Chapitre 2

Manipulation 2 : Interféromètre stellaire de Michelson et Pease.

Parmi les nombreuses applications métrologiques de la diffraction et des interférences, il faut citer l'interféromètre stellaire de Michelson et Pease (1920) mis au point plus d'un siècle après l'expérience des trous d'Young (1801). Cette manipulation a pour but de montrer, sur un dispositif simplifié, comment on a pu utiliser les phénomènes liés au caractère ondulatoire de la lumière pour mesurer des diamètres d'étoiles lointaines. Elle constitue une suite naturelle de la manipulation sur les fentes d'Young.

2.1. Partie théorique : Largeur de la source-mère – Interféromètre stellaire

On aborde ici le problème de l'influence de la largeur de la source-mère dans une expérience d'interférences.

En amont de la pupille $(\mathcal{P})$, la source qui produit l'onde plane initiale est appelée *source-mère*. Pour une expérience avec des fentes d'Young par exemple, ce sera une fente $(\mathcal{S})$ parallèle aux fentes d'Young et située en S, suffisamment loin avant $(\mathcal{P})$ pour que l'onde arrivant sur $(\mathcal{P})$ soit pratiquement plane (figure 2.1). On appellera D la distance SP et s la largeur de la source-mère.

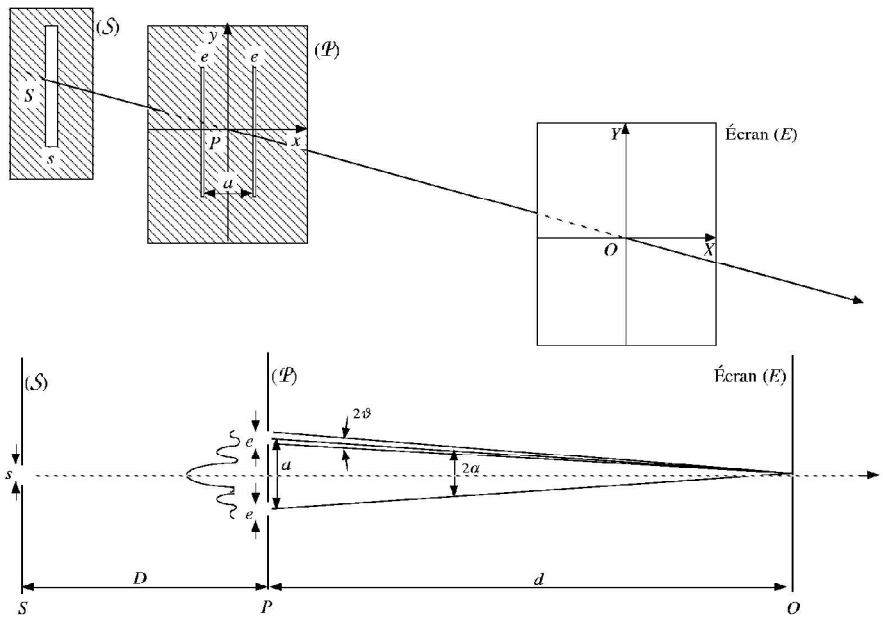

Figure 2.1 : Montage complet pour une expérience d'interférences.

Il est clair que la largeur de la fente $(\mathcal{S})$ est à l'origine un phénomène de diffraction : si s est faible, la tache centrale créée par le faisceau incident au niveau de P est large et les deux fentes d'Young sont éclairées par cette tache. Par contre, si s est grand, alors la tache centrale au niveau de P est étroite, comme cela est suggéré sur la figure 2.1, et on peut se demander ce qu'il advient de la cohérence entre les vibrations qui arrivent sur les fentes. En fait, on montre que plus s croît, moins les fentes ont de chance d'être éclairées par des vibrations en relation de phase. Un calcul plus complet montre que c'est le contraste des franges observées sur l'écran en O qui traduit cet effet : dans le cas usuel où l'onde plane issue de $(\mathcal{S})$ arrive normalement sur $(\mathcal{P})$ et où SP est normal au plan des fentes d'Young, l'intensité

résultante en un point (X, Y) de l'écran s'écrit (réf. [3])

$$I(X,Y) = 2sI_0 \left[1 + \mathrm{sinc}\frac{\pi a s}{\lambda D} \cos\left(\frac{2\pi a}{\lambda d} X\right)\right] .$$

