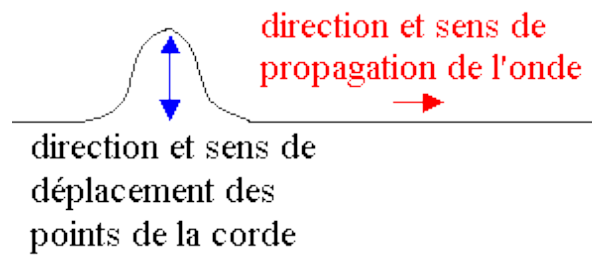


UEI : Système nerveux et organes de sens.

## **1 - Acoustique.**

I. Ondes mécaniques progressives :

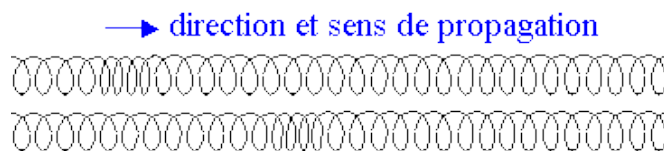
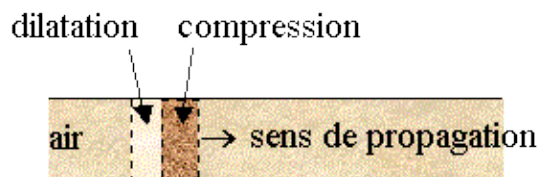
1. Onde transversale :



Une onde est transversale, lorsque le déplacement des points du milieu de propagation s'effectue perpendiculairement à la direction de propagation.

**Remarque:** dans notre exemple, la corde est le milieu de propagation, elle ne se déplace pas. Il n'y a pas de transport de matière. Il faut que le milieu de propagation présente une certaine élasticité.

2. Onde longitudinale :

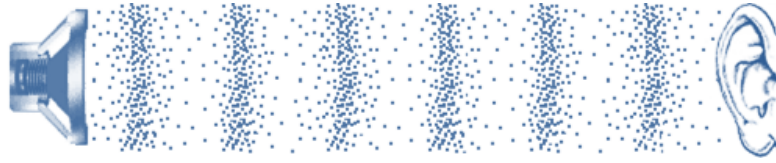


Une onde est longitudinale, lorsque le déplacement des points du milieu de propagation s'effectue dans la même direction que celle de la propagation.

**Remarque:** L'air est le milieu de propagation pour le son, il ne se déplace pas. Il n'y a pas de transport de matière. L'air est un milieu élastique.

**Autres exemples :** le long d'un ressort la déformation du ressort se propage de proche en proche vers la droite

## II. Acoustique et bruit :



- **Qu'est-ce que l'acoustique?**

- Science des ondes mécaniques élastiques, branche de la physique
- Science décrivant la génération et la propagation d'ondes élastiques dans les gaz, les liquides et les solides.
- Elle traite des phénomènes tant sonores que vibratoires.

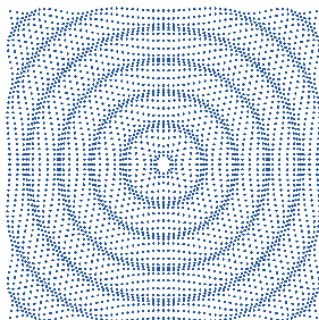
- **Qu'est-ce qu'un son?**

- Dans le domaine des fréquences audibles, les ondes acoustiques composent le son à l'origine d'une sensation auditive.
- Hors du domaine audible: les infrasons et les ultrasons.

- **Qu'est qu'un bruit?**

- Son perçu provoquant une sensation gênante ou désagréable
- Notion subjective de nuisance

## III. Nature des ondes acoustiques :



Les ondes acoustiques dans l'air sont de petites fluctuations rapides de la pression autour de la pression statique; par exemple la pression atmosphérique  $P_0$ .

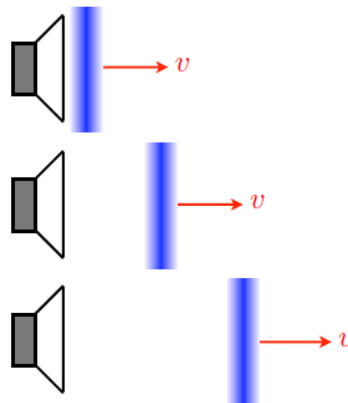
• **Pression totale  $P_{tot}$**

$$P_{tot} = P_0 + P(t)$$

- $P_0$  : pression atmosphérique (constante)
- $P(t)$  : pression acoustique (varie en fonction du temps)

