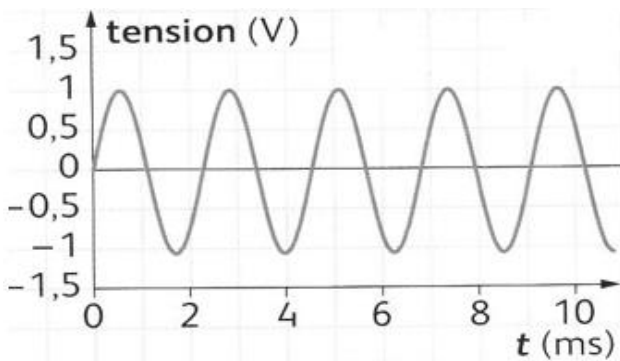
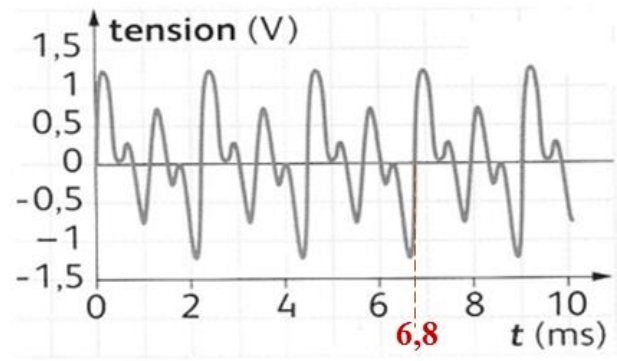


Fig.5 – Timbre du basson. (a) Analyse. (b) Spectre acoustique.

2. Un dispositif d'acquisition permet d'obtenir les enregistrements ci-dessous. Ces enregistrements correspondent aux sons émis par le diapason et la guitare jouant seuls.



(a)



(b)

Q1. Attribuer à chaque instrument sa courbe en justifiant votre réponse.

R1. Le son produit par un diapason étant pur son signal est sinusoïdal. La figure (a) correspond donc au son produit par un diapason et la figure (b) à celui émis par la guitare. Ce dernier est périodique mais pas sinusoïdal : on dit que ce son est complexe.

Q2. Déterminer la fréquence du fondamental du son émis par la guitare.

R2. D'après l'enregistrement de la figure (b) :

$$3.T = 6,8 \text{ ms} \Rightarrow T = (6,8 / 3) \times 10^{-3} \text{ s}$$

$$f = 1 / T = 4,4 \times 10^2 \text{ Hz}$$

Q3. La guitare et le diapason sont-ils accordés ? Pourquoi ?

R3. Sur l'enregistrement (a), on remarque que 3,5 périodes tombe exactement sur 8 ms alors :

$$3,5 \times T' = 8,0 \text{ ms} \Rightarrow T' = (8 \times 10^{-3} / 3,5) \text{ s}$$

$$\text{La fréquence est : } f' = 1 / T' = 4,4 \times 10^2 \text{ Hz}$$

La guitare et le diapason sont accordés car ils ont *la même hauteur* (signaux de même fréquence).

4. Intensité et niveau sonore

4.1. Puissance acoustique

Une onde sonore émet un son avec une certaine puissance acoustique **P**, exprimée en Watts (**W**). La puissance acoustique est l'énergie délivrée par une source sonore pendant un intervalle de temps donné. Elle peut être définie par la formule :

$$P = \frac{E}{\Delta t} \quad (1)$$

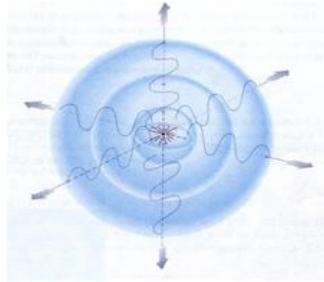
E est l'énergie acoustique en joules (**J**), et Δt un intervalle de temps (**s**). Cette variable dépend uniquement des caractéristiques de la source.

