Chapitre 01 : Les ondes et leurs propriétés

Extrait du programme de Term spé

Intensité sonore, intensité sonore de référence, niveau d'intensité sonore. Atténuation (en dB)	- Exploiter l'expression donnant le niveau d'intensité sonore d'un signal. - *Illustrer l'atténuation géométrique et l'atténuation par absorption*
Diffraction d'une onde par une ouverture : conditions d'observation et caractéristiques. Angle caractéristique de diffraction	- Caractériser le phénomène de diffraction dans des situations variées et en citer des conséquences concrètes. - Exploiter la relation exprimant l'angle caractéristique de diffraction en fonction de la longueur d'onde et de la taille de l'ouverture. - *Illustrer et caractériser qualitativement le phénomène de diffraction dans des situations variées.* - Exploiter la relation donnant l'angle caractéristique de diffraction dans le cas d'une onde lumineuse diffractée par une fente rectangulaire en utilisant éventuellement un logiciel de traitement d'image.
Interférences de deux ondes, conditions d'observation. Interférences constructives, interférences destructives.	- Caractériser le phénomène d'interférences de deux ondes et en citer les conséquences concrètes. - Établir les conditions d'interférences constructives et destructives de deux ondes issues de deux sources ponctuelles en phase dans le cas d'un milieu de propagation homogène. - *Tester les conditions d'interférences constructives ou destructives à la surface de l'eau dans le cas de deux ondes issues de deux sources ponctuelles en phase.*
Interférences de deux ondes lumineuses, différence de chemin optique, conditions d'interférences constructives ou destructives.	- Prévoir les lieux d'interférences constructives et les lieux d'interférences destructives dans le cas des trous d'Young, l'expression linéarisée de la différence de chemin optique étant donnée. - Établir l'expression de l'interfrange - *Exploiter l'expression donnée de l'interfrange dans le cas des interférences de deux ondes lumineuses, en utilisant éventuellement un logiciel de traitement d'image.* - *PYTHON* : Représenter la somme de deux signaux sinusoïdaux périodiques synchrones en faisant varier la phase à l'origine de l'un des deux.
Effet Doppler Décalage Doppler	- Décrire et interpréter qualitativement les observations correspondant à une manifestation de l'effet Doppler. - Établir l'expression du décalage Doppler dans le cas d'un observateur fixe, d'un émetteur mobile et dans une configuration à une dimension. - Exploiter l'expression du décalage Doppler dans des situations variées utilisant des ondes acoustiques ou des ondes électromagnétiques. - *Exploiter l'expression du décalage Doppler en acoustique pour déterminer une vitesse.*

I- Généralités sur les ondes (Rappels)

Vidéo en classe inversée sur les ondes

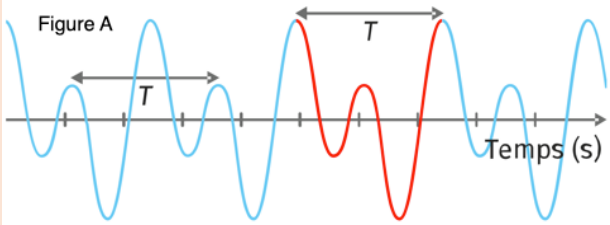
Une onde est la propagation d'une perturbation, avec transport d'énergie mais sans transport de matière dans toutes les directions possibles.
Une onde mécanique a besoin d'un milieu matériel pour se propager. Une onde électromagnétique, elle, peut se propager dans le vide ou dans un milieu matériel.

Exemple : Les ondes sonores, les ondes à la surface de l'eau sont des ondes mécaniques. La lumière, les IR, les UV, les ondes radio sont des ondes électromagnétiques.

Application en autonomie : n°1 p 459 (notion de retard)

Certaines ondes sont périodiques : elles se reproduisent identiques à elles-mêmes à intervalles de temps réguliers, et possèdent un motif élémentaire.

La durée du motif élémentaire est appelée **période T** et s'exprime en secondes.



La **fréquence f** d'une onde mécanique périodique correspond au nombre de périodes qu'il y a en une seconde. Elle s'exprime en Hertz (de symbole Hz).

