PHYSIQUE-CHIMIE

soutienscolaire@monsieurtahar.com

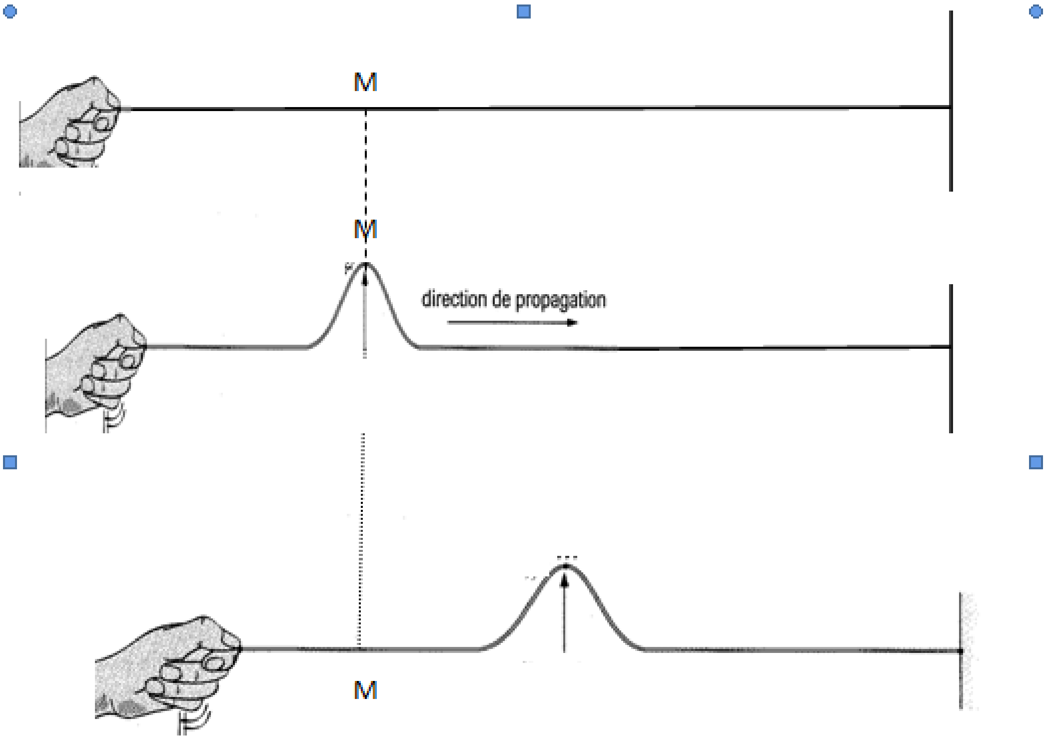
CHAPITRE 15

Chapitre 15 ATTENUATION DU SON ET EFFET DOPPLER

I) RAPPELS SUR LES ONDES MECANIQUES:

1) Définition générale.

On appelle onde mécanique progressive le phénomène de propagation d'une perturbation dans un milieu matériel sans transport de matière.



Le point M subit la perturbation et revient à sa position de départ.

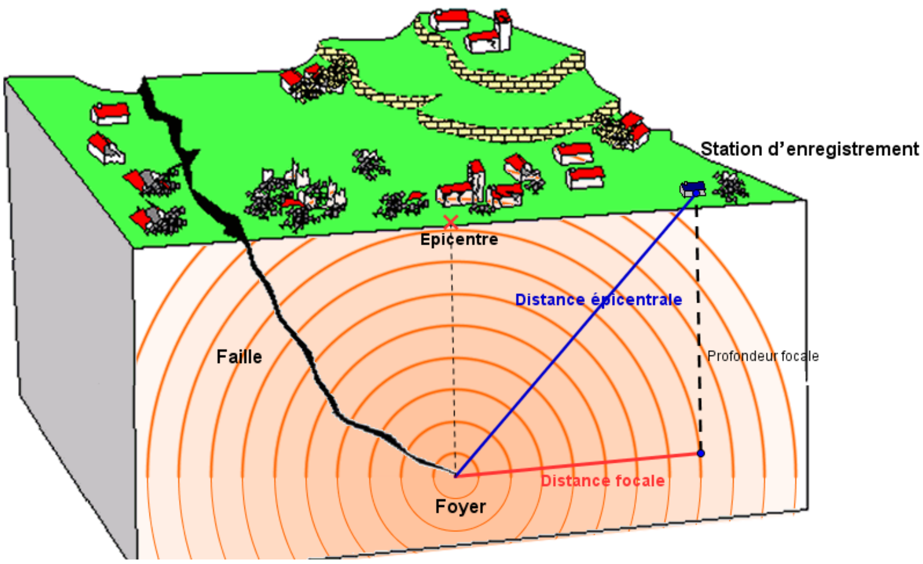
Il n'y a donc pas déplacement de matière.

2) Exemple d'onde mécanique :

- la houle: il s'agit d'une onde mécanique en 2 dimensions car elle se propage à la surface de l'eau. Lors des tempêtes elle peut créer des dégâts importants.

- les ondes sonores: un son est produit par une **perturbation** qui fait se déplacer la matière de part et d'autre de sa position d'équilibre. Par exemple des couches d'air au passage de l'onde sonore se déplacent et transmettent ce déplacement aux autres couches d'air.

- les ondes sismiques: elles sont créées au cours d'un déplacement de la croute terrestre. Les dégâts sur les bâtiments peuvent être importants. **Le foyer du séisme** correspond à la **source de l'ébranlement**. **L'épicentre** est **le point** à la surface de la Terre situé **à la verticale du foyer**. **La magnitude** mesure l'énergie dégagée par le séisme. On utilise **l'échelle de Richter** pour indiquer la valeur de la magnitude.

