1. Comment caractériser une onde sonore progressive périodique ?

Nous avons vu au *chapitre* 1 que le son est une onde mécanique progressive. Étudions l'évolution dans le temps (évolution temporelle) et dans l'espace (évolution spatiale) d'une onde émise par un instrument de musique ou par un diapason.

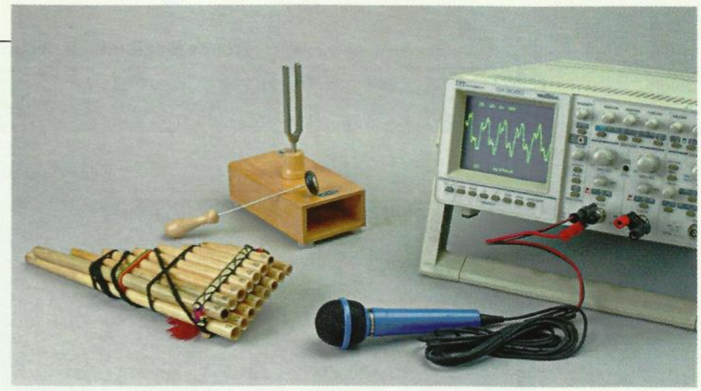
1.1 Périodicité temporelle d'une onde sonore

Activité 1

Comment étudier une onde sonore périodique, en un point de l'espace ?

Un microphone capte le son émis par un instrument de musique jouant une note continue, puis le son émis par un diapason. À l'aide d'un oscilloscope relié au microphone, visualiser le signal sonore [Doc. 1].

1. *Les ondes visualisées sont-elles périodiques ?*
2. *Comparer les oscillogrammes.*



Doc. 1 *Dispositif expérimental.*

> Observation

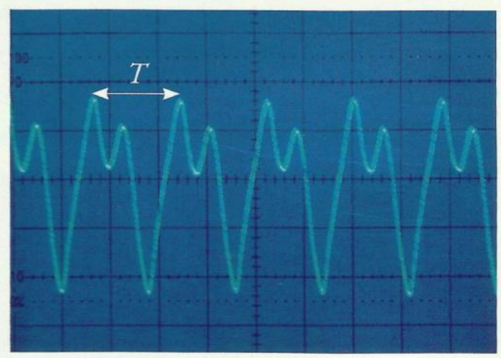
Dans les deux situations, pour une position quelconque du microphone, nous observons une courbe périodique de période T [Doc. 2].

Cette courbe est une sinusoïde dans le cas du diapason [Doc. 3].

> Interprétation

L'instrument de musique (ou le diapason) communique à l'air des vibrations périodiques de période T : il apparaît dans l'air des zones de dilatation et de compression. Cela se traduit par de petites variations de la pression de l'air qui se propagent.

Ces petites variations de pression arrivent sur la membrane du microphone et la font vibrer avec la même période T. Il apparaît une tension variable, de même période aux bornes du microphone. Cette tension est visualisée par l'oscilloscope.



Doc. 2 *L'onde émise par un instrument de musique est périodique. T désigne la période temporelle.*

Le son émis par un instrument de musique (ou par un diapason) se propage sous la forme d'une onde progressive périodique.

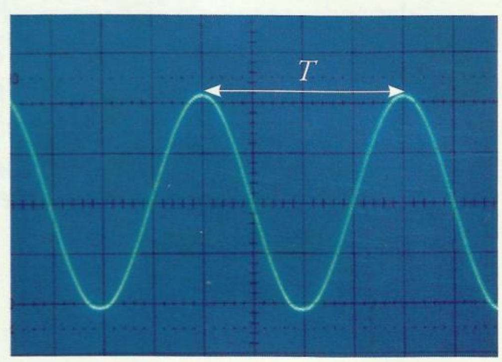
La période temporelle T de l'onde progressive périodique est la plus petite durée au bout de laquelle un point du milieu de propagation se retrouve dans le même état vibratoire.

La fréquence ν de l'onde est telle que $\nu = \dfrac{1}{T}$.

T s'exprime en seconde (s) et ν en hertz (Hz).

La période T (ou la fréquence ν) caractérise une onde périodique.

Une onde sonore est audible si sa fréquence est comprise entre 20 Hz et 20 000 Hz environ.



