



PHS 4700
Physique pour les applications multimédia

Chapitre 8 — Acoustique

Djamel Seddaoui
Département de Génie Physique

Table des matières

Ondes sonores
Effet Doppler
Réflexion et réfraction
Acoustique physique
Son
Audition
Conclusions

Ondes sonores
Effet Doppler
Réflexion et réfraction
Acoustique physique

Ondes sonores

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

Les ondes de pression

- Ici, nous étudierons les ondes de pression dans un fluide compressible (un gaz) à partir des équations de Navier-Stokes.
- Ces ondes de pression dans l'air donnent naissance à ce que notre appareil auditif détecte comme des sons (ondes sonores).

Ondes sonores

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

Équations de la dynamique des fluides (rappel)

■ Équation de conservation de l'énergie

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho e \vec{v}) = -\vec{\nabla} \cdot (p \vec{v}) + \vec{\nabla} \cdot (\boldsymbol{\tau} \vec{v}) + \rho \vec{f} \cdot \vec{v} + \vec{\nabla} \cdot \vec{q}$$

■ Équation de conservation de la quantité de mouvement

$$\frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \rho (\vec{v} \vec{v}^T) = -\vec{\nabla} p + \vec{\nabla} \cdot \boldsymbol{\tau} + \rho \vec{f}$$

■ Équation de conservation de la masse

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v})$$

Ondes sonores

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

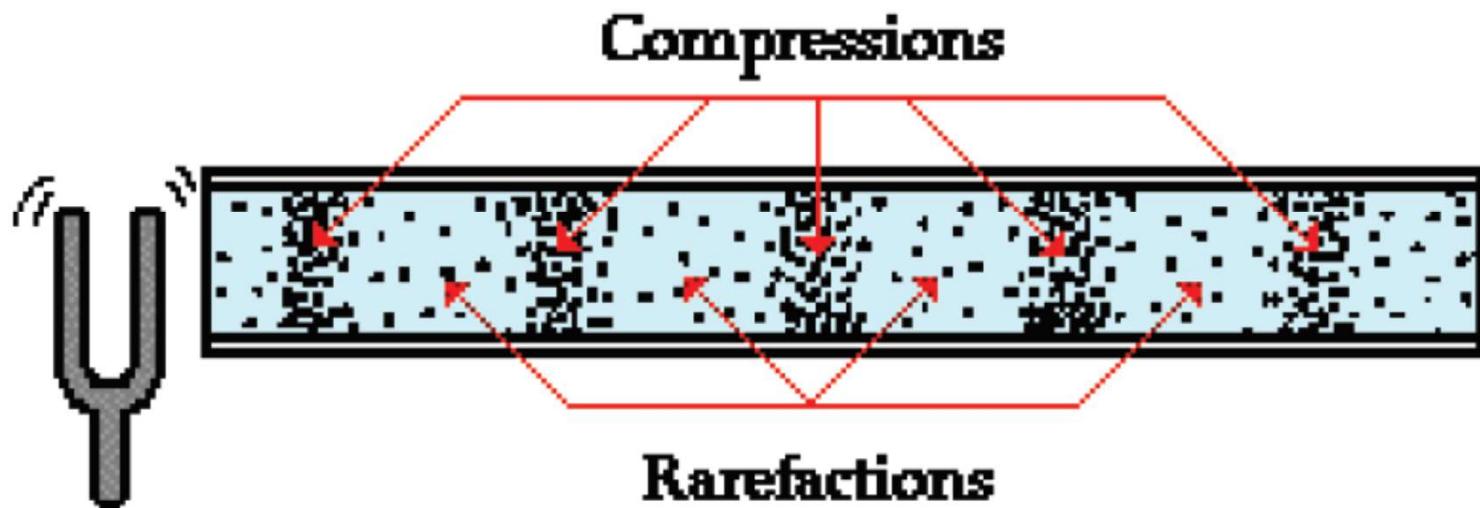
Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

Ondes de pression.



Ondes sonores

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

Dérivation.

- Pour un gaz parfait, l'équation d'état est

$$p = \frac{\rho RT}{M} = \gamma \rho$$

où γ est fonction de la température.

- Pour un processus adiabatique (sans échange de chaleur) on supposera que γ est constant et on peut écrire

$$\gamma = \frac{\partial p}{\partial \rho}$$

Ondes sonores

Ondes sonores

- Effet Doppler
- Réflexion et réfraction
- Acoustique physique
- Son
- Audition
- Conclusions

On supposera que la pression p et la densité ρ du gaz varieront autour de valeurs d'équilibre p_0 et ρ_0 lors du passage de l'onde.

- On définit s la variation relative de la masse volumique par rapport à ρ_0

$$s = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0}$$

et donc $\rho = \rho_0(1 + s)$.

- Une expansion de p au premier ordre en ρ donne alors

$$p = p_0 + \frac{\partial p}{\partial \rho}(\rho - \rho_0) = p_0 + \gamma \rho_0 s = p_0 + \tilde{p}$$

avec $\tilde{p} = \gamma \rho_0 s$ la pression exercée par l'onde.

Ondes sonores

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

- L'équation de conservation de masse en 1-D donne

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \rho_0 \frac{\partial(1+s)}{\partial t} = - \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} = -\rho_0 \frac{\partial((1+s)v)}{\partial x}$$

- Si on admet que le terme s était négligeable par rapport à 1 on obtient alors

$$\frac{1}{\gamma \rho_0} \frac{\partial \tilde{p}}{\partial t} = - \frac{\partial v}{\partial x}$$

Ondes sonores

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

- L'équation de conservation de la quantité de mouvement peut s'écrire (en utilisant $p = p_0 + \tilde{p}$ et $\rho = \rho_0(1 + s)$ et en ne conservant que les termes dominants on obtient)

$$\rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} = - \frac{\partial \tilde{p}}{\partial x}$$

(Pas de forces externes ni de frottement visqueux).

Ondes sonores

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

On peut ensuite combiner l'équation de conservation de masse et de quantité de mouvement en prenant la dérivée de la première par rapport à t et de la seconde par rapport à x et en éliminant le terme vitesse v

$$\frac{\partial^2 \tilde{p}}{\partial t^2} = \gamma \frac{\partial^2 \tilde{p}}{\partial x^2} = c^2 \frac{\partial^2 \tilde{p}}{\partial x^2}$$

qui est l'équation pour une onde dont la vitesse c est donnée par

$$c = \sqrt{\gamma}$$

en se rappelant que \tilde{p} est la différence de pression entre l'onde (p) et le milieu (p_0).