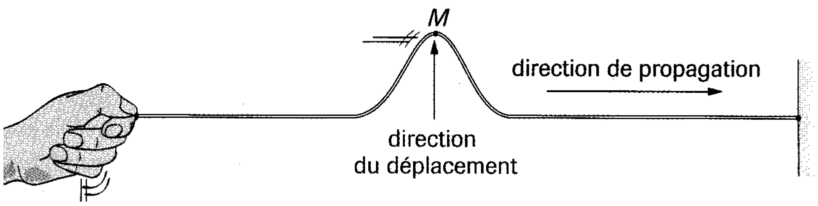


3) Onde longitudinale et onde transversale.

a) Onde transversale.

Une onde est transversale lorsque la direction de la perturbation s'effectue perpendiculairement à la direction de propagation.

Exemple : La corde est le milieu de propagation et elle ne se déplace pas dans son ensemble. Il n'y a pas de transport de matière. Chaque point reproduit, à son tour, le mouvement du point précédent. On notera qu'il est nécessaire que le milieu de propagation présente une certaine élasticité.



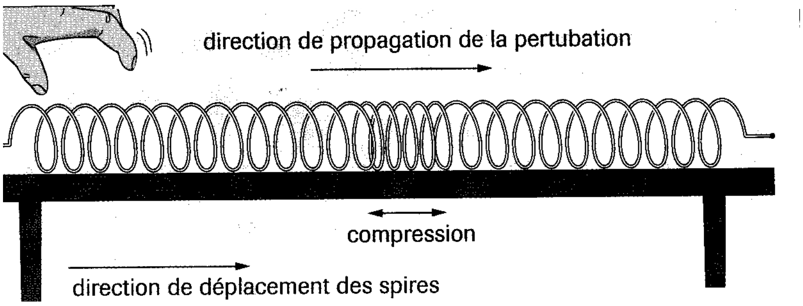
Exemple : la houle est une onde mécanique transversale.

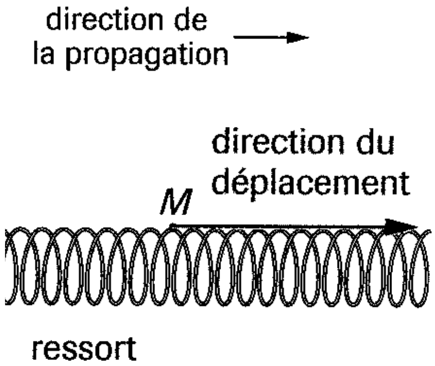
b) Onde longitudinale.

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

Exemple 1 : l'onde sonore (onde longitudinale de compression - dilatation)

Exemple 2 : onde le long d'un ressort





II. Propriétés générales des ondes mécaniques progressives.

1. Direction de propagation;

Une onde se propage, à partir de la source, dans toutes les directions qui lui sont offertes. On distinguera ainsi les ondes à une, deux ou trois dimensions.

a) Onde à une dimension.

Une onde mécanique progressive est à une dimension lorsque la propagation a lieu dans une seule direction.

Exemple : L'onde se propageant le long d'une corde .

b) Onde à deux dimensions.

Une onde mécanique progressive est à deux dimension lorsque la propagation a lieu dans un plan (espace à deux dimensions).

Exemple : onde engendrée à la surface de l'eau lorsqu'on y jette une pierre.

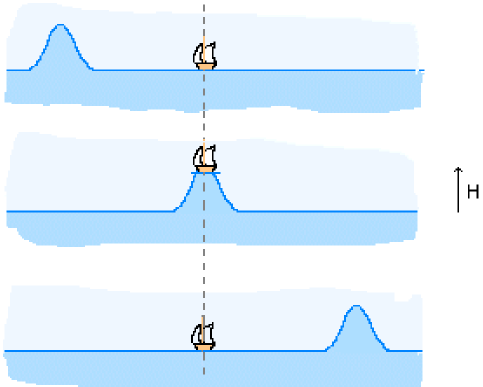
c) Onde à trois dimensions.

Une onde mécanique progressive est à trois dimension lorsque la propagation a lieu dans l'espace.

Exemple : Onde sonore engendrée par deux mains que l'on claque l'une contre l'autre.

2. Transfert d'énergie sans transport de matière.

L'onde mécanique progressive transporte de **l'énergie sans transport de matière.**



L'exemple ci-contre illustre ces propriétés. Au passage de l'onde, le bateau s'élève d'une hauteur H et voit donc son énergie potentielle de pesanteur augmenter de mgH. Cette énergie lui a été fournie par l'onde, mais le bateau est resté à la même abscisse: il n'y a pas de transport de matière.

3. Célérité de l'onde.

On appelle célérité v de l'onde la vitesse de propagation de l'onde. C'est le rapport entre la distance d parcourue par l'onde et la durée Δt du parcours.

$$\boxed{v = \frac{d}{\Delta t}}$$

v en mètre par seconde (ms^{-1}), d en mètre (m), Δt en seconde (s)

On préfère le mot **célérité** au mot **vitesse auquel est associé la notion de déplacement de matière** (vitesse d'une automobile, d'une particule etc...).

La célérité de l'onde est une propriété du milieu de propagation. Elle est donc constante dans un milieu donné dans des conditions données.

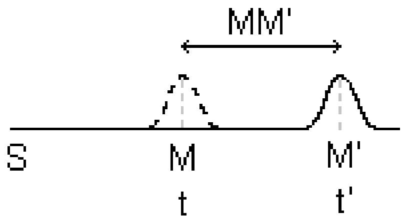
Par exemple :

- la célérité du son dans l'air dépend de sa température.

- La célérité d'une onde se propageant sur une corde dépend de sa tension et de sa masse linéique (masse par unité de longueur).

4) Retard de l'onde.