Doc. 3 *L'onde émise par un diapason est périodique, sinusoïdale. T désigne la période temporelle.*

1.2 Périodicité spatiale d'une onde sonore

Activité 2

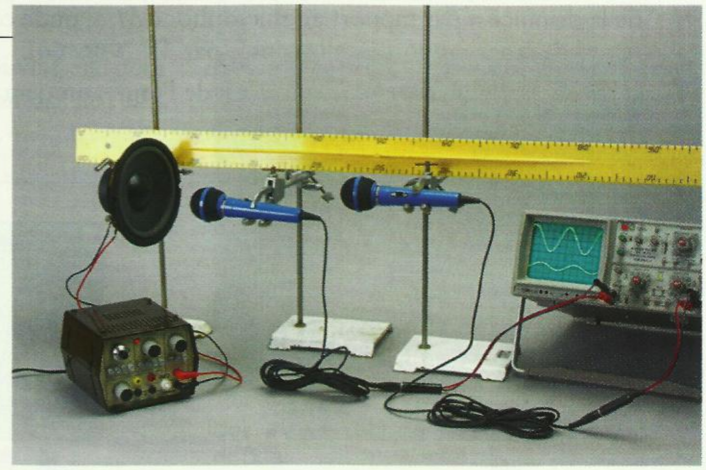
Comment étudier une onde sonore périodique, au même instant, en différents points de l'espace ?

- Reprendre le montage de l'*activité* 1 et brancher un second microphone sur l'autre voie de l'oscilloscope.
- Utiliser comme source sonore un haut-parleur relié à un générateur B.F., réglé sur une fréquence de 3 000 Hz environ.
- Placer les deux microphones M_1 et M_2 côte à côte [Doc. 4].
- Le microphone M_1 restant fixe, éloigner lentement le microphone M_2 du haut-parleur, le long d'une règle graduée, sur une droite joignant le centre du microphone M_1 au centre de la membrane du haut-parleur.

Qu'observe-t-on sur l'écran de l'oscilloscope :

a. ***lorsque les microphones M_1 et M_2 sont côte à côte ?***

b. ***lorsqu'on éloigne progressivement le microphone M_2 ?***



Doc. 4 *Dispositif expérimental.*

> Observation

Lorsque les microphones sont placés côte à côte, nous observons deux **sinusoïdes de même période** T, qui atteignent leurs maximums et leurs minimums en même temps [Doc. 5a] : elles sont **en phase**.

Lorsque nous éloignons le microphone M_2, ces sinusoïdes se décalent horizontalement ; ce décalage augmente avec la distance d entre les deux microphones [Doc. 5b].

Pour une distance particulière notée λ, les deux sinusoïdes sont à nouveau en phase [Doc. 5c].

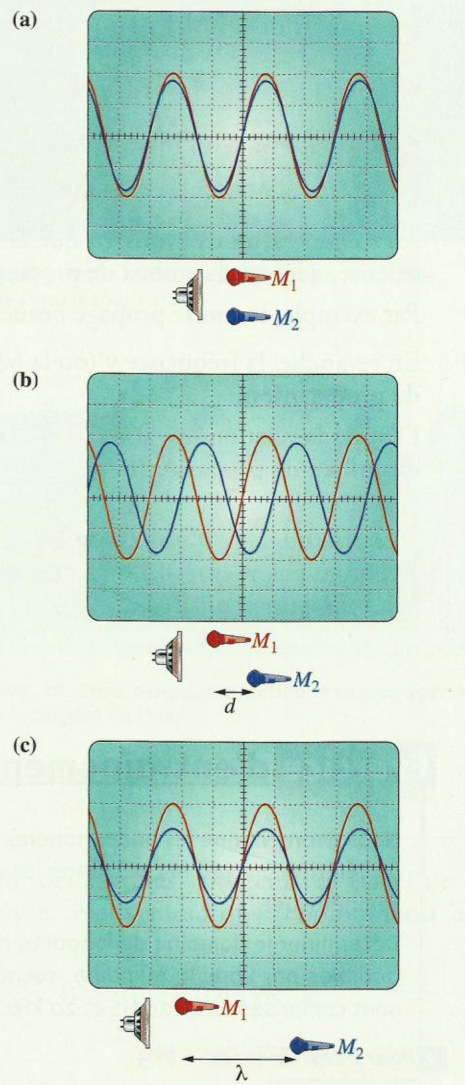
Lorsque nous continuons de déplacer M_2, nous retrouvons les deux sinusoïdes en phase pour des positions de M_2 consécutives, équidistantes, séparées à nouveau d'une distance λ.

