
Fabrication optique

2.1	Caractérisation des surfaces optiques	10
2.1.1	Fréquences spatiales	10
2.1.2	PTV et RMS	11
2.1.3	Polynômes de Zernike	12
2.1.4	Densité de puissance spectrale (PSD)	15
2.1.5	Ondelettes	16
2.2	Mesure des surfaces optiques	17
2.2.1	Mesure des BF et MF	18
2.2.2	Mesure des HF	21
2.2.3	Synthèse	22
2.3	Procédés de polissage	22
2.3.1	Contrôle de l'enlèvement matière	22
2.3.2	Ébauchage	24
2.3.3	Doucissage	25
2.3.4	Polissage magnéto-rhéologique	26
2.3.5	Lissage	28
2.3.6	Usinage ionique	31
2.3.7	Synthèse	32
2.4	Mise en œuvre industrielle du procédé de lissage	33
2.4.1	Rappel des objectifs	33
2.4.2	Lissage sphérique	34
2.4.3	Lissage asphérique	36
2.4.4	Problématique	38
2.4.5	Les outils de lissage asphérique	38

2. FABRICATION OPTIQUE

2.4.6	Modélisation du lissage	44
2.4.7	Importance de la poix de polissage	49
2.5	Conclusion	50
2.5.1	Synthèse	50
2.5.2	Étude menée	51

2.1 CARACTÉRISATION DES SURFACES OPTIQUES

Cette section décrit les outils de caractérisation des surfaces optiques et introduit le vocabulaire nécessaire à la présentation des procédés de fabrication. Les divers outils mathématiques permettant de déterminer la qualité d'une surface optique sont listés. Dans un premier temps, la séparation des défauts en bande de fréquence est présentée, suivie des critères de qualité de surface et de la décomposition de surface en polynômes de base ou série de Fourier.

2.1.1 Fréquences spatiales

Les défauts présents sur une optique sont généralement séparés en différentes catégories suivant leur période spatiale. Différents instruments de mesure sont alors nécessaires car aucun ne permet à lui seul d'observer tout le spectre de défauts présents sur une pièce. Un certain type de matériel permettra ainsi de bien visualiser les grandes périodes spatiales sur toute la pièce, alors qu'un autre permettra de bien visualiser les petites périodes spatiales, mais de manière très locale. Les défauts ont donc été séparés en différentes bandes de période spatiale et en fonction des limites des différents instruments de mesure (fig. 2.1). Pour des précisions sur les instruments de mesure, voir paragraphe 2.2. Les défauts dits de basse fréquence ("défauts BF") et de moyenne fréquence ("défauts MF") génèrent des aberrations optiques alors que les défauts de haute fréquence ("défauts HF") sont la source de diffusions parasites ("flare" [20] et diminution de la transmittance) et de diminution de contraste [21].

Les défauts HF sont traditionnellement séparés en 2 catégories :

- les défauts MSFR (Mid-Spatial Frequency Roughness), responsables du flare et mesurables au micro interféromètre
- les défauts HSFR (High-Spatial Frequency Roughness), responsables d'une baisse de transmittance et mesurables à l'AFM.

2.1. Caractérisation des surfaces optiques

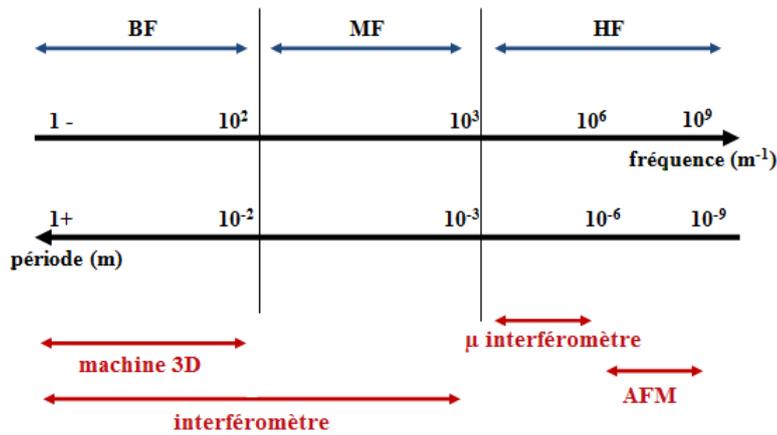


FIGURE 2.1 – Définition des différentes gammes de fréquences spatiales de défaut et moyens de mesure associés.

Les défauts LSFR (Low-Spatial Frequency Roughness) regroupent alors tous les défauts MF et BF.

2.1.2 PTV et RMS

Le critère historique pour mesurer la précision de forme d'une lentille est appelée l'écart PTV (Peak-to-Valley). Il représente l'amplitude maximum de l'écart à la forme (Fig. 2.2), et est défini par :

$$PTV = Z_{max} - Z_{min} \quad (2.1)$$

où Z_{min} et Z_{max} représentent respectivement les valeurs minimum et maximum de l'écart à la forme. Cette valeur PTV est très facilement im-

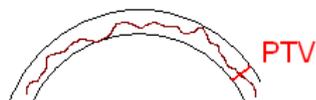


FIGURE 2.2 – Définition du PTV d'une surface (vue de coupe) par rapport à la forme théorique.

pactée par des défauts très localisés qui ne perturbent pourtant pas les

performances générales de l'optique. Le critère de PTV est donc largement insuffisant pour décrire la qualité d'une surface optique. Un autre critère a alors été introduit, le RMS (Root Mean Square), qui permet de limiter l'impact des défauts locaux. Ce critère représente la moyenne quadratique de l'écart à l'altitude moyenne en chaque point de l'optique. La valeur d'écart de forme RMS d'une optique est donc :

$$RMS = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N (Z_{M_i} - Z_{moy})^2} \quad (2.2)$$

avec N le nombre de points d'échantillonnage de la mesure, et Z_{M_i} et Z_{moy} respectivement l'altitude mesurée en chaque point d'échantillonnage et l'altitude moyenne. La mesure optique par interférométrie permet d'obtenir une figure d'interférences sur la pièce qu'un logiciel échantillonne pour transformer en carte de topologie de surface. Il faut bien choisir N de manière à avoir une résolution adaptée au besoin tout en conservant une durée de mesure raisonnable : plus N est grand, plus la durée de la mesure est longue.

