

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 du signal lorsqu'on superpose plusieurs ondes sinusoïdales de même fréquence dans des conditions de déphasage particulières ;
- ▷ la **diffraction**, qui se traduit par un étalement du profil spatial d'une onde dans de nouvelles directions d'espace après son passage par 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. Il est donc utile de savoir quelles conditions expérimentales favorisent leur observation. Historiquement, l'observation et l'analyse théorique de la diffraction et des interférences lumineuses ont aussi contribué à mettre en évidence le caractère ondulatoire de la lumière. Nous verrons que le modèle ondulatoire de la lumière a néanmoins des limites.

Ce chapitre introduit la notion de **déphasage entre deux signaux sinusoïdaux**, puis met en évidence son rôle dans le phénomène d'interférence entre deux ondes sinusoïdales de même fréquence. Le phénomène de diffraction est décrit sans apporter d'explication théorique. Un paragraphe d'ouverture souligne certaines limites du modèle ondulatoire de la lumière.

Sauf mention explicite du contraire, on raisonnera sur des signaux de même amplitude par souci de simplicité.

1 Déphasage entre deux signaux sinusoïdaux

1.1 Lien entre déphasage et décalage temporel

Lorsqu'on représente simultanément sur un même graphique deux signaux sinusoïdaux $s_1(t)$ et $s_2(t)$ de même fréquence mais de phases à l'origine ϕ_1 et ϕ_2 différentes, cela se traduit par un **décalage temporel** Δt non nul entre ces deux signaux.

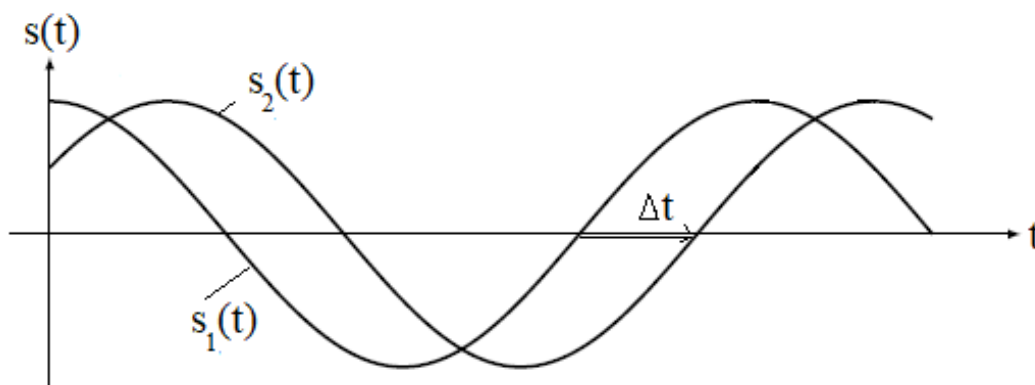


FIGURE 1 – Mise en évidence d'un décalage temporel entre deux signaux sinusoïdaux de même amplitude, de même fréquence, mais de phase à l'origine différente

Le décalage temporel Δt correspond au **retard algébrique** du signal s_2 par rapport au signal s_1 :

$$s_2(t) = s_1(t - \Delta t).$$

Si $\Delta t > 0$, le signal s_2 est **en retard** par rapport au signal s_1 ; si $\Delta t < 0$, le signal s_2 est **en avance** sur le signal s_1 .

Le **déphasage** du signal s_2 par rapport au signal s_1 désigne la différence de leurs phases. Comme ils ont même fréquence, ce déphasage est la différence de leurs phases à l'origine :

$$\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1.$$

Le lien entre le déphasage $\Delta\phi$ et le décalage temporel Δt peut être étudié empiriquement (autrement dit, en expérimentant) grâce à une **simulation numérique** (un code Python est disponible sur Cahier de Prépa).