4.2. Intensité acoustique

L'intensité acoustique **I**, exprimée en Watt par mètre carré, (**W.m⁻²**), correspond à l'énergie qui traverse chaque seconde une surface unitaire perpendiculaire à la direction des ondes sonores.

$$I = \frac{P}{A} \quad (2)$$

1. *Le seuil audible* est donné par : $I_0 = 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.
2. *Le seuil de douleur* est le palier au-delà duquel un son crée une douleur et endommage fortement voire irrémédiablement le système auditif. L'intensité sonore associée vaut $I_{\text{douleur}} = 10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.
3. Dans le cas d'une source d'onde sphérique, l'intensité I est liée à la puissance P par la relation :



$$I = \frac{P}{4 \pi r^2}$$

où r (**m**) est la distance entre la source et un point de mesure.

4.3. Niveau sonore

Le niveau sonore, L (Level en Anglais), est relié à l'intensité acoustique I par l'expression:

$$L = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right) \text{ (dB)} \quad (3)$$

$$I = I_0 \cdot 10^{\frac{L}{10}} \text{ (W} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (4)$$

Remarque : *Les intensités acoustiques s'ajoutent, mais pas les niveaux d'intensités sonores.*

L'atténuation, ΔL , du son avec la distance est exprimée par la :

$$\Delta L = \text{Niveau à la distance } r_1 \text{ (dB)} - \text{Niveau à la distance } r_2 \text{ (dB)}$$

$$\Delta L = L_1 - L_2 = 10 \log \left(\frac{I_{r_1}}{I_{r_2}} \right) = 20 \log \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \text{ (dB)} \quad (5)$$

Exemples :

1. Un violon : I ; 10 violons : $10 \cdot I$ $\Delta L = 10 \text{ dB}$; 20 violons : $20 \cdot I$ $\Delta L \approx 13 \text{ dB}$

Bruit	L [dB]	I
Avion	150	$10^{15} I_0$
Concert	120	$10^{12} I_0$
Trafic	80	$10^8 I_0$
Moustique	50	$10^5 I_0$
Seuil	0	I_0

Tableau 1 – Niveau sonore et intensité acoustique en fonction du bruit.

2. Calculer l'intensité sonore I d'un instrument de musique qui émet une note de niveau d'intensité sonore $L = 60$ dB.

$$I = 10^{-12} \cdot 10^{\frac{60}{10}} = 10^{-6} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

3. On superpose trois sons de 20 décibels chacun et de fréquence 1000 Hz. Quel est le niveau sonore du son résultant ?

- Pour chaque son :

$$I = I_0 \cdot 10^{\frac{L}{10}} = I_0 \cdot 10^{\frac{20}{10}} = 100 \cdot I_0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

- Le son résultant a l'intensité :

$$I' = 3 \cdot I = 300 \cdot I_0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

- Le niveau sonore du son résultant est :

$$L' = 10 \log \left(\frac{I'}{I_0} \right) = 10 \log (300) = 24.8 \text{ dB}$$

4. Le bruit d'une machine est de 60 dB. Le bruit de 2 de ces mêmes machines est alors de :

$$L = 10 \log \left(\frac{2I}{I_0} \right) = 10 \log (2) + 10 \log \left(\frac{2I}{I_0} \right) = 3 + 60 = 63 \text{ dB}$$

Pour 4 machines, on obtient 66 dB, et pour 10 machines 70 dB.

5. Une source d'ondes sonores émet avec une puissance de 80 W. Quelle est l'intensité perçue à 3 m de la source ?

$$I = \frac{P}{4 \pi r^2} = \frac{80}{4 \pi 3^2} = 0,71 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

5. Vitesse du son

La vitesse du son, appelée *célérité* et mesurée en mètres par seconde (m/s), dépend du milieu de propagation. Elle est d'autant plus grande que le milieu est dense. Exemples :

	milieu	v (m/s)
gaz	air (0 °C)	331
	air (20 °C)	343
	He	972
liquides	Eau	1493
	Diammant	1200
solides	Verre	5640
	Or	3240

Tableau 2 – Vitesse du son en fonction du milieu de propagation.

