UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DES SCIENCES

DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA MATIERE

Mémoire

Présenté pour obtenir le diplôme de :
Master En Physique

Spécialité : Physique des Matériaux

Par :

Boubakeur Nadia

Thème :

Etude d'association des lentilles par la méthode d'optique matricielle

Soutenue publiquement le : 25 /06 /2024, Devant le jury composé de :

Houatis djamel	Grade : MCA	UYFM	Président
Benrekia Ahmed Redha	Grade : MCB	UYFM	Examinateur
Sebbar jamel	Grade : MCA	Etablissement	Encadreur

Année universitaire : 2023/2024

Résumé

Etude d'association des lentilles par la méthode d'optique matricielle nous avons formulons une relation générale de conjugaison pour un système de lumière et calculons les changements de positionne formation d'image d'un objet dans un système de lumière constitué de lentilles différentes séparées par une certaine distance.

Mots clés

Lentilles. Matrice de transfert (ABCD). Distance focal. Grandissement, optique géométrique.

ملخص

دراسة ارتباط العدسات بطريقة الموصوفة البصرية .نقوم بصياغة علاقة اقتران عامة لنظام ضوئ و حساب التغيرات في تكوين صورة الموضع لجسم ما في نظام ضوئ و حساب التغيرات في تكوين صورة الموضع لجسم ما في نظام ضوئ يتكون من عدسات منفصلة مختلفة بمسافة معينة

الكلمات الدالة

(ABCD)نقل مصفوفة العدسات. البعد البؤري .التكبير موضع الصورة و الجسم و البصريات الهندسية

Summary

Studying the correlation of lenses using the optical method .we formulate a general coupling relationship for a light system and calculate the changes in the formation of the position image of an object in an optical system .we calculate the cganges in the formation of the position image of an object in a light system consisting of separate lenses different by a certain distance

Keywords

Transfer matrix lenses (ABCD).Focal length .Enlargement .The position of the image and object .geometric optics.

Sommaire :

Introduction Générale 1

Chapitre 1: Généralité sur l'optique géométrique

Chapitre 1: Généralité sur l'optique géométrique. 2
Introduction. 2
1.1 Caractéristiques et définitions des Milieux optique. 2
1.1.1 Milieu transparent 2
1.1.2 Milieu Homogène. 2
1.1.3 Milieu isotrope 2
1.1.4 Indice de réfraction. ..... **Error! Bookmark not defined.**
1.2 Les lois de Snell Descartes 3
1.2.1 Loi de Réflexion. 3
1.2.2 Loi de Réfraction. 3
1.3 Stigmatisme 5
1.3.1 Stigmatisme rigoureux 5
1.3.2 Conditions du Stigmatisme rigoureux 5
1.3.3 Stigmatisme approché 5
1.4 Aplanétisme 6
1.4.1 Conditions d'aplanétisme 6
1.4.2 Approximation de Gauss. 6
1.5 Les lentilles optiques. 7
1.5.1. Types de lentilles 7
1.5.1.1 Les lentilles divergentes 7
1.5.1.2 Les lentilles convergentes. 7
1.5.2.1 Foyer image 7
1.5.2.2 Foyer objet 8
1.6 Caractéristique d'une lentille 8
1.6.1 L'axe optique 8
1.6.2Centre optique 8
1.6.3 Epaisseur 8
1.6.4 Les rayons de courbure 8
1.6.5 Construction géométrique pour des lentilles convergentes 9

1.6.6 Construction géométrique pour des lentilles divergentes.....10
1.6.7 Distance focale.....10
1.6.8 La vergence.....11
1.6.9 Le grandissement.....11
1.6.10 Relation de conjugaison.....11
1.7 Les Miroir.....11
1.7.1 Miroir plan.....11
1.7.2 Miroir sphérique.....12
1.7. 3 Types de miroir sphérique.....12
1.7.4 Caractéristique géométrique.....13
1.7.4.1 Centre du miroir.....13
1.7.4.2 L'axe optique.....13
1.7.4.3 Sommet de miroir.....13
1.7.4.4 Rayon de miroir.....13
1.7.4.5 De courbure et le sommet.....13
1.7.5 Point focal image.....13
1.7.6 Point focal objet.....13
1.7.7 Constructions géométrique du miroir sphérique.....14
1.7.7.1 Miroirs concave.....14
1.7.7.2 Miroirs convexes.....15
1.7.8 Distance focal du miroir.....15
1.7.9 La vergence.....16
1.7.10 Grandissement latéral (Ou transversal ou linéaire)......16
1.7.11 Relation de conjugaison.....16
1.8 Les Dioptres.....17
1.8.1 Dioptres plan.....17
1.8.1.1 Image d'un à travers un dioptre plan.....17
1.8.2 Dioptre sphérique.....19
1.8.3 Types de Dioptre.....19
1.8.4 Remarque.....20

Chapitre 02 : Optique matricielle

1.1 Introduction.....21
2.2 Matrice de transfert.....21

2.3 L'objectif de la matrice ..... **Error! Bookmark not defined.**
2.4 Propagation d'un rayon lumineux les matrices ABCD 21
2.4.1 Système optique élémentaires 22
2.4.1.1 propagations sur une distance (d). 22
2.4.1.2 lentilles minces de focale f. 23
2.4.1.3 combinaisons A+B 24
2.5 Système Optique périodique 25
2.6 Matrices de rayons comme dérivées 25
2.7 Eléments de l'optique matricielle 25
2.7.1 coordonnées d'un rayon dans un espace d'indice n. 26
2.8 pricipales matrices de transfert 26
2.8.1 Matrice de translation ..... **Error! Bookmark not defined.**
2.8.2 Matrice de réfraction. 27
2.8.2.1 cas du dioptre plan. 27
2.8.2.2 cas du dioptre. ..... **Error! Bookmark not defined.**

Chapitre 03 Résultats et discussion

Introduction. 29
3-1 Détermination la position de l'image par La loi ABCD. 29
3.1.1 Système formé par cas lentilles. 29
3.1.2 Système formé par deux cas lentilles 30
3.1.3 Cas d'un système optique constitué par trois lentilles non accolées 32
3.1.4 Système formé par quatre lentilles 33
Conclusion générale 42

Introduction Générale

Ibn sahl est le premier savant de la période médiévale à introduire une rupture à la fois dans les approches et dans les concepts dans le domaine de l'optique .Avec lui , nous sommes à la veille d'une des premières révolutions en optique ,sinon en physique .En effet une génération à peine après ,Ibna Hayham (Albazen) engage ses travaux pour réformer le domaine de l'optique . R Rashed. L'acte fondateur de cette réforme consistait à faire clairement la différence, pour la premières fois dans l'histiore de l'optique, entre les conditions de la propagation de la lumiére et les conditions de la vision des objets [1]. .L'étude de la lumière a commencé avec les Grecs de l'école d'Alexandrie en Egypte ce n'est qu'au 17^{e} siècle que l'optique est de venue une science [2].le mont « optique » vient du grec « optikos »et qui signifie « relatif à la vue».aussi, l'otique désigne la branche de la physique qui étudie les phénomènes de la vision[3]. Depuis l'antiquité, la lumière a toujours fasciné l'esprit humain par ses aspects multiples et son caractère mystérieux .Au cours de ces siècles, les deux directions de l'onde et de la particule se sont heurtées .Au XVLLE siècle apparaissent Descartes et newton, découvrant la nature particulaire de la lumière. Du XVLLE au XIXE siècle, Grimaldi et Huygens expliquent le phénomène de diffraction. Au XXE siècle, Dirac et Broglie découvrent la dualité onde et particule. L'optique géométrique : On appelle optique géométrique la partie de la physique ou l'on considère que la lumière se propage en ligne droite dans les milieux homogènes [4].Enfin, l'optique est une science dont les bases ont été posées avant le XXe siècle [5].lorsqu'elle a été présentée par le savant Ibn al –Chatham, dont le nom complet est Abu Ali al –Hasan ibn al Chatham, et c'est un groupe des phénomènes que l'œil perçoit grâce à la lumière [6].

Optique matricielle c'est ce qu'on appelle un tableau de nombres carrés ou rectangulaires contenant des lignes« q »ou des colonnes « n »comme matrice. Utilisé pour calculer le trajet des rayons lumineux à l'aide l'optique.
Ce thème de fin d'études sera divisé en trio chapitres qui sont :

Chapitre I : IL s'agissait principalement d'une introduction à l'optique géométrique et également d'une présentation des propriétés de ses matériaux, notamment des lentilles et des miroirs.

Chapitre II : Nous parlerons de l'optique matricielle et fournirons des équations mathématiques.
Chapitre III : Nous avons confirmé la formule générale de la relation de conjugaison pour un système de lumière, car elle consiste en un groupe de lentilles séparées les unes des autres en termes d'éléments A, B, C et D du système de lumière. Enfin, nous avons étudié un réseau lumineux composé de deux lentilles optique et la focale distance de l'une des deux lentilles.

Chapitre 1: Généralité sur l'optique géométrique.

Introduction.

Ce premier chapitre débute donc avec l'optique géométrique ou autrement appelée l'optique. Une partie de la physique qui considère la lumière se propageant en ligne droit dans des milieux homogènes. Développé entre le XIe et lexie siècle à partir de la propagation de la lumière et de la formation d'images utilisant la notion de rayon lumineux. Et un le plus objectif pour le traitement des systèmes dioptriques et catadioptriques, l'optique géométrique repose sur deux principes la propagation rectiligne dans un milieu homogène et isotrope et le principe du retour inverse qui exprime la réciprocité du trajet lumineux entre source et destination et sur les lois empiriques qui sont lois de Snell –Descartes pour source et la réfraction [7].

Le but de ce chapitre est de caractériser différents aspects et de maitriser leurs concepts de base pour la réflexion et la réfraction d'images virtuelles et également d'intégrer des rayons dans le système.

1.1 Caractéristiques et définitions des Milieux optique.

L'optique géométrique est l'étude des phénomènes optique dans l'approximation ou' tous les objets utilisés ont une dimension α grande devant la longueur d'onde de la lumière ($\lambda << \alpha$)[2].les milieux linéaires, homogène et isotrope sont caractérisés par un indice n appelé indice optique de la substance ou encore indice réfraction[8].

1.1.1 Milieu transparent.

Le terme transparent fait ici référence au manque d'absorption de la lumière lorsqu' elle traverse le support.

1.1.2 Milieu Homogène.

Les propriétés environnementales du milieu sont identiques en tout point du milieu.

1.1.3 Milieu isotrope.

Cela signifie que les propriétés du milieu sont les mêmes quelle que soit la direction de propagation dans le milieu.

1.1.4 Indice de réfraction.

On appelle indice de réfraction n d'un milieu le rapport de la célérité c d'un onde lumineuse monochromatique dans le vide à sa vitesses v dans le milieu considéré

$$n = \frac{c}{v} \ , avec \quad c = 299792485\ ms^{-1} \qquad (.11)$$

1.2 Les lois de Snell Descartes.

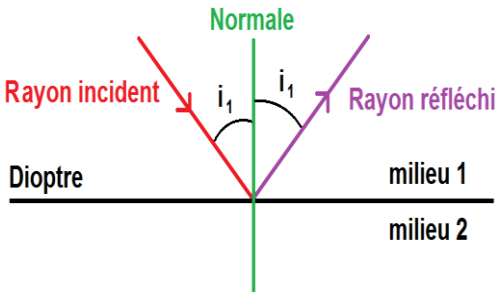
Il existe deux lois fondamentales **:**

1.2.1 Loi de Réflexion.

Cette loi stipule que l'angle d'incidence d'un rayon lumineux est égal à l'angle de sa réflexion mesuré par rapport à la perpendiculaire à la surface du matériau au point d'incidence.

- Première loi : le rayon réfléchi est dans le plan d'incidence, plan défini par le rayon incident et la normale à la surface réfléchissante[9].

-Deuxième loi : les angles d'incidence et de réflexion sont égaux, et l'angle de réflexion θ_2 et l'angle d'incidence θ_1 sont égaux i_1=i_2[10] .



Figurel 1.1 : schéma du principe de la loi de la reflexion.

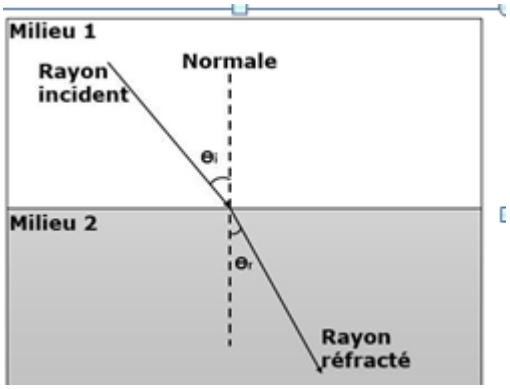
1.2.2 Loi de Réfraction.

Ce terme désigne le phénomène qui survient quand un rayon lumineux arrive sur certains types de surfaces séparant deux milieux transparents et se voit partiellement transmis dans le second milieu[10] .

Première loi : le rayon réfracté est dans le plan d'incidence[11].

Deuxième loi : les angles d'incidence et de réfraction sont liés par loi de snell-descartes

$$\sin\theta_1 = \ n \sin\theta_2 \ \text{ avec } \ n = \frac{n_1}{n_2} \qquad [10].$$



Figurel 1.2 : schéma du principe de la loi de la réfraction.

L'indice relatif est égal au rapport des indices absolus. L'emploi des indices absolus permet de mettre la formule de Descartes sous la forme symétrique[3].

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2 \qquad (1.2)$$

Si $n_1 > n_2 \Rightarrow i_1 < i_2$(pour tout rayon incident), le rayon réfracté existera toujours[3].

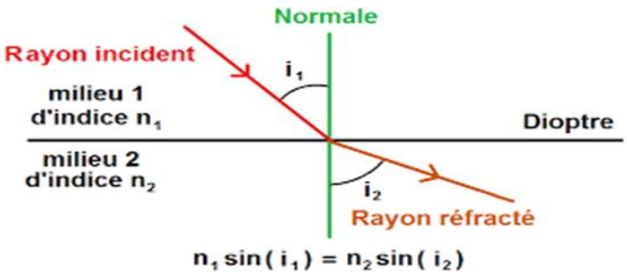


Figure 1.3 : Schéma de la loi de la réfraction (cas $n_1 > n_2$)

Si $n_2 < n_1 \Rightarrow \ i_2 > i_1$les rayons réfractés (lorsqu'ils existent) s'éloignent de la normale au dioptre (au point d'incidence) [3].