On retrouve donc la forme habituelle des intensités interférentielles, $I \sim \cos^2 \frac{\phi}{2}$ ou $I \sim 1 + \cos\phi$, mais ici avec un facteur de contraste $\mathrm{sinc}\frac{\pi a s}{\lambda D}$ qui atténue d'autant plus l'effet du cosinus que l'argument $\frac{\pi a s}{\lambda D}$ du sinus cardinal est grand. Tant que $\frac{\pi a s}{\lambda D}$ est faible, le sinus cardinal est proche de 1 en ordre de grandeur. La courbe de la figure 2.2, où le sinus cardinal est tracé en fonction de la largeur s de la source-mère, montre que cela est vrai, en gros, tant que $\frac{\pi a s}{\lambda D}$ est nettement inférieur à π, donc s inférieur à $\frac{\lambda D}{a}$.

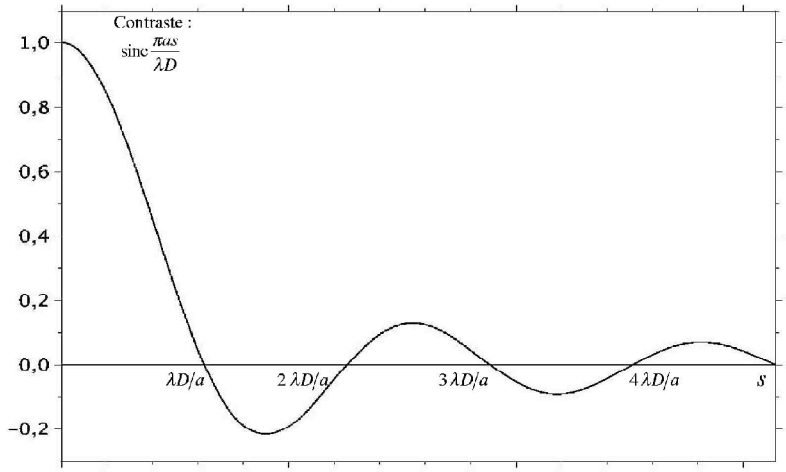

FIGURE 2.2 : Contraste en fonction de la largeur s de la source-mère dans une expérience d'interférences.

Par contre, on voit que le contraste s'annule pour $s = \frac{\lambda D}{a}$: on n'observe plus de franges sur l'écran en O. Après cette valeur, le contraste devient négatif ; il le reste tant que s est inférieur à $2\frac{\lambda D}{a}$; ceci se traduit sur l'écran par le remplacement des franges brillantes par des franges noires et vice-versa ; dans cette second arche, le contraste est beaucoup plus faible que dans l'arche initiale. Une nouvelle annulation puis une nouvelle inversion de signe fait disparaître de nouveau les franges puis réapparaître de motif initial, avec un contraste encore diminué, etc.

On n'est pas étonné de ce phénomène : en fait dans le rapport $\frac{\lambda D}{a s}$, on voit apparaître l'angle $\beta \approx \frac{s}{D}$ sous lequel de P on voit la source-mère $(\mathcal{S})$; $\frac{\lambda D}{s}$ est donc $\frac{\lambda}{\beta}$, (demi-) largeur de cohérence de l'onde arrivant en P, et dans le rapport $\frac{\lambda D}{a s}$, cette largeur est comparée à la distance a des fentes d'Young : si elle est grande devant a, c'est-à-dire si s est faible devant $\frac{\lambda D}{a}$, alors les interférences sont bien visibles car la cohérence recouvre les deux fentes (on est dans la demi-arche centrale du sinus cardinal).

Pendant le TP, il sera possible d'examiner en détail ce phénomène ; il faut impérativement observer la succession décrite précédemment : interférences bien contrastées, disparition, inversion du motif, nouvelle disparition, rétablissement du premier motif avec un contraste très atténué etc.

Mais l'application essentielle de ce phénomène est l'interféromètre stellaire de Michelson et Pease. La disparition d'un système de franges étant plus facilement détectable qu'un maximum de contraste, Michelson et Pease ont imaginé de se servir conjointement de la grande cohérence de la lumière qui nous parvient des étoiles et de l'expérience des fentes d'Young pour mesurer le diamètre angulaire apparent $\beta = s/D$ de certaines étoiles à partir de la première disparition du système de franges, la mieux détectable. Pour cela, il suffit, en principe, d'ajuster la distance a entre les fentes pour réaliser l'extinction du réseau de franges. Comme on est au premier zéro du sinus cardinal, on obtient $\beta = \lambda/a$. Les détecteurs qui jouent le rôle des fentes d'Young devaient être extrêmement sensibles, mais Michelson et Pease sont parvenus à réaliser cette expérience. Les distances a typiques entre les détecteurs étaient de l'ordre de plusieurs mètres.

