

TP d'optique géométrique

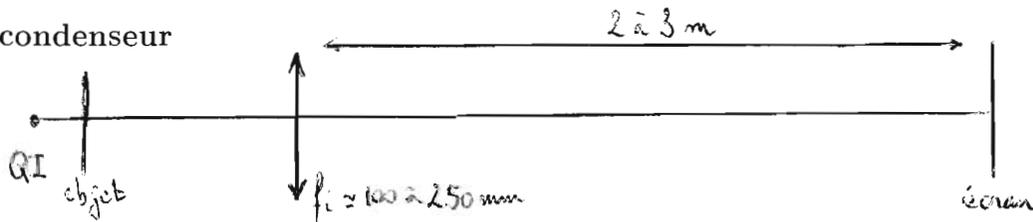
Ce texte de TP ne doit en aucun cas servir de ressource de travail mais simplement de guide sur les expériences que l'on peut (doit ?) faire en vue des oraux. Il n'est certainement pas exhaustif et ne vous dispense pas de connaître de façon approfondie les ouvrages de référence qui eux seront disponible le jour J. Pour ne citer que les plus couramment utilisés : Optique Expérimentale (Sextant), TP de physique (Journaux), Experiences d'Optique à l'Agrégation (Duffait). Je ne saurais trop vous conseiller de consulter les sites de certaines prépas (Montrouge, Cachan, Lyon, Grenoble et surtout Rennes) et d'éventuellement vous munir de certaines copies.

Pour commencer, vous lirez avec profit les chapitres d'introduction des Sextant et Duffait et/ou le poly de Rennes pour les généralités sur les sources, matériels etc...

1 Projection

Une part importante de l'optique géométrique expérimentale consiste en la projection d'un objet (i) sur un écran ou (ii) sur un capteur. Dans le premier cas l'image sera en général (très) agrandie ce qui pose le problème de l'éclairage en plus de celui de la conjugaison.

1.1 sans condenseur



Réaliser le montage ci-dessus avec comme objet un "F" (ou une grille) transparent ou diffusant et une lentille de focale de 100mm à 250mm. Pour une luminosité optimale on a intérêt à placer l'objet près de la source ; observer en conséquence la quasi image du filament sur l'écran. Qualité de la projection ?

1.2 avec condenseur

Intercaler un condenseur entre la source et l'objet (les 3 "serrés" l'un derrière l'autre). Remarquer que la mise au point ne change pas. Est-ce mieux du point de vue de l'éclairage ? Reculer progressivement la source. Observer que le résultat le meilleur est obtenu quand l'image du filament se forme au (voisinage du) centre de la lentille. On peut alors "desserrer" condenseur et objet pour améliorer encore un peu. On a la recette suivante : mettre la lentille de projection à 20 – 30cm de la source (pourquoi ?), mettre le condenseur et focaliser au centre de la lentille, mettre l'objet au voisinage du plan focal de la lentille (pourquoi ?) et faire la mise au point sur un écran à 2 – 3m.

1.3 conjugaison - focométrie

Vérifiez quantitativement la formule de conjugaison en notant les distances p_o et p_i pour différentes positions de l'écran. Mesurez systématiquement le grandissement et montrez qu'il y a deux positions qui réalisent la conjugaison. En déduire la valeur de la focale (méthode de Bessel). Comment faire pour une lentille divergente (méthode de Badal par exemple, HPrépa d'optique).

1.4 faisceau parallèle

Pour obtenir un faisceau parallèle, il ne suffit pas de placer un objet lumineux dans le plan focal objet d'une lentille : il faut de plus que celui-ci soit petit ! Réaliser un faisceau parallèle par autocollimation. En déduire au passage une estimation de la focale de la lentille utilisée. A-t-on intérêt à utiliser la recette pour la projection ? Que se passe-t-il si on focalise la source sur le trou ? Insérez alors un filtre coloré après le condenseur pour s'affranchir des aberrations chromatiques du condenseur.

2 aberrations

2.1 chromatiques

Supprimez la lentille du montage précédent et ne conservez que le condenseur. Rapprochez l'écran à $\approx 50cm$. Déplacer le diaphragme de part et d'autre du point de convergence et observer/interpréter les irisations rouges ou bleues. Laquelle de ces deux couleurs converge plus près de la lentille ? En déduire le signe de B dans la formule de Cauchy $n \approx A + B/\lambda^2$. Comment s'en affranchir ? (repérez les lentilles adéquates dans la collection)

2.2 géométriques

2.2.1 Réaliser la projection d'un objet à l'aide d'une lentille plan convexe (demi-condenseur) face bombée côté source. De tête, à quelle distance doit-on placer la lentille de l'objet si on veut un grandissement de l'ordre de -5 ? idem face plane côté source. Vérifiez la règle "plus plat, plus près". On aura intérêt à utiliser un filtre coloré. Si l'objet est un petit diaphragme on peut mesurer quantitativement la taille de l'image (qui n'en est pas une...) que l'on appelle *cercle de moindre confusion*.

2.2.2 Aberration de sphéricité : prendre un objet ponctuel, une source, un filtre et une lentille de grande ouverture. Faire l'image du trou, avec l'ensemble de la lentille éclairée, et pas seulement son centre comme dans la recette de projection. Observer la caustique, nappes sagittale et tangentielle en déplaçant l'écran ou dans une cuve de fluorescéine. Les rayons marginaux convergent-ils plus ou moins que les rayons paraxiaux? Diaphragmer la lentille pour observer une diminution de l'aberration.

