

P1 : ONDES & RAYONNEMENTS

Plan du chapitre

Caractéristiques des ondes

- Perturbation
- Onde mécanique
- Onde électromagnétique
- Onde transversale
- Onde longitudinale
- Dimensions d'une onde
- Onde progressive
- Célérité (c)
- Retard (Δt)
- Onde progressive périodique
- Période (T)
- Fréquence (f ou ν)
- Longueur d'onde (λ)

Exemples d'ondes mécaniques

- La houle
- Les ondes sismiques
- Les ondes sonores

Ondes sonores

- Définition
- Détecteurs sonores
- Intensité et niveau sonore
- Analyse spectrale
- Hauteur et timbre

Rayonnements dans l'Univers

- Définition
- Sources de rayonnements
- Étude de l'Univers
- Absorption de rayonnements
- Détecteurs de rayonnements

Comportements ondulatoires

- Diffraction
- Interférences
- Effet Doppler

Caractéristiques des ondes

- 🔗 Définir une onde progressive à une dimension.
- 🔗 Connaître et exploiter la relation entre retard, distance et vitesse de propagation (célérité).
- 🔗 Définir, pour une onde progressive sinusoïdale, la période, la fréquence et la longueur d'onde.
- 🔗 Connaître et exploiter la relation entre la période ou la fréquence, la longueur d'onde et la célérité.

■ Perturbation

Une perturbation est la **modification** locale d'une ou plusieurs grandeur(s) physique(s) d'un milieu (hauteur, pression, position, champs électromagnétique).

🔗 Le pavé dans la mare

Lorsque l'on fait tomber un caillou dans une étendue d'eau calme, le caillou va créer une perturbation de la hauteur de la surface de l'eau à son point d'impact (d'où l'apparition de vagues). De plus, ce mouvement de l'eau va créer une perturbation de la pression de l'air dans son entourage (d'où l'apparition d'un son).



■ Onde mécanique

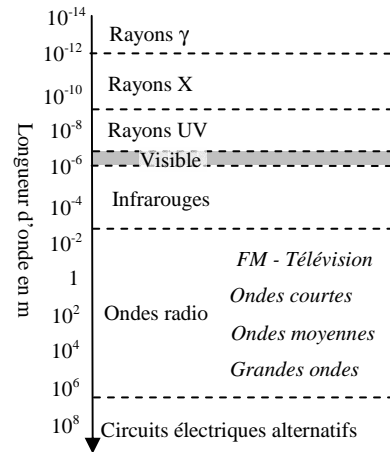
Une onde mécanique est la **propagation d'une perturbation** mécanique dans la matière, **sans transport de matière**, mais avec transport d'énergie. Une onde mécanique a besoin d'un milieu matériel pour se propager.

🔗 Le pavé dans la mare (bis)

La perturbation de la surface de l'eau créée par la chute du caillou est une perturbation mécanique : on a « déformé » la surface de l'eau. Cette perturbation va se propager sous forme de vaguelettes. Ces vaguelettes transportent de l'énergie (elles sont capables de faire bouger un petit objet à la surface de l'eau) mais elles ne déplacent pas l'eau de manière permanente (elles ne créent pas de courant, par exemple). De même, la perturbation de la pression de l'air est une perturbation mécanique : la densité des molécules d'air est modifiée localement. Cette perturbation se propage dans l'air sous forme d'ondes sonores.

■ Onde électromagnétique

Une onde électromagnétique est une perturbation du champ électromagnétique de l'espace qui se propage. Les ondes électromagnétiques sont classés en différentes catégories selon leur fréquence : ondes radio, infra-rouge, lumière visible, ultra-violet, rayons X et rayons γ . Les ondes électromagnétiques peuvent se propager dans le vide, contrairement aux ondes mécaniques.



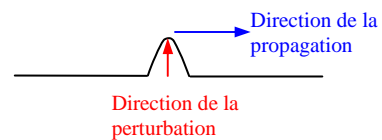
🌐 Ondes électromagnétiques

Remarque : un autre type d'onde, les *ondes gravitationnelles* qui sont la propagation de la perturbation du champ gravitationnel de l'espace, prédites par Einstein en 1915, ont été observées pour la première fois le 14 septembre 2015, après plus de 50 ans d'efforts. Ce ne sont ni des ondes mécaniques, ni des ondes matérielles.

