

ONDES SONORES

EFFET DOPPLER

1 - Les ondes mécaniques

Une onde mécanique est la propagation d'une perturbation dans un milieu matériel (solide, liquide ou gaz).

Une onde mécanique modifie localement et temporairement les propriétés mécaniques (vitesse, position, pression,) du milieu matériel.

On appelle onde mécanique le phénomène de propagation d'une perturbation dans un milieu élastique, sans transport de matière, mais avec transport d'énergie.

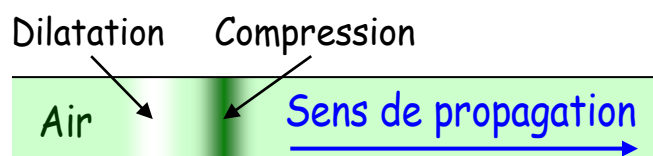
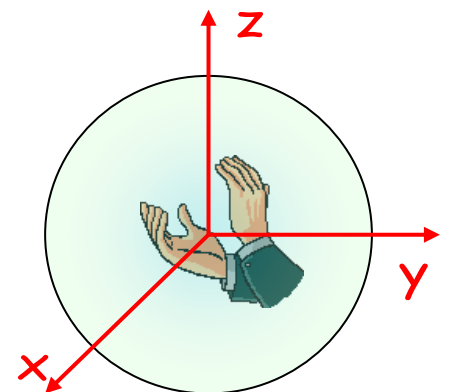
Une onde se propage, à partir de la source, dans toutes les directions qui lui sont offertes.

Le professeur situé dans une salle de cours claque des mains.
Les élèves situés autour de lui entendent le claquement.

Les ondes sonores se propagent dans les trois dimensions, mais à condition qu'elles soient en présence de matière (solide, liquide ou gaz).

Ces ondes sonores font vibrer les molécules présentes dans l'air près de la source sonore, et transmettent leur mouvement à leurs voisines lorsqu'elles se heurtent, qui elles-mêmes transmettent à leur tour le mouvement et ainsi de suite.

Cela provoque des zones de compressions et de dilatation.



L'air, milieu de propagation ne se déplace pas. Il n'y a pas de transport de matière. L'air est un milieu élastique.

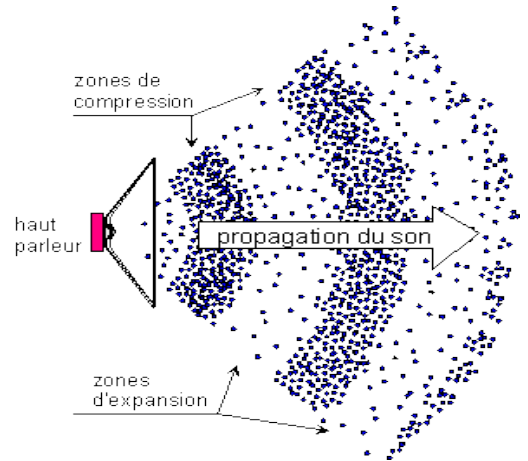
A cause des frottements existant lors du passage de la perturbation dans le milieu matériel, une partie de l'énergie transportée est perdue (elle se transforme en chaleur). On dit qu'il y a amortissement du signal.

2- Emission et détection des ondes

Pour qu'une perturbation prenne naissance dans une région, appelée source, d'un milieu matériel, il est nécessaire qu'il y ait un apport d'énergie. L'émetteur apporte l'énergie nécessaire à la création de cette perturbation.

La membrane d'un haut-parleur comprime et dilate la couche d'air avec laquelle elle est en contact pour créer une onde sonore.

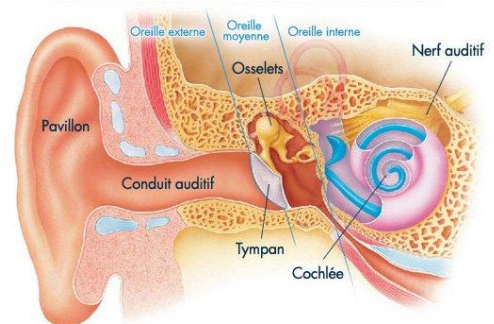
Les molécules de gaz proches de la membrane sont projetées par celle-ci. Ces molécules s'entrechoquent avec les molécules voisines. La zone de pression se déplace. Après le "choc" les molécules reprennent leur position initiale.



La détection d'une onde mécanique met en œuvre un capteur qui transforme une des grandeurs physiques du milieu modifiée par le passage de la perturbation en une grandeur facile à exploiter.

L'énergie mécanique transportée par l'onde est le plus souvent transformée en énergie électrique.

Dans notre oreille, la transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique est réalisée grâce aux cellules ciliées de la cochlée.



Une onde sonore est une onde mécanique longitudinale (onde acoustique) qui se propage dans un milieu matériel élastique. Les petits déplacements des tranches de matière se font dans la direction de propagation. Le son ne se propage pas dans le vide.

3- Célérité d'une onde

On appelle célérité la vitesse de propagation de l'onde, pour la distinguer de la vitesse de déplacement d'un corps.

Si d est la distance parcourue par l'onde et Δt la durée de propagation, on définit une célérité moyenne V de l'onde par la relation:

$$V = \frac{d}{\Delta t}$$

V :	Vitesse en mètre par seconde (m.s^{-1})
d :	Distance parcourue en mètre (m)
Δt :	Durée de propagation en seconde (s)

La propagation d'une onde dans un milieu matériel se fait de proche en proche: elle n'est pas instantanée.

Dans un milieu homogène et isotrope, la célérité d'une onde est constante.

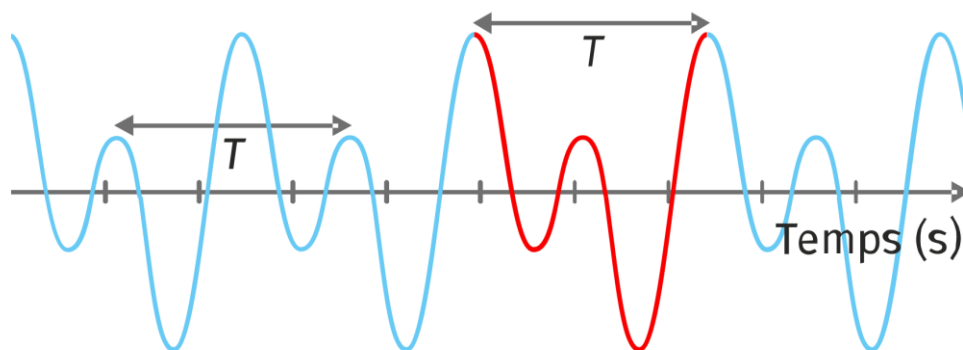
Une onde sonore se propage plus vite dans les liquides que dans les gaz et fréquemment plus vite dans les solides que dans les liquides

La vitesse du son dans l'air dépend de sa température.

