

Montage DIFFRACTION DES ONDES LUMINEUSES

contact : pierre.lombardo@univ-amu.fr

1 Introduction

Un aspect essentiel de ce montage est de comprendre la différence entre la diffraction de Fraunhofer et celle de Fresnel (voir les rapports de jury). Les propriétés de la diffraction de Fraunhofer (issues de celles de la transformée de Fourier) sont aussi à montrer en détail. Les expériences doivent être faites parfois avec un laser mais pas seulement : utiliser aussi une source de lumière blanche (quartz-iode) éclairant un trou source à travers un condenseur. Les concepts de fréquences spatiales (pour le filtrage) ainsi que le critère de Rayleigh pour le pouvoir de résolution doivent être clairement exposés.

Rapport de jury 2016 : La différence entre diffraction de Fraunhofer et diffraction de Fresnel doit être connue, et on doit s'assurer que les conditions de Fraunhofer sont remplies si l'on utilise les formules associées. Attention aux expériences de filtrage spatial qui sont souvent mal comprises. La détermination de la taille d'un fil ou d'un cheveu est d'autant plus intéressante que la valeur mesurée peut être comparée à une valeur tabulée ou mesurée par une technique complémentaire. Le jury voit trop souvent des expériences de diffraction par des fentes, généralement mal calibrées, servir à mesurer des longueurs d'ondes de lasers !

Rapport de jury 2015 : Diffraction des ondes lumineuses. La différence entre diffraction de Fraunhofer et diffraction de Fresnel doit être connue, et l'on doit s'assurer que les conditions de Fraunhofer sont remplies si l'on utilise les formules associées. Attention aux expériences de filtrage spatial qui sont souvent mal comprises. La détermination de la taille d'un fil ou d'un cheveu est d'autant plus intéressante que la valeur mesurée peut être comparée à une valeur tabulée ou mesurée par une technique complémentaire.

Rapport de Jury 2013 : Montage 8 : La différence entre diffraction de Fraunhofer et diffraction de Fresnel doit être connue, et l'on doit s'assurer que les conditions de Fraunhofer (tant sur l'onde incidente que sur le plan d'observation) sont remplies si l'on utilise les formules associées. Rappelons que les phénomènes de diffraction peuvent s'observer avec d'autres sources lumineuses que des lasers, dont le « speckle » peut parfois nuire à la précision des mesures.

Rapport de Jury 2011 : 8 Diffraction des ondes lumineuses. La différence entre diffraction de Fraunhofer et diffraction de Fresnel doit être connue, et l'on doit s'assurer que les conditions de Fraunhofer (tant sur l'onde incidente que sur le plan d'observation) sont remplies si l'on utilise les formules associées. Rappelons que les phénomènes de diffraction peuvent s'observer avec d'autres sources lumineuses que des lasers, dont le « speckle » peut parfois nuire à la précision des mesures.

Rapport de Jury 2009 : 8 Diffraction des ondes lumineuses. La diffraction de Fraunhofer est souvent évoquée sans que ses conditions d'obtention soient bien connues. Rappelons que les phénomènes de diffraction peuvent s'observer avec d'autres sources lumineuses que des lasers.

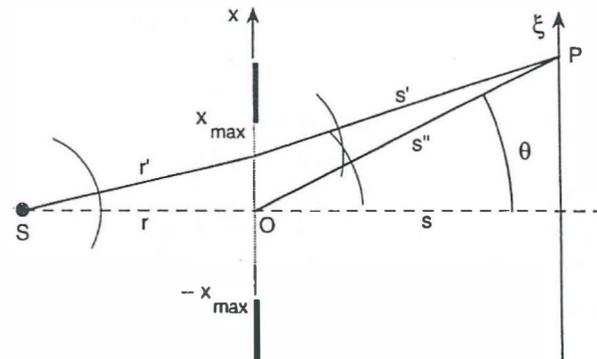
Rapport de Jury 2008 : 8 Diffraction des ondes lumineuses. Dans toute expérience d'optique, les figures sont de bien meilleure qualité quand les appareils sont convenablement alignés. Ce fut tout particulièrement le cas pour ces deux montages.

Rapport de Jury 2007 : 10. Diffraction des ondes lumineuses. Il ne suffit pas de présenter des expériences du niveau de la classe de seconde. Il existe d'autres sources lumineuses que les sources laser.