Soit une onde émise par la source S et se propageant avec la célérité finie v le long d'une corde. Cette onde se propage de proche en proche dans le milieu de propagation. Elle atteint le point M à la date t et le point M' à la date ultérieure t'. Cela revient à dire que le point M' subit la même perturbation que le point M avec un certain retard τ.Étant donnée la définition de la célérité on pourra écrire:



$t' - t = \tau$

$$\boxed{v = \frac{MM'}{\tau}}$$ et donc $$\boxed{\tau = \frac{MM'}{v}}$$

III. Les ondes progressives sinusoïdales

1) Périodicité temporelle d'une onde progressive

De façon générale, en physique, la période, notée T est la plus petite durée au bout de laquelle le phénomène se répète identique à lui-même. T s'exprime en seconde

Dans le cas de la propagation d'une onde progressive, c'est la plus petite durée au bout de laquelle un point du milieu se retrouve dans le même état vibratoire.

La fréquence d'un e onde progressive est le nombre de perturbations crées par seconde
On la note généralement f, ou N son unité est le hertz (Hz). La fréquence est l'inverse de la période:

$$\boxed{f = \frac{1}{T}}$$

2) Onde progressive sinusoïdale :

Une onde progressive sinusoïdale est la propagation d'une perturbation décrite par une fonction sinusoïdale du temps

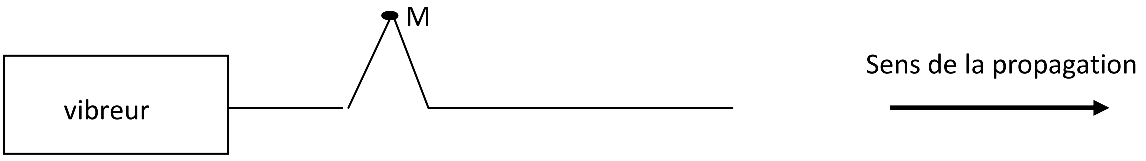
3) Périodicité spatiale :

La périodicité spatiale d'une onde progressive périodique est la plus petite distance séparant deux points du milieu se trouvant dans le même état vibratoire. Elle est appelée longueur d'onde et notée λ

4) Exemples :

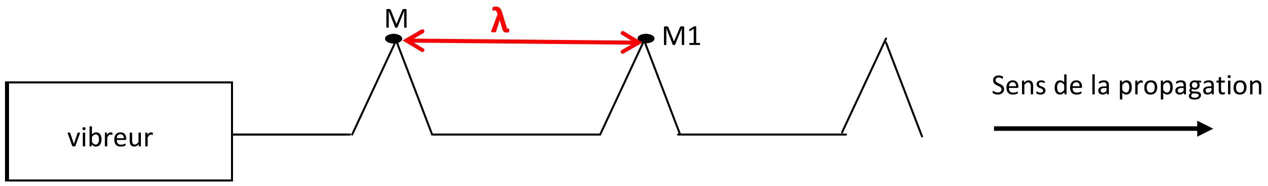
a) **onde le long d'une corde**

Onde mécanique progressive



Le vibreur créé une perturbation unique qui se propage.

Onde mécanique progressive périodique

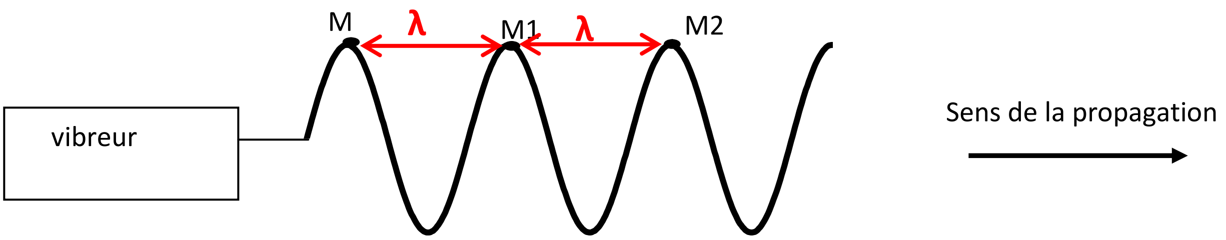


Le vibreur crée des perturbations de façon régulière à intervalles de temps constant.

Chaque T (période) seconde, une perturbation est crée. Toutes les T seconde, M se retrouvera dans le même état vibratoire.

M et M1 sont deux points se trouvant dans le même état vibratoire, ils sont séparés d'une longueur d'onde λ.

Onde mécanique progressive sinusoïdale (donc périodique)

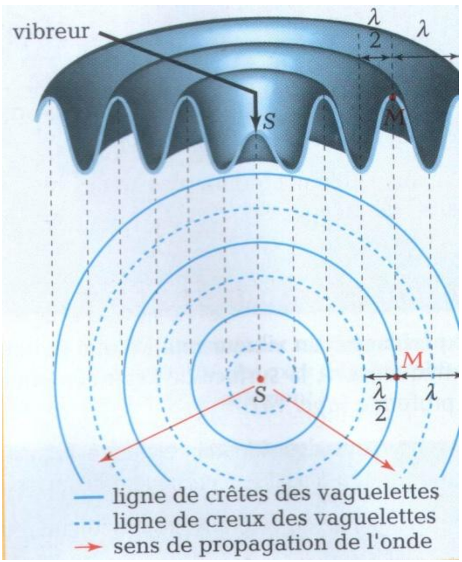


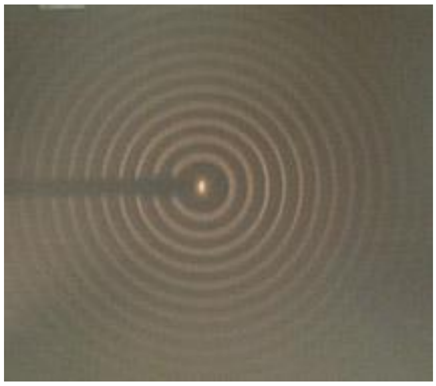
Le vibreur crée des perturbations de forme sinusoïdales à intervalles de temps constant.

