



COURS PI

☆ *L'école sur-mesure* ☆

de la Maternelle au Bac, Établissement d'enseignement
privé à distance, déclaré auprès du Rectorat de Paris

Terminale - Module 6 - Ondes et signaux

Physique-Chimie

v.5.1



- ✓ **Guide de méthodologie**
pour appréhender notre pédagogie
- ✓ **Leçons détaillées**
pour apprendre les notions en jeu
- ✓ **Exemples et illustrations**
pour comprendre par soi-même
- ✓ **Prolongement numérique**
pour être acteur et aller + loin
- ✓ **Exercices d'application**
pour s'entraîner encore et encore
- ✓ **Corrigés des exercices**
pour vérifier ses acquis

www.cours-pi.com

Paris & Montpellier



EN ROUTE VERS LE BACCALAURÉAT

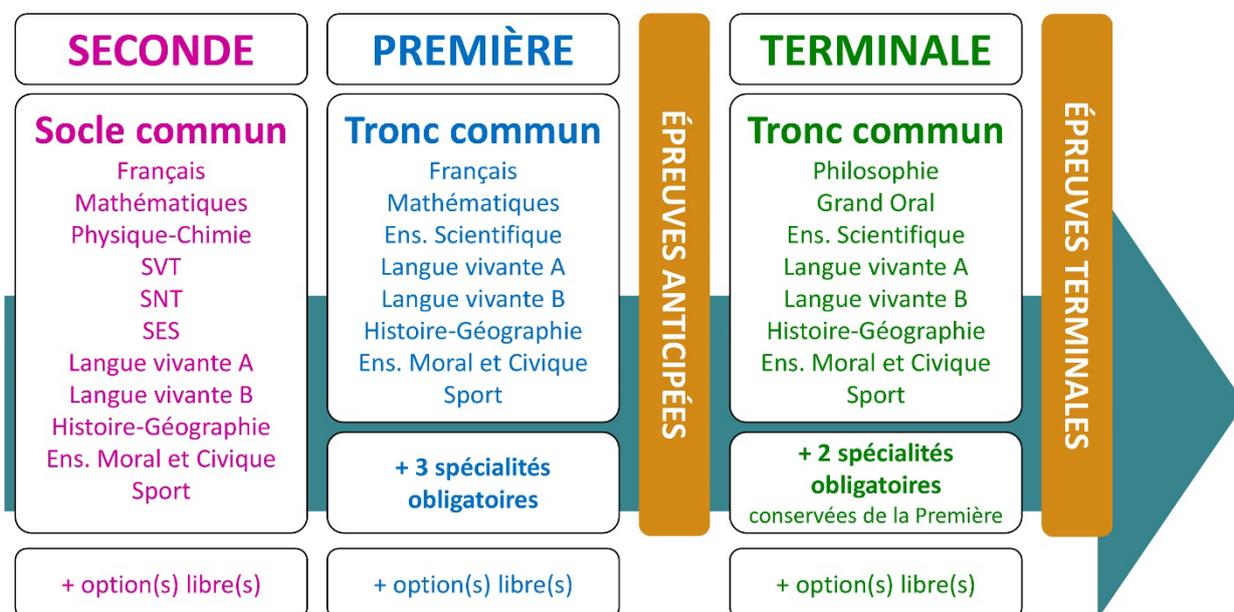
Comme vous le savez, la **réforme du Baccalauréat** est entrée en vigueur progressivement jusqu'à l'année 2021, date de délivrance des premiers diplômes de la nouvelle formule.

Dans le cadre de ce nouveau Baccalauréat, **notre Etablissement**, toujours attentif aux conséquences des réformes pour les élèves, s'est emparé de la question avec force **énergie** et **conviction** pendant plusieurs mois, animé par le souci constant de la réussite de nos lycéens dans leurs apprentissages d'une part, et par la **pérennité** de leur parcours d'autre part. Notre Etablissement a questionné la réforme, mobilisé l'ensemble de son atelier pédagogique, et déployé tout **son savoir-faire** afin de vous proposer un enseignement tourné continuellement vers l'**excellence**, ainsi qu'une scolarité tournée vers la **réussite**.

- Les **Cours Pi** s'engagent pour faire du parcours de chacun de ses élèves un **tremplin vers l'avenir**.
- Les **Cours Pi** s'engagent pour ne pas faire de ce nouveau Bac un diplôme au rabais.
- Les **Cours Pi** vous offrent **écoute** et **conseil** pour coconstruire une **scolarité sur-mesure**.

LE BAC DANS LES GRANDES LIGNES

Ce nouveau Lycée, c'est un enseignement à la carte organisé à partir d'un large tronc commun en classe de Seconde et évoluant vers un parcours des plus spécialisés année après année.



CE QUI A CHANGÉ

- Il n'y a plus de séries à proprement parler.
- Les élèves choisissent des spécialités : trois disciplines en classe de Première ; puis n'en conservent que deux en Terminale.
- Une nouvelle épreuve en fin de Terminale : le Grand Oral.
- Pour les lycéens en présentiel l'examen est un mix de contrôle continu et d'examen final laissant envisager un diplôme à plusieurs vitesses.
- Pour nos élèves, qui passeront les épreuves sur table, le Baccalauréat conserve sa valeur.

CE QUI N'A PAS CHANGÉ

- Le Bac reste un examen accessible aux candidats libres avec examen final.
- Le système actuel de mentions est maintenu.
- Les épreuves anticipées de français, écrit et oral, tout comme celle de spécialité abandonnée se dérouleront comme aujourd'hui en fin de Première.



A l'occasion de la réforme du Lycée, nos manuels ont été retravaillés dans notre atelier pédagogique pour un accompagnement optimal à la compréhension. Sur la base des programmes officiels, nous avons choisi de créer de nombreuses rubriques :

- **Suggestions de lecture** pour s'ouvrir à la découverte de livres de choix sur la matière ou le sujet
- **Réfléchissons ensemble** pour guider l'élève dans la réflexion
- **L'essentiel et le temps du bilan** pour souligner les points de cours à mémoriser au cours de l'année
- **À vous de jouer** pour mettre en pratique le raisonnement vu dans le cours et s'accaparer les ressorts de l'analyse, de la logique, de l'argumentation, et de la justification
- **Pour aller plus loin** pour visionner des sites ou des documentaires ludiques de qualité
- Et enfin ... la rubrique **Les Clés du Bac by Cours Pi** qui vise à vous donner, et ce dès la seconde, toutes les cartes pour réussir votre examen : notions essentielles, méthodologie pas à pas, exercices types et fiches étape de résolution !

PHYSIQUE-CHIMIE TERMINALE

Module 6 – Ondes et signaux

L'AUTEUR



Eric BLANQUIER

Docteur en physique nucléaire théorique, expert de l'enseignement des sciences-physiques, monsieur Blanquier privilégie l'accompagnement de l'élève à la compréhension des notions en parallèle de leurs usages dans le monde contemporain de l'ingénierie.

PRÉSENTATION

Ce **cours** est divisé en chapitres, chacun comprenant :

- Le **cours**, conforme aux programmes de l'Education Nationale
- Des **exercices d'application et d'entraînement**
- Les **corrigés** de ces exercices
- Des **devoirs** soumis à correction (et **se trouvant hors manuel**). Votre professeur vous renverra le corrigé-type de chaque devoir après correction de ce dernier.

Pour une manipulation plus facile, les corrigés-types des exercices d'application et d'entraînement sont regroupés en fin de manuel.

CONSEILS A L'ÉLÈVE

Vous disposez d'un support de Cours complet : **prenez le temps** de bien le lire, de le comprendre mais surtout de l'**assimiler**. Vous disposez pour cela d'exemples donnés dans le cours et d'exercices types corrigés. Vous pouvez rester un peu plus longtemps sur une unité mais travaillez régulièrement.

LES FOURNITURES

Vous devez posséder :

- une **calculatrice graphique pour l'enseignement scientifique au Lycée comportant un mode examen (requis pour l'épreuve du baccalauréat)**.
- un **tableur** comme Excel de Microsoft (payant) ou Calc d'Open Office (gratuit et à télécharger sur <http://fr.openoffice.org/>). En effet, certains exercices seront faits de préférence en utilisant un de ces logiciels, mais vous pourrez également utiliser la calculatrice).

LES DEVOIRS

Les devoirs constituent le moyen d'évaluer l'acquisition de **vos savoirs** (« Ai-je assimilé les notions correspondantes ? ») et de **vos savoir-faire** (« Est-ce que je sais expliquer, justifier, conclure ? »).

Placés à des endroits clés des apprentissages, ils permettent la vérification de la bonne assimilation des enseignements.

Aux *Cours Pi*, vous serez accompagnés par un **professeur selon chaque matière** tout au long de votre année d'étude. Référez-vous à votre « Carnet de Route » pour l'identifier et découvrir son parcours.

Avant de vous lancer dans un devoir, assurez-vous d'avoir **bien compris les consignes**.

Si vous repérez des difficultés lors de sa réalisation, n'hésitez pas à le mettre de côté et à revenir sur les leçons posant problème. **Le devoir n'est pas un examen**, il a pour objectif de s'assurer que, même quelques jours ou semaines après son étude, une notion est toujours comprise.

Aux Cours Pi, chaque élève travaille à son rythme, parce que chaque élève est différent et que ce mode d'enseignement permet le « sur-mesure ».

Nous vous engageons à respecter le moment indiqué pour faire les devoirs. Vous les identifierez par le bandeau suivant :



Vous pouvez maintenant
faire et envoyer le **devoir n°1**



Il est **important de tenir compte des remarques, appréciations et conseils du professeur-correcteur**. Pour cela, il est **très important d'envoyer les devoirs au fur et à mesure** et non groupés. **C'est ainsi que vous progresserez !**

Donc, dès qu'un devoir est rédigé, envoyez-le aux *Cours Pi* par le biais que vous avez choisi :

- 1) Par **soumission en ligne** via votre espace personnel sur **PoulPi**, pour un envoi **gratuit, sécurisé** et plus **rapide**.
- 2) Par **voie postale** à *Cours Pi*, 9 rue Rebuffy, 34 000 Montpellier
*Vous prendrez alors soin de joindre une **grande enveloppe libellée à vos nom et adresse**, et **affranchie au tarif en vigueur** pour qu'il vous soit retourné par votre professeur*

N.B. : quel que soit le mode d'envoi choisi, vous veillerez à **toujours joindre l'énoncé du devoir** ; plusieurs énoncés étant disponibles pour le même devoir.

N.B. : si vous avez opté pour un envoi par voie postale et que vous avez à disposition un scanner, nous vous engageons à conserver une copie numérique du devoir envoyé. Les pertes de courrier par la Poste française sont très rares, mais sont toujours source de grand mécontentement pour l'élève voulant constater les fruits de son travail.

VOTRE RESPONSABLE PÉDAGOGIQUE

Professeur des écoles, professeur de français, professeur de maths, professeur de langues : notre Direction Pédagogique est constituée de spécialistes capables de dissiper toute incompréhension.

Au-delà de cet accompagnement ponctuel, notre Etablissement a positionné ses Responsables pédagogiques comme des « super profs » capables de co-construire avec vous une scolarité sur-mesure. En somme, le Responsable pédagogique est votre premier point de contact identifié, à même de vous guider et de répondre à vos différents questionnements.

Votre Responsable pédagogique est la personne en charge du suivi de la scolarité des élèves. Il est tout naturellement votre premier référent : une question, un doute, une incompréhension ? Votre Responsable pédagogique est là pour vous écouter et vous orienter. Autant que nécessaire et sans aucun surcoût.

QUAND
PUIS-JE
LE
JOINDRE ?

Du **lundi** au **vendredi** : horaires disponibles sur votre carnet de route et sur PoulPi.

QUEL
EST
SON
RÔLE ?

Orienter les parents et les élèves.

Proposer la mise en place d'un accompagnement individualisé de l'élève.

Faire évoluer les outils pédagogiques.

Encadrer et **coordonner** les différents professeurs.

VOS PROFESSEURS CORRECTEURS

Notre Etablissement a choisi de s'entourer de professeurs diplômés et expérimentés, parce qu'eux seuls ont une parfaite connaissance de ce qu'est un élève et parce qu'eux seuls maîtrisent les attendus de leur discipline. En lien direct avec votre Responsable pédagogique, ils prendront en compte les spécificités de l'élève dans leur correction. Volontairement bienveillants, leur correction sera néanmoins juste, pour mieux progresser.

QUAND
PUIS-JE
LE
JOINDRE ?

Une question sur sa correction ?

- faites un mail ou téléphonez à votre correcteur et demandez-lui d'être recontacté en lui laissant **un message avec votre nom, celui de votre enfant et votre numéro.**
- autrement pour une réponse en temps réel, appelez votre Responsable pédagogique.

LE BUREAU DE LA SCOLARITÉ

Placé sous la direction d'Elena COZZANI, le Bureau de la Scolarité vous orientera et vous guidera dans vos démarches administratives. En connaissance parfaite du fonctionnement de l'Etablissement, ces référents administratifs sauront solutionner vos problématiques et, au besoin, vous rediriger vers le bon interlocuteur.

QUAND
PUIS-JE
LE
JOINDRE ?

Du **lundi** au **vendredi** : horaires disponibles sur votre carnet de route et sur PoulPi.

04.67.34.03.00

scolarite@cours-pi.com



LE SOMMAIRE

Physique-Chimie - Module 6 - Ondes et signaux

RAPPELS D'OPTIQUE 1

CHAPITRE 1. Onde sonore 5

Q COMPÉTENCES VISÉES

- Comprendre ce qu'est une intensité acoustique et comment elle varie avec la distance.
- Maîtriser la relation entre l'intensité acoustique et le niveau d'intensité sonore.
- Connaître les propriétés d'un niveau d'intensité sonore.
- Exploiter l'expression donnant le niveau d'intensité sonore d'un signal.

