



# Optique géométrique et ondulatoire

## I Rapports

### CCINP 2023 et 2022

Les constructions géométriques manquent souvent de rigueur et surtout de clarté.

En particulier, dans le dispositif des trous d'Young en montage de Fraunhofer, les rayons lumineux qui interfèrent en un point préalablement fixé sur l'écran sont très souvent tracés au hasard.

L'origine de la différence de marche dans un montage interférentiel n'est pas toujours bien comprise, que ce soit pour le dispositif des trous d'Young en montage de Fraunhofer ou pour un interféromètre de Michelson.

La notion de blanc d'ordre supérieur est souvent mal comprise. En particulier, les cannelures d'un spectre cannelé sont souvent interprétées comme des franges d'interférences sombres, directement visibles sur l'écran. Le calcul des longueurs d'ondes absentes constitue de ce fait une réelle difficulté.

Les notions de base sur les réseaux échappent à la plupart des candidats : les angles d'incidence et de diffraction ne sont pas forcément petits et beaucoup de candidats ne savent pas exploiter la condition d'interférences constructives pour retrouver la formule des réseaux.

La description des conditions d'observation dans un interféromètre de Michelson monté en configuration lame d'air, ou coin d'air et éclairé par une source étendue est généralement satisfaisante. En revanche, les conditions d'éclairage sont souvent méconnues.

### CCINP 2021

Les constructions géométriques manquent souvent de rigueur. Il convient de préciser le sens de la lumière incidente, la position des foyers des lentilles et de soigner la construction des rayons lumineux. En particulier, dans le dispositif des trous d'Young en montage de Fraunhofer, les rayons lumineux qui interfèrent sont très souvent tracés au hasard. Idem en 2019.

L'origine de la différence de marche dans un montage interférentiel n'est pas toujours bien comprise, que ce soit pour le dispositif des trous d'Young en montage de Fraunhofer ou pour un interféromètre de Michelson. Idem 2019.

La notion de blanc d'ordre supérieur est souvent mal comprise. En particulier, les cannelures d'un spectre cannelé sont souvent interprétées comme des franges d'interférences sombres, directement visibles sur l'écran.

Les notions de base sur les réseaux échappent à la plupart des candidats. Les angles d'incidence et de diffraction en jeu dans les montages à réseaux ne sont pas forcément petits. Idem 2019.

La description des conditions d'observation dans un interféromètre de Michelson monté en configuration lame d'air ou coin d'air et éclairé par une source étendue est généralement satisfaisante. En revanche, les conditions d'éclairage sont souvent méconnues. Idem 2019.

### Mines-Ponts2023

Un exercice d'optique doit généralement commencer par un tracé de rayons lumineux.

Nombre de candidats ne sait pas réaliser ce type de construction, en particulier si le système possède plusieurs lentilles ou s'il mêle trous d'Young et lentilles.

En optique géométrique, le fonctionnement de l'œil et les constructions géométriques associées posent souvent problème.

En optique ondulatoire, la construction des sources secondaires sur différents dispositifs interférométriques est parfois très confuse. De plus, l'effet d'un système stigmatique tel qu'une lentille mince sur la différence de marche entre deux rayons qui la traversent issus de A et allant vers A' n'est pas maîtrisé. Trop de candidats connaissent simplement le résultat par cœur : si celui-ci peut être proposé sans calcul, il faut cependant savoir représenter cette différence de marche sur un schéma, même pour le montage des trous d'Young. Dans ce dernier cas, il est nécessaire de préciser sous quelles conditions de distance ce résultat est effectivement valide.

Le critère de cohérence pour une source spatialement ou spectralement étendue est généralement utilisé à bon escient. Cependant, le vocabulaire (cohérence, synchronisme, en phase) n'est pas interchangeable et doit être maîtrisé.

## Mines-Ponts 2022

Les constructions géométriques manquent souvent de clarté. Il convient de préciser le sens de la lumière incidente, la position des foyers des lentilles et de soigner la construction des rayons lumineux. Les définitions d'un objet et d'une image en optique géométrique sont généralement mal connues. Quelques candidats ont tendance à croire que l'image d'un objet par une lentille mince est toujours dans le plan focal image ; ce n'est pas le cas (Idem 2021).

Le fonctionnement d'un œil normal et ses éventuels défauts sont souvent mal compris (Idem 2021).

