

Séquence 1

Ondes et matière

Problématique

Des sources « froides » (rayonnement cosmologique, nuages interstellaires, corps solides, etc.) aux plus « chaudes » (étoiles et sources associées), en passant par les sources composites comme les galaxies, l'Univers est rempli d'émetteurs électromagnétiques sur tout le spectre, qui interagissent avec l'atmosphère terrestre. Cette interaction, qui dépend du domaine spectral considéré, conditionne la nature de l'instrument d'observation, son support technologique et son altitude (du sol à l'extérieur de l'atmosphère).

L'Homme sait également fabriquer des sources de rayonnement sur l'ensemble du spectre, dans le visible, mais aussi dans les domaines radio, infrarouge et ultraviolet notamment.

Les photons associés aux ondes électromagnétiques, les particules élémentaires (électrons, protons, neutrinos, etc.), ou composites (noyaux, atomes, molécules) sont, à côté des ondes électromagnétiques et mécaniques, des supports précieux d'information.

Sommaire

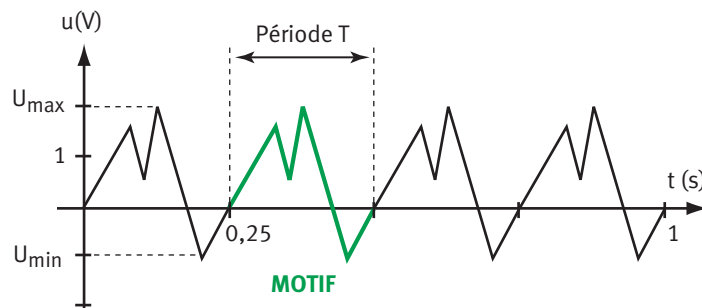
1. Prérequis
2. Ondes et particules
3. Caractéristiques des ondes
4. La diffraction
5. Les interférences
6. L'effet Doppler
7. Pour clore la séquence

Signaux périodiques et ondes

1. Signaux périodiques (niveau 2^{de})

Un signal est dit périodique lorsqu'une partie de celui-ci, le motif, se répète identique à lui-même au cours du temps.

Exemple d'une tension électrique périodique :



Grandeurs physiques caractérisant un signal périodique :

- La période T en secondes (s) : c'est la durée du motif.
- La fréquence ν en hertz (Hz) : elle est égale au nombre de motifs par seconde.

Période et fréquence d'un signal périodique sont reliées par la formule :

$$T = \frac{1}{\nu} \quad \begin{cases} T : \text{période en secondes (s)} \\ \nu : \text{fréquence en Hertz (Hz)} \end{cases}$$

2. Ondes sonores et ondes électromagnétiques (niveau 2^{de} et 1^{re} S)

Dans notre environnement, nous émettons et recevons des ondes qui apportent avec elles de l'énergie et des informations.

Les ondes sonores sont des ondes qui ont besoin d'un milieu matériel pour se propager (l'air par exemple). Les ondes électromagnétiques comme la lumière visible n'ont pas besoin d'un milieu matériel pour se propager : elles se propagent aisément dans l'espace (le vide). Tandis que les ondes sonores se déplacent à la vitesse de 340 m.s^{-1} dans l'air, les ondes électromagnétiques se propagent à la vitesse de la lumière ($c = 3.10^8 \text{ m.s}^{-1}$) dans le vide et dans l'air et à une vitesse plus faible dans les autres milieux.

Les radiations lumineuses sont des ondes périodiques que l'on peut caractériser par leurs fréquences mais aussi par leurs longueurs d'onde reliées par la relation suivante :

$$\lambda = c T = \frac{c}{\nu}$$

avec λ en m, T en s, ν en Hz ; c est la célérité de la lumière : $c = 3,00.10^8 \text{ m.s}^{-1}$.

Une radiation électromagnétique est dite monochromatique lorsqu'elle est composée d'une seule radiation de longueur d'onde déterminée (donc d'une seule couleur). C'est une onde électromagnétique progressive sinusoïdale de fréquence donnée. La couleur est liée à la valeur de sa fréquence.

Exemple Le laser.

Une radiation électromagnétique est dite polychromatique si elle est composée de plusieurs radiations de longueurs d'onde différentes (donc de plusieurs couleurs). Elle est donc composée de plusieurs ondes monochromatiques de fréquences différentes.

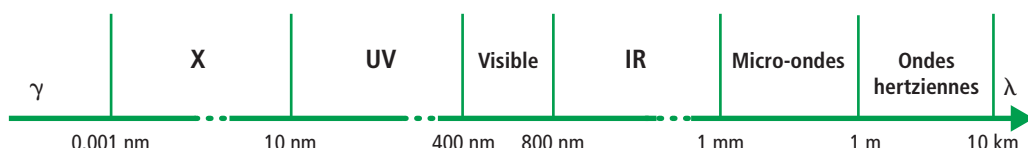
Exemple La lumière émise par le Soleil.



Domaine des ondes électromagnétiques en longueurs d'onde

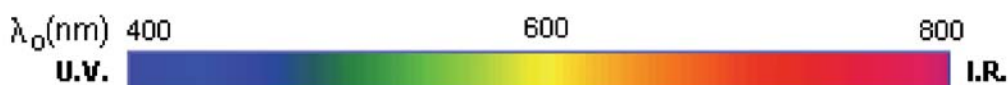
Les ondes hertziennes, les micro-ondes, les radiations infrarouges, la lumière, les rayons ultraviolets, les rayons X, les rayons γ sont toutes des ondes électromagnétiques.

Échelle des longueurs d'onde pour les différents domaines



1. Domaine visible

Pour le domaine des ondes visibles, l'intervalle de longueurs d'onde est souvent donné avec des valeurs arrondies [400 nm ; 800 nm] plus faciles à retenir.



2. Rayonnement infrarouge

D'une façon générale, tous les corps chauffés émettent de l'énergie sous forme d'infrarouge, même s'ils ne sont pas lumineux.



3. Rayonnement ultraviolet

Les sources d'ultraviolets, sont, avant tout, naturelles : le Soleil et les étoiles produisent des ultraviolets.

Les ultraviolets (UV) sont des ondes électromagnétiques dont les longueurs d'onde sont comprises entre 10 et environ 400 nm.



Couleur des corps chauffés

En 2^{nde}, nous avons vu que tout corps solide porté à haute température émet un spectre continu.

Le rayonnement thermique émis par un corps chauffé correspond à l'émission d'ondes électromagnétiques.

1. Rayonnement du corps noir (1^{re} S)

Lorsqu'un corps reçoit un rayonnement, il en absorbe une partie et diffuse le reste.

Le cas idéal d'un corps qui absorbe tous les rayonnements (quelle que soit la longueur d'onde) et qui ne diffuse rien est appelé « corps noir ».

Remarque

Un corps noir peut être très lumineux (cas du Soleil) car il absorbe les rayonnements qu'il reçoit de l'extérieur mais il émet des radiations du fait de son activité propre.

2. Loi de Wien (1^{re} S)

En 1893, le physicien Wilhelm Wien (1864-1928) a énoncé la loi reliant la valeur de λ_{max} et la température du corps noir :

$$\lambda_{\text{max}} T = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ K.m}$$

La longueur d'onde λ_{max} , correspondant au maximum d'émission lumineuse, est inversement proportionnelle à la température du corps chauffé.

La couleur de la lumière émise par une source lumineuse dépend de sa température. Plus la température est élevée, plus le spectre de la lumière émise va s'enrichir en radiation de longueur d'onde de plus en plus courte.



Interaction lumière-matière (1^{re} S)

1. Énergie du photon

À toute onde électromagnétique on peut donc associer un corpuscule énergétique se propageant à la vitesse de la lumière, le photon. On admettra qu'une onde électromagnétique peut s'interpréter comme un « flux » de photons.

L'énergie E d'un photon (en J) est liée à la fréquence ν du rayonnement par la

relation : $E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$.

h est la constante de Planck : $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$.

2. Quantification des niveaux d'énergie de la matière

L'atome ne peut exister que dans certains états d'énergie bien définis caractéristiques de l'élément ; chaque état est caractérisé par un niveau d'énergie.

La perte d'énergie d'un atome excité passant du niveau d'énergie E_p vers un niveau inférieur E_n s'accompagne de l'**émission d'un photon** d'énergie tel que :

$$E = E_p - E_n = h\nu.$$

L'**absorption d'énergie** lumineuse par un atome ne peut se faire que si l'énergie du photon permet une transition d'un niveau E_n à un niveau supérieur E_p tel que :

$$E = E_p - E_n = h\nu.$$

3. Spectre solaire

La surface chaude des étoiles émet une lumière dont le spectre est continu. Certaines radiations de cette lumière blanche traversant l'atmosphère de l'étoile sont absorbées par des atomes qui y sont présents.



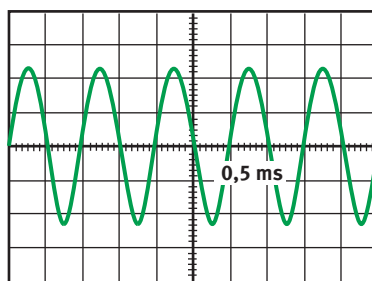
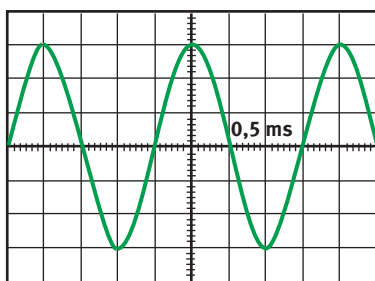
Les raies d'absorption sont caractéristiques des éléments qui constituent l'atmosphère de l'étoile et renseignent donc sur les entités chimiques présentes dans l'atmosphère de l'étoile.



Tests

Test 1

Sur ces oscillogrammes, une division correspond à 0,5 ms.



- 1 Lequel de ces deux signaux a la période la plus longue ? Calculer la valeur de cette période.
- 2 Lequel de ces deux signaux a la fréquence la plus grande ? Calculer la valeur de cette fréquence.

Test 2

À l'aide du paragraphe B (Domaine des ondes électromagnétiques en longueurs d'onde), ajouter dans la colonne de gauche du tableau la grandeur utile pour rechercher à quels domaines les ondes électromagnétiques (A, B, C et D) appartiennent (on complètera le tableau suivant).

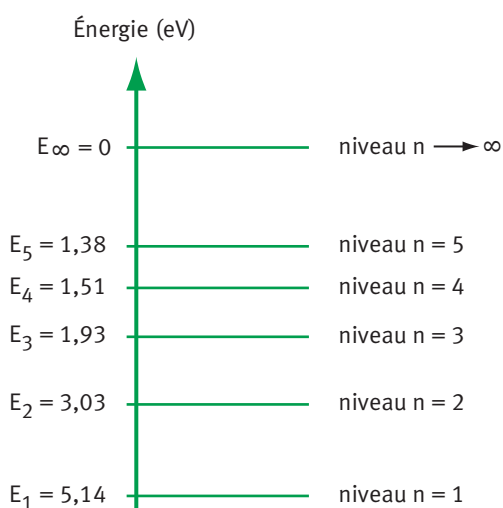
Ondes	A	B	C	D
Fréquence	105,5 MHz	$0,0852 \cdot 10^{15}$ Hz	50 GHz	$6 \cdot 10^{15}$ Hz
Longueur d'onde				
Domaine				

Test 3

Calculer la longueur d'onde correspondant au maximum de rayonnement solaire ; la température externe du Soleil est de 6 000 K.

Test 4

Une lampe à vapeur de sodium utilisée en TP émet une lumière jaune-orangé. Le diagramme énergétique simplifié de l'atome de sodium est reproduit ci-dessous.



Donnée $1\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

La couleur jaune-orangé correspond à une transition concernant les deux premiers niveaux ($n = 1$ et $n = 2$).

Représenter cette transition par une flèche sur le diagramme énergétique dans le cas d'une émission.

Calculer la longueur d'onde λ de la radiation émise par la lampe.

2

Ondes et particules

A

Objectifs

Connaître les rayonnements émis dans l'Univers.

- Savoir que certains rayonnements sont absorbés par l'atmosphère.
- Connaître des ondes de matière.
- Connaître l'intensité d'un son.
- Connaître et savoir exploiter la relation reliant le niveau d'intensité sonore à l'intensité sonore.
- Connaître des moyens de détecter les rayonnements et les ondes de matière.

B

Pour débiter

Les rayonnements dans l'Univers

Le rayonnement électromagnétique est notre principale source d'information sur l'univers. La lumière, constituant la frange du spectre visible pour l'œil, ne représente qu'une partie de ce rayonnement. Le spectre électromagnétique est l'ensemble de tous les rayonnements que l'Univers émet, allant des rayons gamma aux ondes radio.

Activité 1



Le texte ci-dessous est composé d'extraits d'un article introductif à l'astronomie que l'on peut découvrir sur le site web du CNES <http://smc.cnes.fr/Fr/astronomie.htm#top>.

Lire cet article puis répondre aux questions ; vous complèterez ensuite le tableau situé à la fin de l'activité.

« L'astronomie est une science en perpétuelle évolution. Elle se place à la pointe de la recherche à la fois observationnelle et théorique. Alors que depuis l'Antiquité et jusqu'au ^{xix}^e siècle, les observations étaient faites dans le domaine visible, on étudie maintenant la voûte céleste dans un nombre toujours plus grand de longueurs d'ondes du spectre électromagnétique : rayons Gamma, les rayons X, Ultraviolet (UV), Visible, Infrarouge (IR), domaine millimétrique et submillimétrique, ondes radio... La multiplication de ces observations permet d'étudier des phénomènes de plus en plus variés ce qui, au final, améliore notre compréhension globale de l'Univers.

Divers phénomènes restreignent les possibilités d'observation depuis le sol, entre autres, la turbulence naturelle de l'air qui crée des variations de densité donc des instabilités d'image et limite la résolution aux environs



d'une seconde d'arc. En outre, certains rayonnements (Gamma, X...) sont purement et simplement absorbés par l'atmosphère et donc inobservables depuis le sol. Le spatial joue alors un rôle fondamental dans l'astrophysique moderne en autorisant des mesures irréalisables par le passé.

Les observations dans le domaine visible et ultra-violet

Les télescopes spatiaux fonctionnant dans le domaine du visible permettent d'étudier des objets célestes cent fois moins lumineux que ceux observés du sol. L'émission astronomique dans l'ultraviolet est pratiquement inobservable au sol en raison de l'opacité des divers constituants atmosphériques (ozone, oxygène, vapeur d'eau...).

C'est dans l'UV que les étoiles chaudes émettent l'essentiel de leur énergie (c'est souvent le rayonnement UV qui ionise les nuages interstellaires, lesquels réémettent des radiations IR ou visibles).

C'est aussi dans ce domaine qu'on peut réaliser l'étude du milieu interstellaire à partir duquel les étoiles se forment et dans lequel les explosions stellaires (supernovae) et les éjections de matière (novae, étoiles éruptives) transfèrent une partie des éléments formés dans les étoiles. Ce domaine de longueurs d'ondes est donc essentiel pour étudier l'évolution des étoiles.

Le domaine visible reste celui où il est possible d'atteindre les meilleures performances instrumentales que ce soit au niveau de la résolution angulaire ou de la photométrie. Ce domaine d'investigation reste donc très utilisé par les scientifiques.

L'astronomie infrarouge et submillimétrique

C'est dans ce domaine que les objets « froids » de l'Univers émettent le plus d'énergie et donc sont le plus facilement observables. L'appellation « objets froids » recouvre l'ensemble des objets célestes dont la température est inférieure à quelques centaines de degrés Kelvin. Ils sont nombreux et se rencontrent à toutes les échelles de l'Univers, des planètes très proches de nous, jusqu'au rayonnement fossile de l'Univers.

Ce domaine est donc favorable à l'observation des étoiles en cours de formation ou en fin de vie. Dans les deux cas, ce sont les nuages de poussières qui les entourent qui émettent des radiations IR conséquences du chauffage qu'ils subissent par les étoiles voisines.

Par ailleurs, l'observation du ciel dans ce domaine est particulièrement utilisée pour l'étude de notre propre galaxie (sa partie centrale, inobservable dans le visible en raison de l'écran de matière interstellaire, libère une forte énergie IR), pour celle des autres galaxies (celles à petit noyau très lumineux émettent un gigantesque rayonnement IR) ainsi que pour celle de l'atmosphère des planètes du système solaire.

L'astronomie X

Les rayons X peuvent être émis par les atomes chauffés à hautes températures ou lors d'interactions entre des électrons de grande énergie et d'autres particules ou champs magnétiques. Les sources X peuvent être périodiques (pulsars, binaires à éclipse dont une composante est une source X) ou non périodiques : des radiogalaxies, des pulsars, des étoiles, des novae, des quasars émettent des radiations X.

L'astronomie des hautes énergies (gamma)

Le développement de détecteurs capables de mesurer le rayonnement de très haute énergie (typiquement entre quelques centaines de keV et quelques dizaines de MeV) a permis l'observation détaillée des processus violents de l'Univers (novae, supernovae, galaxies actives, etc.), que l'on observait jusqu'à présent essentiellement dans le visible.

Ces phénomènes violents produisent des particules de très hautes énergies : les rayons cosmiques (mélange de protons et de noyaux auxquels s'ajoutent une faible proportion d'électrons). De l'interaction de ces rayons cosmiques avec la matière, les champs magnétiques et la lumière, naissent des photons Gamma. Ceux-ci se propagent en ligne droite et apportent des informations sur leur lieu d'origine.

L'observation Gamma est alors un outil unique pour localiser et étudier les sites où se produisent les grands transferts d'énergie associés aux interactions de particules ou aux processus nucléaires. L'astronomie gamma, par l'étude des processus violents, permet d'étudier les phases ultimes de l'évolution des étoiles : pulsars, étoiles à neutrons, trous noirs. »

© CNES, 2006.

<http://missions-scientifiques.cnes.fr>

- ❶ À quel domaine appartiennent les ondes submillimétriques ?
- ❷ Comment définir un rayon cosmique ?
- ❸ Pourquoi est-on obligé, pour détecter certaines ondes, de se placer dans l'espace ?
- ❹ Qu'est-ce qu'un pulsar ?
- ❺ Compléter le tableau suivant.

Données h est la constante de Planck : $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ J.s ; une énergie de 1 eV correspond à $1,6 \cdot 10^{-19}$ J.

Nom du rayonnement	Gamma	X	UV	Visible	IR	Radio
Intervalle de longueur d'onde	< 0,001 nm	[0,001 ; 10] (nm)	[10 ; 400] (nm)	[400 ; 800] (nm)	[800 nm ; 1 mm]	> 1mm
Fréquence (Hz)						
Énergie des photons (en J)						
Énergie des photons (en eV)						
Origines dans l'Univers						



Pour apprendre

1. Les ondes électromagnétiques

a) Absorption du rayonnement par les molécules atmosphériques

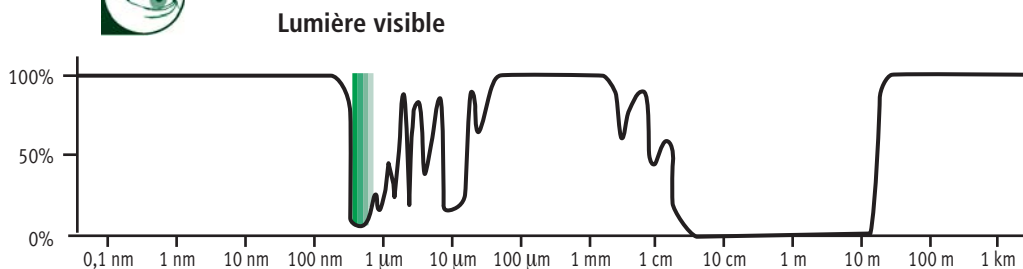
Des sources « froides » (rayonnement cosmologique, nuages interstellaires, corps solides, etc.) aux plus « chaudes » (étoiles et sources associées), en passant par les sources composites comme les galaxies, l'Univers est rempli d'émetteurs électromagnétiques sur tout le spectre, qui interagissent avec l'atmosphère terrestre. Cette interaction, qui dépend du domaine spectral considéré, conditionne la nature de l'instrument d'observation, son support technologique et son altitude (du sol à l'extérieur de l'atmosphère).

Dans le texte de l'activité 1, nous avons vu que certains rayonnements étaient absorbés par l'atmosphère. La figure de l'activité 2 va vous permettre de savoir quels sont les rayonnements absorbés.

Activité 2



La figure suivante donne le taux d'absorption des rayonnements par l'atmosphère en fonction de la longueur d'onde λ .



- 1 Replacer sur le schéma les domaines d'ondes correspondant aux rayonnements gamma, X, UV... et radio ?
- 2 L'atmosphère est-elle opaque aux rayonnements gamma et X ?
- 3 Quels sont les rayonnements les moins absorbés ?
- 4 Pourquoi les radiotélescopes sont-ils construits dans les déserts ?

Exemple

Absorption du rayonnement UV émis par le Soleil.

Au cours de leur pénétration dans l'atmosphère, les photons solaires sont progressivement absorbés.

Par exemple, le rayonnement UV est absorbé dans la mésosphère pour les radiations les plus énergétiques et dans la stratosphère pour les radiations les moins énergétiques (par l'ozone...).

La destruction de l'ozone diminue l'absorption des photons de longueur d'onde comprise entre 200 et 300 nm qui sont dangereux pour notre santé.

Activité 3



Le site Internet <http://planet-terre.ens-lyon.fr/> contient des informations supplémentaires sur l'étude du rayonnement de l'Univers et son absorption par l'atmosphère terrestre. En voici un extrait :

« Absorption du rayonnement par les molécules atmosphériques

Au cours de leur pénétration dans l'atmosphère, les photons solaires entrent en collision avec les molécules atmosphériques et sont progressivement absorbés. L'absorption du rayonnement par les molécules atmosphériques est intimement liée à leurs caractéristiques énergétiques. Une molécule possède des niveaux énergétiques discrets ou quantifiés associés à des états de rotation, de vibration ou de configuration électronique. Un photon peut être absorbé lorsque son énergie correspond à une transition entre le niveau fondamental et un de ces états excités. D'autre part, une molécule peut être dissociée par des photons dépassant l'énergie d'ionisation de la molécule. Il y a alors un continuum énergétique d'absorption au-delà de l'énergie d'ionisation. »

Ainsi, on peut distinguer quatre types d'absorption suivant l'énergie du photon incident : plus l'énergie du photon augmente, plus l'effet du rayonnement sur la molécule est important. Pour des énergies faibles, la molécule réceptrice va

tourner autour d'elle-même. Cet effet se rencontre souvent mais peut être amplifié artificiellement pour augmenter la température d'un corps. Au-delà d'une certaine valeur de l'énergie du photon, les molécules vont se mettre à vibrer de différentes manières, entraînant également une augmentation de la température du corps. Cet effet se rencontre pour de nombreuses molécules et a pour conséquence l'effet de serre de l'atmosphère car les radiations ayant ces énergies peuvent aussi bien être émises par le Soleil que par la Terre. Si on a des énergies du photon encore plus élevées, il peut y avoir dissociation de la molécule réceptrice. De telles radiations sont en grande partie absorbées par la couche d'ozone à haute altitude mais pas totalement...

Les molécules situées dans l'atmosphère peuvent absorber des rayonnements.

Une molécule possède des niveaux énergétiques discrets ou quantifiés associés à des états de rotation, de vibration ou de configuration électronique.

Un photon peut être absorbé lorsque son énergie correspond à une transition entre le niveau fondamental et un de ces états excités.

À partir des documents précédents, compléter le tableau suivant traduisant l'effet du rayonnement électromagnétique sur les molécules en utilisant les expressions données : « les molécules changent de configuration électronique », « les molécules sont dissociées », « les molécules vibrent », « les molécules tournent ».

Rayonnement	Ultraviolet	Visible	Infrarouge	Micro-ondes
Effet sur les molécules				

b) Sources de rayonnement fabriquées par l'Homme

L'Homme sait également fabriquer des sources de rayonnement sur l'ensemble du spectre électromagnétique.

→ Les rayonnements gamma et X

L'Homme sait fabriquer des rayons gamma et X à partir d'éléments radioactifs. Ils sont utilisés en médecine et dans l'industrie.

Activité 4



Rechercher quels sont les deux premiers scientifiques qui ont permis la fabrication d'une source de rayons X.

Expliquer rapidement le principe du premier tube à rayons X.

→ Le rayonnement UV

On utilise des lampes à vapeur (gaz) ; une décharge électrique dans les gaz à basse pression excite les électrons qui, en se réorganisant, produisent des UV.

Exemple

La lampe à vapeur de mercure (rayonnement UV de 0,2 à 0,4 μm).

→ Le rayonnement visible

Tout corps solide porté à haute température émet un spectre continu de radiations. Plus la température est élevée et plus le spectre s'enrichit en radiations de courtes longueurs d'onde (vers le violet).

À faible pression, de nombreux gaz, subissant par exemple une décharge électrique, émettent des radiations distinctes ; on obtient un spectre de raies.

Les filaments chauffés à haute température, les tubes à gaz sous faible pression, les lasers sont des sources de lumière.

→ Le rayonnement IR

En 1800, W. Herschel observe que, suivant la couleur du filtre optique qu'il utilise dans ses télescopes, sa sensation de chaleur à l'œil varie avec la sensation de lumière. En décomposant la lumière à l'aide d'un prisme, il s'est aperçu qu'un thermomètre placé au-delà du rouge mesurait une température plus grande que celle de l'air ambiant.

Une ampoule émet de la lumière parce que le filament est chauffé par le passage du courant ; le filament chauffé rayonne de la lumière visible et des IR. D'une façon générale, tous les corps chauffés émettent de l'énergie sous forme d'infrarouges même s'ils ne sont pas lumineux.

