

Leçon de physique

Sophie Kervazo

January 18, 2021

1 Niveau : cycle terminal de l'enseignement secondaire

1.1 Ondes mécaniques

1.2 Phénomènes acoustiques

1.3 Aspects ondulatoires en optique

Jean-Paul Bellier – Montages de physique au CAPES – Chap 7 Interférences lumineuses

1.4 Effet Doppler

Niveau : Spécialité Physique Chimie Terminal **Prè-requis :** signal périodique, ondes progressives, ondes mécaniques, ondes électromagnétiques

1.4.1 Introduction

1.4.2 Description et explication

a) Historique:

Doppler :

Christian Doppler était un mathématicien et physicien autrichien. Il fut professeur de mathématiques et de géométrie pratique à l'École polytechnique de Prague. Sa publication la plus célèbre : Sur la lumière colorée des étoiles doubles et de quelques autres astres du ciel. Cet article met en avant la démonstration du phénomène observé par Doppler, ce qui sera appelé par la suite "l'effet Doppler"

Effet Doppler

Il s'agit de la variation de la fréquence (longueur d'onde) d'une onde mécanique ou électromagnétique en fonction de la vitesse relative de la source et du récepteur.

Hippolyte Fizeau (1819-1896)

Hippolyte Fizeau était un physicien et astronome français. Fizeau devint célèbre

et collabora avec Léon Foucault afin de travailler sur la lumière.

Effet Doppler-Fizeau

L'effet Doppler-Fizeau est le plus généralement utilisé pour les ondes lumineuses. Dans ce cas, il traduit le déplacement des raies du spectre de la lumière reçue par un observateur d'une source lumineuse en mouvement relatif par rapport à celui-ci.

b) Analyse physique du phénomène

Lorsque la source et le récepteur sont en mouvement relatif, le signal émis par la source et celui reçu par le récepteur n'ont pas la même fréquence. Le décalage de fréquence s'exprime alors :

$$\Delta f = f_R - f_S$$

Cela revient à dire que la fréquence d'un signal périodique dépend du référentiel dans lequel il est observé. En effet, la fréquence du signal émis par la source S ne varie pas dans le référentiel de celle-ci. En revanche, pour le récepteur R, lors de l'approche ou de l'éloignement de la source, la fréquence perçue sera différente à cause de l'effet Doppler. Ce phénomène peut être expliqué de la façon suivante :

- La période détectée dans le référentiel lié à la source est appelée période propre et s'exprime de la façon suivante : $T = t_{e2} - t_{e1}$ où t_{ei} est l'instant d'une émission du signal i.
- De même, la période détectée dans le référentiel lié au récepteur est appelée période apparente et s'exprime de la façon suivante : $T_a = t_{r2} - t_{r1}$ où t_{ri} est l'instant de réception du signal i émis par la source.
- Comme la source est en mouvement par rapport au récepteur, la distance entre ces derniers varie. De ce fait, les temps de trajet entre la première émission et sa réception et la deuxième émission et sa réception sont différents :

$$\Delta t_1 = t_{r1} - t_{e1} \neq \Delta t_2 = t_{r2} - t_{e2}$$

On en déduit donc :

$$T_a - T = \Delta t_2 - \Delta t_1$$

ou encore

$$T_a = T + \Delta t_2 - \Delta t_1$$

De ce fait, plusieurs cas peuvent être étudiés :

- Si la source et le récepteur sont immobiles : $T_a = T$
- Si la source s'approche du récepteur immobile (ou si le récepteur s'approche de la source immobile) : $T_a < T$
- Si la source s'éloigne du récepteur immobile (ou si le récepteur s'éloigne de la source immobile) : $T_a > T$
- Si la source et le récepteur sont en mouvement

b) Différents cas

| Nom | Source | Fréquence propre | Vitesse de propagation de l'onde émise par la source | Vitesse de déplacement de la source | Récepteur | Fréquence apparente | Vitesse de déplacement du récepteur |
|----------|--------|------------------|--|-------------------------------------|-----------|---------------------|-------------------------------------|
| Notation | S | f | v | v_s | R | f_a | v_r |

Tableau 1 : Notations utilisées dans l'étude des différents cas

Pour ces différents cas, il sera considéré que $v_s < v$ et $v_r < v$.