4- Caractéristiques des ondes mécaniques progressives périodiques

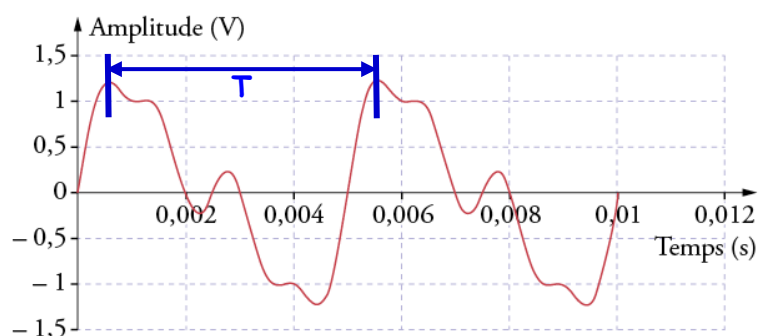
Lorsque le phénomène qui crée l'onde est périodique (vibration des ailes d'un moustique, gouttes qui tombent d'un robinet sur la surface de l'eau dans l'évier, etc.), les différentes ondes successives n'en forment plus qu'une appelée onde périodique.

Une onde périodique apparaît quand la perturbation se répète, identique à elle-même, sur un intervalle de temps régulier appelé période. Visuellement, un motif se répète



L'onde sonore reçue par un capteur (microphone) est convertie en une information électrique visualisée sur l'oscillogramme. Cette information a les mêmes caractéristiques que l'onde dont elle est issue.

Sur l'exemple ci-contre, elle se reproduit à intervalles de temps égaux.



Une onde progressive est périodique lorsque la perturbation se reproduit identique à elle-même à intervalles de temps égaux, appelés période temporelle T .

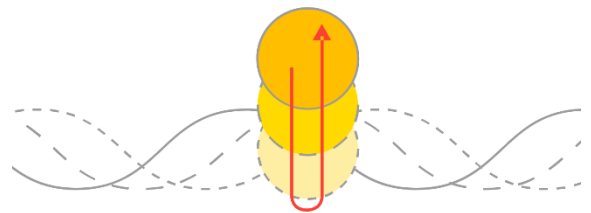
Une onde périodique de période T (s) est aussi caractérisée par sa fréquence f (en Hertz, de symbole Hz).

La fréquence f de l'onde est le nombre de répétitions de la perturbation par seconde. Fréquence et période sont liées par la relation:

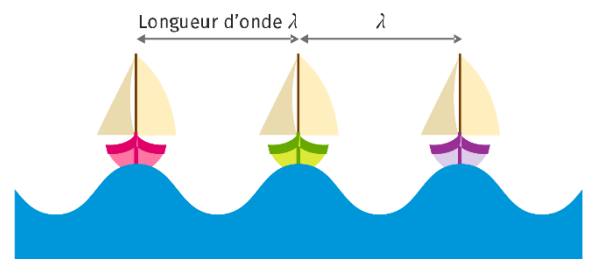
$$f = \frac{1}{T} \quad \left| \begin{array}{l} f: \text{Fréquence en Hertz (Hz)} \\ T: \text{Période temporelle en seconde (s)} \end{array} \right.$$

Une onde périodique présente une double périodicité.

Un point, à un instant sur un "sommet" de l'onde périodique, est soumis régulièrement à la même perturbation: il descend, puis remonte en suivant la forme de l'onde. La durée nécessaire pour retrouver la même position est la période temporelle (notée T et exprimée en secondes).



Deux points espacés qui suivent le même mouvement oscillent de la même façon, avec la même amplitude, en raison de la régularité de l'onde. La distance qui sépare ces points est appelée longueur d'onde ou période spatiale. On la note λ (lambda) et elle s'exprime en mètre.



La longueur d'onde λ est la distance parcourue par l'onde ayant une célérité V pendant une période.

Une onde progressive sinusoïdale présente une double périodicité, spatiale (définie par la longueur d'onde λ), et temporelle (définie par la période T).

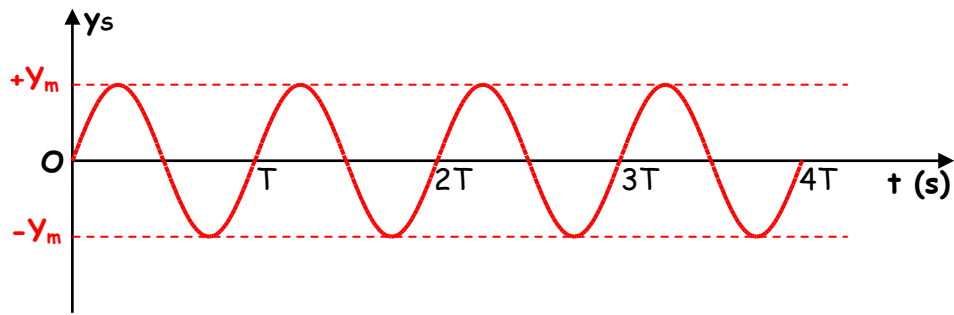
$$\lambda = V \cdot T \quad \left| \begin{array}{l} \lambda: \text{Longueur d'onde (m)} \\ V: \text{Célérité de l'onde (m.s}^{-1}\text{)} \\ T: \text{Période (s)} \end{array} \right.$$

On peut parfois représenter une onde progressive périodique par des fonctions sinusoïdales.

L'une de ces fonctions décrit le mouvement de la source S .

