



BLAISE PASCAL
PT 2019-2020

Révisions – Bloc 7

Optique

Année	Chapitre	Ce qu'il faut réviser	Support	Prioritaire	😊
PTSI	Photons	Dualité onde-corpuscule, relations de Planck-Einstein (R)			
PTSI	Descartes	Lois de Descartes (R)			
PTSI	Descartes	Exemple fondamental : réflexion totale (D)			
PTSI	Lentilles	Construire le trajet de rayons lumineux avec une lentille convergente ou dans un instrument d'optique à deux lentilles (M)	(PTSI) DS microscope (PT) TP 17	*	
PTSI	Lentilles	Utiliser les relations de conjugaison (officiellement rappelées par l'énoncé) (M)	(PTSI) DS microscope (PT) TP 17, TD 24 ex 3		
PTSI	Lentilles	Exemple fondamental : relation $D > 4f$ (R+D)	TD 24 ex 3		
PT	22 Modèle scalaire	Formule de Fresnel (R+éventuellement D), contraste		*	
PT	22 Modèle scalaire	Modèle des trains d'ondes, longueur de cohérence L_c , lien entre largeur spectrale $\Delta\lambda$ et L_c	TD ex 1 + révisions ex 2		
PT	23 Div front d'onde	Calculer DDM trous d'Young à distance finie (DL) et infinie (plans d'ondes) (R+D)	TD ex 2 + révisions ex 1	*	
PT	23 Div front d'onde	Exemple fondamental : cohérence spatiale avec deux sources ponctuelles (M)	TD ex 5 + révisions ex 1		
PT	23 Div front d'onde	Formule des réseaux (R+D)	TD ex 3	**	
PT	24 Div amplitude	Constitution, configurations (dont localisation et éclairage)		*	
PT	24 Div amplitude	Calculer DDM en lame d'air (R+D)	TD ex 1 + révisions ex 2	*	
PT	24 Div amplitude	Exemple fondamental : cohérence temporelle doublet du sodium (M)	TD ex 2	**	
PT	24 Div amplitude	Lumière blanche, spectre cannelé	Révisions ex 1		

Plan de la fiche

I	Ressources en ligne	1
II	Rappels de cours	2
II.1	Condensé de photons	2
II.2	Angle limite de réfraction ; réflexion totale	2
III	Questions de cours	3
IV	Pour compléter vos TD	4
1	Fentes d'Young éclairées en lumière blanche	4
2	Étude la raie verte du mercure	5
3	Bilentes de Billet	6
V	Correction des exercices	7
1	Fentes d'Young éclairées en lumière blanche	7
2	Étude la raie verte du mercure	9
3	Bilentes de Billet	10

I - Ressources en ligne

Scanner ou cliquer sur les QR-code pour accéder aux ressources.

- **Sur l'ENT** : outre cette fiche de révisions, vous trouverez
 - ▷ la correction du TP 17, que nous aurions dû faire au lycée dans les premiers jours de confinement ;
 - ▷ une proposition de carte mentale sur l'optique ondulatoire, en complément de celle que vous avez réalisée.
- **L'essentiel du cours sous forme de cartes mémo** : cartes réalisées par Christophe Cayssiols.



Cartes utilisables pour ce bloc de révisions : toutes celles d'optique de première et deuxième année.

- **Qmax : QCM d'applications directes du cours**



Choisir d'abord le mode « j'apprends » puis éventuellement le mode « je révise ». Ces QCM correspondent au programme de PCSI, certaines notions peuvent donc vous être inconnues : me demander en cas de doute.

Thèmes abordés dans ce bloc de révisions : optique (les questions ne concernent que le programme de PTSI).

II - Rappels de cours

II.1 - Condensé de photons

Les photons présentent un comportement de type particule dans leur détection (on ne les détecte qu'à un seul endroit à un seul instant) mais leur propagation (reliée à la probabilité de les détecter en un point donné) est régie par des lois ondulatoires (interférences, diffraction) : c'est la **dualité onde-corpuscule**. Les mêmes phénomènes sont observés pour toutes les particules quantiques : électrons, atomes, molécules, etc.

Une onde lumineuse peut être décrite comme un flux de photons. Comme il s'agit de deux descriptions équivalentes (ou presque) du même objet physique, alors leurs propriétés sont reliées. Ainsi, un photon

- ▷ se propage à la vitesse de la lumière dans la direction \vec{u} de propagation de l'onde ;
- ▷ est de masse rigoureusement nulle ;
- ▷ transporte une énergie $\varepsilon = h\nu = \hbar\omega$ où ν et ω sont la fréquence et la pulsation de l'onde ;
- ▷ a une quantité de mouvement $\vec{p} = \frac{h}{\lambda}\vec{u} = \hbar\vec{k}$.

Ces deux dernières relations sont appelées **relations de Planck-Einstein**, et elles impliquent la **constante de Planck h** ou la constante de Planck « réduite » notée \hbar ,

$$h = 6,6261 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \quad \text{et} \quad \hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,0546 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}.$$

II.2 - Angle limite de réfraction ; réflexion totale

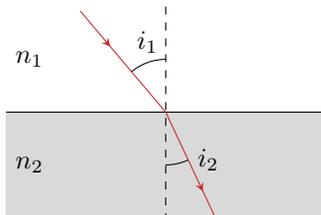


Figure 1 – Réflexion et réfraction.

À l'interface entre deux milieux d'indices différents, un rayon lumineux incident est partiellement réfléchi (environ 4% de l'énergie à l'interface air-verre) et partiellement réfracté, c'est-à-dire transmis et dévié. Les angles d'incidence et de réfraction sont reliés par

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2.$$

Cette relation montre que le rayon lumineux est plus proche de la normale dans le milieu d'indice le plus élevé : p.ex. si $n_2 > n_1$ alors $\sin i_2 < \sin i_1$ donc $i_2 < i_1$ car les angles sont compris entre 0 et $\pi/2$. Sur la figure 1, on constate que $n_2 > n_1$.

