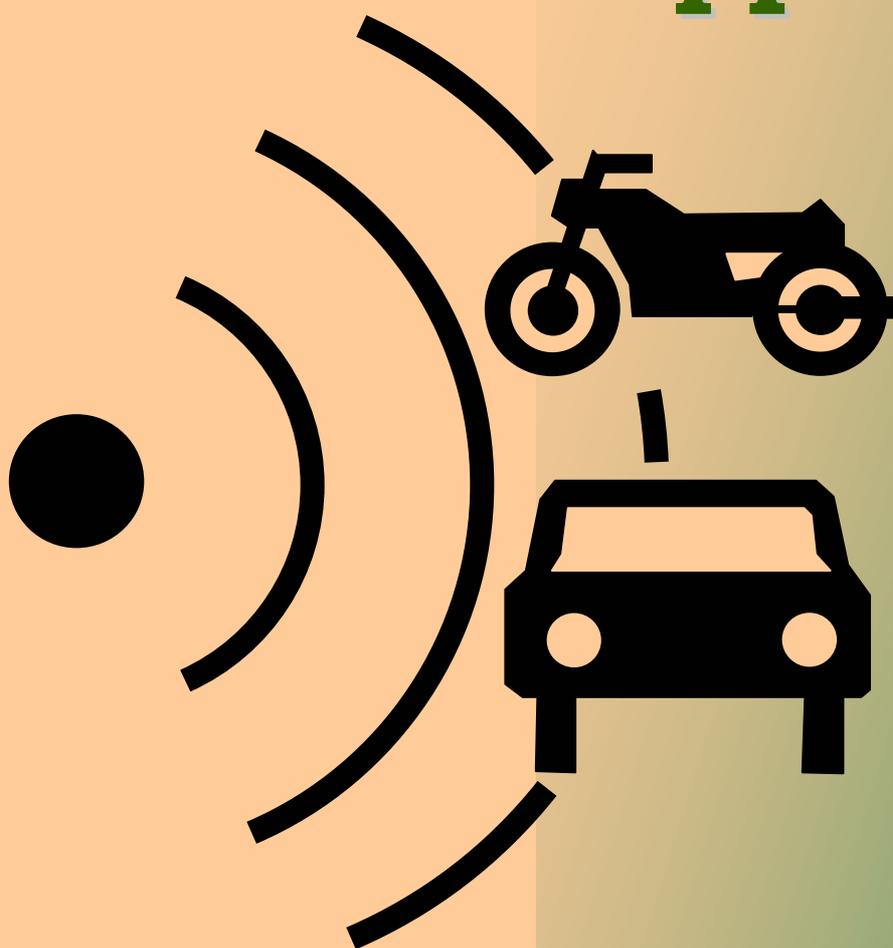


Dossier thématique n°5

Radars et effet Doppler



Auteur :
Jean-François RÉCOCHÉ

Dossier thématique

Sommaire n° 5

Quel rapport entre un contrôle routier de vitesse, un sauvetage en mer, la gestion d'un aéroport, un examen cardiologique ou une échographie, un bulletin météo et la théorie du big bang ?

Réponse : Un effet qui s'applique à tous types d'ondes (sonores et électromagnétiques principalement) et qui est à la base de nombreuses réalisations :

L'effet Doppler.

<i>1 – L'effet Doppler.</i>	P.3
<i>2 – Les ondes.</i>	P.4
<i>3 – Emetteur mobile Récepteur immobile.</i>	P.4
<i>4 – En résumé.</i>	P.7
<i>5 – Autres cas.</i>	P.6
<i>6 – Vive les math !</i>	P.10
<i>7 – Les ondes électromagnétiques.</i>	P.10
<i>8– Le radar.</i>	P.11
<i>9 – Quelques applications.</i>	P.14

1 – L'EFFET DOPPLER.

Qui n'a pas vécu l'expérience classique où, placé en observateur en bord de route, on perçoit un son de fréquence supérieure à la fréquence du son émis par la sirène du camion,

lorsque celui-ci s'approche, fréquence qui s'abaisse brusquement au moment du croisement, prenant alors une valeur inférieure, alors que le camion s'éloigne.



Ces constatations sont très nettement accentuées lorsqu'il s'agit par exemple de 2 trains se croisant à grande vitesse, l'un utilisant un avertisseur.



*Si une onde acoustique est émise à une certaine fréquence, lorsque la distance entre l'émetteur et le récepteur varie en fonction du temps, la fréquence de l'onde semble varier. Ce phénomène physique est connu sous le nom d'**effet Doppler**.*

C'est en 1842 que Doppler publie son article sur le comportement des ondes. Indépendamment, mais ultérieurement, Fizeau découvre aussi ce phénomène et l'applique aussi à la lumière. C'est pourquoi on parle d'effet Doppler-Fizeau lorsqu'on parle d'ondes lumineuses.



Christian Andreas Doppler
(1803/1853)
Mathématicien et physicien
autrichien.