Unité de pression: le Pascal ( $Pa$ )

**Ondes acoustiques = ondes de compression**



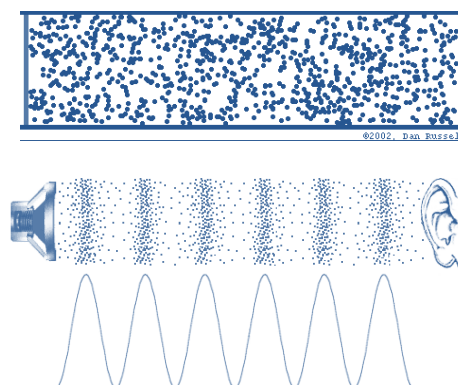
La membrane du haut-parleur comprime localement l'air.

IV. **La propagation du son :**

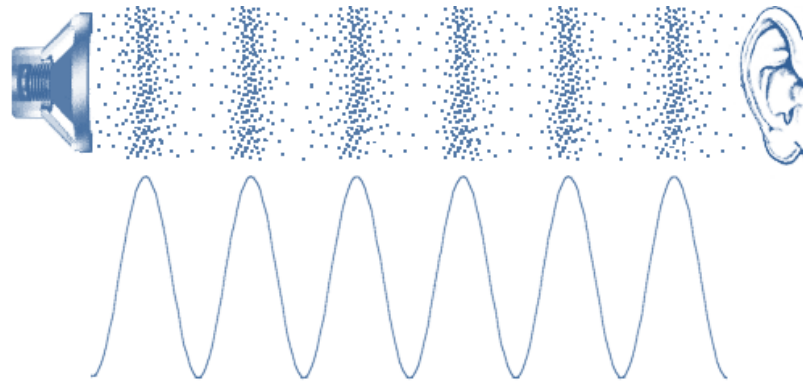
Le son est produit par une **ondulation du milieu de propagation**

- une modification locale de la pression
- un mouvement vibratoire du milieu (gaz, liquide, solide)
- un déplacement des particules de proche en proche La perturbation acoustique se compose d'une compression et d'une dilatation du milieu.

Après le passage de la perturbation, le milieu retrouve son état d'équilibre.

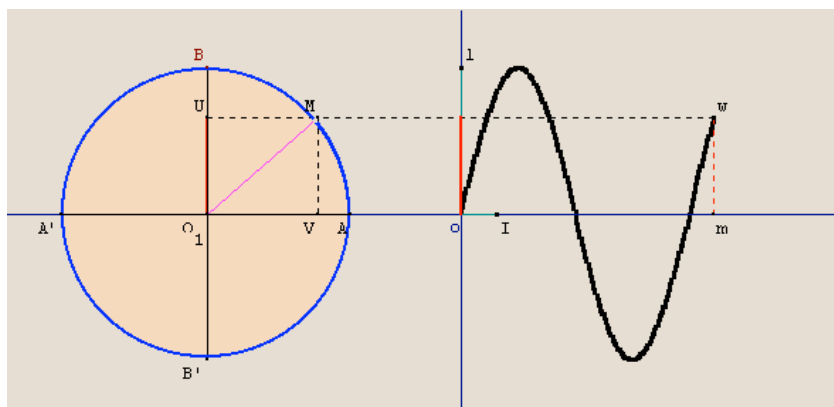


V. Description de l'onde sonore :



- Fréquence  $f$ : nombre d'oscillations par seconde du phénomène ondulatoire, exprimée en Hertz (Hz).
- Période  $T$  : Durée d'une oscillation en seconde (s).
- Pulsation  $\omega$ , ou vitesse angulaire, exprimée en  $rad. s^{-1}$
- Célérité du son dépend du milieu  $C(m/s)$ .
- Longueur d'onde dépend de la célérité.

$$f = \frac{1}{T}, \quad \omega = 2\pi f, \quad \lambda = \frac{C}{f}$$



VI. Vitesse du son :

	<u>milieu</u>	<u>v [m/s]</u>
<u>Gaz</u>	<u>air (0°C)</u>	<u>331</u>
	<u>air (20°C)</u>	<u>343</u>
	<u>He</u>	<u>972</u>
<u>Liquides</u>	<u>eau</u>	<u>1493</u>
	<u>Hg</u>	<u>1450</u>
<u>Solides</u>	<u>diamant</u>	<u>12000</u>
	<u>verre</u>	<u>5640</u>
	<u>or</u>	<u>3240</u>

Plus le milieu est déformable, plus la vitesse diminue.

