

Effet Doppler et applications

Niveau : CPGE

Prérequis : ondes, cinématique

Introduction

L'effet Doppler traduit le décalage en fréquence d'une onde quand celle-ci se rapproche ou s'éloigne de nous. Nous le constatons au quotidien quand une voiture klaxonnant s'approche de nous (ou quand il s'agit d'une voiture de police ou d'un camion de pompier). Ce principe a été énoncé par Christian Doppler en 1842, puis démontré par Buys-Ballot en 1845 avec une expérience où des trompettistes jouaient dans un train en mouvement. En 1848, Fizeau met en évidence l'effet Doppler pour les ondes lumineuses, découverte qui servira par la suite à démontrer l'expansion de l'univers. Dans cette leçon nous allons démontrer dans des cas simples l'effet Doppler puis nous étudierons des applications concrètes.

I Effet Doppler et calcul de fréquence

1) Cas d'un émetteur fixe et d'un récepteur en mouvement

L'émetteur immobile émet un son de fréquence constante f_e (en Hz). Période T_e .

c : vitesse du son (en m/s).

V_r : vitesse du récepteur (en m/s).

Plaçons nous à l'instant t où le récepteur perçoit le 1^{er} front d'onde.

La distance séparant les 2 fronts d'onde est :

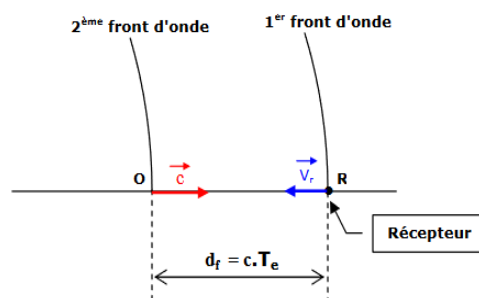
$$d_f = c \cdot T_e$$

En plaçant l'origine au point O, l'équation horaire du 2^{ème} front d'onde (qui va vers le récepteur) est :

$$d = c \cdot t$$

l'équation horaire du récepteur (qui va vers le 2^{ème} front d'onde) est :

$$d = d_f - V_r \cdot t = c \cdot T_e - V_r \cdot t$$



Le récepteur rencontrera le 2^{ème} front d'onde à l'instant t tel que :

$$c \cdot t = c \cdot T_e - V_r \cdot t \Rightarrow c \cdot t + V_r \cdot t = c \cdot T_e \Rightarrow (c + V_r) \cdot t = c \cdot T_e \Rightarrow t = \frac{c}{c + V_r} \cdot T_e$$

Ce temps est la période apparente T du son.

Le son perçu par l'observateur a donc une fréquence apparente d'expression :

$$f = \frac{c + V_r}{c} \cdot f_e$$

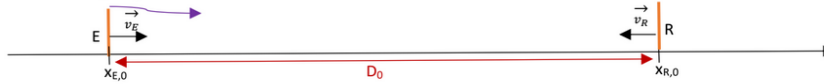
$\frac{c + V_r}{c} > 1$ donc $f > f_e$. L'observateur perçoit un son plus aigu.

Remarque : si l'émetteur est en mouvement et le récepteur est fixe, alors $f = \frac{c-v_r}{c} f_e$, donc $f < f_e$, le son est plus grave.

2) Généralisation : émetteur et récepteur en mouvement

Au tableau : Démo

- A $t_1=0$, émission de l'onde.



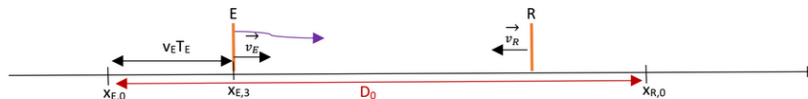
- A t_2 réception de l'onde.



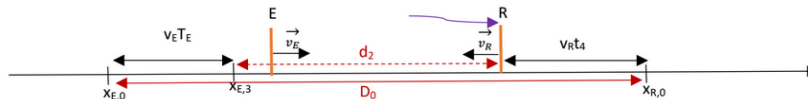
On note d_1 la distance parcourue par l'onde. Entre t_2 et t_1 R a parcouru une distance $v_R t_2$.

Soit $d_1 = c \cdot t_2$ et $d_1 = D_0 - v_R t_2$ donc $t_2 = \frac{D_0}{c + v_R}$ (1)

- Emission à $t_3 = T_E$



- Réception à t_4



On note d_2 la distance parcourue par l'onde entre T_E et t_4 .

Soit $d_2 = c(t_4 - T_E)$ et $d_2 = D_0 - v_R t_4 - v_E T_E$ alors :

$$t_4 = \frac{D_0}{c + v_R} + \frac{T_E(c - v_E)}{c + v_R} \quad (2)$$

On obtient donc lorsque émetteur et récepteur s'approche :

$$T_R = t_4 - t_2 = (2) - (1)$$

$$T_R = T_E \frac{c - v_E}{c + v_R}$$

$$f_R = f_E \frac{c + v_R}{c - v_E}$$

Vitesse en m/s et fréquence en Hz.

Si on fixe comme sens positif le sens émetteur vers récepteur et qu'on considère V_R et V_E comme valeur algébrique on peut résumer le résultat avec une seule formule.

$$f_R = f_E \frac{c - \overline{v_R}}{c - \overline{v_E}}$$

On peut ainsi retrouver tous les cas possibles (faire pour un exemple).

$$f_R = f_e * \frac{c - v_r}{c - v_e}$$

En supposant l'émetteur où le récepteur fixe, donc une des valeurs de vitesse nulle, on peut obtenir l'autre valeur de vitesse assez facilement.