Plusieurs cas peuvent être envisagés :

- Emetteur et observateur tous deux en mouvement.
- Emetteur en mouvement et observateur immobile.
- Emetteur immobile et observateur en mouvement.

Dans chaque cas il peut être envisagé que l'émetteur et l'observateur s'éloignent ou se rapprochent l'un de l'autre.

Nous limiterons notre étude à un (ou des) déplacement(s) sur une même droite avec des vitesses constantes.

2 – LES ONDES.

Lançons un caillou dans l'eau. On voit alors de petites vagues partir du point de chute du caillou et dessiner des cercles de plus en plus grands.

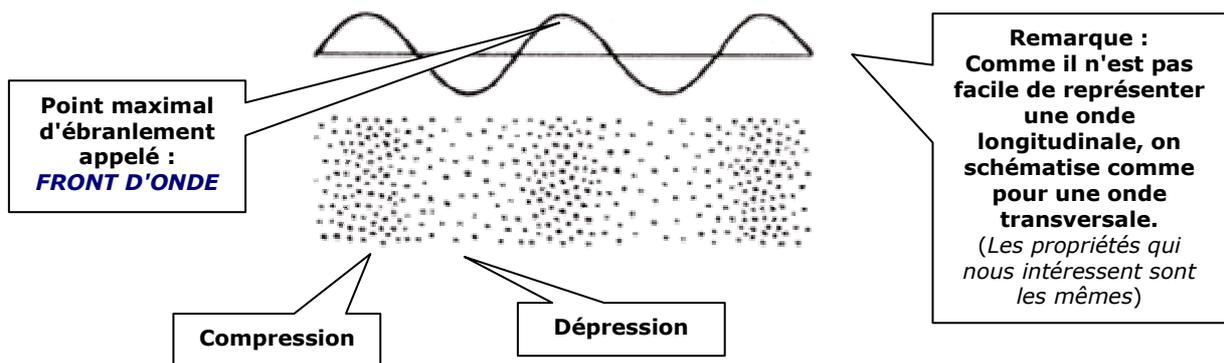
Dans l'air (milieu élastique et homogène), un son se propage via la modification de la pression des couches d'air (voir schéma ci-dessous)

Une onde est la propagation d'un ébranlement.

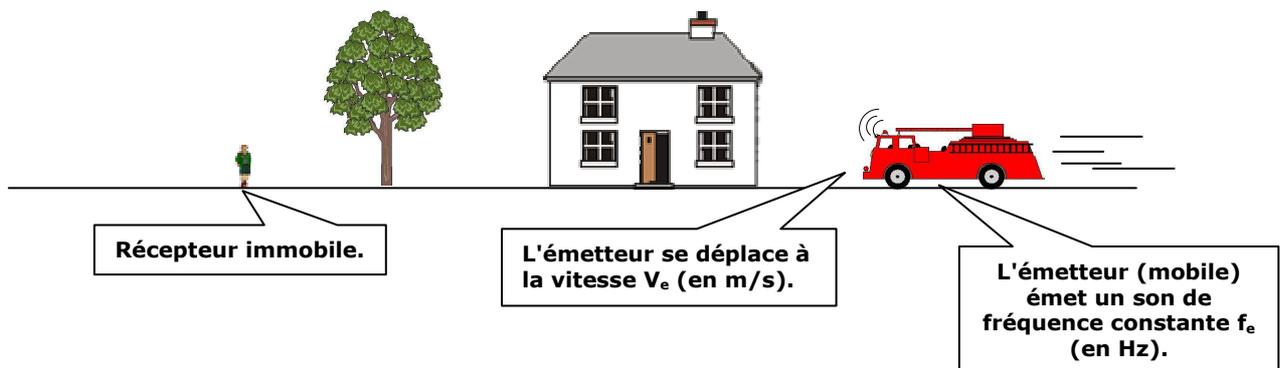
Dans le cas du caillou il s'agit d'une **onde transversale** (déformation dans la direction perpendiculaire au déplacement)

Dans le cas du son, c'est une **onde longitudinale** (déformation dans la direction du déplacement)

Dans les deux cas il n'y pas de déplacement longitudinal de matière: le bouchon posé sur l'eau monte puis redescend, et personne ne peut prétendre être décoiffé par un son malgré l'expression, erronée donc, "wouaw!... ce groupe a un son qui décoiffe !! "



3 – ÉMETTEUR MOBILE – RÉCEPTEUR IMMOBILE.



Appelons c la vitesse du son (en m/s).

Pendant une période, temps T_e ($T_e = 1/f_e$, T_e en s), le premier front d'onde a parcouru la distance d_f (en m) telle que $d_f = c \cdot T_e$

Pendant ce temps là l'émetteur c'est déplacée de la distance d_e telle que $d_e = V_e.T_e$

Pour notre oreille l'intervalle de temps entre deux fronts d'onde est inférieur à l'intervalle réel lors de l'émission, le deuxième front d'onde ayant moins de distance à parcourir.