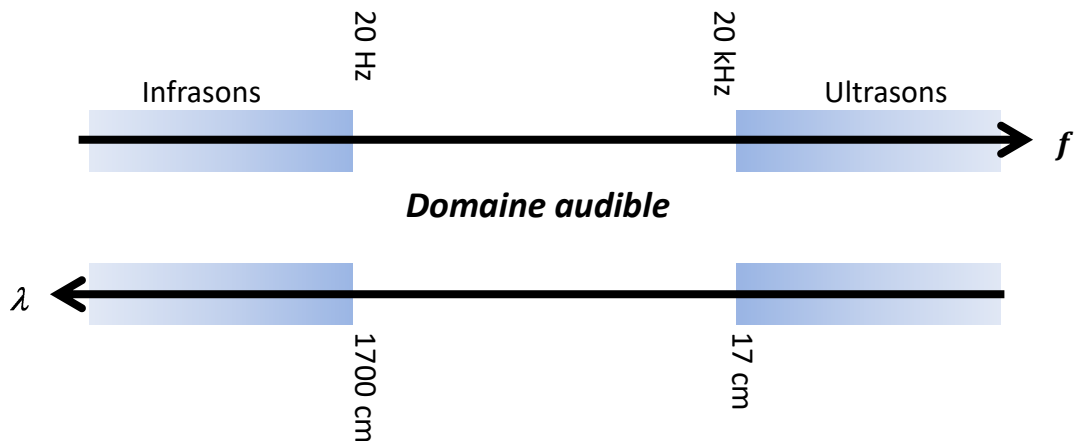
Exercice d'application:

Calculer la pulsation  $\omega$  pour des ondes de fréquences **100Hz**, **1000Hz** et **10000Hz** ainsi que la longueur d'onde dans l'air et dans l'eau.

On donne la célérité dans l'air 340 m/s et dans l'eau 1480 m/S

$f$	100 Hz	1000 Hz	10000 Hz
$\omega$	628,31 rad/s	6283,1 rad/s	62831 rad/s
$\lambda_{\text{air}}$	340 cm	34 cm	3,4 cm
$\lambda_{\text{eau}}$	1480 cm	148 cm	14,8 cm

VII. Domaine audible :



VIII. Les sons purs :

La vibration des particules est caractérisée par l'équation de type:

$$A(t) = A_{max} \cdot \sin(\omega t)$$

Deux sons purs peuvent entraîner les mêmes déplacements longitudinaux sur les particules d'un même milieu commun, mais ces mouvements peuvent être entraînés dans le temps. Entre

$$A_1(t) = A_{max} \cdot \sin(\omega t)$$

et

$$A_2(t) = A_{max} \cdot \sin(\omega t + \varphi) \text{ ou } A_2(t) = A_{max} \cdot \sin(\omega t - kx)$$

Avec  $k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$  est appelé nombre d'onde en  $m^{-1}$ .

Même mouvement des particules mais le second mouvement est en avance sur le premier d'un angle  $\varphi$

- Vitesse vibratoire ou vitesse instantanée : vitesse locale d'une particule mise en mouvement de vibration:

$$v(t) = \frac{dA}{dt} = A_{max} \cdot \omega \cos(\omega t + \varphi)$$

- Célérité du son: célérité de la propagation de l'onde sonore le long de la direction.

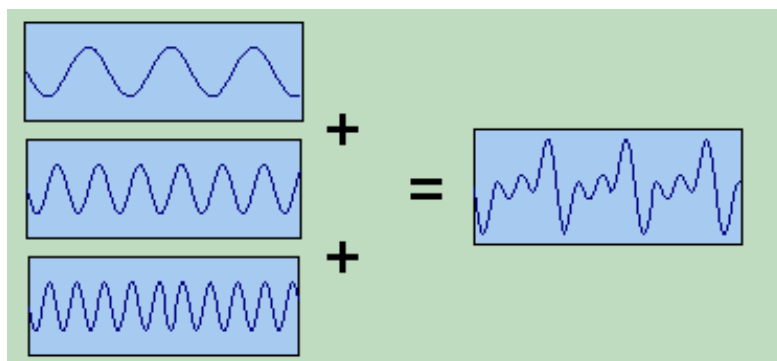
Si le milieu est isotrope, la célérité ne dépend que des caractéristiques du milieu:

Les sons vont d'autant plus vite que les milieux sont solides.

- Dans l'air:  $c = 330$  à  $340$  m/s
- Dans l'eau:  $c = 1450$  m/s
- Dans le tissu mou:  $c = 1540$  m/s
- Dans l'os:  $c = 3300$  m/s

### IX. Les sons complexes :

Sont produits par des particules animées de mouvements périodiques mais qui ne sont plus sinusoïdaux.