Ce critère permet effectivement de réduire l'impact de défauts locaux et est donc un meilleur indicateur de la qualité générale d'une surface optique. Cependant, lors de la fabrication, il est important de connaître quels types de défauts sont présents sur la pièce pour mettre en place les stratégies de correction les plus efficaces en fonction de l'importance relative de chaque défaut. Le RMS global peut ainsi par exemple être séparé en une somme de RMS de défauts de bases connus : c'est le principe de la décomposition en polynômes de Zernike.

2.1.3 Polynômes de Zernike

Les polynômes de Zernike sont une série de polynômes à 2 variables orthogonaux sur le disque unité, donc bien adaptés à la forme circulaire des optiques. Ils permettent de décomposer, pour les optiques circulaires, les aberrations observées en interférométrie en une combinaison linéaire de polynômes de base, donnant ainsi une indication sur le type et la proportion des défauts présents. Ils ont été introduits en 1934 par Zernike pour étudier la forme de miroirs à contour circulaire [22]. Les polynômes de Zernike sont définis par :

$$Z_n^m(\rho, \Phi) = N_n^m R_n^m(\rho) \cos(m\Phi) \quad (2.3)$$

$$Z_n^{-m}(\rho, \Phi) = -N_n^m R_n^m(\rho) \sin(m\Phi) \quad (2.4)$$

avec ρ le rayon ($0 \leq \rho \leq 1$) et Φ l'angle ($0 \leq \Phi \leq \pi/2$), m et n sont des entiers positifs tels que $n \geq m$. R_n^m est la fonction radiale définie par :

$$R_n^m(\rho) = \sum_{i=0}^{\frac{n-m}{2}} \frac{(-1)^i (n-i)!}{i! \left[\frac{1}{2}(n+m)-i\right]! \left[\frac{1}{2}(n-m)-i\right]!} \rho^{n-2i} \quad (2.5)$$

si $n - m$ est pair, et :

$$R_n^m(\rho) = 0 \quad (2.6)$$

si $n - m$ est impair. N_n^m est la constante de normation égale à :

$$N_n^m = \left[\frac{2(n+1)}{1+\delta_{m0}} \right]^{1/2} \quad (2.7)$$

avec δ un symbole de Kronecker (si $m = 0$, $\delta_{m0} = 1$, sinon $\delta_{m0} = 0$).

Ces polynômes étant orthonormaux, on peut décomposer toute fonction définie à l'intérieur du cercle unité comme une combinaison linéaire de polynômes de Zernike, chaque coefficient de la combinaison linéaire représentant la part du polynôme associé et l'amplitude du défaut associé. L'utilisation de ces polynômes est facilement transposable en optique si on considère un point d'une surface à contour circulaire dont les coordonnées polaires sont r et θ . Si A est le rayon du disque, alors $\rho = r/A$ et on peut écrire l'aberration S (RMS) en tout point de cette surface

$$S(\rho, \theta) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left[\frac{2(n+1)}{1+\delta_{m0}} \right]^{1/2} R_n^m(\rho) [c_{nm} \cos(m\theta) - s_{nm} \sin(m\theta)] \quad (2.8)$$

où c_{nm} et s_{nm} sont les coefficients d'aberration [23], représentant l'amplitude RMS du défaut considéré dans le défaut total S .

Ces polynômes ont la particularité de présenter la même "forme" que les aberrations optiques observées expérimentalement (Table 2.1, Fig. 2.3). Ils présentent donc un intérêt tout particulier car les polynômes d'ordre bas vont permettre de représenter les défauts BF sur une surface optique. En cours de fabrication, les défauts BF sont ainsi décomposés et traités en termes de Zernike à corriger. Pour les défauts MF et HF, on préfère cependant utiliser une autre décomposition de type Fourier, à la base de la méthode de la densité spectrale de puissance (Power Spectral Density, "PSD").

2. FABRICATION OPTIQUE

TABLE 2.1 – Les premiers polynômes de Zernike et leur nom usuel en optique.

n	m / -m	équation du polynôme	nom usuel
0	0	1	piston
1	1	$2\rho \cos \theta$	tilt X
1	-1	$2\rho \sin \theta$	tilt Y
2	0	$\sqrt{3} (2\rho^2 - 1)$	focus
2	2	$\sqrt{6}\rho^2 \cos (2\theta)$	astig 0°
2	-2	$\sqrt{6}\rho^2 \sin (2\theta)$	astig 45°
3	1	$\sqrt{8} (3\rho^3 - 2\rho) \cos \theta$	coma X
3	-1	$\sqrt{8} (3\rho^3 - 2\rho) \sin \theta$	coma Y
3	3	$\sqrt{8}\rho^3 \cos (3\theta)$	trefoil
3	-3	$\sqrt{8}\rho^3 \sin (3\theta)$	trefoil
4	0	$\sqrt{5} (6\rho^4 - 6\rho^2 + 1)$	sphère 3

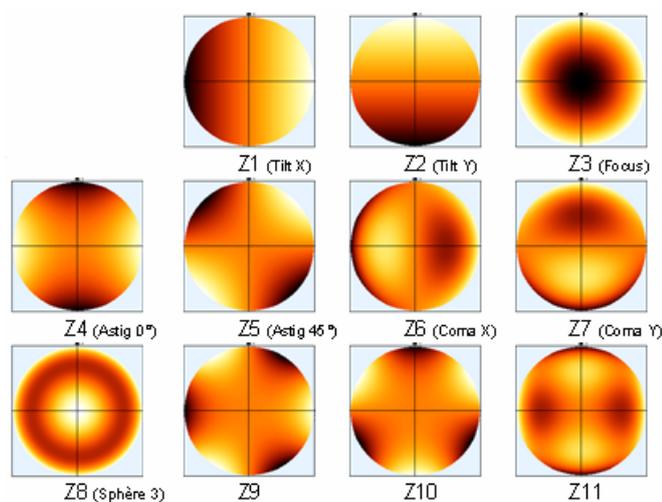


FIGURE 2.3 – Les premiers polynômes de Zernike tels qu'utilisés en optique (il n'y a pas de norme sur la numérotation Z_j , elle peut donc varier).

