BLAISE PASCAL
PT 2020-2021

Fiche de révisions R10

Ondes mécaniques
Optique géométrique

Ressources en ligne

Scanner ou cliquer sur les QR-code pour accéder aux ressources.

- **L'essentiel du cours sous forme de cartes mémo :** cartes réalisées par Christophe Cayssiols.

  Cartes utilisables pour ce bloc de révisions : thème « thermodynamique 1$^{\text{re}}$ année », rubrique « machines thermiques en système fermé ».

- **Qmax : QCM d'applications directes du cours**

  Choisir d'abord le mode « j'apprends » puis éventuellement le mode « je révise ». Ces QCM correspondent au programme de PCSI, certaines notions peuvent donc vous être inconnues : me demander en cas de doute.

  Thèmes abordés dans ce bloc de révisions : thème « thermodynamique », rubrique « machines thermiques ».

Rappels de cours

A - Condensé de photons

Les photons présentent un comportement de type particule dans leur détection (on ne les détecte qu'à un seul endroit à un seul instant) mais leur propagation (reliée à la probabilité de les détecter en un point donné) est régie par des lois ondulatoires (interférences, diffraction) : c'est la **dualité onde-corpuscule**. Les mêmes phénomènes sont observés pour toutes les particules quantiques : électrons, atomes, molécules, etc.

Une onde lumineuse peut être décrite comme un flux de photons. Comme il s'agit de deux descriptions du *même* objet physique, alors leurs propriétés sont reliées. Ainsi, un photon

▷ se propage à la vitesse de la lumière dans la direction $\vec{u}$ de propagation de l'onde ;
▷ est de masse rigoureusement nulle ;
▷ transporte une énergie $\varepsilon = h\nu = \hbar\omega$ où ν et ω sont la fréquence et la pulsation de l'onde ;
▷ a une quantité de mouvement $\vec{p} = \dfrac{h}{\lambda}\vec{u} = \hbar\vec{k}$.

Ces deux dernières relations sont appelées **relations de Planck-Einstein**, et elles impliquent la **constante de Planck *h*** ou la constante de Planck « réduite » notée $\hbar$,

$$h = 6{,}6261 \cdot 10^{-34}\,\mathrm{J\cdot s} \qquad \text{et} \qquad \hbar = \frac{h}{2\pi} = 1{,}0546 \cdot 10^{-34}\,\mathrm{J\cdot s}\,.$$

CC BY-NC-SA

B - Angle limite de réfraction ; réflexion totale

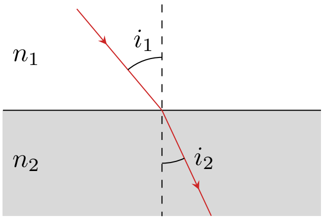


Figure 1 – Réflexion et réfraction.

À l'interface entre deux milieux d'indices différents, un rayon lumineux incident est partiellement réfléchi (environ 4 % de l'énergie à l'interface air-verre) et partiellement réfracté, c'est-à-dire transmis et dévié. Les angles d'incidence et de réfraction sont reliés par

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2 \,.$$

Cette relation montre que le rayon lumineux est plus proche de la normale dans le milieu d'indice le plus élevé : p.ex. si $n_2 > n_1$ alors $\sin i_2 < \sin i_1$ donc $i_2 < i_1$ car les angles sont compris entre 0 et $\pi/2$. Sur la figure 1, on constate que $n_2 > n_1$.

- **Cas $n_2 > n_1$: angle maximal de réfraction** (voir figure 2)

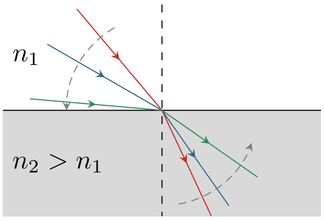


Figure 2 – Angle de réfraction maximal.

Comme $n_2 > n_1$, le rayon est plus proche de la normale dans le milieu ②. La figure ci-contre montre alors clairement que lorsque l'incidence devient rasante ($i_1 \to \pi/2$) alors l'angle de réfraction atteint une valeur seuil. Cette valeur s'obtient à partir de la loi de la réfraction en se plaçant à la limite,

$$n_1 \sin \frac{\pi}{2} = n_2 \sin i_{2,\max} \qquad \text{donc} \qquad \sin i_{2,\max} = \frac{n_1}{n_2} \qquad \text{et} \qquad i_{2,\max} = \arcsin \frac{n_1}{n_2} \,.$$

Cette expression n'est surtout pas à retenir (trop de risque de confusion avec la réflexion totale), mais il faut savoir la retrouver.