Dans un gaz parfait, la célérité du son est exprimée par l'équation :

$$c = \sqrt{\gamma \frac{R T}{M}} \quad (m/s) \quad (6)$$

avec

- $R \approx 8.314 \text{ (J.mol}^{-1}\text{.K}^{-1}\text{)}$, constante des gaz parfaits
- T (**Kelvin**), la température
- M (**Kg/mol**), le poids moléculaire moyen
- $\gamma = 5/3$ pour les gaz monoatomiques
- $\gamma = 7/5$ pour les gaz diatomiques (O₂, N₂ ...)

Remarque :

- Dans l'air, la célérité, c , du son peut être approximée par la formule : $c = (331,35 + 0,607 \times T)$ où T est la température en degré Celsius. Plus la température augmente, plus la vitesse de propagation n 'augmente.
- Pour une température donnée, la pression à laquelle est soumis l'air modifie sa masse volumique. Moins la pression est forte, moins la masse volumique est importante car l'air se dilate. Par extension, la célérité du son augmente.
- Pour une pression et une température donnée, le son se propagera plus rapidement dans l'air sec qu'humide.
- Plus le milieu est déformable plus la célérité du son diminue.

Exemple :

1. avec $\gamma = 1,4$; $M = 0,29 \text{ kg}$, $T = 300 \text{ K}$, alors $c = 347 \text{ m/s}$.
2. Longueur d'onde dans l'air : $\lambda = \frac{c}{f} \text{ m}$ et $c = 340 \text{ ms}^{-1}$ à température ambiante
 - Si $f = 20 \text{ Hz}$ alors $\lambda = 17 \text{ m}$
 - Si $f = 500 \text{ Hz}$ alors $\lambda = 0,68 \text{ m}$
3. Un sonar utilise un émetteur-récepteur de fréquence 40 kHz. Dans l'eau de mer, il envoie des impulsions sonores très brèves toutes les 20 ms. La vitesse des ultrasons dans l'eau de mer est égale à 1500 m.s^{-1} .

- a. Calculer la profondeur maximale de l'obstacle si l'on veut que le premier écho soit perçu avant l'émission de la seconde impulsion.

Rep. Le premier écho doit être perçu au plus tard à $t = 20 \text{ ms}$. Il est produit par la première impulsion qui a parcouru avec la célérité c , la distance d_{\max} jusqu'à l'obstacle puis la même distance d_{\max} après réflexion sur l'obstacle, soit :

$$2d_{\max} = c \times t ; d_{\max} = c \times t / 2 = 1500 \times 20 \times 10^{-3} / 2 = 15 \text{ m}$$

- b. Le sonar détecte un écho 0,53 s après l'envoi d'une impulsion. À quelle distance se trouve l'obstacle ?

Rep. $d = c \times t / 2 = 1500 \times 0,53 / 2 = 398 \text{ m}$

6. Onde de pression, Onde de déplacement

Lorsqu'une source sonore génère une onde sonore, pour une valeur donnée du temps t , on observe dans l'air une alternance de zones en surpression ou en sous-pression par rapport à la pression atmosphérique moyenne. L'amplitude de la perturbation se mesure en pascals [Pa]. Une autre manière de décrire le même phénomène est de remarquer que l'onde est constituée d'une succession de zones où le déplacement des molécules d'air est alternativement maximum ou nul. L'amplitude de la perturbation se mesure alors en mètres. On notera qu'aux endroits où la pression est maximale, le déplacement des molécules est nul et vice-versa.