Récepteur et source immobiles

S émet un signal de fréquence f. Comme la source est immobile, les trains d'onde successifs arrivent avec la même périodicité (et donc la même fréquence) au niveau du récepteur immobile. Ainsi, il n'y a pas de décalage Doppler (figure 2) : $f_a = f \leftrightarrow T_a = T$

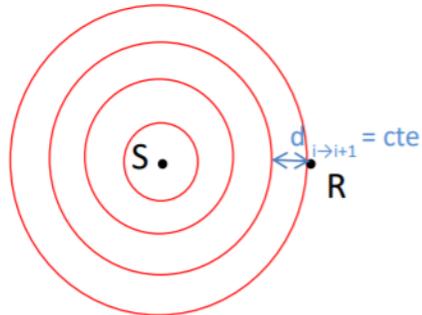


Figure 2 : Illustration de la situation sans effet Doppler

Récepteur immobile et source s'approchant

S émet un signal de fréquence f et de période T .

Le premier front d'onde a donc parcouru la distance $d = v \times T$

Comme la source est en mouvement elle a parcouru, dans le même temps, la distance $d_s = v_s \times T$ avant d'émettre le deuxième front d'onde.

Il est alors possible de calculer la distance séparant les deux fronts d'onde (figure 3) :

$$d_{1 \rightarrow 2} = d - d_s = T(v - v_s)$$

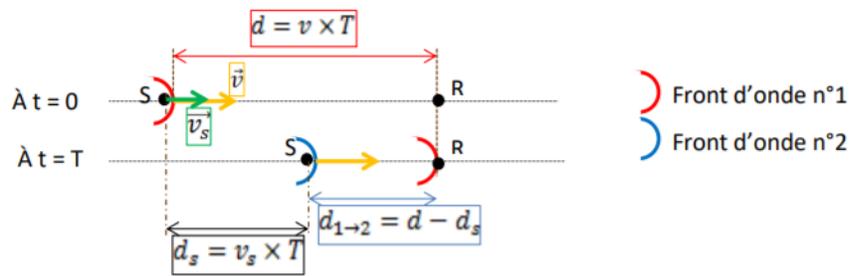


Figure 3 : Schéma explicatif du cas « Récepteur immobile et source s'approchant »

Or, chaque front d'onde ayant la même vitesse de propagation v , l'écart entre deux fronts d'onde successifs sera le même (figure 4). Ainsi, la période apparente s'exprime

$$T_a = \frac{d_{1 \rightarrow 2}}{v} = T \times \frac{(v - v_s)}{v}$$

De ce fait, la fréquence apparente est la suivante :

$$f_a = \frac{1}{T_a} = f \times \frac{v}{(v - v_s)}$$

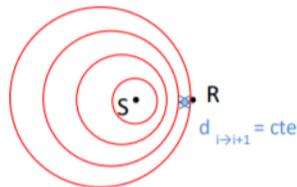


Figure 4 : Illustration de l'effet Doppler lorsque la source s'approche du récepteur

Récepteur immobile et source s'éloignant

Même raisonnement que précédemment, la seule différence est l'expression de $d_{1 \rightarrow 2}$ (figure 5) : $d_{1 \rightarrow 2} = d + d_s = T(v + v_s)$

La fréquence apparente est donc la suivante :

$$f_a = \frac{1}{T_a} = f \times \frac{v}{(v + v_s)}$$

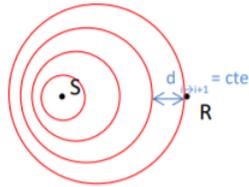


Figure 5 : Illustration de l'effet Doppler lorsque la source s'éloigne du récepteur

Source immobile et récepteur s'approchant

S émet un signal de fréquence f . Ainsi, pendant la période T , la distance parcourue par le premier front d'onde est $d = v \times T$

L'instant $t = T$ est pris comme origine des temps. L'origine spatiale est placée au niveau de la source et le récepteur à la distance d . A un instant t quelconque il est possible d'écrire (figure 6) :

La distance parcourue par le deuxième front d'onde est $d_2(t) = v \times t$

La distance parcourue par le récepteur est $d_r(t) = v \times T - v_r \times t$

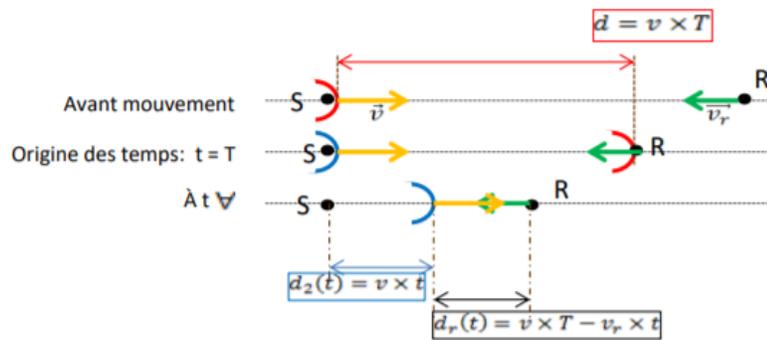


Figure 6 : Schéma explicatif du cas « Source immobile et récepteur s'approchant »