2.2.3 Coma : Diaphragmer de moitié la lentille et éloigner le trou de l'axe, ou bien incliner légèrement la lentille (justifiez que cela revient au même).

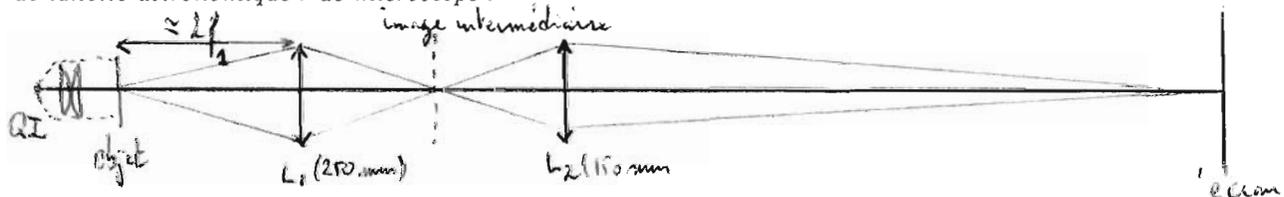
2.2.4 Astigmatisme : diaphragmer plus et plus éloigner de l'axe (manip peu convaincante, il y a toujours tous les termes, seule leur proportion varie...).

2.2.5 Courbure de champ : diaphragmer franchement la lentille et projeter des cercles concentriques sur calque. Suivant la position de l'écran, ce sont les cercles du centre ou des bords qui sont nets.

2.2.6 Distorsion : idem avec une grille sur calque.

3 Instrument

On fera tout d'abord un modèle à deux lentilles (cf. poly Rennes) comme ci-dessous ($f_1 \approx 250\text{mm}$, $f_2 \approx 150\text{mm}$). La lentille L_2 sera ajustée pour faire la mise au point sur l'écran. Comment seraient elles placées et quelles seraient les focales pour un modèle de lunette astronomique? de microscope?



3.1 diaphragme d'ouverture

Placer un diaphragme à iris derrière la première lentille. Le fermer progressivement. Montrez (éventuellement quantitativement avec une photodiode) que l'éclairement diminue quand on le ferme sans que la taille de l'image soit altérée. Rechercher son image par la seconde lentille : c'est la pupille de sortie (= cercle oculaire pour un instrument subjectif c'est à dire pour lequel l'image, destinée à une observation visuelle, est rejetée à l'infini).

3.2 diaphragme de champ

Mettre le diaphragme derrière la seconde lentille. Le fermer progressivement. Montrez (éventuellement quantitativement) que la taille de l'image diminue en proportion sans altération de luminosité. Si on ferme trop, l'éclairement diminue aussi : ce diaphragme joue alors aussi le rôle de diaphragme d'ouverture.

3.3 champ de contour

Sans diaphragme, observer que la luminosité diminue progressivement sur les bords de l'image. Montrer qu'il y a une image nette entre les deux lentilles (image intermédiaire). Y placer un diaphragme (son image définitive est donc nette) et le fermer pour supprimer le champ de contour. Le retirer et le remplacer par une lentille de champ de focale 100 – 150mm. Amélioration?

on se contentera dans la suite d'une simple lentille de projection

3.4 profondeur de champ

On utilise comme objet un réseau de quelques traits par mm accolé à un calque (pourquoi?). Il sera incliné, traits horizontaux, à 45° par rapport à l'horizontale. Faire l'image du centre de l'objet sur la barrette CCD. Mettre un diaphragme contre la lentille. Montrez que le nombre de traits nets augmente quand on ferme le diaphragme (et que la luminosité diminue...).

3.5 pouvoir séparateur - rôle de la diffraction

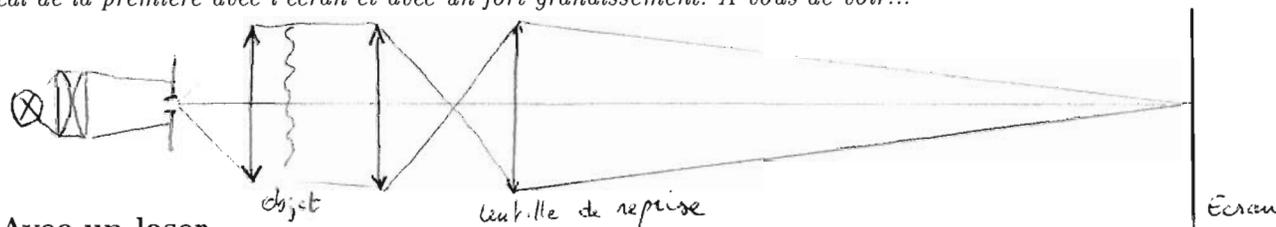
On utilise comme objet une bifente (diapo Leybold) et on diaphragme la lentille par une fente réglable. Faire l'image sur la CCD et observer la fusion des deux images lorsque l'on ferme le diaphragme.

TP interférences

Ce texte de TP ne doit en aucun cas servir de ressource de travail mais simplement de guide sur les expériences que l'on peut (doit ?) faire en vue des oraux. Il n'est certainement pas exhaustif et ne vous dispense pas de connaître de façon approfondie les ouvrages de référence qui eux seront disponible le jour J. Pour ne citer que les plus couramment utilisés : *Optique Expérimentale (Sextant)*, *TP de physique (Journaux)*, *Expériences d'Optique à l'Agrégation (Duffait)*. Je ne saurais trop vous conseiller de consulter les sites de certaines prépas (Montrouge, Cachan, Lyon, Grenoble et surtout Rennes) et d'éventuellement vous munir de certaines copies.

