

# Chapitre 5 - Propriétés des ondes: l'effet Doppler

## Activité 1 : à propos de la sirène des pompiers

*Lien entre mouvement de la source sonore et fréquence du son perçu*

### But de l'activité :

Introduire l'effet Doppler et arriver à la conclusion : si une source sonore se rapproche d'un observateur fixe, sa fréquence est plus élevée que si elle est immobile ; si la source s'éloigne de lui, sa fréquence est plus basse.

### Compétences travaillées :

compétence du BO		Explication
***	Définir, pour une onde progressive sinusoïdale, la période, la fréquence et la longueur d'onde.	
*	Réaliser l'analyse spectrale d'un son musical et l'exploiter pour en caractériser la hauteur et le timbre.	Pour traiter cette activité les élèves doivent associer les affirmations « le son est plus grave » à « la fréquence de l'onde a baissé »

**Objectif :** Ecouter des sons dans différentes situations où se manifeste l'effet doppler pour établir un lien entre l'évolution de la fréquence du son perçu et le mouvement de la source sonore.

► Écouter l'extrait sonore diffusé dans la salle de classe.

### Questions :

- Si on ne considère que le « pin » du « pin-pon » joué par la sirène des pompiers, comment sa hauteur évolue-t-elle entre le début et la fin de l'extrait sonore ?
- En utilisant votre expérience personnelle, quelle différence y a-t-il entre le mouvement du camion par rapport au micro qui enregistre sa sirène :
  - au début de l'extrait sonore
  - à la fin de cet extrait ?
- Exploiter les deux réponses précédentes pour établir un lien entre la fréquence du son perçu et le mouvement de la source
- Autre situation :** frapper un diapason et lui faire faire des allers et retours au voisinage de votre oreille (rapprocher puis éloigner le diapason de votre oreille). Décrire l'effet auditif produit et vérifier que l'effet décrit à la question (c) est bien reproduit ici.

### Corrigé

- La note est plus aigüe au début et plus grave à la fin de l'extrait.
- Au début le camion se rapproche du micro et à la fin il s'en éloigne.
- Plus la fréquence d'une onde sonore est élevée, plus le son est perçu comme aigu.  
Donc :
  - Lorsque la source se rapproche du récepteur la fréquence des ondes sonores reçues est plus élevée que celle des ondes sonores émises.
  - Lorsque la source s'éloigne du récepteur la fréquence des ondes sonores reçues est plus faible que celle des ondes sonores émises.
- On observe bien que le son produit par le diapason est plus aigu lorsque celui-ci se rapproche de l'oreille et plus grave lorsqu'il s'en éloigne.

## Activité 2 : Trois matelots observent des vagues

*Première interprétation à l'aide d'une analogie*

### But de l'activité :

Utiliser une analogie entre les ondes sonores et les vagues à la surface de l'eau pour interpréter les effets du mouvement relatif de la source et du récepteur sur la fréquence du son perçu.

### Compétences travaillées :

	compétence du BO	Explication
***	Définir, pour une onde progressive sinusoïdale, la période, la fréquence et la longueur d'onde.	

**Objectif :** Utiliser le modèle des ondes progressives périodiques pour étudier comment varient les fréquences et périodes des ondes mécaniques observées par des observateurs ayant des mouvements différents.

*Trois matelots, sur trois bateaux différents, utilisent leurs téléphones pour discuter de l'état de la mer. Le premier matelot a jeté l'ancre mais pas les deux autres. Le premier matelot dit à ses collègues :*

*« La mer est agitée. Les vagues n'arrêtent pas de taper, on prend une grosse secousse toutes les secondes ! »*

*Le second matelot lui répond : « Viens par ici car c'est plus tranquille pour moi, on a bien 2 secondes entre chaque secousse ! ».*

*Le troisième dit : « Moi j'ai le mal de mer... j'aimerais bien qu'il y ait moins de vagues... »*

### Questions :

- Pour comprendre cette conversation, on modélise les vagues comme des ondes mécaniques périodiques. Que vaut leur fréquence ? Justifier à l'aide des propos d'un des matelots.
- Proposer une explication à la réponse du second matelot, qui fait intervenir le mouvement de son bateau.
- Reformuler la phrase prononcée par le 3<sup>ème</sup> matelot en utilisant un vocabulaire de physicien, emprunté au modèle des ondes mécaniques périodiques.
- Que peut-on suggérer au 3<sup>ème</sup> matelot, à propos du mouvement de son bateau, pour résoudre son problème ?
- La situation envisagée ici et celle de l'activité précédente présentent des similitudes et des différences. On souhaite les rassembler dans le tableau ci-après.