> Interprétation

Les sinusoïdes sont en phase pour des distances multiples de la distance λ qui joue le rôle d'une période dans l'espace.

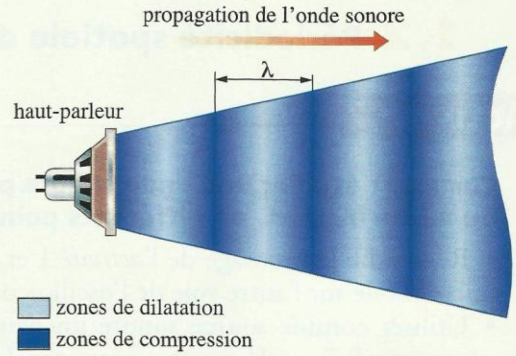
L'onde sonore présente une **périodicité spatiale** de période λ, appelée la **longueur d'onde** [Doc. 5c]. Les longueurs d'onde des ondes sonores, se propageant dans l'air, s'échelonnent de quelques centimètres à plusieurs mètres.

L'onde sonore progressive sinusoïdale présente une double périodicité :
- **une périodicité temporelle de période T ;**
- **une périodicité spatiale de période λ, appelée longueur d'onde.**



Doc. 5 *Oscillogrammes des tensions aux bornes des deux microphones.* ▶
a) Les microphones étant placés côte à côte, les sinusoïdes sont en phase.
b) Lorsqu'on éloigne les deux microphones, les sinusoïdes se décalent.
c) Pour une distance particulière λ entre les deux microphones, les sinusoïdes sont, à nouveau, en phase.

1.3 Période, longueur d'onde et fréquence

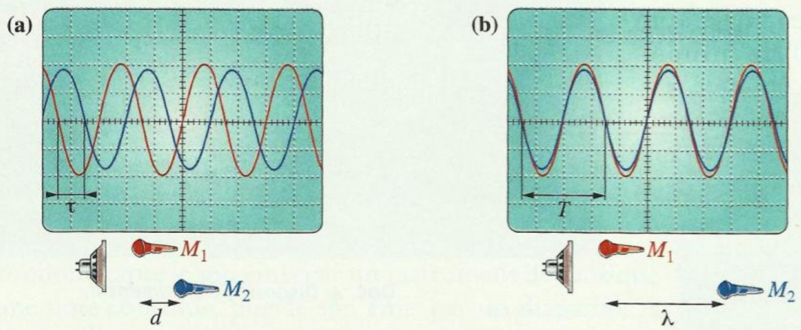


Doc. 7 *Onde sonore périodique. Des zones de compression et dilatation se propagent.*

Reprenons l'expérience de l'*activité* 2. Lorsque le microphone M_2 est décalé de la distance d par rapport au microphone M_1, l'onde captée par M_2 est en retard de τ par rapport à celle captée par M_1 **[Doc. 6a]**.

ϑ désignant la vitesse de propagation de l'onde, on peut écrire la relation :

$$\vartheta = \frac{d}{\tau}.$$



Doc. 6 **(a)** *Le déphasage entre les deux sinusoïdes est quelconque.*
(b) *Pour une distance λ entre les deux microphones, les deux sinusoïdes sont en phase.*

Lorsque le retard est égal à la période T, les ondes sont en phase **[Doc. 5c et 6b]** et la distance entre les microphones est égale à λ, telle que :

$$\vartheta = \frac{\lambda}{T}, \quad \text{soit } \lambda = \vartheta \cdot T. \quad \textbf{[Doc. 7]}$$

La longueur d'onde λ est la distance parcourue par l'onde pendant une période T : $\lambda = \vartheta \cdot T$.

- ***Période temporelle : T.***
- ***Période spatiale (longueur d'onde) : λ.***
- ***Relation : $\lambda = \vartheta \cdot T$.***

Au *chapitre* 1, nous avons vu que la vitesse de propagation d'une onde, ou célérité, dépend du milieu de propagation.

Par exemple, le son se propage beaucoup plus vite dans l'eau que dans l'air.

En revanche, **la fréquence ν** (ou la période $T = \frac{1}{\nu}$) **ne dépend pas du milieu de propagation.**

D'après la relation $\lambda = \vartheta \cdot T = \frac{\vartheta}{\nu}$, **la longueur d'onde dépend de ϑ, donc du milieu de propagation.**

La fréquence ν d'une onde est caractéristique de cette onde, elle ne change pas même si l'onde change de milieu. Ce n'est pas le cas de la longueur d'onde.