La distinction entre interféromètres à division du front d'onde et à division d'amplitude pose parfois problème.

Les notions de cohérence temporelle et de cohérence spatiale sont souvent mal maîtrisées. En particulier, la justification de la chute de contraste par perte de cohérence spatiale pose problème à certains candidats. Synchronisme et cohérence des sources sont parfois assimilées à tort.

En lumière blanche, le blanc d'ordre supérieur n'est pas le fruit d'interférences destructives.

Le théorème de Malus est souvent cité sans que les candidats sachent réellement justifier son emploi en amont ou en aval de trous d'Young ou d'une lentille mince.

L'origine de la différence de marche dans un montage interférentiel n'est pas toujours bien comprise. Si un candidat décide de proposer une formule de différence de marche sans la démontrer, il convient de justifier avec soin qu'elle peut respectivement être appliquée dans le cas étudié. C'est en particulier rarement le cas pour la différence de marche pour les trous de Young qui nécessite une évaluation précise des ordres de grandeurs des distances mises en jeu.

La description des conditions d'observation dans un interféromètre de Michelson équivalent à une lame d'air ou à un coin d'air éclairé par une source étendue, est généralement satisfaisante. En revanche, les conditions d'éclairage et leurs justifications sont souvent mal connues par les candidats.

Si la formule de Fresnel donnant l'intensité dans le cas d'interférences à deux ondes est généralement bien connue, sa démonstration n'est pas toujours maîtrisée par les candidats.

Les angles d'incidence et de diffraction en jeu dans les montages à réseaux ne sont pas forcément petits. En outre, la « formule des réseaux » est souvent connue mais les étudiants oublient qu'elle représente une condition d'interférence constructive.

## Centrale-Supélec 2022

On note des difficultés dans les constructions géométriques menant au calcul d'une différence de marche. Certains n'hésitent pas à faire de la géométrie autour d'une lentille convergente, ignorant sa nature bombée... La condition d'interférences destructives/destructives portant sur le déphasage ou l'ordre d'interférence est méconnue, on lui préfère la formule de Fresnel et les calculs aboutissent alors rarement. Il serait bon de reprendre ce point. Le théorème de Malus porte hélas bien son nom. Il faut le reprendre pour bien l'exposer. Des tracés élémentaires d'optique géométrique ont posé d'insurmontables difficultés.

## Centrale-Supélec 2021

Certains candidats ont encore du mal à faire la différence entre distance et distance algébrique, ce qui les mène ainsi à des résultats totalement aberrants. Il est indispensable de maîtriser le théorème de Thalès. Les notions d'objets (respectivement d'images) réels et virtuels ne sont pas toujours assimilées. La réflexion totale est souvent mal maîtrisée. Idem 2019.

On ne place pas toujours l'écran dans le plan focal image d'une lentille convergente.

Il faut savoir exprimer une différence de marche, savoir localiser les figures d'interférence. L'expression de la différence de marche obtenue avec un interféromètre de Michelson en lame d'air est rarement démontrée. Idem 2019.

Le calcul du rayon des anneaux brillants (ou sombre) est souvent laborieux : de nombreux candidats ne réalisent pas que l'ordre d'interférence est maximal au centre de la figure d'interférence. Idem 2019.

L'usage du théorème de Malus associé au retour inverse de la lumière dans le calcul des différences de marche a posé parfois problème.

## II Questions de cours

- Réflexion et transmission par un dioptre ; cas de la réflexion totale.
- Cohérence temporelle en optique.
- L'approximation de Gauss en optique géométrique.
- Minimum de déviation par un réseau.
- Approximation scalaire de l'optique.
- Conditions de formation d'images en optique. Présentation de quelques instruments d'optique.
- Conditions d'obtention d'interférences entre deux ondes lumineuses.
- Protocole de réglage d'un interféromètre de Michelson.
- Phénomène d'interférences à deux ondes et applications.
- Effet laser : nécessité d'une inversion de population.