	situation de l'activité 2 (les trois matelots)	situation de l'activité 1 (le camion de pompiers)
Quelles ondes interviennent ?		
Est-ce la source ou le récepteur qui se déplace ?		
À quelle condition sur le mouvement relatif de la source et du récepteur la fréquence		

des ondes reçues augmente-t-elle ?		
À quelle condition sur le mouvement relatif de la source et du récepteur la fréquence des ondes reçues diminue-t-elle ?		

**Corrigé**

- (a) Le 1<sup>er</sup> matelot, qui est immobile par rapport à la mer, indique qu'une vague par seconde atteint sa proue. Leur fréquence vaut donc :  $f = 1 \text{ Hz}$
- (b) S'il est en mouvement dans un sens contraire aux vagues, cela peut expliquer qu'il perçoive les vagues avec une fréquence plus élevée que s'il était immobile.
- (c)
- (d) « J'aimerais que la fréquence des ondes mécaniques à la surface de l'eau diminue ! »
- (e) S'il se met en mouvement dans le même sens que celui dans lequel les vagues se propagent, la fréquence des ondes perçues va diminuer.
- (f)

	situation de l'activité 2 (les trois matelots)	situation de l'activité 1 (le camion de pompiers)
Quelles ondes interviennent ?	ondes mécaniques à la surface de l'eau	ondes sonores
Est-ce la source ou le récepteur qui se déplace ?	le récepteur (bateau)	la source (le camion)
À quelle condition sur le mouvement relatif de la source et du récepteur la fréquence des ondes reçues augmente-t-elle ?	si la source et le récepteur se rapprochent l'un de l'autre	
À quelle condition sur le mouvement relatif de la source et du récepteur la fréquence des ondes reçues diminue-t-elle ?	si la source et le récepteur s'éloignent l'un de l'autre	

### Activité 3 : Représentations d'une onde sonore pour une source en mouvement ou non

*Interprétation de l'effet Doppler à l'aide du modèle des ondes périodiques*

**Buts de l'activité :**

Comprendre ce que représentent les schémas présents dans les manuels. Établir la relation entre fréquence émise et fréquence reçue, d'abord qualitativement, puis quantitativement.

**Compétences travaillées :**

	compétence du BO	Explication
***	Définir, pour une onde progressive sinusoïdale, la période, la fréquence et la longueur d'onde.	

***	Connaître et exploiter la relation entre la période ou la fréquence, la longueur d'onde et la célérité.	Dans la 1 <sup>ère</sup> partie les élèves doivent associer l'augmentation de la longueur d'onde à la diminution de la fréquence (et vice versa). Dans la 2 <sup>ème</sup> partie les élèves doivent utiliser la relation sous sa forme littérale pour obtenir la relation choisie.
*	Réaliser l'analyse spectrale d'un son musical et l'exploiter pour en caractériser la hauteur et le timbre.	Pour traiter cette activité les élèves doivent associer les affirmations « le son est plus grave » à « la fréquence de l'onde a baissé »

**Objectif :** Utiliser le modèle des ondes progressives périodiques pour établir qualitativement puis quantitativement une relation entre le mouvement relatif de l'émetteur et de la source sonore et les fréquences émises et perçues.

### 1<sup>ère</sup> partie :

#### Interprétation qualitative

L'effet que nous avons observé lors de l'activité 1, lorsqu'il concerne les ondes sonores, est appelé « effet Doppler ». Voici deux illustrations censées interpréter l'effet Doppler et inspirées des schémas que l'on trouve sur internet :

Figure 1 : la source est immobile

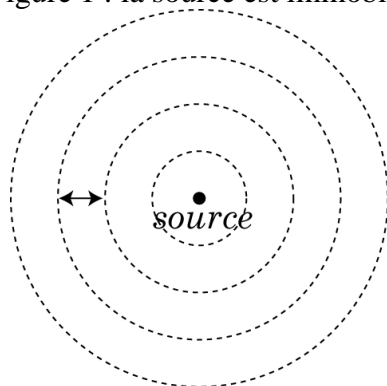
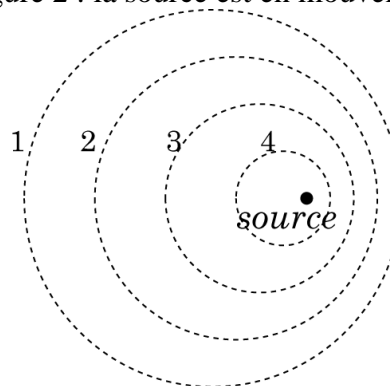