Le graphe des temps de la source S correspond alors à la représentation graphique associée à la fonction:

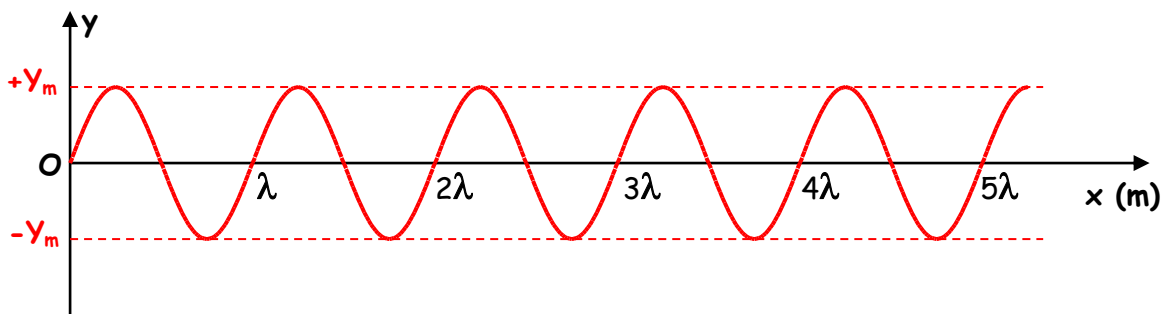
$$y(t) = Y_m \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t\right)$$



Sur celui-ci, apparaît bien la période temporelle T .

Le graphe des espaces correspond alors à la représentation graphique associée à la fonction:

$$y(x) = Y_m \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot x\right)$$

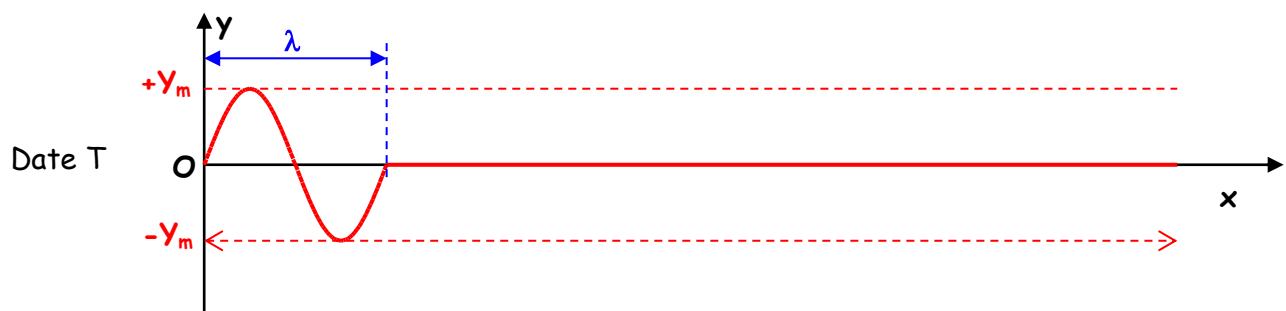


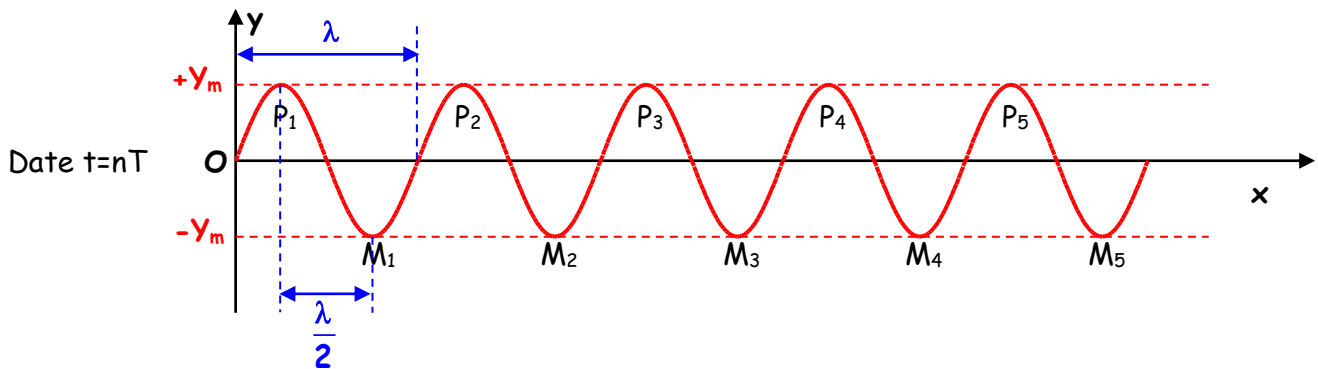
Sur ce graphe des espaces (à la date t) apparaît nettement la périodicité spatiale de l'onde se propageant sur la corde.

C'est ce que l'on obtiendrait si on photographiait la corde à un instant t .

5- Propriétés de la longueur d'onde

Si on photographie la corde aux dates $t=T$ et $t=n.T$, on obtient les graphiques suivants.





Le front de l'onde parti de O à la date $t=0$ a parcouru la distance λ à la date $t=T$.

La longueur d'onde λ est égale à la distance parcourue par l'onde en une période T .

Tous les points P , distants de λ , passent en même temps par leur élongation maximale. Ils ont à chaque instant la même élongation y , comprise entre $-y_m$ et $+y_m$. On dit qu'ils vibrent en phase.

Tous les points M , distants de λ , passent en même temps par leur élongation maximale. Ils ont à chaque instant la même élongation y , comprise entre $-y_m$ et $+y_m$. On dit qu'ils vibrent en phase.

Les points P et M , distants de $\frac{\lambda}{2}$, sont en opposition de phase.

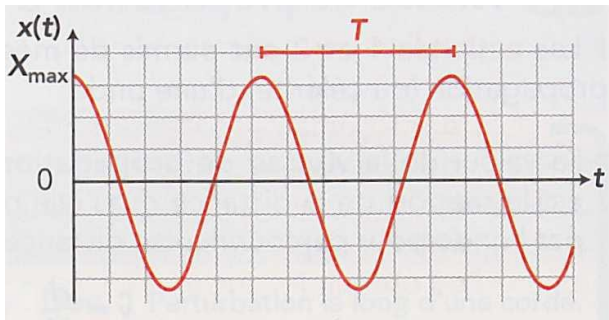
6- Notion de déphasage

Dans le cas d'une onde mécanique sinusoïdale, l'évolution de l'élongation au cours du temps est donnée généralement par une fonction de la forme

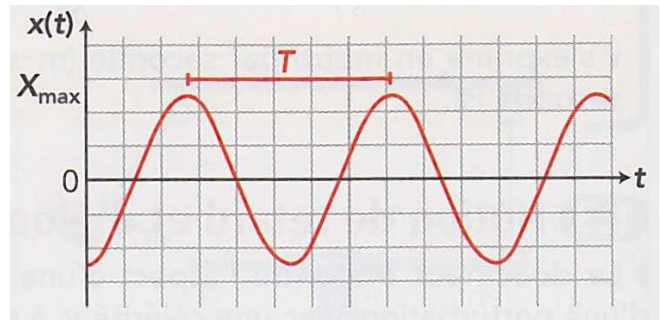
$$x(t) = X_m \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t + \varphi\right)$$

X_m est l'amplitude, T la période et φ la phase à l'origine, positive par définition et donnée par les conditions initiales.