## III Exercices

On rappelle les formules de conjugaison pour une lentille, donnant une image  $A'$  d'un objet  $A$  sur l'axe optique ainsi que les formules du grandissement, avec origine au centre optique  $O$  :

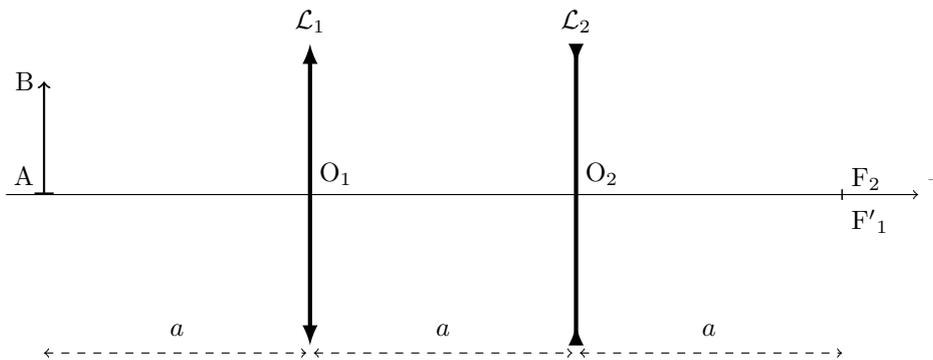
$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{OA'} - \frac{1}{OA} \qquad \gamma = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}$$

avec origine aux foyers :

$$\overline{FA} \times \overline{F'A'} = f \times f' \qquad \gamma = \frac{-f}{FA} = \frac{\overline{F'A'}}{-f'}$$

### 1. Lunette de Galilée – CCINP

Une lunette de Galilée est constituée d'une lentille convergente  $\mathcal{L}_1$  et d'une lentille divergente  $\mathcal{L}_2$ . Déterminer géométriquement et analytiquement l'image de  $A$ . Quel est le grandissement ?



## 2. Projection d'un film – CCINP

On souhaite projeter un film sur un écran (E). On utilise une lentille convergente (L) de foyer objet  $F$ , de foyer image  $F'$  et de distance focale image  $f'$ . La pellicule, modélisée par un objet  $AB$  perpendiculaire à l'axe optique, est située à une distance  $d > f'$  du centre  $O$  de la lentille. La distance entre la pellicule et l'écran est notée  $D$ .

1. Construire l'image de l'objet  $AB$  sur l'écran par la lentille ( $L$ ) en traçant trois rayons.
2. Montrer que la distance  $d$  existe si et seulement si  $f'$  et  $D$  vérifient une relation que l'on déterminera.
3. Exprimer le grandissement transversal  $G_t$  du système en fonction de  $d$  et  $f'$ .
4. Quel grandissement  $G_t$  choisir pour obtenir une projection convenable de la pellicule sur l'écran ? En déduire la valeur de  $d$ .

Données : taille d'une image sur une pellicule de film  $16 \text{ mm} \times 22 \text{ mm}$  ; dimension de l'écran de projection  $4 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ .  
 $f' = 6,0 \text{ cm}$ .

## 3. Michelson en lame d'air – CCINP

On considère un michelson éclairé par une source large et monochromatique. L'écran est dans le plan focal image d'une lentille et les deux miroirs sont perpendiculaires.

1. Montrer que le montage est équivalent à une lame d'air.
2. Décrire la figure d'interférence. Déterminer l'évolution du rayon des anneaux si l'anneau central est brillant.
3. On remplace un des miroirs par un miroir concave. Que devient la figure d'interférence ?
4. Déterminer dans ce cas le rayon  $r_k$  de la  $k$ ième frange brillante.

## 4. Sujets/Visueur – CCINP

Un viseur est constitué d'une lentille  $L_1$  convergente ( $f'_1 = 5 \text{ cm}$ ) et d'un écran situé à  $d = 7,5 \text{ cm}$  de  $L_1$ .

Un objet  $A_1B_1$  est placé à  $20 \text{ cm}$  avant une lentille  $L$  dont on ignore la focale. On observe une image nette de l'objet  $A_1B_1$  sur l'écran lorsque  $L$  est placé à  $5 \text{ cm}$  devant  $L_1$ . Calculer la focale  $f'$  de  $L$ .

## 5. Microscope – CCINP

Soit un microscope composé de deux lentilles convergentes  $L_1$  et  $L_2$  de distance focale  $f'_1 = 5 \text{ mm}$  et  $f'_2 = 25 \text{ mm}$ . On a  $\overline{F'_1F_2} = \Delta = 16 \text{ cm}$ . On place un objet  $AB$  de taille  $0,1 \text{ mm}$  tel que  $A$  soit sur l'axe optique.  $A_1B_1$  est son image à travers la lentille  $L_1$  et  $A'B'$  l'image de  $A_1B_1$  à travers  $L_2$ .