Figure 2 : la source est en mouvement



#### Questions :

- Que peuvent représenter les cercles en pointillés sur cette figure ? Utiliser le modèle des ondes sonores pour répondre.
- Quelle distance particulière est représentée par une double flèche sur la figure 1 ?
- Sur la figure 2, représenter par des points S1, S2, S3 et S4 les positions successives de la source lorsqu'elle a généré les perturbations 1, 2, 3 et 4.
- Sur la figure 2, indiquer dans quelle zone le son perçu est le plus grave et dans quelle zone il est le plus aigu. Justifier en utilisant la figure et le modèle des ondes sonores.

### 2<sup>ème</sup> partie (facultative) :

#### Obtention d'une relation entre les fréquences des ondes émises et reçues

On considère une source sonore émettant une onde sonore périodique, de fréquence  $f$ , de période  $T$ , de longueur d'onde  $\lambda$  et de célérité  $c$ . Cette source sonore est en mouvement rectiligne uniforme à la vitesse  $v$  par rapport à un récepteur. La source sonore est en mouvement vers le récepteur.



#### Questions :

- Exprimer la distance sur laquelle l'onde s'est propagée pendant une période  $T$  de l'onde.
- Exprimer la distance parcourue par la source pendant cette même durée  $T$ .

(c) La longueur d'onde de l'onde reçue est notée  $\lambda'$ . Montrer que  $\lambda'$  s'exprime par :

$$\lambda' = \lambda - vT$$

(d) En déduire la relation entre la fréquence  $f'$  de l'onde reçue et la fréquence  $f$  de l'onde émise :

$$f' = f \frac{c}{c - v}$$

(e) Vérifier que cette relation rend bien compte de ce que nous avons affirmé précédemment : le son perçu est plus aigu lorsque la source se rapproche du récepteur.

(f) Que devient la relation de la question (d) lorsque la source s'éloigne du récepteur ? Utiliser la nouvelle relation obtenue pour interpréter, dans cette nouvelle situation, la modification de la hauteur du son perçu.

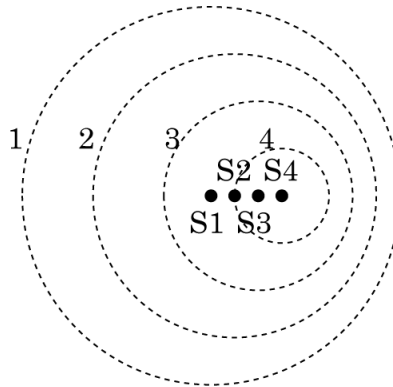
### Corrigé

#### 1<sup>ère</sup> partie :

(a) Il s'agit d'une zone identiquement perturbée. Il peut s'agir, par exemple, des zones de compression.

(b) Il s'agit de la longueur d'onde de l'onde sonore émise par la source.

(c)



(d) Plus la fréquence de l'onde sonore est élevée, le son est perçu comme aigu. Or fréquence et longueur d'onde sont inversement proportionnelles. Donc :

- du côté gauche : la longueur d'onde est plus grande, la fréquence est donc plus faible et le son est perçu comme plus grave.
- du côté droit : la longueur d'onde est plus faible, la fréquence est donc plus élevée et le son est perçu comme plus aigu.

#### 2<sup>ème</sup> partie (facultative) :

(a) distance :  $cT$

(b) distance :  $vT$

(c)  $\lambda' = cT - vT = \lambda - vT$

(d) La relation précédente donne :

$$\lambda' = \lambda - vT$$

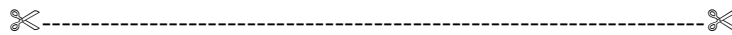
$$\frac{c}{f'} = \frac{c}{f} - \frac{v}{f} = \frac{c - v}{f}$$

$$f' = f \frac{c}{c - v}$$

(e) Cette relation indique que  $f' > f$ , l'onde sonore reçue a donc une fréquence plus élevée, le son est alors perçu comme plus aigu que si la source est immobile.

