

# Introduction à l'effet Doppler

Ph. Ribière  
ribierep@orange.fr

Mercredi 9 Novembre 2011

## 1 Introduction à l'effet Doppler.

Vous avez tous fait l'expérience de l'effet Doppler dans la rue, lorsqu'une ambulance, toute sirène allumée passe à vos côtés ou qu'une moto passe près de vous? Quelle est votre sensation sonore?

## 2 L'effet Doppler pour une onde sonore.

### 2.1 Formule de l'effet Doppler sonore pour un récepteur fixe.

Pour interpréter cela, imaginons une source S qui émet des bips sonores à intervalle de temps régulier  $T_S$ . Un récepteur R se situe sur la trajectoire rectiligne de la source. Le son se propage à la vitesse  $c$ .

#### 2.1.1 La source se rapproche du récepteur.

Considérons le cas où la source S se rapproche à la vitesse  $v_S$  du récepteur.

Un premier bip est émis par la source à une date  $t_1$   
A la date  $t_1$  la source et le récepteur sont distants de  $d$ .  
Le bip est perçu par le récepteur à une date  $t'_1 =$

Un second bip est émis par la source à une date  $t_2 = t_1 + T_S$   
Le bip est perçu par le récepteur à une date  $t'_2 =$

La source se rapproche du récepteur donc la durée de propagation diminue, ce qui modifie la période perçue (et donc la fréquence) de l'onde sonore.

Le récepteur voit donc les bips espacés d'un intervalle de temps  $T_R =$

Donc une fréquence  $f_R =$

Donc une pulsation  $\omega_r =$

Donc une longueur d'onde (sonore)  $\lambda_R =$

### 2.1.2 La source s'éloigne du récepteur.

Considérons maintenant le cas où la source S a dépassé le récepteur et s'éloigne donc à la vitesse  $v_S$  du récepteur.

Le récepteur voit les bips espacés d'un intervalle de temps  $T_R =$

Donc une fréquence  $f_R =$

Il est maintenant possible d'interpréter votre expérience "sonore" de l'effet Doppler, sachant que les sons graves correspondent à des basses fréquences et les sons aigus à des hautes fréquences.

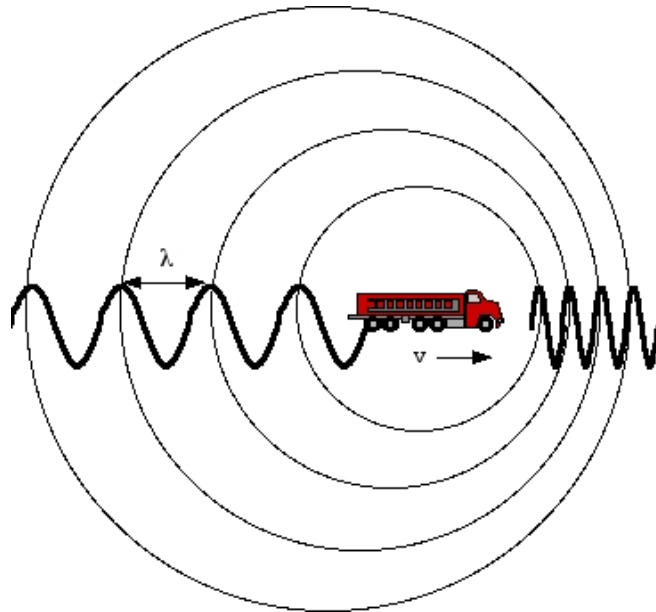


FIGURE 1 – Effet Doppler sonore

### 2.1.3 Formule de l'effet Doppler pour un récepteur fixe.

Nous retiendrons donc la relation suivante, qui regroupe et généralise les formules vues ci-dessus :

$$f_R = \frac{1}{1 - \frac{\vec{v}_S \cdot \vec{u}_{S \rightarrow R}}{c}} f_S \quad (1)$$

Application :

Une ambulance qui se déplace à  $v_A = 20 \text{ m.s}^{-1}$  émet le "la" à 440Hz. Un passant immobile regarde le passage de l'ambulance. Quelle fréquence perçoit-il lorsque l'ambulance se rapproche puis quand elle s'éloigne ?

