

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE FERHAT ABBAS-SETIF

MEMOIRE

Présenté à l'Institut d'Optique et de Mécanique de Précision

Pour l'Obtention du Diplôme de

MAGISTER

École Doctorale des Technologies et des Applications Spatiales

Option : Optique Spatiale et Mécanique de Précision

Par

LOGHRAB MOHAMED

THEME

ETUDE COMPARATIVE DES METHODES
DE FABRICATION DES SURFACES
ASPHERIQUES

Soutenu le : 09/01/2012

devant la commission d'examen:

| | | |
|------------------------|-------------------------------|------------|
| Said Bouzid | Prof. à l'université de Sétif | Président |
| Djamel Bouzid | Prof. à l'université de Sétif | Rapporteur |
| Said Meguellati | M.C.A à l'université de Sétif | Examineur |
| Toufik Aliouane | M.C.A à l'université de Sétif | Examineur |

Remerciements

Remerciements

Ce travail a été effectué au sein du Laboratoire d'Optique Appliquée.

Mes premiers remerciements s'adressent à mon directeur de recherche Mr Djamel Bouzid, professeur à l'Institut d'optique et de mécanique de précision- Université Ferhat Abbas- Sétif pour la confiance qu'il a su m'accorder, pour sa rigueur et sa pédagogie et pour ses précieux conseils qui m'ont permis de mener à bien ce travail.

Je tiens à remercier Mr Saïd Bouzid, professeur à l'Institut d'optique et de mécanique de précision- Université Ferhat Abbas- Sétif, qui a présidé le jury de soutenance.

Je tiens à remercier très chaleureusement les membres du jury Mr Saïd Meguellati et Mr Toufik Aliouane tous deux Maîtres de Conférence à l'Institut d'optique et de mécanique de précision- Université Ferhat Abbas- Sétif, pour l'attention qu'ils ont porté à mon travail et pour avoir également accepté de participer à la commission d'examen.

Je veux adresser des remerciements à tous les doctorants du laboratoire d'Optique Appliquée et particulièrement Messieurs M. Rahmani, Y. Kerma, A.Hamedî pour leurs collaborations.

Je veux adresser des remerciements à tous les doctorants du laboratoire des systèmes photoniques et optique non linéaire et particulièrement Messieurs M. I. Habia, A. Nouri et N. Fares, A.Adouane pour leurs collaborations.

Merci également à tous mes compagnons de l'institut d'optique et mécanique de précision:

I. Touafek, A. Hemissi et H.Zegadi

Lo. Mohamed

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mes parents.

mon frère et mes sœurs.

et tous ceux qui me sont chers.

| | |
|--|----|
| Introduction générale | 01 |
| Chapitre I. Généralités sur les systèmes optiques | |
| 1. Généralités sur les systèmes optique | 03 |
| 1.1. Systèmes optiques centrés | 04 |
| 1.2. Systèmes optiques parfaits | 04 |
| 1.3. Composants optiques | 06 |
| 1.4. Systèmes dioptriques (réfracteurs) | 08 |
| 1.4.1. Dioptré | 08 |
| 1.4.2. Lentilles | 08 |
| 1.4.3. Prismes | 11 |
| 1.5. Systèmes catoptriques (réflecteurs) | 12 |
| 1.5.1. Miroirs | 12 |
| 1.6. Diaphragme | 13 |
| 1.7. Caractéristiques géométriques des instruments d'optique | 14 |
| Chapitre II Défauts de surface et les aberrations optiques | |
| 2. Défauts de surface et les aberrations optiques | 17 |
| 2.1. Défauts de surface | 17 |
| 2.1.1. Définition d'une surface | 17 |
| 2.1.2. Topographie de la surface | 18 |
| 2.1.3. L'éclairage | 19 |
| 2.1.4. Défauts de forme et d'ondulation | 21 |
| 2.1.5. Effets sur les images | 21 |
| 2.1.6. Défauts de forme | 22 |
| 2.1.7. Différents types de défauts | 23 |
| 2.1.8. Défaut d'ondulation | 23 |
| 2.1.9. Rugosité | 24 |
| 2.1.9.1. Les critères de la rugosité | 24 |
| 2.1.10. Méthodes de mesures et de contrôles de surfaces | 25 |
| 2.1.10.1. Méthodes mécaniques | 25 |
| 2.1.10.2. Mesure tridimensionnelle | 25 |
| 2.1.11. Méthodes optiques | 26 |
| 2.1.11.1. Méthodes de mesure interférométrique | 26 |
| 2.1.11.2. Profilomètre laser | 27 |
| 2.1.11.3. Microscopie confocale | 28 |
| 2.1.12. Microscope électronique à balayage | 29 |
| 2.2. Aberration optique | 30 |
| 2.2.1. Les aberrations chromatiques | 30 |
| 2.2.2. Aberrations géométriques | 31 |
| 2.2.2.1. Aberration sphérique | 32 |
| 2.2.2.2. Coma | 33 |
| 2.2.2.3. Astigmatisme | 35 |
| 2.2.2.4. Distorsion | 35 |
| 2.2.2.5. Courbure de champ | 36 |
| Chapitre III Composant asphérique | |
| 3. Composant asphérique | 38 |
| 3.1. Introduction | 38 |
| 3.2. Définition d'une surface asphérique | 39 |
| 3.3. Surface conique | 40 |
| 3.4. Étapes de fabrication des composants optiques | 42 |
| 3.4.1. Tronçonnage | 42 |
| 3.4.2. Meulage | 42 |
| 3.4.3. Doucissage | 43 |
| 3.4.4. Polissage | 44 |
| 3.5. Méthode de finition des surfaces asphériques | 45 |
| 3.5.1. Technique d'abrasive de fabrication optique | 45 |
| 3.5.2. Processus d'enlèvement de la matière | 45 |
| 3.5.2.1. Polissage à abrasifs en suspension ou libre | 45 |
| 3.5.2.2. Rodage ductile | 46 |

| | |
|--|----|
| 3.5.2.3. Polissages chimique | 48 |
| 3.5.2.4. Polissage par jet d'abrasifs en suspension | 48 |
| 3.5.2.6. Polissage par faisceau ionique | 48 |
| 3.5.2.7. Polissage avec un outil flottant | 48 |
| 3.5.2.8. Polissage laser | 49 |
| 3.5.2.9. Polissage magnetorheologique | 49 |
| 3.6. Méthodes de fabrication des surfaces asphériques | 51 |
| 3.6.1. Meulage de haute précision | 51 |
| 3.6.2. Moulage de précision | 52 |
| 3.6.3. Technique de fabrication des lentilles hybrides | 52 |
| 3.6.4. Usinage par commande numérique | 53 |
| 3.7. Mesure des surfaces asphériques | 56 |
| 3.7.1. Options métrologiques actuellement disponibles | 56 |
| 3.7.1.1. Les systèmes tactiles | 56 |
| 3.7.1.2. Les systèmes à compensation | 56 |
| 3.7.1.3. Les systèmes à couplage de zone | 57 |
| 3.7.4. Contrôle les surfaces asphériques | 57 |
| 3.7.5. Interféromètre de contrôle des optiques asphériques | 58 |
| 3.7.6. Système de mesure de conversion de coordonnées polaires | 59 |
| 3.8. Application des composants asphériques | 60 |

Chapitre IV Etude expérimentale

| | |
|--|----|
| 4.1. L'objectif recherché | 61 |
| 4.2. Réalisation de moule | 61 |
| 4.2.1. Matériaux de moule | 61 |
| 4.2.2. Conception du moule | 62 |
| 4.3. Réalisation des lentilles sphériques | 64 |
| 4.3.1. Meulage | 64 |
| 4.3.2. Rodage les lentilles sphériques | 65 |
| 4.4. Déroulement de la réalisation de la lentille asphérique | 66 |
| 4.4.1. La forme | 66 |
| 4.4.2. Contrôle de profile de la surface | 68 |
| 4.4.3. Mesure des rayons de la surface asphérique | 69 |
| 4.5. Contrôle de la rugosité | 71 |
| Conclusion générale | 73 |
| Bibliographie | 75 |

Introduction générale

Introduction générale

Introduction générale

Dans des domaines aussi divers que les semi-conducteurs, l'aérospatial, ou l'électronique de grande consommation, l'amélioration des performances des équipements, et aussi de leur qualité, repose aujourd'hui sur l'utilisation d'optiques asphériques. En effet, outre la capacité d'obtenir de meilleures performances, les optiques asphériques offrent au concepteur opticien un degré de liberté supplémentaire par le simple fait de la réduction du nombre des composants d'un système, ce qui conduit à l'augmentation de la transmission lumineuse ainsi qu'à la diminution du poids et du coût du système considéré.

Ce type de lentilles couvre ainsi une gamme s'étendant de moins de un millimètre à plusieurs centaines de millimètres, avec des précisions allant de quelques microns au sub-nanométrique. Cependant, l'utilisation à grande échelle des optiques asphériques a été freinée dès l'origine, par la difficulté à les qualifier avec le niveau de précision requis. Depuis de nombreuses années, il existe en effet différentes méthodes de fabrication des optiques asphériques comme l'usinage diamant, le polissage à outil ponctuel, le polissage ionique, le polissage assisté par ordinateur, ou encore le moulage de précision. Mais la réussite de ces technologies dépend en fait des capacités de la métrologie associée.

L'objectif essentiel de ce travail consiste à étudier et comparer théoriquement les différentes méthodes utilisées dans la technologie de fabrication des surfaces asphériques.

Ce mémoire est constitué de quatre chapitres :

Le premier chapitre présente d'abord les généralités sur les systèmes optiques en montrant ses différentes caractéristiques. Le second chapitre, est consacré à l'étude de défauts de surface optique tels que les défauts de forme, d'ondulation, et de rugosité qui réduisent la qualité d'image, ainsi les aberrations optiques et leurs effets sur les images en expliquant les deux types fondamentaux des aberrations ; les aberrations chromatiques qui sont dues aux matériaux des composants optiques constituant le système optique et à la lumière poly-chromatique, et les aberrations géométriques

Introduction générale

(L'aberration sphérique, la coma, l'astigmatisme, la courbure de champ, et la distorsion) qui sont liées à la géométrie des composants optiques et à l'angle de champ de l'objet.

Dans le troisième chapitre on définit les composants asphériques et différentes méthodes utilisées dans la technologie de fabrication des surfaces asphériques. Le quatrième chapitre est réservé à l'étude expérimentale, les résultats obtenus et leur discussion.

Chapitre I

*Généralités sur les systèmes
optiques*

1. Généralités sur les systèmes optiques

L'étude des systèmes optiques est fondée sur la notion d'image d'un objet lumineux, donc le but recherché dans l'emploi d'un système optique est en général de former une image d'un objet qu'il est difficile d'observer directement, cette image étant la représentation la plus fidèle possible de l'objet.

Un système optique parfait est un système stigmatique. C'est à dire que la lumière entre dans ce système sous forme de faisceau, et en ressort sous forme de faisceau identique, mais, la plupart des systèmes optiques sur le marché ne peuvent être rigoureusement stigmatiques que pour un seul couple de points (points conjugués) et ont plutôt un certain degré d'astigmatisme, et le système idéal reste encore à venir. Le mieux que l'on puisse faire est un système qui se rapproche le plus des conditions idéales, c'est à dire on peut dans certaines conditions, assurer un stigmatisme approché, permettant d'obtenir des images de qualités. Ces conditions, appelées conditions paraxiales ou conditions de Gauss. Mais, les systèmes optiques ne travaillent que très rarement dans les conditions de l'optique paraxiale. Et dès que l'on s'en écarte, un système optique centré perd ses propriétés de stigmatisme et d'aplanétisme, ces écarts à l'optique de Gauss sont nommés aberrations.

Certains systèmes centrés utilisent aussi d'autres surfaces de révolution, par exemple des miroirs paraboliques. Le recours à de telles surfaces, dites asphériques, est fréquent dans la construction des télescopes ou celle des condenseurs de projecteurs dont certains éléments ne sont pas taillés mais moulés. On rencontre encore des surfaces asphériques dans un petit nombre d'objectifs photographiques de haute qualité ou dans les lentilles en plastique moulé des appareils de bas de gamme.

Dans ce premier chapitre, on donne des définitions sur les systèmes optiques, et ses différentes caractéristiques.

1.1. Systèmes optiques centrés

Un système optique est une succession de milieux transparents et homogènes séparés par des dioptres ou des miroirs. S'il existe également un axe de symétrie par révolution, alors le système est dit centré, et l'axe de révolution est appelé l'axe principal optique. La propriété des systèmes centrés c'est: tout rayon arrivant suivant l'axe optique, n'est pas dévié. Pour avoir cette propriété, tous les dioptres et/ou miroirs sphériques utilisés pour fabriquer un système centré devront être centrés sur cet axe. Donc, il faut que les centres de courbure des différents dioptres sphériques du système soient alignés. Si cette condition n'est pas réalisée, les excentrement produisent des altérations de l'image analogues aux aberrations géométriques classiques.

1.2. Systèmes optiques parfaits

Un système optique parfait est un système qui remplit la condition de stigmatisme et forme une image parfaite comme le montre la figure 1.1, où tous les rayons issus d'un point quelconque doivent, après avoir traversé l'instrument, passer par un même point \hat{A} . On dit alors que \hat{A} est l'image de A ou encore que les points A et \hat{A} sont conjugués. Et le chemin optique ($A\hat{A}$) de tous les rayons allant de A à \hat{A} , soit constant. En appliquant la loi du retour inverse de la lumière, on sait que A est aussi l'image de \hat{A} par le système optique utilisé en sens inverse, et on dit qu'il y a stigmatisme rigoureux avec le système optique pour le couple de points (A, \hat{A}) . Donc, On note que tout système optique réalise une correspondance entre l'objet et l'image est un système optique parfait et peut être considéré comme une boîte noire.

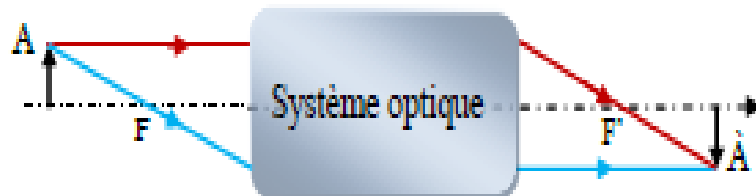


Fig .1.1 : Formation d'image d'un système optique parfait

En réalité, les systèmes optiques ne donnent pas une image stigmatique, mais distribuent plutôt la lumière autour ou au voisinage de cette image stigmatique. Ce que l'on appelle la fonction d'étalement de point (FEP) dite aussi PSF (suivant la terminologie anglaise pour Point Spread Function). Donc, l'image n'est plus ponctuelle et des aberrations géométriques indépendantes les unes des autres apparaissent alors, déformant ou modifiant l'image [Dao10].

✓ Stigmatisme

Un système optique est stigmatique (voir la figure 1.2) si l'image A' qu'il forme d'un objet A est un point. Autrement dit il est stigmatique, si tout rayon provenant de A passe rigoureusement par A' . La plupart des instruments d'optique utilisés (lentilles, miroirs, ...) ne forment pas parfaitement l'image des objets, c'est-à-dire que les rayons issus A ne passent pas tous par A' . Si c'était le cas on aurait un stigmatisme rigoureux. Mais ces instruments permettent toutefois d'avoir des images de relativement bonne qualité. On parle alors de stigmatisme approché.

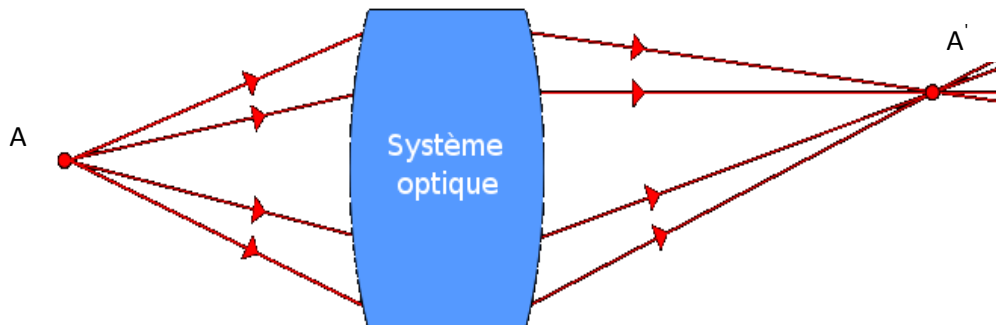


Fig.1.2: Stigmatisme

✓ Aplanétisme

Un système centré d'axe optique Δ est dit aplanétique (voir la figure 1.3) si tout objet $AB \perp \Delta$ a pour image $A'B' \perp \Delta$.

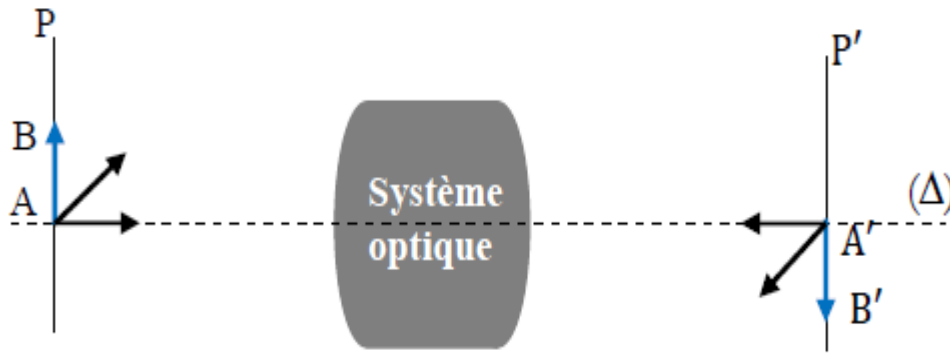


Fig.1.3:Aplanétisme

1.3. Composants optiques

Les composants optiques (lentilles, miroirs) sont utilisés dans des systèmes optiques pour la manipulation de la propagation des rayons lumineux. Elles influencent les propriétés d'un faisceau lumineux incident, la phase et de ce fait la direction de la propagation, de l'intensité et de l'état de polarisation. Ceci influence des caractéristiques des composants optiques comme énuméré dans Tableau.1.1. Toutes ces caractéristiques doivent être définies lors de la conception optique et doivent être réalisés lors de la production du composant optique. Ce processus de production peut être divisé en deux parties: la production chimique et physique de la matière et le façonnage mécanique de la composante. Lors de la conception optique et la production de la matière, la plupart des caractéristiques du composant sont traitées de manière à ce que les techniques de fabrication optique seulement doivent contrôler l'exactitude de forme, l'aspérité et la quantité de sub-surface dommage [Oli99].

Tableau 1.1. Caractéristiques des composants optiques et leurs influences sur la performance optique. [Oli99]

| Caractéristiques des composants optiques | Influence à sa performance optique |
|---|---|
| l'angle d'incidence | la déviation d'alignement d'un composant optique dans un système optique cause des aberrations optiques (par exemple le coma) |
| Diamètre | Détermine la taille limitée de diffraction du foyer |
| forme extérieure | aberrations géométriques (surface sphérique) |
| Exactitude de forme | la forme imprécise cause des aberrations géométriques |
| la rugosité | perte de contraste de formation d'image |
| Absorption | peut causer la perte de lumière dans le système optique |
| Réflexion | peut causer la perte de lumière dans le système optique et produire des images flous |
| Transmission | change l'intensité du rayon lumineux |
| Dispersion | cause des aberrations chromatiques (la dispersion) |
| effort mécanique | la quantité d'effort détermine des effets de polarisation |
| densité du matériel | les inhomogénéités causent les changements non désirés à l'absorption et à l'indice de réfraction et changent la phase et l'intensité du rayon lumineux |
| inhomogénéité chimique et physique du matériel | la cause d'inhomogénéités change par l'indice de réfraction, la réflexion, la phase du rayon lumineux, etc. |
| sensibilité aux influences environnementales (la température, vibrations mécaniques, pression, rayonnement, humidité, contamination (par exemple la poussière) | limite la vie du composant optique ; change la subsurface dommage, rugosité et la précision |

1.4. Systèmes dioptriques (réfracteurs)

Les systèmes dioptriques sont des systèmes optiques qui ne possédant que des surfaces réfractant (lentilles, prismes), comme les lunettes astronomiques.

1.4.1. Dioptre

Un dioptre désigne une surface séparant deux milieux transparents homogènes et réfringents ayant des indices de réfraction différents.

Le dioptre sphérique (voir la figure 1.4) on désigne par C le centre de courbure est donc souvent limité à une calotte sphérique dont le pôle O constitue le sommet du dioptre et l'angle W définit l'ouverture, CO l'axe principale, CS un axe secondaire.

Un dioptre peut être utilisé pour former l'image d'un objet, le faisceau incident peut être réfracté ou réfléchi lors de la rencontrer de l'interface et forme l'image de l'objet. Le faisceau après réfraction ou réflexion peut être divergent ou convergent.

[Arm171].

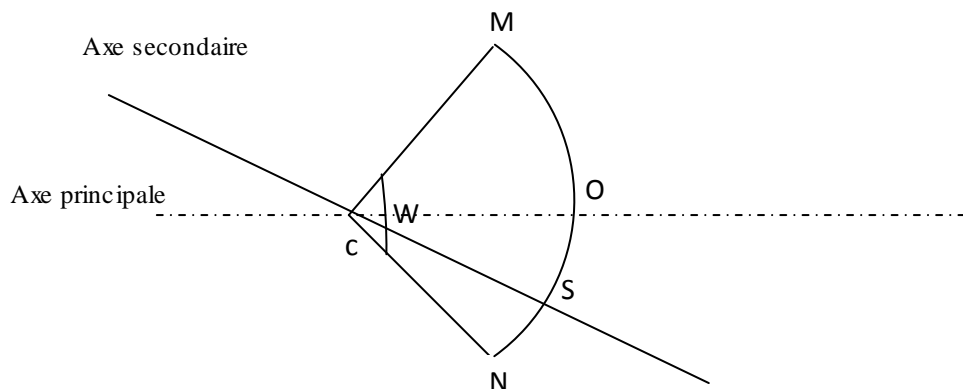


Fig.1.4:Dioptre sphérique

1.4.2. Lentilles

Elles sont composées d'un milieu transparent d'indice n compris entre deux dioptres de rayon R_1 et R_2 comme l'illustre la figure 1.5. L'axe de la lentille passe par les centres de courbures des faces. Cet axe coupe les dioptres en leurs sommets S_1 et S_2 . $e = S_1S_2$ est l'épaisseur au sommet de la lentille.

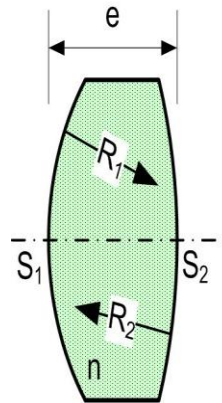
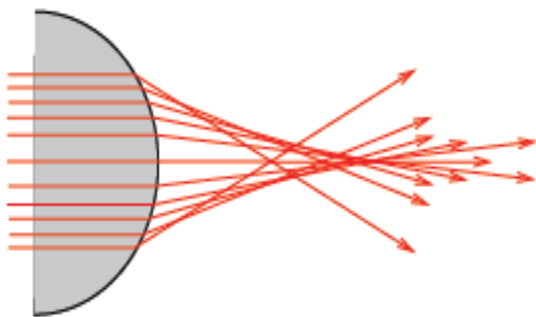


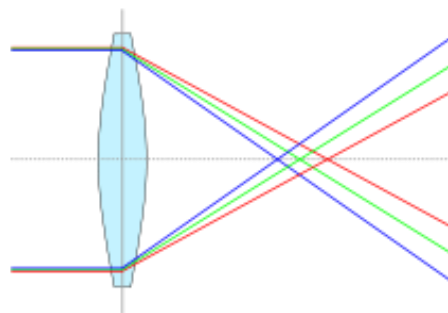
Fig1.5: Représentation de la lentille

a) Lentille mince

Une lentille mince est formée par l'association de deux dioptrés sphériques. La distance entre ces deux dioptrés est négligeable. L'équation de conjugaison des lentilles minces est obtenue par la combinaison des équations des dioptrés sphériques ou on néglige la distance comprise entre les deux interfaces. L'image d'un point n'est pas rigoureusement un point. On dit que la lentille présente des aberrations géométriques (voir la figure 1.6a). L'indice variant avec la longueur d'onde (phénomène de dispersion), la lumière rouge n'aura pas le même comportement que la lumière bleue (voir la figure 1.6b). Ainsi, en lumière polychromatique, l'image que donne une lentille sera irisée, on parle alors d'aberrations chromatiques.