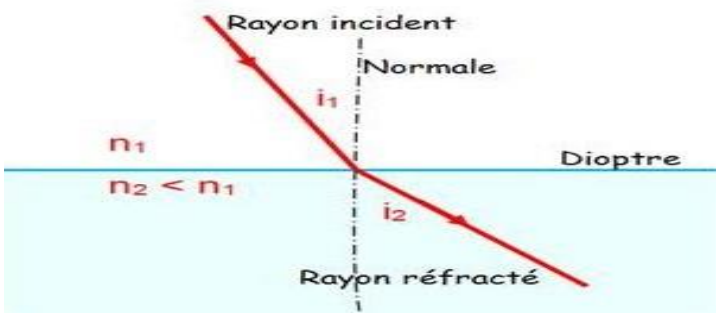


Figure1.4 : Schéma de la loi de la réfraction (cas$n_1 < n_2$).

1.3 Stigmatisme.

Un objet lumineux A envoi des rayons lumineux sur un système optique S. On suppose que ces rayons lumineux se trouvent réfractés à travers S et arrivent en un point A' ou plutôt sur un petit volume centré en A'[13].

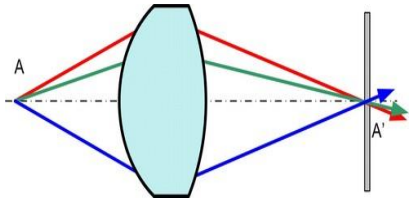


Figure1.5 : Système optique stigmatisme.

1.3.1 Stigmatisme rigoureux.

Un système optique est stigmatique lorsque tout rayon passant par un point objet A passe par le point A', image de A (c'est-à-dire que l'image d'un point est ponctuelle). Il y a stigmatique rigoureux lorsque le chemin optique de A et A' sont deux points conjugués. Remarquons que le stigmatique est difficile à réaliser et que seul le miroir plan est stigmatique pour tous les points de l'espace[14].

1.3.2 Conditions du Stigmatisme rigoureux.

Pour qu'un point A admette une image ponctuelle A' à travers un système optique, il faut et il suffit que le chemin optique (A A') soit le même sur tous les rayons [9].IL en résulte qu'au voisinage de deux points A et A' pour lesquels il y a stigmatisme rigoureux .les surfaces d'onde ($\sum$ et$\sum'$) sont des sphères de centres A et A', respectivement [5].

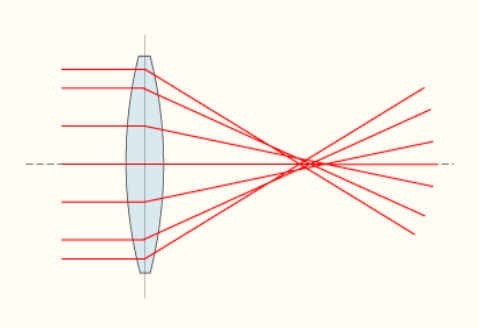


Figure 1.6 : Système optique stigmatisme rigoureux.

1.3.3 Stigmatisme approché.

Le stigmatisme approché est réalisé à travers la lame, si chaque dioptre présentent stigmatisme approché : L'objet plan est de petites dimensions, perpendiculaire à l'axe principal (normale aux faces) et centré sur cet axe .chaque point de l'objet n'envoie que des rayons dont l'angle d'incidence est faible (condition de l'optique par axiale) [15].

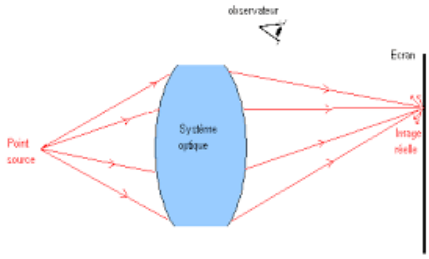


Figure 1.7 : Système optique stigmatisme (rigoureuxeta approché).

1.4 Aplanétisme.

Un système optique est aplanétique s'il forme de tout objet étendu situé dans un plan perpendiculaire à l'axe optique une image plane perpendiculaire à l'axe optique[14].

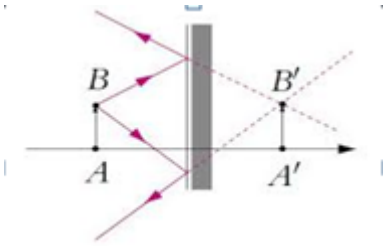


Figure 1.8 : Système optique aplanétisme d'un miroir plan.

1.4.1 Conditions d'aplanétisme.

Conditions permettent d'obtenir une image appropriée d'un objet et de traduire un stigmate approximatif. [16].

- L'objet doit être plat et perpendiculaire à l'axe visuel.

-Les angles d'incidence des rayons sont faibles.

- Il ne doit envoyer des rayons axiaux au système.

1.4.2 Approximation de Gauss.

Il est destiné à approximer les optiques géométriques, appelées conditions gaussiennes.
-la partie utile du dioptre doit avoir une faible ouverture (angle 2w) [18].

-les rayons incidents doivent être proximaux, très faiblement inclinés sur l'axe principal du dioptre. [18].

1.5 Les lentilles optiques.

La lentille optique est un matériau isotrope transparent à la lumière dans le domaine spectral, dont le but est de faire converger ou diverger la lumière.

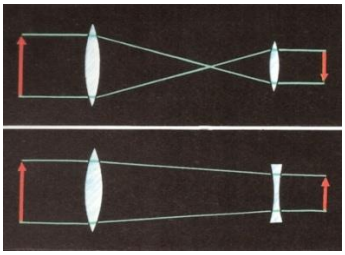


Figure 1.9 : présentation une lentille optique.

1.5.1. Types de lentilles.

Il existe deux types de lentilles :

1.5.1.1 Les lentilles divergentes.

C'est une lentille qui réfracte le rayon lumineux parallèlement, loin de l'axe, et peut être identifiée au toucher.

1.5.1.2 Les lentilles convergentes.

Sont les lentilles à bord mince rapprocher les rayons parallèles à l'axe optique et les diriger vers un point commun.

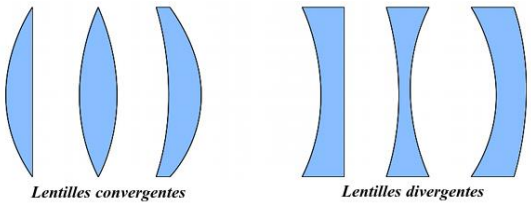


Figure 1.10 : les différentes taupes de lentilles.

Les points focaux d'une lentille

1.5.2.1 Foyer image :

Le foyer objet noté F c'est un point symétrique du foyer image F' par rapport au centre optique l'axe tel que tous les rayons issus de ce point sortent de la lentille parallèlement à l'axe.

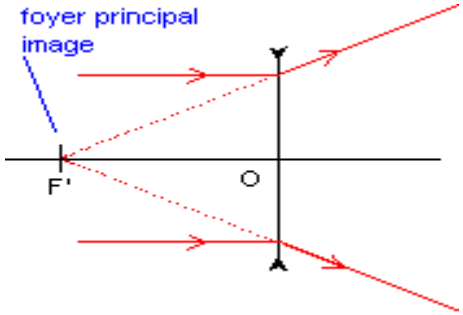


Figure 1.11 : Foyer image d'une lentille convergente et divergente.

Donc les foyers image et objet d'une lentille convergente sans réels et se trouvent de part et d'autre du centre O et à la même distance $|\overline{OF}|=|\overline{OF'}|$.

1.5.2.2 Foyer objet.

Le foyer objet noté Fc'est un point symétrique du foyer image F'par rapport au centre optique l'axe tel que tous les rayons issus de ce point sortent de la lentille parallèlement à l'axe.

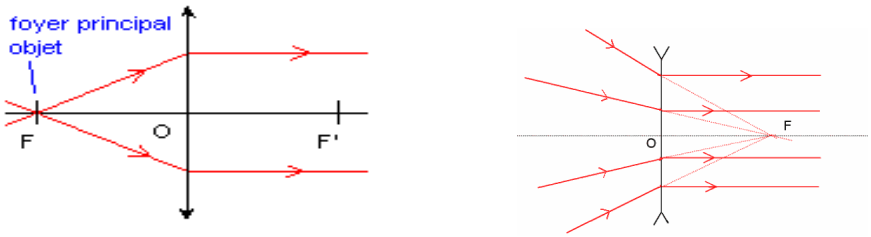


Figure 1.12 : Foyer objet d'une lentille convergente et divergente.

1.6 Caractéristique d'une lentille.

1.6.1 L'axe optique.

L'axe optique ou axe principal est un axe de rotation. On appelle centre optique le point situé sur l'axe optique par lequel les rayons peuvent passer sans déviation.

1.6.2Centre optique.

Centre géométrique de la lentille O.

1.6.3 Epaisseur $e= \overline{S_1S_2}$.

1.6.4 Les rayons de courbure : R_1 , R_2.

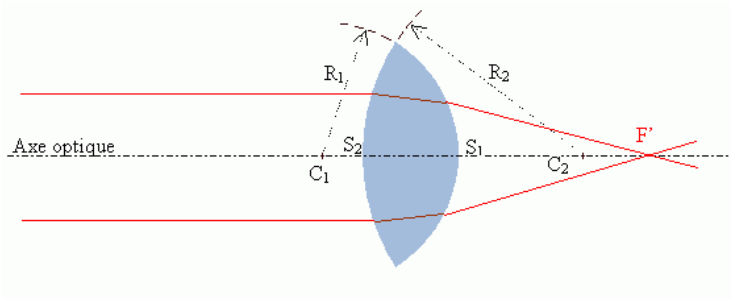


Figure 1.12 : *Caractéristique* d'une lentille optique.

1.6.5 Construction géométrique pour des lentilles convergentes.

Premier cas :

On peut utiliser trois rayons spécifiques:

Le rayon qui traverse le centre optique O n'est pas dévié par la lentille.

Le rayon venant de B et parallèle à l'axe optique passe par F.

Le rayon par F et émerge parallèlement à l'axe optique.

Finalement, ces rayons convergent en un même point, qui est nécessairement de la forme$B' - B$.

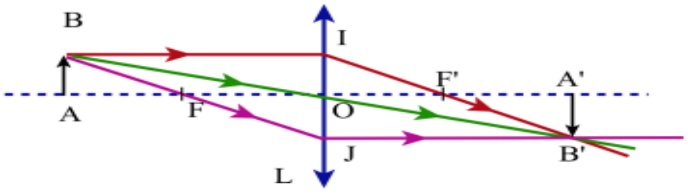


Figure1.13 : construction de l'image réelle d'un l'image.

Deuxième cas *:* Si l'objet est réel et est placé entre et foyer et le centre optique, l'image est virtuelle.

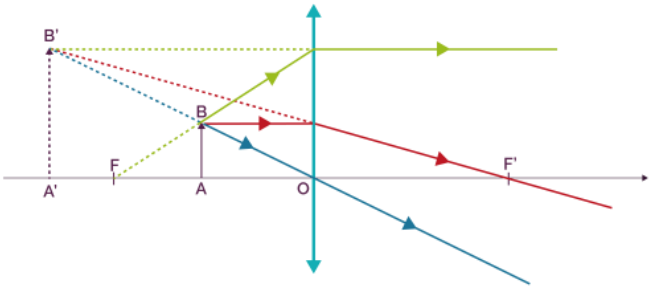


Figure1.14 : Schéma d'une lentille convergente pour objet réel,

Image virtuelle.

Troisième cas : Si l'objet est virtuel ($OA > 0$) l'image est réelle, Droite et plus grande que l'objet.

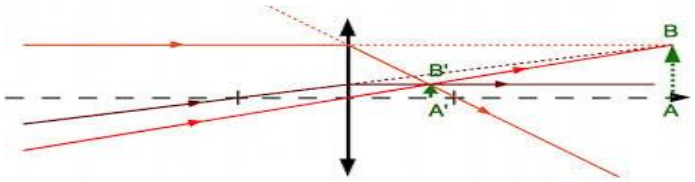


Figure1.15 : Représentation géométrique d'une lentille convergente Objet virtuelle, image réél1.

Cas particulier : Si Fet A est confondu (F=A), lorsque le rayon passant par un centre et le rayon passant par un foyer sont parallèles, il est impossible d'obtenir une image.

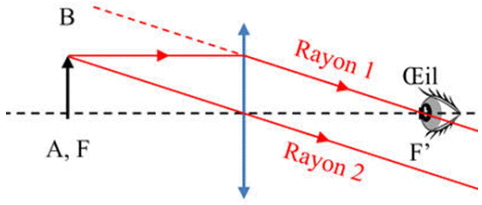


Figure1.16 : Absence d'image dans le cas (F=A).

1.6.6 Construction géométrique pour des lentilles divergentes.

Deux des trois rayons doivent être utilisés pour déterminer l'image hors axe :

Le rayon qui traverse le centre optique O n'est par dévier par la lentille.

Le rayon venant de B est parallèle à l'axe optique et passe par un foyer.

Le corps B émerge parallèlement à l'axe et donc ces rayons.

Convergent en un même point, qui est l'image B' à B.

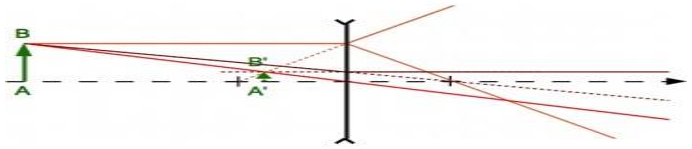


Figure1. 17 : Lentille divergente pour objet réel, image virtuelle.

1.6.7 Distance focale.

C'est la distance à laquelle convergent tous les rayons émis exprimée en mètres.



Figure 1.18: Distance focale pour lentille convergente et divergente.

1.6.8 La vergence.

IL a un autre concept, qui est le concept de puissance intrinsèque.la convergence de la lentille est l'inverse de la distance focale d'une image. Exprimée par :

$$v = \frac{1}{f} = \frac{n_1 - n_2}{n_2}\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right) \tag{1.3}$$

D'où l'unité de La vergence est en m^{-1}.

Pour une lentille convergence $v > 0$.

Pour une lentille divergente $v < 0$.

1.6.9 Le grandissement.

C'est le rapport entre la taille d'un objet et son équivalent dans cet objet image à travers lequel le système visuel

$$\gamma = \frac{\overrightarrow{A'B'}}{\overrightarrow{AB}} = \frac{\overrightarrow{OA'}}{\overrightarrow{OA}} \tag{1.4}$$

Si $\gamma > 0$: l'image est droite.

