

5. Poussières fines dans un ensemble fermé avec un trajet lumineux irrégulier.

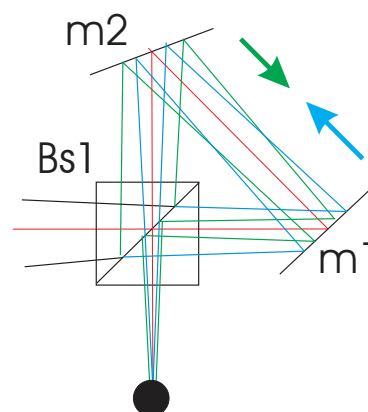
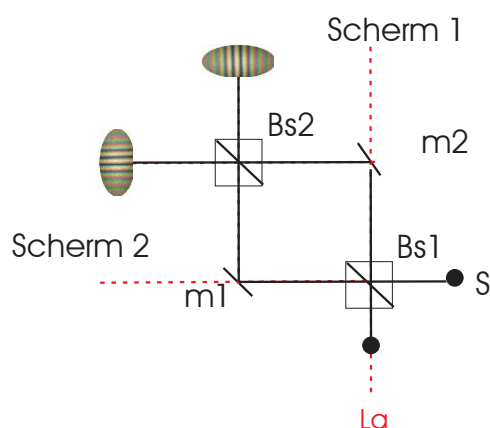
Contenu

5.1. Une configuration « ouverte » ou « fermée ».	1
5.2. L'arrangement de base	2
5.3. Mise en route	4
5.4. Comment l'interpréter ?	7
5.5. L'élaboration mathématique	9
5.6. L'élaboration algébrique	11

Dans ce qui suit, nous voulons construire une sorte d'interféromètre. Nous voulons vérifier si une image d'interférence apparaît et ce que nous verrons si nous plaçons la main sur le trajet de la lumière.

5.1. Une configuration « ouverte » ou « fermée ».

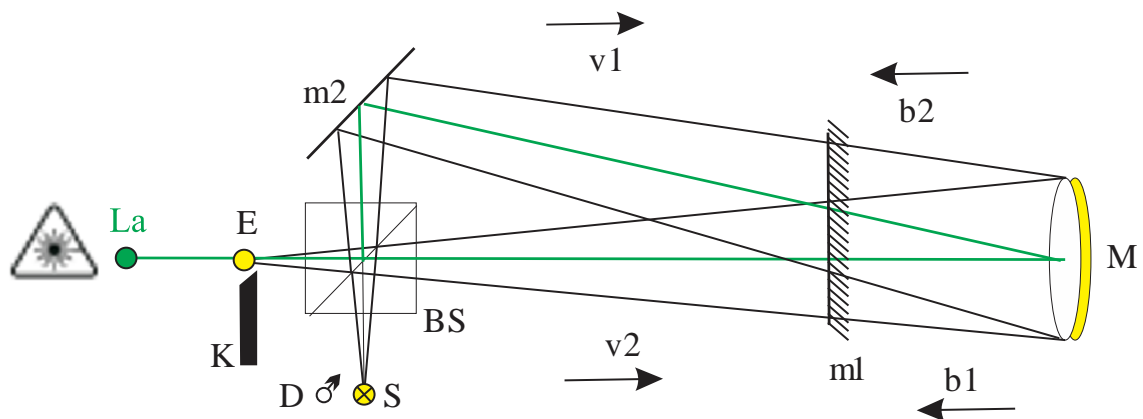
Dans ce qui précède, nous avons parlé d'une configuration « ouverte » et d'une configuration « fermée ». Le dessin de gauche montre une configuration ouverte. Les deux chemins lumineux - S, Bs1, m1, Bs2 et S, Bs1, m2, Bs2 - suivent chacun un chemin différent. Il n'est pas facile de faire en sorte que les deux chemins lumineux aient la même longueur à une fraction de millimètre près. Ce problème ne s'est pas présenté dans l'arrangement dont nous voyons un détail à droite. Que la lumière traverse le dispositif dans le sens des aiguilles d'une montre ou dans le sens inverse ne fait aucune différence. On parle donc d'un dispositif fermé.



Dans l'arrangement ci-dessous, nous voyons deux chemins lumineux distincts. Un premier faisceau traverse l'arrangement dans le sens des aiguilles d'une montre, tandis qu'un second le fait dans le sens inverse des aiguilles d'une montre.