Chaque T seconde, tous les points du milieu se retrouveront dans le même état vibratoire.

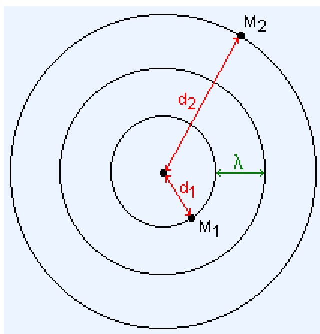
M , M1 et M2 sont dans le même état vibratoire, par contre la distance séparant M deM2 correspond à 2λ.

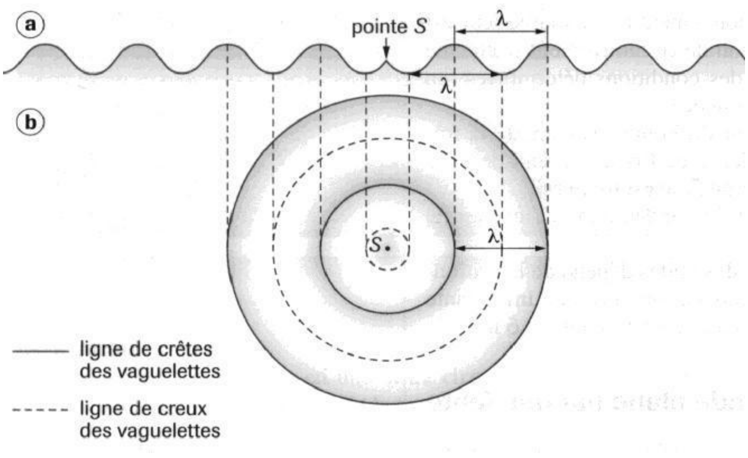
b) <u>Onde circulaire à la surface de l’eau :</u>



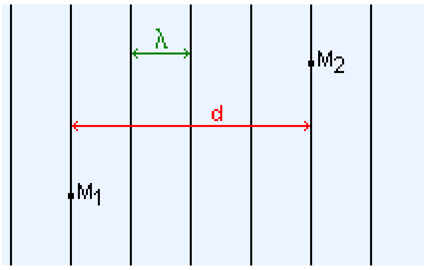


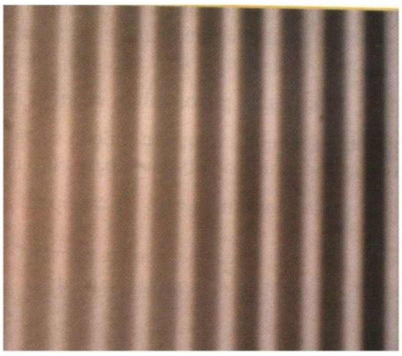
<u>Les points M_1 et M_2 vibrent en phase si $|d_2-d_1| = k.\lambda$.</u>



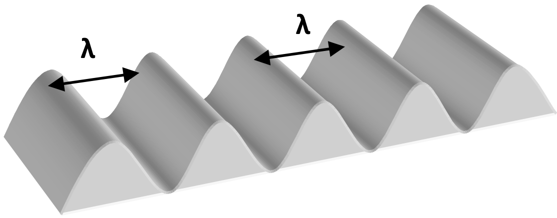


c) Les ondes rectilignes à la surface de l'eau





Les points M_1 et M_2 vibrent en phase si $|d_2-d_1| = k.\lambda$.



5) Relation entre la période T et la longueur d'onde λ :

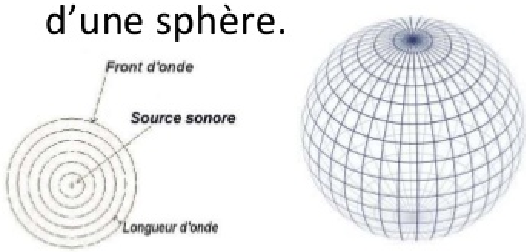
Nous allons effectuer une analyse dimensionnelle du rapport λ / T.
[λ] = [L]   et [T] = [T]   d'où λ / T a la dimension [L] / [T]   ou [L] .[T]$^{-1}$ qui est la dimension d'une vitesse.

Par conséquent : $\lambda = v.T$ **λ s'exprime en m, T en seconde et v en m/s.**
Autrement dit ; la longueur d'onde λ correspond à la distance parcourue par l'onde pendant une période temporelle T.

IV) Intensité sonore I et niveau sonore L:

1) Rappels sur les ondes sonores

- L'onde sonore se propage dans les trois directions à partir d'une source.
- La source émet une puissance P.
- Cette puissance se répartit sur la surface S d'une sphère.



Il faut imaginer la propagation en 3D.

La grandeur qui permet de caractériser la « force d'un bruit » est **l'intensité sonore** notée *I* exprimée en **W.m**$^{-2}$ (watt par mètre carré).
Plus un son est fort plus son intensité sonore est forte.
L'intensité sonore est définie par la relation:

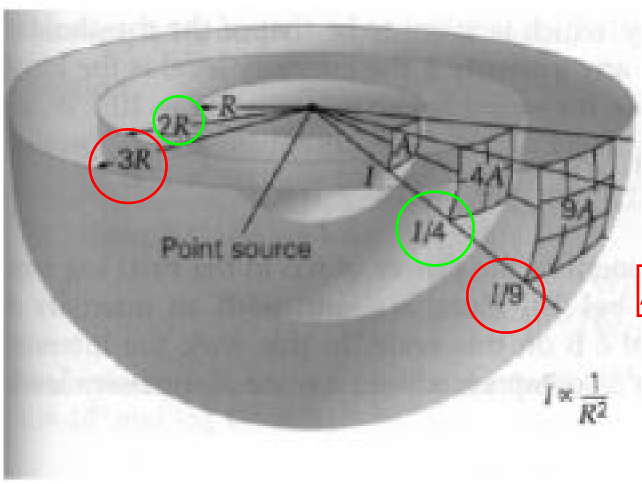
$$\boxed{I = \frac{P}{S} = \frac{P}{4\pi d^2}}$$

P s'exprime en Watt (W)

d la distance par rapprt à la source (m)

I et d^2 sont 2 grandeurs inversement proportionnelles.
Si d double, l'intensité sonore est divisé par 4.
Si d triple, l'intensité sonore est divisé par 9

VOIR SCHEMA CI-DESSOUS.



