Avant d'aborder le chapitre

LES ACQUIS INDISPENSABLES

1re Enseignement de spécialité — 1re Enseignement scientifique

- L'intensité sonore exprime la puissance par unité de surface transportée par l'onde sonore :

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

intensité sonore I ($\mathbf{W \cdot m^{-2}}$) ; puissance sonore P délivrée par la source (**W**) ; surface S ($\mathbf{m^2}$)

$$L = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

niveau sonore L (**dB**) ; intensité sonore I ($\mathbf{W \cdot m^{-2}}$) ; intensité sonore du seuil d'audibilité : $I_0 = 1{,}0 \times 10^{-12}\ \mathrm{W \cdot m^{-2}}$

- La célérité d'une onde rend compte de la distance parcourue par l'onde par unité de temps.

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

célérité de l'onde c ($\mathbf{m \cdot s^{-1}}$) ; distance parcourue par la perturbation d (**m**) ; *Retard* ou durée pour parcourir par la distance d (**s**)

- La **période T** d'un phénomène périodique est la plus petite durée au bout de laquelle le phénomène se reproduit identique à lui-même.

- La **fréquence f** est le nombre de fois que se répète le phénomène périodique par seconde.

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

fréquence de l'onde f (**Hz**) ; période T (**s**)

- La **longueur d'onde λ** est la plus petite distance séparant deux points vibrant en phase. C'est aussi la distance parcourue par l'onde en une période T.

$$c = \frac{\lambda}{T}$$

célérité de l'onde c ($\mathbf{m \cdot s^{-1}}$) ; longueur d'onde λ (**m**) ; période T (**s**)

1 Niveau d'intensité sonore

L'intensité sonore I et le niveau d'intensité sonore L

L'intensité sonore correspond à l'énergie transportée par l'onde sonore par unité de temps et de surface. Elle s'exprime en watt par mètre carré ($W \cdot m^{-2}$).

La valeur minimale audible, appelée seuil d'audibilité, vaut $I_0 = 1{,}0 \times 10^{-12}\ W \cdot m^{-2}$. La valeur maximale, appelée seuil de douleur, vaut $1\ W \cdot m^{-2}$.

L'étendue de l'intensité sonore étant considérable, on préfère utiliser une échelle logarithmique, qui représente mieux la perception visuelle de l'oreille humaine, en introduisant le niveau d'intensité sonore (FIG. 1). Il est noté L, comme level qui signifie niveau en anglais, et est exprimé en décibel (dB) :

$$L = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

niveau d'intensité sonore (dB) → L ; I : intensité sonore ($W \cdot m^{-2}$) ; I_0 : intensité sonore de référence ($W \cdot m^{-2}$)

FIG. 1 Échelle de niveau d'intensité sonore.

Atténuation

Plus la distance entre la source et le récepteur augmente plus le niveau d'intensité sonore diminue : on parle **d'atténuation géométrique** (FIG. 2). D'autre part, on parle **d'atténuation par absorption** lorsqu'un matériau est interposé entre la source et le récepteur, ce qui amoindrit l'intensité sonore.

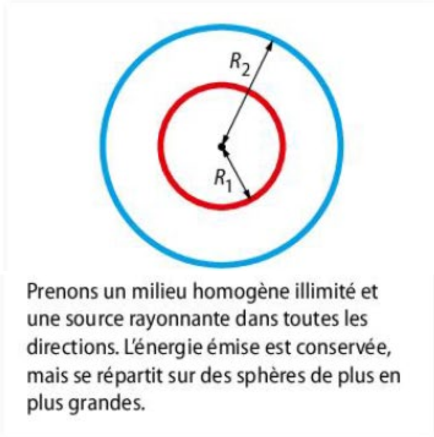


FIG. 2 Atténuation géométrique : répartition de la même puissance sur deux sphères de rayons différents.

2 Diffraction d'une onde

Conditions d'observation

Lorsqu'une onde mécanique plane rencontre une ouverture, dont la taille est inférieure ou égale à sa longueur d'onde, il se produit un phénomène de **diffraction**. L'onde se transforme en onde circulaire, ce qui crée une vibration qui se propage dans une région plus vaste que l'ouverture seule (FIG. 3).