5.2. L'arrangement de base

Le faisceau partiel dans le sens des aiguilles d'une montre diverge de S, du séparateur de faisceaux Bs et m2 vers le miroir M. Nous appelons ce chemin la distance cible v_1 . La lumière converge ensuite vers Bs et E. Nous appelons ce chemin la distance image b_1 .

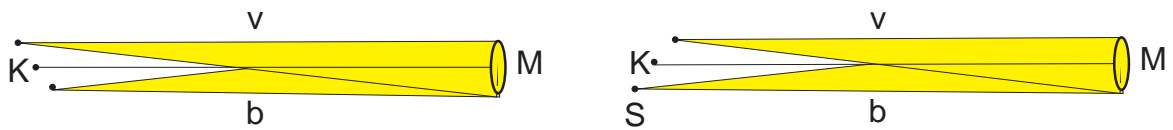


Le faisceau partiel dans le sens inverse des aiguilles d'une montre traverse l'installation en divergeant de S et Bs vers le miroir M. Cette trajectoire est la distance image v_2 . Ensuite, la lumière converge vers m2, Bs et E. Nous appelons ce trajet la distance image b_2 .

On reconnaît dans la forme de l'arrangement un triangle avec comme rectangle le côté Bs-m2, comme oblique le côté m2-M, et comme autre rectangle le côté M-Bs. Il ne s'agit donc pas d'un arrangement « ouvert ». Le trajet de la lumière dans le sens des aiguilles d'une montre est aussi long que dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. Cependant, il y a une particularité : le trajet de la lumière vers le miroir via m2 est plus long que le trajet de la lumière allant directement de Bs au miroir M. Il s'agit d'un arrangement « fermé » avec un trajet lumineux inégal entre les deux faisceaux partiels et le miroir M. Cette particularité a son importance. Nous y reviendrons plus tard lorsque nous discuterons de l'arrangement également « fermé » mais avec un trajet lumineux égal.

Dans cette configuration, il existe une sorte de proportionnalité inverse entre la distance pré-image et la distance image, exprimée par la formule du miroir $1/f = 1/v + 1/b$.

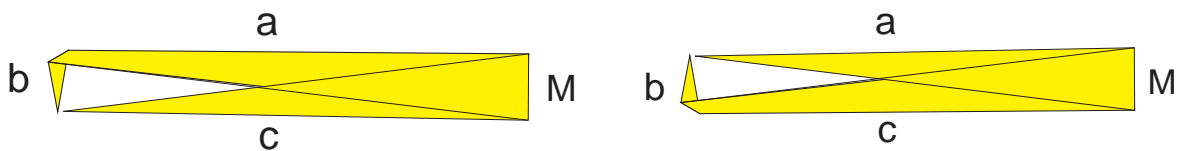
Si la distance de l'objet est longue, la distance de l'image est courte, et inversement, si la distance de l'objet est courte, la distance de l'image est longue.



D'une certaine manière, on peut dire que cette proportionnalité inverse joue aussi dans un triangle : dans le dessin de gauche ci-dessous, la somme des côtés $a + b$ est plus grande que le côté c , et dans le dessin de droite ci-dessous, la somme des côtés $b + c$ est plus grande que le côté a .

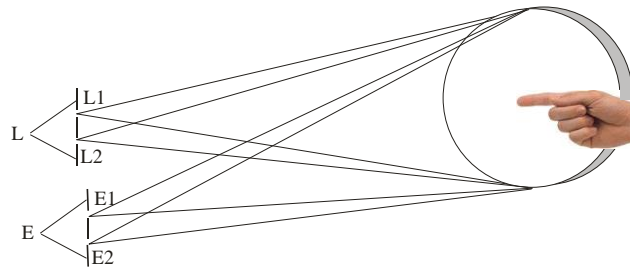


La même chose que ci-dessus s'applique aux deux dessins ci-dessous. Mais ici, on peut également voir l'analogie avec le dessin ci-dessus qui montre la distance entre l'objet et l'image, mais où la distance la plus longue a été « pliée » de manière à ce que nous reconnaissons le triangle dans chacune des deux figures. Mathématiquement, il s'agit de choisir la distance entre l'objet et l'image de manière à ce qu'ils s'intègrent parfaitement dans le triangle et que leurs points de convergence se rejoignent parfaitement en un sommet. L'opération algébrique nécessaire à cette fin, que nous reproduisons à la fin de ce texte, montre que ce n'est pas si simple.