L'intensité sonore diminue quand d augmente.

On parle:

ATTENUATION GEOMETRIQUE

Il existe une intensité sonore minimale sous laquelle on n'entend pas le son ; c'est **le seuil d'audibilité**. Il vaut $\boldsymbol{I_0 = 1{,}0.10^{-12}}$ **W.m**$^{-2}$.

Il existe aussi **un seuil de douleur**, palier au-delà duquel un son crée une douleur et endommage fortement voire irrémédiablement le système auditif. L'intensité sonore associée vaut $\boldsymbol{I_{douleur} = 10^2}$ **W.m**$^{\mathbf{-2}}$.

On se rend donc compte que les intensités sonores des bruits quotidiens peuvent s'étendre de $1{,}0.10^{-12}$ W.m^{-2} jusqu'à 10^2W.m^{-2}. Ce domaine est beaucoup trop étendu pour se rendre compte des différentes valeurs : le seuil de douleur est 10^{14} fois plus fort que le seuil d'audibilité !!

Pour réduire ce domaine de valeurs on a alors créé une nouvelle grandeur : **le niveau d'intensité sonore *L*** (*L* pour « Level » in english) exprimé en **décibel (dB)** et qui se calcule par la formule suivante :

$$\boxed{L = 10.\log(\frac{I}{I_0})}$$

avec :
- L le niveau d'intensité sonore (dB)
- I l'intensité sonore de la source sonore (W.m^{-2})
- I_0 le seuil d'audibilité ($I_0 = 1{,}0.10^{-12}$ W.m^{-2})

→ « log » est une fonction mathématique appelée « logarithme décimal ». Il se calcule en appuyant sur la touche « log » de votre calculatrice.

Calculons alors le niveau d'intensité sonore pour le seuil d'audibilité I_0 :

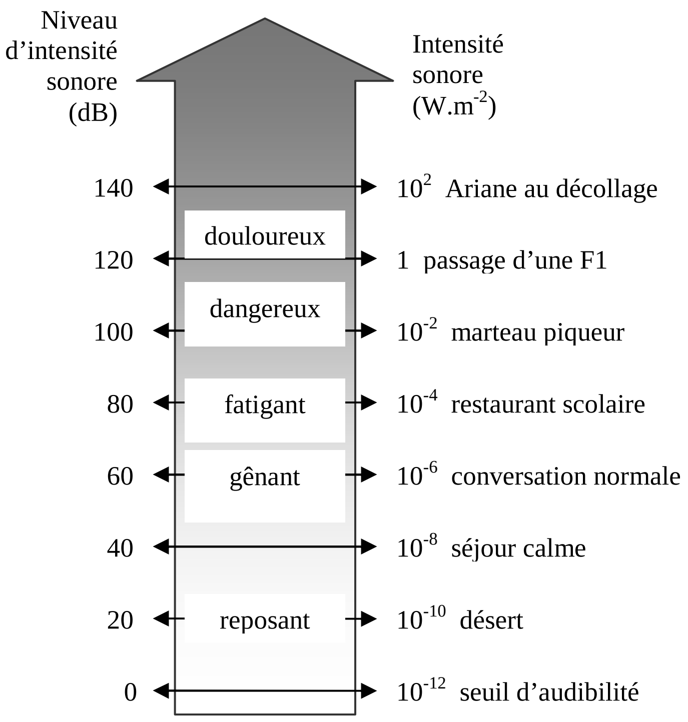
$$L_{min} = 10.\log(\frac{I_0}{I_0}) = 10.\log(1) = 0 \text{ dB}$$

On peut ensuite calculer le niveau d'intensité sonore pour le seuil de douleur :

$$L_{max} = 10.\log(\frac{I_{douleur}}{I_0}) = 10.\log(\frac{10}{1{,}0.10^{-12}}) = 140 \text{ dB}$$

Les valeurs des niveaux d'intensité sonore ne s'étendent plus que sur un domaine allant de 0 à 140 !

Le schéma ci-dessous donne les intensités sonores et les niveaux d'intensité sonore de différentes sources sonores :



- Un appareil permet de mesurer le niveau d'intensité sonore. Il s'appelle un **sonomètre**.

2) Application directe:

A/ Calculer un niveau d'intensité sonore :

Question :

Calculer le niveau d'intensité sonore d'une source d'intensité sonore $1{,}0.10^{-5}$ W.m^{-2}.

On utilise la formule $L = 10.\log(\frac{I}{I_0})$. On remplace I par sa valeur :

$$L = 10.\log(\frac{1{,}0.10^{-5}}{1{,}0.10^{-12}}) = 10.\log(1{,}0.10^{7})$$

On en déduit finalement que $\boxed{L = 10.\log(1{,}0.10^{7}) = 10 \times 7 = 70 \text{ dB}}$

B/ Calculer une intensité sonore :

→ 1ère Question :

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

$$L = 10.\log(\frac{I}{Io})$$

$$L/10 = \log(\frac{I}{Io})$$

$$10^{L/10} = \frac{I}{Io}$$

$$\boxed{I = I_0.10^{\frac{L}{10}}}$$

$$I = 1{,}0.10^{-12}.10^{60/10} = 1{,}0.10^{-6} \text{ W/m}^2$$

→ 2ème question :

On considère 4 instruments qui émettent, chacun SEUL, une note de niveau d'intensité sonore L = 60 dB. Quel sera le niveau d'intensité sonore si les 4 instruments jouent ensemble ?

