L'effet Doppler

Introduction :

Christian Andrea Doppler est un mathématicien et un physicien autrichien du XIXe siècle. En 1842, il observe que les ondes mécaniques et électromagnétiques présentent un décalage de leur fréquence entre l'émission et la réception, lorsque la source de l'onde est en mouvement ou que l'observateur est en mouvement. Puis en 1848, l'astronome et physicien français Hippolyte Fizeau démontre expérimentalement cette théorie.
Ce phénomène porte le nom d'effet Doppler ou Doppler-Fizeau lorsque l'on parle d'onde électromagnétique.

Dans ce cours, nous introduirons le principe de l'effet Doppler grâce à trois situations différentes. Puis nous développerons son application dans différents domaines avec les ondes acoustiques et lumineuses.

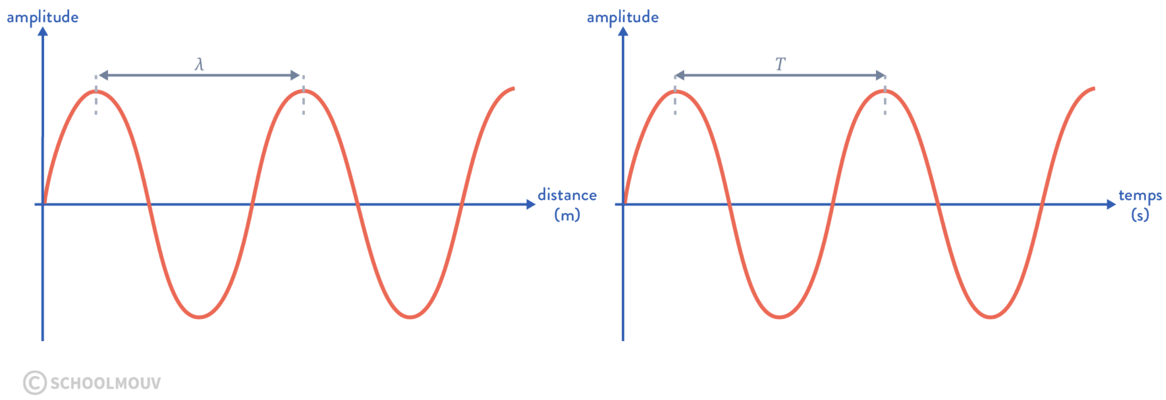
1 Qu'est-ce que l'effet Doppler ?

a. Rappel sur les ondes

Une onde est la propagation d'une perturbation qui produit sur son passage une variation réversible des propriétés locales du milieu dans lequel elle se propage. Lors de sa propagation il y a transport d'énergie, mais sans déplacement de matière.
Une onde est produite par une source avant de se propager dans un milieu adéquat pour atteindre son récepteur.

Rappel

Une onde **mécanique** (son) ou **électromagnétique** (lumière) peut être représentée comme un signal sinusoïdal périodique et est caractérisée par une double périodicité : temporelle définit par la période T et spatiale définit par la longueur d'onde λ.



On rappelle que la longueur d'onde λ est proportionnelle à la période T et est inversement proportionnelle à la fréquence f telle que :

$$\begin{aligned}\lambda &= \frac{c}{f} \\ &= c \times T\end{aligned}$$

Avec :

- la célérité de l'onde c exprimée en $\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1}$;
- la longueur d'onde λ exprimée en m ;
- la fréquence f exprimée en Hz ;
- la période T en s.

