

CHAPITRE 5

Phénomènes ondulatoires

Dans ce chapitre, nous abordons deux **phénomènes ondulatoires** (autrement dit, associés aux ondes) :

- ▷ les **interférences**, qui se traduisent par une amplification ou une atténuation lorsqu'on superpose plusieurs ondes sinusoïdales de même fréquence dans des conditions particulières ;
- ▷ la **diffraction**, qui se traduit par un étalement du profil spatial d'une onde en aval d'un obstacle de petite taille.

Leur étude est motivée par leur impact en ingénierie : suivant la situation, on les met à profit ou on essaie de s'en affranchir, ce qui implique de savoir quelles conditions expérimentales favorisent leur observation.

Historiquement, l'observation et l'analyse théorique de la diffraction et des interférences lumineuses ont contribué à mettre en évidence le caractère ondulatoire de la lumière. Nous verrons toutefois que ce modèle a des limites dans certaines situations.

1 Phénomène d'interférences

1.1 Présentation du phénomène

Lorsque plusieurs **ondes** se superposent à un instant et dans une zone d'espace donnés, on observe une unique onde résultante qui est la somme des ondes individuelles.

Dans le cas de deux ondes s_1 et s_2 , l'onde totale observée s_{tot} a pour expression :

$$s_{\text{tot}} = s_1 + s_2.$$

Ce **principe de superposition** a une conséquence sur le signal observé en un point de l'espace où deux ondes sinusoïdales se superposent.

On considère deux ondes sinusoïdales de même nature, **synchrones** (autrement dit, de même fréquence f), de même célérité, et d'amplitudes respectives A_1 et A_2 .

Dans ces conditions, le signal associé à l'onde résultante est lui aussi sinusoïdal, de fréquence f . Son amplitude A_{tot} est comprise entre $|A_1 - A_2|$ et $A_1 + A_2$, et dépend du **déphasage** entre les deux ondes au point considéré.

On observe des **interférences** entre ces deux ondes sinusoïdales si l'amplitude de l'onde résultante au point de l'espace où on observe le signal associé correspond à l'un des deux cas extrêmes :

- ▷ $A = A_1 + A_2$: les interférences sont **constructives**.
Cela implique que $A_{\text{tot}} \geq \max(A_1; A_2)$: c'est un phénomène d'amplification ;
- ▷ $A_{\text{tot}} = |A_1 - A_2|$: les interférences sont **destructives**.
Cela implique que $A \leq \min(A_1; A_2)$: c'est un phénomène d'atténuation.

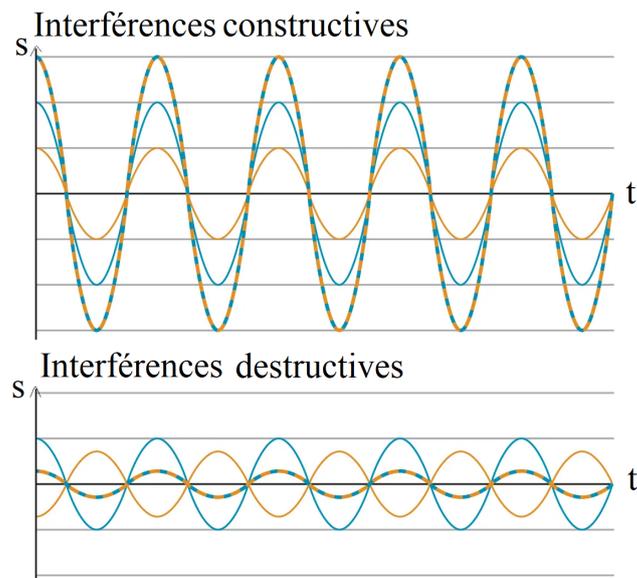


FIGURE 1 – Interférences constructives et destructives (signal résultant en pointillés)

Le cas $A_1 = A_2$ et $A_{\text{tot}} = 0$ (interférences maximalement destructives) est intéressant quelle que soit la nature des ondes : au point de l'espace où on observe le signal, ce dernier est nul, alors même qu'il résulte de l'addition de deux signaux non nuls !

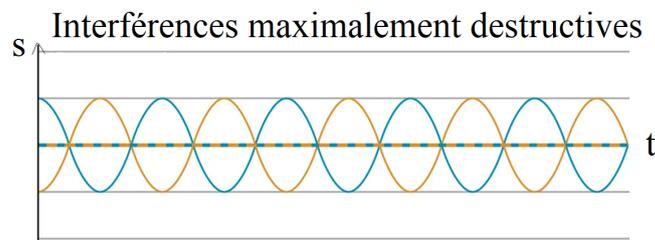


FIGURE 2 – Interférences maximalement destructives (signal résultant en pointillés)

Le cas $A_1 = A_2 = A$ et $A_{\text{tot}} = 2A$ (interférences maximalement constructives) est surtout intéressant dans le cas d'ondes lumineuses. Comme l'intensité lumineuse est proportionnelle à la valeur moyenne du carré de l'amplitude, on observe en un point où les interférences sont constructives une lumière quatre fois plus brillante que ce qu'aurait donné une seule source lumineuse !

Exercice d'application 1 :

CAPACITÉ TRAVAILLÉE :

Exprimer les conditions d'interférences constructives ou destructives.

Au vu de ce qui précède :

1.a. Lister les conditions pour que deux ondes sinusoïdales interfèrent de manière maximalement constructive, en termes de fréquences, d'amplitudes et de déphasage entre les deux signaux au point où les ondes se superposent.

1.b. Les traduire par une relation simple entre $s_1(t)$ et $s_2(t)$.

- 2.a. Lister les conditions pour que deux ondes sinusoïdales interfèrent de manière maximalement destructive, en termes de fréquences, d'amplitudes et de déphasage entre les deux signaux au point où les ondes se superposent.
- 2.b. Les traduire par une relation simple entre $s_1(t)$ et $s_2(t)$.