### Théorème de Fourier :

Un signal périodique la somme de signaux sinusoïdaux (Fondamentale + Harmoniques).

### Les bruits:

Sont dus à des vibrations non périodiques.

### X. Pression acoustique :

Le long de l'axe de propagation du son, les particules subissent un déplacement vibratoire sinusoïdal autour de leur position de repos, leur densité sur cet axe varie, faisant apparaître des régions plus denses et d'autres moins denses qu'à l'état de repos.

→ Des variations de pression autour de la pression atmosphérique, donc des surpressions et des dépressions par rapport à la pression de base. Cette variation est appelée la pression acoustique.

$$p = \rho \cdot v \cdot c$$

$\rho$  : Masse volumique

$v$  : Vitesse acoustique

$c$  : Célérité acoustique



XI. **Impédance acoustique :**

Une grandeur très importante pour la caractérisation du milieu.

$$Z = \frac{p}{v} = \rho \cdot c$$

❖ Quelques valeurs d'impédance acoustique :

Air :  $Z = 0,04 \cdot 10^3 \text{ g.cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

Eau :  $Z = 1,48 \cdot 10^3 \text{ g.cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

Foie :  $Z = 1,65 \cdot 10^3 \text{ g.cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

Os :  $Z = 7,5 \cdot 10^3 \text{ g.cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

XII. **Puissance acoustique (ou puissance surfacique en Watt :**

La puissance acoustique d'un son pur est toujours apportée à l'unité de surface. (**P** : puissance; **p** : pression )

$$P = \frac{d(\text{travail})}{S \cdot dt} = \frac{F \cdot dx}{S \cdot dt} = \frac{p \cdot S \cdot dx}{S \cdot dt} = p \cdot v = v^2 \cdot \rho \cdot c$$

Comme

$$v = \frac{p}{\rho \cdot c} \Rightarrow P = \frac{p^2}{\rho \cdot c}$$

XIII. **Intensité acoustique Watt/m<sup>2</sup>:**

L'intensité sonore est liée à la puissance P du transfert de l'énergie reçu au voisinage d'un point par un récepteur de surface S. elle est donnée par la relation :

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

XIV. **Niveau sonore (décibel dB):**

La mesure du niveau de puissance acoustique se fait toujours par comparaison avec un son de référence tel que:

$$P_0 = 10^{-12} \text{ Watt}$$

L'intensité sonore de référence sera donc:

$$I_0 = 10^{-12} \text{ Watt/m}^2$$

En prenant comme niveau de référence, la puissance acoustique d'un son pur de 1000Hz juste audible, le niveau de puissance sonore ( $L_P$ ) exprimé en décibels ou dB

$$L_P = 10 \log \frac{P}{P_0}$$

Par analogie, le niveau d'intensité sonore ( $L_I$ ) exprimé en dB s'écrit:

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

**Quelques exemples de niveaux sonores:**

- 0 dB → seuil d'audibilité
- 20 dB → voix basse
- 90 dB → motocyclette
- 130 dB → avion à réaction