Rapport de Jury 2005 : Montage 10 : Il est souhaitable de ne pas se limiter aux sources lasers.

Rapport de Jury 2004 : Montages 9 et 10 : Dans ces montages, les mesures de largeurs de fentes mal calibrées, ou dont la largeur est donnée de manière indicative (sans indication de précision),

ne peuvent pas constituer le thème central de l'étude. Il serait illusoire d'espérer déterminer avec une précision satisfaisante la longueur d'onde d'un laser He-Ne à partir de l'analyse de la figure de diffraction par une fente, même calibrée. L'utilisation de montages avec réseaux doit être mieux maîtrisée, en évitant de confondre angles et déviations par rapport à l'ordre zéro. Les conditions de Fraunhofer, plus larges que la simple « diffraction à l'infini », gagneraient à être connues. Dans les expériences de filtrage spatial de type passe-haut, l'utilisation d'objets de phase serait certainement plus pertinente que celle d'une plume.



2 Passage quantitatif de Fresnel à Fraunhofer

Biblio : [1] page 138

Cette première expérience, très simple, est essentielle pour ce montage. Elle montre quantitativement comment on passe de la diffraction de Fresnel à celle de Fraunhofer. La source ponctuelle S est suivie de la fente diffractante puis d'un écran. Les distances avant (s) et après (d) la fente seront choisies pour que les calculs soient simples, par exemple $s = 10 \text{ cm}$ et $d = 1 \text{ m}$. La fente doit être étalonnée de telle sorte que l'on puisse lire directement sa largeur sans avoir à en faire une image agrandie.

La manipulation consiste à estimer le terme de phase d'ordre 2 (dans le développement de la phase de la page 138 du Sextant) pour deux largeurs de fente a différentes.

- D'abord pour une fente large, loin de la diffraction de Fraunhofer, on observe sur l'écran une figure de diffraction très différente du sinus cardinal attendu dans la diffraction de Fraunhofer. On pourra par exemple choisir $a = a_1$ tel que le centre de la figure soit un minimum d'intensité. On calcule le terme de phase d'ordre 2 : $\Phi^{(2)}/2\pi = (a_1^2/\lambda s + a_1^2/\lambda d) \approx a_1^2/\lambda s$, qui doit être grand devant 1.
- Pour une fente bien plus fine $a = a_2$, on observe sur l'écran une figure proche de celle de Fraunhofer (sinus cardinal) et on trouve en effet $\Phi^{(2)}/2\pi \approx a_2^2/\lambda s \ll 1$.

Ceci montre que la diffraction de Fraunhofer correspond au cas où la phase est linéaire en x, y (coordonnées dans le plan du diaphragme diffractant). La figure de diffraction est donc la transformée de Fourier bi-dimensionnelle de la fonction de transparence $t(x, y)$ du diaphragme.

Ceci implique toute une série de propriétés de la figure de diffraction de Fraunhofer. Mais l'importance de la diffraction de Fraunhofer est surtout due au fait qu'on retrouve une phase linéaire dans presque toutes les situations de l'optique. En effet, lorsque l'on forme l'image d'un point, on retrouve le développement de la page 138 du Sextant avec $s = -d$ et ainsi tous les termes disparaissent sauf le terme d'ordre 1. On vérifiera expérimentalement qu'en prenant l'image du point S sur l'écran, une fente diffractante donne bien un sinus cardinal sur l'écran. On appelle cette situation : diffraction au voisinage de l'image géométrique de la source.

$$\Phi/k_0 = -x \sin \theta$$

$$+ \frac{x^2}{2} \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{s} \right)$$

$$- \frac{x^4}{8} \left(\frac{1}{r^3} + \frac{1}{s^3} \right)$$

$$- \frac{3\xi^2 x^2}{4s^3} + \frac{\xi x^3}{2s^3}$$

+ ε

ordre 1

ordre 2

ordre 4

ordre 4

ordre ≥ 5

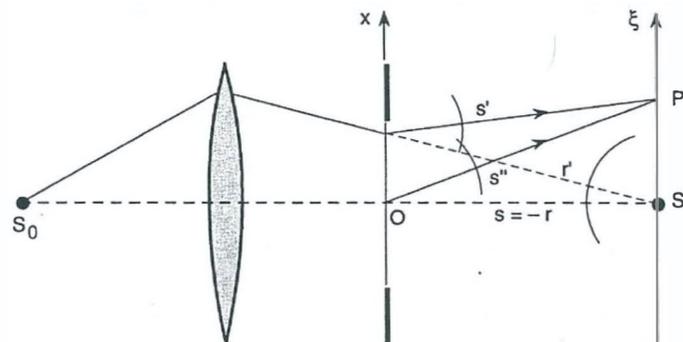


Figure III.21 : Cas particulier de la figure III.20 correspondant à $r = -s$; la source S est l'image virtuelle de la source S_0 fournie par une lentille. On a représenté en traits fins quelques surfaces d'onde.

