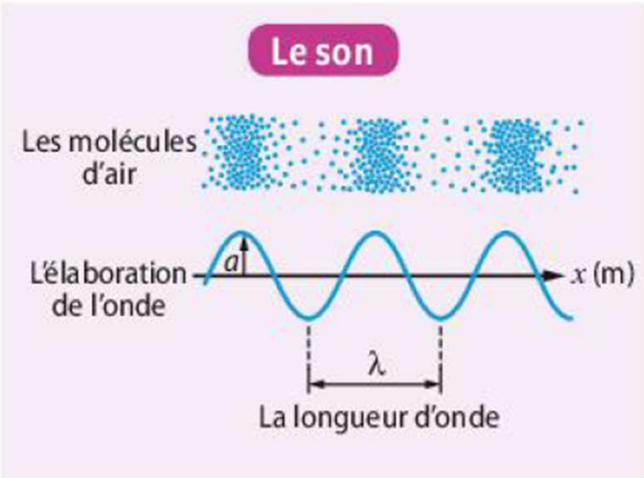
Propagation des ondes sonores

Niveau d'intensité sonore

Intensité sonore

Le son est une onde mécanique longitudinale qui transporte de l'énergie.



La puissance P correspond à l'énergie transportée par unité de temps.
L'intensité correspond à la puissance sonore par unité de surface.
Cette grandeur permet de calculer la puissance sonore reçue au niveau d'un récepteur de surface S.

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

I : intensité sonore ($W \cdot m^{-2}$)
P : puissance (W)
S : surface (m^2)

Lorsque le bruit environnant est très faible, l'oreille humaine peut percevoir des sons de très faibles intensités. Mais, lorsque le bruit environnant devient plus important, les mêmes sons d'intensités très faibles ne sont plus perçus. Notre tympan percevra alors des sons d'intensités beaucoup plus importantes.
Si l'intensité du son double, notre oreille ne perçoit pas un son deux fois plus fort. Les sensations auditives suivent une échelle logarithmique.

Niveau d'intensité sonore

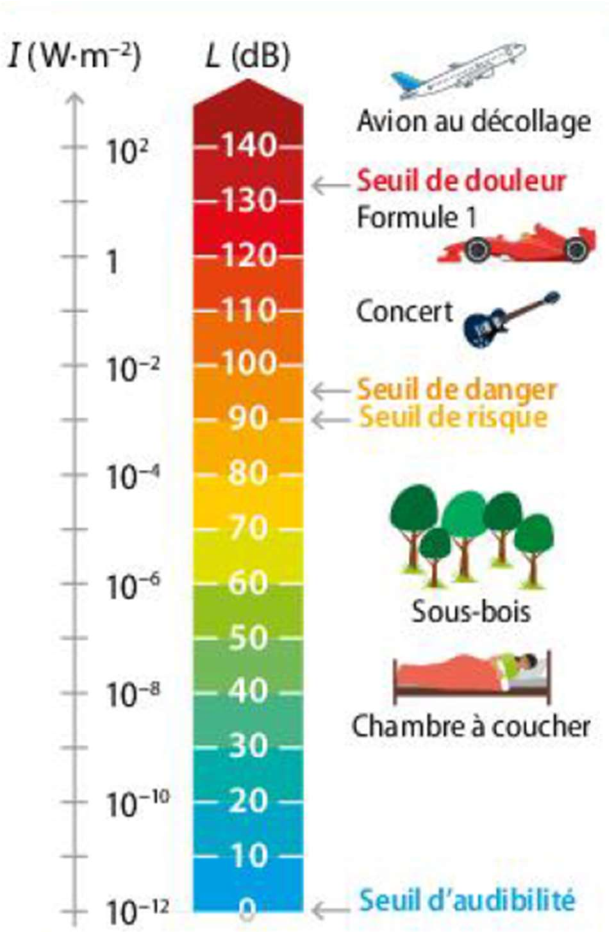
Intensité et niveau sonore sont reliés par la relation suivante :

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

I : intensité sonore ($W \cdot m^{-2}$)
L : niveau d'intensité sonore (dB)
I_0 : seuil d'audibilité à 1 000 Hz $I_0 = 1{,}0 \times 10^{-12}\ W \cdot m^{-2}$