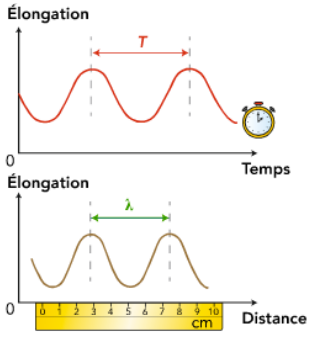
$$f = \frac{1}{T}$$

Application en autonomie : n°4 p 459

La période spatiale d'une onde mécanique périodique est appelée **longueur d'onde** et se note **λ** (lambda). Elle correspond à la distance parcourue par l'onde durant une période.
On dit également que la longueur d'onde est la plus petite distance séparant deux points du milieu dans le même état vibratoire (ou en phase).
Elle s'exprime en mètres (m) et elle est reliée à la période par :

$$\lambda = v \times T \qquad \text{ou } \lambda = \frac{v}{f}$$

avec v la célérité de l'onde en $m.s^{-1}$ et T la période temporelle en s.



Applications en autonomie : n°6 et 7 p 459

II- La diffraction

Activité : La diffraction (PPT)

1. *Généralités*

La propagation d'une onde sinusoïdale dans un milieu uniforme est rectiligne. Cependant, elle peut être modifiée au voisinage d'un objet de petite dimension.

Lorsqu'une onde rencontre un obstacle ou une ouverture de petite dimension, sa direction de propagation est modifiée : c'est le phénomène de diffraction.

La diffraction a lieu sans changement de fréquence de l'onde et c'est un phénomène caractéristique d'un comportement ondulatoire.

Le phénomène de diffraction dépend de la longueur d'onde λ de l'onde incidente et de la dimension *a* de l'obstacle. Il est d'autant plus marqué que *a* est du même ordre de grandeur ou inférieur à λ.

Trois cas se présentent :

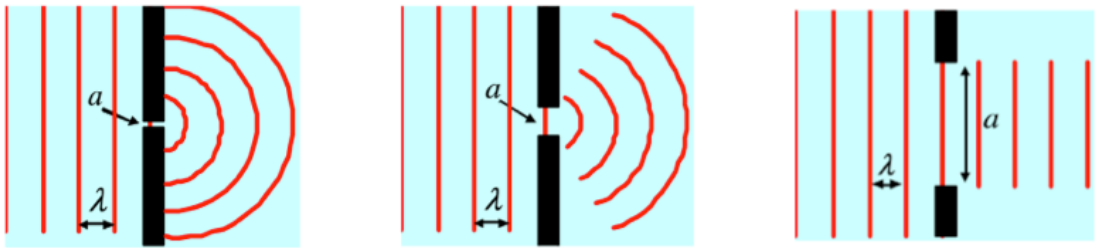
a) Si a < λ, l'onde diffractée occupe tout l'espace qui lui est offert.

b) Si a > λ, l'onde diffractée occupe une partie seulement de l'espace qui lui est offert, et on définit une ouverture angulaire (ou écart angulaire) : c'est l'angle entre la direction de propagation de l'onde en l'absence de diffraction et le milieu des premières extinctions (ou minima).

$$\theta = \frac{\lambda}{a}$$

avec λ la longueur d'onde de l'onde en m
a la dimension de l'obstacle ou de l'ouverture en m
θ l'ouverture angulaire en rad

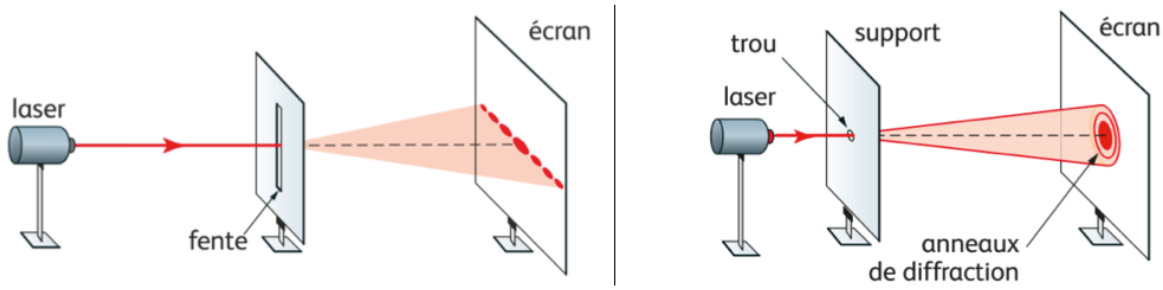
c) Si a >> λ, l'ouverture angulaire est quasi-nulle (θ ≈ 0) et il n'y a pas de diffraction.



