

# Effet Doppler

Une voiture de police est stationnée en bordure de l'autoroute et sa sirène de 1000 Hz fonctionne. Si vous êtes également stationné sur le bord de l'autoroute, vous entendrez cette même fréquence. Par contre, s'il y a un mouvement relatif entre vous et la voiture de police, que vous vous en approchiez ou que vous vous en éloigniez, vous entendrez une fréquence différente. Par exemple, si vous conduisez en vous rapprochant de la voiture de police à  $120 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , vous entendrez une fréquence plus élevée (1097 Hz).

Ces variations de fréquence reliées au mouvement relatif sont des exemples de l'effet Doppler. Cet effet a été démontré en 1842 par le physicien autrichien Johann Christian Doppler. Il a été vérifié expérimentalement en 1845 par Buys Ballot en Hollande à l'aide d'une locomotive tirant un wagon découvert sur lequel prenaient place plusieurs trompettistes. L'effet Doppler s'applique non seulement aux ondes sonores, mais aussi aux ondes électromagnétiques, qui incluent les micro-ondes, les ondes radio et la lumière visible.

## 1 Effet Doppler pour les ondes sonores

### 1.1 Formule de l'effet Doppler sonore pour un détecteur fixe et un émetteur mobile

On considère une source sonore  $S$  mobile à la vitesse  $\vec{v}_S$  qui émet des bips sonores à intervalle de temps régulier  $T_S$  comme indiqué figure (1). Un détecteur  $D$  se situe sur la trajectoire rectiligne de la source. Le son se propage à la vitesse  $c$ .

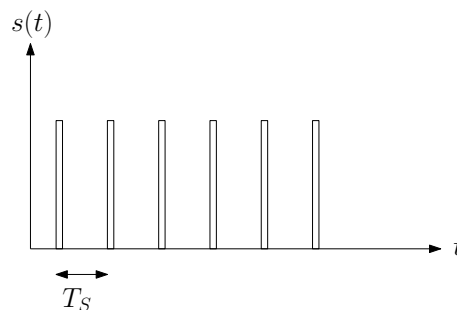


FIGURE 1 – Signal émis par la source

#### 1.1.1 Cas où la source se rapproche du détecteur à la vitesse $v_S$

La source  $S$  se rapproche du détecteur  $D$  comme indiqué figure (2)

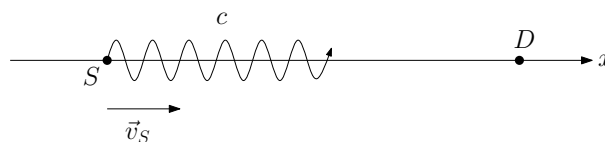


FIGURE 2 – Cas où l'émetteur se rapproche du détecteur

- Un premier bip est envoyé par  $S$  à la date  $t_1$ ,  $S$  et  $D$  étant alors à la distance  $d_1$ .
- Le bip est perçu par  $D$  à la date  $t'_1 = t_1 + \frac{d_1}{c}$ .
- Un second bip est envoyé à la date  $t_2 = t_1 + T_S$  par  $S$  qui est alors à la distance  $d_2 = d_1 - v_S \times T_S$
- Ce dernier bip est perçu par  $D$  à la date  $t'_2 = t_2 + \frac{d_2}{c}$

Ainsi, la période perçue par  $D$  est donc :

$$T_D = t'_2 - t'_1 = T_S + \frac{d_2 - d_1}{c} = T_S - \frac{v_S \times T_S}{c} = T_S \left( \frac{c - v_S}{c} \right)$$

Lorsque la source se rapproche, la période perçue par le détecteur diminue. On peut en déduire l'évolution des autres grandeurs relatives à l'onde :

- Sachant que  $f_S = \frac{1}{T_S}$  et que  $f_D = \frac{1}{T_D}$ , on obtient une augmentation de la fréquence :

$$f_D = f_S \times \frac{c}{c - v_S}$$

- Sachant que  $\omega_S = 2\pi f_S$  et que  $\omega_D = 2\pi f_D$ , on obtient de même une augmentation de la pulsation.
- Sachant que  $\lambda_S = \frac{c}{f_S}$  et que  $\lambda_D = \frac{c}{f_D}$ , on obtient une diminution de la longueur d'onde :

$$\lambda_D = \lambda_S \left( \frac{c - v_S}{c} \right)$$

### 1.1.2 Cas où la source s'éloigne du détecteur à la vitesse $v_S$

La source  $S$  se rapproche du détecteur  $D$  comme indiqué figure (3)

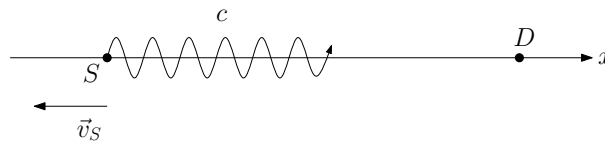


FIGURE 3 – Cas où l'émetteur s'éloigne du détecteur

- Un premier bip est envoyé par  $S$  à la date  $t_1$ ,  $S$  et  $D$  étant alors à la distance  $d_1$ .
- Le bip est perçu par  $D$  à la date  $t'_1 = t_1 + \frac{d_1}{c}$ .
- Un second bip est envoyé à la date  $t_2 = t_1 + T_S$  par  $S$  qui est alors à la distance  $d_2 = d_1 + v_S \times T_S$
- Ce dernier bip est perçu par  $D$  à la date  $t'_2 = t_2 + \frac{d_2}{c}$

