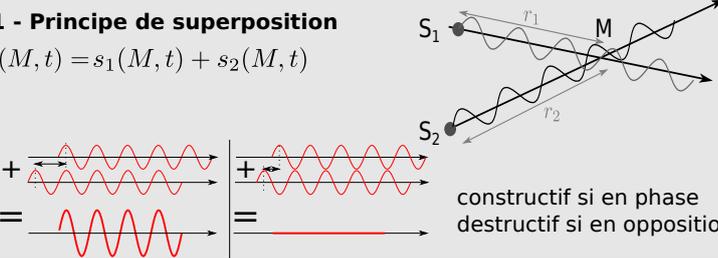


Phénomènes d'interférence

I Interférences avec des ondes acoustiques ou mécaniques

1 - Principe de superposition
 $s(M, t) = s_1(M, t) + s_2(M, t)$



constructif si en phase
destructif si en opposition

2 - Condition sur le déphasage
différence de marche en M : $\delta = r_1 - r_2$
déphasage en M : $\Delta\varphi = k(r_1 - r_2) = \frac{2\pi}{\lambda} \delta$

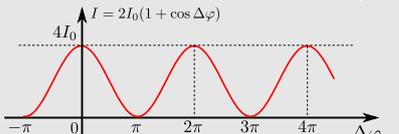
$\Delta\varphi = 2n\pi \Leftrightarrow \delta = n\lambda$
 $\Delta\varphi = \pi + 2n\pi \Leftrightarrow \delta = \lambda/2 + n\lambda$

II Interférences avec des ondes optiques

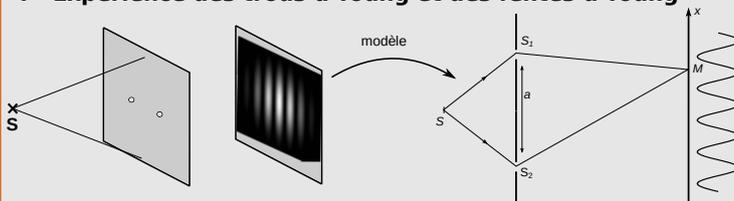
1 - Intensité lumineuse $I(M) = k \langle s(M, t)^2 \rangle$

2 - Chemin optique : $(SM) = n \times SM$
et différence de chemin optique : $\delta(M) = (S_1M) - (S_2M)$

3 - Interférences et formule de Fresnel
 $I(M) = 2I_0 (1 + \cos \Delta\varphi)$ avec $\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \delta(M)$



4 - Expérience des trous d'Young et des fentes d'Young



Ce qu'il faut connaître

_____ (cours : I)

- ▶₁ Quand dit-on que les interférences sont constructives? Destructives?
Donner la condition sur le déphasage $\Delta\varphi$, entre les deux ondes au point M , pour avoir chacun des cas.
Donner également la condition sur la différence de marche $\delta = r_1 - r_2$.

_____ (cours : II)

- ▶₂ Comment est défini le chemin optique entre un point S et un point M dans un milieu d'indice optique n ?
- ▶₃ On considère deux sources S_1 et S_2 et un point d'observation M . Quelle est la définition de la différence de chemin optique en M ?
- ▶₄ Énoncer la formule de Fresnel, ainsi que l'expression du déphasage $\Delta\varphi$ en fonction de la différence de chemin optique δ .

Ce qu'il faut savoir faire

_____ (cours : I)

- ▶₅ Exprimer des conditions d'interférences constructives ou destructives. → EC1
- ▶₆ Exprimer l'amplitude de l'onde résultante en un point en fonction du déphasage → EC2

_____ (cours : II)

- ▶₇ Trous d'Young (sans lentille) : exprimer la différence de chemin optique en un point M , puis en utilisant la formule de Fresnel fournie, en déduire l'expression de l'éclairement → EC3

Exercices de cours

EC 1 – Conditions d'interférences constructives ou destructives

On considère le dispositif suivant. On suppose que l'émetteur 2 est de taille suffisamment petite pour ne pas avoir d'influence sur le signal émis par l'émetteur 1. Chaque émetteur envoie une onde progressive sinusoïdale de même fréquence et de phase à l'origine nulle.