🌐 Les ondes gravitationnelles détectées 100 ans après la prédiction d'Einstein

■ Onde transversale

Une onde est dite transversale si la direction de la perturbation est **perpendiculaire** à la direction de propagation de l'onde.



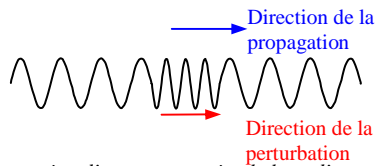
Propagation d'une impulsion le long d'une corde

🔗 Le pavé dans la mare (ter)

La perturbation créée à la surface de l'eau est une perturbation verticale. Elle est perpendiculaire à sa direction de propagation (la surface de l'eau, qui est, par définition, horizontale). Les vagues sont donc des ondes transversales.

■ Onde longitudinale

Une onde est dite longitudinale si la direction de la perturbation est **parallèle** à la direction de propagation de l'onde.



Propagation d'une compression le long d'un ressort

Le pavé dans la mare (quater)

La perturbation créée dans l'air est une vibration des molécules d'air dans une direction parallèle à la direction de propagation du son (nous reviendrons en détails sur les ondes sonores un peu plus loin dans ce chapitre). L'onde sonore est donc une onde longitudinale.

- [Transport d'énergie](#)
- [Ondes sur un ressort](#)
- [Onde longitudinale / transversale](#)
- [Onde sonore](#)

■ Dimensions d'une onde

Selon son milieu de propagation, une onde peut être à une, deux ou trois dimensions

Une dimension : la perturbation se propage sur un objet filiforme (ex. perturbation sur une corde).

Deux dimensions : la perturbation se propage sur une surface (ex. vague)

Trois dimensions : dans tout l'espace (ex. onde sonore).

Le pavé dans la mare (sexies)

Les vagues se propagent à la surface de l'eau, il s'agit d'une onde à deux dimensions. Les ondes sonores se propagent dans tout l'espace, il s'agit donc d'ondes à 3 dimensions.

Exercice 1 Ondes longitudinales et transversales

■ Onde progressive

Une onde progressive est une onde qui se **propage**, par opposition aux ondes **stationnaires** (étudiées en spécialité seulement).

Le pavé dans la mare (quinquies)

Les vagues et l'onde sonore créées se propagent. Il s'agit donc d'ondes progressives.

- [Onde progressive](#)
- [Onde stationnaire](#)
- [Houle stationnaire dans une piscine](#)

■ Célérité (c)

La célérité d'une onde est la vitesse de propagation de la perturbation. Elle dépend de la nature de l'onde et des caractéristiques du milieu.

Deux valeurs de célérité à connaître par coeur :

Célérité du son dans l'air : environ $340 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Célérité de lumière dans le vide : environ $3,00\cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

■ Retard (Δt)

Le retard d'une onde est la durée séparant la détection de l'onde par deux détecteurs situés à une distance d l'un de l'autre.

$$d = c \cdot \Delta t$$

- [Célérité d'une onde non-périodique](#)

Exercice 2 Retard et célérité

■ Onde progressive périodique

Si la grandeur $s(t)$ associée à une onde (pression de l'air, hauteur d'eau, etc), en un point donné, est une fonction périodique du temps, l'onde est dite **périodique**.

Une onde progressive non-périodique peut être une impulsion, une onde de choc, un soliton, etc.

- [Ondes périodique et non périodique](#)
- [Soliton dans un canal](#)

Si $s(t)$ est sinusoïdale, l'onde est dite **sinusoïdale**.

■ Période (T)

La période d'une onde périodique est la plus courte durée de reproduction d'un motif élémentaire de $s(t)$.

■ Fréquence (f ou ν)

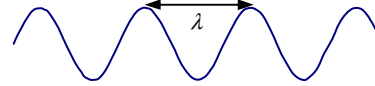
La fréquence d'une onde périodique est le nombre de répétitions du motif élémentaire par seconde. Unité : hertz (Hz).

$$f = 1/T$$

■ Longueur d'onde (λ)

La longueur d'onde d'une onde périodique est la plus courte longueur séparant 2 points dans le même état vibratoire.

$$\lambda = c \cdot T$$



- [Double périodicité d'une onde](#)

Exercice 3 Longueur d'onde de la lumière

TP P1.1 : Mesure de la vitesse des ultrasons

Pratiquer une démarche expérimentale pour déterminer la période, la fréquence, la longueur d'onde et la célérité d'une onde progressive sinusoïdale.