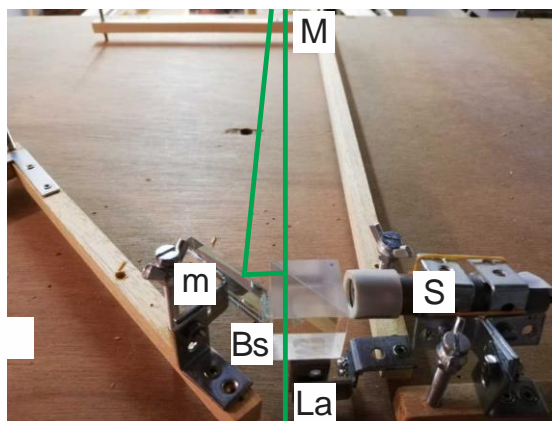
Nous pouvons également imaginer la configuration de base comme une source lumineuse qui est dédoublée en deux faisceaux partiels, un peu comme dans l'expérience des deux séparateurs de Young. Après réflexion sur le miroir, les faisceaux partiels s'unissent à nouveau, mais cette fois par l'intermédiaire d'un séparateur de faisceaux. De plus, dans notre

configuration, la source lumineuse L et l'emplacement de l'observateur E coïncident, pour ainsi dire.



5.3. Mise en route

Nous construisons l'installation sur le banc optique et plaçons le miroir plan m_2 à une petite distance du séparateur de faisceaux Bs. Deux faisceaux cohérents, c'est-à-dire provenant de la même source lumineuse, parcourent un chemin distinct et se rejoignent ensuite en E.

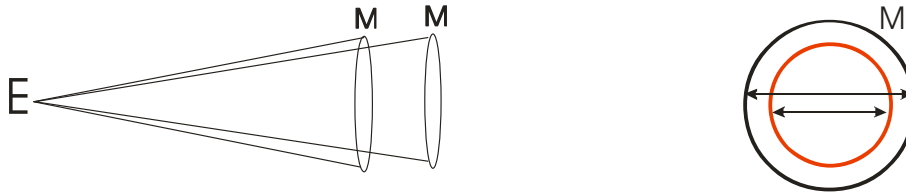


Le miroir plan M1 arrive à mi-chemin du trajet de la lumière, nous rappelant qu'en réalité le miroir M1 se trouve juste en dessous de l'observateur en E, de sorte que la propre main de l'observateur peut être vue. Le dessin n'est donc pas du tout à l'échelle. En réalité, le diamètre de M1 est ici égal à 100 mm, de sorte qu'il peut encore contenir tous les faisceaux partiels à cet endroit. Le miroir M est à environ 2500 mm de E, le miroir oblique m_2 est à quelques mm de Bs. Il y a donc une parallaxe, mais elle est trop faible pour affecter visiblement l'image.

Nous constatons que dans notre montage, le trajet lumineux v_1 est plus long que le trajet lumineux v_2 , et le trajet lumineux b_1 est plus court que le trajet lumineux b_2 . C'est pourquoi nous appelons cette disposition, qui forme une sorte de triangle, « la disposition de base avec trajet optique inégal ».

La lumière de M qui nous parvient par b_2 a donc parcouru un chemin plus long que la lumière de M qui nous parvient par b_1 . Ainsi, du point de vue de l'œil en E, le miroir M est plus

éloigné dans le premier cas que dans le second. Ceci illustre de manière exagérée notre dessin ci-dessous à gauche. L'œil voit donc deux surfaces circulaires dont les dimensions diffèrent légèrement.