Exercice d'application 2 :

Un musicien fait l'acquisition d'un casque antibruit actif. Un microphone détecte les ondes sonores entrant dans le casque et un haut-parleur miniature émet une autre onde sonore quasiment en même temps. Dans certaines conditions, le porteur entend un son atténué.



Une simulation de l'enregistrement du son au niveau de l'oreille du musicien est proposée ci-dessous :

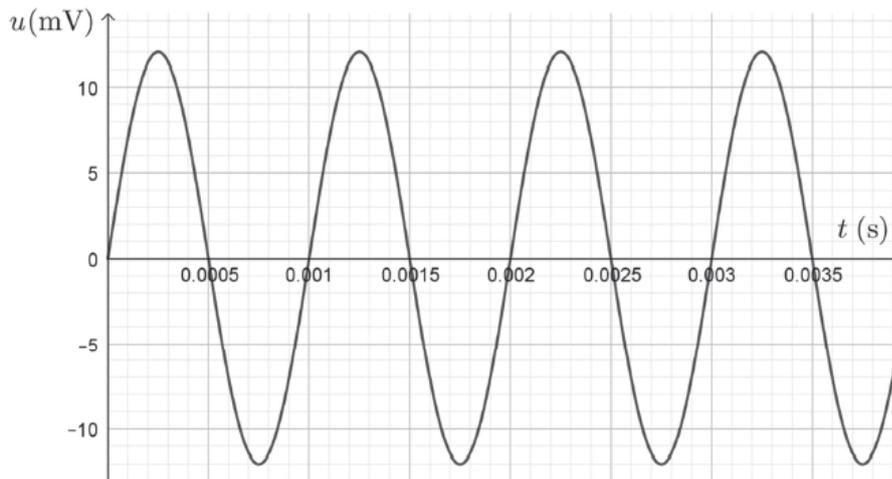


FIGURE 3 – Simulation de l'enregistrement d'un son (tension électrique aux bornes du microphone)

1. Justifier que ce son est audible par l'Homme.
2. Tracer la représentation graphique du signal issu du haut-parleur situé dans le casque, au niveau de l'oreille de l'auditeur, pour que ce dernier n'entende pas de son. Comment pourrait-on qualifier les deux signaux ?
3. Nommer le phénomène mis en jeu entre les deux ondes sonores.

1.2 Rôle du déphasage

On a mis en évidence graphiquement le rôle du **déphasage** $\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1$ entre les deux signaux associés aux ondes dans le phénomène d'interférences. Une approche algébrique, complémentaire, s'appuie sur la **formule d'addition des cosinus** :

$$\cos(a) + \cos(b) = 2 \cos\left(\frac{a+b}{2}\right) \cos\left(\frac{a-b}{2}\right).$$

Si on superpose deux signaux sinusoïdaux synchrones de même amplitude A , le signal résultant a pour expression :

$$s_{\text{tot}}(t) = A \cos(\omega t + \phi_1) + A \cos(\omega t + \phi_2) = 2A \cos\left(\omega t + \phi_1 + \frac{\Delta\phi}{2}\right) \cos\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right).$$

On en conclut que deux ondes sinusoïdales synchrones interfèrent :

- constructivement aux endroits où les signaux sont **en phase** : $\Delta\phi = 2n\pi$ avec n un nombre entier relatif ;
- destructivement aux endroits où les signaux sont en **opposition de phase** : $\Delta\phi = (2n + 1)\pi$.

Si de plus $A_1 = A_2 = A$, l'amplitude de l'onde résultante est respectivement maximale et égale à $2A$ ou minimale et égale à 0 .

Pour comprendre dans quelles situations expérimentales on peut observer des interférences, il faut s'intéresser aux causes du déphasage entre les deux signaux aux lieux où les ondes se superposent.

Il y en a deux, dont les effets se combinent :

- ▷ une différence de phase à l'origine entre les signaux émis par les deux sources d'onde se retrouve aux lieux où les ondes se superposent ;
- ▷ la propagation des ondes introduit un déphasage supplémentaire, dû à la différence de distance parcourue.

C'est ce dernier cas que nous allons analyser à présent. Les ondes sont ici supposées émises en phase.

Quels que soient la direction et le sens de propagation des deux ondes, elles interfèrent constructivement en un point donné si elles parcourent la même distance pour y parvenir. Les interférences peuvent aussi avoir lieu si les distances sont différentes, mais cela requiert des conditions particulières.

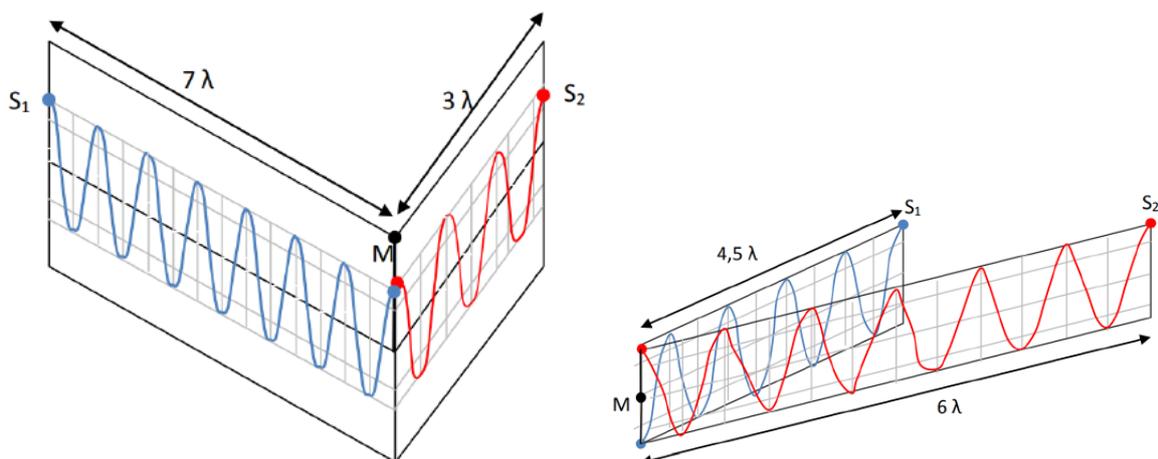


FIGURE 4 – Gauche : un cas où les signaux sont en phase au point M ; droite : un cas où les signaux sont en opposition de phase au point M