- 1 - Rappeler les conditions d'interférence destructive et constructive en terme de déphasage entre les deux signaux.
- 2 - Lorsque $d = 0$, qu'enregistre-t-on au niveau du microphone ?
- 3 - On part de $d = 0$, et on augmente d jusqu'à ce que le signal enregistré soit nul. Ceci se produit pour $d = 6,0$ cm. Expliquer pourquoi il y a cette extinction. En déduire la longueur d'onde du son émis.

EC 2 – Expression de l'amplitude résultant d'interférences

On considère deux sources qui émettent deux ondes progressives sinusoïdales, de même pulsation ω . On note r_1 = distance S_1M et r_2 = distance S_2M .

Pour simplifier les calculs, on considère que les amplitudes de s_1 et s_2 sont identiques. On a donc au point M :

$$s_1(M,t) = A_0 \cos(\omega t - kr_1) \quad \text{et} \quad s_2(M,t) = A_0 \cos(\omega t - kr_2).$$

On donne la formule $\cos p + \cos q = 2 \cos\left(\frac{p+q}{2}\right) \cos\left(\frac{p-q}{2}\right)$

- 1 - Exprimer le signal total $s(M,t) = s_1(M,t) + s_2(M,t)$ au point M .
On le mettra sous la forme $s(M,t) = A \cos(\omega t + \varphi_0)$. On donnera l'expression de l'amplitude A obtenue, en fonction de A_0 , λ et de $\delta = r_2 - r_1$.
- 2 - Retrouver alors la condition habituelle sur $\delta = r_2 - r_1$ pour que les interférences soient destructives.
- 3 - De même, retrouver la condition habituelle sur $r_2 - r_1$ pour que les interférences soient constructives.

On rappelle que $\cos x = 0 \Leftrightarrow x = \frac{\pi}{2} + n\pi, n \in \mathbb{Z}$,
que $\cos x = 1 \Leftrightarrow x = 2\pi \times n, n \in \mathbb{Z}$,
et que $\cos x = -1 \Leftrightarrow x = \pi + 2\pi \times n, n \in \mathbb{Z}$.

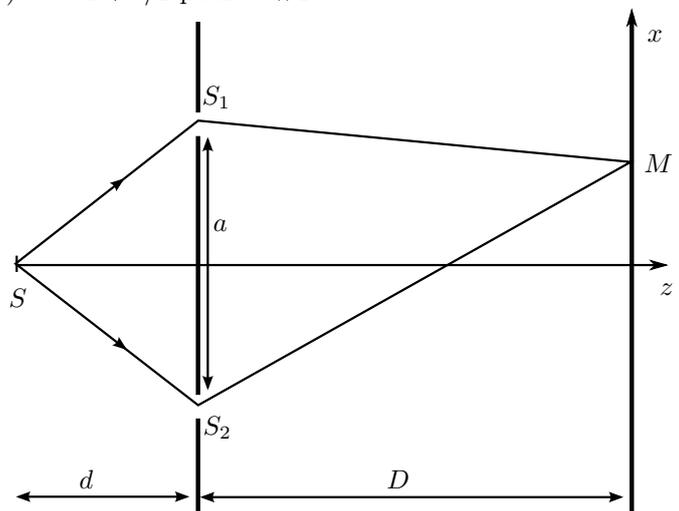
EC 3 – Trous d'Young

On considère le montage des trous d'Young. L'écran est à grande distance : $D \gg x, y, a$. Le milieu est de l'air d'indice ~ 1 . La source S est supposée monochromatique ($\lambda = 633$ nm pour un laser rouge He-Ne) et ponctuelle. On utilise des trous de diamètres $70 \mu\text{m}$, d'écartement $a = 0,30$ mm, avec une distance $D = 2,0$ m. On suppose l'éclairement dû à S_1 (seul en l'absence de S_2) uniforme sur l'écran, d'intensité notée I_0 . De même pour S_2 .

On donne la formule de Fresnel : $I = 2I_0(1 + \cos \Delta\varphi)$ avec $\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \delta(M)$ et $\delta(M)$ la différence de chemin optique en M .

On raisonne uniquement dans le plan de la feuille. On donne $(1 + \varepsilon)^{1/2} \simeq 1 + \varepsilon/2$ pour $\varepsilon \ll 1$.