Ceux qui ont l'habitude d'aller à la piscine ont certainement déjà constaté ce phénomène : lorsque vous vous placez les yeux dans l'eau à faible profondeur sous la surface et que vous regardez « au loin », vous observez un « plafond d'eau » et vous ne pouvez pas voir ce qui se passe à la surface, tous les rayons étant trop déviés pour qu'ils puissent atteindre votre œil. Sur la figure 3, aucun rayon issu de l'air et incident au point I ne peut parvenir à l'œil du nageur. S'il observe le point I, le nageur verra l'eau mais pas les rayons issus de l'extérieur de la piscine.

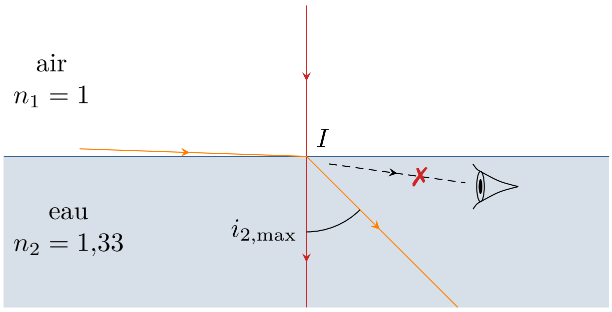


Figure 3 – À la piscine. Attention sur le schéma : si l'observateur regarde vers le point I, ce n'est pas son œil qui émet des rayons lumineux dirigés vers I mais des rayons lumineux issus de I qui parviennent à son œil. Ici, aucun rayon réfracté en I ne peut atteindre l'œil de l'observateur.

- **Cas $n_2 < n_1$: réflexion totale** (voir figure 4)

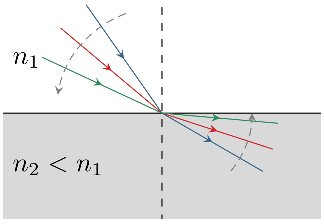


Figure 4 – Réflexion totale.

Comme $n_2 < n_1$, le rayon est cette fois plus éloigné de la normale dans le milieu ②. La figure ci-contre montre alors clairement que l'angle de réfraction devient rasant ($i_2 \to \pi/2$) pour une valeur seuil $i_{1,\max}$ de l'angle d'incidence. Au delà, le rayon incident ne peut plus être réfracté : il ne pénètre pas dans le milieu ②, c'est le phénomène de **réflexion totale**. Comme précédemment, la valeur de l'angle limite de réflexion totale s'obtient à partir de la loi de la réfraction en se plaçant à la limite.

$$n_1 \sin i_{1,\max} = n_2 \sin \frac{\pi}{2} \qquad \text{donc} \qquad \sin i_{1,\max} = \frac{n_2}{n_1} \qquad \text{et} \qquad i_{1,\max} = \arcsin \frac{n_2}{n_1} \,.$$

Cette expression n'est pas à retenir, mais il faut savoir la retrouver. Concrètement, tous les rayons arrivant sur le dioptre avec une incidence $i_1 > i_{1,\max}$ sont totalement réfléchis.

Ceux qui ont un aquarium peuvent observer ce phénomène quotidiennement. Lorsque vous regardez votre poisson préféré de loin, il semble se réfléchir sur le fond de l'aquarium exactement comme dans un miroir : les angles sont tels que la réflexion est totale, donc toute l'énergie lumineuse du rayon réfléchi aboutit dans votre œil. Au contraire, vous n'observez rien de tel lorsque vous regardez le poisson de plus près car l'énergie lumineuse est réfractée : vous pouvez éventuellement voir un reflet, mais il est beaucoup moins lumineux que le poisson lui-même.