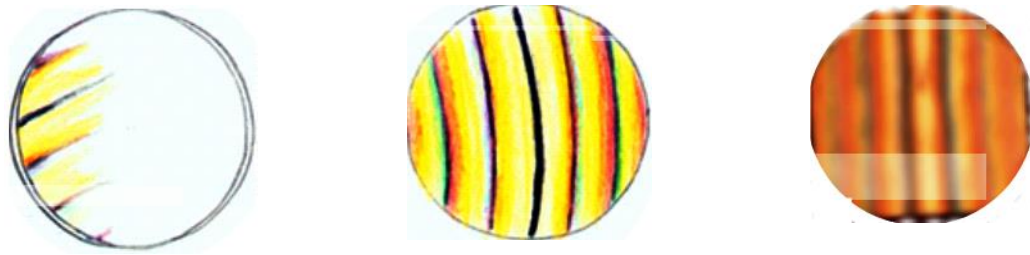


Si la distance entre B_s et m_2 est, disons, de 10 mm, alors b_1 est d'environ 2495 mm et b_2 d'environ 2505 mm. Si nous faisons le calcul, l'une des images du miroir de E s'avère être d'une taille différente d'environ 0,6 mm par rapport à l'autre image du même miroir. Cela nous montre, de manière très exagérée, le dessin de droite.

Une construction efficace de ce montage montrera que cette différence est trop petite pour être encore perçue par l'œil à une distance de 2500 mm, mais suffisamment grande pour provoquer une image d'interférence. C'est précisément la raison pour laquelle il s'agit d'un interféromètre radial : les deux images ont un diamètre différent.

Comme il s'agit d'une interférence de lumière blanche, on peut s'attendre à des couleurs. Rappelons que notre « source de lumière ponctuelle » est équipée d'un variateur réglable D. Nous travaillons avec une intensité lumineuse maximale. Nous alignons précisément l'installation avec le laser. Nous avons constaté qu'il n'est pas facile d'obtenir des images d'interférence ; en effet, ces configurations exigent une précision presque draconienne. Les ondes lumineuses sont extrêmement petites, deux mille ondes dans un seul mm. C'est avec des attentes tempérées, mais pleines d'espoir, que nous avons regardé notre miroir pour la première fois. Ce que nous avons vu ensuite a dépassé nos espérances les plus folles.

Dans le premier dessin, représentations fidèles de ce qui apparaît, on voit que le réglage n'est pas encore à son maximum. Les images du chemin lumineux ne coïncident pas encore parfaitement. Si l'on affine avec les vis de réglage, les lignes s'élargissent de plus en plus comme le montre le dessin du centre. L'image de droite est une photo prise avec un téléphone portable.



Ces lignes s'élargissent à mesure que le petit miroir m_2 se rapproche de B_s . Nous veillons à ce que m_2 ne touche pas le séparateur B_s . Nous veillons à ce que m_2 ne touche pas le séparateur B_s , afin d'éviter de le rayer. Nous procédons à nouveau à un réglage minutieux et observons ce qui apparaît à gauche de l'image. On dirait qu'une seule ligne s'est ouverte beaucoup plus largement. Si nous procédons à un réglage plus précis à l'aide des nombreuses vis de réglage, nous ne voyons plus de lignes sur la photo de droite, mais un cercle central noir entouré d'un cercle jaune. Il faut un peu de temps pour s'habituer et se demander ce que l'on voit exactement et comment l'interpréter.



Par ailleurs, les nombreuses vis de réglage, M6, sont effilées et dotées d'une bille en bas pour minimiser les frottements.