On remarque alors que :

- Si $\Delta\phi = 0$, les deux signaux ne sont pas décalés temporellement. On dit alors qu'ils sont **en phase** ;
- Si $\Delta\phi \in]0; 2\pi[$, le signal s_2 est en avance sur le signal s_1 : $\Delta t < 0$;
- Si $\Delta\phi = 2\pi$, les deux signaux ont été décalés temporellement d'une période exactement par rapport au cas où $\Delta\phi = 0$. Comme leurs graphes se recouvrent, les signaux sont à nouveau en phase.

On met en évidence une périodicité du décalage temporel en fonction du déphasage : chaque fois que le déphasage augmente de 2π , le décalage temporel diminue d'une période.

Si on explore les déphasages négatifs ($\Delta\phi < 0$), on constate que le signal s_2 est à présent en retard sur le signal s_1 ($\Delta t > 0$). Chaque fois que le déphasage diminue de 2π , le décalage temporel augmente d'une période.

Enfin, une étude plus poussée met en évidence la proportionnalité entre décalage temporel et déphasage.

La formule ci-dessous résume toutes ces observations. Elle fait le lien entre le déphasage entre deux signaux sinusoïdaux de même fréquence et leur déphasage :

$$\frac{\Delta\phi}{2\pi} = -\frac{\Delta t}{T},$$

où le déphasage $\Delta\phi$ est exprimé en radian (rad). Elle permet de passer d'un décalage temporel à un déphasage et inversement.

Remarque : avec un déphasage exprimé en degré ($^\circ$), on aurait :

$$\frac{\Delta\phi}{360^\circ} = -\frac{\Delta t}{T}.$$

La formule qui relie décalage temporel et déphasage se démontre en quelques lignes dans le cas de deux signaux de même amplitude :

$$s_2(t) = A \cos(\omega t + \phi_2) = A \cos(\omega t + \Delta\phi + \phi_1),$$

d'une part, et d'autre part :

$$s_2(t) = s_1(t - \Delta t) = A \cos(\omega(t - \Delta t) + \phi_1),$$

ce qui montre que

$$\Delta t = -\frac{\Delta \phi}{\omega},$$

dont la formule découle en utilisant la propriété

$$\omega = \frac{2\pi}{T}.$$

Exercice d'application 1 :

CAPACITÉ TRAVAILLÉE :

Reconnaître une avance ou un retard de phase.

Passer d'un décalage temporel à un déphasage et inversement.

Dans l'exemple illustré sur la Figure 1 ci-dessus :

1. Indiquer, en justifiant, si le signal s_2 est en avance ou en retard sur le signal s_1 .
2. Déterminer la valeur du déphasage $\Delta \phi = \phi_2 - \phi_1$.

1.2 Déphasages particuliers

On donne un nom à quelques cas particuliers de déphasage (à une constante additive près, multiple entier de 2π) :

- Si $\Delta \phi = 0$, les signaux sont **en phase** : on ne voit pas de décalage temporel ;
- Si $\Delta \phi = \pm \frac{\pi}{2}$ les signaux sont **en quadrature de phase** : ils sont décalés d'un quart de période.
- Si $\Delta \phi = \pi$ les signaux sont **en opposition de phase** : ils s'annulent en même temps mais quand l'un est maximal, l'autre est minimal ;

