CHAPITRE 2

Les conditions d'interférences

Objectifs :

- citer et utiliser les conditions d'interférences constructives et destructives.

2.1 La lumière décrite comme une onde : première approche

une onde est une perturbation qui se transmet de proche en proche dans un milieu matériel ou dans le vide. La lumière est une onde qui se propage **sans milieu matériel**. Nous allons décrire pour l'instant la lumière par la plus simple des ondes : une onde **progressive harmonique**.

— une onde progressive est une onde qui "progresse" en s'éloignant de la perturbation qui la créée. Il existe un autre type d'onde, les ondes stationnaires. Les ondes progressives transportent de l'énergie, de l'impulsion et éventuellement du moment cinétique.

— une onde harmonique est une onde dont la perturbation est une oscillation sinusoïdale. Une onde progressive harmonique est donc la propagation d'une oscillation sinusoïdale (voir figure 2.1).

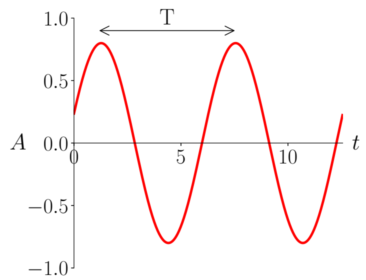


FIGURE 2.1: Période d'une onde harmonique.

Une onde harmonique est caractérisée par sa **période T**. Pour un observateur fixe en un point, la **période** représente le temps à attendre pour que l'onde retrouve la même amplitude (figure 2.1). La **fréquence $f = \frac{1}{T}$** représente le nombre de "passage" de l'onde par seconde pour cet observateur. **La fréquence et la période sont des grandeurs intrinsèques à l'onde**.

☞ Soit t le temps d'observation de l'observateur. Le nombre de passage de l'onde pendant la durée t a pour expression $N = \frac{t}{T} = ft$ où T est la période de l'onde. Le nombre $f = \frac{N}{t} = \frac{1}{T}$ représente donc le nombre de passage de l'onde par seconde.

Une onde progressive périodique dans le temps a également une périodicité spatiale qui nous permet de définir la longueur d'onde. Pour visualiser le concept de longueur d'onde, il faut imaginer un observateur prendre une photo en hélicoptère d'un train de houle (des vagues), la distance qui sépare deux crêtes est alors la longueur d'onde de la houle (figure 2.2).

La **longueur d'onde λ**, qui représente la distance séparant deux points de même amplitude, est liée à la période par l'intermédiaire de la vitesse de l'onde :

$$\boxed{\lambda = vT} \tag{2.1}$$

La vitesse v de l'onde dépend **du milieu traversé et de la période (ou de la fréquence) de l'onde**. Contrairement à la fréquence, la longueur d'onde n'est donc pas une quantité intrinsèque à l'onde.

Figure 2.2: Exemple de longueur d'onde d'une houle vue de satellite (source google map).

2.2 Interférences à deux ondes

2.2.1 Propagation des ondes dans le vide

Afin d'étudier les interférences à deux ondes, nous considérons deux sources isotropes qui émettent des ondes lumineuses de **même fréquence et de même amplitude à l'origine** (figure 2.3), nous disons que les deux ondes ont la même **phase à l'origine** dans ce cas. Soit P le point de rencontre des deux ondes. Nous considérons pour l'instant que **les deux ondes de longueur d'onde λ_0 se propagent dans le vide (ou l'air)**.

☞ Nous verrons par la suite que la production d'onde lumineuse dans le domaine visible de même phase à l'origine est difficile car les ondes visibles sont émises par les atomes et la phase à l'origine des ondes émises par chaque atome n'a aucune raison d'être corrélées dans le cas général. Il est bien plus facile de produire des ondes lumineuses en phase dans le domaine radio. Il suffit d'alimenter deux petites antennes radio à l'aide du même oscillateur situé à mi-chemin entre les deux antennes pour obtenir l'émission d'ondes radio de même phase à l'origine. Notons que nous pouvons également appliquer les raisonnements que nous allons dans ce chapitre aux ondes sonores.

