

Quelques explications théoriques et pratiques...

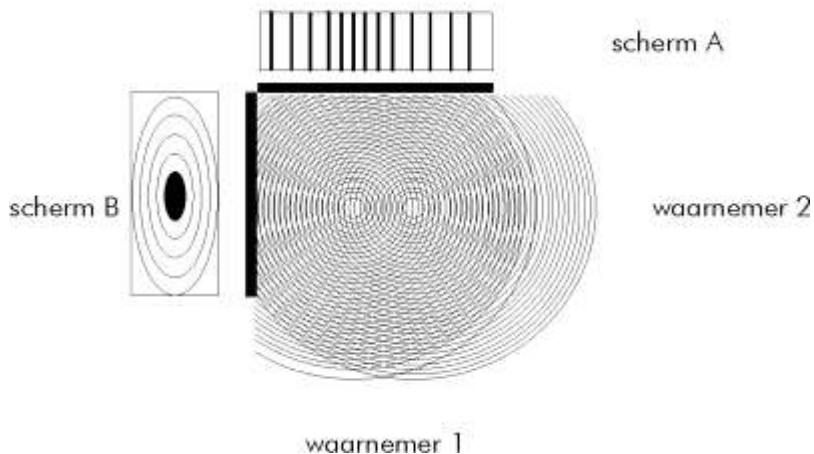
Nous donnons ici une description plus détaillée des expériences, pour ceux qui veulent les comprendre techniquement, et éventuellement pour ceux qui veulent les refaire. Tout d'abord, nous allons approfondir un peu plus le sujet de l'interférence optique.

Interférence optique

Deux points lumineux cohérents très proches l'un de l'autre génèrent des ondes lumineuses qui, comme de nombreuses sphères concentriques, ne cessent de s'étendre et de se mélanger les unes aux autres. Nous illustrons cela avec deux transparents sur lesquels sont imprimés un certain nombre de cercles concentriques et nous faisons glisser progressivement les transparents l'un sur l'autre. Ils semblent former une sorte de motif moiré.



Le document montre tout cela dans un plan plat, en deux dimensions. En fait, il ne s'agit pas de cercles, mais de sphères en expansion qui ont toujours une dimension spatiale et temporelle.



Nous voyons ci-dessus une vue de dessus de deux sources lumineuses ponctuelles monochromatiques cohérentes, que nous appellerons A et B, qui sont particulièrement proches l'une de l'autre. Les bandes noires horizontale et verticale représentent chacune la vue de dessus

d'un écran de projection. Les écrans A et B, sont les mêmes écrans, mais maintenant légèrement dépliés, nous disons à 45° , ce qui nous permet de voir ce qui est projeté sur eux.

Vanuit het gezichtspunt van waarnemer 1 liggen de lichtbronnen A en B naast elkaar. Op het scherm A zullen er zich een aantal evenwijdige interferentielijnen tonen, wat ons bij de interferentie-experimenten van Young en Fresnel brengt.

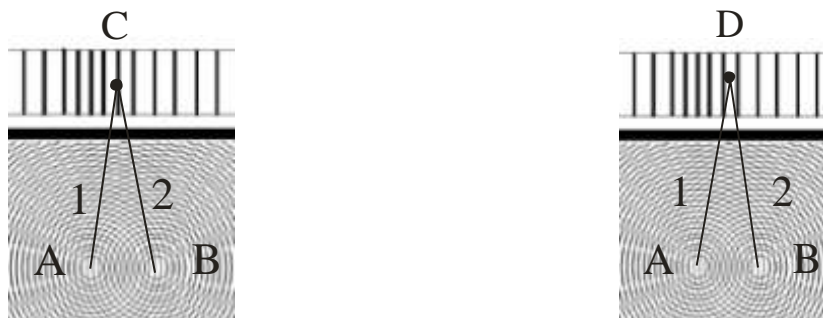
Cependant, du point de vue de l'observateur 2, les sources lumineuses A et B se trouvent l'une derrière l'autre. Sur l'écran de projection B, des cercles concentriques seront visibles, ce qui fait référence aux anneaux newtoniens.

Essayons de clarifier ce point. Les images ci-dessous sont des détails des images qui viennent d'être données.

Regardons d'abord l'écran A.

Au-dessus, au milieu, nous voyons une ligne sombre, la ligne d'interférence destructive. Le point C se situe sur cette ligne. Tous les faisceaux lumineux de A et B qui forment la ligne dans laquelle se trouve C, comme les faisceaux lumineux 1 et 2, ont une phase opposée et s'éteignent mutuellement.

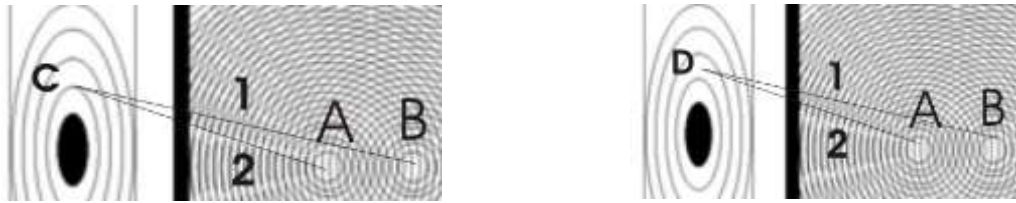
Le point D de l'image de droite tombe sur une bande de lumière plus large, une ligne d'interférence constructive. Tous les rayons lumineux provenant de A et B qui forment la ligne dans laquelle se trouve D, comme les rayons lumineux 1 et 2, ont la même phase et se renforcent mutuellement. La lumière y est plus intense.



Ensuite, nous examinons l'écran B.

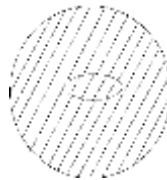
Le point C sur l'image de gauche tombe sur un cercle sombre, un cercle d'interférence destructive. Tous les rayons lumineux de A et B qui forment le cercle C, comme les rayons lumineux 1 et 2, ont une phase opposée et s'éteignent mutuellement.

Le point D de l'image de droite tombe sur un cercle lumineux plus large, un cercle d'interférence constructive. Tous les rayons lumineux de A et B qui forment le cercle D, comme les rayons 1 et 2, ont la même phase et se renforcent mutuellement. La lumière y est plus intense.



Si l'on passe progressivement de la position de l'observateur 1 à celle de l'observateur 2, ces lignes, d'abord parallèles, vont théoriquement se transformer en courbes, jusqu'à devenir des cercles concentriques.

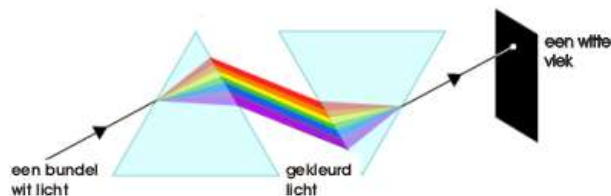
Dans une certaine forme de microscopie d'interférence, le champ de vision est ajusté de telle sorte qu'il est rempli de nombreuses lignes d'interférence destructive. Une bactérie transparente placée sur le trajet de la lumière ralentira la lumière, ce qui entraînera une légère déformation et un décalage de ces lignes. Cela donne des informations sur l'emplacement, la forme et l'épaisseur de la bactérie.






Si l'on rapproche encore plus les deux sources lumineuses, ces cercles sur l'écran B deviennent de plus en plus grands. Au final, l'anneau central sera si grand qu'il remplira tout le champ de vision de l'observateur. On parle avec un terme anglo-saxon de "infinite fringe width". Dans ce qui suit, nous abrègerons ce terme en "IFW".

Quelque chose à propos des couleurs

Le brillant physicien anglais Isaac Newton (1643/1727) a démontré que la lumière du soleil traversant un prisme se décompose en ses couleurs constitutives. Un deuxième prisme permet de réunir à nouveau ces couleurs pour former la lumière blanche.



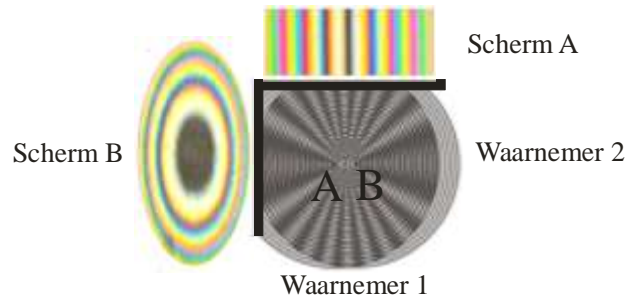
Chaque couleur a sa propre longueur d'onde. Par exemple, la longueur d'onde du rouge (entre 620 et 750 nanomètres) est beaucoup plus longue que celle du violet (entre 380 et 450 nanomètres).

Violet		380-450 nm
Rouge		620-750 nm
La lumière blanche		380-750 nm

La source lumineuse ponctuelle "blanche" S ci-dessous génère toutes les couleurs de l'arc-en-ciel. Comme il y a environ deux mille (!) ondes dans un seul millimètre, les différentes couleurs se chevauchent très rapidement et une lumière blanche est à nouveau générée.



Nous travaillons avec de la lumière blanche dans nos expériences. Ainsi, les lignes d'interférence et les anneaux de Newton sur nos deux écrans de projection seront beaucoup plus colorés. Nous avons :



Ce qui était des lignes ou des cercles noirs dans les images avec notre source de lumière monochromatique sont maintenant des lignes et des cercles avec les couleurs de l'arc-en-ciel.

Vous trouverez ci-dessous un détail de l'écran B et de l'écran A. Au milieu de chaque image, nous appliquons une ligne rouge. Nous voyons que dans les deux écrans, les moitiés sont l'image miroir l'une de l'autre.