2.1.4 Densité de puissance spectrale (PSD)

La décomposition en polynômes de Zernike ne fournit pas d'information sur la répartition fréquentielle des défauts. Certes, les fréquences spatiales contenues dans les polynômes augmentent avec l'ordre de ces derniers, mais de manière non quantifiée. Pour avoir une réelle information sur la répartition fréquentielle des défauts, il faut faire une analyse de Fourier de la topologie de la surface optique. L'intérêt est ici de travailler en termes de périodes et fréquences spatiales pour déterminer la composition spectrale de l'écart entre la forme réelle et la forme théorique. Le calcul de la PSD permet de relier la composante fréquentielle des défauts sur la pièce à l'impact de ces derniers en termes de RMS de la surface.

La PSD est définie comme la transformée de Fourier de la fonction d'autocorrélation de la topologie de surface de la pièce [24, 25]. La PSD d'une surface 2D $Z(x, y)$ peut donc s'écrire de la forme [26] :

$$PSD(f_x, f_y) = \frac{1}{A} \left| \iint_A e^{i2\pi(f_x x + f_y y)} Z(x, y) dx dy \right|^2 \quad (2.9)$$

avec la PSD exprimée en unité de longueur puissance quatre. A est l'aire observée par l'instrument de mesure. Elle peut être pleine pupille (surface complète) ou sous-pupille (une partie de la surface seulement).

Cette PSD peut ensuite être intégrée pour remonter au RMS σ de la surface par bande de fréquence [27] :

$$\sigma^2 = 2\pi \int_{f_1}^{f_2} PSD \cdot f df \quad (2.10)$$

avec f_1 et f_2 les limites de la bande fréquentielle dont on souhaite évaluer l'impact.

La PSD est donc un outil puissant pour analyser l'évolution des différentes composantes fréquentielles des défauts au cours des différents procédés de polissage. Ceci permet alors d'analyser les capacités de correction des procédés du point de vue spectral. En effet, l'évolution du RMS de la surface sur une gamme de fréquence spatiale donnée au cours d'un procédé donne directement l'action du procédé sur la gamme de fréquence considérée. Il est alors possible de déterminer les capacités fréquentielles de n'importe quel procédé ainsi que son efficacité (diminution des défauts). La PSD est donc un bon outil complémentaire des polynômes de Zernike pour l'analyse des défauts MF et HF.

2.1.5 Ondelettes

Les ondelettes fonctionnent sur un principe similaire à l'analyse de Fourier, mais en rajoutant une information sur la localisation spatiale des défauts [28] grâce à la possibilité de faire évoluer sa résolution. Cela permet par exemple de faire de l'analyse multi-échelles [29] (Fig. 2.4). Une

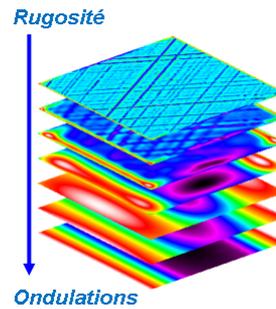


FIGURE 2.4 – Exemple de décomposition de surface par transformée en ondelettes.

transformée en ondelette permet de faire une décomposition d'une topographie de surface dans une base quelconque, à l'inverse de la transformée de Fourier qui impose une base sinusoïdale.

Pour un profil 1D, on peut écrire [30] :

$$C(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} Z(x) \psi_{a,b}^*(x) dx \quad (2.11)$$

avec $Z(x)$ la représentation du profil de surface et $\psi_{a,b}^*(x)$ le nombre complexe conjugué de la fonction ondelettes $\psi_{a,b}(x)$, qui est exprimée par la relation :

$$\psi_{a,b}(x) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi \left(\frac{x-b}{a} \right) \quad (2.12)$$

dans laquelle $\psi_{a,b}(x)$ représente une famille de fonction ondelettes générées par translation avec le paramètre b et agrandissement/réduction d'échelle avec le paramètre a .

Pour un profil 2D, on peut écrire [31] :

$$C(a_1, b_1, a_2, b_2) = \frac{1}{\sqrt{a_1 a_2}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} Z(x, y) \psi_{a_1, b_1, a_2, b_2}^*(x, y) dx dy \quad (2.13)$$

où

$$\psi_{a_1, b_1, a_2, b_2}(x, y) = \frac{1}{\sqrt{a_1 a_2}} \psi\left(\frac{x - b_1}{a_1}, \frac{y - b_2}{a_2}\right) \quad (2.14)$$

Les fonctions ondelettes peuvent être continues ou discrètes.

Les ondelettes sont parfois basées sur des dérivées de fonctions gaussiennes, comme par exemple la fonction ondelette de Ricker (Fig. 2.5) :

$$\psi_{Ricker}(x) = \frac{2}{\sqrt{3\sigma\pi}} \frac{1}{4} \left(1 - \frac{t^2}{\sigma^2}\right) e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} \quad (2.15)$$

aussi appelée "chapeau mexicain" ou sur des fonctions trigonométriques.

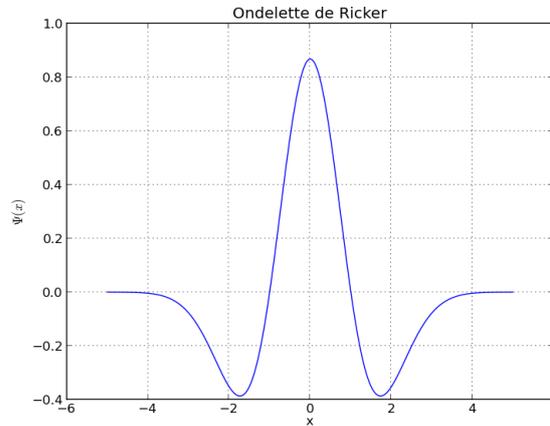


FIGURE 2.5 – Ondelette de Ricker.

Les ondelettes sont encore peu utilisées en optique, la transformée de Fourier classique étant pour l'instant la norme pour définir les spécifications des optiques.