Dans l'air, les ondes sonores de faible amplitude et de fréquences différentes (sons graves et aigus) se propagent à la même vitesse de 340 m . s⁻¹.

Exercice d'entraînement 1

Nous avons vu que les ondes sonores se propagent dans l'air à la célérité $\vartheta = 340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, dans les conditions ordinaires de température.

Déterminer le domaine de longueur d'onde des ondes sonores audibles par l'oreille humaine, sachant que leurs fréquences sont comprises entre 20 Hz et 20 kHz.

Pour s'entraîner : Ex. 1 et 3

Appliquons la formule $\lambda = \frac{\vartheta}{\nu}$ et calculons les longueurs d'onde extrêmes :

– pour $\nu = 20$ Hz, $\lambda = \frac{340}{20} = 17$ m ;

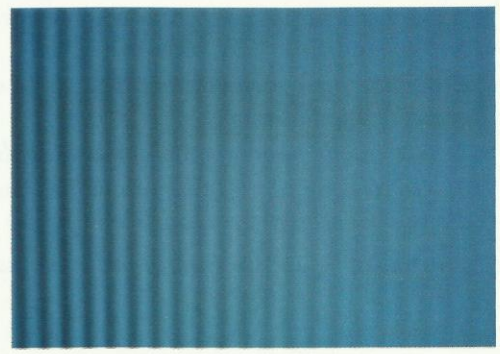
– pour $\nu = 20$ kHz, $\lambda = \frac{340}{20 \times 10^3} = 1{,}7 \times 10^{-2}$ m $= 1{,}7$ cm.

Le domaine de longueur d'onde des ondes sonores audibles par l'oreille humaine est compris entre **1,7 cm et 17 m.**

2. Comment caractériser une onde périodique à la surface de l'eau ?

La double périodicité observée pour les ondes sonores se retrouve-t-elle pour d'autres ondes mécaniques ? Examinons le cas des ondes à la surface de l'eau.

Doc. 8 *Onde circulaire périodique à la surface de l'eau.*



Doc. 9 *Onde rectiligne périodique à la surface de l'eau (échelle 1/10).*

Activité 3

Comment étudier la propagation d'une onde périodique à la surface de l'eau ?

- Un vibreur muni d'une pointe frappe, avec une fréquence connue, la surface de l'eau contenue dans une cuve à ondes **[Doc. 8]**.
- Éclairer la surface de l'eau avec un stroboscope qui est une source d'éclairs lumineux périodiques de fréquence ν_E connue et réglable. Il permet de déterminer la fréquence ν d'un phénomène périodique.
- Commencer l'éclairement par des éclairs de fréquence élevée, puis diminuer progressivement la fréquence.

Qu'observe-t-on ?

> Observation

En diminuant la fréquence des éclairs du stroboscope, c'est-à-dire en augmentant leur période, pour une valeur T_E de celle-ci, nous observons une première immobilité apparente des rides circulaires et du vibreur **[Doc. 8]**.

> Interprétation

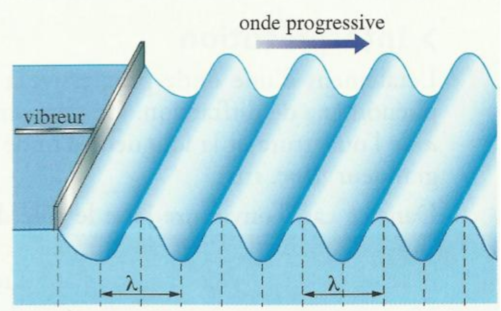
L'observateur a l'illusion de l'immobilité des rides (persistance des impressions lumineuses sur la rétine) si, entre deux éclairs (durée T_E), chaque ride a pris la place de celle qui la précédait (durée T). Nous avons alors $T_E = T$.

L'observation par stroboscopie d'une immobilité apparente montre que le phénomène est périodique.

Lors de l'immobilité apparente, nous pouvons constater que les rides à la surface de l'eau sont équidistantes : le phénomène présente une périodicité spatiale de valeur λ.

Toute onde périodique progressive présente une double périodicité :
- **une périodicité temporelle de période T ;**
- **une périodicité spatiale de période λ, appelée longueur d'onde.**

Si le vibreur est muni d'une réglette, les rides sont rectilignes : l'onde est rectiligne progressive périodique **[Doc. 9 et 10]**. C'est le cas des vagues produites dans le bassin de houle de l'*activité préparatoire A*, page 39.