Si $\gamma < 0$: l'image est renversée.

Si $\gamma > 1$: l'image est plus grande que l'objet.

Si $\gamma < 1$: l'image est plus petite que l'objet.

1.6.10 Relation de conjugaison.

C'est une formule mathématique qui relie la position d'un objet par rapport à l'image à l'aide d'un système optique. Et nous l'avons obtenu en utilisant les lois :

$$\frac{1}{\overrightarrow{OA'}} + \frac{1}{\overrightarrow{OA}} = \frac{2}{\overrightarrow{OF}} = \frac{1}{f} = C \tag{1.5}$$

$f > 0$: Pour une lentille convergents.

$f < 0$: Pour une lentille divergente.

1.7 Les Miroir.

1.7.1 Miroir plan.

Un miroir plan est une surface plane réfléchissante [17].Un miroir plan est une portion de surface plane réfléchissante .le plan géométrique qui le contient est un plan est de symétrie pour l'espace entier.

1.7.2 Miroir sphérique.

Un miroir sphérique est une calotte sphérique de centre c et de sommet S rendue réfléchissante .l'axe de symétrie est l'axe optique du miroir.

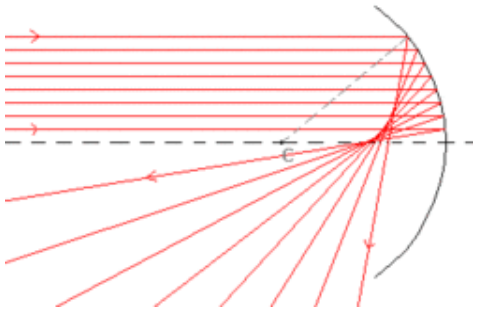


Figure 1.18 : Miroir sphérique.

1.7. 3 Types de miroir sphérique.

Il existe deux types de miroirs sphériques :

Miroir sphérique concaves.

Miroir sphérique concaves.

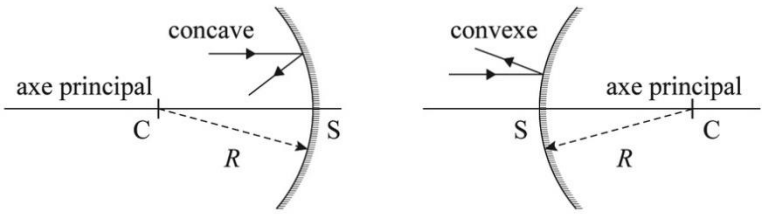


Figure 1.19:Types miroir sphérique.

Le miroir sphérique concaves : C'est le miroir convergent, qui est « bombée vers l'intérieur », le coté d'une cuillère qui recueille la soupe est concave. **Le miroir sphérique convexes :** C'est le miroir divergent, qui est « bombée vers l'extérieur », le coté d'une cuillère qui recueille la soupe est convexe.

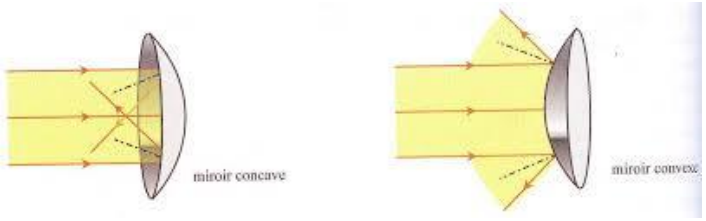


Figure 1.20 : miroir sphérique concave et convexe.

1.7.4 Caractéristique géométrique.

1.7.4.1 Centre du miroir.

le centre C de sphère

1.7.4.2 L'axe optique.

Appelé l'axe de symétrie de révolution, passant par les points C et S.

1.7.4.3 Sommet de miroir.

L'intersection de l'axe de symétrie et du miroir s'appelle le sommet du miroir, noté *S.*

1.7.4.4 Rayon de miroir.

Appelé le rayon de courbure R=SC, Pour un miroir concave, il est négatif et pour un miroir convexe, positif.

1.7.4.5 De courbure et le sommet.

Ou miroirs convergentes ce sont des calottes sphériques dont la surface réfléchissante est tournée vers le centre C.

$SC > 0$:Le miroir est convexe.

$SC < 0$: Le miroir est convexe.

1.7.5 Point focal image.

C'est le point image F' pour que l'objet est à l'infini sur l'axe optique.

Dans les conditions de Gauss on montre la démonstration :

$$SA \to \infty \quad , \quad A \equiv F' \quad \to SF' = \frac{SC}{2} \tag{1.6}$$

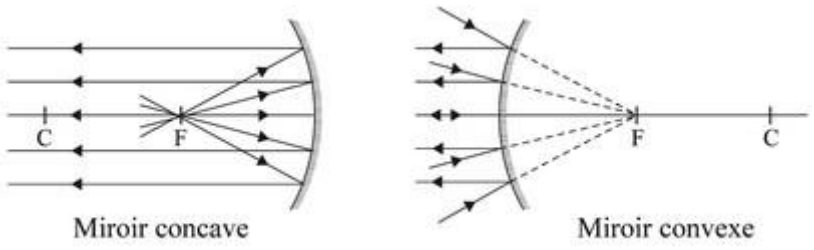


Figure 1.22: Foyer image d'un miroir concave et convexe.

1.7.6 Point focal objet.

C’est l’antécédent F d’un point image situé à l’infini sur l’axe optique

$$SA' \to \infty \,, A \equiv F' \quad \to \; SA = \frac{SC}{2} \tag{1.7}$$

Pour un miroir sphérique, Les deux foyers sont identiques.

1.7.7 Constructions géométrique du miroir sphérique.

1.7.7.1 Miroirs concave.

Premier cas : Si l’objet est réel et situé avant c donc l’image est réel, renversée et plus petit que l’objet

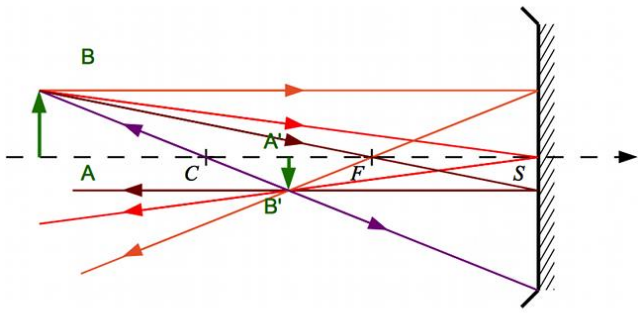


Figure1.24 : Miroir convergent d’un objet réel, image renversée.

Deuxième cas : si l’objet est réel, situé entre F et S, l’image et virtuel droite et plus grand que l’objet.

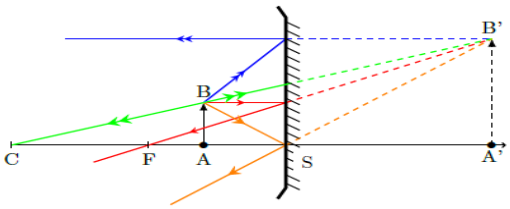


Figure1.25 : Miroir convergent d’un objet réel, image virtuelle.

Troisième cas : si l’objet est virtuel, situé après S, l’image et réelle, droite et plus petite que l’objet.

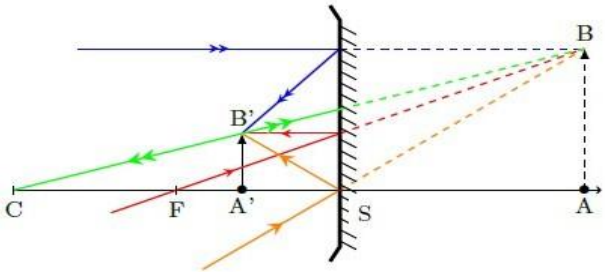


Figure 1.26 : Miroir concave d'un objet virtuel, image réel .

1.7.7.2 Miroirs convexes.

Premier cas : Si l'objet est réel et situé avant *S* donc l'image est virtuelle, droite et plus petite que l'objet.

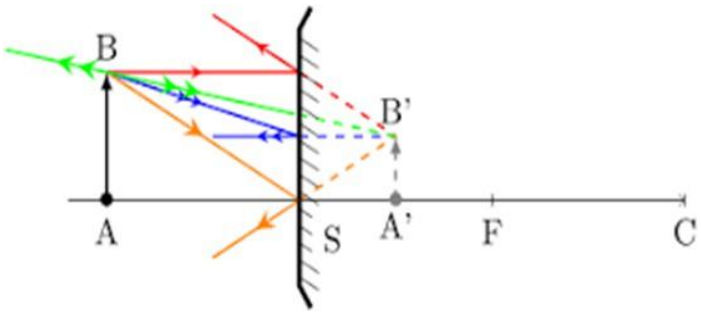


Figure 1.27: Miroir Divergence d'un objet réel, image virtuelle.

Deuxième cas : si l'objet virtuel et situé entre S et F L'image est réelle, droite et plus grande que l'objet.

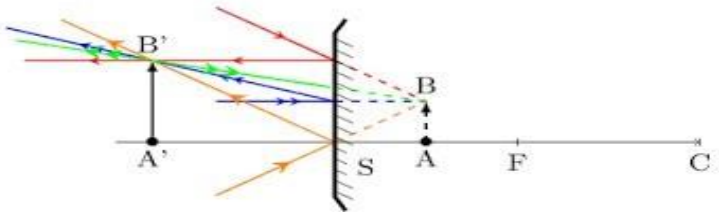


Figure 1.28 : Miroir convexe d'un objet virtuelle, image réelle.

Troisième cas : l'objet virtuel, situé avant donc L'image est virtuelle, renversée et plus petit que l'objet.

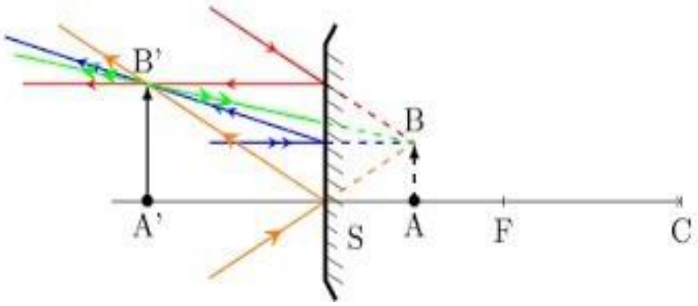


Figure 1.29: Miroir convexe d'un objet virtuelle, image réelle.

1.7.8 Distance focal du miroir.

C’est une mesure algébrique de SF, et c’est écrit selon la loi$f = \overrightarrow{SF} = \frac{\overrightarrow{SC}}{2}$ s’exprime en métré.

$f < 0$ Si le miroir est concave.

$f > 0$ Si le miroir est convexe.

1.7.9 La vergence.

Est la capacité d’une lentille à dévier les rayons de la lumière, Elle est égale à l'inverse de la distance focale $v = \frac{1}{f}$ son unité dioptrie ou m^{-1}.

Pour une lentille convergente V>0.

Pour une lentille divergente V<0.

1.7.10 Grandissement latéral (Ou transversal ou linéaire).

$$\gamma = \frac{\overrightarrow{A'B'}}{\overrightarrow{AB}} \tag{1.8}$$

Origine au centre.

$$\gamma = \frac{\overrightarrow{CA'}}{\overrightarrow{CA}} \tag{1.9}$$

Origine au somment.

$$\gamma = -\frac{\overrightarrow{SA'}}{\overrightarrow{SA}} \tag{1.10}$$

Origine au foyer

$$\gamma = \frac{\overrightarrow{FA'}}{\overrightarrow{FS}} = \frac{\overrightarrow{FS'}}{\overrightarrow{FA}} \tag{1.11}$$

$\gamma > 0$: Image droit.

$\gamma < 0$: Image renversée.

$\gamma > 1$: Image Agrandie.

$\gamma < 1$: Image est dite agrandir

$\gamma = 1$: Image Est de même taille que l’objet.

1.7.11 Relation de conjugaison.

C’est une formule mathématique qui relie la position d’un objet par rapport à l’image à l’aide d’un système optique. Et nous l’avons obtenu en utilisant les lois :

$$\frac{1}{\overline{SA}}+\frac{1}{\overline{SA'}}=\frac{2}{\overline{SC}}=\frac{1}{f} \quad (1.11)$$

Origine au centre :

$$\frac{1}{\overline{CA'}}+\frac{1}{\overline{CA}}=\frac{2}{\overline{SC}} \quad (1.12)$$

Origine au foyer :

$$\overrightarrow{fA}*\overrightarrow{fA'}=f \quad (1.13)$$

1.8 Les Dioptres.

1.8.1 Dioptres plan.

C'est un système constitué de deux supports homogènes et transparents avec des indices $n\ et\ n'$identiques et différents, qui donnent une image qui a la même dimension que l'objet, il n'est pas stigmatique.

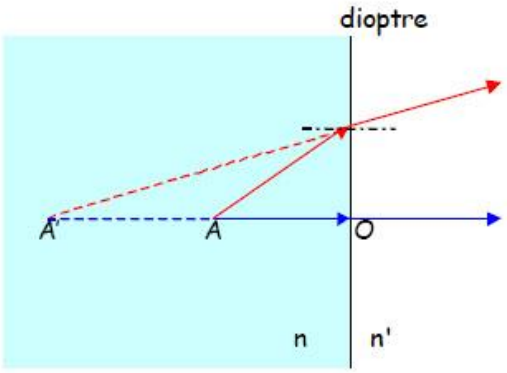


Figure 1.28 : Schéma présentative du dioptre plan.

1.8.1.1 Image d'un point à travers un dioptre plan.

Premier cas : si l'objet A réel et $n' > n$ dons l'image est virtuelle.