- 1 - Donner l'expression de la différence de chemin optique $\delta(M)$ au point M , en fonction de a , x et D . On exploitera le fait que $D \gg x, a$.
- 2 - En déduire l'expression de l'intensité au point M (aussi appelée éclairement).
- 3 - Cet éclairement est périodique. Donner l'expression de sa période spatiale (aussi appelée interfrange), notée i .
- 4 - Application numérique pour i .
- 5 - Comment est modifié l'interfrange si on augmente la distance entre les trous ? Si on augmente la longueur d'onde λ ? Et si on augmente la distance D ?

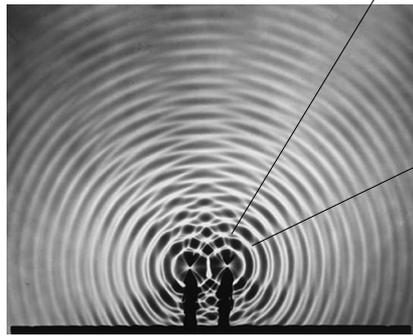


I – Interférences avec des ondes mécaniques ou acoustiques

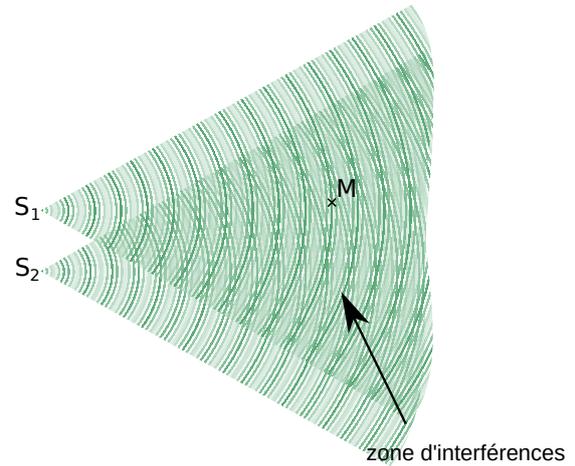
Interférences = superposition d'onde.

1 – Principe de superposition

● Exemples d'observations :

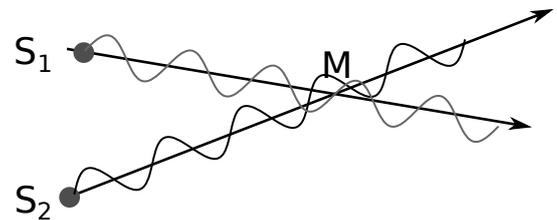


Interférences entre deux ondes sphériques produites par deux vibreurs à la surface de l'eau.



● Idée derrière les interférences :

- Source S_1 qui produit une onde $s_1(M,t)$ (valeur au point M à l'instant t).
- Source S_2 qui produit une onde $s_2(M,t)$ (valeur au même point M , instant t).



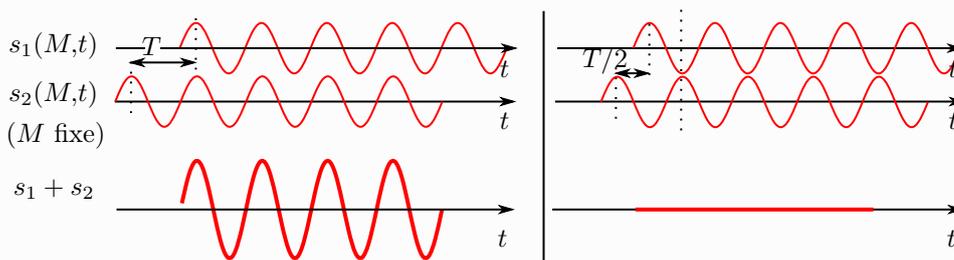
⇒ l'onde totale au point M est : $s_{tot}(M,t) = s_1(M,t) + s_2(M,t)$.

(voir aussi animation 2 site classe)

Définition de destructif/constructif

- Si les ondes s_1 et s_2 sont **en phase** au point M (maximales en même temps, ou minimales en même temps), alors l'amplitude s_{tot} est importante.
 - On dit que les interférences sont **constructives**.
- Si les ondes s_1 et s_2 sont **en opposition de phase** au point M (l'une est maximale et l'autre minimale), alors l'amplitude s_{tot} est faible.
 - On dit que les interférences sont **destructives**.