La nature des interférences au point P - constructives ou destructives - dépend de la valeur de la différence de marche $\delta = r_2 - r_1$ entre les deux ondes (voir figure 2.4).

Lorsque $r_1 = r_2$ (figure 2.5 (a)), la différence de marche entre les deux ondes est nulle et les deux ondes arrivent au point P avec la même amplitude. Nous disons que les ondes arrivent en phase. Il y a **interférence constructive** au point P dans ce cas.

Pour $\delta = \frac{\lambda_0}{2}$, la figure 2.5 (b) montre que les deux ondes arrivent au point P en opposition de phase, c'est-à-dire que **la crête d'une onde arrive en même temps que le creux de l'autre onde. Il y a interférence destructive**.

Pour $\delta = 2\lambda_0$, la figure 2.5 (c) montre que les deux ondes arrivent au point P en phase, c'est-à-dire que **la crête d'une onde arrive en même temps que la crête de l'autre onde. Il y a interférence constructive**.

- Nous pouvons généraliser les résultats précédents, il y a interférence constructive au point P si la différence de marche entre les deux ondes est un multiple entier de fois la longueur d'onde. Ainsi, la condition d'interférence constructive s'écrit :

$$\boxed{\delta = m\lambda_0} \tag{2.2}$$

  Où m est un entier relatif, c'est-à-dire que $m = ..., -2, -1, 0, 1, 2, ...$
- De même, il y a interférence destructive si la différence de marche entre les deux ondes est un nombre demi-entier de fois la longueur d'onde ($\delta = \frac{1}{2}\lambda_0, \frac{3}{2}\lambda_0, ...$). Ainsi, la condition d'interférence destructive s'écrit :

$$\boxed{\delta = (m + \frac{1}{2})\lambda_0} \tag{2.3}$$

  Où m est un entier relatif, c'est-à-dire que $m = ..., -2, -1, 0, 1, 2, ...$

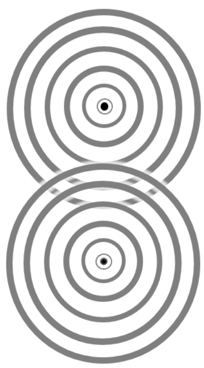
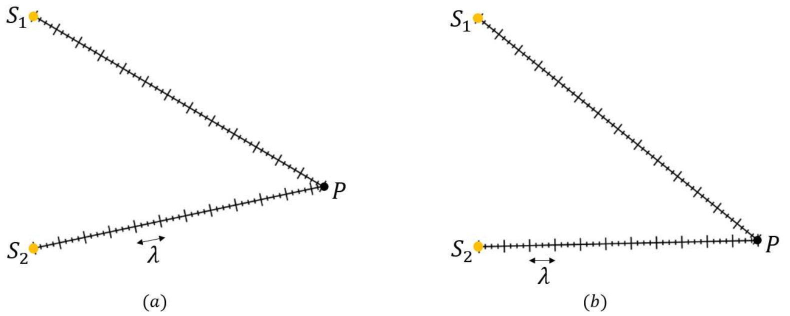


Figure 2.3: Deux sources ponctuelles qui émettent des ondes de même fréquence et de même phase à l'origine.

Exemple

Les deux figures suivantes montrent deux sources ponctuelles isotropes S_1 et S_2 qui émettent des ondes lumineuses de même fréquence et de même phase à l'origine. Les interférences sont destructives au point P dans le cas (a) et constructives au point P dans le cas (b).



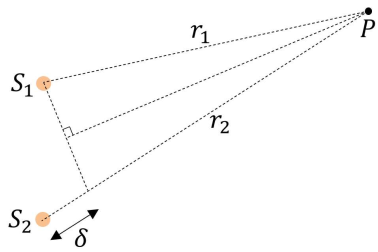


FIGURE 2.4: Différence de marche entre deux rayons émis en S_1 et S_2.