→ Les ondes radio

Une onde radio peut être produite par les vibrations des électrons libres présents dans un circuit électrique sous l'influence d'une tension électrique variable (oscillations électriques). Les oscillations électriques sont transférées à une antenne radioélectrique qui permet d'émettre l'onde radio électromagnétique.

Exemples Émetteur radio FM, téléphone portable...

2. Les ondes dans la matière

Contrairement à la lumière, qui est capable de se propager dans le vide et dans la matière, certaines ondes comme la houle, les sons, les ondes sismiques ne se propagent que dans la matière.

La propagation des ondes de matière dépend des propriétés mécaniques de cette dernière. La matière perturbée par une vibration tend à retrouver son état initial.

a) La houle

Activité 5



Le texte ci-après est composé d'extraits d'un cours d'océanographie, « Les ondes dans l'océan », que l'on peut découvrir sur le site web de l'IFREMER (et édité par son laboratoire de physique des océans) : http://www.ifremer.fr/lpo/cours/vagues_ondes/index.html.

« En océanographie, les ondes de surface se matérialisent par une déformation de l'interface entre l'océan et l'atmosphère. Les particules d'eau mises en mouvement au passage d'une onde se déplacent avec un petit mouvement qui leur est propre, mais restent en moyenne à la même position.

La houle est formée par le vent : c'est un phénomène périodique, se présentant sous l'aspect de vagues parallèles avec une longueur d'onde λ de l'ordre de 100 m au large, où la profondeur moyenne de l'océan est d'environ 4 000 m.

On peut classer les ondes de surface, en fonction de leurs caractéristiques et de celles du milieu de propagation, en « ondes courtes » et en « ondes longues ».

Ondes courtes : lorsque la longueur d'onde λ est faible par rapport à la profondeur locale h de l'océan (au moins $\lambda < 0,5 h$).

Leur célérité v est définie par : $v = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}}$.

Ondes longues : lorsque la longueur d'onde λ est très grande par rapport à la profondeur h de l'océan ($\lambda > 10 h$), les ondes sont appelées ondes longues.

Leur célérité v est définie par : $v = \sqrt{gh}$.

- 1 Au large (avec $h_1 = 4\,000$ m), la houle est-elle classée en ondes courtes ou longues ?

Évaluer la célérité v_1 d'une houle de longueur d'onde $\lambda_1 = 80$ m, ainsi que la période T de ses vagues.

- 1 En arrivant près d'une côte sablonneuse (profondeur d'eau $h_2 = 3,0$ m), la longueur d'onde de la houle devient grande par rapport à la profondeur, elle rentre donc dans la catégorie des ondes longues. Sachant que sa période T ne varie pas, évaluer alors sa nouvelle célérité v_2 , ainsi que sa nouvelle longueur d'onde λ_2 .

b) Les ondes sismiques

Lors d'un séisme, la Terre est mise en mouvement par des ondes de différentes natures, qui occasionnent des secousses plus ou moins violentes et destructrices en surface.



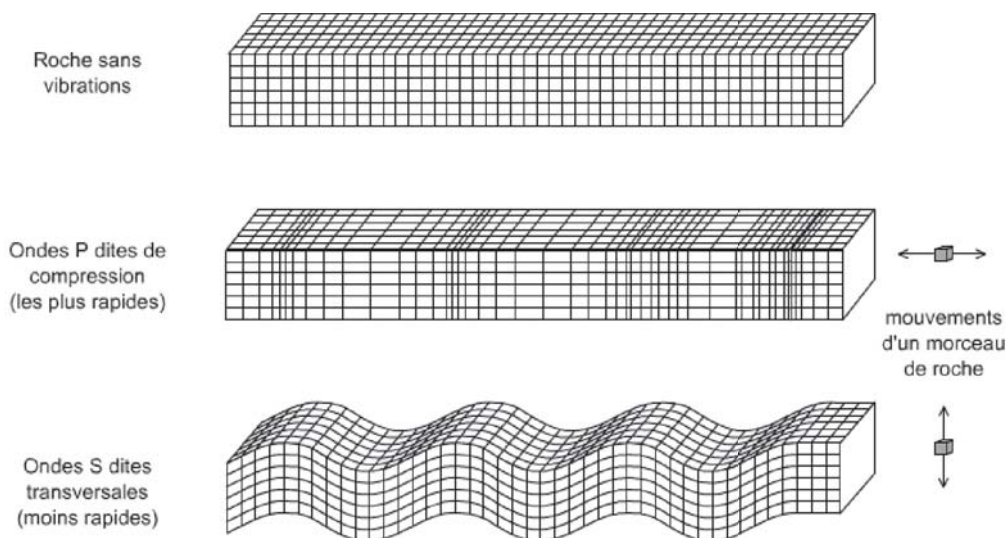
→ Ondes P et S (connaissances spécifiques de SVT)

On distingue :

- les ondes P, les plus rapides, se propageant dans les solides et les liquides,
- les ondes S, moins rapides, ne se propageant que dans les solides.

L'enregistrement de ces ondes par des sismographes à la surface de la Terre permet de déterminer l'épicentre du séisme (lieu de naissance de la perturbation).

Les schémas suivants modélisent la progression des ondes sismiques dans une couche terrestre lorsque le sens de propagation de l'onde se fait vers la droite.



→ La magnitude d'un tremblement de terre

La magnitude d'un tremblement de terre mesure l'énergie libérée au foyer d'un séisme.

Plus le séisme libère de l'énergie et plus la magnitude est élevée.

L'échelle de Richter, présentée dans les médias, est une échelle uniquement adaptée aux tremblements de terre californiens.

Activité 6



Quelle était la magnitude du tremblement de terre du 11 mars 2011 au Japon ?
Rechercher les effets des tremblements de terre suivant leur magnitude.

Magnitude	Effets
2,0 à 2,9	
3,0 à 3,9	
4,0 à 4,9	
5,0 à 5,9	
6,0 à 6,9	
7,0 à 7,9	
8,0 à 8,9	

c) Les ondes sonores

→ Ondes de compression-dilatation

Le son se propage d'un émetteur à un récepteur.



Le son est produit par les vibrations d'un émetteur.

Exemples d'émetteurs sonores : cordes vocales, membrane d'un haut-parleur, instrument de musique, diapason...

Une vibration est un mouvement de va-et-vient, périodique, c'est-à-dire qui se reproduit identique à lui-même à intervalles de temps égaux. La période et la fréquence sont caractéristiques de la vibration.

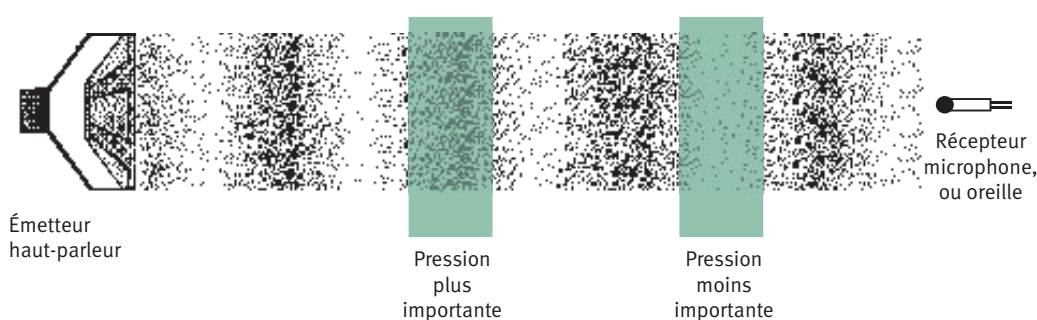
Nous entendons le son produit par un émetteur à une certaine distance : le son se propage depuis l'émetteur jusqu'au récepteur. La vibration de l'émetteur modifie le milieu de propagation.

Dans l'air, par exemple, la vibration se propage de la membrane du haut-parleur vers les couches d'air qui se trouvent devant elle ; la propagation du son se traduit par la mise en mouvement, de proche en proche, des molécules de part et d'autre de leur position moyenne, comme les spires d'un ressort. Il en résulte des variations de pression dans l'espace de propagation.

Les récepteurs tels que l'oreille ou le microphone sont sensibles à la variation de pression.

Un ensemble de molécules qui vibrent reste globalement au même endroit : il n'y a pas de déplacement de matière de l'émetteur au récepteur.

Modélisation de l'air lorsqu'un haut-parleur fonctionne



Les ondes sonores sont des ondes de compression-dilatation.

L'onde sonore nécessite la présence d'un milieu matériel pour se propager. Cette onde crée de proche en proche des zones de compression et de dilatation du milieu.

La vitesse du son dépend du milieu de propagation. La vitesse du son dans l'air est de l'ordre de 340 m.s^{-1} à température et pression ordinaires.

Cette modification se produit donc dans le milieu à partir de l'émetteur, puis de plus en plus loin de l'émetteur : c'est ce qu'on appelle une onde.

Le déplacement du son correspond à la propagation de l'onde sonore.

→ Intensité d'un son

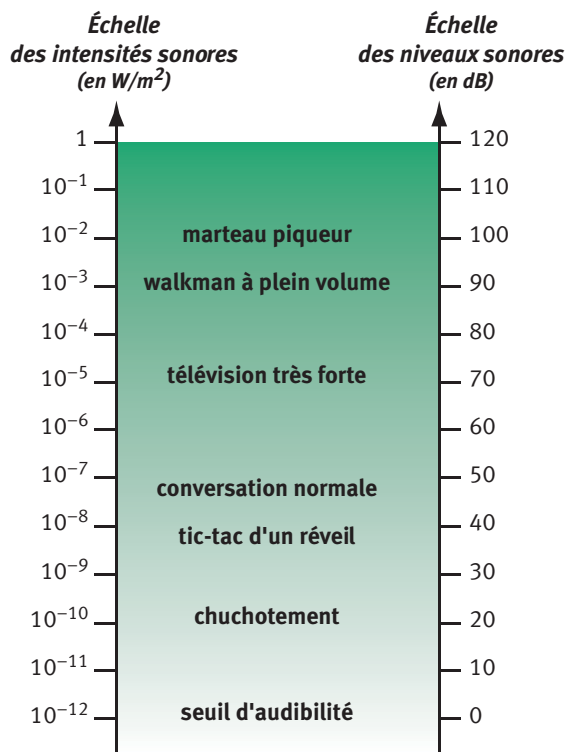
L'amplitude des variations de pression qui accompagne la propagation d'un son crée des effets mécaniques au niveau du récepteur (oreille, microphone...). Pour évaluer ces effets, on mesure la puissance sonore P d'un émetteur exprimée en watt (W) ; la puissance sonore croît avec l'amplitude de la vibration. Elle est caractéristique de l'émetteur.

L'intensité sonore I en watt par mètre carré est une grandeur plus significative de ce que reçoit un récepteur (tympan...) de surface S :

$$I = \frac{P}{S}.$$

Quelques valeurs de l'intensité sonore : intensité sonore au seuil d'audibilité $I_0 = 10^{-12} \text{ W.m}^{-2}$; intensité sonore au seuil de douleur : $I_{\text{max}} = 1 \text{ W.m}^{-2}$.

Correspondance entre l'échelle des niveaux sonores et l'échelle des intensités



L'intensité sonore perçue varie avec l'amplitude de la source sonore (puissance), avec les propriétés absorbantes du milieu et diminue avec le carré de la distance à la source.

L'intensité sonore a pour référence le seuil d'audibilité : $I_0 = 1.10^{-12} \text{ W.m}^{-2}$.

Elle permet de définir le niveau sonore de symbole L (comme Level) par :

$$L = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

Il s'exprime en décibel acoustique dB_A .

Ainsi, le seuil d'audibilité correspond à un niveau sonore égal à 0.

On obtient donc une échelle absolue de niveau sonore pour laquelle on fixe arbitrairement le point de référence de niveau sonore $L_0 = 0$, correspondant au seuil minimal d'un son audible à 1 000 Hz, d'intensité : $I_0 = 10^{-12} \text{ W.m}^{-2}$.

Pour obtenir la valeur de l'intensité sonore à partir du niveau sonore, il faudra utiliser la fonction 10^x qui est la fonction inverse de la fonction $\log$:

$$I = I_0 10^{\frac{L}{10}}$$

Remarque

La fonction logarithme sera vue en cours d'année dans le cours de mathématiques. Pour résoudre les exercices, vous n'avez besoin que des relations précédentes et d'un bon usage de votre calculatrice.

Activité 7



À quelle augmentation d'intensité sonore correspond une augmentation de 3 décibels (pour un lave-vaisselle d'intensité 50 dB_A au lieu de 47 dB_A par exemple) ?

3. Détecteurs d'ondes et de particules

Pour découvrir l'Univers et comprendre son évolution, celui-ci est observé depuis le sol et depuis l'espace.

a) Détecteurs d'ondes

→ Détection des ultrasons

La détection d'ultrasons est basée sur les propriétés piézoélectriques des céramiques : lorsque les ultrasons font vibrer la céramique, une tension électrique apparaît aux bornes de celle-ci.

→ Détection des ondes sismiques

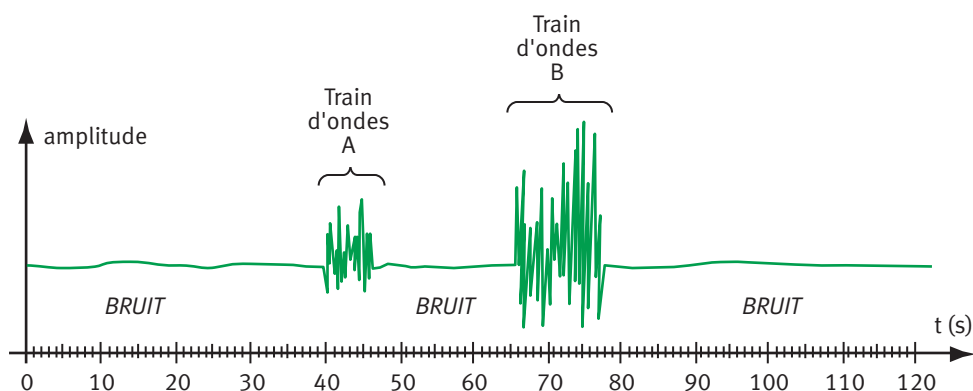
La détection des ondes sismiques se fait avec un sismographe qui mesure les mouvements du sol. Nous avons vu dans le paragraphe précédent un sismogramme, qui est l'enregistrement de ces mouvements du sol.

Activité 8



Un séisme s'est produit à San Francisco (Californie) en 1989.

Le document ci-dessous présente le sismogramme obtenu, lors de ce séisme à la station Eureka.



Le sismogramme a été enregistré à Eureka, station sismique située au nord de la Californie. L'origine du repère ($t = 0$ s) a été choisie à la date du début du séisme à San Francisco.

Le sismogramme présente deux trains d'ondes repérés par A et B.

- 1 À quel type d'onde (S ou P) correspond chaque train ? Justifier votre réponse à l'aide du texte d'introduction du paragraphe 2b (onde sismique).
- 2 Sachant que le début du séisme a été détecté à Eureka à 8 h 15 min 20 s TU (Temps Universel), déterminer l'heure TU (h ; min ; s) à laquelle le séisme s'est déclenché à l'épicentre.
- 3 Sachant que les ondes P se propagent à une célérité moyenne de 10 km.s^{-1} , calculer la distance séparant l'épicentre du séisme de la station Eureka.
- 4 Calculer la célérité moyenne des ondes S.

→ Détection des ondes électromagnétiques

La détection des ondes électromagnétiques se fait au sol ou dans les astres.

Au sol, les observations sont réalisées dans les domaines de la lumière visible, des ondes radio avec des télescopes et des radiotélescopes. Ces radiotélescopes sont implantés au sommet de hautes montagnes afin de bénéficier des meilleures conditions d'observation.

Activité 9



Rechercher quels sont les objectifs des missions spatiales Corot et Planck (quelles sont les études effectuées) et quels sont les détecteurs utilisés (télescopes...).

On pourra utiliser le site web du CNES <http://smc.cnes.fr/Fr/astrophysique.htm#top>.

b) Détecteurs de particules

Les collisions entre les particules très énergétiques qui composent les rayons cosmiques et les noyaux des molécules composant l'atmosphère engendrent des particules qui, après de nouvelles collisions avec de nouveaux noyaux, vont créer d'autres particules...

Les trajectoires de ces particules peuvent être matérialisées grâce à un dispositif appelé « chambre à brouillard », réalisé par le physicien écossais Wilson (1912).

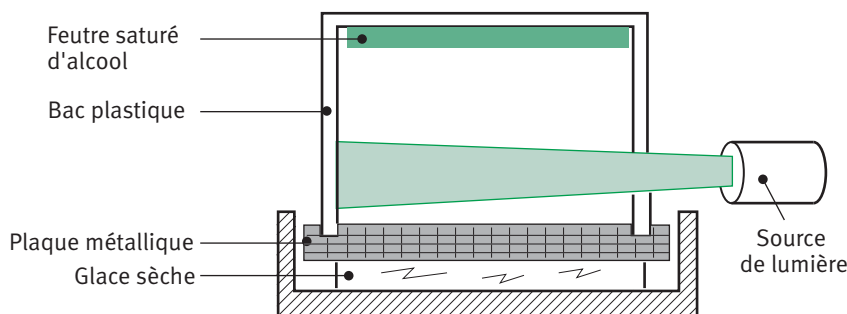
À chaque fois qu'une particule chargée traverse le gaz saturé en vapeur de solvant volatil dans les conditions de l'expérience (méthanol, éthanol, eau...), elle provoque sur son passage la formation de gouttelettes de condensation. Cela permet de trouver la nature de la particule observée puisque chaque type de particule (proton, électron...) produit une trace caractéristique permettant de l'identifier.

On peut créer, par exemple, un brouillard d'alcool qui est alors dans un état métastable.

On peut ainsi, avec ce dispositif, matérialiser les trajectoires de muons.

Cette expérience a été réalisée par un groupe d'élèves du lycée Pilote Innovant International du Futuroscope Jaunay Clan dans le cadre des Olympiades de Physique (1^{er} prix).

Ci-dessous, le schéma d'une chambre à brouillard expérimentale



Activité 10



Les neutrinos, contrairement à la lumière, peuvent traverser l'Univers sans quasiment jamais être arrêtés.

- 1 Citer deux sources astrophysiques de neutrinos.
- 2 Le télescope Antares est-il capable de détecter tous les neutrinos ?

On utilisera Internet.



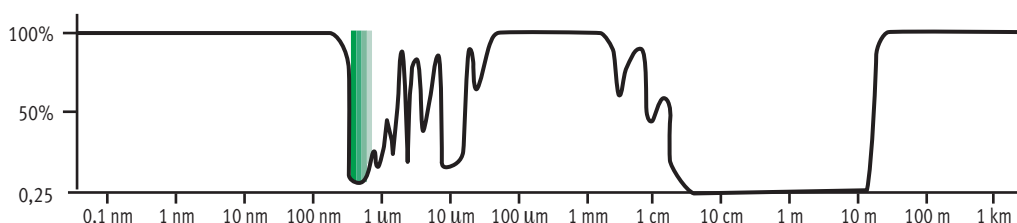
Pour conclure

1. Résumé du chapitre

Rayonnements émis dans l'univers

Nom du rayonnement	Gamma	X	UV	Visible	IR	Radio
Intervalle de longueur d'onde	< 0,001 nm	[0,001 ; 10] (nm)	[10 ; 400] (nm)	[400 ; 800] (nm)	[800 nm ; 1 mm]	> 1 mm

Rayonnements (en pourcentage) absorbés par l'atmosphère



L'atmosphère absorbe totalement les rayons γ et X, fortement les UV et partiellement les rayonnements visibles et infrarouges. Par contre, les ondes radio ne sont pas absorbées dans un grand intervalle de fréquence. Ce qui explique le développement des observations astronomiques par radiotélescope sur Terre.

L'Homme sait également fabriquer des sources de rayonnement sur l'ensemble du spectre électromagnétique :

- les rayonnements gamma et X : éléments radioactifs, tubes à rayons X
- le rayonnement UV : lampes à vapeur sous basse pression
- le rayonnement visible : corps chauffés (lampe à incandescence), lampes à décharge (néon...)
- le rayonnement IR : corps chauffés (lampe IR)
- les ondes radio : circuit électrique sous tension électrique variable associé à une antenne.

Contrairement à la lumière, qui est capable de se propager dans le vide et dans la matière, certaines ondes ne se propagent que dans la matière :

- la houle,
- les sons,
- les ondes sismiques.

Le niveau sonore de symbole L (comme Level) est défini par :

$$L = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

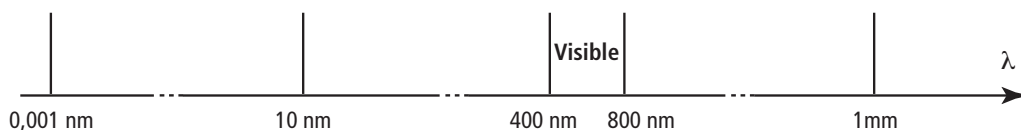
Il s'exprime en décibels acoustiques dB_A .

L'intensité sonore I a pour référence : $I_0 = 1.10^{-12} \text{ W.m}^{-2}$; elle s'exprime en watt par mètre carré.

2. Exercices d'apprentissage

Exercice 1 Ondes électromagnétiques

- 1 Attribuer à chaque intervalle le domaine qui lui correspond : domaine des rayons X, des infrarouges et des ultraviolets.



- 2 Attribuer à chacune des zones : rayons X, infrarouges et ultraviolets, un exemple de source choisi parmi les suivants : tube de Coolidge, radiateur électrique, lampe à vapeur de mercure.
- 3 Donner la valeur et l'unité de la célérité c de la lumière dans le vide.
- 4 a) Calculer la fréquence ν_1 d'une radiation de longueur d'onde $\lambda_1 = 750$ nm.
b) Calculer la fréquence ν_2 d'une radiation de longueur d'onde $\lambda_2 = 10$ nm.
c) Recopier correctement la phrase suivante en choisissant les adjectifs qui conviennent parmi ceux proposés : « plus la fréquence d'une onde est élevée, plus sa longueur d'onde est (petite ou grande). »
- 5 a) Calculer l'énergie E_1 associée au photon de fréquence $\nu_1 = 4.10^{14}$ Hz.
b) Calculer l'énergie E_2 associée au photon de fréquence $\nu_2 = 3.10^{16}$ Hz.
c) Recopier correctement la phrase suivante en choisissant les adjectifs qui conviennent parmi ceux proposés : « plus la fréquence d'une onde est élevée, plus son énergie est (faible ou forte).

Exercice 2 Intensité sonore

On mesure le niveau sonore (L) produit par un haut-parleur en un point A situé à 1 m devant lui en y disposant un sonomètre.

Le niveau sonore (ou niveau d'intensité acoustique) mesuré au point A est $L = 92$ dB.

Quelle est l'intensité sonore (ou intensité acoustique) I (en W.m^{-2}) au point A, sachant que l'intensité sonore correspondant au seuil d'audibilité à 1 000 Hz est $I_0 = 10^{-12} \text{ W.m}^{-2}$?

3

Caractéristiques des ondes

A

Objectifs d'apprentissage

- Définir une onde progressive à une dimension.
- Connaître et exploiter la relation entre retard, distance et vitesse de propagation.
- Connaître et exploiter la relation entre la période, la fréquence, la longueur d'onde et la célérité d'une onde progressive sinusoïdale.
- Exploiter le spectre d'un son musical.

B

Pour débiter

1. Observons une perturbation se déplaçant le long d'une corde

Une très longue corde élastique inextensible est disposée horizontalement sur le sol. Un opérateur crée une perturbation (un signal sous la forme d'une « bosse ») en imprimant une brève secousse verticale à l'extrémité S de la corde (figure 1).

Mouvement de la main

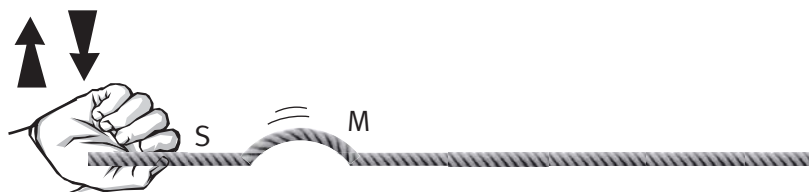


Figure 1

La perturbation se propage le long de la corde ; on parle d'onde.

La propagation de l'onde le long de la corde est étudiée par chronophotographie (figure 2, page suivante).