Echelle d'intensité sonore I(W.m^{-2}) et de niveau d'intensité sonore L(dB)

Par convention, les seuils correspondent aux moyennes calculées sur la population pour des sons de fréquence 1000 Hz



Atténuation

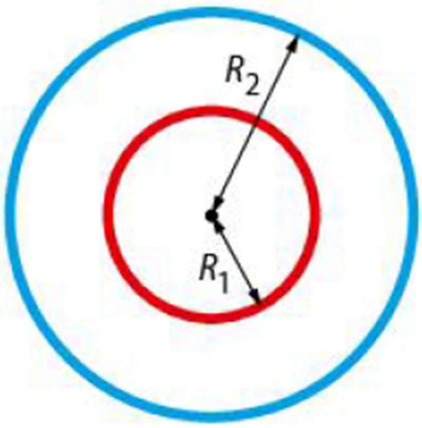
Atténuation géométrique

Un son peut être perçu à des niveaux d'intensités sonores différents qui dépendent de la distance entre la source sonore et le récepteur.

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

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

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



L'énergie émise est conservée, mais elle se répartie sur des sphères de plus en plus grandes.
Ainsi, si la distance à la source est multipliée par 2, l'onde se répartie sur une surface 4 fois plus grande.

$$10 \times \log 4 = 6$$

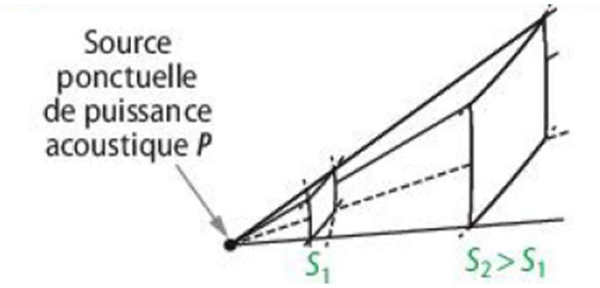
Alors, le niveau d'intensité sonore diminuera de 6 dB.

A mesure que le son se propage, la puissance acoustique P se répartie sur une surface S de plus en plus grande. Par conséquent le niveau d'intensité sonore L diminue. Le son est atténué.
La diminution de l'intensité sonore constaté est appelée atténuation A :

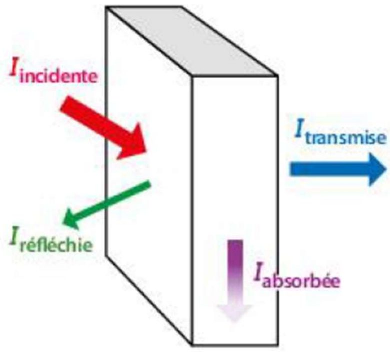
$$\boldsymbol{A = L_{proche} - L_{éloigné}}$$

Entre deux sphères de rayon R_1 et R_2 l'onde sonore s'atténue de

$$A = 10 \times \log\left(\frac{P}{4 \times \pi \times R_1^2 I_0}\right) - 10 \times \log\left(\frac{P}{4 \times \pi \times R_2^2 I_0}\right) = 10 \times \log\frac{R_2^2}{R_1^2}$$



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



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

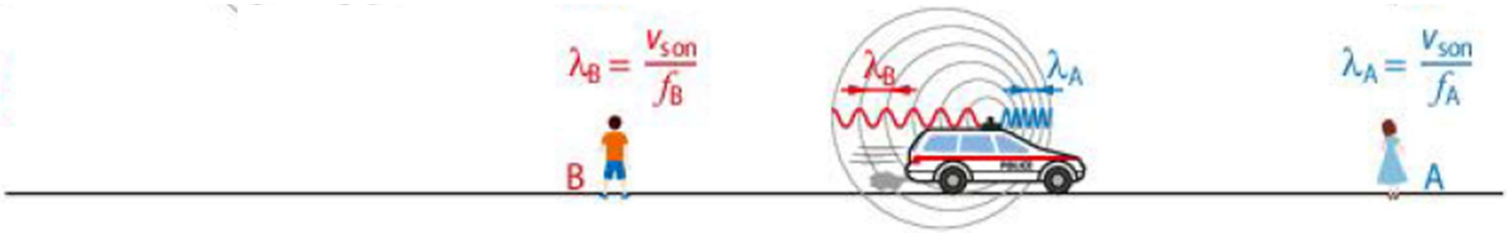
$$\boldsymbol{A = L_{incident} - L_{transmis}}$$

Effet Doppler

Observation

Véhicule immobile : Les observateurs A et B, ainsi que le conducteur perçoivent des sons à la même fréquence.