1 division du front d'onde : fentes de Young

Voir TP diffraction en ce qui concerne l'éclairage. Toutefois, les fentes que l'on utilise sont généralement "petites" ($a \sim 100\mu\text{m}$) de sorte que l'on est en dehors de la zone de Fresnel pour $\frac{a^2}{\lambda D} \ll 1$ soit $D \gg a^2/\lambda$: une paillasse de 2m est donc suffisante. L'avantage est que l'on observe la figure à 2m donc beaucoup plus grande qu'avec une lentille de projection dont les focales dépassent rarement 50cm. On peut contourner le problème avec une seconde lentille de projection qui conjugue le plan focal de la première avec l'écran et avec un fort grandissement. A vous de voir...



1.1 Avec un laser

Utiliser la diapo Leybold qui comporte fentes et bifentes. Repérer la figure de diffraction d'une fente puis de la bifente correspondante. Mesurer l'interfrange, le nombre de pics dans la tâche centrale de diffraction etc... Vérification quantitative.

L'intérêt est bien sûr de s'intéresser aux cohérences spatiale et temporelle et pour cela il faut passer en lumière naturelle, lumière blanche par exemple.

1.2 Avec lampe QI

On choisira de préférence celle dont le filament est vertical et on la focalisera à l'aide du condenseur sur la fente source. En configuration Fraunhofer il faut conjuguer cette fente avec l'écran, au moyen d'une, deux (éclairage parallèle) voire trois lentilles (éclairage parallèle plus deuxième lentille de projection pour agrandir l'image). Le problème est qu'on a alors souvent l'image du filament... Les manips qui suivent sont plus qualitatives, on se contente du montage Fresnel (sans lentille), aussi loin que la luminosité le permet.

Évaluez la largeur de cohérence spatiale de votre montage. Choisir en conséquence la largeur de la fente source ou bien la distance fente source - bifentes (en général $\sim 20\text{cm}$). S'assurer du parallélisme des fentes.

En configuration Fresnel, déplacez l'écran : les franges sont non localisées.

Cohérence temporelle : observez les irisations des franges latérales. Avec Caliens, enregistrez et comparez les interférogrammes obtenus avec différents filtres : interfranges et longueur de cohérence temporelle.

Cohérence spatiale : déplacer la fente source latéralement. L'interférogramme se déplace en conséquence. En déduire que les franges se brouillent si on élargit la fente. Élargir la fente source et observer l'annulation de contraste puis son inversion. Remplacer la fente source par une fente triangulaire. Si la luminosité le permet, rajouter un filtre coloré (jaune de préférence). Que se passe-t-il si on tourne la fente source (supposée suffisamment fine pour observer les franges) dans son plan ?

2 division d'amplitude : anneaux de Newton

Éclairez les anneaux à l'aide d'un condenseur (éclairage quasi parallèle) : pourquoi n'a-t-on pas besoin de réaliser un trou source ? En conséquence où sont localisées les interférences ? Avec deux lentilles et un miroir, projetez les anneaux par réflexion et par transmission. Ces anneaux sont-ils des franges d'égale inclinaison comme ceux que l'on observe au Michelson ? Pourquoi sont-ils moins contrastés en transmission ? Observez qu'ils sont complémentaires (en lumière blanche ou derrière un filtre coloré).

Rq : on peut faire l'expérience avec un film de savon. Tremper un cadre en fil émaillé dans une solution eau+savon+glycérol. Pourquoi l'image du haut du cadre devient-elle progressivement sombre en réflexion ?

3 division d'amplitude : l'interféromètre de Michelson

Allumez les lampes spectrales (Na+Hg). Vous devez connaître sur le bout des doigts les différents réglages de l'interféromètre

de Michelson : consultez les ouvrages classiques et choisissez celui qui vous convient le mieux. Faites-vous une copie du passage correspondant et suivez la procédure le nombre de fois suffisant pour que vous la maîtrisiez parfaitement.

3.1 en lame d'air

Pour avoir le plus grand champ possible, je vous conseille d'utiliser deux condenseurs : un juste derrière la lampe qui collimate le faisceau, un juste avant l'interféromètre qui focalise sur les miroirs. Entre les deux, vous mettez les filtres nécessaires car ils sont protégés par la face anticalorique du premier condenseur. Réglez l'interféromètre jusqu'au contact optique en lumière blanche. Repérez sa position. Pour mémoire :

- spectre Na : doublet jaune 589,0 nm et 589,6 nm
- spectre Hg : doublet jaune 577,0 nm et 579,1 nm, raie verte 546,1 nm, raie violette 435,8 nm, raie UV 365,0 nm.
- Avec la raie verte du mercure (ajouter un filtre coloré pour l'isoler), mesurer la progression des rayons anneaux. La comparer avec la loi théorique : $R_p = f_i i_p$ et $i_p = \sqrt{\frac{\lambda}{e}} \sqrt{p_0 - p}$ où $p_0 = \frac{2e}{\lambda}$ est l'ordre d'interférence au centre et p l'ordre d'interférence considéré : raie brillante p entier, sombre p demi-entier.
- Estimez la longueur de cohérence de la raie verte du mercure et la distance du doublet du sodium (ou du mercure + filtre jaune correspondant). Réalisez éventuellement une acquisition avec photodiode au centre des anneaux + moteur + synchronie (+éventuellement détecteur de crête).
- Projetez le spectre du blanc d'ordre supérieur (fente + PVD) ou utilisez le spectromètre à fibre (facile). Interprétation.
- Expérience de Fresnel - Arago : insérez un puis deux polaroïd sur le/les bras de l'interféromètre. Modifiez leurs orientations relatives. Notez les configurations qui donnent lieu ou non à interférences. Interprétation (sujet A 2005).