b. Observer et analyser l'effet Doppler

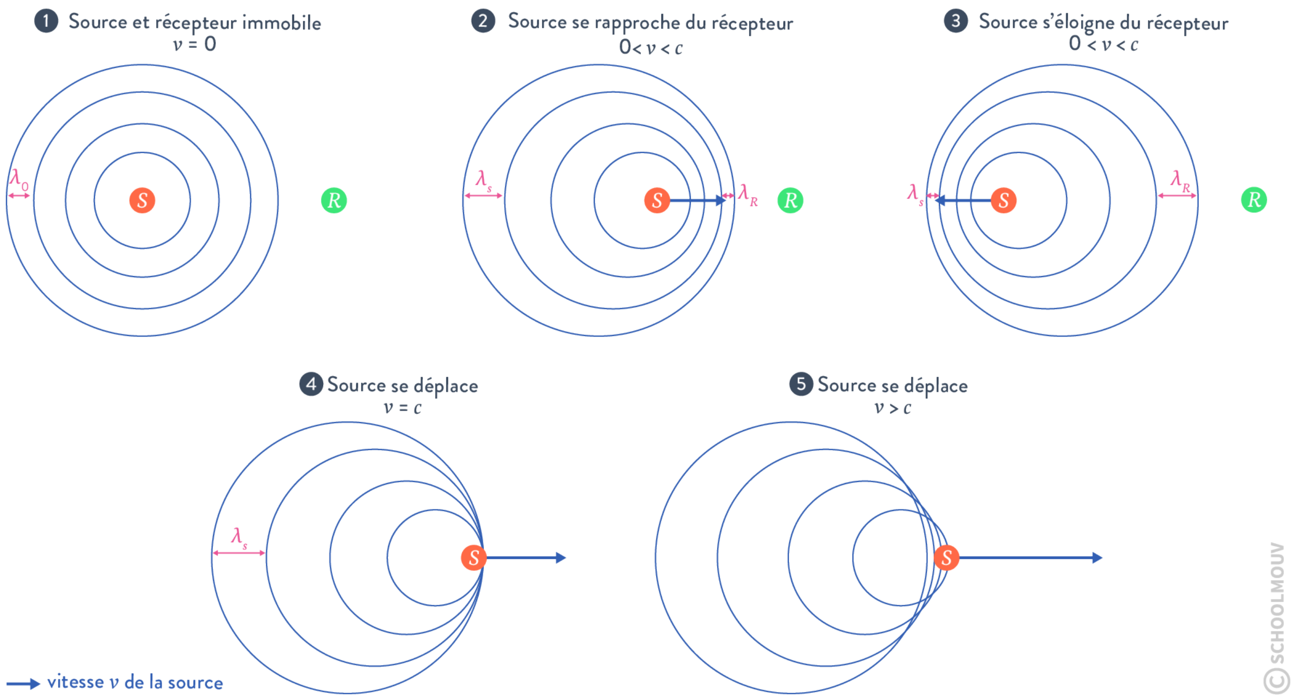
Lorsqu'une source est en mouvement relatif par rapport à un récepteur fixe, elle émet une onde sinusoïdale dans un référentiel donné. Le récepteur reçoit l'onde avec une fréquence différente de la fréquence émise.

Définition

Effet Doppler :

L'effet Doppler est le décalage entre la fréquence de l'onde perçue par le récepteur et la fréquence de l'onde émise par la source, lorsque la source ou le récepteur est en mouvement, au cours du temps.

Selon le mouvement de la source S et du récepteur R, nous pouvons différencier plusieurs situations.



1. Dans le premier cas, la source S et le récepteur R sont immobiles et séparés par une distance d. Nous observons que l'onde émise par la source a une longueur d'onde égale à la longueur d'onde de l'onde perçue par le récepteur, que l'on note λ_0.

Dans les deux autres cas, la source S se déplace à une vitesse v en émettant une onde de fréquence f, de période T et de longueur d'onde λ_S. Cette onde se propage à une célérité c vers un récepteur R fixe, dans un référentiel donné.
Dans les deux cas nous considérons que $0 < v < c$.

2. Dans le cas 2, **la source S se rapproche du récepteur fixe**, nous remarquons alors que la longueur d'onde λ_R diminue et s'accompagne d'une augmentation de la fréquence f, car $\lambda = \frac{c}{f}$.

➜ Dans ce cas, la fréquence de l'onde perçue par le récepteur sera supérieure à celle émise par la source.

3. Dans le cas 3, **la source S s'éloigne du récepteur fixe**, nous remarquons alors que la longueur d'onde λ_R augmente et s'accompagne d'une diminution de la fréquence f,

car $\lambda = \frac{c}{f}$.

➜ Dans ce cas, la fréquence de l'onde perçue par le récepteur sera inférieure à celle émise par la source.