5.4. Comment l'interpréter ?

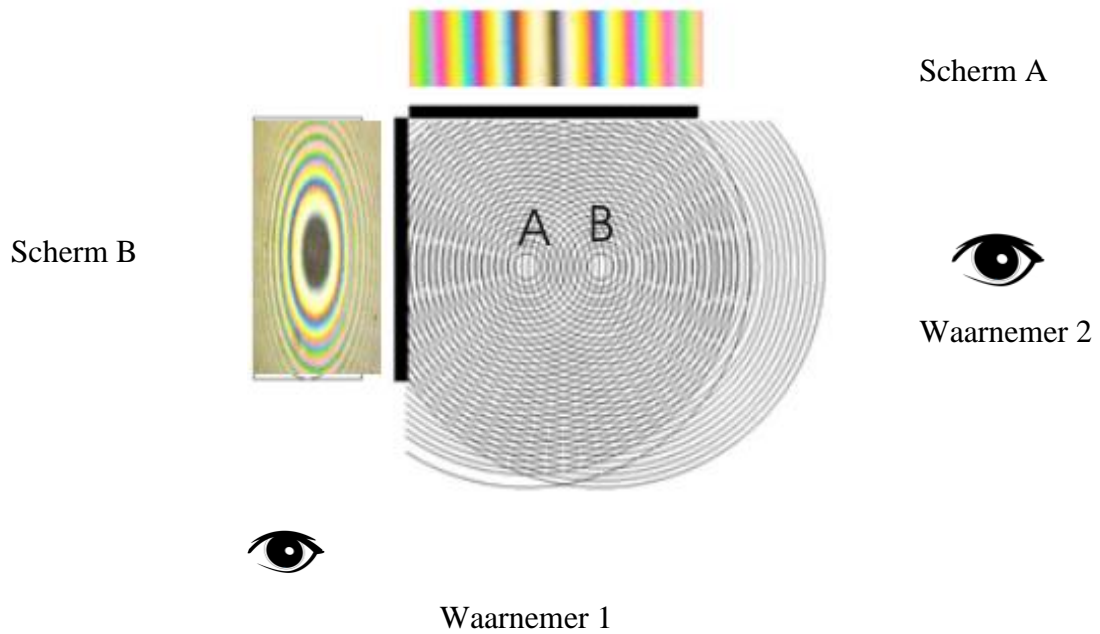
Toute personne familiarisée avec l'optique pensera presque immédiatement au test des deux fentes de Young en regardant la première image. La seconde image, un dessin, semble être liée aux anneaux bien connus de Newton. Nous avons déjà expliqué ces deux phénomènes dans le texte au point 5.7.

Dans le dessin ci-dessous, nous voulons expliquer le lien entre l'expérience des deux fentes de Young et les anneaux de Newton.

En regardant le dessin ci-dessous, nous voyons que les deux côtés représentent pratiquement le même phénomène d'interférence. Deux points lumineux, proches l'un de l'autre, génèrent des sphères en expansion continue. Représentées dans un plan plat, elles sont évidemment représentées ici sous forme de cercles.

Du point de vue de l'observateur 1, les points A et B se trouvent l'un à côté de l'autre et génèrent sur l'écran A une série de lignes parallèles. Du point de vue de l'observateur 2, les points A et B sont dos à dos et génèrent sur l'écran B une série de cercles, appelés anneaux de Newton. Newton les a découverts mais n'a pas pu les expliquer parce qu'il considérait la lumière non pas comme des ondes mais comme de petites particules.

Si nous plaçons les deux points A et B non pas l'un à côté de l'autre ou en dessous, mais un peu plus en diagonale, alors sur un écran, situé entre les écrans A et B, il n'y aurait pas de lignes droites ou de cercles, mais des courbes, et ce précisément comme une transition entre les cercles et les lignes droites. L'Anglais Young et le Français Fresnel n'étaient pas d'accord en leur temps pour dire si ce phénomène d'interférence était des droites ou des courbes. Ils n'avaient apparemment pas le même point de vue.



Nous refaisons le test de Foucault avec le couteau pour amener la source lumineuse S au point de courbure le plus précisément possible. Nous retirons ensuite le couteau et observons avec une intensité lumineuse suffisante. Nous constatons que notre miroir est éclairé sur toute sa surface avec seulement quelques couleurs d'interférence. Cela nous donne l'image de gauche ci-dessous. Un réglage plus précis permet d'obtenir des images où la surface du miroir n'est remplie que d'une seule couleur.



Lorsque nous plaçons la main sur le trajet de la lumière, nous voyons un certain nombre de brins colorés s'élever à partir d'elle. La main est plus chaude que l'air ambiant et réchauffe les couches d'air voisines. Cela modifie l'indice de réfraction de l'air à cet endroit, ce qui donne naissance à ces mèches. Ce phénomène est également visible dans l'image ci-dessous à gauche.

Si nous assombrissons la constellation au maximum, nous ne voyons plus les traînées, mais la faible bande brumeuse et lumineuse autour de la main réapparaît, comme nous l'avons déjà observé dans la « version plus sombre » du test de Foucault. C'est ce que l'on peut voir dans l'image ci-dessous à droite.



5.5. L'élaboration mathématique

Dans ce qui suit, nous faisons le tour des mathématiques. Cela ne fonctionne pas sans calculs. Les mathématiques nous donnent une prise sur l'installation et nous pouvons vérifier à l'avance, voire calculer, l'apparition maximale ou minimale d'un phénomène. Nous avons pour ainsi dire la main et le pouvoir sur notre installation. Celui qui sait ce qu'il cherche sait aussi ce qu'il va trouver. Sinon, on travaille dans le vide, on cherche parfois en vain et on ne comprend pas toujours ce que l'on trouve. Restons-en à la citation de Kurt Lewin de 1947 : « Rien n'est plus pratique qu'une bonne théorie ». Clarifiez à l'aide de quelques données le dessin ci-dessous.