Avant même de commencer, il faut retenir que :

ON N'AJOUTE PAS LES NIVEAUX D'INTENSITÉ SONORE ENTRE EUX !
SEULES LES INTENSITÉS SONORES S'AJOUTENT !

Deux instruments de musiques émettent des sons d'intensité sonores I1 et I2 de niveaux sonores correspondant L1 et L2.

Les intensités sonores s'additionnent : $I_{total} = I_1 + I_2$

Les niveaux sonores ne s'additionnent pas : $L_{total} \neq L_1 + L_2$

Dans ce genre d'exercice, on procédera toujours de la manière suivante :

1. Il faut calculer les intensités sonores *I* de chaque source sonore.
2. On ajoute ensuite toutes les intensités sonores *I* entre elles.
3. On calcule finalement le niveau d'intensité sonore *L*.

Pour nos instruments de musique, on a déjà calculé l'intensité sonore et on a trouvé :

$$I = 1{,}0.10^{-6}\ W.m^{-2}.$$

Les 4 instruments ensemble vont produire une intensité sonore 4 fois plus importante soit :

$$I_{total} = 4.\ I = 4{,}0.10^{-6}\ W.m^{-2}.$$

On peut alors calculer le nouveau niveau d'intensité sonore correspondant :

$$L = 10.\log\left(\frac{4{,}0.10^{-6}}{1{,}0.10^{-12}}\right) = 10.\log(4{,}0.10^{6}) = 66\text{dB}$$

→ 3ème question :

Un lave vaisselle en fonctionnement a un niveau sonore L1 = 42 dB et celui d'une imprimante L2 = 46 dB

Calculer le niveau sonore total lorsque les 2 appareils fonctionnent simultanément.

Ce sont les intensités sonores qui s'ajoutent $\Rightarrow$ $\mathbf{I = I_1 + I_2}$ **or** $\mathbf{L_1 = 42\ dB}$ **et** $\mathbf{L_2 = 46\ dB}$

$$I_1 = I_0 \times 10^{L1/10} \qquad I_2 = I_0 \times 10^{L2/10}$$

donc $I_{total} = I_0 \times 10^{L1/10} + I_0 \times 10^{L2/10} = I_0 \left(10^{L1/10} + 10^{L2/10} \right)$

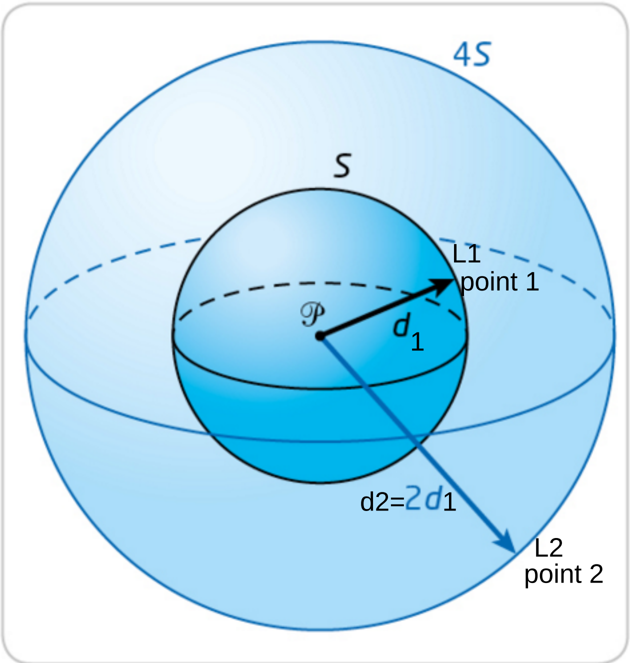
Le niveau sonore est alors $L_{total} = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right) = 10 \log\left(10^{L1/10} + 10^{L2/10}\right) = 47{,}5\ \text{dB}$

V. ATTENUATION GEOMETRIQUE ET PAR ABSORPTION

Au cours de la propagation d'une onde, son amplitude diminue. Il y a atténuation de l'onde.

Dans le cas des ondes sonores, l'**atténuation (en dB)** mesure la diminution du niveau d'intensité sonore.
Il existe deux types d'atténuation.

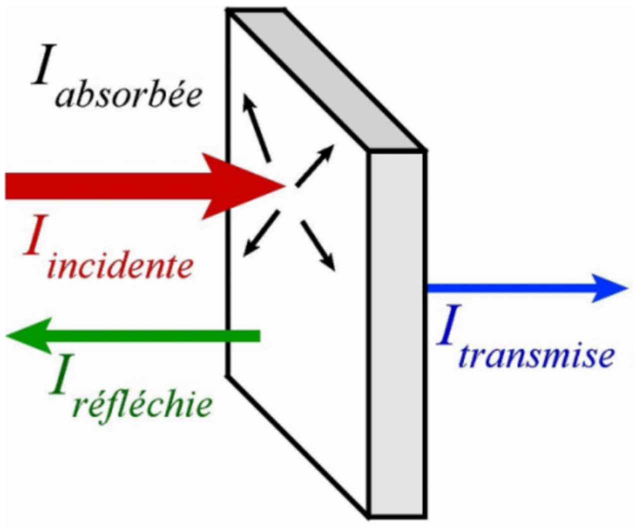
- **L'atténuation géométrique** se manifeste lorsqu'un observateur s'éloigne de la source puisque l'énergie par unité de surface transportée par l'onde diminue (**DOC. 3**).
- **L'atténuation par absorption** est causée par le milieu matériel qui absorbe une partie de l'énergie rayonnée par la source au fur et à mesure de la propagation de l'onde (**DOC. 4**).