3 Propriétés de la diffraction de Fraunhofer

Biblio : [1] page 109

Dans le cas discuté ci-dessus de diffraction au voisinage de l'image géométrique de la source, avec un laser + objectif de microscope + lentille + fente + écran, on montre que :

- (P1) la figure de diffraction reste perpendiculaire à la fente source lorsqu'on tourne cette dernière.
- (P2) si on translate dans son plan la fente diffractante, la figure ne change pas.
- (P3) si on élargit la fente, la figure de diffraction se rétrécit (et inversement).
- (P4) la figure de diffraction du diaphragme complémentaire $\tilde{t}(x, y) = 1 - t(x, y)$ est identique (sauf au centre) à la figure de diffraction du diaphragme original.

Toutes ces propriétés sont les conséquences du fait que la figure de diffraction de Fraunhofer est la transformée de Fourier bi-dimensionnelle de $t(x, y)$.

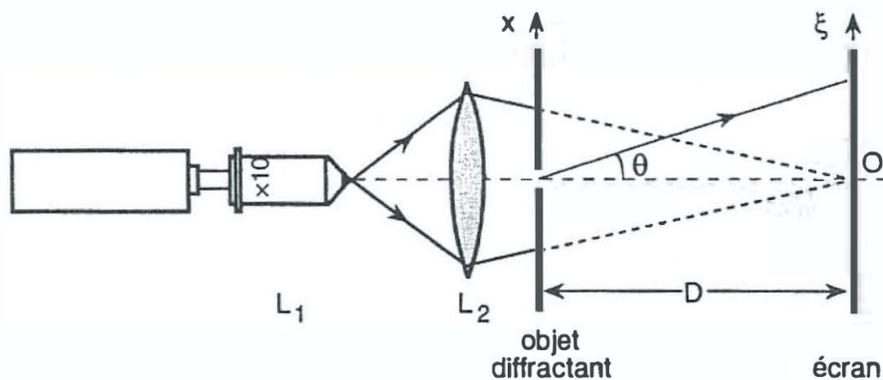


Figure III.5. Montage permettant d'observer la figure de diffraction de Fraunhofer d'un faisceau laser par une fente.

Le faisceau laser est élargi au niveau de l'objet diffractant à l'aide de deux lentilles L_1 et L_2 . L_1 peut être un objectif de microscope utilisé comme indiqué. L'objet diffractant est placé après L_2 de façon à être totalement éclairé.

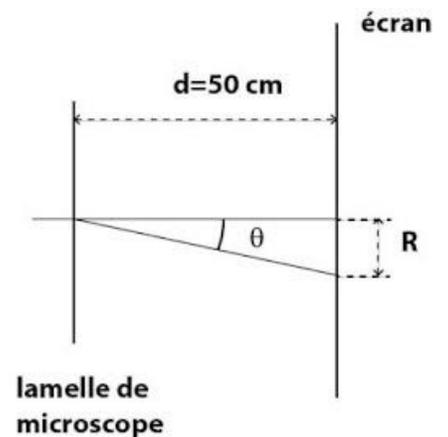
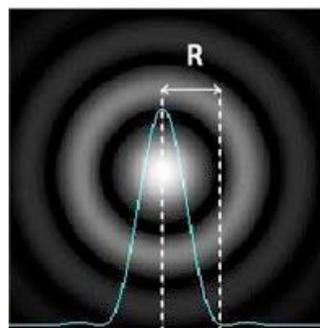
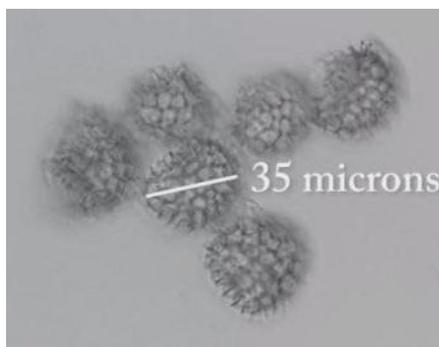
4 Diffraction par un disque opaque