Enregistrement au point M :



Attention : tout ceci n'a un sens que si s_1 et s_2 sont de **même période** (ou fréquence, ou pulsation).

Remarque : Sur le schéma de droite ci-dessus, l'amplitude totale est nulle car s_1 et s_2 ont la même amplitude. Si ce n'est pas le cas, $s_1 + s_2$ ne sera pas d'amplitude nulle, mais faible (et on dit aussi que les interférences sont destructives).

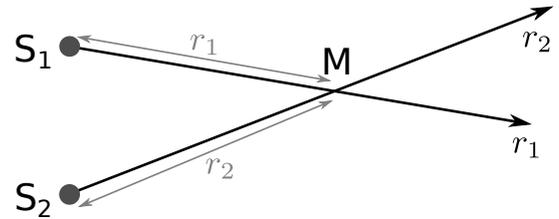
Observations d'interférences ?

- séismes, marées,
- casque antibruit,
- optique (cf suite, et cours de PT).

2 – Condition sur le déphasage entre les deux ondes

On considère deux sources S_1 et S_2 qui émettent des ondes progressives sinusoïdales avec la même période $T = 2\pi/\omega$. On prend une même phase à l'origine $\varphi_0 = 0$.

- Soit M un point d'observation.
- On note r_1 l'axe entre S_1 et M , et r_2 l'axe entre S_2 et M .
- On a donc r_1 = distance S_1M et r_2 = distance S_2M .



→₁ Rappel : une onde progressive sinusoïdale est du type “ $s_0 \cos(\omega t - kx + \varphi)$ ”. Comment peut-on écrire l'onde émise par S_1 avec les notations introduites ? Et celle émise par S_2 ?

Définition : déphasage et différence de marche

- ▶ Au point M , le signal 1 est $s_1(M,t) = A_1 \cos(\omega t - kr_1)$.

La phase à l'origine de ce signal temporel est :

- ▶ Au point M , le signal 2 est $s_2(M,t) = A_2 \cos(\omega t - kr_2)$.

La phase à l'origine de ce signal temporel est :

On définit :

- ▶ Le **déphasage** entre les deux ondes au point M : $\Delta\varphi(M) = \varphi_2 - \varphi_1$.

On a donc aussi $\Delta\varphi(M) = k(r_1 - r_2) = \frac{2\pi}{\lambda}(r_1 - r_2)$.

- ▶ La **différence de marche** entre les deux ondes au point M : $\delta(M) = r_1 - r_2$.

Nous allons traduire les conditions d'interférences destructives ou constructives sur la valeur de $\Delta\varphi$ et de δ .

→₂ **Cas 1 : interférences constructives**, donc ondes s_1 et s_2 en phase au point M (max ou min en même temps)

→₃ **Cas 2 : interférences destructives**, donc ondes s_1 et s_2 en opposition de phase au point M (l'une max lorsque l'autre est min)

Bilan

- ▶ Interférences constructives \Leftrightarrow différence de phase $\Delta\varphi = 2n\pi \Leftrightarrow \delta = r_1 - r_2 = n\lambda \quad (n \in \mathbb{Z})$.

- ▶ Interférences destructives \Leftrightarrow différence de phase $\Delta\varphi = \pi + 2n\pi \Leftrightarrow \delta = r_1 - r_2 = \frac{\lambda}{2} + n\lambda \quad (n \in \mathbb{Z})$.

On retrouve ce qu'on a annoncé dans le 1/. Se souvenir que c'est logique : en phase \Leftrightarrow décalage d'une période donc d'un nombre entier de fois λ , ou encore égalité de ce qui est dans le cos à 2π près. En opposition de phase \Leftrightarrow décalage d'une demi-période donc de $\lambda/2$, ou encore différence de π pour ce qui est dans les cosinus.

→₄ Faire l'**EC1**.

3 – Expression de l'amplitude de l'onde résultante

Ci-dessus, on a obtenu des conditions pour avoir une amplitude minimale (destructif) ou maximale (constructif) en M . Mais que vaut l'amplitude en M dans les cas intermédiaires (ni constructifs ni destructifs) ?

→₅ Faire l'EC2.