Première approche	6
1. Généralités et rappels sur les ondes	7
2. Intensité sonore	7
3. Niveau d'intensité sonore	9
4. Atténuation (en dB)	13
Le temps du bilan	15
Exercices	16

CHAPITRE 2. Diffractions, interférences et effet doppler 23

Q COMPÉTENCES VISÉES

- Caractériser le phénomène de diffraction dans des situations variées et en citer des conséquences concrètes.
- Exploiter la relation exprimant l'angle caractéristique de diffraction en fonction de la longueur d'onde et de la taille de l'ouverture.
- Caractériser le phénomène d'interférences de deux ondes et en citer des conséquences concrètes.
- Etablir les conditions d'interférences constructives et destructives de deux ondes issues de deux sources ponctuelles en phase dans le cas d'un milieu de propagation homogène.
- Prévoir les lieux d'interférences constructives et les lieux d'interférences destructives dans le cas des trous d'Young, l'expression linéarisée de la différence de chemin optique étant donnée. Etablir l'expression de l'interfrange.
- Décrire et interpréter qualitativement les observations correspondant à une manifestation de l'effet Doppler.
- Etablir l'expression du décalage Doppler dans le cas d'un observateur fixe, d'un émetteur mobile et dans une configuration à une dimension.
- Exploiter l'expression du décalage Doppler dans des situations variées utilisant des ondes acoustiques ou des ondes électromagnétiques.

Première approche	24
1. La diffraction	29
2. Interférences	30
3. Effet Doppler	34
Le temps du bilan	38
Exercices	41
Les Clés du Bac : les ondes	50

CHAPITRE 3. La lunette astronomique 55

Q COMPÉTENCES VISÉES

- Représenter le schéma d'une lunette afocale modélisée par deux lentilles minces convergentes.
- Représenter le faisceau émergent issu d'un point objet situé « à l'infini » et traversant une lunette afocale.
- Etablir l'expression du grossissement d'une lunette afocale.
- Exploiter les données caractéristiques d'une lunette commerciale.

Première approche	56
1. Modèle optique d'une lunette astronomique	60
2. Grossissement	61
Le temps du bilan	64
Exercices	65

CHAPITRE 4. La lumière un flux de photons 73

Q COMPÉTENCES VISÉES

- Décrire l'effet photoélectrique, ses caractéristiques et son importance historique.
- Interpréter qualitativement l'effet photoélectrique à l'aide du modèle particulaire de la lumière.
- Etablir, par un bilan d'énergie, la relation entre l'énergie cinétique des électrons et la fréquence.
- Exploiter qualitativement le fonctionnement d'une cellule photoélectrique.
- Citer quelques applications mettant en jeu l'interaction photon-matière (capteurs de lumière, cellules photovoltaïques, diodes électroluminescentes, spectroscopies UV-visible et IR, etc.).

Première approche	74
1. Explication de l'effet photoélectrique	77
2. L'effet photoélectrique	77
3. Travail d'extraction	80
4. Absorption et émission de photons	84
Le temps du bilan	83
Exercices	84

CHAPITRE 5. Le modèle du circuit RC série 95

Q COMPÉTENCES VISÉES

- Relier l'intensité d'un courant électrique au débit de charges.
- Identifier des situations variées où il y a accumulation de charges de signes opposés sur des surfaces en regard.
- Citer des ordres de grandeur de valeurs de capacités usuelles.
- Etablir et résoudre l'équation différentielle vérifiée par la tension aux bornes d'un condensateur.
- Expliquer le principe de fonctionnement de quelques capteurs capacitifs.

Première approche	96
1. Intensité d'un courant électrique en régime variable	99
2. Le condensateur	99
3. Charge et décharge	101
4. Capteurs capacitifs	106
Le temps du bilan	107
Exercices	108
Les Clés du Bac : étude d'un circuit RS	118

CORRIGÉS à vous de jouer et exercices 123



SUGGESTIONS CULTURELLES

ESSAIS

- **Une histoire de la physique et de la chimie** *Jean Rosmorduc*
- **Des chimistes de A à Z** *Eric Brown*
- **Une histoire de tout, ou presque...** *Bill Bryson*
- **Les forces de la nature** *Paul Davies*
- **La structure des révolutions scientifiques** *Thomas Khun*

PHILOSOPHIE DES SCIENCES

- **La nature des choses** *Lucreèce*
- **Penseurs grecs avant Socrate** *Jean Voilquin*
- **Discours de la méthode** *René Descartes*
- **Préface pour un traité du vide** *Blaise Pascal*
- **La science et l'hypothèse** *Henri Poincaré*
- **La valeur de la science** *Henri Poincaré*
- **Comment je vois le monde** *Albert Einstein*
- **Le nouvel esprit scientifique** *Gaston Bachelard*
- **La nature dans la physique contemporaine** *Werner Heisenberg*
- **Le Nouvel esprit scientifique** *Gaston Bachelard*

BANDES-DESSINÉES

- **La physique en BD** *Larry Gonick*
- **La chimie en BD** *Larry Gonick*

DOCUMENTAIRES AUDIOVISUELS

- **Les secrets de la matière (3 épisodes)** *Jim Al-Khalili*
- **L'histoire de l'électricité (3 épisodes)** *Jim Al-Khalili*

PODCASTS

- **Les podcasts du CEA** www.cea.fr
- **La méthode scientifique** *France Culture*

CHAÎNES YOUTUBE

- **E-penser**
- **Dr Nozman**
- **Le blob, l'extra-média**
- **ScienceEtonnante**
- **ScienceClic**



INTRODUCTION

Les ondes sont omniprésentes dans la vie de tous les jours. On peut penser par exemple à la lumière, aux vagues, aux ondes sonores, une ola dans un stade de football, les ondes électromagnétiques, les ondes sismiques, ... Il existe ainsi une grande variété d'ondes différentes. La définition que l'on pourrait donner est qu'une onde désigne le phénomène de propagation d'une perturbation, sans transport de matière, mais avec transport d'énergie. Ainsi, la matière n'est pas emportée par une onde, mais localement affectée. D'autre part, il y a bel et bien un transport d'énergie. C'est par exemple l'énergie du Soleil qui nous parvient sur Terre. C'est également l'énergie destructrice d'une onde sismique. C'est également le fait qu'un bruit puisse nous incommoder, etc.

D'autre part, l'énergie véhiculée par une onde n'est pas forcément néfaste. Elle peut également véhiculer de l'information, ce qui présente bien évidemment de nombreuses applications : communication orale, téléphonie, optique, etc. L'onde est ainsi potentiellement porteuse d'un signal d'un émetteur vers un récepteur.

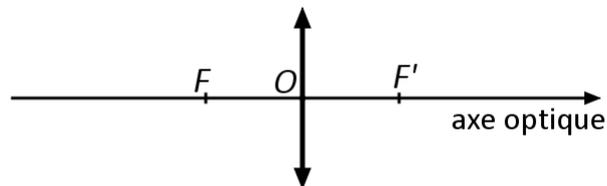
Dans le cadre de ce module, nous proposons d'étudier les différents aspects liés aux ondes. Ainsi, dans un premier temps, nous étudierons les ondes sonores, en mettant l'accent sur l'aspect énergétique avec le décibel. Ensuite, nous étudierons les propriétés des ondes (diffraction, interférences, effet Doppler). Après, nous nous intéresserons à l'optique, via l'étude de la lunette astronomique. Si une bonne partie de ce module décrit la lumière comme une onde, il sera ensuite vu qu'elle peut aussi être décrite comme un faisceau de particules pour expliquer certains phénomènes. Nous concluons par l'étude du circuit RC série. Ceux qui continueront à étudier la physique dans le supérieur verront que ce circuit est le premier d'une série de circuits plus complexes, et présentent quelques applications, et notamment de produire des signaux (circuit RLC).



RAPPELS D'OPTIQUE : les lentilles minces convergentes

Vergence d'une lentille

Pour rappel, une lentille mince comporte en son centre un point nommé centre optique O , et selon son axe optique, deux foyers : le foyer objet F et le foyer image F' . Le centre optique O est au milieu du segment $[FF']$.



La vergence C (en dioptrie δ ou en m^{-1}) d'une lentille est définie par :

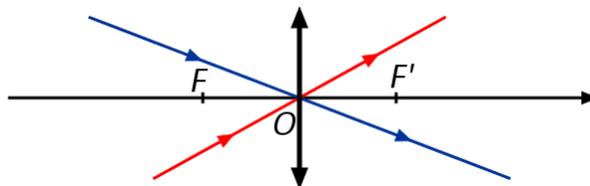
$$C = \frac{1}{\overline{OF'}}$$

Pour rappel, une longueur surmontée d'une barre désigne une longueur algébrique. Autrement dit, $\overline{OF'}$ est positive si F' est « à droite » (ou « au dessus ») de O , et négative dans le cas contraire.

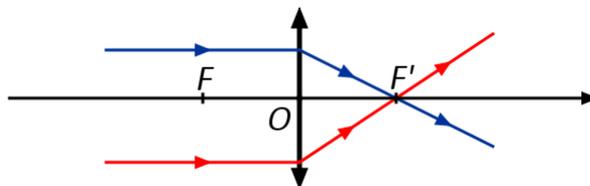
Dans le cas des lentilles convergentes, $\overline{OF'} > 0$, donc la vergence C est positive pour des lentilles convergentes. Elle est négative pour des lentilles divergentes, mais nous n'en parlerons pas en détail dans ce cours.

Tracé de rayons

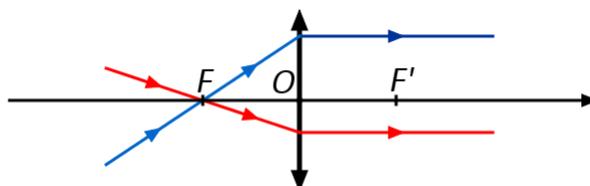
Pour tracer les rayons lumineux passant à travers une lentille mince convergente, on pourra se rappeler des règles suivantes :



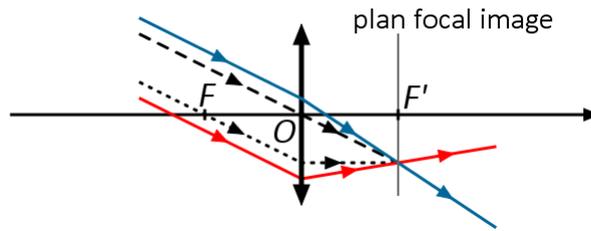
- Les rayons lumineux ne sont pas déviés en passant par le centre optique O .



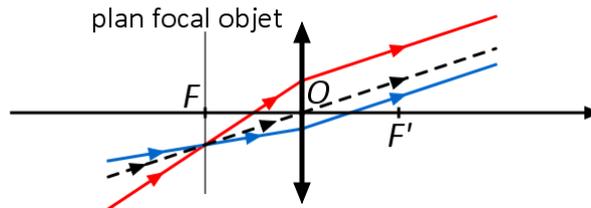
- Si des rayons lumineux arrivent parallèles à l'axe optiques, alors, en sortie de lentille, ils focaliseront au niveau du foyer image F' .



- Si des rayons lumineux passent par le foyer objet F , alors, en sortie de lentille, ils ressortiront parallèles à l'axe optique.



- Si des rayons arrivent parallèles entre eux mais pas à l'axe optique, alors en sortie de lentille ils focaliseront au niveau du plan focal image.



- Si des rayons passent en un même point du plan focal objet, alors ils ressortiront parallèles entre eux en sortie de la lentille.

Formule de conjugaison, grandissement γ

Pour une lentille mince, la formule de conjugaison établit un lien entre la distance focale de la lentille, la position d'un point objet A et de son image A' :

$$\frac{1}{OF'} = \frac{1}{OA'} - \frac{1}{OA}$$

On définit le grandissement γ comme le rapport de la longueur de l'image $A'B'$ par la longueur de l'objet AB . On écrit alors :

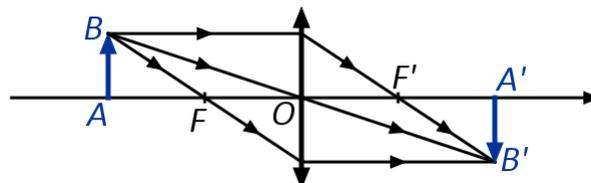
$$\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}$$

La deuxième égalité est obtenue via le théorème de Thalès, voir le premier schéma ci-dessous.

Images réelles et virtuelles

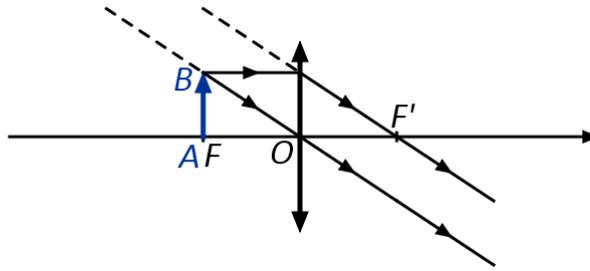
Selon la position de l'objet AB par rapport au foyer objet F , on peut avoir une de trois configurations suivantes :

- AB est situé avant F :



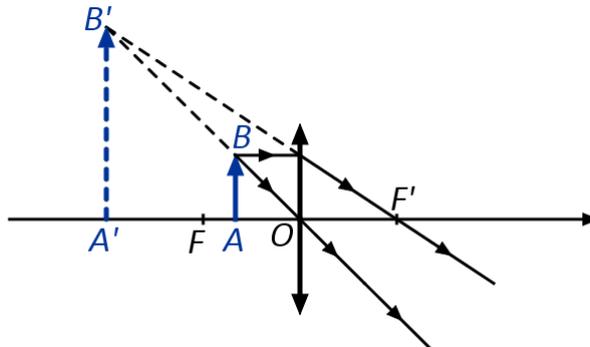
L'image se forme « à droite » de la lentille. C'est une image réelle. Autrement dit, on peut la recueillir sur un écran (un peu à la manière d'un appareil photo). Le grandissement est négatif, car on a alors une image $A'B'$ renversée.

- A est situé en F :



Les rayons issus de tout point de l'objet, dont B , ressortent parallèles entre eux en sortie de la lentille. En conséquence, on aura une image réelle à l'infini sur la partie droite du montage, et une image virtuelle à l'infini sur la partie gauche. On rappelle qu'une image virtuelle est ce que l'on voit si l'on regarde à travers l'instrument d'optique, si l'on se place sur la partie droite du montage et que l'on observe vers la gauche.