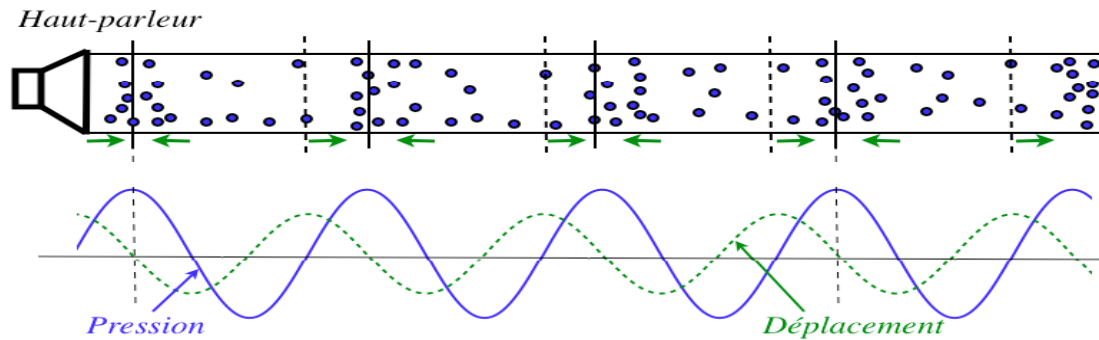


Fig.6– Haut-parleur générant une onde dans l'air.

Les expressions mathématiques pour ces deux descriptions sont les suivantes :

- **Onde de pression** (courbe en trait plein) :

$$p(x, t) = \Delta p \sin(kx - \omega t) \quad (7)$$

$$\Delta p = P - P_0 \quad (8)$$

P : pression absolue du fluide,

P_0 : pression absolue au repos,

$\Delta p > 0$: compression,

$\Delta p < 0$: dilatation.

- **Pression efficace** : est définie par :

$$P_e = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2 dt} \quad (Pa) \quad (9)$$

Le **seuil d'audibilité** correspond à la pression minimale en dessous de laquelle l'oreille ne perçoit plus le son : $P_{e0} = 2 \times 10^{-5}$ Pa

Le **seuil de douleur** correspond à la pression maximale supportable par l'oreille: $P_{e_{\max}} = 63$ Pa

- **Onde de déplacement** (courbe en trait-tillé) :

$$s(x, t) = S \sin(kx - \omega t) \quad (10)$$

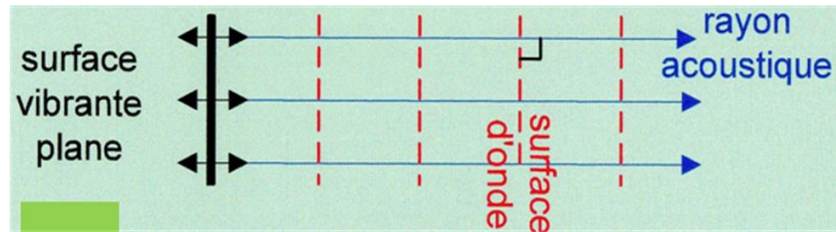
L'amplitude de déplacement S et l'amplitude de surpression Δp sont proportionnelles et leur relation est exprimée par :

$$\Delta p = \rho \cdot \omega \cdot c S \quad (11)$$

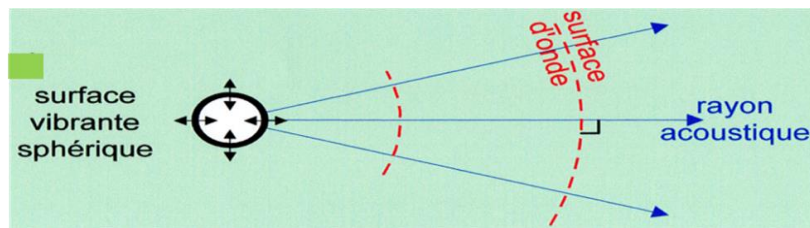
où : ρ est la masse volumique du milieu, ω la pulsation de l'onde et c sa célérité.

▪ **Front d'onde, Rayon acoustique**

- L'ensemble des points atteints au même instant par une onde est appelé *surface d'onde*.
- Tous les points d'une surface d'onde vibrent *en phase*.



(a)



(b)

Fig.7 – Allure du front d'onde et du rayon sphérique.