4. Dans le cas 4, **la source S se déplace avec une vitesse v égale à la célérité c de l'onde**, nous remarquons alors que la longueur d'onde λ_S double et que les sphères de l'onde s'accumule à l'avant en un seul et même point, car la source « rattrape » l'onde qu'elle émet.

4. Dans le cas 5, **la source S se déplace avec une vitesse v supérieure à la célérité c de l'onde**, nous remarquons que les ondes se propagent à l'arrière de la source dans un cône, appelé cône de Mach.
Ce cas peut s'observer avec les avions de chasse lorsqu'ils perforent le mur du son, car ils produisent des ondes de compression et de dilatation, provoquant ainsi le « bang » que l'on entend.

Dans la suite de ce cours, nous nous intéresserons uniquement au cas 2 et 3, en considérant $0 < v < c$.

2 L'effet Doppler appliqué aux ondes sonores

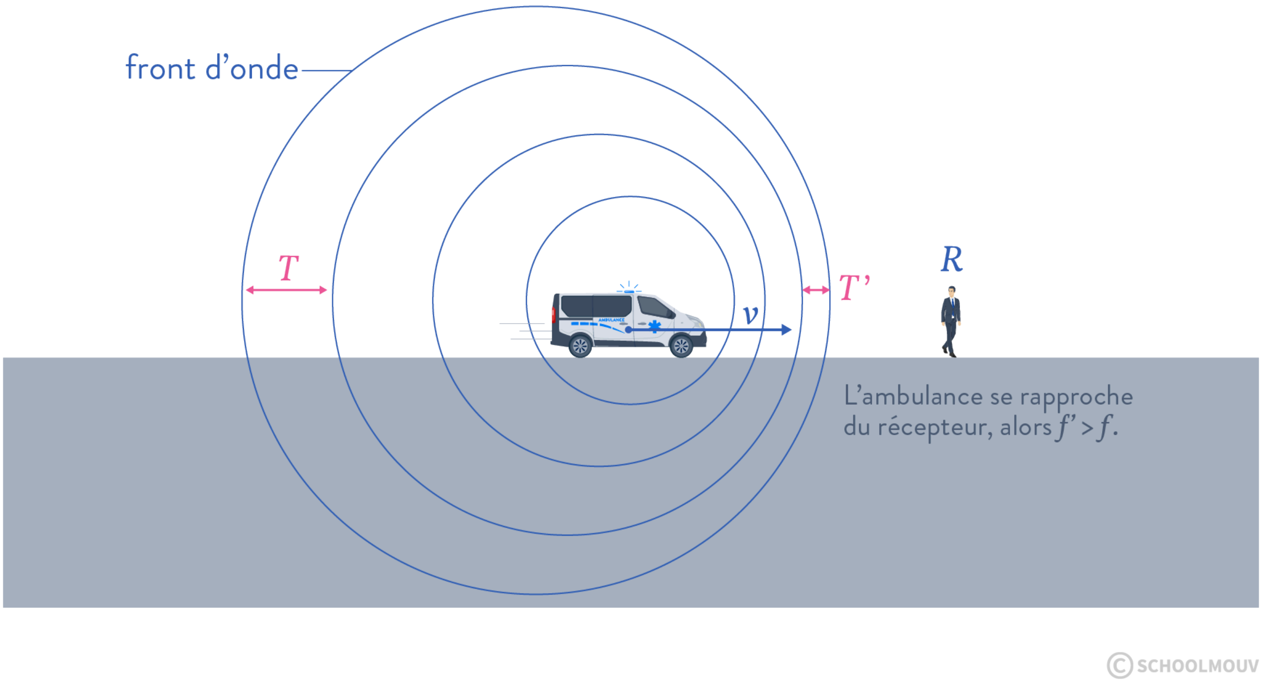
Les ondes sonores ou acoustiques sont des ondes mécaniques progressives, et sont aussi sujettes à l'effet Doppler dans le cas où la source et/ou le récepteur ne sont pas fixes. Nous rencontrons l'effet Doppler au quotidien, avec par exemple la sirène d'une ambulance.

a. La sirène d'une ambulance et l'effet Doppler

Qui n'a pas déjà remarqué que la sirène d'une ambulance ne « retentit » pas de la même manière si l'ambulance est fixe ou si elle s'éloigne ou se rapproche de nous. Développons donc ces trois cas.