3. **Quand le rayon d'une sphère double, la puissance rayonnée se répartit sur une surface d'aire quatre fois plus grande.** L'intensité sonore est donc divisée par quatre et le niveau d'intensité sonore diminue de 6 dB.

ATTENUATION GEOMETRIQUE

A géometrique $= L1 - L2 = 10 \log(I1/I2)$



L'atténuation A par absorption est égale à la différence entre le niveau sonore incident avant l'obstacle, $L_{incident}$ et le niveau sonore transmis $L_{transmis}$

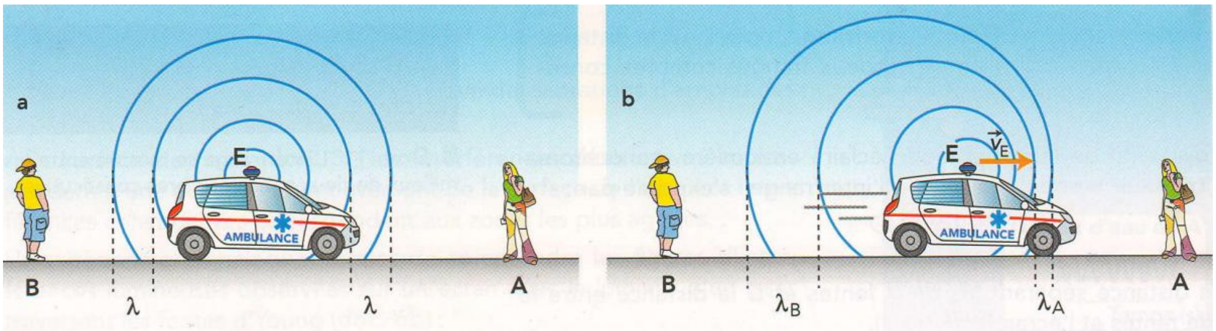
ATTENUATION PAR ABSORPTION

A attenuation $= L_{incid} - L_{trans} = 10.\log (I_{incid} / I_{trans})$

VI. EFFET DOPPLER:

1) Qu'est-ce que l'effet Doppler?

Lorsque la sirène d'une ambulance, s'approche, le son perçu parait plus aigu, puis plus grave lorsque celle-ci s'éloigne : la fréquence de l'onde sonore reçue varie lorsque l'émetteur se déplace.



Lorsque l'émetteur est immobile, les observateurs immobiles A et B perçoivent des ondes de même longueur λ.

Lorsque l'émetteur se déplace à la vitesse v_E en s'approchant de l'observateur A et en s'éloignant de l'observateur B, ceux-ci perçoivent des ondes de longueurs d'onde $\lambda_A < \lambda$ et $\lambda_B > \lambda$.

L'effet Doppler correspond à un décalage $\Delta f = f_R - f_E$ non nul entre la fréquence f_R du signal reçu par un récepteur R, et la fréquence f_E du signal émis par la source S, lorsque R et S sont en mouvement l'un par rapport à l'autre.

Si R et S se rapprochent, fR > fE (Δf = fR – fE est positif)

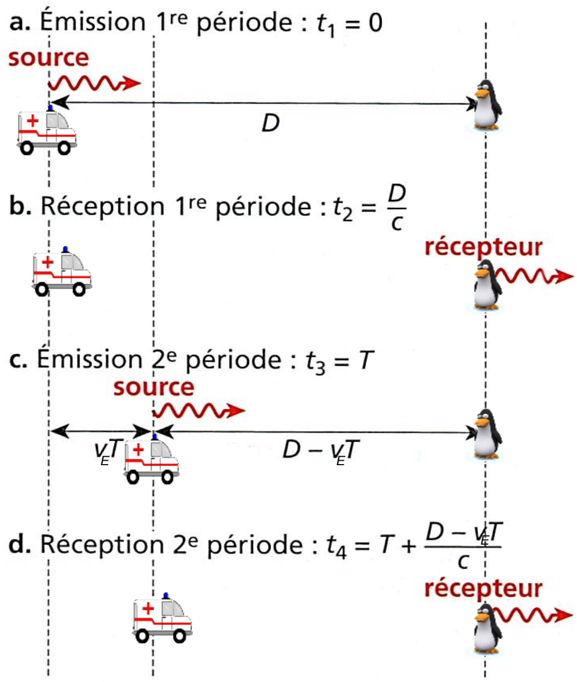
Si R et S s'éloignent, fR < fE (Δf = fE – fS est négatif)

Si R et S sont immobiles, fR = fE (Δf = 0 ; pas d'effet Doppler)

Les formules ne sont pas à connaitre par connaitre. Elles seront données dans les sujets de bac.	
$$f_R = \frac{c}{c - V_E} f_E$$ APPROCHE	$$f_R = \frac{c}{c + V_E} f_E$$ ELOIGNEMENT

V_E est la vitese de l'emetteur c est la célérité des ondes

Démonstration des formules des fréquences de réception:



Soit une ambulance (émetteur) qui se déplace à la vitesse v_E (vitesse de l'ambulance) en direction d'un récepteur fixe (pingouin).

Elle émet des ondes périodiques, de période T_E, se propageant dans le milieu à la célérité c (vitesse du son dans l'air).

⇒ **La première période de l'onde est émise à la date $t_1 = 0$:** L'ambulance est à la distance D du récepteur (figure a).
Cette onde parcourt cette distance à la vitesse c, le récepteur la reçoit à la date : $t_2 = \frac{D}{c}$ (figure b).

⇒ **La deuxième période de l'onde est émise à la date $t_3 = T_E$:** L'ambulance ayant parcouru la distance $v_E.T_E$ depuis la date t = 0, elle se trouve à $D - v_E.T_E$ du récepteur (figure c).