Ce phénomène se produit aussi lorsqu'un faisceau laser rencontre une fente suffisamment fine. Après l'ouverture, au lieu de rester confiner à la dimension de l'ouverture, le faisceau s'éparpille : on obtient plusieurs tâches lumineuses alternant la lumière et l'obscurité (FIG. 4). Ce phénomène, commun aux ondes mécaniques et lumineuses, décrit la lumière comme une onde.

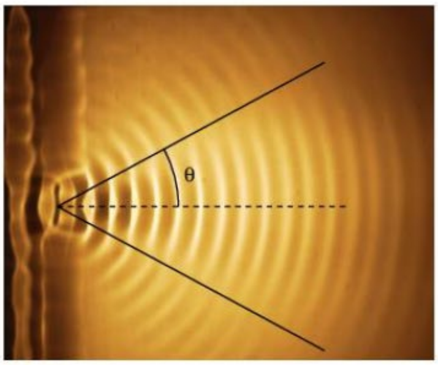


FIG. 3 Diffraction d'une onde mécanique plane sur l'eau.

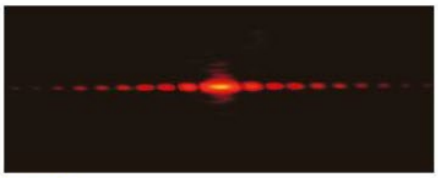


FIG. 4 Diffraction de la lumière d'un laser.

Caractéristiques de la diffraction

Le phénomène de **diffraction** (FIG. 5) dépend de la dimension de l'ouverture a et de la longueur d'onde λ. Il est d'autant plus marqué que a est voisin ou inférieur à λ.

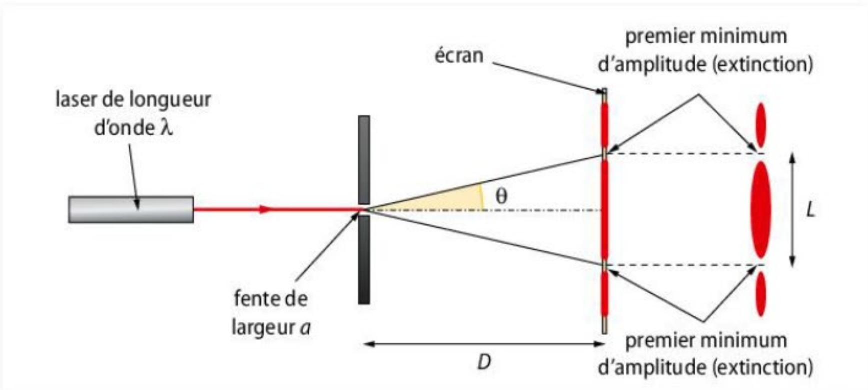


FIG. 5 Diffraction de la lumière d'un laser par une ouverture de dimension a.

Angle caractéristique de la diffraction θ

On exprime l'**angle caractéristique de la diffraction** θ comme le demi-angle délimitant les premiers minima d'amplitude (FIG. 5). Il s'exprime en radian (rad).

L'**angle caractéristique** vérifie la relation :

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

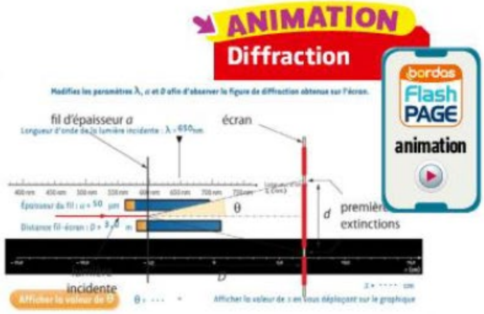
- θ : angle caractéristique de diffraction (rad)
- λ : longueur d'onde (m)
- a : taille de l'ouverture (m)

EXEMPLE

Pour trouver le diamètre d'une ouverture, il suffit de mesurer la tâche centrale L avec une règle, la distance fente-écran D, et lire sur le laser la longueur d'onde λ. On utilise l'approximation des petits angles :

$$\tan\theta \approx \theta = \frac{L}{2D} = \frac{\lambda}{a}$$

On isole a, ce qui donne $a = \dfrac{2\lambda \cdot D}{L}$.