Pratiquer une démarche expérimentale mettant en œuvre un capteur ou un dispositif de détection.

Pratiquer une démarche expérimentale visant à étudier qualitativement et quantitativement un phénomène de propagation d'une onde.

Objectif : Déterminer la vitesse des ultrasons par mesure de leur longueur d'onde.

Démarche : À l'aide d'un émetteur et de deux récepteurs à ultrason, on mesure la longueur d'onde des ultrasons émis (par mesure de plusieurs longueurs d'onde pour une meilleure précision – méthode importante à retenir). Grâce à l'oscilloscope on mesure la période de ces ultrasons. Connaissant λ et T , on en déduit v .

Résultats : On trouve $v = 344 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ce qui est la valeur théorique attendue à moins de 1% d'erreur.

- [Simulation du TP P1.1](#)

Exercice 4 Principe du sonar

Un petit bonus pour votre culture générale

Comment Fizeau a-t-il déterminé la vitesse de la lumière en 1849 ?

- [Méthode de Fizeau pour déterminer la vitesse de la lumière](#)

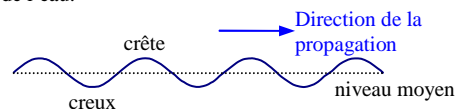
Exemples d'ondes mécaniques

Extraire et exploiter des informations sur les manifestations des ondes mécaniques dans la matière.

Extraire et exploiter des informations sur : des sources d'ondes et de particules et leur utilisation ; un dispositif de détection.

■ La houle

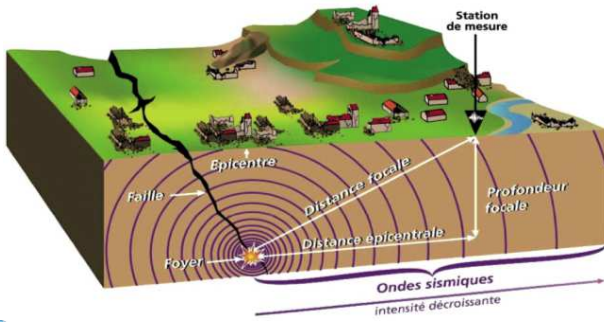
La houle est un mouvement ondulatoire de la surface de la mer qui est formé par un champ de vent éloigné de la zone d'observation. Il s'agit d'une onde mécanique transversale, en 2 dimensions car elle se propage à la surface de l'eau.



- [Houle](#)

■ Les ondes sismiques

Elles sont créées au cours d'un déplacement de la croûte terrestre. Le foyer du séisme correspond à la source de l'ébranlement. L'épicentre est le point à la surface de la Terre situé à la verticale du foyer.



- 🌐 [Ondes sismiques](#)
- 🌐 [Ondes sismiques 2](#)
- 🌐 [C'est pas sorcier : les séismes](#) (optionnel)
- 🌐 [Principe d'un sismomètre](#)
- 🌐 [Enregistrement par un sismomètre](#)

La **magnitude** mesure l'énergie dégagée par le séisme. On utilise l'**échelle de Richter** pour indiquer la valeur de la magnitude.

🌐 [Magnitude d'un séisme](#)

Exercice 5 Séisme et sismographe

■ **Les ondes sonores**

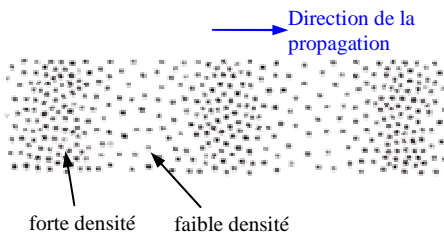
Les ondes sonores sont développées dans le paragraphe suivant.

Ondes sonores

📖 *Connaitre et exploiter la relation liant le niveau sonore à l'intensité sonore.*

■ **Définition**

Un son (ou onde sonore) est produit par une perturbation qui fait se déplacer la matière de part et d'autre de sa position d'équilibre. Onde périodique (pas forcément sinusoïdale), fréquence : 20 Hz à 20 kHz. Cette perturbation va créer des zones de grande densité de particules (haute pression) et des zones de faible densité de particules (faible pression).