- A est situé entre F et O :



En sortant de la lentille, les rayons issus de B divergent. Ainsi, si un observateur placé sur la droite regarde vers la gauche à travers la lentille, il verra l'image virtuelle non renversée $A'B'$. On aura ainsi un grandissement positif.



Les ondes sonores sont des ondes mécaniques, c'est-à-dire qu'elles ont besoin d'un milieu matériel pour se propager. Elles peuvent ainsi évoluer dans les solides, liquides, gaz. Evidemment, dans la vie de tous les jours, c'est plutôt la propagation des sons dans l'air que l'on expérimente le plus. Ladite propagation résulte de la compression-dilatation des couches d'air sous l'effet du son. En d'autres termes, l'onde sonore induit une légère variation de pression. Comme toute onde, cela s'accompagne ainsi logiquement d'un transport d'énergie.

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser tout particulièrement à cette énergie véhiculée par l'onde sonore. En conséquence, après quelques rappels qui serviront d'ailleurs pour les autres chapitres, nous allons voir ce qu'est une intensité acoustique. Ensuite, nous verrons l'utilité d'utiliser le niveau d'intensité sonore. Nous aborderons alors les propriétés d'un niveau d'intensité sonore, qui ne sont pas les mêmes que pour les grandeurs physiques ordinaires.

Q COMPÉTENCES VISÉES

- Comprendre ce qu'est une intensité acoustique et comment elle varie avec la distance.
- Maîtriser la relation entre l'intensité acoustique et le niveau d'intensité sonore.
- Connaître les propriétés d'un niveau d'intensité sonore.
- Exploiter l'expression donnant le niveau d'intensité sonore d'un signal.

Q PRÉ-REQUIS

- Concernant les aspects physiques, il peut être utile de savoir ce qu'est une onde.
- Concernant les aspects mathématiques, les notions requises seront précisées, mais il est conseillé d'être à l'aise avec les logarithmes.



Première approche

Pour commencer, télécharger les différentes ressources utiles au manuel ici : www.cours-pi.com/ressources

Pour cet exercice on dispose d'abord de deux enregistrements sonores :

1 son_2_niveaux.wav

2 son_2_niveaux.wav

Pour les deux, on a un son pur de 1000 Hz. Au début de l'enregistrement, le son a une intensité faible, puis le son est joué plus fort. Pour le premier enregistrement, l'intensité acoustique est multipliée par 4. Pour le second, elle est multipliée par 100.

1. Ecoutez les deux enregistrements. Quels commentaires peut-on faire ?

Utilisons à présent le nouvel enregistrement suivant :

3 son_escalier.wav

2. Ecoutez l'enregistrement, puis commenter.

En réalité, si l'intensité sonore vaut une certaine valeur en début de l'enregistrement, à chaque transition, ladite intensité est doublée.

3. En prenant en compte cette donnée, commentez à nouveau cet enregistrement.

CORRECTION

1. Pour les deux enregistrements, on entend plutôt bien le changement d'intensité sonore. Il est vrai que le changement est plus audible pour le second. Par contre, on peut s'étonner au premier abord des chiffres mentionnés par l'énoncé. Ainsi, pour le premier enregistrement, on **perçoit** que l'intensité augmente légèrement, mais on n'aurait pas dit que c'était d'un facteur 4. Pour le second, la remarque est d'autant plus vraie : on ne **perçoit** pas que l'intensité a été multipliée par 100. Ainsi, on constate qu'**il y a un écart entre ce que l'on perçoit et la variation réelle de l'intensité sonore**.
2. A l'écoute de cet enregistrement, l'intensité **perçue** semble augmenter de manière régulière, un peu comme des marches d'un escalier. On a donc l'impression que l'intensité sonore est augmentée d'une quantité constante à chaque transition.
3. En fait, contrairement à ce que l'on perçoit à l'écoute de l'enregistrement, l'intensité n'est pas augmentée d'une quantité constante, mais multipliée par une quantité constante. Pour relier cette observation avec les mathématiques, l'évolution de l'intensité perçue semble évoluer selon une suite arithmétique, alors qu'en réalité l'évolution est selon une progression de suite géométrique. En conclusion de cette question, et de l'exercice entier, on ne peut que constater **l'écart entre ce que l'on perçoit et comment l'intensité acoustique varie en réalité**, en accord avec la conclusion de la question 1.



ONDE SONORE

Généralités et rappels sur les ondes

Une onde se propage dans toutes les directions qui s'offrent à elle. Elle peut être 1D (onde le long d'une corde), 2D (vagues à la surface de l'eau) ou 3D (son, lumière). Si l'onde induit une déformation dans la même direction que celle de propagation de l'onde, elle est dite longitudinale, comme l'onde sonore dans l'air. Par contre, si la déformation s'effectue perpendiculairement à la direction de propagation (vague), elle est dite transversale.

Une onde se propage avec une vitesse c (en m/s) que l'on appelle également célérité. En un temps τ (en s), l'onde parcourt une distance d (en m), selon la relation $c = \frac{d}{\tau}$.

On dit que l'onde est périodique si la déformation l'est aussi. Les ondes périodiques les plus courantes sont les ondes sinusoïdales. En une position donnée, la période T (en s) est la durée minimale non nulle séparant deux états vibratoires identiques. C'est la durée d'une oscillation complète. Son inverse est la fréquence f (en Hz) : $f = \frac{1}{T}$. La distance parcourue par l'onde en une période T est sa longueur d'onde λ (en m). Ainsi, $c = \frac{\lambda}{T}$. On peut aussi dire que pour un instant donné, c'est la distance minimale non nulle entre deux états vibratoires identiques.

Un front d'onde désigne l'ensemble des points du milieu de propagation ayant le même état vibratoire, et ayant le même temps de parcours depuis la source de l'onde.



ONDE SONORE

Intensité sonore

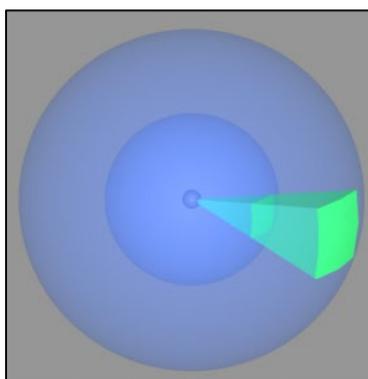
Définition

L'onde sonore se propage dans l'air, via des variations locales de la pression. Cette variation de pression s'exerce sur les obstacles qu'elle rencontre. Cela concerne notamment le tympan de l'oreille, ce qui peut nous permettre d'entendre l'onde sonore.

Pour rendre compte de l'énergie véhiculée par l'onde sonore, il est courant de faire appel à l'intensité sonore I , aussi appelée intensité acoustique. Plus précisément, l'intensité sonore correspond à l'énergie transmise par l'onde par unité de temps et par unité de surface. Une énergie par unité de temps est une puissance. Une puissance par une unité de surface est ainsi une puissance surfacique. En conséquence, **l'intensité sonore I s'exprime en W/m^2** . Notons que le terme d'intensité acoustique n'a aucun rapport à l'intensité électrique.

Propagation de l'onde sonore

Dans l'air, l'onde sonore se propage dans toutes les directions qui s'offrent à elle, c'est-à-dire en l'absence d'obstacle dans un espace tridimensionnel. Cela implique que les fronts d'onde sont des sphères concentriques (centrées sur la source émettrice), dont le rayon augmente au cours du temps. Dans l'air, l'énergie véhiculée par l'onde sonore n'est pas absorbée/dissipée par le milieu de propagation. En conséquence, lors de sa propagation, sa puissance se conserve au cours du temps. Par contre, puisque la surface du front d'onde, c'est-à-dire de la sphère, croît au cours du temps, ladite puissance est diluée sur une surface de plus en plus grande. En d'autres termes, l'intensité sonore I va diminuer au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la source émettrice du son. Cette observation est facilement vérifiable dans la pratique : plus l'on s'éloigne de la source, moins l'on entendra le son émis.



On note P la puissance (en W) émise par la source. La surface S (en m^2) d'une sphère de rayon R (en m) est donnée par $S = 4\pi R^2$. De par la définition de l'intensité sonore, on propose la relation :

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



RÉFLÉCHISSONS ENSEMBLE

Par combien l'intensité sonore est-elle divisée quand on double la distance nous séparant de la source émettrice ?

.....

.....

.....

.....

.....

Solution :

Soit $I_1 = \frac{P}{4\pi R^2}$ l'intensité sonore initiale. Si l'on double la distance, alors on remplace R par $2R$ dans la formule, ce qui nous fait l'intensité sonore $I_2 = \frac{P}{4\pi(2R)^2} = \frac{P}{4 \times 4\pi R^2} = \frac{1}{4} \frac{P}{4\pi R^2} = \frac{1}{4} I_1$.

En conséquence, **l'intensité sonore a été divisée par 4.**



ONDE SONORE

Niveau d'intensité sonore

Intensité sonore de référence

Une onde sonore est audible par une oreille humaine jeune et en bonne santé si sa fréquence est comprise entre 20 Hz et 20 kHz. La sensibilité de l'oreille est maximale entre 1000 Hz et 2000 Hz ; dans cette gamme, l'oreille est théoriquement capable d'entendre un son dont l'intensité sonore serait de $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$. Cette valeur est le seuil d'audibilité, autrement appelé **intensité sonore de référence**.

Loi de Weber-Fechner (non exigible)

A l'opposé, l'oreille peut capter des sons dont les intensités sonores sont supérieures à quelques W/m^2 . Lesdits sons sont alors douloureux. En fait, l'oreille peut ainsi percevoir des ondes sonores dont les intensités sonores sont très différentes. Par contre, cette perception n'est pas linéaire : si l'on double l'intensité d'une source, on ne percevra pas le son deux fois plus fort. Plus précisément, la loi de Weber-Fechner explique que la « sensation varie comme le logarithme de l'excitation », ce que l'on réécrirait dans le cas des ondes sonores comme « **la sensation sonore perçue est proportionnelle au logarithme de l'intensité sonore** ».

Définition du niveau sonore

Cela amène à la conclusion que l'intensité sonore traduit certes une réalité physique, mais n'est pas adapté pour décrire un son, notamment à un non-scientifique. On introduit alors le niveau d'intensité sonore L , définit comme :

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

L s'exprime en décibel (dB). I est l'intensité sonore, en W/m^2 , et $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ l'intensité sonore de référence définie plus haut. A partir de L , il est possible d'accéder à I par la relation inverse :

$$I = I_0 10^{L/10}$$



RÉFLÉCHISSONS ENSEMBLE

1. Calculez le niveau sonore L d'un son d'intensité acoustique $I = 10^{-5} \text{ W/m}^2$.
2. Calculez l'intensité sonore I d'un son de niveau sonore $L = 40 \text{ dB}$.

On prendra $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$.

Solution :

1. On écrit $L = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right)$, soit $L \approx 10 \log \left(\frac{10^{-5}}{10^{-12}} \right) \approx 70$ dB.
2. Avec la relation $I = I_0 10^{L/10}$, on fait $I \approx 10^{-12} \times 10^{40/10} \approx 10^{-8}$ W/m².



L'ESSENTIEL

Notions mathématiques

La fonction log est la fonction logarithme décimal, à ne pas confondre avec le logarithme népérien vu en mathématiques et par exemple dans le cours de physique nucléaire. Voici quelques-unes de ses propriétés, utilisées plus tard dans ce chapitre :

Pour tout x réel, $\log(10^x) = x$

Pour tout x strictement positif, $10^{\log(x)} = x$

Pour tout x strictement positif, $\log(x) = y \Leftrightarrow x = 10^y$

Pour tous réel a et b strictement positifs, $\log(a \times b) = \log(a) + \log(b)$
 $\log(a / b) = \log(a) - \log(b)$
 $\log(a^n) = n \log(a)$

Propriétés du niveau sonore

L'intensité sonore I peut être manipulée comme la plupart des grandeurs physiques que l'on connaît. Ainsi, si deux sources proches ont une même intensité sonore I , l'intensité résultante sera logiquement égale à $2I$.

Par contre, les règles de calcul habituelles sur les nombres réels ne s'appliquent pas aux grandeurs logarithmiques, comme le niveau sonore L . On ne peut pas ajouter des niveaux sonores ou les multiplier comme l'on le ferait d'habitude.

En fait, le niveau sonore compare une intensité acoustique avec l'intensité acoustique de référence, dans une échelle logarithmique, en décibel. Concrètement, on a, par exemple :

Si $= I_0$, $L = 0$ dB

Si $= 10 I_0$, $L = 10$ dB

Si $= 100 I_0$, $L = 20$ dB

Si $= 1000 I_0$, $L = 30$ dB

En clair, le niveau sonore transforme une multiplication en addition.

Cette remarque peut également se vérifier avec la propriété suivante :

Si I est doublée, L augmente de 3 dB

Par exemple, « 50 dB+50 dB \approx 53 dB ». La présence des guillemets rappelle que l'on ne somme pas des niveaux sonores comme des nombres réels.

Démonstration

Prenons un son d'intensité acoustique I_1 et de niveau sonore $L_1 = 10 \log \left(\frac{I_1}{I_0} \right)$. Si l'on double l'intensité acoustique, alors on a $I_2 = 2 I_1$, ce qui correspond à un niveau sonore :

$$L_2 = 10 \log \left(\frac{I_2}{I_0} \right) = 10 \log \left(\frac{2 I_1}{I_0} \right).$$

En vertu de la relation $\log(a \times b) = \log(a) + \log(b)$, on écrit donc que :

$$L_2 = 10 \log \left(\frac{2 I_1}{I_0} \right) = 10 \left(\log \left(\frac{I_1}{I_0} \right) + \log(2) \right) = 10 \log \left(\frac{I_1}{I_0} \right) + 10 \log(2).$$

Etant donné que $10 \log(2) \approx 3$, on en déduit que $L_2 \approx L_1 + 3$ dB.



RÉFLÉCHISSONS ENSEMBLE

On multiplie l'intensité sonore d'une source par 4. Comment va évoluer le niveau sonore ?

Solution :

Si l'on multiplie l'intensité sonore par 2, alors le niveau sonore augmente de 3 dB. Si l'on remultiplie par 2 (pour avoir finalement une intensité multipliée par 4), alors le niveau sonore augmente encore de 3 dB. Ainsi, le niveau sonore aura augmenté de 6 dB.