La vitesse du son dans l'air est de  $340 \text{ m.s}^{-1}$

Remarque :

Que se passe-t-il si  $v_S = c$  ? La fréquence  $f_R$  tend vers  $\infty$ . Que se passe-t-il du point de vue physique ? Les ondes sonores émises par la source se propagent à la vitesse  $c$ , qui est aussi la vitesse de propagation du son. Donc toutes les ondes sonores émises par la source vont arriver au même instant au niveau

du récepteur. L'accumulation de toutes ces ondes (et donc de la puissance sonore) est perçue par le récepteur comme un grand bruit sourd. C'est ce bruit que vous percevez lorsqu'un avion militaire franchit "le mur du son", c'est à dire que sa vitesse dépasse la vitesse du son. Les ondes sonores émises se concentrent et génèrent une onde de choc. Vous retrouvez alors le fait que l'onde sonore est, entre autre, une onde de pression. La variation de pression d'une onde sonore classique est faible (quelques pascals<sup>1</sup> comparés à la pression atmosphérique de l'ordre de  $10^5$ Pa) mais leur accumulation génère une forte variation de pression susceptible de faire exploser les vitres.



FIGURE 2 – Passage en supersonique et onde de choc sonore.

Autre formulation de l'effet Doppler :

Il peut être intéressant de calculer le décalage relatif en fréquence, dû à l'effet Doppler.

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{f_R - f_S}{f_S} =$$

Nous retiendrons donc la relation suivante, valable si les vitesses de déplacements sont faibles devant la vitesse  $c$  de l'onde :

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{f_R - f_S}{f_S} \simeq \frac{\vec{v}_S \cdot \vec{u}_{S \rightarrow R}}{c} \quad (2)$$

1. 20 Pa correspondent à un son de 120dB

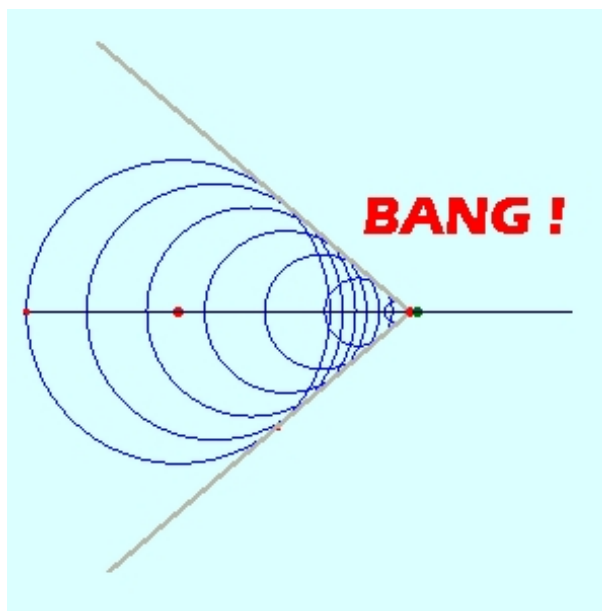


FIGURE 3 – Génération de l'onde de choc sonore.

## 2.2 Formule générale de l'effet Doppler sonore.

Dans un cas plus général, la source et le récepteur peuvent être en mouvement l'un par rapport à l'autre. Néanmoins nous nous limiterons au cas où les mouvements s'effectuent toujours sur la droite Source-Récepteur que nous nommerons axe  $\vec{u}_x$ .

Dans ce cas, la vitesse (algébrique) de la source est  $v_S$  et celle du récepteur est  $v_R$ .  
(Les deux vitesses sont comptées positives suivant  $+\vec{u}_x$ )

Pour trouver la formule de l'effet Doppler, l'idée est de se ramener à la situation précédente par un changement de référentiel. On se place donc dans le référentiel  $R'$  où le récepteur est fixe, soit un référentiel qui se translate à la vitesse  $+v_R$  par rapport au référentiel  $R$  d'origine.

Dans ce référentiel  $R'$ , la source se déplace à la vitesse  $v'_S =$

Les ondes sonores se déplacent elles à la vitesse  $c' =$

En injectant ces deux valeurs dans la formule 1, il vient finalement :

$$f_R =$$

Nous retiendrons donc la relation suivante, qui généralise l'ensemble des cas rencontrés :

$$f_R = \frac{1 - \frac{\vec{v}_R \cdot \vec{u}_{S \rightarrow R}}{c}}{1 - \frac{\vec{v}_S \cdot \vec{u}_{S \rightarrow R}}{c}} f_S \quad (3)$$

Autre formulation de l'effet Doppler :

Il est là encore intéressant de calculer le décalage relatif en fréquence, dû à l'effet Doppler.

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{f_R - f_S}{f_S} =$$

Nous retiendrons donc la relation suivante, valable si les vitesses de déplacements sont faibles devant la vitesse  $c$  de l'onde :

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{f_R - f_S}{f_S} \simeq \frac{(\vec{v}_S - \vec{v}_R) \cdot \vec{u}_{S \rightarrow R}}{c} \quad (4)$$

De plus, l'énoncé demande parfois de travailler avec la longueur d'onde et plus exactement avec l'écart relatif des longueurs d'ondes. Pour trouver la formule faisant intervenir les longueurs d'onde connaissant la relation précédente, il faut prendre la différentielle logarithmique de l'expression liant longueur d'onde et fréquence :

$$\lambda = c.T = \frac{c}{f}.$$

Il faut aussi toujours vérifier par le raisonnement physique la pertinence du résultat. Pour cela, nous retiendrons que :

Le rapprochement relatif de la source et du récepteur fait augmenter la fréquence reçue (décalage vers les sons aigus).