Biblio : [1] page 122

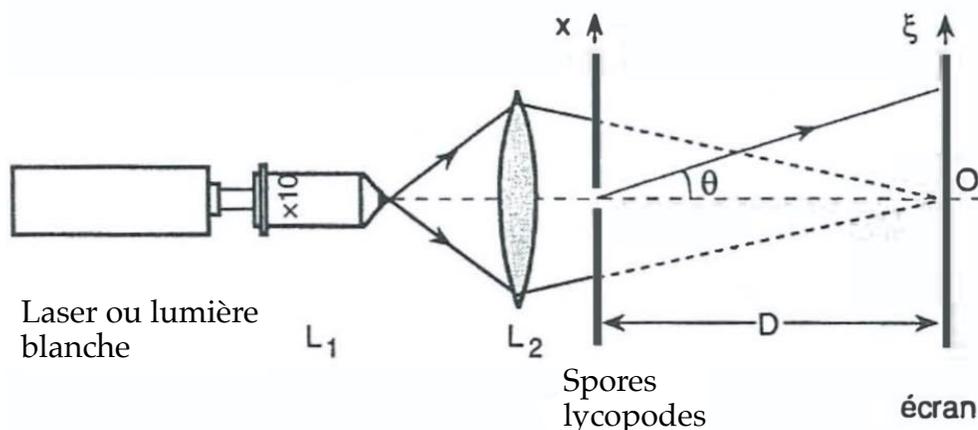
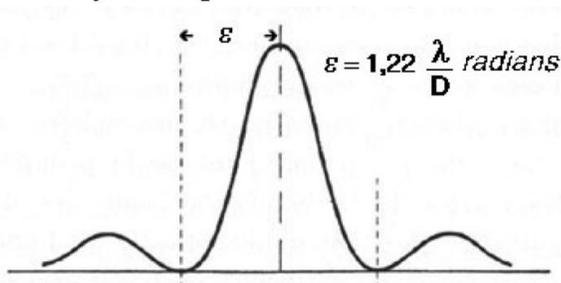
La plupart des diaphragmes en optique sont circulaires (trous, monture de lentille etc...). Ici on cherche à montrer à quoi ressemble la figure de diffraction de Fraunhofer d'un diaphragme circulaire. On fait cette manipulation en lumière blanche pour changer. On éclaire donc un trou source avec une QI via un condenseur. On fait l'image de ce trou sur l'écran et on dispose l'objet diffractant après la lentille.

Grâce à la propriété (P2), on pourrait envisager de faire un grand nombre de trous dans une plaque pour avoir un grand nombre de figures de diffraction qui se superposent et ainsi gagner en luminosité. Mais tous ces trous doivent être circulaires et de même diamètre ce qui pose un problème de réalisation. On contourne ce problème en utilisant la propriété (P4) : plutôt qu'un grand nombre de trous, on utilise comme objet diffractant un grand nombre de disques opaques : les spores de lycopode, qui présentent l'intérêt de ne présenter qu'une très faible dispersion sur leur diamètre.

On observe ainsi sur l'écran la tache d'Airy (sauf au centre). Pour la caractériser on mesure le rayon du premier anneau noir R et on vérifie que $\sin \theta = 1.22\lambda/d$. Ici θ est défini par $\tan \theta = R/d$. On doit retrouver que le diamètre d des spores de lycopode est de 30 à 35 μm .



Rayon du premier anneau noir :