⇒ Pour couvrir tout le spectre de défauts sur une surface optique, les outils utilisés pour l'étude des surfaces sont donc les polynômes de Zernike pour les défauts BF et la PSD pour les défauts MF et HF.

2.2 MESURE DES SURFACES OPTIQUES

Comme précisé au paragraphe 2.1.2., il est impossible de mesurer toutes les caractéristiques d'une surface optique avec un seul instrument. Différents moyens de mesure sont ainsi utilisés, en fonction de

l'état de la surface de la pièce et du type de défaut que l'on souhaite observer. Les moyens de mesure utilisés à chaque étape de fabrication sont donc présentés avec leur principe de fonctionnement.

2.2.1 Mesure des BF et MF

Mesure mécanique tridimensionnelle

La mesure tridimensionnelle est utilisée lors des phases amont du polissage quand l'interférométrie n'est pas encore possible à cause des fortes HF et pentes présentes sur les pièces. Elle sert principalement à déterminer les caractéristiques géométriques des pièces : rayon, épaisseur, ainsi que les défauts de basse fréquence comme le tilt, le focus... Cette machine dispose d'un palpeur mécanique qui permet d'obtenir un mapping 3D de la topologie de la pièce.

Trois liaisons glissières permettent de venir positionner la tête de mesure en tout point de la pièce. L'axe Z de la machine est porté sur un portique, ce qui permet de mesurer des pièce positionnées à plat sur un granit (Fig. 2.6). Le stylet, composé d'une tige portant une sphère en rubis se déplace sur la pièce avec un mapping déterminé en fonction des besoins de la mesure : on contrôle ainsi la résolution et le nombre de points de mesure. Lorsque la force dépasse une valeur critique (quelques Newtons), la mesure se déclenche : le stylet transmet les coordonnées (X, Y, Z) puis se déplace vers le point de mesure suivant programmé. Ce procédé est généralement utilisé avec des pas de maillage relative-



FIGURE 2.6 – Machine de mesure mécanique tridimensionnelle.

ment grands de l'ordre du millimètre et plus car il y a une méthode

plus précise et plus rapide si on souhaite mesurer précisément la pièce lorsqu'elle est à un stade de fabrication plus avancé : l'interférométrie.

Interférométrie

La technique usuellement employée en optique pour mesurer avec une précision nanométrique ou sub-nanométrique est l'interférométrie optique. Les surfaces optiques sont comparées à des surfaces de références bien connues, permettant ainsi de déterminer l'écart de forme entre la surface optique réelle et la surface théorique attendue.

Cette technique utilise la différence de chemin optique entre un faisceau interagissant avec une référence ou avec une pièce à mesurer afin de créer des interférences [32]. Ces interférences peuvent se traduire directement par une différence d'altitude des défauts de surface. Cependant le procédé a plusieurs limitations qui empêchent son utilisation en début de fabrication :

- un interféromètre classique ne peut mesurer une surface non polie spéculaire : les surfaces mates de début de fabrication dispersent la lumière et la réflexion ou transmission mesurées sont trop faibles ou inexistantes
- l'amplitude de l'écart de forme mesurable est limitée, notamment lorsque les pentes de défauts sont importantes, ce qui est souvent le cas sur les défauts HF en début de procédé.

Optiques planes et sphériques de petites dimensions. Pour la mesure des surfaces planes et sphériques, on utilise des interféromètres de type Fizeau (Fig. 2.7). La référence a une double fonction. Elle permet de mettre

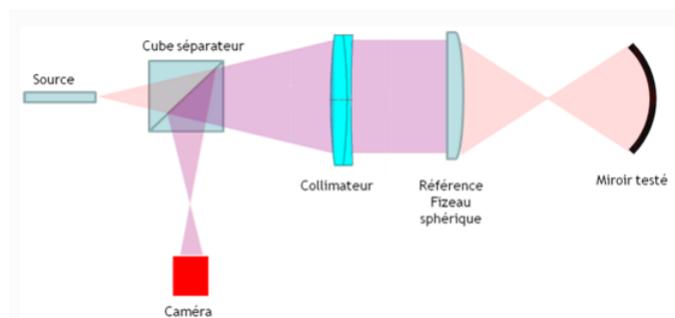


FIGURE 2.7 – Interféromètre de type Fizeau en configuration de mesure sphérique.

2. FABRICATION OPTIQUE

en forme le faisceau collimaté (front d'onde plan) en un front d'onde sphérique et réfléchit une partie du faisceau afin de donner l'*onde de référence*. L'autre partie traverse la référence et se réfléchit sur la pièce sphérique à fabriquer qui peut être un miroir ou une lentille. C'est l'*onde objet*. Une caméra visualise alors la figure d'interférence entre l'onde de référence et l'onde objet. Un logiciel échantillonne une carte de différence de topologie de surface entre la référence et la pièce testée. Ceci est ensuite transformé en une différence de topologie entre la surface théorique souhaitée et la surface réelle mesurée, donnant ainsi accès à l'état de la pièce. La résolution maximale de l'interférométrie est alors limitée par celle de la caméra.

L'optique mesurée doit être moins ouverte que la sphère de référence pour récupérer tous les rayons se réfléchissant sur la pièce.

Optiques asphériques.

Utilisation de null-lens. Dans le cas d'une optique asphérique, l'onde de référence (sphérique) et l'onde objet (asphérique) n'ont pas la même forme et on ne peut donc utiliser les systèmes Fizeau classiques. Cependant dans la plupart des cas, on peut se contenter d'intégrer une "null-lens" qui va permettre de transformer à l'aller le front d'onde sphérique en un front d'onde asphérique adapté à l'optique mesurée, et au retour de transformer le front d'onde asphérique en un front d'onde sphérique adapté à la référence sphérique (Fig. 2.8). Les null-lens utilisées sont des hologrammes générés par ordinateur (Computer Generated Holograms "CGH"). Ils permettent de simuler la présence d'une lentille transformant le front d'onde asphérique en front d'onde sphérique.