2.2. Partie expérimentale

Ce T.P. est la suite du T.P. **Fentes d'Young** ; il a pour but de nouvelles applications métrologiques : la mesure d'angles et surtout celle du diamètre d'étoiles par interférométrie astronomique.
Se reporter en annexe pour une utilisation correcte de l'oculaire micrométrique.

Matériel : on dispose autour d'un banc d'optique de 2 m, d'une source de lumière blanche et d'une lampe à vapeur de sodium (lampe Na), d'une fente à largeur réglable qui servira de source-mère $(\mathcal{S}_2)$ en S, de deux lentilles convergentes montées sur cavaliers ($(\mathcal{L}_3)$ de focale 500 mm et $(\mathcal{L}_4)$ de focale 250 mm), de quelques cavaliers-supports pour placer les filtres et les fentes d'Young (pupilles $(\mathcal{P})$ en P), d'un oculaire micrométrique $(\mathcal{M})$ qui remplacera l'écran E d'observation en O, d'un goniomètre pour la mesure des angles et des fentes d'Young F_3 qui nous serviront tout au long du T.P. (leur distance a est donnée en salle de T.P.).

Avant toute chose, il faut allumer la lampe Na car elle nécessite quelques minutes de chauffe et sera utile dès le début du travail.

2.2.1. Métrologie par des fentes d'Young : mesures d'angles

Effectuer le montage simplifié de la figure 2.3 : placer la fente réglable $(\mathcal{S}_2)$ en bout de banc (en S) et la lampe

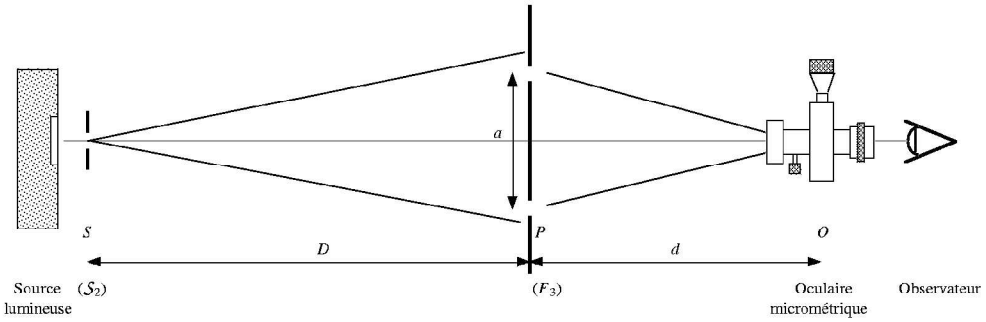

FIGURE 2.3

Na derrière elle. Installer le goniomètre sur le banc, en P, et s'assurer de son centrage et de son parfait alignement avec le banc (ceci est très important). Fixer provisoirement les fentes d'Young F_3 sur le goniomètre. Placer l'oculaire micrométrique en O, à l'autre extrémité du banc (attention aux chutes !) et fixer $d = PO$ à au moins 300 mm mais de telle façon que la manipulation du goniomètre soit aisée lorsqu'on regarde dans l'oculaire ; $D = SP$ doit être à plus de 600 mm. Revenir sur la position des fentes F_3 en vérifiant leur correcte orientation par rapport à la source-mère $(\mathcal{S}_2)$ (verticalité) par la netteté des franges observées dans l'oculaire. S'assurer que la rotation de F_3 avec le goniomètre ne déplace pas excessivement les franges observées (ajustement de l'axe de rotation de F_3 avec le banc).

Mesures : Le but de ce travail est d'obtenir un alignement du goniomètre aussi correct que possible pour l'étude suivante de l'interféromètre de Michelson et Pease. Commencer par faire une série de plusieurs mesures de l'interfrange $i' = \lambda d/a'$ pour un angle α correspondant à 0° sur le vernier du goniomètre. L'écartement apparent des fentes selon l'axe optique étant en principe $a' = a\cos\alpha$, a étant l'écartement réel donné en salle de T.P., s'assurer que $\text{Arcos}\left(\frac{\lambda d}{ai'}\right)$ est compatible avec l'angle $\alpha = 0^\circ$ lu ; corriger éventuellement l'orientation axiale du goniomètre en conséquence.
Une fois le goniomètre aussi bien aligné que possible, mesurer l'interfrange i' pour une dizaine d'angles α lus entre 0° et environ 60° sur le vernier du goniomètre.

