18 Diffraction et Interférences

TÉ

1.1. Diffraction

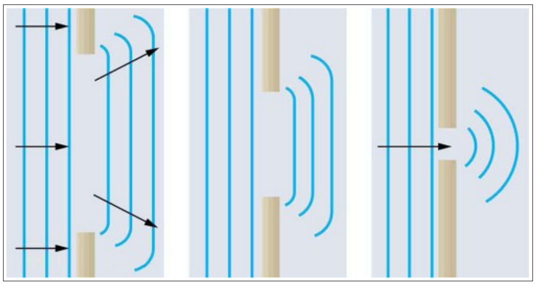
• La diffraction est l'étalement d'une onde dans l'espace dû à son passage au travers, ou autour, d'un obstacle. On observe la diffraction pour tout type d'onde.
La diffraction permet de mettre en évidence le caractère ondulatoire d'un phénomène

↳ Dans l'exemple ci-contre, la houle qui déferle sur la rive peut être assimilée à une onde se propageant dans une seule direction. En rencontrant l'ouverture de la baie, les vagues « s'étalent » dans toutes les directions.

• On étudie le passage d'une onde au travers d'une ouverture de plus en plus petite. Le phénomène de diffraction augmente lorsqu'on diminue la taille de l'ouverture.

↳ Plus la taille de l'ouverture est faible plus la diffraction est importante.

↳ La diffraction est d'autant plus intense que la dimension de l'objet diffractant est proche de la longueur d'onde λ de l'onde incidente.

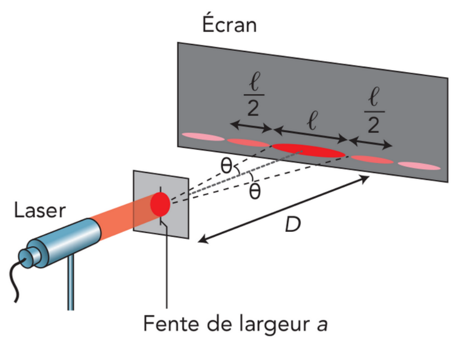


1.2. Diffraction d'une onde lumineuse

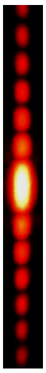
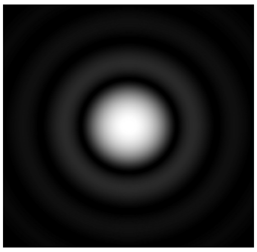
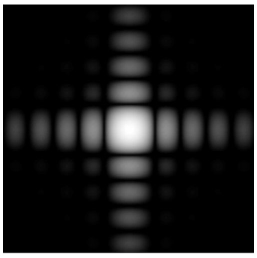
• On réalise le montage suivant, où une fente de largeur a est éclairé par un faisceau laser.

L'onde lumineuse émise par le laser qui atteint la fente est plane et monochromatique (λ = 632 nm)

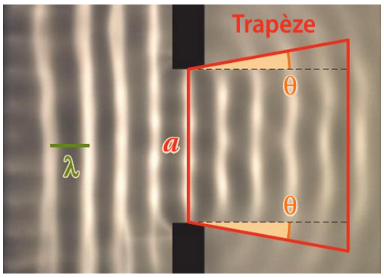
On observe sur l'écran une figure de diffraction, constituée d'une tache centrale entourée de taches de luminosité plus faible, séparées par des zones d'extinction.



↳ Toutes les figures de diffraction présentent une tache centrale brillante entourée d'autres motifs. L'allure précise est caractéristique de l'objet diffractant.