Le niveau sonore vérifie une autre propriété :

Si l'on a une source émettant à un niveau sonore L_1 et une autre source émettant à un niveau sonore L_2 , et si $L_2 - L_1 \geq 10$ dB, alors le niveau sonore résultant sera très proche de L_2 .

Par exemple, « 50 dB+70 dB \approx 70 dB ».

Cela signifie que si deux sources émettent en même temps, si l'une d'entre elles émet nettement plus fort que l'autre, seule la plus forte est audible.

Détail du calcul :

50 dB correspondent à une intensité sonore de $I_1 = I_0 10^{50/10} = I_0 10^5$

70 dB correspondent à une intensité sonore de $I_2 = I_0 10^{70/10} = I_0 10^7$

Les intensités sonores peuvent s'ajouter : $I = I_1 + I_2 = I_0 10^5 + I_0 10^7$

Le niveau sonore correspondant est donc :

$$L = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right) = 10 \log\left(\frac{I_0 10^5 + I_0 10^7}{I_0}\right) = 10 \log(10^5 + 10^7) \approx 70,04 \text{ dB}, \text{ soit environ } 70 \text{ dB.}$$

Echelle en décibel

Comme pour le pH, l'usage d'une échelle logarithmique avec le décibel permet de tracer une échelle facilement compréhensible pour le non scientifique.

Niveau sonore en dB	Exemple
130	Avion au décollage
120	Tonnerre
110	Boîte de nuit
100	Klaxon de voiture
90	Tondeuse à gazon
80	Circulation automobile
70	Cantine scolaire
60	Grand magasin animé
50	Conversation
40	Bureau calme
30	Chambre à coucher
20	Brise
10	Désert
0	Seuil d'audibilité

On retiendra que des sons de niveaux sonores supérieurs à 85 dB sont potentiellement nocifs pour la santé. Les sons dépassant les 100 dB peuvent entraîner des pertes d'audition, quelquefois irréversibles.

Echelle de décibels (dB) perçus par l'oreille





ONDE SONORE

Atténuation (en dB)

Quand un son se propage, il s'atténue. Il est possible d'évaluer cette atténuation en décibel, via la relation :

$$A = 10 \log \left(\frac{I_i}{I_f} \right)$$

où I_i est l'intensité sonore initiale (avant propagation), et I_f l'intensité sonore finale (après propagation). Les deux s'expriment en W/m^2 .

Avec la relation mathématique $\log(a/b) = \log(a) - \log(b)$, on peut réécrire cette relation comme

$$A = 10 \log \left(\frac{I_i}{I_f} \right) = 10 \log \left(\frac{I_i/I_0}{I_f/I_0} \right) = 10 \log \left(\frac{I_i}{I_0} \right) - 10 \log \left(\frac{I_f}{I_0} \right) = L_i - L_f,$$

où L_i et L_f désignent, respectivement, les niveaux sonores initiaux et finaux, en décibel.

Attention : nous avons choisi de définir l'atténuation comme une **grandeur positive**.

Dans la littérature, A peut être définie négative, ce qui mènerait à la relation $A = 10 \log \left(\frac{I_f}{I_i} \right)$.

L'atténuation d'un son peut venir de deux phénomènes que nous allons détailler ci-dessous : l'atténuation géométrique, et l'atténuation par absorption.

Atténuation géométrique (formule non exigible)

L'atténuation géométrique provient du fait que la puissance de l'onde doit se répartir sur toute la surface du front d'onde (une sphère), comme vu plus haut quand nous avons établi la relation

$I = \frac{P}{4\pi R^2}$. L'atténuation géométrique A , en décibel, lorsque l'onde sonore passe d'une distance d_1 à une distance d_2 de la source (en m), et donnée par :

$$A = L_{d_1} - L_{d_2} = 20 \log \left(\frac{d_2}{d_1} \right)$$

Démonstration :

Soit $I_1 = \frac{P}{4\pi(d_1)^2}$ l'intensité sonore à une distance d_1 , et $I_2 = \frac{P}{4\pi(d_2)^2}$ l'intensité sonore à une distance d_2 .

On écrit alors l'atténuation comme

$$A = 10 \log \left(\frac{I_1}{I_2} \right) = 10 \log \left(\frac{\frac{P}{4\pi(d_1)^2}}{\frac{P}{4\pi(d_2)^2}} \right) = 10 \log \left(\frac{P}{4\pi(d_1)^2} \frac{4\pi(d_2)^2}{P} \right) = 10 \log \left(\frac{(d_2)^2}{(d_1)^2} \right) = 10 \log \left(\left(\frac{d_2}{d_1} \right)^2 \right).$$

En vertu de la relation $\log(a^n) = n \log(a)$, on a donc $A = 20 \log \left(\frac{d_2}{d_1} \right)$.



RÉFLÉCHISSONS ENSEMBLE

Avec la relation $A = 20 \log \left(\frac{d_2}{d_1} \right)$, estimez l'atténuation lorsque l'on passe d'une distance d'1,0 mètre à 40,0 mètres.

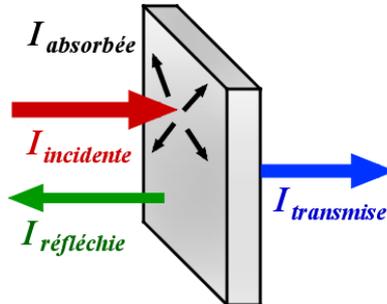
Solution :

On écrit $A = 20 \log \left(\frac{40,0}{1,0} \right) \approx 32 \text{ dB}$.

Atténuation par absorption

Quand une onde sonore rencontre un obstacle, une partie de l'intensité sonore est transmise à travers l'obstacle, une autre est réfléchiée, une autre est absorbée. En vertu de la conservation de l'énergie, cela nous mène à l'équation :

$$I_{\text{incidente}} = I_{\text{réfléchiée}} + I_{\text{absorbée}} + I_{\text{transmise}}$$



Pour évaluer l'atténuation A induite par l'obstacle, on écrit alors que :

$$A = 10 \log \left(\frac{I_{\text{incidente}}}{I_{\text{transmise}}} \right) = L_{\text{incidente}} - L_{\text{transmise}}$$



RÉFLÉCHISSONS ENSEMBLE

Estimez $\frac{I_{\text{incidente}}}{I_{\text{transmise}}}$ dans le cas de bouchons d'oreilles, pour lesquels on a $A = 27 \text{ dB}$.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Solution :

Avec la relation $A = 10 \log \left(\frac{I_{\text{incidente}}}{I_{\text{transmise}}} \right)$, on divise par 10, afin d'obtenir $\frac{A}{10} = \log \left(\frac{I_{\text{incidente}}}{I_{\text{transmise}}} \right)$.

Ensuite, on fait appel à la propriété $\log(x) = y \Leftrightarrow x = 10^y$,

Ce qui nous donne le résultat $\frac{I_{\text{incidente}}}{I_{\text{transmise}}} = 10^{\frac{A}{10}} \approx 10^{2,7} \approx 501$.

LE TEMPS DU BILAN

- L'onde sonore est une onde mécanique pouvant se propager dans l'air. Pour estimer si un son est fort ou pas, on peut faire appel à **l'intensité sonore I** , qui s'exprime en W/m^2 . Lorsque l'on capte un son à une distance R (en m) de sa source, de puissance P (en W), son intensité sonore est donnée par la relation :

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

- Une intensité sonore audible par une oreille humaine peut varier de $10^{-12} \text{ W}/\text{m}^2$ à $10 \text{ W}/\text{m}^2$. Cela suggère alors de faire appel à une grandeur logarithmique, le **niveau sonore L** (en **décibel**, de symbole **dB**), relié à I par :

$$L = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right) \text{ ou } I = I_0 10^{L/10}$$

où $I_0 = 10^{-12} \text{ W}/\text{m}^2$ est le **seuil d'audibilité théorique d'une oreille humaine**, vers 1000 Hz-2000Hz. C'est également **l'intensité sonore de référence**.

- Les règles de calcul avec L sont différentes par rapport aux grandeurs physiques classiques :
 - **Si I est doublée, L augmente d'environ 3 dB**
 - **Si l'on a une source émettant à un niveau sonore L_1 et une autre source émettant à L_2 , et si $L_2 - L_1 \geq 10 \text{ dB}$, alors le niveau sonore résultant sera très proche de L_2 .**
- Grâce au niveau sonore L , il est possible d'établir une **échelle en décibel** afin de cataloguer les sons en fonction de leur niveau sonore, et repérer les sons nocifs (si $> 85 \text{ dB}$).
- Quand un son se propage, il s'atténue. **L'atténuation A** (en dB) peut prendre en compte **l'atténuation géométrique**, qui s'explique par le fait que la puissance de l'onde se dissipe sur toute la surface du front d'onde, et **l'atténuation par absorption**, quand l'onde rencontre un obstacle.

Abordons maintenant une série d'exercices, afin de vérifier vos connaissances. Les exercices ont été classés dans un ordre d'approfondissement croissant. Les réponses aux exercices se trouvent en fin de manuel.

EXERCICE

01

Intensité acoustique et décibel.

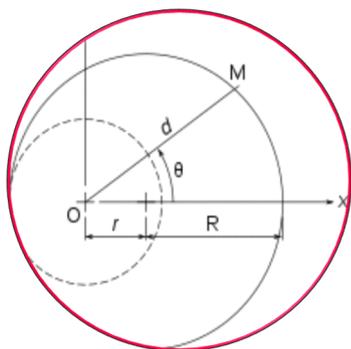
1. Expliquez ce qu'est l'intensité acoustique I , en précisant son unité.

2. Ecrivez la relation entre la puissance acoustique P d'une source et son intensité acoustique I lorsque l'on se situe à une distance d de la ladite source.

3. Exprimez le niveau sonore L en fonction de l'intensité acoustique I .

4. Exprimez l'intensité acoustique I en fonction du niveau sonore L .

2. Par combien l'intensité acoustique est-elle divisée sous l'effet de protections auditives ?



Pour rappel, on appelle onde le phénomène de propagation d'une perturbation sans transport de matière mais avec transport d'énergie. Cela peut désigner les ondes sonores, lumineuses, etc. Quelles que soient leurs natures, ces ondes ont des propriétés communes.

Dans ce chapitre, nous proposons d'étudier lesdites propriétés. Cela concerne les phénomènes de diffraction, d'interférences et l'effet Doppler (ondes sonore et électromagnétiques). Certains de ces phénomènes présentent des applications très concrètes (radars routier basés sur l'effet Doppler ...) ou au contraire peuvent constituer une gêne pour certains instruments (diffraction limitant les capacités des instruments d'optique ...).

Q COMPÉTENCES VISÉES

- Caractériser le phénomène de diffraction dans des situations variées et en citer des conséquences concrètes.
- Exploiter la relation exprimant l'angle caractéristique de diffraction en fonction de la longueur d'onde et de la taille de l'ouverture.
- Caractériser le phénomène d'interférences de deux ondes et en citer des conséquences concrètes.
- Etablir les conditions d'interférences constructives et destructives de deux ondes issues de deux sources ponctuelles en phase dans le cas d'un milieu de propagation homogène.
- Prévoir les lieux d'interférences constructives et les lieux d'interférences destructives dans le cas des trous d'Young, l'expression linéarisée de la différence de chemin optique étant donnée. Etablir l'expression de l'interfrange.
- Décrire et interpréter qualitativement les observations correspondant à une manifestation de l'effet Doppler.
- Etablir l'expression du décalage Doppler dans le cas d'un observateur fixe, d'un émetteur mobile et dans une configuration à une dimension.
- Exploiter l'expression du décalage Doppler dans des situations variées utilisant des ondes acoustiques ou des ondes électromagnétiques.

Q PRÉ-REQUIS

- Connaître les grandeurs physiques pertinentes pour décrire une onde : longueur d'onde, célérité, fréquence, période, et bien entendu les formules liants ces grandeurs entre elles.
- Mathématiquement parlant, ce chapitre ne fera pas appel à des notions mathématiques nouvelles, sauf peut-être l'approximation des angles faibles.



Première approche

On éclaire une fente fine avec un faisceau LASER. A la traversée de l'obstacle, le faisceau est diffracté, ce qui se traduit par son élargissement. Ce phénomène sera étudié plus en détail dans le cours. Néanmoins, pour cette première approche, on propose de découvrir le phénomène « expérimentalement », via le site :

<https://web-labosims.org/animations/diffraction/diffraction.html>

1. Faites varier la longueur d'onde du LASER. Quel est l'effet produit sur la largeur de la figure de diffraction ? Même question avec la largeur de la fente.

.....

.....

.....

.....

.....

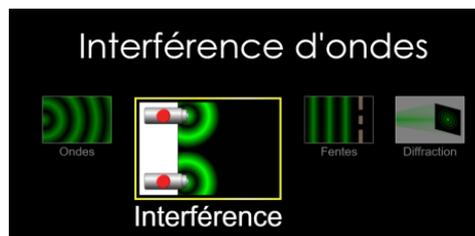
.....

.....

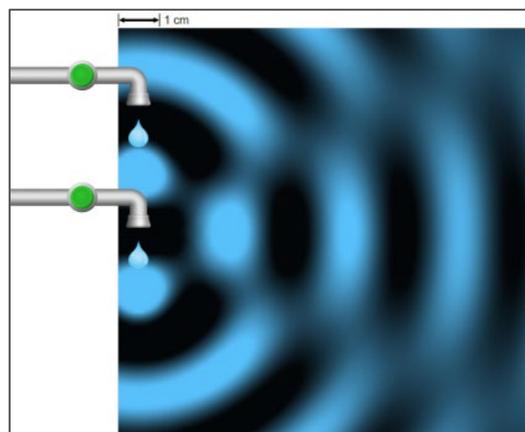
Le phénomène d'interférences survient quand deux ondes identiques se superposent. Pour étudier le phénomène, allez sur la page :

https://phet.colorado.edu/sims/html/wave-interference/latest/wave-interference_fr.html

Sélectionnez ensuite l'item « interférence » :



« Allumer » ensuite les deux robinets, en appuyant sur les boutons verts, de manière à lancer l'animation, qui doit alors avoir l'allure suivante :



2. Commentez le résultat obtenu, en particulier sur la partie droite de la figure.

.....