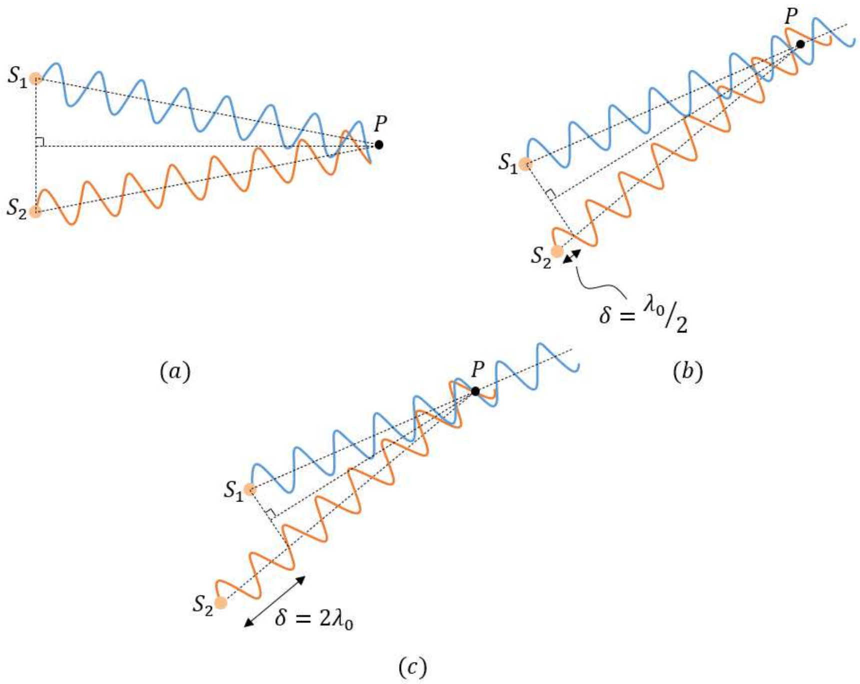


FIGURE 2.5 – Différence de marche entre deux rayons émis en S_1 et S_2 qui se rencontrent au point P dans différentes situations.

✍ **Vous pouvez maintenant faire les exercices 1 et 2.**

2.2.2 Propagation des ondes dans un milieu

Supposons maintenant que chaque onde se propage dans un milieu différent d'indices optiques notés respectivement n_1 et n_2. L'indice optique n d'un milieu est défini par $n = \frac{c}{v} = \frac{\lambda_0}{\lambda}$ où λ_0 est la longueur d'onde de la lumière dans le vide.

La figure 2.6 montre le changement de la longueur d'onde d'un rayon lumineux en fonction de l'indice du milieu au sien duquel il se propage. Cette figure montre que l'amplitude de l'onde à une position donnée ne dépend pas de la distance géométrique parcourue par l'onde mais du **chemin optique** parcourue par l'onde.

Pour comprendre ce concept, considérons une onde lumineuse qui parcourt la distance r_1 dans un milieu n_1 entre un point S_1 et un point P. Le nombre de période de l'onde entre ces deux points est $N_1 = \frac{S_1P}{\lambda_1}$ où λ_1

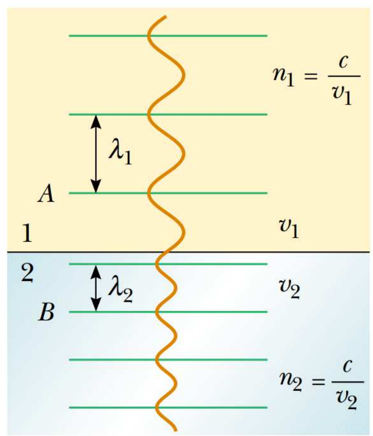


FIGURE 2.6: Évolution de la longueur d'onde en fonction de l'indice du milieu.

est la longueur d'onde de l'onde qui se propage dans le milieu n_1. Considérons maintenant une onde lumineuse qui se propage dans un milieu d'indice n_2 entre un point S_2 et le point P (figure 2.7), le nombre de période de cette onde entre ces deux points est $N_2 = \frac{S_2P}{\lambda_2}$ où λ_2 est la longueur d'onde de l'onde qui se propage dans le milieu n_2. Pour que l'amplitude de l'onde soit la même au point P, la différence entre le nombre de périodes N_2 et le nombre de périodes N_1 doit être égale à un entier relatif m d'où $N_2 - N_1 = m$. Nous obtenons donc :

$$\frac{S_2P}{\lambda_2} - \frac{S_1P}{\lambda_1} = m$$
$$n_2\frac{S_2P}{\lambda_0} - n_1\frac{S_1P}{\lambda_0} = m$$
$$n_2S_2P - n_1S_1P = m\lambda_0$$