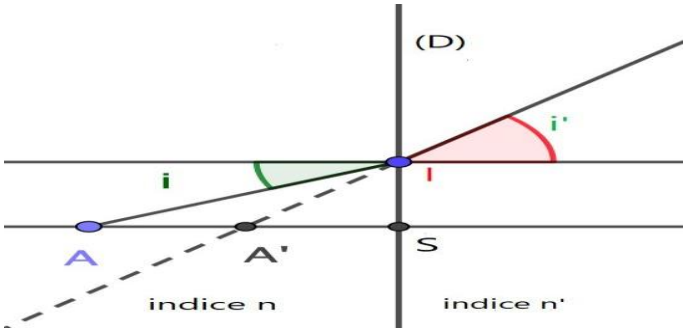
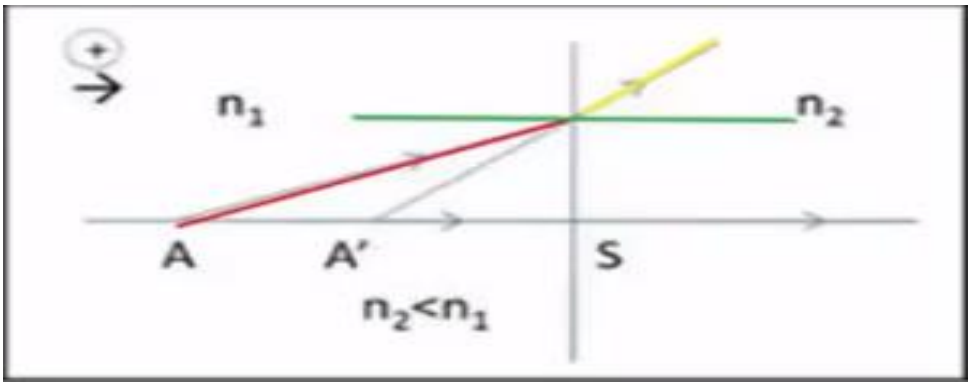


Figure 1.29:Construction d'un dioptre plan pour objet réel, image virtuelle.

Deuxième cas : si l'objet A réel et $n_2 > n_1$, l'image est réelle.



Figur1. 29 : Dioptre plan pour objet virtuel, image réelle.

Troisième cas : si l'objet A réel et $n' < n$ dons l'image est réelle.

S : sommet c'est le résultat de l'intersection de l'axe optique et du dioptre plan.

Les quatre états ont le même signe et le même environnement et ont deux natures opposées, Si l'un d'eux est réel

Le point lumineux a est situé au centre du pointeur n lorsque le système tourne autour et le traverse.

Si l'image A existe, alors AS existe certainement.

Les rayons émergents IR se coupe AS en A'tel que :

$$SI = SA\tan(i) = SA'\tan(i') \qquad (1.14)$$

$$SA' = SA\frac{\sin(i)}{\cos(i)}\frac{\cos(i')}{\sin(i')} \qquad (1.15)$$

$$\sin(i') = \frac{n}{n'}\text{Sin (i)} \qquad (1.17)$$

$$\cos(i) = \sqrt{1 - sin^2(i)} \qquad (1.18)$$

$$\cos(i')=\sqrt{1 - (\frac{n}{n'})^2 sin^2(i)} \qquad (1.19)$$

$$SA' = SA.\frac{n'}{n}.\sqrt{\frac{1-\left(\frac{n}{n'}\right)^2 sin^2(i)}{1-sin^2(i)}} \qquad (1.20)$$

Les rayons incidents sont à faible incidence (i→0°, sin(i) →0) (approximation de gauss).

$$SA' = SA.\frac{n'}{n}.\sqrt{\frac{1-\left(\frac{n}{n'}\right)^2 sin^2(i)}{1-sin^2(i)}} \rightarrow \frac{\overline{SA'}}{\overline{SA}} = \frac{n'}{n} \qquad (1.30)$$

$$\frac{\overrightarrow{SA'}}{\overrightarrow{SA}} = \frac{n'}{n} \qquad (1.31)$$

La relation (1.31) appelée relation de conjugaison.

1.8.2 Dioptre sphérique.

Un dioptre sphérique est constitué de deux milieux d'indices et distincts et séparés par une surface sphérique. On appelle centre de la sphérique et S le sommet situé sur l'axe optique. Dans l'approximation de Gauss.

1.8.3 Types de Dioptre.

Ces dioptres peuvent être :

-Dioptre sphérique convergent :$R = \overrightarrow{SC} < 0$.

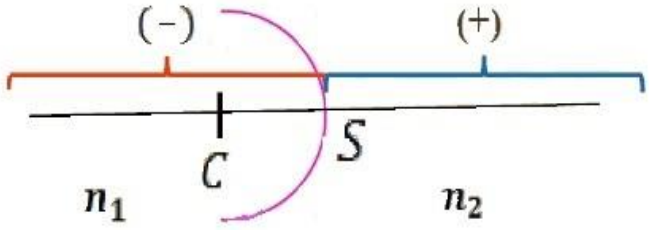


Figure1.32 : Dioptre sphérique convergent.

Dioptre sphérique divergent : $R = \overrightarrow{SC} > 0$.

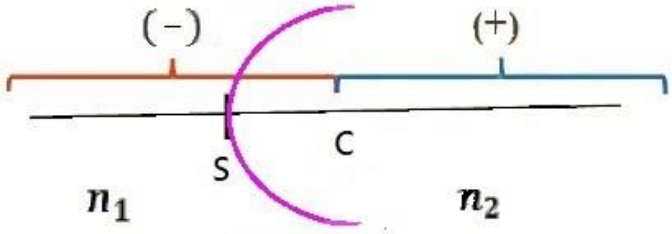


Figure1.33 : Dioptre sphérique divergent.

Les dioptries sphériques sont représentées de deux manières :

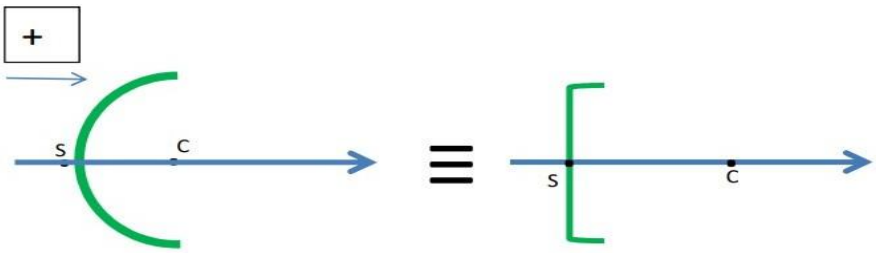


Figure 1.32 : Représentation des dioptries sphériques.

1.8.4 Remarque

Lorsque la lumière provient d'un milieu avec moins de réfraction($n_1 < n_2$), elle s'approche du point d'incidence. Et lorsqu'un renversement se produit, passant d'un milieu avec plus de réfraction à un milieu plus faible ($n_1 < n_2$), elle s'écarte de la normale au point d'incidence.

Chapitre 02 : Optique matricielle.

1.1 Introduction.

Dans ce chapitre. Nous appliquons l'optique matricielle à la propagation d'un rayon lumineux montrons et les conditions d'application de l'optique géométrique à la propagation de la lumière en ce qui concerne la longueur caractéristique associée à la lumière colorée sont définies.

2.2 Matrice de transfert.

La matrice T. appelée matrice de transfert, est caractéristique du système optique et des plans de front considérés pour le rayon incident et pour le rayon émergent. Ses éléments sont des nombres complexes. On évalue cette matrice pour un système optique donné en calculant la marche des rayons qui le travers, par exemple en utilisant les relations de conjugaison .on peut aussi trouver la matrice de transfert d'un système compliqué à partir de celles des éléments qui le composent.

2.4 Propagation d'un rayon lumineux les matrices ABCD.

Les tableaux sont la formation de matrices de transmission. La propagation d'un faisceau lumineux peut être décrite à travers une structure composée d'éléments optiques. Cette méthode consiste à connecter chaque élément optique à une matrice (2x2) spécifique. Un rayon par axial peut être caractérisé par les coordonnées du point M(x, y) d'intersection avec un plan de section droite (π) z = Cet et les Ongles θ et φ avec la normal $\overrightarrow{OM}\rightarrow$ dans plans.

(x, y) et (y, z) respectivement [20].

Rayon est par axial si θ et φ sont petits c'est-à-dire :

$$\text{tg}\theta \approx \sin\theta \approx \theta \text{ et } \text{tg}\,\varphi \approx \sin\varphi \approx \varphi \qquad (2.1)$$

Dans ces conditions pour système optique les relations entre les coordonnées à l'entrée sont

(x_1, θ_1) Et (y_1, φ_1) et les coordonnées à la sortie sont $(x_2, \theta_2) et (y_2, \varphi_2)$ .Ces coordonnées linéaires qui peut s'écrire sous forme matricielle [19].

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ \theta_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_X B_X \\ C_X D_X \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ \theta_1 \end{pmatrix} = T_X \begin{pmatrix} x_1 \\ \theta_1 \end{pmatrix} \qquad (2.2)$$

$$\begin{pmatrix} y_2 \\ \varphi_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_Y B_Y \\ C_Y D_Y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_1 \\ \varphi_1 \end{pmatrix} = T_Y \begin{pmatrix} y_1 \\ \varphi_1 \end{pmatrix} \qquad (2.3)$$

Les matricesT_X etT_Y caractérisent complètement le système optique.

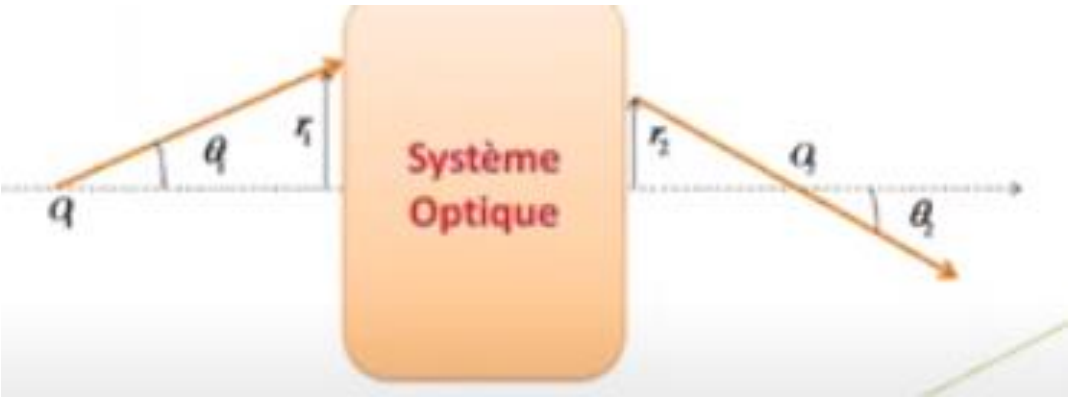


Figure 2.1: la propagation d'une onde sphérique dans un système optique

2.4.1 Système optique élémentaires.

2.4.1.1 propagations sur une distance (d).

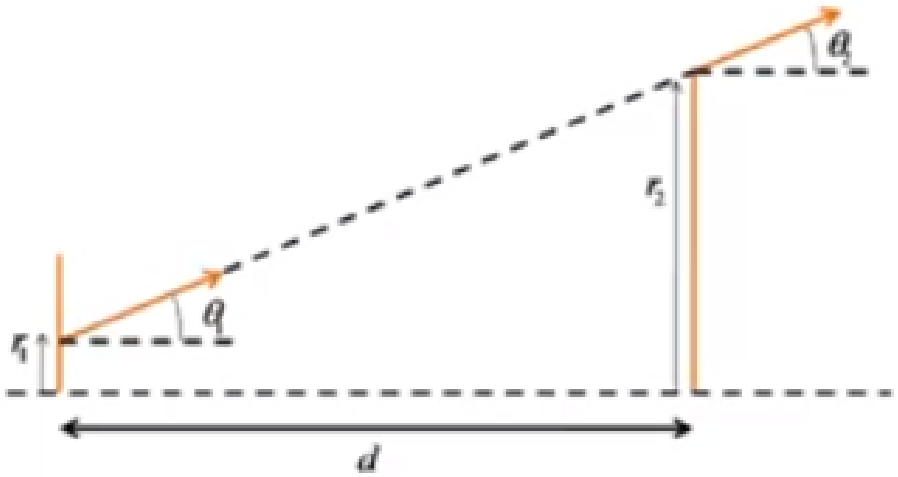


Figure 2.2 : propagation dans un espace libre

$$r_2 = r_1 + d\theta_1 \ , \theta_1 = \theta_2 \tag{2.4}$$

$$\begin{pmatrix} r_2 \\ \theta_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_1 \\ \theta_1 \end{pmatrix} \tag{2.5}$$

$r_2 \ \ et \ \ r_1$: le rayon lumineux se propageant dans un espace libre

$\theta_1 et \ \theta_2$: La Coins

d : la distance .

2.4.1.2 lentilles minces de focale f.

Les deux caractéristiques d'une lentille fine :

La lentille est mince :

$$s = \overline{OA} = \overline{ll_0} \tag{2.7}$$

$$s' = \overline{OA'} = \overline{ll_\iota} \tag{2.8}$$

$$\begin{pmatrix} y_0 \\ n'a' \end{pmatrix}' = \begin{pmatrix} 1 & ein \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_0 \\ na \end{pmatrix} \tag{2.9}$$

$$\begin{pmatrix} y_0 \\ a \end{pmatrix}'_l = \begin{pmatrix} 1 & s \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_0 \\ a \end{pmatrix}_{ln} \qquad et \qquad \begin{pmatrix} y_0 \\ a' \end{pmatrix}'_l = \begin{pmatrix} 1 & -s' \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_0 \\ a' \end{pmatrix}'_{li} \tag{2.10}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & -s' \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_0 \\ a' \end{pmatrix}'_{li} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & -s \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_0 \\ a \end{pmatrix}_{ln} \tag{2.11}$$

$$\begin{pmatrix} y_0 \\ a' \end{pmatrix}'_{li} = \begin{pmatrix} 1 & s \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & -s \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_0 \\ a \end{pmatrix}_{ln} \tag{2.12}$$

$$\begin{pmatrix} y_0 \\ a' \end{pmatrix}'_{li} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{s'}{f'} & s' - s + \frac{s's}{f'} \\ -\frac{1}{f} & 1 + \frac{s}{f} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_0 \\ a \end{pmatrix}_{ln} \tag{2.13}$$

$$\begin{pmatrix} y_0 \\ a' \end{pmatrix}'_{li} = \begin{pmatrix} G & 0 \\ -\frac{1}{f} & \gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_0 \\ a \end{pmatrix}_{ln} \tag{2.14}$$

$$s' - s + \frac{s's}{f'} = 0 \tag{2.15}$$

$$G_{\gamma=(}1 - \frac{s'}{f'}) \left(1 + \frac{s}{f} \right) = 1 + \frac{1}{f}(s' - s + \frac{s's}{f'}) = 1 \tag{2.16}$$

