

THÈME 4

ONDES ET SIGNAUX

Pierre-André LABOLLE

Lycée International des Pontonniers de Strasbourg

Novembre 2020

CHAPITRE 4 : ATTÉNUATION ET EFFET DOPPLER

I. Atténuation d'une onde sonore

1. Qu'est-ce qu'une onde sonore ?
2. Intensité sonore et niveau d'intensité sonore
3. Atténuation géométrique
4. Atténuation par absorption

II. Effet Doppler

Introduction

1. Source et récepteur au repos
2. Source en mouvement et récepteur fixe
3. Décalage Doppler

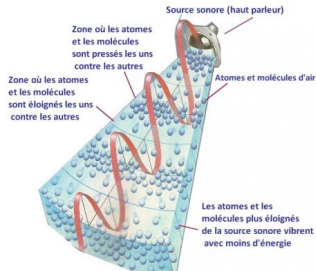
III. Conséquences concrètes de l'effet Doppler

1. Vélocimétrie à ultrasons
2. Vélocimétrie optique
3. Application en astrophysique

I. Atténuation d'une onde sonore

1. Qu'est-ce qu'une onde sonore ?

- Ce sont des ondes de compression et de dilatation des couches d'air.
- Ces perturbations de pression se propagent de proche en proche en trois dimensions.
- Comme toutes les ondes mécaniques, elles nécessitent un milieu matériel pour se propager.
- Dans l'air, à la pression atmosphérique et à 20°C : $v_{air} = 340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
- $v_{son}(\text{solides}) > v_{son}(\text{liquides}) > v_{son}(\text{gaz})$



I. Atténuation d'une onde sonore

2. Intensité sonore et niveau d'intensité sonore

- L'intensité sonore I dépend de la distance à la source.

Définition : intensité sonore

Si P est la puissance sonore (en W) reçue par un récepteur de surface S (en m^2) alors l'intensité sonore I (en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) est donnée par :

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

- Le niveau d'intensité sonore dépend aussi de la distance à la source mais traduit mieux la sensation auditive qui varie de façon logarithmique.

Définition : niveau d'intensité sonore

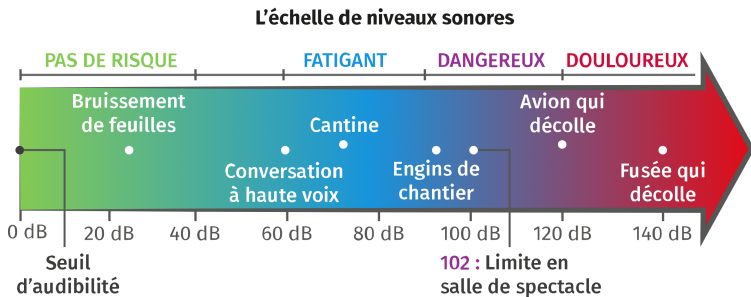
Soit I l'intensité sonore (en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) et $I_0 = 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ le seuil d'audibilité, alors le niveau sonore L (en dB) est donné par :

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

I. Atténuation d'une onde sonore

2. Intensité sonore et niveau d'intensité sonore

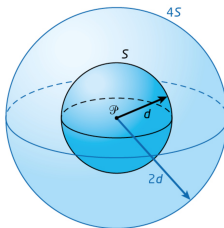
- Le niveau d'intensité sonore augmente de 3 dB lorsque l'intensité sonore double.
- Le niveau d'intensité sonore augmente de 10 dB lorsque l'intensité sonore est multipliée par 10.



I. Atténuation d'une onde sonore

3. Atténuation géométrique

- L'intensité sonore perçue par un récepteur dépend de la distance à la source.
- En revanche, la puissance émise, elle, ne dépend que de la source.
- Si le milieu est isotrope, cette puissance se répartit sur une sphère de rayon r centrée sur la source.
- On a donc $I = \frac{P}{S} = \frac{P}{4\pi r^2}$
- Si la distance à la source double, l'intensité sonore est donc divisée par 4 et par conséquent, le niveau d'intensité sonore diminue de 6 dB.
- Cette diminution de l'intensité sonore due à l'éloignement à la source est appelée **atténuation géométrique**.



I. Atténuation d'une onde sonore

4. Atténuation par absorption

- Lorsqu'une onde se propage dans un matériau, une partie de son énergie (donc de sa puissance) est absorbée par le matériau.
- L'intensité de cette absorption dépend du matériau et de ses caractéristiques physiques (densité par exemple).
- La puissance perdue par l'onde au profit du milieu matériel devient de la puissance mécanique (vibrations par exemple) et/ou de la puissance thermique.

