

ONDES SONORES & EFFET
DOPPLER

Compétences visées:

- Exploiter l'expression donnant le niveau d'intensité sonore d'un signal.
- Décrire qualitativement les observations correspondant à une manifestation de l'effet Doppler.
- Expliquer qualitativement l'effet Doppler.
- Établir l'expression du décalage Doppler dans le cas d'un observateur fixe, d'un émetteur mobile et dans une configuration à une dimension.
- Exploiter l'expression du décalage Doppler dans des situations variées utilisant des ondes acoustiques ou des ondes électromagnétiques.

Exercices :

1. Manipulation de base
2. Atténuation géométrique d'une onde sonore
3. Atténuation par absorption d'une onde sonore

[...]

Version Numérique :

Ce cours est disponible en **version numérique**.
Vous pouvez y accéder en scannant le **QR Code**
ci-contre :



Table des matières

I	Les ondes sonores	3
A	Rappels	3
A-1	Fréquence et période	3
A-2	Fréquence	3
A-3	Audibilité	4
B	Intensité sonore & Niveau d'intensité sonore	5
B-1	Intensité sonore	5
B-2	Niveau d'intensité sonore	5
C	Atténuation des ondes sonores	6
C-1	Atténuation géométrique	6
C-2	Atténuation par absorption	8
II	L'effet Doppler	11
A	Généralité	11
B	Formule et démonstration	11
B-1	Formule	11
B-2	Démonstration	12

I Les ondes sonores

A Rappels

Propriété : Ondes sphériques

Une onde sonore émise par une **source ponctuelle** est **sphérique** et se propage de manière **isotrope**, c'est-à-dire que la perturbation se diffuse uniformément dans toutes les directions de l'espace.

On appelle **Longueur d'Onde** (noté λ) la **distance** entre deux fronts d'ondes.

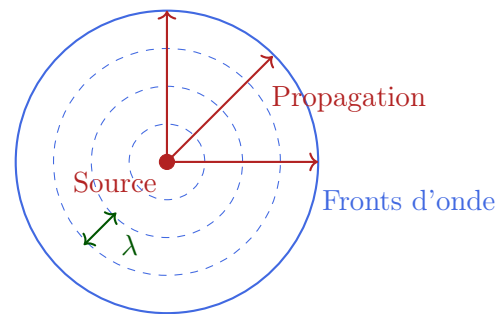


FIGURE 1 – Ondes sphériques

A-1 Fréquence et période

Définition : Période

La durée minimale après laquelle le signal se répète est appelée la **période** T .

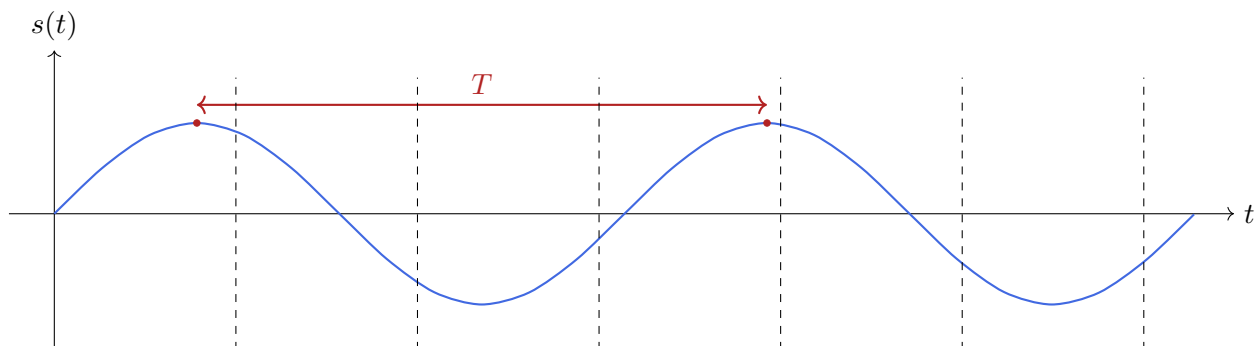


FIGURE 2 – Période d'un signal

A-2 Fréquence

Définition : fréquence

La **fréquence** d'un signal périodique est le nombre de cycles complets que le signal effectue en une seconde. Elle est notée par la lettre f et se mesure en hertz (Hz). La fréquence est définie par la relation suivante :

$$f = \frac{1}{T} \quad (1)$$

où T est la **période** du signal, c'est-à-dire la durée d'un cycle complet du signal.