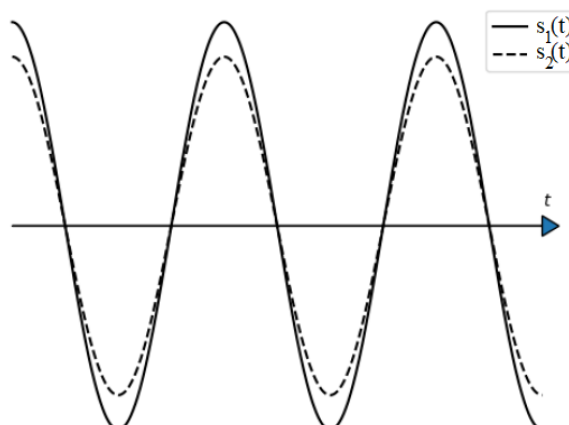


FIGURE 2 – Représentation graphique de deux signaux en phase

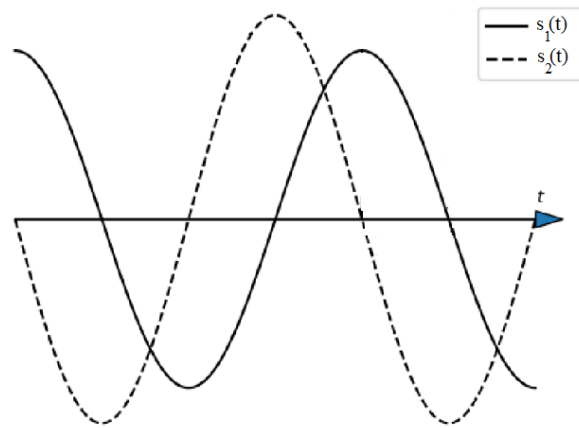


FIGURE 3 – Représentation graphique de deux signaux en quadrature de phase

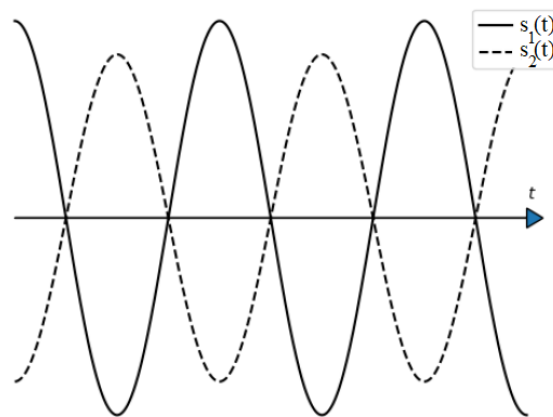


FIGURE 4 – Représentation graphique de deux signaux en opposition de phase

2 Phénomène d'interférences

2.1 Principe de superposition

Lorsque plusieurs **ondes** se superposent à un instant et dans une zone d'espace donnés, on observe une 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 des conséquences sur le signal observé en un point de l'espace où deux ondes sinusoïdales se superposent.

2.2 Superposition de deux ondes synchrones déphasées

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 , qui se superposent en un point de l'espace où on place un capteur pour enregistrer le signal résultat.

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 :

- ▷ $A_{\text{tot}} = A_1 + A_2$: 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**.

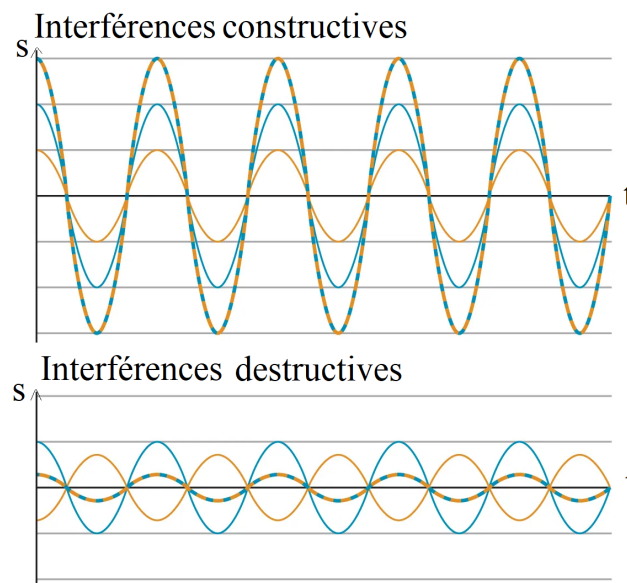


FIGURE 5 – Interférences constructives et destructives (signal résultant en pointillés)

Le cas où $A_1 = A_2$ et $A_{\text{tot}} = 0$ (interférences maximalement destructives) est le plus impressionnant d'un point de vue observationnel. 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. Pour des ondes sonores, la superposition de deux sons conduit au silence. Pour des ondes lumineuses, la superposition de deux ondes lumineuses conduit à l'obscurité.