			
Fente verticale	Fente horizontale	Trou	Carré

• Grandeur caractéristique

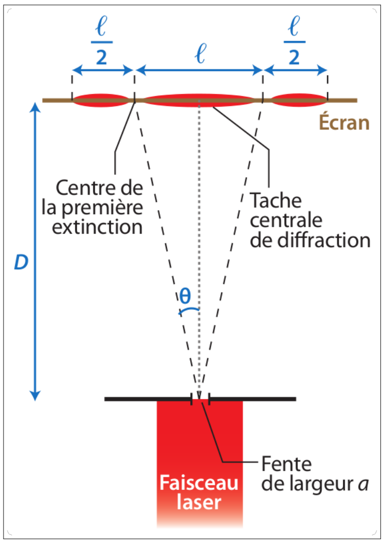


L'angle caractéristique de diffraction θ est l'angle formé par la direction de propagation de l'onde incidente et le centre de la première extinction.

↳ Quelle que soit l'onde étudiée, on peut exprimer cet angle caractéristique de diffraction θ en fonction de la taille de l'ouverture a et de la longueur d'onde λ de l'onde incidente.

L'expression de θ est : $\theta = \frac{\lambda}{a}$ pour $a < 10\,\lambda$.

↳ Dans le cas de la fente éclairée par un laser, pour déterminer la valeur de θ, on peut mesurer la taille de la tache centrale et la rapporter à la distance objet diffractant - écran.



Dans le triangle rectangle : $\tan(\theta) = \frac{l}{2D}$. De plus, les angles étant petits : $\tan(\theta) = \theta$ et finalement :

Dans le cas d'un laser diffracté par une fente, l'angle caractéristique de diffraction, observée sur un écran situé à une distance D de l'objet diffractant vaut :

$$\theta = \frac{l}{2D} = \frac{\text{diamètre de la tâche centrale}}{2 \times \text{distance objet-écran}}$$

1.3. Conséquences concrètes

1.3.1. Cristallographie

La diffraction aux rayons X est mise à profit en cristallographie.
L'étude des figures de diffraction obtenues par irradiation d'un l'échantillon de composé, permet de déterminer les paramètres de la structure cristalline de celui-ci.

1.3.2. Pouvoir de séparation ou pouvoir de résolution

La diffraction limite le pouvoir de résolution des systèmes optiques.
Un objet ponctuel donne une image « floue » due à la diffraction. Si deux détails d'un objet sont trop proches, les taches de diffraction se chevauchent et il devient impossible d'obtenir des images séparées de ces détails.

2.1. Interférences

• Comme la diffraction, les interférences sont caractéristiques des phénomènes ondulatoires. On les observe pour tous types d'ondes : mécaniques, ultrasonores, acoustiques, électromagnétiques, lumineuses, etc. ... Elles se manifestent lorsque deux ondes de même fréquence se superposent.

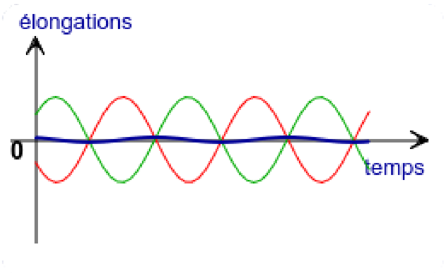
• Conditions d'interférences :
↳ Les deux sources doivent être synchrones c'est-à-dire vibrer à la même fréquence.
↳ Le déphasage entre les deux sources doit être constant.
Si ces deux conditions sont réunies les sources sont dites cohérentes et peuvent interférer.

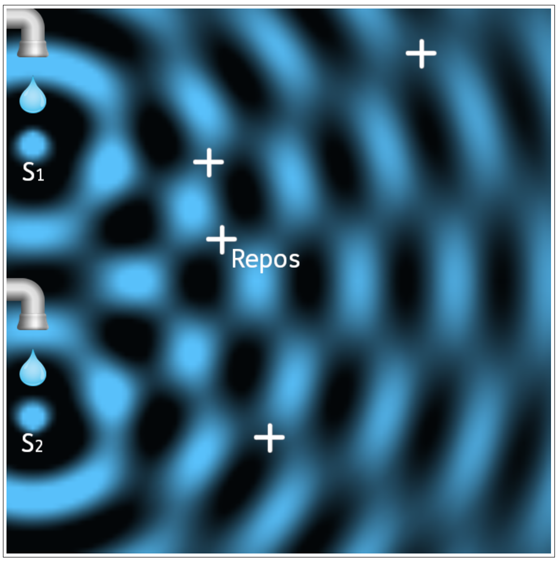
• On observe un plan d'eau soumis à des perturbations en phase, et de même fréquences en S_1 et S_2. Les ondes se superposent, et le plan d'eau se couvre d'une figure caractéristique.