Véhicule en mouvement : l'observateur A perçoit un son de fréquence plus grande, et l'observateur B perçoit un son de fréquence plus petite.



lorsque la distance entre l'émetteur et le récepteur varie.

Le décalage Doppler est noté : $\Delta f = f_R - f_E$

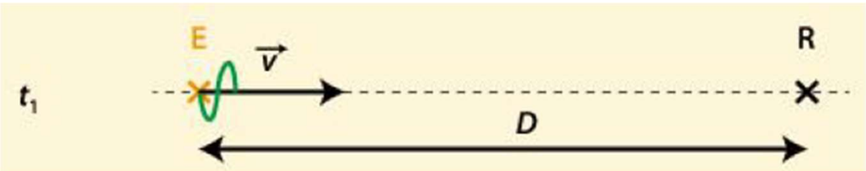
Rappel :

$$longueur\ d'onde = \frac{célérité\ de\ l'onde}{fréquence} \qquad \rightarrow \qquad \lambda = \frac{c}{f}$$

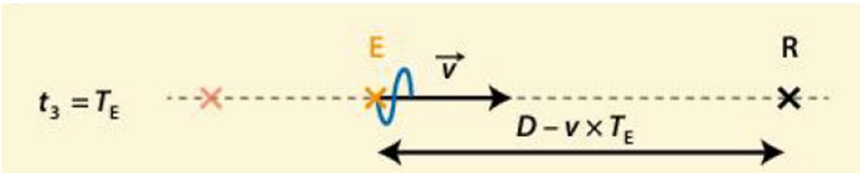
Expression du décalage Doppler

Considérons un émetteur d'ondes sonores E, qui se rapproche à la vitesse v d'un récepteur R.

- A la date $t_1 = 0$ s, un signal est émis par E et la distance entre E et R vaut D



- Ce signal émis à la date t_1 est reçu par R à la date $t_2 = \frac{D}{v_{onde}}$
- A la date $t_3 = T_E$, un autre signal est émis par E.



La distance que le signal doit parcourir pour rejoindre R n'est plus D car l'émetteur E avance à la vitesse $v_{émetteur}$. Le signal doit parcourir la distance :

$$D - v_{émétteur} \times T_E$$

- Le deuxième signal émis par l'émetteur est donc reçu à la date t_4 :

$$t_4 = t_3 + \frac{D - v_{émétteur} \times T_E}{v_{onde}}$$

- Les signaux émis par E avec la période T_E sont donc reçu par R avec la période $T_R = t_4 - t_2$

D'où :

$$T_R = t_3 + \frac{D - v_{\text{émétteur}} \times T_E}{v_{onde}} - \frac{D}{v_{onde}}$$

$$T_R = T_E + \frac{D - v_{\text{émétteur}} \times T_E}{v_{onde}} - \frac{D}{v_{onde}}$$

$$T_R = T_E + \frac{D}{v_{onde}} - \frac{v_{\text{émétteur}} \times T_E}{v_{onde}} - \frac{D}{v_{onde}}$$

$$T_R = T_E - \frac{v_{\text{émétteur}} \times T_E}{v_{onde}}$$

$$T_R = T_E \left(1 - \frac{v_{\text{émétteur}}}{v_{onde}}\right)$$

Comme f=1/T, on obtient la relation :

$$f_R = f_E \left(\frac{v_{onde}}{v_{onde} - v_{\text{émétteur}}}\right)$$

Le décalage Doppler a donc pour expression :

$$\Delta f = f_R - f_E$$

$$\Delta f = f_E \left(\frac{v_{onde}}{v_{onde} - v_{\text{émétteur}}}\right) - f_E$$

$$\Delta f = f_E \left(\frac{v_{onde}}{v_{onde} - v_{\text{émétteur}}} - 1\right)$$

$$\boldsymbol{\Delta f = f_E \left(\frac{v_{\text{éméteur}}}{v_{onde} - v_{\text{émétteur}}}\right)}$$

Conclusion : La mesure du décalage Doppler permet de connaitre la vitesse de l'émetteur.