Exploitation : Tracer l'angle mesuré $\alpha' = \text{Arcos}\left(\frac{\lambda d}{ai'}\right)$ en fonction de l'angle α lu, en utilisant la valeur de a donnée. En déduire, d'après l'allure de la courbe, l'erreur systématique sur l'angle mesuré α' et la fluctuation des mesures autour de cette systématique.

2.2.2. Interféromètre stellaire de Michelson

Diamètres angulaires apparents

Montage : On conserve le montage précédent et on s'intéresse à l'influence de $D - SP$. On fixe la distance entre le micromètre et les fentes F_3 à $d = PO \approx 150$ mm ; on maintiendra cet écart constant par la suite pour éliminer l'influence d'une variation de d.

Mesures : Faire varier la distance entre $(\mathcal{S}_2)$ et F_3, $D = SP$, de sa valeur minimum (environ 150 mm) à sa valeur maximum (à partir de $D \approx 600$ mm il devient nécessaire de travailler à deux) par pas de 100 mm. Pour chacune des valeurs, ajuster la largeur s de $(\mathcal{S}_2)$ pour obtenir l'extinction des franges d'interférences dans l'oculaire. Relever la valeur lue s_{lu} de la largeur s et la corriger en s_{corr} par la courbe de calibration adéquate de la figure 2.4.

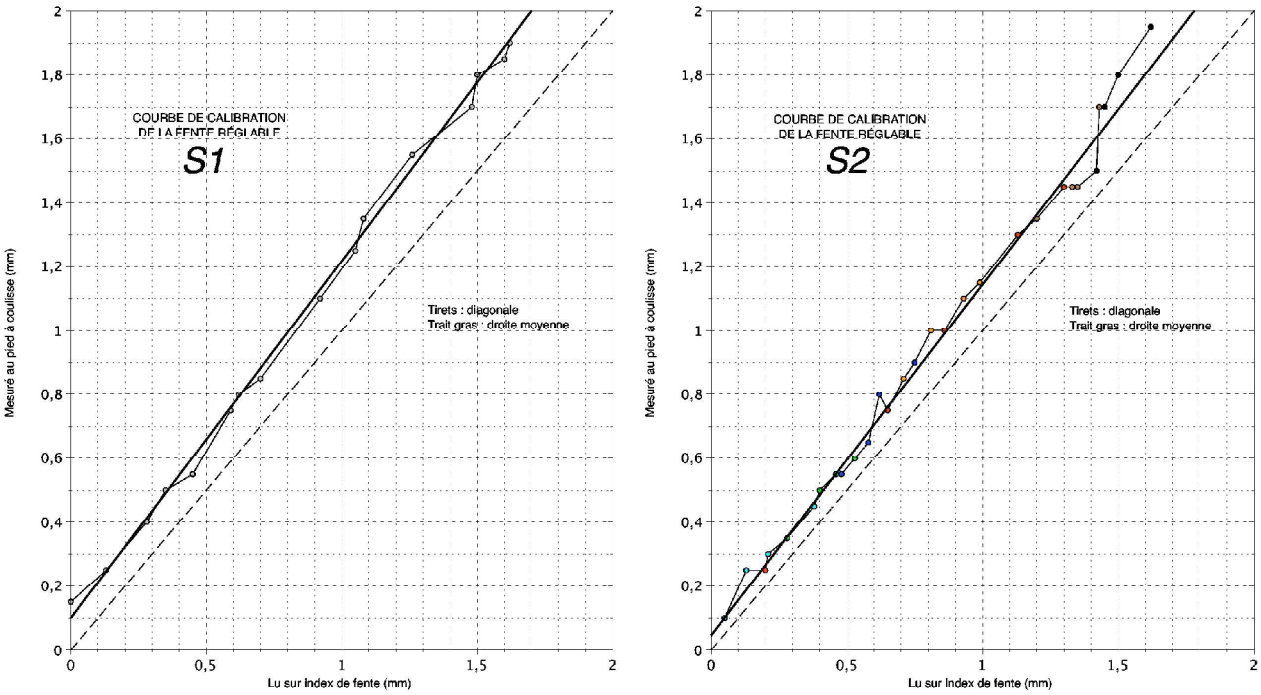

FIGURE 2.4 : Courbes de calibration des largeurs des fentes réglables $(\mathcal{S}_1)$ et $(\mathcal{S}_2)$.