1. Si nous sommes dans l'ambulance, le récepteur et la source sont **fixes** dans un référentiel en mouvement, le récepteur et la source entendront donc les ondes acoustiques telles qu'elles sont émises.

2. Si l'ambulance **se rapproche d'un récepteur fixe**, les ondes acoustiques seront perçues plus **aiguës** puisque la fréquence de l'onde perçue f' sera supérieure à la fréquence de l'onde émise f.



Démonstration

Soit une onde émise par une source se rapprochant du récepteur fixe, de fréquence f, en Hz, et de période $T = \frac{1}{f}$, en s.

Soit c la célérité de l'onde et v la vitesse de déplacement de la source, toutes deux en $\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1}$.

Nous considérons en outre : $0 < v < c$.

1. À $t_0 = 0$, la source, à une distance d_0 du récepteur, émet un premier front d'onde, qui parvient au récepteur à l'instant $t_0^{'}$, que l'on peut exprimer facilement :

$$t_0^{'} = \frac{d_0}{c}$$

2. Un deuxième front d'onde est émis au bout d'une période, donc à l'instant $t_1 = T$.

À cet instant, la source a parcouru depuis $t_0 = 0$ une distance d_s :

$$d_\mathrm{s} = v \times T$$

La source s'est approchée et est donc, à $t_1 = T$, à une distance d_1 du récepteur :

$$d_1 = d_0 - d_\mathrm{s}$$

Ce deuxième front d'onde parviendra au récepteur à l'instant $t_1^{'}$, que l'on peut aussi exprimer :

$$
\begin{aligned}
t_1' &= t_1 + \frac{d_1}{c} \\
&= T + \frac{d_0 - d_\text{s}}{c} \text{ [car } t_1 = T\text{]}
\end{aligned}
$$

3 L'intervalle de temps entre l'instant où le récepteur recevra le premier front d'onde et le deuxième est égal à $t_1' - t_0'$.

➜ Il s'agit donc de la période T', en s, de l'onde perçue par le récepteur. Et nous avons :

$$
\begin{aligned}
T' &= t_1' - t_0' \\
&= T + \frac{d_0 - d_\text{s}}{c} - \frac{d_0}{c} \\
&= T + \frac{d_0}{c} - \frac{d_\text{s}}{c} - \frac{d_0}{c} \\
&= T - \frac{d_\text{s}}{c} \\
&= T - \frac{v \times T}{c} \text{ [car } d_\text{s} = v \times T\text{]} \\
&= T\left(1 - \frac{v}{c}\right)
\end{aligned}
$$

4 Nous en déduisons l'expression de la fréquence f', en Hz, de l'onde perçue par le récepteur :

$$
\begin{aligned}
f' &= \frac{1}{T'} \\
&= \frac{1}{T(1 - \frac{v}{c})} \\
&= \frac{1}{T} \times \frac{1}{1 - \frac{v}{c}} \\
&= f \times \frac{1}{1 - \frac{v}{c}}
\end{aligned}
$$

C Comme nous travaillons avec $0 < v < c$:

$$
\frac{1}{1 - \frac{v}{c}} > 1 \Rightarrow f' > f
$$

Ainsi lorsque l'ambulance se rapproche d'un récepteur fixe, la fréquence de l'onde perçue f' par le récepteur varie en fonction de :

- la fréquence initiale f du signal ;
- la vitesse de déplacement v de la source ;
- la célérité c de l'onde.