3.2 en coin d'air

Modifiez la position de la lentille en conséquence.

- visualisez qualitativement des objets de phase en plaçant sur l'un des bras : allumette chaude (mais non enflammée!), jet de gaz...
- mesurez l'épaisseur optique d'une lamelle de microscope : en lumière blanche au contact optique, insérez la lame puis chariotez (dans le bon sens!) pour retrouver le contact optique. OdG : $e = 170\mu\text{m}$ (vérifiez au pied à coulisse), $n = 1,5$ et $\delta x = ne/2$.

3.3 cohérence spatiale : zones de Fresnel

La perte de contraste (partout sauf sur la surface de localisation) lorsque l'on élargit la source provient du fait que la différence de marche varie sur la source (noté $\Delta\delta$ dans le cours). On peut alors découper la source en zones, dites de Fresnel, telles que $\Delta\delta \in [k\lambda, (k+1/2)\lambda]$ et d'autres telles que $\Delta\delta \in [(k+1/2)\lambda, (k+1)\lambda]$. En un point M quelconque les premières contribuent avec une phase $\varphi \in [0, \pi]$: elles s'ajoutent. De même, les autres avec $\varphi \in [\pi, 2\pi]$ s'ajoutent entre elles mais par contre leur contribution globale se retranche de celle des précédentes : il y a brouillage.

- aux franges de coin d'air : placer l'écran à la sortie de l'interféromètre sans lentille de conjugaison ; on ne voit pas de franges. Mettre une fente source parallèle aux franges : si elle est suffisamment fermée, elle ne couvre qu'une zone de Fresnel : les franges apparaissent. On peut aussi voir le phénomène en disant qu'elle donne deux images équivalentes aux fentes de Young.
- aux anneaux : on peut faire la même chose avec un trou source. Difficile car peu lumineux. Le mieux est d'utiliser un réseau zoné c'est à dire une alternance d'anneaux opaques et transparents qui permettent de sélectionner une zone de Fresnel sur deux : très délicat!!!

3.4 interféromètre de polarisation

Le principe est de placer une lame biréfringente d'axes neutre Ox et Oy entre polariseurs et analyseurs à 45° . Après le polariseur le champ est $E_0 e_{45^\circ} = \frac{E_0}{\sqrt{2}}(e_x + e_y)$. A 45° , le polariseur excite avec la même amplitude les deux voies de l'interféromètre (nécessaire pour un contraste maximal). Après la lame, la composante selon l'axe lent (Oy) subit un déphasage $\varphi = \Delta ne$. Le champ après la lame est donc $\frac{E_0}{\sqrt{2}}(e_x + e^{i\varphi} e_y)$. L'analyseur reprojette chaque composante sur sa direction propre : il recombine les faisceaux, avec des amplitudes égales s'il est à $\pm 45^\circ$. A la sortie de l'analyseur le champ est donc $\frac{E_0}{2}(1 \mp e^{i\varphi})e_{\pm 45^\circ}$. L'éclairement est donc $\mathcal{E} = \mathcal{E}_0(1 \pm \cos(\varphi)) = \mathcal{E}_0 \sin^2(\varphi/2)$ ou $\mathcal{E}_0 \cos^2(\varphi/2)$ selon que l'analyseur est perpendiculaire ou parallèle au polariseur. Ces deux positions sont complémentaires.

Comme lame on prendra des rubans adhésifs (axes neutres ?) et on éclairera le montage quasi parallèlement en lumière blanche avec un condenseur. La différence d'indice dépend de la longueur d'onde ce qui permet d'observer des phénomènes colorés.

Observer la complémentarité des couleurs en lumière blanche ; ajouter filtre vert : complémentarité des éclaircissements. Faire tourner la lame biréfringente. Expériences plus quantitatives avec lames cristallines.

Remarques : lame épaisse \Rightarrow spectre cannelé. Analyse au Michelson. En lumière convergente \Rightarrow croix de Malte. Interprétation délicate.

TP de diffraction

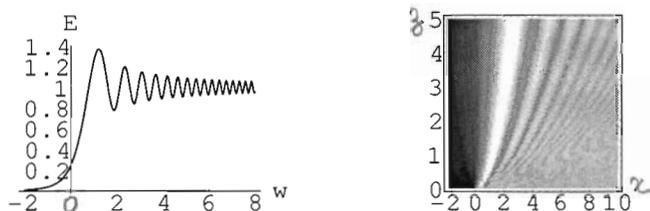
Ce texte de TP ne doit en aucun cas servir de ressource de travail mais simplement de guide sur les expériences que l'on peut (doit ?) faire en vue des oraux. Il n'est certainement pas exhaustif et ne vous dispense pas de connaître de façon approfondie les ouvrages de référence qui eux seront disponible le jour J. Pour ne citer que les plus couramment utilisés : *Optique Expérimentale (Sextant)*, *TP de physique (Journaux)*, *Expériences d'Optique à l'Agrégation (Duffait)*. Je ne saurais trop vous conseiller de consulter les sites de certaines prépas (Montrouge, Cachan, Lyon, Grenoble et surtout Rennes) et d'éventuellement vous munir de certaines copies.