La période apparente est l'instant où le front d'onde et le récepteur vont se rencontrer. Ainsi :

$$v \times T_a = v \times T - v_r \times T_a \rightarrow T_a = T \times \frac{v}{v + v_r}$$

La fréquence apparente s'écrit donc :

$$f_a = f \times \frac{(v + v_r)}{v}$$

Le cas où la sources et les récepteurs sont tout les deux mobiles n'est pas étudié au lycée.

1.4.3 Applications de l'effet Doppler

a) Radar fixe

3.1. Radar fixe

Pour un radar utilisant l'effet Doppler, la source immobile joue également le rôle de récepteur [5]. Le radar émet des micro-ondes avec une fréquence donnée f . Ce signal est alors réfléchi sur la voiture qui le renvoie avec une fréquence différente qui sera détectée par le radar. De ce fait, la vitesse de la voiture peut être déterminée.

Prenons le cas où la voiture s'approche du radar.

- Dans un premier temps, la source (radar) est immobile et le récepteur (voiture) est en mouvement. La fréquence apparente f_{a1} reçue par la voiture est donc la suivante :

$$f_{a1} = f_{\text{onde}} \times \frac{(v_{\text{onde}} + v_{\text{voiture}})}{v_{\text{onde}}}$$

- Dans un second temps, la source (voiture) est en mouvement et le récepteur (radar) est immobile. La réflexion de l'onde ne modifie pas sa fréquence. La fréquence apparente f_{a2} reçue par le radar est donc la suivante :

$$f_{a2} = f_{a1} \times \frac{v_{\text{onde}}}{(v_{\text{onde}} - v_{\text{voiture}})} = \frac{(v_{\text{onde}} + v_{\text{voiture}})}{(v_{\text{onde}} - v_{\text{voiture}})} \times f_{\text{onde}}$$

- Après développement de la formule et isolement de la variable v_{voiture} recherchée, la formule ci-dessous est obtenue :

$$v_{\text{voiture}} = v_{\text{onde}} \times \frac{f_{a2} - f_{\text{onde}}}{f_{a2} + f_{\text{onde}}} = v_{\text{onde}} \times \frac{\Delta f}{f_{a2} + f_{\text{onde}}}$$

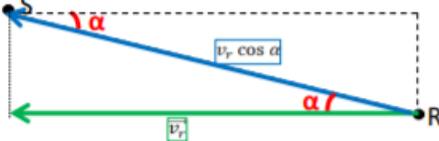
- Pour simplifier cette expression, l'approximation suivante sera faite : comme $v_{\text{voiture}} < v_{\text{onde}}$ alors $f_{a2} \approx f_{\text{onde}} \rightarrow f_{a2} + f_{\text{onde}} \approx 2f_{\text{onde}}$

Ainsi, la vitesse de la voiture s'exprime de la façon suivante :

$$v_{\text{voiture}} = v_{\text{onde}} \times \frac{\Delta f}{2f_{\text{onde}}}$$

Cependant, cette formule s'utilise lorsque le déplacement relatif de la source et du récepteur s'effectue sur un même axe. Dans le cas des radars, il existe un angle entre la source et le récepteur de 25° [6], [7] (figure 9). Ce n'est donc pas la vitesse de la voiture qui est mesurée avec cette formule mais une de ses composantes. Ainsi, il faut tenir compte de cet angle de la

façon suivante :



$$v_r \cos \alpha = v_{\text{onde}} \times \frac{\Delta f}{2f_{\text{onde}}}$$

Ainsi, la vitesse de la voiture s'exprime :

$$v_{\text{voiture}} = \frac{v_{\text{onde}}}{\cos \alpha} \times \frac{\Delta f}{2f_{\text{onde}}}$$

b) Astronomie

3.2.1. Détermination du déplacement des étoiles

L'effet Doppler est utilisé en astronomie pour mesurer la vitesse de déplacement des étoiles par rapport à la Terre. Ceci est possible grâce à l'observation du spectre d'absorption des éléments chimiques d'une étoile en mouvement par rapport à la Terre. En effet, il y a un décalage entre la longueur d'onde apparente absorbée qui est perçue par l'observateur et la longueur d'onde réellement absorbée par les espèces chimiques de l'étoile. Si l'étoile s'approche de la Terre, il y a un décalage des raies d'absorption vers les longueurs d'ondes plus basse : il s'agit du « blueshift ». Au contraire, si l'étoile s'éloigne de la Terre, le décalage s'effectue vers les longueurs d'onde plus grandes : il s'agit du « redshift » (figure 10).