- **Cas $n_2 > n_1$: angle maximal de réfraction** (voir figure 2)

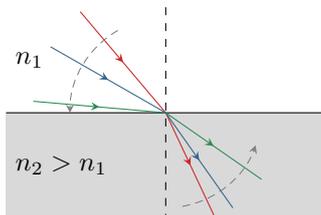


Figure 2 – Angle de réfraction maximal.

Comme $n_2 > n_1$, le rayon est plus proche de la normale dans le milieu 2. La figure ci-contre montre alors clairement que lorsque l'incidence devient rasante ($i_1 \rightarrow \pi/2$) alors l'angle de réfraction atteint une valeur seuil. Cette valeur s'obtient à partir de la loi de la réfraction en se plaçant à la limite,

$$n_1 \sin \frac{\pi}{2} = n_2 \sin i_{2,\max} \quad \text{donc} \quad \sin i_{2,\max} = \frac{n_1}{n_2} \quad \text{et} \quad i_{2,\max} = \arcsin \frac{n_1}{n_2}.$$

Cette expression n'est surtout pas à retenir (trop de risque de confusion avec la réflexion totale), mais il faut savoir la retrouver.

Ceux qui ont l'habitude d'aller à la piscine ont certainement déjà constaté ce phénomène : lorsque vous vous placez les yeux dans l'eau à faible profondeur sous la surface et que vous regardez « au loin », vous observez un « plafond d'eau » et vous ne pouvez pas voir ce qui se passe à la surface, tous les rayons étant trop déviés pour qu'ils puissent atteindre votre œil. Sur la figure 3, aucun rayon issu de l'air et incident au point I ne peut parvenir à l'œil de l'observateur. S'il observe ce point, il verra l'eau mais pas les rayons issus de l'extérieur de la piscine.

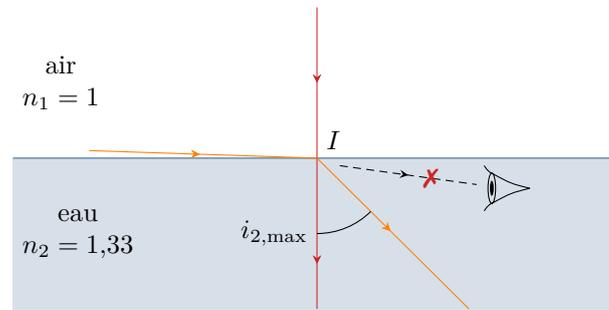
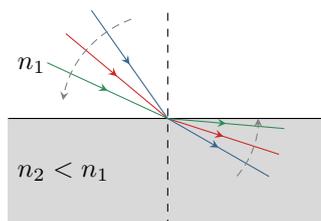


Figure 3 – À la piscine ... Attention sur le schéma : si l'observateur regarde vers le point I , ce n'est pas son œil qui émet des rayons lumineux dirigés vers I mais des rayons lumineux issus de I qui parviennent à son œil. Ici, aucun rayon réfracté en I ne peut atteindre l'œil de l'observateur.

• **Cas $n_2 < n_1$: réflexion totale** (voir figure 4)



Comme $n_2 < n_1$, le rayon est cette fois plus éloigné de la normale dans le milieu 2. La figure ci-contre montre alors clairement que l'angle de réfraction devient rasant ($i_2 \rightarrow \pi/2$) pour une valeur seuil $i_{1,\max}$ de l'angle d'incidence. Au delà, le rayon incident ne peut plus être réfracté : il ne pénètre pas dans le milieu 2, c'est le phénomène de **réflexion totale**. Comme précédemment, la valeur de l'angle limite de réflexion totale s'obtient à partir de la loi de la réfraction en se plaçant à la limite.

$$n_1 \sin i_{1,\max} = n_2 \sin \frac{\pi}{2} \quad \text{donc} \quad \sin i_{1,\max} = \frac{n_2}{n_1} \quad \text{et} \quad i_{1,\max} = \arcsin \frac{n_2}{n_1}.$$

Figure 4 – Réflexion totale.

Cette expression n'est pas à retenir, mais il faut savoir la retrouver. Concrètement, tous les rayons arrivant sur le dioptre avec une incidence $i_1 > i_{1,\max}$ sont totalement réfléchis.

Ceux qui ont un aquarium peuvent observer ce phénomène quotidiennement. Lorsque vous regardez votre poisson préféré de loin, il semble se réfléchir sur le fond de l'aquarium exactement comme dans un miroir : les angles sont tels que la réflexion est totale, donc toute l'énergie lumineuse du rayon réfléchi aboutit dans votre œil. Au contraire, vous n'observez rien de tel lorsque vous regardez le poisson de plus près car l'énergie lumineuse est réfractée : vous pouvez éventuellement voir un reflet, mais il est beaucoup moins lumineux que le poisson lui-même.