(a) Aberrations géométriques



(b) Aberrations chromatiques

Fig.1.6: Aberrations des lentilles

b) Approximation de Gauss

Les défauts des lentilles s'observent surtout quand les rayons sont très inclinés par rapport à l'axe optique ou très éloigné de l'axe optique. Pour se rapprocher d'un comportement idéal des lentilles, on suppose que les rayons sont peu inclinés et proches de l'axe optique : c'est l'approximation de Gauss ou l'approximation paraxiale. Dans ce cadre, on admet que

1. les lentilles sont stigmatiques : l'image d'un point est un point. C'est ce qui permet la formation des images.
2. les lentilles sont aplanétiques : l'image d'un objet perpendiculaire à l'axe optique est perpendiculaire à l'axe optique.

c) Notion de foyers

Dans le cadre de l'approximation de Gauss, l'image d'un point est un point. Deux points jouent un rôle particulier dans les lentilles : il s'agit des foyers objet et image (voire la figure 1.7).

Foyer image : l'image d'un point à l'infini sur l'axe est le foyer image F'

Foyer objet : un point à l'infini sur l'axe est l'image du foyer objet F .

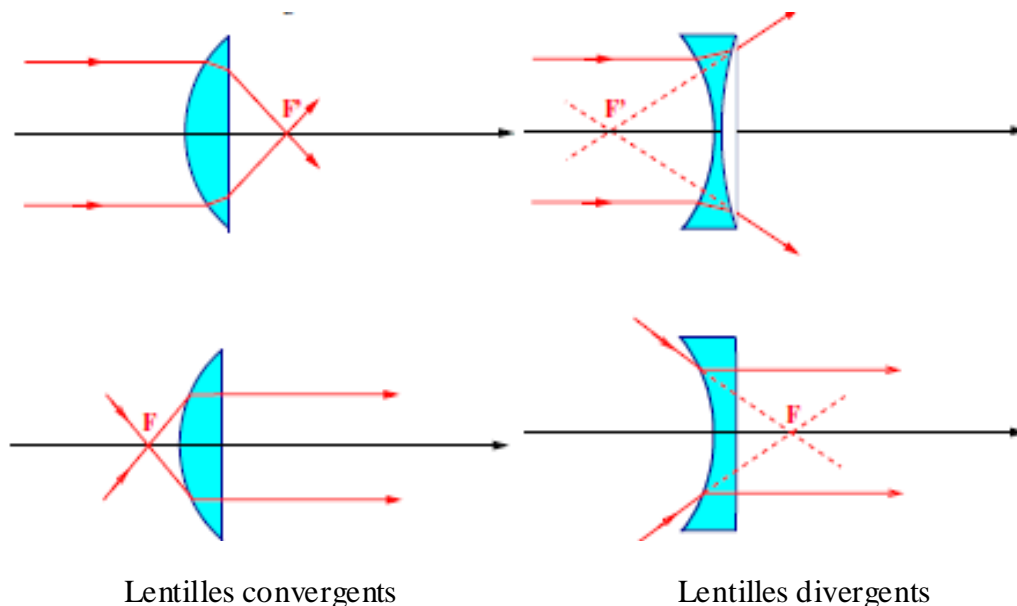


Fig 1.7: Notion des foyers

1.4.3. Prismes

Un prisme (voir la figure 1.8) est un milieu réfringent d'indice de réfraction n , homogène et isotrope, limité par deux dioptries plans formant un dièdre. Un dièdre est une figure constituée par deux plans limités par une arête commune. L'angle A du dièdre est appelé angle de sommet du prisme [Mö107].

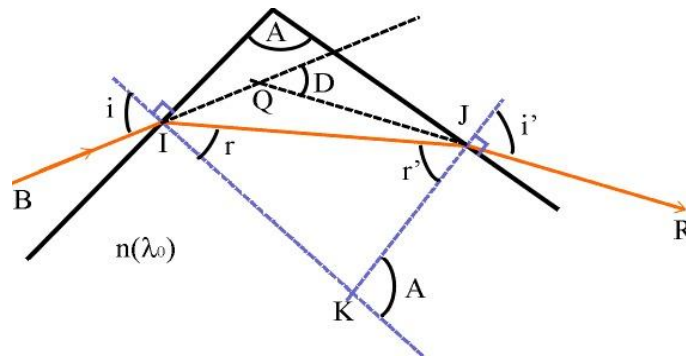


Fig: 1.8: Représentation de prisme

Dioptrie en I $\sin i = n \sin r \dots\dots\dots(1.1)$

Dioptrie en J $n \sin r' = \sin i' \dots\dots\dots(1.2)$

Triangle IJK : l'angle IKJ est égal à $\pi - A$ donc $A = r + r' \dots\dots\dots(1.3)$

L'angle de déviation D défini comme l'angle entre le rayon émergent JR et le rayon incident BI peut être déterminé en examinant le triangle IJQ , où l'on a la relation :

$(i - r) + (i' - r') + (\pi - D) = \pi$ soit $D = i + i' - A \dots\dots\dots(1.4)$

La présence d'un prisme dans un système optique a beaucoup d'effets. Parmi ces effets on peut mentionner ce qui suit [Men04, Mal04].

1. plier l'axe optique ;
2. déplacer, dévier, ou réorienter un faisceau de lumière et inverser l'image ;
3. disperser la lumière de différentes longueurs d'onde ;
4. Les tailles limitées de leurs faces peuvent agir en tant qu'arrêts, limitant l'extension latérale du faisceau lumineux ;

5. Quelques contributions d'aberration sont ajoutées, principalement l'aberration sphérique et l'aberration chromatique axiale, même avec les faces plates.

1.5. Systèmes catoptriques (réflecteurs)

La conception de grandes lentilles est très onéreuse en plus d'être lourdes et de causer des problèmes mécaniques. De plus, l'autre principal défaut des lentilles, réside dans la qualité imparfaite des images. C'est pourquoi aujourd'hui, on utilise surtout des systèmes à miroir, appelés les systèmes catoptriques.

Ils sont donc des systèmes optiques qui ne possèdent que des surfaces réfléchissantes (que des miroirs) comme les télescopes [Les03].

1.5.1. Miroirs

Les miroirs de qualité optique sont généralement composés d'une surface de verre polie plane, convexe ou concave sur laquelle a été déposé un traitement réfléchissant.

a) Miroir plan

Soit un point objet A et H sa projection sur le miroir. La prolongation du rayon réfléchi coupe la droite AH en un point A' . Sur la figure 1.9 on montre aisément que, si les valeurs absolues de i_1 et i_2 sont égales, celles de i_3 et i_4 le sont aussi et $HA=HA'$.

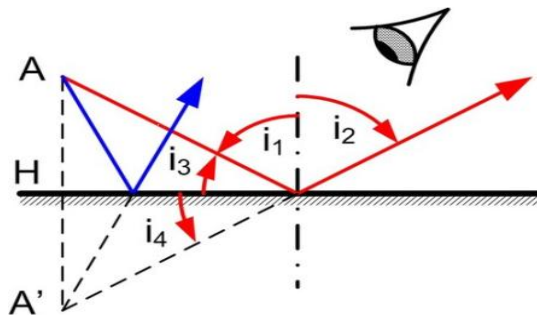


Fig.1.9: Miroir plane. [Warr08]

b) Miroir sphérique

Les miroirs sphériques (voire la figure 1.10) sont des portions de calottes sphériques. Ils peuvent être concaves ou convexes. On note souvent C le centre de la sphère et R son rayon. Dans le cas d'un système centré, on peut placer un miroir sphérique dont le

centre est sur l'axe optique (on a ainsi la symétrie par révolution). L'intersection S entre le miroir et l'axe optique est appelée sommet du miroir. Les rayons lumineux arrivant sur un miroir sphérique sont réfléchis conformément aux lois de Descartes [Warr08].

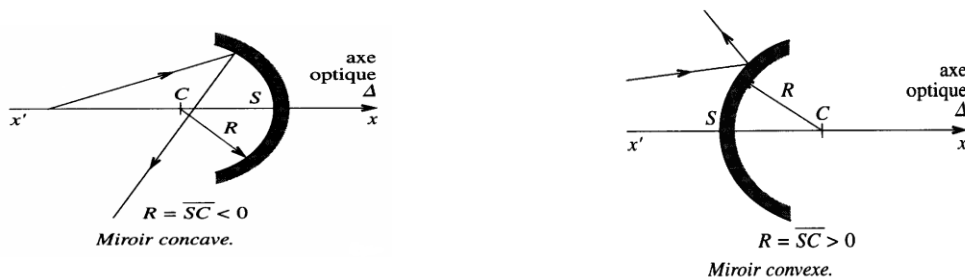


Fig.1.10 : Miroir sphérique [Warr08].

c) Miroir parabolique

Un miroir parabolique (voir la figure 1.11) est un miroir dont la forme est une portion de paraboloïde de révolution. Les miroirs paraboliques concaves sont beaucoup utilisés soit pour produire des faisceaux de lumière parallèles, notamment dans des projecteurs, soit pour recueillir la lumière provenant d'une source lointaine et la concentrer en son foyer.

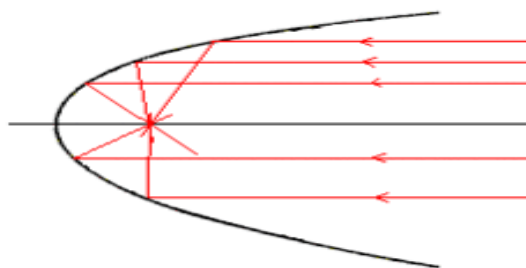


Fig1.11: Profil d'un miroir parabolique

1.6. Diaphragme

a) Diaphragme d'ouverture

Il limite l'angle des rayons entrant, donc le flux lumineux. Les images du diaphragme d'ouverture dans l'espace objet et l'espace image sont appelées respectivement la

pupille d'entrée PE est la pupille de sortie PS. Il est indispensable de connaître ces pupilles pour la prise en compte de facteurs de performance tels que la quantité totale de lumière atteignant l'objectif, la manière dont l'image est rendue floue et les aberrations [Mal04].

b) Diaphragme de champ

C'est une ouverture qui limite la taille angulaire des objets pouvant être vus par le système optique. En suivant le chemin du rayon principal dans la figure 1.12, on peut voir un rayon principal à partir d'un point dans l'objet qui est plus loin de l'axe serait empêché du dépassement par le système par le deuxième diaphragme, qui est le diaphragme de champ de ce système. Les images de diaphragme de champ dans l'espace d'objet et d'image s'appellent respectivement les lucarnes d'entrée et de sortie. Le champ visuel angulaire est déterminé par la taille du diaphragme de champ, et il est l'angle que la lucarne d'entrée ou de sortie passe par le centre de la pupille d'entrée ou de sortie, respectivement. Le champ angulaire dans l'espace d'objet est fréquemment différent de celui dans l'espace d'image [Smi00].

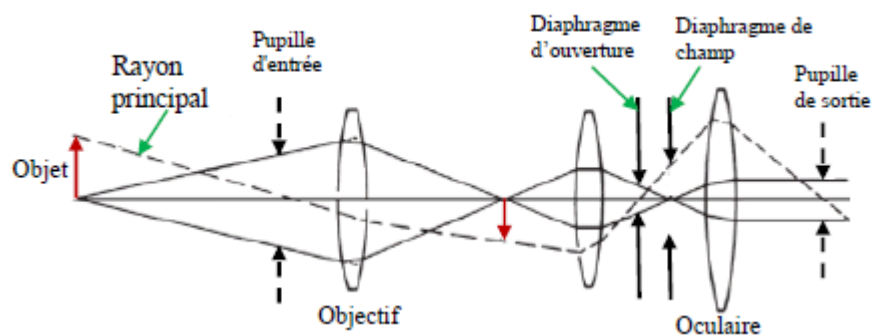


Fig.1.12: Principe d'un système optique pour illustrer le diaphragme d'ouverture et de champ et la relation entre eux

1.7. Caractéristiques géométriques des instruments d'optique

Les caractéristiques de l'image donnée par l'instrument, doivent être adaptées au récepteur qui permet d'analyser cette image. Le choix d'un instrument dépend essentiellement de l'objet lui-même, grand ou petit, éloigné ou proche et du type d'image recherchée, agrandie ou réduite, réelle ou virtuelle. Une association de lentilles permet de corriger les défauts des objectifs, d'obtenir des effets spéciaux, de modifier les grossissements, etc. Dans les

instruments de prise de vue ou de projection, les récepteurs des images sont des films, des détecteurs CCD, des écrans. La dernière image doit alors être réelle. Pour l'observation des images par un instrument visuel (loupe, jumelles, etc..) le dernier des systèmes optiques est l'œil. La dernière image produite par le système optique sera l'objet pour l'œil. Tous les éléments constitutifs d'un instrument d'optique doivent avoir le même axe optique ; cet axe optique est l'axe de l'instrument. On appelle «objectif» une combinaison de lentilles donnant de l'objet une image réelle, et «oculaire» l'instrument ou la partie d'instrument donnant une image virtuelle, observée à son tour par l'œil ou un autre instrument d'optique. L'ensemble des caractéristiques définies ci-dessous le sont en toute rigueur dans les conditions de Gauss.

a) Grandissement

Pour un couple objet AB et image A'B' conjugués par un système optique, on appelle grandissement la grandeur :

$$\gamma = \frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}} \dots\dots\dots(1.5)$$

Pour une lentille mince de centre O, on peut également montrer que

$$\gamma = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}} \dots\dots\dots(1.6)$$

Ainsi, si $\gamma > 0$, l'image est droite, et si $\gamma < 0$, l'image est renversée.

De plus, si $|\gamma| < 1$, l'image est réduite, et si $|\gamma| > 1$, l'image est agrandie.

b) Diamètre apparent

Le diamètre apparent α est l'angle sous lequel l'œil de l'observateur voit un objet réel AB directement (voir la figure 1.13).

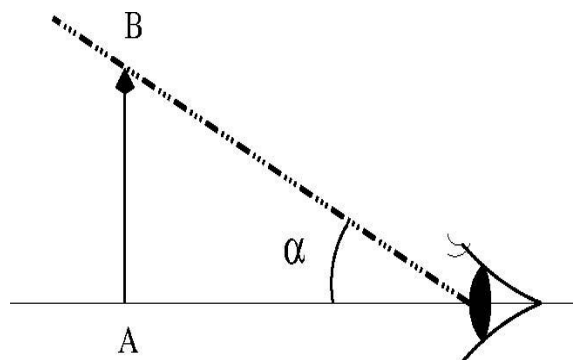


Fig : 1.13 : Représentation l'angle d'observation

On appelle α' le diamètre apparent sous lequel l'observateur placé au même endroit voit $A'B'$ l'image de AB à travers un instrument.

c) Grossissement

Le grossissement est le rapport du diamètre apparent de l'image $A'B'$ donnée par l'instrument au diamètre apparent de l'objet AB . C'est un nombre sans dimension.

$$G = \frac{\alpha'}{\alpha} \dots\dots\dots(1.7)$$

Dans les conditions de Gauss les angles sont petits. On a donc en première approximation $\alpha' \simeq \tan \alpha'$ et $\alpha \simeq \tan \alpha$, les angles étant exprimés en radians

d) Puissance

La puissance exprime l'angle sous lequel on voit l'image en fonction de la taille de l'objet. P est le rapport :

$$P = \frac{\alpha'}{AB} \dots\dots\dots(1.8)$$

où α' en radians, AB en mètres, P en dioptries (m^{-1}). Les notions de puissance et de grossissement ne sont pas caractéristiques de l'instrument tout seul. Elles dépendent aussi des positions de l'objet et de l'observateur par rapport à l'instrument.

Chapitre II

*Défauts de surface et les
aberrations optiques*

2. Défauts de surface et les aberrations optiques

L'instrument d'optique parfait transforme une surface d'onde incidente plane ou sphérique en une surface d'onde le plus souvent sphérique. Les aberrations ou les défauts des surfaces qui le composent altèrent la forme de l'onde émergente : l'onde oscille de part et d'autre d'une sphère moyenne. Les écarts de forme doivent être inférieurs aux tolérances définies par le calculateur [Mar00]. Ce chapitre est consacré aux effets des défauts de forme, d'ondulation, de rugosité et des défauts locaux sur la qualité des images. On donne aussi des généralités sur les différents types des aberrations, les causes qui engendrent ces aberrations et ces influences sur l'image formée.

2.1. Défauts de surface

2.1.1. Définition d'une surface

La surface d'un corps solide est la partie de ce solide qui le limite dans l'espace et le sépare du milieu environnant, elle est prépondérante pour assurer des fonctions telles que :

- ✓ l'aptitude aux frottements
- ✓ la résistance à l'usure ou à la corrosion
- ✓ conduction thermique ou électrique
- ✓ résistance aux contraintes mécanique
- ✓ étanchéité statiques ou dynamiques...etc.

La surface d'un solide constitue une recherche spécifique et un problème de conception. Le concept de la surface est perceptible et compréhensible par intuition, il est cependant très difficile à définir et à comprendre de façon bien précise, habituellement la définition des surface n'est pas claire, en effet ce concept a été défini de plusieurs manière selon la discipline de la science ou de la technologie de l'objet à étudier. La surface d'un solide est habituellement caractérisée par une structure et des propriétés qui diffèrent de l'intérieur du matériau [Lak10].

2.1.2. Topographie de la surface

La forme ou la topographie d'une surface joue un rôle très important pour le fonctionnement de différents types des pièces. Elle dépend du processus utilisé pour le formage, soit le moulage, la coupe et l'abrasion. Comme le montre la figure 2.1, cela est souvent observé microscopiquement comme une série d'aspérités plutôt qu'une surface plate vue macroscopiquement [Ali07].

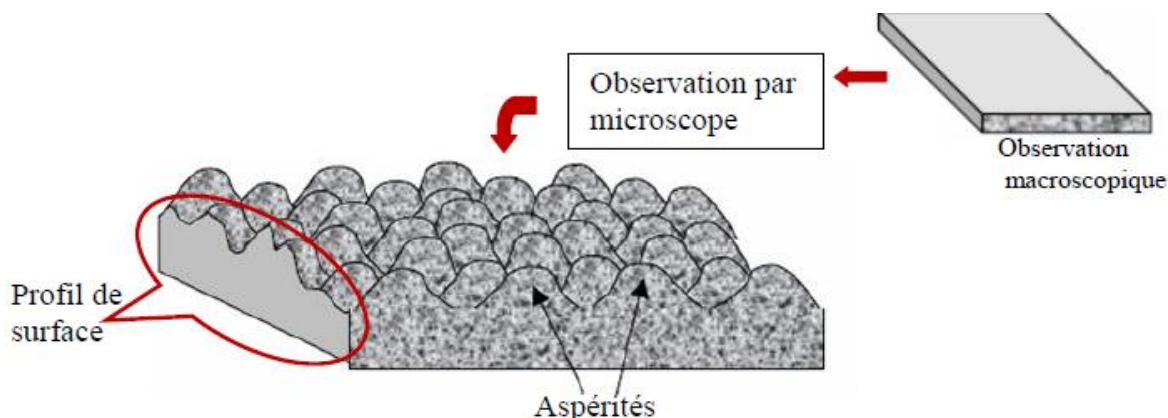


Fig.2.1: Observation microscopique d'une surface relevant une surface irrégulière (surface polie) [Ali07].

La texture géométrique de la surface peut être caractérisée par son profil de la surface, et les résultats de trois composants différents de la texture de la surface (rugosité, ondulation et écart de forme). Souvent, la rugosité et le défaut d'ondulation sont les plus utilisés pour définir la texture de la surface que l'écart de forme.

Un profil de surface est la courbe résultant de l'intersection de la surface réelle et d'un plan spécifié. Ce plan est perpendiculaire à la surface de l'échantillon. Un profil de surface, outre la forme nominale de la pièce, est composé de différents écarts géométriques comme le représente la figure 2.2, auxquels correspondent différents profils [Bou00].

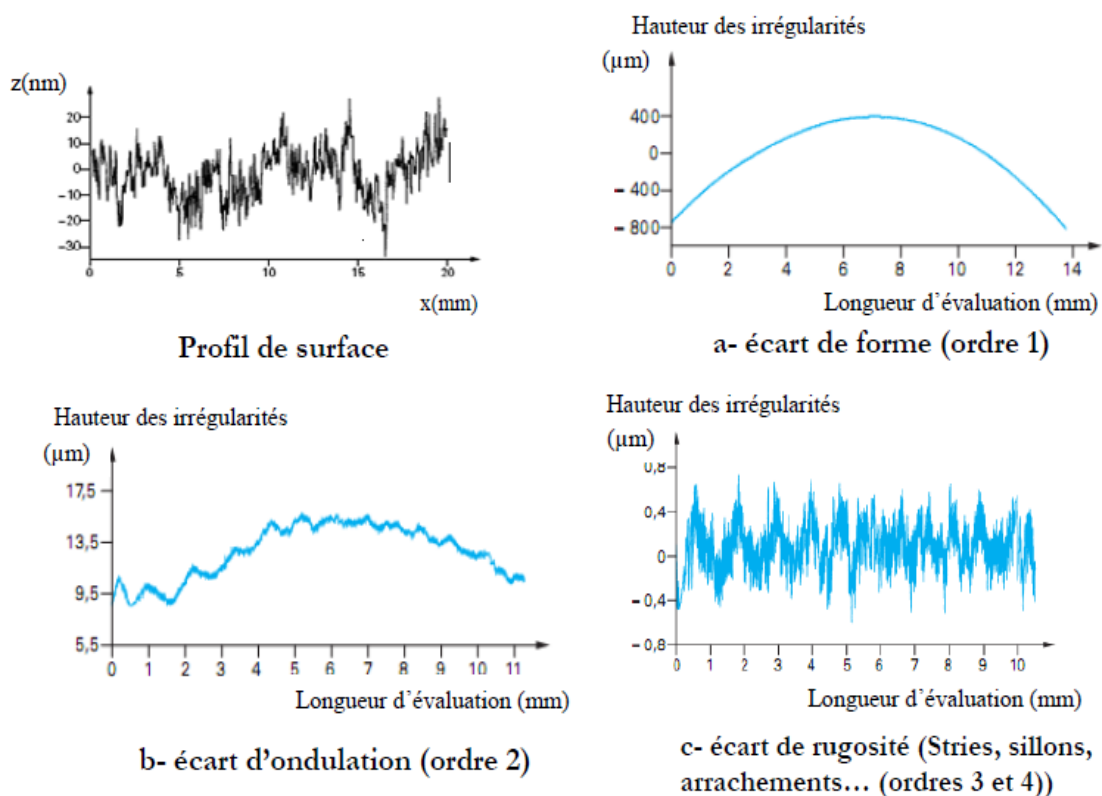


Fig.2.2 : Ecart géométriques d'un profil [Bou00].

- ❖ **profil P**, profil primaire (ordre **1 + 2 + 3 + 4**), sur lequel sont définis les paramètres de structure, désignés par un symbole commençant par la lettre P, par exemple Pt, Pa, etc. ;
- ❖ **profil W**, profil d'ondulation (ordre **2**), sur lequel sont définis les paramètres d'ondulation, désignés par un symbole commençant par la lettre W, par exemple Wt, Wa, etc. ;
- ❖ **profil R**, profil de rugosité (ordre **3 + 4**), sur lequel sont définis les paramètres de rugosité, désignés par un symbole commençant par la lettre R, par exemple Rt, Ra, etc.