Les ondes sonores sont des ondes mécaniques longitudinales en 3 dimensions (elles se propagent dans toutes les directions).

■ **Détecteurs sonores**

Oreille, microphone. Dans tous les cas, il s'agit d'une membrane mise en vibration par l'onde sonore.

- 🌐 [Onde sonore plane](#)
- 🌐 [Mouvement et distance à l'équilibre](#)
- 🌐 [Le son et l'oreille](#)
- 🌐 [Le son](#)

■ **Intensité et niveau sonore**

Intensité sonore I : puissance par unité de surface ($W \cdot m^{-2}$).

Niveau sonore L : lié à la « sensation » sonore ressentie. En décibel (dB).

$$L = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0} \text{ et } I = I_0 \cdot 10^{\frac{L}{10}}$$

Avec $I_0 = 10^{-12} W \cdot m^{-2}$ (seuil d'audition conventionnel).

Exemple	Niveau sonore (dB)	Perception humaine
Silence	0	
Murmures	30	Très tranquille
Bruit dans une bibliothèque	40	
Bruits domestiques	50	Légèrement dérangeant
Conversation normale	60	
Bruits dans un restaurant	70	Difficulté à parler au

Sèche-cheveux à 60 cm	80
Guitare électrique	100
Concert de rock	110
Klaxon à 1 m	120
Train	130

téléphone
Dérangeant
Très dérangeant
Insupportable

Exercice 6 Puissance et intensité sonore

■ **Analyse spectrale**

Décomposition de Fourier

Joseph Fourier, en 1822, stipule qu'une fonction périodique quelconque, de fréquence f , peut toujours être obtenue par addition de fonctions sinusoïdales de fréquence $f, 2f, 3f$, etc.

🌐 [Créer une fonction périodique quelconque](#)

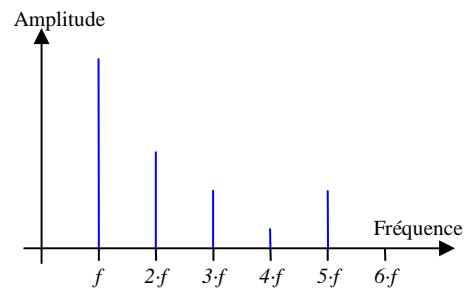
Fondamentale et harmoniques

La sinusoïde de fréquence f est appelée **fondamentale** ou **1^{ère} harmonique**.

La fonction de fréquence $n \cdot f$ est la **n ^{ième} harmonique**.

Spectre d'une fonction périodique

Le spectre d'une fonction périodique se présente sous la forme d'un graphique, ressemblant au graphique ci-dessous :



En abscisse : fréquence de l'harmonique

En ordonnée : son amplitude

On en déduit donc quelles sont les harmoniques présentes dans la fonction et quelles sont leurs amplitudes relatives.

🌐 [Créer une fonction périodique à partir d'un spectre](#)

■ **Hauteur et timbre**

TP 1.2 : Hauteur et timbre d'un son

📖 *Réaliser l'analyse spectrale d'un son musical et l'exploiter pour en caractériser la hauteur et le timbre.*

Problématique : Qu'est-ce qui différencie deux notes différentes d'un même instrument ? Deux mêmes notes de deux instruments différents ?

Démarche : On compare deux enregistrements de deux notes différentes d'un même instrument (situation a), puis de la même note jouée par deux instruments différents (situation b)

Résultats : La courbe temporelle montre que la période est différente pour les deux notes dans la situation a. Le spectre de ces deux notes montre que la fondamentale n'a pas la même fréquence dans les deux cas.

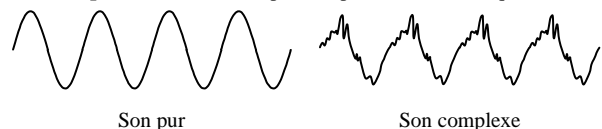
Dans la situation b, le spectre montre que l'intensité relative des différentes harmoniques n'est pas la même dans les deux cas, bien que la fréquence de la fondamentale n'ait pas changé.

Conclusion : Deux sons diffèrent par leur hauteur si leur fréquence est différente. Deux sons diffèrent par leur timbre s'ils ne présentent pas les mêmes harmoniques dans leur spectre.

La hauteur d'un son (aigu ou grave) dépend de la fréquence fondamentale. Son timbre dépend de son spectre, c'est-à-dire des amplitudes relatives des différentes harmoniques.