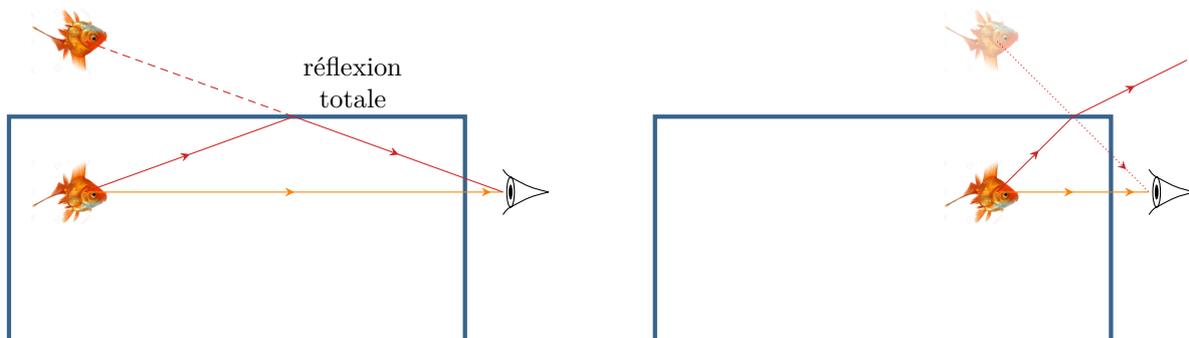


Figure 5 – Un poisson dans un aquarium. Pour simplifier le schéma, je n'ai pas tenu compte du verre de l'aquarium (ce qui ne change rien à la physique), et j'ai supposé l'œil suffisamment proche de l'aquarium pour pouvoir négliger la déviation des rayons lumineux entre l'aquarium et l'œil.

III - Questions de cours

1 - Rappeler les relations de Planck-Einstein, qui relie la quantité de mouvement et l'énergie d'un photon au vecteur d'onde et à la pulsation de l'onde lumineuse. Rappeler l'unité et l'ordre de grandeur de la constante de Planck.

2 - On considère un rayon lumineux se propageant d'un milieu ① vers un milieu ② tels que $n_1 < n_2$. On note i_1 l'angle d'incidence sur le dioptre plan séparant les deux milieux. Représenter la situation sur un schéma et établir l'expression de l'angle maximal de réfraction $i_{2,\max}$.

3 - On considère la même situation avec désormais $n_1 > n_2$. Montrer que, si l'angle d'incidence est supérieur à une valeur maximale $i_{1,\max}$ à déterminer, alors le rayon lumineux est totalement réfléchi et ne pénètre pas dans le

milieu ②.

4 - Sur un exemple donné par l'interrogateur, construire l'image d'un objet réel par une lentille convergente. On s'attachera en particulier aux cas « moins simples » : image virtuelle ou à l'infini.

5 - Déterminer le temps de cohérence τ_c d'une raie de longueur d'onde λ et largeur $\Delta\lambda$.

6 - Rappeler sous quelles conditions deux ondes sont cohérentes. Établir la formule de Fresnel et l'exprimer, au choix de l'interrogateur, en termes de déphasage, d'ordre d'interférence ou de différence de marche.

7 - Établir l'expression de la différence de marche dans le cas de trous d'Young éclairés par une source ponctuelle monochromatique placée sur l'axe des trous, ou bien dans le cas d'une observation à grande distance, ou bien dans le cas d'une observation dans le plan focal image d'une lentille convergente (au choix de l'interrogateur).

8 - Dans le cas de trous d'Young éclairés par une source étendue centrée sur l'axe optique, établir l'expression de la largeur de cohérence spatiale de la source. L'expression de la différence de marche sera rappelée sans démonstration par l'étudiant.

| **Méthode attendue** : application du critère de brouillage.

9 - Établir la formule des réseaux. La différence de marche entre deux motifs consécutifs doit être redémontrée, et il est attendu que l'étudiant explique pourquoi il suffit de considérer des interférences constructives entre *deux* motifs pour déterminer les directions d'interférences constructives entre *tous* les motifs.

10 - Rappeler la constitution d'un interféromètre de Michelson. Définir les deux configurations lame d'air et coin d'air. Pour chaque cas : donner l'allure de la figure d'interférences ; indiquer le lieu de localisation et la position de la lentille de projection ; indiquer les conditions d'éclairage et la position du condenseur.

11 - Établir l'expression de la différence de marche en lame d'air. La distance entre sources secondaires doit être clairement justifiée par un schéma propre.

12 - On considère un Michelson en lame d'air d'épaisseur e . Établir l'expression de l'ordre p d'un anneau en fonction de son rayon r sur l'écran. En déduire le nombre d'anneaux observés dans une figure d'interférences de rayon R_0 .

13 - On considère un Michelson en lame d'air éclairé par un doublet spectral. Établir l'expression de l'éclairement au centre des anneaux en fonction de l'épaisseur e de la lame d'air. Interpréter les différents termes. Définir les coïncidences et anti-coïncidences.

14 - On considère un Michelson en coin d'air éclairé par une source de lumière blanche. En raisonnant en termes de cannelures dans le spectre, expliquer la figure d'interférences : frange centrale blanche, teintes de Newton irisées, blanc d'ordre supérieur.

IV - Pour compléter vos TD

 **Attention !** Tous ces exercices ne sont pas « à faire », concentrez-vous sur ce qui vous pose des difficultés.

Signification des pictogrammes :

 Difficulté d'analyse et compréhension, initiative requise ;

 Difficulté technique et calculatoire ;

 Exercice important.

Exercice 1 : Fentes d'Young éclairées en lumière blanche

 2 |  2 | 

Des bifentes d'Young, considérées infinies dans la direction z et distantes de b dans la direction y sont éclairées par une lampe quartz-iode, assimilée à une source de lumière blanche. Une fente simple, infinie dans la direction z , est placée juste après la lampe, à distance d des bifentes. Les interférences sont observées à l'infini grâce à une lentille convergente de distance focale f' . L'intensité sur l'écran ne dépend que de la coordonnée y du point d'observation, on raisonnera donc dans un plan $z = \text{cte}$.

1 - Faire un schéma du montage indiquant la marche de deux rayons interférant en un point de l'écran.