On définit la **différence de marche** comme la différence de distance parcourue par deux ondes pour atteindre un point M donné depuis leurs **sources** S_1 et S_2 :

$$\delta = |S_2M - S_1M|.$$

On observe des interférences constructives aux lieux où la différence de marche est un multiple entier de leur **longueur d'onde** λ :

$$\delta = n\lambda,$$

où n est un nombre entier relatif, et des interférences destructives aux lieux où la différence de marche est un multiple entier de leur longueur d'onde, auquel on additionne une demi-longueur d'onde :

$$\delta = \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda.$$

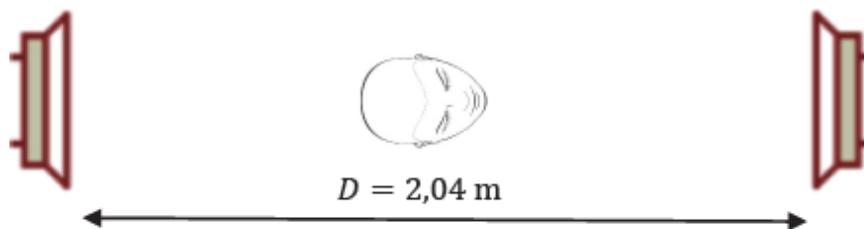
Exercice d'application 3 :

CAPACITÉ TRAVAILLÉE :

Exprimer les conditions d'interférences constructives ou destructives.

En se plaçant entre deux haut-parleurs, le son entendu peut être très fortement atténué pour certaines positions de l'auditeur si les deux sons sont émis en phase.

La situation est modélisée sur le schéma ci-dessous :



On se place initialement à égale distance des haut-parleurs. La taille de la tête n'est pas prise en compte, la fréquence des deux signaux émis est de 1 000 Hz.

1. Justifier que le son entendu à cet endroit a une intensité maximale.
2. Déterminer de quelle distance minimale on doit se déplacer pour que le son entendu ait une intensité minimale.

Donnée : on rappelle que l'intensité sonore est proportionnelle au carré de l'amplitude de l'onde sonore.

En résumé, deux ondes sinusoïdales interfèrent en un point donné de l'espace où elles se superposent si :

- ▷ elles sont de même nature ;
- ▷ elles sont synchrones (elles ont la même fréquence) ;
- ▷ le déphasage entre les signaux au point d'observation garde au cours du temps une valeur particulière : $2n\pi$ pour des interférences constructives, $(2n + 1)\pi$ pour des interférences destructives.

La **formule de Fresnel**, que nous admettrons, permet d'exprimer l'amplitude du signal résultant observé en un point M lorsque deux ondes issues des points sources S_1 et S_2 s'y superposent :

$$A_{tot} = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\Delta\phi(M))}$$

où le déphasage entre les deux signaux au point M a pour expression :

$$\Delta\phi(M) = 2\pi \frac{\delta(M)}{\lambda} + \phi_2(S_2) - \phi_1(S_1),$$

avec

$$\delta(M) = |S_2M - S_1M|$$

la différence de marche au point M.

1.3 Interférences entre ondes mécaniques : aspects spatiaux

Des interférences entre **ondes mécaniques** dans deux dimensions d'espace peuvent être visualisées avec des ondes à la surface de l'eau. Dans l'illustration ci-dessous, on fait osciller deux batteurs de façon synchrone à la surface d'un lac :



FIGURE 5 – Images extraites de la vidéo intitulée "The original double slit experiment" de la chaîne Youtube Veritasium

La grandeur physique qui décrit l'onde est la hauteur locale de la surface de l'eau mesurée par rapport à sa position au repos. On observe des zones, fixes dans l'espace, où l'onde résultante a une amplitude maximale (interférences constructives) ou minimale (interférences destructives) : ce sont les **franges d'interférences**.

On peut aussi simuler cette expérience à échelle réduite grâce à une **cuve à ondes** munie de deux souffleurs.

Une simulation numérique permet d'en faire varier facilement les paramètres pour étudier leur influence :

https://phyanim.sciences.univ-nantes.fr/Ondes/cuve_ondes/interference_ondes_circulaires.php

2 Phénomène de diffraction

Le phénomène de **diffraction** désigne la modification du profil spatial d'une onde quand sa propagation est limitée par un obstacle.

Le paramètre qui conditionne le phénomène de diffraction est la largeur a de l'obstacle, qui sera à comparer à une longueur caractéristique de l'onde : sa longueur d'onde λ .



FIGURE 6 – Diffraction d'une onde à la surface de l'eau par un creux dans une digue (photographie aérienne)