Un **son pur** (au sens physique, aucun intérêt sur le plan musical) est une onde sonore sinusoïdale. Un son pur ne possède donc qu'une seule harmonique : sa fondamentale.

Un **son complexe** est un son composé de plusieurs harmoniques.



🌐 [Créer un son musical de A à Z](#)

Rayonnements dans l'Univers

Extraire et exploiter des infos sur l'absorption de rayonnements par l'atmosphère terrestre et ses conséquences sur l'observation des sources de rayonnements dans l'Univers.

Connaître des sources de rayonnement radio, infrarouge et ultraviolet.

■ Définition

Rayonnement : processus d'émission d'énergie impliquant une onde ou une particule (synonyme : radiation).

■ Sources de rayonnements

Depuis la Terre, nous captions divers rayonnements électromagnétiques ainsi qu'un rayonnement cosmique particulaire.

Rayonnement particulaire

- Particules élémentaires : électrons, neutrinos, etc.
- Assemblages de particules élémentaires (par exemple noyaux formés de neutrons et de protons).
- Photons, particules associées aux ondes électromagnétiques.

Rayonnement électromagnétique

Contrairement aux ondes mécaniques, les ondes électromagnétiques ne nécessitent pas de milieu matériel pour se propager. Les sources des ondes électromagnétiques dans l'Univers diffèrent selon l'énergie des photons associés.

🌐 Spectre et onde EM

· **Ondes infrarouges, visibles et ultraviolettes** ont pour principales sources des corps chauffés (des étoiles dans l'Univers). La loi de Wien permet de faire le lien entre la température d'un corps noir et la longueur d'onde correspondant au maximum d'intensité émise par ce corps.

🌐 Loi de Wien

· **Ondes radio**, ou ondes hertziennes, sont produites sur Terre par des antennes, et dans l'espace par certaines étoiles en fin de vie, les pulsars, des gaz froids et des nuages de poussières.

· **Rayonnements ionisants (X ou gamma)** sont également créés dans le cosmos par des pulsars, des étoiles à neutrons, des naines blanches ou des phénomènes très énergétiques (absorption de matière par un trou noir, par exemple). Sur Terre, ils proviennent de corps radioactifs.

■ Étude de l'Univers

C'est grâce à l'analyse des ondes ou des particules que les scientifiques peuvent étudier les objets de l'Univers.

Chaque longueur d'onde apporte des informations différentes.

🌐 Galaxie M81 à différentes longueurs d'onde

🌐 Radioastronomie

🌐 Astronomie dans d'autres longueurs d'onde

■ Absorption de rayonnements

La Terre reçoit de toutes les directions de l'espace des rayonnements et des particules. Ces rayonnements interagissent avec l'atmosphère, ce qui empêche parfois leur détection (par exemple le rayonnement UV émis par le Soleil est absorbé en partie par l'atmosphère terrestre). Pour s'affranchir de cette limitation, certains détecteurs sont embarqués dans des engins spatiaux, comme le télescope Hubble.

Si ce flot ininterrompu n'était pas en grande partie arrêté par l'atmosphère, ses effets interdiraient toute vie sur Terre.

🌐 Absorption des ondes EM par l'atmosphère

■ Détecteurs de rayonnements

Les détecteurs de rayonnement peuvent être extrêmement différents dans leur forme et dans leur principe de fonctionnement selon le type de rayonnement que l'on souhaite détecter. En voici quelques exemples de détecteurs de rayonnements.

Capteur CCD ou CMOS (1969)

Selon leur construction et les filtres qui sont appliqués à eux, ils peuvent être sensibles au proche infrarouge, à la lumière visible et aux UV. Ce sont des capteurs très utilisés. Ils sont notamment utilisés dans les appareils photo numérique.

Compteur Geiger(1928)

C'est un appareil capable de détecter les rayonnements ionisants (particules α et β , rayons γ et rayons X).

🌐 Compteur Geiger

Chambre à brouillard (1911)

La chambre à brouillard permet de mettre en évidence des particules chargées en déplacement.

🌐 Chambre à brouillard

Exercice 7 📖 La mission Planck

Comportements ondulatoires

■ Diffraction

📖 Savoir que l'importance du phénomène de diffraction est lié au rapport λ/a .