1 remarque sur l'éclairage

En ce qui concerne la diffraction, la cohérence spatiale du montage doit être assurée. Pas de problème si l'on utilise un laser. Sinon il faut s'en assurer en focalisant la source sur un petit diaphragme à l'aide d'un condenseur. Suivant la géométrie de l'objet diffractant, on utilisera comme diaphragme un trou ou une fente. De plus, pour s'approcher du cas simple d'un point de vue théorique (onde plane incidente), ce diaphragme sera placé dans le plan focal objet d'une lentille convergente. Pour le laser, on peut s'en dispenser si l'objet est très petit devant la taille du faisceau. Sinon on élargit le faisceau en faisant un télescope constitué d'une lentille de courte focale (objectif de microscope par exemple) et d'une lentille convergente de longue focale. L'objet diffractant doit être le plus uniformément éclairé possible. Remarque, avec un laser, vous obtiendrez toujours de la diffraction, avec ou sans lentille, où que vous placiez l'écran. Celle-ci n'est cependant interprétable quantitativement simplement que si l'on se place dans les situations décrites dans ce TP.

2 diffraction à distance finie dite *diffraction de Fresnel*

Pour la théorie, voir *Optique*, J.Ph. Pérez, Pb 30.3 et son corrigé sur le web. L'éclairement derrière un bord d'écran à la distance z est donné par $E(x, z) = E_0 \frac{1}{2} [(\frac{1}{2} + Fc(w))^2 + (\frac{1}{2} + Fs(w))^2]$ avec $w \approx x(\frac{1}{2}\lambda z)^{-\frac{1}{2}}$. Fc et Fs sont les fonctions de Fresnel définies par $Fc(w) + iFs(w) = \int_0^w e^{i\pi t^2} dt$.



Le "0" ci-dessus correspond à la position géométrique de l'ombre. On note donc, (i) de la lumière dans l'ombre géométrique (jusqu'à 25%) (ii) des franges sombres se resserrant dans la zone éclairée. On remarque de plus que le paramètre sans dimension pertinent, w est en $\frac{x}{\sqrt{z}}$ et non pas en $\alpha = \frac{x}{z}$: il n'y a donc pas d'angle caractéristique de diffraction car il n'y a pas de taille caractéristique de cet objet. Une fente n'est somme toute que deux bords d'écrans...

manipulations : avec un laser élargi (ou non...), observer la figure de diffraction du bord d'écran. Puis avec une fente que l'on ferme progressivement. Les figures ci-dessous correspondent à des largeurs de fente $\delta w = 15, 8, 2, 1, 0.5, 0.2$: on observe le passage vers la diffraction à l'infini (sinus cardinal et figure qui s'élargit quand on ferme la fente) autour de $\delta w = 1$.



Vérifiez quantitativement ce passage.

3 diffraction à l'infini dite *diffraction de Fraunhofer*

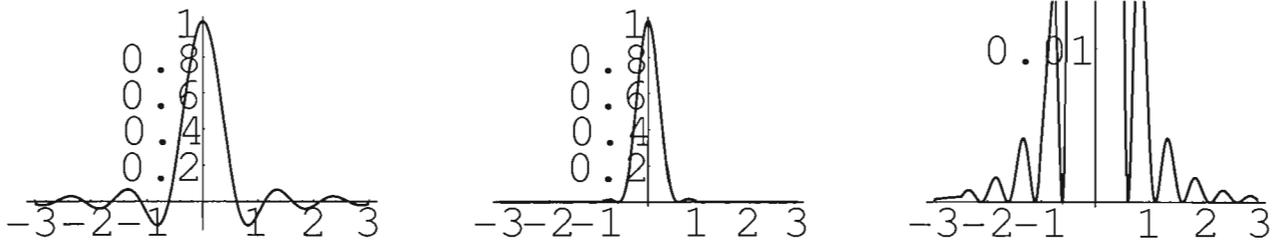
Rappel : la figure de diffraction s'observe autour de l'image géométrique ; on peut donc déplacer légèrement la lentille de collimation pour conjuguer la source avec l'écran. Si celui-ci est à suffisamment grande distance on sera dans des conditions proches de la diffraction à l'infini. Toutefois, il est plus rigoureux de conserver un éclairage collimaté et de faire l'observation dans le plan focal d'une seconde lentille. On sera dans les conditions de diffraction à l'infini strictes.

manipulations :

3.1 enregistrer avec Caliens les figures pour différentes largeurs de fente et vérifiez quantitativement l'inversion des échelles ; vérifiez que les zéros sont régulièrement espacés sauf pour la tâche centrale qui est double. La théorie est donc vérifiée : en déduire inversement la largeur d'une fente inconnue.

3.2 faire la figure de diffraction d'un trou. Là encore, on peut vérifier quantitativement la loi d'inversion des échelles. Ci-dessous la fonction $2 \frac{J_1(2\pi x)}{2\pi x}$, la tâche d'Airy (son carré) et un zoom sur les premiers zéros : 0.61, 1.12, 1.62, 2.12, ... les zéros

sont ensuite régulièrement espacés de 0.5 (à cette précision du pourcent près). Le diamètre de la tâche centrale est donc un peu plus que deux fois plus gros que la distance entre deux anneaux consécutifs contrairement au cas d'une fente.