Le deuxième front d'onde est espacé du premier de :

$$d = d_f - d_e = c.T_e - V_e.T_e = (c - V_e).T_e$$

Il en est de même pour les fronts d'onde suivants.

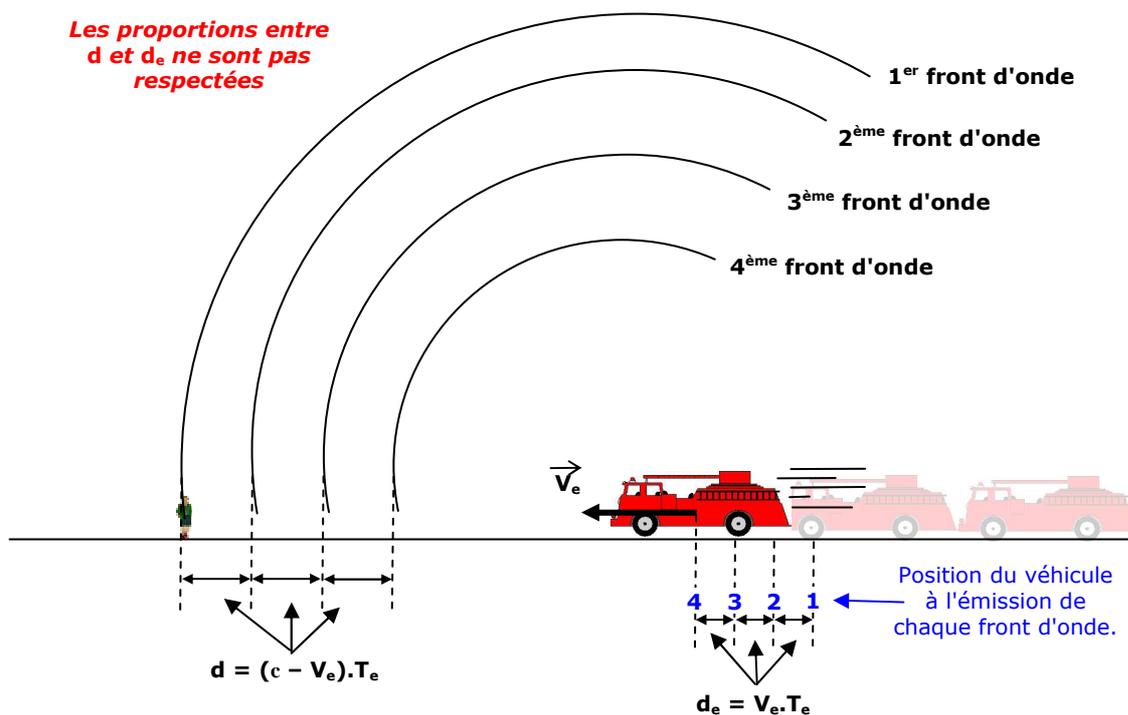
Chaque front d'onde ayant une vitesse c , il mettra pour parcourir cette distance et atteindre à son tour l'émetteur un temps T :

$$T = \frac{d}{c} = \frac{(c - V_e).T_e}{c} \text{ soit } T = \frac{(c - V_e)}{c} . T_e$$

Le son perçu par le récepteur a donc une fréquence apparente d'expression :

$$f = \frac{c}{c - V_e} . f_e$$

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



En 1848, le père de la météorologie B.BALLOT place une dizaine de trompettistes sur un train et leur demande de tous jouer la même note. Il place un autre groupe de musiciens professionnels sur le bord de la

voie. Au passage du train, aucun des observateurs n'est capable de reconnaître la note jouée. La preuve est faite ! L'effet Doppler modifie la perception de la fréquence d'un son.

Exemple :

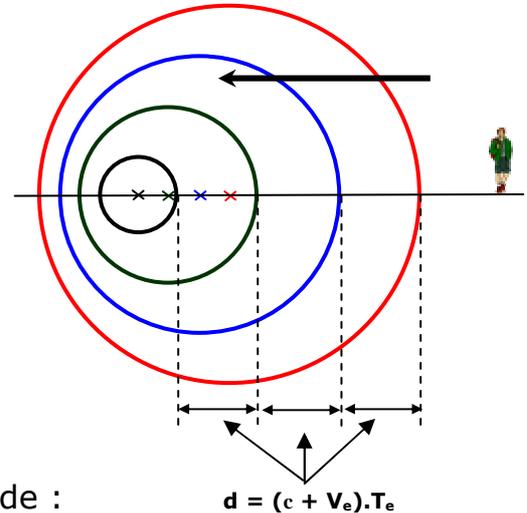
Soit $c = 340$ m/s ; vitesse du véhicule $V_e = 25$ m/s (90 km/h) ; fréquence de la sirène 400 Hz.

