

# Effet Doppler

## Le phénomène physique - Applications

**Site du C.E.A.** : présentation élémentaire (son, ondes électromagnétiques dont lumière)  
<http://portail.cea.fr/multimedia/Pages/animations/physique-chimie/effet-doppler.aspx>

**Site de J.F Noblet** : explications dans le cas d'un récepteur immobile, vidéos et animations  
 Exemples variés :  
<http://www.jf-noblet.fr/doppler/intro1.htm> et <http://www.jf-noblet.fr/doppler/intro2.htm>  
 Exoplanètes :  
<http://www.jf-noblet.fr/doppler/tp2-1.htm> , <http://www.jf-noblet.fr/doppler/tp212.htm> et  
<http://www.jf-noblet.fr/doppler/tp213.htm>

### Résumé :

1/ Récepteurs fixes et  $V_E < c$  (vitesse de l'émetteur inférieure à la célérité de l'onde)

Émetteur fixe

Émetteur mobile

Les récepteurs fixes A et B perçoivent  $\lambda_A$  et  $\lambda_B$  tels que :  $\lambda_A < \lambda < \lambda_B$

Effet Doppler: vitesse de la source < célérité de l'onde

Signal au point A: [Image of compressed wave]

Signal au point B: [Image of stretched wave]

Applet : <http://ww2.cnam.fr/physique//DOCUMENTS/LABO/doppler.htm>

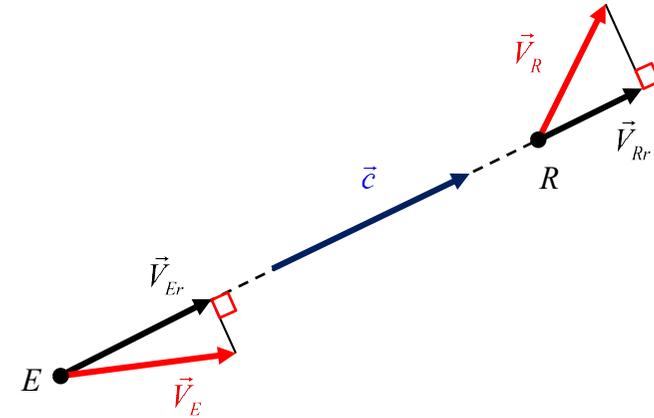
2/ Récepteurs fixes et  $V_E$  quelconque (applets) : [http://en.wikipedia.org/wiki/Doppler\\_effect](http://en.wikipedia.org/wiki/Doppler_effect)

### Effet Doppler avec un mobile

La mise en évidence de l'effet Doppler est très facile à mettre en œuvre avec un mobile.

## Effet Doppler en physique classique (non relativiste)

**Formule algébrique** valable dans tous les cas de figure (référentiel terrestre) :



$E$  = émetteur et  $R$  = Récepteur.

La fréquence émise par l'émetteur et la fréquence perçue par le récepteur sont liées aux vitesses radiales (projections algébriques des vitesses sur la droite  $(E,R)$ ) par :

$$f_R = \frac{c - V_{Rr}}{c - V_{Er}} f_E \quad (\text{cas non relativiste})$$

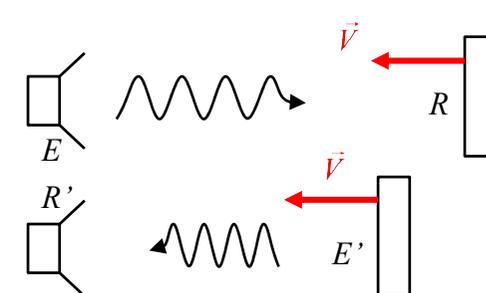
Bien noter que  $V_{Rr}$  et  $V_{Er}$  sont **algébriques** (i.e. positifs ou négatifs).

### Cas particuliers :

- ✓ Émetteur fixe / récepteur mobile :
- ✓ Émetteur mobile / récepteur fixe :

### Principe du radar à effet Doppler

Cas du radar : émetteur fixe et onde réfléchié par un objet mobile.



Cas d'un mobile à l'approche avec  $V \ll c$

Relation entre fréquence reçue par le récepteur et vitesse de l'obstacle ? Démontrer que :

$$\delta f = \frac{f_{R'} - f_E}{f_E} \approx 2 \frac{V}{c}$$

## Effet Doppler - Éléments théoriques

Les démonstrations dans chacun des deux cas particuliers précédents sont simples. Il existe plusieurs démonstrations dans le cas général (utilisations de « bips », formalisme des ondes...).