Par exemple, si l'élongation est initialement $x(0) = X_m$, alors $\varphi=0$.



Cas où la phase à l'origine est nulle

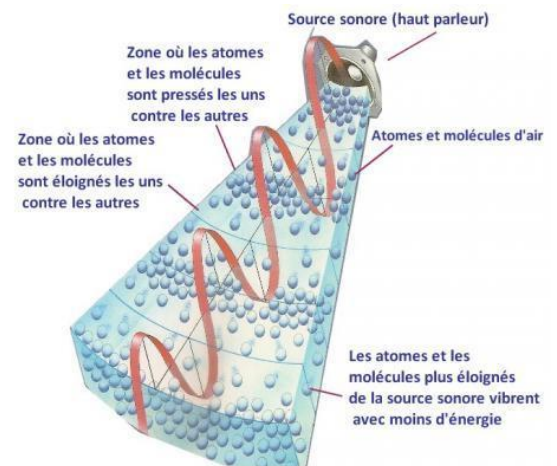


Cas où la phase à l'origine est non nulle

7- Son et Ultra-Son

Un son est un phénomène périodique de nature ondulatoire.

La vibration d'un émetteur sonore, comme celle d'un haut-parleur, engendre une suite de compressions et de dilatations de l'air qui se propage jusqu'à faire vibrer le tympan de l'oreille, ce que le cerveau interprète ensuite comme un son.

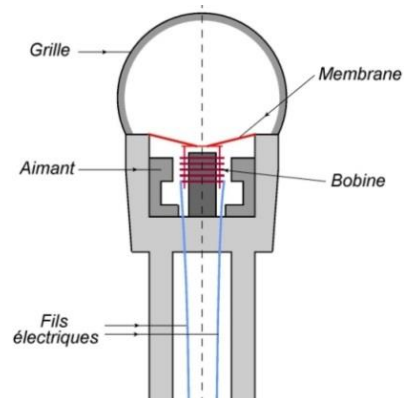


Une onde sonore est un phénomène périodique qui se propage par une suite de compression et de dilatations du milieu de propagation. Elle nécessite un support matériel et ne se propage pas dans le vide: c'est une onde mécanique progressive.

Un microphone permet de transformer un signal sonore en signal électrique analogique.

Les variations de tension obtenues en sortie du microphone sont analogues aux variations de la pression acoustique captées au niveau du microphone qui sont continues dans le temps.

La fréquence de ce signal électrique permet une première caractérisation de l'onde sonore.

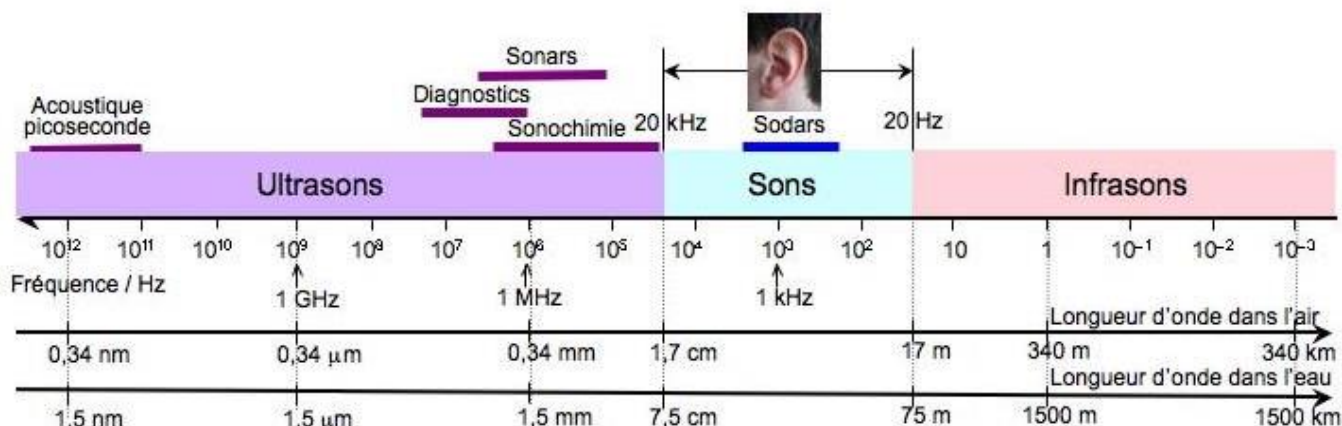


Le domaine des fréquences audibles concernant les sons se situe, selon les individus et leur âge, entre 20 et 20 000 Hz.

Au-delà d'une fréquence de 20 000 Hz, on parle d'ultrasons.

Les sons de fréquence inférieure à 20 Hz sont appelés infrasons.

Dans le domaine des fréquences audibles, les fréquences faibles correspondent aux sons graves et les fréquences élevées, aux sons aigus.