L'éloignement relatif de la source et du récepteur fait diminuer la fréquence reçue (décalage vers les sons graves).

Application : interprétation de la fréquence perçue dans l'exemple ci-dessus.

Citons pour finir deux applications de l'effet Doppler Sonore : les radars (routiers, au tennis,...) et l'échographie Doppler.

### 2.3 Formulaire de l'effet Doppler sonore.

A retenir, pour les ondes sonores :

L'onde sonore émise par la source se déplaçant à la vitesse  $\vec{v}_S$  à la fréquence  $f_S$ , est perçue par le récepteur en mouvement à la vitesse  $\vec{v}_R$  à la fréquence  $f_R$

$$f_R = \frac{1 - \frac{\vec{v}_R \cdot \vec{u}_{S \rightarrow R}}{c}}{1 - \frac{\vec{v}_S \cdot \vec{u}_{S \rightarrow R}}{c}} \cdot f_S \quad (5)$$

ce qui correspond, pour des vitesses  $v \ll c$ , à un écart relatif de fréquence :

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{f_R - f_S}{f_S} \simeq \frac{(\vec{v}_S - \vec{v}_R) \cdot \vec{u}_{S \rightarrow R}}{c} \quad (6)$$

ou un écart relatif de longueur d'onde :

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{\lambda_R - \lambda_S}{\lambda_S} \simeq -\frac{(\vec{v}_S - \vec{v}_R) \cdot \vec{u}_{S \rightarrow R}}{c} \quad (7)$$

Reste à retenir l'interprétation physique du phénomène :

Le rapprochement relatif de la source et du récepteur fait augmenter la fréquence reçue ou diminuer la longueur d'onde (décalage vers les sons aigus).

L'éloignement relatif de la source et du récepteur fait diminuer la fréquence reçue ou augmenter la longueur d'onde (décalage vers les sons graves).

## 3 L'effet Doppler pour une onde lumineuse.

### 3.1 Introduction qualitative.

Le cas des ondes lumineuses est plus délicat.

Néanmoins, la démonstration faite à la partie 2.1 tient en remplaçant les bips sonores par des flash lumineux. La première formule (1) est donc vraie aussi pour des ondes lumineuses.

Mais la démonstration faite dans la partie 2.2, elle, en faisant un changement de référentiel, lâche. Il n'est plus vrai d'écrire que dans le référentiel  $R'$ , la vitesse des ondes  $c' = c - v_R$ . En effet, la théorie de la relativité d'Einstein (1905) 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. Au final, dans  $R$  et  $R'$ , la vitesse des ondes lumineuses est  $c$ .

Mais cette hypothèse amène un nombre important de modifications de la vision du monde. En particulier, le temps ne s'écoule pas de la même façon dans R et R' et les mesures de distance ne sont pas les mêmes dans R et R'. De ce fait, l'effet Doppler apparaît mais la démonstration est, vous l'avez compris, moins simple.

C'est la formule donnant l'écart relatif des fréquences ou des longueurs d'onde qui se généralise :

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{f_R - f_S}{f_S} \simeq \frac{(\vec{v}_S - \vec{v}_R) \cdot \vec{u}_{S \rightarrow R}}{c}$$

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{\lambda_R - \lambda_S}{\lambda_S} \simeq -\frac{(\vec{v}_S - \vec{v}_R) \cdot \vec{u}_{S \rightarrow R}}{c}$$

Les applications de l'effet Doppler lumineux sont par exemple le refroidissement d'atomes par Laser (de manière schématique, un atome en mouvement ne voit pas les mêmes fréquences qu'un atome au repos et donc il n'absorbe pas les ondes de mêmes fréquences) ou bien la mesure de la forme de la galaxie ou de l'expansion de l'Univers.