Remarque

La relation entre la fréquence f et la période T est réciproque :

$$T = \frac{1}{f} \quad (2)$$

Ainsi, si la fréquence d'un signal augmente, la période diminue proportionnellement, et vice versa.

A-3 Audibilité

Propriété : Sensibilité humaine

Pour qu'un être humain soit capable d'entendre un son, il y a deux impératifs :

- la fréquence de l'onde sonore doit être située entre **20 Hz et 20 kHz**.
- l'intensité sonore doit être supérieure à **l'intensité sonore de référence (ou seuil d'audibilité)** : $I_0 = 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Remarque

Ce **seuil d'audibilité** dépend de pleins de facteurs comme la génétique, l'âge, la fréquence...

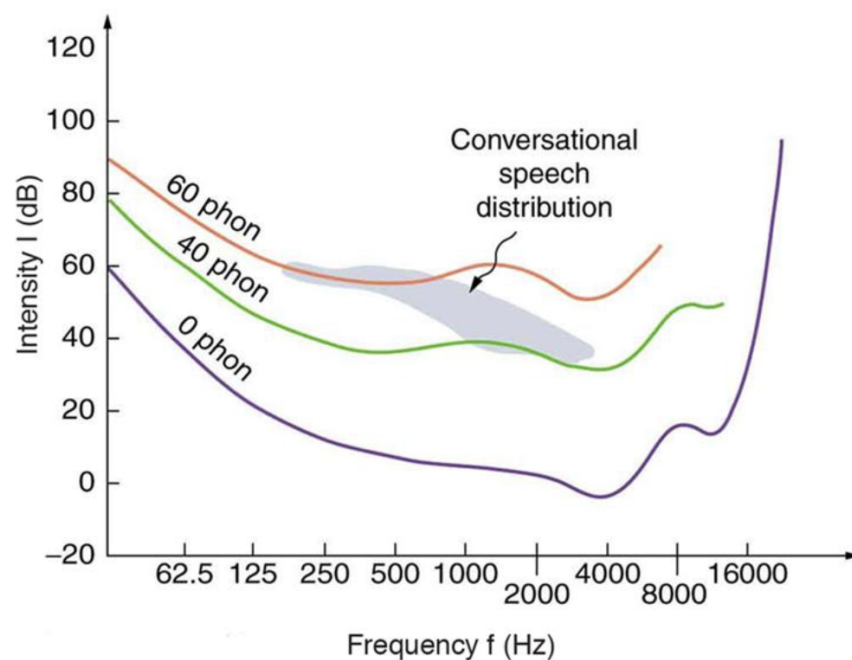


FIGURE 3 – <https://texasgateway.org/resource/176-hearing>

Sur ce graphique, les **40 phon** et **60 phon** correspondent au pourcentage d'audition perdu, 40 phon est équivalent à 40% d'audition en moins).

B Intensité sonore & Niveau d'intensité sonore

B-1 Intensité sonore

Définition : Intensité sonore

L'intensité sonore I correspond à la puissance sonore reçue par unité de surface.

$$I = \frac{P_s}{S} = \frac{P_s}{4\pi R^2}$$

avec P_s la puissance sonore en W et $S = 4\pi R^2$ la surface d'une sphère en m^2 .

Remarque

L'intensité sonore varie sur une très large plage.

L'intensité sonore que l'oreille humaine peut percevoir varie d'environ :

$$I_0 = 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \quad (\text{seuil d'audibilité})$$

jusqu'à :

$$I \approx 1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \quad (\text{seuil de douleur})$$

Cela représente une plage de plus d'un trillion de fois (facteur 10^{12}) ! Une telle plage est beaucoup trop large pour être manipulée aisément avec des nombres usuels.

C'est pourquoi nous introduisons une nouvelle grandeur afin de facilement comparer les intensités sonores : le **niveau d'intensité sonore**.

B-2 Niveau d'intensité sonore

Définition : Niveau d'intensité sonore

L'unité du niveau d'intensité sonore est le décibel dB. Il se calcule à partir de l'intensité sonore I :

$$L = 10 \cdot \log \left(\frac{I}{I_0} \right)$$

Exercice 1 Manipulation de base (★)

On rappelle la relation entre le niveau d'intensité sonore L (en dB) et l'intensité sonore I (en $W \cdot m^{-2}$) :

$$L = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right), \quad \text{avec} \quad I_0 = 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Q1 Calculer le niveau d'intensité sonore L correspondant à une intensité $I = 10^{-10} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Q2 Déterminer l'intensité sonore I correspondant à un niveau sonore $L = 60$ dB.