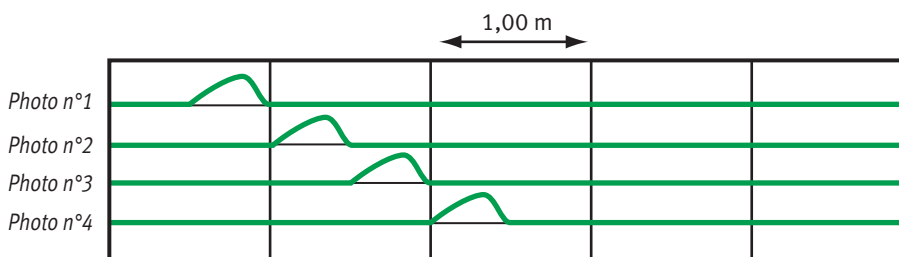


Figure 2

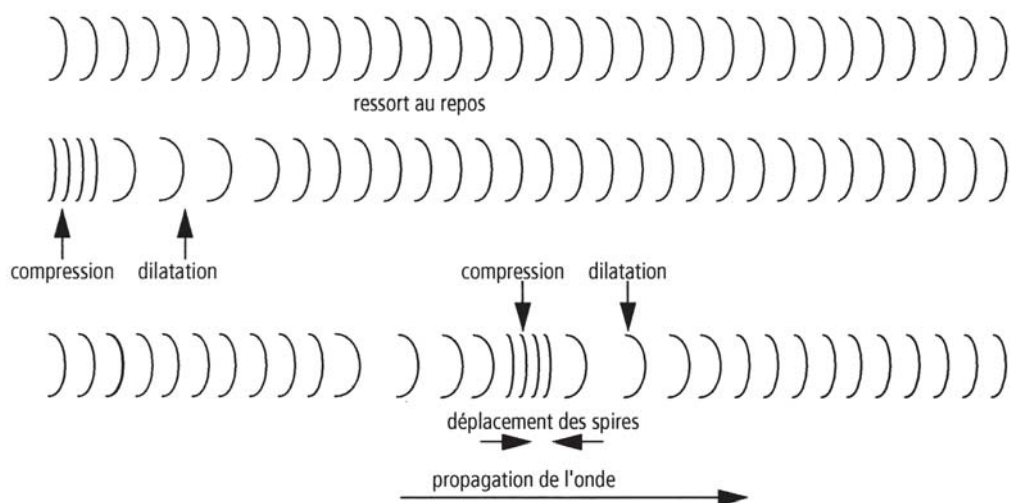
Activité 11



- ❶ Quelle est la direction de propagation de l'onde ?
- ❷ La corde reprend-elle sa position initiale après passage de la perturbation ?
- ❸ Quelle est la direction du déplacement d'un point de la corde ?
- ❹ Quel est le milieu permettant la progression de la perturbation ?

2. Observons une perturbation se déplaçant le long d'un ressort

Lorsque l'on pince les spires d'un ressort (compression) avant de les relâcher, la perturbation (zone de compression) se déplace le long du ressort.



Activité 12



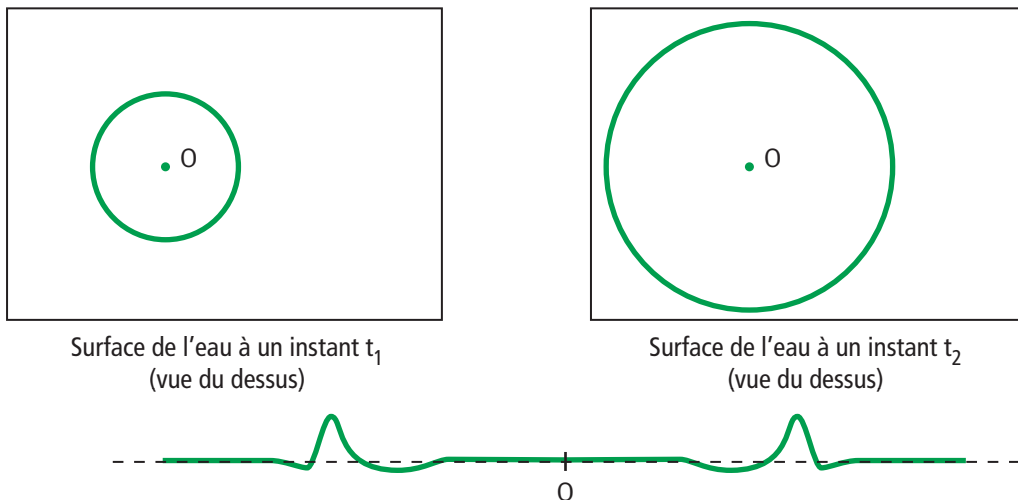
- ❶ Quelle est la direction de propagation de l'onde ?
- ❷ Le ressort reprend-il sa position initiale après passage de la perturbation ?
- ❸ Quelle est la direction du déplacement d'un point du ressort ?
- ❹ Quel est le milieu permettant la progression de la perturbation ?



3. Observons une perturbation se déplaçant à la surface de l'eau

Posons un petit morceau de liège sur l'eau et perturbons la surface de l'eau par la chute d'une goutte en un point O.

Une perturbation circulaire se déplace sur l'eau ; le morceau de liège se déplace verticalement mais n'est pas entraîné par la perturbation.



Vue en coupe de la surface de l'eau (selon une droite passant par la source O de l'onde : point de chute de la goutte)

Activité 13



- 1 Quelle est la direction de propagation de l'onde ?
- 2 L'eau reprend-elle sa position initiale après passage de la perturbation ?
- 3 Quelle est la direction du déplacement d'un point de l'eau ?
- 4 Quel est le milieu permettant la progression de la perturbation ?

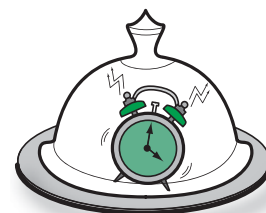
4. Expérience sur le son

Nous entendons le son produit par un émetteur à une certaine distance dans toutes les directions de l'espace : le son se propage depuis l'émetteur jusqu'au récepteur (onde à trois dimensions).

On fait l'expérience suivante : sous une cloche est placé un réveil.

Si on fait sonner le réveil, la sonnerie est entendue par une salle de classe.

On fait le vide dans la cloche : on n'entend plus le réveil sonner.



Activité 14



- 1 Quelle est la direction de propagation de l'onde ?
- 2 Quel est le milieu permettant la progression de la perturbation ?

5. La lumière

Nous avons vu que les ondes électromagnétiques se propagent à la vitesse de la lumière c dans le vide et dans l'air et à une vitesse plus faible dans les autres milieux.

La lumière se propage dans le vide et n'a pas besoin de matière pour se propager.

Activité 15



Comment peut-on interpréter la propagation de la lumière ?



Pour apprendre

1. Ondes progressives

a) Définitions

Une onde se propage, à partir de la source, dans toutes les directions qui lui sont offertes.

La célérité d'une onde est la « vitesse » à laquelle elle se propage.

On appelle **onde mécanique** progressive le phénomène de propagation d'une perturbation dans un milieu sans transport de matière.

Le terme **célérité** est utilisé plutôt que celui de vitesse pour distinguer le déplacement d'un objet (lié à un transport de matière) et la propagation d'une onde (sans transport de matière).

La célérité d'une onde est une propriété du milieu dans laquelle elle se propage.

Activité 16



Rechercher les ordres de grandeur des célérités des ondes suivantes et compléter le tableau. Vous pouvez faire des observations de phénomènes rencontrés dans la vie courante, des expériences simples ou des recherches sur Internet.

Ondes...	... à la surface de l'eau	... le long d'une corde	Son dans l'air	Son dans l'eau	Onde sismique
$v \text{ (m.s}^{-1}\text{)}$					

► La perturbation se transmet de proche en proche avec transfert d'énergie sans transport de matière.

► Deux ondes peuvent se croiser sans se perturber.

On classe les différentes ondes mécaniques en comparant leurs directions de propagation et de perturbation :

► **Ondes transversales** : elles provoquent une perturbation dont la direction est perpendiculaire au sens de propagation de l'onde.

Exemple Perturbation le long d'une corde

► **Ondes longitudinales** : elles provoquent une perturbation dont la direction est parallèle au sens de propagation de l'onde.

Exemple Perturbation d'élongation-compression le long d'un ressort

b) Notion de retard pour une onde progressive à une dimension

Revenons sur l'onde progressive à une dimension qui a pour direction de propagation une droite (corde par exemple).

Soit une onde émise par la source O et se propageant avec la célérité v le long d'une corde :

- À la date t' , la perturbation passe en M' .
- À la date t , la perturbation passe en M .

Photo au temps t'



Photo au temps t



τ est appelé le retard de la déformation au passage en M' .

La perturbation en un point M du milieu, à l'instant de date t , est celle qui existait auparavant en un point M' au temps $t' = t - \tau$, τ étant le retard (dans un milieu non dispersif).

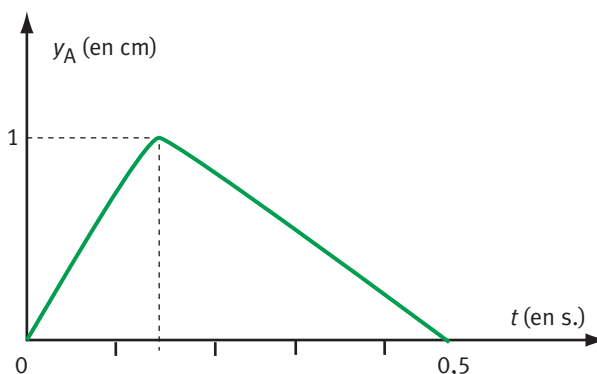
Par définition, la célérité est égale à : $v = \frac{M'M}{t - t'}$ avec $t - t' = \tau \Rightarrow \tau = \frac{MM'}{v}$.

Activité 17



La courbe de la figure ci-dessous représente l'ordonnée y_A de l'extrémité A de la corde avec un dispositif identique à celui utilisé précédemment. Les signaux se propagent le long de la corde avec une célérité égale à 50 cm.s^{-1} .

Tracer la courbe représentant les variations y_B de l'ordonnée d'un point B de la corde, B étant situé à 10 cm de A.



Activité 18



Toujours avec le même dispositif, on impose au point A un déplacement tel que son ordonnée y_A varie en fonction du temps, comme indiqué dans le tableau ci-dessous.

Compléter ce tableau en y faisant figurer, aux différentes dates, les ordonnées y_M et y_N des points M et N situés respectivement à 15 cm et à 20 cm de A.

Célérité de propagation des signaux : $V = 50 \text{ cm.s}^{-1}$

$t \text{ (s)}$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$y_A \text{ (mm)}$	0	2	4	6	3	0	0	0	0	0	0
$y_M \text{ (mm)}$											
$y_N \text{ (mm)}$											

2. Ondes progressives périodiques, ondes sinusoïdales

a) Les ondes progressives mécaniques périodiques

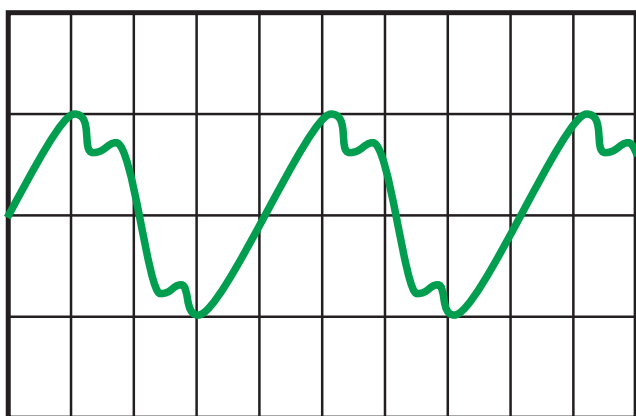
Un phénomène périodique est un phénomène qui se répète de la même manière à intervalles de temps réguliers.

Ces phénomènes sont caractérisés par leur période T : plus petite durée au bout de laquelle le phénomène se reproduit à l'identique. La période T est exprimée en secondes.

S'il s'agit de perturbations qui se répètent à intervalles de temps réguliers et qui se propagent dans un milieu élastique, on parle d'onde progressive périodique.

Exemple

Signal émis par le tuyau d'une flûte et capté par un microphone relié à un oscilloscope (voir le paragraphe 2c du chapitre précédent).



Les sons musicaux sont des successions d'ondes progressives mécaniques périodiques contrairement au bruit, qui n'est pas une onde périodique.

b) Une double périodicité : temporelle et spatiale

Périodicité temporelle

La durée qui sépare l'arrivée de deux perturbations successives en un point est appelée période temporelle T .

Périodicité spatiale

La distance qui sépare deux perturbations consécutives est appelée période spatiale λ .

Ondes à la surface de l'eau

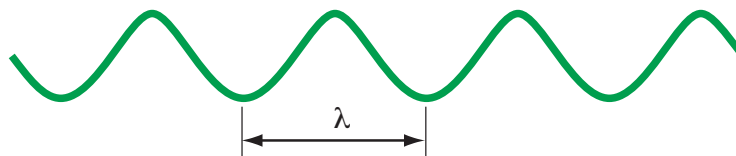
Au lieu de laisser tomber une goutte pour provoquer une ride sur l'eau, on frappe régulièrement la surface du liquide avec un vibreur.

On obtient une onde progressive circulaire périodique : sa période T correspond à la durée entre deux frappes du vibreur sur le liquide.

Chaque point de la surface de l'eau oscille suivant la verticale avec la même période temporelle T .

La distance entre deux rides est appelée période spatiale λ .

Exemple Onde progressive périodique le long d'une corde.
La période spatiale λ est représentée sur le schéma.



La longueur d'onde λ correspond à la distance parcourue par l'onde en une période T .

Ce qui donne naissance à une relation importante :

$$\lambda = vT$$

λ s'exprime en m, T en s et v en m.s^{-1} .

c) Onde progressive sinusoïdale

L'onde mécanique progressive périodique est dite sinusoïdale si la perturbation est une fonction sinusoïdale du temps.

L'onde est caractérisée par sa période temporelle T et sa fréquence f (notée aussi ν) qui sont imposées par la source :

$$T = \frac{1}{f} \quad \Rightarrow \quad \lambda = vT = \frac{v}{f}$$

Activité 19



Compléter le tableau suivant concernant les sous-multiples ou multiples des unités « seconde » et « hertz » en suivant l'exemple donné.

Un gigahertz	Une milliseconde	Un mégahertz	Une microseconde	Un kilohertz
1 GHz				
10^9 Hz				

d) Exemples

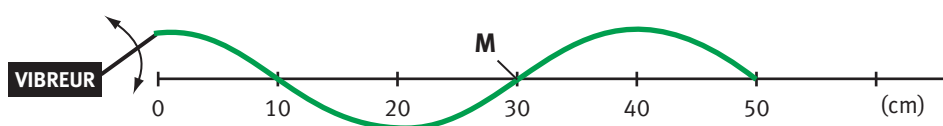
→ Onde progressive sinusoïdale le long d'une corde

Au lieu de provoquer une déformation de la corde à la main comme précédemment, on fixe un vibreur à l'extrémité de la corde tendue. On obtient une onde progressive sinusoïdale qui se propage le long de la corde.

Sa période temporelle T correspond à la durée entre deux passages du vibreur en position haute par exemple.

Sa période spatiale λ correspond à la distance entre deux points successifs en position haute par exemple.

Photo de la corde à l'instant de date t



Activité 20

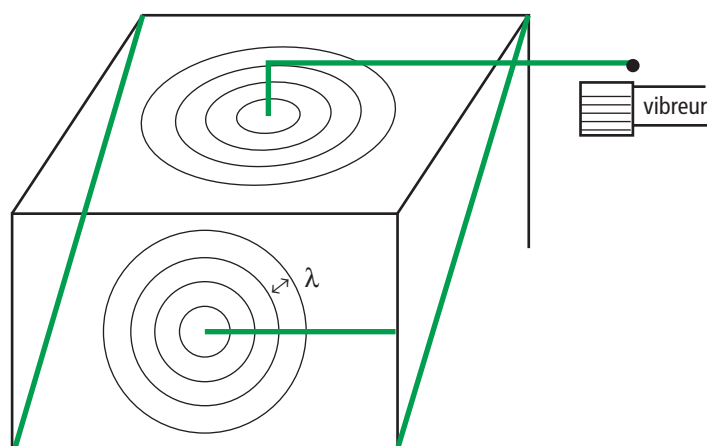


Calculer la longueur d'onde dans l'exemple précédent sachant que la fréquence du vibreur était fixée à 25 Hz et que la célérité de propagation sur la corde très fine valait $10,0 \text{ m.s}^{-1}$.

→ Onde progressive sinusoïdale à la surface de l'eau

Pour étudier les ondes progressives sinusoïdales à la surface de l'eau, on utilise une cuve à ondes.

Un vibreur permet de générer des ondes planes circulaires de fréquence f à la surface de l'eau. Les crêtes des vagues donnent des rides brillantes et les creux des rides sombres sur un écran que l'on photographie.



3. Cas des ondes sonores et ultrasonores

Lorsqu'on entend un son, on perçoit un bruit ou un son musical. Si on s'en tient à l'aspect purement physique des phénomènes (et non subjectif au niveau de la sensation désagréable), ils diffèrent dans la périodicité des composantes du mélange des ondes constituant le son entendu. Cela nous conduit naturellement à étudier les caractéristiques des ondes sonores se propageant dans l'air.

a) Comment étudier les caractéristiques de l'onde sonore se propageant dans l'air ?

La fréquence de l'onde sonore est la même que celle de la vibration de la source sonore. Elle n'est pas modifiée par le milieu matériel. Elle est donc la même partout. Nous allons utiliser un haut-parleur (émetteur), un microphone (récepteur) et un oscilloscope pour mesurer la fréquence.

Dans un microphone, les vibrations des tranches d'air imposent un mouvement à la membrane, ce qui crée une tension électrique en sortie. La tension obtenue a la même fréquence que la membrane du microphone, elle-même égale à la fréquence de vibration de la membrane du haut-parleur. L'oscilloscope permet de visualiser la tension de sortie du microphone.

→ Fréquence

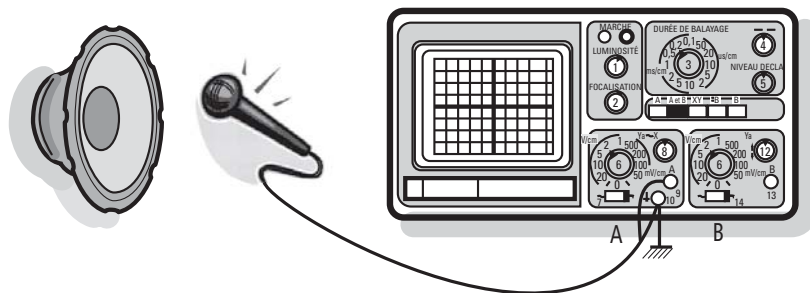
Activité 21



Haut-parleur

Microphone

Oscilloscope

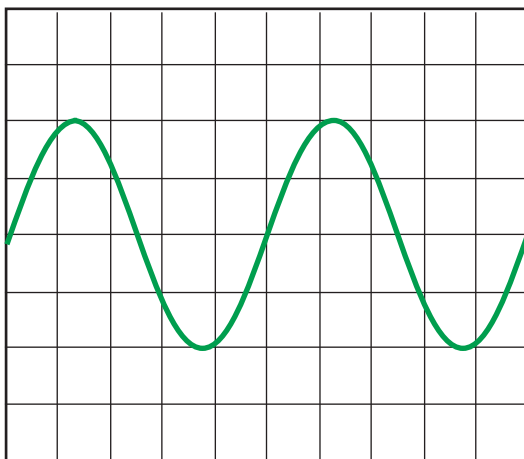


La membrane d'un haut-parleur a un mouvement sinusoïdal. Les tranches d'air vibrent autour d'une position moyenne, avec la même période temporelle T et donc à la même fréquence f que la membrane.

Un microphone placé devant le haut-parleur permet de transformer le mouvement sinusoïdal des vibrations de l'air en une tension électrique de même fréquence visualisée sur l'écran d'un oscilloscope.

Déterminer la période de la tension visualisée sur l'oscillogramme de la page suivante ; l'intervalle de temps d'une division correspond à 0,5 ms.

En déduire la fréquence de l'onde sonore captée par la microphone.



→ Vitesse de propagation du son

La vitesse moyenne est égale au quotient de la distance parcourue par la durée de parcours :

$$v = \frac{d}{t} .$$

La vitesse du son dépend du milieu de propagation.

La vitesse du son dans l'air est de l'ordre de 340 m.s^{-1} à température et pression ordinaires. Elle peut atteindre 1500 m.s^{-1} dans l'eau et encore davantage dans les métaux.

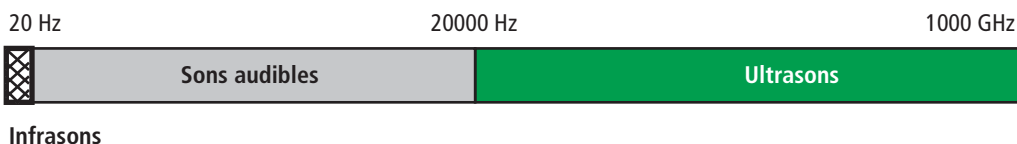
→ Longueur d'onde

La longueur d'onde est la distance parcourue par le son en une période T de vibration de la source.

Si v est la vitesse de propagation du son alors : $v = \frac{\lambda}{T} \Rightarrow \lambda = vT = \frac{v}{f}$; λ s'exprime en mètres (m).

Les propriétés de l'onde sonore sont valables pour une gamme de fréquences plus large que les fréquences des sons que l'oreille peut entendre.

Pour les fréquences inférieures aux fréquences des sons audibles, on parle d'infra-sons et pour les fréquences supérieures, on parle d'ultrasons. L'Homme ne perçoit pas les ultrasons.



Le domaine de fréquence des ultrasons s'étend de la limite des fréquences audibles (environ 16 kHz) jusqu'aux fréquences d'agitation thermique des molécules. Au-delà, on parle d'hypersons. Ce domaine de fréquence est très

large et les longueurs d'onde associées sont de l'ordre du décimètre jusqu'au nanomètre. Les applications des ultrasons sont nombreuses et dépendent de la fréquence.

b) Acoustique musicale et physique des sons

Les fréquences audibles vont de 20 Hz à 20 000 Hz.

Elles sont variables et dépendent de l'âge ainsi que des fortes intensités sonores auxquelles l'oreille a pu être soumise.

→ Hauteur d'un son simple

La hauteur d'un son simple est mesurée par sa fréquence.

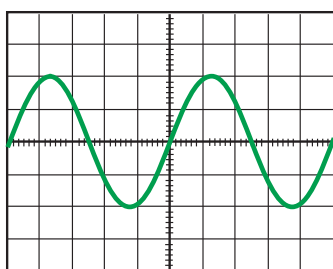
Plus la fréquence est basse et plus le son est grave.

Un son simple correspond à une vibration sinusoïdale (voir activité 22).

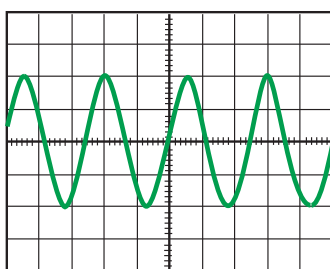
Activité 22



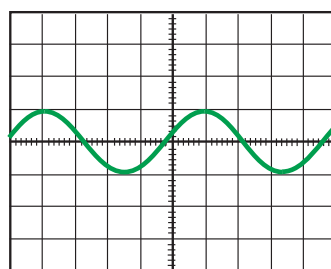
Un oscilloscope est branché aux bornes communes d'un GBF et d'un haut-parleur. Soit les oscillogrammes ci-dessous avec comme sensibilité verticale : 2 V/div et comme base de temps : 0,1 ms/div.



Cas n° 1



Cas n° 2



Cas n° 3

Dans quel cas (1, 2 ou 3) le son émis par le haut-parleur sera-t-il le plus aigu ?

Activité 23



En musique, une octave est l'intervalle séparant deux sons dont la fréquence fondamentale de l'un vaut le double de la fréquence de l'autre.

Chaque octave comprend les notes bien connues do, ré, mi... et commence par le do.



La note de référence des musiciens est la note de fréquence 440 Hz (La₃) pouvant être obtenue par un diapason.

Rechercher ce que signifie La₃.

Combien y a-t-il de La et donc d'octaves dans le spectre audible ?

→ Timbre d'un instrument et hauteur d'un son complexe

Si nous écoutons trois notes de même fréquence 440 Hz émises par un diapason, un violon et un hautbois, on remarque qu'elles ont la même hauteur mais pas le même son.

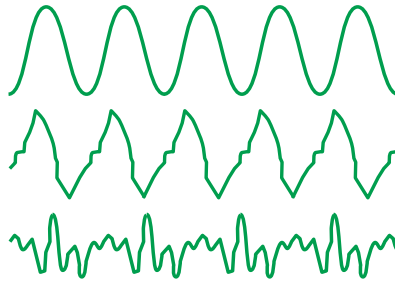
On dit que les deux instruments n'ont pas le même timbre.

Les enregistrements effectués avec un micro montrent que les sons sont différents.

Celui du diapason est un son simple (vibration sinusoïdale).

Les sons simples ont pour « image » une tension sinusoïdale de même fréquence que celles du son étudié.

Ils sont générés, entre autres, par un diapason ou un GBF alimentant un haut-parleur.



Les deux autres sons sont complexes. Des vibrations de fréquences plus élevées se rajoutent à la vibration sinusoïdale.

Les spectres acoustiques permettent d'analyser les sons complexes.

Le spectre d'un son permet de déterminer les fréquences des divers harmoniques qui le composent et leur amplitude.

Le son complexe résulte de la superposition de sons purs correspondant à divers harmoniques, dont les amplitudes sont souvent différentes.

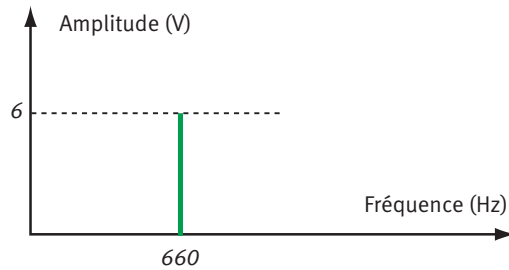
Le timbre d'un son est lié à la richesse de ce son en ses divers harmoniques.

L'harmonique de fréquence la plus basse (rang 1) correspond au fondamental. Les autres harmoniques, notées harmoniques de rang 2, 3..., ont des fréquences multiples de celle du fondamental.

La hauteur du son complexe est mesurée par la fréquence de son fondamental.