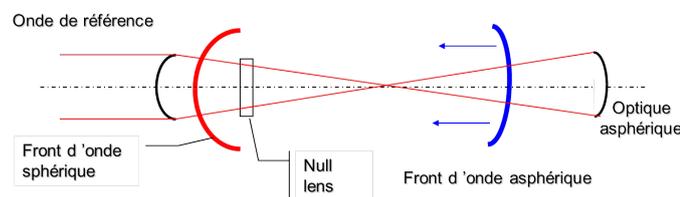


FIGURE 2.8 – Principe de la mesure interférométrique d'une pièce asphérique.

Chaque optique asphérique différente nécessite un CGH adapté. Pour des précisions de mesure sub-nanométriques, la difficulté de fabrication des CGH augmente considérablement.

Lorsque les optiques sont trop ouvertes, on doit utiliser une autre technique de mesure.

Interférométrie par couplage de zone. Dans le cas des optiques de grande dimension et/ou de forte courbure, il est difficile de mesurer toute la surface en même temps. On réalise donc des mesures en sous-pupille et on reconstruit la carte globale (Fig. 2.9, [33]). C'est le principe de fonctionnement de la machine de métrologie sous-pupille par couplage de zone (Subaperture Stitching Interferometry, "SSI") [33].

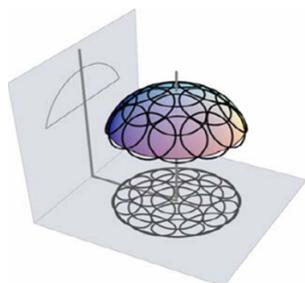


FIGURE 2.9 – Principe de la reconstruction de carte par couplage de zone ("stitching").

⇒ Pour une optique de diamètre 300 mm, la résolution latérale maximale est de l'ordre de 250 μm , ce qui permet d'observer les défauts BF et MF sur l'ensemble de la pièce. Cependant, pour mesurer les défauts HF, on utilise des techniques locales, permettant une meilleure résolution au détriment de la surface couverte.

2.2.2 Mesure des HF

La mesure des défauts HF est effectuée par deux moyens complémentaires. La micro-interférométrie optique permet de mesurer des champs allant jusqu'au mm^2 avec des précisions sub-nanométrique pour une bonne mesure des défauts HF de type MSFR (périodes du millimètre au micron). Un micro-interféromètre fonctionne sur le même principe qu'un interféromètre classique, mais sur un champ plus réduit.

2. FABRICATION OPTIQUE

Pour les défauts HSFR (période inférieure au micron), on recourt à la microscopie à force atomique (Atomic Force Microscopy, "AFM") sur des champs de taille micrométrique.

2.2.3 Synthèse

La synthèse des propriétés des différents moyens de mesure est présentée Table 2.2. Les moyens sont ainsi adaptés à la mesure des optiques

TABLE 2.2 – Moyens de mesure et défauts observables.

procédé	taille de champ	résolution latérale	résolution verticale	défauts observés
mesure 3D	pleine pupille	1 mm	10 nm RMS	BF
interférométrie	pleine pupille	250 μm	0.1 nm RMS	BF, MF
micro-interférométrie	mm ²	1 μm	< 0.1 nm RMS	HF (MSFR)
AFM	100 μm^2	10 nm	< 0.1 nm RMS	HF (HSFR)

à différentes étapes du procédé présenté dans la section suivante.

2.3 PROCÉDÉS DE POLISSAGE

Les procédés de polissage sont généralement séparés en quatre grandes catégories, qui correspondent chacune aux différentes étapes d'avancement d'une pièce dans la chaîne de fabrication. Se suivent ainsi l'ébouchage, le doucissage, le polissage [34] et la finition, qui permettent la transformation d'un "blank" de matière (matière brute) en une optique polie et prête à être traitée. Le matériau à usiner étant un matériau fragile, ces quatre étapes font chacune appel à des procédés d'abrasion, présentant cependant différents modes d'action.

Dans cette section, les différents procédés de fabrication constituant la chaîne de fabrication d'une optique asphérique de précision sont listés après la présentation du concept de fonction d'enlèvement matière.

2.3.1 Contrôle de l'enlèvement matière

Pour un bon surfaçage optique, il faut un fort enlèvement de matière, mais il faut aussi avoir un bon contrôle sur ce dernier. L'enlèvement

de matière est défini comme le produit du taux d'enlèvement matière multiplié par le temps de résidence. Localement, on peut donc écrire, pour un point $p(x, y)$, que l'enlèvement matière $\Delta z(x, y)$ (= épaisseur enlevée) est un produit de convolution (sur le temps et l'espace) :

$$\Delta z(x, y, t) = \frac{dz(x, y, t)}{dt} * \Delta t(x, y, t) \quad (2.16)$$

où $\Delta t(x, y)$ et $\frac{dz}{dt}(x, y)$ sont respectivement le temps de résidence et la fonction d'enlèvement matière de l'outil au point P . La fonction d'enlèvement de matière est souvent appelée TIF (Tool Influence Function). Elle représente le profil d'usure dans le plan de la surface au point $P(x, y)$.

⇒ La connaissance des cartes de défauts avant-après mesurées par interférométrie donne accès à l'enlèvement de matière Δz recherché. Si on connaît la TIF, il est possible, par déconvolution, de déterminer le temps de polissage nécessaire en chaque point de la pièce afin d'obtenir la forme théorique souhaitée.