Dans un premier temps, on intercale un filtre coloré entre la lampe et la fente source. Ainsi, le montage est éclairé par une lumière monochromatique de longueur d'onde λ_0 .

2 - On suppose la fente source infiniment fine et placée sur l'axe optique du montage. Établir l'expression de l'ordre d'interférence $p_0(y)$. En déduire la position des franges brillantes en fonction d'un entier m et l'interfrange i .

3 - Pour obtenir une figure d'interférences de grande taille, comment choisir la focale f' ? Sur le plan expérimental, quel peut en être l'inconvénient ? À quelle distance des bifentes la lentille doit-elle être placée ?

4 - On suppose maintenant la fente source infiniment fine décalée d'une distance $a \ll d$ par rapport à l'axe optique.

Établir la nouvelle expression de l'ordre d'interférence $p_a(y)$. Comment la figure d'interférences est-elle modifiée ?

5 - Étudions maintenant le cas d'une fente source large, de largeur $2a$ dans la direction y . Expliquer qualitativement pourquoi la figure d'interférences apparaîtra brouillée si $p_a(y) - p_0(y) \gg 1$.

6 - Déterminer la largeur de cohérence spatiale, notée a^* , définie conventionnellement par $p_{a^*}(y) - p_0(y) = 1/2$. Commenter le résultat : la largeur a^* est-elle intrinsèque à la source ?

On enlève maintenant le filtre coloré, mais la largeur de la fente source est réduite de telle sorte que $a \ll a^*$. Une photo de l'écran est reproduite figure 6.

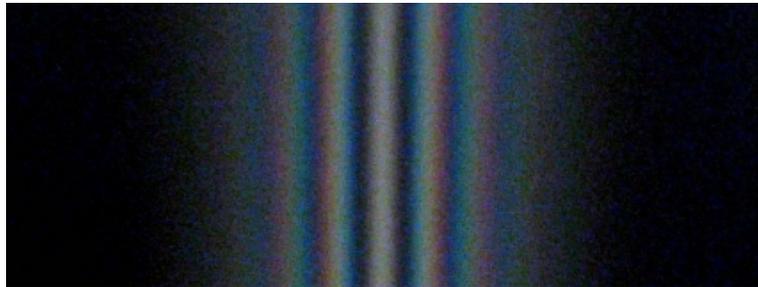


Figure 6 – Figure d'interférences obtenue en lumière blanche.

7 - En s'appuyant sur les questions précédentes, interpréter qualitativement la figure : pourquoi la frange centrale est-elle blanche ? pourquoi obtient-on des irisations ?

Finissons par deux questions plus compliquées.

8 - Un interféromètre de Michelson éclairé en lumière blanche produit un blanc d'ordre supérieur pour les grandes différences de marche, alors que l'écran est noir sur la figure 6. Proposer une interprétation.

9 - Les bifentes sont éclairées par une source de lumière blanche placée derrière une fente source de largeur $a > a^*$. Qu'observe-t-on sur l'écran ?

Exercice 2 : Étude la raie verte du mercure

[inspiré oral banque PT | 💡 2 | ✂ 2 | ⊕]

On dispose d'un interféromètre de Michelson, éclairé par une lampe à vapeur de mercure suivie d'un filtre vert permettant d'isoler la raie verte ($\lambda = 546 \text{ nm}$). La bande passante du filtre est supérieure à la largeur de la raie verte.

1 - Représenter le dispositif permettant d'observer une telle figure d'interférences, incluant le dispositif d'éclairage et de projection.

2 - Exprimer l'ordre d'interférence en fonction de l'angle d'incidence i des rayons sur les miroirs et de l'épaisseur e de la lame d'air.

3 - Exprimer le rayon d'un anneau sur l'écran en fonction de i puis de p .

4 - On note R_{ext} le rayon de la figure d'interférences. Déterminer le nombre d'anneaux visibles sur l'écran.

5 - Les deux clichés de la figure 7 ont été obtenus avec la même lentille de projection. Quel réglage a été modifié lors du passage du cliché de gauche à celui de droite ? Comment les anneaux se sont-ils déplacés (sont ils « rentrés » ou « sortis » par l'extérieur de l'écran) ? On pourra raisonner à $p = \text{cte}$.

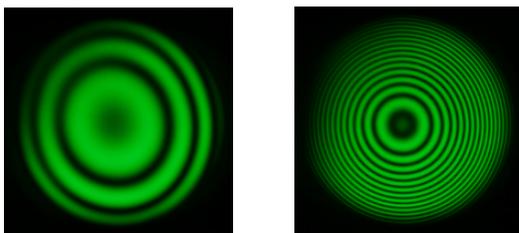


Figure 7 – Figures d'interférences.

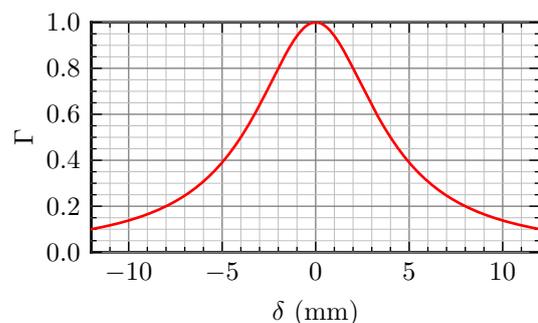


Figure 8 – Acquisition du contraste.

Un dispositif d'acquisition numérique permet d'enregistrer le contraste Γ de la figure d'interférences en fonction de la différence de marche δ pour une large gamme de différences de marche. La courbe obtenue est représentée

figure 8.

6 - Exprimer la largeur spectrale $\Delta\lambda$ de la raie en fonction de la longueur de cohérence temporelle L_c . Estimer sa valeur numérique.