→ Étude du spectre d'un son simple

L'analyse spectrale d'un son permet d'obtenir le diagramme suivant :



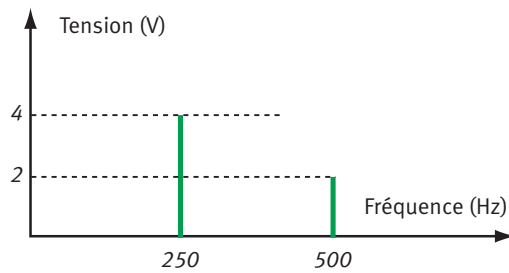
S'agit-il d'un son simple ou complexe ?

Ce son est simple car il n'y a pas d'autre harmonique que le fondamental.

La fréquence du son étudié est : 660 Hz.

→ Étude du spectre d'un son complexe

Un analyseur de fréquence donne pour l'étude d'un son le spectre ci-dessous.



Ce son a deux harmoniques : il est complexe.

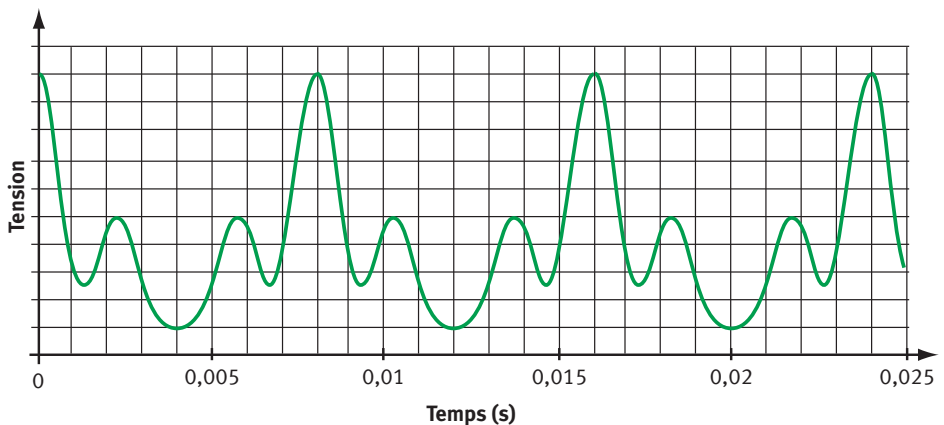
Le fondamental a pour fréquence 250 Hz et pour amplitude 4 V.

Le deuxième harmonique a pour fréquence 500 Hz et pour amplitude 2 V.

Activité 24

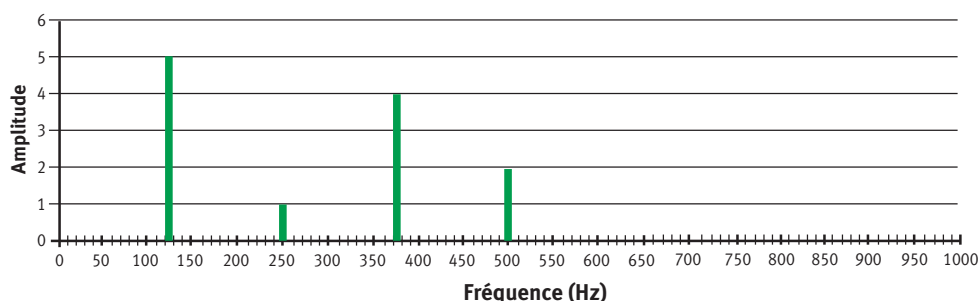


- ① On étudie le son restitué par un récepteur radio à l'aide d'un microphone relié à un système d'acquisition informatisé. On obtient le graphe ci-dessous. Déterminer la hauteur du son.



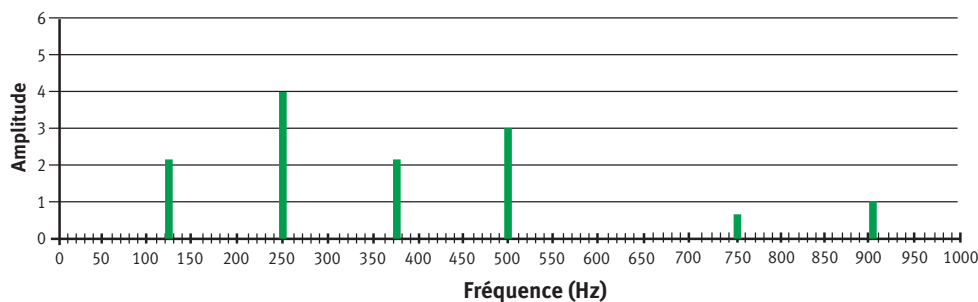
- 2 Un logiciel d'analyse spectrale permet ensuite d'obtenir le diagramme ci-dessous.

Que représentent les fréquences qui apparaissent sur ce spectre ?



- 3 L'analyse par le même dispositif d'un autre son donne le diagramme ci-dessous.

Quels sont le point commun et la différence entre ce son et celui restitué par le récepteur radio ?



4. Cas des ondes électromagnétiques

Une lumière est dite **monochromatique** lorsqu'elle est composée d'une seule radiation de longueur d'onde déterminée (donc d'une seule couleur). C'est une onde électromagnétique progressive sinusoïdale de fréquence donnée. La couleur de cette lumière est liée à la valeur de sa fréquence.

Exemple Le laser.

Une lumière est dite **polychromatique** si elle est composée de plusieurs radiations de longueurs d'onde différentes (donc de plusieurs couleurs).

Elle est donc composée de plusieurs ondes monochromatiques de fréquences différentes.

Exemple La lumière émise par le Soleil.

Si nous voyons séparément les radiations de longueurs d'onde différentes, elles apparaissent comme des couleurs.

Exemple

λ (nm)	400	480	530	580	610	700
Couleurs	violet	bleu	vert	jaune	orange	rouge

Les relations établies avec les ondes mécaniques progressives périodiques peuvent être appliquées à la lumière ainsi qu'à toutes les radiations électromagnétiques.

Si toutes les longueurs d'onde de la lumière solaire atteignent notre œil en même temps, nous voyons la couleur blanche.



Pour conclure

1. Résumé du chapitre

Onde mécanique progressive

C'est le phénomène de propagation d'une perturbation dans un milieu sans transport de matière.

- Une onde se propage, à partir de la source, dans toutes les directions qui lui sont offertes.
- La célérité d'une onde est la « vitesse » à laquelle elle se propage.
- La perturbation se transmet de proche en proche avec transfert d'énergie sans transport de matière.
- Deux ondes peuvent se croiser sans se perturber.

Onde mécanique progressive périodique

Double périodicité : temporelle et spatiale

Périodicité temporelle

La durée qui sépare l'arrivée de deux perturbations successives en un point est appelée période temporelle T .

Périodicité spatiale

La distance qui sépare deux perturbations consécutives est appelée période spatiale.

Acoustique musicale et physique des sons musicaux

La hauteur d'un son simple est mesurée par sa fréquence.

Plus la fréquence est basse et plus le son est grave. Plus elle est élevée, plus il est aigu.

Le son complexe résulte de la superposition de sons purs correspondant à divers harmoniques, dont les amplitudes sont souvent différentes.

Le timbre d'un son est lié à la richesse de ce son en ses divers harmoniques.
 L'harmonique de fréquence la plus basse (rang 1) correspond au fondamental.
 Les autres harmoniques, notés harmoniques de rang 2, 3..., ont des fréquences multiples de celle du fondamental.
 La hauteur du son complexe est mesurée par la fréquence de son fondamental.

2. Exercices d'apprentissage

Exercice 3 Ondes transversales ou longitudinales ?

On classe les différentes ondes mécaniques en comparant leurs directions de propagation et de perturbation :

- Ondes transversales : elles provoquent une perturbation dont la direction est perpendiculaire au sens de propagation de l'onde.
- Ondes longitudinales : elles provoquent une perturbation dont la direction est parallèle au sens de propagation de l'onde.

Les ondes suivantes sont-elles transversales ou longitudinales ?

Ondes...	... à la surface de l'eau	... le long d'une corde	Son dans l'air	Le long d'un ressort
Type d'ondes				

Exercice 4 On considère une onde à la surface de l'eau.

Pourquoi dit-on, dans un tel cas, que l'onde se propage mais qu'il n'y a pas, lors de cette propagation, transfert de matière ? Sous quelle forme l'énergie est-elle transférée lorsqu'une onde se propage à la surface de l'eau ?

Exercice 5 Un son audible a une fréquence comprise entre :

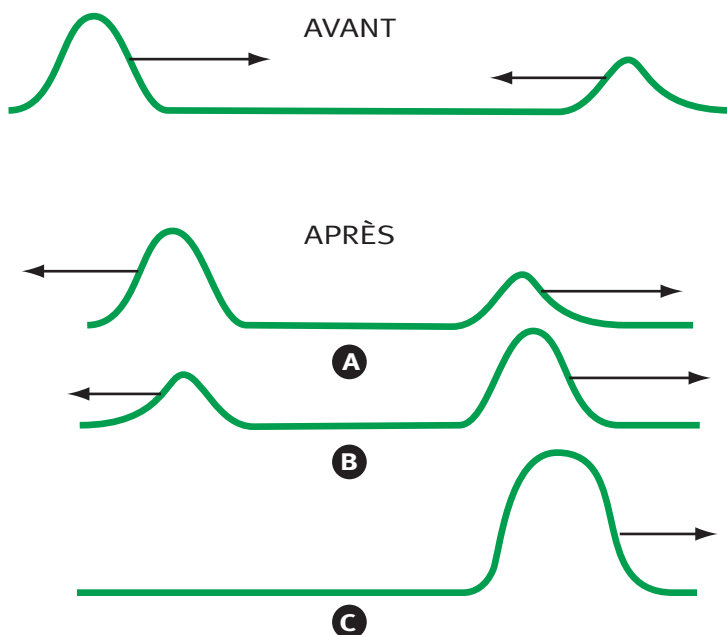
- a) 2 Hz et 2 kHz. ☐
- b) 20 Hz et 20 kHz. ☐
- c) 20 kHz et 200 kHz. ☐
- d) 20 MHz et 200 MHz. ☐

Exercice 6 Pêcheur à la ligne

Un pêcheur à la ligne est au bord d'un lac tranquille. Soudain, un enfant vient perturber la surface de l'eau en jetant un caillou à quelques mètres du flotteur.
 Le flotteur se déplace-t-il à la célérité v de l'onde ?

Exercice 7 Croisement de 2 ondes

Deux ébranlements se propagent en sens contraire sur une corde tendue. On a représenté plusieurs situations possibles après leur point de rencontre. Choisir celle qui est physiquement possible.



Exercice 8 Analyse d'une note

- ❶ Lors d'un concert, un microphone de bonne qualité, placé près d'un violon, est relié à un oscilloscope à mémoire. On capte une note. L'oscillogramme obtenu est reproduit sur la figure ci-dessous.

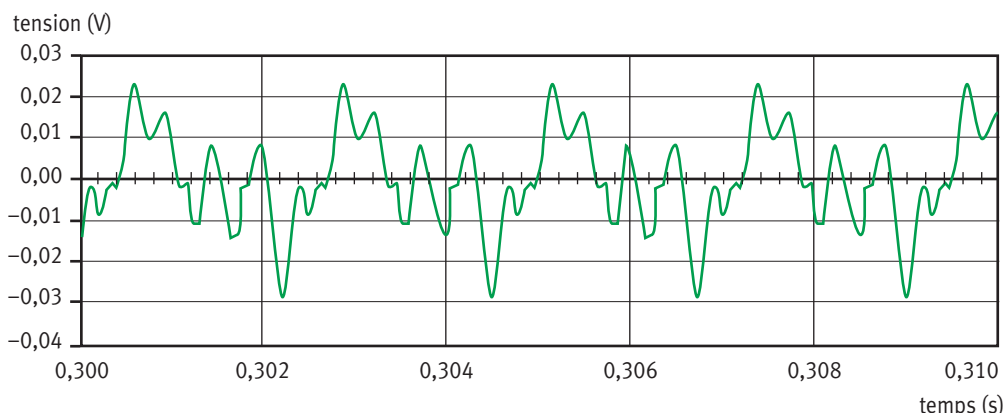


Figure 3

En déterminant la fréquence fondamentale f_1 de la note captée, montrer que celle-ci est le la_3 .

- 2 Le spectre en fréquence de la note captée est reproduit sur la figure 4 ci-dessous :

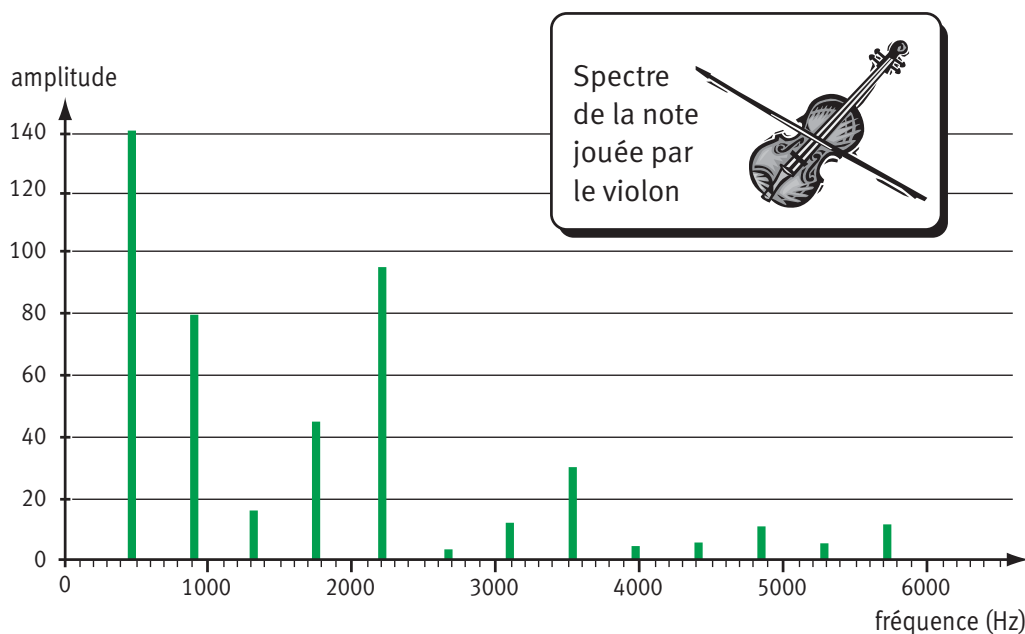


Figure 4

Calculer les valeurs des fréquences des harmoniques de rang 2 et de rang 13 de cette note.

4

La diffraction

A

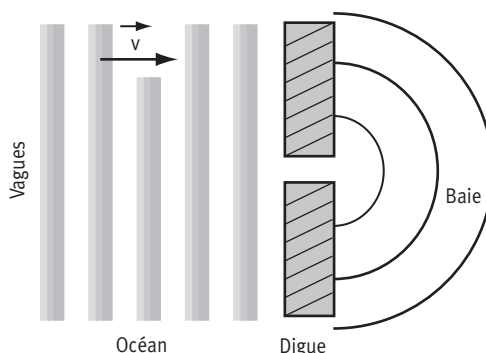
Objectifs d'apprentissage

- Savoir que l'importance du phénomène de diffraction est liée au rapport de la longueur d'onde aux dimensions de l'ouverture et de l'obstacle.
- Connaître et exploiter la relation $\theta = \frac{\lambda}{a}$.
- Identifier les phénomènes physiques où il est pertinent de prendre en compte le phénomène de diffraction.

B

Pour débiter : observons le phénomène

Le schéma suivant représente des vagues venant frapper une digue à l'entrée d'une baie protégée. Les traits figurant sur le schéma représentent les sommets des vagues à un instant donné ; la distance entre deux traits est égale à une longueur d'onde.



Activité 25



Que peut-on dire de la forme des vagues avant de frapper la digue puis après être rentrées dans la baie ?

Comparer la longueur d'onde avant et après la digue.

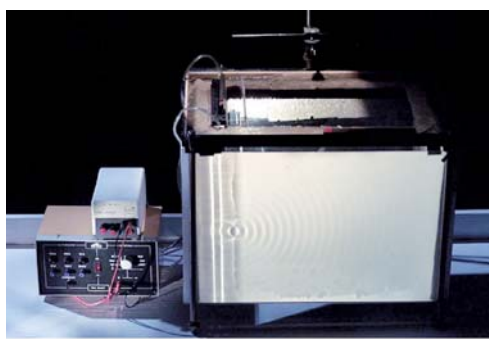
En laboratoire, on peut étudier ce phénomène avec une cuve à ondes ; on place une règle sur le vibreur et un obstacle muni d'une ouverture (photo 1, page suivante). Un dispositif optique permet de visualiser les ondes se propageant après l'obstacle (photo 2, page suivante).



vibreux

règle

Photographie n°1



Photographie n°2

Si les ondes à la surface de l'eau rencontrent un seul bord de l'obstacle, nous obtenons le schéma 1 ; si elles rencontrent deux bords très écartés l'un de l'autre, nous obtenons le schéma 2 ; si l'on rapproche les deux bords, nous obtenons le schéma 3.

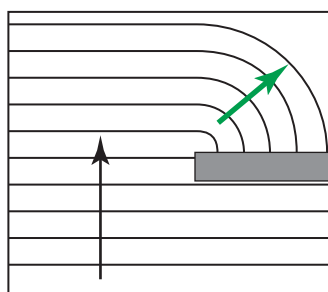


Schéma 1

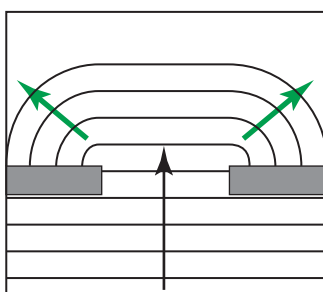


Schéma 2

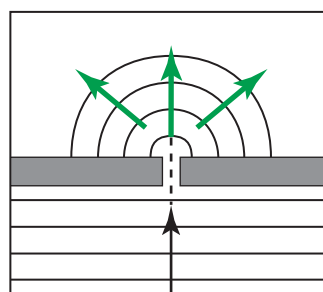


Schéma 3

Activité 26

Quelles différences existe-t-il entre les schémas 2 et 3 ?



Quelle est, d'après vous, la condition sur la largeur de l'ouverture qui permet d'obtenir le phénomène du schéma 3 ?



Pour apprendre

1. Le phénomène de diffraction

On observe un phénomène de diffraction lorsqu'une onde traverse une ouverture ou rencontre un obstacle dont la dimension est voisine de la longueur d'onde λ .

On remarque sur les schémas 3, 4 et 5 (page suivante), où l'ouverture est de la dimension de la longueur d'onde, qu'une onde périodique circulaire apparaît au niveau de la fente, quelle que soit l'onde qui arrive sur elle : c'est le phénomène de diffraction.

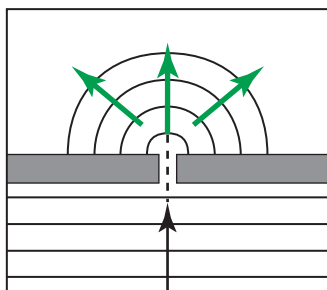


Schéma 3

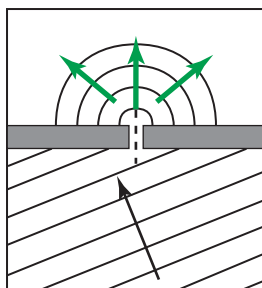


Schéma 4

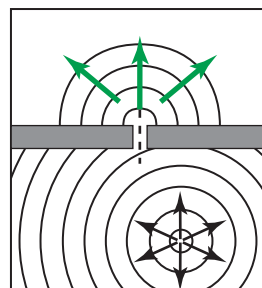
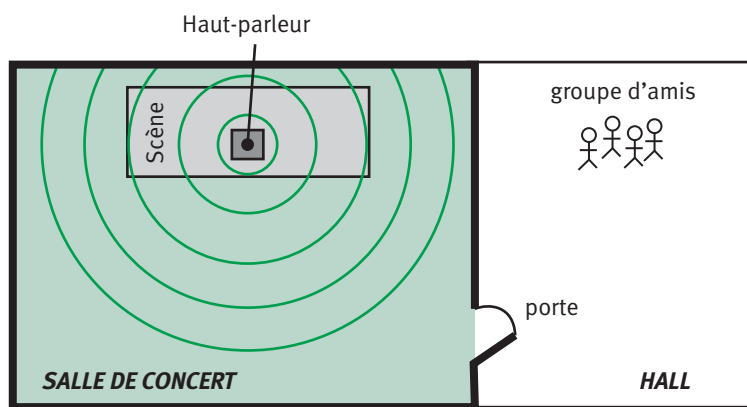


Schéma 5

Plus la dimension de l'ouverture ou de l'obstacle est petite, plus le phénomène de diffraction est marqué.

2. Diffraction des ondes sonores

Un concert de rock est donné dans une salle ; on remarque qu'il est possible d'entendre la musique alors que l'on se trouve, avec un groupe d'amis, dans le hall. On est alors séparé de la scène par un mur très bien isolé phoniquement et la porte, d'une largeur de 1,00 m, est ouverte. Lorsque la porte est fermée, il n'est plus possible d'entendre la musique. La situation est représentée sur le schéma ci-dessous.



Activité 27

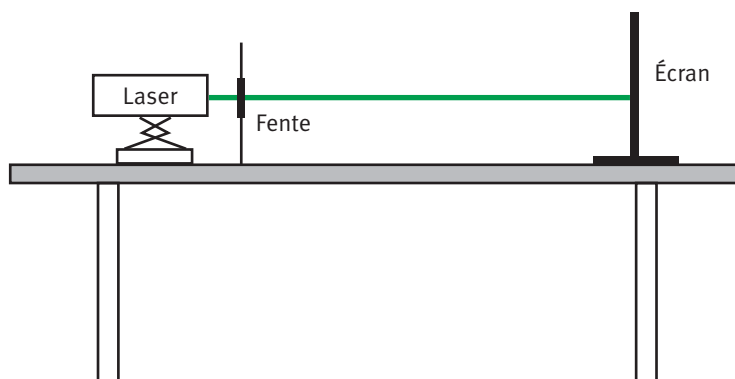


Quel phénomène physique permet d'expliquer l'observation faite ?

Est-ce que l'on entend préférentiellement dans le hall des sons graves ($f = 100 \text{ Hz}$) ou des sons très aigus ($f = 10\,000 \text{ Hz}$) ? Justifier la réponse en calculant les longueurs d'onde correspondantes ($v = 340 \text{ m.s}^{-1}$).

3. Diffraction de la lumière

La lumière est une onde ; on dit pourtant que la lumière se propage en ligne droite ; le phénomène de diffraction existe-t-il pour la lumière ? Réalisons l'expérience suivante : le faisceau d'un laser traverse une fente.



On observe alors la figure ci-dessous.

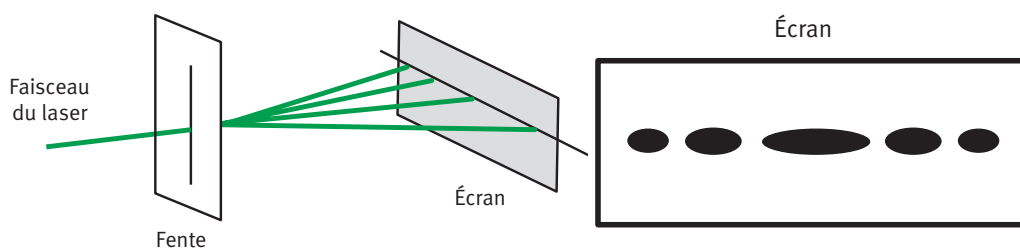


Figure de diffraction

Si la lumière se propageait en ligne droite, nous devrions observer un point lumineux sur l'écran ; or, nous observons sur l'écran une figure de diffraction.

Ce phénomène se produit lorsque l'ouverture par laquelle passe la lumière est de petite taille. On dit que l'ouverture a diffracté la lumière du laser.

Si l'ouverture est circulaire, on observe la figure ci-dessous.

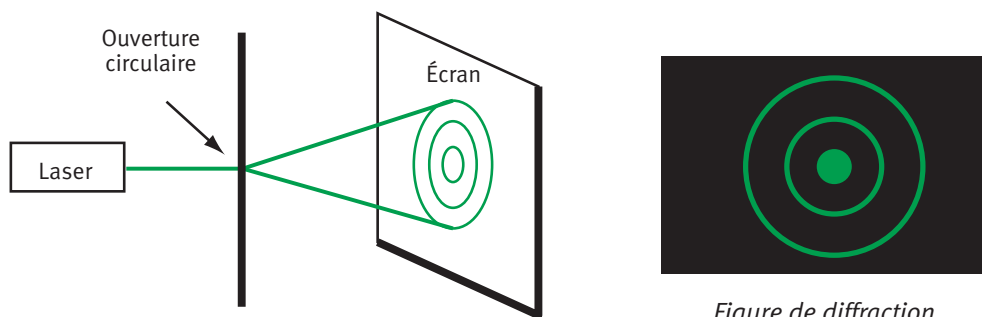


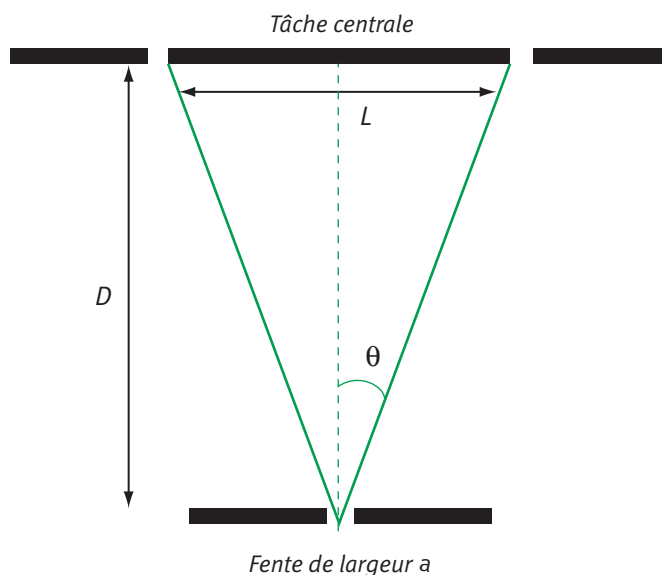
Figure de diffraction

Le phénomène de diffraction met donc en défaut le principe de propagation rectiligne de la lumière dans un milieu homogène.