Ex : $v_e = 0$. $v_r = c * \frac{f_e - f_r}{f_e}$

II Applications

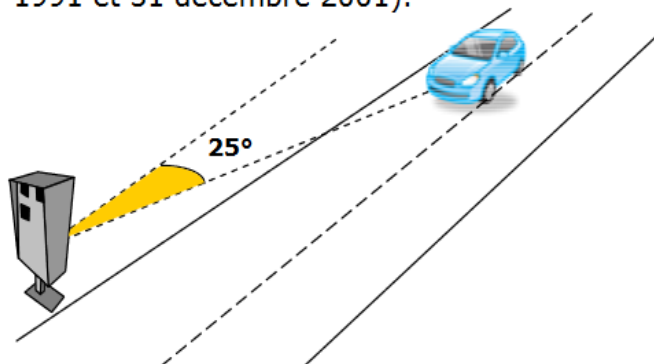
1) Principe du radar routier

Radar = RAdio Detection And Ranging = Détection et estimation de distance par onde radio.

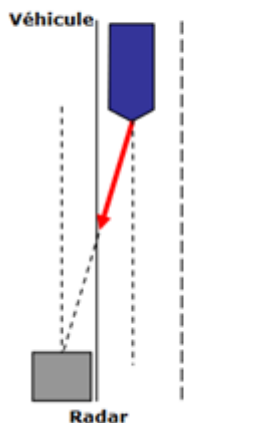
Une antenne émet une onde électromagnétique dans le domaine des ondes radio, qui se réfléchit sur les véhicules.

Par effet Doppler, la fréquence de l'onde réfléchi diffère de celle de l'onde incidente.

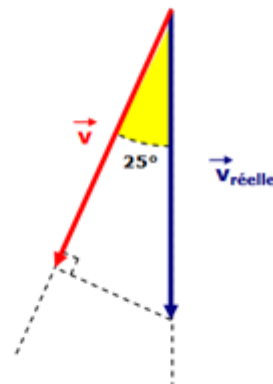
Pour que les mesures réalisées par les radars (fixes ou mobiles) soient exactes, ceux-ci doivent être réglés à 25° par rapport à l'axe du déplacement (arrêtés du 7 janvier 1991 et 31 décembre 2001).



⇒ D'une part, l'onde réceptionnée a parcouru un "aller-retour", il est donc nécessaire d'introduire le coefficient 1/2.



⇒ D'autre part, La vitesse v ainsi calculée est la vitesse radiale. La vitesse réelle $v_{réelle}$ est donc telle que :

$$v = v_{réelle} \cdot \cos 25$$


Nous aboutissons donc à : $v_{réelle} = \frac{c(f_e - f)}{2 \cdot f \cdot \cos 25}$

De plus :

Lorsque la cible se rapproche du radar, $f > f_e$. La vitesse $v_{réelle}$ est négative (normal, la cible se déplace en sens inverse de l'onde).

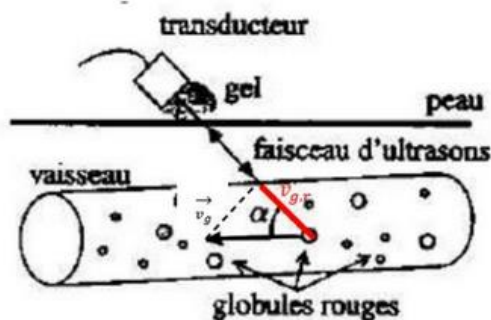
Pour simplifier les calculs selon les situations, nous poserons $\Delta f = |f_e - f|$

$$v_{réelle} = \frac{c \cdot \Delta f}{2 \cdot f \cdot \cos 25}$$

2) Échographie

Même principe que le radar mais pour déterminer la vitesse d'un écoulement sanguin.

Le transducteur émet un faisceau d'ultrasons de fréquence $f_0 = 3\text{MHz}$ et on considère que la célérité des ondes émises dans tout le milieu biologique est $c = 1500 \text{ m.s}^{-1}$.



Avec le même calcul que précédemment on obtient :

$$v_g = c \frac{(f_1 - f_0)}{2 \cos(\alpha) f_0}$$

AN : Avec un angle de 10° et $f_1 - f_0 = 1,2 \text{ kHz}$ $f_0 = 3\text{MHz}$ et $c = 1500 \text{ m/s}$

$v_g = 0,3 \text{ m.s}^{-1} \Rightarrow$ correspond à la vitesse du sang dans les artères qui se trouve entre autres dans la carotide. Dans le corps, cette vitesse peut varier entre $0,1$ et $0,5 \text{ m.s}^{-1}$.

Échographie carotidienne : on détermine la vitesse du sang à différents endroits des artères de la carotide, car si un vaisseau présente un rétrécissement, alors la vitesse des globules rouges va augmenter.

Conclusion

Dans cette leçon nous avons démontré l'existence de l'effet Doppler qui se manifeste par une modification de la fréquence en fonction de la position d'un émetteur par rapport à un récepteur. D'autres applications existent comme l'écholocation de certains animaux, les radars météorologiques, les sonars des bateaux...L'effet Doppler est également utilisé en astronomie, il permet de prouver que l'Univers est en expansion, mettant en évidence le « redshift » (décalage vers le rouge).

Bibliographie

-Physique tout-en-un, PC-PC*

-BUP n°761, changement de fréquence, effet Doppler

-http://maths-sciences-lp.ac-amiens.fr/IMG/dossier_radar/doppler_dossier.pdf

-https://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue/Ondes/son/doppler_explication.php