Exercice 3 : Bientilles de Billet

[3 | 3]

Cet exercice combine les approches géométrique et ondulatoire de façon un peu originale. Cependant, les bienilles de Billet sont un dispositif relativement marginal et cet exercice compliqué ne doit pas être une priorité.

Le dispositif des bienilles de Billet, schématisé figure 9, est élaboré à partir d'une lentille convergente L de centre O , d'axe optique (Oz) , de rayon R et de distance focale f' . Cette lentille est coupée en deux dans le plan (Oyz) , formant ainsi deux demi-lentilles L_1 et L_2 . Chaque demi-lentille se comporte exactement comme une lentille ayant son propre centre optique et ses propres foyers.

Les demi-lentilles sont translatées symétriquement suivant Ox pour les séparer d'une distance Δ . Dans le repère $(Oxyz)$, les centres optiques O_1 et O_2 ont alors pour coordonnées $(\pm\Delta/2, 0, 0)$. Ce dispositif est éclairé par une source monochromatique ponctuelle S située à distance $L = 2f'$ de O . Un cache opaque permet de bloquer la lumière ne passant pas par les demi-lentilles.

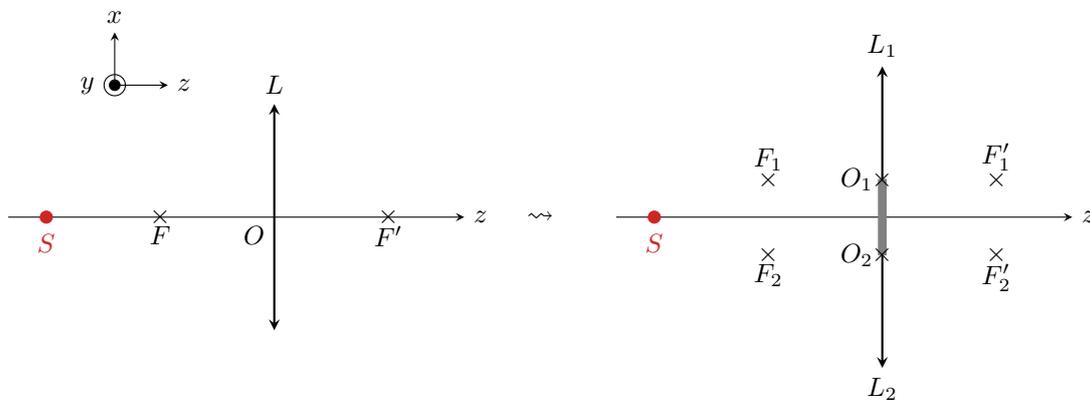


Figure 9 – Bientilles de Billet.

- 1 - Construire sur un schéma propre les deux images S_1 et S_2 de S par les lentilles L_1 et L_2 . Attention à laisser de la place à droite de la figure et à respecter à peu près les proportions de la figure de l'énoncé concernant la taille de la lentille.
- 2 - Déterminer analytiquement les positions de S_1 et S_2 , c'est-à-dire la distance a entre S_1 et S_2 et la distance d entre la droite (S_1S_2) et le plan contenant les demi-lentilles.
- 3 - Justifier que S_1 et S_2 se comportent comme deux sources secondaires à même de générer une figure d'interférences. Construire alors sur le schéma le champ d'interférences.
- 4 - Calculer la distance minimale D_{\min} à laquelle il faut placer un écran d'observation pour observer des interférences. Cette distance sera comptée à partir des demi-lentilles.
- 5 - L'écran est placé à distance $D > D_{\min}$ des demi-lentilles. Calculer la largeur d du champ d'interférences.
- 6 - Déterminer l'interfrange puis le nombre de franges visibles sur l'écran.

Donnée : relations de conjugaison et de grandissement pour une lentille mince.

Le centre optique de la lentille est noté O , son foyer principal objet est noté F et son foyer principal image F' . La lentille a une distance focale image f' et une distance focale objet $f = -f'$. A est un point de l'axe optique et A' son image par la lentille. Les distances sont comptées algébriquement.

$$\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{f'} \quad \text{et} \quad \overline{FA} \times \overline{F'A'} = -f'^2$$

$$\gamma = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}} \quad \text{et} \quad \gamma = -\frac{\overline{F'A'}}{f'} = -\frac{f}{\overline{FA}}$$

V - Correction des exercices

Exercice 1 : Fentes d'Young éclairées en lumière blanche

[🔦 2 | 🧩 2 | 🌀]