Ondes sonores

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

Si on élimine \tilde{p} au lieu de v des équations de conservation on obtient plutôt

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = \gamma \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = c^2 \frac{\partial^2 v}{\partial x^2}$$

qui est aussi une équation d'onde de vitesse c donnée par

$$c = \sqrt{\gamma}$$

les vitesses des molécules ont donc aussi un comportement ondulatoire.

Ondes sonores

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

- On utilise généralement

$$c_{\text{gaz}} = \sqrt{\frac{c_p \cdot p}{c_v \rho}} = \sqrt{\frac{\beta \cdot p}{\rho}} \approx \sqrt{\frac{\beta \cdot p_0}{\rho_0}}$$

où c_p et c_v sont les capacités thermiques massiques à pression et volume constants. Pour l'air $\beta = c_p / c_v = 1.4$ et on a supposé que $\tilde{p} \ll p_0$ et $s \ll 1$.

- On peut aussi écrire la dépendance en température comme suit :

$$c_{\text{gaz}} = \sqrt{\beta R_s T}$$

avec $R_s = 287 \text{ J/kg/K}$ et T la température en K.

Ondes sonores

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

- Pour l'air, on utilisera une approximation pour $c(T) = c(\Theta)$ de la forme

$$c_{\text{air}}(T) = c_{\text{air}}(\Theta) = (331.3 + 0.606\Theta) \text{ m/s}$$

avec $\Theta = T - 273.16$ la température en C.

- Cette relation est valide pour des températures variant de -20 C à 40 C avec une erreur inférieure à 0.2%.
- À 20 C on obtient $c_{\text{air}} = 343.3$ m/s.
- Pour l'hélium à 0 C $c_{\text{hélium}} = 972$ m/s.

Ondes sonores

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

Solution générale en 1 D.

$$\tilde{p}(x, t) = f\left(\frac{2\pi x}{\lambda} - 2\pi\nu t\right) + g\left(\frac{2\pi x}{\lambda} + 2\pi\nu t\right)$$

avec ν la fréquence et $\lambda = c/\nu$ la longueur d'onde de l'onde.

■ Onde plane en 1-D

$$\tilde{p}(x, t) = A \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda} \pm 2\pi\nu t\right)$$

■ Onde sphérique en 3-D

$$\tilde{p}(r, t) = \frac{A}{r} \sin\left(\frac{2\pi r}{\lambda} \pm 2\pi\nu t\right)$$

Ondes sonores

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

Énergie d'une onde sonore.

- L'intensité I d'une onde sonore est donnée par la relation $I = \nu \tilde{p}$ où ν est la vitesse des particules qui se déplacent dans l'onde (pas la vitesse de l'onde qui est notée c).
- Comme ces particules se déplacent sous l'action de la pression, la force exercée sur les particules est proportionnelle à l'accélération de celles-ci et

$$\rho \nu = - \int \vec{\nabla} \tilde{p} dt = \frac{\tilde{p}}{c}$$

pour une onde sinusoïdale en 3-D. On obtient donc

$$I \approx \frac{\tilde{p}^2}{\rho c}$$

Ondes sonores

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

Pour une source d'intensité I (W/m^2), la puissance P véhiculée par l'onde sonore est donnée par

$$P = \int I dS$$

Une source de puissance P émettant uniformément dans toutes les directions aura une intensité

$$I = \frac{P}{S} = \frac{P}{4\pi r^2}$$

Ondes sonores

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

Niveau de puissance sonore

- L'ouïe humaine peut détecter des différences de pression dans l'air variant de $20 \mu\text{Pa}$ à environ 100 Pa (seuil de la douleur).
- Ceci donne des valeurs de la puissance sonore P variant de plus de 14 ordres de grandeur.
- On utilise en général une échelle logarithmique pour qualifier le niveau de puissance sonore L_P en dB (décibel) :

$$L_P = 10 \log \left(\frac{P}{P_0} \right)$$

avec $P_0 = 10^{-12} \text{ W}$.

Ondes sonores

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

Le niveau d'intensité L_I sonore (dB) est relié au niveau de puissance sonore par :

$$L_I = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$$
$$= L_P - 10 \log\left(\frac{S}{S_0}\right)$$

avec $S_0 = 1 \text{ m}^2$ et S la surface sur laquelle est distribuée la puissance P .

Ondes sonores

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

Exemples de niveaux de puissance sonore.

Émetteur	P (W)	L_P (dB)
Fusée	1,000,000	180
Avion à réaction	10,000	160
Sirène	1,000	150
Concert rock	100	140
Hélicoptère	0.01	100
Cris	0.001	90
Frigo	10^{-7}	50
Seuil d'audition (à 28 cm)	10^{-12}	0

Ondes sonores

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

Atténuation des ondes sonores

- La principale raison de l'atténuation du son est sa dispersion. Comme nous l'avons déjà vu, la pression d'une onde sonore sphérique diminue en $1/r$, son intensité variant comme $1/S$.
- L'atténuation des ondes sonores peut aussi être due à leur perte d'énergie due à la viscosité du milieu à mesure qu'elles se déplacent.
- Cette perte d'énergie est souvent faible puisqu'elle est reliée aux collisions entre les molécules du gaz dans le milieu. Elle dépend fortement de la fréquence de l'onde sonore.
- Si on connaît l'intensité d'une onde sonore à une distance r_0 de la source, son intensité à une distance r sera alors donnée par

$$L_I(r) = L_I(r_0) - 20 \log\left(\frac{r}{r_0}\right) - A(v)(r - r_0)$$

Ondes sonores

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

- L'intensité du son diminue d'environ 6 dB chaque fois que l'on double la distance (atténuation due à la dispersion).
- Les coefficients d'atténuation par perte d'énergie due à la viscosité $A(\nu)$ pour des ondes sonores se déplaçant dans l'air à 20 °C et 70 % d'humidité relative sont quand à eux donnés par

Fréquence ν	$A(\nu)$
125 Hz	0.3 dB/km
250 Hz	1.1 dB/km
500 Hz	2.8 dB/km
1000 Hz	5.0 dB/km
2000 Hz	9.0 dB/km
8000 Hz	76.6 dB/km