5 Filtrage spatial : expérience d'Abbe et strioscopie

Biblio : [1] page 128

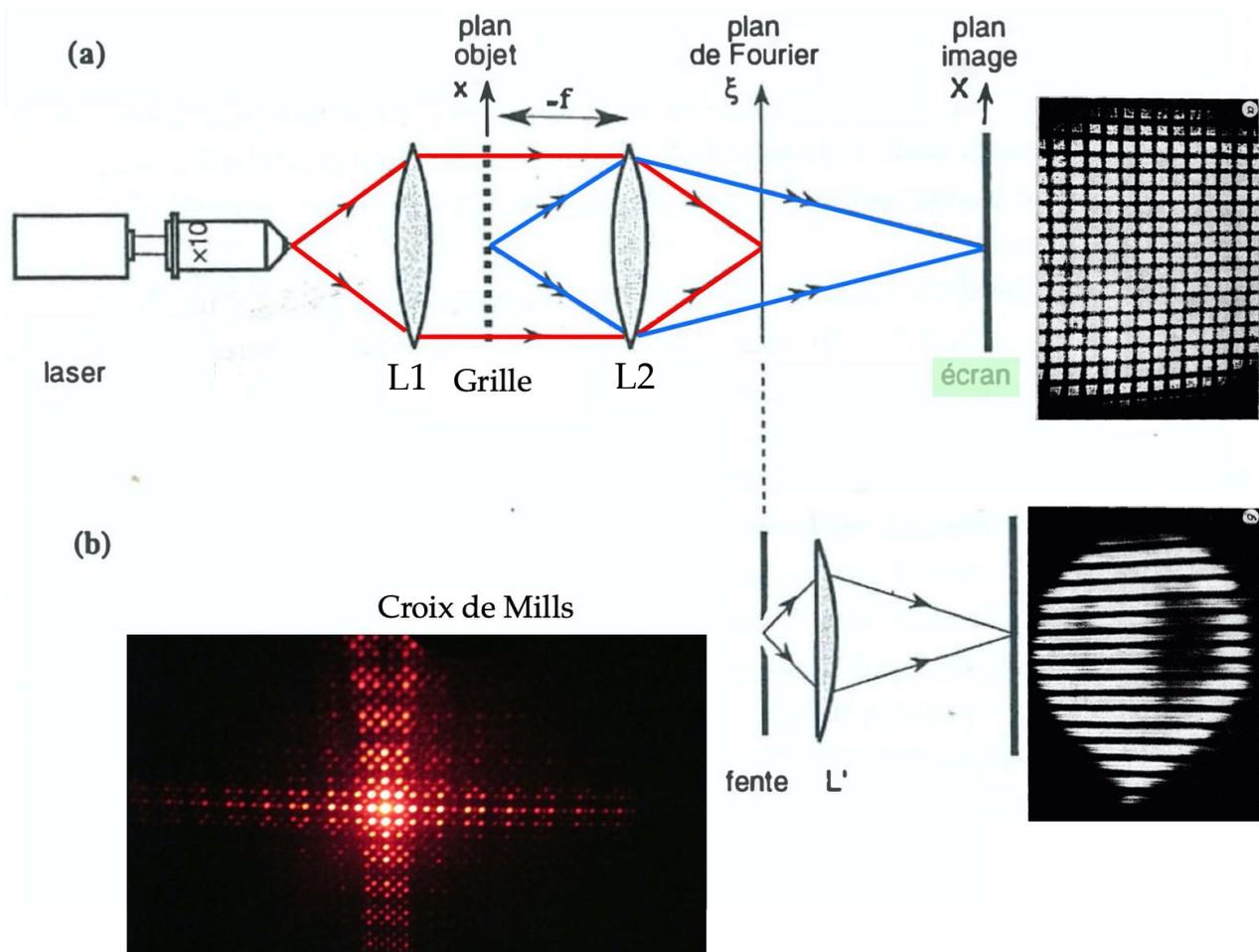
Expérience importante qui revient dans plusieurs montages (Filtrage par exemple). Elle peut être faite en lumière blanche+trou source ou avec un laser He-Ne. Ici on a deux lentilles L_1 et L_2 . Une difficulté est de comprendre que L_2 joue un double rôle :

- en effet L_1+L_2 conjugue la source ponctuelle avec le plan de Fourier (qui n'est plus sur l'écran ici, mais en avant de l'écran). C'est dans ce plan qu'on observe la figure de diffraction de Fraunhofer et qu'on peut venir filtrer les fréquences spatiales dans cette figure ;
- L_2 seule conjugue également l'objet diffractant (la grille) avec l'écran.

Le choix de la grille est primordial ici. Elle doit être assez fine pour bien diffracter et pour qu'on puisse venir filtrer les fréquences spatiales avec une fente dans le plan de Fourier. Mais elle doit être assez grosse pour qu'on puisse en faire une image par L_2 bien visible sur l'écran.

En filtrant avec une fente verticale on ne laisse passer que la fréquence spatiale $q_x = 0$, tandis qu'on laisse passer toutes les fréquences spatiales q_y . On a donc un passe-bas sur x et un passe-tout sur y . L'image de la grille s'en trouve altérée : on ne voit plus que les lignes horizontales (variations de la fonction de transparence $t(x, y)$ en fonction de y seulement puisque les fréquences q_y sont conservées. Par contre, $t(x, y)$ ne varie plus par rapport à x puisqu'on n'a plus que la fréquence spatiale nulle ($q_x = 0$).