Si nous faisons un zoom sur la couleur bleue de la ligne d'interférence 1, nous trouverons la couleur rouge à sa gauche. Si nous faisons un zoom sur la ligne 2, nous trouverons la couleur rouge à droite de celle-ci.

Raisonnons un peu plus loin. Nous ajustons de façon à ce que toute la surface de notre miroir principal soit remplie d'une seule couleur du spectre. Si nous perturbons ensuite le trajet de la lumière, par exemple en tenant notre main juste devant le miroir, la chaleur/évaporation émanant de notre main ralentira le trajet de la lumière à cet endroit et entraînera un décalage des couleurs d'interférence. Il est alors évident que ce décalage sera en fonction de la ligne ou du cercle d'interférence à gauche ou à droite de la ligne ou du cercle d'interférence destructive. En d'autres termes, cela dépend si nous nous trouvons dans la zone d'interférence 1 ou 2.

Une perturbation dans une configuration d'interférence, causée par une lumière monochromatique, provoquera un décalage des lignes d'interférence. Nous avons illustré cela avec l'exemple de la bactérie dans le microscope.

Si nous travaillons avec de la lumière blanche, alors une telle ligne est une collection de couleurs. Si nous pouvions ajuster notre installation de manière à ce que la surface du miroir soit remplie d'une seule couleur d'une seule ligne, nous aurions de bonnes raisons de croire que nous obtiendrions un instrument beaucoup plus sensible. C'est finalement l'idée de base de toutes les expériences ultérieures que nous voulons réaliser.

Quelque chose à propos des interféromètres

Comme indiqué précédemment, dans un interféromètre, la lumière est divisée en deux faisceaux partiels qui sont perturbés d'une manière ou d'une autre et se rejoignent ensuite, ce qui donne lieu à des interférences et à des changements de couleur perceptibles.

Abréviations utilisées

S = Source, source lumineuse ponctuelle.

M = Miroir, miroir concave, diamètre 155 mm, $f = \pm 1250$ mm

m = Miroir, petit miroir plat, avec couche réfléchissante sur le dessus

Bs = Cube diviseur de faisceau pour lumière visuelle, 50/50, 20 mm³.

E = Œil, emplacement de l'observateur

v = distance de l'objet

b = distance de l'image

B = point image

K (la lettre majuscule) = centre de courbure

k (la lettre minuscule) = distance du point focal

La = Laser vert, nécessaire pour aligner les pièces. La est placé derrière E, de sorte que lorsque l'on regarde, la tête se trouve entre La et E, et le risque d'être aveuglé par le laser est réduit. Il est toujours recommandé d'éteindre le laser lorsque l'on regarde.

IFW : Infinite Fringe Width (largeur de frange infinie) : une image où la surface réfléchissante n'a qu'une seule couleur du spectre. En d'autres termes, une seule ligne d'interférence est tellement étendue que M est rempli d'une seule couleur.

Un interféromètre radial.

1. Approche algébrique

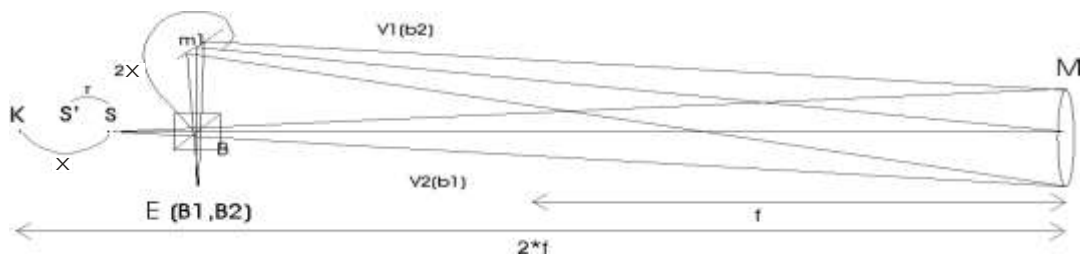
Pour l'arrangement ci-dessous s'appliquent encore :

a = chemin lumineux de S à M dans le sens des aiguilles d'une montre

b = chemin lumineux de S à M dans le sens inverse des aiguilles d'une montre

x = la distance a - b

$$r = \sqrt{x^2 + f^2} - f$$



Nous appelons cette configuration la "configuration de base". Nous pensons à la source lumineuse ponctuelle dans S' et nous essayons de définir algébriquement les deux distances des objets.

Nous avons :

v₁, la distance antérieure dans le sens des aiguilles d'une montre, est égale à la distance de S' à S, puis à B, m₁ et M, soit : $v_1 = 2*f - (x - r) + 2*x = 2*f + x + r$. (1)

v₂, la distance dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, est égale à la distance de S' à S et ensuite via B à M ou : $v_2 = 2*f - (x - r) = 2*f - x + r$ (2)

Par la formule du miroir $1/f = 1/b + 1/v$ nous trouvons : $b = (v*f) / (v-f)$, de sorte que b₁, la première distance image, appartenant à v₁, et allant de M via B dans la direction de E, est égale à :

$$b_1 = (2*f - x + r)*f / (2*f - x - r - f) \quad (3)$$

Pour b₂, la deuxième distance image, appartenant à v₂, et allant de M à travers m₁ et B dans la direction de E nous trouvons :

$$b_2 = (2*f + x + r)*f / (2*f + x + r - f) \quad (4)$$

Si nous voyons dans le dessin où se trouve b₁, nous voyons que le chemin disponible pour b₁ est égal à v₂. Ainsi le point image B₁ (la majuscule pour le distinguer de la minuscule b₁, la distance image) sera à b₁-v₂ de E, soit :

$$B_1 = b_1 - v_2$$

Si l'on regarde par analogie l'emplacement de b₂, on voit que le chemin disponible est égal à v₁. Le point B₂ sera donc à la distance b₂-v₁ de E.

$$B_2 = b_2 - v_1$$

Nous trouvons la distance mutuelle D entre les deux points d'image B1 et B2 en faisant la différence entre ces deux valeurs.

Nous avons :

$$D = B2 - B1 = (b2-v1) - (b1-v2) = (b2-b1) - (v1-v2) \quad (5)$$

De (1) et (2) nous trouvons :

$$(v1-v2) = 2*f-x+r - 2*f-x-r = -2*x \quad (6)$$

de sorte que nous pouvons réécrire (5) comme : $D = (b2-b1) + 2*x$ (7)

Maintenant nous remplaçons dans (7) pour b2 et b1 les valeurs obtenues dans (3) et (4) :

$$D = ((2*f-x+r)*f/(f-x+r)) - ((2*f+x+r)*f/(f+x+r)) + 2*x$$

Nous allons maintenant approfondir cette équation.

$$\begin{aligned} &= (((2f^2 - fx + fr) * (f + x + r) - (2f^2 + fx + fr) * (f - x + r)) / (f - x + r) * (f + x + r)) + 2x \\ &= (2f^3 + 2f^2x + 2f^2r - fx^2 - fxr + f^2r + fxr + fr^2) / (f + x + r) * (f - x + r) - \\ &\quad (2f^3 - 2f^2x + 2f^2r + f^2x - fx^2 + fxr - f^2r - fxr + fr^2) / (f + x + r) * (f - x + r) - 2x \\ &= (2f^2x / (f + x + r) * (f - x + r)) - 2x \\ &= (2f^2x / (f^2 - fx + fr + fx - xr + r^2)) - 2x \\ &= (2f^2x / (f^2 + 2fr + r^2 - x^2)) - 2x \\ &\text{ou } D = (2f^2x / ((f+r)^2 - x^2)) - 2x \quad (8) \end{aligned}$$

Avec cette dernière expression, nous avons maintenant une formule qui nous dit à quelle distance se trouvent les deux points images B1 et B2 dans notre montage, et ceci en fonction de la distance focale f de notre miroir M, de la valeur de x et du décalage radial r de notre source lumineuse ponctuelle.

Que r dans cette expression vise 0, et en poursuivant le calcul nous obtenons :

$$\begin{aligned} D &= (2f^2x / (f^2 - x^2)) - 2x \\ D &= (2f^2x - 2x(f^2 - x^2)) / (f^2 - x^2) \\ D &= (2f^2x - 2xf^2 + 2x^3) / (f^2 - x^2) \\ D &= 2x^3 / (f^2 - x^2) \end{aligned}$$

Nous voyons que la valeur de D devient plus petite lorsque la valeur de x diminue et/ou que la valeur de f augmente. Si, à r = 0, nous voulons rapprocher les points image B1 et B2, nous devons évaluer autant que possible les distances objet v1 et v2 et travailler avec des miroirs à long(er) foyer. L'importance d'une petite valeur de D apparaîtra clairement dans la section suivante, où l'on montrera que nous disposons alors d'une plus grande marge de manœuvre mécanique pour ajuster notre configuration.

La question évidente est maintenant de savoir quand les deux points d'image coïncident réellement, ou quand la valeur de D devient égale à 0. Nous la calculerons en fonction de la distance r, car cette valeur peut être modifiée le plus facilement dans un montage en avançant ou en reculant la source lumineuse. Si nous calculons cela, en partant de l'équation donnée dans (8), nous trouvons

$$D = (2f^2x / ((f+r)^2 - x^2)) - 2x, \text{ of:}$$

$$(2f^2x / ((f+r)^2 - x^2)) - 2x = 0$$

et on va s'arranger :

$$2f^2x / ((f+r)^2 - x^2) = 2x, \text{ of}$$

$$(f+r)^2 - x^2 = 2f^2x / 2x$$

$$(f+r)^2 = f^2 + x^2$$

$$f + r = \text{sqr}(x^2 + f^2), \text{ of}$$

$$r = (\text{sqr}(x^2 + f^2)) - f$$

Avec cette dernière formule, nous avons ce dont nous avons besoin : une valeur nulle pour D en fonction de r. Si r satisfait à la condition décrite ci-dessus, alors théoriquement les deux points images B1 et B2 doivent coïncider.