Doc. 10 *Onde périodique rectiligne se propageant à la surface de l'eau.*

Exercice d'entraînement 2

Le **document 9** a été réalisé pour une fréquence d'immobilisation apparente $\nu_E = 15$ Hz.

Quelle est la célérité de l'onde à la surface de l'eau ?

Appliquons la formule $\lambda = \frac{\vartheta}{\nu}$, avec $\nu = \nu_E$; donc $\vartheta = \lambda \cdot \nu_E$.

La distance entre deux crêtes consécutives est égale à la longueur d'onde. Nous mesurons (compte-tenu de l'échelle) : $\lambda = 3$ cm.

D'où : $\vartheta = 3 \times 10^{-2} \times 15 = 0{,}45\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$.

> Pour s'entraîner : Ex. 5 et 8

3. Que se passe-t-il quand une onde rencontre un obstacle ?

Assis dans une salle de classe, si la porte est entrouverte, nous pouvons entendre une conversation qui se déroule dans le couloir. Pourtant, il existe des obstacles entre les sources sonores et l'auditeur.

Le document de la page 38 montre que l'onde engendrée par le tsunami contourne l'île de Sumatra.

Le contournement d'un obstacle par une onde est dû au **phénomène de diffraction**.

Activité 4

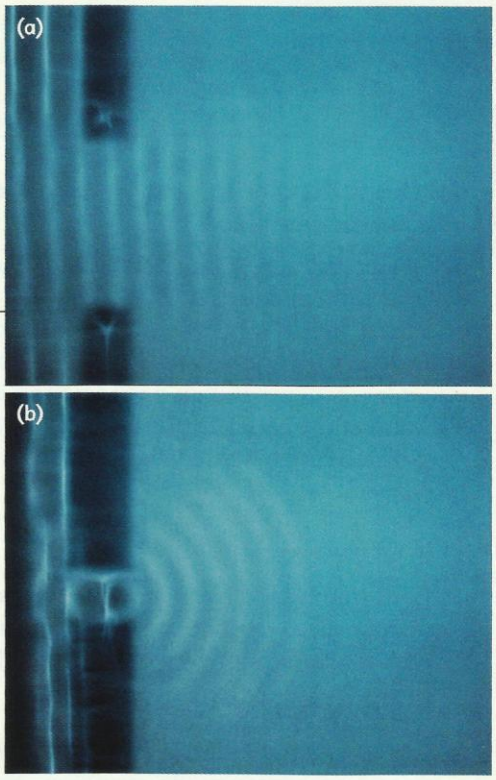
Comment observer un phénomène de diffraction ?

- Produire une onde périodique rectiligne à la surface de l'eau d'une cuve à ondes.
- Disposer, sur le trajet des ondes, deux règles permettant de créer une ouverture de largeur réglable **[Doc. 11]**.

1. L'onde affecte-t-elle des points de la surface que l'on aurait pu penser protégés par l'obstacle ?

2. Sur quelle photo, le phénomène de diffraction est-il le plus marqué ?

3. On désigne par a la largeur d'une ouverture et par λ la longueur d'onde. Comment est modifiée la figure de diffraction si l'on augmente le rapport $\frac{\lambda}{a}$ en diminuant la largeur de l'ouverture a ?



Doc. 11 *Passage d'une onde rectiligne à travers une ouverture.*
(a) *La largeur de la fente est supérieure à la longueur d'onde.*
(b) *La largeur de la fente est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde.*

> Observation

Après avoir traversé une ouverture assez étroite, l'onde n'est plus rectiligne ; elle semble circulaire, centrée sur l'ouverture **[Doc. 11b]**.

> Interprétation

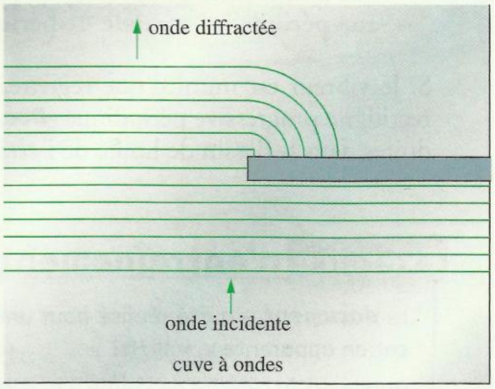
L'étalement d'une onde progressive à la sortie d'une ouverture illustre le phénomène de diffraction. Ce phénomène est important lorsque la largeur *a* de l'ouverture et la longueur d'onde λ de l'onde sont du même ordre de grandeur **[Doc. 11b]**.