3 Interférences de deux ondes

Conditions d'observation

Lorsque deux ondes mécaniques, de même longueur d'onde, se rencontrent, elles se superposent géométriquement : on constate par endroit qu'elles se renforcent en s'additionnant, et par ailleurs, elles s'annulent (FIG. 6A) : c'est le phénomène d'**interférences**.

Cela se produit aussi lorsque deux faisceaux de lumière issus d'une même source se superposent : on obtient sur un écran une alternance de zones brillantes et de zones sombres (FIG. 6B). Cela a beaucoup surpris les physiciens du XIX^e siècle : lumière + lumière = obscurité !

Là encore, ce phénomène observé pour la lumière et pour les ondes mécaniques, confirme les propriétés ondulatoires de la lumière.

Pour être observées, il faut que les deux ondes respectent des **conditions d'interférences** :
– avoir la même longueur d'onde ou *fréquence*
– être synchrones (ou cohérentes), c'est-à-dire avoir un déphasage de l'une par rapport à l'autre constant.

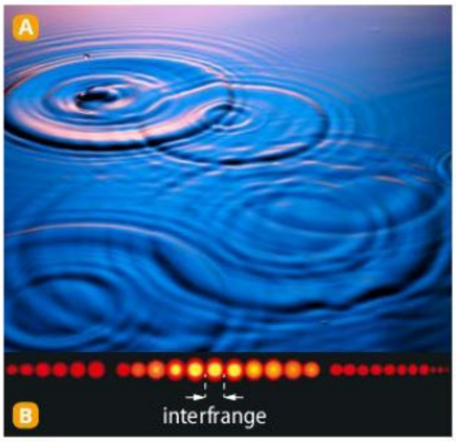


FIG. 6 A interférences entre des ondes mécaniques à la surface de l'eau. B Interférences en lumière monochromatique

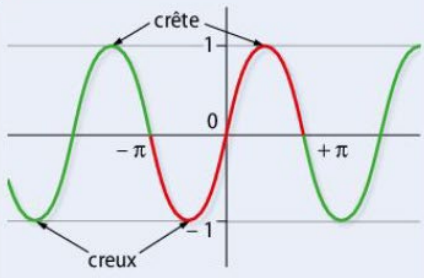
Interférences constructives et destructives

Une onde monochromatique peut être modélisée par une succession de creux et de crêtes, sous la forme d'une fonction sinusoïdale. La superposition de deux ondes de même longueur d'onde donne deux cas extrêmes.

– Si les creux et les crêtes coïncident, les deux ondes sont exactement décalées d'un multiple de la longueur d'onde λ : on dit que les **deux ondes sont en phase**. Lors de la superposition, les amplitudes des deux ondes s'ajoutent et l'onde résultante est renforcée : on parle d'**interférences constructives**.
– Si les creux d'une des ondes coïncident avec les crêtes de la seconde, les deux ondes sont précisément décalées d'un multiple de la demi-longueur d'onde $\frac{\lambda}{2}$, on dit que **les ondes sont en opposition de phase**. Lors de la superposition, les amplitudes des deux ondes s'annulent, on parle d'**interférences destructives** (FIG. 7).

UN PONT VERS LES MATHS

La fonction sinus est une courbe qui alterne crête et creux.



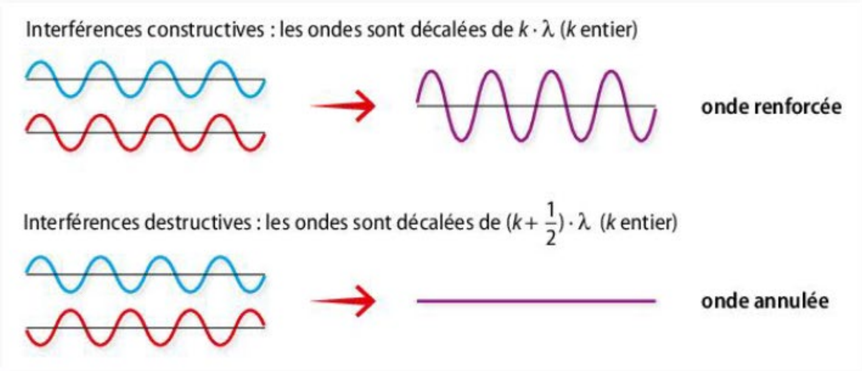


FIG. 7 Conditions d'interférences constructives ou destructives.