2.1.3. Eclairement

Appelons Δ l'écart normal aberrant (écart entre la sphère de référence et la surface d'onde compté perpendiculairement à ces surfaces). La répartition des éclairements

dans le plan image (figure 2.3) est caractérisée par la fonction $D(x', y')$ carré de l'amplitude du champ électrique :

$$D(x', y') = E(x', y') E^*(x', y') \dots \dots \dots (2.1)$$

Appelons A la fonction d'autocorrélation normalisée de Δ et Ω l'angle solide $\iint dB'd\gamma'$

$$D(x', y') = \Omega \frac{\overline{\Delta^2}}{\lambda^2} \Phi \left| \frac{x' x'}{\lambda \lambda} \right| \dots \dots \dots (2.2)$$

Où Φ est la transformée de Fourier de la fonction A et λ la longueur d'onde. L'amplitude des défauts est donc caractérisée par la valeur quadratique moyenne $\overline{\Delta^2}$ de Δ^2 et l'étendue spatiale par la fonction A , transformée de Fourier de la fonction d'autocorrélation. Si les défauts ont une étendue spatiale relativement importante, la fonction A décroît lentement et Φ rapidement. L'énergie diffusée se localise au voisinage immédiat de l'image. Si, au contraire, les défauts sont très petits, leur corrélation est peu étendue, la fonction Φ décroît peu et la lumière diffractée s'étale largement dans le plan image. On voit ainsi que l'on passe insensiblement des défauts de forme à des défauts d'ondulation, puis à la rugosité. L'ingénieur chargé de spécifier les tolérances de forme, d'ondulation ou de rugosité des surfaces devrait connaître la nature et l'amplitude des défauts des surfaces pour pouvoir chiffrer leurs effets sur l'image. Ce n'est, bien sûr, pas le cas et il ne peut que les estimer [Mar05].

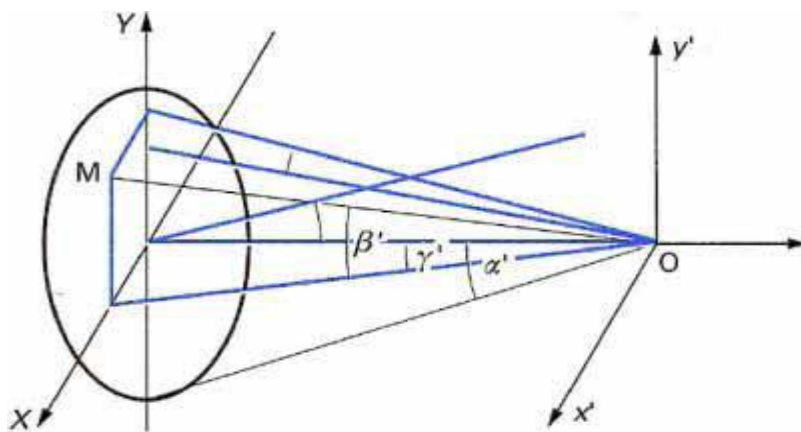


Fig.2.3 : Représentation de la répartition des éclaircissements dans le plan image [Mar05].

2.1.4. Défauts de forme et d'ondulation

Depuis toujours les surfaces optiques sont produites par rodage, ce qui permet d'obtenir des composants avec un excellent état de surface et très peu d'ondulation. Par contre, cette méthode peut engendrer des défauts de forme (figure 2.4). Les plus classiques sont des défauts à symétrie axiale appelés couronne concave ou convexe, ou des déformations asymétriques en selle de cheval bien souvent dues à une fixation de la lentille sous contraintes. Ces défauts de forme affectent la qualité des images et leur influence peut être simulée en adoptant les théories des aberrations. Par ailleurs, depuis quelques décennies, des recherches sont effectuées pour créer des moyens nouveaux de surfaçage de sphères, mais surtout de surfaces asphériques. Les méthodes sont très variées : évaporation sous vide, bombardement ionique, polissage, meulage, tournage, etc. Chacune d'elles a son domaine d'application. Elles engendrent des défauts spécifiques, sources d'altérations des images d'un nouveau type.

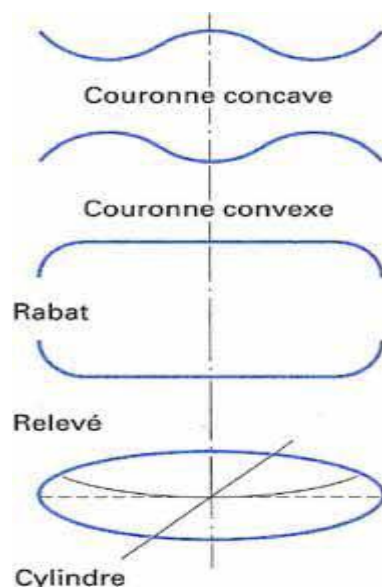


Fig.2.4: Défauts de forme classique d'une surface optique

2.1.5. Effets sur les images

Les défauts engendrés sur la surface d'onde par les couronnes concaves ou convexes ou les défauts de cylindre des surfaces polies (figure.2.4) sont assimilables à de l'aberration sphérique ou de l'astigmatisme. Un instrument d'optique étant composé d'une association de dioptrés et de miroirs, la qualité de chacun d'eux intervient dans le résultat final. L'application du théorème de Gouy permet de connaître le chemin optique aberrant relatif à l'ensemble de l'instrument pour un point image au centre du

champ, en ajoutant les chemins optiques aberrants des divers éléments. En effet, le problème est plus complexe, la simple addition des écarts aberrants axiaux ne pouvant pas être appliquée pour les rayons correspondant à un point image hors axe. De plus, certains défauts peuvent partiellement se compenser. Suivant l'optimisme du concepteur, on peut multiplier l'effet calculé pour un dioptre par N ou \sqrt{N} , N étant le nombre de surfaces. Cela correspond soit à une simple addition des aberrations dues aux diverses surfaces, soit à une compensation partielle [Mar05].

2.1.6. Défauts de forme

a) Critère de A. Maréchal

A. Maréchal a démontré que l'on pouvait calculer la baisse de l'éclairement du maximum central de la tache de diffraction à l'aide de la valeur moyenne du carré de l'écart entre la surface d'onde et une sphère de rayon convenable. Cette sphère correspond au minimum de l'écart quadratique moyen. En appliquant ce résultat, A. Maréchal a montré qu'à une baisse de 20 % du maximum de la tache de diffraction correspond une valeur $\overline{\Delta^2}$ de l'écart quadratique moyen égale à

$$\delta = \frac{\lambda^2}{200} \dots\dots(2.3) \quad \text{avec} \quad \overline{\Delta^2} = \iint \Delta^2 ds - \left| \iint \Delta ds \right|^2 \dots\dots(2.4)$$

ds est l'élément de surface pour lequel l'écart normal est Δ

b) Défauts de forme à symétrie axiale

Ces défauts sont assimilables à de l'aberration sphérique. On peut déduire de l'étude de Steel qu'un défaut de forme ne doit pas s'écarter de plus de

$$\delta = \frac{\lambda}{6.8(n-1)} \dots\dots(2.5) \quad \text{soit} \quad \delta = \frac{\lambda}{3.4} \dots\dots(2.6) \quad \text{pour } n=1.5 \text{ si on veut limiter la baisse du}$$

contraste à 10 % pour une fréquence spatiale de 0,4.

c) Défauts de forme sans symétrie axiale

Ces défauts de cylindre sont assimilables à l'astigmatisme. Si l'on place la mire objet à 45° du défaut d'astigmatisme, la déformation maximale admissible entre les deux méridiennes de la surface, pour avoir une baisse de contraste de 10 % pour une fréquence spatiale réduite de

$$\delta = \frac{\lambda}{5(n-1)} \dots\dots(2.7) \quad \text{soit} \quad \delta = \frac{\lambda}{2.5} \dots\dots(2.8) \quad \text{pour } n=1.5$$

2.1.7. Différents types de défauts

a) Différence de rayon de courbure

Le calibre de référence et la surface en cours de fabrication n'ont pas le même rayon de courbure. On obtient des franges d'interférence circulaires, dites anneaux de Newton. Si l'épaisseur de la couche d'air est telle que les centres de courbure soient confondus, on observe une teinte dite teinte plate. Le nombre de franges obtenu quand les deux surfaces sont en contact permet de connaître la différence entre les deux rayons de courbure.

b) Défauts de révolution

La surface est affectée d'un défaut de forme ayant un axe de symétrie. Dans ce cas, les diamètres des anneaux ne suivent pas la loi de Newton. Si l'on forme un coin d'air, les franges ne sont pas circulaires. L'écart par rapport à la frange régulière permet de chiffrer le défaut en nombre d'interfranges.

c) Défauts de non-révolution

Le défaut n'a plus d'axe de symétrie. On chiffre ici la déformation de non-révolution de la surface.

d) Défauts localisés

Les défauts les plus courants de ce type sont les creux, les bosses, le rabat, le relevé et les facettes. Les franges ne sont plus régulières, mais présentent des variations brutales de pente. L'écart par rapport à la frange régulière caractérise le défaut local.

2.1.8. Défaut d'ondulation

Une erreur pratique très importante trouvée sur la surface du composant optique c'est: le défaut d'ondulation. L'ondulation est une succession des zones concentriques et résulte des effets du mouvement de résonance de l'outil de polissage, les vibrations de la machine, et les grandes pressions appliquées sur la matière [Wil07].

On peut distinguer deux genres d'ondulation :

1. **Ondulation primaire;** Ceci a une "période" ou espacement qui rapprochent les intervalles des modèles d'outil. On peut le voir facilement par le testeur de Foucault en employant une fente fine et une source intense

2. Micro-ondulation ; Ceci se produit d'une échelle plus petite. Les défauts sont de l'ordre d'un millimètre carré dans la surface et de hauteur inférieur à 10Å . On peut facilement ramener la micro-ondulation à un niveau négligeable. Ceci représente entièrement une question de la technique de polissage. La nature et l'importance de l'ondulation dépendent principalement du matériel et de la structure d'outil. Jusqu'à un plus petit degré elles dépendent également de l'agent de polissage. Les polissoirs rigides (par exemple, cire d'abeille ou papier), qui ne se déforment pas laissent généralement des défauts ayant des pentes dix fois aussi grands (10^{-5} au lieu de 10^{-6})

2.1.9. Rugosité

La rugosité est le résultat de la modification microgéométrique d'une surface, provoquée par le bombardement intensif de cette surface par des projectiles.

Apparaissent alors:

- des aspérités appelées "Pics"
- des cavités appelées "Creux"

Sur une coupe perpendiculaire à la surface traitée, les pics et les creux se répartissent également de part et d'autre d'une "ligne centrale" (moyenne algébrique) appelée aussi "ligne moyenne". La "ligne enveloppe" est celle qui réunit entre eux les sommets des pics et les fonds des creux. La "ligne enveloppée" prend en compte la totalité des longueurs créées par la succession des pics et des creux. Elle est importante puisqu'elle génère la surface augmentée dont l'adhérence sera fonction.

2.1.9.1. Les critères de la rugosité

Un grand nombre de critères sont définis dans la normalisation pour caractériser une rugosité (voir la figure 2.5). En pratique, dans un profil et sur une longueur considérée, seuls trois d'entre eux sont retenus:

- "Ra": écart moyen. C'est la moyenne arithmétique des valeurs absolues des écarts, entre les pics et les creux. "Ra" mesure la distance entre cette moyenne et la "ligne centrale". On admet couramment que cette notion synthétise approximativement les différents paramètres intéressés dans la rugosité.
- "Rt": écart total. C'est la dénivellation la plus importante entre le plus haut sommet

d'un pic et le fond le plus bas d'un creux.

- "Rz": régularité. C'est la moyenne des écarts totaux de rugosité "Rt" observés sur 5 longueurs.

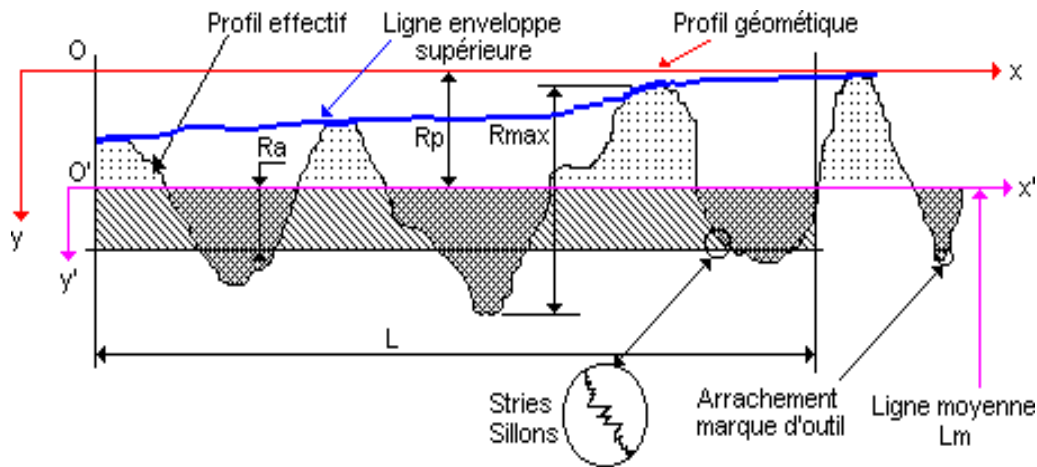


Fig.2.5 : Critères de la rugosité.

2.1.10. Méthodes de mesures et de contrôles de surfaces

2.1.10.1. Méthodes mécaniques

En raison de leurs simplicités et leurs grandes diversités, les méthodes mécaniques peuvent englober une vaste gamme de paramètres de rugosité, les instruments conventionnelles de mesure de surfaces utilisant ces méthodes présentent certains inconvénients tels que :

- ✓ Technique relativement lente.
- ✓ La force du palpeur peut parfois endommager la surface.
- ✓ Limitation sur des secteurs de mesure.

Les avantages évidents sont :

- ✓ Souplesse pour adopter une large diversité de forme.
- ✓ Très haute résolution dans la direction verticale [Hic00].

2.1.10.2. Mesure tridimensionnelle

La caractérisation de l'état d'une surface ne peut se limiter à l'analyse d'une trajectoire. L'objectif recherché est la caractérisation et l'analyse de l'intégralité d'une surface ou d'une portion de surface est pour connaître son relief, sa texture et ses

défauts de surface. Les avancées technologiques repoussent toujours la connaissance et la mesure des états de surface. Ces dernières années ont vues un grand développement d'équipements destinés à la quantification de la topographie de surface, grâce à l'évolution

- des appareils de mesure à contact (ajout d'un troisième axe de mesure).
- de la microscopie à haute résolution.
- du traitement de l'information et du traitement d'image.

La mesure tridimensionnelle des états de surface dépasse le cadre du contrôle qualité des surfaces sur des produits industriels. L'image tridimensionnelle permet d'augmenter les possibilités d'analyse de la texture des surfaces. Elle est destinée davantage à la recherche et à l'expertise et permet ainsi d'optimiser la fonction pour laquelle est destinée une surface, frottement, adhérence, étanchéité, lubrification, écoulement, etc. Les problèmes rencontrés dans la mesure du profil de surface sont négligeables par rapport à ceux rencontrés dans la mesure tridimensionnelle qui sont communs à tous les instruments et sont comme suit :

a- Maintenir des données de la hauteur précise entre les trajectoires.

b- Adopter un model numérique approprié.

c- Adopter un model d'échantillonnage qui permet a assez de zones d'être suffisamment couvertes avec un temps et un prix raisonnable.

d- Maintenir une résolution suffisante pour détecter les défauts et autres caractéristiques non-standards [Tsu81].

2.1.11. Méthodes optiques

2.1.11.1. Méthodes de mesure interférométrique

L'interférométrie est habituellement utilisée pour la mesure d'une longueur donnée par comparaison de deux chemins optiques. La figure 2.6 montre d'une façon simplifiée ce principe.

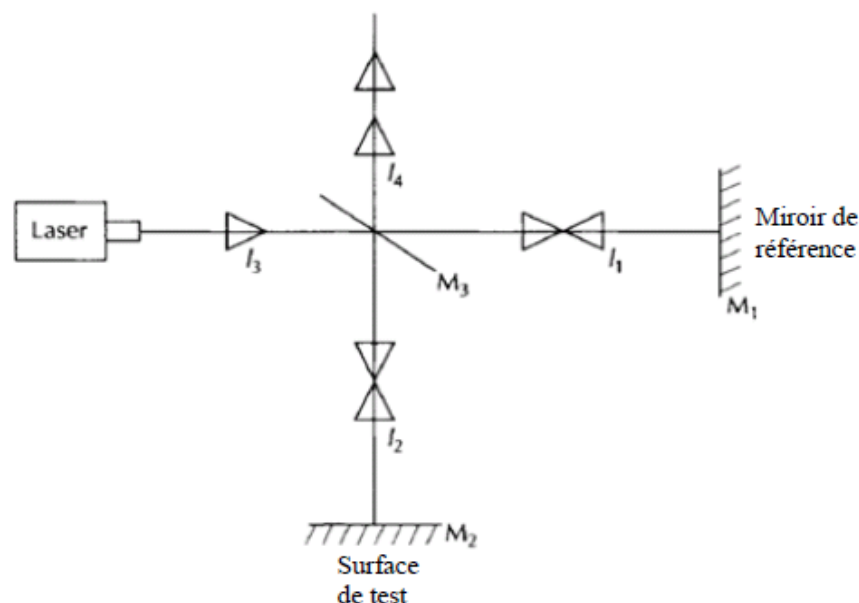


Fig.2 6. Principe de mesure interférométrie

La lumière d'une source est divisée à l'aide d'un miroir séparateur, une partie du faisceau est dirigé sur la pièce, l'autre sur un miroir de référence. Après réflexion, les deux faisceaux sont de nouveau superposés au niveau du miroir séparateur. Le chemin de référence est $l_3 + l_1 + l_4$ tandis que le chemin d'essai (à mesurer) a une longueur $l_3 + l_2 + l_4$, la comparaison doit se faire entre l_1 et l_2 et leurs combinaison dépend de leurs différences de phase parfois en les additionnant et parfois en les soustrayant sous une lumière cohérente. Si le miroir M_1 est fixe, la longueur l_2 peut être déterminée en comptant le nombre de maxima vue par l'oeil, chaque maxima correspond a une différence de marche de $\lambda/2$ entre l_1 et l_2 , le balayage des deux miroirs M_1 et M_2 est normal (perpendiculaire) [Bro86].

2.1.11.2. Profilomètre laser

Ces méthodes sont très proches de la méthode par contact, à savoir qu'elles nécessitent l'exploration de la surface au moyen d'une série de trajectoires parallèles régulièrement espacées par déplacement de l'échantillon ou de la source. Les coordonnées Z sont acquises à l'aide d'un capteur optique à source laser. La méthode peut être coaxiale ou basée sur le principe de la triangulation suivant que le faisceau émis et le faisceau réfléchi suivent le même trajet ou une trajectoire différente. La figure 2.7 illustre le principe d'un profilomètre laser. La méthode coaxiale nécessite un système de déplacement vertical permettant l'asservissement du point de focalisation

du faisceau laser sur la surface. L'exploitation des données, calcul des paramètres et visualisation de la surface, se fait avec les mêmes outils que ceux utilisés par la méthode avec contact [Ber05].

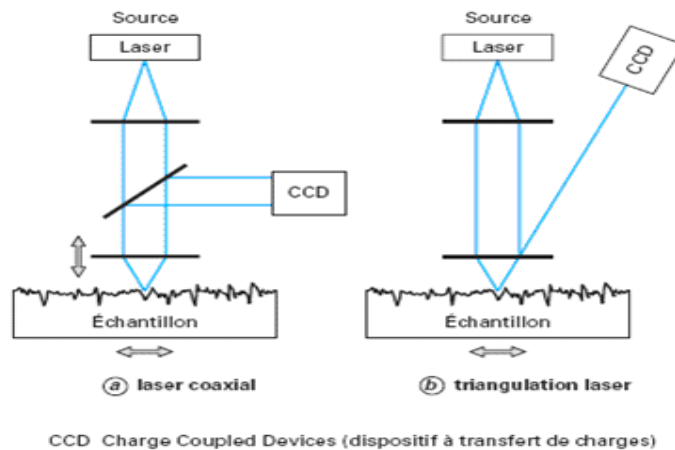


Fig. 2.7. Méthodes par profilométrie laser

2.1.11.3. Microscopie confocale

La surface de l'échantillon est balayée par un laser. Grâce à un diaphragme placé avant le détecteur, celui-ci ne reçoit que le faisceau provenant du point focal (figure 8). En déplaçant l'échantillon ou le détecteur suivant l'axe vertical, le plan focal occupe alors différentes hauteurs ; on obtient ainsi une série de « coupes optiques » de la surface de l'échantillon. Une méthode dérivée de la microscopie confocale utilise l'aberration chromatique d'une lentille. Une source blanche est focalisée sur la surface par un ensemble optique présentant une forte aberration chromatique. Le capteur est basé sur le principe du codage chromatique, où l'on attribue à chaque point du champ de mesure une longueur d'onde. L'altitude de la surface est déterminée par une analyse spectrale de la lumière réfléchiée par cette surface. Cette méthode est plus rapide tout en ayant une profondeur de champ importante (jusqu'à 10 mm).

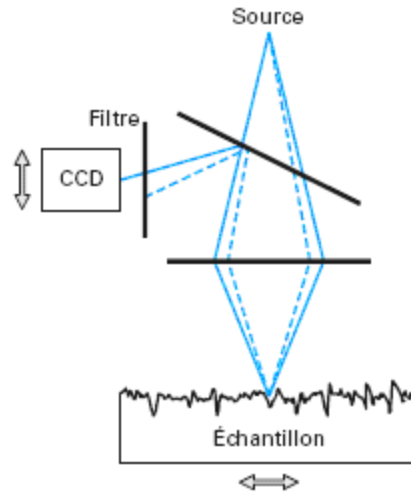


Fig.2.8. Microscopie confocale

2.1.12. Microscope électronique à balayage

Le microscope électronique à balayage (MEB ou SEM en anglais pour *Scanning Electron Microscopy*) permet d'obtenir des images de surfaces de pratiquement tous les matériaux solides, à des échelles allant de celle de la loupe (x10) à celle du microscope électronique en transmission (x500.000 ou plus). Le MEB conventionnel fonctionne dans un vide ordinaire (10^{-5} à 10^{-6} mbar); les échantillons peuvent être massifs, de dimension allant de quelques micromètres (particules) à une dizaine de centimètres de diamètre, voire plus. Ils doivent supporter le vide sans le polluer et être conducteurs. La préparation est en général simple. Le MEB à pression contrôlée (vacuum) permet l'observation dans un vide allant jusqu'à 30 mbar, rendant ainsi possible l'examen d'échantillons humides ou gras, d'isolants sans métallisation préalable (céramiques, métaux corrodés), voire en présence de liquide [Hea72].

2.2. Aberration optique

Pour définir l'image donnée par un système optique, on travaille dans les conditions de Gauss, dans ces conditions les rayons considérés sont paraxiaux c'est-à-dire proches de l'axe optique et peu incliné par rapport à celui-ci. Dans le cadre de cette approximation paraxiale, l'image d'un point est un point. Tous les systèmes optiques ont été étudiés dans les conditions de Gauss pour avoir le stigmatisme. En réalité ce stigmatisme n'est pas rigoureux et plus on s'écarte des conditions de Gauss. Dans ce cas les rayons incidents peuvent être relativement éloignés de l'axe optique et/ou fortement incliné, de ce fait, l'image d'un objet sera déformée. On exprime tous les déformations et les défauts de l'image à travers un système optique par le terme aberration. Donc, les aberrations dans une image sont le résultat d'un système optique qui manque de produire une correspondance du point à point exacte entre la source et son image. Elles correspondent aux perturbations du front d'ondes..

Les causes des aberrations sont diverses, cela permet de les classer en deux catégories, les aberrations chromatiques, et les aberrations géométriques.

Les aberrations se scindent en deux familles :

- ❖ **Les aberrations chromatiques**, qui apparaissent en lumière polychromatique, sont dues aux matériaux des éléments constituant le système optique et ainsi à la dispersion du verre composant l'élément optique.
- ❖ **Les aberrations géométriques**, qui sont les écarts à l'optique de Gauss. Elles dépendent uniquement de la structure des rayons lumineux provenant des points objets, concourent à la formation de l'image.

2.2.1. Les aberrations chromatiques

En optique géométrique, l'aberration chromatique (voir la figure 2.9) désigne une aberration optique qui produit une image floue et aux contours irisés. Elle résulte de la décomposition de la lumière blanche en plusieurs bandes de couleurs. Le phénomène est mis aisément en évidence avec un verre à forte correction elle est généralement due à la variation de l'indice de réfraction du matériau composant les lentilles en fonction de la longueur d'onde de la lumière qui les traverse. Il en résulte une distance focale variable, de sorte que la mise au point ne peut être effectuée simultanément pour toutes

les couleurs du spectre. Si, par exemple, la mise au point est effectuée pour le rouge, le bleu est alors flou : l'image d'un objet blanc présente alors sur ses bords une irisation bleutée. L'aberration chromatique peut être à la fois longitudinale, lorsque les couleurs sont focalisées à des distances différentes ; et transversale ou latérale, lorsque les couleurs sont focalisées à différentes positions dans le plan focal (car le grandissement d'une lentille varie également avec la longueur d'onde).