2. Approche arithmétique.

Vérifions cela avec quelques valeurs concrètes.

Diamètre M = 155 mm, f = 1250 mm, Bs = 10mm³,

La distance m1 au centre Bs = 10, alors 2x = 10mm et x = 5mm.

Si B1 et B2 doivent coïncider, alors r doit satisfaire :

$$r = \text{sqr}(f^2 + x^2) - f, \text{ ou bien}$$

$$r = \text{sqr}(1250^2 + 5^2) - 1250 = 0,01\text{mm}.$$

A r = 0.01, D = 0 doit être. Vérifions :

$$D = (2f^2x / ((f+r)^2 - x^2)) - 2x, \text{ soit}$$

$$D = (2 * 1250^2 * 5 / ((1250 + 0,01)^2 - 5^2)) - 2 * 5 = 0\text{mm}.$$

Nous obtenons en outre :

$$v1 = 2f + x + r \text{ ou } 2 * 1250 + 5 + 0,01 = 2505,01$$

$$v2 = 2f - x + r \text{ ou } 2 * 1250 - 5 + 0,01 = 2495,01$$

Via $1/f = 1/v + 1/b$ on obtient

$$b1 = (v1 * f) / (v1 - f) \text{ ou } (2505,01 * 1250) / (2505,01 - 1250) = 2495,01$$

$$b2 = (v2 * f) / (v2 - f) \text{ ou } (2495,01 * 1250) / (2495,01 - 1250) = 2505,01$$

Nous allons vérifier où, dans E, se trouvent les points B1 et B2 :

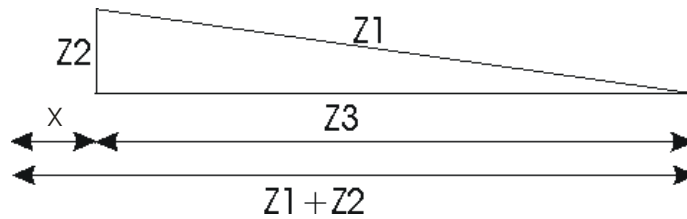
$$b2 - v1 = 2505,01 - 2505,01 = 0$$

$$b1 - v2 = 2495,01 - 2495,01 = 0$$

D est alors également 0, de sorte que théoriquement B1 et B2 coïncident exactement.

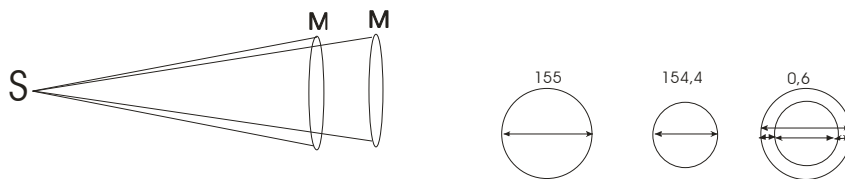
L'idée de base de ce type d'interféromètre radial est très simple.

D'une part : dans le triangle rectangle, $z1 + z2 > z3$ et $z1 + z2 - z3 = x$.



Et d'autre part : si $v < k$, alors $b > k$ et alors $v - b = x$.

En résumé, nous avons décrit et calculé un type d'interféromètre radial. C'est un interféromètre parce que deux trajets lumineux - dans le sens des aiguilles d'une montre et dans le sens inverse - s'unissent en E, et parce qu'ici ces images n'ont pas la même taille. Le trajet lumineux M, Bs, E est en effet plus court que le trajet lumineux M, m1, Bs, E. Et pourtant, avec les valeurs données, théoriquement, les deux points images coïncident.



3. Trois situations différentes

Voyons ci-dessous quelles seraient les conséquences pour des valeurs qui diffèrent légèrement de celles calculées en théorie. En d'autres termes, demandons-nous si notre montage est réalisable dans la pratique. Supposons, par exemple, que nous fassions une erreur d'un millimètre. Nous calculons notre installation lorsque les distances sont 1 millimètre trop courtes, nous les comparons avec les distances qui sont exactement conformes à la théorie, et enfin lorsqu'elles sont 1 millimètre trop longues. Afin de ne pas confondre les distances objet et image, nous remplaçons le miroir creux par une lentille dans le dessin ci-dessous.

Situation 1 : les distances sont trop courtes d'un millimètre.

$$v_1 = 2 * f + x + r - 1$$

$$v_2 = 2 * f - x + r - 1$$

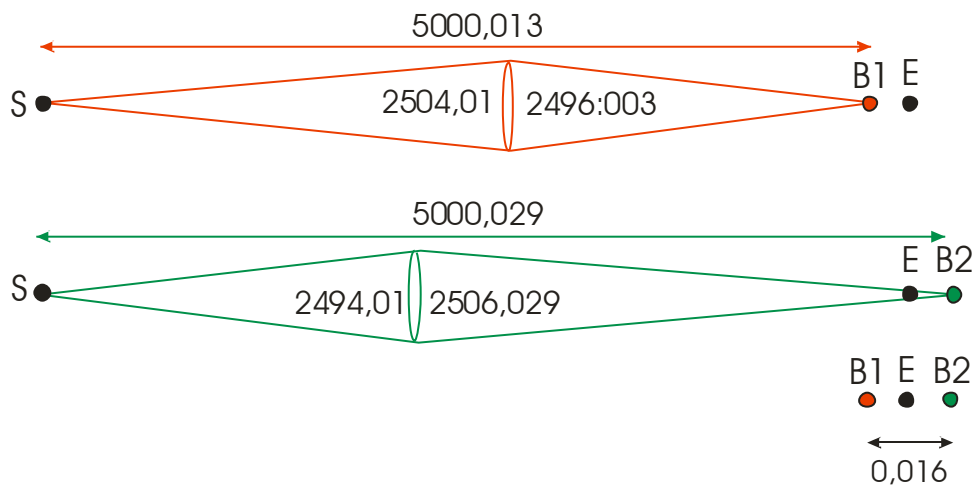
$$v_1 = 2504,01 \quad b_1 = (2504,01 * 1250) / (2504,01 - 1250) = 2496,003$$

$$v_2 = 2494,01 \quad b_2 = (2494,01 * 1250) / (2494,01 - 1250) = 2506,019$$

$$v_1 + b_1 = 2504,01 + 2496,003 = 5000,013$$

$$v_2 + b_2 = 2494,01 + 2506,019 = 5000,029$$

$$5000,029 - 5000,013 = 0,016$$



Parce que $b_1 = 2496.003$, mais $v_2 = 2494.01$,
 B1 tombe sur $v_2 - b_1$ ou $2494.01 - 2496.003 = - 1.993$ passé E

Puisque $b_2 = 2506.019$, mais $v_1 = 2504.01$,
 B2 tombe sur $v_1 - b_2$ ou $2504.01 - 2506.019 = - 2.009$ passé E

Donc B2 est plus éloigné de E que B1,
 leur différence mutuelle est $B_2 - B_1 = 2,009 - 1,993 = + 0,016$,

Situation 2 : les distances sont égales.

$$v_1 = 2 * f + x + r$$

$$v_2 = 2 * f - x + r$$

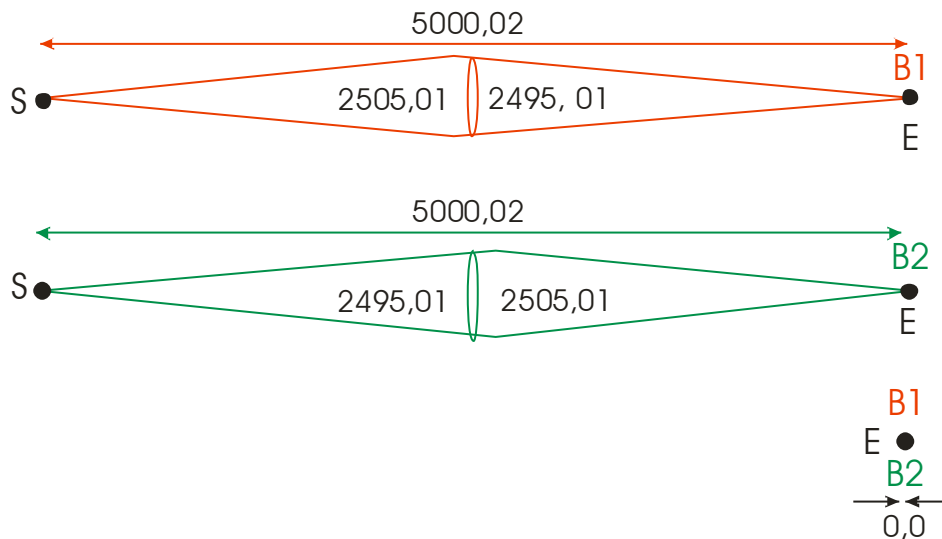
$$v_1 = 2505,01 \quad b_1 = (2505,01 * 1250) / (2505,01 - 1250) = 2495,01$$

$$v_2 = 2495,01 \quad b_2 = (2495,01 * 1250) / (2495,01 - 1250) = 2505,01$$

$$v_1 + b_1 = 2505,01 + 2495,01 = 5000,02$$

$$v_2 + b_2 = 2495,01 + 2505,01 = 5000,02$$

$$5000,02 - 5000,02 = 0,0$$



Puisque $b_1 = 2495,01$, et $v_2 = 2495,01$,
 B_1 tombe sur $v_2 - b_1$ ou $2495,01 - 2495,01 = 0$ B_1 tombe en E