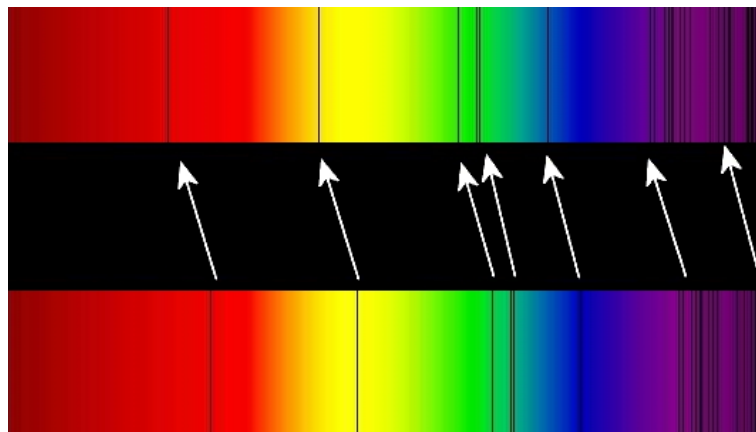


FIGURE 4 – Décalage vers le rouge du spectre lumineux d'absorption ou Redshift. En bas expérience sur Terre et en haut, résultat de l'observation d'une galaxie lointaine.

Remarque :

La formule donnée n'est valable que pour les faibles vitesses comparées à la vitesse de la lumière. Néanmoins, la formule exacte diverge si la vitesse  $v$  de la particule tend vers  $c$ . Cet effet, analogue de l'onde de choc sonore, est appelé effet Cerenkov et est observé dans l'eau des centrales nucléaires en maintenance : une lumière intense est émise donnant au réacteur sous l'eau une couleur bleue.





FIGURE 5 – Effet Cerenkov dans un réacteur.

### 3.2 Formulaire de l'effet Doppler lumineux

Pour les ondes lumineuses, dans le cas de vitesses  $v \ll c$  :

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{f_R - f_S}{f_S} \simeq \frac{(\vec{v}_S - \vec{v}_R) \cdot \vec{u}_{S \rightarrow R}}{c} \quad (8)$$

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{\lambda_R - \lambda_S}{\lambda_S} \simeq -\frac{(\vec{v}_S - \vec{v}_R) \cdot \vec{u}_{S \rightarrow R}}{c} \quad (9)$$

Interprétation physique du phénomène :

Le rapprochement relatif de la source et du récepteur fait augmenter la fréquence reçue ou diminuer la longueur d'onde (décalage vers le bleu).

L'éloignement relatif de la source et du récepteur fait diminuer la fréquence reçue ou augmenter la longueur d'onde (décalage vers le rouge, redshift en anglais).

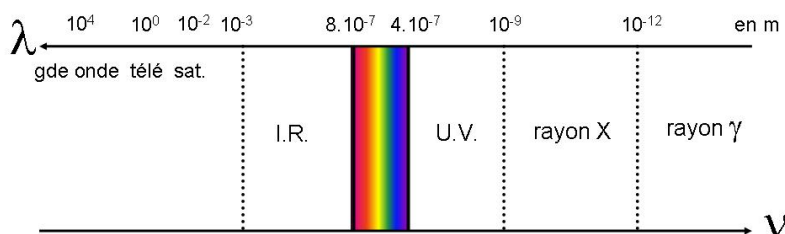


FIGURE 6 – spectre des ondes électromagnétiques

## 4 Exercices sur l'effet Doppler.

### 4.1 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<sup>2</sup> sera prise de  $330 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  et la vitesse de la lumière de  $3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

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  $900 \text{ Hz}$ . 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 ?

2. La vitesse du son dans l'air dépend de la température, elle peut donc légèrement varier, il faut bien lire l'énoncé.

Dans le cas de l'affirmative, calculer la vitesse (peu réaliste) qu'aurait du avoir le motard pour voir le feu vert ( $\lambda_v = 560nm$ ) au lieu d'orange ( $\lambda_o = 610nm$ ).

## 4.2 Le sous marin : effet Doppler lors d'un aller retour de l'onde.

Le sous marin "l'Invincible", qui se déplace à la vitesse  $v_I = 1m.s^{-1}$ , en mission d'entraînement, a pris en chasse le bâtiment "le Dusquesne". Afin de déterminer la vitesse de ce bâtiment, le sous marin émet des ondes ultra-sonores de fréquence  $f_E = 40kHz$  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  $f_R = 39,856kHz$ .

La vitesse du son dans l'eau est de  $1480 m.s^{-1}$

1. Etablir 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. Etablir 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.

## 4.3 Deux interprétations de l'onde sonore dans le tuyau.

Un haut parleur est placé à l'entrée  $x=0$  d'un tuyau sonore. Son rôle est uniquement de guider le son pour éviter que celui ne se répartisse dans tout l'espace. L'onde sonore émet un son de fréquence  $f = 500Hz$ . L'autre extrémité du tuyau sonore est fermée par une paroi mobile à la vitesse  $u$  (très faible de  $c$ ). A  $t=0$ , la paroi mobile est mise en mouvement, partant de  $x=D$ .