.....

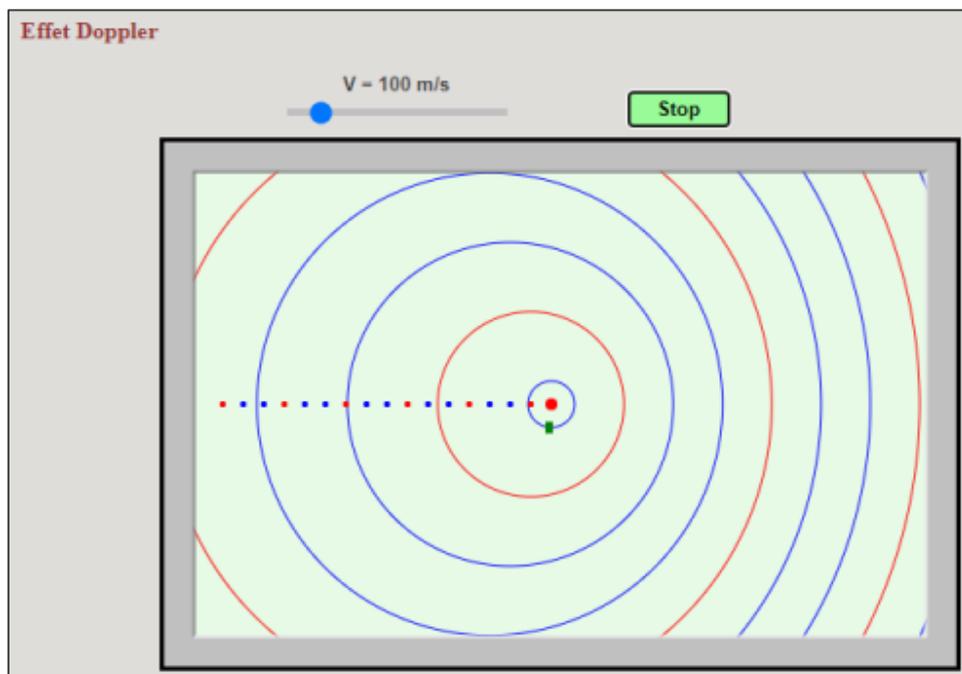
.....

.....

.....

.....

L'effet Doppler se caractérise par une modification de la fréquence perçue d'une onde émise par une source, si ladite source (et/ou le récepteur) se déplace(nt). Pour visualiser l'effet Doppler, regarder la page : <http://ressources.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02/meca/doppler.html> Dans ce cas-là, le récepteur est fixe (par exemple le point vert au centre de la figure), la source se déplace. Appuyer sur le bouton « début » pour lancer l'animation :



3. Commentez le résultat obtenu. Comment la fréquence varie-t-elle lorsque la source se rapproche du récepteur ? S'en éloigne ?

.....

.....

.....

.....

.....

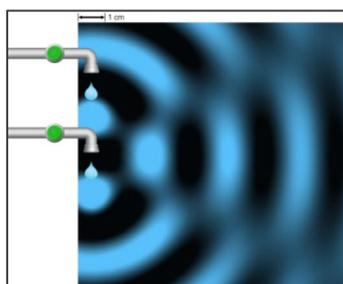
.....

CORRECTION

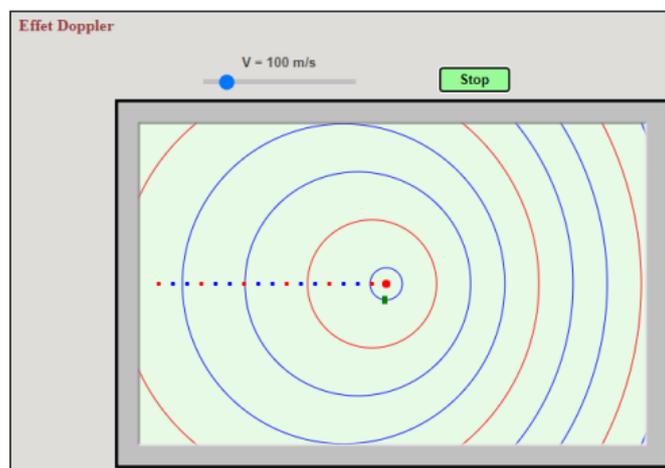
1. Si l'on augmente la longueur d'onde du LASER, en gardant les autres paramètres constants, alors la figure de diffraction est plus large. D'autre part, si l'on augmente la largeur de la fente, alors la figure de diffraction devient moins large. On verra d'ailleurs dans le cours que la longueur d'onde et la largeur de la fente sont les deux paramètres agissant sur le phénomène de diffraction. Ces observations ont été faites avec une fente, mais restent valables avec un trou.



2. L'effet des deux robinets est de produire des ondes identiques (ici des ondes mécaniques : des vagues), mais décalées spatialement. Il en résulte que les deux ondes vont se superposer, et interférer. Si l'on regarde par exemple sur la partie droite de la figure, on note qu'au milieu du bord droit, les deux ondes se cumulent pour donner une oscillation de forte amplitude. On dit que l'on a des interférences constructives. Par contre, au niveau des bords supérieur et inférieur droits, l'onde résultante est de très faible amplitude. On a là des interférences destructives.



3. L'animation proposée est une très bonne illustration de l'effet Doppler : les ondes sont représentées par des cercles dont le rayon croît au cours du temps. Par contre, vu que la source se déplace, les cercles ne sont pas concentriques. Quand la source se rapproche, les cercles sont plus rapprochés que lorsqu'elle s'éloigne. La distance entre deux cercles consécutifs correspond à la longueur d'onde. Par effet Doppler, celle-ci est plus faible quand la source se rapproche par rapport à la longueur d'onde pour une source immobile. A l'opposé, la longueur d'onde est plus grande lorsque la source s'éloigne.



Puisque la longueur d'onde λ est reliée à la fréquence f et à la célérité c de l'onde par la relation $\lambda = c/f$, longueur d'onde et fréquence sont inversement proportionnelles. En conclusion, par effet Doppler, la fréquence est plus forte quand la source se rapproche que lorsqu'elle s'éloigne.



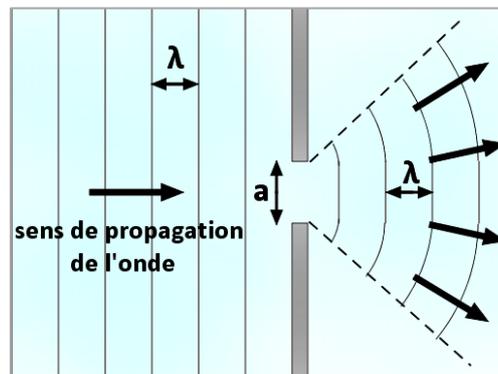
DIFFRACTIONS, INTERFÉRENCES ET EFFET DOPPLER

La diffraction

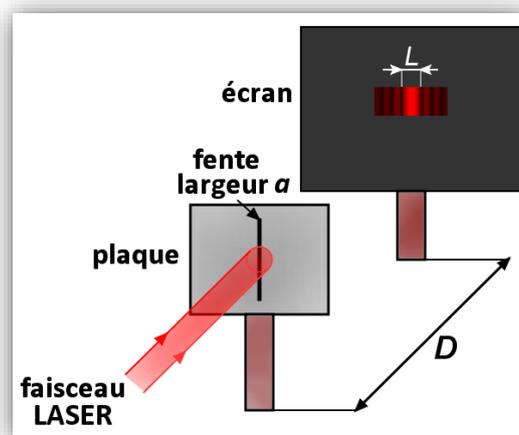
Diffraction d'une onde par une ouverture : conditions d'observation et caractéristiques.

En optique géométrique, on considère que la lumière peut être décrite par des rayons lumineux. Néanmoins, si l'on essaie d'isoler un de ces rayons, notamment en faisant passer un faisceau de lumière à travers une ouverture très petite, le faisceau s'élargit à la traversée de l'obstacle. C'est le phénomène de diffraction.

De manière générale, le phénomène de diffraction se caractérise par une déviation d'une onde à la traversée d'un obstacle. La diffraction est observable si la taille de l'obstacle a est comparable (ou du moins du même ordre de grandeur) ou inférieure à la longueur d'onde λ . Si par contre $a \gg \lambda$, la diffraction est négligeable : le modèle du rayon lumineux est alors suffisant.

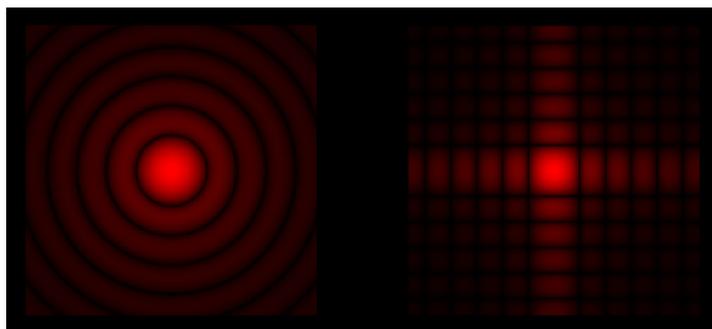


La diffraction ne concerne pas que la lumière, mais tout type d'onde (onde sonore, etc.). Expérimentalement, il est cependant vrai que la diffraction de la lumière est la plus facile à étudier. Voici un exemple de montage faisable en Travaux Pratiques.



Quand on parle d'obstacle, cela peut concerner l'absence de matière comme une fente ou la présence de matière comme un cheveu. Si les deux obstacles que l'on vient de citer ont la même largeur, alors leur figure de diffraction sera identique, selon le principe de Babinet (cette propriété est intéressante à connaître, mais il n'est pas exigible de devoir citer son nom).

En ce qui concerne la forme de l'obstacle diffractant, elle a bien entendu une influence sur la figure de diffraction obtenue.



Diffraction par une ouverture circulaire (gauche) et carrée (droite).



RÉFLÉCHISSONS ENSEMBLE

Parmi les exemples suivants, indiquez ceux qui sont susceptibles d'induire une diffraction notable :

- 1) Lumière à travers une fenêtre ouverte.

- 2) Son à travers une fenêtre ouverte.

- 3) Lumière à travers un rideau.

Solution :

- 1) Les dimensions d'une fenêtre sont trop grandes pour faire diffracter la lumière, dont la longueur d'onde est entre 400 et 800 nm.
- 2) La longueur d'onde d'un son est de l'ordre de quelques centimètres, donc un son peut être diffracté par une fenêtre.
- 3) Le maillage d'un rideau est assez fin pour faire diffracter la lumière visible.

Angle caractéristique de diffraction

Dans le cas d'un obstacle comme une fente (ou un cheveu), le demi-angle de diffraction θ (en rad) est donné par la relation :

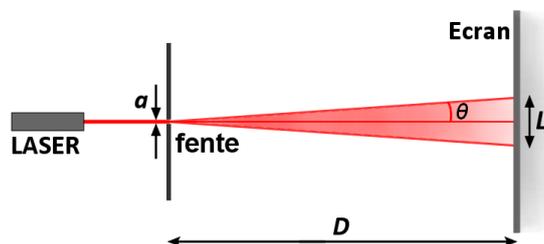
$$\sin(\theta) = \frac{\lambda}{a}$$

ou $\theta \approx \frac{\lambda}{a}$ car $\sin(\theta) \approx \theta$ si θ est faible.

La longueur d'onde λ et la largeur de la fente a sont en mètre.

Remarque : Pour une ouverture circulaire, le demi-angle est donné par la relation $\theta \approx 1,22 \frac{\lambda}{d}$, où d est le diamètre de l'ouverture (en m). Habituellement, cette formule sera donnée le jour de l'épreuve. Il n'est donc pas nécessaire de la connaître par cœur.

Dans la pratique, il est peu aisé de mesurer θ . On préférera mesurer la largeur L de la largeur de la tâche centrale de diffraction. Si l'on reprend le montage décrit précédemment :



D'après le schéma ci-dessus, on peut ainsi écrire que $\tan(\theta) = \frac{L/2}{D}$, soit $\tan(\theta) = \frac{L}{2D}$, avec L et D en mètre. En TP, il est courant que la source de lumière soit un LASER, afin d'avoir une luminosité suffisante. La longueur d'onde employée se situe bien entendu dans le domaine du visible, c'est-à-dire entre 400 et 800 nm. Les largeurs des fentes s'expriment plutôt en μm , les angles de diffraction sont très faibles. Cela nous autorise à considérer que $\tan(\theta) \approx \theta$, avec bien entendu θ en radian. En conséquence, on écrit que :

$$\theta \approx \frac{L}{2D}$$

En fusionnant avec la relation vue plus haut, il est possible de supprimer θ de l'équation, ce qui nous mène à :

$$\frac{\lambda}{a} \approx \frac{L}{2D}$$



RÉFLÉCHISSONS ENSEMBLE

Estimez L si l'on prend un LASER de longueur d'onde $\lambda \approx 650 \text{ nm}$, une fente de largeur $a \approx 100 \mu\text{m}$ et que l'on place l'écran à $D \approx 2,00 \text{ m}$.

Solution :

Via la relation $\frac{\lambda}{a} \approx \frac{L}{2D}$, on écrit $L \approx 2D \frac{\lambda}{a} \approx 2 \times 2,00 \times \frac{650 \times 10^{-9}}{100 \times 10^{-6}} \approx 2,60 \text{ cm}$.

Applications du phénomène

En TP, il est possible de faire des mesures précises à l'aide du phénomène de diffraction, comme par exemple la détermination du diamètre d'un cheveu. Pour cela, connaissant λ , L et D , on en déduit a .

Des rayons X peuvent diffracter sur une structure cristalline comme celle des métaux, révélant ainsi leur structure.

En spectroscopie, il est possible d'utiliser un réseau de diffraction, constitué d'un ensemble de fentes très fines. A titre de comparaison, un réseau de diffraction (en transmission) se comporte comme un prisme par rapport à la lumière. Il existe aussi des réseaux de diffraction en réflexion, comparable à la surface d'un disque optique : irisation de la lumière, c'est-à-dire apparition des couleurs de l'arc en ciel.