Effet Doppler

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

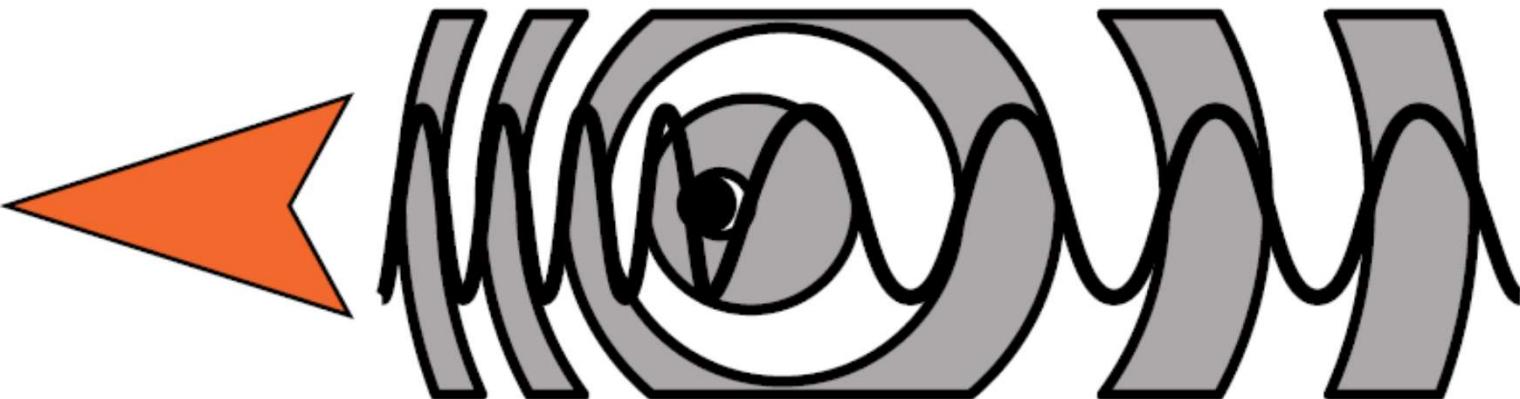
Audition

Conclusions

L'effet Doppler c'est

- le décalage de fréquence d'une onde entre la mesure à l'émission et la mesure à la réception lorsque la distance entre l'émetteur et le récepteur varie au cours du temps.

Cet effet fut décrit la première fois par Christian Doppler en 1842 et confirmé sur les sons en utilisant des musiciens jouant une note calibrée sur un train de la ligne Utrecht-Amsterdam.



Effet Doppler

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

- L'effet Doppler se manifeste par exemple pour les ondes sonores dans la perception de la hauteur du son d'un moteur de voiture, ou de la sirène d'un véhicule d'urgence.
- Le son est différent selon que l'on est dans le véhicule (l'émetteur est immobile par rapport au récepteur), que le véhicule se rapproche du récepteur (le son devient plus aigu) ou qu'il s'éloigne (le son devient plus grave).
- Cet effet est utilisé pour mesurer une vitesse, par exemple celle d'une voiture, ou bien celle du sang lorsqu'on réalise des examens médicaux (notamment les échographies en obstétrique ou en cardiologie).

Effet Doppler

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

- Il s'applique aussi à la lumière et est donc d'une grande importance en astronomie, car il permet de déterminer directement la vitesse d'approche ou d'éloignement des objets célestes (étoiles, galaxies, nuages de gaz, etc.).
- Il s'applique aussi aux ondes de surface (vagues) même si on en tient peu compte, les vitesses mises en jeu étant trop faibles.

Effet Doppler

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

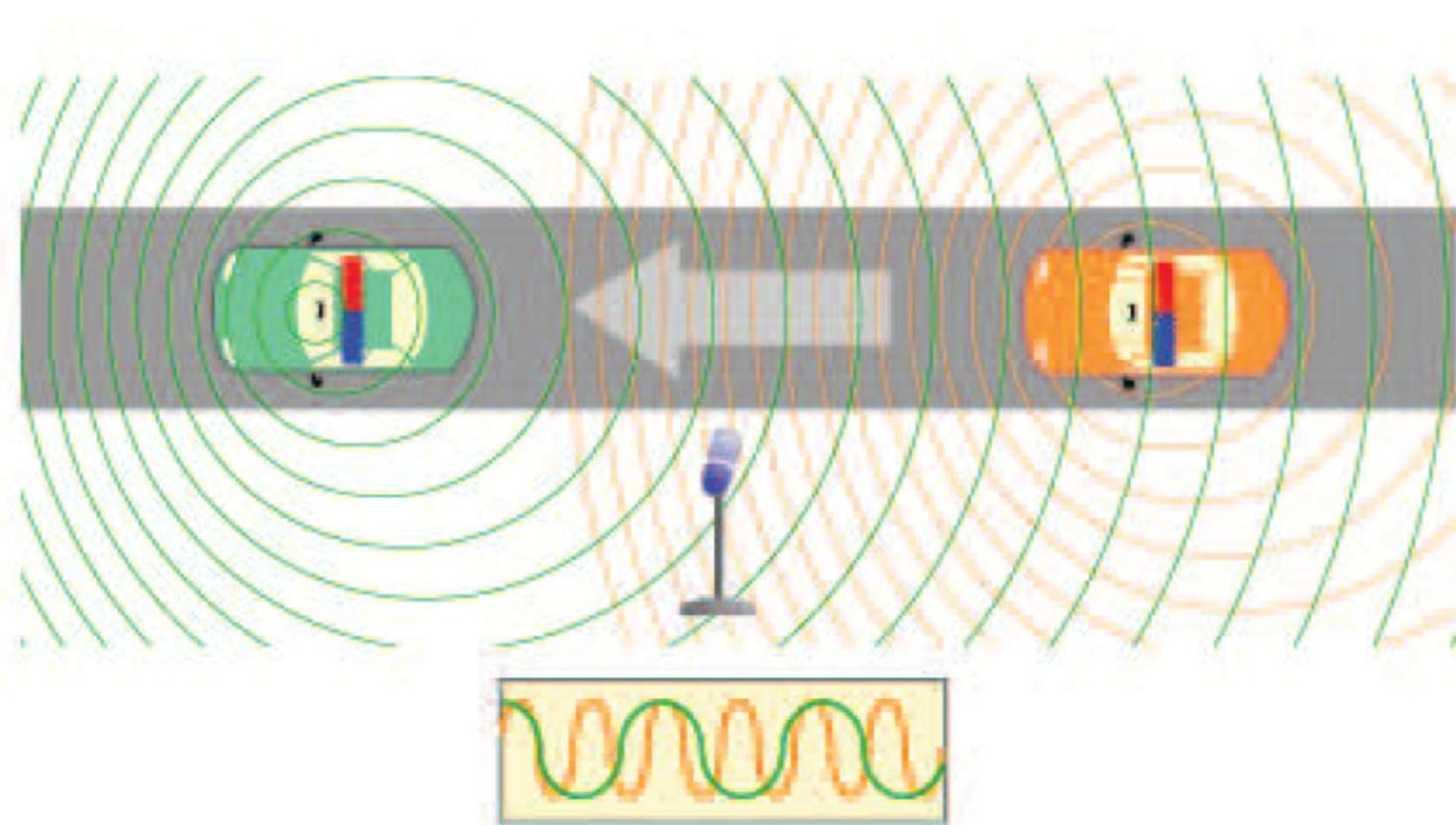
Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

Son perçu par une automobiliste en mouvement par rapport à une source fixe.