BY-NC-SA

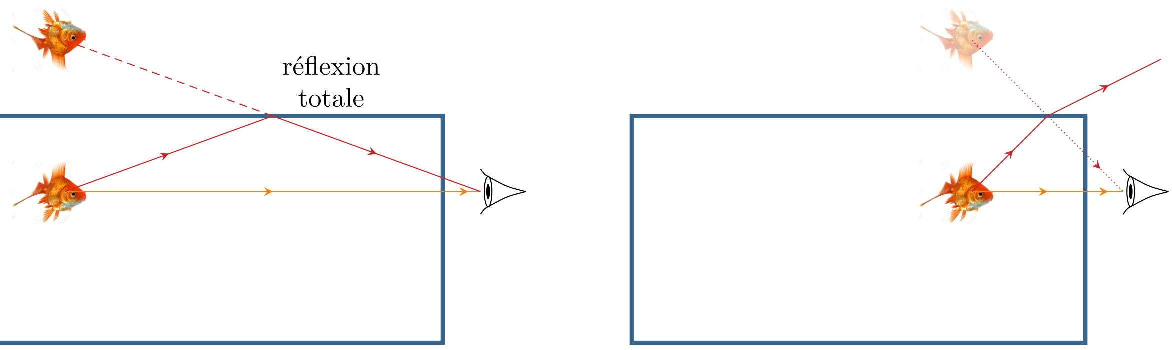


Figure 5 – Un poisson dans un aquarium. Pour simplifier le schéma, je n'ai pas tenu compte de la réfraction par le verre de l'aquarium (importante pour des calculs quantitatifs mais qui ne change rien qualitativement).

Questions de cours

R10.1 - La figure 6 est la représentation spatiale d'une onde à l'instant $t = 0$. Cette onde se propage dans le sens des x **croissants** à la célérité $c = 20\,\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$. Un capteur est situé en $x = 60\,\text{cm}$. Représenter le chronogramme du signal reçu par le capteur pour t allant de 0 à 6 s.

R10.2 - La figure 7 est la représentation spatiale d'une onde à l'instant $t = 0$. Cette onde se propage dans le sens des x **décroissants** à la célérité $c = 20\,\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$. Un capteur est situé en $x = 20\,\text{cm}$. Représenter le chronogramme du signal reçu par le capteur pour t allant de 0 à 6 s.

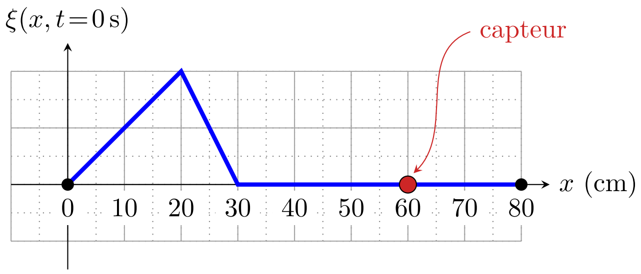


Figure 6 – Onde se propageant dans le sens des x CROISSANTS.

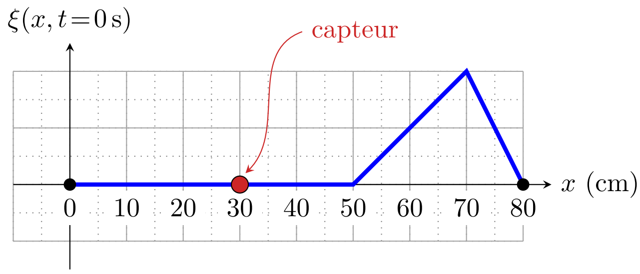
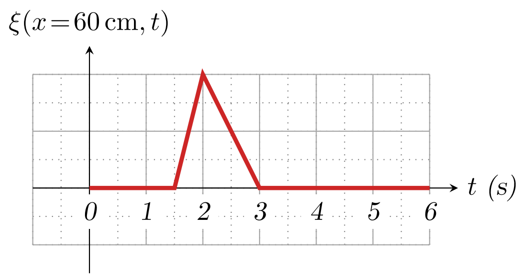
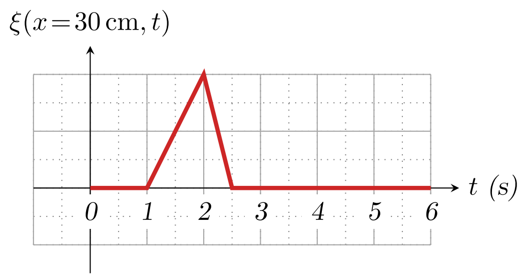


Figure 7 – Onde se propageant dans le sens des x DÉCROISSANTS.

> 
>
>
> *Question R10.1 - Onde se propageant dans le sens des x croissants.*
>
> 
>
>
> *Question R10.2 - Onde se propageant dans le sens des x décroissants.*

R10.3 - En s'appuyant sur deux représentations graphiques **claires**, **propres** et **légendées**, illustrer les différences entre onde plane progressive harmonique et onde plane stationnaire harmonique.