On notera donc l'égalité suivante :

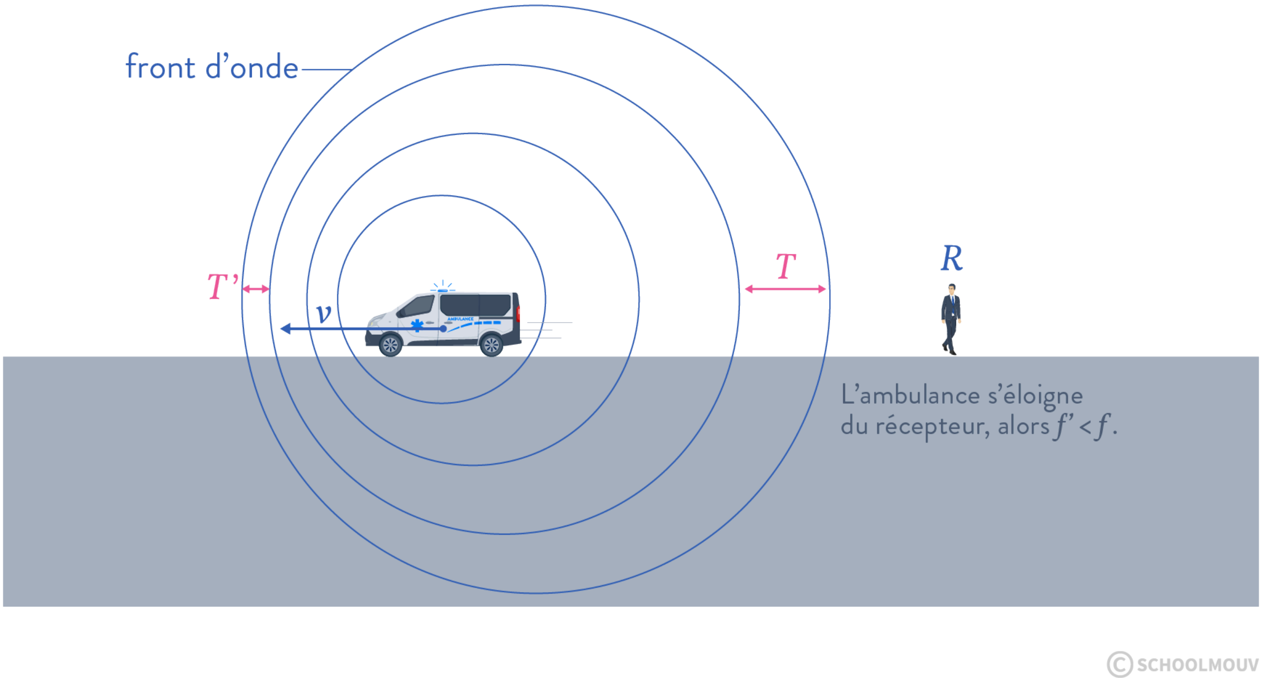
$$\boxed{f^{'} = f \times \frac{1}{1 - \frac{v}{c}}}$$

À retenir

Lorsqu'une onde est émise par une source se rapprochant d'un récepteur fixe, de fréquence f et de période T, et en considérant $0 < v < c$, nous pouvons dire que $f^{'} > f$.

→ Alors le **décalage Doppler** $\Delta f = f^{'} - f$ sera **positif** et le son plus **aigu**.

3. Si l'ambulance **s'éloigne de nous**, les ondes acoustiques seront perçues plus **graves** puisque la fréquence perçue $f^{'}$ sera inférieure à la fréquence émise f.



Démonstration

Soit une onde émise par une source s'éloignant du récepteur fixe, de fréquence f, en Hz, et de période $T = \frac{1}{f}$, en s.

Soit c la célérité de l'onde et v la vitesse de déplacement de la source, toutes deux en $\mathrm{m \cdot s^{-1}}$.

Nous considérons en outre : $0 < v < c$.

1. À $t_0 = 0$, la source, à une distance d_0 du récepteur, émet un premier front d'onde, qui parvient au récepteur à l'instant $t_0^{'}$, que l'on peut exprimer facilement :

$$t'_0 = \frac{d_0}{c}$$

2 Un deuxième front d'onde est émis au bout d'une période, donc à l'instant $t_1 = T$.

À cet instant, la source a parcouru depuis $t_0 = 0$ une distance d_s :

$$d_s = v \times T$$

La source s'est éloignée et est donc, à $t_1 = T$, à une distance d_1 du récepteur :

$$d_1 = d_0 + d_s$$

Ce deuxième front d'onde parviendra au récepteur à l'instant t'_1, que l'on peut aussi exprimer :

$$\begin{aligned} t'_1 &= t_1 + \frac{d_1}{c} \\ &= T + \frac{d_0 + d_s}{c} \quad [\text{car } t_1 = T] \end{aligned}$$

3 L'intervalle de temps entre l'instant où le récepteur recevra le premier front d'onde et le deuxième est égal à $t'_1 - t'_0$.