Effet Doppler

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

Description de l'effet Doppler :

- une personne est debout dans l'eau, au bord du rivage ;
- des vagues lui arrivent sur les pieds toutes les dix secondes ;
- la personne commence à marcher et va à la rencontre des vagues ;
- les vagues l'atteignent avec une fréquence plus élevée (par exemple toutes les huit secondes) ;
- la personne fait alors demi-tour et marche en direction de la plage ;
- les vagues l'atteignent avec une fréquence moins élevée (par exemple toutes les douze secondes) ;

Effet Doppler

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

- on peut aussi considérer une source mobile de vagues ;
- si la source se déplace dans la direction d'un observateur au repos, il observera des vagues plus resserrées ;
- si la source se déplace dans la direction opposée à l'observateur alors il observera des vagues plus espacées.

La fréquence des vagues détectée par une personne en mouvement dépend de sa vitesse par rapport à l'eau, la fréquence des vagues elle même dépend de la vitesse de la source (émetteur de vagues) par rapport à l'eau.

Effet Doppler

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

Pour dériver l'effet Doppler, il faut donc considérer trois référentiels :

1. le milieu au repos dans lequel se propage l'onde de vitesse c (par exemple l'air pour une onde sonore) ;
2. le référentiel de l'émetteur (source) ayant une vitesse \vec{v}_s par rapport au milieu au repos, cette source étant situé au point $\vec{r}_s(t)$;
3. le référentiel au récepteur ayant une vitesse \vec{v}_r par rapport au milieu au repos, le récepteur étant situé au point $\vec{r}_r(t)$.

Effet Doppler

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

On supposera aussi que l'onde se déplace en ligne droite de la source au récepteur dans le milieu au repos, sa direction étant

$$\vec{u}_{s,r} = \frac{\vec{r}_r(t) - \vec{r}_s(t)}{|\vec{r}_r(t) - \vec{r}_s(t)|}$$

Les vitesses du récepteur et de la source sont positives si dans la direction de propagation du signal ($\vec{u}_{s,r}$) et négatives dans une direction opposée.

Effet Doppler

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

Si ν_s est la fréquence de l'onde dans le référentiel de la source, alors le récepteur va recevoir une onde de fréquence ν_r donnée par

$$\nu_r = \frac{c - (\vec{\nu}_r \cdot \vec{u}_{s,r})}{c - (\vec{\nu}_s \cdot \vec{u}_{s,r})} \nu_s = \frac{1 - \beta_r}{1 - \beta_s} \nu_s$$

avec

$$\begin{aligned}\beta_r &= \frac{(\vec{\nu}_r \cdot \vec{u}_{s,r})}{c} = \frac{|\vec{\nu}_r| \cos(\theta)}{c} \\ \beta_s &= \frac{(\vec{\nu}_s \cdot \vec{u}_{s,r})}{c} = \frac{|\vec{\nu}_s| \cos(\theta')}{c}\end{aligned}$$

Effet Doppler

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

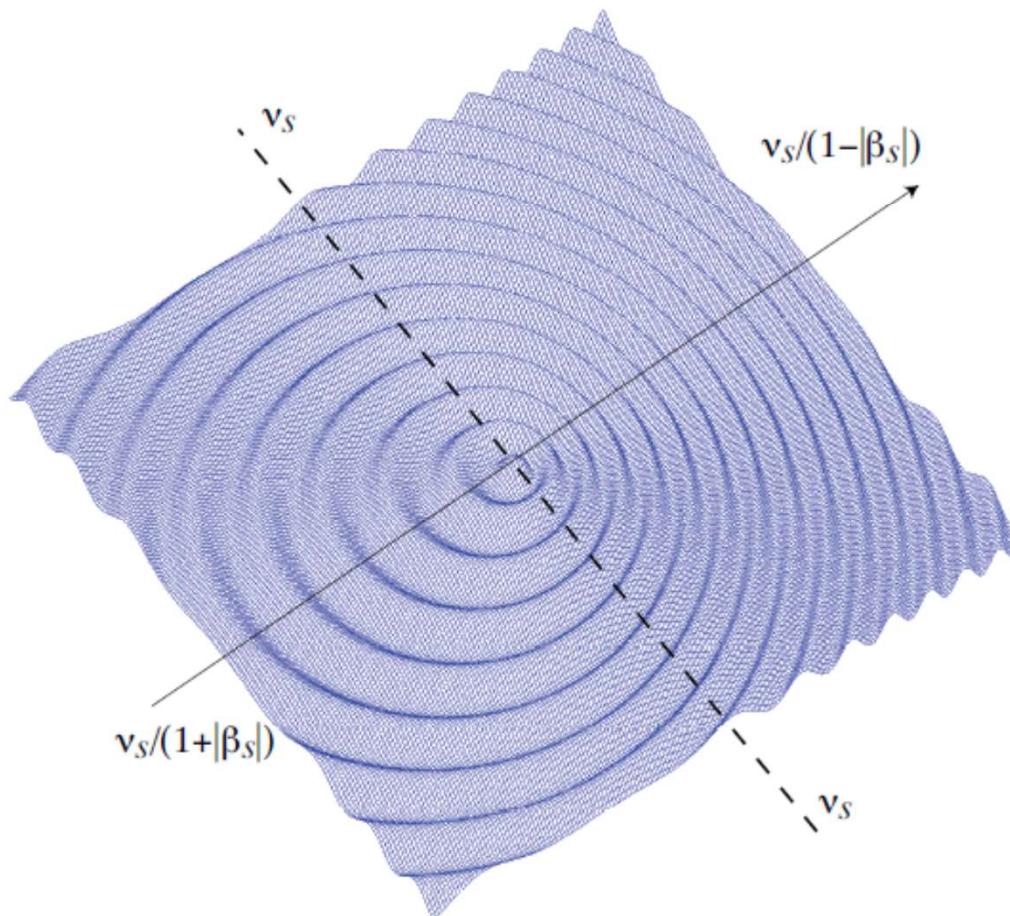
Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

Effet Doppler dû au mouvement de la source.