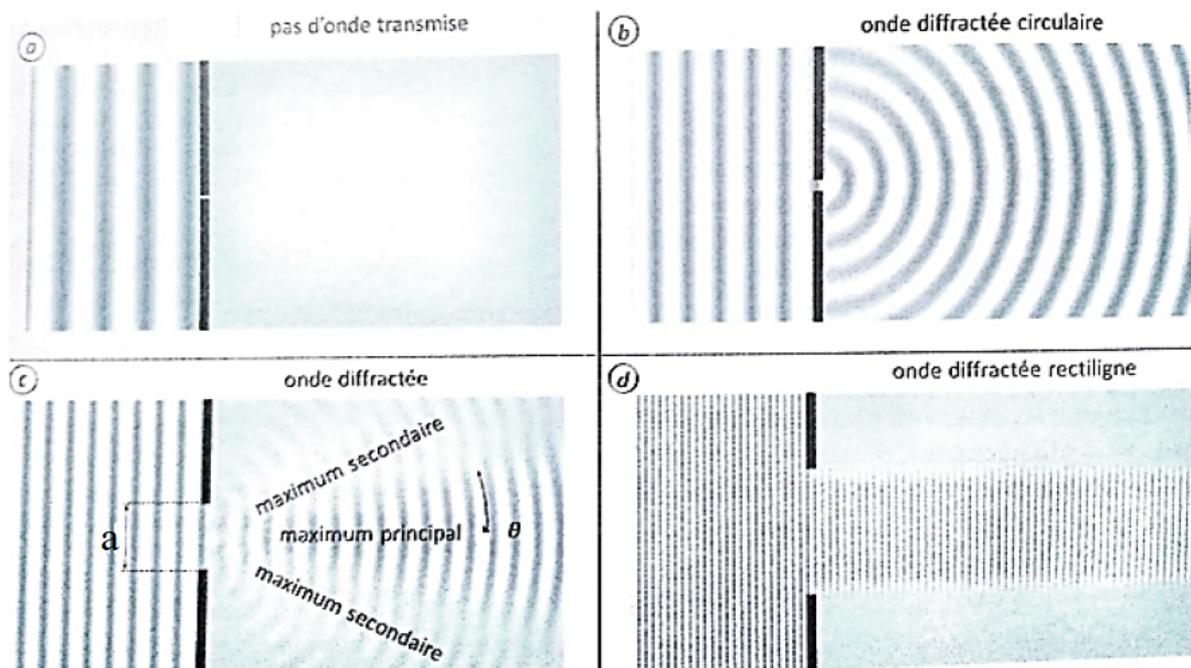


FIGURE 7 – Influence de la largeur a de l'obstacle sur le phénomène de diffraction

Les différents cas de figure sont illustrés ci-dessus, sur des schémas qui représentent des ondes à la surface de l'eau dans une cuve à ondes.

L'expérience montre que si l'onde diffractée est spatialement périodique de longueur d'onde λ , la longueur d'onde n'est pas modifiée à l'issue de la diffraction.

On constate qu'il n'y a pas de diffraction dans les cas :

- a) où $a \ll \lambda$: aucune onde n'est transmise ;
- d) où $a \gg \lambda$: l'onde transmise est seulement redimensionnée et présente toujours une structure d'**onde plane** : le **front d'onde** reste rectiligne.

Il y a diffraction dans les cas b) et c), où la largeur a de l'ouverture est du même

ordre de grandeur que la longueur d'onde λ de l'onde. Au passage de l'ouverture, l'onde incidente donne naissance à une onde diffractée de profil spatial (semi-) circulaire, concentrée dans un certain secteur angulaire de demi-ouverture angulaire θ .

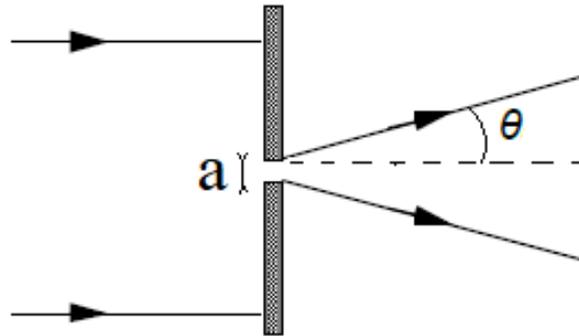


FIGURE 8 – Définition de l'angle θ caractéristique de la diffraction

L'expérience montre que cet angle θ augmente quand la taille de l'obstacle diminue ou quand la longueur d'onde λ augmente.

Pour un obstacle rectangulaire de largeur a , on dispose de la relation :

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

Comme l'angle θ est en général très petit par rapport à 1 rad, en utilisant la relation $\sin(\theta) \simeq \theta$ (approximation des petits angles), on simplifie cette relation :

$$\theta \simeq \frac{\lambda}{a}.$$

L'expérience montre que cette relation approchée reste valable si l'obstacle a une forme différente, nous l'appliquerons donc de façon générale.

En tant que phénomène ondulatoire, la diffraction concerne tous les types d'ondes :

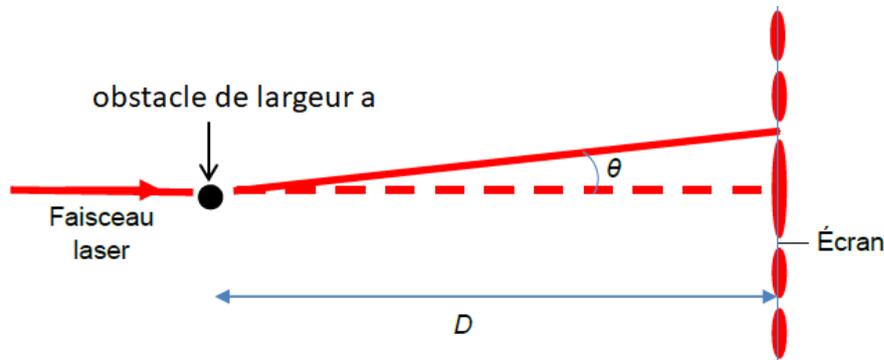
- Les ondes radio, caractérisées par des longueurs d'onde allant du mètre au kilomètre, sont diffractées par le relief (collines, montagnes...), d'où leur réception sans vision directe de l'émetteur.
- Les ondes sonores, caractérisées par des longueurs d'onde allant du centimètre au mètre, sont diffractées par les objets du quotidien. La diffraction des ondes sonores par une porte ouverte ou entrebaillée permet à deux personnes de communiquer même si elles sont situées dans deux pièces différentes et ne se voient pas.
- En radiocristallographie, les rayons X sont diffractés par les réseaux cristallins dont les paramètres de maille sont de l'ordre de 0,1 nm. L'analyse de la figure de diffraction obtenue permet de remonter à la structure cristalline.