Q3 Calculer les niveaux sonores correspondant aux intensités suivantes :

- $I_1 = 4,0 \times 10^{-12} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$
- $I_2 = 8,0 \times 10^{-12} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$

Que remarquer lorsque l'intensité double ?

C Atténuation des ondes sonores

C-1 Atténuation géométrique

Propriété : Atténuation géométrique

Lorsqu'une onde sonore se propage à partir d'une source ponctuelle dans un milieu homogène et isotrope, son intensité diminue avec le carré de la distance d :

$$I(R) = \frac{P}{4\pi d^2}$$

Cette diminution, appelée **atténuation géométrique**, est due à la répartition de l'énergie sur une surface sphérique croissante. Elle s'exprime aussi par la différence de niveaux sonores :

$$A = L_{\text{proche}} - L_{\text{éloigné}} = 10 \cdot \log \left(\frac{I_{\text{proche}}}{I_{\text{éloigné}}} \right) = 20 \cdot \log \left(\frac{d_2}{d_1} \right)$$

**Exercice 2****Atténuation géométrique d'une onde sonore (★)**

Une source ponctuelle émet une puissance sonore P dans toutes les directions de manière isotrope. L'intensité sonore I à une distance R de la source s'exprime par la relation :

$$I(R) = \frac{P}{4\pi R^2}.$$

Q1 Soient deux individus situés à des distances R_1 et $R_2 = 2R_1$ de la source. Exprimez le rapport des intensités sonores $\frac{I_2}{I_1}$.

Q2 En déduire la variation de l'intensité sonore lorsque la distance à la source est doublée.

Q3 Sachant que le niveau sonore L en décibels est défini par

$$L = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right),$$

où I_0 est l'intensité de référence, calculez la différence de niveau sonore $L_2 - L_1$ entre les deux positions.

Q4 Quelle est la conséquence pratique de ce résultat sur la perception du son lorsqu'on s'éloigne d'une source ponctuelle ?

C-2 Atténuation par absorption

Propriété : Atténuation par absorption

Lorsqu'une onde sonore traverse un matériau, une partie de l'énergie est absorbée par le milieu. Cette **atténuation par absorption** se traduit par une diminution du niveau sonore entre l'entrée et la sortie du matériau. Elle est donnée par la relation :

$$A = L_{\text{incident}} - L_{\text{transmis}}$$

où :

- L_{incident} est le niveau sonore avant le matériau,
- L_{transmis} est le niveau sonore après le matériau.



Exercice 3

Atténuation par absorption d'une onde sonore (★)

Une onde sonore frappe une cloison. Le niveau sonore juste avant la cloison est de $L_{\text{incident}} = 85$ dB. Le niveau mesuré de l'autre côté de la cloison est $L_{\text{transmis}} = 60$ dB.

Q1 Calculez l'atténuation apportée par la cloison.

Q2 Interprétez physiquement ce résultat. Qu'est-ce que cela signifie sur l'efficacité acoustique de la cloison ?

Q3 Un second matériau donne une atténuation de $A = 30$ dB. Est-il plus ou moins performant que le premier ?

**Exercice 4****Un déluge d'eau pour se protéger du bruit - Bac Métropole 2 2025 (★ ★)**

Le 9 juillet 2024, la fusée Ariane 6 a décollé avec succès depuis le Centre spatial guyanais de Kourou.

Au moment du décollage, 800 000 litres d'eau sont déversés sur le pas de tir (au pied de la fusée) en quelques dizaines de secondes, c'est ce que l'on appelle le déluge.

En plus de l'atténuation des effets thermiques du décollage, l'objectif principal du déluge est de faire comme un mur d'eau qui absorbe en partie l'onde acoustique produite par le décollage et atténue le niveau sonore qui aurait pu atteindre, sinon, 180 dB.

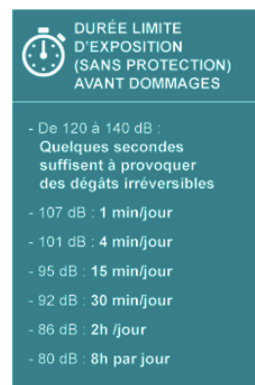


FIGURE 4 – Le système de déluge de la zone de lancement d'Ariane 6 CNES

Données

- Intensité sonore de référence : $I_0 = 1,010^{-12} \text{ W.m}^{-2}$
- Relation entre le niveau d'intensité sonore L en décibels (dB) et l'intensité sonore I : $L = 10 \cdot \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$
- L'atténuation $A_{d_1 d_2}$ lorsqu'on passe d'une distance d_1 à une distance d_2 de la source sonore s'exprime par les relations :

$$A_{d_1 d_2} = L_2 - L_1 = 20 \cdot \log\left(\frac{d_2}{d_1}\right)$$

- L'atténuation est comptée toujours positive dans cet exercice.