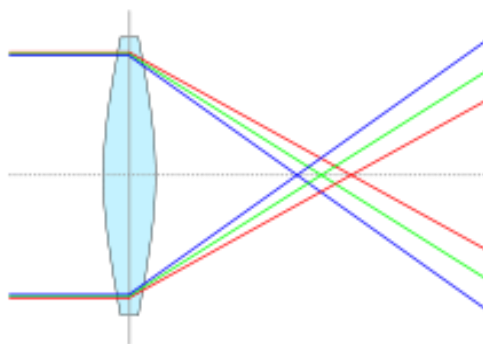


Fig2.9: Aberration chromatique

La Réduction de l'aberration chromatique se fait par :

- ajout d'un filtre laissant passer une bande spectrale étroite
- utilisation préférentielle de miroirs (télescope) qui ne présentent pas d'aberration chromatique (mais une aberration de sphéricité ou des aberrations de champ)
- utilisation de verre optique de haute qualité, notamment celui contenant de la fluorine, afin de réduire cette dispersion chromatique.
- utilisation d'un montage de lentilles en doublet, l'achromat.
- utilisation d'un objectif apochromatique, en combinant plus de deux lentilles de différentes compositions.

2.2.2. Aberrations géométriques

Elles sont: l'aberration sphérique, la coma, et l'astigmatisme (pour un objet ponctuel), la courbure de champ et la distorsion (pour un objet étendu). Dans ces cinq types d'aberrations, trois sont responsables de la netteté de l'image (aberration sphérique, coma et astigmatisme) et deux sont responsables de la forme et de la position de l'image (courbure de champ et distorsion). D'un autre côté l'aberration sphérique et la

coma sont des aberrations monochromatiques des faisceaux larges, et l'astigmatisme, la courbure de champ, et la distorsion sont des aberrations monochromatiques des faisceaux inclinés ou de champ. Les courbes d'aberration sphérique sont des cercles concentriques qui sont centrés dans le plan image Gaussienne, elle donne une diffusion latérale qui a la symétrie de révolution [Laa95].

2.2.2.1. Aberration sphérique

L'aberration sphérique (voir la figure 2.10) est la plus importante de toutes les aberrations primaires, parce qu'elle affecte le champ entier de la lentille. Le nom de cette aberration vient du fait qu'elle est observée dans la plupart des surfaces sphériques réfractant ou réfléchissantes. Elle est observée quand on recherche l'image d'un point objet située sur l'axe optique donnée par un système de grande ouverture [Sha97]. L'aberration sphérique désigne une aberration dont l'une des conséquences est la disparition du foyer. Les rayons provenant du bord et du centre de l'optique ne se focalisent plus au même point. Par conséquent les rayons marginaux sont plus déviés et convergent plus que les rayons paraxiaux. Les premiers convergent en un point appelé foyer marginal $F'm$ et les seconds en un autre point appelé foyer paraxial $F'p$. On observe alors deux caustiques de focalisation, caustique axiale et caustique sagittale en forme de flèche, dans laquelle le point image attendu sera remplacé par un halo plus ou moins flou.

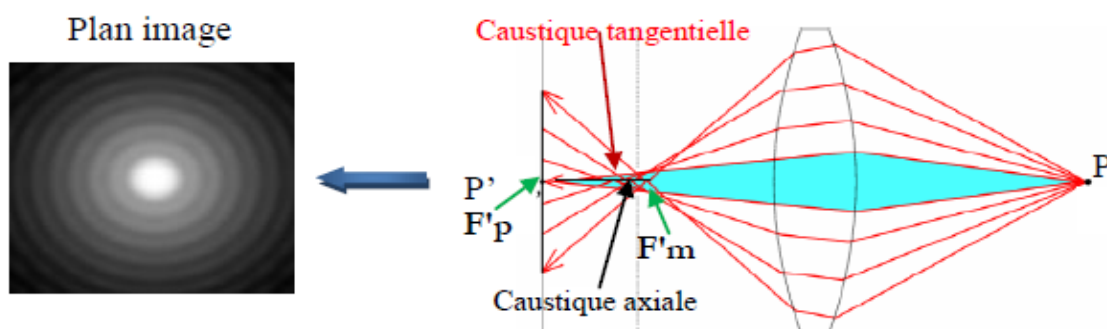


Fig.2.10 : Aberration sphérique d'une lentille convergente.

Les courbes d'aberration sphérique sont des cercles concentriques qui sont centrés dans le plan image Gaussienne, elle donne une diffusion latérale qui a la symétrie de révolution [Laa95].

2.2.2.2. Coma

L'aberration de coma (voir la figure 2.11) désigne une aberration qui dépend du champ d'une part et de l'ouverture d'autre part. Cette aberration est dite "de champ" car elle n'existe pas sur l'axe optique. L'effet de cette aberration est de produire une tache en forme d'aigrette dans un plan d'observation. Les rayons parallèles qui ne sont pas dans l'axe optique de la lentille ne convergent pas tous en un même point sur le plan focal. Les rayons qui passent sur les bords de la lentille peuvent être focalisés plus loin ou plus près de l'axe optique que ceux passant au centre de la lentille. On parle respectivement de coma positive et de coma négative.

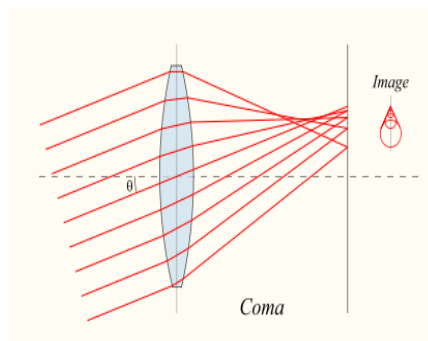


Fig.2.11 : Représentation du coma d'une lentille.

2.2.2.3. Astigmatisme

L'astigmatisme est une aberration de champ observée lorsque l'on s'éloigne de l'axe optique (voir la figure 2.12), elle se rencontre aussi quand les dioptries des lentilles ne sont pas sphériques mais ellipsoïdaux. L'astigmatisme provient du fait que les rayons contenus dans le plan tangentiel (contenant l'axe optique et le point objet éloigné de l'axe), ne convergent pas à la même distance que ceux contenus dans le plan sagittal (perpendiculaire au plan tangentiel contenant le rayon principal) [Sha97]. lorsque le front d'onde va être réfracté par le dioptré, il ne sera pas sphérique comme se serait le cas idéalement sur l'axe, mais il deviendra une surface complexe pour laquelle chaque

profil pris individuellement est un arc de cercle , mais ou ces arcs de cercle sont de rayon variable.

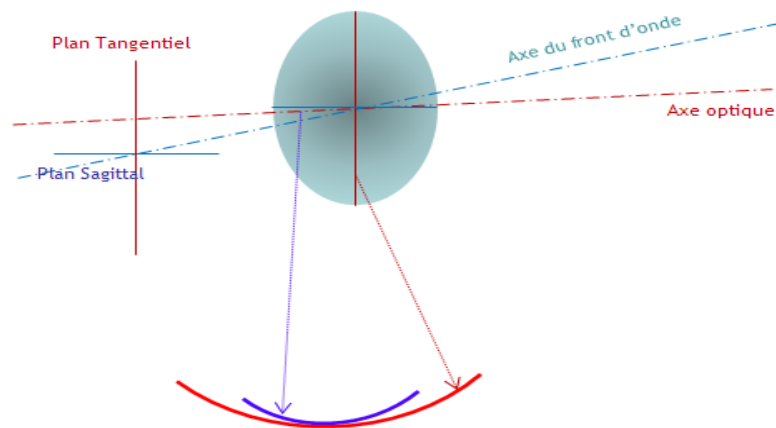


Fig.2.12 : Représentation l'écart de front d'onde

Si l'on ne retient que la différence entre un front d'onde parfaitement sphérique et l'aberration d'astigmatisme, on obtient la surface de la figure 2.13.

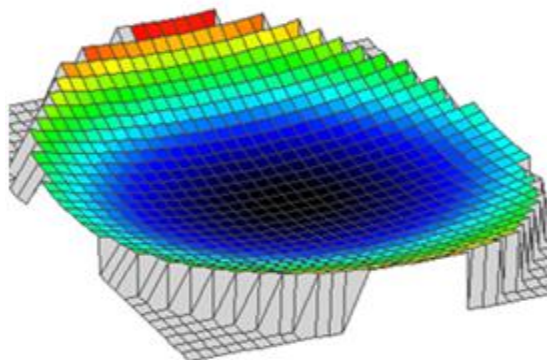


Fig.2.13 : Représentation l'écart entre le front d'onde et l'aberration d'astigmatisme

Comme chaque profil se trouve donc transmis ou réfléchi par un système optique de focale variable, le point de focalisation sera lui aussi variable, entre deux extrêmes que sont les foci des rayons du plan sagittal qui sera la focale la plus longue (car le plus grand axe de l'ellipse) et la tangentielle la plus courte. Si on simplifie la représentation en ne gardant que ces deux axes, voici les deux points de focalisation présente par la figure 2.14

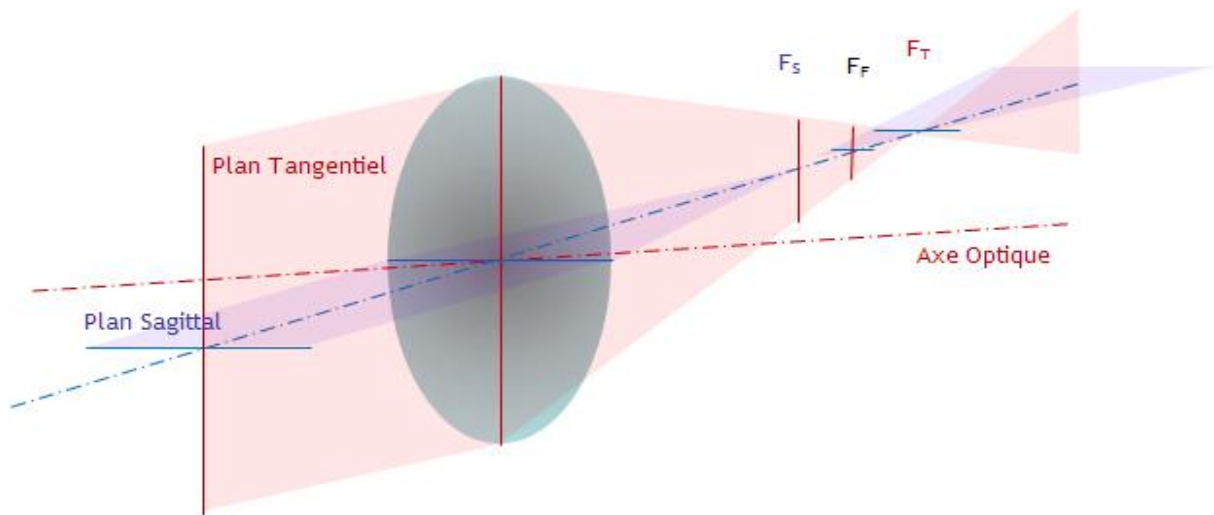


Fig.2.14 : Plan tangentiel et plan sagittal

Comme mentionné plus haut, on peut rencontrer cette aberration également sur l'axe optique d'un instrument. C'est le cas si l'instrument ne présente pas une focale identique sur tous ses plans suite à un défaut de polissage par exemple. Une contrainte mécanique peut aussi déformer le système optique en le comprimant sur l'un de ses axes. Ce défaut peut aussi mettre en évidence un souci d'alignement d'une lentille au sein d'un objectif, ou un mauvais alignement d'un correcteur additionnel.

2.2.2.4. Distorsion

Toutes les aberrations étudiées jusqu'à présent se manifestent par des défauts de stigmatisme. Mais dans ce cas, il n'y a plus de défaut de stigmatisme : l'image d'un point source est un point image. Par contre l'image peut ne pas être fidèle à l'objet dans le sens où elle peut être déformée [Hi100], la figure 2.15 montre l'influence de la position de l'ouverture sur la distorsion.

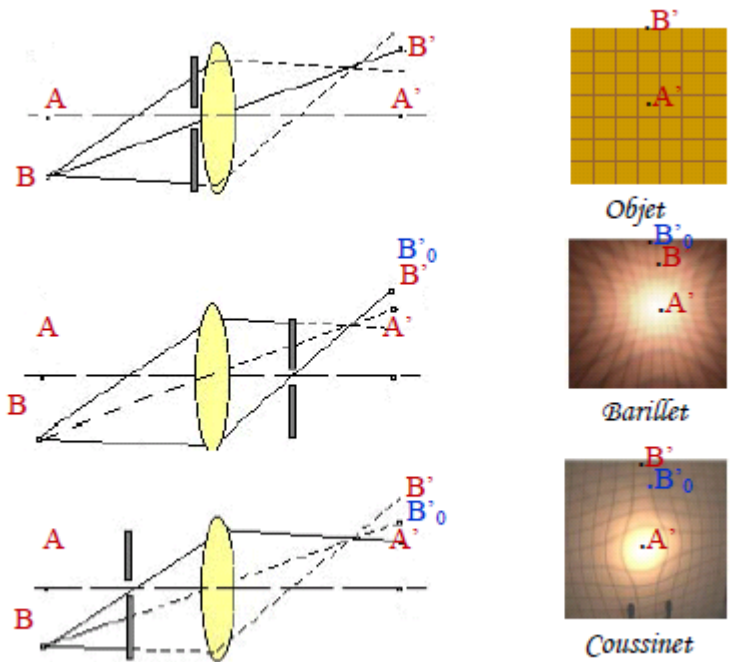


Fig.2.15 : Influence de la position de l'ouverture sur la distorsion

2.2.2.5. Courbure de champ

Un instrument entaché de courbure de champ voir (figure 2.16) forme l'image d'un objet plan de grande dimension sur une surface paraboloidale et non sur un plan, on perd l'aplanétisme. Ce défaut se traduit par des images floues en bord de champ. La courbure de champ est un champ dépendant du changement longitudinal de la focal qui varie comme le carré de l'angle de champ [Sha97].

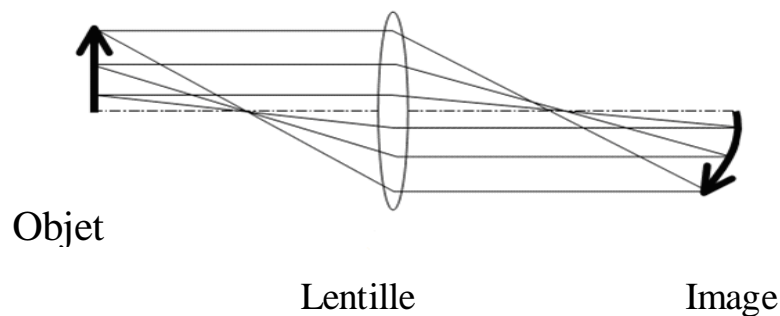


Fig.2.16 : Courbure de champ.

Toutes les aberrations géométriques proviennent du fait que le stigmatisme des lentilles sphériques est un stigmatisme approché lorsqu'on se place dans les conditions de Gauss. Dès que les faisceaux lumineux s'écartent de ses conditions, le stigmatisme n'est plus réalisé. La figure 2.17 montre cet effet : Plus h est grand, plus le point conjugué $A'(h)$ est situé près de la lentille. Les rayons marginaux convergent plus près de la lentille parce qu'ils sont plus déviés que les rayons paraxiaux qui convergent plus loin sur l'axe optique [Hi100].

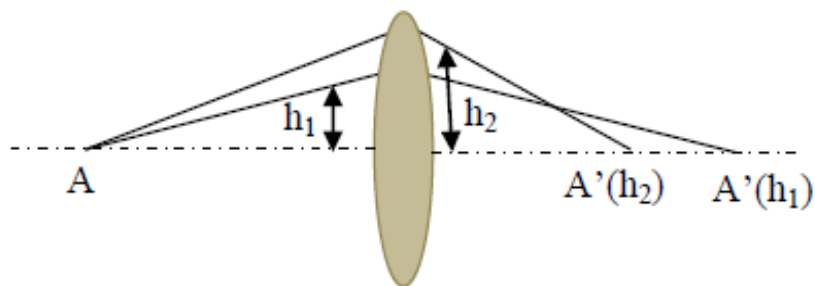


Fig.2.17 : Cause des aberrations géométriques.

Chapitre III

Composants asphériques

3. Composant asphérique

3.1. Introduction

Les lentilles sphériques classiques ont un défaut inhérent à leur conception : le foyer de mise au point pour le centre de la lentille ne correspond pas à celui de la périphérie. Ainsi, une image, observée en dehors de l'axe optique, contient des aberrations qui sont difficilement compensées par des correctrices sphériques. C'est pourquoi les lentilles asphériques ont été développées. Ces composants ont un rayon de courbure variable conçu de façon à atteindre un foyer de mise au point unique, la figure 3.1 montre les surfaces sphériques et asphériques. De ce fait, pour un rayon hors axe, le degré de liberté supplémentaire lié à l'asphéricité d'un composant optique aide à corriger les aberrations de sphéricité. Cependant, cette solution n'est pas entièrement satisfaisante, car on ne corrige pas les aberrations chromatiques de la lentille [Reo06].

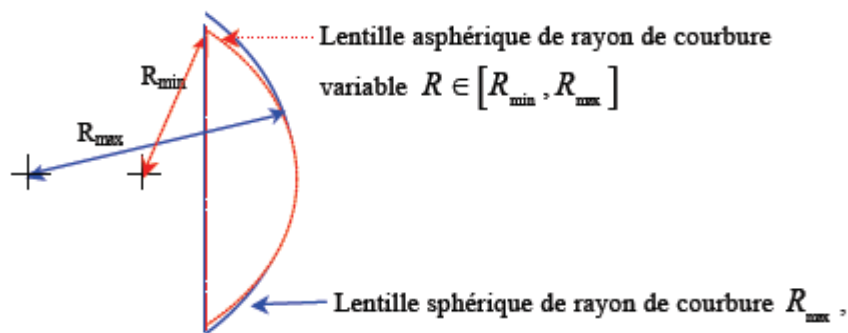


Fig:3.1. Surface sphérique en traits continus, surface asphérique en pointillés.

On s'intéresse à la trajectoire des rayons lumineux lors de leur transmission à travers une surface asphérique, alors les lois de Snell-Descartes suffisent pour décrire le phénomène.

Si on considère deux couches homogènes différentes d'indices n_1 et n_2 , alors les angles d'incidence et de réfraction sont reliés par la loi de Snell-Descartes, de telle sorte que :

$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2) \dots \dots \dots (3.1)$$

Cette relation est vraie, quelque soit la forme du dioptré, plan ou courbe (voir la figure 3.2). Si le dioptré est courbe, celle-ci s'applique localement.

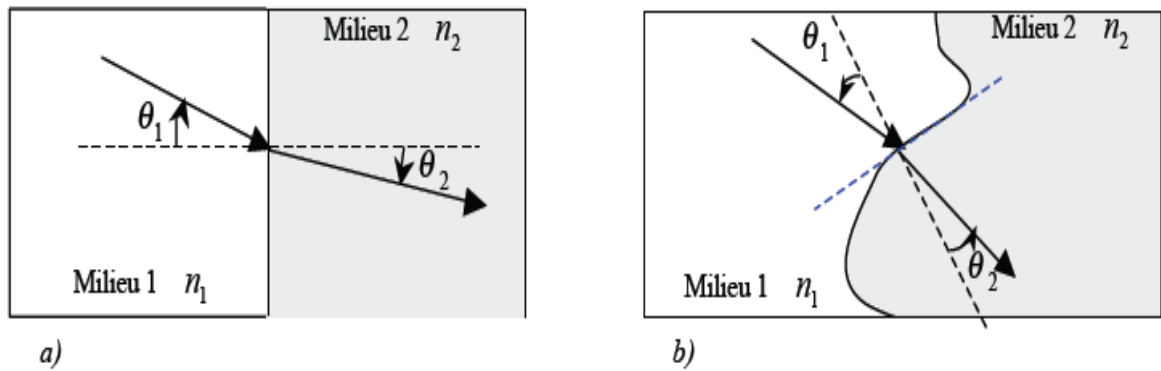


Fig.3.2: Lois de Snell-Descartes : a) dioptre plan ; b) dioptre courbe. [Reo06]

Cette loi permet de représenter le trajet de rayons se propageant parallèlement à l'axe optique en entrée d'une lentille asphérique, comme le montre la figure 3.3.

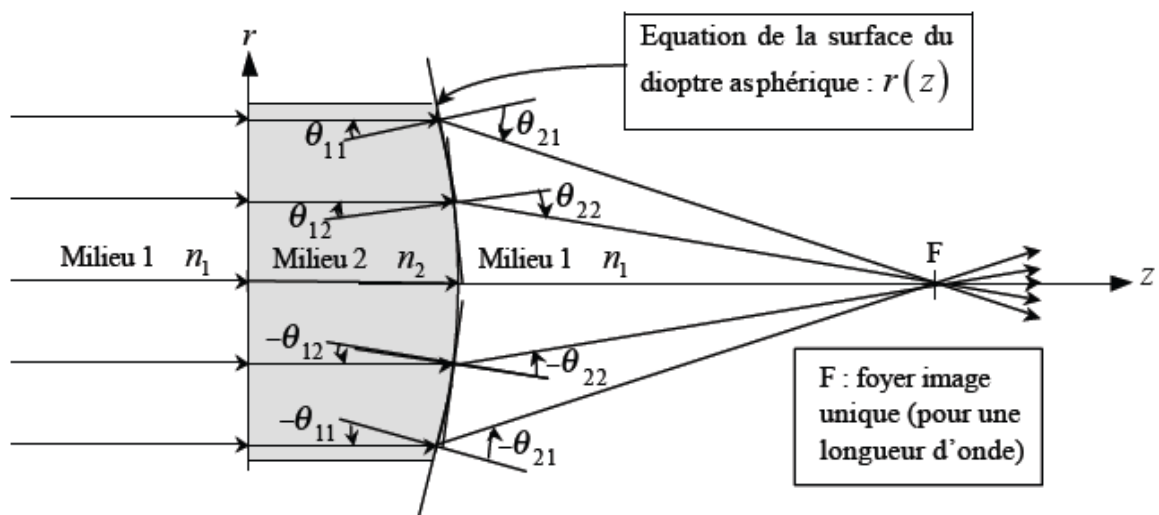


Fig.3.3: Lentille asphérique [Reo06]

L'angle d'incidence θ_{1i} sur le dioptre asphérique va dépendre de sa forme, et l'angle de transmission θ_{2i} , va dépendre des indices des milieux 1 et 2. Ainsi la trajectoire est complètement définie à partir des paramètres n_1 , n_2 , et $r(z)$. Le choix de ces paramètres donne accès à un foyer image unique pour une longueur d'onde. En réalité, il existe un foyer pour chaque longueur d'onde appartenant au spectre de la source utilisée. En effet, l'indice du matériau varie avec la longueur d'onde, ainsi l'angle de transmission varie également [Reo06].

3.2. Définition d'une surface asphérique

Une surface optique est dite asphérique quand elle n'épouse pas la forme d'une sphère (le profil des méridiens d'une telle surface diffère de celui d'un cercle). Les surfaces

asphériques ne peuvent pas être défini avec une seule courbure sur toute la surface en raison de ses changements de courbure localisée à la surface (voir la figure 3.4) [Sal91]. Une surface asphérique est généralement définie par une formule analytique :

$$Z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum a_i r^{2i} \dots\dots\dots(3.2)$$

Avec **Z** est la flèche, **c** la courbure au sommet, **k** constante conique, **r** la coordonnée radiale mesurée perpendiculairement à l'axe optique, $\sum a_i r^{2i}$ coefficients polynômes.