Un observateur immobile voyant approcher un camion de pompier entendra la sirène à une fréquence

$$f = \frac{340}{(340 - 25)} \cdot 400 = 431,75 \quad f \approx 432 \text{ Hz}$$

Et lorsque le camion s'éloigne ?

Le schéma simplifié ci-contre permet de répondre à la question : Lorsque l'émetteur aura dépassé le récepteur, les fronts d'onde ont de plus en plus de distance à parcourir pour atteindre le récepteur. L'intervalle de temps entre deux fronts d'onde à la réception est maintenant supérieur à l'intervalle réel lors de l'émission.



Chaque front d'onde est espacé du précédent de :

$$d = d_f + d_e = c \cdot T_e + V_e \cdot T_e = (c + V_e) \cdot T_e$$

Le son perçu par le récepteur a donc une fréquence apparente d'expression :

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

$\frac{c}{c + V_e} < 1$ donc $f < f_e$. L'observateur perçoit un son plus grave.

Reprenons notre exemple :

$c = 340$ m/s ; $V_e = 25$ m/s (90 km/h) ; $f_e = 400$ Hz.

L'observateur immobile voyant s'éloigner le camion, entendra la sirène à une fréquence

$$f = \frac{340}{(340 + 25)} \cdot 400 = 372,6 \quad f \approx 373 \text{ Hz}$$

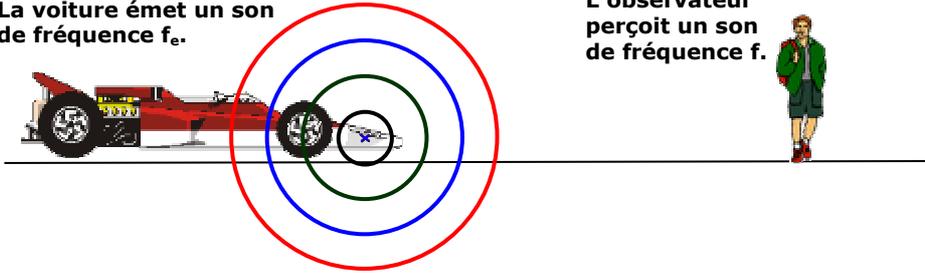
A noter que l'écart n'est pas "symétrique" : gain de 32 Hz à l'approche, perte de 27 Hz à l'éloignement.

Remarque importante : Les élèves peuvent exprimer leur étonnement au fait que la fréquence apparente est la même tout au long de l'approche, change brusquement au croisement puis reste constante tout au long de l'éloignement. Ils sont persuadés que plus le camion

approche plus le son est aigu. Cette sensation auditive n'est pas fautive. Elle peut être illustrée avec un GBF et un haut-parleur : A fréquence constante lorsqu'on augmente l'amplitude (le volume) le son semble plus aigu. Ce n'est qu'une sensation.

4 – EN RÉSUMÉ.

La voiture émet un son de fréquence f_e .

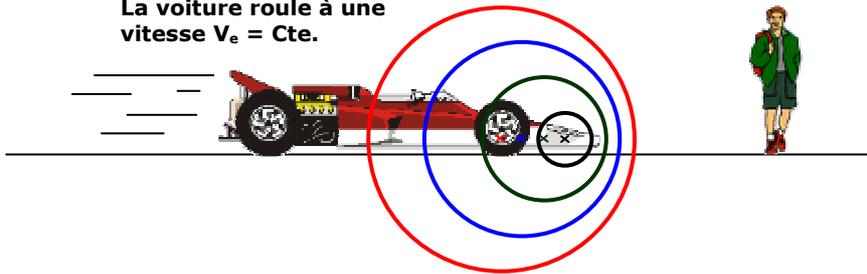


L'observateur perçoit un son de fréquence f .

La voiture est à l'arrêt.

$$f = f_e$$

La voiture roule à une vitesse $V_e = \text{Cte}$.

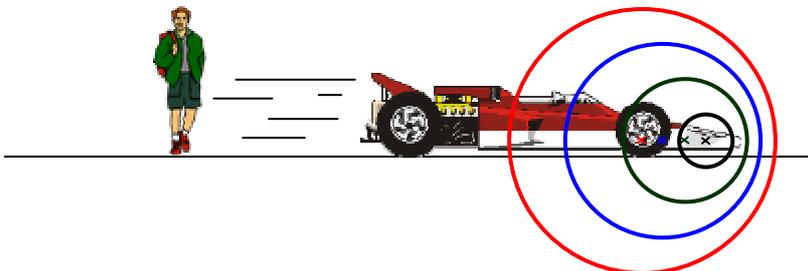


La voiture approche de l'observateur immobile.

- Les fronts d'onde sont "resserrés".
- $f > f_e$
- Le son est perçu plus aigu.

$$f = \frac{c}{c - V_e} \cdot f_e$$

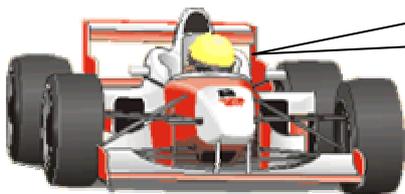
c : vitesse du son



La voiture s'éloigne de l'observateur immobile.