➜ Il s'agit donc de la période T', en s, de l'onde perçue par le récepteur. Et nous avons :

$$\begin{aligned} T' &= t'_1 - t'_0 \\ &= T + \frac{d_0 + d_s}{c} - \frac{d_0}{c} \\ &= T + \frac{d_0}{c} + \frac{d_s}{c} - \frac{d_0}{c} \\ &= T + \frac{d_s}{c} \\ &= T + \frac{v \times T}{c} \quad [\text{car } d_s = v \times T] \\ &= T\left(1 + \frac{v}{c}\right) \end{aligned}$$

4 Nous en déduisons l'expression de la fréquence f', en Hz, de l'onde perçue par le récepteur :

$$\begin{aligned} f' &= \frac{1}{T'} \\ &= \frac{1}{T(1 + \frac{v}{c})} \\ &= \frac{1}{T} \times \frac{1}{1 + \frac{v}{c}} \\ &= f \times \frac{1}{1 + \frac{v}{c}} \end{aligned}$$

Ⓒ Comme nous travaillons avec $0 < v < c$:

$$\frac{1}{1+\frac{v}{c}} < 1 \Rightarrow f' < f$$

Ainsi lorsque la source s'éloigne d'un récepteur fixe, la fréquence de l'onde perçue f' par le récepteur varie en fonction de :

- la fréquence initiale f du signal ;
- la vitesse de déplacement v de la source ;
- la célérité c de l'onde.

On notera donc l'égalité suivante :

$$\boxed{f' = f \times \frac{1}{1+\frac{v}{c}}}$$

À retenir

Lorsqu'une onde est émise par une source s'éloignant d'un récepteur fixe, de fréquence f et de période T, et en considérant $0 < v < c$, nous pouvons dire que $f' < f$.

➜ Alors le **décalage Doppler** $\Delta f = f' - f$ sera **négatif** et le son plus **grave**.

Exemple

Soit une ambulance traversant un boulevard à $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ dont la sirène émet des ondes acoustiques de fréquence 420 Hz et est entendue par un piéton qui attend pour traverse. De plus, la vitesse du son dans l'air est de $340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, soit $1\ 224 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

- **L'ambulance se rapproche du piéton, quelle est la fréquence perçue f' par le piéton ?**

$$\begin{aligned} f' &= \frac{f}{1-\frac{v}{c}} \\ &= \frac{420}{1-\frac{80}{1\ 224}} \\ &\approx 449 \text{ Hz} \end{aligned}$$

- **L'ambulance s'éloigne du piéton, quelle est la fréquence perçue f' par le piéton ?**

$$
\begin{aligned}
f' &= \frac{f}{1+\frac{v}{c}} \\
&= \frac{420}{1+\frac{80}{1\,224}} \\
&= 394 \text{ Hz}
\end{aligned}
$$

La fréquence émise f' par l'ambulance sera perçue plus grande dans le cas où l'ambulance s'approche progressivement du récepteur et plus petite dans le cas où elle s'en éloigne.

À retenir

Ici, nous avons pu établir que lorsque le source est en mouvement, nous observons l'effet Doppler, c'est-à-dire un décalage entre la fréquence perçue f' par le récepteur et la fréquence émise f par la source :

- si la source se rapproche du récepteur fixe :
  $f' = f \times \frac{1}{1-\frac{v}{c}}$ et ainsi $f' > f$;
- si la source s'éloigne du récepteur fixe :
  $f' = f \times \frac{1}{1+\frac{v}{c}}$ et ainsi $f' < f$.

Attention

Le raisonnement sera le même si la source est fixe et le récepteur en mouvement, mais les formules seront différentes. Dans ce cours nous parlons uniquement le cas du récepteur fixe.