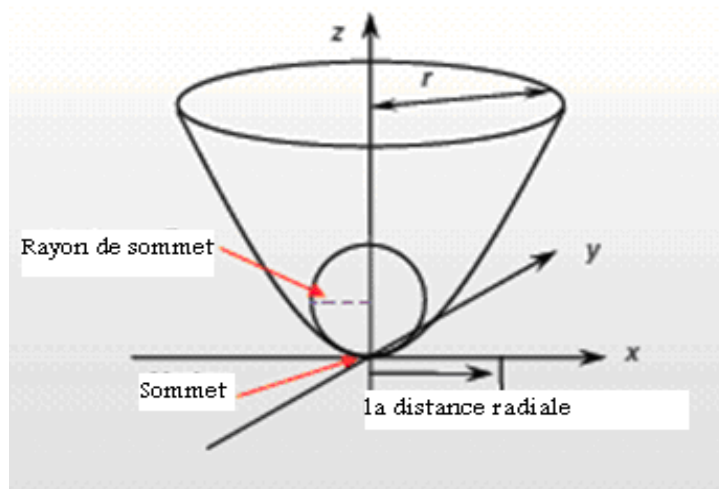


Fig.3.4: Représentation de la surface asphérique

3.3. Surface conique

Dans le cas où les coefficients polynômes sont nul, la surface asphérique prend la forme d'une section transversale conique de rotation symétrique avec le fléchissement défini par la relation 3.3

$$Z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} \dots\dots\dots (3.3)$$

Dans le tableau 3.1 on montre les variations des surfaces coniques en fonction de la constante conique k, dans l'équation de fléchissement, suivant la relation 3.3.

La figure 3.5 illustre les surfaces coniques pour le même rayon et différentes valeurs de k par contre, sur la figure 3.6 est représenté les différents profils pour k variable.

Tableaux 3.1 cinq surfaces ayant différentes constantes coniques, mais la même courbure.

| Constant k | Surface |
|--------------|-----------------------------|
| $K=0$ | Sphère |
| $k < -1$ | Hyperboloïde |
| $K=-1$ | Paraboloïde |
| $-1 < k < 0$ | Ellipsoïde |
| $k > 0$ | Ellipsoïde aplati aux pôles |

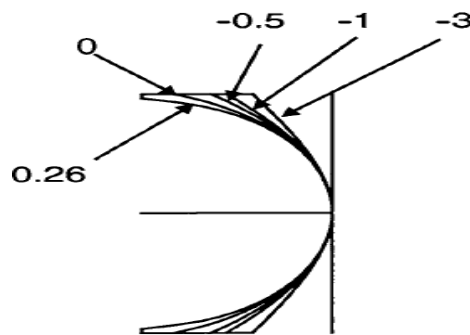


Fig3.5: Surfaces coniques avec le même r, et différentes k.

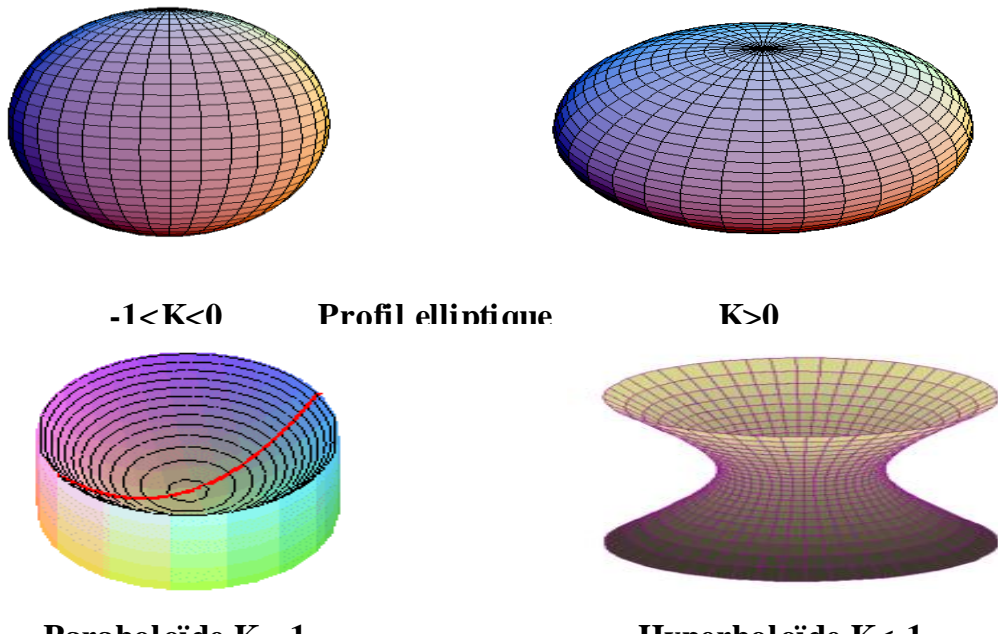


Fig.3.6: Profils des surfaces en fonction de la constante conique k.

3.4. Étapes de fabrication des composants optiques

3.4.1. Tronçonnage

Son but est de scier un bloque de verre en ébauches à meuler comme le montre la figure 3.7. Il est effectué par des outils diamantés composés de grains de l'abrasif incorporés ou enchâssés dans un liant. A cause de la grande vitesse de rotation de l'outil, il est absolument indispensable d'arroser avec de l'eau additionnée d'une huile spéciale qui lubrifie, refroidit et élimine les débris de verre [Mar00].

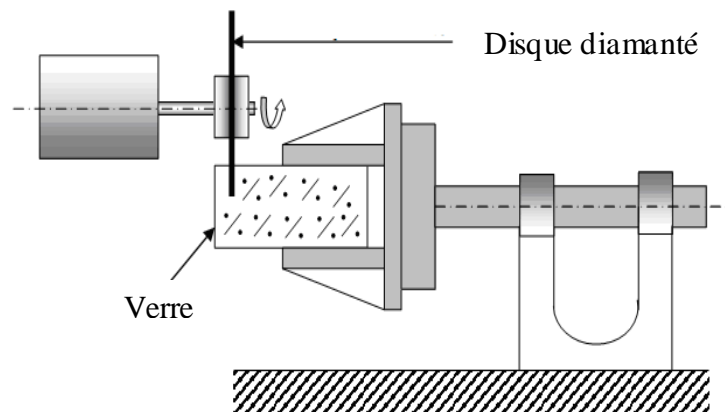


Fig.3.7: Principe de découpage du verre par disque diamanté [Bel08].

3.4.2. Meulage

Le meulage est un procédé d'usinage permettant de donner la forme géométrique finale des composants optiques à réaliser, tel que les surfaces sphériques (convexe-concave), et des formes asphériques (voir la figure 3.8). Il est basé sur le fait que l'outil diamanté et le composant optique à usiner sont montés chacun sur une broche. La broche porte-outil tourne à une grande vitesse. Les axes de rotation sont dans le même plan, ils forment entre eux un angle [Mar00].

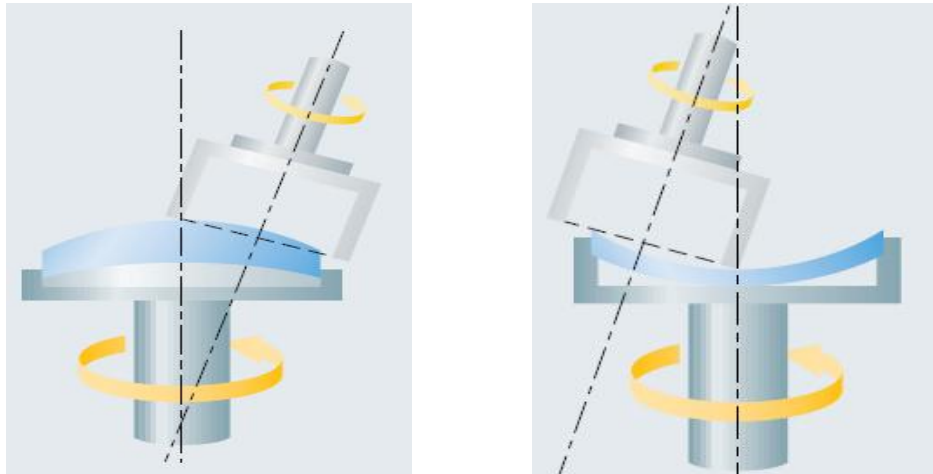


Fig.3.8: Principe de meulage du verre

3.4.3. Doucissage

Chaque opération de meulage présente des surfaces superficielles endommagées. Pour enlever les endommagements causés dans le processus de meulage, un cycle de doucissage et de polissage est obligatoire. Le doucissage est un processus pour façonner les composants optiques avec des outils agglomérés ou des abrasifs en suspension (voire la figure 3.9). Il est exécuté pour enlever les défauts macro-géométriques de la surface meulée afin d'assurer la planéité et le parallélisme [Dao10].

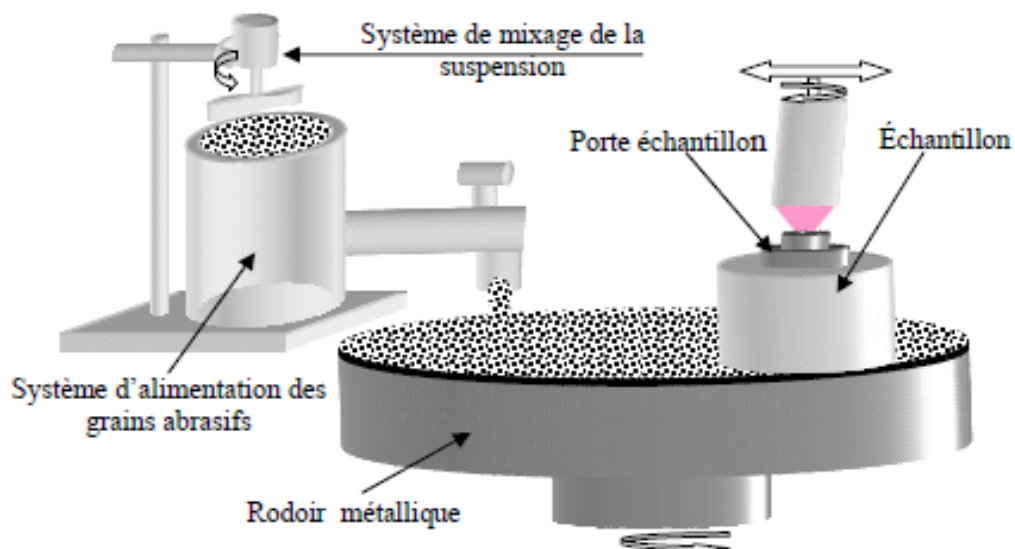


Fig.3.9: Principe de doucissage par abrasifs libres du verre

3.4.4. Polissage

Le polissage est la dernière opération de finition des composants optiques, elle s'effectue selon le même principe que le douçissage sauf qu'on emploie un polissoir plus doux et des grains abrasifs plus fins comme le montre la figure 3.10. Le polissage permet deux opérations simultanées : La diminution de la rugosité et la mise en forme à la précision nécessaire [Mar00].

Une rugosité inférieure à 1nm et un écart de forme de l'ordre du nanomètre peuvent être atteints en polissage des surfaces planes et sphériques.

Le polissage se caractérise par la génération d'une rugosité minimale de la surface avec un faible taux d'enlèvement. Des grains abrasifs de taille micrométriques et des polissoirs relativement doux sont utilisés généralement. Cependant, la transition entre le douçissage et le polissage est restreinte puisque, sous certaines conditions, le douçissage peut aussi être utilisé comme processus final [Bel08].

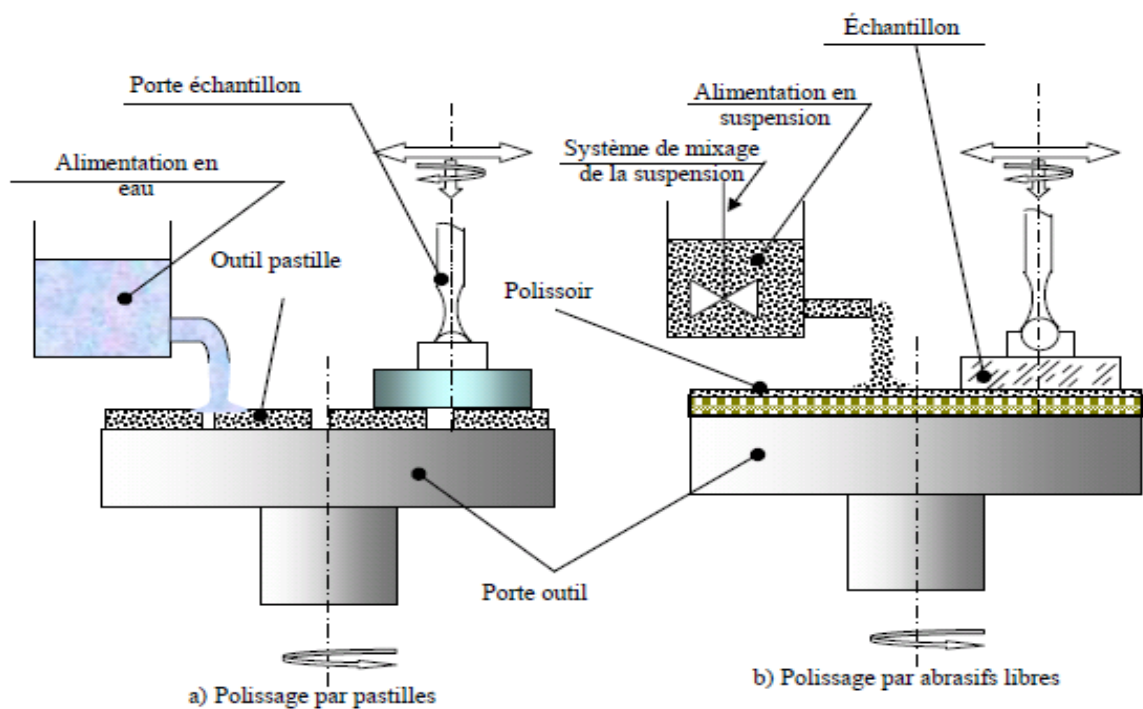


Fig.3.10: Principe de polissage du verre optique [Bel08].

3.5. Méthode de finition des surfaces asphériques

3.5.1 Technique d'abrasive de fabrication optique

Les techniques de fabrication optique pour générer des surface asphérique dans le cas des matériaux fragiles (ex verre), consistent en générale deux étape .La première est une sorte d'ébauchage pendant laquelle la surface optique asphérique est générée. Ici l'enlèvement de matière est causé par rupture fragile. Cette étape de production est caractérisée par un enlèvement de matière important, et laisse une subsurface endommagée hautement contrainte. La deuxième étape de production est la finition. Ici la rugosité, les contraintes, de surface, l'endommagement subsurfacique créés par la première étape doivent être supprimés. La précision de la surface doit être améliorée [Oli99].

3.5.2. Processus d'enlèvement de matière

La qualité de la surface, (rugosité et endommagement de la subsurface) peut être améliorée par divers procédés d'enlèvement de la matière, en général les procédés d'enlèvement de la matière sont utilisés pour la finition des surface optique tel que : Rodage ductile, polissage chimique, usinage par émission élastique, finition magnéto-réhlogique, polissage par laser, polissage par jet d'abrasifs en suspension, , Polissage par faisceau ionique.... etc.

3.5.2.1. Polissage à abrasifs en suspension ou libre

La technique traditionnelle de fabrication des surfaces asphériques planes et sphériques, est un rodage fragile par grains abrasifs libres suivis par un polissage. Un moule, sur lequel une charge est appliquée, et qui a la forme inverse de la pièce qui tourne. L'outil est la pièce forment une surface de contact et l'enlèvement se fait par des grain abrasifs, qui se déplacent aléatoirement en suspension, généralement dans de l'eau entre l'outil et la pièce, le procédé de polissage est basé sur une relation complexe entre beaucoup de variables, les plus importantes des quelles sont :

- ✓ Le type et la quantité de la suspension utilisée et ses propriétés physiques et chimiques

- ✓ Le type de grains abrasifs et leurs propriétés physiques (forme des particules, durté..)et chimiques.
- ✓ Concentration, température et réactivité chimiques de la suspension
- ✓ Caractéristiques physiques et chimiques du matériau de l'outil utilisé
- ✓ Propriétés physique et chimiques du verre utilisé

L'enlèvement de la matière résulte d'effets mécanique, et chimiques, et dépend de la charge, et aussi de mouvement relatif entre l'outil et la pièce. Le rapport local d'enlèvement de la matière dh/dt est souvent estimé par l'équation de Preston.

$$\frac{dh}{dt} = c_{pre} \frac{Lds}{Qdt} \dots\dots\dots(3.4)$$

Où L est la charge appliquée, Q la surface de contact entre l'outil et la piece. ds/dt la vitesse de l'outil parallèle à la surface, est C_{pre} est une constante qui dépend des paramètres du procédé[Mar90].

3.5.2.2. Rodage ductile

Le procédé de rodage des surfaces optiques par enlèvement de matière peut être compris par l'analyse de la génération des fissures sous l'effet d'un indenteur pointu. Comme le montré la figure 3.11. Une fissure radiale est générée, si la charge de l'indenteur (par exemple un grain abrasif) dépasse une valeur critique. La réduction de la charge [fig3.11(b),(c) et (d)] produit une fissure latérale. Si cette fissure latérale croit jusqu'à ce qu'elle atteigne la surface, une partie de la matière est enlevée (enlèvement de matière mode fragile). La fissure radiale restante détermine la profondeur de l'endommagement de la subsurface qui s'ajoute à celle de la surface optique.

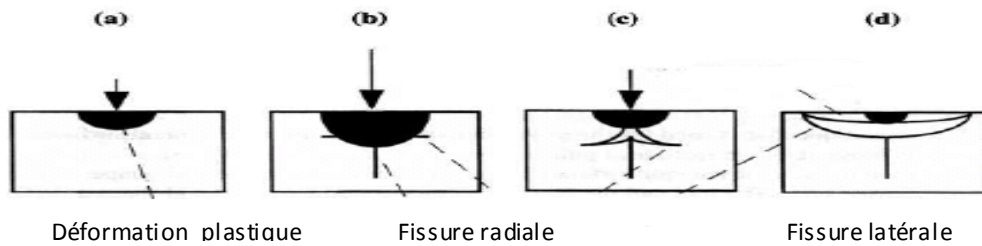


Fig.3.11: Principe de rodage ductile.

le procédé d'enlèvement de matière en mode fragile par rodage des surfaces optiques se fait comme suit: (a) l'augmentation de la charge provoque la déformation plastique d'une couche au voisinage du point de contact, (b) une fois la charge maximale appliquée, et la fissure radiale générée, la charge est diminuée provoquant une fissure latérale, (c) qui se développe avec la charge décroissante, (d) si la fissure latérale atteint la surface, la matière est alors enlevée laissant un creux avec une fissure radiale sous la surface.

$$\frac{E_p}{E_c} \propto d_i \dots\dots(3.5)$$

Le E_p requis pour la déformation de matière plastique est proportionnel au volume déformé, et l'énergie E_c , exigée pour la génération d'une fissure est une fonction de la surface créée par propagation des fissures, d_i est la profondeur de pénétration de la déformation. Par conséquent, en diminuant la profondeur de l'indentation, l'écoulement plastique devient plus intéressant comme mécanisme d'enlèvement de la matière. Donc, il existe une profondeur de coupe critique pour avoir un rodage mode ductile. Une surface de verre ainsi rodée présente une surface lisse avec un endommagement subsurfacique de profondeur comparable avec celle obtenue par le polissage. L'étape suivante de polissage sert alors à enlever la surface contenant des contraintes résiduelles, et à réduire la rugosité.

Un enlèvement de matière mode ductile a été atteint avec un contrôle précis de la position relative de l'outil par rapport à la pièce. Ceci peut être fait par rodage de précision à abrasifs fixes, ou par diamant ponctuel tournant. En outre, il est possible d'atteindre un rodage mode ductile avec un rodage contrôlé à travers le contrôle des caractéristiques physiques de la suspension utilisée [Sin95].

3.5.2.3. Polissages chimique

Les verres sont solubles dans des solutions acides. Par conséquent, de telles réactions chimiques peuvent être utilisées pour lisser les surfaces optiques. Cette réaction, sans contact mécanique, laisse des creux non désirables. Ces réactions sont utilisées pour lisser encore plus des surfaces déjà lissées par rodage. L'intérêt principal du polissage chimique est de réduire l'épaisseur de la couche perturbée en surface polie par rapport à celle créée par des procédés classiques agissant avec des grains d'abrasifs [Tsu81].

3.5.2.4. Polissage par jet d'abrasifs en suspension

Le guidage d'une suspension de viscosité élevée, contenant des abrasifs polymères, par l'utilisation d'un jet à de hautes pressions (>50 bar) sur une surface en verre, sa rugosité peut être réduite. Lorsque les molécules de polymère touchent la surface, ils diminuent sa rugosité par leur mouvement relatif latéral par rapport à la surface.

Il est possible d'effectuer des érosions à l'échelle atomique et d'atteindre des qualités équivalentes à celles du polissage flottant si on utilise des particules ayant des dimensions inférieures au 1/10 de micron [Bro86].

3.5.2.5. Polissage par faisceau ionique

Des ions, pourvus d'une énergie cinétique très supérieure à l'énergie de cohésion du matériau qu'ils bombardent, sont capables de provoquer des déplacements atomiques et des collisions en chaîne. Ces collisions en cascade produisent des perturbations et provoquent l'éjection d'atomes situés dans les premières couches.

Pour des énergies de l'ordre du KeV le rendement est de l'ordre de 1 atome éjecté par ion incident. Pour des densités de courant de l'ordre de 0.5 mA/cm², une érosion d'environ 5 couches atomiques par seconde se produit [Mar00].

3.5.2.6. Polissage avec un outil flottant

C'est un procédé de polissage souvent utilisé pour la finition des surfaces planes ultra lisses en silice. L'outil et la pièce sont immergés dans la suspension abrasive. L'outil flotte sur la suspension, et l'épaisseur de la couche liquide entre l'outil (souvent en feutre ou en téflon) et la pièce est un multiple du diamètre des grains abrasifs utilisés (souvent de l'oxyde de cérium). Une fois le processus de polissage enclenché, aucun abrasif n'est ajouté. Sous l'effet de la vitesse de rotation de la pièce

les grains abrasifs passent au dessus de la surface, et vont au fond du récipient qui les contient [Vog92].

3.5.2.7. Polissage laser

L'utilisation d'un faisceau laser (ex CO₂), les surfaces optiques en verre peuvent être lissées, en les faisant chauffer jusqu'à environ leurs points de transformation. Le polissage laser est un compromis entre deux effets : d'un côté un échauffement rapide est nécessaire pour maintenir la forme requise de la surface, (la surface fond légèrement) et, de l'autre côté, la surface a besoin d'être suffisamment chauffée pour éviter tout endommagement subsurfacique issue d'un formage antérieur. Par conséquent, le polissage laser doit introduire une grande quantité d'énergie dans une période très courte dans le matériau, ce qui introduit des contraintes thermiques sur la surface optique. Une rugosité de 1nm rms a été atteinte sur du verre BK7 avec ce procédé [sin95].

3.5.2.8. Polissage magnetorheologique

Le polissage est réalisé par des particules magnétiques et abrasives .quand ce mélange est soumis à l'action d'un champ magnétique les particules s'agglomèrent et la matière qui constitue le polissoir se rigidifie. La viscosité peut être réglée en temps réel en agissant, sur le champ, dans une zone active de petite taille. Les ondulation de hautes fréquences sont effacées par la rigidité du polissoir et les ondulations de basse fréquence sont réduites en agissant sur le temps d'action du polissoir en chaque point de la surface .les abrasifs incorporés sont ceux utilisés pour le polissage classique[Nin96].