▪ **Intensité sonore**

On peut montrer qu'en un point donné, l'intensité de l'onde sonore dépend de son amplitude de déplacement S , de sa fréquence f ($\omega = 2\pi f$), de sa célérité c et de la masse volumique ρ du milieu :

$$I = 0,5 \times \rho \cdot c \cdot \omega^2 \cdot S^2 \quad (12)$$

La relation entre l'intensité sonore et la pression est donnée par :

$$I = k \cdot P e^2 \quad (13)$$

Exemples :

1. Une onde produite par la vibration de la membrane d'un haut-parleur a une fréquence de 500 Hz, une amplitude est de 0,01 mm, et se propage à 342 m/s dans l'air. Quelle est la valeur des maxima de pression Δp ?

$$\Delta p = \rho \cdot \omega \cdot c \cdot S = 1,2 \times 2\pi \times 500 \times 342 \times 0,01 \times 10^{-3} = 13 \text{ Pa} .$$

Ce résultat est à comparer à la pression atmosphérique qui est de l'ordre de 100 kPa.

2. Quelle est l'intensité d'une onde de 500 Hz, se propageant à 344 m/s dans l'air et dont l'amplitude est de 0,01 mm?

$$I = 0.5 \times \rho \cdot c \cdot \omega^2 \cdot S^2 = 0.5 \times 1.2 \times 342 \times (0.01 \times 10^{-3})^2 (2\pi \times 500)^2 = 0.20 \text{ W/m}^2 .$$

7. Réflexion et transmission des ondes sonores

- **Loi de Snell - Descartes** (Voir Fig.7)
- **Loi de la réflexion**

$$r = i_l \quad (14)$$

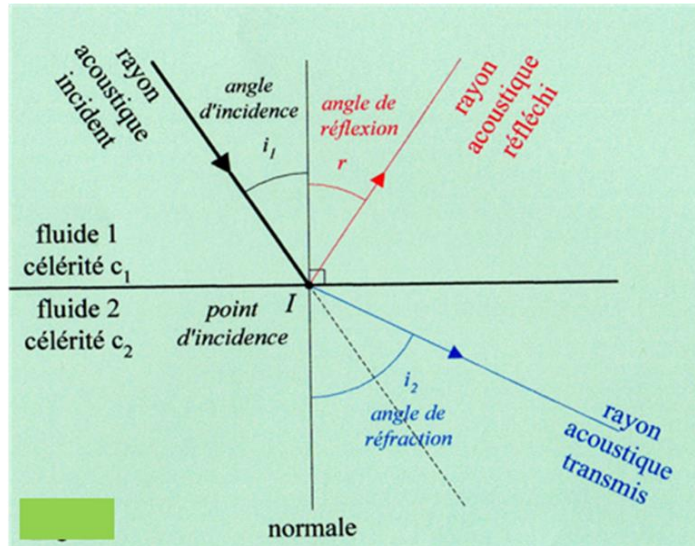


Fig.8 – Loi de Snell-Decartes.

■ **Loi de la réfraction**

$$\frac{\sin i_1}{c_1} = \frac{\sin i_2}{c_2} \quad (15)$$

■ **Aspect énergétique**

➤ *Impédance acoustique :*

$$\mathbf{Z} = \rho \cdot \mathbf{c} \quad (\text{Kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}) \quad (16)$$

➤ *Relation entre Impédance acoustique et Intensité acoustique :*

$$\mathbf{I} = \frac{P_e^2}{\mathbf{Z}} = \frac{(\text{Pa})^2}{(\text{Kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})} \quad (17)$$

➤ *Coefficient de réflexion énergétique (sous incidence normale) :*

$$R = \left(\frac{\mathbf{Z}_1 - \mathbf{Z}_2}{\mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_2} \right)^2 \quad (18)$$

Exemple :

Passage du son de l'air dans l'eau :

$$\mathbf{Z}_{\text{eau}} = \rho_{\text{eau}} \times c_{\text{eau}} = 1000 \times 1480 = 1,48 \times 10^6 \text{ Kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}.$$

$$\mathbf{Z}_{\text{air}} = \rho_{\text{air}} \times c_{\text{air}} = 1,29 \times 342 = 440 \text{ Kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}.$$

$$R = 99,88 \%$$

$$T = 0,12 \% \quad \text{forte atténuation du son transmis}$$