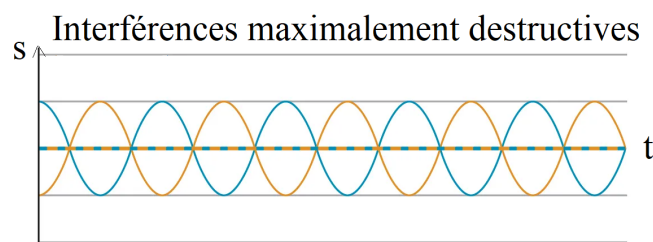


FIGURE 6 – Interférences maximalement destructives (signal résultant en pointillés)

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 au carré de l'amplitude du signal lumineux, on observe en un point où les interférences sont constructives un point lumineux quatre fois plus brillant 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 de même nature 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 de même nature 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.

Dans ce casque, un microphone détecte l'onde sonore incidente et un haut-parleur miniature émet une autre onde sonore quasiment en même temps, qui se propage en direction de l'oreille de l'utilisateur. Ce dernier entend un son qui correspond à la superposition des deux signaux sonores au niveau de son oreille, très atténué par rapport au son qui est entré dans le casque.

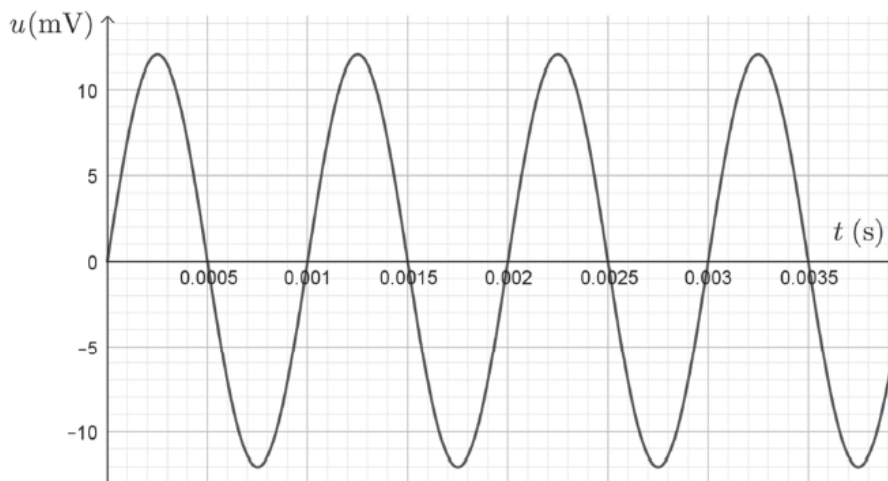


FIGURE 7 – Simulation de l'enregistrement du signal sonore incident au niveau de l'oreille de l'auditeur (tension électrique aux bornes d'un microphone fictif)

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.

2.3 Rôle du déphasage : approche analytique

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

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

L'amplitude du signal résultant vaut donc

$$A_{\text{tot}} = 2A \left| \cos\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) \right|.$$

La valeur de cette amplitude est conditionnée par celle du déphasage.

On en conclut que deux ondes sinusoïdales synchrones interfèrent :

- maximalement constructivement aux endroits où les signaux sont **en phase** : $\Delta\phi = 2n\pi$ avec n un nombre entier relatif et l'amplitude vaut $2A$;
- maximalement destructivement aux endroits où les signaux sont en **opposition de phase** : $\Delta\phi = (2n+1)\pi$ et l'amplitude s'annule.

2.4 Causes de déphasage entre deux ondes

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 peut introduire un déphasage supplémentaire, en cas de différence de distance parcourue depuis la ou les source(s) des ondes et le point où elles se superposent.

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 depuis leur source pour y parvenir.

Des interférences peuvent aussi avoir lieu si les distances sont différentes, mais cela requiert des conditions particulières, comme illustré ci-dessous par des exemples.