Un observateur se place dans un premier temps à une distance $d_1 = 1,0 \text{ m}$ du pas de tir. Sans déluge d'eau, le niveau d'intensité sonore perçu à la distance $d_1 = 1,0 \text{ m}$ vaut $L_{1,sans} = 180 \text{ dB}$. Avec le déluge, l'intensité sonore vaut $I_{1,avec} = 0,10 \text{ W.m}^{-2}$.

Q1 Montrer que le niveau d'intensité sonore L_1 , avec du son produit au décollage à la distance $d_1 = 1,0 \text{ m}$ après son passage à travers le mur d'eau vaut $L_{1,avec} = 110 \text{ dB}$.

Q2 Indiquer si cet observateur encourt un risque auditif au moment du décollage en présence du déluge d'eau.

Q3 Calculer l'atténuation $A_{avec} = L_{1,sans} - L_{1,avec}$ en décibels qui a alors lieu grâce au déluge d'eau.

L'observateur se trouve désormais à une distance d_2 du pas de tir.

Q4 En l'absence du déluge d'eau, estimer la valeur de la distance d_2 de sorte que le niveau sonore ne dépasse pas $L_{2,sans} = 95 \text{ dB}$.

Les fusées Ariane sont lancées depuis Kourou, en Guyane française. Le site d'observation est situé à Carapa à 18 km du pas de tir.

Q5 Commenter l'intérêt acoustique du déluge d'eau pour un observateur situé à Carapa.

II L'effet Doppler

A Généralité

📖 Définition : Effet Doppler

L'effet Doppler est le phénomène par lequel la fréquence (ou la longueur d'onde) d'une onde perçue par un observateur diffère de celle émise par la source, lorsque celle-ci est en mouvement relatif par rapport à l'observateur.

🔗 Propriété : Sens du décalage

- Lorsque la source **se rapproche** du récepteur, la fréquence du signal perçu **augmente** car les **fronts d'onde se resserrent**.
- Lorsque la source **s'éloigne** du récepteur, la fréquence du signal perçu **diminue** car les **fronts d'onde s'écartent**.

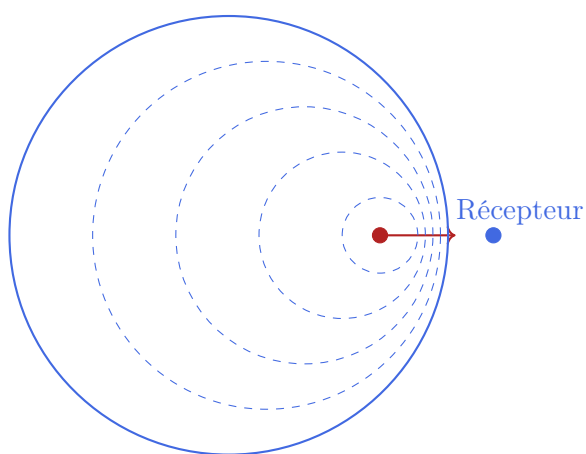


FIGURE 5 – Source se rapprochant du récepteur

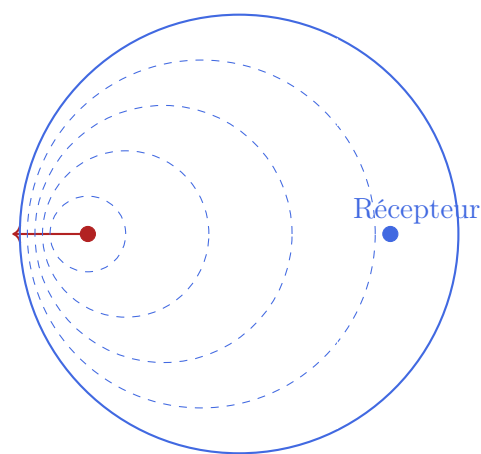


FIGURE 6 – Source qui s'éloigne du récepteur

B Formule et démonstration

B-1 Formule

📖 Définition : Décalage en fréquence

Le décalage en fréquence est donné par la formule suivante :

$$f_{\text{recue}} = f_{\text{emise}} \cdot \frac{c}{c \pm v}$$

- $\pm = -$ si la source se rapproche,
- $\pm = +$ si la source s'éloigne.