Ainsi, la période perçue par  $D$  est donc :

$$T_D = t'_2 - t'_1 = T_S + \frac{d_2 - d_1}{c} = T_S + \frac{v_S \times T_S}{c} = T_S \left( \frac{c + v_S}{c} \right)$$

Lorsque la source s'éloigne, la période perçue par le détecteur diminue. On peut en déduire l'évolution des autres grandeurs relatives à l'onde :

- Sachant que  $f_S = \frac{1}{T_S}$  et que  $f_D = \frac{1}{T_D}$ , on obtient une diminution de la fréquence :

$$f_D = f_S \times \frac{c}{c + v_S}$$

- Sachant que  $\omega_S = 2\pi f_S$  et que  $\omega_D = 2\pi f_D$ , on obtient de même une diminution de la pulsation.
- Sachant que  $\lambda_S = \frac{c}{f_S}$  et que  $\lambda_D = \frac{c}{f_D}$ , on obtient une augmentation de la longueur d'onde :

$$\lambda_D = \lambda_S \left( \frac{c + v_S}{c} \right)$$

Lorsque la source se déplace avec une vitesse de module  $v_S$  alors la fréquence perçue par le détecteur est de la forme :

$$f_D = f_S \left( \frac{c}{c \pm v_S} \right)$$

L'écart en fréquence étant alors :

$$\frac{\Delta f}{f_S} = \frac{f_D - f_S}{f_S} = \pm \frac{v_S}{c \pm v_S} \approx \pm \frac{v_S}{c}$$

Les règles suivantes déterminent le choix des signes :

- Lorsque le mouvement de la source s'effectue en se rapprochant du détecteur alors le signe devant le module de sa vitesse doit avoir pour effet de faire augmenter la fréquence détectée.
- Lorsque le mouvement de la source s'effectue en s'éloignant du détecteur alors le signe devant le module de sa vitesse doit avoir pour effet de faire diminuer la fréquence détectée.

## 1.2 Formule de l'effet Doppler sonore pour un détecteur mobile et un émetteur fixe

On considère une source sonore  $S$  fixe qui émet des bips sonores à intervalle de temps régulier  $T_S$ . Un détecteur  $D$  mobile à la vitesse  $\vec{v}_D$  a sa trajectoire qui passe par  $S$ .

Pour simplifier l'étude on se place dans le référentiel dans lequel le détecteur est fixe et on note  $R$  le référentiel dans lequel la source est fixe (référentiel terrestre) et  $R'$  le référentiel, en translation dans  $R$ , dans lequel le détecteur est fixe.

D'après la loi de composition des vitesses, on a pour tout point  $M$  de l'espace :

$$\vec{V}(M)_{/R'} = \vec{V}(M)_{/R} - \vec{V}_{R'/R}$$

soit

$$\vec{V}(M)_{/R'} = \vec{V}(M)_{/R} - \vec{v}_D$$

Ainsi, dans le référentiel  $R'$  :

- la source a une vitesse  $-\vec{v}_D$
- l'onde sonore a une célérité  $\vec{c}' = \vec{c} - \vec{v}_D$ .

On se retrouve alors dans le cas d'un émetteur fixe et d'une source mobile.

### 1.2.1 Cas où le détecteur se rapproche de la source à la vitesse $v_D$

Le détecteur  $D$  se rapproche de la source  $S$  comme indiqué figure (4) et (5).

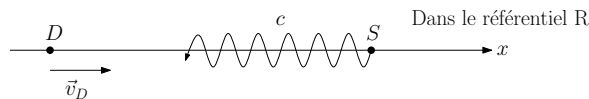


FIGURE 4 – Cas où le détecteur se rapproche de la source : Dans le référentiel  $R$

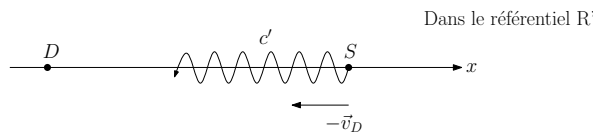


FIGURE 5 – Cas où le détecteur se rapproche de la source : Dans le référentiel  $R'$

Les projections sur l'axe  $(Ox)$  des différentes vitesses dans le référentiel  $R'$  donnent :

- Vitesse de la source  $-\vec{v}_D = -v_D \vec{e}_x$
- Célérité de l'onde sonore  $\vec{c}' = \vec{c} - \vec{v}_D = (-c - v_D) \vec{e}_x$  soit  $\|\vec{c}'\| = c + v_D$ .

Par un raisonnement similaire au raisonnement précédent, on en déduit la période perçue par le détecteur :

- Un premier bip est envoyé par  $S$  à la date  $t_1$ ,  $S$  et  $D$  étant alors à la distance  $d_1$ .
- Le bip est perçu par  $D$  à la date  $t'_1 = t_1 + \frac{d_1}{c'}$ .
- Un second bip est envoyé à la date  $t_2 = t_1 + T_S$  par  $S$  qui est alors à la distance  $d_2 = d_1 - v_D \times T_S$
- Ce dernier bip est perçu par  $D$  à la date  $t'_2 = t_2 + \frac{d_2}{c'}$

Ainsi, la période perçue par  $D$  est donc :

$$T_D = t'_2 - t'_1 = T_S + \frac{d_2 - d_1}{c'} = T_S - \frac{v_D \times T_S}{c + v_D} = T_S \left( \frac{c}{c + v_D} \right)$$