Parce que $b_2 = 2505,01$, et $v_1 = 2505,01$
 B_2 tombe sur $v_1 - b_2$ ou $2505,01 - 2505,01 = 0$ tombe sur B_2 en E

Donc B_2 et B_1 coïncident,
leur différence mutuelle est $B_2 - B_1 = 0$

Situation 3 : les distances sont de 1 millimètre trop longues.

$$v_1 = 2 * f + x + r + 1$$

$$v_2 = 2 * f - x + r + 1$$

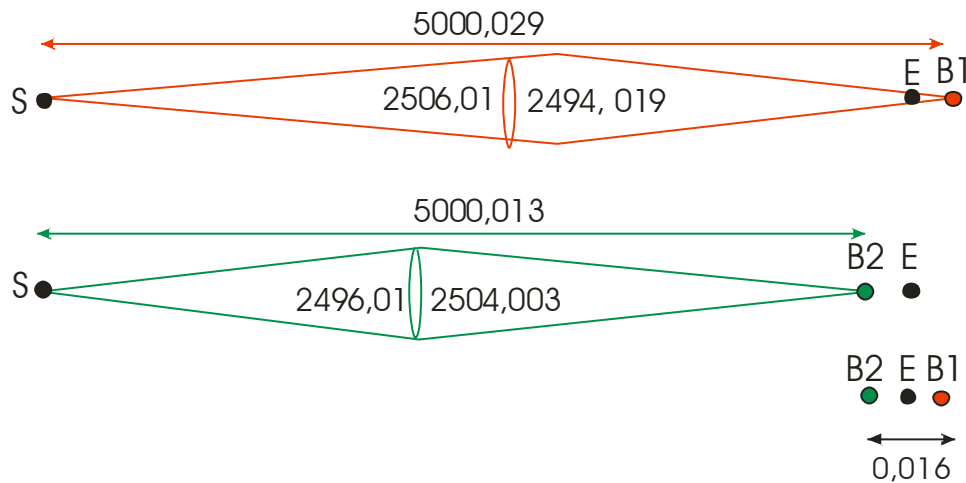
$$v_1 = 2506,01 \quad b_1 = (2506,01 * 1250) / (2506,01 - 1250) = 2494,019$$

$$v_2 = 2496,01 \quad b_2 = (2496,01 * 1250) / (2496,01 - 1250) = 2504,003$$

$$v_1 + b_1 = 2506,01 + 2494,019 = 5000,029$$

$$v_2 + b_2 = 2496,01 + 2504,003 = 5000,013$$

$$5000,029 - 5000,013 = - 0,016$$



Puisque $b_1 = 2494,019$, mais $v_2 = 2496,01$,
 B1 tombe sur $v_2 - b_1$ ou $2496,01 - 2494,019 = 1,991$ pour E

Puisque $b_2 = 2504,003$, mais $v_1 = 2506,01$,
 B2 tombe sur $v_1 - b_2$ ou $2506,01 - 2504,003 = 2,007$ pour E

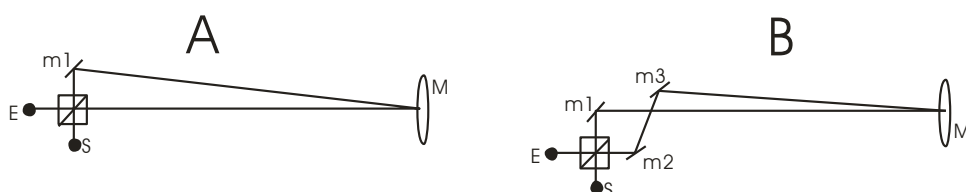
Donc B2 est plus éloigné de E que B1,
 leur différence mutuelle est $B_2 - B_1 = 1,991 - 2,007 = -0,016$,

Nous généralisons : Dans la configuration de base, les variables peuvent être choisies de telle sorte que, par rapport au miroir M, B2 soit exceptionnellement proche après B1 (1), que les deux coïncident (2), ou que B2 soit exceptionnellement proche avant B1 (3). En d'autres termes, nous disposons théoriquement d'un moyen de rapprocher incroyablement deux points d'image, voire de les faire coïncider exactement.

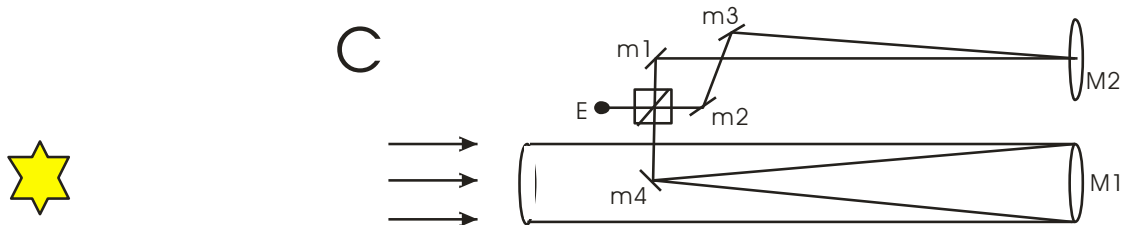
Les deux points d'image peuvent ainsi être rapprochés beaucoup plus près l'un de l'autre que ne le permet l'expérience classique à deux fentes de Young.

Nous verrons que cela ouvre la porte à la création de lignes d'interférence très larges.

Et une autre chose : Dans l'image ci-dessous, sous A, nous voyons l'installation de base représentée schématiquement : l'interféromètre radial. En B, nous voyons à nouveau la configuration de base, mais maintenant avec un trajet lumineux égal, de sorte que la radialité vise 0. C'est ainsi qu'il est devenu possible de réaliser une interférence destructive.



On peut se demander si d'autres applications sont envisageables. Par exemple, sous C, nous avons couplé l'arrangement B à un télescope newtonien. La question se pose de savoir si l'interférence destructive peut également être obtenue à partir de l'image capturée dans le visualiseur. Cependant, dans ce cas, nous sommes au niveau professionnel, qui va beaucoup plus loin que ce qui est possible pour un amateur.



4. Pour commencer

Quelques remarques pratiques à l'avance.

Une pièce entière.

N'oubliez pas qu'un arrangement nécessite une pièce entière, que nous pouvons également assombrir.

La source lumineuse ponctuelle.

Pour S, nous avons utilisé une source lumineuse ponctuelle d'un diamètre de 0,3 mm. Nous avons monté une extrémité d'un câble en fibre de verre dans un morceau de tube électrique en plastique que nous avons fermé avec une plaque métallique (par exemple d'une canette de soda) et nous l'avons percé avec une aiguille d'acupuncture de 0,3 mm. Ensuite, nous avons soigneusement poncé toutes les bavures et les avons contrôlées au microscope. L'autre extrémité de la fibre était maintenue à une certaine distance (+/- 200 mm) d'une lampe (+/- 50 Watt). Ceci pour ne pas brûler le support plastique de la fibre. Nous n'avons pas utilisé de ventilateur car cela provoque des turbulences d'air gênantes. Et pour la même raison, la lampe n'a pas été placée dans le chemin de lumière. Nous avons également équipé la lampe près de E d'un variateur de lumière afin de pouvoir augmenter ou diminuer l'intensité lumineuse. Nous avons également rendu la source de lumière étanche pour que la pièce reste sombre.

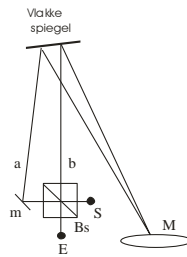
Un laser

L'alignement de chaque installation est effectué à l'aide d'un laser. Il doit être suffisamment puissant, car dans certaines installations, le trajet de la lumière peut atteindre 15 mètres. Plus le trajet lumineux est long, plus le point laser est large et faible, et plus l'alignement est difficile. Nous plaçons le laser derrière E, de sorte que la lumière du laser, lorsqu'on regarde depuis E, brille sur l'arrière de notre tête. Nous évitons avec anxiété toute lumière laser dans l'œil. Oui, avec un interrupteur à portée de main, nous éteignons le laser avant de regarder la configuration.

Un miroir extra-plat.

Nous voulons vérifier ce que l'on verra de notre main lorsqu'elle sera placée dans une telle disposition juste devant M. Avec une valeur f de +/- 1250 mm et une valeur k de +/- 2500 mm, ce n'est évidemment pas possible. Pour éviter d'être dépendant des autres pour voir la main, nous plaçons un miroir plat supplémentaire (diamètre +/- 100 mm) à mi-chemin du trajet lumineux, de sorte que, en regardant depuis E, l'observateur peut toujours tenir la main devant

M et voir par lui-même ce qui est montré.



Le miroir principal

Nous avons utilisé un miroir auto-affûté d'un diamètre de 155 mm, soit la valeur standard pour ceux qui suivent un cours d'affûtage de miroir dans un observatoire populaire en vue de construire un télescope newtonien.

Quelques miroirs

Nous aurons également besoin de quelques miroirs avec la couche réfléchissante sur le dessus, pour éviter les erreurs qui pourraient se produire parce que la lumière doit traverser le verre différemment. Leur taille dépend de leur place dans le dispositif. S'ils sont proches de Bs, 15*15 mm sont suffisants. Nous avons nous-mêmes besoin de quelques miroirs de 15*100 mm. Cela sera expliqué plus tard.