1 Voir figure 10.

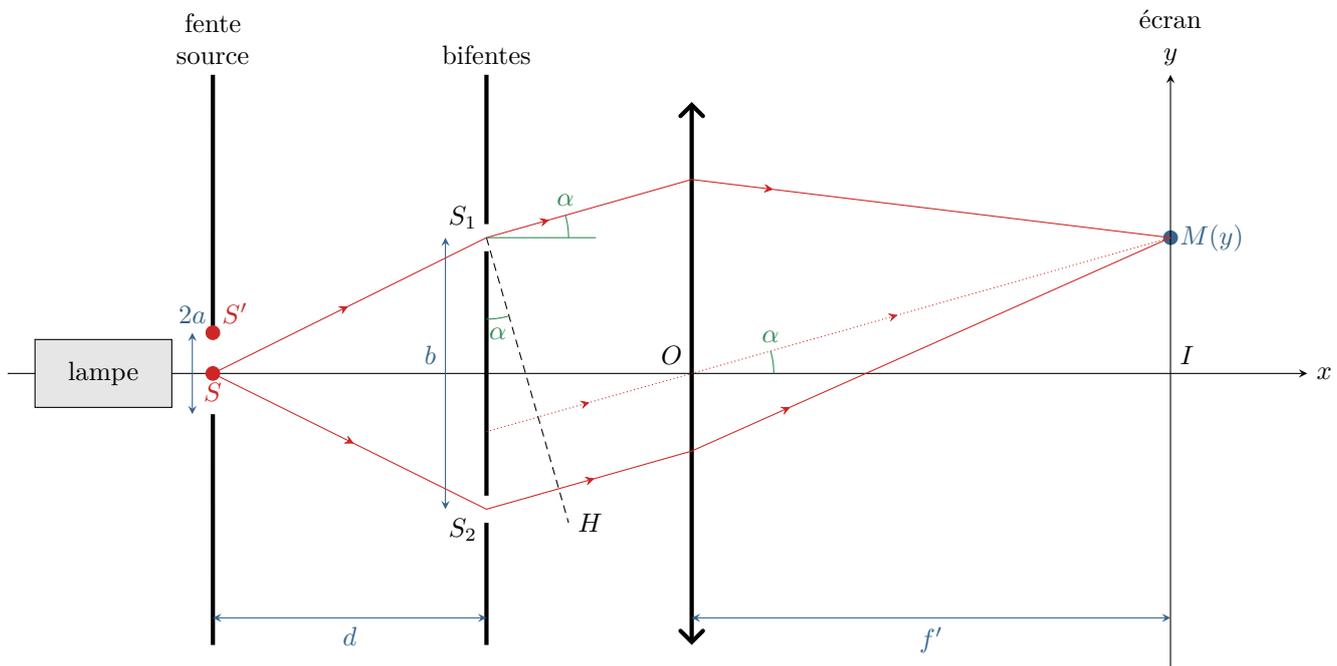


Figure 10 – Fentes d'Young en lumière blanche.

2 La source étant placée sur l'axe optique du montage,

$$\delta_0 = (SS_2M) - (SS_1M) = \cancel{(SS_2)} - \cancel{(SS_1)} + (S_2M) - (S_1M).$$

D'après le principe de retour inverse de la lumière et le théorème de Malus, si la source était placée en M , alors les points S_1 et H appartiendraient au même plan d'onde. Ainsi,

$$(S_1M) = (HM) \quad \text{d'où} \quad \delta_0 = (S_2H) + \cancel{(HM)} - \cancel{(S_1M)}.$$

En raisonnant dans le triangle S_1S_2H ,

$$\alpha \simeq \sin \alpha = \frac{S_2H}{S_1S_2} = \frac{\delta_0}{b},$$

et en raisonnant dans le triangle OIM

$$\alpha \simeq \tan \alpha = \frac{IM}{OI} = \frac{y}{f'}.$$

En identifiant,

$$\delta_0 = \frac{by}{f'} \quad \text{d'où} \quad \boxed{p_0(y) = \frac{by}{\lambda_0 f'}}.$$

Les franges brillantes sont situées aux positions y_m telles que l'ordre d'interférences soit entier, soit

$$p_0(y_m) = m \quad \text{donc} \quad \frac{by_m}{\lambda_0 f'} = m \quad \text{d'où} \quad \boxed{y_m = m \frac{\lambda_0 f'}{b}}.$$

Par définition de l'interfrange,

$$p_0(y+i) = p_0(y) + 1 \quad \text{soit} \quad \cancel{\frac{by}{\lambda_0 f'}} + \frac{bi}{\lambda_0 f'} = \cancel{\frac{by}{\lambda_0 f'}} + 1 \quad \text{d'où} \quad \boxed{i = \frac{\lambda_0 f'}{b}}.$$

3 Une figure d'interférences de grande taille signifie que l'interfrange est grand : il faut donc choisir une grande distance focale ... mais cela a l'inconvénient d'étaler davantage la lumière sur l'écran, et donc de diminuer la luminosité de la figure d'interférences.

En pratique, on préfère donc utiliser une lentille de courte focale pour avoir une figure de luminosité raisonnable bien que petite.

La distance entre la lentille et les bifentes n'intervient pas, on peut donc la choisir librement. Dans le but de maximiser la luminosité de la figure d'interférences, on a intérêt à placer la lentille la plus proche possible des bifentes.

4 Supposons maintenant la source placée au point S' de la figure 10, ce qui ajoute une différence de marche. On a

$$\overrightarrow{S'S_1} = d\vec{e}_x + \left(\frac{b}{2} - a\right)\vec{e}_y \quad \text{et} \quad \overrightarrow{S'S_2} = d\vec{e}_x + \left(\frac{b}{2} + a\right)\vec{e}_y,$$

ce qui donne en norme

$$S'S_1^2 = d^2 + \left(\frac{b}{2} - a\right)^2 = d^2 \left(1 + \frac{b^2}{2d^2} - \frac{ab}{d^2} + \frac{a^2}{d^2}\right) \quad \text{et} \quad S'S_2^2 = d^2 \left(1 + \frac{b^2}{2d^2} + \frac{ab}{d^2} + \frac{a^2}{d^2}\right)$$

Par des développements limités du type $(1+x)^{1/2} = 1+x/2$, il vient

$$S'S_1 = d \left(1 + \frac{b^2}{4d^2} - \frac{ab}{2d^2} + \frac{a^2}{2d^2}\right) \quad \text{et} \quad S'S_2 = d \left(1 + \frac{b^2}{4d^2} + \frac{ab}{2d^2} + \frac{a^2}{2d^2}\right).$$

On en déduit

$$(S'S_2) - (S'S_1) = \frac{ab}{d}.$$

Les chemins optiques (S_2M) et (S_1M) étant inchangés, il vient en fin de compte

$$\delta_a = \frac{ab}{d} + \frac{by}{f'} \quad \text{et} \quad p_a(y) = \frac{ab}{\lambda_0 d} + \frac{by}{\lambda_0 f'}.$$

En reprenant les calculs précédents, les franges brillantes se trouvent aux positions y'_m telles que

$$p_a(y'_m) = m \quad \text{d'où} \quad y'_m = m \frac{\lambda_0 f'}{b} - \frac{af'}{d} = y_m - \text{cte},$$

et l'interfrange n'est pas modifié. Ainsi, la figure d'interférences est simplement **décalée sur l'écran** par rapport à la situation précédente.