1. (a) Où doit se situer  $A'B'$  pour qu'il n'y ait pas d'accommodation de la part de l'observateur ?  
 (b) En déduire où est  $A_1$ .  
 (c) Calculer  $\overline{F_1A_1}$ .  
 (d) Tracer le schéma expliquant comment on obtient  $A'B'$ .

2. (a) Calculer le grandissement  $\gamma_1$  de la lentille  $L_1$ .
- (b) On note  $\alpha'$  l'angle formé par les rayons à la sortie de  $L_2$ , calculer  $\alpha'$ .
- (c) On place un objet  $AB$  de taille  $0,1$  mm à la distance  $d$  de l'œil de l'observateur. En prenant une distance  $d = 25$  cm, calculer  $\alpha$ , l'angle sous lequel l'objet est observé par l'œil.
- (d) On note  $G_c = \left| \frac{\alpha'}{\alpha} \right|$  le grossissement du microscope, calculer  $G_c$ .

## 6. Problèmes de vue – Mines-Ponts

Un patient souffre d'un problème de vision. Il ne voit pas les objets nets au-delà de 26,0 cm, ni en-dessous de 13,5 cm.

1. Établir le diagnostic quant à la vision du patient : de quel défaut souffre-t-il ? Proposer une correction adaptée, tout d'abord avec une paire de lunettes qu'il portera à 2cm de ses yeux, ensuite avec des lentilles de contact.
2. Avec l'âge, le patient ne pourra certainement plus lire son journal de près. Comment régler ce défaut ? Ce second problème compensera-t-il le problème initial ?

## 7. Système afocal – CCINP

On a deux lentilles convergentes de focales  $f'_1$  et  $f'_2$ . Déterminer la distance entre  $L_1$  et  $L_2$  pour avoir un montage afocal, ainsi que le grandissement correspondant.

On considère désormais une convergente ( $f'_1$ ) et une divergente ( $f'_3$ ). Distance entre  $L_1$  et  $L_3$  pour avoir un montage afocal ? Grandissement ?

## 8. Doublet – CCINP

On réalise des interférences lumineuses non localisées avec une source qui émet, avec la même intensité, deux radiations de longueurs d'onde  $\lambda_1 = 589,6$  nm et  $\lambda_2 = 589,0$  nm. On notera  $\delta$  la différence de marche entre les deux rayons, issus de la source, venant interférer en un point de l'écran.

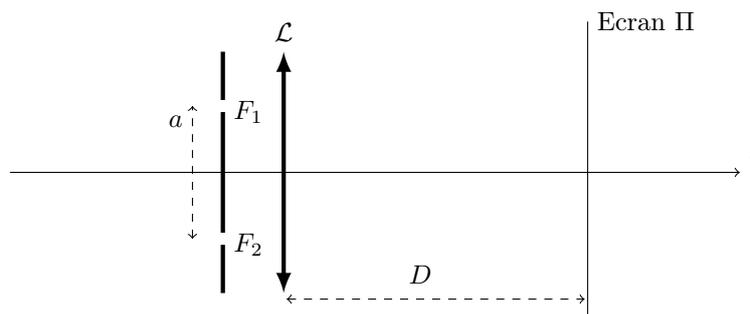
1. Exprimer l'intensité lumineuses en fonction de  $\delta$ .
2. Représenter  $I(\delta)$ .
3. Quelle est la valeur de  $\delta$  correspondant au premier brouillage.

## 9. Fentes d'Young – Mines

$F_1$  et  $F_2$  sont deux fentes d'Young très fines éclairées sous incidence normale de longueur d'onde  $\lambda$ ,  $F_1 F_2 = a$ . La lentille de distance focale image  $f'$  est pratiquement confondue avec le plan des fentes.