Un micro est mis en  $x_R = \frac{D}{2}$ , il perçoit un son de fréquence approximative  $f \simeq 500Hz$  modulé en amplitude (l'amplitude croît et décroît jusqu'à s'annuler dans le cas présent). La durée entre deux "silences" est  $\tau = 34ms$ .

La vitesse du son dans l'air sera prise de  $340m.s^{-1}$

1. Quelle est la fréquence de l'onde réfléchi du fait du mouvement de l'extrémité? Quel autre phénomène ondulatoire permet d'expliquer la modulation d'amplitude perçue? Déterminer la vitesse  $u$ .
2. On peut aussi interpréter les observations comme la conséquence d'ondes stationnaires lentement perturbées par le déplacement de l'extrémité du tuyau. De quelle distance se déplace l'extrémité mobile entre deux silences? Retrouver la valeur de  $u$ .

Remarque : un tuyau sonore dont l'extrémité est immobile est un système qui permet aussi de mesurer facilement la vitesse de l'onde sonore. Un système d'onde stationnaire se crée dans le tuyau et il est alors possible et facile avec un micro de mesurer la longueur d'onde. Connaissant la fréquence émise, il devient alors facile de calculer la célérité de l'onde sonore.  $c = \lambda.f$ .

## 4.4 Largeur de raie Doppler.

1. L'énergie de l'atome d'hydrogène est quantifiée par le nombre quantique principal  $n$ .  $E_{atome H}(n) = -\frac{136}{n^2}eV$ . Cet atome se désexcite de l'état  $n=3$  vers l'état  $n=2$  en émettant un photon. 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 ? (Rappel :  $h=6,62 \cdot 10^{-34}$  S.I.)

- 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  $\Delta\lambda$ .
- Calculer en ordre de grandeur la largeur de la raie à température ambiante (25°C). (Rappel :  $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$  S.I.,  $N_A = 6,023 \cdot 10^{23}$  et  $M_H = 1 \text{ g.mol}^{-1}$ )

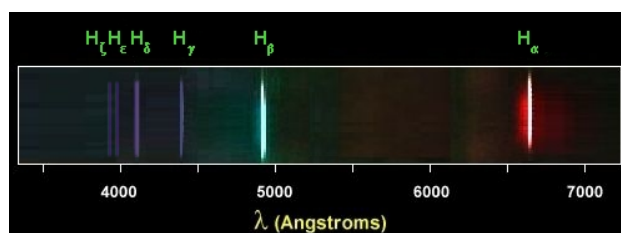


FIGURE 7 – Spectre visible de l'hydrogène

#### 4.5 Redshift, paradoxe d'Olbers et constante de Hubble.

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 ?<sup>3</sup> 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.

- 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 ?
- Déduire des deux mesures la valeur moyenne de la vitesse d'éloignement de la galaxie de la Terre en  $\text{km.s}^{-1}$ .
- Le graphique de la distance D des étoiles à la terre en fonction du décalage Doppler  $z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$  observé depuis la Terre est représenté figure 8 Justifier à partir des observations de ce graphique en échelle logarithmique que le lien entre D et z est linéaire.
- En déduire alors que D est proportionnelle à la vitesse (relative) d'éloignement de la Terre v.