2.2. Interférences destructives

• Certains points du plan d'eau apparaissent en grisés sur la simulation. Ces points sont au repos, ils ne sont animés d'aucun mouvement.

↳ En ces points, le maximum d'une onde coïncide avec le minimum de l'autre. Les élongations s'annulent, et l'amplitude de l'onde résultante est nulle : on dit que les interférences sont destructives.





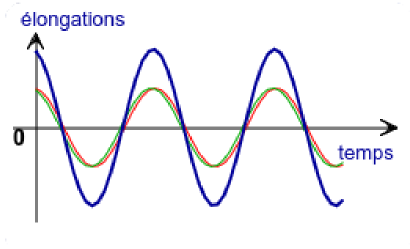
↳ Un maximum d'une onde correspond à un minimum de l'autre : les ondes sont en opposition de phase.

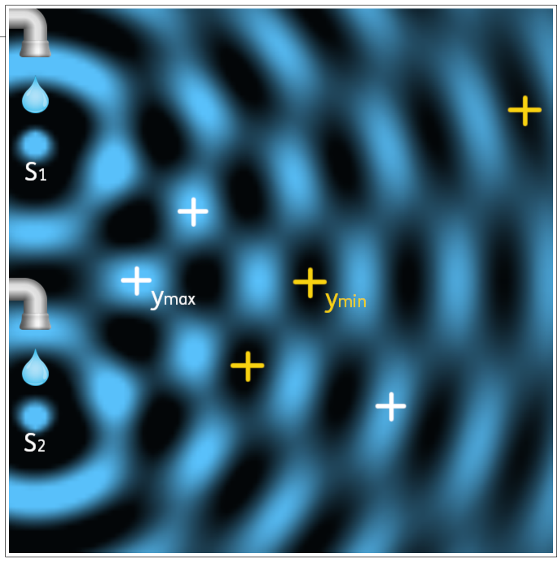
Les interférences sont destructives en tout point où les ondes sont en opposition de phase.

2.3. Interférences constructives

• Certains points apparaissent en bleu clair (resp. noir) sur la simulation. Ils correspondent à une élongation maximale de la surface de l'eau. (resp. minimale)

↳ En ces points les maxima coïncident. Les élongations se renforcent, et l'amplitude de l'onde résultante est maximale : on dit que les interférences sont constructives.





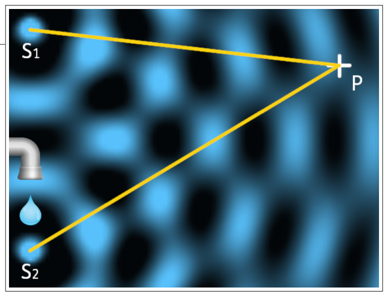
↳ Un maximum correspond à un autre maximum : les ondes sont en phase.

Les interférences sont constructives en tout point où les ondes sont en phase.

2.4. Différence de marche

• Pour connaître l'état vibratoire d'un point P du champ d'interférence, il faut connaître la différence des distances parcourues par l'onde issue de S_1 et celle issue de S_2 pour atteindre P.

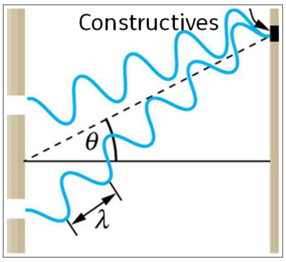
Cette différence s'appelle la différence de marche, et est notée $\delta = S_2P - S_1P$.