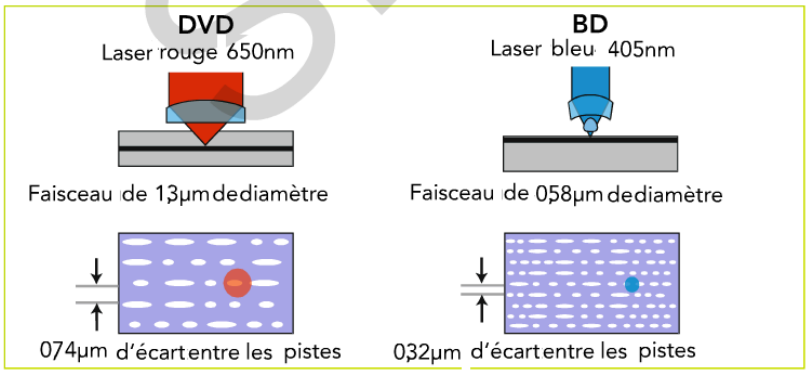
a) b) c)

Dans le cas des ondes lumineuses, le critère est moins restrictif : le phénomène est encore bien apparent avec des ouvertures ou des obstacles de dimensions jusqu'à 100 fois plus grandes que la longueur d'onde (en ordre de grandeur).

La forme de la figure de diffraction dépend de la forme de l'ouverture (ou de l'obstacle).
Si l'ouverture est un trou, la figure de diffraction est circulaire.
Si l'ouverture est une fente, la figure de diffraction est linéaire.

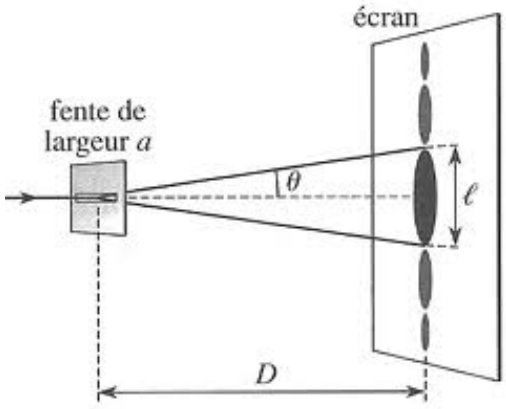


Application : Sur un support numérique à lecture optique, la capacité de stockage est limitée par le phénomène de diffraction : l'augmentation de cette capacité nécessite des pistes plus serrées (a diminue). Pour limiter la diffraction, il est nécessaire d'utiliser un rayonnement de plus petite longueur d'onde. On est ainsi passé d'un faisceau rouge (DVD) à un faisceau bleu (blue ray disc)



2. *Diffraction par une fente*

Voir TP n°1 : Phénomène de diffraction



Ce type d'expérience a plusieurs utilités, grâce à la mesure de la largeur l de la tache centrale :

- on peut avoir accès à la longueur d'onde du rayonnement
- on peut avoir accès à la largeur de la fente utilisée

Remarque importante : *La démonstration suivante est à savoir refaire* !

En repérant les différentes grandeurs sur la figure, on observe que : $\tan\theta = \frac{l/2}{D}$.

Or l'angle θ est petit (l << D), on peut donc utiliser l'approximation des petits angles : tan θ ≈ θ.

Finalement $\theta = \frac{l}{2\,D}$.

De plus, on sait que $\theta = \frac{\lambda}{a}$

D'où : $\lambda = \frac{a\,l}{2\,D}$

Applications : n°33 p 478, n°1 feuille d'exercice, n°62 p 483 (irisation en lumière blanche)
Applications en autonomie (exercices corrigés) : n°32 p 478, n°27 p 476 (partie 1), n°43 p 479

III- Les interférences

Activité Addition d'ondes (utilisation du logiciel Geogebra)

- Observation de f(x) et g(x) pour différentes valeurs de φ (0, π, $\pi/2$)
- Définition en phase et opposition de phase
- Observation de h(x), la somme des deux pour différentes valeurs de φ
- Définition des interférences constructives et destructives