II – Interférences avec des ondes optiques

En optique, on peut alors avoir des zones où "lumière + lumière = absence de lumière". Ceci est expliqué par le modèle *ondulatoire* de la lumière : c'est un phénomène d'interférence.

1 – Intensité lumineuse

La fréquence des ondes lumineuses est très élevée ($f = c/\lambda \approx 10^{15}$ Hz), si bien que les détecteurs (ou l'œil) ne permettent pas d'enregistrer le signal $s(M,t) = A \cos(\omega t - kr)$.

En réalité, les détecteurs (et l'œil) ne sont sensibles qu'à l'énergie moyenne reçue, elle-même proportionnelle à valeur moyenne du carré du signal :

$$\text{intensité au point } M : I(M) = k \langle s(M,t)^2 \rangle.$$

(k est une constante de proportionnalité)

2 – Chemin optique

Définition : chemin optique

Soit un milieu transparent d'indice optique n .

Le chemin optique entre un point S et un point M est : $(SM) = n \times SM$.

Il est noté avec des parenthèses.

Dit autrement, chemin optique = indice optique \times distance.

Définition : différence de chemin optique

Soit deux sources S_1 et S_2 , et un point M .

La différence de chemin optique entre S_1 et S_2 est : $\delta(M) = (S_1M) - (S_2M)$.

On l'appelle aussi "différence de marche", comme avec les ondes mécaniques, mais il ne faut pas oublier l'indice n s'il est différent de 1.

→₆ Si on se place dans l'air, comment s'écrit le chemin optique et la différence de chemin optique ?

3 – Interférences et formule de Fresnel

Formule de Fresnel

Soit deux sources de lumière

- monochromatique (longueur d'onde dans le vide λ),
- de même intensité (notée I_0).

Lorsqu'elles interfèrent, l'intensité résultante s'écrit selon la formule de Fresnel :

$$I(M) = 2I_0 (1 + \cos \Delta\varphi) \text{ avec } \Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \delta(M).$$

Ici $\Delta\varphi$ est le déphasage entre les deux signaux reçus au point M , exactement comme dans la partie I.

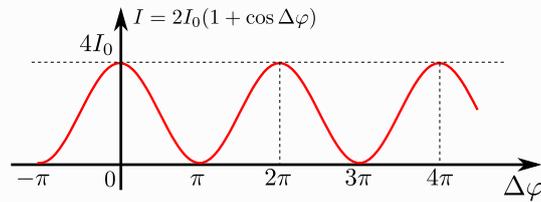
$\delta(M)$ est la différence de chemin optique.

Remarque : vous verrez en seconde année les conditions nécessaires à la production d'interférences optiques (sources cohérentes). Vous verrez également la formule de Fresnel dans le cas où les intensités sont différentes. Et vous la démontrerez !

Interférences constructives ou destructives

On a, de même qu'avec les ondes mécaniques :

- ▶ Interférences constructives \Leftrightarrow différence de phase $\Delta\varphi = 2n\pi \Leftrightarrow \delta(M) = n\lambda \quad (n \in \mathbb{Z})$.
- ▶ Interférences destructives \Leftrightarrow différence de phase $\Delta\varphi = \pi + 2n\pi \Leftrightarrow \delta(M) = \frac{\lambda}{2} + n\lambda \quad (n \in \mathbb{Z})$.

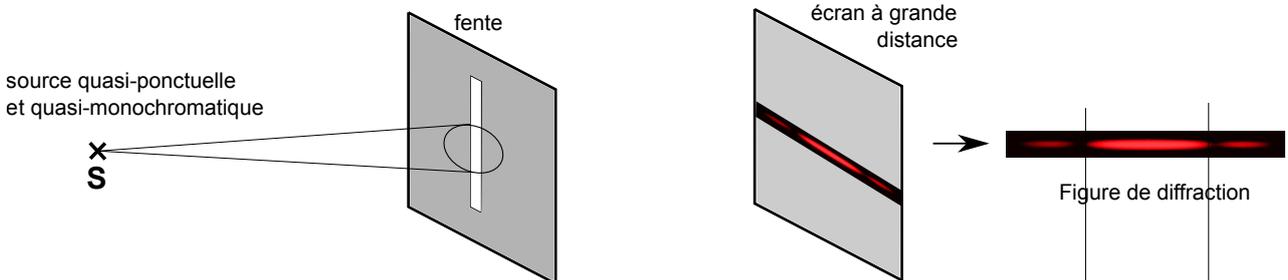


→ Démontrer les résultats ci-dessus en partant de la forme de Fresnel. Ceci se voit aussi sur le tracé ci-dessous.