(f) La relation (d) devient dans ce cas :  $f' = f \frac{c}{c+v}$

Cette fois  $f' < f$  : le son est alors perçu plus grave que lorsque la voiture est immobile, ce qui est compatible avec ce que nous avons affirmé dans l'activité 1.



#### Activité 4 : Mesure de la vitesse d'un véhicule

*Comment exploiter l'effet Doppler pour mesurer une vitesse ? (activité expérimentale)*

##### Buts de l'activité :

Exploiter la relation entre le décalage Doppler et la vitesse pour mesurer la vitesse d'une source. Pratiquer pour cela une « démarche expérimentale ».

##### Compétences travaillées :

	compétence du BO	Explication
***	Connaître et exploiter la relation entre la période ou la fréquence, la longueur d'onde et la célérité.	S'ils mesurent au réticule, les élèves utilisant la relation $f = 1/T$ pour trouver la fréquence
*	Mettre en œuvre une démarche expérimentale pour mesurer une vitesse en utilisant l'effet Doppler.	
*	Exploiter l'expression du décalage Doppler de la fréquence dans le cas des faibles vitesses.	
	Identifier les différentes sources d'erreur (de limites à la précision) lors d'une mesure : variabilités du phénomène et de l'acte de mesure (facteurs liés à l'opérateur, aux instruments, etc.).	
	Évaluer l'incertitude d'une mesure unique obtenue à l'aide d'un instrument de mesure.	

**Objectif :** Utiliser l'expression du décalage Doppler pour proposer puis mettre en œuvre une expérience permettant de mesurer la vitesse d'un véhicule à partir du son qu'elle émet. Analyser les conditions de l'expérience et les incertitudes de mesure pour vérifier que le décalage de fréquence est bien dû à l'effet Doppler.

##### Donnée : expression du décalage Doppler

On appelle « décalage Doppler » la différence  $\delta f$  entre la fréquence de l'onde sonore émise par la source en mouvement et celle de l'onde reçue.

Si la vitesse de la source est très faible devant la célérité des ondes sonores, le décalage Doppler vaut, en valeur absolue :

$$|\delta f| \approx f \frac{v}{c}$$

#### 1<sup>ère</sup> partie : mesure d'une vitesse en utilisant l'effet Doppler

##### Situation :

Une voiture à friction est astreinte à se déplacer sur un rail (un banc d'optique par exemple).

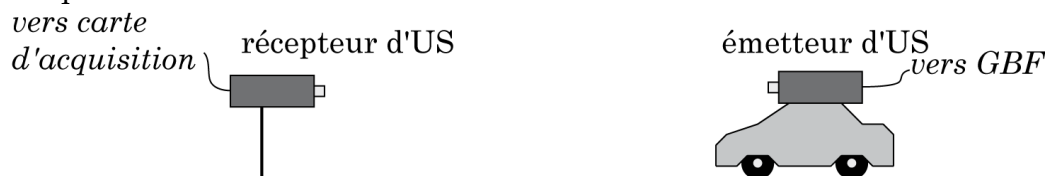
**Votre travail :**

Avec le matériel présent sur votre paillasse, vous devez exploiter l'effet Doppler pour mesurer la vitesse de la voiture lorsqu'elle est lancée sur son rail.

Pour cela : décrire le principe d'une expérience permettant cela. Indiquer, en particulier, quel dispositif est envisagé et quelle(s) grandeur(s) il faut mesurer.

**Protocole (à donner aux élèves après la mise en commun des dispositifs envisagés) :**

- Alimenter un émetteur d'ultrasons à l'aide d'un GBF délivrant une tension sinusoïdale de fréquence 40 kHz.
- Sur le toit de la petite voiture, fixer cet émetteur d'ultrasons avec un ruban adhésif. La voiture se déplacera sur un rail (un banc d'optique par exemple).
- Fixer un récepteur d'ultrasons à une extrémité du banc d'optique, à la même hauteur que l'émetteur.



- Brancher le récepteur sur une carte d'acquisition et programmer le logiciel pour réaliser une acquisition de 10000 points environs, pendant une durée correspondant à une vingtaine de périodes de l'onde sonore.
- Réaliser une première acquisition du signal reçu, la voiture étant immobile, à 10 cm environ du récepteur.
- Exploiter les fonctionnalités du logiciel (curseur, réticule...) pour mesurer la période  $T$  du signal reçu. En déduire la valeur de sa fréquence  $f$ .
- Nous devons maintenant programmer une acquisition similaire, la voiture étant cette fois en mouvement sur son rail.