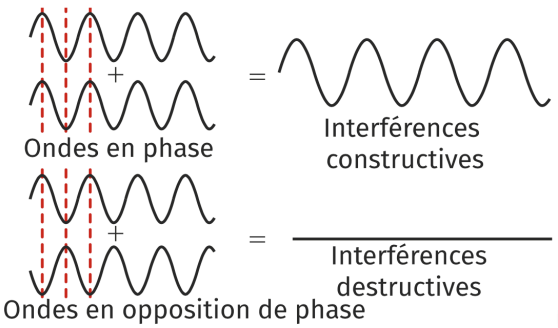
Voir TP n°2 : Phénomène d'interférences

1. *Description du phénomène*

Lorsque deux ondes monochromatiques de même fréquence se superposent, l'amplitude de l'onde résultante varie dans l'espace : c'est le phénomène d'interférences.
L'amplitude de l'onde résultante en tout point est la somme des amplitudes des deux ondes en ce point.

Les interférences peuvent être **constructives** : les ondes superposées sont en phase. L'amplitude de l'onde résultante est alors maximale.

Les interférences peuvent aussi être **destructives** : les ondes superposées sont en opposition de phase. L'amplitude de l'onde résultante est alors minimale ou nulle.



Les interférences ne peuvent s'obtenir que si les sources des ondes sont cohérentes : les deux ondes ont la même fréquence et leur déphasage reste constant au cours du temps.

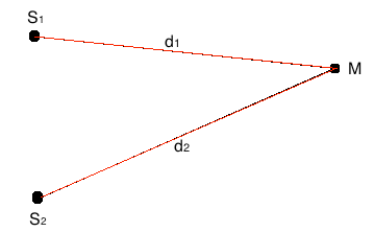
Remarque : Pour créer deux sources lumineuses cohérentes, il faut utiliser des sources secondaires créées à partir d'une source unique. Les fentes d'Young par exemple, utilisent ce principe.

2. *Différence de marche*

Activité polycopié différence de marche (matériel : photocopie photo + cuve à ondes pour interférences)
Animation sur internet : https://phyanim.sciences.univ-nantes.fr/Ondes/cuve_ondes/interference_ondes_circulaires.php

Le décalage temporel qui existe entre les deux ondes issues de deux sources cohérentes S1 et S2 en un point d'observation M dépend de la durée de leurs trajets respectifs.

On appelle **différence de marche δ** en un point M la différence entre les distances d_1 et d_2 (distances entre les sources et le point M) : $\delta = d_1 - d_2$



Soit v la célérité des ondes dans le milieu de propagation : $d_2 = v \times \tau_2$ et $d_1 = v \times \tau_1$
Ainsi, $\delta = v \times (\tau_2 - \tau_1)$
Or, il y a des interférences constructives si $\tau_2 - \tau_1 = k \times T$.
Dans ce cas, on peut écrire : $\delta = k \times v \times T = k \times \lambda$ (car $\lambda = v \times T$)

On peut faire la même démonstration pour des interférences destructives ($\tau_2 - \tau_1 = k \times T + \frac{T}{2}$)

Il y a des interférences constructives si $\delta = k \times \lambda$.
Il y a des interférences destructives si $\delta = k \times \lambda + \frac{\lambda}{2} = (2k+1) \times \frac{\lambda}{2}$
L'entier k est appelé ordre d'interférences.

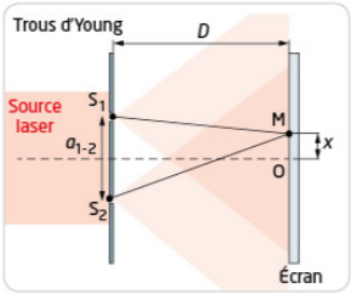
Remarque : Dans le TP, avec Python, on a raisonné en termes de déphasage : (d'où le vocabulaire utilisé précédemment)

- Si $\Delta\varphi = 2k\pi$ → interférences constructives
- Si $\Delta\varphi = (2k+1)\pi$ → interférences destructives

Applications : n°2 feuille d'exercices, n°59 p 482 (approfondir interférences sonores)
Application en autonomie : n°27 p 477 partie 2

3. *Les trous d'Young*

Les trous d'Young sont un dispositif permettant de créer des interférences lumineuses.
(Le même dispositif avec des fentes fonctionne sur le même principe)



Sur un écran, on observe deux phénomènes qui se produisent simultanément :

- Des cercles concentriques dus à la diffraction
- Des alternances de franges lumineuses et de franges sombres, dues aux interférences.