Déterminer l'interfrange  $i$  sur le plan  $\Pi$

1. Pour  $D = f'$
2. Pour  $D = 2f'$

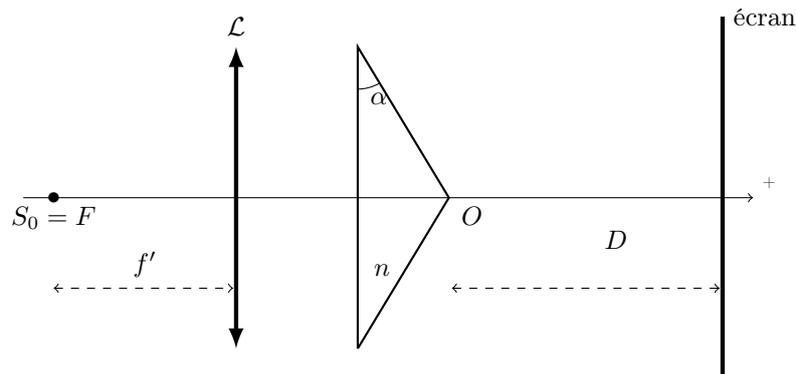


## 10. Biprisme de Fresnel – Mines

Un biprisme de Fresnel est constitué de deux prismes identiques droits accolés d'angle  $\alpha$  faible, d'indice  $n \geq 1$ . Ce biprisme est éclairé par une source ponctuelle  $S_0$  placée au foyer objet de la lentille convergente. Il s'agit d'une source supposée monochromatique (longueur d'onde dans le vide  $\lambda$ ).

Le biprisme présente un angle  $\alpha$  égal à  $10'$  d'arc.

1. Dessiner le champ d'interférences.
2. Qu'observe-t-on sur un écran situé à une distance  $D$  de  $O$  ?
3. Calculer l'interfrange.



## 11. Mesure de l'indice du monoxyde de carbone – Centrale

On considère le dispositif interférentiel ci-dessous, qui permet de mesurer l'indice du monoxyde de carbone CO, en mettant en jeu trois bacs  $A$ ,  $B$  et  $C$ , chacun séparé en deux compartiments de même longueur  $e$ .

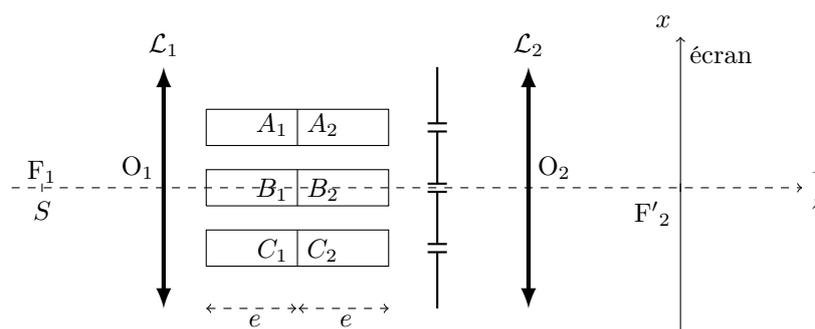
Les six compartiments sont initialement remplis d'air. Deux opérations peuvent être réalisées :

- ( $O_1$ ) on fait le vide dans les compartiments  $A_1$ ,  $A_2$  et  $B_1$  ;
- ( $O_2$ ) on remplit les compartiments  $A_1$ ,  $A_2$  et  $B_1$  de monoxyde de carbone CO.

1. On réalise l'opération ( $O_1$ ). Dans quel sens se sont déplacées les franges ?
2. On revient à la situation initiale (six compartiments remplis d'air). On réalise alors l'opération ( $O_2$ ). On constate que, lors de cette opération, 8 franges (à plus ou moins 1 frange) défilent sur l'écran vers le haut. L'indice  $n_{CO}$  du monoxyde de carbone est-il supérieur ou inférieur à l'indice  $n$  de l'air ? Déterminer l'indice  $n_{CO}$ , ainsi que l'incertitude associée.
3. Représenter le profil de l'intensité lumineuse observée sur l'écran. Le comparer à celui observé dans le cas d'interférences à deux ondes.

Données :

- la longueur d'onde dans le vide de la source  $S$  monochromatique  $\lambda_0 = 589,27 \text{ nm}$  ;
- l'indice optique de l'air  $n = 1,00027$  (six chiffres significatifs)
- la longueur d'un compartiment  $e = 1,0 \text{ cm}$



## 12. Mesure de l'indice d'une lame – Mines

Soient deux fentes d'Young distantes de  $a = 3,3$  mm et placées à une distance  $D = 3,0$  m d'un écran. On place une lame transparente d'épaisseur  $e = 100$   $\mu\text{m}$  et d'indice  $n$  devant une des deux fentes.