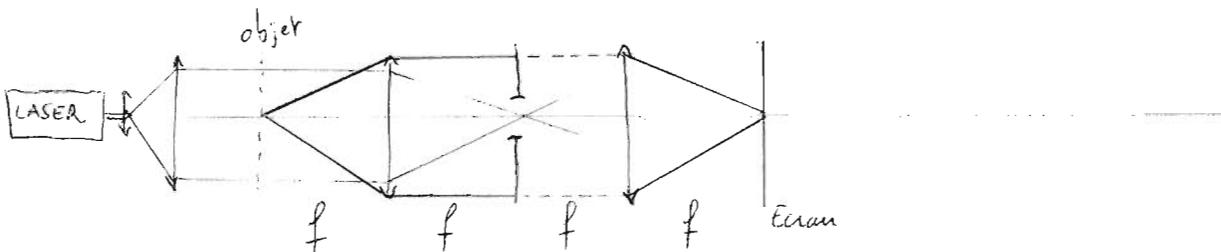


3.3 opération sur les pupilles : translater la pupille, la tourner. Observer l'effet ou le non-effet correspondant. Vérifiez le théorème de Babinet à l'aide de la diapo Leybold adaptée. Diffraction par un ensemble de pupilles identiques : aléatoires (lycopodes) ou réseau (influence du nombre de trait éclairés).

3.4 diffraction par une fente en lumière blanche. Remarquer les irisations sur les bords. Comparer sur Caliens avec un filtre rouge et un filtre bleu.

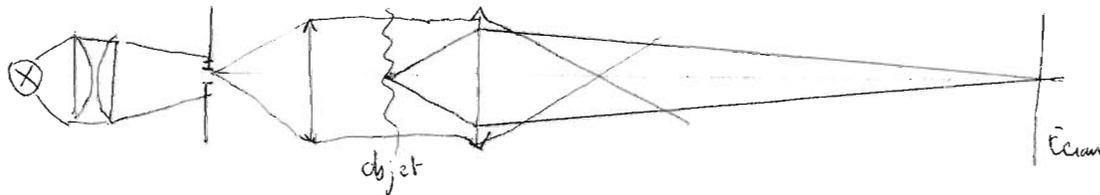
4 filtrage des fréquences spatiales : expérience d'Abbe

Faire le montage classique dit "4f" du cours. Prendre une grille assez fine (~ 10 traits/mm) et placer une fente dans le plan de Fourier. La fermer plus ou moins, la faire tourner dans son plan.



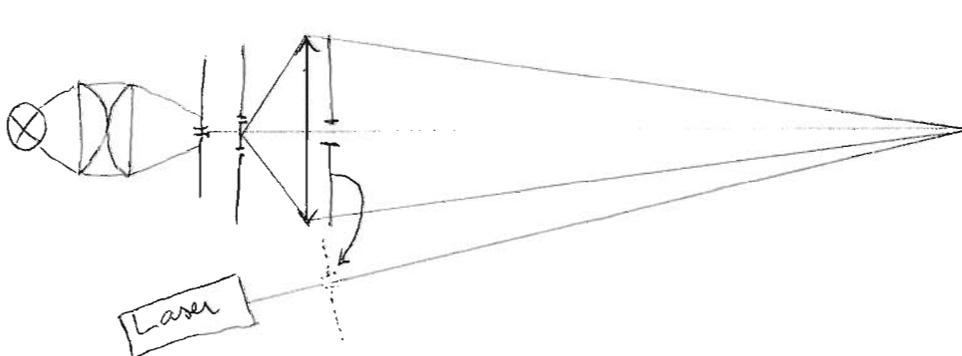
5 strioscopie

Faire le montage classique en lumière blanche et améliorer le contraste de l'image d'une plume, empreinte digitale etc...



6 résolution d'un instrument

Faire l'image (en lumière blanche plutôt) sur l'écran ou sur Caliens d'une bifente par une lentille de projection. Placer devant cette lentille une fente en guise de diaphragme. Le fermer jusqu'à perte de résolution. Déplacer légèrement cette fente sur le côté et envoyer au travers un laser de sorte à former la figure de diffraction au même endroit sur l'écran ou Caliens. Vérifier le critère de Rayleigh : la largeur de la figure de diffraction est comparable à la distance entre les deux images.



TP sources et spectroscopie

Ce texte de TP ne doit en aucun cas servir de ressource de travail mais simplement de guide sur les expériences que l'on peut (doit ?) faire en vue des oraux. Il n'est certainement pas exhaustif et ne vous dispense pas de connaître de façon approfondie les ouvrages de référence qui eux seront disponible le jour J. Pour ne citer que les plus couramment utilisés : *Optique Expérimentale (Sextant)*, *TP de physique (Journaux)*, *Expériences d'Optique à l'Agrégation (Duffait)*. Je ne saurais trop vous conseiller de consulter les sites de certaines prépas (Montrouge, Cachan, Lyon, Grenoble et surtout Rennes) et d'éventuellement vous munir de certaines copies.