Dans ce cas, **l'ouverture joue le rôle de source de très petites dimensions (source ponctuelle)** émettant une onde circulaire : tous les points situés derrière l'obstacle sont affectés par cette onde circulaire.

C'est ce qui est également observé sur le document de la page 38, où l'on voit l'onde, engendrée par le tsunami, être diffractée par le détroit situé entre Sumatra et Java.

Nous observons aussi le phéomène de diffraction lorsque nous disposons sur le trajet des ondes une seule règle parallèlement aux rides. Les ondes contournent la règle (ondes circulaires derrière la règle) **[Doc. 12]**. Cette expérience constitue une simulation de la diffraction de la houle par une jetée.

Ainsi, les ondes sonores émises par des personnes en conversation, dont les longueurs d'onde sont de l'ordre du mètre, peuvent être perçues par un auditeur situé derrière une porte entrouverte dont les dimensions sont aussi de l'ordre du mètre. C'est aussi la raison pour laquelle les murs antibruit ne peuvent pas arrêter parfaitement les ondes sonores sur les autoroutes (voir l'*activité préparatoire B*, page 39).



Doc. 12 *Lorsqu'on dispose, sur le trajet des ondes, une règle parallèle aux rides, les ondes contournent le bord de la règle. Celles situées derrière la règle sont circulaires : il y a diffraction des ondes rectilignes par le bord de la règle.*

Le phénomène de diffraction est caractéristique des ondes.
Il se manifeste lorsque les dimensions d'une ouverture ou d'un obstacle sont inférieures ou du même ordre de grandeur que la longueur d'onde.
L'onde diffractée a la même fréquence et la même longueur d'onde que l'onde incidente.

Pour s'entraîner : Ex. 9

4. La célérité d'une onde dépend-elle de sa fréquence ?

Doc. 13 *Pour les ondes sonores émises par les instruments de musique, l'air n'est pas un milieu dispersif. Les sons graves et les sons aigus arrivent en même temps aux oreilles du spectateur.*

Activité 5

Quelle est l'influence de la fréquence d'une onde sur sa vitesse de propagation ?

- Produire une onde rectiligne sur la surface de l'eau d'une cuve.
- Mesurer la longueur d'onde λ pour différentes fréquences ν de vibration du vibreur.
- Calculer, à partir des valeurs de λ et de ν, les valeurs correspondantes de ϑ.

La vitesse de propagation dépend-elle de la fréquence des ondes ?

Observation

Nous constatons que, lorsque nous modifions la fréquence ν de l'onde, la longueur d'onde λ est modifiée aussi.

La vitesse de propagation est telle que $\lambda = \frac{\vartheta}{\nu}$, soit $\vartheta = \lambda \, . \, \nu$.

Pour les ondes à la surface de l'eau, la valeur du produit $\vartheta = \lambda \, . \, \nu$ change lorsque nous modifions la fréquence ν.

Dans le cas des ondes sonores se propageant dans l'air, la valeur du produit $\vartheta = \lambda \, . \, \nu$ reste inchangée lorsque nous modifions la fréquence ν (voir l'*exercice d'entraînement* 1, page 42).

Interprétation

Un milieu dispersif est un milieu dans lequel la vitesse de propagation d'une onde dépend de sa fréquence.

L'eau est un milieu dispersif ; l'air ne l'est généralement pas **[Doc. 13]**.

En revanche, lorsque l'intensité sonore est trop grande (tonnerre), l'air peut être dispersif **[Doc. 14]**.

Proche de l'éclair, le tonnerre est un son très bref. En revanche, loin de l'éclair, on entend un grondement prolongé de plus en plus grave.

Le tonnerre est un son constitué d'ondes sonores de fréquences différentes. Les ondes de fréquences faibles (sons graves) se propagent moins vite que celles de fréquences plus élevées (sons aigus) ; les sons graves parviennent en dernier à l'observateur éloigné : c'est le grondement du tonnerre.

Doc. 14 *Pour le tonnerre, l'air est un milieu dispersif.*

Pour s'entraîner : Ex. 10