Effet Doppler

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

Preuve pour émetteur produise des bips à une fréquence ν_s

- Lorsque le deuxième bip est produit, le premier bip a parcouru une distance

$$d_{e,0} = \frac{c}{\nu_s}$$

- La source s'est aussi déplacée de $c\beta_s/\nu_s$.
- La distance séparant deux bips est alors

$$d_{e,1} = \frac{c(1 - \beta_s)}{\nu_s}$$

- La fréquence de l'onde dans le milieu est alors

$$\nu_m = \frac{c}{d_{e,1}} = \frac{\nu_s}{(1 - \beta_s)}$$

Effet Doppler

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

- Si récepteur reçoit le premier bip après un temps t_1 et le deuxième bip après un temps t_2 , il aura lui-même parcouru la distance

$$d_{r,1} = c\beta_r(t_2 - t_1) = \frac{c\beta_r}{v_r}$$

où $v_r = 1/(t_2 - t_1)$ est la fréquence perçue par le récepteur.

- Le déplacement total du second bip par rapport au premier pour le récepteur est

$$d_{r,2} = d_{e,1} + d_{r,1} = \frac{c}{v_r}$$

Effet Doppler

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

On écrira alors

$$\frac{c(1 - \beta_s)}{v_s} + \frac{c\beta_r}{v_r} = \frac{c}{v_r}$$

d'où

$$v_r = \frac{c - (\vec{v}_r \cdot \vec{u}_{s,r})}{c - (\vec{v}_s \cdot \vec{u}_{s,r})} v_s = \frac{1 - \beta_r}{1 - \beta_s} v_s$$

La fréquence perçue par le récepteur par rapport à la fréquence dans le milieu est alors

$$v_m = \frac{c}{d_{e,1}} = (1 - \beta_r) v_m$$

Effet Doppler

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

- si l'émetteur est immobile et le récepteur en mouvement on obtient

$$v_r = (1 - \beta_r)v_s$$

- si l'émetteur est en mouvement et le récepteur immobile on obtient

$$v_r = \frac{1}{1 - \beta_s} v_s \approx (1 + \beta_s) v_s$$

la dernière approximation étant valide seulement lorsque $\beta_s \ll 1$.

Noter que lorsque l'émetteur se rapproche du récepteur $\beta_s > 0$.
Lorsque le récepteur se rapproche de l'émetteur $\beta_r < 0$.

Réflexion et réfraction

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

En acoustique physique on considère la réflexion et la réfraction du son d'une façon tout à fait semblable à ce que l'on fait pour la lumière. Le son étant une onde (de pression) et se déplaçant en ligne droite dans un milieu on supposera qu'il subira.

- une réflexion parfaite (ou miroir) par une surface solide ;
- une transmission partielle combinée à une réflexion partielle entre deux milieux.

Ce sont ces modèles que nous étudierons maintenant et qui se révèleront très utiles pour étudier le son transmis d'un milieu à un autre.

Réflexion et réfraction

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

On associe à l'onde sonore qui se déplace en 3-D un vecteur unitaire \vec{u}_i qui décrit sa direction initiale de propagation

$$\vec{u}_i = \frac{\vec{r}_m - \vec{r}_s}{|\vec{r}_m - \vec{r}_s|}$$

avec \vec{r}_s la position de départ de l'onde (la source) et \vec{r}_m le point où elle touche la surface réfléchissante ou transparente.

Réflexion et réfraction

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

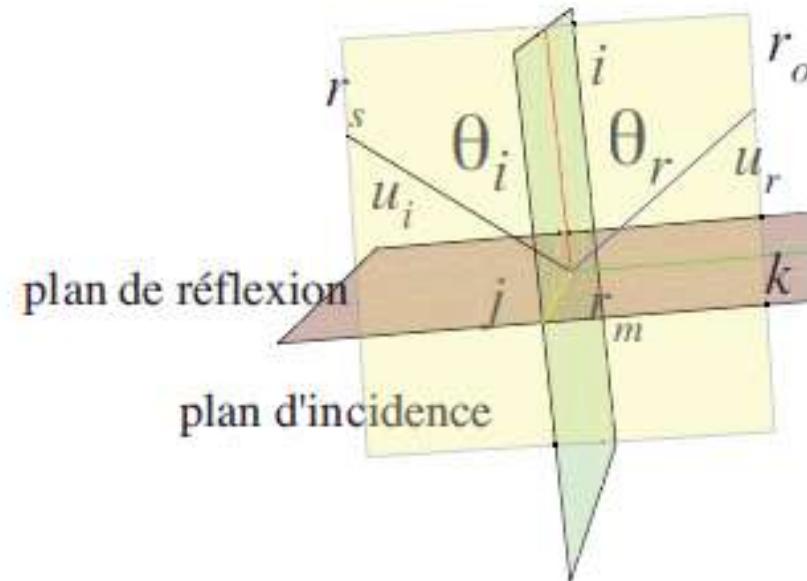
Acoustique physique

Son

Audition

Musique

Réflexion



Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

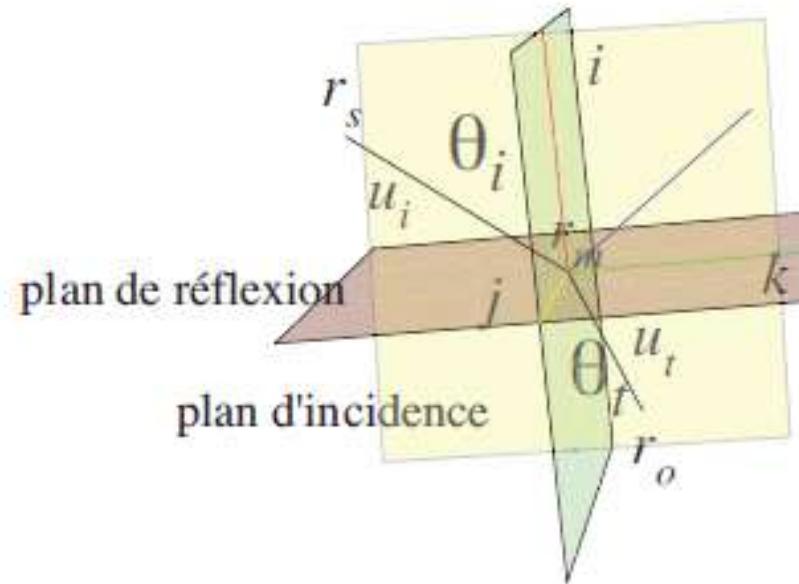
Acoustique physique

Son

Audition

Musique

Réfraction



Réflexion et réfraction

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

En utilisant la normale unitaire \hat{i} (sortante) à la surface de réflexion au point \vec{r}_m et

$$\begin{aligned}\hat{j} &= \frac{\hat{u}_i \times \hat{i}}{|\hat{u}_i \times \hat{i}|}, \\ \hat{k} &= \hat{i} \times \hat{j}.\end{aligned}$$

Le plan défini par \hat{i} et \hat{k} est le plan d'incidence (normale \hat{j}) et le plan de réflexion/transmission est défini par les vecteurs \hat{j} et \hat{k} .