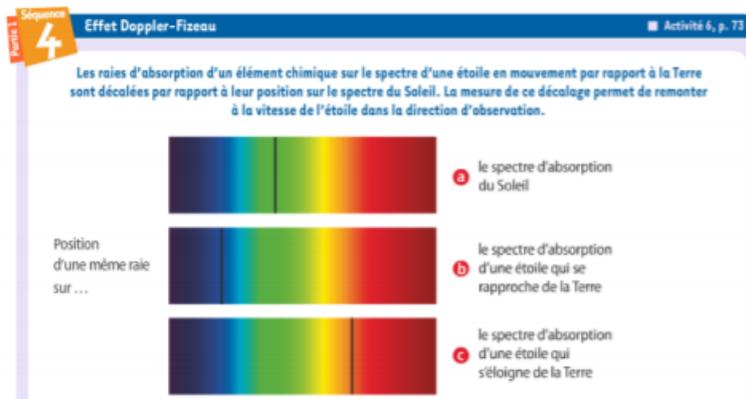


Figure 10 : Illustration du redshift et du blueshift [8]

Le décalage spectral peut être calculé à l'aide de la formule suivante[9] :

$$z = \frac{\lambda_r - \lambda_0}{\lambda_0}$$

Avec λ_0 : longueur d'onde « normalement émise » et λ_r : longueur d'onde reçue par les instruments de mesure optique

Il est possible de lier la vitesse radiale (vitesse de l'étoile le long de la ligne de visée) et le décalage spectral, si la vitesse de l'étoile est petite devant la vitesse de la lumière, par la

formule : $z = \frac{v_r}{c}$

Ainsi, il est possible de déterminer la valeur de la vitesse radiale :

$$v_r = c \times \left(\frac{\lambda_r - \lambda_0}{\lambda_0} \right)$$

Il est important de noter que cette formule ne donne pas la valeur de la vitesse du corps céleste mais uniquement sa composante suivant la ligne de visée.

Si la vitesse de l'étoile n'est pas négligeable devant la vitesse de la lumière, il faut utiliser la formule relativiste suivante :

$$\lambda_r = \lambda_0 \sqrt{\frac{1 + \frac{v_r}{c}}{1 - \frac{v_r}{c}}}$$

$$\text{D'où } v_r = \frac{\lambda_r^2 - \lambda_0^2}{\left(\frac{\lambda_0}{c} + \frac{\lambda_r}{c}\right)}$$

Par extension, l'effet Doppler-Fizeau est la preuve de l'expansion de l'Univers. En effet, les travaux de Shapley et de Hubble sur les nébuleuses ont montré un décalage du spectre vers le rouge, ainsi les nébuleuses s'éloignaient de la Terre. En 1929, « *Hubble découvrit que la vitesse d'éloignement augmentait proportionnellement à la distance de la galaxie* »[10, p. 22].

3.2.2. Détection des exo planètes

L'effet Doppler est également utilisé en astronomie pour la détection des exo planètes. En effet, la révolution d'une planète autour de son étoile produit un léger déplacement de cette dernière. De même que précédemment, l'observation du spectre de l'étoile permet de calculer la vitesse radiale de l'étoile. L'évolution de la vitesse radiale en fonction du temps décrit alors une sinusoïde. Cette sinusoïde est la preuve de la présence d'une exo planète.

3.2.2.1 Exemple de la détection d'une exo planète

L'étude de la position d'une des raies du Sodium ($\lambda_{Na1} = 5889,950 \text{ \AA}$) d'une étoile (à l'aide du logiciel SalsaJ) donne les résultats suivants[11] :

| Spectre | Date t (en jour) | λ_1 (en \AA) | V (en km/s) |
|---------|------------------|--------------------------------|-------------|
| 1 | 0 | 5890,411 | 23,48 |
| 2 | 0.974505 | 5890,496 | 27,81 |
| 3 | 1.969681 | 5890,491 | 27,56 |
| 4 | 2.944838 | 5890,305 | 18,08 |
| 5 | 3.970746 | 5890,014 | 3,26 |
| 6 | 4.886585 | 5889,815 | -6,88 |
| 7 | 5.924292 | 5889,642 | -15,69 |
| 8 | 6.963536 | 5889,638 | -15,89 |
| 9 | 7.978645 | 5889,764 | -9,47 |
| 10 | 8.973648 | 5890,056 | 5,40 |
| 11 | 9.997550 | 5890,318 | 18,74 |