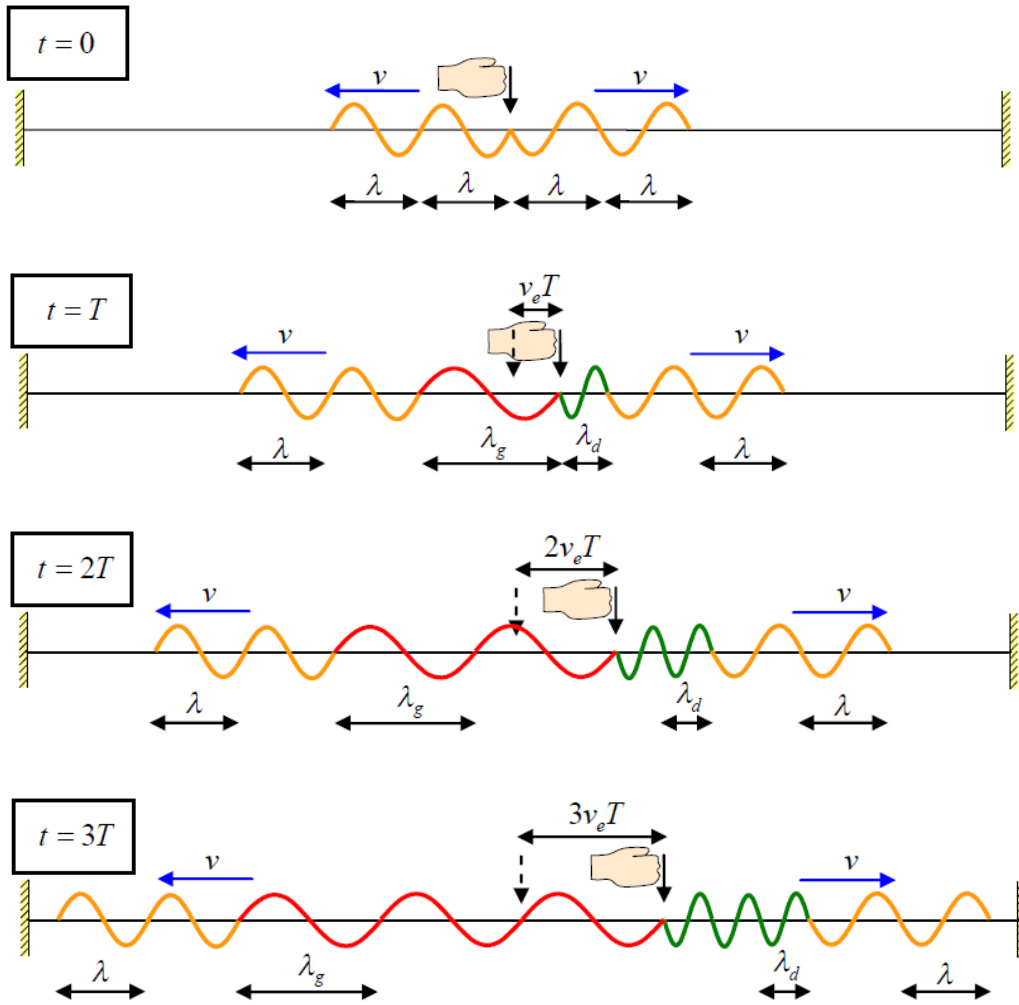
**Exercice d'application :**

Une lame vibrante, de fréquence  $f = 100$  Hz, est munie d'une pointe qui produit en un point "o" de la surface d'une nappe d'eau une perturbation transversale, sinusoïdale d'amplitude  $u_0 = 1$  mm, se propageant dans toutes les directions du liquide à la vitesse constante de 36cm/s. A l'origine des temps la source passe par sa position d'équilibre et commence à vibrer en se déplaçant vers le bas.

1. Écrire l'équation du mouvement  $u(t)$  du point "o" en fonction du temps, puis l'équation du mouvement des points M et N, situés respectivement à 6.3 mm et à 9 mm de "o"
2. Comparer le mouvement des deux points considérés au mouvement de point "o".
3. Représenter graphiquement le mouvement de "o", de M et de N en fonction de temps.
4. Représenter graphiquement à l'instant  $t = 0.02$  s, puis à l'instant  $t = 0.025$  s, l'aspect de la surface de l'eau en fonction de la distance au point "o".

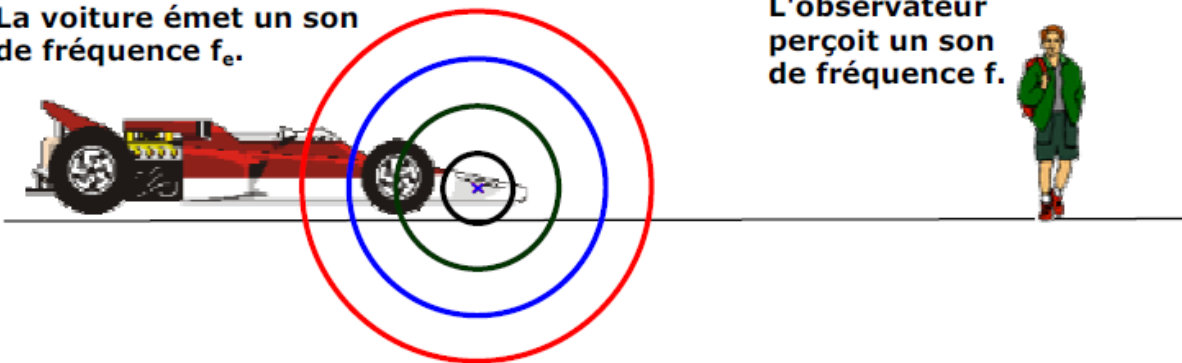
**XV. Effet Doppler :**

Nous avons tous fait l'expérience de la variation de la fréquence d'un klaxon ou d'une sirène lorsqu'une voiture s'approche ou s'éloigne de nous : cet effet est l'effet Doppler (d'après Christian Johann Doppler, physicien autrichien, 1803 - 1853). [Ce changement de fréquence liée au mouvement se retrouve également pour les ondes électromagnétiques ; on a découvert que la galaxie Andromède s'approche de nous (la voie lactée) en observant un "décalage vers le bleu" de la lumière émise par Andromède.]