Lorsque le détecteur se rapproche, la période perçue par le détecteur diminue. On peut en déduire l'évolution des autres grandeurs relatives à l'onde :

- Sachant que  $f_S = \frac{1}{T_S}$  et que  $f_D = \frac{1}{T_D}$ , on obtient une augmentation de la fréquence :

$$f_D = f_S \times \frac{c + v_D}{c}$$

- Sachant que  $\omega_S = 2\pi f_S$  et que  $\omega_D = 2\pi f_D$ , on obtient de même une augmentation de la pulsation.
- Sachant que  $\lambda_S = \frac{c}{f_S}$  et que  $\lambda_D = \frac{c}{f_D}$ , on obtient une diminution de la longueur d'onde :

$$\lambda_D = \lambda_S \left( \frac{c}{c + v_D} \right)$$

### 1.2.2 Cas où le détecteur s'éloigne de la source à la vitesse $v_D$

Le détecteur  $D$  s'éloigne de la source  $S$  comme indiqué figure (6) et (7).

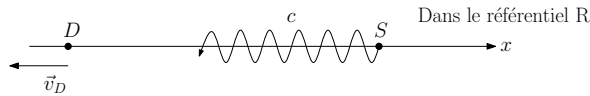


FIGURE 6 – Cas où le détecteur s'éloigne de la source : Dans le référentiel  $R$

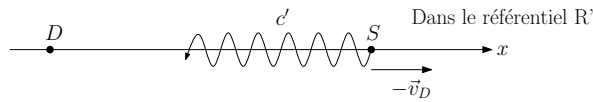


FIGURE 7 – Cas où le détecteur s'éloigne de la source : Dans le référentiel  $R'$

Les projections sur l'axe ( $Ox$ ) des différentes vitesses dans le référentiel  $R'$  donnent :

- Vitesse de la source  $-\vec{v}_D = v_D \vec{e}_x$
- Célérité de l'onde sonore  $\vec{c}' = \vec{c} - \vec{v}_D = (-c + v_D) \vec{e}_x$  soit  $\|\vec{c}'\| = c - v_D$ .

Par un raisonnement similaire au raisonnement précédent, on en déduit la période perçue par le détecteur :

- Un premier bip est envoyé par  $S$  à la date  $t_1$ ,  $S$  et  $D$  étant alors à la distance  $d_1$ .
- Le bip est perçu par  $D$  à la date  $t'_1 = t_1 + \frac{d_1}{c'}$ .
- Un second bip est envoyé à la date  $t_2 = t_1 + T_S$  par  $S$  qui est alors à la distance  $d_2 = d_1 + v_D \times T_S$
- Ce dernier bip est perçu par  $D$  à la date  $t'_2 = t_2 + \frac{d_2}{c'}$

Ainsi, la période perçue par  $D$  est donc :

$$T_D = t'_2 - t'_1 = T_S + \frac{d_2 - d_1}{c'} = T_S + \frac{v_D \times T_S}{c - v_D} = T_S \left( \frac{c}{c - v_D} \right)$$

Lorsque le détecteur s'éloigne, la période perçue par le détecteur augmente. On peut en déduire l'évolution des autres grandeurs relatives à l'onde :

- Sachant que  $f_S = \frac{1}{T_S}$  et que  $f_D = \frac{1}{T_D}$ , on obtient une diminution de la fréquence :

$$f_D = f_S \times \frac{c - v_D}{c}$$

- Sachant que  $\omega_S = 2\pi f_S$  et que  $\omega_D = 2\pi f_D$ , on obtient de même une diminution de la pulsation.
- Sachant que  $\lambda_S = \frac{c}{f_S}$  et que  $\lambda_D = \frac{c}{f_D}$ , on obtient une augmentation de la longueur d'onde :

$$\lambda_D = \lambda_S \left( \frac{c}{c - v_D} \right)$$

Si le détecteur se déplace avec une vitesse de module  $v_D$  alors la fréquence perçue par le détecteur est de la forme :

$$f_D = f_S \left( \frac{c \pm v_D}{c} \right)$$

L'écart en fréquence étant alors :

$$\frac{\Delta f}{f_S} = \frac{f_D - f_S}{f_S} = \pm \frac{v_D}{c}$$

Les règles suivantes déterminent le choix des signes :

- Lorsque le mouvement du détecteur s'effectue en se rapprochant de la source alors le signe devant le module de sa vitesse doit avoir pour effet de faire augmenter la fréquence détectée.
- Lorsque le mouvement du détecteur s'effectue en s'éloignant de la source alors le signe devant le module de sa vitesse doit avoir pour effet de faire diminuer la fréquence détectée.

### 1.3 Formule de l'effet Doppler sonore pour dans le cas général

#### 1.3.1 Cas où les vitesses sont colinéaires

Si le détecteur et la source se déplacent respectivement avec des vitesses de modules  $v_D$  et  $v_S$  alors la fréquence perçue par le détecteur est de la forme :

$$f_D = f_S \left( \frac{c \pm v_D}{c \pm v_S} \right)$$

L'écart en fréquence étant alors :

$$\frac{\Delta f}{f_S} = \frac{f_D - f_S}{f_S} = \frac{\pm v_D \pm v_S}{c \pm v_S} \approx \frac{\pm v_D \pm v_S}{c}$$

Les règles suivantes déterminent le choix des signes :

- Lorsque le mouvement du détecteur s'effectue en se rapprochant de la source que l'on suppose immobile (ou que le mouvement de la source s'effectue en se rapprochant du détecteur que l'on suppose immobile) alors le signe devant le module de sa vitesse doit avoir pour effet de faire augmenter la fréquence détectée.
- Lorsque le mouvement du détecteur s'effectue en s'éloignant de la source que l'on suppose immobile (ou que le mouvement de la source s'effectue en s'éloignant du détecteur que l'on suppose immobile) alors le signe devant le module de sa vitesse doit avoir pour effet de faire diminuer la fréquence détectée.