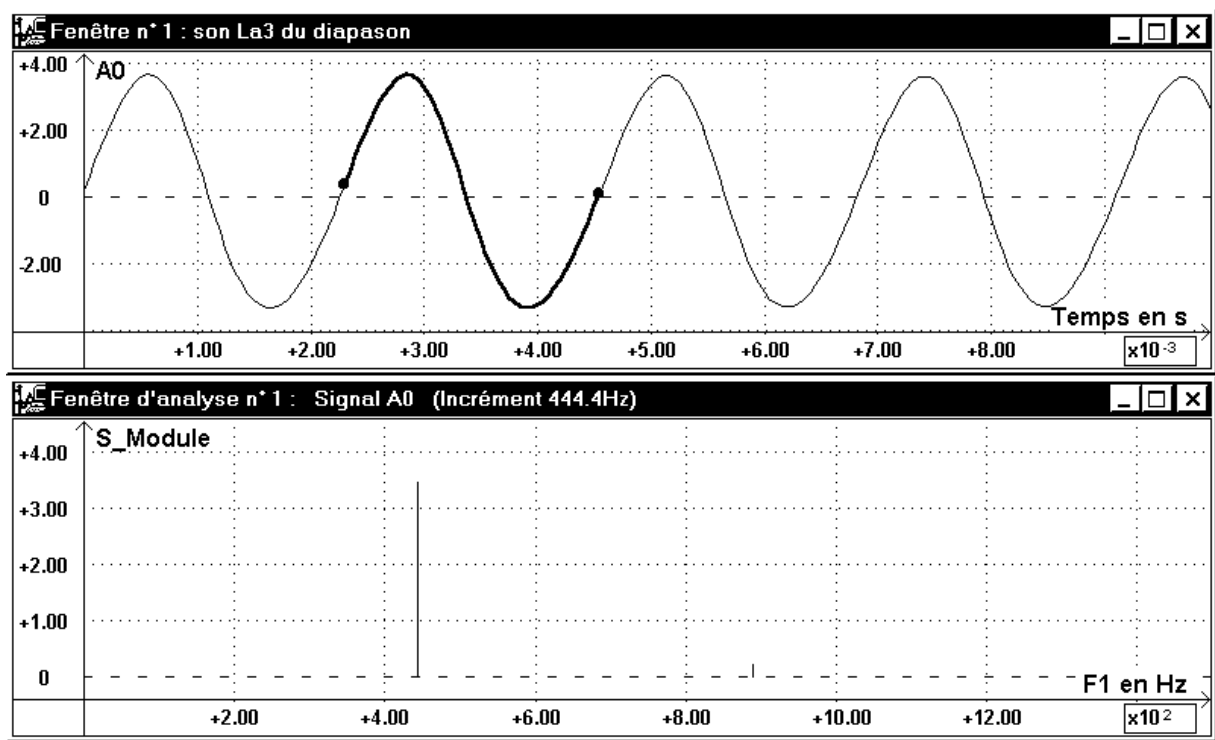


8- Analyse spectrale

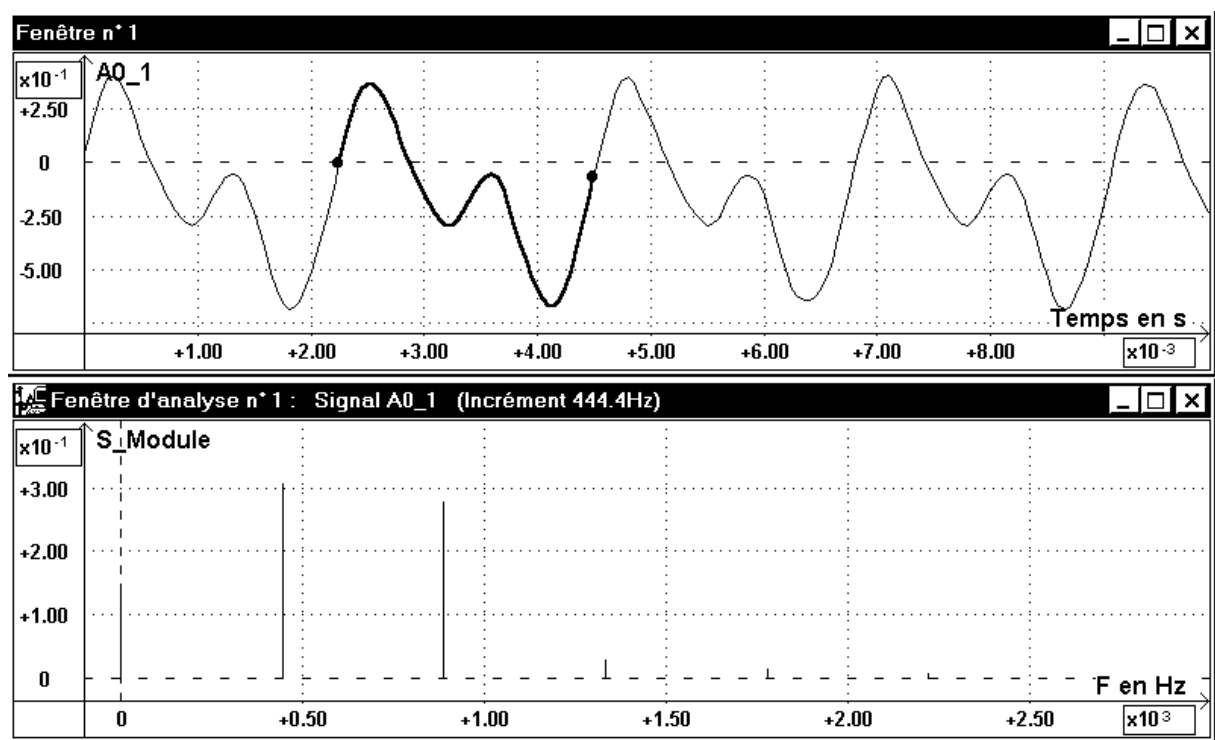
Pour accorder son instrument de musique, on peut utiliser un diapason qui, en vibrant, émet un "la₃". L'onde sonore produite est une onde progressive sinusoïdale. Le signal électrique obtenu à l'aide d'un microphone qui capte ce son est un signal parfaitement sinusoïdal: on dit que le son est pur.

Le signal électrique correspondant au son d'une voix ou d'un instrument de musique comme une guitare est un signal périodique, mais n'est pas parfaitement sinusoïdal: on dit que le son est complexe.

Pour comprendre la constitution d'un son complexe, on réalise une analyse spectrale du signal.



Signal d'un son pur et son spectre



Signal d'un son complexe et son spectre

Une analyse spectrale est la représentation de l'amplitude relative d'un signal en fonction de la fréquence.

Cette représentation est appelée spectre en fréquence.