En passant en transformée de Fourier, on peut écrire dans le cas général :

$$FT(\Delta z) = FT(TIF) \cdot FT(\Delta t) \quad (2.17)$$

donc :

$$\Delta t = FT^{-1} \left[\frac{FT(\Delta z)}{FT(TIF)} \right] \quad (2.18)$$

La TIF est donc bien la donnée principale à connaître pour permettre la convergence du procédé de manière prédictive. Cependant, cette équation ne peut être résolue analytiquement en l'état, il faut faire des hypothèses. On considère tout d'abord que la donnée temporelle n'intervient pas (les variables ne dépendent pas du temps). On obtient alors :

$$\Delta t(x, y) = FT^{-1} \left[\frac{FT(\Delta z(x, y))}{FT(TIF(x, y))} \right] \quad (2.19)$$

La première hypothèse faite dans le domaine des procédés de surfacage optique commandés numériquement (Computer-Controlled Optical Surfacing, "CCOS") est donc que la TIF est stable temporellement. Mais il n'existe cependant pas non plus de solution analytique générale à ce problème [35]. Pour des raisons de simplicité de mise en œuvre, les TIF sont généralement considérées dans l'industrie comme constantes

en tout point de la pièce, et on peut alors résoudre le problème de déconvolution :

$$\Delta t(x, y) = FT^{-1} \left[\frac{FT(\Delta z(x, y))}{FT(TIF)} \right] \quad (2.20)$$

Les TIF sont malheureusement rarement stables, que ce soit spatialement ou temporellement, nuisant ainsi à la convergence du procédé. La convergence est définie comme le rapport entre les paramètres géométriques initiaux et finaux d'une étape de polissage. Par exemple, pour le RMS :

$$C = \frac{RMS_{initial}}{RMS_{final}} \quad (2.21)$$

Lorsque l'outil se déplace sur la pièce asphérique, la forme locale change en permanence et peut donc entraîner des variations du taux d'enlèvement matière qu'il faut à minima connaître, et dans le meilleur des cas maîtriser. De même le polissage étant un procédé lent, durant de plusieurs heures à plusieurs jours, le taux d'enlèvement matière peut varier de manière importante entre le début et la fin d'un cycle de polissage, générant une surface différente de la surface théorique souhaitée. Il faut là aussi connaître et de préférence maîtriser l'usure des outils, des abrasifs, l'évolution de la dureté du matériau à polir. . .

⇒ Les polisseurs et fabricants de machines de polissage cherchent donc des moyens de réduire les variations de taux d'enlèvement matière afin de mieux le contrôler et le rendre le plus constant possible, à la fois spatialement et temporellement. Le but est de rendre les procédés présentés ci-après plus convergents et déterministes.

2.3.2 Ébauchage

L'objectif de la phase d'ébauchage est d'obtenir la forme globale souhaitée à la surface de la pièce, avec une rugosité moyenne R_a de l'ordre du micron. Cette étape est réalisée par un procédé de micro-rectification avec meule diamantée à abrasifs liés, qui présente un taux d'enlèvement de matière important, mais qui génère de nombreux défauts HF ainsi que des défauts sous-surfaciques.

À cette étape, il est admis que l'abrasion est principalement d'origine mécanique (pas d'effet chimique) [34]. Les particules rayent et indentent la surface [36, 37], créant ainsi des fractures coniques, radiales et latérales (Fig. 2.10, [38]).

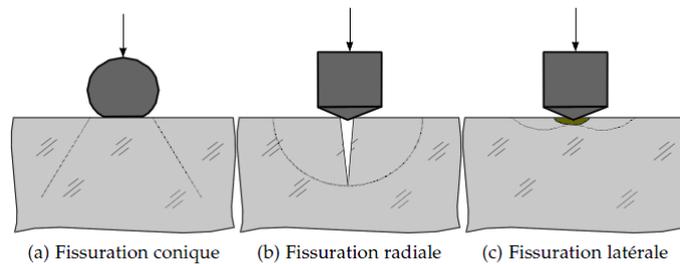


FIGURE 2.10 – Création de fractures dans le verre par indentation lors de l'ébauchage.

Les fractures latérales sont responsables de l'enlèvement de matière alors que les fractures radiales génèrent des défauts de sous-surfaces, aussi appelés SSD (Sub-Surface Damages). Ces défauts sont incompatibles d'une utilisation en lithographie (dispersion et perte de transmission de lumière) et doivent donc être retirés dans les étapes de surfacage suivantes. La profondeur des défauts générés déterminant l'épaisseur minimale à enlever par la suite, de nombreuses recherches s'intéressent à l'estimation de la profondeur des SSD [39, 40, 41, 42], notamment dans le domaine des lasers de puissance où les SSD sont une cause d'endommagement des optiques.

Les différentes formes de meule permettent de travailler en mode "ponctuel". Ainsi la meule et la pièce ne sont en contact que sur une très faible surface. Ceci permet de générer tout type de forme. C'est d'ailleurs pour cette raison que la forme globale d'une optique est donnée à cette étape. La convergence de ce type de procédé étant relativement bonne, on obtient rapidement la forme sphérique ou asphérique souhaitée, à quelques microns PTV près. L'inconvénient des outils "ponctuels" est la création de nombreux défauts HF, en plus des SSD inhérents à la fissuration du verre. La phase de doucissage a pour but principal de supprimer ces deux types de défauts.

2.3.3 Doucissage

En sortie d'ébauchage, la surface de la pièce comme sa sous-surface sont très perturbées, avec des défauts s'étendant jusqu'à plusieurs dizaines de microns de profondeur [43]. Le procédé de doucissage doit donc produire un enlèvement de matière assez important pour enlever

cette épaisseur de verre tout en générant lui-même le moins possible de SSD [44] car l'enlèvement de matière des phases suivantes (polissage et finition) est trop faible pour enlever beaucoup d'épaisseur. Pour améliorer l'état de surface, le doucissage est effectué avec des abrasifs libres (Fig. 2.11) plus fins qu'en ébauchage (quelques microns), généralement constitués d'alumine Al_2O_3 ou de grenat.

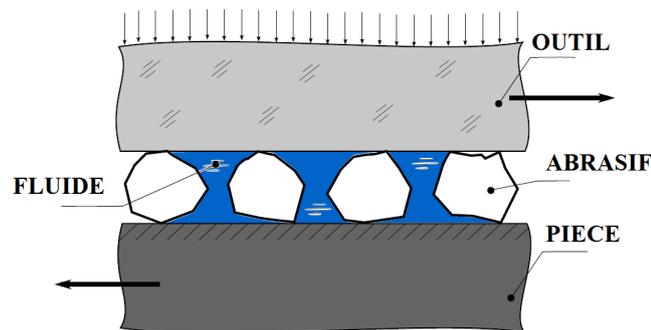


FIGURE 2.11 – Schéma de principe du doucissage.