3 Nature de la lumière

La question de la nature de la lumière a donné lieu à une **controverse scientifique** qui a duré plusieurs siècles. L'observation des phénomènes de diffraction et d'interférences lumineuses a grandement contribué à clarifier le débat.

3.1 Diffraction de la lumière

Dans les expériences actuelles de diffraction de la lumière, on s'appuie sur un dispositif similaire à celui ci-dessous (vu de dessus), où l'obstacle mesure de l'ordre de 1 à 100 μm :



On place un écran à une distance D de l'obstacle, grande devant la largeur a de ce dernier ($D \gg a$) de sorte qu'on peut considérer que l'écran se trouve "à l'infini". On observe y observe une **figure de diffraction** dont la forme dépend de celle de la fente.



FIGURE 9 – Figures de diffraction produites par des obstacles de différentes formes

Pour analyser une figure de diffraction, on peut enregistrer, avec un capteur CCD par exemple, son profil d'**intensité lumineuse** (ou d'**éclairage**). Cette grandeur est proportionnelle au carré de l'onde, moyenné sur le temps d'intégration du capteur.

L'**interfrange** i désigne la distance entre deux annulations successives de l'intensité lumineuse en dehors de la tache centrale (qui mesure $2i$). Pour un obstacle rectangulaire, on trouve (cf TP2) que

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

Pour établir simplement ce résultat approché, on part de la relation $\sin(\theta) = \frac{\lambda}{a}$, puis on utilise l'approximation des petits angles : $\sin(\theta) \simeq \tan(\theta)$ pour $\theta \ll 1$ rad. Comme $\tan(\theta) = \frac{i}{D}$, le résultat en découle.

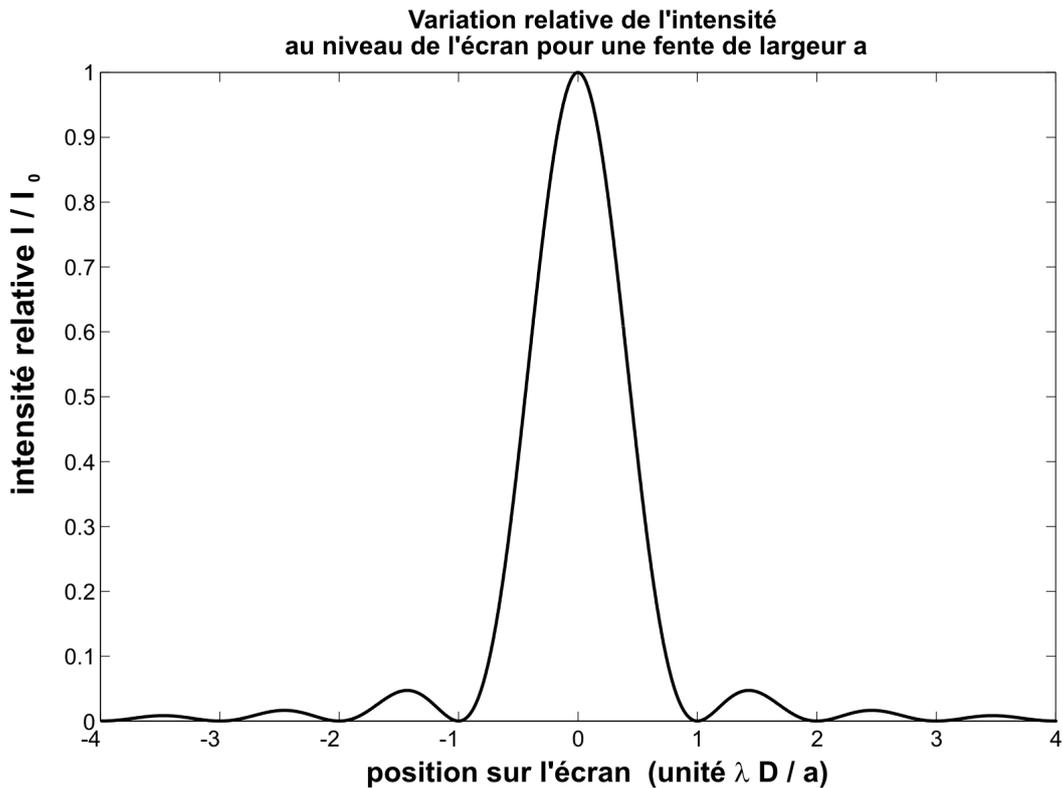
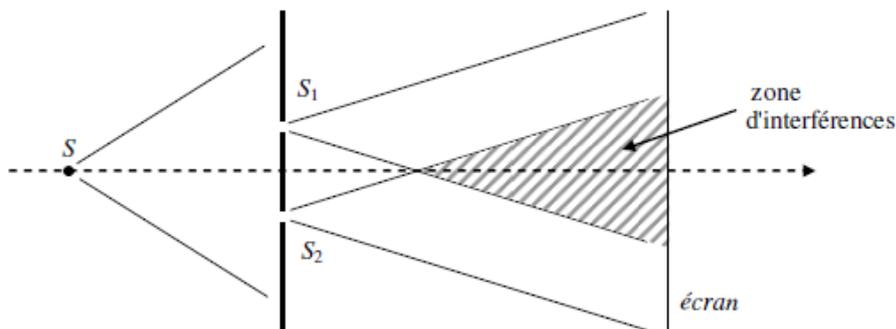


FIGURE 10 – Simulation du profil d'intensité lumineuse au niveau de l'écran, telle qu'elle serait enregistré avec un capteur CCD, pour un obstacle en forme de fente rectangulaire de largeur a

3.2 Interférences lumineuses

On peut observer des interférences avec les ondes lumineuses en utilisant le dispositif des **fentes d'Young**, schématisé ci-dessous :



On sépare en deux une onde primaire émise par une source unique S pour lui faire suivre deux trajets différents. On intercale entre la source primaire S et l'écran un plan percé de deux fentes d'Young. L'onde primaire rencontre l'obstacle, et les deux fentes S_1 et S_2 diffractent la lumière dans un cône d'autant plus ouvert que les fentes sont étroites.