Réflexion et réfraction

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

Le rayon de lumière sera réfléchi dans le plan d'incidence de façon symétrique par rapport à la normale au plan de réflexion

$$\hat{u}_r = \hat{u}_i - 2\hat{i}(\hat{u}_i \cdot \hat{i}) = \cos\theta_i \hat{i} + \sin\theta_i \hat{k}.$$

avec

$$\sin\theta_r = \sin\theta_i .$$

C'est la première loi de Snell-Descartes.

Réflexion et réfraction

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

Le rayon de lumière transmis sera dans le plan d'incidence et sa direction sera

$$\hat{u}_t = -\hat{i} \cos \theta_t + \hat{k} \sin \theta_t.$$

avec

$$\sin \theta_t = \left(\frac{c_t}{c_i} \right) \sin \theta_i.$$

C'est la seconde loi de Snell-Descartes. Ici, on a utilisé directement les vitesses au lieu des indices de réfraction, car pour le son, il n'y a pas de vitesse qui peut facilement être choisie pour servir de référence absolue.

Réflexion et réfraction

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

- Si $c_i = c_t$, toutes les valeurs de θ_i sont permises ($-\pi/2 \leq \theta_i \leq \pi/2$), et elles généreront l'ensemble des valeurs permises pour θ_t ($\pi/2 \leq \theta_t \leq \pi/2$).
- Si $c_i > c_t$ toutes les valeurs de θ_i sont permises ($-\pi/2 \leq \theta_i \leq \pi/2$), et elles généreront un ensemble restreint de valeurs pour θ_t ($-|\arcsin(c_t/c_i)| \leq \theta_t \leq |\arcsin(c_t/c_i)|$).
- Si $c_i < c_t$, les seules valeurs de θ_i permises sont $-|\arcsin(c_i/c_t)| \leq \theta_i \leq |\arcsin(c_i/c_t)|$. Elles généreront un ensemble complet de valeurs pour θ_t . Aucune onde ne peut pénétrer dans le second milieu pour $\theta_i < -|\arcsin(c_i/c_t)|$ ou $\theta_i > |\arcsin(c_i/c_t)|$.

Réflexion et réfraction

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

- Notez que pour l'optique on utilisera

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t$$

avec

$$n_i = \frac{c}{c_i} \quad n_t = \frac{c}{c_t}$$

où c est la vitesse de la lumière dans le vide et c_i la vitesse de la lumière dans le milieu i .

- En acoustique, il n'y a pas de vitesse qui peut facilement être choisie pour servir de référence absolue et, au lieu d'utiliser les indices de réfraction, on utilise directement les vitesses.

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

Impédance acoustique

- L'impédance acoustique caractérise la résistance qu'un milieu oppose à sa mise en mouvement lorsqu'il est traversé par une onde acoustique.
- Elle est définie comme le rapport de la pression acoustique sur la vitesse locale de déplacement dans un milieu, et est généralement notée Z .
- Il faut distinguer :
 - ◆ l'impédance caractéristique d'un milieu (l'air ou l'eau) ;
 - ◆ l'impédance d'un composant acoustique (un silencieux ou un tuyau d'orgue).

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

L'impédance caractéristique d'un milieu

- L'impédance caractéristique d'un milieu (solide, liquide ou gazeux) est définie comme étant le rapport de la pression acoustique sur la vitesse de déplacement en milieu ouvert (c'est-à-dire en l'absence d'ondes réfléchies)

$$Z \propto \frac{p}{c_{\text{milieu}}}$$

avec Z en $\text{Pa} \times \text{s/m}$.

- En électromagnétisme, l'impédance est définie par

$$Z \propto \frac{V}{I}$$

et représente la résistance du milieu au déplacement des charges sous l'effet d'un potentiel V .

Acoustique physique

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

- On a déjà vu que pour un gaz :

$$c_{\text{gaz}} = \sqrt{\beta \frac{p}{\rho}}$$

avec $\beta = c_p / c_v = 1.4$ pour l'air.

- L'impédance caractéristique, définie comme étant une propriété du matériel considéré, est égale au produit de la masse volumique du matériau ρ par la vitesse du son c_{milieu} dans ce même matériel

$$Z = \rho c_{\text{milieu}}$$

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

- L'indice de réfraction entre deux milieux est donné par (optique)

$$n_{1,2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{c_{\text{milieu 1}}}{c_{\text{milieu 2}}}$$

- Le rapport d'impédance pour deux milieux est

$$\frac{Z_1}{Z_2} = n_{1,2} \frac{\rho_1}{\rho_2}$$

- Notez qu'en optique, l'onde se propage dans le vide et les densités des milieux ρ_1 et ρ_2 ne correspondent à rien de physique.

Acoustique physique

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

La masse volumique et la vitesse du son variant avec la température, c'est aussi le cas pour l'impédance acoustique de l'air.

T (C)	c (m/s)	ρ (kg/m ³)	Z (Pa × s/m)
-10	325.4	1.341	436.5
-5	328.5	1.316	432.4
0	331.5	1.293	428.3
+5	334.5	1.269	424.5
+10	337.5	1.247	420.7
+15	340.5	1.225	417.0
+20	343.4	1.204	413.5
+25	346.3	1.184	410.0
+30	349.2	1.164	406.6

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Musique

Impédance acoustique de différents matériaux.