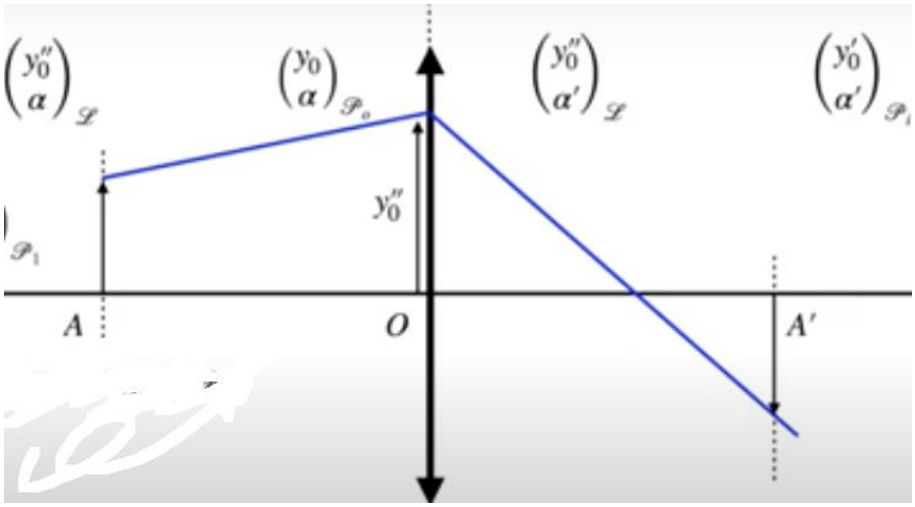


Figure 2.3 : lentilles minces

2.4.1.3 combinaisons A+B

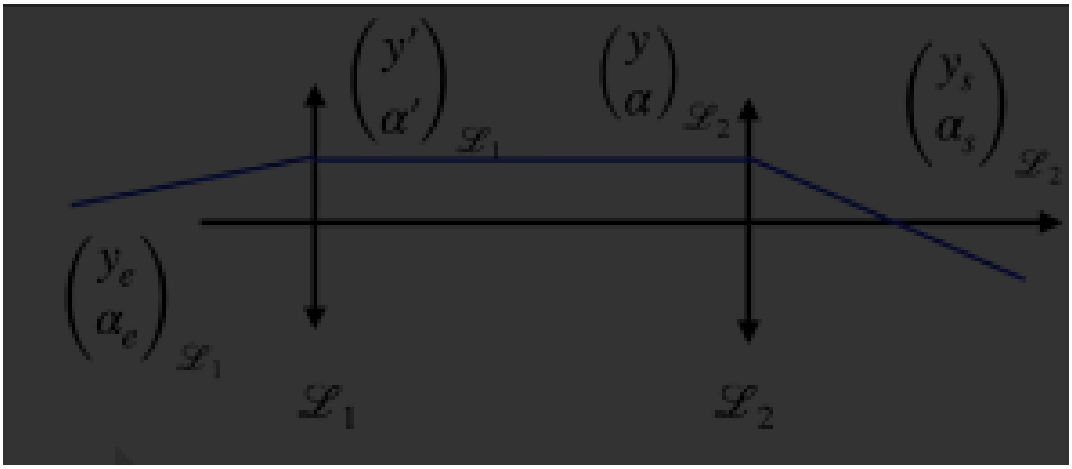


Figure2.4 : lentille minces de focale F.

$$\begin{pmatrix} y_S \\ a_s \end{pmatrix}_{l_2} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{-1}{f'_2} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y \\ a \end{pmatrix}_{l_2} \tag{2.17}$$

$$\begin{pmatrix} y \\ a \end{pmatrix}_{l_2} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y' \\ a' \end{pmatrix}_{l_1} \tag{2.18}$$

$$\begin{pmatrix} y' \\ a' \end{pmatrix}_{l_1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{-1}{f'_2} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_e \\ a_e \end{pmatrix}_{l_2} \tag{2.19}$$

$$\begin{pmatrix} y_S \\ a_s \end{pmatrix}_{l_2} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{-1}{f'_2} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & e \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{-1}{f'_2} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_e \\ a_e \end{pmatrix}_{l_2} \quad (2.20)$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{-1}{f'_2} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & e \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{-1}{f'_2} & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{e}{f'_2} \end{pmatrix} \quad (2.21)$$

2.5 Système Optique périodique.

En général , les deux régularités optique consécutives (A+B) pour une matrice T_A, T_B sont la matrice du groupe $T_C = T_B T_A$. De là on conclut que la matrice n'est pas commutative.

Cas deux systéme de type (c) [20].

$$\begin{pmatrix} r_2 \\ \theta_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & d_2 \\ -\frac{1}{f_2} & 1 - \frac{d_2}{f_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_1 \\ -\frac{1}{f_1} & 1 - \frac{d_1}{f_1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_1 \\ \theta_1 \end{pmatrix} \quad (2.22)$$

$$T_D = \begin{pmatrix} 1 - \frac{d_2}{f_1} d_2 + d_1 - \frac{d_1 d_2}{f_1} \\ -\frac{1}{f_2} - \frac{1}{f_1} + \frac{d_1 d_2}{f_1 f_2} - \frac{d_2}{f_2} + \left(1 - \frac{d_2}{f_2}\right)\left(1 - \frac{d_1}{f_1}\right) \end{pmatrix} \quad (2.23)$$

2.6 Matrices de rayons comme dérivées.

puisque les déplacements et les angles sont supposées petits ,nous pouvons penser en termes de dérivées partielles [21].

$$\begin{bmatrix} \mathrm{x_{out}} \\ \theta_{\mathrm{out}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathrm{A} & \mathrm{B} \\ \mathrm{C} & \mathrm{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathrm{x_{in}} \\ \theta_{\mathrm{in}} \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

$$x_{out} = \frac{\partial x_{out}}{\partial x_{in}} x_{in} + \frac{\partial x_{out}}{\partial \boldsymbol{\theta}_{in}} \theta_{\mathrm{in}} \quad (2.25)$$

$$\theta_{out} = \frac{\partial \boldsymbol{\theta}_{out}}{\partial \boldsymbol{x}_{in}} x_{in} + \frac{\partial \boldsymbol{\theta}_{out}}{\partial \boldsymbol{\theta}_{in}} \theta_{\mathrm{in}} \quad (2.26)$$

$\frac{\partial x_{out}}{\partial x_{in}}$: grossissement spatial .

$\frac{\partial \boldsymbol{\theta}_{out}}{\partial \boldsymbol{\theta}_{in}}$: angulaire grossissement .

2.7 Eléments de l'optique matricielle .

On rappelle que l'approximation de Gauss, qui est l'approximation linéaire de l'optique géométrique [21].

la loi de la réfraction

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2 \qquad (2.27)$$

2.7.1 coordonnées d'un rayon dans un espace d'indice n.

un rayon lumineux se propageant dans un milieu isotrope d'indice n est complétement défini par les coordonnées du point I [21].

matrice de transfert .

Les coordonnées $\begin{bmatrix} y \\ n\alpha \end{bmatrix}$ et $\begin{bmatrix} y' \\ n'\alpha' \end{bmatrix}$ des rayons incident et émergent sont liées par des relations linéaires que l'on peut écrire sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} y' \\ n'\alpha' \end{bmatrix} = M_{\overline{OO'}} \begin{bmatrix} y \\ n\alpha \end{bmatrix} \qquad (2.28)$$

$M_{\overline{OO'}}$ est la matrice de transfert.de O à O′.

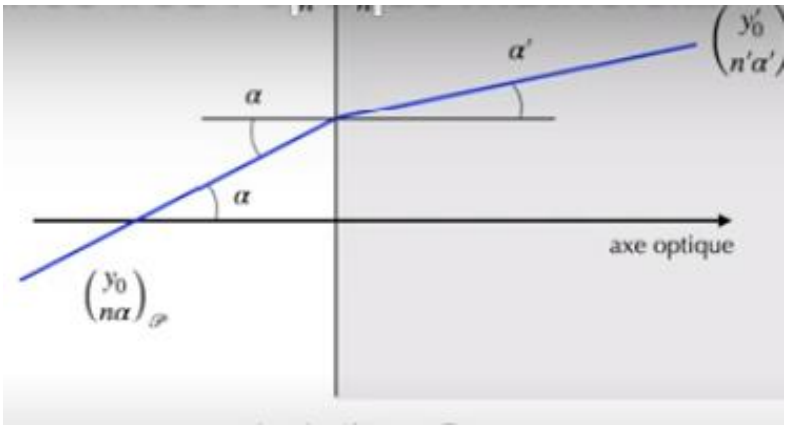


Figure 2.5:plan de référence

2.8 pricipales matrices de transfert .

2.8.1 Matrice de rayons pour un espace libre ou un support .

si x_{in} et θ_{in} sont la position et la pente à l'entrée , laissez x_{out} et θ_{out} étre la position et la pente après propagation de z =0 à z.

$$x_{out} = x_{in} + z\,\theta_{in} \tag{2.29}$$

$$\theta_{out} = \theta_{in} \tag{2.30}$$

Soit

$\theta_{space} = \begin{bmatrix} 1 & z \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$=matrice de translation ,et $\begin{bmatrix} x_{out} \\ \theta_{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{in} \\ \theta_{in} \end{bmatrix}$.

Le déterminant de la matrice de translation est égal à 1.

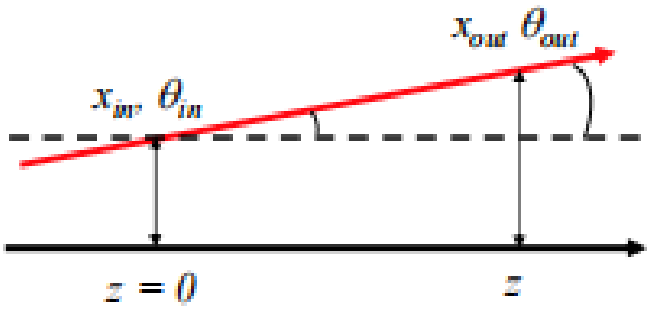


Figure 2.6: rayons pour un espace libre

2.8.2 Matrice de réfraction.

2.8.2.1 Matrice de rayons pour une interface .

A L'interface clairement :

$$x_{out} = x_{in} \tag{2.31}$$

Ces relation se traduisent sous forme matricielles par :

$$n_1\,\theta_{in} = n_2\,\theta_{out} \tag{2.32}$$

$$\theta_{out=[n_1/n_2]}\,\theta_{in} \tag{2.33}$$

La matrice $\theta_{out} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & n_1/n_2 \end{bmatrix}$est la matrice de réfraction

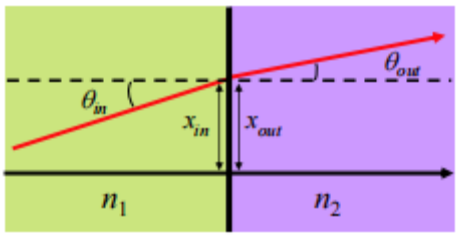


Figure 2.7: le plan réfraction

2.8.2.2 Matricede rayons pour une lentille :

Les relations fondamentals pour une lentille sont :

$$\mathbf{1}/_{\boldsymbol{f}} = (\boldsymbol{n}-\mathbf{1})(\frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{R_1}} - \frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{R_2}}) \tag{2.34}$$

$$\theta_{lent} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\mathbf{1}/_{\boldsymbol{f}} & 1 \end{bmatrix} \tag{2.35}$$

La quantité F est la distance focale de l'objectif .c'est le plus simple paramétre important d'un objectif .cela peut ètre positif ou négatif .

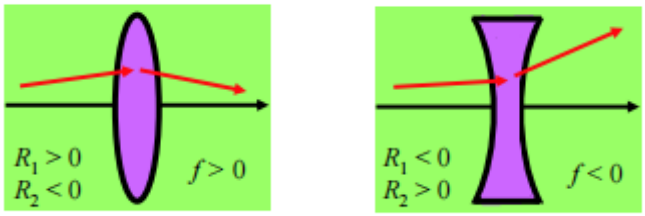


Figure2.8: l'objectif dévie rayons éloignés de l'axe et vers l'axe

Chapitre 03 Résultats et discussion.

Introduction.

Dans cette section, nous trouverons une formule générale de la relation de conjugaison pour un système lumineux, qui consiste en un groupe de lentilles non accolées séparés les unes des autres, par utilisation en termes d'éléments A, B, C et D du système lumineux.

Nous étudierons un système optique composé de deux lentilles optiques, où nous déterminons la distance focale équivalente pour le système optique constitué par plusieurs lentilles non accolées en termes de distance entre deux lentilles. Facteur de grossissement du système en termes de support optique du système.

3-1 Détermination la position de l'image par La loi ABCD.

3.1.1 Système formé par cas lentilles.

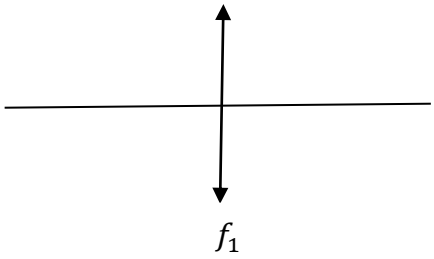


Figure 3.1 représentation d'une lentille mince

La matrice de transfert est donnée par :

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{pmatrix} \tag{3.1}$$

En remarque que la distance focale de lentille est donnée par :$f = -\frac{1}{c}$.

Détermination la position de l'image par la relation de conjugaison.

La relation de conjugaison d'une lentille est donnée par la relation suivante :

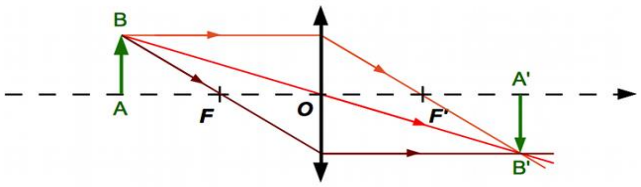


Figure3.2 : systèmes formé par cas lentilles

$$\frac{1}{\overrightarrow{OA'}} - \frac{1}{\overrightarrow{OA}} = \frac{1}{f} \qquad (3.2)$$

Où :

$\overrightarrow{OA'}$: La position de l'image par rapport du centre de lentille.

$\overrightarrow{OA}$:La position de l'objet par rapport du centre de lentille.

f : est la distance focale de la lentille.

A partir de l'équation (3.3) on obtient que :

$$\overrightarrow{OA'} = \frac{f\overrightarrow{OA}}{f+\overrightarrow{OA}} \qquad (3.3)$$

Par identification cette dernière relation et utilisation des éléments ABCD de la matrice de transfert on obtient que :

$$\overrightarrow{OA'} = \frac{A\overrightarrow{OA}-B}{-C\overrightarrow{OA}+D} \qquad (3.4)$$

$$\overrightarrow{OA'} = \frac{1\,\overrightarrow{OA}-0}{\frac{1}{f}\overrightarrow{OA}+1} = \frac{f\overrightarrow{OA}}{\overrightarrow{OA}+f} \qquad (3.5)$$

3.1.2 Système formé par deux cas lentilles.

Dans ce cas on considère deux lentilles L1 et L2 séparé par une distance d comme indique le Schéma ci-dessous.