S = Source, source lumineuse ponctuelle, lumière blanche.

M = Miroir, (majuscule) miroir concave, 155 mm de diamètre, $f = +/- 1250$ mm

m = miroir, (lettre minuscule) petit miroir plat, avec couche réfléchissante sur le dessus

Bs = cube de paillettes pour la lumière visuelle, 50/50, 20 mm³.

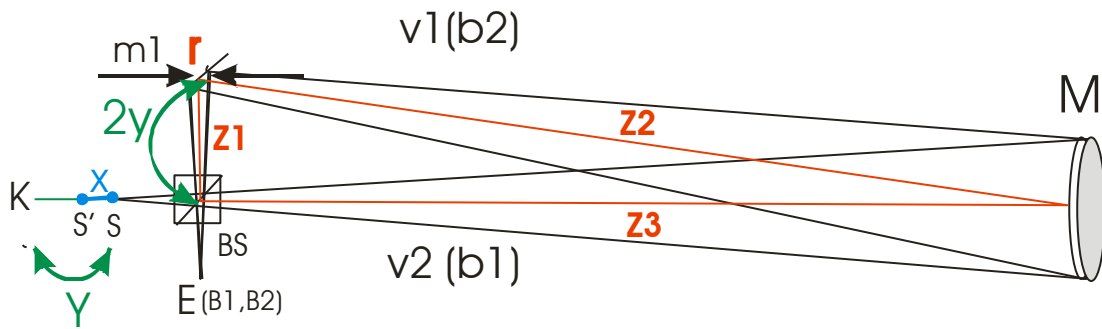
E = œil, place de l'observateur

v = (minuscule) distance de l'objet

b = (minuscule) distance de l'image

B = (lettre majuscule) point de l'image

K (lettre majuscule) = point central de la courbure



Remarquez le triangle rouge formé par le centre de Bs, m1, M et à nouveau par le centre de BS. Il s'agit d'un triangle rectangle, dont l'angle droit est situé dans BS. Z1 et Z3 sont les côtés rectangulaires, Z2 est l'hypoténuse et est évidemment plus longue que Z3.

La distance $2y$, indiquée par l'arc vert à gauche, est la somme du côté $z1$, plus la différence entre $z2$ et $z3$. Plus courte ; $2y = z1 - (z2 - z3)$.

La distance entre le centre de courbure K et S (l'arc vert en bas) est égale à une fois y .

Enfin, x (en bleu), la distance de S' à S, est donnée par la formule :

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

Avec toutes ces données, nous essayons de définir les distances des objets. Nous obtenons :

$$v1 = 2*f - y + 2y + x \text{ ou } v1 = 2*f + y + x$$

$$v2 = 2*f - y + x$$

par la formule du miroir $1/f = 1/v + 1/b$ on trouve :

$$b1 = v1*f / (v1 - f) \quad b2 = v2*f / (v2 - f)$$

Illustrons que nous avons les valeurs suivantes :

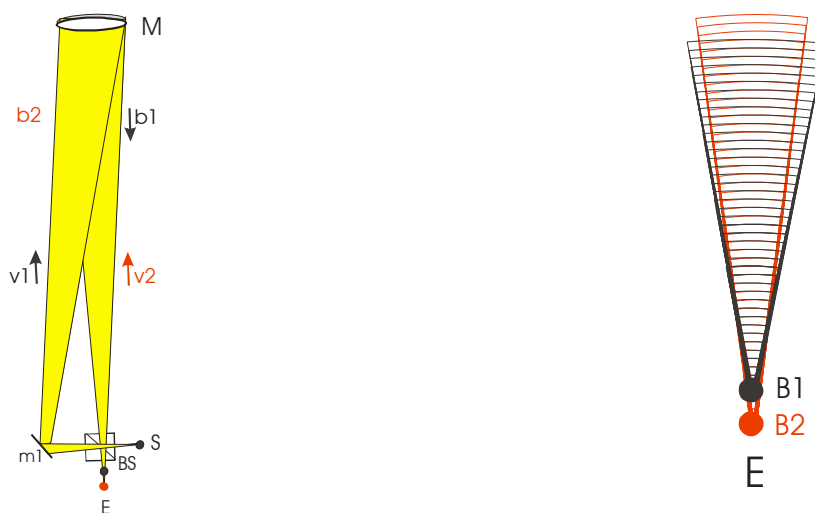
$$f = 1250, y = 5, x = \sqrt{5^2 + 1250^2} - 1250 \text{ ou } 0,01. \text{ On obtient :}$$