Remarque : si la vitesse de l'émetteur est très faible devant la célérité de l'onde, alors l'expression peut se simplifier :

$$\Delta f = f_E \left(\frac{v_{\text{éméteur}}}{v_{onde}}\right)$$

Pour les ondes, on parle de célérité et non pas de vitesse de l'onde.

$$\boldsymbol{\Delta f = f_E \left(\frac{v_{\text{éméteur}}}{c}\right)}$$

Effet Doppler-Fizeau

En astronomie, l'analyse du spectre de la lumière émise par une étoile permet de déceler le décalage en longueur d'onde par rapport au spectre de l'élément obtenu en laboratoire. Comme la longueur d'onde $\lambda = \frac{c}{f}$ est inverse de la fréquence, si l'étoile s'éloigne de la Terre, les longueurs d'onde sont supérieures à celles obtenues en laboratoire, on parle de décalage vers le rouge ou encore *redshift.*

On retiendra :

Le décalage Doppler est noté : $\Delta f = f_R - f_E$

- Si l'émetteur se rapproche du récepteur :

$$\Delta \boldsymbol{f} = \boldsymbol{f_E}\left(\frac{\boldsymbol{v}}{\boldsymbol{c}-\boldsymbol{v}}\right)$$

$$Si\ \ c \gg v : \qquad \Delta f = f_E\left(\frac{v_{\text{émeteur}}}{c}\right)$$

$\Delta \boldsymbol{f}$ est positif, la fréquence reçue f_R est supérieur à la fréquence émise f_E

- Si l'émetteur s'éloigne du récepteur :

$$\Delta \boldsymbol{f} = -\boldsymbol{f_E}\left(\frac{\boldsymbol{v}}{\boldsymbol{c}+\boldsymbol{v}}\right)$$

$$Si\ \ c \gg v : \qquad \Delta f = -f_E\left(\frac{v_{\text{émeteur}}}{c}\right)$$

$\Delta \boldsymbol{f}$ est négatif, la fréquence reçue f_R est inférieur à la fréquence émise f_E

Exercices

Exercice 1 : QCM

Exercice 2 : Calculer un niveau d'intensité sonore

Calculer le niveau d'intensité sonore correspondant à chacune des intensités sonores suivantes.

1. $1{,}2 \times 10^{-7}\ \mathrm{W \cdot m^{-2}}$ **2.** $7{,}3 \times 10^{-5}\ \mathrm{W \cdot m^{-2}}$

3. $2{,}3 \times 10^{-3}\ \mathrm{W \cdot m^{-2}}$

Données

- $L = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$.
- $I_0 = 1{,}0 \times 10^{-12}\ \mathrm{W \cdot m^{-2}}$.

Exercice 3 : Utiliser le logarithme décimal

1. Etablir l'expression de l'intensité sonore en fonction du niveau d'intensité sonore.

2. Recopier et compléter sans calculatrice ce tableau.

$I\ (\mathrm{W \cdot m^{-2}})$	L (dB)
1×10^{-5}	
2×10^{-5}	
	60

Utiliser le ré

Données

- $L = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$.
- $I_0 = 1{,}0 \times 10^{-12}\ \mathrm{W \cdot m^{-2}}$.
- $\log(2) = 0{,}3$.

Exercice 4 : Mettre en évidence une atténuation

Un niveau d'intensité sonore moyen de 78 dB est enregistré dans un jardin bordant une route. Après construction d'un mur anti-bruit, le niveau d'intensité sonore moyen dans ce jardin est 67 dB.

1. Quel phénomène est mis en évidence ?

2. Calculer la grandeur correspondante.

Exercice 5 : Reconnaître l'effet Doppler

- Parmi les situations suivantes, repérer celles qui sont la conséquence de l'effet Doppler.