3. Olbers concevait alors l'Univers comme statique et infini, contenant une infinité d'étoiles.

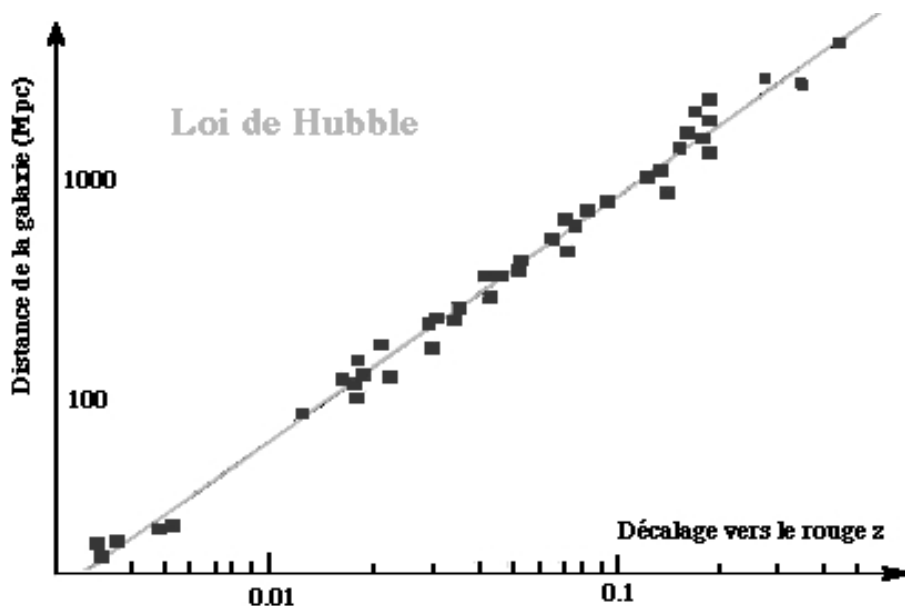


FIGURE 8 – Loi de Hubble

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 200Mpc de la terre, en déduire une estimation de la constante de Hubble en  $km.s^{-1}.Mpc^{-1}$ .  
En effectuant une régression linéaire sur la courbe, la constante de  $H_0 \simeq 75km.s^{-1}.Mpc^{-1}$  où  $Mpc$  désigne le megaParsec. ( $1pc \simeq 3.10^{16}m$ )
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.

## 5 Correction des exercices sur l'effet Doppler.

### 5.1 L'effet Doppler dans tous ses états.

1.  $f_s = 4.50 = 200Hz$
2.  $f_R = \frac{1}{1 - \frac{v_S}{c}} \cdot f_S = 210Hz$
3.  $f_R = \frac{1}{1 + \frac{v_S}{c}} \cdot f_S = 190Hz$
4.  $f_R = \frac{1 - \frac{v_R}{c}}{1 - \frac{v_S}{c}} \cdot f_S = 203Hz$
5.  $f_R = \frac{1 + \frac{v_R}{c}}{1 + \frac{v_S}{c}} \cdot f_S = 197Hz$
6.  $f_R = (1 - \frac{v_R}{c}) \cdot f_S = 854Hz$

7. Le motard se rapproche du feu tricolore donc il voit un décalage vers les faibles longueurs d'onde, donc ceci est théoriquement possible. Calculons la vitesse.  $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\lambda_R - \lambda_S}{\lambda_S} \simeq -\frac{v_R}{c}$  soit  $v_R = -\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \cdot c = 2,46 \cdot 10^7 m \cdot s^{-1} = 6,83 \cdot 10^6 km \cdot h^{-1}$ , ce qui peu réaliste.

## 5.2 Le sous marin : effet Doppler lors d'un aller retour de l'onde.

1.  $f_D = \frac{1 - \frac{v_D}{c}}{1 - \frac{v_I}{c}} \cdot f_E$
2.  $f_R = \frac{1 + \frac{v_I}{c}}{1 + \frac{v_D}{c}} \cdot f_D$
3.  $f_R = \frac{1 + \frac{v_I}{c}}{1 + \frac{v_D}{c}} \cdot \frac{1 - \frac{v_D}{c}}{1 - \frac{v_I}{c}} \cdot f_E$  donc  $v_D = 3,67 m \cdot s^{-1}$

## 5.3 Deux interprétations de l'onde sonore dans le tuyau.

1.  $f_R = \frac{1 - \frac{u}{c}}{1 + \frac{u}{c}} \cdot f_E$  soit  $f_R - f_E \simeq \frac{2u}{c} \cdot f_E$ .  
Avec la formule des battements :  $a_0 \cos(\omega t) + a_0 \cos(\omega' t) = 2 \cdot a_0 \cos(\frac{\omega + \omega'}{2} \cdot t) \cos(\frac{\omega - \omega'}{2} \cdot t)$  le signal enveloppe varie donc à la pulsation  $\frac{\omega - \omega'}{2}$  et s'annule pour  $\frac{\omega - \omega'}{2} \cdot \tau = \pi$   
Donc  $(f_R - f_E) \cdot \tau = 1$  d'où  $u = \frac{c}{2 \cdot f_E \cdot \tau}$  (ce qui est homogène)
2. Le phénomène peut être vu comme une onde stationnaire lentement perturbée par le déplacement de l'extrémité. Sachant que la distance entre deux minima est  $\frac{\lambda}{2}$ , on en déduit que  $\frac{\lambda}{2} = u \cdot \tau$  soit  $u = \frac{c}{2 \cdot f_E \cdot \tau}$ , même formule que précédemment.

## 5.4 Largeur de raie Doppler.

1.  $E_3 - E_2 = 3,022 \cdot 10^{-22} J$  soit  $f = 4,56 \cdot 10^{14} Hz$  et  $\lambda = 657 nm$  raie de Balmer, appartient au visible.
2.  $E_C = \frac{5}{2} k_B T = \frac{1}{2} m v^2$  d'où  $v = \sqrt{\frac{5 k_B T}{m}}$  et d'après la formule de l'effet Doppler pour les ondes lumineuses :  $\Delta\lambda = \frac{\lambda_0 \cdot v}{c} = \frac{\lambda_0}{c} \sqrt{\frac{5 k_B T}{m}}$ . La raie est élargie par effet Doppler (certains atomes ayant une vitesse positive, se rapprochant, et d'autres une vitesse négative, s'éloignant).
3.  $\Delta\lambda = 3,5 \cdot 10^{-12} m$ , ce qui est faible comparé à  $\lambda_0$ , les raies spectrales apparaissent fines.