5 La fente large peut être décomposée par la pensée en une multitude de fentes infiniment fines incohérentes. Les éclaircissements produits par chacune des fentes élémentaires s'additionnent sur l'écran. Si $p_a(y) - p_0(y) \gg 1$, cela signifie que l'état d'interférences varie beaucoup au point y en fonction des différentes fentes élémentaires : certaines produiront une frange brillante (celles pour lesquelles p est entier), d'autres une frange sombre (celles pour lesquelles p est demi-entier). Au total, l'éclaircissement prendra donc une valeur intermédiaire et ne donnera pas lieu à une frange « nette » : la figure d'interférences est brouillée.

6 En reprenant les expressions précédentes,

$$\frac{a^*b}{\lambda_0 d} + \frac{by}{\lambda_0 f'} - \frac{by}{\lambda_0 f'} = \frac{1}{2} \quad \text{d'où} \quad a^* = \frac{\lambda_0 d}{2b}.$$

On constate que l'écart b entre les bifentes et la distance d entre la source et l'interféromètre intervient dans le résultat, il est donc clair que la largeur de cohérence spatiale a^* ne caractérise pas seulement la source mais l'ensemble source et interféromètre.

C'est différent pour la longueur de cohérence temporelle, qui peut être reliée uniquement à la longueur d'onde moyenne et à la largeur spectrale de la source et ne fait pas du tout intervenir l'interféromètre.

7 La lumière blanche est polychromatique. D'après la question 2, l'ordre d'interférence en un point $p_0(y)$ associé à une longueur d'onde λ s'écrit

$$p_0(y) = \frac{by}{\lambda f'}.$$

Ainsi, au centre de l'écran ($y = 0$), l'ordre est entier (nul!) pour toutes les composantes spectrales. Le spectre obtenu sur l'écran est identique au spectre de la source, si bien que la frange centrale apparaît blanche. Au contraire, pour $y \neq 0$, l'ordre prend des valeurs différentes pour les différentes composantes spectrales. S'il est demi-entier pour

une longueur d'onde, les interférences sont destructives et la longueur d'onde en question est absente du spectre obtenu sur l'écran, si bien que la lumière apparaîtra colorée.

8 Avec des fentes d'Young, la figure d'interférences s'inscrit à l'intérieur de la figure de diffraction produite par les bifentes. Celle-ci étant de largeur limitée, on comprend que toutes les différences de marche ne sont pas observables sur l'écran. Celui-ci apparaît noir car on est en dehors de la figure de diffraction, mais pas parce que les interférences sont destructives.

9 Si $a > a^*$, alors la figure d'interférences sera brouillée pour toutes les longueurs d'ondes. Il n'y aura plus d'interférences visibles : l'écran apparaîtra uniformément blanc.

Exercice 2 : Étude la raie verte du mercure

[inspiré oral banque PT | 💡 2 | ✂ 2 | ⊗]

1 Cf cours, observation dans le plan focal image d'une lentille convergente de focale f , éclairage convergent sur les miroirs.

2 Cf cours pour le calcul de la différence de marche : $\delta = 2e \cos i$. On en déduit l'ordre d'interférence

$$p = \frac{2e}{\lambda} \cos i.$$

3 Cf cours : $r = f \tan i$, puis dans l'hypothèse des petits angles

$$p = \frac{2e}{\lambda} \left(1 - \frac{i^2}{2}\right) = \frac{2e}{\lambda} \left(1 - \frac{r^2}{2f^2}\right)$$

d'où on déduit en inversant la relation

$$r_p = f \sqrt{2 - p \frac{\lambda}{e}}.$$

4 À chaque fois que l'ordre est entier, un anneau brillant est observé. Ainsi, la différence d'ordre entre le centre et l'extérieur de la figure d'interférences donne le nombre d'anneaux observés.

▷ Ordre au centre :

$$p_c = \frac{2e}{\lambda}$$

▷ Ordre à l'extérieur :

$$2 - p_{\text{ext}} \frac{\lambda}{e} = \frac{R_{\text{ext}}^2}{f^2} \quad \text{d'où} \quad p_{\text{ext}} = \frac{e}{\lambda} \left(2 - \frac{R_{\text{ext}}^2}{f^2}\right).$$

▷ Nombre d'anneaux :

$$N = \mathbb{E}(p_c - p_{\text{ext}}) = \quad \text{d'où} \quad N = \mathbb{E}\left(\frac{eR_{\text{ext}}^2}{\lambda f^2}\right).$$

5 Les deux figures d'interférences sont obtenues avec la même lentille et la même source. Elles ont le même rayon, mais comptent un nombre d'anneaux différents. On en déduit que l'épaisseur e de la lame d'air a été augmentée. Lorsque l'épaisseur e augmente, alors le rayon de l'anneau d'ordre p augmente : les anneaux sont sortis de la figure par les bords et rentrés par le centre de la figure d'interférences.

6 Par définition du temps de cohérence et de la largeur en fréquence,

$$\tau_c \Delta\nu = 1 \quad \text{soit} \quad \frac{L_c}{c} \Delta\nu = 1.$$

Pour relier la largeur en fréquence $\Delta\nu$ à la largeur en longueur d'onde $\Delta\lambda$, différentions la relation de dispersion,

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad \text{soit} \quad d\nu = -c \frac{d\lambda}{\lambda^2} \quad \text{d'où} \quad \Delta\nu = c \frac{\Delta\lambda}{\lambda^2}.$$

▮ Rappelons que l'identification entre différentielles et largeur de raie impose de prendre la valeur absolue.