Trois grands miroirs auxiliaires (H1, H2 et H3)

Ces miroirs ordinaires nous aideront à aligner des montages plus difficiles. Nous avons utilisé des miroirs d'environ 100 mm * 900 mm, avec la couche réfléchissante au dos. Ils sont attachés à une poutre qui n'est pas légèrement plus longue. Nous les avons obtenus à partir de vieilles armoires de toilette que l'on place par exemple au-dessus des éviers ou sur les portes des armoires. Bien qu'ils ne soient pas vraiment "plats" selon les normes optiques élevées, ils suffisent généralement à nos besoins.

4.1. La configuration de base

La configuration de base a déjà été expliquée au point 1. L'utilisation d'un miroir extra plat a également été mentionnée.

Comme toutes les pièces sont dans le même "plan", cette configuration est relativement facile à construire et à ajuster avec un laser. Par exemple, dans cette configuration, il importe peu que le trajet lumineux Bs-m soit parallèle ou non au banc optique. Si, par exemple, deux beamsplitters ou plusieurs petits miroirs sont utilisés, alors, comme nous le verrons, le réglage devient beaucoup plus difficile.

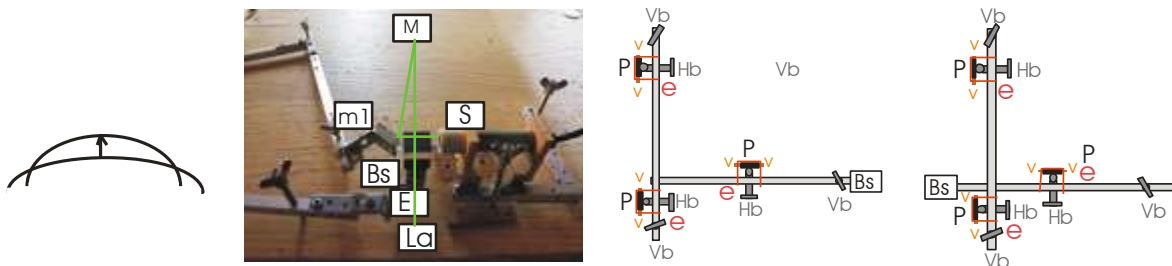
Si vous construisez cette configuration de base, vous remarquerez rapidement un certain nombre de lignes d'interférence ou de cercles concentriques. On peut expérimenter en augmentant ou en diminuant la différence entre les deux trajets lumineux (s-Bs-m-M et s-Bs-M). Les perturbations, c'est-à-dire les déformations des lignes d'interférence dues, par exemple, à l'introduction d'une bougie allumée, d'une cigarette allumée ou de la main dans le trajet de la lumière, deviennent perceptibles lorsque la différence de trajet est maintenue aussi faible que possible, c'est-à-dire lorsque m et Bs sont très proches l'un de l'autre et que la distance à M suit de près le calcul. Nous avons nous-mêmes utilisé le test du couteau de Foucault. Cependant avec cette différence que le couteau en E avait une position fixe, et nous pouvions changer la

distance à M et m méticuleusement. La modification de la distance de m à Bs se fait à l'aide des vis de réglage. Modifier la distance de M à E est un peu plus difficile. Nous avons placé M sur un petit chariot à 4 roues et l'avons relié à une poutre plus longue qui est passée sous le banc optique jusqu'à ce qu'elle soit à portée de l'observateur en E. Pour éviter que la poutre ne se courbe, une poutre métallique de +/- 15 mm d'épaisseur a été placée contre elle. À l'autre extrémité du faisceau (en E), on a placé un Hb et un Vb, ainsi qu'un boulon qui permet de rapprocher ou d'éloigner un peu plus le miroir M de E.



Notez qu'un interféromètre radial réunit deux ondes perturbées de manière similaire mais de taille légèrement différente. Essayons d'illustrer cela avec le dessin ci-dessous à gauche. Lorsque les deux ondes se "croisent", elles se mélangent et il en résulte des différences de couleur qui peuvent être observées à l'œil nu.

Regardons l'image (la deuxième image ci-dessous) qui montre schématiquement une partie de la configuration de base. Avec de simples cornières, m1 et Bs peuvent être déplacés approximativement le long des axes requis : le miroir m1 le long des axes x et y, Bs le long des axes x, y et z. Les tiges d'aluminium (diamètre : 10 mm²) permettent d'effectuer un réglage fin pour les pièces requises. La ligne verte sur la photo a été ajoutée ultérieurement et indique le trajet de la lumière laser. M est cependant en dehors de la photo en raison de sa grande valeur f.

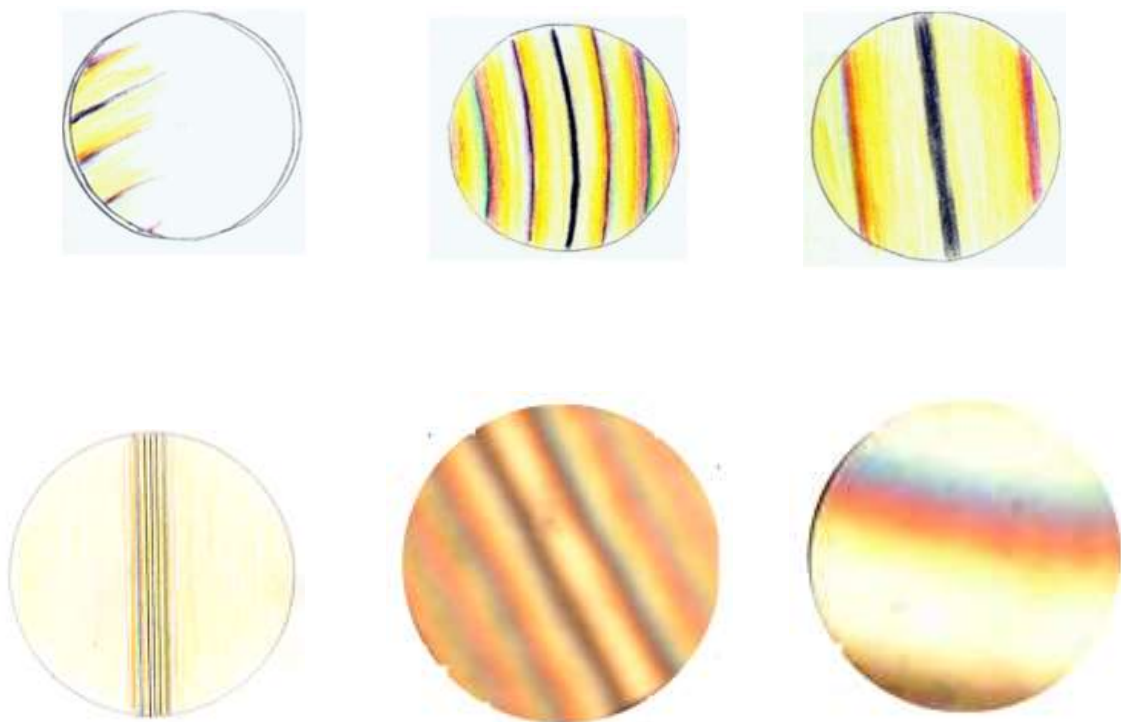


La troisième image ci-dessus à droite montre par exemple des B dans un support modifié. Les deux "leviers" sont en aluminium, ont un diamètre de 10 mm² et mesurent environ 400 mm de long. "Hb" signifie "Horizontal bolt", "Vb" signifie "Vertical bolt". Ces boulons sont munis en haut d'un écrou à ailettes et ont été percés de façon conique. Dans l'ouverture créée, une bille a été collée pour minimiser la friction entre le boulon et le banc optique lors de la rotation du boulon. La lettre "P" désigne une planche verticale fixe contre laquelle le boulon peut s'appuyer lorsqu'il est serré. La lettre "e" désigne une crémaillère qui appuie le boulon contre la planche, la lettre "v" désigne une petite vis à laquelle la crémaillère peut être fixée. On voit que par l'interaction des 6 boulons, Bs selon ses 3 axes, mais aussi ce qui est à gauche, à droite, au-

dessus, au-dessous, en avant ou en arrière peut être déplacé. Ce sont tous les mouvements dont nous aurons besoin.

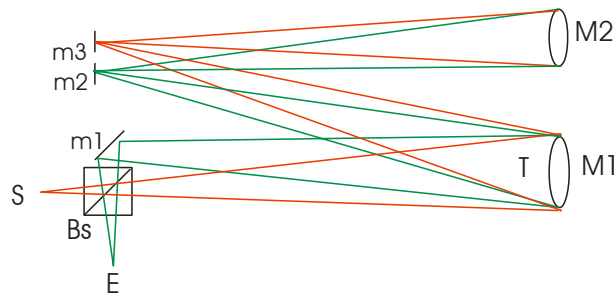
La quatrième illustration montre une variation d'un support Bs. Le Bs est plus central. On choisit bien sûr la variante la plus réalisable pour chaque arrangement. Chaque petit miroir faisant partie d'une installation doit également être placé dans un tel support.

Si une installation ne comporte que quelques pièces, comme l'installation de base, elle est relativement facile à construire. Cependant, si un montage nécessite plusieurs pièces, le banc d'optique est alors rempli de nombreuses tiges d'aluminium qui semblent souvent se gêner les unes les autres. Il faut ensuite faire preuve d'ingéniosité pour tout organiser de manière conviviale. Rappelez-vous que nous voulons actionner les vis de réglage principales depuis E. Cela signifie qu'elles doivent être à portée de main. Les montages comportant plus de 1 Bs ou m nécessitent également des rétroviseurs auxiliaires plats supplémentaires. Lors de l'alignement, tous les faisceaux laser doivent se trouver avec précision dans un même plan. Nous y reviendrons dans un instant.