↳ Pour les points M situés sur la médiatrice de $[S_1S_2]$ on observe des interférences constructives, ce qui indique que les ondes y arrivent en phase.

Les distances parcourues par les deux ondes sont égales : $S_1M = S_2M$. La différence de marche δ est nulle.

Interférences constructives



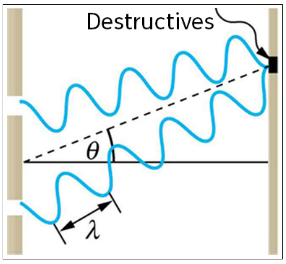
• On se place en un point P tel que la différence de marche vaut une longueur d'onde : $\delta = \lambda$. L'onde issue de S_2 parcourt donc une distance plus grande de une longueur d'onde λ que l'onde issue de S_1 pour arriver en P. $S_2P = S_1M + \lambda$.

↳ Les ondes issues de S_1 et S_2 sont décalées de une longueur d'onde en arrivant en P : elles sont donc en phase en P, et les interférences en P sont constructives.

↳ Le même raisonnement peut être conduit avec $\delta = 2\lambda, 3\lambda, -\lambda$, etc. ...

On observe des interférences constructives pour une différence de marche $\delta = k \times \lambda$, avec $k \in \mathbb{Z}$.

Interférences destructives



• On se place en un point P' tel que la différence de marche vaut une demi-longueur d'onde : $\delta = \frac{\lambda}{2}$. L'onde issue de S_2 parcourt alors une distance plus grande de une demi-longueur d'onde $\frac{\lambda}{2}$ que l'onde issue de S_1 pour arriver en P'.

↳ Les ondes issues de S_1 et S_2 sont décalées de une demi-longueur d'onde en arrivant en P' : elles sont donc en opposition de phase en P' et les interférences en P' sont destructives.

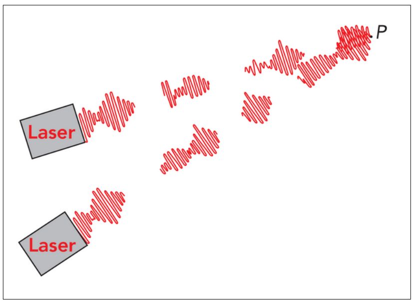
↳ Le même raisonnement peut être conduit avec $\delta = 3\frac{\lambda}{2}, 5\frac{\lambda}{2}, -\frac{\lambda}{2}$, etc. ...

On observe des interférences destructives pour une différence de marche $\delta = (k + \frac{1}{2}) \times \lambda$, avec $k \in \mathbb{Z}$.

3.1. Interférences lumineuses

• Des ondes lumineuses issues de deux sources différentes de même fréquence n'interfèrent pas : elles sont incohérentes. Des conditions spécifiques supplémentaires sont nécessaires pour pouvoir observer des interférences lumineuses.

↳ En effet, l'émission d'une onde lumineuse ne se fait pas de manière continue. L'onde lumineuse est constituée d'une succession de « trains d'onde » de courtes durées dont les phases à l'origine sont aléatoires.