1 projection d'un spectre

Dans les spectroscopes à fentes, on réalise l'image d'une fente source sur un détecteur. Cette image est alors dispersée par un prisme ou un réseau. Aujourd'hui, on utilise le plus souvent une barette de CCD comme détecteur. Si le détecteur n'a pas une résolution spatiale suffisante (photodiode, photomultiplicateur) on intercale devant une seconde fente (fente de sortie). Une "règle" de conception de ce genre de spectrographe est que la taille de l'image de la fente de sortie doit être égale à celle de l'image de la fente d'entrée et à la largeur de sa figure de diffraction. En pratique, c'est bien souvent la taille des fentes qui limite la résolution plutôt que la diffraction.

En toute rigueur, l'élément dispersif doit être éclairé par un faisceau parallèle d'où un montage à deux lentilles. En pratique, une seule lentille suffit derrière laquelle on colle l'élément dispersif.

1.1 Avec une source QI, faire l'image de la fente source avec une bonne lentille (doublet achromatique). Pour l'éclairage, faire l'image du filament au centre de la lentille. Comparer le résultat avec l'image du filament sur la fente source. Spectres qualitatifs avec prisme à vision directe, PVD et différents réseaux. On peut montrer le caractère non linéaire de la dispersion par le prisme en mettant un réseau (dispersion verticale) suivi du PVD (dispersion horizontale). Interprétation.

1.2 Étalonnage : mesurer la position puis l'écart entre la raie jaune (doublet 577,0nm et 579,1nm) et la raie verte (546,1nm) d'une lampe HgBP (Pourquoi BP ?). De la position des raies, déterminez leur longueur d'onde ($\sin \theta = Nk\lambda$ où k est l'ordre et N le nombre de traits par mètre du réseau) ; précision ? On peut inversement supposer ces longueurs d'onde connues et de l'écart, remonter à la dispersion angulaire $\mathcal{D}_a = kN$; vérifiez quantitativement pour différents ordres. En déduire la longueur d'onde moyenne du doublet du Sodium ; précision ? Avec le PVD, montrez que le signe de la dispersion est opposé (pas de quantitatif).

1.3 Résolution et fente source : agir sur la largeur de la fente source pour résoudre, ou non le doublet jaune. On observera à l'ordre 2 (voir plus...) si le réseau a moins de 200tr/mm. A la limite de résolution, mesurer la largeur de l'ordre 0 (largeur de l'image de la source) et la comparer à l'écart entre les centres de raies déterminé à partir de la dispersion mesurée ci-dessus. On pourra utiliser la CCD. Attention, il faut soigner le montage pour limiter les aberrations...

1.4 Résolution et éclairage de l'élément dispersif : on peut prendre le PVD, plus lumineux. Ajuster la fente source pour que le doublet soit juste résolu. Placer devant l'élément dispersif une fente parallèle à la fente source. Lorsqu'on la ferme progressivement, on simule un éclairage d'une partie de moins en moins grande de l'élément dispersif que l'on obtiendrait en changeant le point de focalisation de la source. On perd progressivement la résolution.

2 spectromètre USB

Dans ce genre de spectromètre, c'est le coeur de la fibre qui joue le rôle de fente d'entrée.

2.1 Visualisez le spectre d'une lampe HgBP. Étalonnez si besoin. En déduire la dispersion et la résolution. Prendre la lampe inconnue et déterminez sa composition. Montrez le spectre d'une HgHP : raies plus continuum.

2.2 Éclairez une solution de fluorescéine avec une QI (ou HgHP?). Mesurez son spectre d'absorption et d'émission : ils sont décalés, c'est de la fluorescence. Interprétation.

3 émission et absorption

3.1 Avec une source QI et une photodiode, montrez l'existence des infrarouges. De même avec une HgBP montrez celle des UV (lentille de projection en quartz) en mettant un bristol du côté du bleu : il absorbe les UV et fluoresce dans le bleu ce qui fait apparaître le papier plus blanc (azurant optique comme dans les lessives).

3.2 Avec une QI, disposez une cuve remplie d'une solution faiblement concentrée de permanganate de potassium ($KMnO_4$) ou de sulfate de cuivre II ($CuSO_4$). Avec le spectromètre USB, vérifiez la loi de Beer-Lambert $Ln \frac{I}{I_0} = \alpha L C$ où L est la longueur de la cuve (en la mettant en long puis en large) et C la concentration de la solution (par dilutions successives d'un facteur 2 par exemple). Idem avec des vapeurs de diiode (I_2) dans un ballon.

4 interféromètre de Fabry-Pérot

comme pour l'interféromètre de Michelson, choisissez dans les ouvrages de référence celui dont la procédure de réglage vous

semble la plus claire. Munissez-vous de copies et refaites la procédure jusqu'à la maîtriser.

4.1 Réglez le FP avec une faible épaisseur $e < 1mm$. Projetez le système d'anneaux d'une HgBP. Mettre un filtre vert pour isoler une raie et mesurez le rayon des anneaux successifs. Remontez à la loi $R_p = fi_p$ et $i_p = \sqrt{\frac{\lambda}{e} \sqrt{p_0 - p}}$ où $p_0 = \frac{2e}{\lambda}$ est l'ordre d'interférence au centre et p l'ordre d'interférence considéré : raie brillante p entier. En déduire e .

4.2 Estimez la finesse $F = \pi \frac{\sqrt{R}}{1-R}$ en mesurant le coefficient de réflexion R . Pour cela, envoyer un laser en incidence presque normale et mesurer les intensités des spots successifs avec une photodiode.