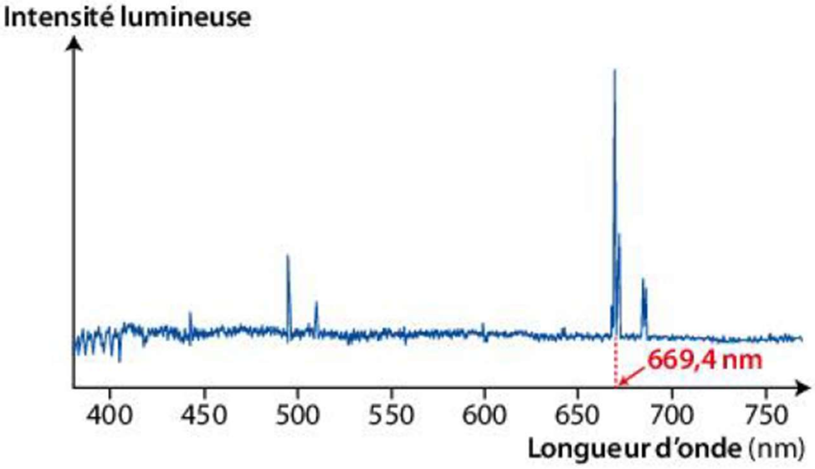
(a) Fréquence d'une note de musique modifiée lorsqu'un musicien accorde son instrument.

(b) Niveau sonore de la sirène d'un camion de pompier qui augmente lorsque ce camion se rapproche.

(c) Fréquence du son de la sirène modifiée lors du passage

Exercice 6 : Exploiter l'effet Doppler

Le spectre de la lumière d'une étoile montre une raie de longueur d'onde égale à 669,4 nm.



Avec une source et un capteur immobiles sur Terre, cette raie a une longueur d'onde égale à 656,3 nm.

- Interpréter cette observation. Utiliser le

Exercice 7 : Identifier une expression

Un émetteur d'ondes sonores s'éloigne d'un récepteur avec une vitesse de valeur $v < v_{son}$. On note f_E la fréquence des ondes émises et f_R la fréquence des ondes reçues.

1. Rappeler l'unité et le signe du décalage Doppler $\Delta f = f_R - f_E$ dans le cas où l'émetteur et le récepteur s'éloignent l'un de l'autre.

2. Parmi les relations suivantes, identifier celle qui donne le décalage Doppler en expliquant pourquoi les trois autres sont incorrectes.

a) $\Delta f = -f_E \times \dfrac{v}{v_{son} + v}$ b) $\Delta f = f_E \times \dfrac{v}{v_{son} - v}$

c) $\Delta f = \dfrac{v - v_{son}}{f_E}$ d) $\Delta f = \dfrac{f_E}{f_R}(v - v_{son})$

Exercice 8 : Calculer une valeur de vitesse

A Fonctionnement d'un radar

1 Le radar a émis une onde de fréquence $f_E = 3{,}40 \times 10^{10}$ Hz.

2 Après réflexion sur le véhicule, l'onde est revenue vers le radar.

3 Le radar a mesuré la fréquence f_R de l'onde réfléchie et a exploité le décalage Doppler $\Delta f = f_R - f_E$ pour déterminer la valeur de la vitesse du véhicule.

Lors du passage d'une voiture, le radar a mesuré un décalage Doppler $\Delta f = 6{,}451 \times 10^3$ Hz. Pour ce radar, le décalage Doppler est :

$$\Delta f = \frac{2v \times \cos\alpha}{c} \times f_E$$

Dans cette expression, α est l'angle entre la direction de déplacement du véhicule et l'axe de visée du radar.

- Calculer la valeur de la vitesse du véhicule.

Données

- Célérité de la lumière : $c = 3{,}00 \times 10^8\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$.
- $\alpha = 20°$.

Exercice 9 : Au son de la corne de brume

Les cornes de brume sont utilisées dans le domaine maritime pour signaler un obstacle ou un danger.

Elles peuvent produire un son dont le niveau d'intensité sonore peut atteindre 115 dB.

1. Déterminer l'intensité sonore maximale du son émis par une corne de brume.

2. À 50 m de la corne de brume, l'intensité sonore est égale à $1{,}0 \times 10^{-4}\ \mathrm{W \cdot m^{-2}}$.

a. Déterminer le niveau d'intensité sonore correspondant.

b. En déduire l'atténuation géométrique du signal.