Le tableau 3.2 regroupe un certain nombre de procédés de polissage asphérique, leurs avantages et inconvénients

Tableau.3.2. Processus d'enlèvement de la matière.

| Méthode de polissage | Description | Avantages | Inconvénient |
|----------------------------------|--|--|---|
| Polissage mécano-chimique | Procédé mécano-chimique qui réduit la rugosité les contraintes résiduelles, et les fissures subsurfaciques d'une surface rodée préalablement | Supprime les contraintes, laisse une subsurface endommagée minimum et corrige la forme | Usure faible, plus 30 variables influencent le procédé |
| Rodage ductile | L'enlèvement de matière se fait en mode ductile et non en mode fragile,c'est un procédé mécanique qui dépend du module d'élasticité du matériau et de la profondeur d'usinage. | Offre de meilleures qualités d'enlèvements de la matière que le précédent (30µm/h),et ne laisse presque aucune subsurface endommagée | La surface est hautement contrainte est nécessaire d'assurer un alimentation continue en abrasif, une bonne rigidité de la machine, une protection chimique de l'environnement. |
| Polissages chimique | L'enlèvement de matière est causé par une solution alcaline | Pas de contact mécanique, pas endommagement subsurfacique, et pas de couche déformée plastiquement génère une faible rugosité et une haute précision sur la forme de la surface | Il est difficile de contrôler la précision sur la forme à cause de l'absence de contact, Les résidus chimiques collent sur la surface et devront être enlevés |
| Polissage avec un outil flottant | L'échantillon et l'outil sont situés dans un récipient et immergés dans une suspension abrasive, ils tournent avec la même vitesse et dans la même direction. le nombre de particules diminue au coure de l'opération jusqu'a ce qu'il n'y en ait plus | Génère des surfaces super lisses sans aucun endommagement, au début, il y a un contact mécanique, mais à la fin la pièce et l'échantillon sont séparés uniquement par une couche d'eau | Un contrôle de température est nécessaire, |
| PMR | A l'intérieur de la suspension, des particules magnéto sensibles pressent les particules abrasives contre la surface optique | Permet la réalisation de plusieurs formes grâce au champ magnétique appliqué | La suspension doit contenir des particules magnéto sensible |

| | | | |
|---|--|---|---|
| <p>Polissage par laser</p> | <p>Réduit la rugosité et rétablit l'endommagement subsurfacique à travers un échauffement de la couche superficielle jusqu'au point de fusion, il existe deux possibilités 1) chauffer toute la surface avec un faisceau laser 2) chauffer une petite partie de la surface avec un faisceau laser focalisé</p> | <p>Pas de contact mécanique, possibilité de finition de formes variées, la fusion ponctuelle grâce à un faisceau focalisé maintient la forme de la surface.</p> | <p>La haute température cause des changements chimiques dans le matériau, des réactions chimiques avec l'environnement, augmentation de la corrosion. Un refroidissement est nécessaire pour éviter la fissuration. beaucoup d'énergie est nécessaire pour l'échauffement profond du matériau, aussi profond que nécessite le fait de rétablir la subsurface endommagée</p> |
| <p>Polissage par faisceau ionique</p> | <p>L'érosion par pulvérisation de la surface est un procédé d'enlèvement atome par atome stochastique. Le rendement de pulvérisation est fonction de l'angle macroscopique entre la direction du flux ionique incident et la normale locale à chaque point de la surface.</p> | <p>Pas de contact mécanique possibilité de finition de formes variées formage asphérique exact (si on utilise un faisceau ionique focalisé)</p> | <p>Vide nécessaire, la pulvérisation elle-même est un procédé érosif, l'implantation d'ions au sein du matériau, réactions chimiques entre les ions et les atomes superficiels, amélioration de la rugosité après polissage de longue durée.</p> |
| <p>Polissage par jet d'abrasifs en suspension</p> | <p>Une suspension très visqueuse contenant des abrasifs est guidée par l'utilisation d'un bec à haute pression sur une surface en verre</p> | <p>Pas de contact mécanique</p> | <p>Un jet haute pression, et une viscosité élevée sont nécessaires.</p> |

3.6. Méthodes de fabrication des surfaces asphériques

3.6.1. Meulage de haute précision

Les surfaces des lentilles sphériques en verre optique sont transformées en surfaces asphériques par des meules tournant à très grande vitesse (voir figure 3.12). Une fois que la meule a fini d'affûter le verre afin d'obtenir une courbure asphérique, la surface est polie. Un système automatique de meulage asphérique haute vitesse, précis au nanomètre près. Avec cette procédure, il est possible de façonner la matrice en une surface asphérique particulière, telle qu'une courbure parabolique décentrée.

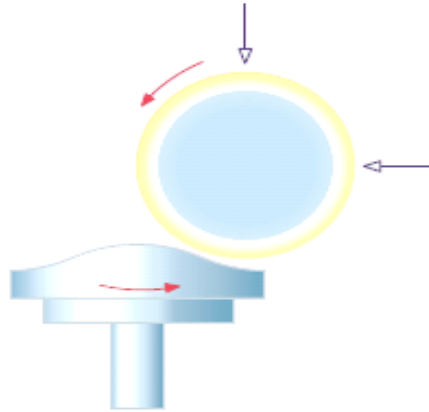


Fig. 3.12: Principe de meulage de haute précision

3.6.2. Moulage de précision

Le moulage de précision consiste à chauffer le verre optique pour le ramollir. Il est ensuite formé dans un moule asphérique résistant à la chaleur (voir figure 3.13). Cette technologie est couramment utilisée dans la fabrication des lentilles asphériques destinées aux objectifs des appareils photo.

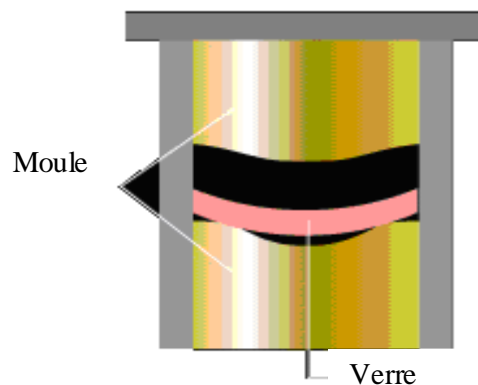


Fig.3.13: Moulage de précision

3.6.3. Technique de fabrication des lentilles hybrides

Le terme Plastics on Aspherical Glass, ou PAG, fait généralement référence à la méthode de fabrication des lentilles asphériques hybrides, combinant verre et résine. Une résine flexographique UV est injectée entre la lentille en verre sphérique et le moule en métal asphérique, puis irradiée avec un rayonnement UV afin de façonner une lentille hybride comme le montre la figure 3.14.

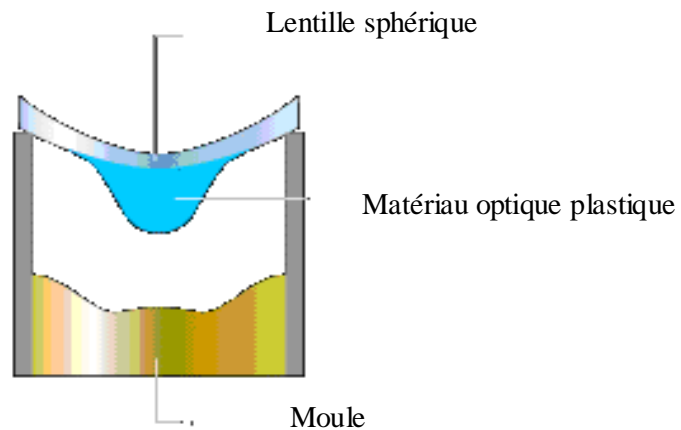


Fig.3.14: Technique de fabrication des lentilles hybrides.

3.6.4. Usinage par commande numérique

On présente quelques résultats obtenus par cette méthode, et les paramètres qui influent pendant le processus de meulage, et le doucissage. Cette étude pour fabriquer une lentille asphérique (parabolique concave) avec $P-V=0.6929\mu\text{m}$ et $Ra=124\text{nm}$. Les dimensions de la lentille asphérique sont montrées dans le tableau 3.3.

Tableau 3.3: Dimensions et paramètres de la lentille asphérique

| | |
|-------------------------|---------------------|
| Profil | parabolique concave |
| Rayon de courbure | $R_0= 150\text{mm}$ |
| Constant conique K | $K=-1$ |
| Diamètre de la lentille | $D=50\text{mm}$ |

La surface asphérique est donnée par la relation 3.6

$$Z = \frac{-x^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2 r^2}} + \sum a_i r^{2i} \dots\dots (3.6)$$

Si $\sum a_i r^{2i} = 0$ donc $Z = \frac{-x^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2 r^2}} \dots\dots (3.7)$

Pour une surface parabolique il faut que $K=-1$ donc $Z = \frac{-x^2}{R^2} \dots\dots (3.8)$

① Meulage

Le principe de la génération automatique de courbe en anglais (automatic curve generation ACG), est employé pour générer la surface de la lentille asphérique (voir figure 3.15).



Fig.3.15: Principe de meulage (ACG)

Après le meulage, Chuang [Chu06] a démontré dans son étude que la forme était plus mauvaise après utilisation d'un angle 13.5° , il y a aussi une cavité de $5\mu\text{m}$ de profondeur au centre de la lentille comme le montre la figure 3.16.

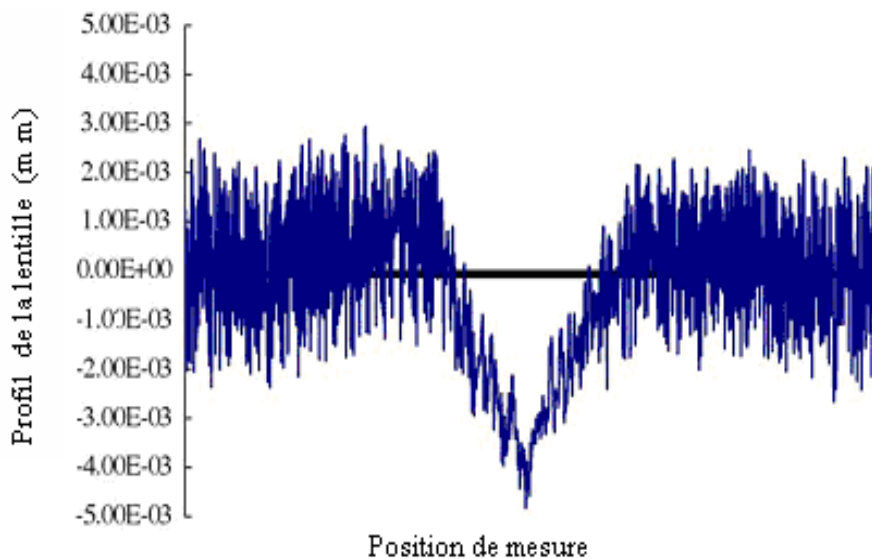


Fig.3.16: La forme de la lentille après le meulage [Chu06].

La figure 3.17 montre la relation entre l'angle d'inclinaison et la profondeur de la cavité. On constate que l'augmentation d'inclinaison conduit à la diminution de la cavité.

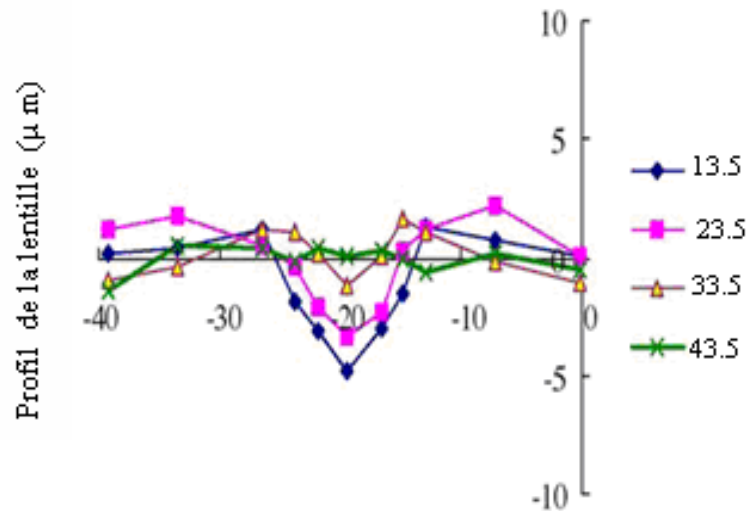


Fig.3.17: Relation entre l'angle d'inclinaison et la forme [Chu06].

② Doucissage

Chuang [Chu06] a démontré l'effet de la grosseur des grains d'alumine (Al_2O_3) sur l'écart de forme (P-V) et la rugosité (Ra) des lentilles asphériques doucies (voir figure.1.18). Il a constaté que les deux critères de l'état de surface varient linéairement en fonction du type des grains abrasifs.

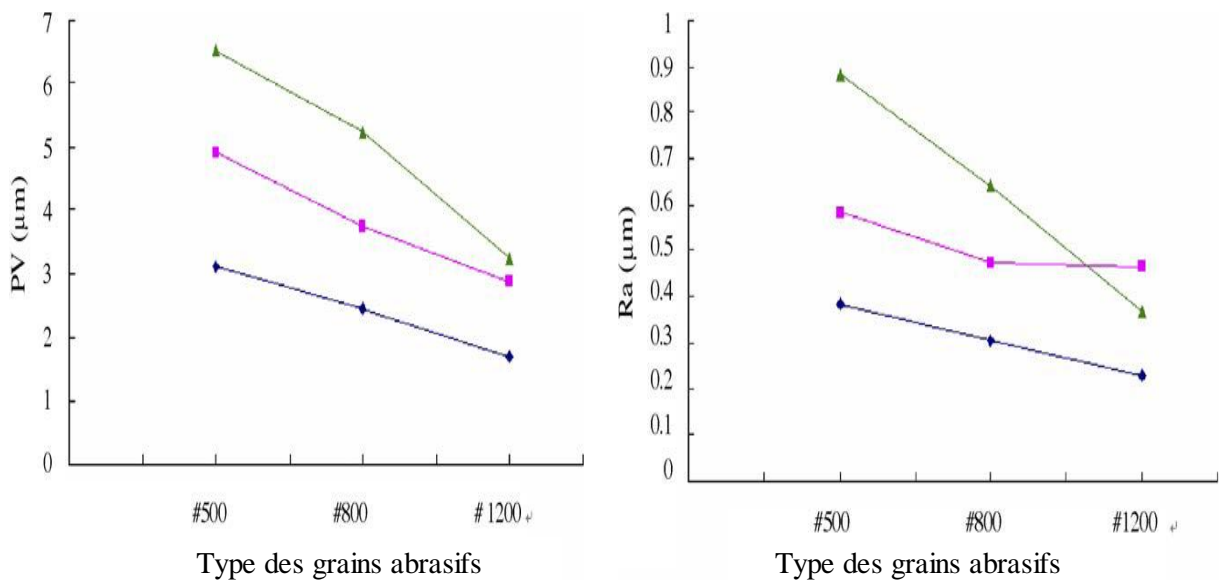


Figure 1.18 : Relation entre la rugosité et l'écart de forme et le type des grains abrasifs lors du doucissage [Chu06].

Chuang [Chu06] a également étudié l'effet de la nature du rodoir sur l'écart de forme des lentilles asphériques meulées préalablement par un outil diamanté. Pour cela, il a utilisé un rodoir dur (acier) un moins dur (MHC14B monocouche) et un très dur

(composite IC1000/SUBA IV). Les résultats de la figure 3.19 montrent que l'écart de forme obtenu par le rodoir IC1000 SUBA IV est clairement meilleur que celui obtenu par les deux autres rodoirs. Ce rodoir peut en même temps éliminer les traces du meulage et maintenir la forme originale de la lentille [Chu06].

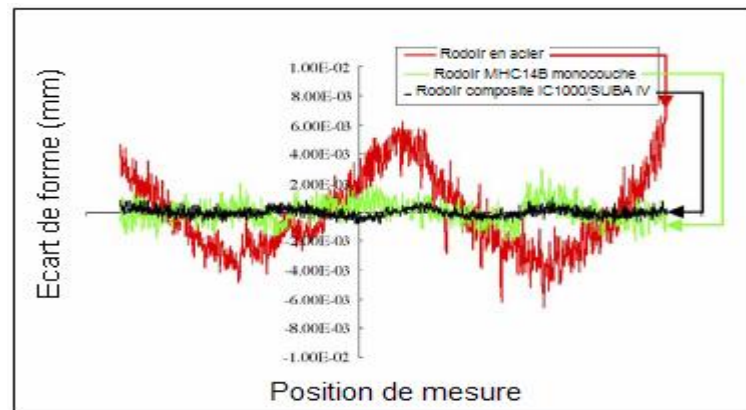


Fig.3.19: Influence du type de rodoir sur l'écart de forme des lentilles rodées [Chu06].

3.7. Mesure des surfaces asphériques

3.7.1. Options métrologiques actuellement disponibles

Les dispositifs de métrologie disponibles sont de trois types:

3.7.1.1. Les systèmes tactiles

Ils construisent une cartographie complète de la surface à partir des profils 2D tracés par un stylet qui se déplace au contact de la lentille. Ces systèmes sont très flexibles et peuvent ainsi s'appliquer à la mesure d'une large variété de pièces. En revanche, ils n'effectuent que des profils 2D à faible densité de points de mesure, et la reconstruction de la topographie 3D requiert une durée très longue (DTCM de 20 à 60 minutes pour une topographie complète). De plus, ils présentent le risque d'endommager la surface par le contact du stylet.

3.7.1.2. Les systèmes à compensation

Ils utilisent, soit une lentille spécifique réalisée sur mesure, soit un hologramme généré par ordinateur, pour transformer l'onde sphérique émise par un interféromètre de Fizeau en onde asphérique adaptée à la géométrie de l'optique à tester. Mais la précision de mesure reste limitée par la qualité de la lentille, ou de l'hologramme, utilisés comme référence, ainsi que par la précision de leur alignement. De plus, ces

systèmes, correspondant à une configuration donnée, n'offrent aucune flexibilité par rapport aux différents types de pièces à contrôler.

3.7.1.3. Les systèmes à couplage de zone

À l'aide d'un interféromètre de Fizeau, une succession de petits éléments composant la surface asphérique, puis les recombinent pour reconstituer la topographie de la surface totale. Mais la durée de mesure est longue, et l'amplitude de mesure reste en fait limitée à une déformation inférieure à 80 μm par rapport à la meilleure sphère de référence, soit le dixième de ce qu'il faudrait pouvoir mesurer.

3.7.2. Contrôle les surfaces asphériques

Dans cette méthode (voir figure 3.20), la surface asphérique à contrôler A est balayée suivant son axe de symétrie et comparée à une surface sphérique de référence de rayon R_2 : on utilise ainsi une configuration de Fizeau dans laquelle l'épaisseur de la cavité varie. On mesure simultanément les distances d_0 au sommet et d dans la zone (sur le même interférogramme pour les deux).

En partant de la position de départ $v = 0$, soit $d_{00} = R_2 - R_0$, on balaye la surface asphérique en augmentant v (c. à d. en diminuant d_0). Dans la même temps, la position du point Q (h, z) se déplace le long du profil de la surface asphérique A à partir de $S_A(0,0)$, et d diminue comme d_0 , de façon semblable mais pas totalement identique, de sorte que la différence p entre d et d_0 représente justement l'écart asphérique de la surface contrôlée par rapport à une surface sphérique. En mesurant ainsi simultanément d_0 et d , on peut en déduire les deux autres valeurs: $v = d_0 - d_{00}$ et $p = d - d_0$. On peut alors reconstruire mathématiquement le profil asphérique (h,z) à partir de la fonction (v,p) [Déc],[Smy].

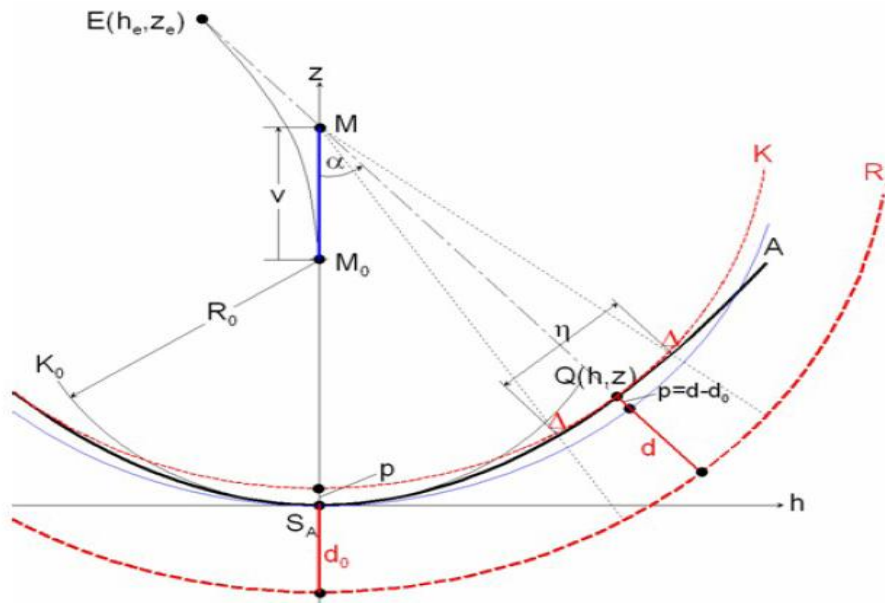


Fig.3.20: Contrôle des surfaces asphériques

3.7.3. Interféromètre de contrôle des optiques asphériques

Ce nouvel instrument de contrôle (voir figure 3.21) de fabrication des lentilles asphériques de révolution réalise, en une seule mesure interférométrique sans contact, une cartographie 3D complète de la surface asphérique (positions x , y et phase h), avec une haute densité de points de mesure. La cartographie ainsi produite fournit à la fois la forme, l'ondulation et la détection des défauts locaux

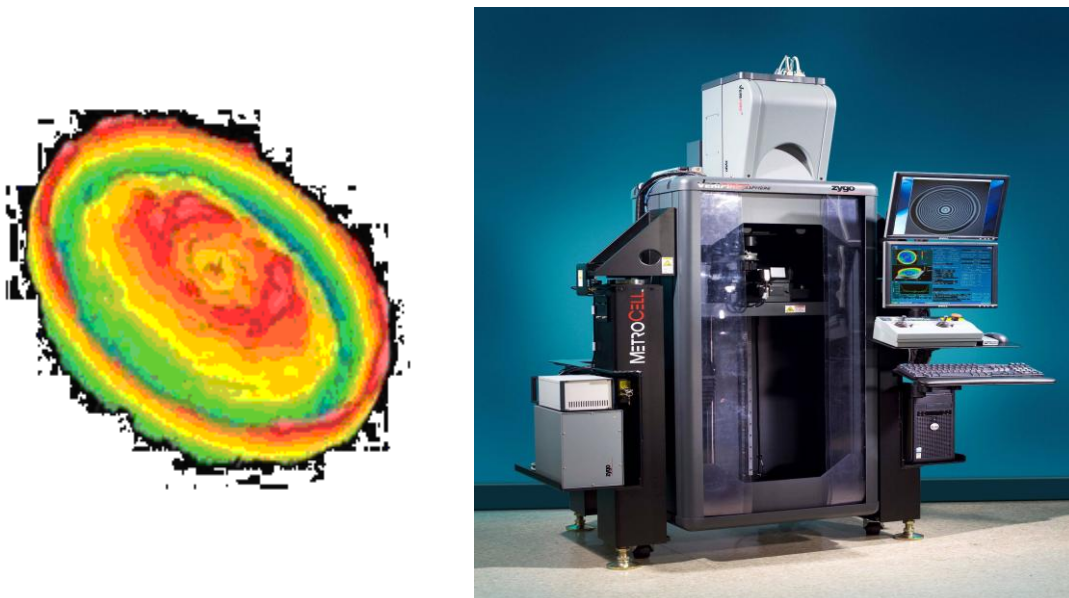


Fig.3.21: Interféromètre de contrôle des optiques asphériques

Il est intéressant d'observer que les points forts du système satisferont les experts en interférométrie, car ils respectent les principes généraux applicables en métrologie

- le résultat est basé sur des mesures de distances uniquement interférométriques;
- les distances mesurées sont les distances relatives entre deux pièces matérielles: la surface de la lentille asphérique, et celle de la sphère de référence
- les mesures sont automatiquement effectuées là où les conditions optiques sont optimales, c. à d. dans les zones où l'incidence est normale;
- chaque zone mesurée est indépendante de toutes les autres, sans recours à un couplage de zones qui serait générateur d'erreurs;
- le balayage axial résout le problème de l'étendue du champ de mesure;
- les coordonnées transversales sont déduites d'une mesure de phase;
- le grandissement et la distorsion du système optique de l'interféromètre n'influent pas sur le résultat;
- les grandeurs mesurées sont évidentes, ce qui rend la méthode ;
- la méthode ne nécessite pas le recours à une optique additionnelle qui demanderait un alignement complexe et précis;

3.7.4. Système de mesure de conversion de coordonnées polaires

L'objet à mesurer par système de mesure (voir figure 3.22) est placé sur une table rotative et pivoté sur son centre de courbure tandis qu'un interféromètre de calibrage est utilisé pour mesurer la différence entre la surface de l'objet et une surface sphérique de référence. Les résultats de mesure sont alors traités par un ordinateur pour déterminer la forme de la surface.