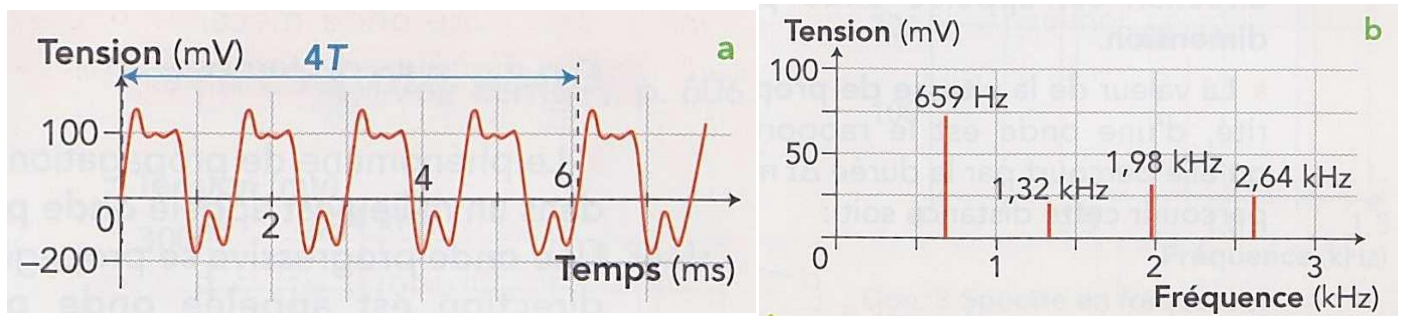
Le spectre en fréquence d'un son pur se traduit par un seul pic.

Le spectre d'un son complexe est constitué de plusieurs pics, qui sont régulièrement espacés pour un son harmonieux, et répartis aléatoirement pour un bruit.

Le mathématicien français Joseph FOURIER a montré que tout signal périodique de fréquence f_s peut être décomposé en une somme de signaux sinusoïdaux de fréquences f_n multiples d'une fréquence f_1 dite fondamentale.

Ces signaux sinusoïdaux sont appelés harmoniques. L'analyse spectrale d'un son permet d'en obtenir le spectre en fréquences, une représentation graphique de l'amplitude de ses composantes sinusoïdales en fonction de la fréquence.

Le spectre en fréquences du son (mi₄) d'une guitare montre plusieurs pics de fréquences: à 659Hz, à 1,32kHz, à 1,98kHz et à 2,64kHz.



Ces fréquences sont celles des harmoniques, la fréquence la plus faible, $f_1=659\text{Hz}$ étant celle du fondamental (elle est aussi appelée hauteur du son).

Toutes les fréquences f_n des harmoniques du spectre sont des multiples entiers de la fréquence du fondamental f_1 :

$$f_n = n \cdot f_1$$

9- Hauteur et timbre

La même note "la₃" émise par le diapason et par une corde de guitare produit des signaux de même fréquence: 440Hz.

La hauteur d'un son est la fréquence du signal correspondant, appelée fréquence fondamentale ou fondamental.

L'analyse spectrale de ces signaux montre que le "la₃" a un spectre en fréquence constitué d'un seul pic pour le diapason et de plusieurs pics pour une corde de guitare.

Le timbre d'un son dépend de la fréquence et de l'importance, dans le spectre de fréquences, de pics appelés harmoniques.

Dans le spectre en fréquence d'un son, le fondamental correspond à la hauteur du son et les harmoniques, aux multiples de cette fréquence.

10- Intensité - Niveau d'intensité sonore

Un peu de mathématiques: Le logarithme décimal et ses propriétés.

La fonction $\log(x)$ est appelée logarithme décimal de x dont la fonction réciproque est la puissance de 10.

Pour tout $a > 0$ et $b > 0$ on aura:

$$\log(a \times b) = \log(a) + \log(b)$$

$$\log\left(\frac{a}{b}\right) = \log(a) - \log(b)$$

$$\log(10^a) = a$$

$$\log(1) = 0$$

$$10^{(a+b)} = 10^a \times 10^b$$

$$10^{(a-b)} = \frac{10^a}{10^b}$$

$$10^{\log(a)} = a$$

$$10^0 = 1$$

Nous percevons les sons de manière plus ou moins intense.

L'oreille humaine perçoit des signaux sonores dont l'intensité est comprise entre une valeur minimale $I_0 = 1,0 \cdot 10^{-12} \text{ W.m}^{-2}$ (seuil d'audibilité) et une valeur maximale égale à 25 W.m^{-2} (seuil de douleur).

L'intensité sonore $I \text{ (W.m}^{-2}\text{)}$ caractérise l'intensité d'un signal reçu par l'oreille.

Il s'agit de la puissance $P \text{ (W)}$ transportée par une onde sonore qui traverse une surface S de 1 m^2 .

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

On a créé une autre grandeur, le niveau d'intensité sonore, plus aisée à exploiter que l'intensité sonore. Il est noté L (comme Level en anglais) et s'exprime en décibels (dB) :

$$L = 10 \times \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$$

où $I_0 = 1,0 \cdot 10^{-12} \text{ W.m}^{-2}$ est l'intensité au seuil d'audibilité.



Echelle des bruits exprimés en décibels

Son échelle est graduée de **0 à 140 dB** environ.

Remarque: Lorsque plusieurs instruments de musique jouent ensemble, lors d'un concert par exemple, les intensités sonores dues à chaque instrument s'ajoutent, mais pas les niveaux d'intensité sonore.

Si l'intensité sonore est multipliée par **2**, alors le niveau d'intensité sonore augmente de **3 dB**:

Par exemple, si l'intensité sonore I_2 est le double de l'intensité sonore I_1 , nous aurons un gain de **3 dB**. On a pour les niveaux d'intensité sonore L_1 et L_2 :

$$L_1 = 10 \times \log\left(\frac{I_1}{I_0}\right)$$

$$L_2 = 10 \times \log\left(\frac{I_2}{I_0}\right) = 10 \times \log\left(\frac{2 \cdot I_1}{I_0}\right) = 10 \times \log(2) + 10 \times \log\left(\frac{I_1}{I_0}\right) = 3 + L_1$$

11- Atténuation

L'atténuation A (dB) d'un son dont le niveau d'intensité sonore passe de L_1 à L_2 vaut:

$$A = L_1 - L_2 = 10 \cdot \log\left(\frac{I_1}{I_2}\right)$$

Par exemple, si l'intensité sonore I_2 est le double de l'intensité sonore I_1 , nous aurons une atténuation de **-3 dB**:

$$A = 10 \cdot \log\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = 10 \cdot \log\left(\frac{I_1}{2 \cdot I_1}\right) = 10 \cdot \log\left(\frac{1}{2}\right) = -3 \text{ dB}$$

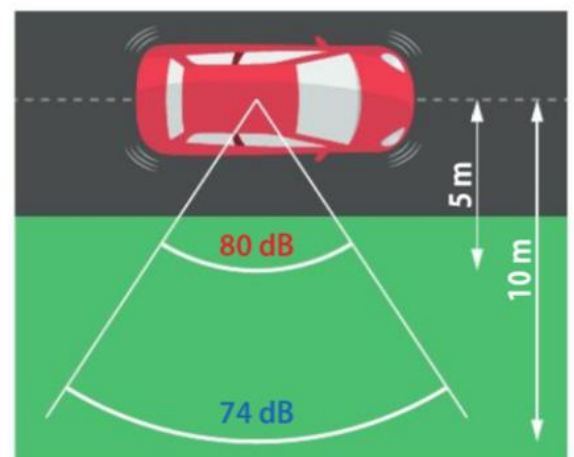
L'intensité sonore $I = \frac{P}{S}$ diminue lorsqu'on s'éloigne de la source.