Tableau 2 : Tableau de valeurs de l'étude de la position d'une des raies du Sodium

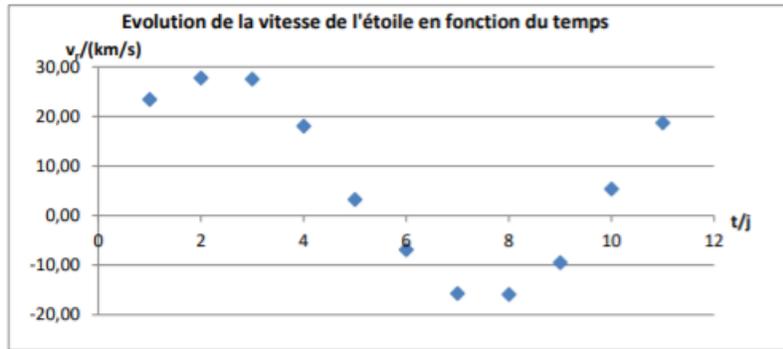


Figure 11 : Graphique montrant l'évolution de la vitesse radiale d'une étoile en fonction du temps
 Le graphique de la figure 10 montre que l'évolution de la vitesse de l'étoile en fonction du temps est périodique, la présence d'une exoplanète est confirmée. Il serait possible avec un logiciel comme Regressi de modéliser cette courbe de façon à obtenir une équation du type : $v_r = v_0 + v_1 \cos(\omega t + \varphi)$. Ceci permettrait de vérifier qu'il s'agit bien d'un signal périodique.

1.4.4 Conclusion

1.5 Phénomènes de polarisation optique

1.6 Aspects énergétiques de phénomènes physiques

1.7 Aspects énergétiques de phénomènes physiques

Jean-Paul Bellier – Montages de physique au CAPES mécanique Chap 9 Electromagnétique Energie thermique ?

1.8 Transmission de l'information

Transmission optique d'un son – Les cahiers techniques, travaux pratiques et montage de physique

1.9 Images et couleurs

1.10 Instruments optiques

Jean-Paul Bellier – Montages de physique au CAPES Microscope - FAIT Lunette astronomique Téléobjectif

1.11 Sources de lumières

1.12 Gravitation et poids

Jean-Paul Bellier – Montages de physique au CAPES Chap11

1.13 Transferts thermiques

Jean-Paul Bellier – Montages de physique au CAPES Chap 16

1.14 Interactions lumière-matière

Jean-Paul Bellier – Montages de physique au CAPES Réfraction p26 Prismes et réseaux

1.15 Mouvements, interactions et notion de champ

1.16 Modélisation de l'écoulement d'un fluide

1.17 Transmission et stockage de l'information

Jean-Paul Bellier – Montages de physique au CAPES Chap 15

2 Niveau : deux premières années de l'enseignement supérieur

- Spectres
 - Effet Doppler Expérience du train (voir TP L1) • Conservation de l'énergie (9) Jean-Paul Bellier – Montages de physique au CAPES • Acquisition et traitement de données échantillonnage quantification de la mesure – oscillo numérique repliment de spectre – fourrier
 - Transferts thermiques (8) Alexis Dumont (les montages à l'agrégation interne) • Phénomènes de diffusion
 - Oscillations (25-11) Alexis Dumont (les montages à l'agrégation interne)
- Mesures et contrôle sensibilité – retroaction – système bouclé Notion de dispersion et de statistique dans les mesures - Les cahiers techniques, travaux pratiques et montage de physique
 - Régimes transitoires Alexis Dumont (les montages à l'agrégation interne)
- Mouillage
 - Machines thermiques P43
 - Phénomènes de transport P44
 - Filtrages Alexis Dumont (les montages à l'agrégation interne) • Viscosité
- (3) P8
 - Écoulements de fluides (4) P8
 - Irréversibilité diffusion frottement absorption bilan entropique

- Phénomènes de polarisation optique P31 Duffait optique Chap VIII et Chap IX Alexis Dumont (les montages à l'agrégation interne)

3 Conclusion

“I always thought something was fundamentally wrong with the universe”