📖 Connaître et exploiter la relation $\theta = \lambda/a$.

📖 Identifier les situations physiques où il est pertinent de prendre en compte le phénomène de diffraction.

Définition

La **diffraction** est la modification de la propagation d'une onde (ouverture du faisceau), sans changement de λ lorsque l'onde rencontre un obstacle de taille a suffisamment petit par rapport à λ .

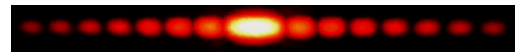
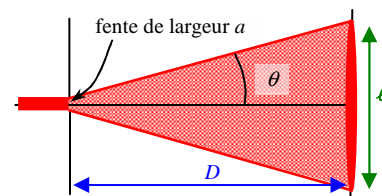


Figure de diffraction créée par une fente verticale, en lumière monochromatique.

La tache la plus brillante est appelée « tache centrale ». Sa largeur est notée ℓ sur le schéma ci-dessous.

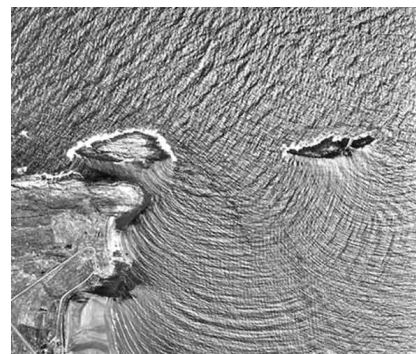


Vue de dessus du dispositif de diffraction. La fente est verticale et la figure de diffraction est horizontale

θ : angle entre la limite du faisceau définissant la **tache centrale** et la direction initiale de l'onde (en **radian**).

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

Toutes les ondes peuvent être diffractées.



Diffraction de la houle

Cas de la lumière blanche

Dans le cas de la lumière blanche, la diffraction provoque des irisations. Les figures de diffraction correspondant à chaque longueur d'onde se superposent.



🌐 Diffraction par une fente

🌐 Diffraction par un trou

📖 Méthode : calcul de ℓ

Calculer ℓ si l'on connaît λ , a et D :

• $\tan \theta = \frac{1}{2} \times \ell / D = \ell / 2D$

• Si θ est assez petit et exprimé en radian, alors $\tan \theta \approx \theta$

• Or, $\theta = \lambda/a$, donc : $\frac{\lambda}{a} = \frac{\ell}{2D}$

TP 1.3 : Étude de la diffraction

Pratiquer une démarche expérimentale visant à étudier ou utiliser le phénomène de diffraction dans le cas des ondes lumineuses.

Mettre en œuvre un protocole expérimental utilisant un laser comme outil d'investigation ou pour transmettre de l'information

Problématique : Quelle est l'influence de la taille de l'obstacle sur le phénomène de diffraction ? Comment mesurer le diamètre d'un cheveu grâce à un rayon laser ?

I. Influence de la taille de l'obstacle

Démarche : On mesure la largeur ℓ de la tache centrale de diffraction d'un faisceau laser créée par un fil de largeur a . Tout autre facteur maintenu constant par ailleurs, on répète cette mesure pour des fentes de largeurs différentes.

Résultats : En traçant le graphique $\ell = f(1/a)$ on obtient une fonction linéaire. Cela signifie que la taille de la tache centrale est inversement proportionnelle à la largeur de la fente qui a diffracté le rayon laser.

II. Mesure du diamètre d'un cheveu

Démarche : On place un cheveu sur le trajet du faisceau laser, dans les mêmes conditions que l'expérience précédente. On mesure la taille de la tache centrale de diffraction.

Résultats : Par lecture graphique, on trouve une valeur de 50-80 μm pour le diamètre du cheveu. Cette mesure peut être vérifiée avec le microscope.

Exercice 8 Tache centrale de diffraction

Exercice 9 Diffraction et longueur d'onde

Exercice 10 Surfez sur la vague

■ Interférences

Connaitre et exploiter les conditions d'interférences constructives et destructives pour les ondes monochromatiques

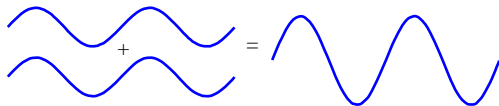
Superposition d'ondes

Deux ondes de même nature passant par un même point se superposent. La perturbation totale $S(t)$ en ce point est la somme algébrique des perturbations dues à chacune des ondes : $S(t) = s_1(t) + s_2(t)$.