## 5.5 Redshift, paradoxe d'Olbers et constante de Hubble.

1. Le décalage se fait vers les grandes longueurs d'ondes donc vers le rouge. (En anglais Redshift)
2.  $v = 14970 km \cdot s^{-1}$ .
3. Quand  $z$  est multiplié par 10 (décalage d'une décade), la distance est elle aussi multipliée par 10. On peut aussi dire que le coefficient directeur de la droite est 1 sur le graphique ( $v \propto z^1$  soit  $\ln v = 1 \cdot \ln z$ )
4.  $z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v_{\text{éloignement}}}{c}$  donc  $v \propto D$

5.  $v = H_0 \cdot D$  avec  $H_0 \simeq 72 \text{ km.s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ .

Remarque 1 : La mesure de la distance Terre étoile s'effectue en regardant la lumière reçue sur Terre de l'étoile et en la comparant à la lumière supposée émise par l'étoile.

Remarque 2 : Le parsec est la distance à laquelle le système Terre Soleil distant de  $1 \text{ u.a.} \simeq 1,5 \cdot 10^{11} \text{ m}$  serait vu sous une seconde d'arc  $= \frac{\pi}{180 \cdot 60 \cdot 60}$ .

6.  $H_0$  s'exprime en seconde<sup>-1</sup>.  $H_0^{-1} = 4 \cdot 10^{-17} \text{ s} = 1,27 \cdot 10^{10} \text{ ans} = 12,7 \text{ Gans}$ .

7. La lumière visible des étoiles lointaines, donc s'éloignant à grande vitesse de la Terre, est décalée vers les basses fréquences donc les grandes longueurs d'onde, et se retrouve dans l'infra-rouge, donc invisible à l'oeil. Seules les étoiles proches sont visibles.

La constante de Hubble est aujourd'hui connue avec une précision de l'ordre de 8%. La première estimation faite par Hubble était assez différente de cette valeur car il se trompait sur la mesure de la distance D entre l'étoile et la Terre.