> *Voir le tableau récapitulatif dans le cours sur les ondes électromagnétiques dans les conducteurs.*

R10.4 - Montrer que la superposition de deux OPPH de même fréquence et même amplitude se propageant en sens opposé donne une onde stationnaire.

> *Voir le cours sur les ondes électromagnétiques dans les conducteurs.*

R10.5 - Retrouver la position des nœuds et des ventres d'une onde stationnaire de la forme $s(x,t) = A\cos(kx)\cos(\omega t)$. De combien sont séparés deux nœuds consécutifs ? deux ventres consécutifs ? un nœud et un ventre consécutifs ?

BY-NC-SA

Nœuds : m est un entier relatif

$$\cos(kx_m) = 0 \qquad \text{donc} \qquad kx_m = \frac{\pi}{2} + m\pi \qquad \text{et} \qquad x_m = \frac{\lambda}{4} + m\frac{\lambda}{2}\,.$$

Ventres :

$$\cos(kx_m) = \pm 1 \qquad \text{donc} \qquad kx_m = m\pi \qquad \text{et} \qquad x_m = m\frac{\lambda}{2}\,.$$

Ainsi, deux nœuds sont séparés de $\lambda/2$ (et non pas de λ comme l'intuition peut laisser croire), deux ventres aussi, et un nœud et un ventre qui se suivent de $\lambda/4$.

Attention ! *Ne pas oublier le $\pm$ pour les ventres !*

R10.6 - On considère une corde de Melde de longueur L, fixée en $x = 0$ et $x = L$. On cherche ses modes propres sous la forme

$$s(x,t) = A\sin(kx + \psi)\cos(\omega t + \varphi)\,.$$

Déterminer les longueurs d'ondes possibles et interpréter graphiquement.

CL en $x = 0$: à tout instant,

$$s(x{=}0,t) \underset{\substack{\uparrow\\ \text{expr}}}{=} A\sin(\psi)\cos(\omega t + \varphi) \underset{\substack{\uparrow\\ CL}}{=} 0\,.$$

Comme le cosinus ne peut pas être nul à tout instant et que A est forcément non nul (sinon, il n'y aurait pas d'onde !) alors $\sin\psi = 0$. Il s'agit d'une phase, que l'on peut choisir librement parmi toutes les valeurs possibles tant qu'on reste cohérent par la suite : on prend donc $\psi = 0$ pour simplifier les calculs.

CL en $x = L$: à tout instant,

$$s(x{=}L,t) \underset{\substack{\uparrow\\ \text{expr}}}{=} A\sin(kL)\cos(\omega t + \varphi) \underset{\substack{\uparrow\\ CL}}{=} 0\,.$$

Pour les mêmes raisons, ni A ni le cosinus ne peuvent être nuls à tout instant, d'où on déduit

$$kL = n\pi \qquad \text{d'où} \qquad L = n\frac{\lambda}{2} \qquad (\text{avec } n \text{ un entier positif}).$$

Attention, cette fois k et L sont des paramètres physiques, on n'a donc aucune liberté sur leurs valeurs et il faut garder toutes celles qui sont compatibles avec la condition aux limites. Ces résultats se voient très bien sur des schémas (cf. vos cours de PTSI !) en se souvenant d'une part que les extrémités de la corde sont des nœuds et d'autre part que deux nœuds sont distants de $\lambda/2$.

R10.7 - Rappeler les relations de Planck-Einstein, qui relient la quantité de mouvement et l'énergie d'un photon au vecteur d'onde et à la pulsation de l'onde lumineuse. Rappeler l'unité et l'ordre de grandeur de la constante de Planck.

R10.8 - On considère un rayon lumineux se propageant d'un milieu ① vers un milieu ② tels que $n_1 < n_2$. On note i_1 l'angle d'incidence sur le dioptre plan séparant les deux milieux. Représenter la situation sur un schéma et établir l'expression de l'angle maximal de réfraction $i_{2,\max}$.

R10.9 - On considère la même situation avec désormais $n_1 > n_2$. Montrer que, si l'angle d'incidence est supérieur à une valeur maximale $i_{1,\max}$ à déterminer, alors le rayon lumineux est totalement réfléchi et ne pénètre pas dans le milieu ②.

R10.10 - Sur un exemple donné par l'interrogateur, construire l'image d'un objet réel par une lentille convergente. On s'attachera en particulier aux cas « moins simples » : image virtuelle ou à l'infini.

BY-NC-SA