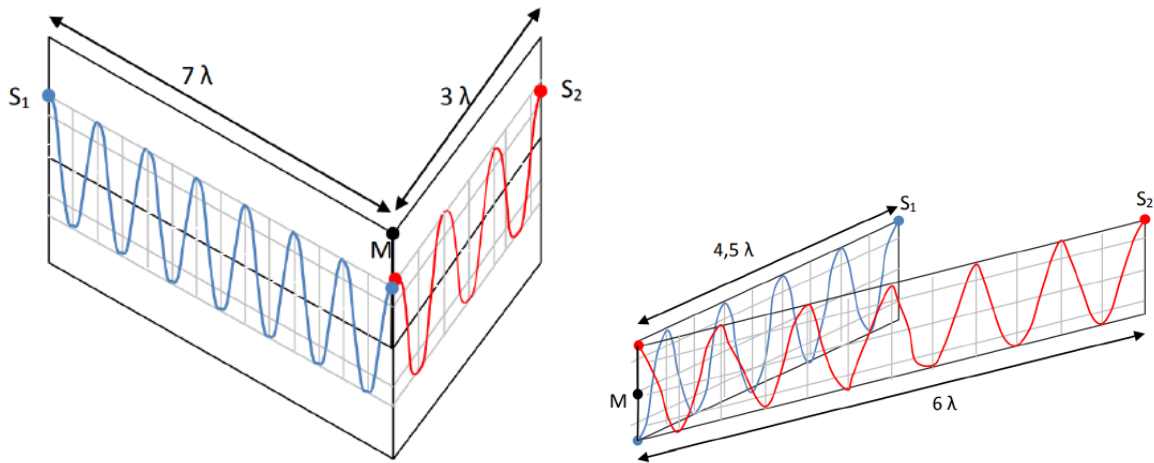


FIGURE 8 – Gauche : un cas où les signaux sont en phase au point M ; droite : un cas où les signaux sont en opposition de phase au point M

On définit la **différence de chemin** (ou différence de marche) δ en un point M comme la différence de distance parcourue par deux ondes pour atteindre ce point M depuis leurs **sources** respectives S_1 et S_2 :

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

On observe des interférences constructives aux lieux où la différence de chemin est un multiple entier de la **longueur d'onde** λ commune aux deux ondes :

$$\delta = n\lambda,$$

où n est un nombre entier relatif.

On observe des interférences destructives là où la différence de chemin est un multiple entier de la longueur d'onde, auquel on additionne une demi-longueur d'onde :

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

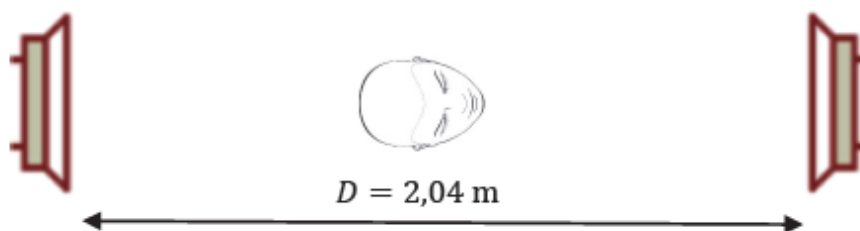
Exercice d'application 3 :

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.

2.5 Résumé : conditions d'interférences entre deux ondes

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** 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 :

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

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 chemin au point M. Dans le cas le plus général, c'est cette formule pour le déphasage qui permet de prévoir si des interférences seront observées ou non au point M, ainsi que leur nature le cas échéant.

2.6 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.

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). On observe d'autres zones, fixes dans l'espace, où l'onde résultante a une amplitude minimale (interférences destructives). Ces zones sont des **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



FIGURE 9 – Images extraites de la vidéo intitulée "The original double slit experiment" de la chaîne Youtube Veritasium

3 Phénomène de diffraction

Le phénomène de **diffraction** désigne la modification du profil spatial d'une onde après un obstacle qui gêne sa propagation libre.