4. Influence des dimensions de l'ouverture sur la diffraction

On réalise une expérience de diffraction à l'aide d'un laser émettant une lumière monochromatique de longueur d'onde λ . À quelques centimètres du laser, on place une fente verticale de diamètre connu. On désigne par a le diamètre de la fente.

La figure de diffraction obtenue est observée sur un écran blanc situé à une distance $D = 1,60$ m de la fente. Pour chacune des fentes, on mesure la largeur L de la tache centrale.



Activité 28



- ❶ L'angle θ étant petit, θ étant exprimé en radian, montrer que : $\theta \approx \frac{L}{2D}$.
- ❷ On cherche la relation liant θ , λ et a .

Les mesures effectuées ont permis d'obtenir les résultats du tableau suivant :

θ (en rad)	$0,5 \cdot 10^{-2}$	$0,7 \cdot 10^{-2}$	$0,9 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$	$2,8 \cdot 10^{-2}$
a (en m)	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$7,7 \cdot 10^{-5}$	$5,9 \cdot 10^{-5}$	$4,0 \cdot 10^{-5}$	$2,0 \cdot 10^{-5}$
$\frac{1}{a}$ (en m^{-1})	$1,0 \cdot 10^4$	$1,3 \cdot 10^4$	$1,7 \cdot 10^4$	$2,5 \cdot 10^4$	$5,0 \cdot 10^4$

Tracer les courbes $\theta = f(a)$ et $\theta = f\left(\frac{1}{a}\right)$.

Montrer que l'une des courbes obtenues permet de trouver une relation simple liant θ et a de la forme : $\theta = k \frac{1}{a}$.

- 3 Comment, à partir de cette courbe, peut-on déterminer k ?
- 4 k correspond à la longueur d'onde λ de la lumière monochromatique utilisée.

Préciser, parmi les valeurs de longueurs d'onde proposées ci-dessous, quelle est celle de la lumière utilisée.

560 cm ☐ ; 560 mm ☐ ; 560 μm ☐ ; 560 nm ☐

Pour résumer, plus la fente est fine et étroite, plus la lumière s'étale et plus la taille de la tache centrale de la figure de diffraction est grande. On voit donc qu'il y a un lien direct entre la taille de l'ouverture et la figure de diffraction.

Soit θ l'écart angulaire (entre le milieu de la tache et le centre de la première extinction) du faisceau diffracté par une fente (ou un fil rectiligne) de largeur a , soit λ la longueur d'onde de la lumière utilisée, nous admettrons que :

$$\theta = \frac{\lambda}{a}$$

Pour une longueur d'onde donnée, le phénomène de diffraction est d'autant plus marqué que la dimension de l'ouverture ou de l'obstacle est plus petite.

La longueur d'onde et la largeur de la fente s'expriment en mètres ; l'angle sera donné en radians (rad).

Plus l'ouverture est petite (a petit), plus le phénomène de diffraction est marqué.

Remarque

La taille de la figure de diffraction dépend de la distance D de la fente à l'écran ; plus on éloigne l'écran et plus la figure est grande. Voir le site suivant :

<http://scphysiques.free.fr/TS/physiqueTS/diffraction/>

5. Prendre en compte le phénomène de diffraction

Il est nécessaire de prendre en compte les phénomènes de diffraction acoustique pour diminuer les niveaux sonores dans les bureaux, les locaux industriels ; la diffraction apparaît avec les arêtes, les portes...

La diffraction est une perturbation qui affecte les ondes lumineuses lorsque celles-ci passent à proximité d'un obstacle. Plus on ferme le diaphragme d'un appareil photographique et plus les effets de la diffraction sont gênants.

Les performances d'un télescope sont limitées par les problèmes de diffraction.

Les télescopes donnent des étoiles une image qui est une tache de diffraction, de taille inversement proportionnelle au diamètre du miroir (plus le diamètre du miroir est grand, moins la diffraction est importante). La figure de diffraction obtenue limite l'aptitude du télescope à séparer les images de deux points très proches.

Pour avoir des images plus lumineuses, on fabrique des télescopes avec des miroirs de grand diamètre. Plus le diamètre est grand, plus le télescope reçoit de lumière et moins il y a de diffraction : Hubble est ainsi un télescope de 2,4 m de diamètre, le VLT fait 8,2 m de diamètre.

Activité 29



Sachant que la limite de résolution angulaire d'une lunette astronomique est liée à la longueur d'onde et au diamètre par la relation :

$$\theta = \frac{1,22 \cdot \lambda}{D}$$

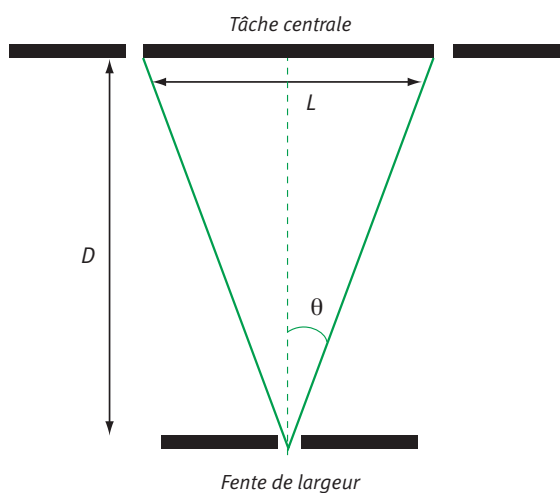
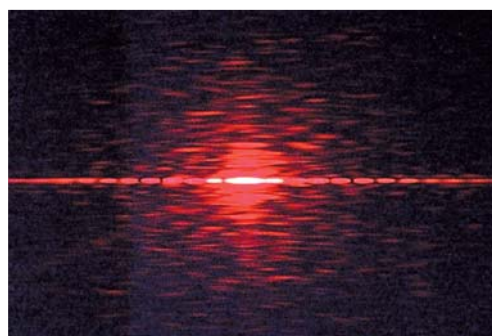
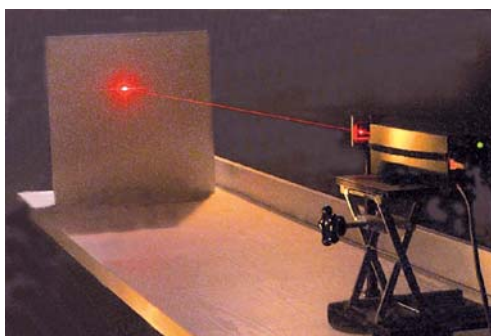
Calculer pour les instruments suivants la limite de résolution angulaire.

	D	λ	$\Delta\theta$
Lunette	14 cm	550 nm	
Télescope	5 m	550 nm	
Radiotélescope	7,5 m	21 cm	



Pour conclure

1. Résumé du chapitre



L'écart angulaire du faisceau diffracté, la largeur de la fente (ou du fil) et la longueur d'onde du laser sont liés par la relation :

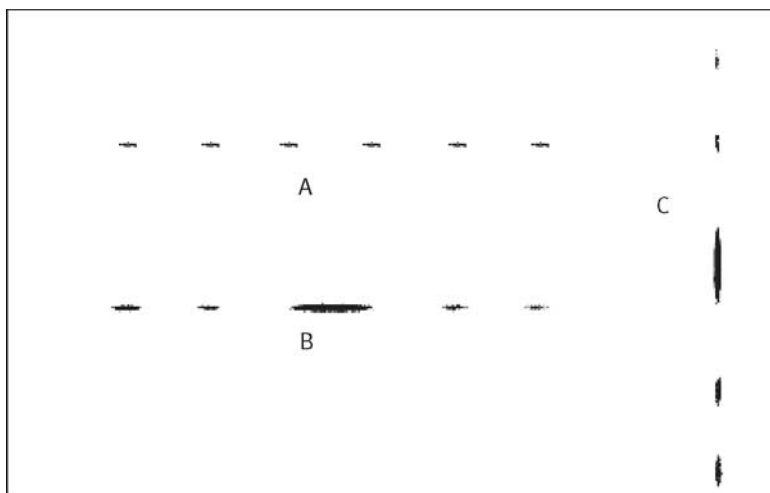
$$\theta = \frac{\lambda}{a}$$

Pour une longueur d'onde donnée, le phénomène de diffraction est d'autant plus marqué que la dimension de l'ouverture ou de l'obstacle est plus petite.

2. Exercices d'apprentissage

Exercice 9 Diffraction

Un faisceau de lumière, parallèle monochromatique, de longueur d'onde λ , arrive sur une fente horizontale de largeur a (a est de l'ordre du dixième de millimètre). Quelle figure de diffraction, parmi celles proposées, observe-t-on sur l'écran situé à une distance D , grande devant a ?



Exercice 10 Onde lumineuse

Pour chacune des propositions, plusieurs affirmations sont données. Répondre par vrai ou faux en justifiant vos réponses.

	Vrai	Faux
a) Le phénomène de diffraction de la lumière visible par une fente est plus marqué pour une fente de largeur $0,5 \mu\text{m}$ que pour une fente de largeur $5 \mu\text{m}$.	☐	☐
b) Pour une lumière monochromatique, l'écart angulaire du faisceau diffracté par une fente est proportionnel à la largeur de la fente.	☐	☐
c) L'écart angulaire du faisceau diffracté par une fente de largeur donnée est plus petit pour une radiation rouge que pour une radiation bleue.	☐	☐

5

Les interférences

A

Objectifs d'apprentissage

- ▶ Connaître et exploiter les conditions d'interférences constructives et destructives pour des ondes monochromatiques.
- ▶ Savoir interpréter les interférences en lumière blanche.
- ▶ Savoir ce qu'est une couleur interférentielle.

B

Pour débiter

Que se passe-t-il si deux ondes identiques à la surface de l'eau se rencontrent ?

On va voir qu'elles ne se renforcent pas forcément. Elles peuvent s'annuler : c'est le phénomène d'interférence.

Imaginons qu'on crée, en lançant deux cailloux dans l'eau, deux systèmes d'ondes se propageant en cercles concentriques autour de leurs sources.

On place alors un bouchon B à un endroit où les deux ondes A et B se croisent. On s'aperçoit que le comportement du bouchon dépend de l'endroit où on l'a mis.

Une onde à la surface de l'eau est composée de creux et de bosses, qui se déplacent à vitesse constante.

Si deux bosses arrivent au même endroit, le mouvement produit sur le bouchon aura une amplitude deux fois supérieure.

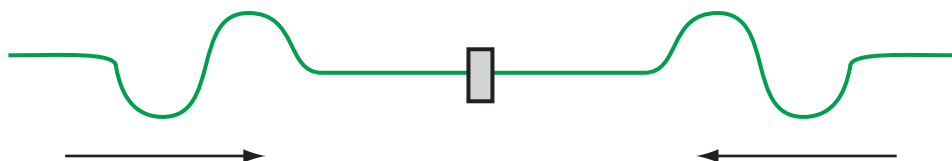
Si une bosse et un creux arrivent au même endroit, le bouchon ne bouge pas.

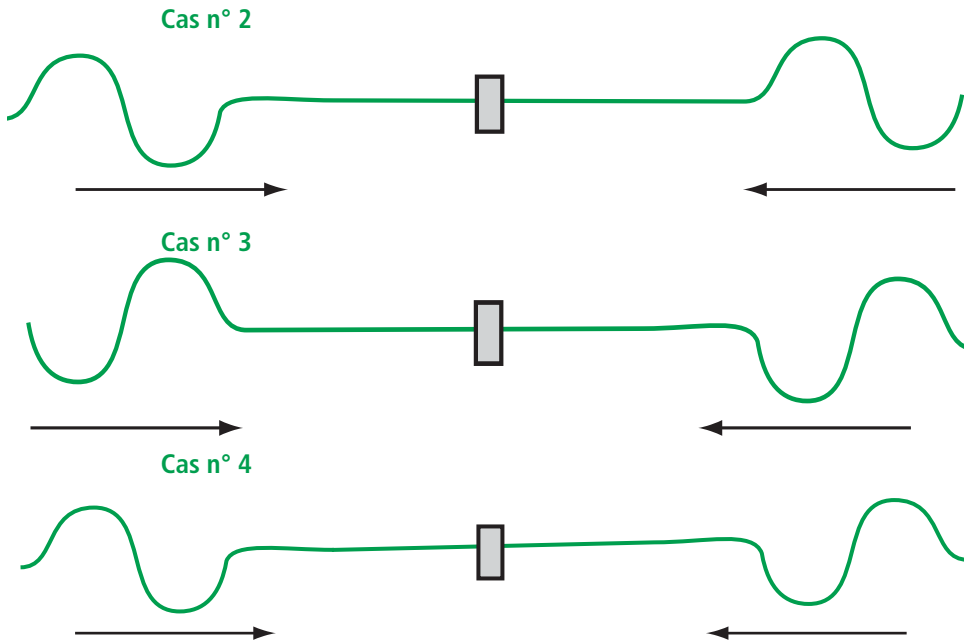
Activité 30



Décrire en une phrase le mouvement du bouchon dans les quatre cas suivants pour lesquels les deux ondes se propagent avec la même célérité.

Cas n° 1





Chaque onde se comporte comme si l'autre n'existait pas : elles se croisent sans se modifier l'une l'autre mais leurs effets s'additionnent.

Sur une cuve à ondes, un vibreur permet de générer des ondes planes circulaires à la surface de l'eau. Les crêtes des vagues donnent des rides brillantes et les creux des rides sombres sur un écran.

Pour visualiser les interférences, on peut utiliser un vibreur muni de deux pointes sources qui frappent la surface de l'eau en deux points distincts. Sur le site suivant, vous pouvez observer les résultats de l'expérience :

http://www.discip.ac-caen.fr/phch/lycee/terminale/interferences_eau/interference.htm

En résumé :

Sommet + sommet	= sommet plus important	= mouvement
Creux + creux	= creux plus important	= mouvement
Creux + sommet	= « rien »	= pas de mouvement

De même, pour les ondes sonores, on peut avoir :

Son + son = son mais aussi son + son = silence.

Pourrait-on avoir, pour des ondes lumineuses :

Lumière + lumière = lumière mais aussi lumière + lumière = obscurité ?



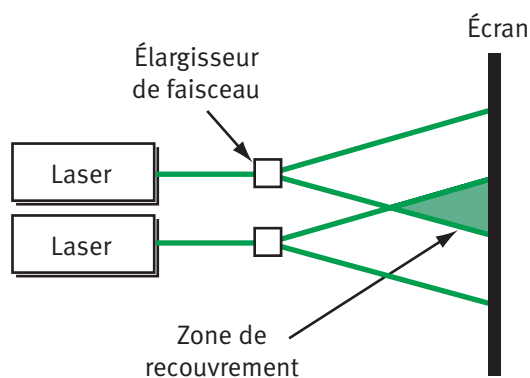
Pour apprendre

1. Conditions d'obtention des interférences lumineuses

Nous avons vu pour les ondes mécaniques qu'il était possible d'obtenir des interférences à partir de deux sources (2 vibreurs). Comment obtenir des interférences à partir de la lumière ?

a) Superposition de lumière issue de deux lasers différents émettant la même longueur d'onde

Utilisons deux lasers de même nature Hélium-néon, émettant chacun une lumière de fréquence parfaitement définie : on parle de lumière monochromatique ($\lambda = 633 \text{ nm}$). Les sources sont dites synchrones.

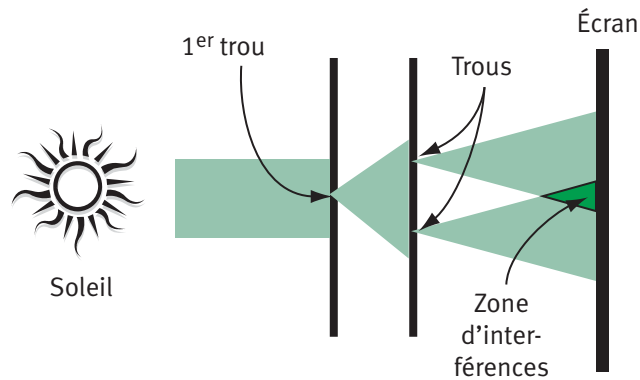


Il est impossible de réaliser des interférences lumineuses avec deux sources « primaires » distinctes synchrones, même identiques et émettant la même radiation monochromatique.

Quelle que soit la distance d'observation, quel que soit l'écartement entre les sources lasers et quelle que soit l'étendue de la zone de recouvrement des faisceaux, on n'observe jamais d'interférences venant de la superposition de ces deux lumières.

b) Expérience historique des trous d'Young

En 1801, Thomas Young réalisa l'expérience suivante en utilisant la lumière du Soleil.



La lumière du Soleil est d'abord diffractée dans toutes les directions en passant dans le 1^{er} trou percé dans l'écran de gauche puis les ondes diffractées arrivent sur un 2^e écran percé de deux trous très rapprochés S_1 et S_2 ; on obtient deux faisceaux diffractés.

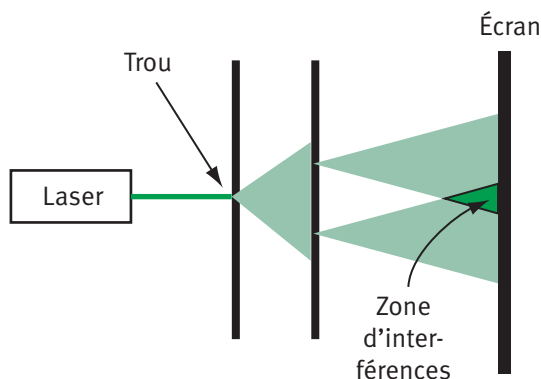
Sur l'écran situé à droite, on observe alors des raies alternativement brillantes et obscures dans la partie commune aux deux faisceaux ; les franges obtenues sont perpendiculaires au plan de la figure et parallèles à la médiatrice des deux trous S_1 et S_2 .

On peut donc observer :

lumière + lumière = lumière mais aussi **lumière + lumière = obscurité.**

c) Superposition de lumière provenant d'une seule source laser

On reprend l'expérience d'Young mais avec un seul laser (source monochromatique). La lumière du laser est alors diffractée par le 1^{er} trou puis le faisceau arrive sur les deux trous d'un second écran ; les deux faisceaux diffractés donnent alors des interférences dans leur zone de recouvrement.



Il est donc possible de réaliser des interférences lumineuses à partir d'une source primaire unique et de deux sources secondaires. Ces sources secondaires sont dites synchrones (mêmes fréquences) et cohérentes (car provenant de la même source primaire).

Vous pouvez observer le système de franges obtenu sur les sites suivants :

<http://ressources.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02/optiphy/biprisme.html>

<http://www.discip.ac-caen.fr/phch/lycee/terminale/interference/interference.htm>

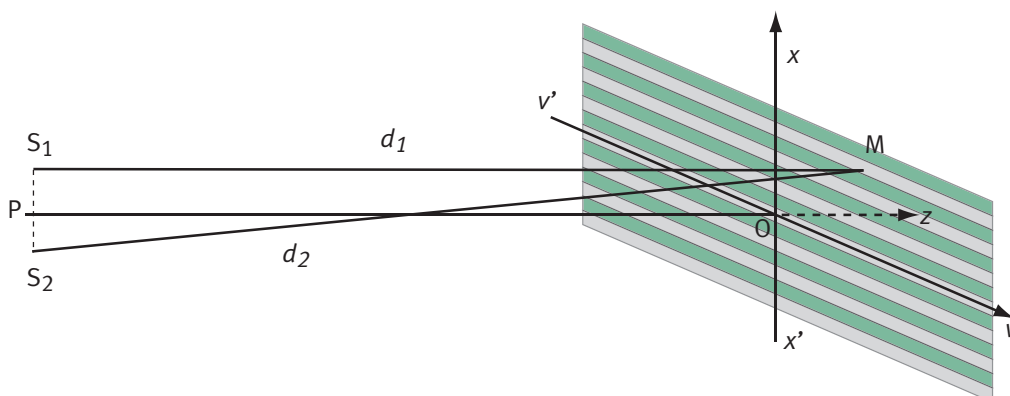
Pour obtenir un phénomène d'interférences, il faut superposer au moins deux ondes de même fréquence et issues d'une même source primaire (ondes cohérentes).

La zone de recouvrement forme le champ d'interférences.

2. Différence de marche et interfrange

a) Différence de marche entre deux rayons

Le plan de la figure ci-dessous est le plan contenant la source S et les sources secondaires S_1 et S_2 .



Cette formule est à admettre. Il ne s'agit pas de l'apprendre mais de savoir l'exploiter. Elle sera donnée dans les exercices proposés.

Les ondes émises par la source S_2 parcourent un trajet plus long pour atteindre le point M que les ondes émises par la source S_1 ; la différence de trajet ($S_2M - S_1M$) est appelée différence de marche et est notée δ avec $\delta = d_2 - d_1$.

On note : $S_1S_2 = a$, $PO = D$ (ordres de grandeur : a en mm et D en m).

En M , on admettra que la différence de marche est égale à :

$$\delta = \frac{ax}{D}$$

b) Interfrange

→ Frange brillante

Les ondes arrivant en phase au point M ajoutent leurs effets ; la frange est une frange brillante.

La différence de marche est donc égale à multiple entier de la longueur d'onde :

$$\delta = k\lambda = \frac{ax}{D}.$$

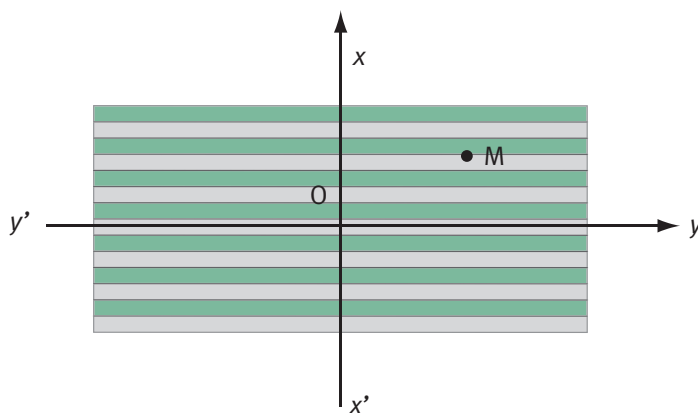
La position moyenne d'une frange brillante est donnée par : $x = k \frac{\lambda D}{a}$.

→ Frange sombre

Les ondes arrivant en opposition de phase au point M annulent leurs effets ; la frange est une frange sombre.

La différence de marche est donc égale à multiple entier impair de demi-longueurs d'onde : $\delta = (2k+1) \frac{\lambda}{2}$.

La position moyenne d'une frange sombre est donnée par : $x = \left(k + \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda D}{a}$.

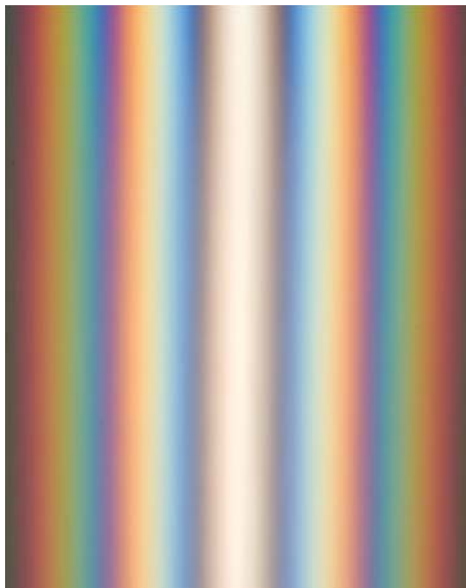


Deux franges brillantes successives sont espacées de $\frac{\lambda D}{a}$, de même que deux franges sombres successives ; cette distance est appelée l'interfrange et est notée

$$i : i = \frac{\lambda D}{a}.$$

3. Cas de la lumière blanche

Remplaçons, dans l'expérience précédente, le laser (source de lumière monochromatique) par une source de lumière blanche. Qu'observe-t-on sur l'écran ?



On observe une frange centrale brillante, blanche et, de part et d'autre, des franges brillantes irisées.

La lumière blanche est formée par la superposition d'une infinité de radiations dont les longueurs d'onde sont comprises entre 400 nm et 750 nm.

Chaque radiation (exemple du laser dans le paragraphe précédent) donne des franges placées différemment sur l'écran. L'interfrange $i = \frac{\lambda D}{a}$ dépend de la longueur d'onde.

Les systèmes de franges correspondant aux différentes longueurs d'onde sont donc décalés.

Au centre du champ d'interférences ($x = 0$), la différence de marche $\delta = \frac{ax}{D}$ est nulle.

Chaque radiation donne, au centre, une frange brillante. La superposition de ces franges brillantes, de couleurs différentes, donne une frange centrale blanche.

En s'éloignant de la frange centrale, la couleur résultante en un point dépend des intensités relatives des diverses radiations en ce point. En un même point, des radiations peuvent donner des franges sombres et d'autres des franges brillantes.

Si on s'éloigne trop de la frange centrale, l'enchevêtrement est trop complexe et l'œil perçoit une teinte blanchâtre appelée blanc d'ordre supérieur. En un point de ce blanc, toutes les radiations ne sont pas présentes.

4. Couleurs interférentielles

Les couleurs observées dans la vie de tous les jours ont plusieurs origines physiques :

- les couleurs par diffusion (le bleu du ciel),
- les couleurs par réfraction (l'arc en ciel),
- les couleurs par absorption (une tomate est rouge).