En effet, la puissance sonore P est constante alors que la surface sur laquelle la puissance sonore se répartit augmente.

Par exemple, si la distance par rapport à une source double, nous aurons une atténuation de **-6 dB**:

Pour un rayon $d_1 = d$, la sphère aura une surface de:

$$S_1 = 4 \cdot \pi \cdot d_1^2 = 4 \cdot \pi \cdot d^2.$$



Pour un rayon $d_2 = 2.d$, la sphère aura une surface de:

$$S_2 = 4.\pi.d_2^2 = 4.\pi.(2.d)^2 = 16.\pi.d^2.$$

Les intensités sonores auront pour valeurs respectives:

$$I_1 = \frac{P}{S_1} = \frac{P}{4.\pi.d^2} \quad \text{et} \quad I_2 = \frac{P}{S_2} = \frac{P}{16.\pi.d^2}$$

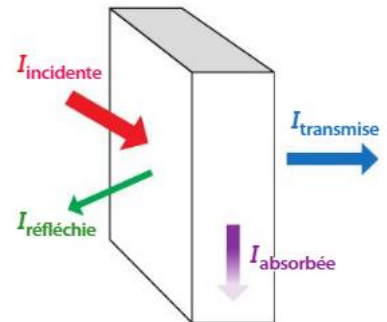
L'atténuation lorsque la distance double sera alors de - 6 dB:

$$A = 10.\log\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = 10.\log\left(\frac{\frac{P}{4.\pi.d^2}}{\frac{P}{16.\pi.d^2}}\right) = 10.\log(4) = -6 \text{ dB}$$

Lorsqu'une onde sonore rencontre une paroi, elle peut être transmise, réfléchie ou absorbée.

L'atténuation par absorption A (dB) évalue l'efficacité d'un matériau à lutter contre la transmission de bruit.

$$A = L_{\text{incident}} - L_{\text{transmis}} = 10.\log\left(\frac{I_{\text{incident}}}{I_{\text{transmis}}}\right)$$



12- Effet Doppler

12.1- Présentation de l'effet Doppler

Le son émis par un véhicule est perçu plus aigu quand le véhicule s'approche d'un observateur, et plus grave quand il s'en éloigne.

L'effet Doppler est l'existence d'un décalage entre la fréquence f_E d'une onde électromagnétique ou mécanique émise et la fréquence f_R de l'onde reçue lorsque la distance entre l'émetteur et le récepteur varie.

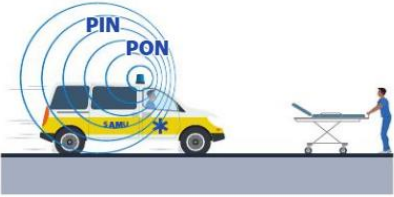


Le décalage Doppler est:

$$\Delta f = f_R - f_E \quad \left| \begin{array}{l} \Delta f: \text{Décalage Doppler (Hz)} \\ f_E: \text{Fréquence émise (Hz)} \\ f_R: \text{Fréquence reçue (Hz)} \end{array} \right.$$

La fréquence f d'une onde, sa période T et sa longueur d'onde λ sont liées les unes aux autres.

L'effet Doppler correspond donc aussi à un décalage de période ou de longueur d'onde.

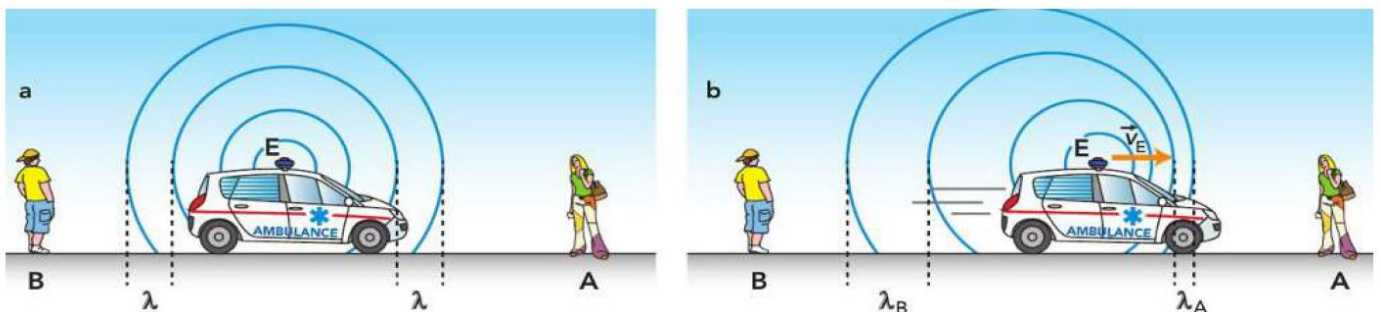
Le signe du décalage Doppler dépend du sens d'évolution de la distance entre l'émetteur **E** et le récepteur **R**.

Rapprochement de E et R	Immobilité entre E et R	Éloignement de E et R
		
$\lambda_R < \lambda_E$ $T_R < T_E$ $f_R > f_E$ $\Delta f = f_R - f_E > 0$	$\lambda_R = \lambda_E$ $T_R = T_E$ $f_R = f_E$ $\Delta f = f_R - f_E = 0$	$\lambda_R > \lambda_E$ $T_R > T_E$ $f_R < f_E$ $\Delta f = f_R - f_E < 0$

12.2- Expression du décalage Doppler

L'expression du décalage Doppler dépend du type d'onde, de la nature du mouvement de l'émetteur par rapport au récepteur et de la présence éventuelle d'une réflexion des ondes.

Considérons un émetteur d'ondes sonores **E**, qui se rapproche d'un récepteur fixe **A** avec une vitesse de valeur V_E .