Mais cette capacité physique qu'ont les ondes sonores à changer de fréquence quand leur source est en mouvement, trouve aussi plusieurs applications utiles notamment dans le **calcul d'une vitesse**.

b. Calcul des vitesses à l'aide de l'effet Doppler

Comme vu précédemment les ondes sonores subissent un effet Doppler lorsque la source ou le récepteur est en mouvement. Les relations développées dans la partie 1 de ce cours, entre la fréquence perçue, la fréquence émise, la vitesse de la source et la célérité de l'onde permettent de calculer la vitesse de la source en mesurant la fréquence perçue et la fréquence émise.

Exemple

Un ambulance traverse un boulevard en se rapprochant d'un piéton, elle émet un son de fréquence $f_1 = 420 \text{ Hz}$. Le piéton mesure à l'aide d'un sonomètre une fréquence $f_2 = 450 \text{ Hz}$.

- **L'ambulance se rapproche du piéton, quelle est sa vitesse ?**

Sachant que $f_2 = \frac{f_1}{1 - \frac{v}{c}}$, par équivalence nous trouvons :

$$\begin{aligned} 1 - \frac{v}{c} = \frac{f_1}{f_2} &\Leftrightarrow \frac{v}{c} = 1 - \frac{f_1}{f_2} \\ &\Leftrightarrow v = c\left(1 - \frac{f}{f'}\right) \end{aligned}$$

Soit,

$$\begin{aligned} v &= 1\ 224 \times \left(1 - \frac{420}{450}\right) \\ &= 81,6 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} \end{aligned}$$

Exemple

Un hélicoptère vole à une vitesse v que nous voulons déterminer.
Quand l'appareil est immobile, il émet des ondes sonores de fréquences $f = 8,1 \times 10^2 \text{ Hz}$. Au cours du vol, l'hélicoptère s'éloigne de l'observateur qui est immobile, ce dernier enregistre des ondes sonores de fréquences $f' = 7 \times 10^2 \text{ Hz}$.

- **Calculer la vitesse de l'hélicoptère au cours de son vol**.

Comme $f' < f$, l'hélicoptère s'éloigne donc de l'observateur, on utilise l'égalité suivante :

$$\begin{aligned} f' = \frac{f}{1 + \frac{v}{c}} &\Leftrightarrow 1 + \frac{v}{c} = \frac{f}{f'} \\ &\Leftrightarrow v = c\left(\frac{f}{f'} - 1\right) \end{aligned}$$

Alors,

$$\begin{aligned} v &= c\left(\frac{f}{f'} - 1\right) \\ &= 1\ 224 \times \left(\frac{8,1 \times 10^2}{7 \times 10^2} - 1\right) \\ &= 192 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} \end{aligned}$$

Cette application est utilisée au quotidien notamment dans le domaine médical, en calculant par exemple la vitesse d'écoulement du sang dans nos veines.

3 L'effet Doppler appliqué aux ondes lumineuses

Le physicien Français, Hippolyte Fizeau, a découvert que l'effet Doppler initialement décrit pour les ondes sonores s'appliquent aussi aux ondes lumineuses (ondes électromagnétiques). C'est pour cela que lorsque l'effet Doppler est observé pour les **ondes lumineuses**, on parle de l'**effet Doppler-Fizeau**.

L'effet Doppler-Fizeau est employé surtout pour déterminer la vitesse radiale des astres puisque la lumière se propage dans le vide (contrairement au son). Mais il est aussi employé pour déterminer la vitesse des voitures, à l'aide de radars routiers par exemple.

a. Utilisation de l'effet Doppler-Fizeau en astrophysique

L'effet Doppler-Fizeau est employé pour déterminer la position, la vitesse mais aussi la masse des objets célestes.

- Quand une étoile se **rapproche** de la Terre avec une vitesse que l'on considère constante, la **fréquence** notée par l'observateur terrestre sera **supérieure** à celle émise par l'étoile.