Pour résumer, on peut dire qu'un rapprochement implique systématiquement une augmentation de fréquence et qu'à l'inverse un éloignement implique une diminution de fréquence.

#### 1.3.2 Cas quelconque

Si le détecteur et la source se déplacent respectivement avec des vitesses  $\vec{v}_D$  et  $\vec{v}_S$  alors la fréquence perçue par le détecteur est de la forme :

$$f_D = f_S \left( \frac{c - \vec{v}_D \cdot \vec{u}_{SD}}{c - \vec{v}_S \cdot \vec{u}_{SD}} \right)$$

$$\text{où } \vec{u}_{SD} = \frac{S\vec{D}}{\|S\vec{D}\|}$$

L'écart en fréquence étant alors :

$$\frac{\Delta f}{f_S} = \frac{f_D - f_S}{f_S} = \frac{(\vec{v}_S - \vec{v}_D) \cdot \vec{u}_{SD}}{c - \vec{v}_S \cdot \vec{u}_{SD}} \approx \frac{(\vec{v}_S - \vec{v}_D) \cdot \vec{u}_{SD}}{c}$$

## 1.4 Les vitesses supersoniques - ondes de choc

Lorsque une source se déplace à une vitesse inférieure à la vitesse du son, les fronts d'onde (sphériques) émis par la source se déplacent plus rapidement que la source comme indiqué figure (8). Notons que sur les figures (8), (9), (10), le rayon d'une surface d'onde est  $c \times t$  où  $c$  est la célérité de l'onde sonore et  $t$  est le temps écoulé depuis l'émission du front d'onde par la source.

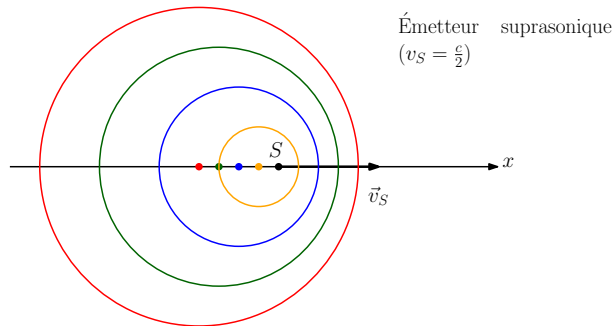


FIGURE 8 – Fronts d'ondes dans le cas d'un émetteur supersonique

Si la source est en mouvement cette fois à une vitesse égale à la vitesse du son, donc si  $v_s = c$  alors les résultats précédents montrent que la fréquence détectée sera infiniment grande. Cela signifie que la source se déplace tellement vite qu'elle a la même vitesse que ses propres plans d'ondes (sphériques) comme indiqué figure (9).

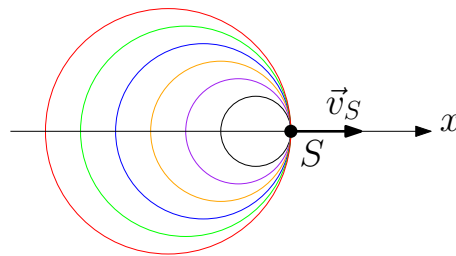


FIGURE 9 – Fronts d'ondes dans le cas d'un émetteur sonique

Qu'arrive-t-il lorsque sa vitesse excède la vitesse du son ?

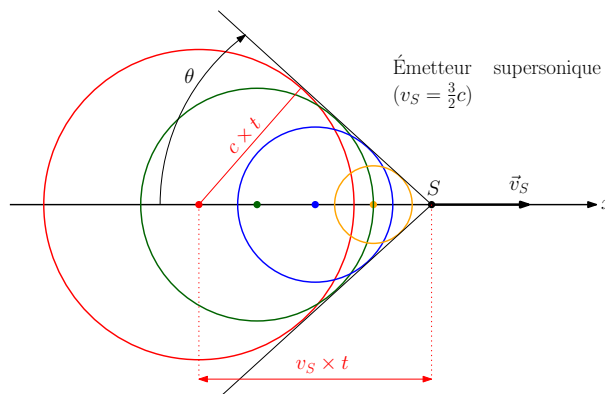


FIGURE 10 – Fronts d'ondes dans le cas d'un émetteur supersonique

Dans ce cas, on parle de vitesse supersoniques et les résultats précédents, donnant alors des fréquences négatives, ne s'appliquent plus. La source étant supersonique, ces fronts d'onde sont derrière la source et se regroupent en formant un enveloppe en forme de V comme indiqué figure (10). En réalité, ces fronts d'onde se déploient dans l'espace et leur regroupement forme un cône que l'on appelle cône de Mach. On dit qu'il y a une onde de choc à la surface de ce cône parce que le regroupement des fronts d'onde cause une augmentation et une

chute rapides de pression de l'air au moment où sa surface atteint un point quelconque de l'espace. Le demi-angle au sommet du cône, est donné par la relation :

$$\sin \theta = \frac{c \times t}{v_S \times t} = \frac{c}{v_S}$$

Le rapport  $\frac{c}{v_S}$  est appelé nombre de Mach.