Sur un écran placé à grande distance des fentes, on observe une **figure d'interférences**, qui pour des fentes rectangulaires très fines par rapport à leur espacement a l'allure suivante :

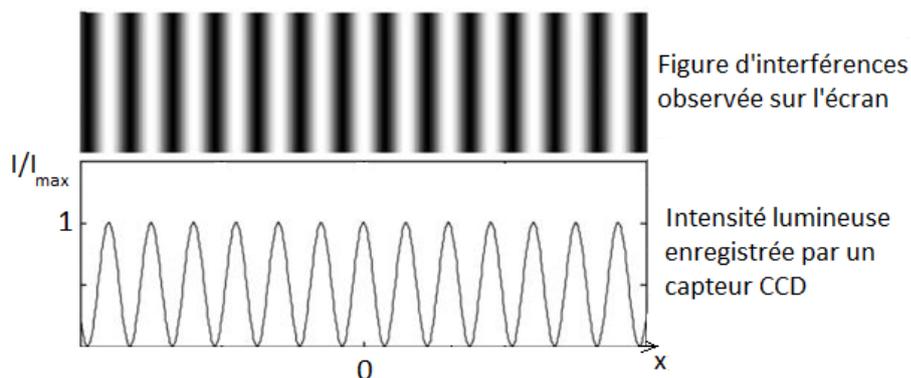


FIGURE 11 – Figure d'interférences observée sur un écran perpendiculaire au plan des sources, à proximité du plan des sources, pour des trous ou des fentes fines

Si la distance b qui sépare les milieux des fentes est comparable à leur épaisseur a , les phénomènes de diffraction et d'interférences se manifestent simultanément.

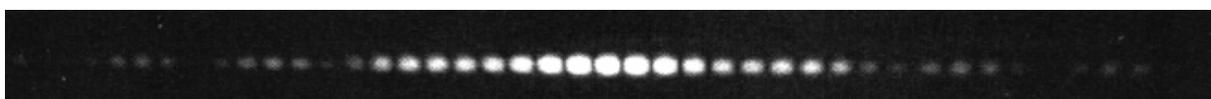


FIGURE 12 – Figure d'interférences observée pour des fentes d'Young dont l'épaisseur n'est pas négligeable par rapport à leur écartement

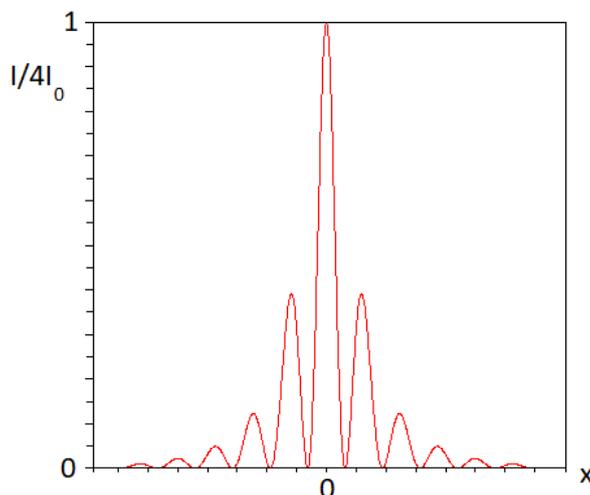


FIGURE 13 – Profil d'intensité sur un écran, obtenu avec des fentes d'Young "épaisses" et proches l'une de l'autre

Les interférences lumineuses conduisent à deux résultats impressionnants :

- ▷ En certains points, l'obscurité est totale alors même qu'on y superpose deux ondes lumineuses !
- ▷ Aux points où on additionne deux ondes lumineuses, l'intensité lumineuse est 4 fois supérieure à celle de chacune des ondes séparées !

Cela est un peu moins contre-intuitif quand on l'interprète de la manière suivante : l'énergie lumineuse totale disponible est toujours la même, elle est juste répartie de manière non uniforme sur l'écran.

On constate par ailleurs que les lieux où l'intensité s'annule sont séparés par une distance fixe, qu'on appelle encore une fois l'**interfrange**, notée i . L'expression de l'interfrange dans le cas des interférences dues à deux fentes fines dont les centres sont séparés par une distance b est (cf TP3)

$$i = \frac{\lambda D}{b}.$$

Pour visualiser l'effet des différents paramètres :

https://phyanim.sciences.univ-nantes.fr/Ondes/lumiere/interference_lumiere.php

3.3 Nature duale de la lumière

Les phénomènes de diffraction et d'interférences lumineuses décrits ci-dessus mettent en évidence le caractère ondulatoire de la lumière. Les aspects mathématiques de la théorie de l'**optique ondulatoire** (ou optique physique) ont été développés par Fresnel.

La théorie ondulatoire s'avère en revanche incapable d'expliquer l'effet photoélectrique, le spectre du corps noir et l'existence de spectres de raies. La résolution de ces problèmes a acté la naissance de la **physique quantique**. L'idée clé est la suivante : lorsque la lumière interagit avec la matière, elle se comporte comme une assemblée de particules quantiques : les **photons**.

La lumière est un objet hybride entre une onde et une assemblée de photons : on parle de **dualité onde-particule**. Nous traiterons ces deux aspects séparément, car l'un ou l'autre prédomine nettement suivant la situation expérimentale.

3.3.1 Modèle ondulatoire, onde électromagnétique

Quand elle se propage, la lumière est modélisée par une **onde électromagnétique**. Les grandeurs physiques associées à cette onde sont un **champ électrique** \vec{E} , et un **champ magnétique** \vec{B} , qui vibrent orthogonalement à la direction de propagation : cette onde est transversale.