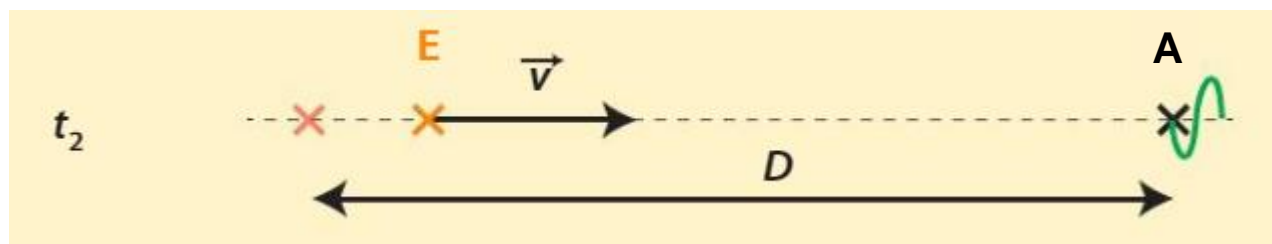


L'émetteur **E** émet avec une période T_E une succession de signaux qui se propagent à la célérité $V_{\text{onde}} > V_E$.

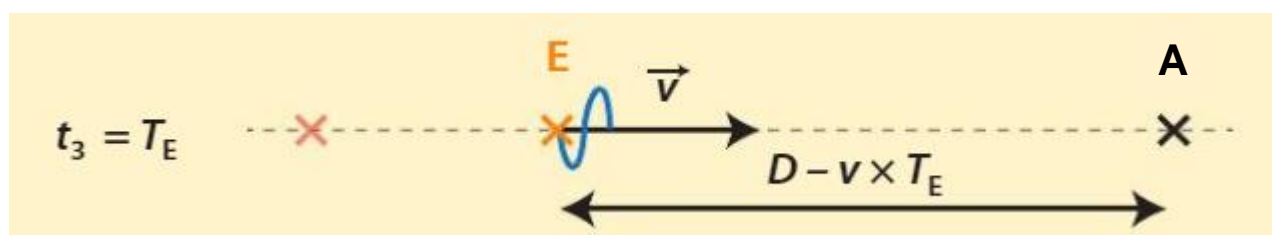
À une date $t_1 = 0$ s, un signal est émis par l'émetteur **E**, alors que la distance entre **E** et **A** est égale à **D**.



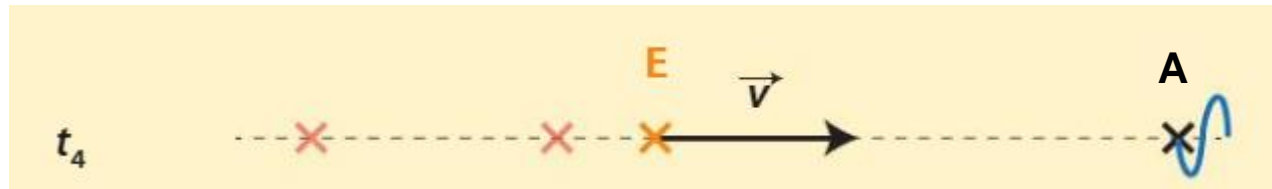
Ce signal émis à la date t_1 est reçu par **A** à la date $t_2 = \frac{D}{V_{\text{onde}}}$.



A la date $t_3 = T_E$, donc 1 période après la première émission, un autre signal est émis, alors que l'émetteur **E** se trouve à une distance $D - v \cdot T_E$ de **A**.



Ce signal émis à la date t_3 est reçu par **A** à la date $t_4 = T_E + \frac{D - V \cdot T_E}{V_{\text{onde}}}$.



Les signaux émis par **E** avec une période $T_E = t_3 - t_1$ sont reçus par **A** avec une période $T_A = t_4 - t_2$.

Donc:

$$T_A = T_E + \frac{D - V \cdot T_E}{V_{\text{onde}}} - \frac{D}{V_{\text{onde}}} = T_E - \frac{V \cdot T_E}{V_{\text{onde}}} = T_E \cdot \left(1 - \frac{V}{V_{\text{onde}}}\right)$$

Cela conduit à la relation:

$$f_A = f_E \cdot \left(\frac{V_{\text{onde}}}{V_{\text{onde}} - V}\right)$$

Quand un émetteur **E** se rapproche d'un récepteur **R** fixe, le décalage Doppler $\Delta f = f_R - f_E$ est:

$$\Delta f = f_E \cdot \left(\frac{V_{\text{onde}}}{V_{\text{onde}} - V}\right) - f_E = f_E \cdot \left(\frac{V}{V_{\text{onde}} - V}\right)$$

Quand un émetteur E s'éloigne d'un récepteur R fixe, le décalage Doppler $\Delta f = f_R - f_E$ est:

$$\Delta f = f_E \cdot \left(\frac{V_{\text{onde}}}{V_{\text{onde}} + V} \right) - f_E = - f_E \cdot \left(\frac{V}{V_{\text{onde}} + V} \right)$$

L'effet Doppler constitue une méthode de mesure de valeurs de vitesse.

Remarque: L'expression du décalage Doppler peut être simplifiée si la valeur de la vitesse de déplacement est très inférieure à celle de l'onde.

Pour un rapprochement on aura:

$$\Delta f \approx f_E \cdot \left(\frac{V}{V_{\text{onde}}} \right) > 0$$

Pour un éloignement on aura:

$$\Delta f \approx - f_E \cdot \left(\frac{V}{V_{\text{onde}}} \right) < 0$$

12.3- Effet Doppler Fizeau

Les raies visibles dans le spectre de la lumière venant d'une galaxie sont souvent décalées par rapport à celles mesurées pour une source immobile sur Terre.

Le décalage de longueur d'onde dû à l'effet Doppler-Fizeau permet de calculer la valeur de la vitesse d'éloignement ou de rapprochement d'une galaxie par rapport à la Terre.

Il y a un décalage vers le rouge (redshift) des raies entre le spectre obtenu pour une source et un observateur immobile et celui obtenu pour un éloignement entre la source et l'observateur. Les longueurs d'ondes augmentent.

Il y a un décalage vers le bleu (blueshift) des raies entre le spectre obtenu pour une source et un observateur immobile et celui obtenu pour un rapprochement entre la source et l'observateur. Les longueurs d'ondes diminuent.