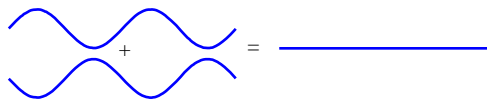
Superposition de deux ondes

Formation des interférences

Lorsque deux ondes de même fréquence et de même nature arrivent au même point **en phase**, il y a **interférence constructive**.



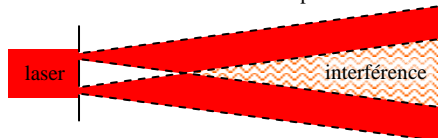
Si elles arrivent en **opposition de phase**, il y a **interférence destructive**.



Interférences de vagues

Interférences lumineuses

On peut facilement observer des interférences lumineuses en faisant passer un faisceau laser à travers deux fentes proches.



Dans la zone où les deux faisceaux se superposent, il y a interférence. On obtient la figure ci-dessous.

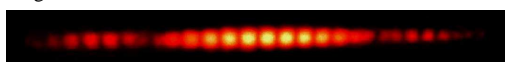


Figure obtenue par un dispositif de fentes doubles en lumière monochromatique

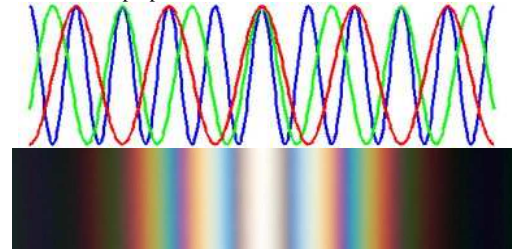
On reconnaît un motif de diffraction, lui-même découpé en une série régulière de zones sombres et de zones lumineuses. Nous étudierons ce motif en TP au chapitre P11, à l'aide d'un capteur numérique.

Conditions interférences
Interférences lumineuses

En lumière blanche

Comme pour la diffraction, le motif obtenu par interférence dépend de la longueur d'onde de la lumière utilisée.

Dans le cas de la lumière blanche (polychromatique), les figures d'interférences, se superposent. Ceci crée des irisations.



Exercice 11 Expérience des fentes d'Young

Exercice 12 Traitement anti-reflets

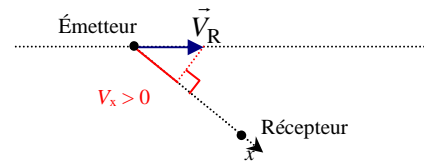
■ Effet Doppler

Exploiter l'expression du décalage Doppler de la fréquence dans le cas des faibles vitesses.

Utiliser des données spectrales et un logiciel de traitement d'images pour illustrer l'utilisation de l'effet Doppler comme moyen d'investigation en astrophysique.

Lorsqu'un émetteur d'une onde périodique de fréquence v_E est en mouvement par rapport à un récepteur, la fréquence v_R perçue par le récepteur peut être différente de v_E .

Effet Doppler



$v_x > 0$ si l'émetteur se rapproche du récepteur. $v_R > v_E$.
 $v_x < 0$ dans le cas contraire et $v_R < v_E$

Mouvement émetteur-récepteur

$$v_R = v_E \cdot \left(1 + \frac{v_x}{c_{\text{onde}}} \right)$$

Mouvement d'un réflecteur

$$v_R = v_E \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot v_x}{c_{\text{onde}}} \right)$$

TP 1.4 : Détermination d'une vitesse par effet Doppler

Mettre en œuvre une démarche expérimentale pour mesurer une vitesse en utilisant l'effet Doppler.

Objectif : Mesurer la vitesse d'un vélo par effet Doppler.

Démarche : une personne sur un vélo, portant une source sonore émettant un son pur, se déplace en ligne droite et à vitesse constante en direction d'un enregistreur sonore. L'expérience est filmée. On détermine, grâce à Audacity, la fréquence reçue avant et après passage du vélo. Puis on en déduit la vitesse du vélo. On vérifie cette valeur par un pointage de la vidéo montrant le mouvement du vélo.

Résultats : les résultats obtenus sont compatibles entre eux. Cependant, à cause du peu de précision avec laquelle Audacity indique la fréquence mesurée, la précision de la mesure de vitesse par effet Doppler n'est pas très grande.

Exercice 13 Quand les physiciens voient rouge