FIGURE 10 – Diffraction de vagues par un creux dans une digue

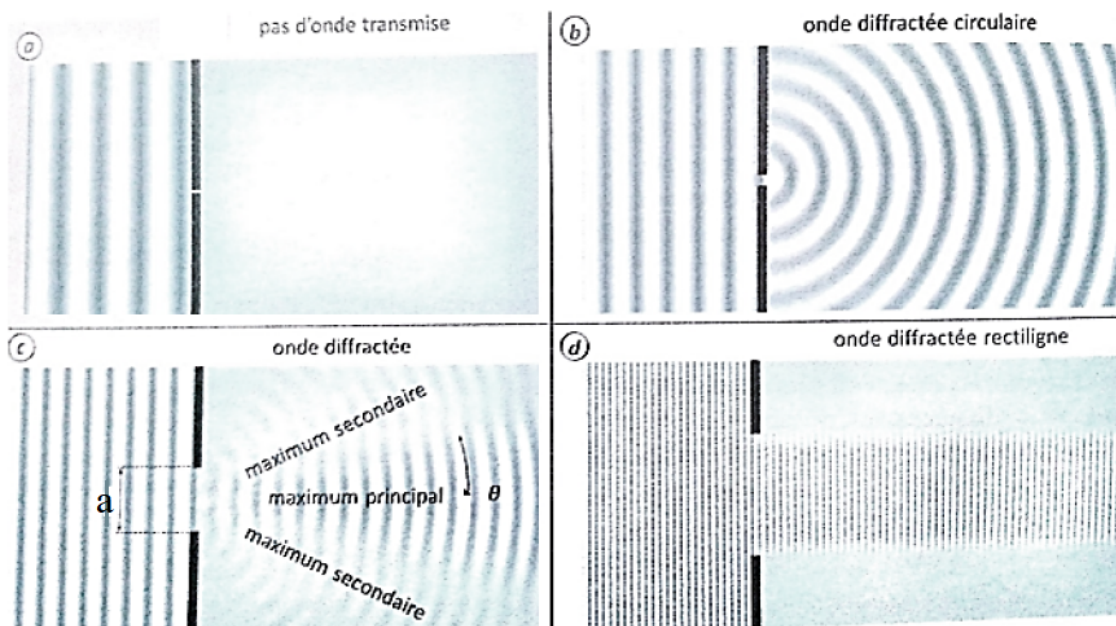


FIGURE 11 – Influence de la largeur a de l'obstacle sur le phénomène de diffraction

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

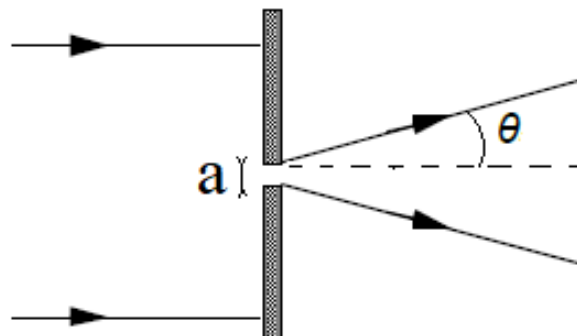


FIGURE 12 – Définition de l'angle θ caractéristique de la diffraction

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'appliquons 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, dont les longueurs d'onde vont du centimètre au mètre, sont diffractées par les objets du quotidien. Leur diffraction par une porte ouverte ou entrebaïllée 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, qui est la longueur d'onde typique de ces rayons. L'analyse de la figure de diffraction obtenue permet de reconstruire la structure cristalline de façon indirecte.
- Le faisceau issu d'un laser a tendance à s'élargir au cours de la propagation.
- Dans l'industrie, la diffraction d'ondes électromagnétiques permet de mesurer des objets de taille micrométrique par analyse de la figure de diffraction.

4 Nature duale de la lumière

Les phénomènes de diffraction et d'interférences lumineuses 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 dans la majorité des situations expérimentales.