1<sup>er</sup> cas : (émetteur immobile, récepteur immobile)

La voiture émet un son de fréquence  $f_e$ .

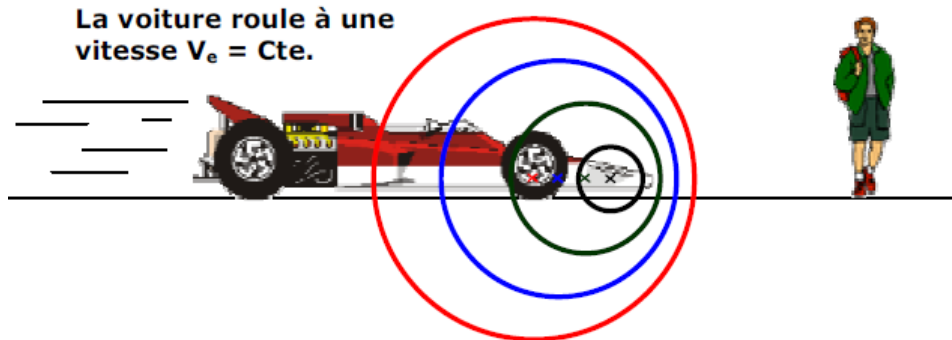


La voiture est à l'arrêt.

$$f = f_e$$

2<sup>ème</sup> cas : (émetteur en mouvement, récepteur immobile)

a) l'émetteur s'approche du récepteur:



Pendant une période, temps  $T_e$ , le premier front d'onde a parcouru la distance  $d_f$  telle que  $d_f = c \cdot T_e$ .

Pendant ce temps-là, l'émetteur c'est déplacée de la distance  $d_e$  telle que  $d_e = v_e \cdot T_e$ ; Pour notre oreille l'intervalle de temps entre deux fronts d'onde est inférieur à l'intervalle réel lors de l'émission, le deuxième front d'onde ayant moins de distance à parcourir.

Le deuxième front d'onde est espace du premier de :

$$d = d_f - d_e = c \cdot T_e - v_e \cdot T_e = (c - v_e) \cdot T_e$$

Il en est de même pour les fronts d'onde suivants.

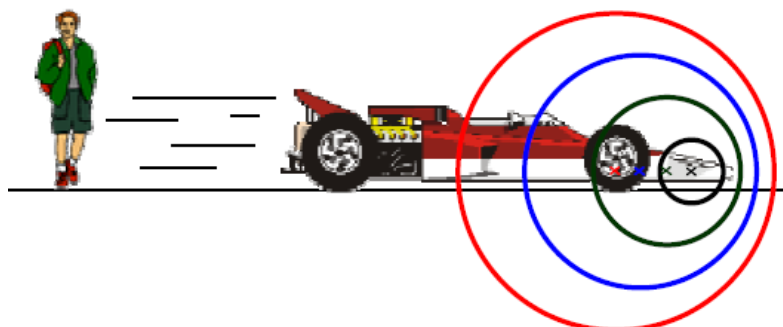
Chaque front d'onde ayant une vitesse  $c$ , il mettra pour parcourir cette distance et atteindre à son tour l'émetteur un temps  $T$  :

$$T = \frac{d}{c} = \frac{(c - v_e)}{c} \cdot T_e$$

Le son perçu par le récepteur a donc une fréquence apparente

$$f = \frac{c}{(c - v_e)} \cdot f_e$$

b) l'émetteur s'éloigne du récepteur:



Chaque front d'onde est espacé du précédent de :

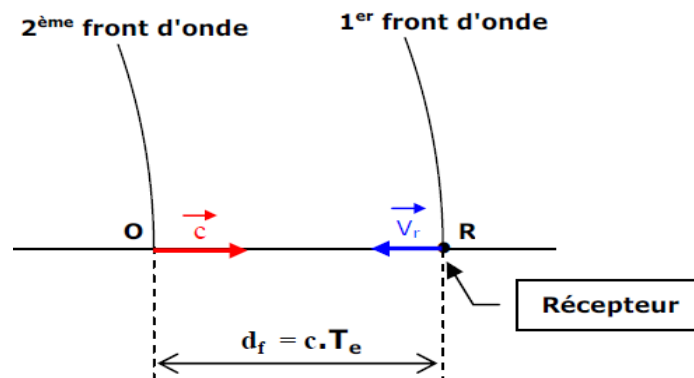
$$d = d_f + d_e = c \cdot T_e + v_e \cdot T_e = (c + v_e) \cdot T_e$$