Une **lumière monochromatique** (qu'on ne peut pas décomposer en différentes couleurs) est modélisée par une **onde sinusoïdale**. On lui associe une longueur d'onde λ , une fréquence ν (lettre grecque qui se prononce "nu"), et une célérité c .

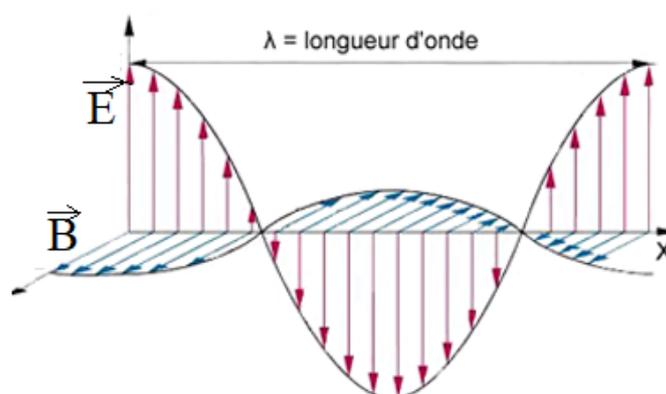


FIGURE 14 – Schéma d'une onde électromagnétique monochromatique (sinusoïdale)

L'œil humain est sensible à la **longueur d'onde dans le vide** de la lumière, qui conduit à la perception d'une couleur. Pour une radiation monochromatique correspondant à de la lumière visible, la longueur d'onde est comprise dans un intervalle [400nm;800nm] environ. Les plus petites longueurs d'onde sont associées à la couleur violette, les plus grandes au rouge.

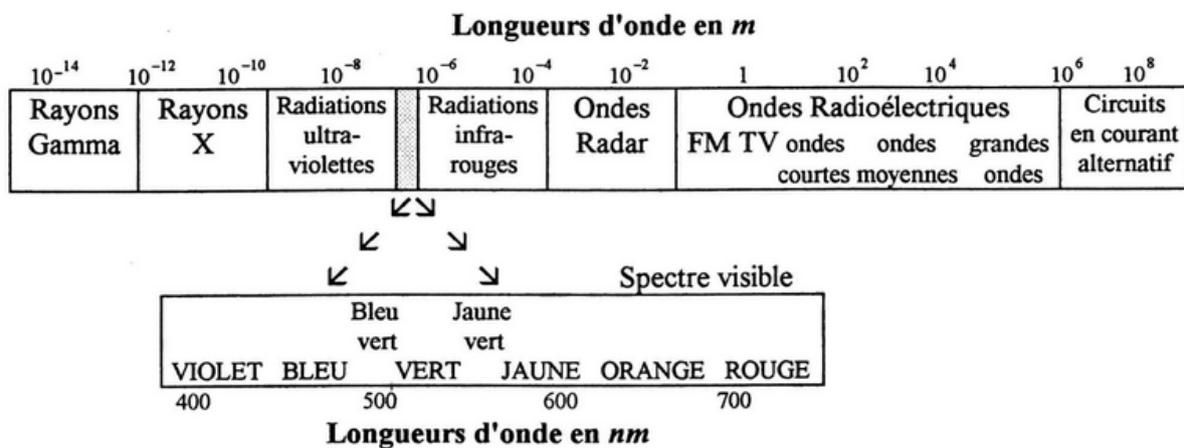
La célérité de la lumière vaut $c = 3,00 \times 10^8 \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ dans le vide. Dans les milieux matériels transparents, la vitesse de propagation v est plus faible que dans le vide.

Fréquence, longueur d'onde et vitesse de propagation dans le vide sont liées :

$$c = \lambda \nu,$$

où c est exprimée en mètre par seconde, λ en mètre et ν en hertz.

La lumière n'est qu'un type particulier d'onde électromagnétique, on distingue différents domaines suivant la longueur d'onde dans le vide :



3.3.2 Modèle particulaire, flux de photons

Le modèle particulaire de la lumière modélise la lumière par un flux de particules de masse nulle appelées **photons**, qui se déplacent à la célérité de la lumière. Ce modèle est utilisé essentiellement pour décrire l'interaction entre lumière et matière.

D'après la théorie quantique, les électrons qui orbitent autour du noyau d'un atome ont une énergie **quantifiée**. Cela signifie que cette énergie ne peut prendre que des valeurs particulières bien précises. L'état de plus basse énergie accessible est l'**état fondamental**, les états d'énergie plus élevée sont des **états excités**.

Un électron peut passer de l'état fondamental à un état excité en absorbant une énergie égale à la différence d'énergie entre le niveau excité et le niveau fondamental. Si cette énergie est retirée à la lumière, cet échange est modélisé par l'**absorption** d'un photon par l'électron.

Une fois l'électron excité, il peut retomber dans un état d'énergie plus bas par **émission** d'un photon, dont l'énergie est égale à la différence entre l'énergie de l'état excité de départ et l'énergie de l'état d'arrivée.

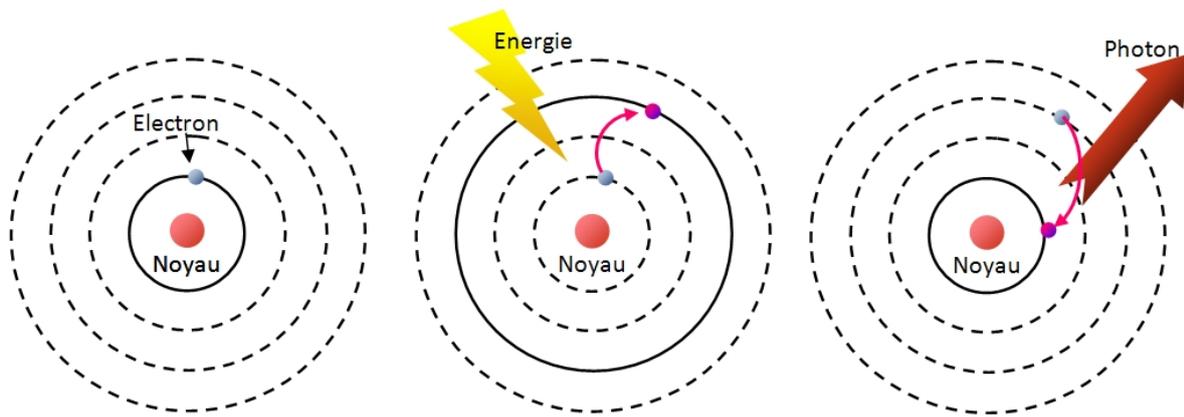


FIGURE 15 – Représentation schématique des processus d’absorption et d’émission

L’énergie E d’un photon est liée à la fréquence ν de l’onde électromagnétique associée par la **relation de Planck** :