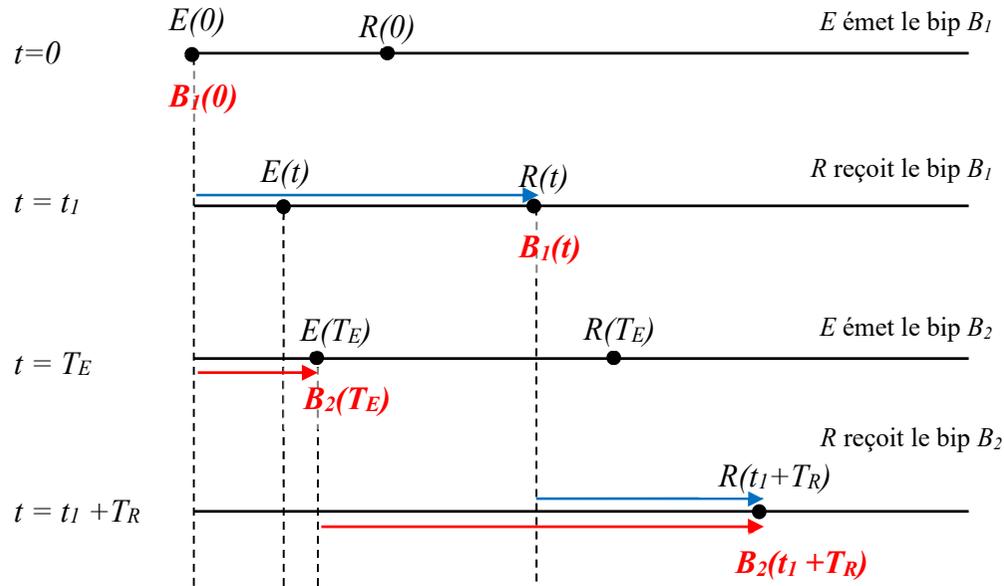
### 1/ Démonstration à l'aide de « bips » - D'après concours

Des « bips » sont émis par l'émetteur (en mouvement uniforme) à intervalles réguliers  $T_E$ , un récepteur (également en mouvement uniforme) reçoit ces « bips » à intervalles réguliers  $T_R$ .

On cherche la relation entre ces deux périodes (pour en déduire la relation entre les fréquences correspondantes).

On note  $v_E$ ,  $v_R$  et  $c$  les vitesses de l'émetteur, du récepteur et du son par rapport au référentiel terrestre.

Cette démonstration repose sur le schéma suivant :



Établir une relation entre les différentes distances repérées sur le schéma ci-dessus (en bleu et en rouge) puis exprimer cette relation à l'aide des vitesses et des temps indiqués sur le schéma.

En déduire la relation entre les fréquences émises et reçues.

### 2/ Démonstration dans le cadre ondulatoire – D'après concours

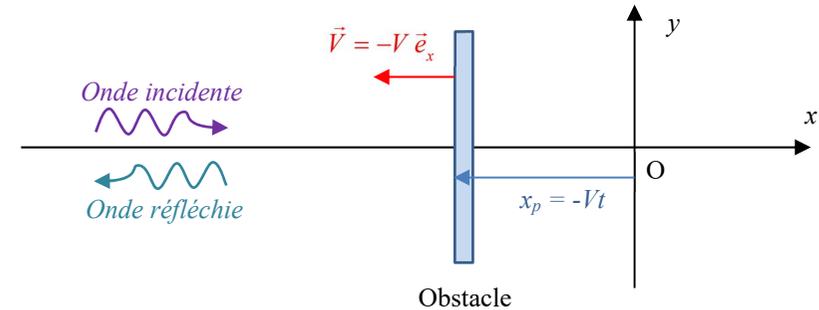
On étudie la réflexion d'une onde ultrasonore sur un obstacle (ou paroi) assimilé à une interface plane, imperméable, perpendiculaire à la direction de propagation.

L'obstacle se déplace en direction de l'émetteur à vitesse constante  $\vec{V} = -V\vec{e}_x$ .

On place l'origine du repère à la position initiale de l'obstacle, la position de ce dernier est donc :  $x_p(t) = -Vt$ .

On admet qu'il n'y a pas d'onde transmise.

On néglige l'effet de l'écoulement de l'air engendré par le déplacement de la paroi, c'est-à-dire que l'on considère que les ondes incidentes et réfléchies se propagent **comme si l'air était au repos y compris au voisinage de la plaque**.



Réflexion sur une interface plane mobile

On considère le cas d'ondes planes progressives, harmoniques se propageant suivant l'axe  $(O, \vec{e}_x)$  à la célérité  $c$ .

On adopte la notation complexe pour les surpressions instantanées et pour les vitesses instantanées.