Dans ce but, programmer un déclenchement à une valeur suffisamment élevée pour que l'acquisition débute lorsque la voiture se trouve à 10 cm environ du récepteur. Pour cela, noter la valeur maximale du signal reçu lors de la première acquisition et la reporter dans la rubrique « déclenchement » du logiciel utilisé.

- Réaliser une seconde acquisition, la voiture étant, cette fois, en mouvement vers le récepteur.
- Exploiter les fonctionnalités du logiciel (curseur, réticule...) pour mesurer la période  $T'$  du signal reçu. En déduire la valeur de sa fréquence  $f'$ .

**Exploitation des expériences :**

Exploiter les deux valeurs de fréquence obtenues pour calculer la valeur  $v$  de la vitesse de la voiture au moment de l'acquisition du signal. Dans ce compte rendu, ne pas tenir compte des chiffres significatifs, la question de la précision sera abordée en 2<sup>nd</sup>e partie.

**2<sup>ème</sup> partie : discussion sur les résultats obtenus**

Cette deuxième partie a pour objectif de répondre à la question qu'on est en droit de se poser suite à l'expérience précédente : le décalage Doppler que nous avons mesuré est-il vraiment la conséquence du mouvement de la voiture ou peut-il s'agir d'un décalage dû aux incertitudes sur les mesures de fréquence ?

**Questions :**

- (a) Collecter les résultats des mesures réalisées par les autres binômes de la classe. Qu'ont ces mesures en commun ? Ce constat suggère-t-il que notre résultat est la conséquence de l'effet Doppler ou d'une erreur de mesure ?

- (b) Estimer l'incertitude  $\Delta t$  lors de la mesure d'une date avec le logiciel utilisé.  
 (c) En déduire l'incertitude  $\Delta T$  sur la mesure d'une période par la méthode choisie.  
 (d) On admet que les incertitudes relatives sur la fréquence et la période sont égales :

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta T}{T}$$

Calculer les incertitudes sur les mesures des fréquences  $f$  et  $f'$  et répondre à la question posée en préambule : le décalage Doppler que nous avons mesuré dans la première partie est-il vraiment la conséquence du mouvement de la voiture ou s'agit-il d'un décalage dû aux incertitudes ?

- (e) L'incertitude relative de la valeur de la vitesse calculée dans la 2<sup>de</sup> partie s'exprime par :

$$\frac{\Delta v}{v} = \sqrt{\left(\frac{\Delta f}{f}\right)^2 + \left(\frac{\Delta(\delta f)}{\delta f}\right)^2}$$

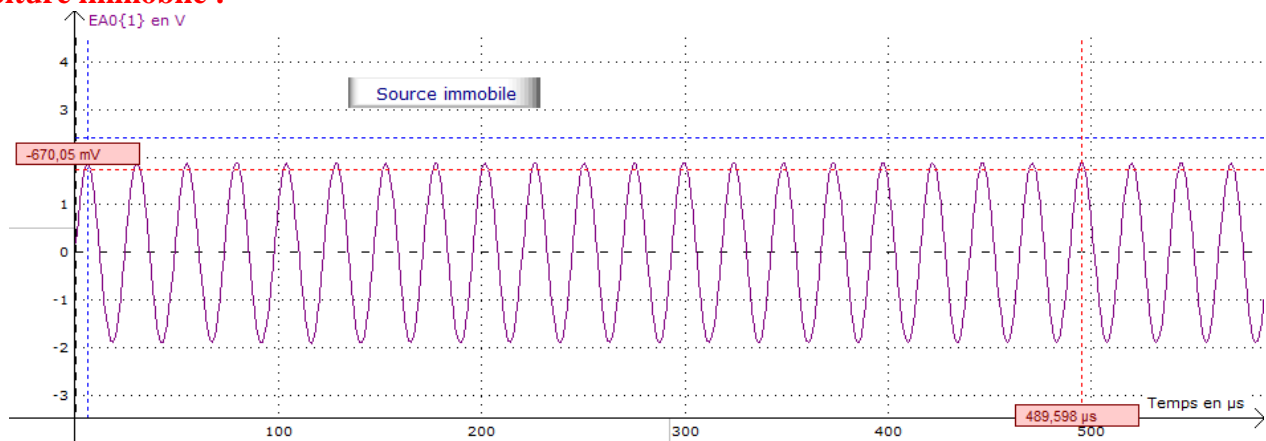
En déduire l'incertitude  $\Delta v$  et présenter la valeur de la vitesse de la petite voiture sous la forme :  $v = \dots \pm \dots \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