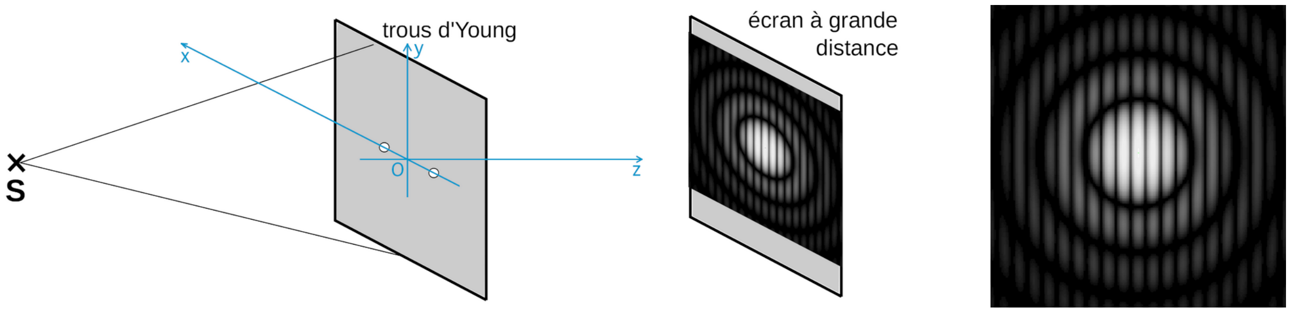


Pour s'assurer que les ondes soient cohérentes, on utilise une unique source primaire associé à un dispositif interférentiel, qui divise l'onde initiale en deux faisceaux différents avant d'être superposés.
Les deux sources secondaires ainsi créées ont même fréquence et un déphasage constant : les sources sont cohérentes.

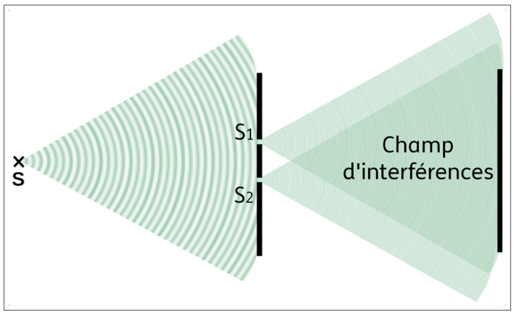
Remarque : il faut en toute rigueur superposer les mêmes trains d'onde ce qui exige que ces derniers soient suffisamment longs devant la différence de marche, condition qui est remplie lorsqu'on utilise un laser (onde monochromatique)

3.2. Expérience des trous d'Young en lumière monochromatique

• Le dispositif interférométrique le plus simple est le dispositif des trous d'Young. Il est constitué d'un écran opaque percé de deux trous circulaires séparés d'une distance notée b. Éclairé par un laser, on observe la figure d'interférences suivante :



• On reconnaît sur l'écran d'observation la figure de diffraction caractéristique d'un trou, à l'intérieur de laquelle se forment des franges d'interférences.

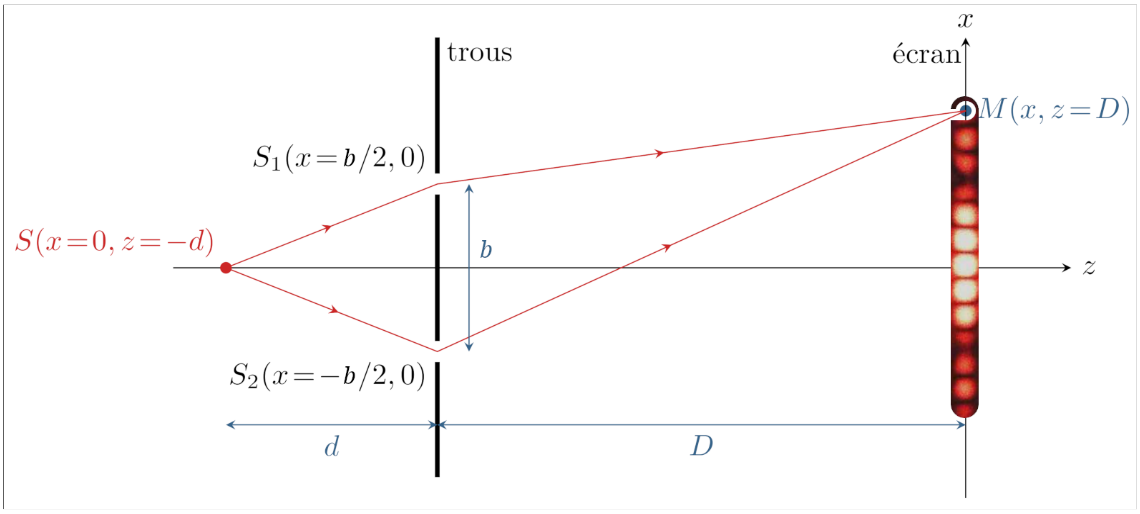


↳ C'est le phénomène de diffraction, qui étale les ondes lumineuses issues de S_1 et S_2, qui permet les interférences.