Les bulles de savon, les taches d'huile sur le sol produisent des couleurs liées au phénomène d'interférences. Il s'agit d'interférences localisées, observées en lumière blanche.

Des interférences se produisent dans les films minces (l'épaisseur des films est de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde incidente). Les couleurs obtenues sont peu intenses. Dans des systèmes multicouches, qui se rencontrent couramment dans la nature, cette intensité est augmentée.



Surface d'une bulle de savon

Photo : PBNJ PRODUCTIONS. © JUPITERIMAGES / BRAND X / AFP.



Tache d'huile sur le sol

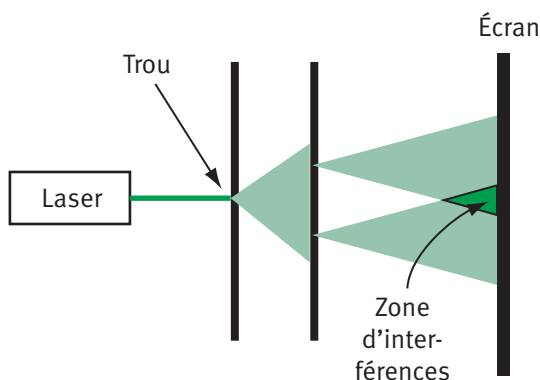
On retiendra que, pour un film d'épaisseur supérieure à quelques microns, on ne voit pas d'interférences à l'œil (si la source lumineuse est blanche). C'est pour cela qu'on ne voit pas de couleurs interférentielles sur une vitre par exemple, alors qu'on peut en voir sur les bulles de savon ou les flaques d'huile sur une chaussée mouillée (films très minces).



Pour conclure

1. Résumé du chapitre

Conditions d'obtention des interférences lumineuses avec une onde monochromatique :



Pour obtenir un phénomène d'interférences, il faut superposer au moins deux ondes :

- de même fréquence,
- et issues d'une même source primaire (ondes cohérentes).

La zone de recouvrement forme le champ d'interférences.

Différence de marche et interfrange

Cette formule est à admettre. Il ne s'agit pas de l'apprendre mais de savoir l'exploiter. Elle sera donnée dans les exercices proposés.

La différence de marche est égale à : $\delta = \frac{ax}{D}$.

Deux franges brillantes successives sont espacées de $\frac{\lambda D}{a}$
de même que deux franges sombres successives ; cette distance est appelée l'interfrange et est notée i : $i = \frac{\lambda D}{a}$

Les interférences avec de la lumière blanche donnent une frange centrale brillante, blanche et, de part et d'autre, des franges brillantes irisées.

2. Exercices d'apprentissage

Exercice 11

On réalise un système interférentiel à partir de fentes d'Young, F_1 et F_2 , éclairé en lumière monochromatique. Les fentes sont distantes de $a = 0,50$ mm. À une distance $D = 1,00$ m des deux fentes, on place un écran vertical qui permet d'observer le phénomène d'interférences.

Donner l'expression de i , interfrange du système. Calculer i quand $\lambda = 546$ nm.

Exercice 12

Des franges d'interférences sont obtenues au moyen du dispositif des fentes d'Young. S_1 et S_2 sont deux fentes très fines qui diffractent la lumière issue de la source lumineuse rectiligne S , placée à égale distance des deux fentes et parallèle à celles-ci. La source émet une radiation monochromatique de longueur d'onde $\lambda = 589 \text{ nm}$.

$S_1S_2 = 0,50 \text{ mm}$ et l'écran est placé à une distance égale à $D = 1,02 \text{ m}$ des deux fentes.

Au point situé à $6,0 \text{ mm}$ de la frange centrale, la frange est-elle sombre ou brillante ?

Donnée

En M, on admettra que la différence de marche est égale à : $\delta = \frac{ax}{D}$.

6

L'effet Doppler

A

Objectifs d'apprentissage

- Savoir interpréter l'effet Doppler.
- Savoir exploiter l'expression du décalage Doppler de la fréquence dans le cas des faibles vitesses.
- Savoir utiliser des données spectrales et un logiciel de traitement d'images pour illustrer l'utilisation de l'effet Doppler comme moyen d'investigation en astrophysique.

B

Pour débiter

Activité 31



L'effet Doppler est un phénomène physique dont les manifestations ont permis des avancées considérables dans des domaines différents comme la médecine, l'étude de l'Univers...

- 1 Rechercher quels sont les apports historiques des deux physiciens Doppler et Fizeau à l'étude de ce phénomène.
- 2 Rechercher quatre applications de l'effet Doppler-Fizeau dans des domaines différents (médecine, ...).

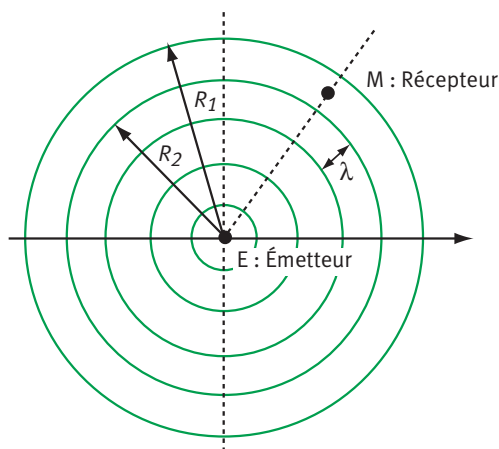
Considérons un phénomène périodique émis par une source et qui, après propagation dans un milieu, est reçu par un récepteur.

1. Source et récepteur au repos

Soit une source E émettant des signaux très brefs (ondes sur l'eau...) à intervalles de temps réguliers T_E (période), et se propageant à la célérité v dans un milieu donné.

Dans l'espace, les signaux successifs se trouveront à un instant t quelconque sur une série de sphères concentriques de rayons $R_1, R_2...$

Après une durée t , la ride circulaire partie du centre à $t=0$ a un rayon R_1 : $R_1 = vt$; la deuxième ride suit avec un retard égal à la période T_E : $R_2 = v(t - T_E)$ et ainsi de suite : $R_3 = v(t - 2T_E)...$



La distance séparant deux signaux consécutifs est égale à la distance parcourue par un signal pendant **une période** T_E soit $\lambda = vT_E$, ce qui correspond à la longueur d'onde.

Activité 32

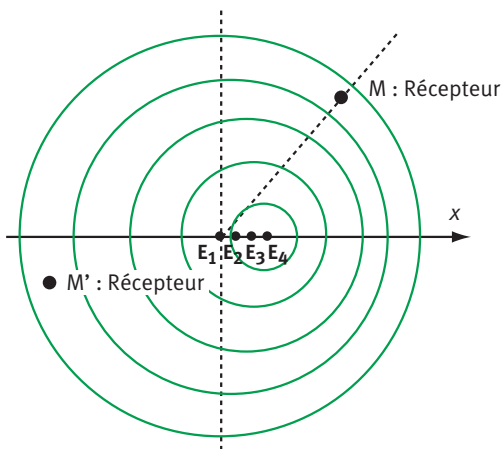


Prenons un récepteur placé en un point M quelconque. Quel intervalle de temps sépare deux signaux consécutifs qui lui arrivent ? Quelle est la relation entre la fréquence détectée et la fréquence émise ?

2. Source en mouvement et récepteur au repos

Supposons l'émetteur animé d'une vitesse $\vec{V}_E$ dans la direction E_1x . À l'instant origine, la source est en E_1 et émet un 1^{er} signal puis des signaux avec une période T_E . Chaque signal se propage dans toutes les directions à la vitesse v .

Dans l'espace, les signaux successifs se trouvent à un instant t quelconque sur une série de cercles concentriques de rayons : $R_1 = vt$, $R_2 = v(t - T_E)$, $R_3 = v(t - 2T_E)$... Les centres des sphères sont maintenant E_1, E_2, E_3, E_4 ...



On voit que la répartition des signaux dans l'espace a été modifiée par le mouvement de la source.

Activité 33



Comparer l'intervalle de temps avec lequel les signaux arrivent sur le récepteur M (immobile) avec la période T_E

Comparer la fréquence détectée et la fréquence émise.

Que se passerait-il si on plaçait le récepteur en M' ?



Pour apprendre

1. Comparaison entre fréquences émise et détectée

a) Étude quantitative d'une expérience

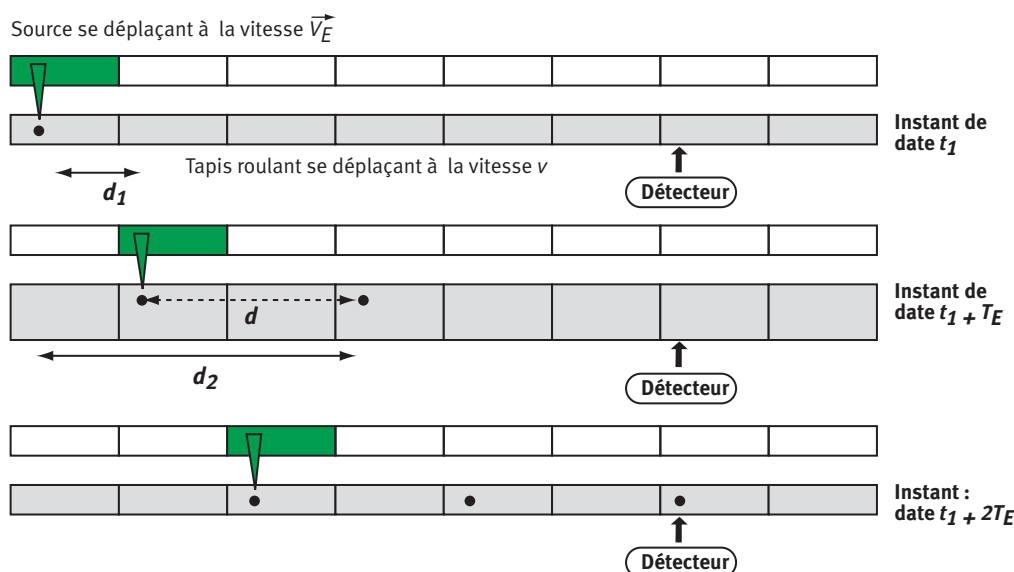
Nous allons étudier une expérience simple afin de déterminer la relation entre les fréquences émise et détectée.

Des petites taches d'encre sont déposées sur un tapis roulant par une pointe fine (la source) à intervalle de temps régulier ; la période d'émission est T_E .

Le tapis roulant se déplace à la vitesse constante v par rapport au milieu.

Un lecteur optique immobile enregistre l'arrivée des taches et l'intervalle de temps séparant les arrivées (période T_R).

La pointe source se déplace entre deux dépôts à la vitesse $\vec{V}_E$; cela ne change rien à la vitesse $\vec{v}$ de transport des taches par rapport au milieu de propagation considéré.



Activité 34



Soit $T_E = 1,0$ s la période d'émission et $V_E = 2,0$ cm.s⁻¹ la vitesse de l'émetteur. La vitesse du tapis roulant est : $v = 6,0$ cm.s⁻¹.

On recherche la période de passage des taches déposées sur le tapis roulant devant le détecteur fixe.

- 1 Calculer la fréquence f_E d'émission des taches.
- 2 Montrer, en vous aidant du schéma, que la distance d existant entre les taches s'exprime par : $d = (v - V_E)T_E$.

En déduire sa valeur.

- 3 Exprimer la durée T_R , détectée à l'arrivée, entre deux taches en fonction de d et v .

Montrer que la période détectée T_R vérifie : $T_R = \left(1 - \frac{V_E}{v}\right)T_E$.

En déduire la fréquence détectée f_R en fonction v , V_E et f_E .

- 4 Calculer la valeur numérique de la fréquence détectée f_R .

b) Expression du décalage Doppler de la fréquence

Ces résultats sont à admettre. Il ne s'agit pas de les apprendre mais de savoir les exploiter. Les formules seront données dans les exercices proposés.

→ Source en mouvement rectiligne et récepteur au repos

L'axe est orienté de l'émetteur E vers le récepteur R ; la source est animée de la vitesse $\overrightarrow{V_E}$; le récepteur est au repos.

Nous avons vu que : $f_R = \frac{1}{\left(1 - \frac{V_E}{v}\right)} f_E$.

→ Source au repos et récepteur en mouvement rectiligne

Le raisonnement est analogue. La source est au repos ; l'axe est toujours orienté de l'émetteur E vers le récepteur R ; le récepteur est animé de la vitesse $\overrightarrow{V_R}$.

On obtient, après calcul, $T_R = \frac{T_E}{1 - \frac{V_R}{v}}$ soit en fréquence : $f_R = \left(1 - \frac{V_R}{v}\right) f_E$.

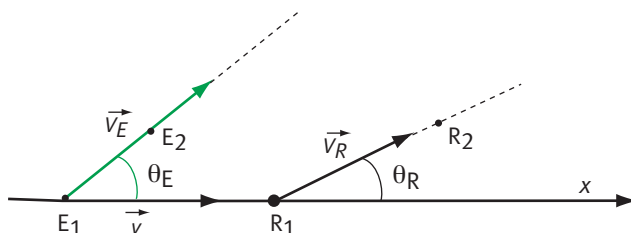
→ Source et récepteur en mouvement colinéaire

L'axe est toujours orienté de l'émetteur E vers le récepteur R ; la source est animée de la vitesse $\overrightarrow{V_E}$; le récepteur est animé de la vitesse $\overrightarrow{V_R}$.

On obtient, après calcul, $T_R = \frac{1 - \frac{V_E}{v}}{1 - \frac{V_R}{v}} T_E$ soit en fréquence : $f_R = \frac{\left(1 - \frac{V_R}{v}\right)}{\left(1 - \frac{V_E}{v}\right)} f_E$.

→ Source et récepteur en mouvement quelconque : cas général

Toutes les formules s'appliquent également lorsque les signaux périodiques sont remplacés par des vibrations sinusoïdales (ondes sonores, ondes lumineuses...).



Dans le cas où émetteur et récepteur sont animés de vitesses $\vec{V}_E$ et $\vec{V}_R$ de direction quelconque par rapport à l'axe E_1R_1 , on peut définir l'angle θ_E existant entre les deux vecteurs vitesse $\vec{V}_E$ et $\vec{v}$, et l'angle θ_R existant entre les deux vecteurs vitesse $\vec{V}_R$ et $\vec{v}$ (voir figure ci-dessus).

On obtient alors les formules suivantes : $T_R = \frac{1 - \frac{V_E \cos \theta_E}{v}}{1 - \frac{V_R \cos \theta_R}{v}} T_E$ soit en fréquence :

$$f_R = \left(\frac{1 - \frac{V_R \cos \theta_R}{v}}{1 - \frac{V_E \cos \theta_E}{v}} \right) f_E.$$

Activité 35



Montrer que cette formule englobe les cas particuliers établis précédemment avec les conventions de signe adoptées.

2. Application aux sources sonores en mouvement

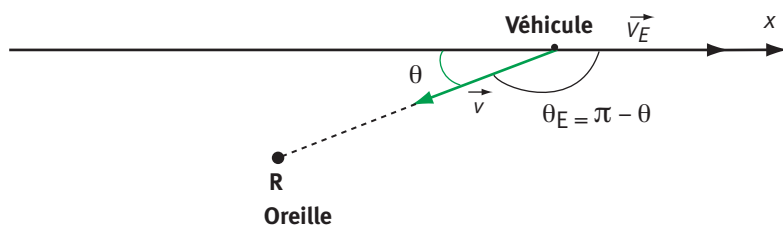
Un véhicule avec sirène se déplace à la vitesse $\vec{V}_E$ suivant l'axe E_x ; v représente la vitesse du son dans l'air.



Lorsque le véhicule avec sirène s'approche du récepteur fixe (oreille de l'observateur) ($V_R = 0$; $\cos \theta_E > 0$), le son détecté par l'oreille a une fréquence

$$f_R = \frac{1}{\left(1 - \frac{V_E \cos \theta_E}{v} \right)} f_E ; \text{ l'oreille entend un son plus aigu que celui émis par la}$$

source puisque $f_R > f_E$.



Lorsque le véhicule avec sirène s'éloigne ($V_R = 0$; $\cos \theta_E = -\cos \theta < 0$), le son détecté par l'oreille a une fréquence $f_R = \frac{1}{\left(1 + \frac{V_E \cos \theta}{v}\right)} f_E$; l'oreille entend un

son plus grave que celui émis par la source puisque $f_R < f_E$. Le son sera plus grave lorsque la source s'éloigne du récepteur.

Vous pouvez consulter une animation sur l'effet Doppler sur le site suivant : <http://www.onera.fr/lumiere/medias/doppler.swf>.

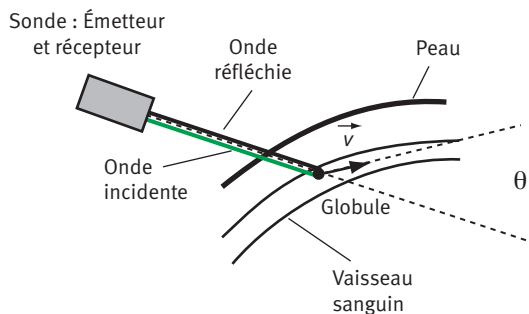
3. Applications médicales de l'effet Doppler-Fizeau

Dans le domaine médical, l'effet Doppler-Fizeau est utilisé pour déterminer des vitesses de particules en mouvement (globules, spermatozoïdes...) inaccessibles à la vision directe. Ces particules sont la cible d'une onde (ultrasons ou lumière) qu'ils réfléchissent en partie ; l'onde réfléchie a une fréquence décalée par rapport à l'onde incidente. La mesure de ce décalage nous renseigne sur la vitesse de déplacement des particules.

a) Vélocimétrie à ultrasons

La cible est constituée des globules sanguins en mouvement dans de gros vaisseaux sanguins. La mesure de leur vitesse $\vec{V}$ permet la mise en évidence d'éventuels rétrécissements des vaisseaux.

La sonde à ultrasons joue le rôle d'émetteur puis de récepteur. La vitesse des ultrasons est égale à v .



Activité 36



- 1 On s'intéresse à l'onde incidente ; la fréquence émise par l'émetteur au repos est f_E .

La fréquence qui serait détectée au niveau du globule en mouvement à la vitesse $\vec{V}$ est notée f_m ; le vecteur $\vec{V}$ fait un angle θ avec la direction de l'onde incidente.

Montrer que la fréquence f_m s'écrit : $f_m = \left(1 - \frac{V \cos \theta}{v}\right) f_E$.

- 2 On s'intéresse à l'onde réfléchi ; la fréquence détectée par le récepteur au repos est f_R .

La fréquence f_m est émise par réflexion au niveau du globule en mouvement à la vitesse $\vec{V}$.

Montrer que la fréquence f_R s'écrit : $f_R = \frac{1}{1 + \frac{V \cos \theta}{v}} f_m$.

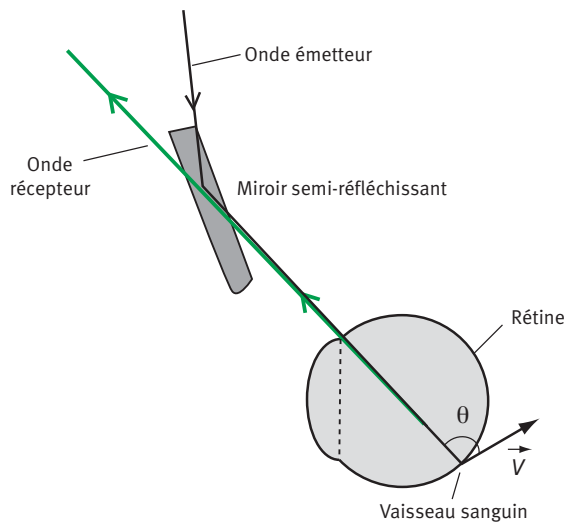
- 3 En déduire la fréquence f_R en fonction de f_E , V , θ et de la vitesse des ultrasons v .

b) Vélodimétrie optique

La vitesse d'écoulement du sang dans les petits vaisseaux de la rétine peut être déterminée en utilisant la lumière d'un faisceau laser. L'œil étant transparent, la lumière éclaire les vaisseaux sanguins de la rétine ; le faisceau est réfléchi sur un miroir semi-réfléchissant avant de pénétrer dans l'œil et d'atteindre le vaisseau sur la rétine.

L'angle θ est grand (donc $\cos \theta$ petit) car le faisceau laser doit pénétrer par la pupille et arrive presque perpendiculairement à la rétine.

Les globules sanguins, animés de la vitesse $\vec{V}$, renvoient la lumière ; le faisceau qui revient sur lui-même après la traversée du miroir semi-réfléchissant est ensuite analysé.

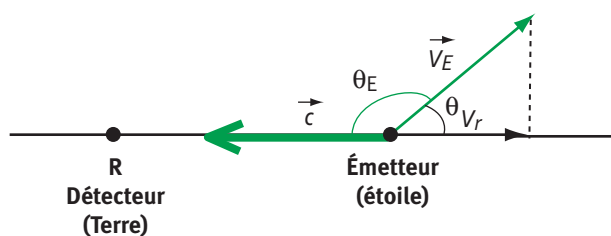


4. Application en astrophysique

Nous avons vu que les étoiles, les galaxies, les quasars émettent des rayonnements électromagnétiques.

L'analyse des spectres dans le domaine visible fait apparaître des raies que l'on sait identifier et qui permettent de donner la constitution chimique de la matière émettant ces spectres.

Lorsque les atomes concernés sont en mouvement (dans une étoile en mouvement à la vitesse $\vec{V}_E$ par rapport à la Terre), les fréquences détectées (f_R) sont décalées par rapport aux fréquences émises (f_E).



a) Relation entre la fréquence détectée d'une raie du spectre et la vitesse de l'étoile

Considérons une raie du spectre de l'étoile.

Nous avons vu que : $f_R = \frac{\left(1 - \frac{V_R \cos \theta_R}{c}\right)}{\left(1 - \frac{V_E \cos \theta_E}{c}\right)} f_E$; on suppose que le détecteur est

fixe : $V_R = 0$.

D'autre part : $v = c$ (vitesse de la lumière).

$$\Rightarrow f_R = \frac{1}{\left(1 - \frac{V_E \cos \theta_E}{c}\right)} f_E ;$$

on pose : $v_r = V_E \cos \theta_E$: c'est la composante radiale de la vitesse de l'astre considéré (voir schéma).

La vitesse radiale v_r est positive si l'étoile se rapproche $\left(\theta_E < \frac{\pi}{2}\right)$ et négative si l'étoile s'éloigne $\left(\theta_E > \frac{\pi}{2}\right)$ (sur la figure ci-dessus, l'étoile s'éloigne).

$$f_R = \frac{1}{\left(1 - \frac{v_r}{c}\right)} f_E \quad \frac{v_r}{c} = 1 - \frac{f_E}{f_R}$$

b) Relation entre le décalage en longueur d'onde d'une raie du spectre et la vitesse radiale

Les astrophysiciens travaillent en longueurs d'onde : $\lambda_R = \frac{c}{f_R}$ et $\lambda_E = \frac{c}{f_E}$, ce qui

$$\text{donne : } \frac{v_r}{c} = 1 - \frac{\lambda_R}{\lambda_E} = \frac{\lambda_E - \lambda_R}{\lambda_E} \Rightarrow v_r = c \frac{\lambda_E - \lambda_R}{\lambda_E} = -c \frac{\lambda_R - \lambda_E}{\lambda_E} = -c \frac{\lambda}{\lambda_E}$$

$$\Rightarrow \lambda = -\frac{v_r}{c} \lambda_E$$

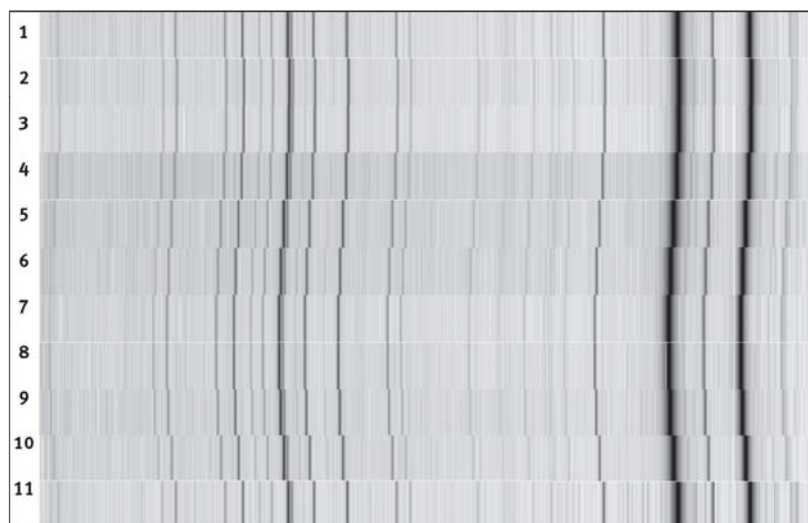
Pour une raie donnée :

- $\lambda > 0$ si la vitesse radiale v_r est négative c'est-à-dire si l'étoile s'éloigne ; il y a donc un décalage vers le rouge ;
- $\lambda < 0$ si la vitesse radiale v_r est positive c'est-à-dire si l'étoile se rapproche ; il y a donc un décalage vers le bleu.

Afin de pouvoir utiliser, si vous en avez la possibilité, le logiciel Salsa J, nous étudions par la suite les données figurant sur le site : <http://www.fr.euhou.net/>.

On considère 11 spectres d'une étoile pris à des dates différentes ; l'intervalle de temps moyen séparant la prise de deux spectres consécutifs est pratiquement égal à 1 jour.

Spectre	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
t (en jour)	0	0,974505	1,969681	2,944838	3,970746	4,886585	5,924292	6,963536	7,978645	8,973648	9,997550



Activité 37



Comment évoluent les raies du spectre de l'étoile pendant les 10 jours ?