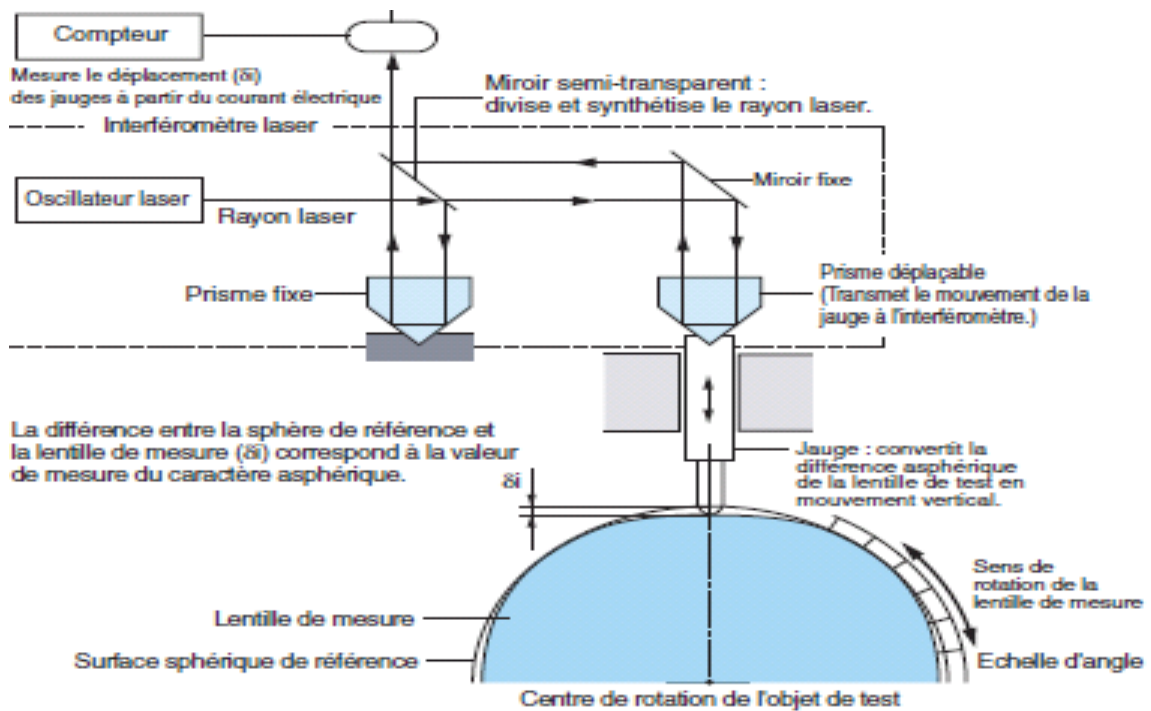


Fig.3.22: Système de mesure de conversion de coordonnées polaires

3.8. Application des composants asphériques

L'utilisation des composants optiques asphériques dans un système optique réduit au minimum le nombre de lentilles exigés pour obtenir une certaine qualité d'image. Par conséquent, un tel système optique a besoin de moins d'espace, et moins de poids, donc l'absorption et diminuer.

L'application des composants optiques asphériques est :

Astronomie : télescopes, recherche de l'espace ;

Industrie médicale ;

Industrie de laser ;

Industrie de la photo : caméra ;

Technologie lithographique ;

Lecteur de CD et technologie de CD-ROM ;

Industrie de l'armement ;

Chapitre IV

Etude expérimentale

4.1. L'objectif recherché

L'objectif de ce travail est la réalisation d'une lentille asphérique en utilisant qui utilise la méthode hybride (meulage - moulage). Cette méthode consiste à fabriquer des lentilles sphériques puis le moulage en tenant compte des conditions spécifiques telles que la température, temps de maintien...etc. Pour cela, on a suivi les étapes suivantes.

- Réalisation du moule;
- Fabrication des trois lentilles sphériques (concave_convexe);
- Moulage des lentilles.

4.2. Réalisation du moule

4.2.1. Matériaux de moule

Le moule est fabriqué en fonte. La fonte est un alliage de fer et de carbone dont la teneur en carbone est supérieure à 2%. Les fontes se divisent en deux groupes selon leur mode d'élaboration, suivant l'état d'existence du carbone sous forme de cémentite ou de graphite.

a. Fontes blanches:

La majorité du carbone se trouve sous forme de cémentite, ce qui donne à la cassure une couleur claire spécifique, c'est pourquoi elle est dite blanche. Elle est caractérisée par des teneurs en carbone et au silicium relativement faibles, et par une teneur élevée en manganèse. Ces fontes sont obtenues lorsque le refroidissement est assez rapide, et la température de coulée est assez basse.

b. Fontes grises :

La totalité du carbone est libre et se trouve sous forme de graphite. Elles sont obtenues lors du refroidissement lent avec une température de coulée assez élevée, Alors la cémentite peut se décomposer en donnant du carbone libre sous forme de graphite.

On a choisi la fonte grise car elle présente des avantages comme:

- facilité d'usinage ;
- très bonne résistance à la corrosion et à la déformation à chaud ;

- très bonne absorption des vibrations ;
- excellente coulabilité ;
- ductile.

4.2.2. Conception du moule

On a réalisé le moule d'après la figure 4.1 par tour a commande numérique .Il se compose de deux surfaces, l'une parabolique de rayon de courbure variant entre 10mm et 13.60mm et l'autre sphérique de rayon de courbure de 12.50m. Le moule à 40mm de diamètre et 50mm de hauteur.

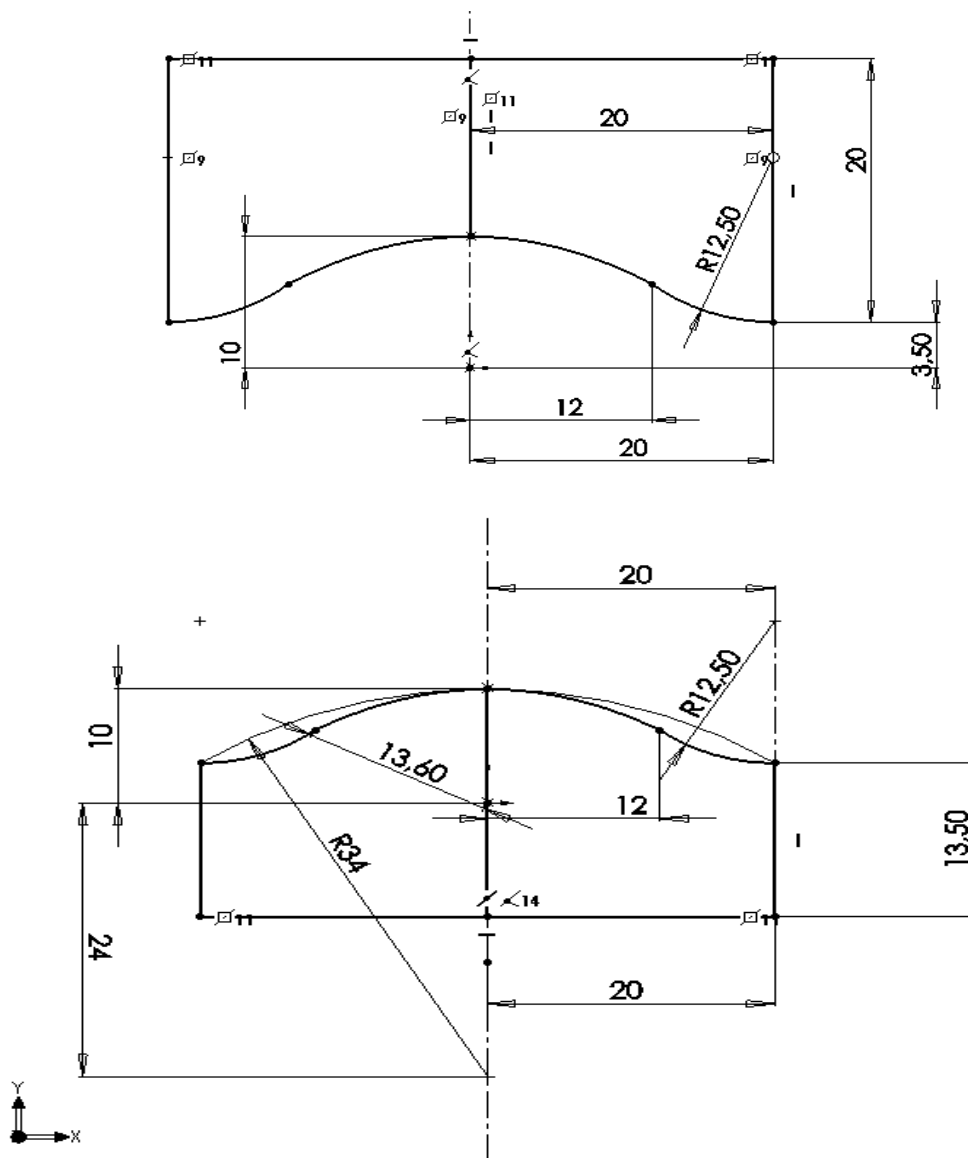


Fig.4.1: Moule à réaliser

Le moule réalisé se compose de deux parties indépendantes.

La première partie (matrice) est conçue de manière suivante:

De A à B surface sphérique de rayon de courbure 12.5 mm, de B à C surface asphérique concave de rayon variable de 10mm à 13.60mm, la matrice a 40mm de diamètre et 20 mm de hauteur comme le montre la figure 4.2.

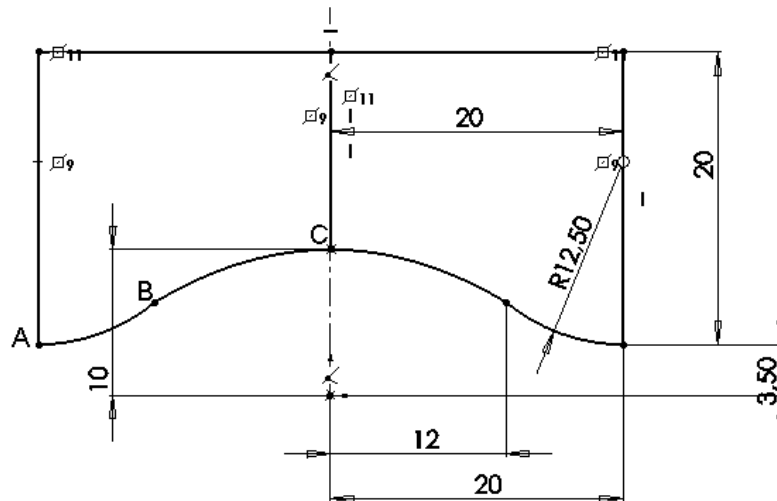


Fig.4.2: Partie supérieure du moule

La deuxième partie (poinçon) est conçue de la même manière que la partie supérieure sauf de B à C on a une surface asphérique convexe comme le montre la figure 4.3.

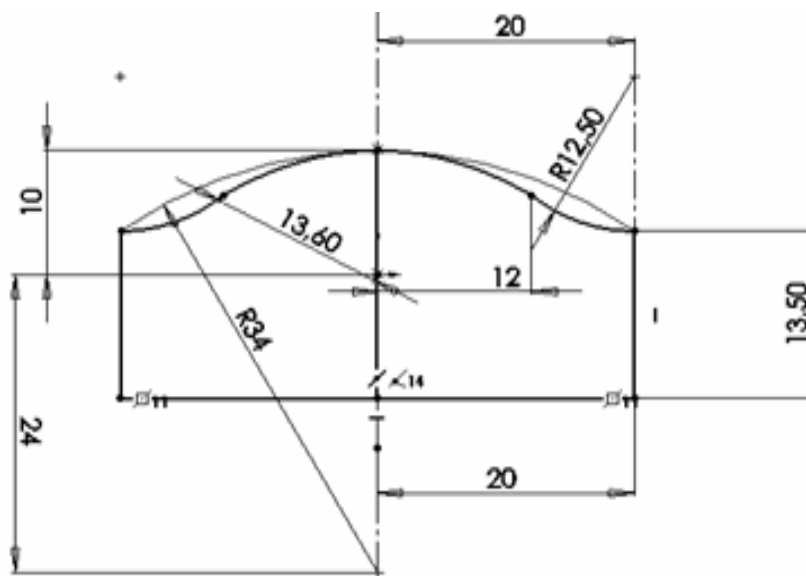


Fig.4.3: Partie inférieure du moule

La figure 4.4 montre le schéma d'ensemble du moule

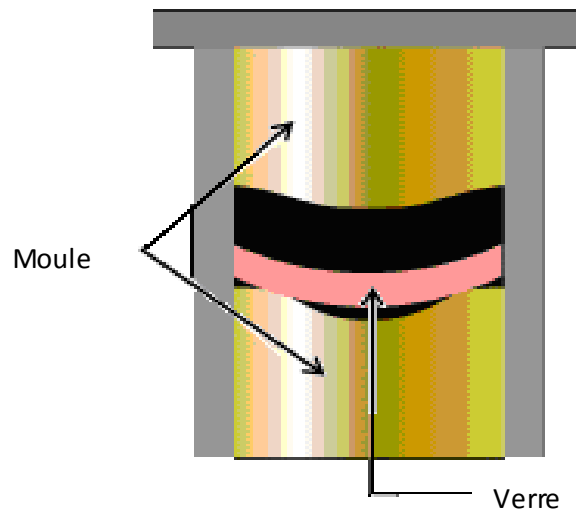


Fig 4.4: Schéma d'ensemble du moule

4.3. Réalisation des lentilles sphériques

4.3.1. Meulage

Le meulage (voir la figure 4.5) est un procédé d'usinage permettant de donner la forme géométrique finale des composants optiques à réaliser, tel que les surfaces sphériques (convexe- concave) et des formes asphériques (cylindrique, torique). Les outils sont des meules avec du diamant fixés par frittage. Les outils utilisés sont des meules à diamants dans les formes sont déterminés par leur application (meule annulaire, conique et cylindrique). L'outil à diamants annulaire est placé suivant un angle de façon à ce qu'il réalise le rayon de courbure demandé.

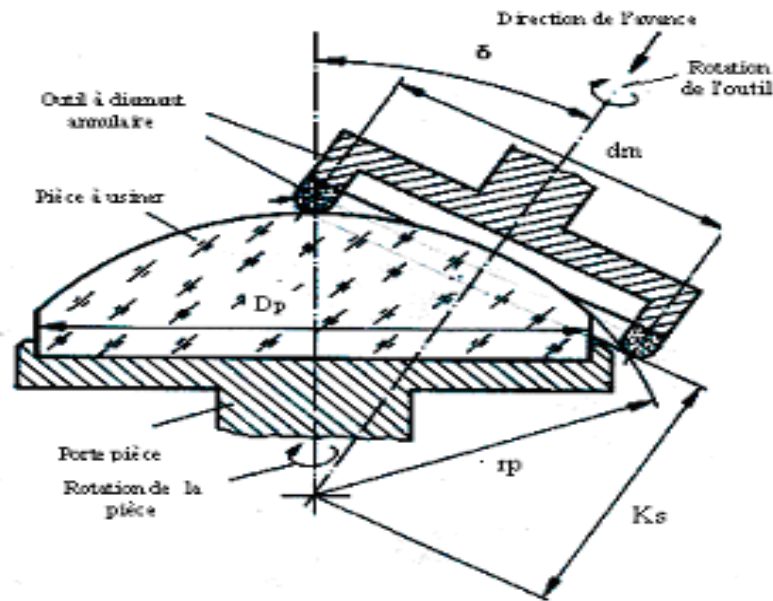


Fig.4.5: Le principe de meulage d'une lentille avec l'outil à diamant annulaire

D'après les relations suivantes on mesure d'angle d'inclinaison:

Pour la forme concave : $\sin \alpha = \frac{dm}{2(rp - rc)} \dots\dots(4.1)$

Pour la forme convexe : $\sin \alpha = \frac{dm}{2(rp + rc)} \dots\dots(4.2)$

dm : diamètre moyenne de l'outil= 31.5 mm

rc : rayon de la couche abrasif = 1.5 mm

rp : rayon de la surface de fonction= 34 mm

4.3.2. Rodage des lentilles sphériques

Le rodage est un procédé d'enlèvement de copeaux par des abrasifs. Il sert à éliminer les imperfections macro-géométriques, et diminue la rugosité de la surface obtenue par les procédés précédents (meulage, tronçonnage ...), et préparer les pièces usinées pour le procédé de finition (polissage) (voir la figure 4.6).

Dans cette étude on a utilisé plusieurs fractions en alumine (F80, F30, F20, F7) .

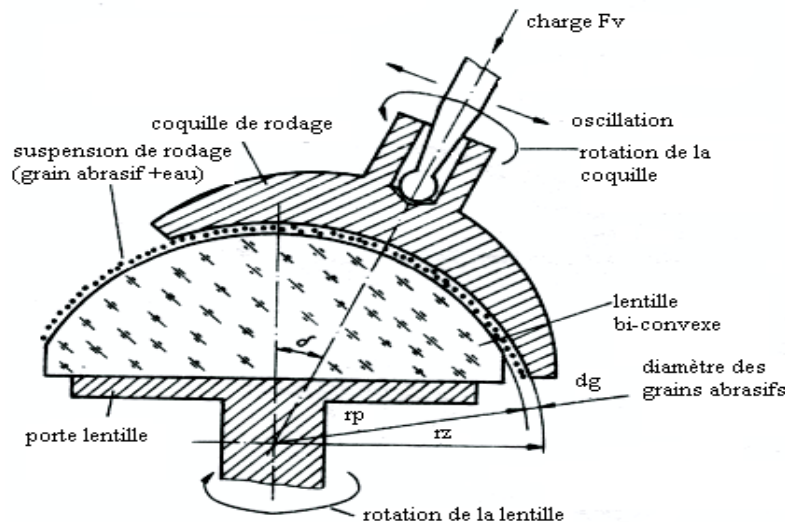


Fig.4.6: Principe d'usinage par rodage d'une surface sphérique du verre

4.4. Description de la réalisation de la lentille asphérique

4.4.1. La forme

On a réalisé trois lentilles sphériques concaves convexes avec un rayon de courbure de 34 mm et une épaisseur de 8 mm. On a choisi cette forme qui s'approche de la forme de la lentille asphérique, qu'on veut obtenir.

La réalisation de la surface asphérique se fait de la manière suivante

Une fois la lentille concave-convexe réalisée, on la place entre le poinçon et la matrice comme le montre la figure 4.4, puis on place le tout dans un four jusqu'à la température de 400°C , avec un temps de maintien de 2h. On note qu'il n'y avait pas de changement, donc on peut conclure qu'il y a une erreur dans le choix du verre utilisée (l'indice de réfraction). Après la première expérience, on a mesuré l'indice de réfraction $n=1.464$ qui correspond au verre crown et T_g (température de transition vitreuse) supérieure à 570°C . Dans ces conditions on a mis la seconde lentille dans le four jusqu'à la température 630°C avec un temps de maintien de 2h, on a réussi à obtenir la forme désirée mais on a pas récupéré la lentille (problème de coulage de la lentille sur le paroi du moule), qui a conduit à la fissuration de la lentille ainsi que l'oxydation du moule qui a un impact sur la surface comme le montre la figure 4.7.

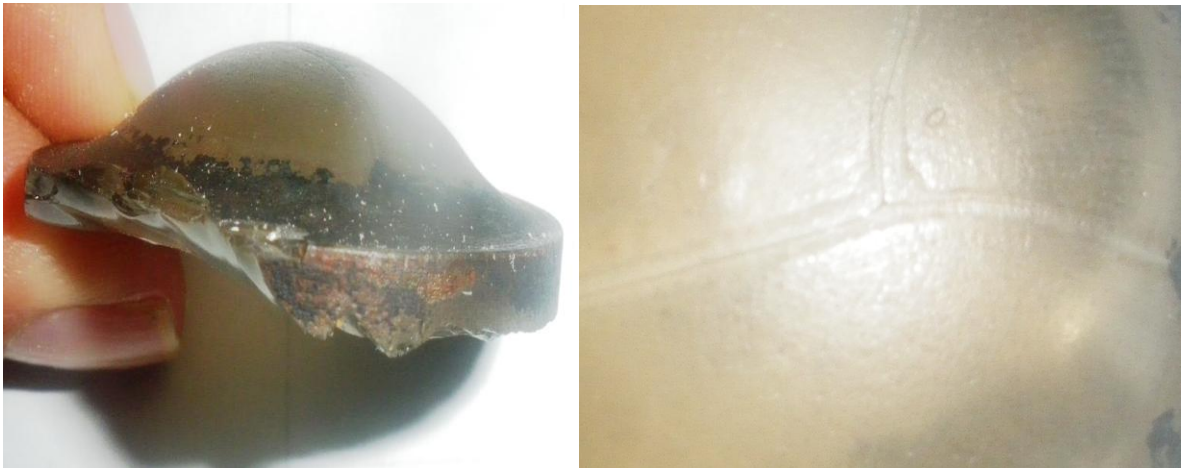
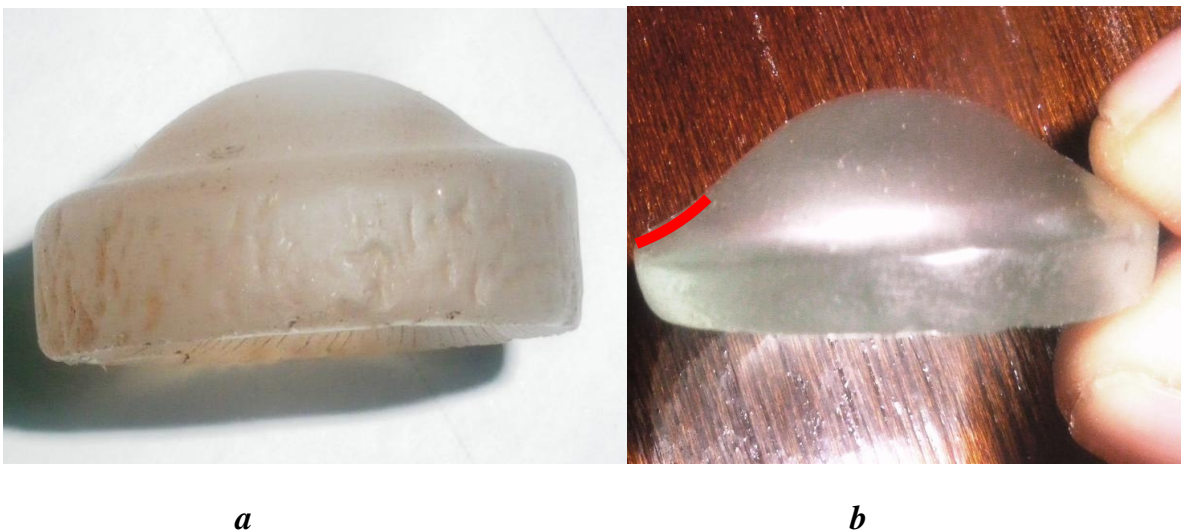


Fig.4.7: Oxydation et fissuration de la lentille

Pour éviter ces problèmes, on a diminué le diamètre à 38mm, et on a ajouté une poudre à base de MgO sur les parois du moule, dans ces conditions on a mis dans le four la troisième lentille.



a

b

Fig.4.8: Lentille asphérique réalisée

D'après la figure 4.8.a on a obtenu la forme désirée mais le problème de la surface qui reste toujours rugueuse. Avant de faire le moulage, on a amélioré l'état de la surface de la troisième lentille (rodage, polissage). On a constaté qu'il y a des changements dans l'état de surface figure .4.8.b (la surface reste rugueuse sur les bords la surface en trait rouge).

4.4.2. Contrôle de profil de la surface

Pour contrôler le profil de la surface asphérique, on a utilisé le projecteur de profil avec un grandissement $\times 10$, et on a fixé une ligne comme référence, puis on a mesuré les coordonnées (x, y) pour 98 points montrés sur le tableau 4.1, on a obtenu le profil suivant:

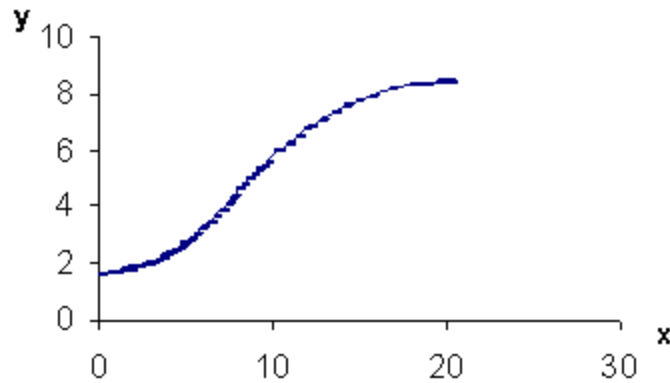


Fig.4.9: La forme de la lentille

D'après la figure 4.9 on ne peut pas juger si ce profil correspond à la surface que nous avons réalisé, pour cela il faut calculer les rayons de courbure de la surface réalisée.