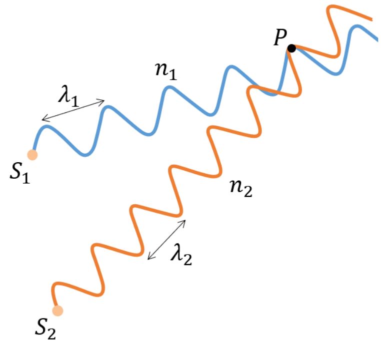


FIGURE 2.7: Propagation de deux rayons dans deux milieux lumineux.

- Nous obtenons :

$$\boxed{(S_2P) - (S_1P) = m\lambda_0} \tag{2.4}$$

où $(SP) = nSP$ est le chemin optique parcoure par l'onde. Autrement dit, **c'est le chemin optique qui est la quantité importante à prendre en compte pour déterminer l'amplitude d'une onde en un point P distant de sa source S**. Dans le cas où les rayons ne se propagent pas dans le même milieu, la nature des interférences au point P dépend donc de la valeur de la **différence de marche optique** entre les deux rayons.

2.3 Déphasage et ordre d'interférences

- Nous définissons le déphasage $\Delta\phi$ qui résulte de la différence de marche entre les deux rayons par :

$$\boxed{\Delta\phi = 2\pi\frac{\delta}{\lambda_0}} \tag{2.5}$$

- Exprimé à l'aide du déphasage, la condition d'interférence constructive s'écrit donc :

$$\boxed{\Delta\phi = 2\pi m} \tag{2.6}$$

Où m est un entier relatif, c'est-à-dire que $m = ..., -2, -1, 0, 1, 2, ...$
- Exprimé à l'aide du déphasage, la condition d'interférence destructive s'écrit :

$$\boxed{\Delta\phi = 2\pi(m + \frac{1}{2})} \tag{2.7}$$

Où m est un entier relatif, c'est-à-dire que $m = ..., -2, -1, 0, 1, 2, ...$

Nous allons également introduire l'ordre d'interférence p qui permet de numéroter les franges par rapport à la frange centrale.

- En un point d'observation P où interfèrent deux ondes présentant la différence de phase $\Delta\phi$, on appelle ordre d'interférence le nombre p défini par :

$$\boxed{p = \frac{\Delta\phi}{2\pi} = \frac{\delta}{\lambda_0}} \tag{2.8}$$

✍ **Vous pouvez maintenant faire les exercices 3, 4 et 5.**

2.4 Figures d'interférence

Dans l'exemple précédents, nous avons fixé le point d'observation des interférence et nous avons déterminé l'état d'interférence au point d'observation. Nous pouvons déterminer la figure géométrique donnée par l'ensemble des points où l'interférence entre les deux ondes est constructives.

Si nous fixons la longueur d'onde, les points P où les interférences sont constructives et destructives sont données par les équations $S_2P - S_1P = m\lambda_0$ et $S_2P - S_1P = (m + \frac{1}{2})\lambda_0$. Ces deux équations sont les équations d'hyperboloïdes de foyers S_1 et S_2.

- Les figures d'interférences que nous pouvons observer sont donc **les intersections de l'écran d'observation avec les hyperboloïdes de révolution de foyers S_1 et S_2**.
- Les maximums de luminosité sont appelées des **franges claires tandis que les minimums de luminosité sont appelées des franges sombres**. Deux cas de figures se rencontrent très souvent :
  1. L'écran d'observation est parallèle au plan qui contient S_1 et S_2. On observe sur l'écran des hyperbole. Dans le cas fréquent ou l'observation est à l'infini, nous observons des droites.
  2. L'écran d'observation est perpendiculaire au plan qui contient S_1 et S_2. Nous observons sur l'écran des ellipses ou des cercles.

☞ Une hyperboloïde est une figure géométrique de la famille de quadriques. Une quadrique est une surface de $\mathbb{R}^3$ dont les points vérifient une équation cartésienne de degré 2.