Par contre, la diffraction se révèle être nocive en optique, car elle limite les performances des instruments d'optique comme les microscopes optiques. Il en est de même pour les lecteurs de disques optiques. Plus précisément, le faisceau LASER utilisé pour lire la surface du disque est focalisé via une lentille convergente, mais, quel que soit le réglage, il ne focalisera jamais en un point, mais donnera une tâche. Ce phénomène est directement relié à la diffraction.

02 DIFFRACTIONS, INTERFÉRENCES ET EFFET DOPPLER

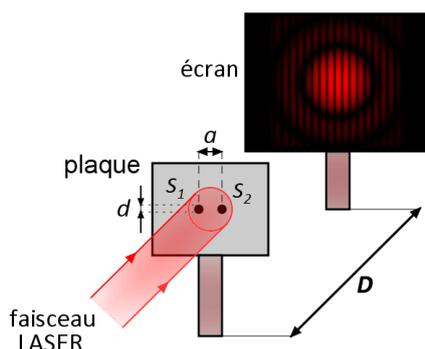
Interférences

Interférences de deux ondes lumineuses : expérience des trous de Young.



Thomas Young (1773-1829).

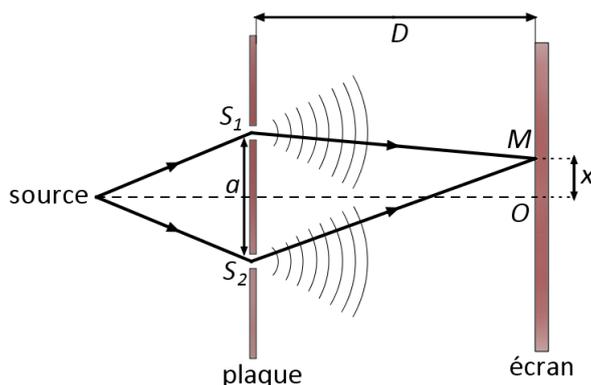
Une plaque opaque est percée de deux trous S_1 et S_2 de diamètre d et distants de a . On éclaire les deux trous avec un faisceau LASER de longueur d'onde λ . A une distance D de la plaque, on place un écran. Sur ce dernier, on observe une image comme dans le schéma ci-dessous.



En d'autres termes, on retrouve la figure de diffraction d'un orifice circulaire, sauf que l'on a en plus en alternance de franges sombres et brillantes, caractéristique du phénomène d'interférences. La distance entre deux franges brillantes consécutives est constante. On la nomme interfrange i .

Schématisation de l'expérience.

Pour expliquer le phénomène, on raisonne par rapport au croquis ci-dessous, qui schématise la situation avec une vue de dessus du montage. Pour notre raisonnement, on se limitera un plan contenant les points S_1 et S_2 et l'axe du faisceau LASER (trait en pointillés).



Au niveau des deux trous S_1 et S_2 , c'est comme si l'on avait deux sources identiques. Les ondes vont donc se propager à partir de ces deux points, jusqu'à atteindre l'écran. On considère alors un point M dudit écran. Les distances S_1M et S_2M ne sont égales que si M est en O .

Différence de chemin optique.

On appelle chemin optique (en m) le produit de la distance parcourue par l'onde par l'indice optique n du milieu au sein duquel cette propagation s'effectue. Un chemin optique peut se noter avec des parenthèses. On écrit donc que $(S_1M) = n S_1M$ et $(S_2M) = n S_2M$.

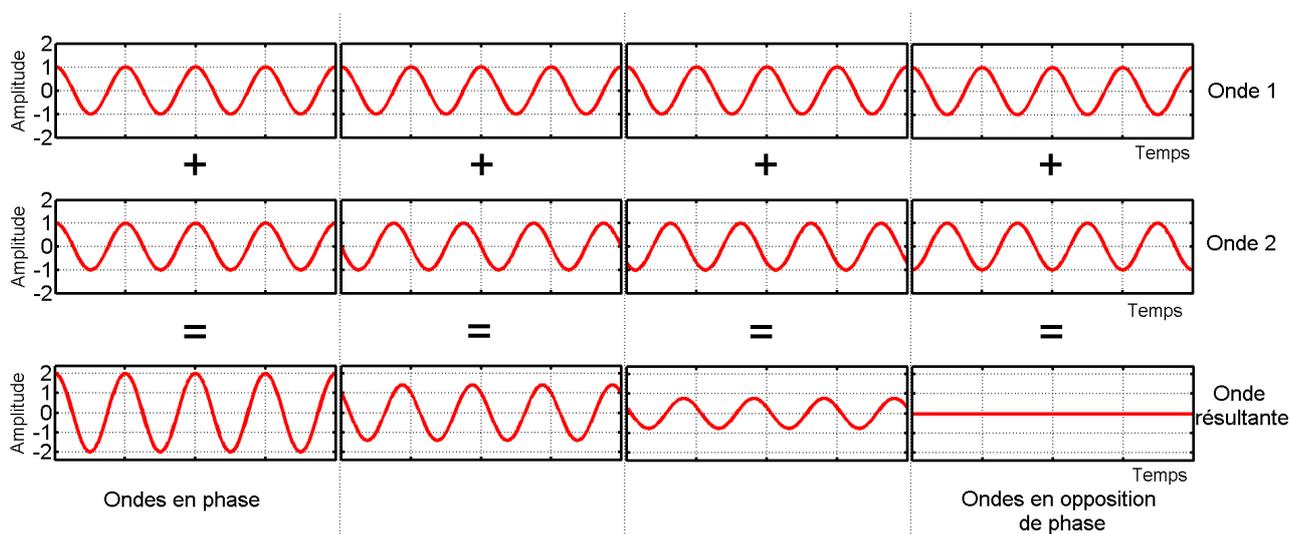
De plus, on définit la différence de marche, aussi nommée différence de chemin optique, comme :

$$\delta = (S_2M) - (S_1M) = n S_2M - n S_1M$$

Dans le cas de l'expérience des trous de Young, vu que les ondes lumineuses évoluent dans l'air, on a bien évidemment $n \approx 1$.

Interférences constructives et destructives.

Selon la valeur de δ , les deux ondes issues de S_1 et S_2 peuvent ainsi ne pas arriver en même temps en M , puisque les distances parcourues peuvent ne pas être les mêmes. Il est alors possible de considérer les quatre configurations suivantes, correspondant chacune à une colonne :



Dans le premier cas (à gauche), les deux ondes ne sont pas déphasées : l'onde résultante présente ainsi une amplitude maximale. Les interférences sont alors dites constructives. Sur la figure d'interférences, cela correspond aux franges brillantes.

A l'opposé dans le cas de droite, les deux ondes sont en opposition de phases : quand l'une présente un maximum, l'autre présente un minimum. L'onde résultante a alors une amplitude négligeable. On a ainsi des interférences destructives, associées aux franges sombres.

Les deux autres cas sont des cas intermédiaires.

Conditions d'interférences constructives ou destructives.

De manière générale, il est possible de prévoir l'état interférentiel en un point donné, en comparant la différence de chemin optique δ à la longueur d'onde λ de l'onde utilisée :

- Si $\delta = k \lambda$, avec k un nombre entier relatif, alors les **interférences sont constructives**. En effet, la différence de chemin optique est alors un multiple de la longueur d'onde : les deux ondes sont donc en phase.
- Si $\delta = (k + 1/2) \lambda$, alors les **interférences sont destructives**. Dans ce cas, les deux ondes sont en effet en opposition de phase. Notons que $k + 1/2$ désigne un nombre demi-entier, comme par exemple 3,5.



RÉFLÉCHISSONS ENSEMBLE

Quel état d'interférences aura-t-on avec une différence de marche de $\delta = 3,90 \mu\text{m}$ et une onde lumineuse de fréquence $f = 5,00 \times 10^{14} \text{ Hz}$?

La célérité de l'onde lumineuse est $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m/s}$.

Solution :

La longueur d'onde de notre onde est donnée par la relation $\lambda = \frac{c}{f} \approx \frac{3,0 \times 10^8}{5,0 \times 10^{14}} \approx 600 \text{ nm}$.

On écrit ensuite que $\delta = K \lambda$, et l'on cherche maintenant à déterminer la valeur de K , afin de voir s'il est entier, demi-entier, ou aucun des deux. On écrit donc que $K = \frac{\delta}{\lambda} \approx \frac{3,90 \times 10^{-6}}{600 \times 10^{-9}} \approx 6,5$.

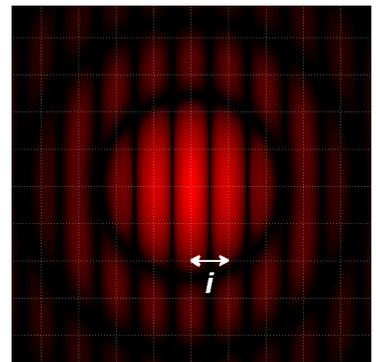
La valeur trouvée est donc demi-entière, ce qui implique que les **interférences sont destructives**.

Interfrange dans l'expérience des trous de Young.

Dans l'expérience des trous de Young, ou des fentes de Young, l'interfrange i (en m) est donné par la relation :

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

Les grandeurs citées dans cette formule ont été introduites plus haut lors de la présentation de l'expérience. Très souvent, cette formule est donnée lors de l'épreuve écrite. Par contre, il peut être demandé d'en faire une analyse dimensionnelle.



Démonstration (non exigible) :

On pourrait montrer que la différence de marche δ est donnée par la relation

$$\delta = \frac{a x}{D}$$

Ainsi, si pour une frange brillante on écrit que $\delta = k \lambda = \frac{a x_k}{D}$, on aura donc, pour la frange brillante suivante, $\delta' = (k + 1) \lambda = \frac{a x_{k+1}}{D}$.

Par définition de l'interfrange, $x_{k+1} = x_k + i$, et ainsi, on fait : $(k + 1) \lambda = \frac{a(x_k+i)}{D}$, ou $k \lambda + \lambda = \frac{a x_k}{D} + \frac{a i}{D}$.
Vu que $k \lambda = \frac{a x_k}{D}$, on simplifie la relation précédente pour ne garder que $\lambda = \frac{a i}{D}$, et l'on en extrait $i = \frac{\lambda D}{a}$.



RÉFLÉCHISSONS ENSEMBLE

Déterminez l'interfrange i si l'on a $\lambda = 650 \text{ nm}$, $D = 200 \text{ cm}$ et $a = 100 \mu\text{m}$.

Solution :

Cet exercice est une simple application numérique de la formule de l'interfrange.

On prendra soin néanmoins de convertir toutes les longueurs en mètre dans la formule.

On obtient :

$$i = \frac{\lambda D}{a} \approx \frac{650 \times 10^{-9} \times 2,00}{100 \times 10^{-6}} \approx 1,30 \text{ cm}$$

Conditions d'observation

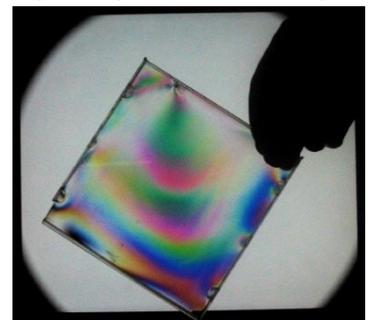
Le phénomène d'interférences est observable a priori pour tous types d'ondes (lumineuses, sonores, etc.). Il y a cependant des conditions pour que le phénomène se produise :

- Evidemment, les deux ondes qui interfèrent doivent être de même nature (deux ondes lumineuses par exemple).
- Elles doivent être synchrones, c'est-à-dire avoir même fréquence.
- Elles doivent être cohérentes, c'est-à-dire que le déphasage des deux sources doit être constant à tout instant. Autrement dit, le décalage temporel des deux sinusoïdes (émises par les sources) en un point donné ne doit pas varier avec le temps.

L'astuce du montage des fentes de Young est que les deux fentes permettent de créer deux sources lumineuses synchrones et a priori cohérentes à partir d'une source unique. Cependant, les sources de lumière classiques, comme le Soleil, les lampes, ... sont peu cohérentes, c'est-à-dire que la phase d'une onde émise varie très rapidement : voir modèle du train d'onde, dans le chapitre 4 traitant des photons ci-après. Il est ainsi difficile d'observer des interférences avec des sources de lumières incohérentes. Les deux phares d'un véhicule ne peuvent pas donner lieu à des interférences. Par contre, la lumière émise par un LASER est très cohérente, donc se prête plutôt bien à l'expérience.

Applications du phénomène.

- On peut mesurer de faibles épaisseurs de petites variations d'épaisseur d'un matériau transparent via les interférences. En effet, les ondes lumineuses traversant ledit matériau peuvent subir des rebonds multiples et interférer. D'ailleurs, c'est ce principe qui est exploité pour lire les disques optiques que l'on trouve dans le commerce.
- Les bulles de savon ou les vitres qui viennent d'être lavées présentent souvent une irisation (couleurs de l'arc en ciel) : chaque longueur d'onde peut interférer indépendamment des autres. Une application pratique est la photoélasticimétrie : la coloration rend compte des efforts subis par une pièce.



- Les interférences sont aussi utilisées en astrophysique, en faisant interférer des ondes électromagnétiques du domaine visible ou radio, provenant de corps célestes lointains, afin de gagner en résolution. Les ondes gravitationnelles prédites par la théorie d'Einstein ont aussi été détectées par interférométrie (projets LIGO américain et VIRGO européen).



DIFFRACTIONS, INTERFÉRENCES ET EFFET DOPPLER

Effet Doppler



Christian Doppler (1803-1853)

L'effet Doppler se caractérise par une modification de la fréquence/longueur d'onde d'une onde, causé par le déplacement de la source émettrice et/ou du récepteur. On distingue deux effets Doppler distincts : celui lié aux ondes mécaniques dont les ondes sonores, et celui lié aux ondes électromagnétiques.