Tableau 4.1 Cordonnes (x, y) mesurées

| | | | | | | | |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| 8.7000 | 5.1340 | 3.8000 | 2.2960 | 2.5750 | 1.9480 | a = [0 | 1.6250] |
| 9.0000 | 5.2730 | 3.8290 | 2.3140 | 2.6000 | 1.9570 | x | y |
| 9.2500 | 5.4080 | 4.0000 | 2.3750 | 2.6500 | 1.9560 | 0.5000 | 1.6890 |
| 9.5300 | 5.5750 | 4.2500 | 2.4640 | 2.6750 | 1.9670 | 1.0000 | 1.6640 |
| 10.1870 | 5.9260 | 4.5000 | 2.5520 | 2.7000 | 1.9670 | 1.2250 | 1.7320 |
| 10.3000 | 5.9910 | 4.5770 | 2.5030 | 2.7290 | 1.9760 | 1.5000 | 1.7890 |
| 10.8000 | 6.2520 | 4.6500 | 2.6200 | 2.7500 | 1.9870 | 1.5700 | 1.7910 |
| 11.3200 | 6.4780 | 4.7000 | 2.6480 | 2.8000 | 1.9970 | 1.6000 | 1.7960 |
| 11.8230 | 6.7100 | 4.8000 | 2.6860 | 2.8250 | 1.9970 | 1.6250 | 1.7960 |
| 12.0000 | 6.7860 | 5.0000 | 2.7770 | 2.8500 | 2.0080 | 1.6500 | 1.7960 |
| 12.6850 | 7.0690 | 5.2500 | 2.8830 | 2.8800 | 2.0150 | 1.7000 | 1.8100 |
| 13.3620 | 7.2990 | 5.5000 | 3.0330 | 2.9000 | 2.0160 | 1.7250 | 1.8080 |
| 14.1030 | 7.5240 | 5.7590 | 3.1750 | 2.9250 | 2.0320 | 1.7500 | 1.8070 |

| | | | | | | | |
|----------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 14.8280 | 7.7330 | 5.8000 | 3.1890 | 2.9500 | 2.0360 | 1.7750 | 1.8170 |
| 15.5770 | 7.9060 | 5.9000 | 3.2460 | 2.9750 | 2.0430 | 1.8000 | 1.8180 |
| 16.7040 | 8.1200 | 6.2340 | 3.4320 | 3.0000 | 2.0540 | 1.8250 | 1.8210 |
| 17.9980 | 8.2840 | 6.5230 | 3.6030 | 3.2500 | 2.1250 | 1.8500 | 1.8240 |
| 18.1940 | 8.3090 | 7.0130 | 3.9000 | 3.5000 | 2.2050 | 1.8750 | 1.8350 |
| 18.7840 | 8.3200 | 7.2330 | 4.0490 | 3.5250 | 2.2050 | 1.9000 | 1.8390 |
| 19.4870 | 8.4030 | 7.3800 | 4.1140 | 3.5500 | 2.2220 | 1.9250 | 1.8400 |
| 19.7570 | 8.4330 | 7.5680 | 4.2840 | 3.6000 | 2.2370 | 1.9500 | 1.8360 |
| 20.0000 | 8.4370 | 7.7000 | 4.4030 | 3.6250 | 2.2480 | 1.9750 | 1.8510 |
| [20.1000 | 8.4310] | 7.9830 | 4.6100 | 3.6640 | 2.2540 | 2.0000 | 1.8510 |
| | | 8.2500 | 4.8140 | 3.7000 | 2.2610 | 2.2500 | 1.8880 |
| | | | | 3.7360 | 2.2760 | 2.5000 | 1.9380 |
| | | | | 8.5000 | 4.9790 | 3.7590 | 2.2930 |

4.4.3. Mesures des rayons de courbure de la surface asphérique.

Il est difficile de mesurer le rayon de courbure par des techniques classiques. Ce qui nous a conduit à chercher des techniques capables d'estimer le rayon de courbure de la surface asphérique. On a mesuré le rayon de courbure sur l'axe optique, qui correspond à la distance [OM], ensuite avec le logiciel Matlab, on a mesuré les distances [OM_i], qui représentent à R_i, tel que R_i le rayon de courbure pour chaque point de la surface, comme le montre la figure 4.10.

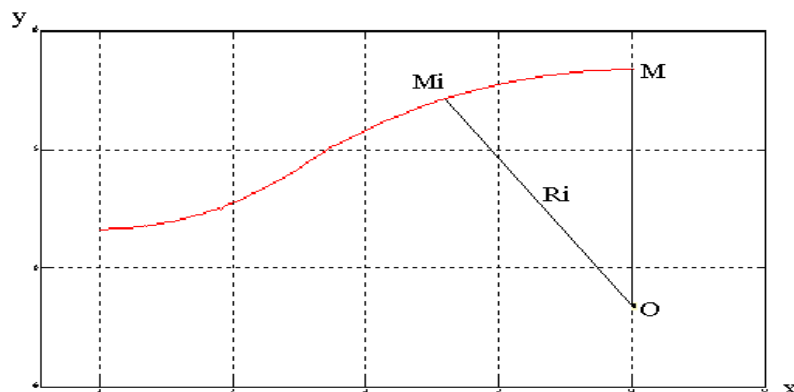


Fig.4.10: Mesure de rayon de courbure

Après une comparaison précise entre la forme de moule et de la lentille à réaliser, on a constaté que les deux ont le même profil, la figure 4.11 illustre la surface de la lentille réalisée.

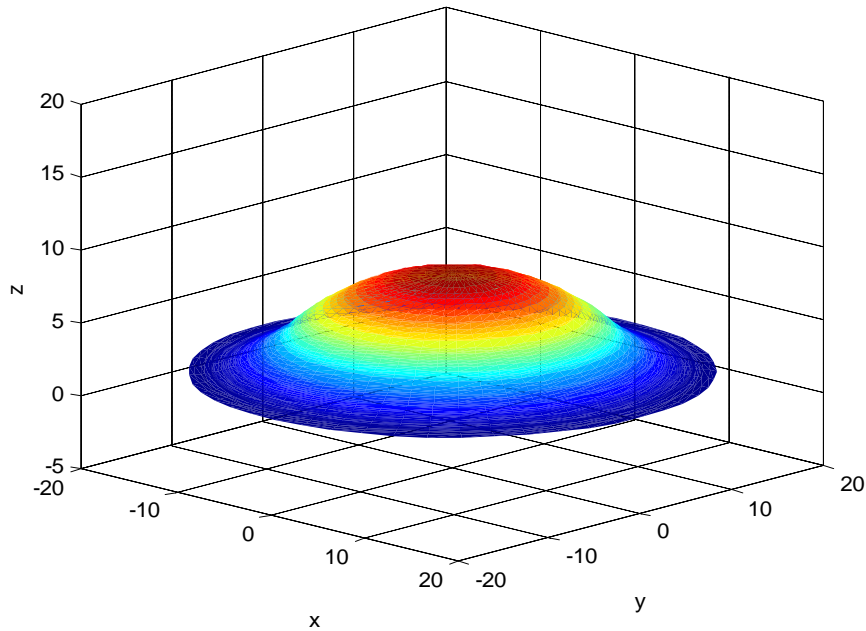


Fig.4.11: Représentation de la lentille asphérique en 3D

Mesure des rayons de courbure suivant ces étapes.

For i=1:98

$$r(i) = \text{sqrt} ((20.1-a(i,1))^2+(a(i,2)-(8.431-10))^2)$$

end.

Tableau 4.2 Valeurs des rayons de courbure.

| | | | |
|-------------------|---------|---------|---------|
| r= 13.6015 | | | |
| 13.4598 | 12.4275 | 11.3841 | 10.2669 |
| 13.3205 | 12.3771 | 11.1374 | 10.0747 |
| 13.2246 | 12.1515 | 10.8925 | 10.0602 |
| 13.0393 | 11.9098 | 10.6921 | 9.9762 |
| 12.8997 | 11.7069 | 10.4992 | 9.9908 |
| 12.7578 | 11.6368 | 10.4992 | 10.0065 |

La forme de la lentille est obtenue par les étapes suivantes

```
for i=1:98
```

```
for j=1:50
```

```
x(i,j)=(a(i,1)-a(98,1))*cos(t(j));
```

```
y(i,j)=(a(i,1)-a(98,1))*sin(t(j));
```

```
end
```

```
z(i,:)=a(i,2)*ones(1,50);
```

```
end
```

```
>> surf(x,y,z)
```

4.5. Contrôle de la rugosité

On a mesuré la rugosité en A et C comme le montre la figure 4.12

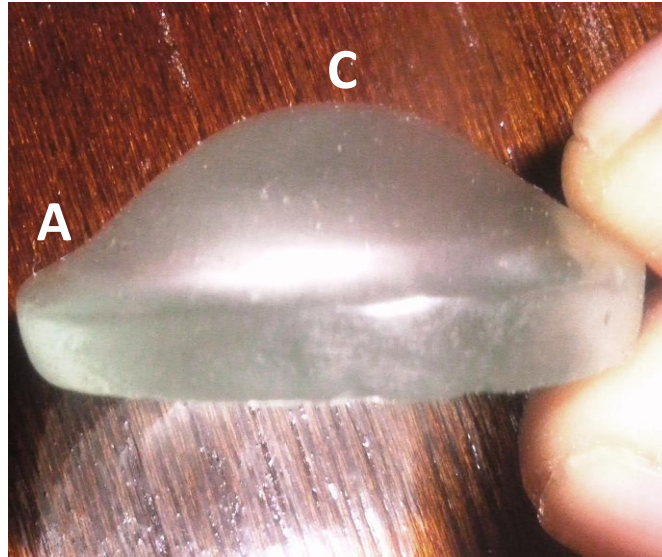


Fig.4.12: Mesure de la rugosité

La rugosité est mesurée par AFM (voir figure 4.13 et 4.14)

Dans le point C

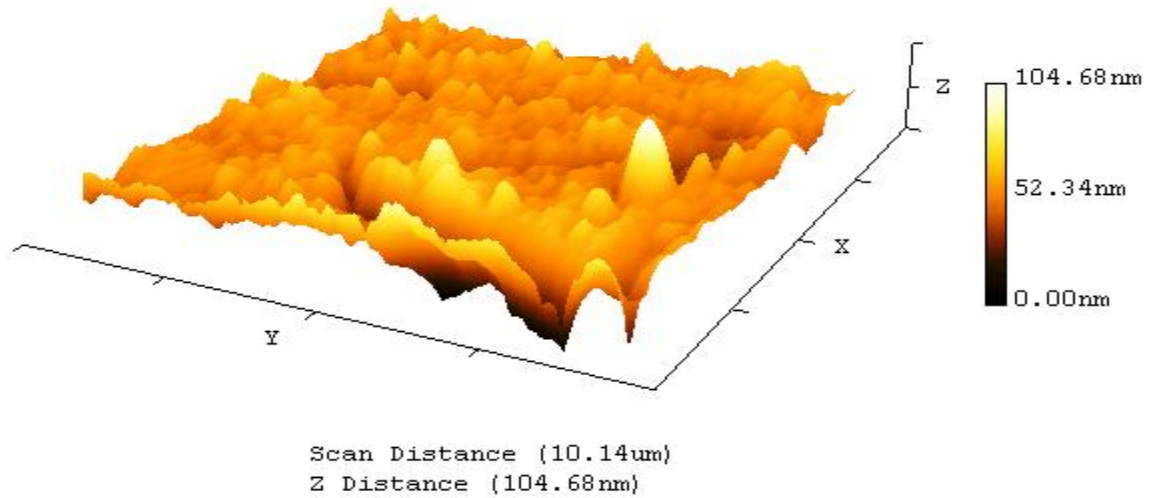


Fig .4.13: Rugosité au point C

Dans le point A

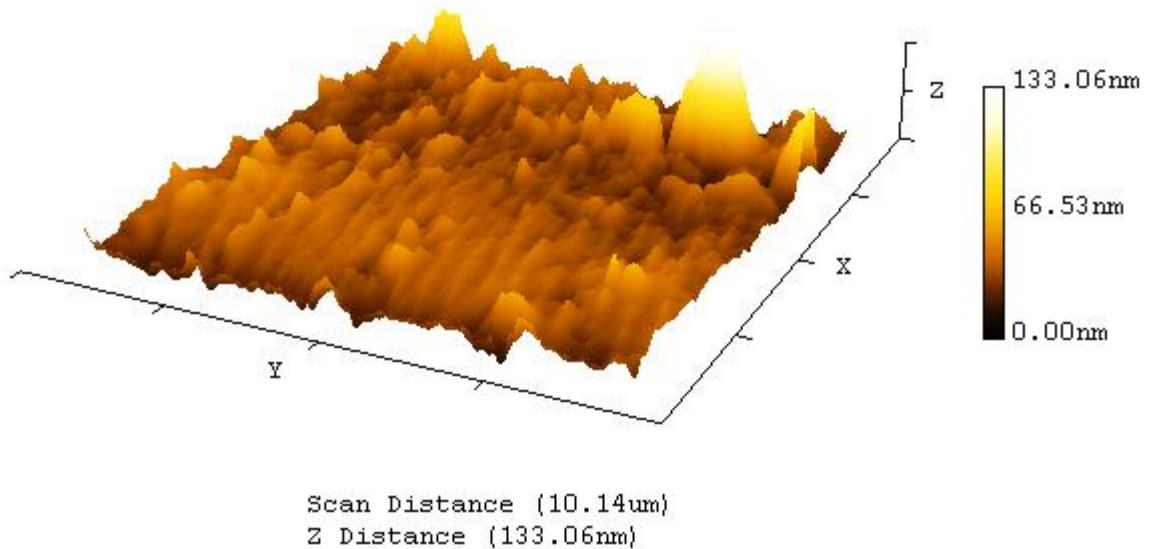


Fig .4.14: Rugosité au point A

D'après les figures représentées ci-dessus (*Fig .4.13 Fig .4.14*), on constate que la rugosité au point A est élevée par rapport au point C, car les déformations au point C, dues à la pression de la partie supérieure du moule, sont moins importantes par rapport à celles du point A.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les lentilles asphériques se différencient des lentilles conventionnelles par leur surface complexe, dont le rayon de courbure change selon la distance par rapport à l'axe du faisceau lumineux. Les lentilles sphériques sont susceptibles de produire des aberrations. Par conséquent, elles ne sont pas capables de concentrer toute la lumière en un seul point. Au contraire, les lentilles asphériques corrigent les aberrations et offrent une meilleure résolution même avec des objectifs compacts intégrant un petit nombre de lentilles.

Ce qui montre l'importance de ce type de lentille dans la fabrication des systèmes optiques. La recherche de nouvelles techniques de fabrication devient l'un des objectifs de l'industrie optique dans le monde.

Ce travail a pour objectif d'étudier et de comparer les différentes méthodes utilisées dans la technologie de fabrication des surfaces asphériques. Et on a proposé une méthode hybride (meulage moulage) pour fabriquer des lentilles asphériques.

Sur la base des essais réalisés, on peut conclure:

- par la méthode hybride (meulage-moulage), il est préférable de se rapprocher de la forme asphérique qu'on veut réaliser.
- On a trouvé des difficultés dans la production des lentilles épaisses car elle présente des fissurations internes.
- Les lentilles minces (forme concave-convexe) sont difficiles à produire car ils sont faciles à casser, mais on peut réaliser la forme plan concave.
- Il faut traiter la surface du moule (ex chromage) pour éviter l'oxydation.
- Améliorer la surface des lentilles (rodage, polissage) avant de faire le moulage

Par cette méthode, on a réussi à obtenir la forme désirée, néanmoins quelques difficultés durant l'obtention de cette surface, sont à signaler particulièrement le problème de coulage de la lentille sur les parois du moule.

Conclusion générale

Pour mieux réussir la technique de fabrication des surfaces asphériques il est nécessaire.

- De connaître la température de ramollissement du verre ;
- De bien polir la surface avant le moulage pour éviter de réaliser le polissage d'une surface asphérique qui reste difficile à maîtriser ;
- Concevoir un moule capable de résister à des températures élevées.

Références

Bibliographiques

Bibliographie

- [Ali07] T.Aliouane, "Étude du comportement des polissoirs en polyuréthane durant le polissage du verre optique", Thèse de doctorat, DOMP UFAS, (2007), p.39.
- [Arm171] Armand Hadani "élément d'optique géométrique" DUNOD, (1971),p.03
- [Bou00] P. Bouchareine,"Metrologie des surfaces", Technique de l'ingénieur, traité, mesure et contrôle, R1390, (2000), pp11-14.
- [Bro86] Brodeman R. «Roughness Form and Waviness Measurement by Means of Light Scattering.» *Prec. Eng* 8 (1986): 221-226.
- [Bel08] N. Belkhir,"Contribution à l'Amélioration des Propriétés Optiques et Mécaniques des Surfaces Doucies et Polies", Thèse de doctorat, DOMP UFAS, (2008), p .5.6.
- [Chu06] H.C. Chuang, P.L.Tso "An investigation of lapping characteristics for improving the form error of an aspheric lens", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 176,(2006), pp. 183–190.
- [Dao10] Daoudi Ouahiba "Etude des effets de défauts de surface sur les aberrations optiques" mémoire de magister, DOMP UFAS, (2010), p.04.
- [Déc07] R. Déchenaux , R.. Smythe, "L'interférométrie de Fizeau au service de la fabrication des optiques asphériques de précision" *Mesures et Techniques Optiques pour l'industrie – Arcachon 2007*
- [Hic00] Hicks T R and Atherton P D. *The micropositioning book*. London: Penton Press, 2000
- [Jea86] C.Jeanmichel, M.Prevost, "Diamond turning with MOORE machine for infrared applications. machining and results", *Proceedings of the SPIE*, (1986)
- [Les03] Mario Lessard," Turbulences et Diffraction : foyer imparfait pour une image parfaite", Premier article du dossier astronomie pratique, *La chronique de Mario*, CAAS, (Mai 2003).

Bibliographie

- [Lak10] Lakhdari Fouad "Etude de l'endommagement des surfaces optiques par particules abrasives", mémoire de magister, DOMP UFAS, (2010), p.27.45
- [Mal04] Daniel Malacara, Zacarias Malacara," Handbook of Optical Design", 2nd edition, Marcel Dekker, Inc, ISBN: 0-8247-4613-9, New York, (2004).
- [Mar05] Jean Paul Marioge,"Surfaces optiques : modélisation des défauts et contrôle", Technique de l'ingénieur, E 4 050v2, (2005), p. 1.2.3.13
- [Mar90] H.M.Martin, J.R.P.Angel, "Polishing with a stressed lap" Science of optical finishing (Technical digest series Vol.9; OSA), (1990)
- [Mar00] J.P. Marioge, "Surface optique: Méthodes de fabrication et de contrôle, recherches",Edition EDP Sciences France, (2000).
- [Mö107] Karl Dieter Möller et Claude Bélorgeot," Cours d'optique" : Simulations et exercices résolus avec Maple®, Matlab®, Mathematica®, Mathcad®, Springer, ISBN-13 : 978-2-287-25199-3, Paris, France, (2007).
- [Nel80] J.E.Nelson, J.Lublner, 'Stressed mirror polishing. "A technique for producing nonaxissymmetric mirrors" Applied Optics, (1980).
- [Nin96] N.M.Ninane, C.A.Jamar, "Parabolic liquid mirrors in optical shop testing" Applied Optics, 11, pp.6136-6139 (1996)
- [Oli99]Oliver Wolfgang fahnle"Shaping and Finishing of Aspherical Optical Surfaces" Thèse de doctorat, Heidelberg geboren Mannheim Allemagne, (1999),p.3.7.8.
- [Reo06] Reolon David "Interférométrie spectrale pour la mesure de dispersion et la géométrie de surface", Thèse de doctorat, Optique, optoélectronique, (2006),p.14.15.
- [Smi00] Warren J. Smith, " Modern Optical Engineering: The Design of Optical Systems", 3rd edition, The McGraw-Hill Companies, Inc, ISBN 0-07-136360-2, New York, (2000), p. 141-143.
- [Sha97] Robert R. Shannon, "The Art and Science of Optical Design", Cambridge University Press, ISBN 0-521 -45414-X, New York, USA, (1997).
- [Sal91] B.E.A.Saleh, M.C.Teich,"Fundamentals of Photonics", Wiley Series in Pure and Applied Optic J.W.Goodman, (1991), p. 130.

Bibliographie

- [**Sin95**] F.Klocke, V.Sinhoff, "Ductile grinding of ultraprecise aspherical optical lenses"8th International Precision Engineering Seminar (8-IPES), 5 (1995)
- [**Sto00**] Stout KJ. "Development of methods for the characterisation of roughness in three Dimensions". UK: Penton Press; 2000.
- [**Tsu81**] Tsukada T and Sasajima K. «3D measuring technique for surface asperities.»
Wear 71 (1981): p1.14.
- [**Vog92**] "W.Vogel, Glas Chemie", Springer -Verlag Berlin Heidelberg New York, ISBN 3-540-55171-9, (1992)
- [**Wi107**] R. N. Wilson, "Reflecting Telescope Optics I", Second Edition, Springer Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-540-40106-7, New York,(2007), p.26.
- [**Warr08**] Warren J. Smith "modern optical engineering"4^{eme} edition SPIE 0-07-147687-3 (USA)

Résumé

Les lentilles sphériques classiques ont un défaut inhérent à leur conception : le foyer de mise au point pour le centre de la lentille ne correspond pas à celui de la périphérie. Ainsi, une image, observée en dehors de l'axe optique, contient des aberrations qui sont difficilement compensées par des correctrices sphériques. C'est pourquoi les lentilles asphériques ont été développées. Ces composants ont un rayon de courbure variable conçu de façon à atteindre un foyer de mise au point unique. La surface asphérique peut être réalisée par différentes techniques telles que : Meulage de haute précision, Moulage de précision, Fabrication hybride, Usinage assisté par ordinateur, etc.

L'objectif de ce travail consiste à étudier et comparer théoriquement les différentes méthodes utilisées dans la technologie de fabrication des surfaces asphériques.

Mots clés: surface asphérique, verre optique, méthode de fabrication, caractérisation

Abstract

The traditional spherical lenses have a defect inherent to their design: the focus of the center of the lens does not correspond to that of its periphery. Thus, an image, observed apart from the optical axis, contains aberrations which are compensated with difficulty by the spherical corrective lenses. This is why the aspheric lenses were developed. These components have a variable radius of curvature designed in order to reach a unique focus.

Aspheric surface can be realized by various techniques such as: Grinding of utmost precision, Molding of precision, hybrid Manufacture, computer-aided machining, etc. The objective of this work consists to study and compare theoretically the various methods used in the manufacturing techniques of aspheric surfaces.

Key words: aspherical surface, optical glass, method of manufacture, characterization

ملخص

العدسات التقليدية الكروية لها خلل في تصميمها: الشعاع المركزي للعدسة لا يتطابق مع الشعاع المحيطي ، كذلك الصورة المشكّلة خارج المحور البصري تحتوي على تشوهات من الصعب تصحيحها بواسطة مصححات كروية. لذلك تم تطوير العدسات شبه الكروية ، هذه العدسات لها انحناء متغير مصممة لأجل الحصول على بعد محرق وحيد. يمكن تصنيع العدسات شبه الكروية بواسطة تقنيات مختلفة نذكر منها.

تصنيع باستعمال الحاسوب، قولبة عالية الدقة، تشكيل عالي الدقة.. الخ

الهدف من هذا العمل هو دراسة ومقارنة نظرية لمختلف الأساليب المستخدمة في تصنيع السطوح شبه الكروية،

كلمات المفاتيح: السطح شبه الكروي ، الزجاج البصري، طرق التصنيع، المميزات