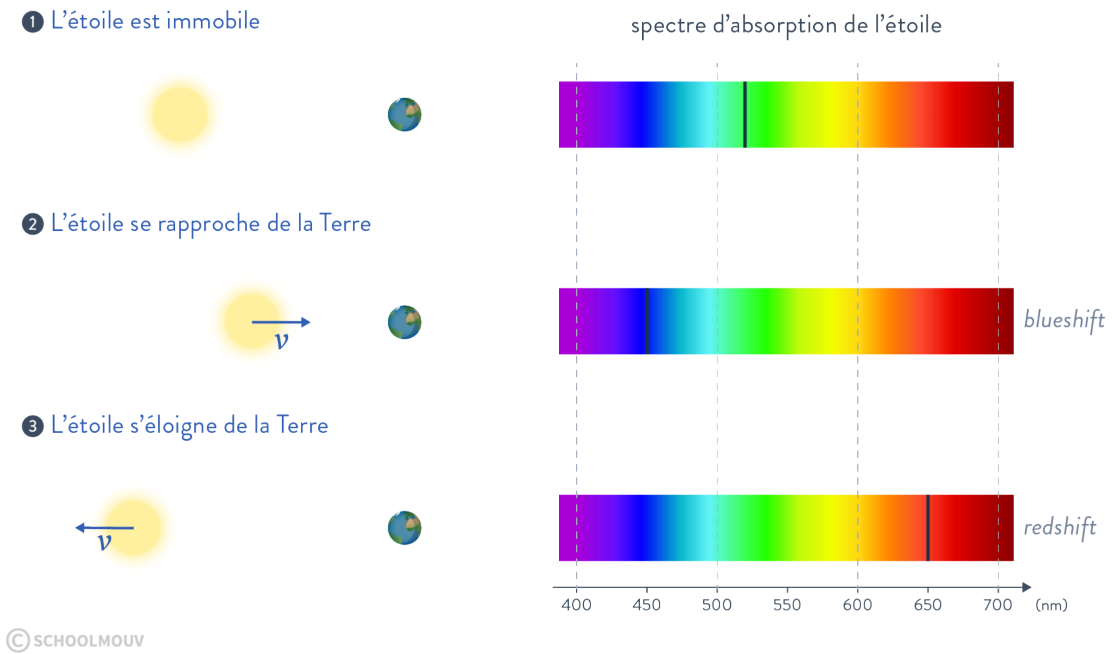
  → On parle alors d'un **décalage des raies d'absorption vers le bleu** avec des longueurs d'ondes faibles et donc des fréquences élevées, c'est ce que l'on appelle le « blueshift ».

- Quand une étoile **s'éloigne** de la Terre avec une vitesse que l'on considère constante, la **fréquence** notée par l'observateur terrestre sera **inférieure** à celle émise par l'étoile.

  → On parle alors d'un **décalage des raies d'absorption vers le rouge** avec des longueurs d'ondes élevées et donc des fréquences basses, c'est ce que l'on appelle le « redshift ».

Exemple

L'image 1 nous montre le spectre d'absorption d'une étoile immobile.
L'image 2 nous montre le spectre d'absorption de cette étoile se rapprochant de la Terre, on observe un « blueshift ».
L'image 3 nous montre le spectre d'absorption de cette étoile s'éloignant de la Terre, on observe un « redshift ».



b. Utilisation de l'effet Doppler-Fizeau avec les radars routiers

L'effet Doppler-Fizeau est employé pour déterminer la vitesse des voitures dans les radars fixes ou mobiles.
Les radars envoient des ondes électromagnétiques lumineuses de fréquences connues qui sont réfléchies sur les voitures en mouvement. Les ondes ensuite captées par le radar seront inférieures ou supérieures à celles envoyées selon si la voiture s'éloigne ou se rapproche du radar. Ainsi, les radars pourront calculer la vitesse de la voiture et déterminer si oui ou non l'automobiliste respecte la limitation de vitesse.

Conclusion :

Dans ce cours nous avons défini que l'effet Doppler est le décalage de fréquence d'une onde, électromagnétique ou mécanique, observé entre la source et le récepteur, lorsque la distance entre les deux varie au cours du temps. Cet effet est observé au quotidien lors du passage d'une ambulance dans la rue, il permet également plusieurs applications dans le domaine de l'astronomie, de l'aviation ou encore médical.