Matériel	c (m/s)	ρ (kg/m ³)	Z MPa × s/m
Eau (20 °C)	1480	1000	1.48
Eau de mer (20 °C)	1531	1025	1.57
Huile d'olive	1445	918	1.32
Quartz	5500	2200	12.1
Acier	5790	7800	4.52
Béton	5650	2300	0.84
Plomb	2160	11400	2.46

Acoustique physique

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

Le coefficient de réflexion d'une onde acoustique à l'interface entre deux milieux d'impédance différentes est donné par:

$$R = \left(\frac{Z_i - Z_t}{Z_i + Z_t} \right)^2$$

avec $Z_i = \rho_i c_i$ et $Z_t = \rho_t c_t$

Le coefficient de transmission est donné par:

$$T = 1 - R = \frac{4 Z_i Z_t}{(Z_i + Z_t)^2}$$

Acoustique physique

Ondes sonores

Effet Doppler

Réflexion et réfraction

Acoustique physique

Son

Audition

Conclusions

- Notez que la conservation d'énergie implique

$$R + T = 1$$

- Les coefficients de réflexion et de transmission énergétiques sont souvent exprimés en décibel

$$R(dB) = 10 \log(R)$$

$$T(dB) = 10 \log(T)$$

Exercice :

Un avion vole à une vitesse constante horizontale $\vec{v}_A = (300; 0; 0)^T \text{ m/s}$ à une altitude h_A au-dessus de la mer. À l'instant $t = 0$, l'avion se trouvant à la position $\vec{r}_A = (0; 0; h_A)^T \text{ m}$, émet un bref signal sonore de fréquence 1 kHz et de puissance $P = 2000 \text{ W}$. Un sous-marin en immersion reste immobile à la position $\vec{r}_S = (1000; 0; -200)^T \text{ m}$.

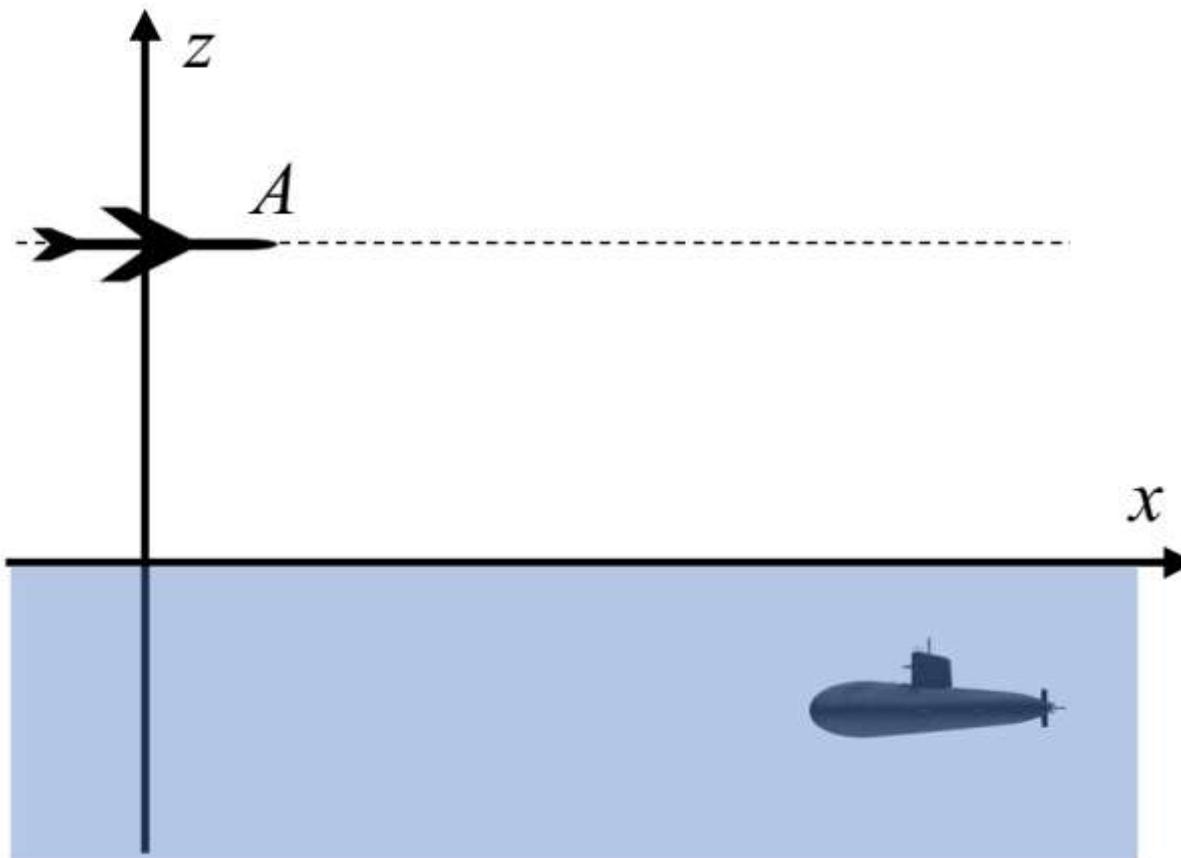
- A) Déterminer l'altitude h_A de l'avion sachant que le signal sonore qui part de l'avion vers le sous-marin intersepte la surface de l'eau avec un angle d'incidence $\theta_i = 10^\circ$.
- B) À quel instant t_s le sous-marin recevra-t-il le signal émis par l'avion?
- C) Quelle est la fréquence du signal reçu par le sous-marin?
- D) Quelle est l'intensité en dB du signal reçu par le sous-marin? On négligera la dispersion du signal sonore une fois pénétré dans l'eau.

On donne :

La vitesse du son est $c_{air} = 343 \text{ m/s}$ dans l'air et $c_{mer} = 1530 \text{ m/s}$ dans l'eau de mer.

La densité de l'air et de l'eau de mer sont respectivement $\rho_{air} = 1.2 \text{ kg/m}^3$ et $\rho_{mer} = 1025 \text{ kg/m}^3$.

Le coefficient d'atténuation du son est $A_{air} = 5.0 \text{ dB/km}$ dans l'air et $A_{mer} = 0.1 \text{ dB/km}$ dans l'eau de mer.