## Corrigé

### 1<sup>ère</sup> partie : mesure d'une vitesse en utilisant l'effet Doppler

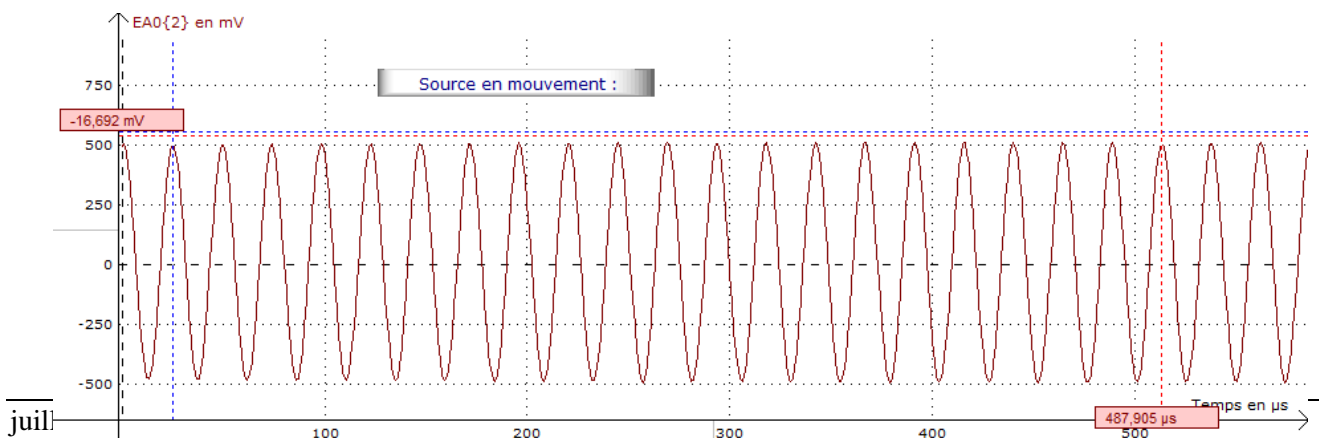
#### Exploitation des expériences :

##### Voiture immobile :



- Mesure de 20 périodes :  $20 T = 489,60 \mu\text{s}$
- Donc  $T = 24,480 \mu\text{s}$
- Donc  $f = 40850 \text{ Hz}$

##### Voiture en mouvement :





- Mesure de 20 périodes :  $20 T = 487,905 \mu\text{s}$
- Donc  $T = 24,395 \mu\text{s}$
- Donc  $f = 40991 \text{ Hz}$

Décalage Doppler :  $\delta f = 141 \text{ Hz}$

Vitesse de la voiture :  $v = c \frac{\delta f}{f} = 1,20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

- (a) Toutes les fréquences mesurées alors que la voiture est en mouvement sont supérieures à celles mesurées lorsqu'elle est immobile. Cela plaide en faveur d'une mesure d'un décalage Doppler.
- (b) Sans modification de l'échelle du graphique :  $\Delta t = 0,5 \mu\text{s}$
- (c) On mesure 2 dates qui séparent 20 périodes. Donc  $\Delta T = 2\Delta t / 20 = 0,05 \mu\text{s}$ .
- (d) Incertitude sur la mesure d'une fréquence :

$$\Delta f = f \cdot \Delta T / T = 80 \text{ Hz}$$

Ce calcul montre que le décalage Doppler est plus élevé que l'incertitude sur la mesure d'une fréquence. Le décalage en fréquence que nous mesurons peut donc être imputé à l'effet Doppler et non à une erreur de mesure.

Cependant l'ordre de grandeur du décalage Doppler est le même que celui de l'incertitude sur une mesure de fréquence. Notre mesure de vitesse est donc très grossière.

- (e) On trouve :  $\Delta v = 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$   
D'où, finalement :  $v = 2 \pm 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

## Activité 5 : un moyen d'investigation en astrophysique

→ Les livres fourmillent d'activités documentaires avec support informatisé...