Rappel

Le lien entre c , f et λ est donné par la formule :

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad \text{ou encore,} \quad f = \frac{c}{\lambda} = c \cdot T$$

B-2 Démonstration**Démonstration : Formule de l'effet Doppler (à connaître)**

**Exercice 5****Application directe de la formule de l'effet Doppler (★)**

Une ambulance émet une sirène de fréquence $f_{\text{émise}} = 440 \text{ Hz}$. Elle roule à une vitesse $v = 90 \text{ km.h}^{-1}$ en direction d'un piéton immobile sur le trottoir. On donne la célérité du son dans l'air $c = 340 \text{ m.s}^{-1}$.

Q1 Convertir la vitesse v de l'ambulance en m.s^{-1} .

Q2 L'ambulance se rapproche-t-elle ou s'éloigne-t-elle du piéton ? En déduire le signe à utiliser dans la formule du décalage Doppler.

Q3 Calculer la fréquence $f_{\text{reçue}}$ perçue par le piéton lorsque l'ambulance s'approche.

Q4 Calculer la fréquence $f_{\text{reçue}}$ perçue par le piéton juste après que l'ambulance l'a dépassé (elle s'éloigne alors à la même vitesse).

Q5 Le piéton entend-il un son plus aigu ou plus grave au moment où l'ambulance s'éloigne, par rapport au son émis à l'arrêt ? Justifier à partir des valeurs calculées.

**Exercice 6****Observation d'un avion en plein vol - Bac Métropole 2024 spé Phy (★)**

Au voisinage de l'aéroport, un observateur enregistre le son du moteur de l'avion passant au-dessus de lui lors de sa phase d'atterrissage. L'observateur est supposé fixe lors de l'enregistrement du son. L'analyse du signal sonore enregistré permet de déterminer les fréquences des signaux reçus par l'observateur. Lorsque l'avion s'avance en direction de l'observateur la fréquence mesurée est $f_A = 2,2 \text{ kHz}$, et lorsqu'il s'éloigne la fréquence est $f_E = 1,5 \text{ kHz}$.

Q1 Donner le nom du phénomène mis en jeu dans cette expérience.

On note f_0 la fréquence du signal émis par la source immobile, c la vitesse du son dans l'air dans les conditions de l'expérience et v la vitesse de l'avion par rapport au sol. On donne $c = 345 \text{ m.s}^{-1}$.

Q2 Parmi les propositions A, B, C et D suivantes, choisir et recopier sur la copie la proposition correcte. Expliquer pourquoi les autres propositions sont à écarter.

A	B	C	D
$f_A = \frac{c}{c-v}$ $f_E = \frac{c}{c+v}$	$f_A = f_0 \cdot \frac{c}{c-v}$ $f_E = f_0 \cdot \frac{c}{c+v}$	$f_A = f_0 \cdot \frac{c}{c+v}$ $f_E = f_0 \cdot \frac{c}{c-v}$	$f_A = f_0 \cdot \frac{c}{c-2v}$ $f_E = f_0 \cdot \frac{c}{c+v}$

FIGURE 7 – Galaxie d'Andromède vue du sol *NASA, ESA*

Q3 Déterminer la vitesse v de l'avion, exprimée en km.h^{-1} , lors de cet atterrissage. Commenter.

**Exercice 7****Vitesse d'un coup droit au TdT - Bac Amerique 2024 2 spé Phy (★ ★)**

Pour améliorer la rapidité de son coup droit, un joueur s'équipe à l'entraînement d'un **cinémomètre**, appareil qui mesure la vitesse d'un objet par **effet Doppler**.



FIGURE 8 – Mesure à l'entraînement

Pour que la mesure soit la plus fiable possible, l'appareil est placé à l'opposé du joueur, face à lui. Le cinémomètre utilise une **onde électromagnétique monochromatique** de fréquence $f_0 = 24,125$ GHz. Il est constitué :

- d'un émetteur qui envoie l'onde vers la balle ;
- d'un récepteur qui capte l'onde réfléchiée par la balle à une fréquence f_R ;
- d'un circuit électronique comparant le signal émis et le signal reçu.