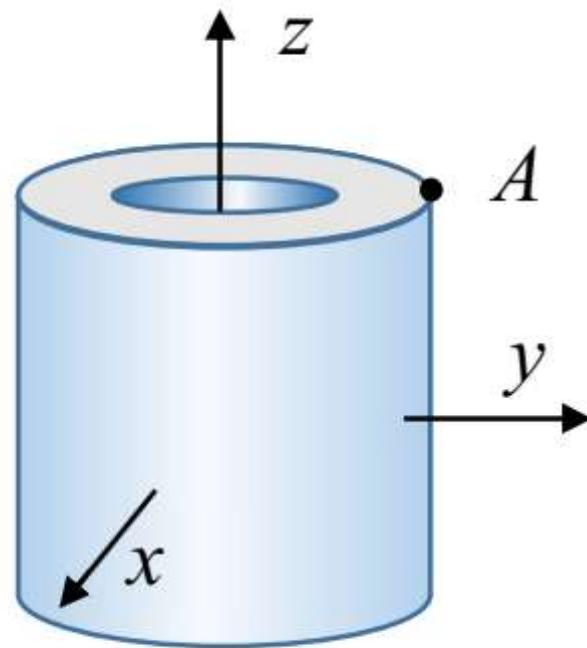
Question : Moment d'inertie et matrice de rotation

Soit la pièce cylindrique représentée sur la figure ci-dessous. L'origine du système d'axes coïncide avec le centre de masse de la pièce. Le point A de coordonnées : $A(0, 10, 10)$ est situé sur son arête supérieure.

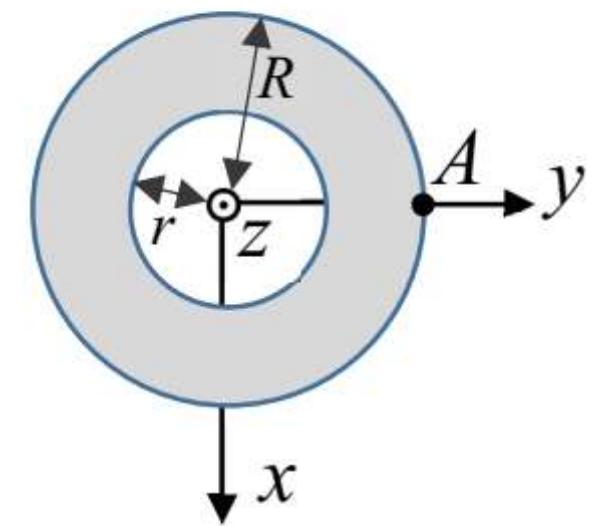
On donne pour la pièce :

- Masse volumique : $\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$
- Hauteur $h = 20 \text{ cm}$
- Rayon interne : $r = 5 \text{ cm}$
- Rayon externe $R = 10 \text{ cm}$.

- a) Déterminer la matrice moment d'inertie \mathbf{I}_C de la pièce par rapport à son centre de masse.
- b) On fait subir à la pièce une rotation autour de son centre de masse de façon à ce que le point A se retrouve sur l'axe oz . Déterminer la matrice \mathbf{R} de cette rotation.
- c) Déterminer le moment d'inertie de la pièce après avoir subi la rotation.



Vue de côté

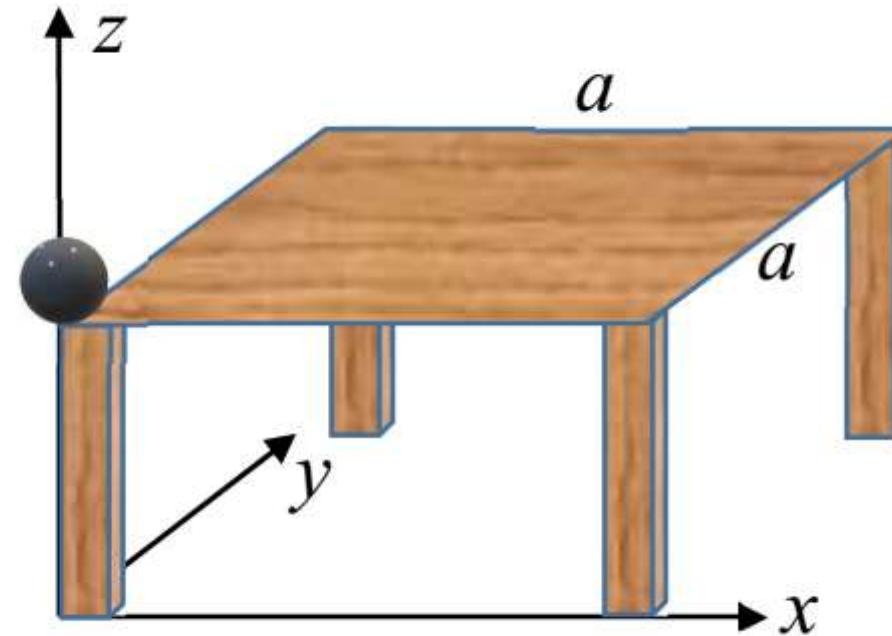


Vue de haut

Question: Roulement et glissement

Une boule pleine de rayon $R = 0.1$ m roule sans glisser sur la surface horizontale d'une table de hauteur $z_{table} = 1.0$ m jusqu'à ce qu'elle franchisse un bord et tombe au sol. À l'instant initial $t = 0$, la boule se trouve sur un coin de la table à la position $\vec{r}_{c,0} = (0.0, 0.0, 1.1)^T$ m/s (voir figure ci-dessous) et sa vitesse linéaire est $\vec{v}_{c,0} = (1.0, 2.0, 0.0)^T$ m/s. Cette vitesse demeure constante tant que la boule roule sur la table. On négligera tout frottement. La surface de la table est de forme carrée de côté $a = 1.5$ m.

- Déterminer le vecteur vitesse angulaire de la boule lorsque celle-ci roule sans glisser sur la surface de la table.
- Déterminer le vecteur position $\vec{r}_{c,1}$ de la boule à l'instant où elle quitte la surface de la table.
- Déterminer l'instant t_1 où le module de la vitesse de la boule atteint la valeur de $v_1 = 3$ m/s. L'accélération gravitationnelle est donnée par : $\vec{g} = (0, 0, -9.8)^T$ m/s².



Question : Collision

Une collision frontale survient entre deux voitures identiques A et B , de mêmes masses $m_A = m_B = 2500 \text{ kg}$. Juste avant la collision, la vitesse de la voiture A est $\vec{v}_A = (25.0, 30.0, 0.0)^T \text{ m/s}$ et celle de la voiture B est $\vec{v}_B = (-20.0, -24.0, 0.0)^T \text{ m/s}$.

- (a) Quelle est la vitesse relative de la voiture A par rapport à la voiture B juste avant l'impact.
- (b) Déterminer la normale \hat{n} entrante vers A aux surfaces de contacts entre les deux voitures.
- (c) Déterminer les vitesses des deux voitures \vec{v}'_A et \vec{v}'_B juste après l'impact sachant que coefficient de restitution de la collision est $\epsilon = 0.2$. On néglige tout frottement lors de la collision.