EXEMPLE

Le phénomène d'interférences est utilisé dans les casques à réduction de bruit : un micro interne détecte les ondes sonores ambiantes et crée un signal en opposition de phase de nature à annihiler le bruit ambiant.

Interférences de deux ondes lumineuses

Dans l'expérience des trous d'Young (FIG. 8)., un faisceau laser de longueur d'onde λ, éclaire deux trous distants d'un écart e. Ils se comportent ainsi comme deux sources synchrones, notées S_1 et S_2 (FIG. 9).

La superposition en un point M de l'écran des deux ondes sinusoïdales dépend de la **différence de chemin optique**, notée δ, due au déplacement supplémentaire de la deuxième onde par rapport à la première :

$\delta = S_2M - S_1M = S_2S_1'$. Par relation trigonométrique dans l'approximation des petits angles, on peut écrire, dans le triangle IOM, $\tan\alpha \approx \alpha = \dfrac{x}{D}$

Mais aussi dans le triangle $S_1S_2S_1'$: $\sin\alpha \approx \alpha = \dfrac{\delta}{e}$

FIG. 8 Thomas Young (1773-1829) est un illustre physicien, mathématicien et médecin.

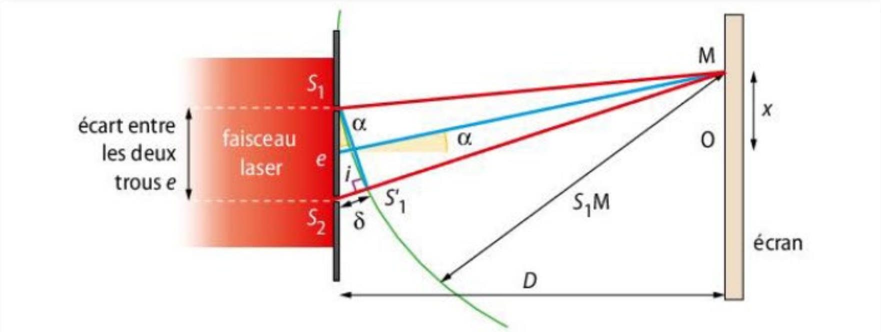


FIG. 9 Expérience des trous d'Young.

En égalisant les deux relations : $\alpha = \dfrac{x}{D} = \dfrac{\delta}{e}$, on obtient l'expression de la différence de chemin optique en fonction de l'abscisse x du point M :

$$\delta = \frac{e \cdot x}{D}$$

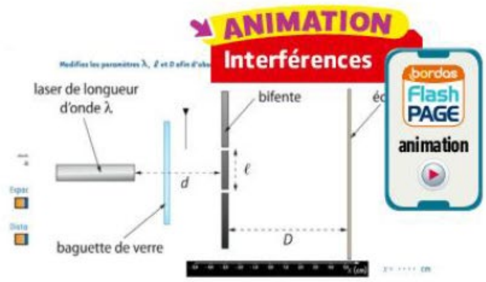
La plus petite valeur de x séparant deux points où des interférences constructives vont être observées s'appelle l'**interfrange**, noté i (FIG. 6B). Elle s'obtient pour $\delta = \lambda$, la distance entre ces deux interférences constructives consécutives : $\lambda = \dfrac{e \cdot i}{D}$, ce qui permet d'obtenir l'expression de l'interfrange i :

longueur d'onde (m)

distance entre les deux fentes et l'écran (m)

interfrange (m) → $\boxed{i = \dfrac{\lambda \cdot D}{e}}$

écart entre les deux fentes (m)



4 Effet Doppler

Définition

Lorsqu'un train klaxonne en passant dans une gare à vitesse importante : le son perçu est plus aigu quand il s'approche, et plus grave lorsqu'il s'éloigne.

L'effet Doppler est une variation de fréquence de l'onde perçue par un observateur, si la source est en mouvement par rapport à l'observateur. Le **décalage Doppler** est d'autant plus marqué que la vitesse de la source par rapport à l'observateur est grande.