Le **décalage Doppler** mesuré par l'appareil est noté $\Delta f = f_R - f_0$, et sa valeur absolue s'écrit :

$$|\Delta f| = 2f_0 \cdot \frac{v}{c}$$

où v est la vitesse de la balle et c la célérité de l'onde électromagnétique dans le vide.

Q1 Expliquer pourquoi la situation illustre l'effet Doppler.

Q2 Déterminer le signe du décalage Doppler lorsque la balle se rapproche du cinémomètre.

Q3 Calculer la vitesse de la balle si $|\Delta f| = 4470$ Hz.

Q4 Le record du monde du smash est de 112,5 km/h. La vitesse mesurée est-elle du même ordre de grandeur ?

**Exercice 8****Galaxie d'Andromède - Bac Métropole 2024 (★ ★ ★)**

Notre galaxie, la Voie lactée, est membre d'un groupe d'une cinquantaine de galaxies appelé Groupe local et dont la taille atteint dix millions d'années-lumière. Ce groupe est dominé par deux galaxies spirales massives : la Voie lactée et la galaxie d'Andromède (qui contient 2 à 5 fois plus d'étoiles que la Voie lactée) séparées d'environ 2,5 millions d'années-lumière. Dans le bulletin n° 58 de l'observatoire de Lowell (USA) de 1913, l'analyse des spectres de la lumière émise par Andromède amène Vesto Slipher à conclure que cette galaxie se rapproche de la Voie lactée à une vitesse radiale d'environ 300 km.s^{-1} .



FIGURE 9 – Galaxie d'Andromède vue du sol
NASA, ESA

**Données**

$$c_{\text{lumière}} = 3.10^8 \text{ m.s}^{-1}$$

La mesure par analyse du décalage de fréquence (effet Doppler) indique que la galaxie d'Andromède se rapproche de la Voie lactée. On se base pour effectuer cette mesure sur plusieurs raies spectrales, mais plus particulièrement sur la raie caractéristique de l'atome d'hydrogène de longueur d'onde dans le vide égale à $\lambda_0 = 656,3 \text{ nm}$ dans le référentiel de l'atome.

Q1 Décrire qualitativement ce qu'est l'effet Doppler.

On se limite dans cet exercice à une configuration unidimensionnelle : l'observateur est considéré fixe et situé dans la Voie lactée, et l'émetteur (la galaxie d'Andromède) est mobile avec une vitesse uniquement radiale.

Q2 Montrer que dans le cas où la source d'une onde lumineuse de fréquence $f_{\text{émise}}$ se rapproche d'un récepteur fixe à une vitesse v , la fréquence $f_{\text{reçue}}$ de l'onde, de célérité c , mesurée par le récepteur, s'écrit sous la forme suivante :

$$f_{\text{reçue}} = \frac{f_{\text{émise}}}{1 - \frac{v}{c}}$$

Q3 Une approximation mathématique classique est :

$$\frac{1}{1-x} \approx 1+x \quad \text{pour } |x| \ll 1.$$

Vérifier qu'elle convient pour $x = \frac{v}{c}$ dans le cas de la vitesse d'Andromède.

Q4 Montrer que, dans ce cas, on peut écrire l'expression du décalage Doppler $\delta f = f_{\text{reçue}} - f_{\text{émise}}$ sous la forme suivante :

$$\delta f \approx f_{\text{émise}} \times \frac{v}{c}$$

Grandeur	Définition / formule	Unité
Fréquence f	$f = \frac{1}{T}$	Hz
Célérité, fréquence, longueur d'onde	$\lambda = \frac{c}{f}$	m
Intensité sonore I	$I = \frac{P_s}{4\pi R^2}$	W.m ⁻²
Niveau d'intensité sonore L	$L = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right)$	dB
Seuil d'audibilité I_0	Intensité minimale perceptible par l'oreille	10 ⁻¹² W.m ⁻²
Atténuation géométrique A	$A = L_{\text{proche}} - L_{\text{éloigné}} = 20 \log \left(\frac{d_2}{d_1} \right)$	dB
Atténuation par absorption A	$A = L_{\text{incident}} - L_{\text{transmis}}$	dB
Décalage Doppler (formule générale)	$f_{\text{reçue}} = f_{\text{émise}} \cdot \frac{c}{c \pm v}$	Hz
Décalage Doppler (approximation $v \ll c$)	$\delta f \approx f_{\text{émise}} \times \frac{v}{c}$	Hz
Décalage Doppler (onde réfléchie, cinémomètre)	$ \Delta f = 2f_0 \cdot \frac{v}{c}$	Hz