À quelle date l'étoile est-elle la plus proche de la Terre ?

On peut visualiser le déplacement des raies au cours du temps sur la page : http://www.fr.euhou.net/index.php?option=com_content&task=view&id=121&Itemid=13.

Déviati n des raies vers la droite
(vers le rouge) : $\lambda > 0$



Spectre de référence de l'étoile

L'étoile s'éloigne ($V = v_r < 0$)



Déviati n des raies vers la gauche
(vers le bleu) : $\lambda < 0$



Spectre de référence de l'étoile

L'étoile se rapproche ($V = v_r > 0$)



Vous pouvez télécharger le logiciel Salsa J sur <http://www.fr.euhou.net/> puis cliquer sur l'onglet « Le logiciel » et ensuite le télécharger. Copier les images (.fit) situées en bas de page dans un fichier sur votre ordinateur que vous appellerez : spectres.

Suivre le protocole suivant avec Salsa J :

- Ouvrir Salsa J en cliquant sur l'icône correspondante.
- Cliquer sur Fichier puis, dans le menu déroulant qui apparaît, cliquer sur Ouvrir.
- Rechercher les images dans : *spectres*.
- Sélectionner les 11 images de spectres : fic 01, fic 02, fic 03, fic 04, fic 05, fic 06, fic 07, fic 08, fic 09, fic 10 et fic 11 (on maintient la touche Shift enfoncée pendant que l'on sélectionne ces images).
- Ouvrir ces 11 images puis cliquer sur Images : dans le menu déroulant qui apparaît, cliquer sur Piles : dans le nouveau menu déroulant qui apparaît, cliquer sur Transférer images dans Pile.
- Cliquer à nouveau sur Images : dans le menu déroulant qui apparaît, cliquer sur Piles : dans le nouveau menu déroulant qui apparaît, cliquer sur Démarrer animation.

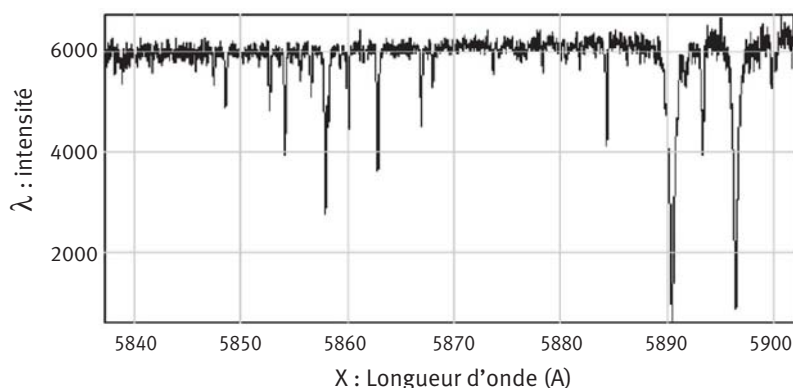
On observe le déplacement des raies du à l'effet Doppler. À la fin, fermer la pile.

c) Détermination de la vitesse radiale v_r par effet Doppler-Fizeau en utilisant une raie du spectre

Nous avons vu que : $\lambda = -\frac{v_r}{c}\lambda_E \Rightarrow v_r = -c\frac{\lambda}{\lambda_E} = -c\frac{\lambda_R - \lambda_E}{\lambda_E}$.

Analysons le spectre n° 2 (avec le logiciel Salsa J, vous pouvez retrouver ce spectre).

Le flux lumineux (ou intensité lumineuse) s'obtient en fonction de la longueur d'onde λ (en angströms).



Choisissons une raie dans ce spectre ; nous prenons la raie de plus grande intensité qui est la 1^{re} raie du sodium : $\lambda_{R2}(\text{Na}) = 5\,890,496 \text{ \AA}$ soit $589,0496 \text{ nm}$.

Pour le sodium, la longueur d'onde mesurée sur Terre vaut $\lambda_E(\text{Na}) = 5\,889,950 \text{ \AA}$
 $\Rightarrow \lambda = \lambda_{R2}(\text{Na}) - \lambda_E(\text{Na}) = 0,546 \text{ \AA}$.

$\lambda_E(\text{Na})$ est la longueur d'onde mesurée dans le laboratoire terrestre et $\lambda_{R2}(\text{Na})$ est la longueur d'onde mesurée dans le spectre 2 de l'étoile en mouvement.

La vitesse radiale s'exprime par : $v_r = -c \frac{\lambda}{\lambda_E}$ ce qui donne : $v_r = -27\,810,1 \text{ m.s}^{-1}$

soit $v_r = -27,81 \text{ km.s}^{-1}$.

d) Expansion de l'Univers

L'analyse spectrographique de la lumière reçue des galaxies lointaines montre systématiquement un déplacement Doppler-Fizeau vers le rouge.

Activité 38



Les galaxies lointaines s'éloignent-elles ou se rapprochent-elles de la Terre ?

Pourquoi dit-on alors que l'Univers est en expansion ?

Les mesures astronomiques des distances r de ces galaxies à la Terre et des vitesses radiales d'éloignement v_r des galaxies donnent la loi de Hubble : $v_r = Hr$.

La constante de proportionnalité H (constante de Hubble) vaut environ $H = 3.10^{-18} \text{ s}^{-1}$.

Les galaxies s'éloignent à une vitesse d'autant plus grande qu'elles sont plus loin de la Terre.

La théorie du big-bang peut s'interpréter par le fait que tout se passe comme si, à l'instant origine, l'Univers s'était formé à partir d'une explosion où les produits de l'explosion d'origine forment maintenant les parties les plus éloignées de l'Univers.



Pour conclure

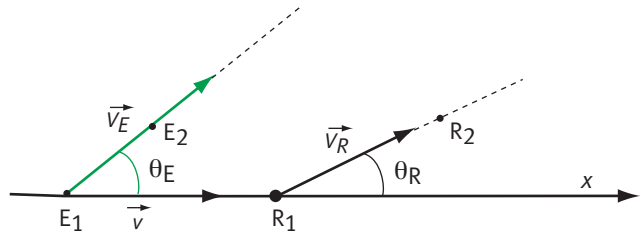
1. Résumé du chapitre

Le décalage Doppler de la fréquence est utilisé dans **le domaine médical pour déterminer des vitesses de particules en mouvement (globules, spermatozoïdes...) inaccessibles à la vision directe.**

L'effet Doppler est utilisé comme moyen d'investigation en astrophysique.

Pour chaque application, nous pouvons utiliser la formule suivante qui n'est pas à connaître :

$$f_R = \frac{\left(1 - \frac{V_R \cos \theta_R}{v}\right)}{\left(1 - \frac{V_E \cos \theta_E}{v}\right)} f_E$$



2. Exercices d'apprentissage

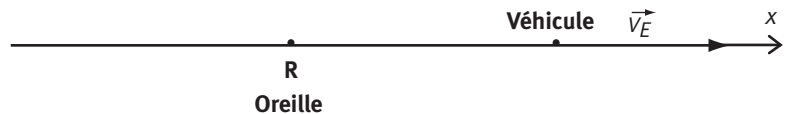
Exercice 13

Au bord d'une route, vous percevez une fréquence de 480 Hz provenant de la sirène d'une voiture qui s'éloigne.

La voiture a une vitesse de 90 km.h⁻¹. Quelle est la fréquence de la sirène ?

Donnée

Vitesse du son dans l'air : $v = 340 \text{ m.s}^{-1}$.



Exercice 14

Vous êtes dans la même situation que dans l'exercice 13 ; vous percevez une fréquence de 540 Hz provenant de la sirène d'une voiture qui s'approche.

Après le passage de la voiture, vous ne percevez plus le son de la sirène qu'à une fréquence de 470 Hz.

Déterminez la vitesse de la voiture (en m/s puis en km/h). Quelle est la fréquence de la sirène ?

Donnée

Vitesse du son dans l'air : $v = 340 \text{ m.s}^{-1}$.

7

Pour clore la séquence

A

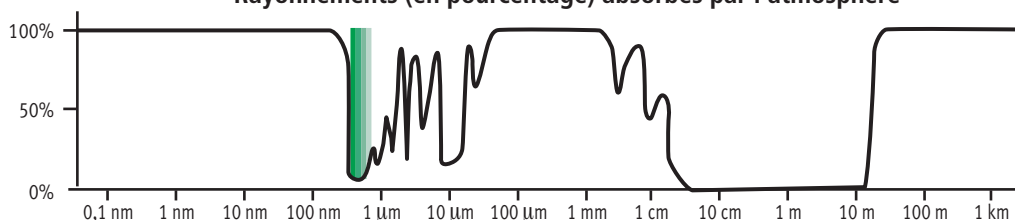
Fiche de synthèse

Ondes et particules

Rayonnements émis dans l'univers

Nom du rayonnement	Gamma	X	UV	Visible	IR	Radio
Intervalle de longueur d'onde	< 0,001 nm	[0,001,10] (nm)	[10,400] (nm)	[400,800] (nm)	[800 nm, 1 mm]	> 1 mm

Rayonnements (en pourcentage) absorbés par l'atmosphère



L'atmosphère absorbe totalement les rayons γ et X, fortement les UV et partiellement les rayonnements visibles et infrarouges. Par contre, les ondes radio ne sont pas absorbées dans un grand intervalle de fréquence. Ce qui explique le développement des observations astronomiques par radiotélescope sur Terre.

L'Homme sait également fabriquer des sources de rayonnement sur l'ensemble du spectre électromagnétique :

- Les rayonnements gamma et X : éléments radioactifs, tubes à rayons X
- Le rayonnement UV : lampes à vapeur sous basse pression
- Le rayonnement visible : corps chauffés (lampe à incandescence), lampes à décharge (néon...)
- Le rayonnement IR : corps chauffés (lampe IR)
- Les ondes radio : circuit électrique sous tension électrique variable associé à une antenne.

Contrairement à la lumière, qui est capable de se propager dans le vide et dans la matière, certaines ondes ne se propagent que dans la matière :

- la houle,
- les sons,
- les ondes sismiques.

Le niveau sonore de symbole L (comme Level) est défini par : $L = 10 \log \frac{I}{I_0}$
Il s'exprime en décibels acoustiques dB_A .

L'intensité sonore I a pour référence : $I_0 = 1.10^{-12} \text{ W.m}^{-2}$; elle s'exprime en watts par mètre carré.

Caractéristiques des ondes

Onde mécanique progressive

C'est le phénomène de propagation d'une perturbation dans un milieu sans transport de matière.

- Une onde se propage, à partir de la source, dans toutes les directions qui lui sont offertes.
- La célérité d'une onde est la « vitesse » à laquelle elle se propage.
- La perturbation se transmet de proche en proche avec transfert d'énergie sans transport de matière.
- Deux ondes peuvent se croiser sans se perturber.

Onde mécanique progressive périodique

Double périodicité : temporelle et spatiale

- Périodicité temporelle
La durée qui sépare l'arrivée de deux perturbations successives en un point est appelée période temporelle T .
- Périodicité spatiale
La distance qui sépare deux perturbations consécutives est appelée période spatiale.

Acoustique musicale et physique des sons musicaux

La hauteur d'un son simple est mesurée par sa fréquence.

Plus la fréquence est basse et plus le son est grave. Plus elle est élevée, plus il est aigu.

Le son complexe résulte de la superposition de sons purs correspondant à divers harmoniques, dont les amplitudes sont souvent différentes.

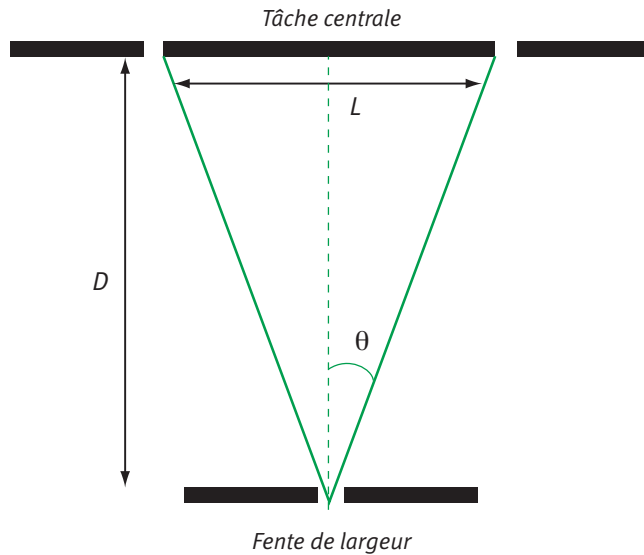
Le timbre d'un son est lié à la richesse de ce son en ses divers harmoniques.

L'harmonique de fréquence la plus basse (rang 1) correspond au fondamental. Les autres harmoniques, notés harmoniques de rang 2, 3..., ont des fréquences multiples de celle du fondamental.

La hauteur du son complexe est mesurée par la fréquence de son fondamental.

Propriétés des ondes

La diffraction



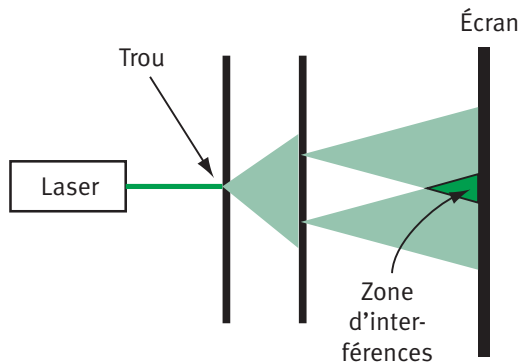
L'écart angulaire du faisceau diffracté, la largeur de la fente (ou du fil) et la longueur d'onde du laser sont liés par la relation :

$$\theta = \frac{\lambda}{a}$$

Pour une longueur d'onde donnée, le phénomène de diffraction est d'autant plus marqué que la dimension de l'ouverture ou de l'obstacle est plus petite.

Les interférences

Conditions d'obtention des interférences lumineuses avec une onde monochromatique :



Pour obtenir un phénomène d'interférences il faut superposer au moins deux ondes :

- de même fréquence,
- et issues d'une même source primaire (ondes cohérentes).

La zone de recouvrement forme le champ d'interférences.

Les interférences avec de la lumière blanche donnent des franges irisées.

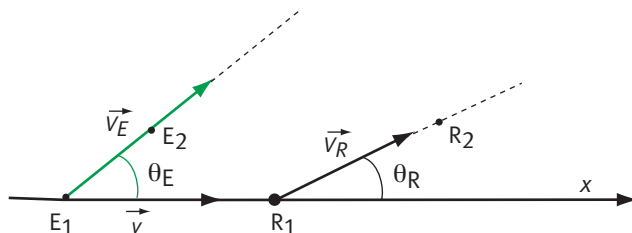
L'effet Doppler

Le décalage Doppler de la fréquence est utilisé dans **le domaine médical pour déterminer des vitesses de particules en mouvement (globules, spermatozoïdes...) inaccessibles à la vision directe.**

L'effet Doppler est utilisé comme moyen d'investigation en astrophysique.

Pour chaque application, nous pouvons utiliser la formule suivante qui n'est pas à connaître :

$$f_R = \frac{\left(1 - \frac{V_R \cos \theta_R}{v}\right)}{\left(1 - \frac{V_E \cos \theta_E}{v}\right)} f_E$$

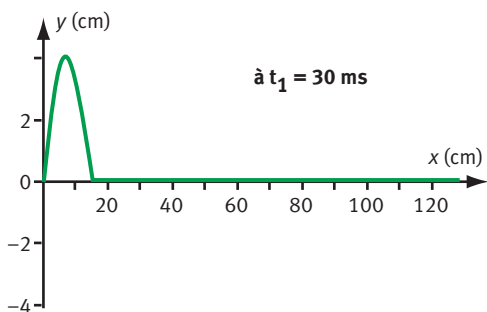


B

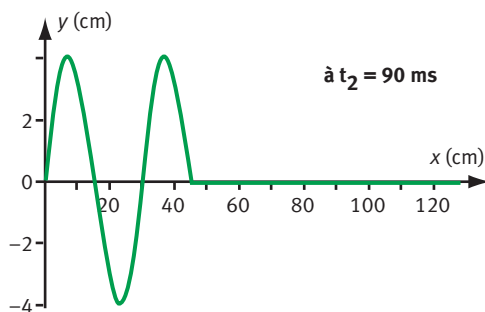
Exercices de synthèse

Exercice 1 Ondes le long d'une corde

L'extrémité gauche d'une corde est reliée à un vibreur effectuant des oscillations sinusoïdales entretenues à partir d'un instant de date $t_0 = 0$ s. Les graphiques 1 et 2 représentent l'état de la corde à une date donnée. Les élongations y et les abscisses x sont graduées en cm. On néglige tout amortissement dans la totalité des questions de cette partie 3.

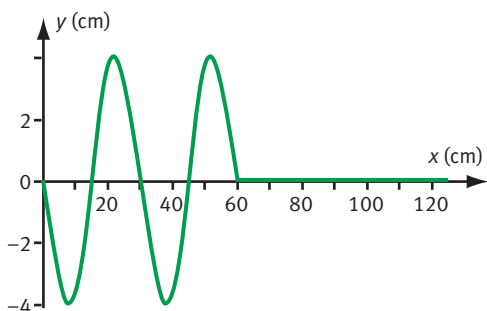


Graphique 1

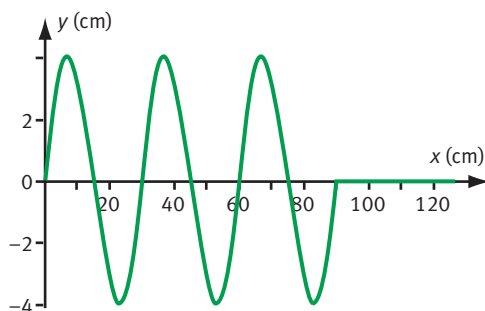


Graphique 2

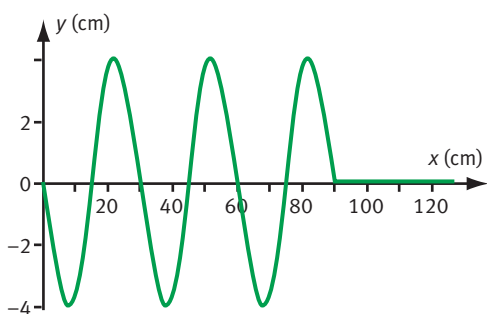
1. Quelle est la valeur numérique de la longueur d'onde λ ?
2. À partir des graphiques 1 et 2, déterminer la valeur de la période temporelle T .
3. Quelle est la célérité de l'onde dans la corde ?
4. Dans la même expérience, parmi les graphes 3, 4, 5 et 6 ci-dessous, quel est celui qui représente l'aspect de la corde à l'instant de date $t = 180$ ms ?



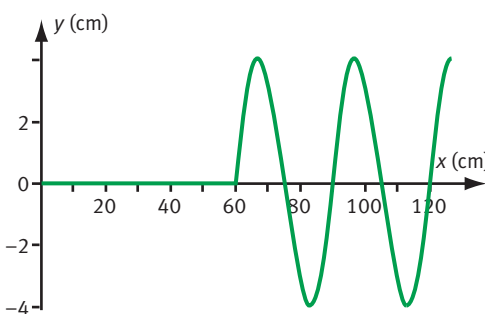
Graphique 3



Graphique 4



Graphique 5



Graphique 6

Exercice 2 Onde mécanique et lumière

La lumière est une onde progressive périodique mais elle n'est pas mécanique.

- a) Citer un fait expérimental qui permet de décrire la lumière comme une onde.
- b) Quelle observation permet de montrer que la lumière n'est pas une onde mécanique ?

Exercice 3 Mesure de la vitesse du son émis par le haut-parleur

Le signal électrique obtenu avec un circuit oscillant est amplifié puis transformé en onde sonore par le haut-parleur.

Pour mesurer la vitesse du son émis par le haut-parleur à la température de la salle, on réalise l'expérience schématisée sur la figure 8 ci-dessous.

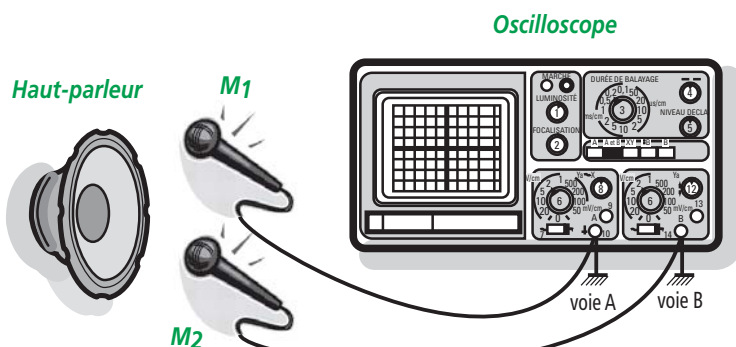


Figure 8

On place côte à côte, face au haut-parleur, deux microphones M₁ et M₂ branchés sur les voies A et B d'un oscilloscope.

Les courbes observées sur l'écran de l'oscilloscope sont représentées sur la figure 9 ci-dessous.

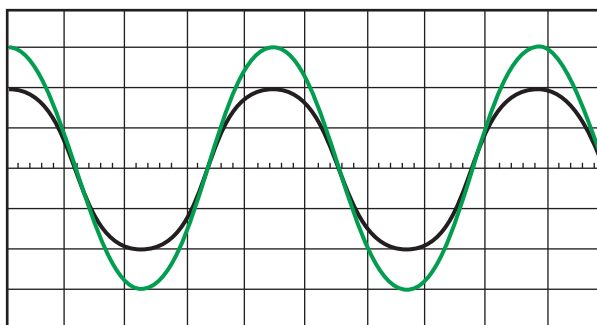


Figure 9

Les deux voies de l'oscilloscope ne sont pas réglées sur la même sensibilité verticale.

- ❶ Quelle est la nature de l'onde sonore émise par le haut-parleur ?
- ❷ Cette onde sonore est dite longitudinale. Expliquer cette appellation.
- ❸ Les courbes observées sur l'écran de l'oscilloscope sont en phase. On laisse le microphone M₁ en place et on déplace lentement et parallèlement à l'axe du haut-parleur le microphone M₂ jusqu'à obtenir à nouveau les deux courbes en phase. La distance qui sépare les deux microphones dans cette nouvelle position est $d = 1,50$ m.
 - a) Définir la longueur d'onde d'une onde périodique.
 - b) Que représente alors la distance d dans cette expérience ?
 - c) Sachant que la fréquence de l'onde sonore émise par le haut-parleur est $f = 225$ Hz, calculer la vitesse de propagation du son dans l'air.

Exercice 4 Céramique et ultrasons

Lorsqu'on applique une tension sinusoïdale d'amplitude suffisante et de fréquence appropriée entre les deux faces métallisées et opposées d'une céramique piézoélectrique, elle se met à vibrer. Lorsque la céramique entre en résonance, elle émet des ultrasons.

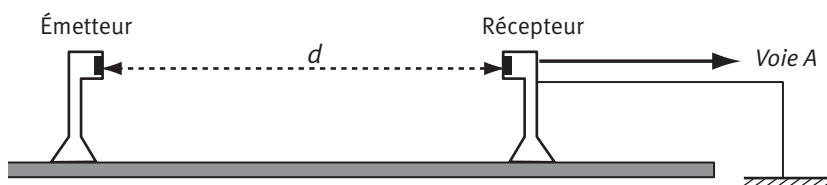
La fréquence des ultrasons émis est égale à la fréquence de vibration de la céramique émettrice.

On réalise le montage schématisé figure 1. Le récepteur, constitué d'une céramique réceptrice, est placé à une distance d , face à la céramique émettrice.

Une tension de même fréquence que les ultrasons reçus apparaît aux bornes de la céramique réceptrice. On visualise cette tension sur la voie A d'un oscilloscope. L'oscillogramme obtenu est représenté sur la figure 2. Le coefficient de balayage est égal à $10 \mu\text{s} / \text{div}$ et la sensibilité verticale à $0,2 \text{ V} / \text{div}$.

On rappelle que la célérité des ultrasons dans l'air est $v_{\text{air}} = 340 \text{ m.s}^{-1}$ dans les conditions de l'expérience.

Figure 1



Coefficient de balayage : $10 \mu\text{s} / \text{div}$

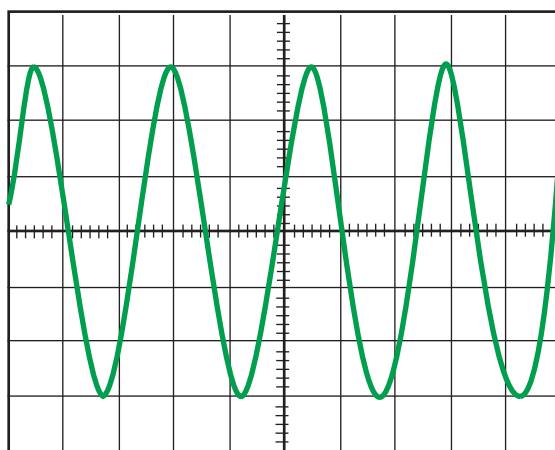
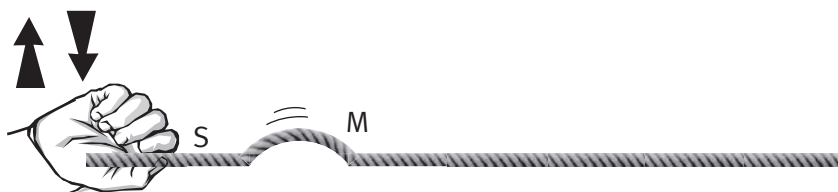


Figure 2

- 1 Déterminer la période T et la fréquence f de la tension observée à l'oscilloscope.
- 2 En déduire la fréquence f_u des ultrasons. Justifier.
- 3 Donner l'expression littérale puis la valeur de la longueur d'onde λ des ultrasons dans l'air.