Décalage Doppler

Considérons une source qui se rapproche à une vitesse v, faible devant la célérité c des ondes. À $t = 0$ s, elle émet une onde, de fréquence $f_e = \frac{1}{T_e}$ et de longueur d'onde λ_e (FIG. 10).

Pendant une durée égale à une période T_e, l'onde se déplace d'une longueur d'onde λ_e. Elle sera entendue à l'instant $t_1 = \frac{D}{c}$.

Pendant ce temps, la source avance d'une distance $d = v \times T_e$, et émet une deuxième onde à $t_2 = T_e$. L'onde n'a plus qu'à parcourir la distance $D - d$. On appelle t_3 l'instant où l'onde est reçue par l'observateur : $t_3 = T_e + \frac{D-d}{c}$.

Ainsi, le récepteur a reçu la première onde à l'instant t_1 et la deuxième onde à l'instant t_3.

La période de l'onde reçue est donc : $T_R = t_3 - t_1 = T_e + \frac{D-d}{c} - t_1 = T_e - \frac{d}{c}$

$$T_R = T_e - \frac{v \cdot T_e}{c} = T_e\left(1 - \frac{v}{c}\right) = T_e\left(\frac{c-v}{c}\right).$$

En prenant l'inverse pour obtenir la fréquence reçue $f_R = \frac{1}{T_R}$:

$f_R = f_e\left(\frac{c}{c-v}\right)$. On retrouve bien une fréquence perçue f_R plus grande que celle émise f_e, ce qui correspond à un son perçu plus aigu.

Bien entendu, si la source s'éloigne de l'observateur, il y a juste à permuter le signe $-v$ en $+v$:

$f_R = f_e\left(\frac{c}{c+v}\right)$. On retrouve bien une fréquence perçue $f_R < f_e$.

Le décalage Doppler Δf s'obtient en faisant la différence $\Delta f = f_R - f_e$:

$$\Delta f = f_R - f_e = f_e\left(\frac{c}{c-v} - 1\right) = f_e\left(\frac{v}{c-v}\right).$$

Si la vitesse v de la source est très faible devant la célérité c des ondes, alors $c - v \approx c$, le décalage Doppler s'écrit :

$$\Delta f = f_R - f_e = \frac{f_e \cdot v}{c}$$

- décalage Doppler (Hz) : Δf
- fréquence de la source au repos (Hz) : f_e
- vitesse de l'émetteur par rapport à l'observateur ($m \cdot s^{-1}$) : v
- vitesse de l'onde ($m \cdot s^{-1}$) : c
- fréquence de l'onde perçue par l'observateur (Hz) : f_R
- fréquence de l'onde émise par émetteur au repos (Hz) : f_e

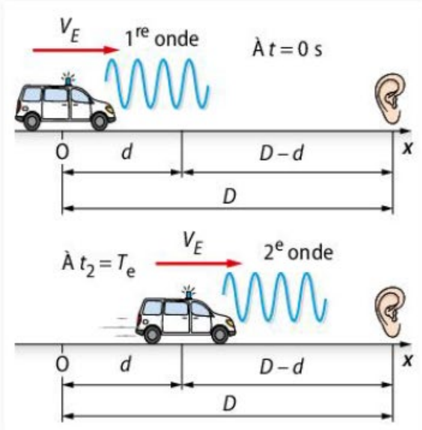
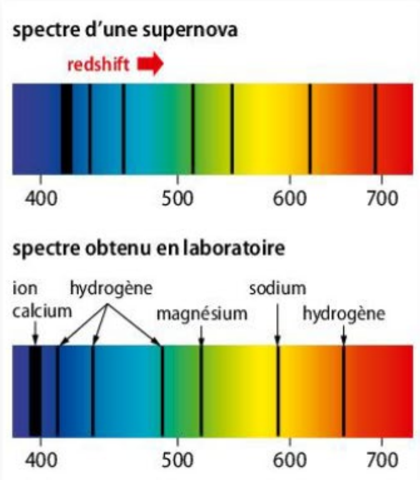


FIG. 10 **A** $t = 0$ s, émission de la 1re onde **B** à $t_2 = T_e$, émission de la 2e onde.