Le doucissage est un procédé de rodage qui présente les mêmes types de mécanismes d'enlèvement matière que l'ébauchage [45, 46]. Il est aussi considéré à cette étape que les aspects chimiques sont négligeables dans l'enlèvement matière [34].

Le doucissage peut être remplacé par une étape de prépolissage, qui se concentre sur les mêmes aspects mais utilise des abrasifs de granulométrie plus fine avec une vitesse relative outil – pièce très élevée.

Après l'étape de doucissage/prépolissage qui se concentre sur l'enlèvement des défauts HF et sous-surface, l'étape de "polissage et lissage" permet d'améliorer la forme et d'obtenir le résultat définitif sur les HF. Cet étape est séparée en deux phases : le polissage MRF et le lissage.

2.3.4 Polissage magnéto-rhéologique

La finition magnéto-rhéologique (Magneto-Rheological Finishing) est un procédé de polissage qui utilise un fluide de polissage chargé de particules magnétiques de pentacarbone de fer. La base du fluide étant aqueuse, des agents stabilisants et anti-corrosion sont ajoutés dans la formulation. En l'absence d'un champ magnétique, la viscosité du fluide est de l'ordre de 0.1 Pa.s, mais cette dernière peut varier de quatre ordres de

grandeur sous un champ magnétique de 2 kG (0.2 T) [47], simulant ainsi un outil de polissage rigide. Une machine MRF contrôle ainsi en temps réel la viscosité d'un cordon de fluide solidaire d'une roue tournante afin de le rigidifier au voisinage de la pièce et générer de l'enlèvement de matière (Fig. 2.12, [48]). Des calculs ont montré qu'il existe au sommet du cordon de fluide en contact avec une pièce une fine couche présentant un cisaillement important, générant l'enlèvement matière [49]. Le fait de travailler principalement en cisaillement a entraîné l'hypothèse que la MRF est un procédé ne générant pas de SSD [50].

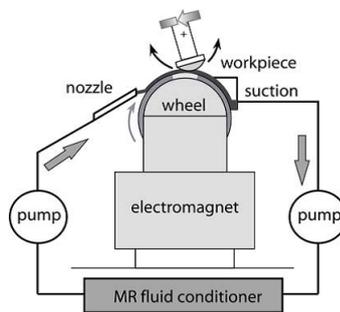


FIGURE 2.12 – Principe de fonctionnement d'une machine de MRF.

Grâce au contrôle de la viscosité du cordon de fluide et un positionnement précis de la pièce par rapport à ce dernier, la fonction d'enlèvement matière obtenue est constante sur toute la pièce (Fig. 2.13), ce qui permet une résolution numérique du problème de déconvolution et donc un très bon contrôle du procédé et une très bonne convergence. Cette forme d'empreinte, typique de la MRF, a pu être retrouvée pour tous types de surfaces (concave, convexe et plane) par des considérations liées à la forme du cordon de slurry en fonction du champ appliqué ainsi que la répartition de l'enlèvement de matière le long de ce profil [51, 52].

Le polissage MRF permet de corriger avec précision les défauts BF et MF, selon les dimensions de la fonction d'enlèvement matière. En effet, pour un outil "sous-pupille" de retouche locale, on peut estimer les capacités de retouche par une approche de type Nyquist-Shannon comme en traitement du signal. Pour échantillonner correctement un signal, il faut que la fréquence d'échantillonnage soit au moins égale au double de la fréquence la plus élevée contenue dans le signal [53]. De la même

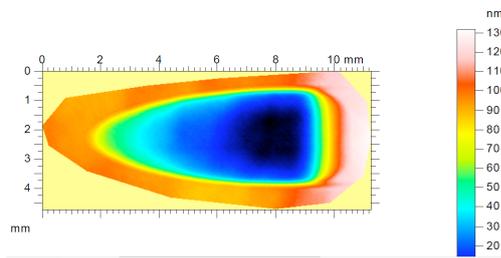


FIGURE 2.13 – Exemple d’empreinte MRF sur une surface en verre (la profondeur max correspond à l’altitude 0 nm, la surface de la pièce à l’altitude 130 nm).

TABLE 2.3 – différentes taille de spot MRF et fréquences théoriques de coupure (au sens de Nyquist - Shannon).

taille de roue MRF	50 mm	150 mm
taille de spot	5 x 11 mm	2.5 x 3.5 mm
fréq. coupure théorique	10 mm	5 mm

manière en correction locale et en termes de périodes, un outil de dimension donnée a ne pourra corriger parfaitement (au sens mathématique) que des défauts de largeur minimum $2a$ (Table 2.3). On observe expérimentalement un effet pour des dimensions inférieures à $2a$, mais aléatoire et dépendant du type de défauts.

Malgré une convergence élevée pour la correction des défauts BF (et MF si les dimensions de la fonction d’enlèvement matière le permettent), les défauts HF ne peuvent être retouchés par MRF, bien que le procédé excède ses capacités estimées par la fréquence de Nyquist en corrigeant des périodes jusqu’à deux fois inférieures à la taille de sa tâche d’usure [54]. Il faut donc corriger les défauts HF par une opération de lissage.

2.3.5 Lissage

L’objectif du lissage est de réduire les défauts HF pour qu’ils soient conformes à la spécification finale, car ils ne seront pas retouchés par le procédé d’usinage ionique qui achève le processus de fabrication. En sortie de lissage, l’amplitude des BF doit aussi être compatible des faibles taux d’enlèvement matière en usinage ionique.

Cette étape est réalisée sur des machines de polissage traditionnel (Fig.

2.14) générant un mouvement aléatoire sur la pièce. La pièce reposant sur un plateau tournant, un des bras de la machine applique un va-et-vient sur la pièce avec un battement d'amplitude donnée pendant que l'autre bras applique un mouvement excentrique pour rendre le mouvement aléatoire.



FIGURE 2.14 – Machine de polissage traditionnel utilisée pour l'étape de lissage.