Un avion volant à Mach 2,3 vole à 2,3 fois la vitesse du son dans l'air. L'onde de choc générée par un avion, ou tout autre projectile supersonique, produit un son nommé bang supersonique, causé par une augmentation subite de la pression de l'air, suivie d'une diminution aussi subite et d'un retour à la normale. Une partie du son entendu quand un projectile est tiré est le bang supersonique produit par le projectile. Ce bang supersonique peut être entendu en faisant claquer rapidement un coup de fouet : quand le fouet atteint la fin de son mouvement, son extrémité se déplace plus vite que le son et produit un petit bang supersonique.

## 1.5 Exemples

### 1.5.1 Orientation des chauves-souris

Les chauves souris règlent leur navigation et leur chasse en émettant des ultrasons (ondes sonores de fréquences supérieures à 20kHz) de fréquence 83 kHz et en détectant ensuite leurs réflexions. Après avoir émis par les narines de la chauve souris, le son peut être réfléchi sous forme d'écho par un papillon de nuit et retourner aux oreilles de la chauve-souris. Les mouvements de la chauve-souris et du papillon par rapport à l'air font varier de quelques kilohertz la fréquence entendue par la chauve-souris, par rapport à la fréquence qu'elle a émise. La chauve-souris traduit automatiquement cette différence en une vitesse relative entre elle et le papillon, et peut ainsi se diriger droit sur lui. Certains papillons évitent d'être capturés en s'éloignant de l'endroit d'où viennent les ondes ultrasoniques. Ce choix de trajectoire de vol réduit la différence de fréquence entre les émissions de la chauve-souris et celles qu'elle entend, et elle peut alors ne pas remarquer l'écho. Le papillon peut aussi éviter la capture en produisant une crépitation sonore afin de produire des propres ultrasons, ce qui brouille le système de détection.

### 1.5.2 Débitmètre à effet Doppler

Une sonde émet un signal ultra-sonore de fréquence  $f$  à l'intérieur de la conduite. Les particules d'impuretés présentes dans le liquide réfléchissent une partie de ce signal vers une sonde réceptrice. Si le fluide est en mouvement, le déplacement de la particule provoque un changement de fréquence de l'onde réfléchie (effet Doppler). La fréquence du signal reçu diffère de celle du signal émis d'une valeur  $\Delta f$ , fonction de la vitesse des particules. Ce type de débitmètre nécessite des liquides chargés de particules d'impuretés.

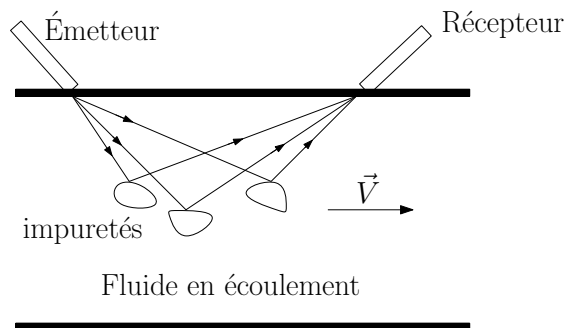


FIGURE 11 – Débitmètre à effet Doppler

## 2 Effet Doppler pour les ondes électromagnétiques

Dans cette partie, on ne considérera que les ondes lumineuses, en sachant que les résultats seront applicables aux autres ondes électromagnétiques.

### 2.1 Introduction qualitative

De manière générale, on retiendra que le cas des ondes lumineuses est plus délicat que les ondes sonores. Néanmoins, la démonstration faite dans le cas d'une source mobile et d'un émetteur fixe reste valable si l'on remplace les bips sonores par des flash lumineux et que l'on remplace la célérité des ondes sonores par la célérité des ondes électromagnétiques (dans l'air :  $c = 3 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ).

En revanche, la démonstration faite dans le cas d'un détecteur mobile n'est pas valable dans le cas des ondes lumineuses. En effet, la théorie de la relativité d'Einstein suppose que les lois physiques sont invariantes par changement de référentiel, ce qui suppose entre autre que la vitesse des ondes lumineuses est la même dans tous les référentiels. ainsi la vitesse des ondes lumineuses dans les référentiels  $R$  et  $R'$  est égale à  $c$ . Cette hypothèse implique de nombreuses modifications dans l'approche d'un problème physique et notamment le temps ne s'écoule pas de la même façon dans les référentiels  $R$  et  $R'$  et les mesures de distances ne sont pas les mêmes dans les deux référentiels. De fait, la démonstration de l'effet Doppler est dans ce cas là nettement plus complexe.