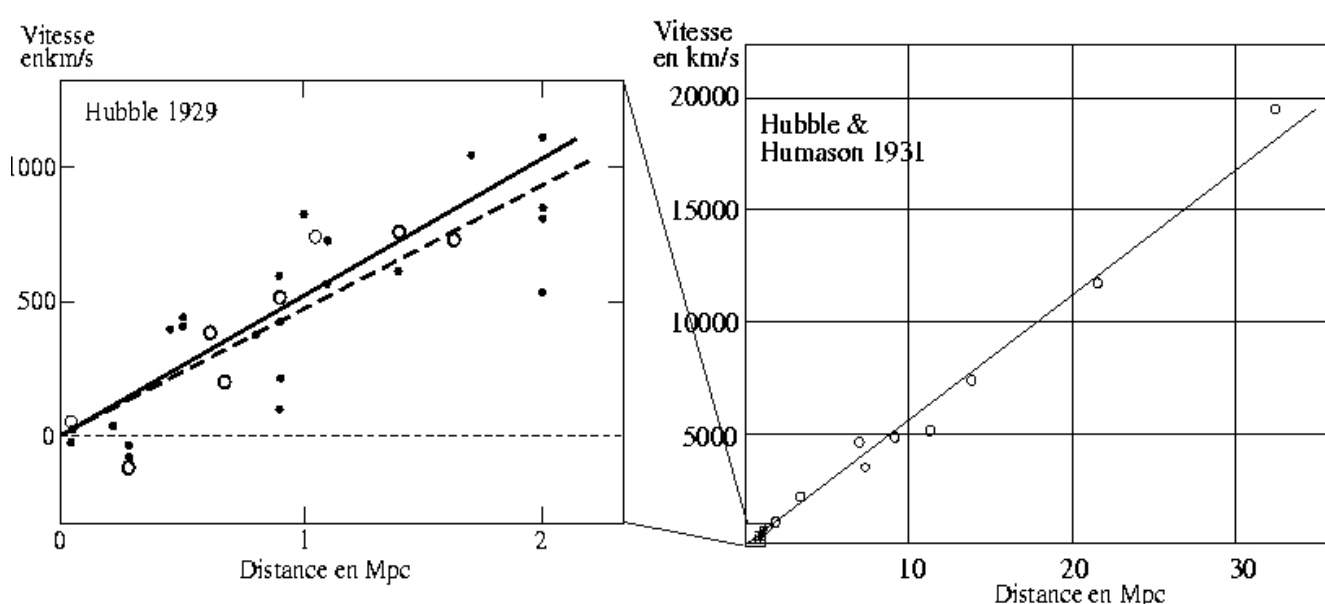


FIGURE 9 – Loi de Hubble, évolution historique

## 6 Exercices non corrigés sur l'effet Doppler.

### 6.1 Boite de nuit.

Un haut-parleur distants de 10 m d'un mur émet un son de fréquence égale à  $f=300 \text{ Hz}$ . La son émis est réfléchi par le mur. Une personne se déplace entre les deux haut-parleurs à la vitesse de 3 m/s. Quelle est la fréquence des battements entendus ?

## 6.2 Vélométrie Doppler.

On envoie des ultrasons de  $f_0 = 5\text{MHz}$  sur des globules sanguins qui s'éloignent à la vitesse  $v$  d'un centimètre par seconde.

On suppose que la célérité de l'onde dans le corps est  $c = 1500\text{m.s}^{-1}$

1. A quelle fréquence les globules sanguins les réémettent-ils ?
2. Quelle est la période du battement qui en résulte ?
3. Reprendre le calcul en supposant que l'angle entre le faisceau sanguin et la sonde est de  $\alpha = 30^\circ$

## 6.3 Regard vers la Grande Ourse.

La Grande Ourse est la troisième plus grande constellation du ciel. Elle contient le « grand chariot » ou « grande casserole », l'un des astérismes les plus connus de l'hémisphère nord, avec ses sept plus brillantes étoiles.

Dubhe ( $\beta$  Ursae Majoris), la deuxième étoile de la constellation, distance de  $d=37,9$  pc (parsec) de la terre, est une supergéante orange, environ 30 fois plus grande que le Soleil. C'est également une étoile double car elle possède un compagnon, moins massif, distant de  $R=23$  ua, qui orbite autour d'elle en  $T=44$  ans.

Chacune des étoiles du système double émet de la lumière dans l'orange  $\lambda = 565,3\text{nm}$ .

Quelles sont les fréquences de la lumière qu'elles nous envoient et que nous percevons depuis la terre ? Rappel : la loi de Hubble affirme que pour une galaxie distante de  $d$ , la vitesse d'éloignement  $v$  est donnée par  $v = H_0.d$  avec  $H_0 = 72\text{km.s}^{-1}.\text{Mpc}^{-1}$  (72 kilomètres par seconde et par mégaparsec).



## Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction à l'effet Doppler.</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>L'effet Doppler pour une onde sonore.</b>	<b>1</b>
2.1	Formule de l'effet Doppler sonore pour un récepteur fixe. . . . .	1
2.1.1	La source se rapproche du récepteur. . . . .	1
2.1.2	La source s'éloigne du récepteur. . . . .	2
2.1.3	Formule de l'effet Doppler pour un récepteur fixe. . . . .	3
2.2	Formule générale de l'effet Doppler sonore. . . . .	5
2.3	Formulaire de l'effet Doppler sonore. . . . .	7
<b>3</b>	<b>L'effet Doppler pour une onde lumineuse.</b>	<b>7</b>
3.1	Introduction qualitative. . . . .	7
3.2	Formulaire de l'effet Doppler lumineux . . . . .	9
<b>4</b>	<b>Exercices sur l'effet Doppler.</b>	<b>10</b>
4.1	L'effet Doppler dans tous ses états. . . . .	10
4.2	Le sous marin : effet Doppler lors d'un aller retour de l'onde. . . . .	11
4.3	Deux interprétations de l'onde sonore dans le tuyau. . . . .	11
4.4	Largeur de raie Doppler. . . . .	11
4.5	Redshift, paradoxe d'Olbers et constante de Hubble. . . . .	12
<b>5</b>	<b>Correction des exercices sur l'effet Doppler.</b>	<b>13</b>
5.1	L'effet Doppler dans tous ses états. . . . .	13
5.2	Le sous marin : effet Doppler lors d'un aller retour de l'onde. . . . .	14
5.3	Deux interprétations de l'onde sonore dans le tuyau. . . . .	14
5.4	Largeur de raie Doppler. . . . .	14
5.5	Redshift, paradoxe d'Olbers et constante de Hubble. . . . .	14
<b>6</b>	<b>Exercices non corrigés sur l'effet Doppler.</b>	<b>15</b>
6.1	Boite de nuit. . . . .	15
6.2	Vélocimétrie Doppler. . . . .	16
6.3	Regard vers la Grande Ourse. . . . .	16