La démonstration suivante est à savoir refaire !

La distance entre les trous S_1 et S_2 est appelée a_{12}. M est à une distance x du point O, et D est la distance trous / écran.

Au point M, on admet que la différence de marche est $\delta = S_2M - S_1M = a_{12} \times \frac{x}{D}$.

On a donc $x = \delta \times \frac{D}{a_{12}}$.

Pour des interférences constructives, on a $\delta = k \times \lambda$.

Ainsi, $x = k \times \lambda \times \frac{D}{a_{12}}$.

Pour chaque valeur de k, on a une zone d'interférences constructives : les valeurs de x correspondent à des droites parallèles, et les interférences constructives sont des franges brillantes.

Si on s'intéresse à la distance entre deux franges consécutives, appelée interfrange et notée i, on a :

$$i = x_{k+1} - x_k = (k+1)\lambda \times \frac{D}{a_{12}} - k \times \lambda \times \frac{D}{a_{12}} = \lambda \times \frac{D}{a_{12}}$$

On peut faire exactement le même raisonnement avec les interférences destructives.

La distance qui sépare les milieux de deux franges consécutives de même nature est appelée **interfrange i** : $i = \frac{\lambda D}{a_{12}}$ avec D la distance entre les fentes et l'écran (en m), λ la longueur d'onde dans le milieu (en m) et a_{12} la distance entre les trous (en m).

Applications : n°37 p 478, n°47 p 479 (homogénéité relation)

Application en autonomie : n°35 p 478

Application : Les couleurs interférentielles (PPT)

Certains objets ont des couleurs vives qui varient suivant l'angle sous lequel on les regarde : ailes de papillon Morpho, carapace des scarabées, bulles de savon. Comme le caractère constructif ou destructif des interférences dépend de la longueur d'onde de la lumière, pour une partie du spectre de la lumière blanche, les interférences peuvent être destructives et constructives pour d'autres : la lumière n'est plus blanche mais colorée et l'objet présente des irisations. Ce sont des couleurs interférentielles.

Exercice type bac (diffraction et interférences) : n°68 p 486

IV- Les ondes sonores

Une source sonore émet un son avec une certaine puissance acoustique P exprimée en watts. L'intensité sonore I est la puissance reçue par unité de surface S (en m^2) : elle s'exprime donc en watts par mètre carré ($W.m^{-2}$)

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

Le seuil d'audibilité de l'oreille humaine vaut $I_0 = 10^{-12}$ $W.m^{-2}$ à la fréquence de 1 kHz alors que le seuil de douleur est d'environ 25 $W.m^{-2}$.

La sensation auditive dépend de l'intensité sonore mais ne lui est pas proportionnelle : si deux sources génèrent deux sons d'intensité I, la sensation auditive ne sera pas le double d'une source seule.
C'est le niveau d'intensité sonore L qui caractérise la sensation auditive, et il se mesure directement avec un sonomètre.

Le niveau d'intensité sonore L (en dB) est donné par la relation : $L = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$

avec $I_0 = 10^{-12}$ W.m^{-2}

Réciproquement, l'intensité sonore a donc pour expression : $I = I_0 \times 10^{\frac{L}{10}}$

Remarque : la démonstration pour « tourner » la formule doit être connue.

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

Point mathématique LOG (voir fiche maths p 26 manuel)

$$\log(x) = b \Leftrightarrow x = 10^b$$
$$\log\left(\frac{a}{b}\right) = \log(a) - \log(b)$$
$$\log(a \times b) = \log(a) + \log(b)$$

Applications :

1- Le niveau d'intensité sonore d'une voiture à un mètre du moteur est 100 dB. Calculer l'intensité sonore correspondante.

Réponse : I = 10^{-2} W.m^{-2}

2- Calculer le niveau d'intensité sonore d'un son d'intensité sonore I_2 = 1,0.10^{-5} W.m^{-2}

Réponse : L_2= 70 dB

3- Calculer l'augmentation de niveau d'intensité sonore lorsqu'un son voit son intensité sonore doubler.