1. Sachant que pour une source monochromatique à  $\lambda_0 = 550$  nm les franges sont déplacées de  $\Delta x = 47,3$  mm à l'introduction de la lame, déterminer son indice.
2. Les distances sur l'écran sont mesurées avec une précision de 0,01 cm. Précision sur  $n$  ?
3. La lame est à présent éclairée en lumière blanche et l'indice varie selon

$$n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2}$$

avec  $A = 1,5$ .

On note  $p(x, \lambda)$  l'ordre d'interférence en un point d'abscisse  $x$  sur l'écran. Montrer qu'il existe une frange achromatique c'est-à-dire vérifiant  $\frac{dp}{d\lambda}(x_0) = 0$ . Trouver sa position et l'ordre correspondant. Quelle est la « couleur » de cette frange ?

## 13. Minimum de déviation d'un réseau par transmission

Soit un réseau par transmission de pas  $a$  éclairé sous une incidence  $i$ .

1. Donner l'expression de la déviation  $D_k$  du rayon correspondant à la longueur d'onde  $\lambda$  dans l'ordre  $k$ .
2. Montrer que, si l'on fait tourner le réseau autour d'un axe parallèle aux traits, cette déviation passe par un minimum  $D_{kmin}$ .
3. On mesure  $D_{kmin} = 19^\circ$  pour  $\lambda = 550$  nm à l'ordre 3. En déduire le pas du réseau.

## 14. Bilentilles – Mines

Une source  $S$  fine, monochromatique  $\lambda_0 = 589,3$  nm est placée dans le plan focal objet d'une lentille convergente  $\mathcal{L}_0$ . Un peu plus loin sont placées les deux moitiés d'une lentille convergente  $\mathcal{L}$  de focale 25 cm sciée en deux suivant un diamètre; les deux moitiés sont écartées symétriquement de  $2\epsilon = 2$  mm. L'intervalle ainsi créé est obturé par un cache opaque. On observe les interférences sur un écran situé à une distance  $d = 50$  cm.

1. Réaliser une figure claire et expliquer. Déterminer la largeur du champ d'interférence, l'interfrange, le nombre de franges visibles.
2. La source est en fait un doublet  $\lambda_1 = 589,0$  nm et  $\lambda_2 = 589,6$  nm. Au bout de combien de franges, y a-t-il brouillage? Conclusion ?
3. On place entre les deux lentilles avant  $\mathcal{L}$  une lame à face parallèle d'indice  $n = 1,52$ . Déterminer son épaisseur  $e$  pour visualiser au centre de l'écran la première anti-coïncidence.

## 15. Oscillations d'une cavité optique résonnante

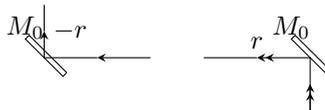


Fig. 1

On considère une cavité optique en anneau, de longueur totale  $L$ , formée de 3 miroirs :  $M_1$  concave,  $M_2$  plan,  $M_0$  séparatrice partiellement transparente.  $M_1$  et  $M_2$  sont considérés comme parfaitement réfléchissants et n'introduisant aucun déphasage.  $M_0$  est caractérisée par le coefficient de transmission en amplitude  $t > 0$  indépendant du sens de propagation, et par le coefficient de réflexion en amplitude  $r > 0$  sur la face inférieure,  $(-r)$  sur la face supérieure (fig.1) :  $r^2 + t^2 = 1$ .

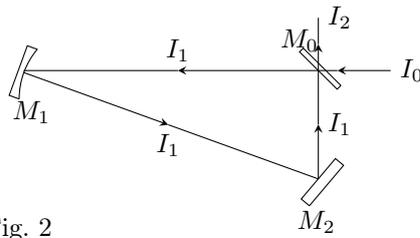


Fig. 2

1. On éclaire la cavité par un faisceau de lumière parallèle monochromatique de longueur d'onde  $\lambda_0$ . Le milieu n'est ni absorbant, ni amplificateur : l'intensité du faisceau est la même en tout point du trajet intérieur (fig.2). Calculer les intensités  $I_1$  et  $I_2$  des faisceaux dans l'anneau et en sortie en fonction de  $\phi = \frac{2\pi L}{\lambda_0}$ .