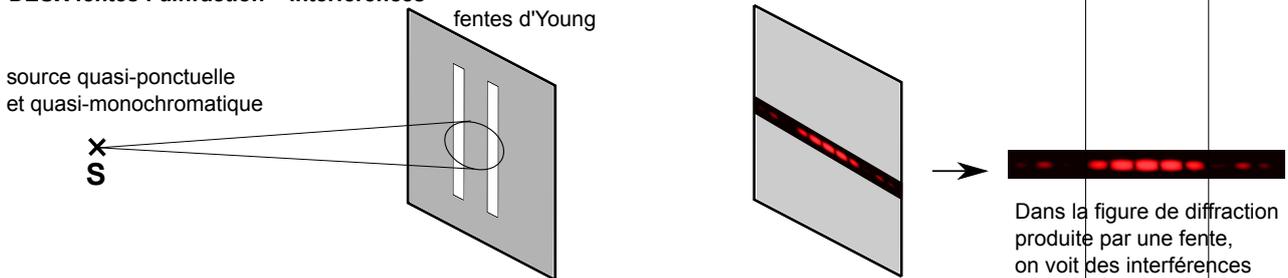
4 – Expérience des trous d'Young et des fentes d'Young

a/ expérience des fentes d'Young

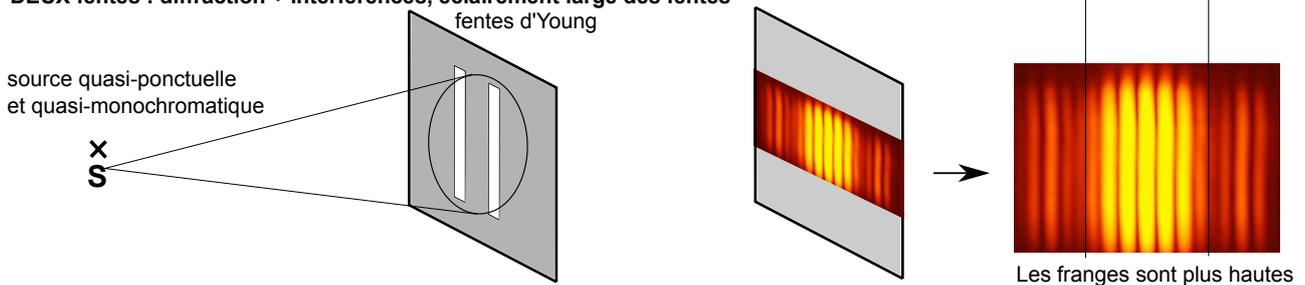
UNE fente : diffraction



DEUX fentes : diffraction + interférences

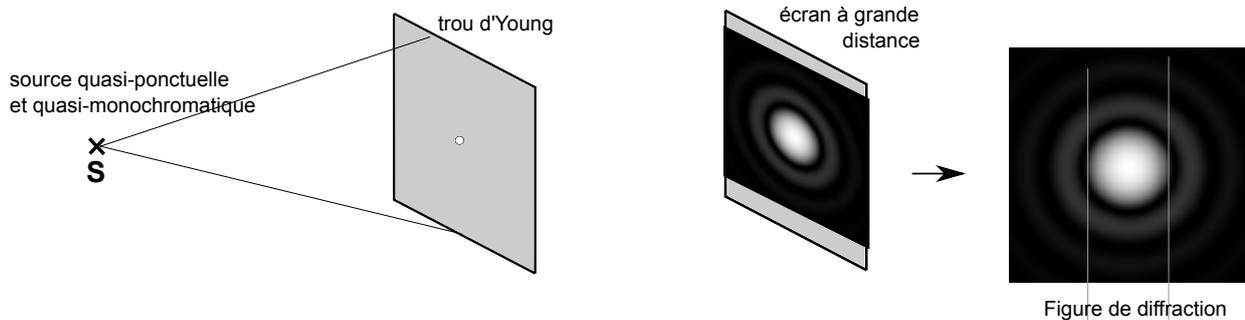


DEUX fentes : diffraction + interférences, éclairage large des fentes d'Young

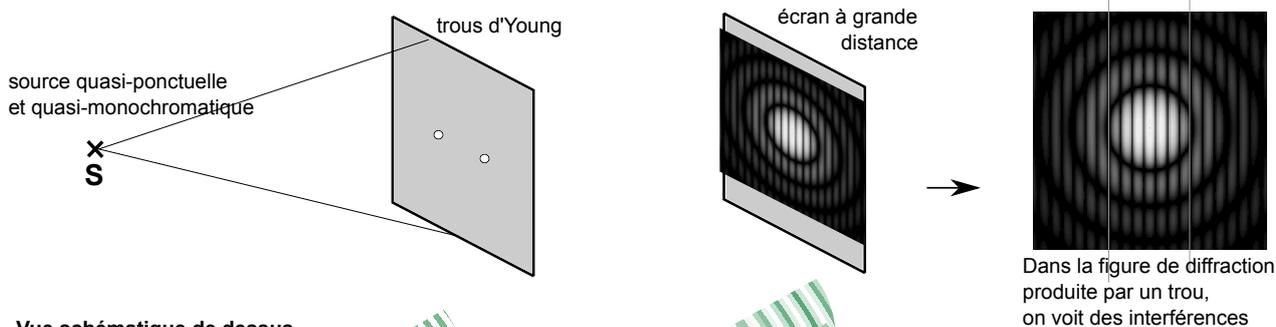


b/ une version plus simple à étudier : expérience des trous d'Young

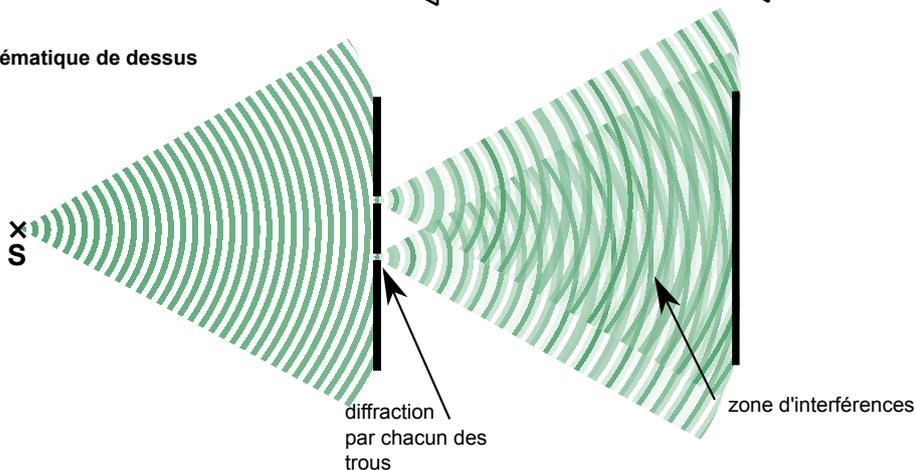
UN trou : diffraction



DEUX trous : diffraction + interférences



Vue schématique de dessus



c/ Rôle de la diffraction et hypothèse d'un éclairage uniforme

Les expériences des fentes d'Young et des trous d'Young montrent que les interférences sont dans la figure de diffraction créée par une seule fente ou un seul trou.

Mais dans ce chapitre on n'étudie pas la diffraction.

On cherche donc à reproduire, avec notre modèle, uniquement les interférences. C'est-à-dire la succession de maxima et minima comme ci-contre.

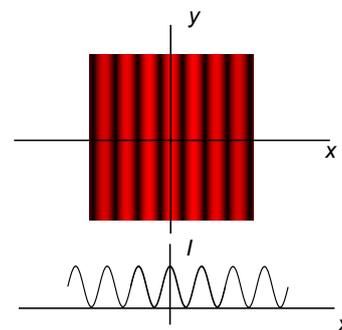


Figure d'interférence décrite mathématiquement dans ce chapitre

Ceci se traduit par l'hypothèse que l'intensité produite par un seul trou ou une seule fente est uniforme sur l'écran (si il est seul). On peut alors appliquer la formule de Fresnel vue plus haut.

~8 Faire l'EC3.