Réponse : L' = L + 3 dB

Application : n°29 p 478
Application en autonomie : n°28 p 478

Voir TP n°3 : Atténuation des ondes sonores

Lorsqu'une onde sonore se propage, il y a un phénomène d'atténuation. Celle-ci peut avoir deux origines différentes :
- L'atténuation géométrique : c'est la diminution du niveau d'intensité sonore lorsque la distance avec la source sonore augmente.
- L'atténuation par absorption : c'est la diminution du niveau d'intensité sonore lorsque l'onde sonore traverse un matériau.

L'atténuation A d'un son dont le niveau d'intensité sonore passe de L à L' a pour expression :

$$A = L - L' = 10 \log\left(\frac{I}{I'}\right)$$

A s'exprime en dB, I et I' s'expriment en $W.m^{-2}$.

Application : Que vaut l'atténuation d'un son lorsque son intensité sonore est divisée par 100 ?

Applications : n°31 p 478
Applications en autonomie : n°30 p 478, n°41 p 479
Résolution de problème : n°65 p 484 (corrigé)

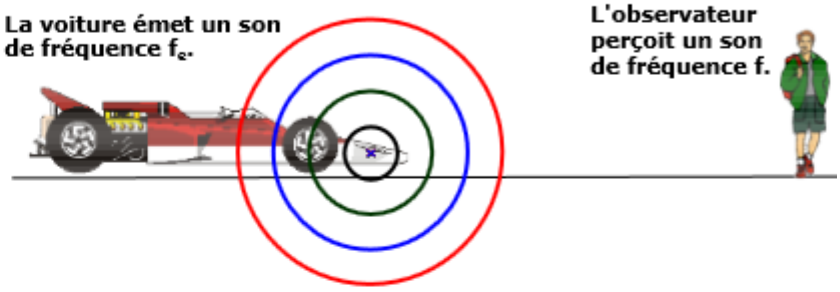
V- L'effet Doppler

Vidéo : The Big Bang Theory

1) Proposer une définition de l'effet Doppler.
2) En quoi le costume de Sheldon illustre-t-il l'effet Doppler ?

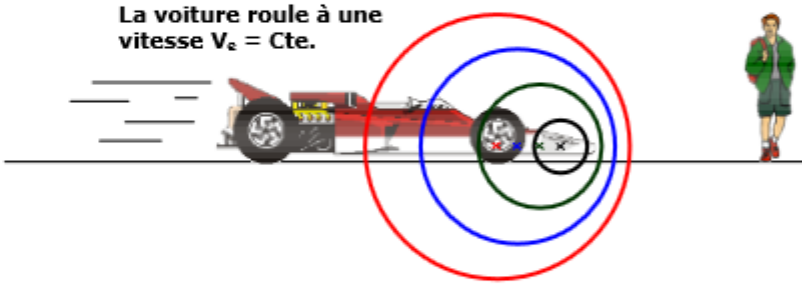
L'effet Doppler se manifeste par un changement de fréquence de l'onde perçue par un observateur lorsque celui-ci et la source sont en mouvement relatifs :

- la fréquence perçue augmente s'ils se rapprochent
- la fréquence perçue diminue s'ils s'éloignent



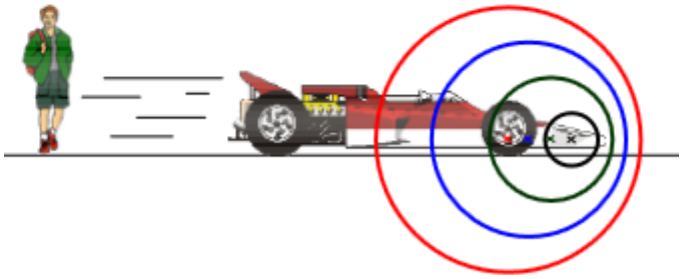
La voiture est **à l'arrêt**.

⟹ La fréquence perçue est la même que la fréquence émise : **$f = f_E$**.



La voiture **s'approche** de l'observateur.

⟹ Les fronts d'onde sont « resserrés ».
⟹ La fréquence perçue est supérieure à celle émise : $f_A > f_E$.
⟹ Le son est perçu plus aigu.



La voiture **s'éloigne** de l'observateur.