2. Calculer les valeurs minimales et maximales de  $I_1$ . Calculer dans chacun de ces deux cas la valeur de la longueur  $L$  en fonction de  $\lambda_0$ . Soit  $r = 1 - \epsilon$ , avec  $\epsilon \ll 1$ . Donner l'allure de la courbe  $I_1(\phi)/I_0$ .

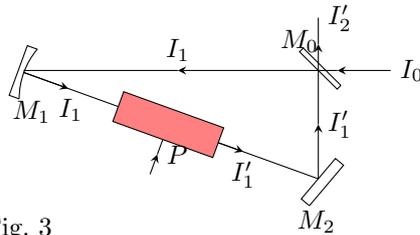


Fig. 3

3. On place désormais (fig.3) un milieu amplificateur de lumière dans l'un des bras de la cavité. Le gain en amplitude (resp. en puissance) de cet amplificateur est  $\gamma > 0$  (resp.  $G = \gamma^2$ ). On note  $P$  la puissance du faisceau pompe nécessaire pour faire fonctionner le mode amplificateur (fig.4) :  $GI = P + I$ .

— Calculer  $I_1/I_0$ ,  $I_2'/I_0$  en fonction de  $\varphi$ ,  $\gamma$  et  $r$ .

— À quelle condition peut-on avoir  $I_2' > I_0$ ? Montrer que la valeur résonnante de  $I_2'$  peut être très élevée sous certaine condition. Quelle est la longueur de la cavité à la résonance? Discuter.

AN :  $G = 1, 1$ ;  $r^2 = 0, 9$ . Calculer  $I_{2max}'/I_0$ ,  $I_{2min}'/I_0$ .

4. Mode laser :  $I_0$  est désormais nul.

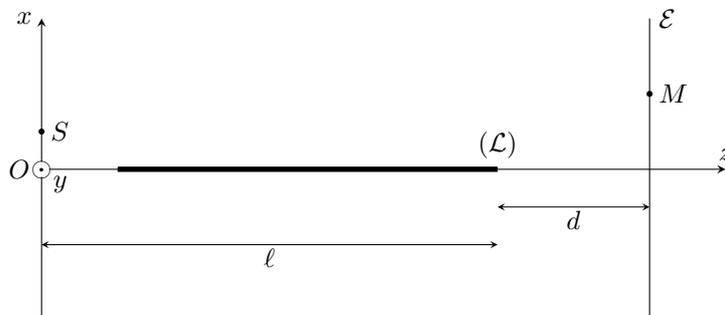
— Quelles sont les conditions à réaliser pour que  $I_1$  et  $I_2'$  ne le soient pas? Interpréter.

— Montrer que l'ensemble des fréquences que peut émettre un laser est dénombrable.

## 16. Miroir de Lloyd

On éclaire une lame de verre ( $\mathcal{L}$ ), assimilée à un miroir plan, par une source lumineuse ponctuelle  $S$ , située à une distance  $a/2$  du plan du miroir, émettant une radiation lumineuse monochromatique de longueur d'onde  $\lambda_0$ .

On admet que la réflexion sur le miroir entraîne un déphasage de  $\pi$ .



1. Les interférences sont obtenues par superposition de l'onde issue directement de  $S$  et de celle réfléchié par le miroir. En déduire quelles sont les deux sources qui produisent des interférences. Sont-elles cohérentes?

2. Représenter les rayons lumineux parvenant au point  $M$  de l'écran. Vérifier que le dispositif est un dispositif de division du front d'onde.

3. Décrire le champ d'interférences ; les interférences sont-elles localisées ?
4. L'écran est placé à la distance  $d$  du bord droit du miroir. On note  $\ell$  la distance de la source au bord droit du miroir. Déterminer en un point  $M$  de l'écran l'ordre d'interférence  $p(M)$ , la différence de marche  $\delta(M)$  et la différence de phase  $\Delta\varphi(M)$ .
5. En déduire l'expression de l'intensité vibratoire sur l'écran. Quelle est la forme des franges d'interférences ?
6. a) Peut-on remplacer la source par une fente fine allongée dans la direction de  $\vec{e}_y$  ?  
b) Soit  $b$  la largeur de la fente dans la direction de  $\vec{e}_x$  ; estimer en fonction de  $a, b$  et de l'interfrange  $i$  l'extention spatiale de la zone où les franges sont correctement contrastées.