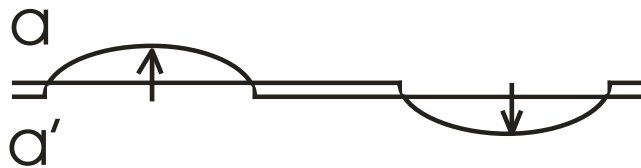
Une variante de cette configuration (et d'autres qui suivront) consiste à laisser la lumière traverser la perturbation "T", "T" de "turbulence", ici généralement notre main, une seconde fois. Le dessin ci-dessous montre une grande parallaxe, mais dans la pratique, cela ne joue pas un rôle majeur. Le miroir M1 est à 2500 mm de Bs et m2 et m3 sont juste à côté de M1. Le dessin n'est donc pas du tout en proportion. Nous avons constaté que la qualité de l'image était moins bonne à cause de cela. La lumière parcourt en effet ici une distance de 15 mètres. En

principe, cela ne peut pas être un problème. Nous utilisons nos miroirs depuis 25 ans et ils n'ont plus jamais été embués. Peut-être que cela joue aussi un rôle.



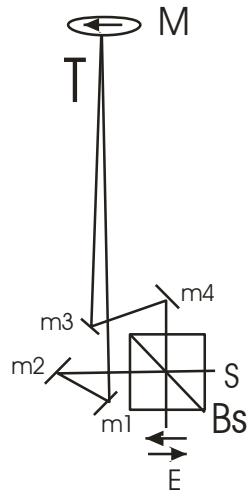
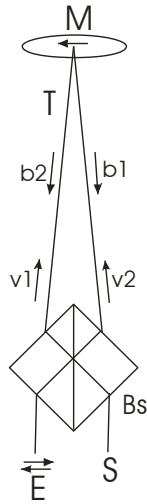
4.2. Un interféromètre à inversion

Comme déjà mentionné, dans un interféromètre à inversion, une moitié de l'image est fusionnée avec l'image miroir de l'autre moitié. Si nous ne passons pas la ligne centrale du miroir à la main, une onde perturbée va interférer avec une onde non perturbée. Leur différence mutuelle, chaque fois indiquée par la flèche ci-dessous, est beaucoup plus importante que dans un interféromètre radial. Nous constatons donc un changement de couleur beaucoup plus intense. Le dessin de celui-ci dans le premier texte le confirme en effet : on voit que l'évaporation / le chauffage de la main fait apparaître deux lignes d'interférence.

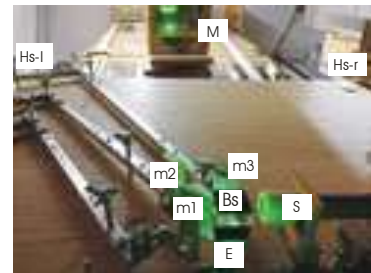
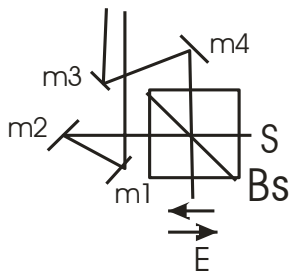


La configuration dans l'image ci-dessous à gauche nous montre un renversement avec un Bs, comme décrit dans la littérature. Nous n'avons pas réussi à susciter une large interférence à ce sujet. Les faisceaux lumineux tombent trop obliquement sur les B, ce qui rend l'IFW très difficile.

Nous avons donc contourné ce problème avec la configuration présentée dans l'image du milieu. Afin de rendre les différents chemins lumineux aussi similaires que possible, nous avons utilisé une carte (image de droite) dans laquelle les deux chemins lumineux ont pu être rendus presque aussi longs que possible, avec une différence de longueur inférieure à 1 mm. Les miroirs m1 à m4 ont ainsi pu - toujours par le biais du test de Foucault fixe - être placés très précisément au bon endroit.



La photo ci-dessous montre un détail de l'installation de gauche. Sur la photo du milieu, faites attention à m4. Nous voyons ici l'image miroir des lignes dessinées sur le carton. Si nous ajustons le miroir m4 de telle manière que nous voyons la ligne dessinée et son image miroir dans le prolongement l'une de l'autre, alors nous savons que l'ajustement est déjà assez précis. Ceci est vrai pour tous les miroirs.

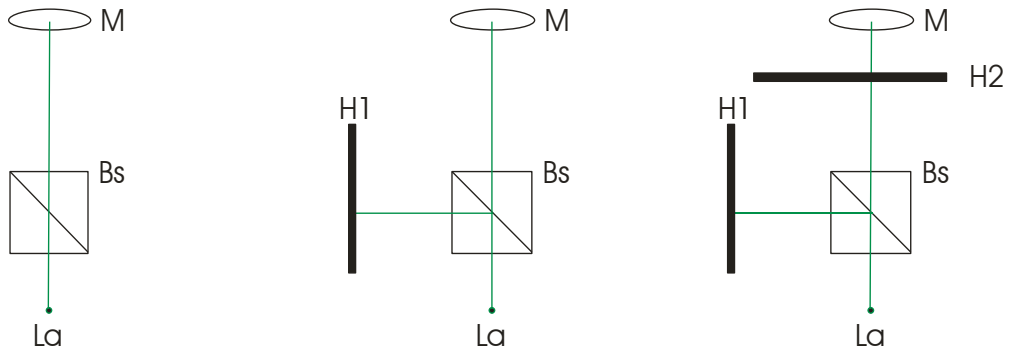


Étant donné que toutes les pièces doivent se trouver précisément dans le même plan, cette configuration est beaucoup plus difficile à construire. L'alignement avec un laser nécessite un algorithme bien pensé. Nous avons procédé comme suit.

1. Photo de gauche. Le laser est dirigé vers le miroir principal M. On ajuste M pour que la lumière soit réfléchi vers le laser. Le séparateur Bs est placé sur le trajet de la lumière de manière à ce que la lumière réfléchi par l'avant coïncide exactement avec le laser.

2. Image au milieu. H1, le premier miroir auxiliaire est placé. Il est disposé de manière à pouvoir se déplacer selon ses deux axes et à réfléchir exactement la lumière provenant de Bs vers Bs.

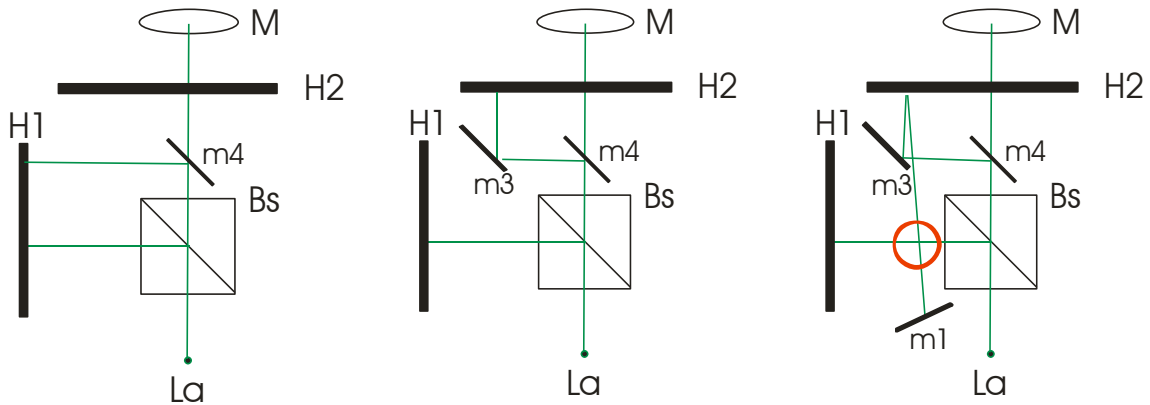
3. Image à droite. H2, le deuxième miroir de soutien est placé. Il peut se déplacer selon ses deux axes et il réfléchit la lumière venant de Bs exactement vers Bs. Ce miroir sera retiré une fois le réglage terminé.



1. Image à gauche. Le miroir m4 est placé de manière à ce que la lumière aille vers H1 et se réfléchisse vers m4.

2. Image au milieu. Le petit miroir m3 est placé de façon à ce que la lumière aille vers H2 et soit réfléchi vers H2.

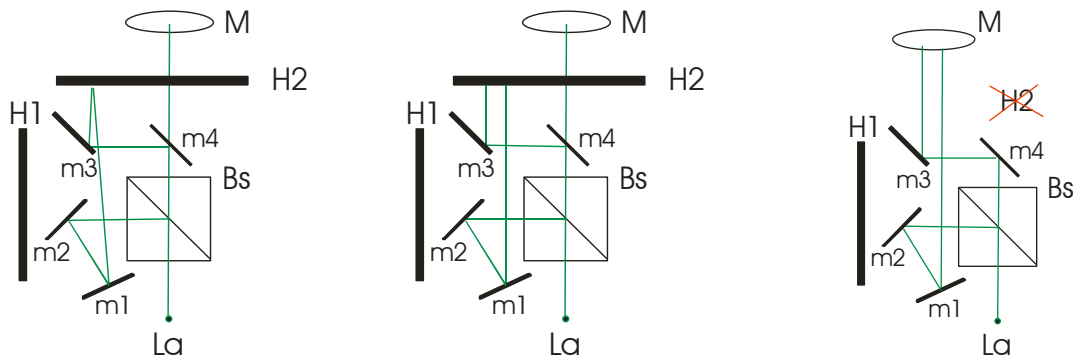
3. Image à droite. Le petit miroir m1 est placé. Nous faisons pivoter légèrement m3 pour que la lumière réfléchi tombe sur m1. Remarquez les deux lignes laser qui se croisent dans le cercle rouge. En vue de dessus, ils semblent se croiser. Pour en être sûr, nous apportons un morceau de verre ou de plastique transparent à cet endroit du chemin lumineux. Sur cette plaque transparente, nous voyons deux points, un pour chaque trajectoire du laser. L'idée est que ces deux points se croisent au point d'intersection, qu'ils coïncident. Si ce n'est pas le cas, alors m3, et seulement m3, doit être visé avec plus de précision. De cette façon, nous pouvons être sûrs que toute la lumière laser est toujours dans le même plan.