⟹ Les fronts d'onde sont « plus écartés ».
⟹ La fréquence perçue est inférieure à celle émise : $fG < f_E$.
⟹ Le son est perçu plus grave.

Soit un émetteur d'ondes sonores E, qui se rapproche d'un récepteur R fixe avec une vitesse de valeur v.
E émet avec une période T_E (et une fréquence f_E) des ondes qui se propagent à la vitesse v_{onde}.
On appelle f_R la fréquence des ondes reçues par le récepteur R.

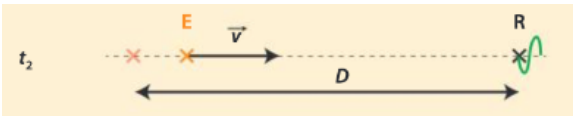
On démontre que f_R est reliée à f_E par la relation : $f_R = f_E \times \frac{v_{onde}}{v_{onde} - v}$ (Relation *)

Le décalage Doppler vaut $\Delta f = f_R - f_E = f_E \times \frac{v_{onde}}{v_{onde} - v} - f_E = f_E \times \left(\frac{v_{onde}}{v_{onde} - v} - 1\right)$
Finalement $\Delta f = f_R - f_E = f_E \times \frac{v}{v_{onde} - v}$

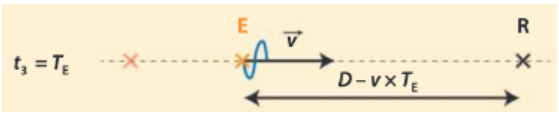
<u>Démonstration de la (Relation *)</u> :

- À une date $t_1 = 0$ s, un signal est émis par E, alors que la distance entre E et R vaut D.

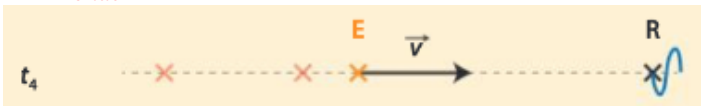
- Ce signal est reçu par R à la date t_2.
  On a $t_2 = \frac{D}{V_{onde}}$



- À la date $t_3 = T_E$ (soit 1 période après la première émission), un autre signal est émis et l'émetteur E s'est rapproché d'une distance $v \times T_E$
  La nouvelle distance entre E et R vaut alors $D - v \times T_E$



- Ce deuxième signal, émis à la date t_3, est reçu par R à une date t_4. L'onde a mis un temps $\frac{D - v \times T_E}{v_{onde}}$ pour parcourir la distance depuis son émission.
  On a donc $t_4 = T_E + \frac{D - v \times T_E}{v_{onde}}$



Du point de vue de R, la période des ondes reçues vaut $T_R = t_4 - t_2$
Ainsi, en remplaçant t_4 et t_2 par leurs expressions, on a $T_R = T_E + \frac{D - v \times T_E}{v_{onde}} - \frac{D}{V_{onde}}$

$$T_R = T_E - \frac{v \times T_E}{v_{onde}} = T_E \times (1 - \frac{v}{v_{onde}})$$

La relation Doppler permet d'exprimer les fréquences des ondes émises et reçues.
On a donc :

$$f_R = \frac{1}{T_R} = \frac{1}{T_E \times \left(1 - \frac{v}{v_{onde}}\right)} = \frac{1}{T_E} \times \frac{1}{\left(1 - \frac{v}{v_{onde}}\right)} = f_E \times \frac{1}{\frac{v_{onde} - v}{v_{onde}}}$$

Finalement, on a : $f_R = f_E \times \frac{v_{onde}}{v_{onde} - v}$

L'effet Doppler a beaucoup d'applications, c'est notamment une méthode de mesure de vitesses.

- Dans les radars automatiques pour détecter les excès de vitesse

- En médecine, pour mesurer le débit sanguin
- En astrophysique, pour déterminer la vitesse radiale d'une étoile. On utilise alors l'effet Doppler-Fizeau (avec la lumière) : on compare les longueurs d'onde de son spectre d'absorption à celles d'un spectre de référence et on mesure les écarts observés.
  (Comme l'univers est en expansion, il y a un décalage vers le rouge des radiations lumineuses : redshift).

Applications : n°39 p 478 (manipulation formule), n°54 p 481 (astrophysique), n°3 feuille d'exercices
Application en autonomie : n°38 p 478
Exercice type BAC : n°67 p 485