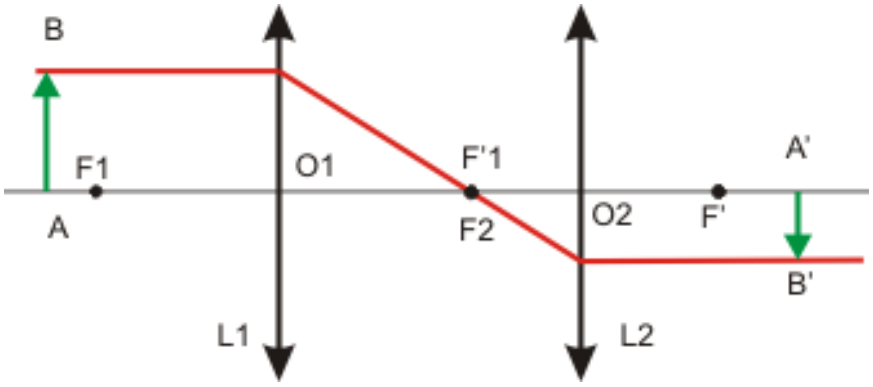


Figure3.3 : représentation deux lentilles minces séparées par une distance.

La matrice de transfert de ce système est donnée par :

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{d_1}{f_1} & d_1 \\ -\frac{-d_1+f_1+f_2}{f_1 f_2} & 1 - \frac{d_1}{f_2} \end{pmatrix} \tag{3.6}$$

Dans ce système en remarque que la distance focale équivalant est donnée par [27, 28]:

$$f_{eq} = -\frac{1}{c} = \frac{f_1 f_2}{-d_1+f_1+f_2} \tag{3.7}$$

Calcul la positon de l'image$\overrightarrow{O_1A'}$criée par la première lentille f_1 , En appliquant la relation de conjugaison pour la lentille f_1

$$\frac{1}{\overrightarrow{O_1A'}} - \frac{1}{\overrightarrow{O_1A}} = \frac{1}{f_1} \tag{3.8}$$

A parier la dernière relation on obtient :

$$\overrightarrow{O_1A'} = \frac{f_1\overrightarrow{O_1A}}{f_1+\overrightarrow{O_1A}} \tag{3.9}$$

Maintenant en calculant $\overrightarrow{O_2A}$la position de cette image par rapport la deuxième lentillef_2, qui est déterminée par la relation suivante :

$$\overrightarrow{O_2A} = -d + \overrightarrow{O_1A'} = -d + \frac{f_1\overrightarrow{O_1A}}{f_1+\overrightarrow{O_1A}} = \frac{-df_1+f_1\overrightarrow{O_1A}-d\overrightarrow{O_1A}}{f_1+\overrightarrow{O_1A}} \tag{3.10}$$

En calculant la position de l'image $\overrightarrow{O_2A'}$ criée par la deuxième lentillef_2 , pour ce la en utilisant la relation de conjugaison suivante :

$$\frac{1}{\overrightarrow{O_2A'}} - \frac{1}{\overrightarrow{O_2A}} = \frac{1}{f_2} \tag{3.11}$$

$$\Rightarrow \overrightarrow{O_2A'} = \frac{f_2\overrightarrow{O_2A}}{f_2+\overrightarrow{O_2A}} \tag{3.12}$$

$$\overrightarrow{O_2A'} = \frac{-d_1f_1f_2-d_1f_2\overrightarrow{O_1A}+f_1f_2\overrightarrow{O_1A}}{f_1f_2+f_2\overrightarrow{O_1A}-d_1f_1-d_1\overrightarrow{O_1A}+f_1\overrightarrow{O_1A}} \tag{3.13}$$

$$\overrightarrow{O_2A'} = \frac{(-d_1f_2+f_1f_2)\overrightarrow{O_1A}-d_1f_1f_2}{(f_2-d_1+f_1)\overrightarrow{O_1A}-d_1f_1+f_1f_2} \tag{3.14}$$

$$\overrightarrow{O_2A'} = \frac{\left(1-\frac{d_1}{f_1}\right)\overrightarrow{O_1A}-d_1}{\frac{(f_2-d_1+f_1)}{f_1f_2}\overrightarrow{O_1A}-\frac{d_1}{f_2}+1} \tag{3.15}$$

$$\overrightarrow{O_2A'} = \frac{\left(1-\frac{d_1}{f_1}\right)\overrightarrow{O_1A}-d_1}{\frac{(f_2-d_1+f_1)}{f_1f_2}\overrightarrow{O_1A}\ 1-\frac{d_1}{f_2}} \tag{3.16}$$

Par identification cette dernière relation et utilisation des éléments ABCD de la matrice de transfert on obtient que :

$$\overrightarrow{O_2A'} = \frac{A\,\overrightarrow{O_1A} - B}{-\,C\,\overrightarrow{O_1A} + D} \tag{3.17}$$

3.1.3 Cas d'un système optique constitué par trois lentilles non accolées.

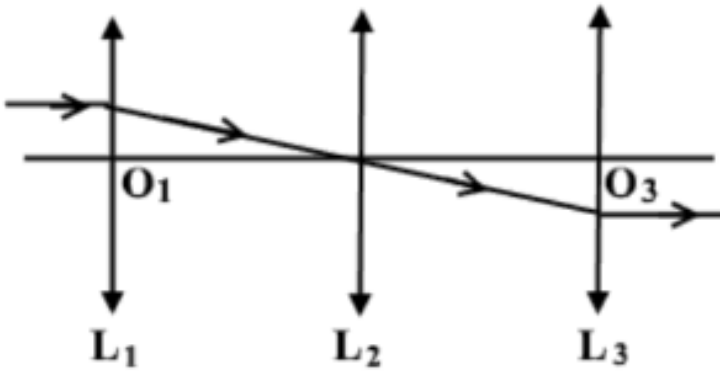


Figure3.4 : Système optique constitué par trois lentilles non décollées.

La matrice de transfert de ce système est donnée par :

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{-1}{f_3} & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{-1}{f_2} & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{-1}{f_1} & 1 \end{pmatrix} \tag{3.18}$$

$$A = \frac{d_1(d_2 - f_2) + f_1 f_2 - d_2(f_1 + f_2)}{f_1 f_2} \tag{3.19}$$

$$B = d_1 + d_2 - \frac{d_1 d_2}{f_2} \tag{3.20}$$

$$c = \frac{-f_1 f_2 + d_2(f_1 + f_2) - f_1 f_3 - f_2 f_3 + d_1(-d_2 + f_2 + f_3)}{f_1 f_2 f_3} \tag{3.21}$$

$$D = \frac{d_1(d_2 - f_2 - f_3) + f_2(-d_2 + f_3)}{f_2 f_3} \tag{3.22}$$

Dans ce système en remarque que la distance focale équivalant est donnée par :

$$f_{eq} = -\frac{1}{c} = \frac{f_1 f_2 f_3}{-d_1 + f_1 + f_2} \tag{3.23}$$

Calcul la positon de l'objet $\overrightarrow{O_3A}$ criée par la troisième lentille f_3 , En appliquant la relation suivante :

$$\overrightarrow{O_3A} = -d_2 + \overrightarrow{O_2A'} \tag{3.24}$$

$$\overrightarrow{O_3A} = -d_2 + \frac{\left(1-\frac{d_1}{f_1}\right)\overrightarrow{O_1A} - d_1}{\frac{(f_2-d_1+f_1)}{f_1f_2}\overrightarrow{O_1A}\ 1-\frac{d_1}{f_2}} \tag{3.25}$$

$$= \frac{-d_2f_1f_2 - d_2f_2\overrightarrow{O_1A} + d_2f_1d_1 + d_2d_1\overrightarrow{O_1A} - f_1f_2d_1 + f_1f_2\overrightarrow{O_2A_2'} - f_2d_1\overrightarrow{O_1A} + d_2f_1\overrightarrow{O_1A}}{f_1f_2 + f_2\overrightarrow{O_1A} - f_1d_1 - d_1\overrightarrow{O_1A} + f_1\overrightarrow{O_1A}} \tag{3.26}$$

$$\overrightarrow{O_3A} = \frac{(f_1f_2 - f_2d_1 + d_2f_1 + d_2d_1 - d_2f_2)\overrightarrow{O_1A} - (-d_2f_1d_1 + f_1f_2d_1 + d_2f_1f_2)}{(f_1 + f_2 - d_1)\overrightarrow{O_1A} + f_1f_2 - f_1d_1} \tag{3.27}$$

En calculant la position de l'image $\overrightarrow{O_3A'}$ criée par la deuxième lentille f_3 , pour ce la en utilisant la relation de conjugaison suivante :

$$\frac{1}{\overrightarrow{O_3A'}} - \frac{1}{\overrightarrow{O_3A}} = \frac{1}{f_3} \tag{3.28}$$

$$\Rightarrow \overrightarrow{O_3A'} = \frac{f_3\overrightarrow{O_3A}}{f_3 + \overrightarrow{O_3A}} \tag{3.29}$$

$$\Rightarrow \overrightarrow{O_3A'} = \frac{(f_3f_1f_2 - f_3f_2d_1 - f_3d_2f_1 + f_3d_2d_1 - f_3d_2f_2)\overrightarrow{O_1A} - (-f_3d_2f_1d_1 + f_3f_1f_2d_1 + f_3d_2f_1f_2)}{(f_3f_1 + f_2f_3 - f_3d_1 + f_1f_2 - f_2d_1 - d_2f_1 + d_2d_1 - d_2f_2)\overrightarrow{O_1A} - (f_3f_1f_2 - f_3f_1d_1 - d_2f_1d_1 + f_1f_2d_1 + d_2f_1f_2} \tag{3.30}$$

Par division par le terme $f_3f_1f_2$ on obtient que :

$$\overrightarrow{O_3A'} = \frac{A\overrightarrow{O_1A} - B}{-C\overrightarrow{O_1A} + D} \tag{3.31}$$

3.1.4 Système formé par quatre lentilles.

Dans ce Cas on considère un système optique constitué par quatre lentilles non accolées.

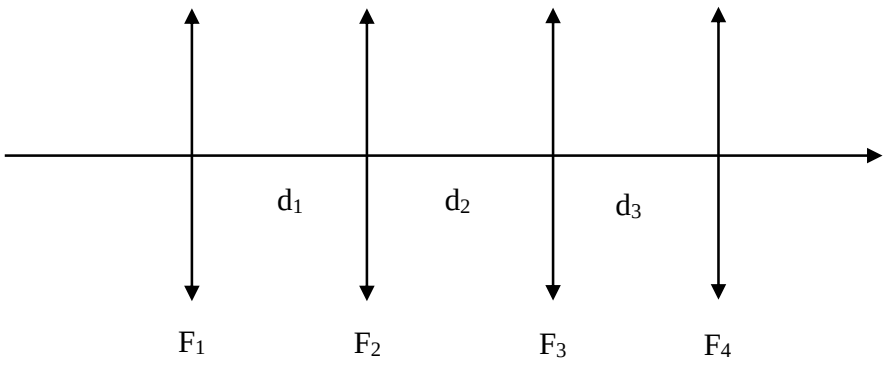


Figure3.4 : Système optique constitué par quatre lentilles non accolées.

La matrice de transfert de ce système est donnée par :

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{-1}{f_4} & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 1 & d_3 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{-1}{f_3} & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{-1}{f_2} & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{-1}{f_1} & 1 \end{pmatrix} \quad (3.32)$$

$$A = \frac{-d_3 f_1 f_{2+} d_2 (f_1 + f_2)(d_3 - f_3) - d_3 f_1 f_3 - d_3 f_2 f_3 + f_1 f_2 f_3 + d_1(-f_2 f_3 + d_2(-d_3 + f_3) + d_3 (f_2 + f_3)}{f_1 f_2 f_3}$$

(3.33)

$$B = \frac{d_1 d_2 (d_3 - f_3) + d_1 f_2 f_3 - d_3 f_2 f_3 + d_2 f_2(-d_3 + f_3) + d_3 d_1 (f_2 + f_3)}{f_2 f_3} \quad (3.34)$$

$$c = d_3 f_1 f_{2+} d_3 f_1 f_3 + d_3 f_2 f_3 - f_1 f_2 f_3 - d_2(f_1 + f_2)(d_3 - f_3 - f_4) - d_3 (f_2 + f_3) f_1 d_3 f_2 + d_3 f_1 f_3 - f_1 f_2 f_3 - d_2(f_1 + f_2) + d_2(f_1 + f_2) - f_1 f_2 f_4 - f_1 f_3 f_4 - f_3 f_2 f_4 - (f_3 + f_2 d_3 + f_3 f_4 + f_2 f_4 + (f_4 + d_3 d_3 + (f_3 f_2 d_1)/f_4 f_1 f_2 f_3 \quad (3.35)$$

$$D = \frac{f_2(d_2(d_3 - f_3 - f_4 + f_3 - d_3 + f_4 + d_1 - f_2 f_3 + d_3(f_2 + f_3 - f_2 f_4 - f_3 f_4 + d_2(d_3 + f_3 + f_4}{f_2 f_3 f_4} \quad (3.36)$$