4. Image à gauche. Le miroir m2 est placé de telle sorte que la lumière de Bs frappe m1, juste là où la lumière laser de H2 frappe m1. Maintenant, le miroir m1 peut être réglé de telle sorte que la lumière provenant de H2 frappe m2 via m1, et que la lumière provenant de m2 frappe H2 via m1.

5. Image au milieu. Les miroirs m3 et m1 sont légèrement soulevés de sorte que le faisceau laser de m3 à H2, après réflexion, retombe sur m3, et le faisceau de m1, sur m1.

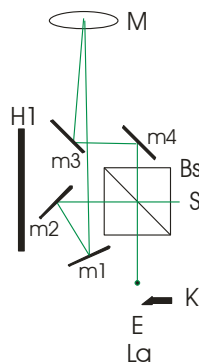
6. Image à droite. H2, le deuxième miroir de soutien est retiré. Le miroir principal M est décalé un peu vers la gauche, de sorte que les faisceaux laser de m3 et m1 frappent ce miroir à côté du centre.



7. Les miroirs m3 et m1 sont un peu soulevés pour que leur lumière tombe bien au milieu du miroir M. Ce miroir est réglé de façon à ce que la lumière aille de m3 à M, après réflexion sur m1, et la lumière de m1 à M, après réflexion sur m3.

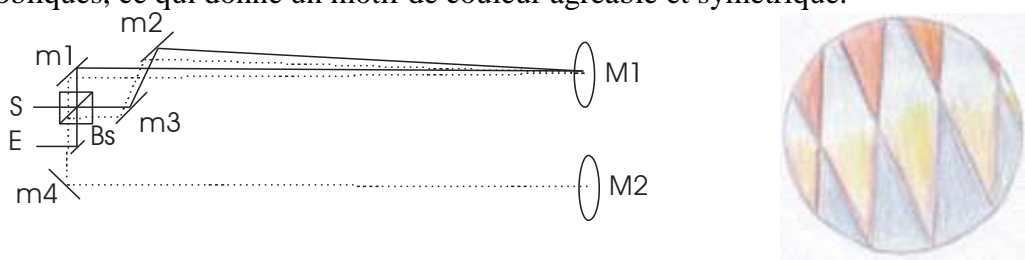
La source lumineuse ponctuelle S (la fibre de verre) est également placée de telle sorte que la lumière laser provenant de Bs frappe exactement le trou de 0,3 mm. S est bien sûr placé dans un support afin de pouvoir être déplacé avec précision le long de ses axes. A E, nous prévoyons également un espace pour "K", de "Knife", le couteau du test de Foucault, un test dont nous aurons besoin pour ajuster les faisceaux convergents de lumière blanche.

Et nous ne serons pas surpris si nous finissons par serrer une soixantaine de boulons.



4.3. Une configuration d'interférences multiples.

Si l'on soulève légèrement M1 et que l'on utilise un second miroir creux M2 de même taille, alors la lumière peut traverser deux fois le montage et on obtient une interférence de deux interférences. Nous voyons en E qu'ici les lignes d'interférence verticales se mélangent aux lignes obliques, ce qui donne un motif de couleur agréable et symétrique.



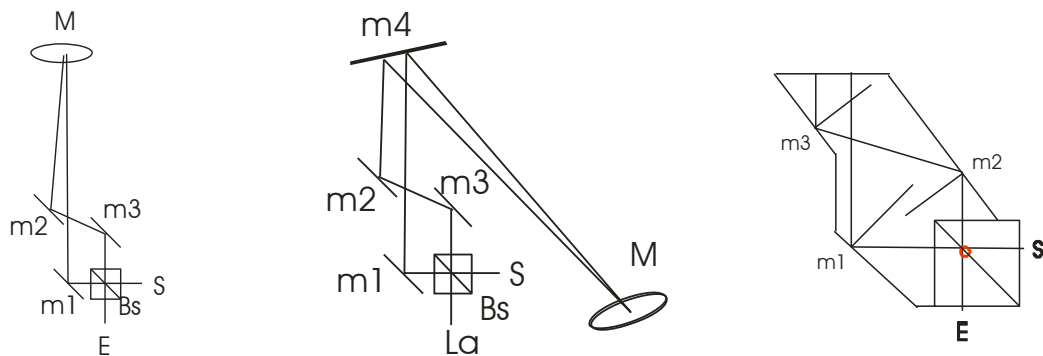
Nous omettons ici l'algorithme de réglage. Il s'agit d'une variante de la procédure de réglage détaillée précédente.

Pour que ces lignes d'interférence soient plus larges, tous les faisceaux lumineux doivent tomber perpendiculairement sur Bs. Cependant, comme le miroir principal M est légèrement incliné, cela est impossible : les chemins lumineux en pointillés tombent obliquement sur Bs. Sur le séparateur Bs, on voit en effet deux spots laser : un spot de lumière allant vers M1, et à gauche le spot de lumière un peu plus faible réfléchi par M1.

Cette configuration n'est donc pas adaptée à la génération de lignes d'interférence très larges ou d'un IFW.

4.4. Interférométrie de neutralisation

Nous disons que ce type d'interféromètre est une version "limite" d'un interféromètre radial, dans lequel la différence de trajectoire des deux faisceaux partiels vise à zéro. Nous y parvenons en ajoutant les miroirs m2 et m3 à la configuration de base.



Le dessin du milieu nous montre à nouveau comment M reste à portée de main de E.

Le dessin de droite montre un détail de l'installation. Là encore, nous avons fait un croquis très précis dans un programme de dessin, que nous avons ensuite réduit, imprimé, découpé et collé sur un morceau de carton. Ceci est nécessaire pour régler les miroirs à la distance et à la direction requises. Si le réglage est effectué très précisément, on obtient ainsi une interférence destructive et on voit la bande faiblement lumineuse qui entoure l'aiguille.

On voit donc que l'algorithme d'ajustement est - mutatis mutandis - analogue à la procédure d'ajustement décrite précédemment.

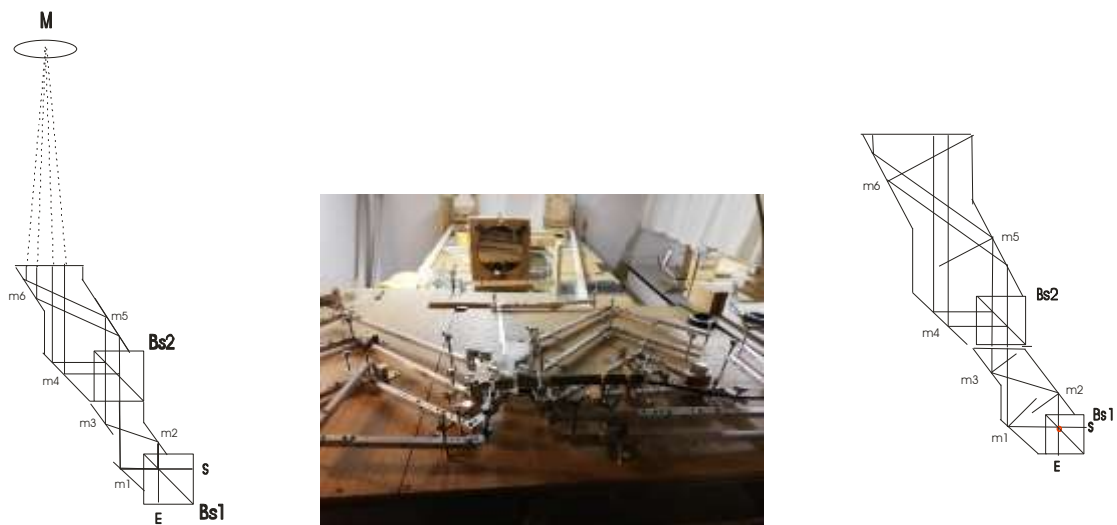
4.5. Interférence multiple avec 2 diviseurs de faisceau.

Comme indiqué dans le texte ci-dessus, cette dernière expérience peut être étendue en permettant à la lumière de traverser le montage une seconde fois. D'une part, il est possible d'éclairer le doigt une seconde fois en conservant une interférence, mais d'autre part, cela peut se faire en laissant la lumière subir une seconde interférence. Un croquis d'une telle installation est présenté ci-dessous. Enfin, une configuration combinant les deux précédentes est également envisageable.

Dans la pratique, cependant, elles sont loin d'être simples. Cependant, après les laborieux réglages et alignements, qui mettent notre patience à rude épreuve, cela en vaut la peine. Les images sont magnifiques, mais la configuration est si délicate. La moindre pression sur l'une des vis de réglage donne lieu à un panorama de couleurs kaléidoscopiques et changeantes, jusqu'à ce que l'on assiste, presque en retenant son souffle, à la stabilisation de l'image. Si l'on tient ensuite la main devant le miroir, on voit une IFW, et une turbulence colorée assez intense, ou, si l'on ajuste pour la ligne destructive, la bande lumineuse autour de la main.