4.1 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** est modélisée par une **onde sinusoïdale**. On lui associe une longueur d'onde λ , une fréquence ν ("nu"), et une célérité c .

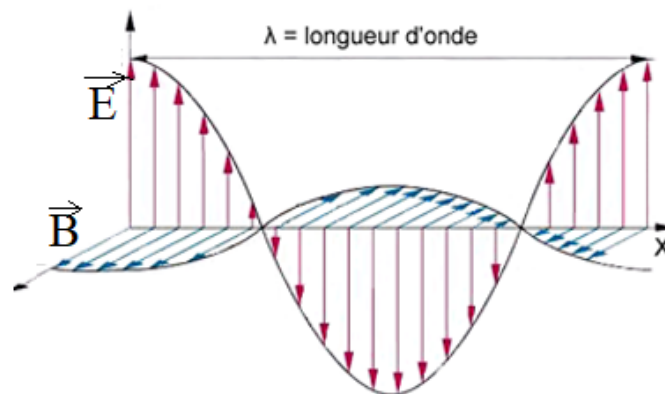


FIGURE 13 – Schéma d'une onde électromagnétique monochromatique (sinusoïdale)

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, elle est comprise dans l'intervalle [400nm;800nm] environ. Les plus petites longueurs d'onde sont associées à la couleur violette, les plus grandes au rouge.

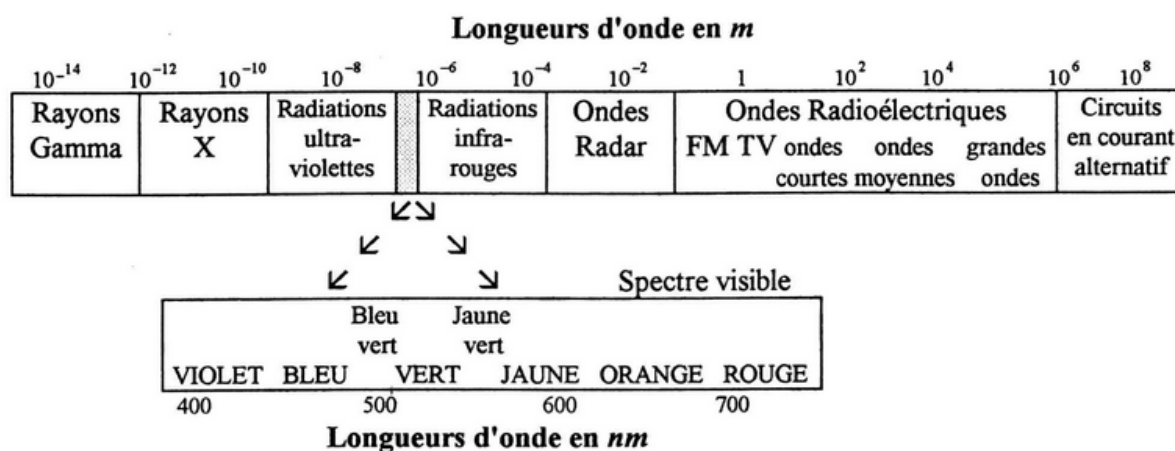
La célérité de la lumière vaut $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ dans le vide. Dans les milieux matériels transparents, la vitesse de propagation v est plus faible que dans le vide.

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 :



4.2 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. Leur valeur dépend de l'élément chimique. 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.

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.

En combinant cette relation à celle donnant la fréquence d'une onde électromagnétique, on obtient :

$$E = \frac{hc}{\lambda}.$$

On comprend alors pourquoi 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.

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 $3 \times 10^{20} \text{ Hz}$ 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 $\nu = 8,11 \times 10^{14} \text{ Hz}$. 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 germinicide émet des radiations avec une longueur d'onde de 254nm. 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 $\nu = 3,2 \times 10^{14} \text{ Hz}$.

Calculer la longueur d'onde correspondante. Commenter.