6. AUTRES ASPECTS DES ONDES.

6.1 Effet Doppler.([1])

Tout le monde a pu remarquer que le bruit que fait un véhicule (notamment les mobylettes à échappement libre) est plus aigu quand le mobile se rapproche de l'auditeur que quand il s'éloigne. On peut aussi remarquer que, entendue du train, la sonnerie d'un passage à niveau semble plus aiguë quand on se rapproche du passage à niveau que quand on l'a dépassé. Ceci est l'effet Doppler.

Cet effet, l'augmentation de la fréquence ressentie par l'observateur quand la distance à la source est en diminution et, réciproquement la diminution de la fréquence quand la distance à la source est en augmentation, n'est pas réservé aux ondes sonores. Il apparaît de la même façon pour tous les types d'ondes. Un voilier qui avance au près "tape" plus qu'au largue ou qu'au vent arrière. Aussi la lumière des étoiles et des galaxies qui s'éloignent de nous apparaît décalée vers le rouge (fréquence plus faible que le vert ou le bleu). Même les gendarmes trouvent que les ondes radio réfléchies par nos voitures semblent avoir des fréquences plus élevées que celles avec lesquelles ils nous ont éclairés.

Nous allons distinguer deux cas: celui où la source est immobile et l'observateur se rapproche de la source, et celui où l'observateur est immobile et c'est la source qui se rapproche.

Dans le premier cas (source immobile) la fréquence de la source S est f_o et sa longueur d'onde sera $\lambda = \frac{c}{f_o}$ où c est la vitesse du son dans le milieu([2]). La vitesse à laquelle l'observateur O se rapproche de la source est v (voir figure 6.1).

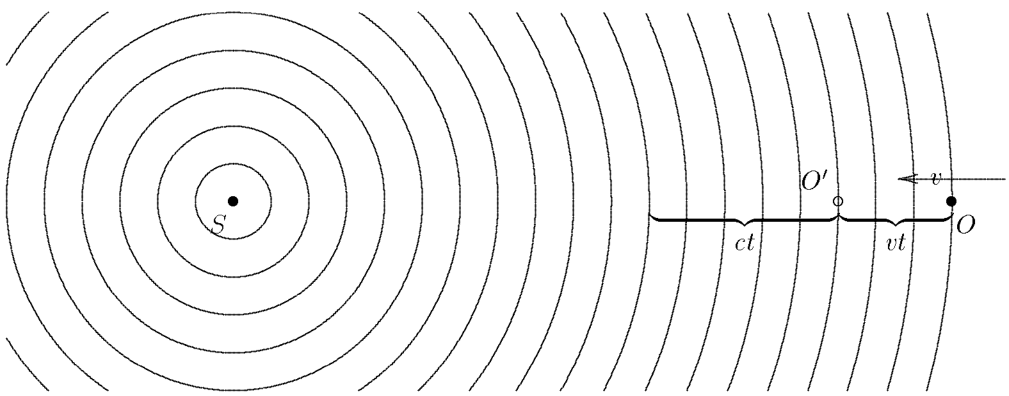

Figure 6.1 Les cercles sont séparés de λ. La source est immobile. Pendant l'intervalle t l'observateur O aura avancé vers la gauche de vt et sera arrivé à la position O'. Pendant ce temps, tous les cercles auront avancé de ct.

Dans la figure 6.1 nous avons représenté les ondes par des cercles séparés de λ (vous pouvez imaginer que chaque cercle correspond au sommet d'une vague). Pour mesurer la fréquence apparente, l'observateur va compter le nombre de sommets n qu'il voit passer pendant un intervalle de temps t. La fréquence apparente sera, évidemment $f_a = \frac{n}{t}$. Si l'observateur était immobile, pendant un temps t il verrait passer autant de sommets que la distance ct contient de longueurs d'onde; c'est-à-dire $n_1 = \frac{ct}{\lambda}$. Dans la figure cela correspond au nombre de cercles qui coupent l'accolade de gauche. Mais comme pendant ce temps l'observateur s'est déplacé à gauche de vt il

([1]) Christian Johan Doppler (1803-1853). Autrichien.