Le son perçu par le récepteur a donc une fréquence apparente d'expression :

$$f = \frac{c}{(c + v_e)} \cdot f_e$$

**3<sup>ème</sup> cas : (émetteur immobile, récepteur en mouvement)**

**a) Le récepteur s'approche de l'émetteur:**



Plaçons-nous à l'instant t ou le récepteur perçoit le 1<sup>er</sup> front d'onde. La distance séparant les deux fronts d'onde est :

$$d_f = c \cdot T_e$$

En plaçant l'origine au point O, l'équation horaire du 2<sup>ème</sup> front d'onde (qui va vers le récepteur) est :

$$d = c \cdot t$$

L'équation horaire du récepteur (qui va vers le 2<sup>ème</sup> front d'onde) est :

$$d = d_f - v_r \cdot t = c \cdot T_e - v_r \cdot t$$

Le récepteur rencontrera le 2<sup>ème</sup> front d'onde à l'instant t tel que :

$$c \cdot t = c \cdot T_e - v_r \cdot t \rightarrow (c + v_r) \cdot t = c \cdot T_e \rightarrow t = \frac{c}{c + v_r} \cdot T_e$$

Ce temps est la période apparente T du son.

Le son perçu par l'observateur a donc une fréquence apparente d'expression :

$$f = \frac{c + v_r}{c} \cdot f_e$$

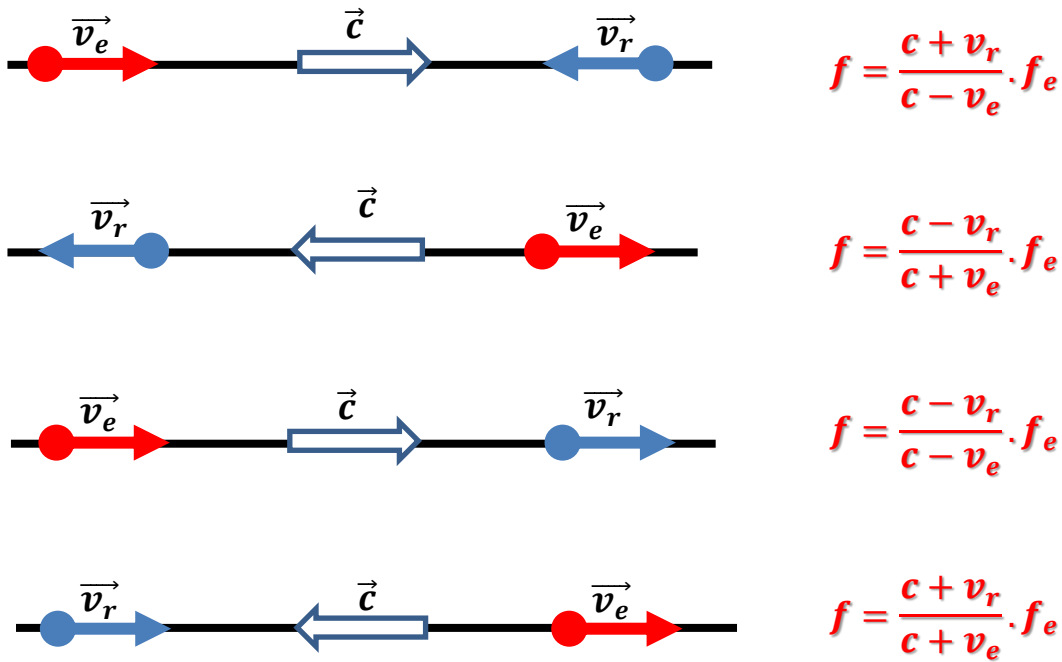
**b) Le récepteur s'éloigne de l'émetteur :**

Par analogie avec les cas précédents on devine que si le récepteur s'éloigne de l'émetteur immobile, la fréquence apparente est :

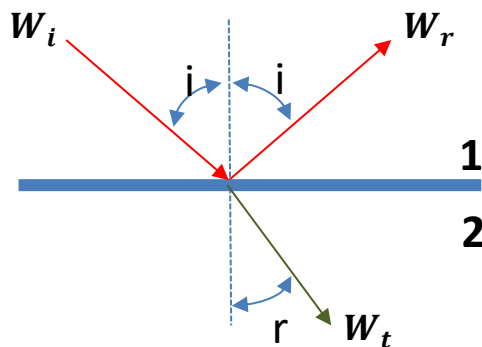
$$f = \frac{c - v_r}{c} \cdot f_e$$

**4<sup>ème</sup> cas : (émetteur et récepteur en mouvement)**

Les résultats précédents permettent de calculer l'effet Doppler lorsque émetteur et récepteur se déplacent simultanément.