En combinant ces résultats,

$$\frac{L_c}{c} \times c \frac{\Delta\lambda}{\lambda^2} = 1 \quad \text{d'où} \quad \Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{L_c}.$$

La définition que vous avez à connaître de la longueur de cohérence temporelle n'est que qualitative : c'est la longueur caractéristique de décroissance du contraste. Quantitativement, prenons par exemple $\Gamma(\delta = L_c) = \Gamma_{\text{max}}/2$, ce qui donne d'après la courbe $L_c = 4 \text{ mm}$, et donc

$$\Delta\lambda \simeq 0,07 \text{ nm}.$$

Compte tenu des définitions qui sont principalement des ordres de grandeur, une largeur de raie est rarement donnée avec plus d'un chiffre significatif ... et, comme dans cet exercice, il est possible que ce soit à vous de proposer une définition quantitative.

Exercice 3 : Billelles de Billet

[🔦 3 | 🧩 3]

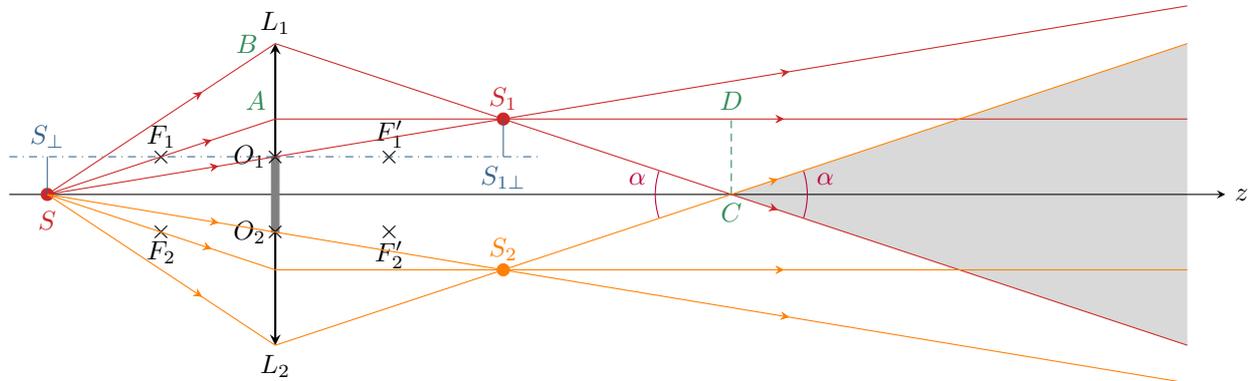


Figure 11 – Billelles de Billet.

1 Voir figure 11 : il suffit d'être méthodique, et de ne pas avoir peur de traiter les deux demi-lentilles comme deux lentilles indépendantes l'une de l'autre.

2 Raisonnons pour la lentille L1. Notons S_perp et S1_perp les projetés orthogonaux de S et S1 sur l'axe optique. D'après la relation de conjugaison,

$$\frac{1}{O_1 S_{1\perp}} - \frac{1}{O_1 S_{\perp}} = \frac{1}{f'} \quad \text{soit} \quad \frac{1}{d} + \frac{1}{2f'} = \frac{1}{f'}$$

ce qui permet d'isoler

$$\frac{1}{d} = \frac{1}{f'} - \frac{1}{2f'} = \frac{1}{2f'} \quad \text{d'où} \quad \boxed{d = 2f'}$$

D'après la relation de grandissement,

$$\frac{S_{1\perp} S_1}{S_{\perp} S} = \frac{O_1 S_{1\perp}}{O_1 S_{\perp}} = -1 \quad \text{d'où} \quad S_{1\perp} S_1 = \frac{\Delta}{2}$$

On en déduit par symétrie

$$a = S_1 S_2 = \frac{\Delta}{2} + \Delta + \frac{\Delta}{2} = 2\Delta$$

Le théorème de Thalès conduit au résultat probablement plus rapidement !

3 S1 et S2 sont les images géométriques de S, les ondes sphériques issues de ces points sont donc de même fréquence et cohérentes. On peut donc les considérer comme deux sources secondaires. Le champ d'interférence est la zone de l'espace où les deux faisceaux convergents en S1 et S2 se recouvrent, représenté en gris sur la figure 11. Pour l'obtenir, il faut commencer par compléter les faisceaux en s'appuyant sur les extrémités de la lentille : par stigmatisme, tous les rayons issus de S passent par S1 ou S2.

4 Notons R le rayon de la lentille. Appliquons le théorème de Thalès dans les deux triangles S1AB et S1CD. Alors,

$$\frac{AB}{CD} = \frac{AS_1}{DS_1} \quad \text{soit} \quad \frac{R - \frac{\Delta}{2}}{\Delta} = \frac{2f'}{D_{\min} - 2f'} \quad \text{d'où} \quad \boxed{D_{\min} = 2f' \left(1 + \frac{\Delta}{R - \frac{\Delta}{2}} \right)}$$

5 Notons alpha la largeur angulaire du champ d'interférences. Géométriquement,

$$\tan \frac{\alpha}{2} = \frac{\Delta}{D_{\min} - 2f'} = \frac{d/2}{D - D_{\min}} \quad \text{d'où} \quad \boxed{d = 2 \frac{\Delta (D - D_{\min})}{D_{\min} - 2f'}}$$

Dessin à faire.

6 $i = \lambda(D - 2f')/2\Delta$ et $N = d/i$.