II. Effet Doppler

Introduction

- L'effet Doppler est un phénomène physique dont les manifestations ont permis des avancées considérables dans des domaines différents comme la médecine, l'étude de l'Univers...
- Quelques exemples d'application : contrôle de la vitesse des automobiles, compréhension de l'expansion de l'Univers, son "déformé" que fait une voiture de course en passant devant une tribune, mesure de mobilité des spermatozoïdes, échographies permettant de détecter les battements du cœur d'un fœtus...

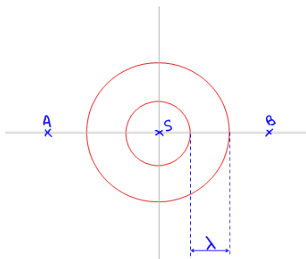
II. Effet Doppler

1. Source et de récepteur au repos

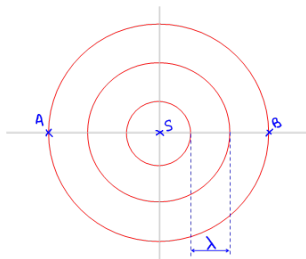
- Soient S une source, fixe dans le référentiel d'étude, émettrice d'une onde sonore de période T_E , de fréquence f_E se propageant à la célérité v .
- La longueur d'onde de cette onde est donnée par : $\lambda_E = v \cdot T_E = \frac{v}{f_E}$
- On considère deux observateurs A et B , eux aussi immobiles dans le référentiel d'étude, situés à égale distance de la source.

II. Effet Doppler

1. Source et de récepteur au repos



Situation à la date $t = 2T_E$



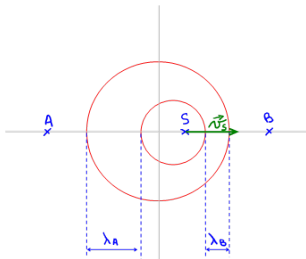
Situation à la date $t = 3T_E$

- Les observateurs A et B sont touchés par l'onde au même instant.
- Ils perçoivent tous les deux une onde sonore de fréquence f_E et de longueur d'onde λ_E

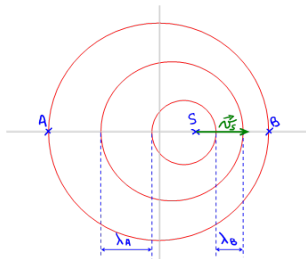
II. Effet Doppler

2. Source en mouvement et récepteur au repos

- La source S est à présent animée d'un mouvement rectiligne uniforme en direction de l'observateur B ; elle s'éloigne donc de A .



Situation à la date $t = 2T_E$



Situation à la date $t = 3T_E$

II. Effet Doppler

2. Source en mouvement et récepteur au repos

- L'observateur A reçoit à présent une onde de longueur d'onde supérieure à λ_E donc de période plus grande que T_E et de fréquence plus petite que f_E . Il perçoit un son plus grave.
- L'observateur B , quant à lui, reçoit une onde de longueur d'onde inférieure à λ_E donc de période plus petite que T_E et de fréquence plus grande que f_E . Il perçoit un son plus aigu.
- Ce phénomène est appelé effet Doppler.
- http://www.onera.fr/sites/default/files/ressources_documentaires/cours-exposition/lumiere/observation-detection-identification.swf

II. Effet Doppler

3. Décalage Doppler

- On appelle décalage Doppler Δf la différence entre la fréquence perçue par l'observateur et la fréquence émise par la source.
- Pour l'observateur A , le décalage Doppler est donc $\Delta f = f_A - f_E$ alors que pour l'observateur B , le décalage Doppler sera $\Delta f = f_B - f_E$.
- Un bip émis à la date $t = 0$ par la source sera reçu à la date t_1 par l'observateur A .
- Le bip suivant, émis à la date $t = T_E$ par la source sera reçu à la date t_2 par l'observateur A .
- L'observateur A recevra ce deuxième bip au bout d'une durée T_E augmentée de la durée nécessaire à l'onde pour parcourir la distance supplémentaire dont la source s'est éloignée durant la durée T_E , à savoir $\frac{v_S \times T_E}{c}$
- Autrement dit, $t_2 = t_1 + T_E + \frac{v_S \times T_E}{c}$
- La période des bips perçue par A est donc

$$T_A = t_2 - t_1 = T_E + \frac{v_S \times T_E}{c} = T_E \times \left(1 + \frac{v_S}{c}\right) = T_E \times \left(\frac{c + v_S}{c}\right)$$