- Les fronts d'onde sont "plus écartés".
- $f < f_e$
- Le son est perçu plus grave.

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



Maintenant vous avez compris pourquoi quand je passe devant vous ça fait

"miaaaaaaooooowwww..."

5 – AUTRES CAS.

Emetteur immobile et récepteur en mouvement.

Pour l'étude de ce cas nous allons raisonner (mais pas résonner bien qu'on soit dans des histoires de son) d'une manière différente.

Gardons la notation du cas précédent :

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 :

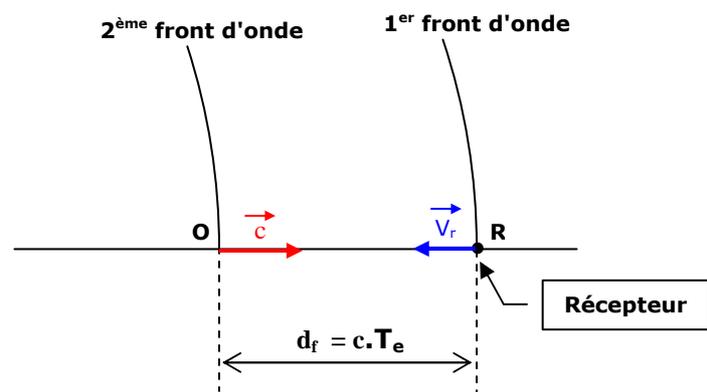
$$d_f = c \cdot T_e$$

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.

Rompue(e) à toutes ces cogitations, vous devinez la suite :

Si le récepteur s'éloigne de l'émetteur immobile, la fréquence apparente est :

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

$\frac{c - V_r}{c} < 1$ donc $f < f_e$. L'observateur perçoit un son plus grave.

Un exemple pour illustrer :

Une alarme incendie émet un son à une fréquence de 1 kHz. Une voiture de pompier s'en approche à une

vitesse de 90 km/h. Quelle est la fréquence perçue par les pompiers ?

$$f = \frac{340 + 25}{340} \cdot 1000 = 1\,073,5 \quad f \approx 1074 \text{ Hz}$$

Si la voiture s'éloigne de la sirène :

$$f = \frac{340 - 25}{340} \cdot 1000 = 926,47 \quad f \approx 926 \text{ Hz}$$



Bon ben 2 paracétamols ... et on s'occupe du dernier cas !!

Emetteur et récepteur en mouvement.

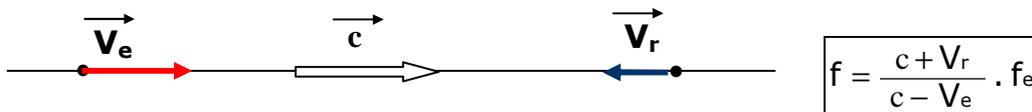
Les résultats précédents permettent de calculer l'effet Doppler lorsque

émetteur et récepteur se déplacent simultanément.

Mais, car il y a un mais, deux situations sont à envisager :

- Emetteur et récepteur se déplacent en sens inverse.

A la rencontre l'un de l'autre :

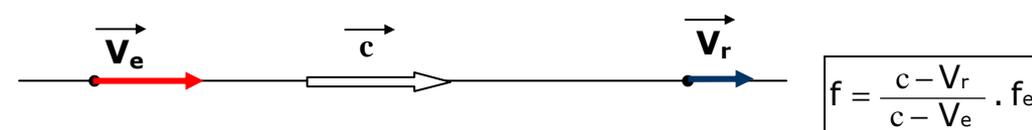


Après le croisement :



- Emetteur et récepteur se déplacent dans le même sens.

Avant le dépassement :



Après le dépassement :



6 – VIVE LES MATH !

Voilà ! huit formules !

C'est là que le physicien est content d'être copain avec un matheux, qui lui, va transformer ces huit formules en une seule, oui m'ssieurs dames, en prononçant le mot magique : "Algèbre".

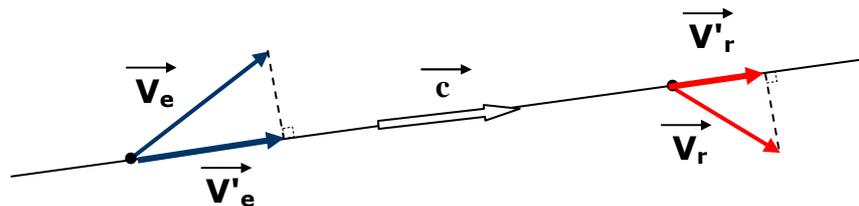


Fixons comme sens positif, le sens de la propagation du son. Considérons V_r et V_e comme des valeurs algébriques (c de par la convention a toujours une valeur positive).