L'onde parcourt cette distance pendant la durée : $\frac{D - v_E.T_E}{c}$

donc le récepteur la reçoit à la date : $t_4 = T_E + \frac{D - v_E T_E}{c}$

⇒ **Pour le récepteur, la période est alors :**

$$T_R = t_4 - t_2 = T_E + \frac{D - v_E.T_E}{c} - \frac{D}{c} = T_E - \frac{v_E.T_E}{c} = T_E\left(1 - \frac{v_E}{c}\right)$$

⇒ **L'onde perçue par le récepteur peut aussi être caractérisée par sa fréquence f_R :**

$$f_R = \frac{1}{T_R} = \frac{1}{T_E}\frac{1}{\left(1 - \frac{v_E}{c}\right)} = f_E \frac{1}{\left(1 - \frac{v_E}{c}\right)} = f_E \frac{c}{c - v_E}$$

⇒ **Si la source s'éloigne du récepteur fixe, le raisonnement est identique**, il suffit de remplacer dans les expressions précédentes v_E par $-v_E$ puisqu'il y a éloignement.

Cela donne : $f_R = \frac{1}{T_R} = f_E \frac{c}{c + v_E}$

2) L'effet Doppler Fizeau en astronomie

A partir des travaux de C Doppler M Fizeau postule en 1848 que si une étoile ou une galaxie s'éloigne ou s'approche de la Terre on doit observer un décalage de ses raies d'absorption. La mesure de ce décalage permettrait de calculer la vitesse radiale de l'étoile (vitesse à laquelle l'astre s'approche ou s'éloigne de la Terre). Les calculateurs récents ont permis de vérifier son hypothèse.

On utilise également l'effet Doppler pour mettre en évidence la présence d'exoplanète autour d'une étoile.

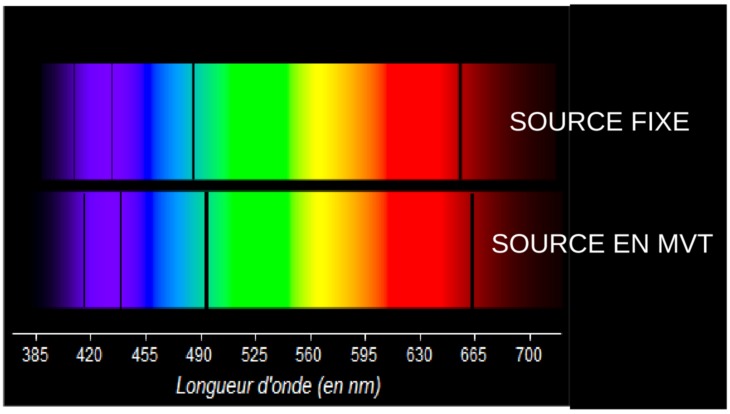
Lorsque l'étoile s'approche de la Terre les longueurs d'onde correspondant aux raies noirs du spectre d'absorption des éléments présents dans l'atmosphère de l'étoile:

-diminuent si l'étoile se rapproche **c'est l'effet BLUSHIFT**

- augmente si elle s'éloigne **c'est l'effet REDSHIFT**

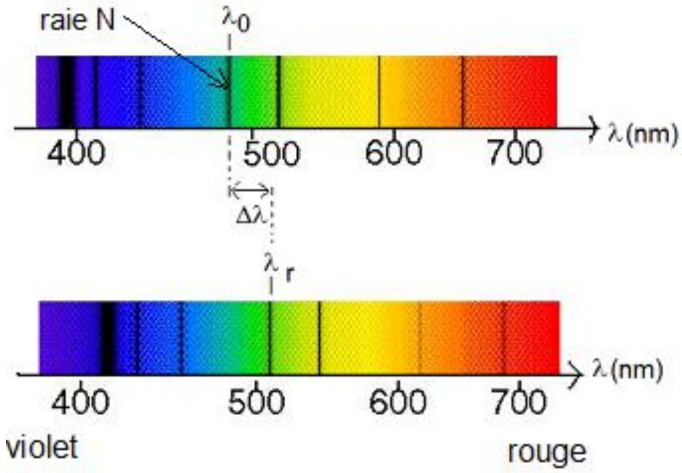
Exemple:

Voici le spectre d'absorption de l'hydrogène si la source est fixe par rapport au récepteur, puis si la source est en mouvement. La source s'éloigne ou se rapproche de l'objet?



L'objet s'éloigne car les longueurs d'onde correspondant aux raies noires de la source en mouvement sont plus grandes que celle du spectre de référence (source fixe).

Ci-dessous est présenté le phénomène dans le cas d'une étoile. Les raies d'absorption sont dues à l'atmosphère de l'étoile. Une exploitation similaire peut être réalisée sur le spectre d'autres objets.



Source lumineuse immobile par rapport à l'observateur.
Une des raies (raie N) a une longueur d'onde **λo**.

Source lumineuse identique s'éloignant de l'observateur : les raies sont décalées.
La raie N a une longueur d'onde **λr**.

Le déplacement des raies dû à l'effet Doppler-Fizeau s'évalue à l'aide d'une grandeur z, appelée décalage spectral relatif:

$$z = \frac{(\lambda r - \lambda o)}{\lambda o} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda o}$$

λo : longueur d'onde de la raie dans le spectre de la source lumineuse immobile

λ r : longueur d'onde de la raie dans le spectre de la source lumineuse en mouvement

On peut montrer que si la vitesse de l'astre observé est nettement inférieure à la célérité de la lumière dans le vide, la vitesse radiale v (c'est à dire la composante de la vitesse dans la direction d'observation) de la source lumineuse par rapport à l'observateur peut être déduite du décalage spectral à l'aide de la relation:

$$\mathbf{v = z \cdot c}$$

z : décalage spectral relatif

c = 3,00 x 10^{8} m.s^{-1} : célérité de la lumière dans le vide.

La vitesse radiale (c'est dire la vitesse d'approche ou d'éloignement) est donc positive par convention si l'astre s'éloigne et négative dans le cas inverse.