On a donc pour l'onde incidente :

- $p_i(x, t) = p_{i0} \exp[j(\omega_0 t - k_i x)]$
- $\vec{v}_i(x, t) = \underline{v}_i(x, t) \vec{e}_x = v_{i0} \exp[j(\omega_0 t - k_i x)] \vec{e}_x$  ;

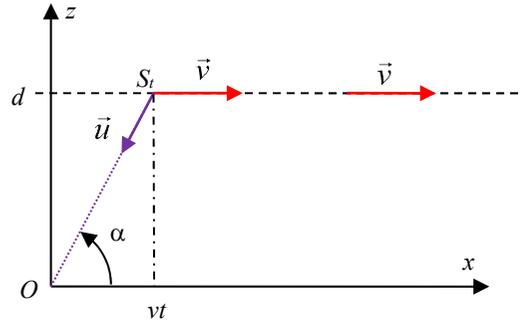
Et pour l'onde réfléchie :

- $p_r(x, t) = p_{r0} \exp[j(\omega_r t + k_r x)]$
- $\vec{v}_r(x, t) = \underline{v}_r(x, t) \vec{e}_x = v_{r0} \exp[j(\omega_r t + k_r x)] \vec{e}_x$ .

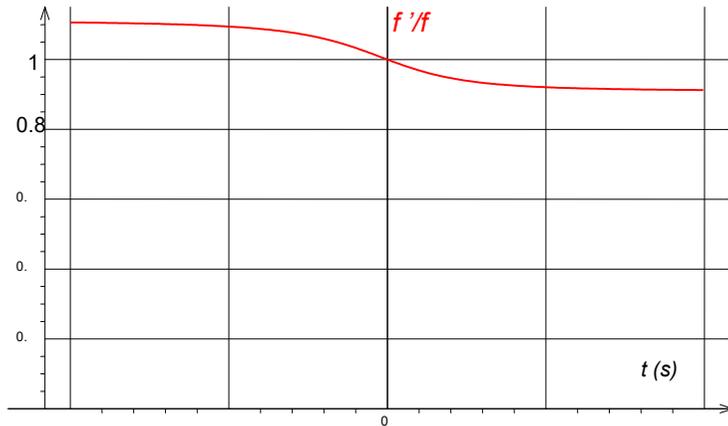
- ✓ Sachant que les vitesses instantanées incidentes  $\vec{v}_i(x, t)$  et réfléchies  $\vec{v}_r(x, t)$  vérifient l'équation de d'Alembert (à une dimension), déterminer la relation reliant  $\omega_0$  et  $k_i$  ainsi que celle reliant  $\omega_r$  et  $k_r$ .
- ✓ En considérant qu'au voisinage de l'obstacle d'abscisse  $x_p = -Vt$  la vitesse de la particule de fluide suivant l'axe  $(O, \vec{e}_x)$  est nulle dans le référentiel du laboratoire, déterminer la relation entre  $\omega_0, \omega_r, k_i, k_r$  et  $V$ .
- ✓ En déduire la pulsation  $\omega_r$  de l'onde reçue par le récepteur à ultrasons, après réflexion de l'onde sonore émise à la pulsation  $\omega_0$  sur un obstacle mobile à la vitesse  $V$ .

### 3/ Démonstration géométrique dans le cas d'un récepteur fixe - Exercice

Une source  $S$  d'ondes sonores de période  $T$  est en mouvement rectiligne uniforme à vitesse  $\vec{v}$  dans l'air où la célérité du son vaut  $c$  par rapport à un observateur fixe en  $O$ . Le mouvement de  $S$  est tel que les coordonnées de  $S$  sont  $x_S = vt$ ,  $y_S = 0$ ,  $z_S = d$  avec  $v$  et  $d$  constantes.



1. Montrer que la différence  $dt'$  des dates d'arrivée en  $O$  des ondes émises par  $S$  aux instants  $t$  et  $t + dt$  vaut à l'ordre 1 en  $dt$  :  $dt' = dt \left( 1 - \frac{\vec{u} \cdot \vec{v}}{c} \right)$  où  $\vec{u} = \frac{\vec{SO}}{SO}$ .
2. La source  $S$  est subsonique ( $v < c$ ) et son déplacement  $vT$  pendant une période est très faible devant  $OS$ . Exprimer la fréquence  $f'$  perçue par l'observateur en fonction de la fréquence émise  $f$  (effet Doppler).  
Interpréter l'évolution de  $f'$  au cours du temps (ci-dessous pour  $v/c = 0,1$ ).



3. À quelle condition sur le rapport  $v/c$  peut-on avoir  $dt'=0$  avec  $dt \neq 0$  ? Justifier dans ce cas la réception d'un son très puissant en  $O$ .