Exploitation : Des mesures précédentes, déduire chaque fois le " diamètre " angulaire apparent de la source-mère $(\mathcal{S}_2)$, $\phi = s_{\text{corr}}/D$ et le porter sur un graphe en fonction de D (**cette courbe sera utilisée par la suite**). Théoriquement, quelle devrait être la valeur de ϕ ? Pourquoi obtient-on un résultat différent ?

Montage

On va créer un montage simulant l'observation d'une étoile par un interféromètre stellaire de Michelson et Pease.

En conservant les éléments précédents (lampe Na, source-mère $(\mathcal{S}_2)$ en S, goniomètre portant les fentes d'Young F_3 en P, oculaire micrométrique en O) et sans les déplacer (en particulier ne pas modifier le positionnement du goniomètre !), effectuer le montage de la figure 2.5 en intercalant les lentilles $(\mathcal{L}_3)$ (focale 500 mm) entre S et P (autocollimater $(\mathcal{L}_3)$ pour que S soit son foyer objet − voir annexe) et $(\mathcal{L}_4)$ (focale 250 mm) entre P et O (vérifier la netteté de l'image de $(\mathcal{S}_2)$ dans l'oculaire pour que O soit le foyer image de $(\mathcal{L}_4)$).

De cette façon, l'image de la source-mère $(\mathcal{S}_2)$ est renvoyée à l'infini par la lentille $(\mathcal{L}_3)$: $(\mathcal{S}_2)$ simule l'étoile éloignée. La lentille $(\mathcal{L}_4)$ joue le rôle de l'objectif d'un instrument dont l'oculaire est l'oculaire micrométrique en O. Les fentes d'Young F_3 sont l'élément original du dispositif de Michelson et Pease : elle sont disposées en amont de l'instrument d'observation, dans le faisceau de lumière parallèle provenant de l'étoile.

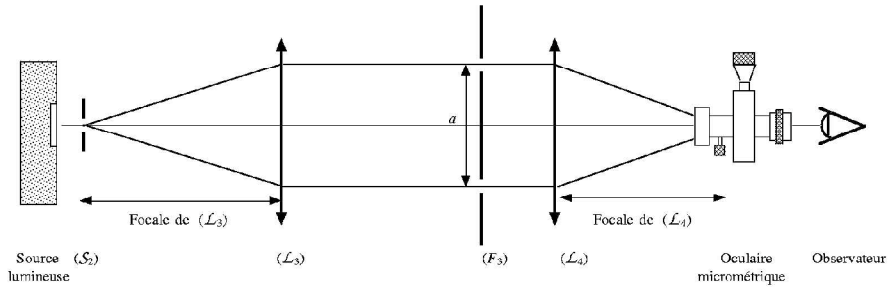

FIGURE 2.5

Diamètre apparent d'une étoile

Mesures : Afficher un angle α de 50° sur le goniomètre portant F_3 et augmenter la largeur s de la fente-mère ($\mathcal{S}_2$)) jusqu'à obtenir l'extinction des franges d'interférences. Noter la largeur s_{lu} lue sur la graduation approximative de ($\mathcal{S}_2$) et la corriger en s_{corr} en utilisant la courbe de calibration 2.4 adéquate. Sans changer α, diminuer légèrement la largeur s de ($\mathcal{S}_2$), noter s_{lu} et s_{corr}, puis diminuer la valeur de α jusqu'à une nouvelle disparition des franges. Noter la nouvelle valeur de α et déduire de cette mesure une valeur s_{exp} que l'on comparera au s_{corr}.

Reprendre le travail en affichant au hasard différentes valeurs de plus en plus faibles de s_{lu}, en déduire chaque fois s_{corr}, puis ajuster α pour obtenir une nouvelle disparition des franges. Déduire chaque fois de α la valeur s_{exp}. Ceci jusqu'à la valeur la plus faible possible de s pour laquelle on peut obtenir la disparition des franges ; cette valeur minimum correspond à la disparition des franges pour $\alpha = 0°$.

Exploitation : Porter s_{exp} en fonction s_{corr} sur un graphe. Conclusion ? (Utiliser la courbe $\phi(D)$ précédemment obtenue pour interpréter les résultats).

Question : Que se serait-il passé si on avait permuté les positions des lentilles ($\mathcal{L}_3$) et ($\mathcal{L}_4$) ?