Dans ce système en remarque que la distance focale équivalant est donnée par :

$$f_{eq} = -\frac{1}{c} \quad (3.37)$$

Calcul la positon de l'image $\overrightarrow{O_4A}$ criée par quatre la lentille f_4 , En appliquant la relation suivante :

$$\overrightarrow{O_4A} = -d_3 + \overrightarrow{O_3A'} = \tag{3.38}$$

$=(-d_3f_3f_1 - d_3f_2f_3 + d_3f_3d_1 - d_3f_1f_2 + d_3f_2d_1 + d_3d_2f_1 - d_3d_2d_1 + d_3d_2f_2)\overrightarrow{O_1A} +$
$(-d_3f_3f_1f_2 + d_3f_3f_1d_1 - d_3d_2f_1d_1 - d_3f_1f_2d_1 + d_3d_2f_1f_2 + (f_3f_1f_2 - f_3f_2d_1 - f_3d_2f_1 +$
$f_3d_2d_1 - f_3d_2f_2)\overrightarrow{O_1A} - (-f_3d_2f_1d_1 + f_3f_1f_2d_1 + f_3d_2f_1f_2)/(f_3f_1 + f_2f_3 - f_3d_1 +$
$f_1f_2 - f_2d_1 - d_2f_1 + d_2d_1 - d_2f_2)\overrightarrow{O_1A} - (f_3f_1f_2 - f_3f_1d_1 - d_2f_1d_1 + f_1f_2d_1 + d_2f_1f_2$
(3.39)$\overrightarrow{O_4A} = (-d_3f_3f_1 - d_3f_2f_3 + d_3f_3d_1 - d_3f_1f_2 + d_3f_2d_1 + d_3d_2f_1 - d_3d_2d_1 + d_3d_2f_2 +$
$f_3f_1f_2 - f_3f_2d_1 - f_3d_2f_1 + f_3d_2d_1 - f_3d_2f_2)\overrightarrow{O_1A} + (-d_3f_3f_1f_2 +$
$d_3f_3f_1d_1 - d_3d_2f_1d_1 - d_3f_1f_2d_1 + d_3d_2f_1f_2 + f_3d_2f_1 - f_3f_1f_2d_1 - f_3d_2f_1f_2)/(f_3f_1 + f_2f_3 -$
$f_3d_1 + f_1f_2 - f_2d_1 - d_2f_1 + d_2d_1 - d_2f_2)\overrightarrow{O_1A} - (f_3f_1f_2 - f_3f_1d_1 - d_2f_1d_1 + f_1f_2d_1 + d_2f_1f_2$
(3.40)

En calculant la position de l'objet$\overrightarrow{O_4A'}$ criée par la quatrième lentillef_4 , pour ce la en utilisant la relation de conjugaison suivante :

$$\frac{1}{\overrightarrow{O_4A'}} - \frac{1}{\overrightarrow{O_4A}} = \frac{1}{f_4} \tag{3.41}$$

$$\Rightarrow \overrightarrow{O_4A'} = \frac{f_4\overrightarrow{O_4A}}{f_4 + \overrightarrow{O_4A}} \tag{3.42}$$

$\Rightarrow \overrightarrow{O_4A'}=(-f_4d_3f_3f_1 - f_4d_3f_2f_3 + f_4d_3f_3d_1 - f_4d_3f_1f_2 + f_4d_3f_2d_1 + f_4d_3d_2f_1 - f_4d_3d_2d_1 +$
$f_4d_3d_2f_2 + f_4f_3f_1f_2 - f_4f_3f_2d_1 - f_4f_3d_2f_1 + f_4f_3d_2d_1 - f_4f_3d_2f_2)\overrightarrow{O_1A} + (-f_4d_3f_3f_1f_2 +$
$f_4d_3f_3f_1d_1 - f_4d_3d_2f_1d_1 - f_4d_3f_1f_2d_1 + f_4d_3d_2f_1f_2 + f_4f_3d_2f_1 - f_4f_3f_1f_2d_1 - f_4f_3d_2f_1f_2)/$
$(f_4f_3f_1 + f_4f_2f_3 - f_4f_3d_1 + f_4f_1f_2 - f_4f_2d_1 - f_4d_2f_1 + f_4d_2d_1 - f_4d_2f_2 - d_3f_3f_1 - d_3f_2f_3 +$
$d_3f_3d_1 - d_3f_1f_2 + d_3f_2d_1 + d_3d_2f_1 - d_3d_2d_1 + d_3d_2f_2)\overrightarrow{O_1A} + (f_4f_3f_1f_2 -$
$f_4f_3f_1d_1 + f_4d_2f_1d_1 + f_4f_1f_2d_1 - f_4d_2f_1f_2 + f_3f_1f_2 - f_3f_1d_1 - d_2f_1d_1 + f_1f_2d_1 + d_2f_1f_2)$
(3.43)

Par division par le terme$f_3f_1f_2f_4$ on obtient que :

$$\Rightarrow \overrightarrow{O_4A'} = \frac{A\overrightarrow{O_1A} - B}{-C\overrightarrow{O_1A} + D} \tag{3.44}$$

On remarque qua la relation de conjugaison peut être généralisée dans un système optique par utilisation du formalisme de l'optique matricielle.

30

3.2 Résultats et discussion.

Dans cette section on considéré un système optique constitué par lentilles minces séparées par un distance.

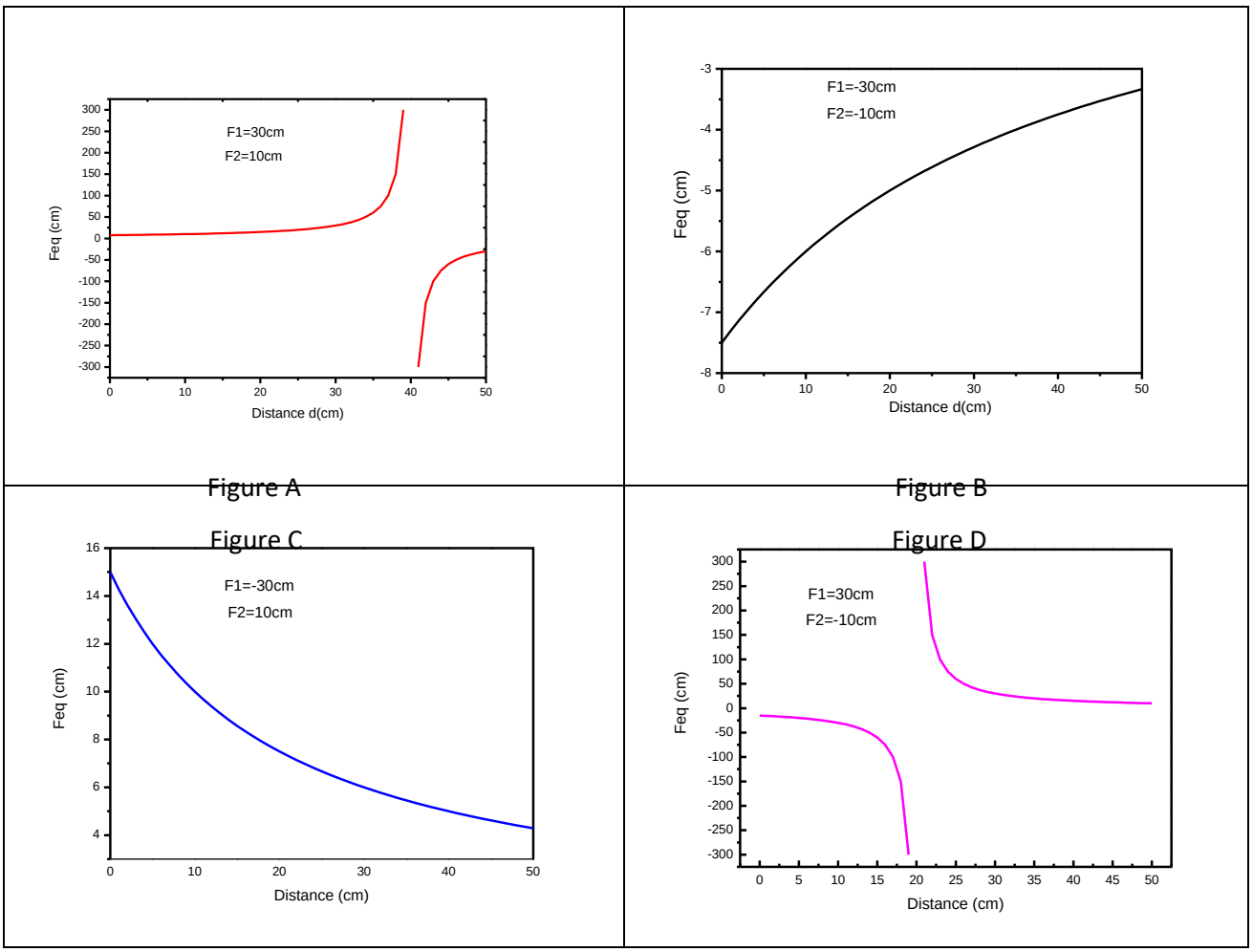


Figure 3.5 :L'allure de la variation de la distance focal équivalente d'un système optique composé par deux lentilles séparées par une distance.

La figure 3.5 : il représente la variation de la distance focales équitante pour un doublet distantes .La figures A : pour que la distance soit comprise entre 0 et 50 cm.la première lentille égale à 30 et la deuxième lentille est égale à 10 cm. En remarquant clairement que pour d'inférieur à 37 cm la distance focale de système est positive c'est –dire le système devient équivalant d'une lentille convergente. Tandis que pour lentilles supérieur à 37 cm la distance focale de système est négative c'est –dire le système devient équivalant d'une lentille divergente. La figures B: De sorte que la distance de deux lentilles est comprise 0 et 50 cm. la première lentille égale à -30 cm et la deuxième lentille est égale à 10 cm. en remarquant la

distance focale de système est négative c'est –dire le système devient équivalant d'une lentille divergente. La figures c: De sorte que la distance de deux lentilles est comprise 0 et 50 cm. la première lentille égale à -30 cm et la deuxième lentille est égale à 10 cm. en remarquant la distance focale de système est positive c'est –dire le système devient équivalant d'une lentille convergente. La figures D: pour que la distance soit comprise entre 0 et 50 cm.la première lentille égale à 30cm et la deuxième lentille est égale à-10 cm. en remarquant clairement que pour d'inférieur à 20cm la distance focale de système est négative c'est –dire le système devient équivalant d'une lentille divergente. Tandis que pour lentilles supérieur à 20 cm la distance focale de système est positive c'est –dire le système devient équivalant d'une lentille convergente.

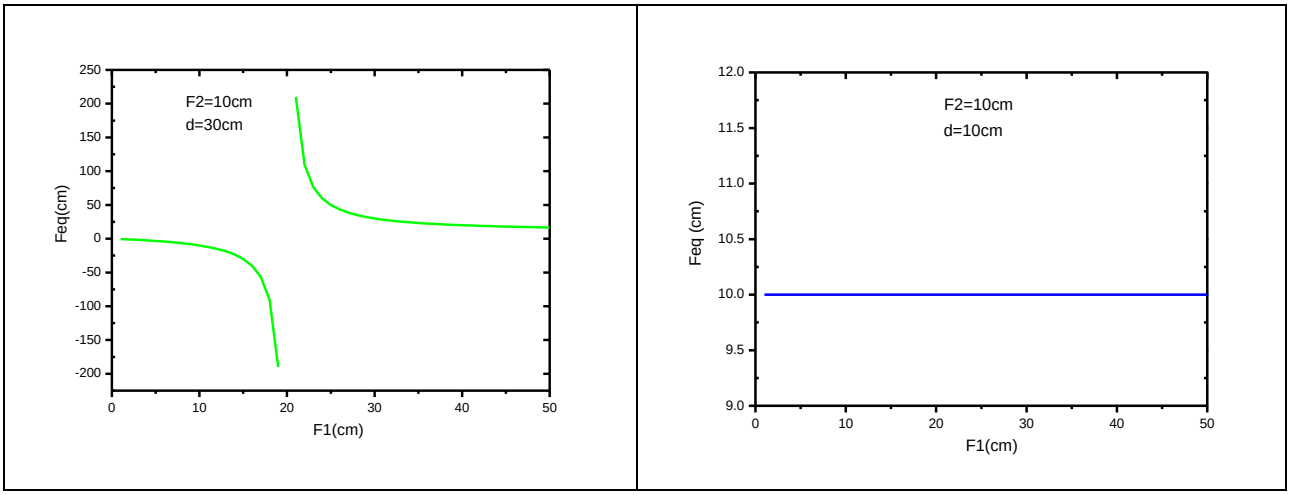


Figure.3.6 L'allure de la variation de la distance focal équivalente d'un système optique composé pardieu lentilles séparées par une distance.

La figure 3. 6: il représente la variation de la distance focal équivalente pour un doublet (deux lentilles) distantes. La figures à gauche tel que la deuxième lentille égale à 10 cm tandis que la première lentille variée entre 0 et 50 cm et distante à la deuxième lentille par d=30 cm, en remarquant clairement que pour d inférieur à 20 cm la distance focale de système est négative c'est-dire le système devient équivalant d'une lentille divergente, tandis que pour d supérieur à 20 cm la distance focale de système est positive c'est-dire le système devient équivalant d'une lentille convergente. Si on considère la distance entre les deux lentilles d égale à 10 cm le système devient équivalant d'une lentille convergente de distante focale F_{eq} constante et égale à 10 cm quel que soit la valeur de la première lentille F_1 comme représente la figue à droite.