Tout ne se résume plus qu'à une seule formule : $f = \frac{c - V_r}{c - V_e} \cdot f_e$

Remarques :

- Dans tous les cas : le son perçu est plus aigu lorsque émetteur et récepteur se rapprochent, et il est plus grave lorsqu'ils s'éloignent l'un de l'autre.
- Si émetteur et récepteur ne se déplacent pas sur la même droite la relation reste valable pour les normes V'_e et V'_r des composantes algébriques des vitesses (voir schéma).

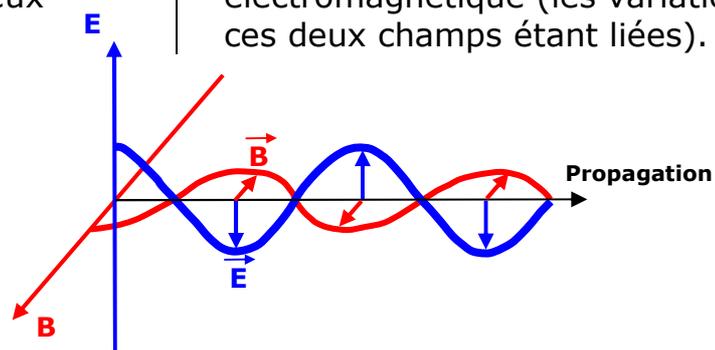


Cette deuxième remarque va être essentielle dans la suite de notre dossier.

7 – LES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES.

Un champ électromagnétique est la combinaison de deux composantes : un champ électrique \vec{E} et un champ magnétique \vec{B} oscillant dans des plans perpendiculaires. La propagation couplée de ces deux

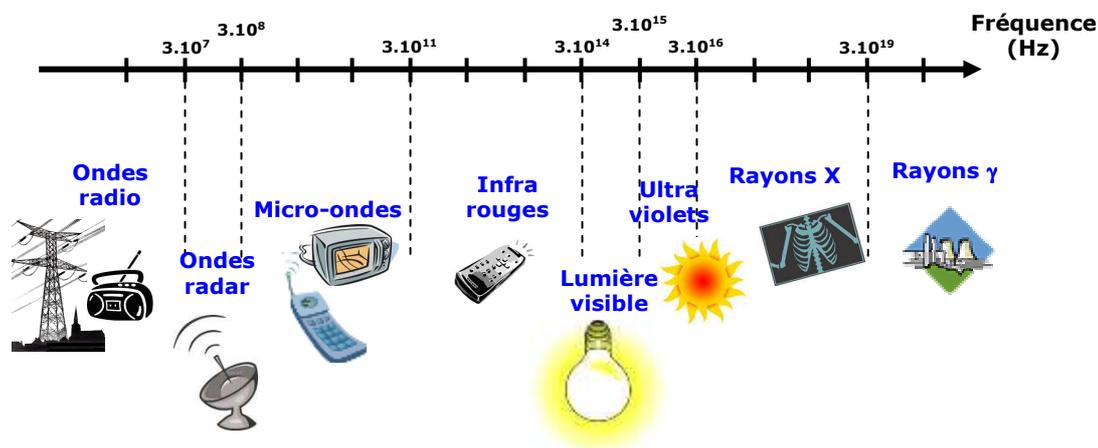
champs est appelée onde électromagnétique (OEM). Ce sont les variations du champ électrique qui servent en général à représenter une onde électromagnétique (les variations de ces deux champs étant liées).



La vitesse de propagation des ondes est aussi la célérité de la lumière : $c = 3.10^5$ km/h soit 3.10^8 m/s (299 792 458 m/s dans le vide pour être précis !).

En effet, ce que nous appelons communément "la lumière" n'est que

la partie visible du spectre de la décomposition d'un rayonnement électromagnétique (en fonction de la fréquence dans le schéma ci-dessous).



Au contraire des ondes sonores, les OEM n'ont pas besoin de support pour se propager.

8 – LE RADAR.

La première partie du dossier a utilisé comme support les ondes acoustiques, mais l'effet Doppler est aussi applicable aux ondes électromagnétiques (ondes radio et lumineuses entre autres). L'effet Doppler est ainsi mis à profit pour mesurer les vitesses radiales de multiples objets, à toutes les échelles dans l'Univers.

Le mot radar est un acronyme (sigle prononcé comme un mot normal) dont les lettres signifient : **RA**dio

Detection **A**nd **R**anging qui peut se traduire par "détection et estimation de la distance par ondes radio".

L'antenne diffuse vers une cible potentielle l'onde électromagnétique produite par un émetteur. Réfléchi par la cible, captée par l'antenne (qui joue donc un double rôle), cette onde est transmise au récepteur. Le changement de fréquence du signal par effet Doppler, permet de mesurer vitesse et position de la cible.



Radar fixe 2^{ème} génération

Avant d'aborder quelques utilisations (liste non exhaustive) voyons en détail le fonctionnement des radars routiers.