### 2.2 Formulaire de l'effet Doppler Lumineux

Pour les ondes lumineuses, et dans le cas d'objets non relativistes : Si le détecteur et la source se déplacent respectivement avec des vitesses  $\vec{v}_D$  et  $\vec{v}_S$  alors la fréquence perçue par le détecteur est de la forme :

$$f_D = f_S \left( \frac{c - \vec{v}_D \cdot \vec{u}_{SD}}{c - \vec{v}_S \cdot \vec{u}_{SD}} \right)$$

$$\text{où } \vec{u}_{SD} = \frac{S\vec{D}}{\|S\vec{D}\|}$$

L'écart en fréquence étant alors :

$$\frac{\Delta f}{f_S} = \frac{f_D - f_S}{f_S} = \frac{(\vec{v}_S - \vec{v}_D) \cdot \vec{u}_{SD}}{c - \vec{v}_S \cdot \vec{u}_{SD}} \approx \frac{(\vec{v}_S - \vec{v}_D) \cdot \vec{u}_{SD}}{c}$$

- Le rapprochement relatif de la source et du détecteur fait augmenter la fréquence reçue ou diminuer la longueur d'onde.
- L'éloignement relatif de la source et du détecteur fait diminuer la fréquence reçue ou augmenter la longueur d'onde (décalage vers le rouge ou redshift)

### 2.3 Exemples

#### 2.3.1 Élargissement des raies d'émission par effet Doppler

En optique, la lumière peut être absorbée (ou émise) par un atome, une molécule ou un système confiné sous forme de raie d'absorption dans le spectre électromagnétique. Du fait de l'agitation thermique des particules dans l'ampoule les contenant, l'effet Doppler change légèrement la fréquence d'absorption (ou d'émission).

Soit un atome (ou molécule) source émettant une radiation à la fréquence  $f_0$  dans le référentiel où elle est au repos. Du fait du mouvement des atomes, la fréquence perçue par un observateur fixe sera modifiée en raison de l'effet Doppler, avec une largeur typiquement de :

$$\frac{\Delta f}{f_0} = 2 \times \frac{u_q}{c}$$

où  $u_q$  représente la vitesse quadratique moyenne, liée à la température  $T$ .

Par exemple, pour un gaz parfait monoatomique, on a :

$$u_q = \sqrt{\frac{3k_B T}{m}}$$



L'écart en fréquence varie donc en  $\sqrt{2}$  :

$$\Delta f \propto \sqrt{T}$$

Notons que le profil de la raie, du fait de la loi de distribution des vitesses de Maxwell est une gaussienne, centrée sur la fréquence  $f_0$ , d'écart-type  $\Delta f$  comme indiqué figure (12).

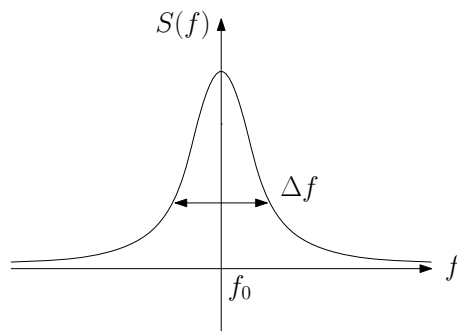


FIGURE 12 – Élargissement d'une raie d'émission par effet Doppler

### 2.3.2 Redshift

A l'exception de la grande galaxie d'Andromède et de quelques galaxies naines proches, toutes les galaxies s'éloignent de nous. Pour mesurer les distances des galaxies, les astronomes utilisent la relation établie par l'astronome américain Edwin Hubble, qui montre que la vitesse  $v$  d'éloignement des galaxies est proportionnelle à leurs distances,  $D$ , selon  $v = H_0 D$ , où  $H_0$  est la constante de Hubble.

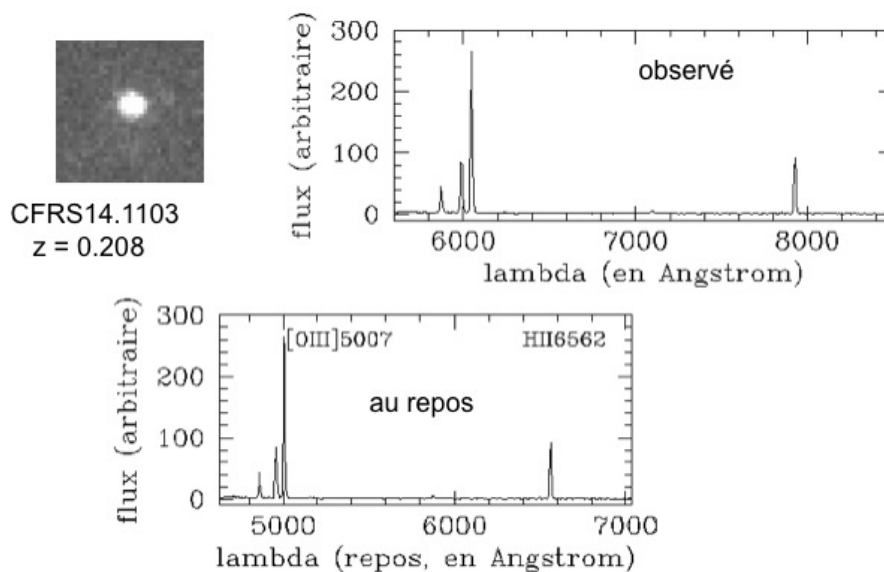


FIGURE 13 – Spectre d'une galaxie s'éloignant à une vitesse de  $56\,000\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$

Plus une galaxie est lointaine, plus vite elle s'éloigne de nous. Son émission lumineuse est alors affectée par sa vitesse d'éloignement, à cause de l'effet Doppler : la lumière émise par une galaxie s'éloignant de nous sera décalée vers le rouge avec un décalage spectral  $z$  donné par :

$$z = \frac{(\lambda_{\text{observ}} - \lambda_{\text{repos}})}{\lambda_{\text{repos}}}$$

Pour mesurer le décalage spectral, les astronomes utilisent les spectres des galaxies (voir figure (13)). Ils en déduisent la vitesse des galaxies, avec :

$$v = c \times \frac{((z + 1)^2 - 1)}{((z + 1)^2 + 1)}$$

où  $c$  est la vitesse de la lumière,  $c = 300\,000 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Lorsque la vitesse d'éloignement est petite par rapport à la vitesse de la lumière, on peut simplifier l'expression ci-dessus par  $v = cz$ . Connaissant la vitesse d'éloignement d'une galaxie, on en déduit sa distance,

$$D = \frac{v}{H_0}$$

### 3 Exercices

#### 3.1 Enregistrement d'un son

Un voiture électrique roule sur une route à vitesse constante. Un piéton, immobile sur la chaussée, enregistre le son émis par un sifflet embarqué dans le véhicule. La figure 14, représente le spectre du signal obtenu. Exploiter ce diagramme et notamment donner la fréquence émise par le sifflet et la vitesse de la voiture.