5 Lasers et faisceaux gaussiens

5.1 rappels théoriques

Les propriétés de cohérence des lasers sont illustrées dans les TP diffraction et interférences. Ils émettent des faisceaux généralement peu divergents dits paraxiaux. Ces faisceaux se décomposent sur la base des faisceaux gaussiens dite TEM, transverse électromagnétique sous entendue rectangulaire. La base à symétrie cylindrique est souvent notée TEM*. Sans rentrer dans les détails, il s'agit de résoudre l'équation de propagation paraxiale pour une onde presque plane $\mathcal{E}(x, y, z, t) = E(x, y, z)e^{i(kz - \omega t)}$ ($\omega^2 = k^2 c^2$) :

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + 2ik \frac{\partial}{\partial z}\right)E = 0 \quad (1)$$

(on néglige le terme en $\frac{\partial^2 E}{\partial z^2}$). Les solutions forment une famille de la forme

$$E(x, y, z) = E_0 \mathcal{H}_{pq}(x, y, z) \frac{w_0}{w(z)} \exp\left(-\frac{r^2}{w^2(z)}\right) \exp\left(-ik \frac{r^2}{2R(z)}\right) \quad (2)$$

avec $r^2 = x^2 + y^2$. On montre que les indices p et q sont entiers et que $\mathcal{H}_{pq}(x, y, z) = H_p\left(\frac{\sqrt{2}x}{w(z)}\right)H_q\left(\frac{\sqrt{2}y}{w(z)}\right)\exp(-i\phi_{pq})$ où $H_{p,q}$ sont les polynômes d'Hermite : $H_0(u) = 1$, $H_1(u) = 2u$, $H_2(u) = u(4 - u)$, ... Le mode fondamental dit TEM₀₀ s'écrit :

$$TEM_{00}(r, z) = \frac{w_0}{w(z)} \exp\left(-\frac{r^2}{w^2(z)}\right) \exp\left(-ik \frac{r^2}{2R(z)}\right) \quad (3)$$

est à symétrie cylindrique et on a $w^2(z) = w_0^2 \left(1 + \frac{z^2}{z_R^2}\right)$ et $R(z) = z + \frac{z_R^2}{z}$. w_0 s'appelle le waist, ou col, du mode et $z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}$ la longueur de Rayleigh. Ainsi, pour $|z| \ll z_R$, $w(z) \approx w_0$ et $R(z) \gg z$: les surfaces d'onde sont quasi planes et l'amplitude a un profil gaussien de largeur quasi constante. Inversement, pour $|z| \gg z_R$, $w(z) \approx \theta z$ et $R(z) \approx z$: les surfaces d'onde sont quasi sphériques et l'onde diverge dans un angle $\theta = \frac{w_0}{z_R} = \frac{\lambda}{\pi w_0}$ qui serait celui de la tâche de diffraction d'un trou de taille de l'ordre de πw_0 . Ce mode est celui qui a la plus petite divergence pour une taille donnée autorisée par la diffraction. Lorsque l'on décompose le champ à l'intérieur d'une cavité laser bien alignée (symétrie cylindrique), le champ doit épouser les miroirs ce qui fixe $R(z_1)$ et $R(z_2)$ donc w_0 et sa position dans la cavité. Le mode TEM₀₀ a la plus petite taille sur les miroirs donc subit le moins de perte. Dans les lasers à gaz où le gain est faible, c'est le seul qui survit. Par contre, si on désaligne la cavité un mode d'ordre supérieur peut réaliser un meilleur compromis et le faisceau de sortie est alors plus complexe (laser en kit des ENS...). Les lasers à fort gain, à semi-conducteur par exemple, peuvent simultanément émettre sur plusieurs modes transverses en même temps et la qualité de faisceau n'est généralement pas bonne. Les faisceaux gaussiens se transforment en faisceaux gaussiens à la limite de l'optique de Gauss bien sûr. On introduit le rayon de courbure complexe $q(z)$ par :

$$\frac{1}{q(z)} = \frac{1}{z - iz_R} = \frac{1}{R(z)} + \frac{i}{S(z)} \text{ avec } S(z) = \frac{\pi w^2(z)}{\lambda} \quad (4)$$

et à la traversée d'un système optique $q' = \frac{Aq+B}{Cq+D}$ où A, B, C et D sont les coefficients de la matrice qui représente le système optique en optique matricielle.

5.2 manipulation

- Avec Caliens, enregistrer le profil du laser pour différentes distances. On pourra atténuer le faisceau en prenant un laser (polarisé) et un ou des polariseurs. En déduire $w(z)$, la position du waist et la divergence du faisceau : vérifiez quantitativement $\theta = \frac{\lambda}{\pi w_0}$ ($\lambda = 632,8nm$). Estimez z_R .

- Prendre une lentille $f = 20cm$ et placer le waist en son foyer objet. Son image ne peut pas se former à l'infini ! En effet, le faisceau aurait alors une taille finie et une divergence nulle ce qui est interdit par la diffraction. On montre avec le formalisme des matrices ABCD que l'image est alors sur le foyer image. Essayez de le vérifier.

Les faisceaux gaussiens étant limités par diffraction on retiendra que si l'on veut un faisceau quasi parallèle il faut d'abord le faire diverger pour qu'il ait un grand waist sur une seconde lentille de grande focale qui va le collimater. Inversement, si on veut un point source petit il faut le focaliser une fois élargi avec une lentille de courte focale pour avoir un grand angle.