Mesta 208

..... Mesta (dont le 206, l'ancestral "barbecue"), Multanova, Cerva, Magda, sont quelques exemples des différents modèles utilisés en poste fixe ou embarqué. Le radar de contrôle routier émet une onde continue (d'autres radars émettent eux des impulsions) et mesure la différence de fréquence

entre l'onde émise et l'onde réfléchi par la cible, afin de calculer la vitesse de cette cible à l'aide des formules vues précédemment. L'onde réfléchi a une plus grande fréquence lorsque le véhicule s'approche du radar et une plus petite fréquence si le véhicule s'en éloigne.

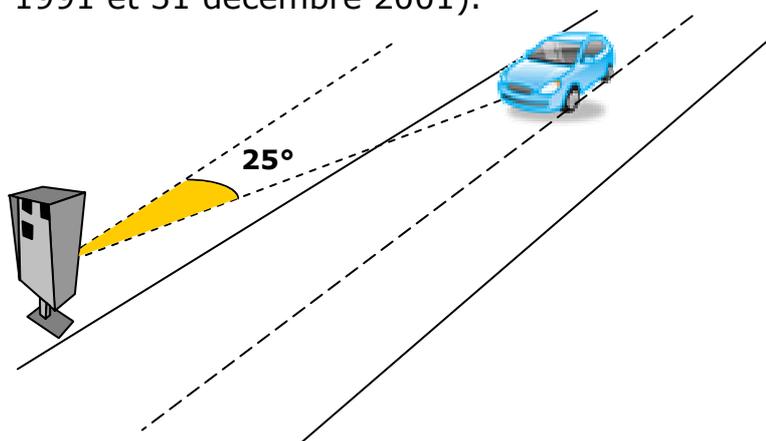
Les longueurs d'onde utilisées sont celles des bandes K ou Ka (Les désignations des différentes bandes proviennent des codes utilisés durant la seconde guerre mondiale).

K (18 – 27 GHz) pour les radars routiers manuels (24,150 GHz \pm 0,1 GHz)

Ka (27 – 40 GHz) pour les radars routiers automatisés (34,3 GHz \pm 0,1 GHz)



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).



Rappelons la formule de la page 10 : $f = \frac{c-v}{c-v_e} \cdot f_e$

Avec v_e et v vitesse du récepteur (ici le véhicule)

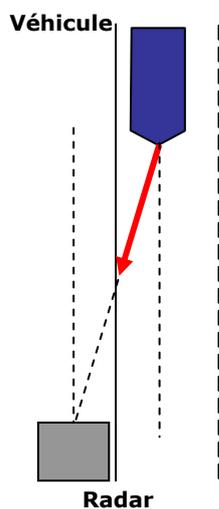
Dans le cas étudié, la vitesse de l'émetteur v_e (ici le radar) est $v_e = 0$.

On obtient donc $f = \frac{c-v}{c} \cdot f_e$

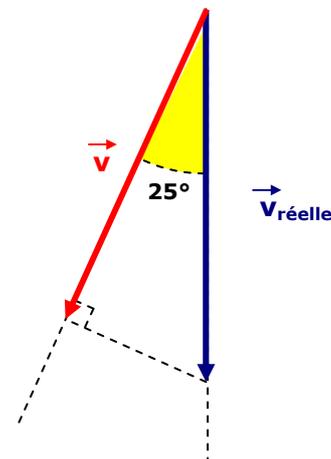
Ce qui, après transformation donne : $v = \frac{c(f_e - f)}{f}$

Mais, attention, cette formule doit être corrigée :

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



⇒ 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 $\Delta f = |f_e - f|$

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

Exemples :

Un véhicule circulant en agglomération (vitesse limitée à 50km/h) est contrôlé par un radar Doppler de la gendarmerie de type Mesta 208 ($f_e = 24,125$ GHz). Au passage du véhicule la variation de fréquence enregistrée est $\Delta f = 2\,500$ Hz.

L'angle de visée α est tel que $\alpha = 25^\circ$.

Ce véhicule est-il en infraction ?



Un radar Doppler OEM de fréquence $F = 21$ GHz, placé sur le central de Roland Garos enregistre une variation de fréquence $\Delta F = 7,5$ kHz lors d'un service de Jo-Wilfried Tsonga.

L'angle de visée Doppler α est de 20° .

Quelle est la vitesse de la balle de Tsonga ?

9 – QUELQUES APPLICATIONS.

L'échographie Doppler.

La différence des fréquences d'émission et de réception des ultrasons renvoyés par les éléments du sang permet de calculer la vitesse et la direction des globules rouges.



Le sonar



L'homme essaie tant bien que mal de copier le sonar biologique parfait qui équipe les cétacés. Le dauphin est capable d'émettre ou de réceptionner des sons ou ultrasons pour "parler" ou repérer et situer d'éventuelles cibles.