L'expérience sur la strioscopie est très similaire à celle d'Abbe. La différence principale est le filtrage : on n'utilise plus une fente mais un petit disque opaque pour retirer les fréquences spatiales nulles sur x et sur y . On a donc un passe-haut sur x et sur y , c'est à dire qu'on retire la composante continue de l'image. On n'aura de la lumière sur l'écran uniquement dans les zones où $t(x, y)$ varie. Comme objet diffractant, on peut prendre une lame de verre de microscope sur laquelle on dépose son empreinte digitale. Par strioscopie, seule l'empreinte devient lumineuse, sur fond noir.



6 Pouvoir de résolution : critère de Rayleigh

Biblio : [1] page 135

On éclaire une bi-fente (écart entre les fentes b) et on en forme l'image sur un écran par une lentille (grandissement γ de l'ordre de 10) à laquelle on a accolé une fente étalonnée de largeur a . Le but est de montrer quantitativement que la diffraction limite le pouvoir de résolution des instruments d'optique. Ici l'instrument est l'ensemble lentille+fente et on dégrade à loisir son pouvoir de résolution en réduisant la largeur de la fente.

Sur l'écran, l'écart entre les images des deux fentes est γb (de l'ordre de 2, 3 ou 5 mm suivant la bi-fente choisie). On vérifie que la perte de résolution survient lorsque la diffraction est suffisante. En effet, l'image de chaque fente (composant la bi-fente) est un sinus cardinal sur l'écran. La demi-largeur du pic central est $\xi = \lambda d/a$ où d est la distance entre la fente diffractante et l'écran. Si on considère chaque fente composant la bi-fente comme une source ponctuelle, on est en effet dans les conditions de Fraunhofer puisqu'on observe la diffraction au voisinage de l'image géométrique de la source. On vérifie pour plusieurs valeurs de b , que la bi-fente n'est plus résolue dès que a est tel que $\lambda d/a = \gamma b$ ce qui confirme que la diffraction est bien à l'origine de cette limitation du pouvoir de résolution.

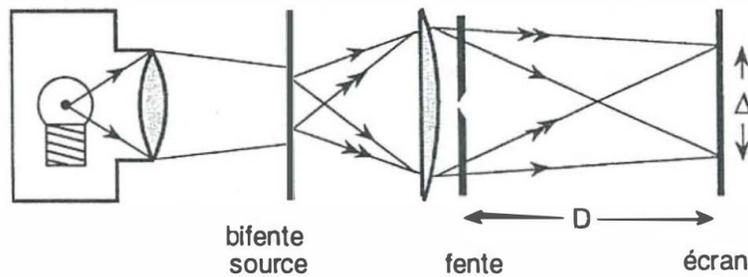


Figure III.19 : Projection de l'image d'une bifente sur un écran. La fente diffractante est introduite pour analyser les effets de la diffraction sur la résolution des deux fentes-images, séparées de Δ .

La largeur du diaphragme-fente réglable est e .

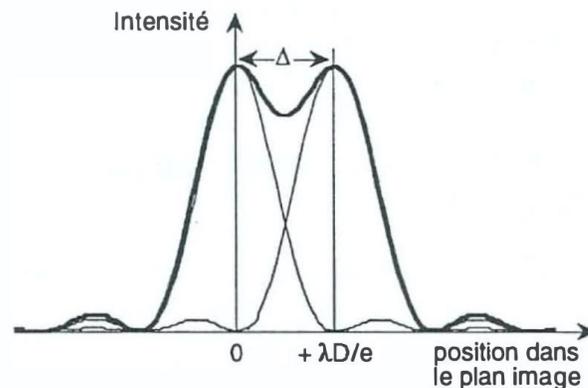


Figure III.18 Intensité de l'image de chacune des fentes-sources (trait fin) et superposition des deux images dans le cas où la distance qui les sépare est exactement la demi-largeur de leur tache centrale (critère de Rayleigh).

Ce sont les intensités qui s'ajoutent, dans le cas supposé où les deux fentes sont éclairées de façon incohérente. À la limite de résolution, l'écart Δ entre les deux images est $\Delta = \lambda D/e$.

Références

[1] Sextant *Optique expérimentale*