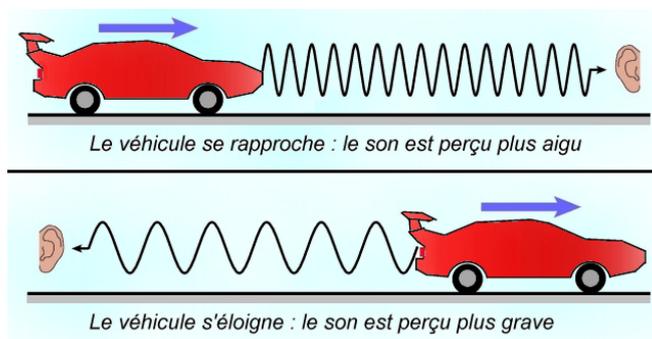
Description du phénomène pour l'effet Doppler lié aux ondes sonores.

Concernant l'effet Doppler acoustique, la plupart du temps seule la source se déplace (dans le référentiel terrestre), le récepteur étant souvent fixe. Prenons un exemple avec une voiture qui se déplace par rapport à un observateur sur le bord de la route en écoutant le son (www.cours-pi.com/ressources)

4 klaxon.mp3

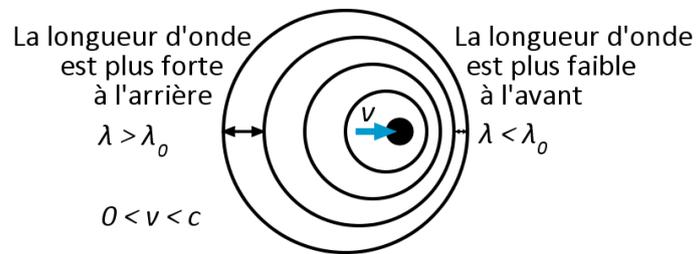
On distingue alors deux cas :

- Quand la voiture se rapproche, le son perçu a une fréquence plus forte (son plus aigu) que le son émis par le véhicule.
- Quand la voiture s'éloigne, le son perçu a une fréquence plus faible, et paraît ainsi plus grave.



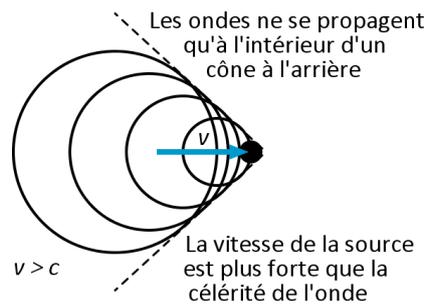
Modélisation de l'effet Doppler pour les ondes sonores/mécaniques.

Pour comprendre le phénomène, on considère le schéma suivant, qui restera valable tant que la vitesse v de la source restera inférieure à la célérité c de l'onde sonore.



Ainsi, de par le mouvement de la source, les fronts d'ondes des ondes émises sont des sphères non concentriques, de telle manière que la longueur d'onde est plus faible à l'avant qu'à l'arrière. Vu que la longueur d'onde et la fréquence sont liées par la relation $\lambda = c/f$, on en conclut que la fréquence perçue est plus forte à l'avant qu'à l'arrière, comme observé plus haut.

Remarque (non exigible) : quand la vitesse v dépasse la célérité c , il se produit le phénomène décrit par le schéma suivant :



Pour des vaguelettes à la surface de l'eau (ondes mécaniques), cela explique le sillage laissé par les bateaux. Pour les avions supersoniques, comme les avions de chasse, cela explique le « cône de Mach » qui se forme quand l'avion a dépassé le mur du son. D'ailleurs, par une condensation temporaire de la vapeur d'eau, ledit cône est visible, comme dans la photographie ci-dessous :



L'effet Doppler acoustique est modélisé via la relation générale ci-dessous, que nous admettrons. En effet, sa démonstration n'est pas au programme.

Si l'on note f_S la fréquence de la source (en Hz), f_R la fréquence reçue (Hz), v_S la vitesse de la source (m/s), v_R la vitesse du récepteur (m/s) et c la célérité de l'onde (m/s), on a :

$$f_R = \frac{1 \pm v_R/c}{1 \pm v_S/c} f_S$$

- Signe + au numérateur : le récepteur se dirige vers la source.
- Signe – au numérateur : le récepteur va à l'opposé de la source.
- Signe + au dénominateur : la source va à l'opposé du récepteur.
- Signe – au dénominateur : la source se dirige vers le récepteur.

Comme indiqué plus haut, il est très fréquent que seule la source se déplace par rapport au milieu de propagation (air), le récepteur étant fixe. Cela nous mène alors à la relation simplifiée suivante :

$$f_R = \frac{f_S}{1 \pm v_S/c}$$

Signe + au dénominateur : la source s'éloigne du récepteur.

Signe – au dénominateur : la source se rapproche du récepteur.

La plupart du temps, cette relation est donnée le jour de l'épreuve. Néanmoins, il est possible de questionner l'élève par rapport aux signes qu'elle comporte. On rappelle donc que quand la source se rapproche, la fréquence est plus forte, et quand la source s'éloigne, la fréquence est plus faible.



RÉFLÉCHISSONS ENSEMBLE

Une source émet un son de fréquence 440 Hz en s'éloignant d'un récepteur immobile avec une vitesse de 90,0 km/h. Quelle est la fréquence reçue par ce récepteur ? La vitesse du son dans l'air sera voisine de 340 m/s.

Solution :

Avant tout, il nous faut convertir 90,0 km/h en m/s, en divisant par 3,6, ce qui nous fait 25,0 m/s.

On utilise ensuite la formule pour un récepteur immobile, et l'on écrit alors que :

$$f_R = \frac{440}{1+25,0/340} \approx 410 \text{ Hz.}$$

Effet Doppler-Fizeau

L'effet Doppler acoustique et l'effet Doppler associé aux ondes électromagnétiques présentent certaines similitudes. Néanmoins, pour le deuxième, il est lié à la théorie de la relativité restreinte d'Einstein. De plus, les formules utilisées ne sont pas exactement les mêmes. Dans la pratique, on le nomme effet Doppler-Fizeau, en référence à Hippolyte Fizeau (1819-1896).

Concrètement, une différence avec l'effet Doppler acoustique est que l'on s'intéresse à la vitesse relative v entre la source et le récepteur : il n'y a plus de référentiel privilégié. Cette vitesse v est positive s'il y a éloignement, et négative si rapprochement. D'autre part, pour les ondes électromagnétiques comme la lumière, on a plus l'habitude de manipuler des longueurs d'onde que des fréquences.

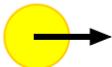
On retiendra ainsi la relation de l'effet Doppler-Fizeau :

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_S} = \frac{v}{c}, \text{ avec } \Delta\lambda = \lambda_R - \lambda_S$$

Dans cette formule, λ_S (en m) est la longueur d'onde de l'onde émise par la source, λ_R la longueur d'onde reçue par le récepteur, v (en m/s) est la vitesse relative évoquée plus haut et c (en m/s) est la célérité de la lumière dans le vide. Cette formule n'est valable que si $v \ll c$, ce qui sera toujours le cas dans les exercices proposés.

Décalage Doppler

L'effet Doppler-Fizeau est nettement plus difficile à percevoir que l'effet Doppler acoustique, car les variations de longueur d'onde sont trop faibles pour être détectée à l'œil nu. En astrophysique, ces écarts, nommés décalage Doppler, sont néanmoins mesurables, par exemple sur les spectres d'absorption d'étoiles. On a alors les trois cas suivants :

	Pour un observateur terrestre :
L'étoile se rapproche  	 Décalage vers le bleu (blueshift)
L'étoile a une vitesse relative nulle  	
L'étoile s'éloigne  	 Décalage vers le rouge (redshift)

Avec la relation de l'effet Doppler-Fizeau vue plus haut, λ_R est la longueur d'onde de la raie de l'étoile telle qu'elle est reçue sur Terre. Une raie d'absorption dépend de l'atome qui l'a engendrée : la valeur de sa longueur d'onde est connue en laboratoire. Cela nous permet ainsi de connaître λ_S .

En écrivant alors que $\frac{\lambda_R - \lambda_S}{\lambda_S} = \frac{v}{c}$, on remonte alors à la vitesse relative v de l'étoile par rapport à la Terre. Celle-ci est typiquement de plusieurs km/s...



RÉFLÉCHISSONS ENSEMBLE

Une raie spectrale émise par une étoile est captée sur Terre avec une longueur d'onde de 525,8 nm. Mesurée en laboratoire, cette raie serait en fait à 526,0 nm. Sachant que la célérité de la lumière dans le vide vaut $c \approx 3,00 \times 10^8$ m/s, estimez la vitesse relative v de l'étoile par rapport à la Terre.

.....

.....

.....

.....

Solution :

On prend la formule $\frac{\lambda_R - \lambda_S}{\lambda_S} = \frac{v}{c}$, et l'on extrait v , ce qui nous donne :

$$v = \frac{\lambda_R - \lambda_S}{\lambda_S} \cdot c = \frac{525,8 \times 10^{-9} - 526,0 \times 10^{-9}}{526,0 \times 10^{-9}} \times 3,00 \times 10^8 \approx -114 \text{ km/s}$$

La vitesse trouvée étant négative, l'étoile étudiée se rapproche donc de la Terre.

Autres applications du phénomène

Dans le domaine de la sécurité routière, les radars routiers dont se servent la Police ou la Gendarmerie utilisent l'effet Doppler-Fizeau : des ondes radar sont émises sur le véhicule à contrôler, rebondissent sur lui et sont captées par l'appareil. Ils peuvent alors estimer la vitesse du véhicule.

L'effet Doppler (acoustique) est aussi utilisé en médecine, lors d'une échographie, avec des ondes ultrasonores, afin de déterminer, par exemple, la vitesse du sang s'écoulant dans un vaisseau sanguin, etc.

Dans l'industrie, l'effet Doppler est également utilisable pour mesurer des vitesses à distance. Cela peut être la vitesse d'un fluide s'écoulant dans une canalisation ...

Enfin historiquement, l'effet Doppler a permis à Edwin Hubble de découvrir l'expansion de l'Univers. En effet, il s'est rendu compte en 1929 après une série d'observation un changement de couleurs de galaxies virant vers le rouge.

LE TEMPS DU BILAN

Les ondes présentent certaines propriétés. En outre, il existe des phénomènes qui ne concernent que les ondes. Les plus connus, sont la diffraction, les interférences et l'effet Doppler.

→ Concernant la **diffraction**, il s'agit d'un élargissement et de la déformation du front d'onde à la traversée d'un obstacle, en particulier si les dimensions a (en m) de ce dernier sont comparables à celle de la longueur d'onde λ (en m).

Pour une fente, le demi-angle de diffraction θ (en rad) satisfait la relation $\sin(\theta) = \frac{\lambda}{a}$, ou $\theta \approx \frac{\lambda}{a}$ si θ est faible. Si l'on dispose un écran à une distance D (en m) de la fente, alors la tâche centrale de diffraction a une largeur L (en m) telle que $\frac{\lambda}{a} \approx \frac{L}{2D}$ (si θ faible).

→ Concernant les **interférences**, elles se manifestent quand deux ondes de même nature, synchrones et cohérentes se rencontrent en un même lieu. Pour les ondes lumineuses, le phénomène se caractérise par une alternance de franges sombres et brillantes.

La différence de marche, ou différence de chemin optique, δ (en m) en un point M par rapport à deux sources S_1 et S_2 est définie comme $\delta = n S_2 M - n S_1 M$, où n (sans dimension) est l'indice optique du milieu au sein duquel les ondes se propagent. Si la longueur d'onde (en m) est notée λ , alors on a :

- Si $\delta = k \lambda$, avec k un nombre entier relatif, alors les **interférences sont constructives** (franges brillantes).
- Si $\delta = (k + 1/2) \lambda$, alors les **interférences sont destructives** (franges sombres).

→ Concernant l'**effet Doppler**, il s'agit d'une modification de la fréquence perçue par un récepteur si ce dernier et/ou la source émettrice se déplace.

Dans le cas des **ondes mécaniques, ce qui inclut les ondes acoustiques**, on a, pour un récepteur fixe dans le référentiel du milieu de propagation :

$$f_R = \frac{f_S}{1 \pm v_S/c}$$

Signe + au dénominateur : la source s'éloigne du récepteur.

Signe – au dénominateur : la source se rapproche du récepteur.

f_S est la fréquence émise par de la source (en Hz), f_R la fréquence reçue (en Hz), v_S (en m/s) la vitesse de la source dans le référentiel du milieu de propagation, et c (en m/s) la vitesse de l'onde dans ledit milieu.

Dans le cas des **ondes électromagnétiques, dont la lumière**, l'effet Doppler-Fizeau indique que :

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_S} = \frac{v}{c}, \text{ avec } \Delta\lambda = \lambda_R - \lambda_S$$

λ_S (en m) est la longueur d'onde émise par la source, λ_R (en m) la longueur d'onde reçue, c (en m/s) est la célérité de la lumière dans le vide, et v (en m/s et $\ll c$) est la vitesse relative de la source par rapport au récepteur : v est positive s'il y a éloignement, et négative si rapprochement.

Nous allons aborder une série d'exercices afin de vérifier vos connaissances. Les exercices sont classés par ordre d'approfondissement croissant. Les réponses aux exercices se situent en fin de manuel.

EXERCICE

07

Formules de base du cours

1. Ecrivez la relation donnant le demi-angle de diffraction θ d'une onde de longueur d'onde λ par une fente de largeur a .

Soit δ la différence de marche de deux ondes identiques de longueur d'onde λ , en un point donné.

2. A quelle condition a-t-on des interférences constructives ? Destructives ?

On donne la formule suivante relative à l'effet Doppler : $f_R = \frac{f_S}{1 \pm v_S/c}$

3. Quel signe a-t-on au dénominateur quand la source se rapproche du récepteur ?

On considère maintenant la formule liée à l'effet Doppler-Fizeau : $\frac{\Delta\lambda}{\lambda_S} = \frac{v}{c}$, avec $\Delta\lambda = \lambda_R - \lambda_S$

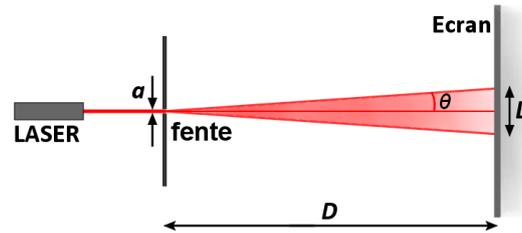
4. Quel est le signe de v s'il y a éloignement de la source et du récepteur ?