Exercice 5 Corde

Une très longue corde élastique inextensible est disposée horizontalement sur le sol. Un opérateur crée une perturbation en imprimant une brève secousse verticale à l'extrémité S de la corde (figure 1).



Mouvement
de la main

Figure 1

1. Étude chronophotographique

La propagation de l'onde le long de la corde est étudiée par chronophotographie (figure 2).

L'intervalle de temps séparant deux photos consécutives est $\Delta t = 0,25$ s.

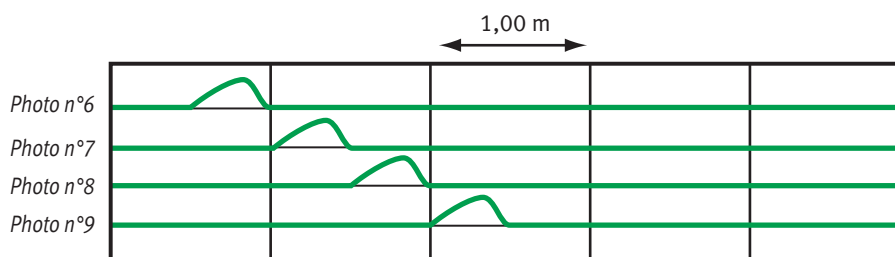


Figure 2

La propagation de l'onde le long de la corde est étudiée par chronophotographie (figure 2).

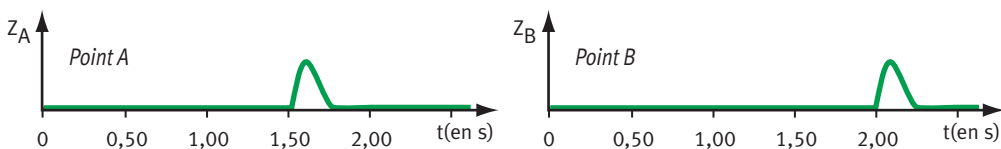
Définir puis calculer la célérité de l'onde.

Pendant quelle durée un point de la corde est-il en mouvement ?

2. Évolution temporelle du déplacement vertical de plusieurs points de la corde

L'évolution au cours du temps des altitudes z_A et z_B de deux points A et B de la corde est l'objet de la figure 3. L'instant de date $t_0 = 0$ s correspond au début du mouvement de S.

Figure 3



- Lequel de ces deux points est touché le premier par la perturbation ?
- Lequel de ces deux points est situé le plus près du point source S de la corde ?
- Quel retard le point touché en second présente-t-il dans son mouvement par rapport au point touché en premier ?
- Quelle est la valeur de la distance séparant les points A et B ?
- Un troisième point C commence son mouvement à l'instant de date $t_c = 0,50$ s. Préciser sa position par rapport à A. Représenter sur un schéma la position des points A, B et C (échelle 2 cm pour 1 m) par rapport au point source S.

Exercice 6 Cuve à ondes

Pour étudier les ondes progressives sinusoïdales à la surface de l'eau, on utilise une cuve à ondes.

Un vibreur permet de générer des ondes planes circulaires de fréquence N à la surface de l'eau. Les crêtes des vagues donnent des rides brillantes et les creux des rides sombres sur un écran que l'on photographie.

Afin d'apprécier l'échelle, deux marques A et B ont été faites sur l'écran qui correspondent à une distance $AB = 7,0$ cm dans la cuve.

La surface de l'eau est excitée par de l'air pulsé : les pulsations sont créées par une petite pompe. Leur fréquence peut être réglée de 10 à 40 Hz grâce à un oscillateur électrique entretenu.

- À l'aide du vibreur, on crée des ondes progressives sinusoïdales de fréquence N à la surface de l'eau. Le phénomène observé possède une longueur d'onde λ . Définir la longueur d'onde λ .
Quelle relation existe-t-il entre la longueur d'onde λ , la fréquence N et la célérité v des ondes observées ?
- À l'aide de la photo 1 (page suivante), déterminer le plus précisément possible la longueur d'onde λ_1 et calculer la célérité v_1 des ondes sachant que pour cette expérience 1 la fréquence des vibrations est $N_1 = 8,0$ Hz.
- Une expérience 2 est réalisée à une fréquence différente $N_2 = 17$ Hz.
À l'aide de la photo 2 (page suivante), montrer que la célérité des ondes varie avec leur fréquence.
Comment appelle-t-on ce phénomène ?

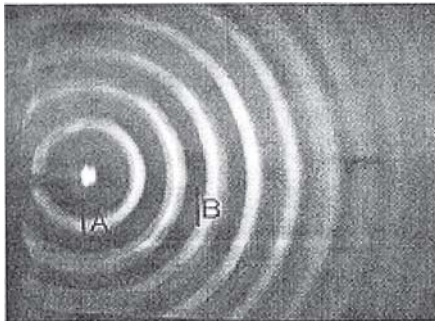


Photo 1

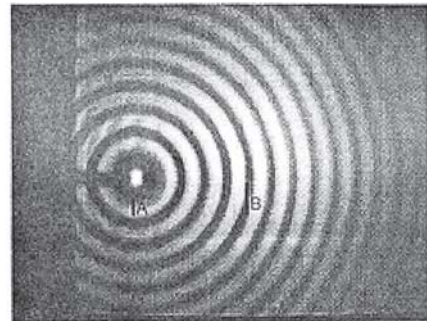


Photo 2

Exercice 7 Acoustique musicale et niveau sonore

Nos oreilles sont fragiles. Une trop grande intensité sonore peut les endommager de façon irréversible. Pour prévenir ce risque, il existe des protections auditives de natures différentes selon leur type d'utilisation.

On peut distinguer, par exemple, deux catégories de bouchons d'oreilles :

– les bouchons en mousse (ou les boules en cire), à usage domestique.

Ce sont largement les plus courants. Ils sont généralement jetables, de faible coût et permettent de s'isoler du bruit. Ils restituent un son sourd et fortement atténué.

– les bouchons moulés en silicone, utilisés par les musiciens.

Ils sont fabriqués sur mesure et nécessitent la prise d'empreinte du conduit auditif. Ils sont lavables à l'eau et se conservent plusieurs années. Ils conservent la qualité du son. Leur prix est relativement élevé.

L'objectif de l'exercice est de comparer le comportement acoustique des bouchons en mousse et des bouchons moulés, lorsque l'auditeur qui les porte écoute le son émis par une flûte à bec.

Le musicien joue la note la_4 . À l'aide d'un système d'acquisition, on enregistre le son émis par la flûte. On obtient l'enregistrement du signal électrique correspondant (figure 1, page suivante).

- ❶ En utilisant la figure 8, on a déterminé la fréquence du son émis : $f = 8,8 \cdot 10^2$ Hz. Expliquer la démarche suivie pour obtenir cette valeur avec la plus grande précision possible.
- ❷ Cette fréquence étant celle du mode fondamental, quelles sont les fréquences des harmoniques de rangs 2 et 3 ?

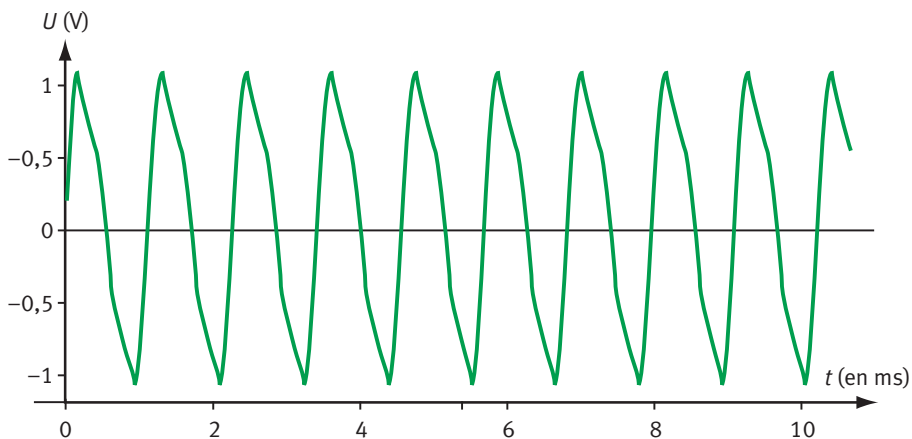


Figure 1

3 Comparaison de la qualité acoustique d'un bouchon en mousse et d'un bouchon moulé en silicone à partir d'un document publicitaire

On s'intéresse ici à la qualité du son perçu par un auditeur muni de protections auditives.

On rappelle que l'intensité sonore de référence égale à $1,0 \times 10^{-12} \text{ W.m}^{-2}$.

Sur un document publicitaire, un fabricant fournit les courbes d'atténuation correspondant aux deux types de bouchons (figure 9). On représente ainsi la diminution du niveau sonore due au bouchon en fonction de la fréquence de l'onde qui le traverse.

On remarquera que plus l'atténuation est grande, plus l'intensité sonore est faible.

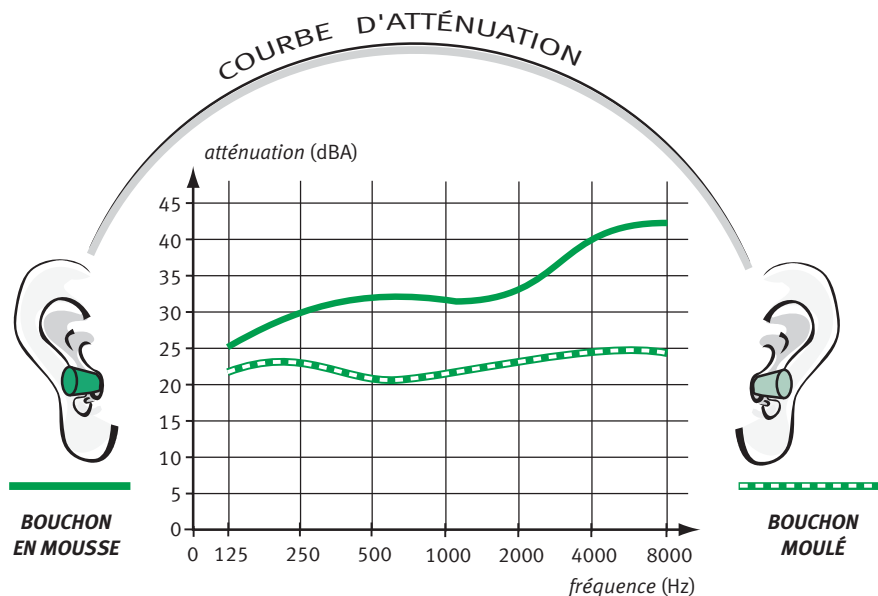


Figure 2

- 3.1. Une pratique musicale régulière d'instruments tels que la batterie ou la guitare électrique nécessite une atténuation du niveau sonore. Cependant, cette atténuation ne doit pas être trop importante afin que le musicien entende suffisamment ; elle ne doit donc pas dépasser 25 dBA.

Indiquer pour chaque bouchon si le critère précédent a été respecté.

- 3.2. En utilisant la courbe d'atténuation (figure 9), indiquer si un bouchon en mousse atténue davantage les sons aigus ou les sons graves.

Commenter la phrase du texte introductif : « Ils (les bouchons en mousse) restituent un son sourd. »

4 Comparaison de la qualité acoustique d'un bouchon en mousse et d'un bouchon moulé en silicone à partir d'une expérience

Un dispositif adapté permet d'enregistrer le son émis par la flûte et ceux restitués par les deux types de bouchons lorsqu'un musicien joue la note la_4 . Les spectres en fréquence de ces sons sont représentés figure 10, figure 11 et figure 12.

- 4.1. En justifiant, indiquer si le port de bouchon en mousse modifie :

- la hauteur du son ?
- le timbre du son ?

Même question pour le bouchon moulé en silicone.

- 4.2. Commenter la phrase du texte introductif : « Ils (les bouchons moulés) conservent la qualité du son. »

- 5 Une exposition prolongée à 85 dBA est nocive pour l'oreille humaine. Durant un concert de rock, un batteur est soumis en moyenne à une intensité sonore $I = 1,0 \cdot 10^{-2} \text{ W.m}^{-2}$.

- 5.1. Calculer le niveau sonore auquel correspond l'intensité sonore I .

- 5.2. Le batteur est porteur de bouchons moulés en silicone correspondant au document publicitaire. En vous aidant de la figure 9, préciser si ses facultés auditives peuvent être altérées au cours du concert.

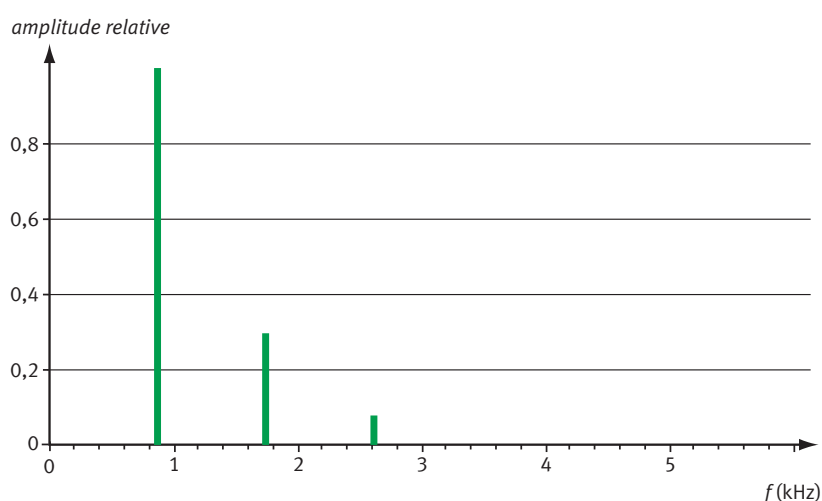


Figure 3 : spectre du la_4 émis par la flûte

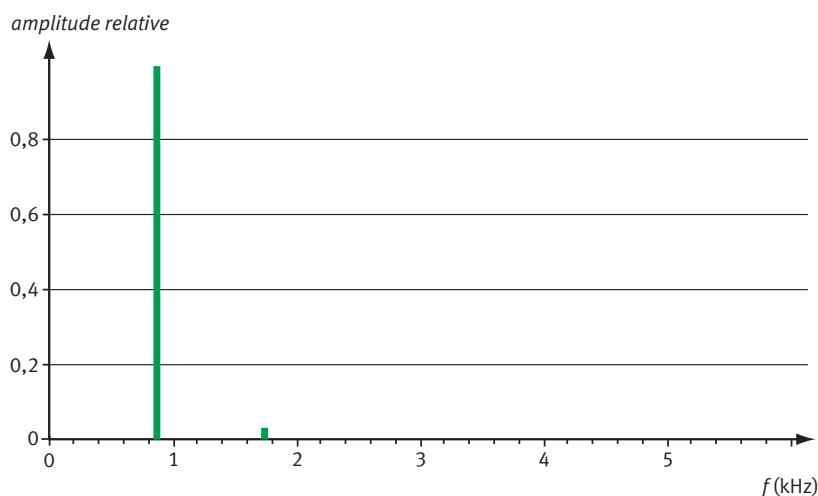


Figure 4 : spectre du la_4 restitué après passage par un bouchon en mousse

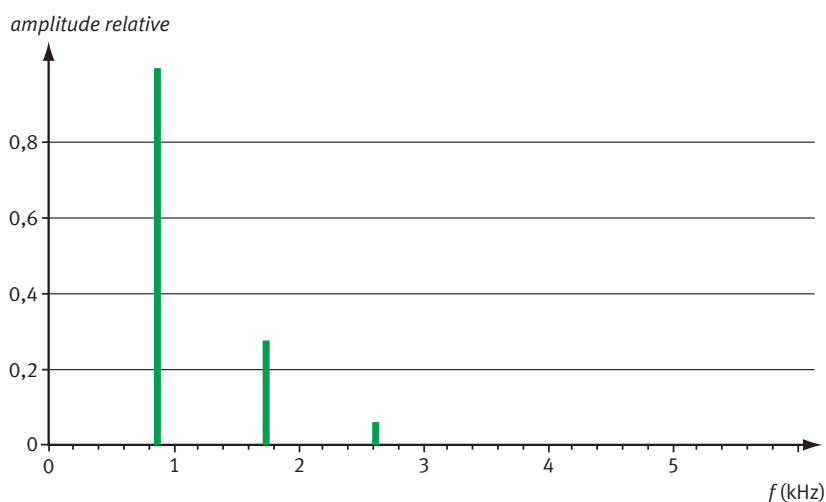


Figure 5 : spectre du la_4 restitué après passage par un bouchon moulé en silicone

Exercice 8 Étude de la lumière utilisée dans un spectrophotomètre

La célérité de la lumière dans le vide est : $c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$.

- 1 Lorsqu'une radiation monochromatique traverse une fente, l'écart angulaire θ du faisceau diffracté qu'il présente avec la direction moyenne de propagation est donné par : $\theta = \frac{\lambda}{a}$.

Que représente λ ? Que représente a ? Quelles sont les unités, dans le système international de θ , λ , et a ?

- 2 Le spectrophotomètre utilise une source de lumière blanche. Cette lumière est envoyée sur un réseau : ensemble de fentes très fines parallèles entre elles et équidistantes qui diffractent la lumière.

Quelle condition sur la largeur d'une fente est nécessaire pour que le phénomène de diffraction soit nettement observable ?

Exercice 9 Laser et fil vertical

Un faisceau de lumière, parallèle monochromatique, de longueur d'onde λ , produit par une source laser, arrive sur un fil vertical, de diamètre a (a est de l'ordre du dixième de millimètre). On place un écran à une distance D de ce fil ; la distance D est grande devant a (cf. figure 1).

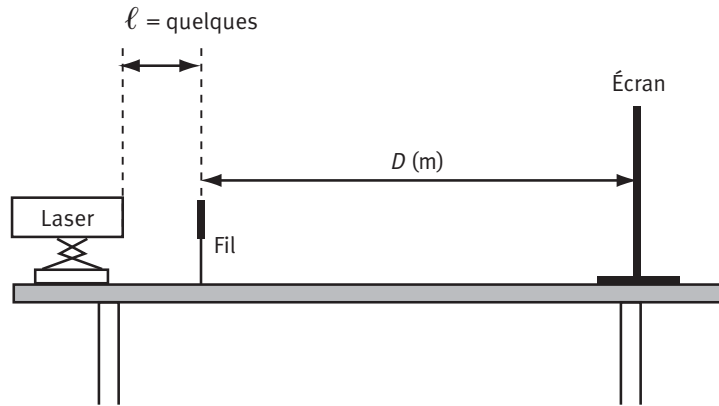


Figure a

- 1 La figure 2 de l'annexe à rendre avec la copie présente l'expérience vue de dessus et la figure observée sur l'écran. Quel enseignement sur la nature de la lumière ce phénomène apporte-t-il ? Nommer ce phénomène.



Figure 2 vue de dessus : le fil est perpendiculaire au plan de la figure

- 2 Reproduire et faire apparaître sur la figure 2 l'écart angulaire ou demi-angle de diffraction θ et la distance D entre l'objet diffractant (en l'occurrence le fil) et l'écran.
- 3 En utilisant la figure 2, exprimer l'écart angulaire θ en fonction des grandeurs L et D sachant que pour de petits angles exprimés en radian : $\tan \theta = \theta$.
- 4 Quelle expression mathématique lie les grandeurs θ , λ et a ? (On supposera que la loi est la même que pour une fente de largeur a .) Préciser les unités respectives de ces grandeurs physiques.
- 5 En utilisant les résultats précédents, montrer que la largeur L de la tache centrale de diffraction s'exprime par :

$$L = 2 \frac{\lambda D}{a} .$$

- 6 On dispose de deux fils calibrés de diamètres respectifs $a_1 = 60 \mu\text{m}$ et $a_2 = 80 \mu\text{m}$.

On place successivement ces deux fils verticaux dans le dispositif présenté par la figure 1. On obtient sur l'écran deux figures de diffraction distinctes notées A et B. Associer, en le justifiant, à chacun des deux fils la figure de diffraction qui lui correspond.

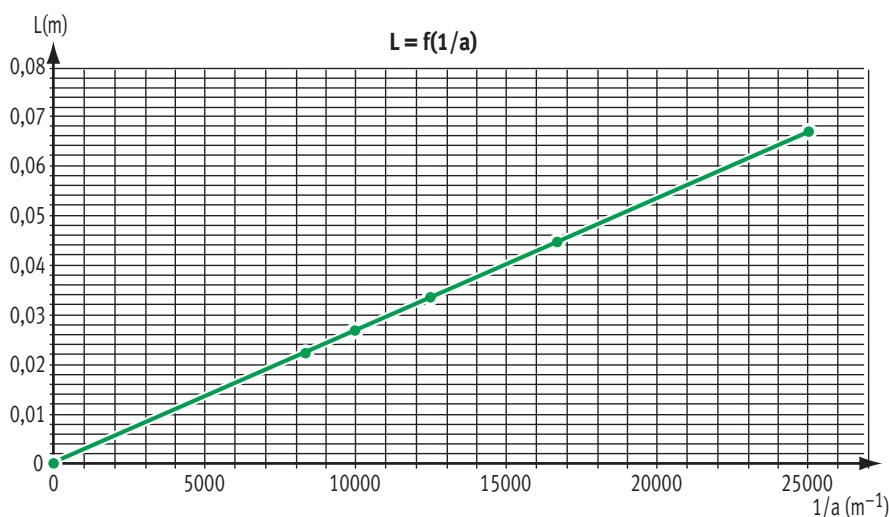


On cherche maintenant à déterminer expérimentalement la longueur d'onde dans le vide λ_0 de la lumière monochromatique émise par la source laser utilisée.

Pour cela, on place devant le faisceau laser des fils calibrés verticaux.

On désigne par « a » le diamètre d'un fil. La figure de diffraction obtenue est observée sur un écran blanc situé à une distance $D = 2,50 \text{ m}$ des fils. Pour chacun des fils, on mesure la largeur L de la tache centrale de diffraction.

On trace la courbe $L = f\left(\frac{1}{a}\right)$.



- 7 La lumière émise par la source laser est dite monochromatique. Quelle est la signification de ce terme ?
- 8 Montrer que l'allure de la courbe $L = f\left(\frac{1}{a}\right)$ obtenue est en accord avec l'expression de L donnée en 5.
- 9 Donner l'équation de la courbe $L = f\left(\frac{1}{a}\right)$ et en déduire la longueur d'onde λ_0 dans le vide de la lumière monochromatique constitutive du faisceau laser utilisé.

10 Calculer la fréquence de la lumière monochromatique émise par la source laser.

11 On éclaire avec cette source laser un verre flint d'indice $n(\lambda) = 1,64$.

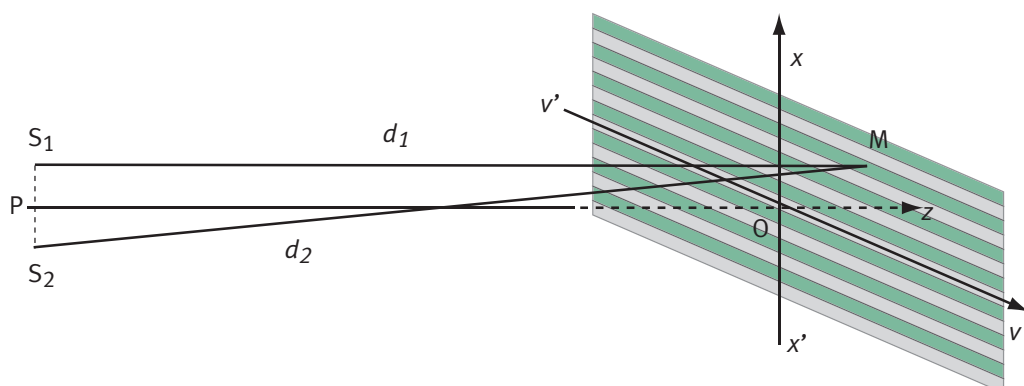
À la traversée de ce milieu transparent dispersif, les valeurs de la fréquence, de la longueur d'onde et la couleur associées à cette radiation varient-elles ?

Donnée Célérité de la lumière dans le vide ou dans l'air $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$.

Exercice 10 Différence de marche entre deux rayons (exercice d'approfondissement)

On s'intéresse à la figure d'interférences produites par des fentes d'Young.

Le plan de la figure ci-dessous est le plan contenant la source S et les sources secondaires S_1 et S_2 .



Les ondes émises par la source S_2 parcourent un trajet plus long pour atteindre le point M que les ondes émises par la source S_1 ; la différence de trajet ($S_2M - S_1M$)

est appelée différence de marche et est notée δ avec $\delta = d_2 - d_1$.

On note : $S_1S_2 = a$, $PO = D$ (ordres de grandeur : a en mm et D en m).

On souhaite montrer que la différence de marche est égale à : $\delta = \frac{ax}{D}$.

1 Dans le repère (Ox, Oy, Oz) , exprimer les coordonnées des points M, S_1 et S_2 .

2 Montrer que les vecteurs s'expriment par : $\overrightarrow{S_1M} \begin{pmatrix} x - \frac{a}{2} \\ y \\ -D \end{pmatrix}$ et $\overrightarrow{S_2M} \begin{pmatrix} x + \frac{a}{2} \\ y \\ -D \end{pmatrix}$

3 En déduire les normes d_1 et d_2 de ces vecteurs.

4 Calculer : $d_2^2 - d_1^2$.

4 Sachant que la distance D (1 m) est très grande par rapport à la distance a (0,5 mm), on pose $d_2 + d_1 \approx 2D$.

En déduire la différence de marche $\delta = d_2 - d_1$.