↳ Même si elle est la cause des interférences, la diffraction sera « négligée » par la suite.

↳ On appelle champ d'interférences la zone de l'espace dans laquelle les deux ondes se superposent. Pour les trous d'Young, les interférences sont observables en tout point du champ d'interférences.

• Dans le plan horizontal y = 0, le schéma du montage est le suivant :



• En optique, la différence de marche n'est pas définie par une simple différence géométrique de distance, mais par une différence de « chemin optique »

Dans un milieu homogène d'indice n, le chemin optique noté (AB) pour aller du point A au point B est défini par : (AB) = n × AB.

↳ Dans le cas des trous d'Young, avec les notations de la figure, la différence de marche est alors $\delta=(S_2M)-(S_1M)$ soit $\delta=n\times S_2M-n\times S_1M$. On admet alors le résultat suivant :

> **La différence de marche au point M situé à l'abscisse x d'un écran placé à la distance D de trous d'Young séparés d'une distance b dans un milieu homogène d'indice n vaut : $\delta=\frac{nbx}{D}$.**

Avec les conditions suivantes :
↳ La source et l'écran sont à grande distance des trous : d et D sont très supérieurs à b.
↳ L'observation se fait à proximité du centre de l'écran : d et D sont très supérieurs à x, position de M sur l'axe horizontal de l'écran.

3.3. Détermination de l'interfrange

• On réalise l'expérience des trous d'Young dans l'air, soit $n = 1$.

Interférences constructives – Franges brillantes

• Connaissant l'expression de la différence de marche ainsi que la condition de formation des interférences constructives, il vient : $\delta = \frac{b\,x}{D} = k \times \lambda$.

↳ On observe des franges brillantes pour x_k tel que $x_k = k \times \frac{\lambda D}{b}$ avec $k \in \mathbb{Z}$.

Interférences destructives – Franges sombres

• Connaissant l'expression de la différence de marche ainsi que la condition de formation des interférences destructives : $\delta = \frac{b\,x}{D} = (k + \frac{1}{2}) \times \lambda$.

↳ On observe des franges sombres pour x_k tel que $x_k = (k + \frac{1}{2}) \times \frac{\lambda D}{b}$ avec $k \in \mathbb{Z}$.

↳ On considère deux franges caractérisées par k et k'. Si ces deux franges sont successives, $k' = k + 1$. La distance qui sépare deux franges vaut : $x_{k+1} - x_k = \frac{\lambda D}{b}$, que la frange soit brillante ou sombre.

Qu'elles soient brillantes ou sombres, deux franges successives sont séparées d'une distance appelée interfrange, qui vaut : $i = \frac{\lambda D}{b}$.

4. Bilan : conditions d'obtention des interférences

	Condition sur les sources	Condition au point P	
		Sur l'état des ondes	**Sur la différence de marche δ**
Interférences constructives	• Elles doivent être cohérentes : ↳ avoir même fréquence (synchrone) ↳ avoir un déphasage constant	Les ondes sont en phase	$\delta = k \times \lambda$, avec $k \in \mathbb{Z}$
Interférences destructives	• Pour les ondes lumineuses : une unique source est divisée en deux sources par un dispositif interférentiel.	Les ondes sont en opposition de phase	$\delta = (k + \frac{1}{2}) \times \lambda$, avec $k \in \mathbb{Z}$