L'installation, mentionnée ci-dessus comme une combinaison, nous ne l'avons pas construite. Comme indiqué précédemment, nous sommes vraiment à la limite de ce qu'un amateur peut réaliser.

Nous examinons ci-dessous le montage, certains travaux préparatoires et un détail du montage .



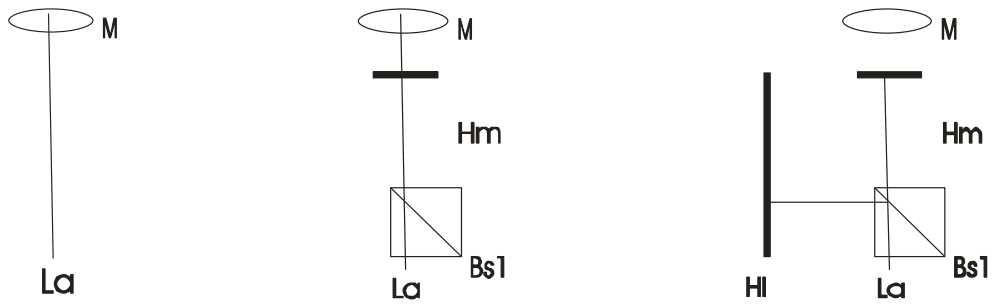
Comme nous travaillons avec deux séparateurs de faisceaux qui doivent se trouver dans le même plan, cette configuration exige encore plus de précision.

Nous avons donc ajusté cette configuration.

Dans le dessin ci-dessous à gauche, le laser est dirigé vers le miroir principal M. Les rayons réfléchis retombent dans le laser. Les rayons réfléchis retombent dans le laser.

Dans le dessin du milieu, Bs1 est ajouté, et le miroir plat M est ajouté de sorte que la lumière réfléchiée par M est maintenant gênée. Bs1 est maintenant réglé de manière à ce que la lumière réfléchiée par sa face avant retourne également vers La. Ensuite, Hm est ajustée de manière à ce que la lumière réfléchiée par celle-ci tombe également sur La. Hm est alors perpendiculaire au faisceau laser.

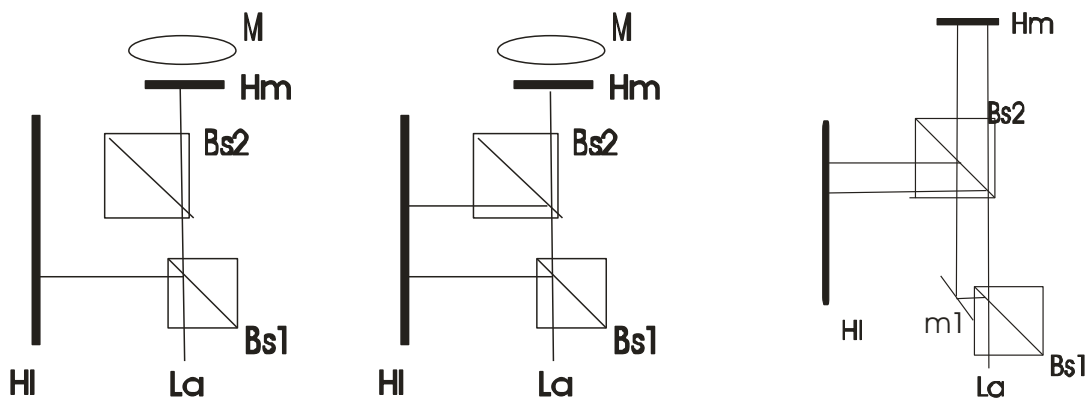
Au dessin de droite, on ajoute H1, le miroir auxiliaire, à gauche. Ce miroir est à 600 mm de Bs1. Ce miroir doit également réfléchir la lumière de Bs vers Bs.



En bas à gauche, Bs2 est ajouté et ajusté de manière à ce que la lumière réfléchi par l'avant de celui-ci retourne dans le laser.

Au milieu, Bs2 est ajusté de sorte que la lumière réfléchi par HI retombe sur Bs2, exactement à l'endroit où le faisceau laser a quitté Bs2 pour HI. Ce sont des ajustements qui prennent du temps et qui sont difficiles.

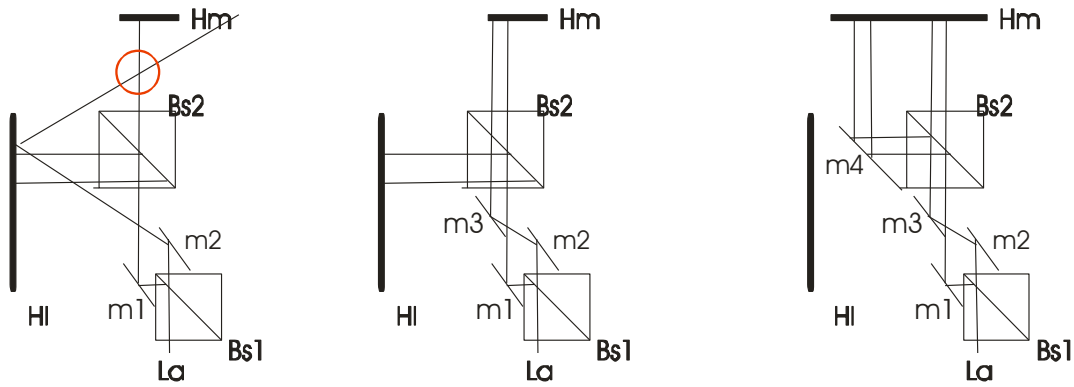
Dans le dessin de droite, m1 est ajouté et ajusté de façon à ce que la lumière allant vers Hm et HI retombe sur m1.



Dans le dessin ci-dessous à gauche, le miroir m2 est ajouté. Celui-ci n'est pas à 45° à cause de la direction égale de la lumière des deux faisceaux. Le miroir m2 est placé obliquement sur HI qui réfléchit la lumière obliquement. Maintenant nous gardons le morceau de plastique translucide (ou de verre) à la place du cercle rouge. Le faisceau lumineux allant de Bs1 à Hm doit croiser le chemin lumineux de m2 qui se réfléchit sur HI. Nous ajustons le m2 de manière à ce que cet objectif soit effectivement atteint.

Puis, au milieu, on ajoute m3 et on l'ajuste de façon à ce que la lumière se reflète de lui à Hm, puis à nouveau à m3.

A droite, m4 est ajouté, de sorte que les rayons vers Hm se réfléchissent à nouveau sur m4.

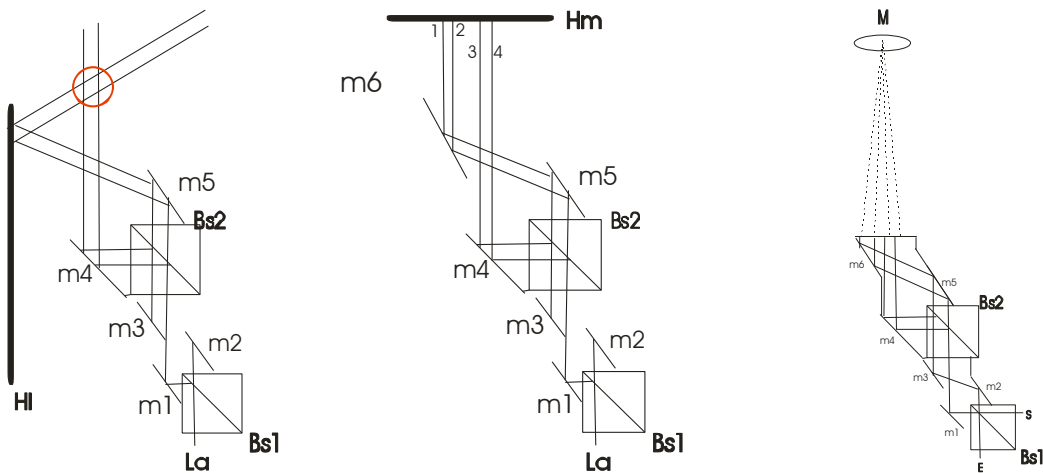


En bas à gauche, m5 est ajouté et ajusté de façon à ce que les faisceaux laser de m4 croisent la lumière réfléchi par m5- hl.

Au milieu, m6 est ajouté et ajusté de façon à ce que les rayons réfléchis par Hm tombent à nouveau sur m6. En raison de la divergence qui se manifeste en lumière blanche, m6 est déjà beaucoup plus long que m1 par exemple. Dans nos expériences, m6 avait déjà 80 mm de long.

Enfin, Hm est enlevé, M est placé de telle sorte que les faisceaux 1, 2, 3 et 4 tombent à égale distance du centre de M. Les miroirs m1 et m4 (et seulement ceux-ci) sont délicatement câblés de façon à ce que les faisceaux 1, 2, 3 et 4 tombent exactement au centre de M. Si toute la procédure est exacte, 1 se réfléchira en 4 et 2 en 3 et ces 4 faisceaux seront tous de la même longueur.

Enfin, ils nous montreront une interférence de deux interférences, rendant cet arrangement exceptionnellement sensible aux turbulences.



Avec tout ce schéma, nous nous sommes demandé si cette fine poussière pouvait être démontrée. Nos expériences nous ont confortés dans cette conviction, et cette question nous semble amplement résolue.

expériences optiques
de 2000 à... ?

Références supplémentaires

53. Einführung in die neueren Methoden der Lichtmikroskopie, G. Braun, Karlsruhe, 1967, p 118. et, plus généralement : J. James : Microscopic methods of observation. A. Oosthoek, Utrecht, 1969.