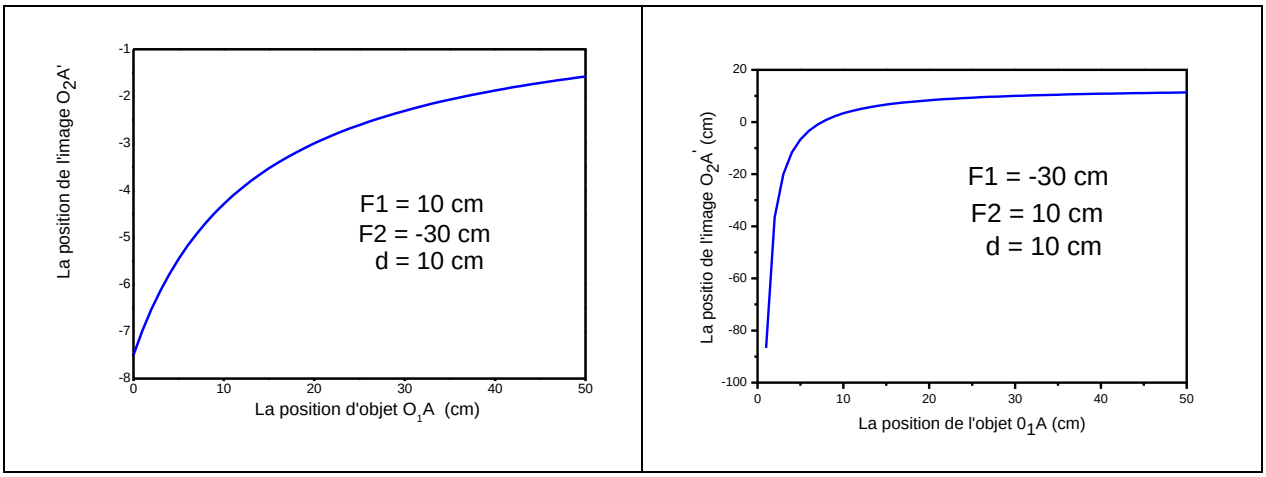
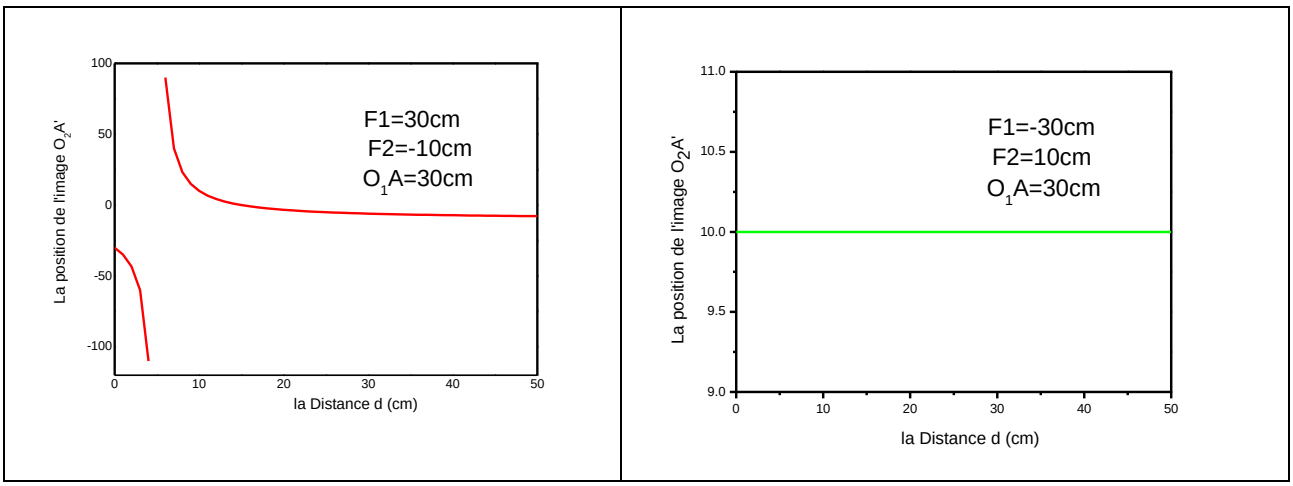


Figure A Figure B

Figure.3.7 :L'allure de la variation de la position d'image d'un système optique composé par deux lentilles séparées par une distance.

La figure 3.7: il représente la variation de la position d'image pour un doublet (deux lentilles) distantes .la figure à gauche tel que la première lentille égale à 10 cm et la deuxième lentille est égale à -30cm tandis que la position de l'objet variée entre 0 et 50 cm et se trouve à 10 cm de l'objectif. En remarquant la distance focale de système est négative c'est –dire le système devient équivalant d'une lentille divergente .la figure à droit tel que la première lentille égale à -30 cm et la deuxième lentille est égale à -10cm, que la position de l'objet variée entre 0 et 50 cm et se trouve à 10 cm de l'objectif. En remarquant la distance focale de système est négative c'est –dire le système devient équivalant d'une lentille divergente.



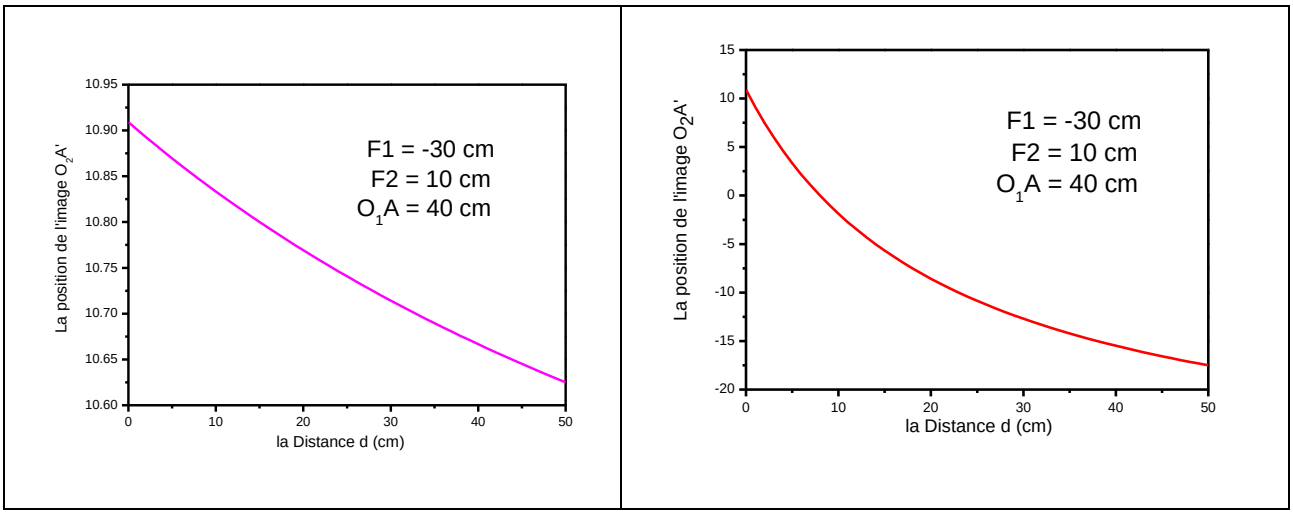


Figure.3.8 L'allure de la variation de la position d'image d'un système optique composé par deux lentilles séparées par une distance

La figure 3. 8: il représente la variation de la position d'image pour un doublet (deux lentilles) distantes. La figures A est à gauche tel que la première lentille est égale à 30 cm et la deuxième lentille est égale à -10 cm tandis que la distance de l'objet variée entre 0 et 50 cm et se trouve à 30cm de l'objectif. en remarquant une position inférieur à 8 cm , la position de l'objet du système est négative c'est-dire le système devient la position de l'image de l'objectif divergente, tandis que pour position de l'objet supérieur à 8cm la position de l'image du système est positive c'est-dire le système devient la position de l'image de l'objectif convergente . la Alors que pour une position supérieure de l'image est positive si l'on considère la position entre les deux lentilles égale à 30 cm, le système devient équivalent aux deux lentilles à position d'image fixe et égale à 10 cm, quelle que soit la valeur de la première lentille -30 cm et de la deuxième lentille -10 cm, comme représenté sur la figure B. La figures C est à la première lentille est égale à -30 cm et la deuxième lentille est égale à 10 cm tandis que la distance de l'objet variée entre 0 et 50 cm et se trouve à 10cm de l'objectif. En remarquant une position inférieur à 10.5 cm, la position de l'image du système est positive c'est-dire le système devient la position de l'image de l'objectif convergente, tandis que pour position de l'objet supérieur à 10.5cm la position de l'objet du système est négative c'est-dire le système devient la position de l'image de l'objectif divergente. La figures D est à la première lentille est égale à -30 cm et la deuxième lentille est égale à 10 cm tandis que la distance de l'objet variée entre 0 et 50 cm et se trouve à 10cm de l'objectif. En remarquant une la position de l'image du système est positive c'est-dire le système devient la position de l'image de l'objectif convergente.

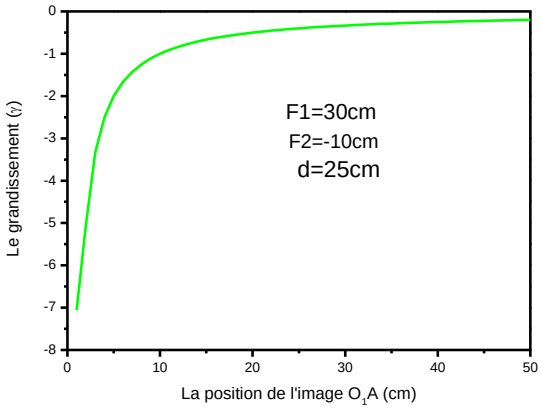


Figure A

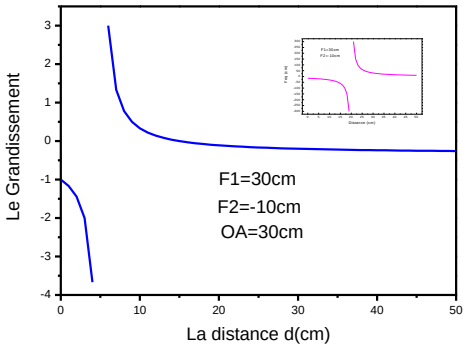


Figure B

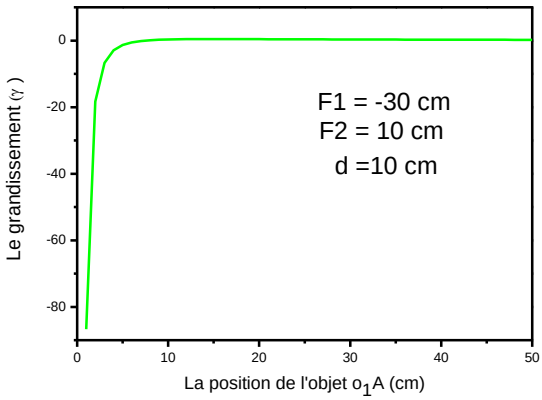


Figure C

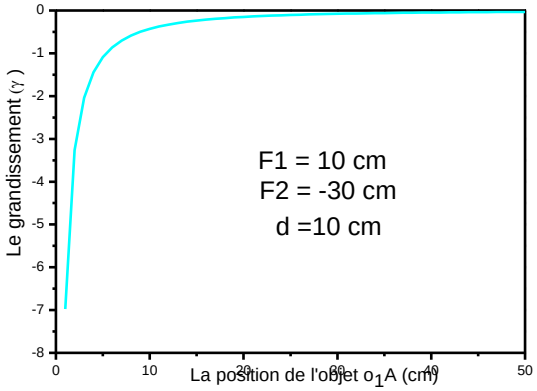


Figure D

Figure.3.9L'allure de la variation du grandissement d'un système optique composé par deux lentilles séparées par une distance.

La figure 3.9 : il représente la variation du grandissement deux lentilles séparées par une distance. La figures A : De sorte que la distance de deux lentilles est comprise 0 et 50 cm. la première lentille égale à 30 cm et la deuxième lentille est égale à -10 cm. en remarquant le grandissement de système est négative c'est –dire le système devient équivalant d'une lentille divergente.. La figures B: pour que la distance soit comprise entre 0 et 50 cm.la première lentille égale à 30cm et la deuxième lentille est égale à-10 cm. en remarquant clairement que pour d'inférieur à 5 cm le grandissement de système est négative c'est –dire le système devient équivalant d'une lentille divergente. Tandis que pour lentilles supérieur à 5 cm la grandissement de système est positive c'est –dire le système devient équivalant d'une lentille convergente. La figures C : De sorte que la distance de deux lentilles est comprise 0 et 50 cm. la première lentille égale à -30 cm et la deuxième lentille est égale à 10 cm. en remarquant le grandissement de système est négative c'est –dire le système devient équivalant d'une lentille divergente. La figures D: De sorte que la distance de deux lentilles est comprise 0 et 50 cm. la première lentille égale à -30 cm et la deuxième lentille est égale à 10 cm. en remarquant le

grandissement de système est négative c'est –dire le système devient équivalant d'une lentille divergente.

Conclusion générale

En conclusion, Ce mémiore de fin d' étude a présenter représente une étude de l'association de lentilles par la méthode d'optique matricielled.

L'objectif principal de notre travail est de permettre au lecteur d'acquérir des connaissances approfondies en étudiant la reformulation de la relation conjugaisonaves la méthode matricielle optique

Dans cette étude,à l'aide des logiciélles mathematica et fortran , nous avons étudié la formule génerale de la relation de conjugaison et le calcul les changements de position de l'image en fonction de la position d'objet dans le systéme optique,qui se compose de deux lentilles (le doublet)non accolées (distantes). Comme nous avons exploitons de la milicien de transfert (ABCD) pour reformuler la relation de conjugaison.

Les résultats obtenus dans cette étude montrent que la relation de conjugaison generale a été trouvée pour un systéme lumineux constitué d'un groupe de lentilles distantes les unes des autres à certaines distances en termes de (ABCD) éléments du systéme lumineux.

Aussi ,sur quatre échantillons (un groupe de lumiére),nous avons conclu que la distance focale est équivalente à la distance et à la qualité des deux lentilles du groupe.

L'objectif principal de notre travail est de permettre au lecteur d'acquérir des connaissances approfondies en étudiant la reformulation de la relation conjugaisonaves la méthode matricielle optique .

Bibliograbhie

[1] BOUDRIOUA ?azzedine . opticien cél ébre .ibn sahl ,le découvrer de la loi de la réfraction 2019.
[2] Tamer Becherrawy .optique géometrique . tous les formats éditions .2007.
[3] H .Boughaleb . optique géometrique.2023 .
[4] Richard taillet .optique géometrique. De Boeck supérieue .2007.
[5] Pascal puech .cour d'optique géométrique et ondulatiore .version 1.2002.
[6] Samai Kamel Meriem KorbAA.les instrmeents d' optique .principes et applications .faculté des scienees et thechnologies .2015.
[7] François Bréhat .Représentation des états de polarisation des ondes lumineuses .*2003*.
[8] Ahmed, Bedja alise. Optique géométrique.2016.
[9] Optique MP –PC –PSI de pierre Bren ders .2005.
[10] Bernard Balland. optique géometrique=imagerie et instruments . Presses polytechiques et universitaires romandes .2007.
[11] Alexandre April.bases de optique géometrique. Editions jean –Francios Dery .2017
[12] Blein (j) . optique géometrique.1913.
[13] Richard taillet .optique géometrique. De Boeck. 2008.
[14] https://youtu.be/My-n1qCMnrc?si=VApGIlOq415khf5M
[15] https://youtu.be/8W8IEkg9Q5Q?si=5XjajUfI5dVjtCOR
[16] https://youtu.be/gDpA99J6EOo?si=V7F4U1dZpx6Nog_I
[17] Balland, B. (2007). Optique géométrique: imagerie et instruments. Suisse: Presses polytechniques et universitaires romandes.
[18] Pierre de félice .Histroire de l'optique .Editions l'harmattan 2009.
[19] Sebbar Djamel . Optique géométrique et ondulatoire ,Polycopie .UYF Médea 2020.
[20] Daniel Blanc ,Jacques Fontan .physique .MP1.PC.optique . réedition numérique feni XX.1970.
[21] https://fsm.rnu.tn/useruploads/cours/ulpcsm/physique/optigeo/apprendre/lentille_mince/associa2.htm
[22] https://uel.unisciel.fr/physique/optigeo/optigeo_ch08/co/apprendre_ch08_10.html