XVI. **Propagation des ondes sonores :**



Lorsqu'un faisceau d'ondes sonores d'intensité  $W_i$  arrive au niveau d'une interface qui sépare deux milieux (1 et 2) d'impédances acoustiques différentes  $Z_1$  et  $Z_2$ , dans lesquels les célérités sont  $c_1$  et  $c_2$ , il en résulte un faisceau réfléchi d'intensité  $W_r$  et un faisceau transmis d'intensité  $W_t$ .

D'après la lois de *Snell-Descartes* :

$$\frac{\sin i}{c_1} = \frac{\sin r}{c_2}$$

De point de vue énergétique  $W_i = W_r + W_t$

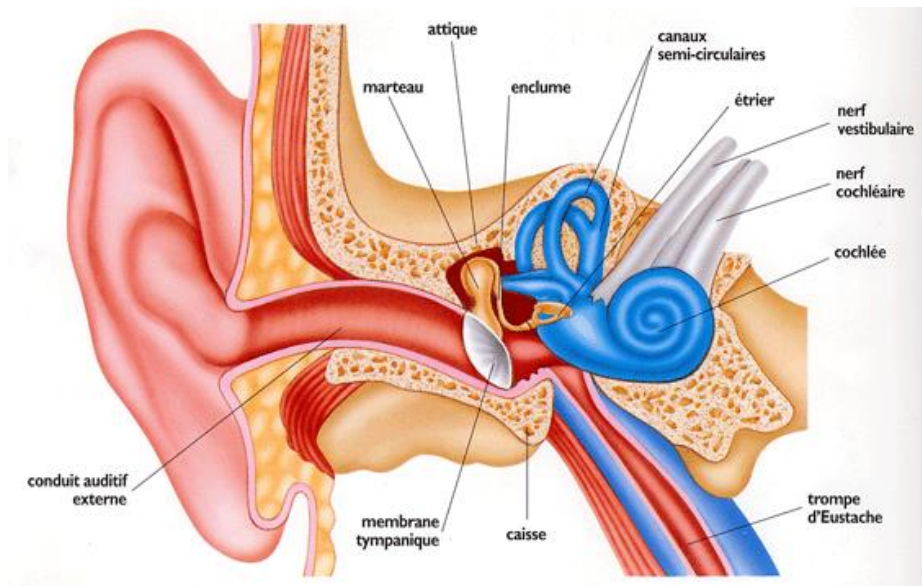
Les pouvoirs de réflexion  $\frac{W_r}{W_i}$  et de transmission  $\frac{W_t}{W_i}$  peuvent s'exprimer en fonction des impédances des deux milieux.

Facteur de Réflexion  $R = \frac{W_r}{W_i} = \frac{(Z_1 - Z_2)^2}{(Z_1 + Z_2)^2}$

Facteur de transmission  $T = \frac{4 \cdot Z_1 \cdot Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2}$

on déduit :  $R + T = 1$

## XVII. La surdité :



La surdité peut résulter de deux processus différents. On parle de *surdité de transmission* quand l'oreille externe ou l'oreille moyenne ne peuvent pas assurer normalement la conduction des vibrations de l'air.

On parle de *surdité de perception* quand le processus de transformation des vibrations en activité nerveuse est perturbé.

On parle enfin de *surdité mixte* quand les deux coexistent.

**La surdité de transmission chez l'adulte :**

Les surdités de transmission découlent d'un problème dans l'oreille externe ou l'oreille moyenne. Elles peuvent se traduire par une perte auditive allant jusqu'à 60dB. Ces surdités peuvent avoir un caractère durable, mais sont parfois réversibles avec une thérapeutique adaptée.

**La surdité de perception chez l'adulte :**

Les surdités de perception sont liées à des atteintes de l'oreille interne : soit de la cochlée (et on parle de surdité de perception endocochléaire), soit du nerf auditif (et on parle de surdité de perception rétrocochléaire). La plus fréquente des surdités de perception qui se développe à l'âge adulte est la presbyacousie (perte de l'audition liée à l'âge), mais une surdité peut avoir d'autres causes.