La chauve-souris dispose d'un système d'écholocation identique dans le principe à celui du dauphin, à la différence près que celui-ci fonctionne dans l'air et non en mer.

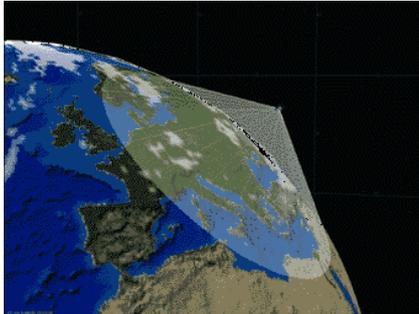


Acronyme de **s**ound **n**avigation **a**nd **r**anging, le sonar est utilisé par les marines de guerre, pour la pêche, pour la navigation maritime et fluviale. Les sonars peuvent être actifs (émission d'un son et écoute de son écho) ou passifs (écoute des bruits).



La localisation Doppler

Le décalage de fréquence entre la fréquence émise par la balise et la fréquence reçue par le satellite permet de localiser l'émetteur. Quand le satellite est à la verticale de la balise, la fréquence du signal reçu est égale à la fréquence du signal



émis. C'est le point TCA (**T**ime of **C**losest **A**pproach)
En fonction du nombre de "messages" reçus, la précision de la localisation change. Elle peut varier de moins de 150 mètres à environ 15 kilomètres !

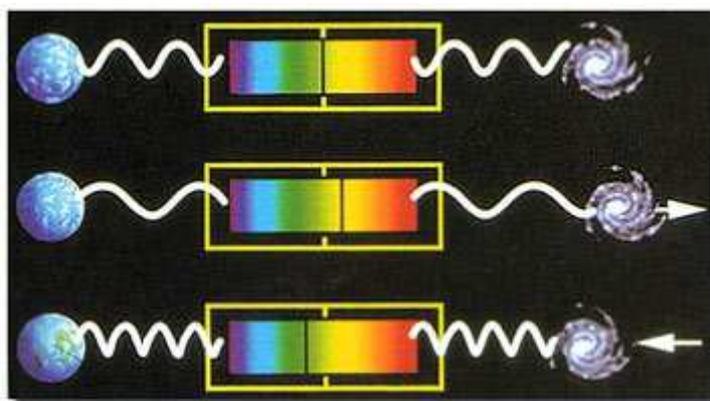


L'astronomie

L'effet Doppler permet de déterminer directement la vitesse d'approche ou d'éloignement des objets célestes (étoiles, galaxies, nuages de gaz, etc.).

Une source en mouvement (une étoile par exemple) émet des ondes qui se modifient (ce décalage apparaît dans les raies du spectre). Plus la source va vite par rapport à l'observateur, plus ce décalage sera important. Pour des objets très rapides comme les galaxies ou les

quasars, les décalages sont particulièrement importants. Pour simplifier la compréhension, disons que quand la source s'approche de l'observateur, les raies sont décalées vers le bleu ; quand la source s'en éloigne, elles sont décalées vers le rouge. C'est ce décalage quasiment systématique de la lumière des galaxies vers le rouge qui a démontré que l'univers était en expansion (Loi de Hubble).



www.harunyahya.fr

La météorologie

Le principe d'un radar météorologique est d'émettre un faisceau d'ondes électromagnétiques dans l'atmosphère. Ces ondes sont réfléchies par tous les obstacles qu'elles rencontrent (pluie, neige, grêle, montagnes ...)

Le radar capte ces ondes réfléchies et évalue leur densité et la distance à laquelle elles se trouvent. Plus une perturbation atmosphérique est intense, plus l'espace entre les gouttelettes d'eau est réduit et plus la quantité d'ondes réfléchies est importante.

Le radar météorologique Doppler permet de plus, d'avoir une information sur la vitesse radiale de ces précipitations.



www.iutenligne.net

L'aviation



Le radar émet des suites d'impulsions d'ondes électromagnétiques représentant des messages d'interrogation. Les transpondeurs à bord des avions détectent ces interrogations, les décodent, et émettent à leur tour des suites d'impulsions d'ondes électromagnétiques représentant les réponses à chaque interrogation reçue. Les réponses des avions permettent de définir leur position.

Le GPS

Le GPS (Global Positioning System ou Géo Positionnement par Satellite) est un système de positionnement par satellites, capable de donner n'importe où sur le globe une position entre une centaine de mètres et quelques centimètres, de jour

comme de nuit.

La partie visible est un petit boîtier électronique (votre récepteur gps), qui quel que soit l'heure et le lieu, indique: l'endroit exact, l'altitude, la vitesse, l'heure, et ce avec rapidité et précision.



Le principe du positionnement GPS est très proche du principe de triangulation. Le GPS mesure la distance entre l'utilisateur et un certain nombre de satellites de positions connues grâce au temps qu'a mis chaque signal à parvenir jusqu'à lui. On définit ainsi des sphères centrées sur des satellites et dont l'intersection donne la position.