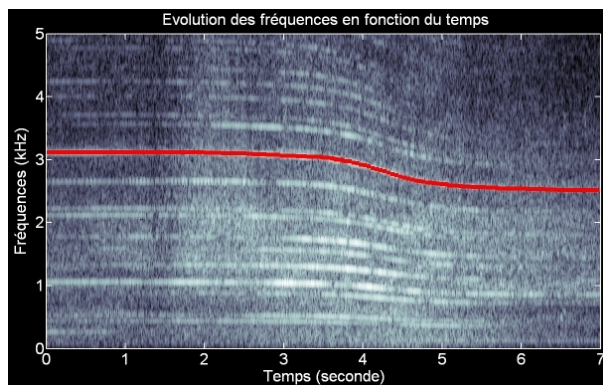


FIGURE 14 – Spectre du son enregistré par le piéton

#### 3.2 L'effet Doppler dans tous ses états

Une moto roule à  $60 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  et son moteur est à 3000 tours/min. Le bruit de la moto est lié aux explosions qui se produisent dans les cylindres de la moto : à chaque tour de l'arbre moteur, 4 des 8 pistons de la motos ont été le siège d'une explosion. La vitesse du son dans l'air sera prise de  $330 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  et la vitesse de la lumière de  $3 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

1. Quelle est la fréquence du son émis par la moto ?
2. Cette moto (qui roule trop vite) croise un piéton qui attend pour traverser. Quelle est la fréquence du son perçu par le piéton lorsque la moto se rapproche du passage piéton ?
3. Quelle est la fréquence du son perçu par le piéton lorsque la moto a dépassé le passage piéton ?
4. La moto double une voiture qui roule à  $40 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ . Quelle est la fréquence du son perçu par l'automobiliste avant le dépassement ?
5. Quelle est la fréquence du son perçu par l'automobiliste après le dépassement ?
6. La moto passe un feu orange (ce qui est très dangereux.) Un agent de la circulation siffle cette infraction avec son sifflet qui émet un son à 900Hz. Quelle est la fréquence du son perçu par le motard ?
7. Le motard, physicien, dit alors : "mais j'ai vu le feu vert par effet Doppler !" Et l'agent lui répond : "Dans ce cas, je vous retire votre permis pour grave excès de vitesse !" Est ce possible ? Dans l'affirmative, calculer la vitesse qu'aurait du avoir le motard pour voir le feu vert au lieu d'orange.

### 3.3 Le sous-marin

Le sous marin "L'invincible", qui se déplace à la vitesse  $v_i = 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , en mission d'entraînement, a pris en chasse le bâtiment "le Duquesne". Afin de déterminer la vitesse de ce bâtiment, le sous-marin émet des ondes ultra-sonores de fréquence  $f_E = 40 \text{ kHz}$  qui vont se réfléchir sur le bateau qui se déplace à la vitesse  $v_D$ . Le son perçu au retour par le sous marin est  $f_R = 39.856 \text{ kHz}$ . La vitesse du son dans l'eau est de  $1480 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

1. Établir le lien entre la fréquence  $f_i$  de l'onde sonore que percevrait le "Duquesne" s'il la captait,  $f_E$  et les vitesses.
2. Établir le lien entre la fréquence  $f_i$  et  $f_R$
3. En déduire le lien entre  $f_E$  et  $f_R$ .
4. Calculer alors la vitesse du bâtiment.

### 3.4 Largeur de raie Doppler

L'énergie de l'atome d'hydrogène est quantifiée par le nombre quantique principal  $n$  :

$$E_H(n) = -\frac{13,6}{n^2} \text{ eV}$$

Cet atome se désexcite de l'état  $n = 3$  vers l'état  $n = 2$  en émettant un photon.

1. Calculer la fréquence et la longueur d'onde de l'onde associée à ce photon. Cette onde électromagnétique est-elle dans le visible, l'infra-rouge ou l'ultra-violet ?
2. La raie de lumière possède cependant une certaine largeur  $\Delta\lambda$ . Cette largeur est proportionnelle à  $\sqrt{T}$  où  $T$  désigne la température. Sachant que les atomes ont une énergie cinétique d'agitation thermique telle que  $E_c = \frac{5}{2}k_B T$  ( $k_B$  désigne la constante de Boltzmann), expliquer la dépendance en  $T$  de  $\Delta\lambda$ .
3. Calculer en ordre de grandeur la largeur de la raie à température ambiante ( $25^\circ\text{C}$ ).

Rappels :  $h = 6.62 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ ,  $k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$ ,  $N_A = 6.023 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$  et  $M_H = 1 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$

### 3.5 Spectre d'une galaxie

La figure 16, représente le spectre d'émission de la galaxie TGS153Z170. La figure 15 représente le spectre d'une source présente dans un laboratoire sur terre. Déterminer la vitesse de la galaxie par rapport à la terre.