II. Effet Doppler

3. Décalage Doppler

- La fréquence des bips perçue par A est donc $f_A = \frac{1}{T_A} = f_E \times \left(\frac{c}{c + v_S} \right)$
- Le décalage Doppler pour l'observateur est donc donné par

$$\Delta f = f_A - f_E = f_E \times \left(\frac{c}{c + v_S} \right) - f_E = f_E \times \left(\frac{c}{c + v_S} - 1 \right)$$

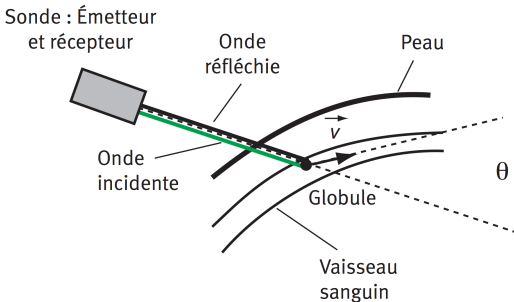
$$\Delta f = f_E \times \left(\frac{-v_S}{c + v_S} \right)$$

- Un raisonnement analogue mène, pour l'observateur B , à $\Delta f = f_E \times \left(\frac{v_S}{c - v_S} \right)$
- On retrouve bien une diminution de la fréquence pour l'observateur A et une augmentation de la fréquence pour l'observateur B .
- **Cette démonstration ne vaut que pour une vitesse de la source inférieure à la célérité de l'onde $v_S < c$**

III. Conséquences concrètes de l'effet Doppler

1. Vélodimétrie à ultrasons

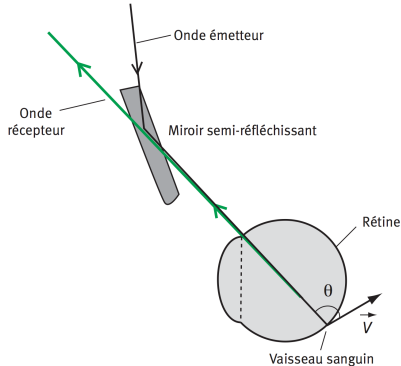
- Une sonde à ultrasons joue le rôle d'émetteur et de récepteur, la célérité des ultrasons étant égale à v .
- Lorsque les ultrasons arrivent sur les globules sanguins présents dans les vaisseaux, ces globules renvoient les ultrasons vers la sonde qui détecte un décalage en fréquence lié à la vitesse des globules, devenus sources d'ondes ultrasonores par réflexion.
- La connaissance de la vitesse des globules permet de détecter des rétrécissements éventuels des vaisseaux sanguins.



III. Conséquences concrètes de l'effet Doppler

2. Vélodimétrie optique

- La vitesse d'écoulement du sang dans les petits vaisseaux sanguins de la rétine peut aussi être déterminée par une méthode analogue.
- On analyse un faisceau laser qui ressort de l'œil après avoir été renvoyé par les globules des vaisseaux irriguant la rétine.
- Cette technique est notamment utilisée dans l'étude de l'influence de la glycémie sur la fonction rétinienne.



III. Conséquences concrètes de l'effet Doppler

3. Application à l'astrophysique

- Les corps célestes étant en mouvement et l'étude des spectres de raies en provenance de ces objets fait état du décalage des longueurs d'onde observées.
- En mesurant ce décalage Doppler, il est possible de déduire la vitesse de l'objet céleste.
- L'analyse spectrographique de la lumière reçue des galaxies lointaines montre systématiquement un décalage Doppler-Fizeau vers le rouge (redshift) qui permet de connaître les vitesses radiales d'éloignement de ces galaxies.
- La connaissance des distances nous séparant de ces galaxies et de leur vitesse a permis d'établir la loi de Hubble qui indique une proportionnalité entre ces deux grandeurs, nous indiquant que plus une galaxie est éloignée, plus sa vitesse d'éloignement est grande.
- Cette loi est en accord avec la théorie de l'expansion de l'Univers.

EXERCICES ATTÉNUATION : PP400-413 n°18, 21, 22 et 32

EXERCICES DOPPLER : PP400-413 n°30, 38, 45 et 47