([2]) Notez qu'ici c est la vitesse du son et non celle de la lumière.

comptera aussi les sommets contenus dans cet intervalle. Dans la figure cela correspond aux cercles qui coupent l'accolade de droite. Ce nombre sera $n_2 = \frac{vt}{\lambda}$.

Le nombre total que l'observateur aura compté sera:

$$n = \frac{ct}{\lambda} + \frac{vt}{\lambda}$$

et comme $\frac{1}{\lambda} = \frac{f_o}{c}$, la fréquence apparente f_a mesurée par l'observateur sera:

$$f_a = \frac{n}{t} = \frac{c}{\lambda} + \frac{v}{\lambda}$$

et

$$f_a = f_o\left(1 + \frac{v}{c}\right) \qquad 6.1$$

v est la vitesse d'approche de l'observateur à la cible. Si l'observateur s'éloigne v sera négative. Si la vitesse de l'observateur n'est pas radiale (par rapport à la cible), seule comptera la composante radiale de sa vitesse.

Le second cas correspond à l'observateur immobile et la source en mouvement.

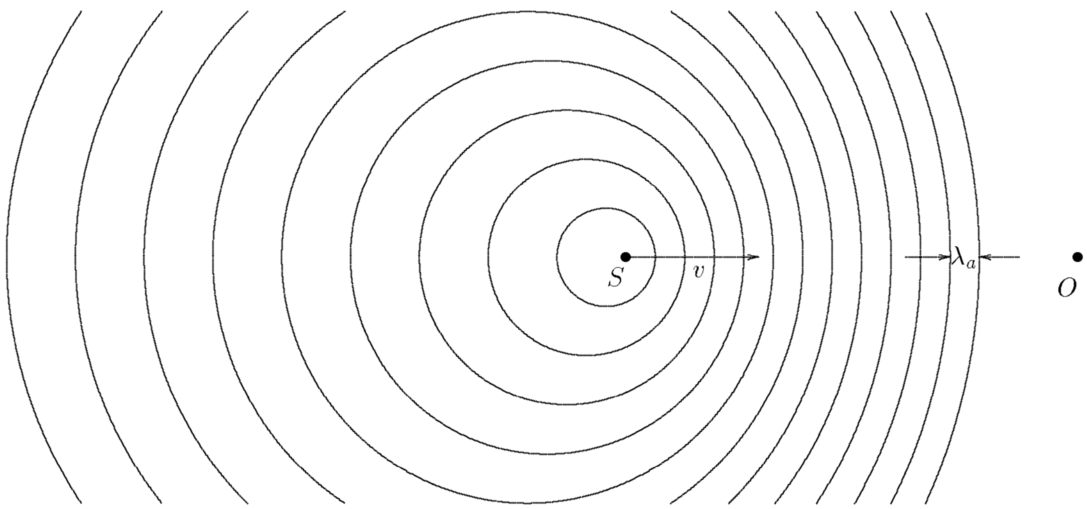

Figure 6.2 La source avance à vitesse v vers l'observateur. Pendant une période T le front d'onde avance de cT et la source avance de vT. La longueur d'onde apparente est de cT - vT.

Comme précédemment, nous avons représenté, dans la figure 6.2, les ondes émises par la source par des cercles. Cette fois les cercles ne sont pas concentriques car pendant une période T la source avance vers la droite de vT (où v est la vitesse de la source vers l'observateur). De ce fait, comme les ondes se sont déplacées de cT (où c est la vitesse des ondes dans le milieu), la longueur d'onde apparente λ_a sera égale à

$$\lambda_a = cT - vT = (c - v)\frac{1}{f_o} = \frac{c}{f_o}\left(1 - \frac{v}{c}\right)$$

et comme $\lambda_a = \frac{c}{f_a}$:

$$f_a = \frac{f_o}{1 - \frac{v}{c}} \qquad 6.2$$

Les équations 6.1 et 6.2 ne sont applicables que pour des ondes qui se propagent dans un milieu. C'est le cas des ondes sonores ou des vagues dans la mer. Par contre ce n'est pas le cas des ondes électromagnétiques, qui se déplacent dans le vide et dont la vitesse est indépendante du référentiel (dixit Einstein). Pour des vitesses faibles comparées à la vitesse de la lumière ($3\,10^8 m/s$), les deux formules sont équivalentes. Par contre pour des vitesses élevées il faut utiliser les corrections relativistes que nous n'étudierons pas:

$$f_a = f_o\frac{\sqrt{1 - v^2/c^2}}{1 - v/c}$$

Cette fois c est la vitesse de la lumière et v la vitesse d'approche entre la source et l'observateur, et ceci sans besoin de préciser qui s'approche de qui. De toutes façons, dans le cadre de la relativité, la question ne se pose pas.

Quand la source et l'observateur se déplacent on peut utiliser le produit des deux formules 6.1 et 6.2.

Le cas du radar à effet Doppler, comme celui utilisé par les gendarmes, est intéressant. Le radar émet une fréquence f_o. La voiture qui s'approche reçoit (et ré-émet) une fréquence f_1 donnée par

$$f_1 = f_o\left(1 + \frac{v}{c}\right)$$

Maintenant le récepteur des gendarmes voit une source de fréquence f_1 qui se rapproche à vitesse v. On utilise l'équation 6.2:

$$f_a = \frac{f_1}{1 - \frac{v}{c}} = f_o\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}}$$

Comme la vitesse des véhicules contrôlés par les gendarmes est souvent très inférieure à la vitesse de la lumière, on peut approcher le résultat par un développement limité:

$$f_a \simeq f_o\left(1 + 2\frac{v}{c}\right)$$

Le radar des gendarmes (l'ancien modèle) mesurait la différence entre f_a et f_o et calculait:

$$v = \frac{c\Delta f}{2f_o}$$

6.2 Vitesse de phase et vitesse de groupe.

Dans le chapitre 2 nous avions dit que la vitesse de propagation des ondes v était en réalité la **vitesse de phase** v_p.

$$v_p = \lambda f = \frac{2\pi f}{2\pi/\lambda} = \frac{\omega}{k} \qquad 6.3$$

où $k = 2\pi/\lambda$ est le nombre d'onde.

Dans certains milieux (et dans le vide absolu pour les ondes électromagnétiques), la vitesse de phase est indépendante de la fréquence. C'est ce que nous avions trouvé pour les ondes dans une corde (avec les approximations faites), dans une ligne électrique, et dans des milieux élastiques (à nouveau avec des approximations). Ce type de milieu, dans lequel la vitesse de phase ne dépend pas de la fréquence reçoit le nom de **milieu non-dispersif**.

Contrairement à ce que l'on pourrait souhaiter, les milieux de propagation non-dispersifs sont rares et les milieux les plus courants sont des **milieux dispersifs** dans lesquels la vitesse de phase dépend de la fréquence. C'est le cas des vagues dans l'eau, de la lumière dans la plupart des diélectriques. Le (presque) vide inter galactique est légèrement dispersif (parce que le vide n'est pas parfait).

Maintenant la question est: puisque chaque fréquence se déplace à des vitesses différentes, à quelle vitesse se déplace l'information? La réponse n'est pas immédiate car on ne peut transmettre d'information en utilisant une seule fréquence.

Une vraie sinusoïde ne transporte aucune information. Il ne faut pas confondre un morceau de sinusoïde avec une sinusoïde. Une vraie sinusoïde a débuté avec l'origine des temps (avant le Big Bang) et sera éternelle. Tout le reste n'est que des morceaux de sinusoïde. Vous pouvez transmettre une information, comme le "top" de midi, en démarrant ou arrêtant un générateur de sinusoïdes, mais ce que vous utilisez, dans ce cas, est un morceau de sinusoïde. Ce que vous créez est un signal composé de plusieurs sinusoïdes de fréquences différentes dont l'addition donne une