EXERCICE

09

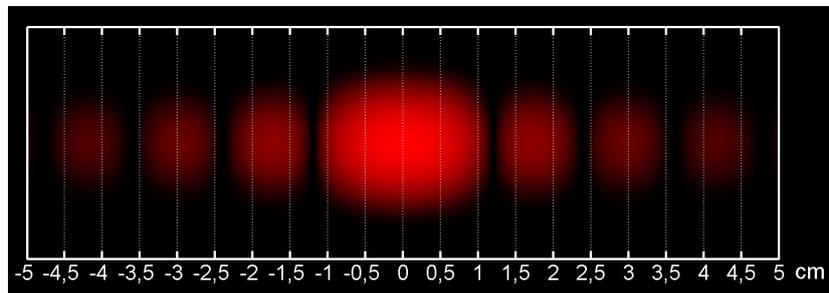
Mesure du diamètre d'un cheveu par diffraction

On cherche à mesurer le diamètre d'un cheveu humain. Etant donné que celui-ci est habituellement compris entre $50 \mu\text{m}$ et $100 \mu\text{m}$, on fait appel à la diffraction pour notre mesure, pour qu'elle soit précise. Pour observer la diffraction d'une fente, on aurait le montage ci-après :



En vertu du principe de Babinet, une fente de largeur a et un cheveu de même diamètre donnent exactement la même figure de diffraction. On peut donc remplacer la fente par le cheveu à étudier. On a $D = (1,50 \pm 0,05) \text{ m}$ et notre LASER a une longueur d'onde $\lambda = 635 \text{ nm}$.

La figure de diffraction obtenue sur l'écran est (figure à lire selon l'axe horizontal) :



- Rappelez la relation entre le demi-angle θ , λ et a .

- Exprimez également θ en fonction de L et de D . Pour cela, on supposera que θ est faible.

- Etablissez alors la relation : $\frac{\lambda}{a} = \frac{L}{2D}$. En déduire la valeur de a .

4. Estimez Δa à l'aide de la formule (l'incertitude sur la valeur de la longueur d'onde est négligeable) :

$$\Delta a = a \sqrt{\left(\frac{\Delta L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta D}{D}\right)^2}$$

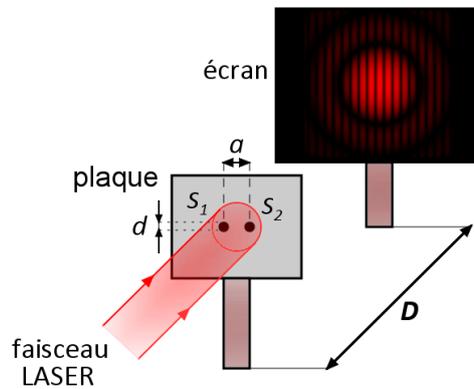
On prendra $\Delta L = 0,1$ cm. Conclure.

EXERCICE

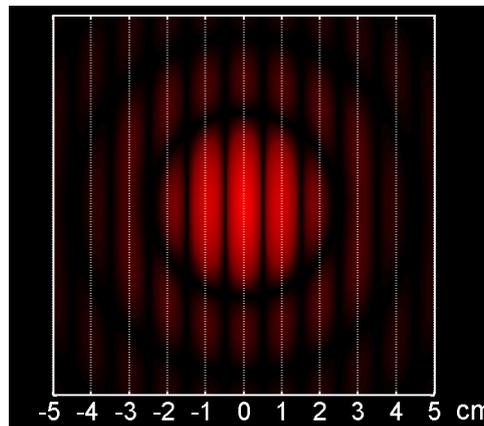
10

Interférences lumineuses

On considère le montage des trous de Young :



On recueille alors la figure suivante :

**Données :**

Distance entre la plaque et l'écran : $D = 1,50$ m

Diamètre des trous : $d = 50,0$ μm

Longueur d'onde du LASER : $\lambda = 650$ nm

Formule de l'interfrange : $i = \frac{\lambda D}{a}$

1. Indiquez les deux phénomènes physiques responsables de la figure obtenue.

2. Définissez ce qu'est l'interfrange. Le mesurer sur la figure.

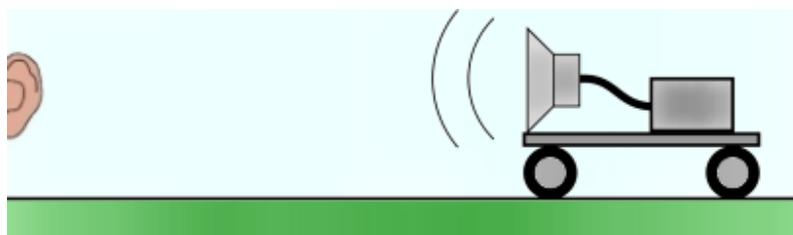
3. Déterminez a .

EXERCICE

11

Effet Doppler acoustique

Sur un mobile, on a placé un haut-parleur. Ce dernier émet des sons composés d'une seule fréquence, associée à une note de musique. Le mobile peut se rapprocher ou s'éloigner d'un observateur immobile.



2. En utilisant la propriété $\sqrt{1 + \varepsilon} \approx 1 + \frac{\varepsilon}{2}$ quand ε très proche de 0, établir que : $\delta = \frac{ax}{D}$
Pour cela, on admettra que $x \ll D$ et $a \ll D$.

3. Rappelez la définition de l'interfrange. A l'aide de la relation trouvée à la question 2., retrouvez alors la formule du cours : $i = \frac{\lambda D}{a}$



LES ONDES

Les ondes constituent une thématique qui est présente dans les programmes pour le BAC depuis fort longtemps. En conséquence, les exercices possibles sur les ondes sont plutôt nombreux et variés. C'est pour cela que nous leur consacrons cette clé du BAC. Rappelons que cette thématique englobe les chapitres 1 et 2 de ce module.



Notions générales à toutes les ondes

En premier lieu, il est important de savoir ce qu'est une onde. Pour rappel, on appelle onde progressive le phénomène de propagation d'une perturbation, de proche en proche, sans transport de matière mais avec transport d'énergie. Pour une onde mécanique (onde sonore par exemple), l'onde a besoin d'un milieu matériel pour se propager.

Ensuite, les ondes se propagent avec une célérité c (ou vitesse) donnée. Parmi les ondes, certaines sont périodiques. Parmi les ondes périodiques, certaines sont sinusoïdales. Ce sont celles que l'on utilise le plus dans les exercices. Elles ont une période T (en s), une fréquence f (en Hz ou s^{-1}) et une longueur d'onde λ (en m), liées entre elles par $\lambda = c T = \frac{c}{f}$.

Intensité sonore, niveau sonore et décibel

Pour les ondes sonores, en plus des grandeurs citées plus haut, on fait appel à l'intensité acoustique I (en W/m^2) intervenant par exemple dans la relation $I = \frac{P}{4\pi R^2}$.

Elle est liée au niveau sonore L (en décibel) par les relations $L = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$ ou $I = I_0 10^{L/10}$, où $I_0 = 10^{-12} W/m^2$.

On se rappellera aussi que :

- Si I est doublée, L augmente de 3 dB
- Si l'on a une source émettant à un niveau sonore L_1 et une autre source émettant à L_2 , et si $L_2 - L_1 \geq 10$ dB, alors le niveau sonore résultant sera très proche de L_2 .

Propriétés des ondes.

Cette année, on étudie 3 phénomènes associés aux ondes : la diffraction, les interférences et l'effet Doppler. La plupart du temps, ils concerneront les ondes lumineuses, ou éventuellement électromagnétiques et acoustiques (effet Doppler). Dans le cadre d'une question de cours, il est conseillé de savoir définir ces trois phénomènes avec précision. Dans bon nombre de sujets sur les propriétés des ondes, il est conseillé de bien connaître les formules liées à la diffraction d'une fente. Celle pour une ouverture circulaire est souvent donnée. Pour les interférences, il faudrait connaître notamment celle donnant le lien entre la différence de marche et l'état d'interférence. En principe, celle sur l'interfrange est donnée ou l'exercice propose de la retrouver. Concernant l'effet Doppler, les formules sont souvent données, mais il est possible de demander à l'élève de donner le bon signe dans une de ces formules. On se rappellera que la fréquence est plus forte quand la source se rapproche, et plus faible quand elle s'éloigne. Par la longueur d'onde, c'est le contraire.



Niveau d'intensité sonore

Dans bon nombre d'exemples, il peut être demandé de passer de l'intensité acoustique I au niveau sonore L , et inversement. Par exemple, il peut être demandé de « sommer » deux niveaux sonores provenant de deux sources. Pour cela, il convient de se rappeler que l'on ne peut pas sommer deux niveaux sonores directement. Il faut alors les convertir en intensités acoustiques via $I = I_0 10^{L/10}$ car elles peuvent être sommées, elles. Une fois l'addition effectuée, on obtient le niveau sonore résultant via $L = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right)$.

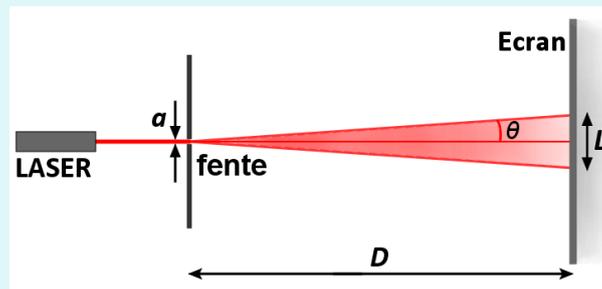
Evidemment, si l'on est dans une deux règles énoncées plus haut, on peut se dispenser du calcul. On rappelle ainsi que :

- Si I est doublée, L augmente d'environ 3 dB
- Si l'on a une source émettant à un niveau sonore L_1 et une autre source émettant à L_2 , et si $L_2 - L_1 \geq 10$ dB, alors le niveau sonore résultant sera très proche de L_2 .

Diffraction

Par exemple pour étudier la diffraction engendrée par une fente, il peut être demandé de trouver le lien entre la largeur a de ladite fente, de la longueur d'onde λ du LASER, de la largeur L de la tâche centrale de diffraction et de la distance D entre la fente et l'écran.

Il peut être intéressant de faire un schéma si l'énoncé n'en propose pas un :



Ensuite, en supposant l'approximation des angles faibles satisfaites, on écrit que le demi-angle de diffraction θ satisfait la relation $\theta = \frac{\lambda}{a}$. D'autre part, d'après le schéma, on note que $\tan(\theta) = \frac{L/2}{D}$, soit $\tan(\theta) = \frac{L}{2D}$. Là aussi, l'approximation des angles faibles est satisfaite, ce qui nous donne $\tan(\theta) \approx \theta$, et donc $\theta = \frac{L}{2D}$. En combinant ces deux relations, il vient $\frac{\lambda}{a} = \frac{L}{2D}$.

Effet Doppler

Par exemple dans le cadre de l'effet Doppler acoustique, il peut être demandé de trouver à quelle vitesse la source se déplace, le récepteur étant immobile. Dans la relation (souvent donnée par l'énoncé) $f_R = \frac{f_S}{1 \pm v_S/c}$, on cherche ainsi v_S , connaissant f_S , f_R et c . Concernant le choix du signe (\pm), $f_R > f_S$ lorsque la source se rapproche, il nous faudra donc le signe $-$. Lorsque la source s'éloigne, $f_R < f_S$, ce qui nous conduira à prendre le signe $+$.

Par exemple si la source se rapproche, on aura donc $f_R = \frac{f_S}{1 - v_S/c}$, que l'on réécrira comme $1 - v_S/c = \frac{f_S}{f_R}$, puis $1 - \frac{f_S}{f_R} = v_S/c$ et enfin $v_S = c \left(1 - \frac{f_S}{f_R} \right)$.

CORRECTIONS

1^{er} exemple

On trouve l'intensité acoustique de la première source via la relation $I_1 = I_0 10^{L_1/10}$, ce qui nous donne $I_1 = 10^{-12} \times 10^{4,50} \approx 3,16 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2$.

On fait de même pour la deuxième source : $I_2 = I_0 10^{L_2/10}$,

c'est-à-dire $I_2 = 10^{-12} \times 10^{5,00} \approx 1,00 \times 10^{-7} \text{ W/m}^2$.

L'intensité acoustique résultante vaut alors $I_1 + I_2$.

On en déduit alors le niveau sonore résultant $L = 10 \log\left(\frac{I_1+I_2}{I_0}\right) \approx 10 \log\left(\frac{3,16 \times 10^{-8} + 1,00 \times 10^{-7}}{10^{-12}}\right) \approx \mathbf{51,2 \text{ dB}}$.

2^{ème} exemple

Si l'on fait l'approximation des angles faibles, alors le demi-angle de diffraction θ (en rad) vérifie la relation

$\theta = \frac{\lambda}{a}$. D'autre part, le demi-angle de diffraction intervient aussi dans la formule $= \frac{L}{2D}$.

En fusionnant ces deux formules, il vient $\frac{\lambda}{a} = \frac{L}{2D}$. On extrait L , ce qui nous fait :

$$L = 2D \frac{\lambda}{a} \approx 2 \times 1,80 \times \frac{635 \times 10^{-9}}{50,0 \times 10^{-6}} \approx \mathbf{4,57 \text{ cm}}$$

3^{ème} exemple

Puisque la source se rapproche du récepteur, alors la formule doit s'écrire comme :

$$f_R = \frac{f_S}{1 - v_S/c}$$

A partir de cette relation, on extrait la vitesse v recherchée :

$1 - v_S/c = \frac{f_S}{f_R}$, ou $-v_S/c = \frac{f_S}{f_R} - 1$, ou encore $v_S/c = 1 - \frac{f_S}{f_R}$, et donc $v_S = c \left(1 - \frac{f_S}{f_R}\right)$. Numériquement, il vient alors :

$$v_S = 340 \times \left(1 - \frac{750}{760}\right) \approx \mathbf{4,47 \text{ m/s}}$$



Vous pouvez maintenant
faire et envoyer le **devoir n°1**