Donnée

Intensité sonore de référence : $I_0 = 1{,}0 \times 10^{-12}\ \mathrm{W \cdot m^{-2}}$.

Exercice 10 : Niveau sonore et scène de concert

Pour contrôler le niveau d'intensité sonore lors d'un concert, un technicien a placé une première enceinte au bord de la scène. Un son est produit avec une puissance sonore égale à $4{,}0 \times 10^{-1}$ W. On fait l'hypothèse que le son est uniformément réparti sur une demi-sphère de rayon r centrée sur l'enceinte.

1. a. Déterminer l'intensité sonore du son reçu par un spectateur placé à 1,0 m de l'enceinte.

b. Que devient cette intensité si le spectateur est placé à 4,0 m de l'enceinte ?

2. a. Déterminer le niveau d'intensité sonore dans les deux cas et comparer ces deux niveaux entre eux.

Utiliser

b. Déterminer l'atténuation géométrique correspondante.

Utilise

3. Le technicien place ensuite une deuxième enceinte identique à la première à côté de celle-ci. Les deux enceintes sont à 4,0 m du spectateur.

a. Déterminer le niveau sonore du son reçu par le spectateur dans cette nouvelle situation.

b. Pour la durée d'un concert, le seuil de danger est estimé à 90 dB. À quelle distance doit se positionner le spectateur pour éviter tout souci auditif ?

Données

- Intensité sonore pour une puissance sonore P répartie sur une surface S :

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

- Surface d'une sphère de rayon r : $S = 4 \times \pi \times r^2$.
- Intensité de référence : $I_0 = 1{,}0 \times 10^{-12}\ \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Exercice 11 : Effet Doppler en astrophysique

La valeur v de la vitesse d'un astre par rapport à la Terre est donnée par la formule de Doppler-Fizeau :

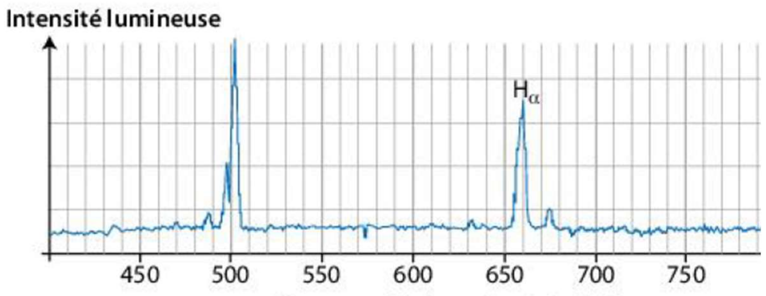
$$v = c \times \frac{|\lambda_{spectre} - \lambda_{référence}|}{\lambda_{référence}}$$

avec
- c : célérité de la lumière dans le vide ($c = 3{,}00 \times 10^8\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
- $\lambda_{spectre}$: longueur d'onde d'une raie du spectre de la lumière venant de l'astre
- $\lambda_{référence}$: longueur d'onde de la même raie dans un spectre de référence (spectre obtenu sur Terre)

1. a. Sachant que la longueur d'onde de la raie H_α mesurée sur Terre pour une source au repos est 656,3 nm, calculer le décalage de longueur d'onde pour la raie H_α de la galaxie nommée M77.

b. Préciser si la galaxie M77 s'éloigne ou se rapproche de la Terre.

2. Calculer la valeur de la vitesse de la galaxie M77 par rapport à la Terre.



Spectre de la galaxie M77

Exercice 12 : Sirène d'alarme

1. La notice d'une sirène d'alarme indique que l'intensité sonore à 20 m de la sirène est $1{,}5 \times 10^{-4}$ W · m^{-2}. Calculer le niveau d'intensité sonore prévisible à 20 m de la sirène.

2. Un voisin constate qu'à 30 m de la sirène, le niveau d'intensité sonore est 78 dB.
Calculer l'atténuation correspondante.

Donnée

Intensité sonore de référence : $I_0 = 1{,}0 \times 10^{-12}$ W · m^{-2}.