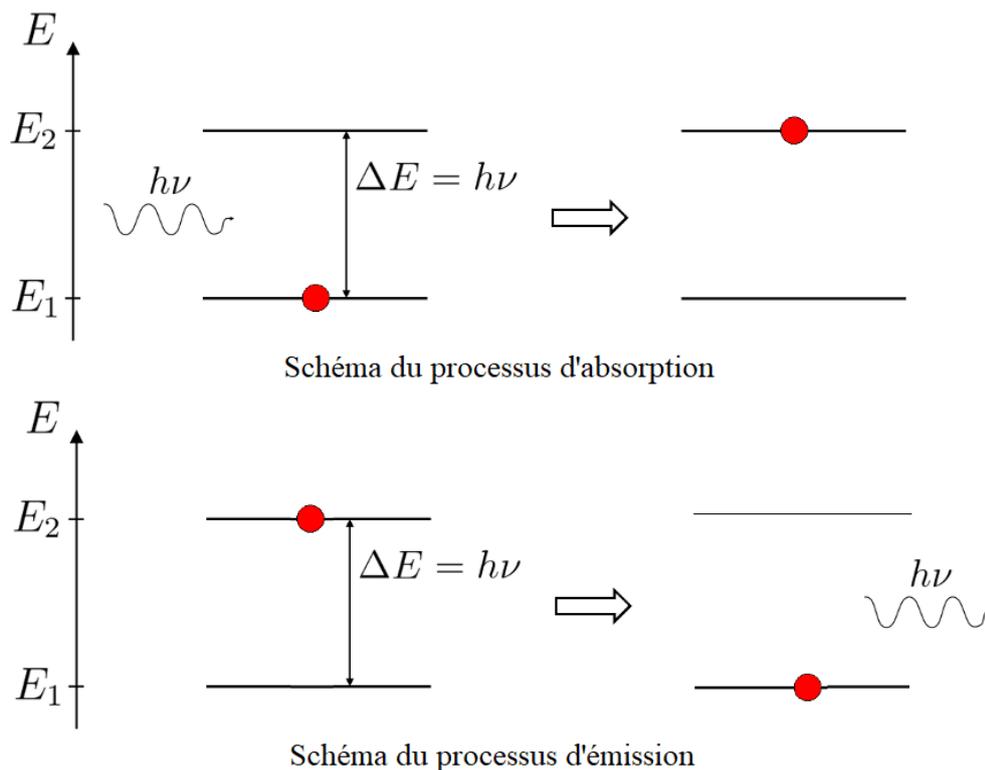
$$E = h\nu,$$

où la **constante de Planck** $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$ joue le rôle de facteur de conversion.

Cela implique que les processus d’émission et d’absorption de lumière ne peuvent avoir lieu que si la fréquence de l’onde électromagnétique qui la modélise a précisément la valeur qui correspond à l’écart entre les niveaux d’énergie impliqués :

$$|\Delta E| = h\nu,$$

où $|\Delta E| = |E_2 - E_1|$ désigne l’écart entre deux niveaux d’énergie numérotés 1 et 2.



La présence des raies d'un élément chimique dans le **spectre d'émission** d'une source lumineuse prouve la présence de cet élément dans cette source, tandis que la présence de ces raies dans un **spectre d'absorption** prouve la présence de l'élément dans un milieu traversé par la lumière. En **spectroscopie**, on met à profit ces propriétés pour déterminer la composition chimique de sources de lumière ou de milieux gazeux.

Exercice d'application 4 :

CAPACITÉ TRAVAILLÉE :

Utiliser l'expression reliant l'énergie d'un photon à la fréquence.

1. La radiothérapie est un traitement contre le cancer. À l'aide d'un accélérateur linéaire de particules, on expose une personne à un rayonnement ionisant d'une fréquence voisine de 3×10^{20} Hz pour bloquer la capacité des cellules cancérigènes à se multiplier.

Calculer l'énergie transportée par un photon en joules (J). La convertir en mégaelectronvolts (MeV). On rappelle que $1\text{eV} = 1,6 \times 10^{-19}\text{J}$. Comparer avec la valeur de l'énergie d'un photon dans le visible (2eV en moyenne). Commenter.

2. Une plaque de zinc est soumise à un rayonnement de fréquence $\nu = 8,11 \times 10^{14}$ Hz. Sous l'effet de ce rayonnement, certains électrons sont arrachés de la plaque et des atomes de zinc sont ionisés, ce qui provoque l'apparition d'un courant électrique. C'est une manifestation de l'effet photoélectrique.

Calculer l'énergie d'un photon associé au rayonnement mis en jeu, puis déterminer la longueur d'onde correspondante. Commenter.

3. Une lampe germicide émet des radiations avec une longueur d'onde de 254 nm. Elle est utilisée notamment pour tuer les bactéries, détruire les virus, désinfecter les eaux ou l'air dans les hôpitaux.

Calculer l'énergie des photons associés à ces radiations. Commenter.

4. Certaines télécommandes utilisent des ondes électromagnétiques de fréquence $\nu = 3,2 \times 10^{14}$ Hz.

Calculer la longueur d'onde correspondante. Commenter.