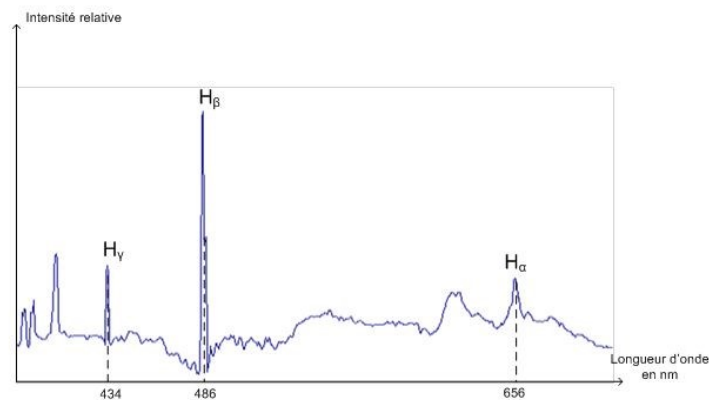


FIGURE 15 – Spectre d'une source terrestre d'hydrogène

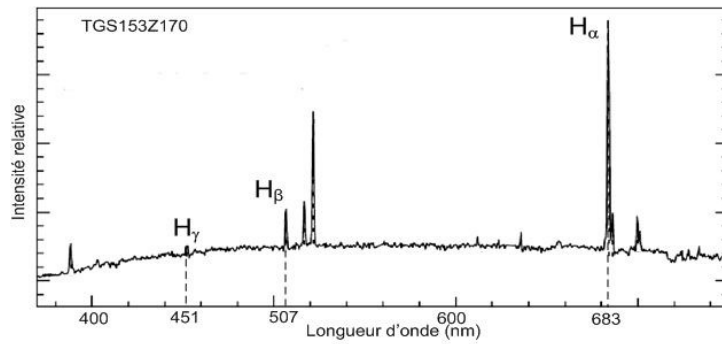


FIGURE 16 – Spectre de TGS153Z170

### 3.6 Redshift

L'astronome Olbers énonça le paradoxe de la nuit noire en 1823. Comment est-il possible que le ciel de la nuit soit noir, car quelle que soit la direction dans laquelle on observe, il y a toujours une étoile et donc le ciel nocturne devrait être au moins aussi lumineux que le ciel de la journée ? trois différentes hypothèses ont été avancées pour résoudre ce paradoxe, mais la véritable explication n'est apparue que récemment, avec l'apparition de la théorie de la relativité d'Einstein et la compréhension que l'univers n'est pas statique mais en expansion.

1. La galaxie Ursa Major I est observée et plus précisément les raies H et K du calcium. Les longueurs d'ondes trouvées sont  $\lambda'_H = 413.0 \text{ nm}$  et  $\lambda'_K = 416.6 \text{ nm}$ . Sur Terre, la mesure de ces raies donne  $\lambda_H = 396.8 \text{ nm}$  et  $\lambda_K = 393.4 \text{ nm}$ . La galaxie Ursa Major I se rapproche-t-elle ou s'éloigne-t-elle de la Terre ?
2. Dédire des deux mesures la valeur moyenne de la vitesse d'éloignement de la galaxie de la Terre en  $\text{km.s}^{-1}$ .
3. Le graphique de la distance  $D$  des étoiles à la terre en fonction du décalage Doppler  $z = \frac{\Delta f}{f}$  observée depuis la Terre est représentée figure (17) . Justifier à partir des observations de ce graphique en échelle logarithmique que le lien entre  $D$  et  $z$  est linéaire.

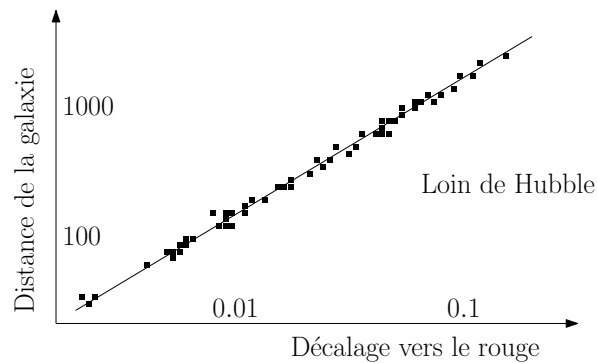


FIGURE 17 – Loi de Hubble

4. En déduire alors que  $D$  est proportionnelle à la vitesse (relative) d'éloignement de la Terre  $v$ .
5. La Loi de Hubble s'écrit donc  $H_0 D = v$  où  $H_0$  est la constante de Hubble. A partir des résultats de la question 1, et sachant que Ursa Major I est située à 200 Mpc de la terre, en déduire une estimation de la constante de Hubble en  $\text{km.s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ . En effectuant une régression linéaire sur la courbe, la constante  $H_0$  vaut  $75 \text{ km.s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$  où le Mpc désigne le megaParsec. ( $1 \text{ pc} = 3 \times 10^{16} \text{ m}$ )
6. Quelle est la dimension de la constante de Hubble ? En déduire une estimation de l'âge de l'Univers.
7. Sachant que l'Univers est en expansion, justifier que la nuit soit noire.

### 3.7 Onde de choc

Déterminer la vitesse de l'avion à partir de la photo ci-dessous.



FIGURE 18 – Onde de choc sur un F18