$$v1 = 2500 + 5 + 0,01 \text{ ou } 2505,01, b1 = 2505,01 * 1250 / (2505,01 - 1250) \text{ ou } 2495,01$$

$$v2 = 2500 - 5 + 0,01 \text{ ou } 2495,01, b2 = 2495,01 * 1250 / (2495,01 - 1250) \text{ ou } 2505,01$$

Nous voyons qu'avec ces valeurs, $v1 = b2$, et aussi que $v2 = b1$. L'importance de ce point devient immédiatement évidente lorsque nous réalisons que $v2 - b1 = 0$, mais aussi $v1 - b2 = 0$. Cela signifie que théoriquement, pour l'observateur en E, les points images B1 et B2 coïncident exactement. C'est la situation telle qu'elle a été expliquée dans le dessin 10c.

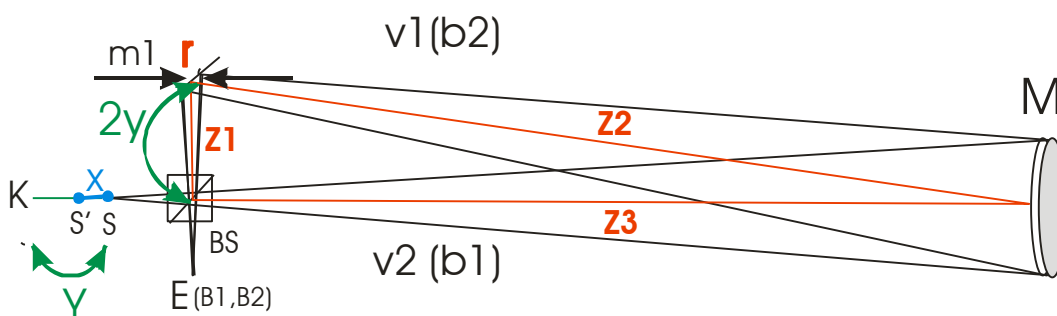
Si l'on refait le calcul pour une autre valeur, par exemple $y = 10$, et que l'on s'en tient à la formule $x = \sqrt{y^2 + f^2} - f$, on trouve toujours que B1 et B2 coïncident. En d'autres termes, notre dispositif nous permet théoriquement de faire coïncider exactement deux points lumineux cohérents.



Le dessin ci-dessus à gauche illustre le trajet de la lumière dans le montage de base (un montage fermé avec un trajet de la lumière irrégulier). Le dessin de droite montre un détail du trajet de la lumière près de E. Les faisceaux partiels convergents b1 et B1 ne coïncident pas encore. Si nous regardons dans le miroir, nous verrons des lignes ou des cercles. S'ils coïncident, les lignes ou les cercles sont si larges qu'ils sortent de la surface du miroir.

5.6. L'élaboration algébrique

Après la pratique mathématique, voici la théorie mathématique. Nous voulons terminer ce cinquième chapitre par l'explication théorique qui permet de trouver la formule : $x = \sqrt{y^2 + f^2} - f$. Reprenons le dessin précédent.



Pensez à la source lumineuse ponctuelle en S' et essayez de définir algébriquement les deux distances entre les objets. En regardant l'image ci-dessus.