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*.

FIG. 11 Phénomène du *redshift*.

FICHE MÉMO PRÉPA BAC

Le vocabulaire à retenir
Les relations à connaître

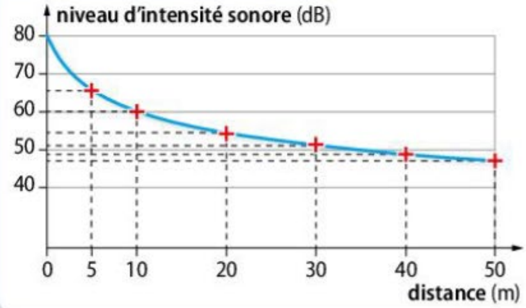
1 Niveau d'intensité sonore

$$L = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

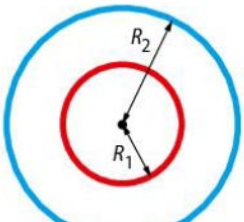
- L : niveau d'intensité sonore (**dB**)
- I : intensité sonore (**W · m^{-2}**)
- I_0 : intensité sonore de référence (**W · m^{-2}**)

$$I = I_0 \cdot 10^{\frac{L}{10}}$$

Atténuation géométrique



Prenons un milieu homogène illimité et une source rayonnante dans toutes les directions. L'énergie émise est conservée, mais se répartit sur des sphères de plus en plus grandes.



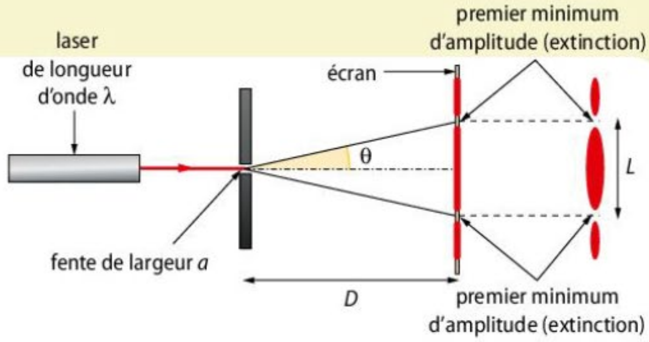
L'atténuation par absorption dépend du milieu de propagation ou du milieu absorbant, et aussi de la fréquence.

2 Diffraction d'une onde

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

- θ : angle caractéristique de diffraction (**rad**)
- λ : longueur d'onde (**m**)
- a : taille de l'ouverture (**m**)

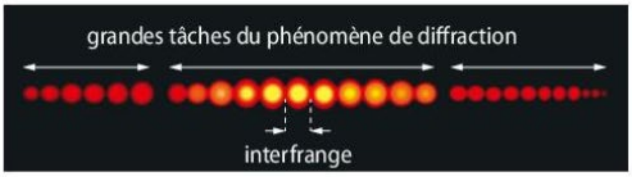
En optique la **diffraction** vient limiter le pouvoir séparateur de la lunette astronomique.



3 Interférences de deux ondes

Interférences constructives : les ondes sont décalées de $k \cdot \lambda$ (k entier)

Interférences destructives : les ondes sont décalées de $(k + \frac{1}{2}) \cdot \lambda$ (k entier)



$$\delta = \frac{e \cdot x}{D}$$

- δ : différence de marche (**m**)
- e : distance entre les deux sources (**m**)
- x : abscisse de l'écran où se superposent les deux ondes (**m**)
- D : distance fentes écran (**m**)

$$i = \frac{\lambda \cdot D}{e}$$

- i : interfrange (**m**)
- λ : longueur d'onde (**m**)
- D : distance fentes écran (**m**)
- e : distance entre les deux sources (**m**)

4 Effet Doppler

$$\Delta f = f_R - f_e = \frac{f_e \cdot v}{c}$$

- Δf : décalage Doppler (**Hz**)
- v : vitesse de l'émetteur par rapport à l'observateur (**m · s^{-1}**)
- c : vitesse de l'onde (**m · s^{-1}**)
- f_R : fréquence de l'onde perçue par l'observateur (**Hz**)
- f_e : fréquence de l'onde émise par émetteur au repos (**Hz**)