Nous obtenons :

v1, la distance de projection dans le sens des aiguilles d'une montre, est égale à la distance de S' à S, puis au séparateur de faisceaux B, puis au petit miroir m1 et enfin au miroir concave M, soit :

$$v1 = 2*f - (m - r) + 2*m = 2*f + m + r. \quad (1)$$

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

$$v2 = 2*f - (m - r) = 2*f - m + r \quad (2)$$

Par la formule du miroir $1/f = 1/b+1/v$, on trouve : $b = (v*f) / (v-f)$, 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

$$b1 = (2*f-m+r)*f / (2*f-m-r-f) \quad (3)$$

Pour b2, la deuxième distance-image, appartenant à v2, et passant de M via m1 et B en direction de E, on trouve :

$$b2 = (2*f+m+r)*f / (2*f+m+r-f) \quad (4)$$

Ensuite, en voyant sur l'image où se trouve b1, on constate que le chemin disponible pour b1 est égal à v2. Donc le point B1 de l'image (la lettre majuscule pour le distinguer de la lettre minuscule b1, la distance de l'image) sera à b1-v2 de E, soit :

$$B1 = b1 - v2$$

En voyant de façon tout à fait analogue où se trouve b2, on constate que le chemin disponible est égal à v1. Le point B2 se trouvera donc à b2-v1 de E, soit : $B2 = b2 - v1$

$$B2 = b2 - v1$$

On trouve la distance mutuelle D entre les deux points de l'image B1 et B2 en faisant la différence entre ces deux dernières valeurs. Nous obtenons :

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

A partir de (1) et (2) nous trouvons :

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

Nous pouvons donc réécrire (5) comme suit :

$$D = (b_2 - b_1) + 2 * m \quad (7)$$

Remplaçons maintenant b_2 et b_1 par les valeurs obtenues en (3) et (4) dans (7) :

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

Nous allons à présent développer cette équation.

$$= (((2f^2 - fm + fr) * (f + m + r) - (2f^2 + fm + fr) * (f - m + r)) / ((f - m + r) * (f + m + r))) + 2m$$

$$= (2f^3 + 2f^2m + 2f^2r - f^2m - fm^2 - fmr + f^2r + fmr + fr^2) / ((f + m + r) * (f - m + r)) -$$

$$(2f^3 - 2f^2m + 2f^2r + f^2m - fm^2 + fmr - f^2r - fmr + fr^2) / ((f + m + r) * (f - m - r)) - 2m$$

$$= (2f^2m / ((f + m + r) * (f - m - r))) - 2m$$

$$= (2f^2m / (f^2 - fm + fr + fm - m^2 + mr + fr - mr + r^2)) - 2m$$

$$= (2f^2m / (f^2 + 2fr + r^2 - m^2)) - 2m \text{ ou :}$$

$$D = (2f^2m / ((f+r)^2 - m^2)) - 2m \quad (8)$$

Avec cette dernière expression, nous disposons maintenant d'une formule qui nous indique à quelle distance se trouvent les deux points d'image B1 et B2 dans notre configuration, et ce en fonction de la distance focale f de notre miroir M, de la valeur de m et du décalage radial r de notre source lumineuse ponctuelle.

Dans cette expression, laissez r aspirer à 0, et en travaillant plus loin, nous obtenons : $D = (2f^2m / (f^2 - m^2)) - 2m$

$$D = (2f^2m - 2m(f^2 - m^2)) / (f^2 - m^2)$$

$$D = (2f^2m - 2mf^2 + 2m^3) / (f^2 - m^2)$$

$$D = 2m^3 / (f^2 - m^2)$$

On constate donc que la valeur de D diminue lorsque la valeur de m diminue et/ou la valeur de f augmente. Si, à $r = 0$, on veut rapprocher les points images B1 et B2, il faut donc égaliser au maximum les distances objets v_1 et v_2 et/ou utiliser des miroirs de grande focale.

La question évidente qui se pose maintenant est de savoir quand les deux points images coïncident réellement, ou quand la valeur de D devient égale à 0. Nous allons calculer cela en fonction de la distance r , car cette valeur peut être modifiée le plus facilement dans un arrangement en déplaçant la source lumineuse vers l'avant ou vers l'arrière. En partant de l'équation donnée en (8), nous trouvons :

$$D = (2f^2m / ((f+r)^2 - m^2)) - 2m, \text{ ou : } (2f^2m / ((f+r)^2 - m^2)) - 2m = 0$$

et de développer davantage :

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

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

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

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

$$\mathbf{r = (\text{sqr}(m^2 + f^2)) - f} \quad \mathbf{(9)}$$

Cette dernière formule permet d'obtenir la valeur zéro de D en fonction de r. Ainsi, si r remplit la condition décrite ci-dessus, les deux points images B1 et B2 doivent pratiquement coïncider.