On utilise alors des fluides de polissage contenant des abrasifs de fine granulométrie, de taille micrométrique ou inférieure. À ces dimensions, les aspects chimiques ne sont plus négligeables devant les aspects mécaniques : on parle de polissage mécano-chimique (Chemical Mechanical Polishing, "CMP"). L'enlèvement matière peut ainsi être optimisé en fonction de la taille des particules mais aussi des interactions physico-chimiques entre les abrasifs et la surface du verre en milieu aqueux. Il a ainsi été montré qu'à taille d'abrasif égale, l'oxyde de cérium est un des agents polissants générant le plus fort taux d'enlèvement matière [55] tout en permettant d'atteindre des précisions sub-nanométriques pour les défauts HF. C'est donc l'abrasif le plus communément utilisé en lissage pour les applications de précision. Ses dimensions varient entre 0.1 et 1.15 μm , avec un pH basique de 8 à 10 [56] pour tirer profit de l'action chimique.

Les mécanismes d'enlèvement matière ne sont toujours pas clairement identifiés et restent ambigus. La difficulté est d'accéder in-situ en cours

2. FABRICATION OPTIQUE

de polissage aux paramètres qui permettraient de quantifier les différents effets. Plusieurs hypothèses principales d'enlèvement matière se sont ainsi succédées, à dominante soit mécanique soit chimique. Toutefois il semble clair que différents mécanismes sont à l'œuvre : ni les effets mécaniques ni les effets chimiques ne sont négligeables lors du polissage, et ceci explique la difficulté à proposer un modèle qui puisse rendre compte de toutes les observations expérimentales obtenues depuis de nombreuses années.

Les quatre hypothèses sont :

- l'abrasion mécanique par fissuration
- la déformation plastique de la surface (usinage ductile) [57]
- la création et l'enlèvement d'une couche de gel en surface du verre par dissolution [55] (action chimique du fluide)
- une réaction chimique entre particule abrasive et surface [36] (action chimique de l'abrasif)

Dans le cadre de l'hypothèse chimique, il a été démontré que la dissolution du verre augmente exponentiellement avec la contrainte appliquée [58] : plus la pression de polissage est élevée, plus la silice se dissout facilement. On connaît depuis la loi de Preston - Archard qu'au niveau mécanique, l'enlèvement matière dépend aussi principalement de la pression [59].

⇒ Il est intéressant de noter que dans l'hypothèse mécanique comme dans l'hypothèse chimique, la pression appliquée est un des paramètres commandant l'enlèvement de matière. C'est donc une donnée dont la connaissance est critique si on souhaite prédire des résultats de lissage. Aucune de ces hypothèses ne peut expliquer seule toutes les observations expérimentales. Un modèle plus réaliste est donc une combinaison de ces différentes hypothèses. Un modèle de mécanisme en quatre étapes combinant les aspects mécaniques et chimiques a ainsi été présenté [55, 60] :

- diffusion d'eau dans le verre, facilitée par la pression appliquée par la particule abrasive
- dissolution du verre en surface sous la force appliquée par la particule abrasive
- enlèvement des composés créés par adsorption sur la particule abrasive
- diffusion d'eau plus en profondeur dans l'espace laissé.

C'est actuellement ce modèle qui prédomine pour expliquer qualitati-

vement les phénomènes ayant lieu au cours du lissage d'une pièce en verre.

Après l'étape de lissage qui permet d'adresser les défauts HF, il faut obtenir les spécifications MF et BF par le procédé d'usinage ionique afin d'obtenir la pièce finale prête pour traitement.

2.3.6 Usinage ionique

La finition par usinage ionique (Ion Beam Finishing, "IBF") est un procédé d'enlèvement matière différent des procédés traditionnels car il n'y a pas de contact outil/pièce. La lentille est bombardée avec un faisceau d'ions (Fig. 2.15, [61]) et des atomes sont ainsi arrachés. Suivant le temps de résidence en chaque point, on enlève plus ou moins de matière et on peut ainsi corriger des défauts présents à la surface de la pièce.

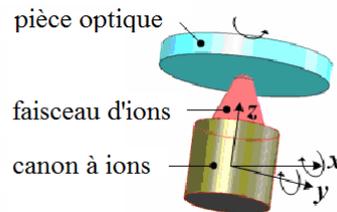


FIGURE 2.15 – Schéma de principe de l'usinage ionique.

Cette technique très perfectionnée est comme la MRF reproductible et convergente. Mais elle est toutefois limitée par les tailles de faisceaux d'ions atteignables. On considère généralement la TIF du procédé IBF comme une quasi-gaussienne dont le paramètre important pour la retouche de défauts est la largeur à mi-hauteur (Full Width at Half-Maximum, "FWHM"). De la même manière que pour la MRF, on peut estimer que l'IBF est efficace pour corriger des défauts de période supérieure à deux fois sa FWHM. Une loi expérimentale permet de décrire l'efficacité de correction en fonction du diamètre du faisceau et la période des défauts [61].

Comme la MRF, l'IBF peut retoucher des défauts de période jusqu'à deux fois inférieure au diamètre de son faisceau (Fig. 2.16, mais avec une efficacité très faible. Il existe quelques unités IBF avec des TIF de

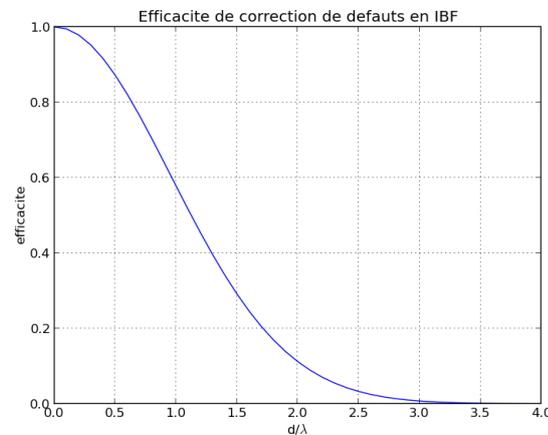


FIGURE 2.16 – Évolution de l'efficacité de correction de défauts en IBF en fonction du rapport entre le diamètre du faisceau et la période des défauts.

FWHM 1 mm et moins [62] mais la taille moyenne est en général de plusieurs millimètres si on souhaite conserver un enlèvement matière suffisant. Cette faible efficacité combinée avec un faible enlèvement matière empêche le procédé d'être utilisé sur la gamme de défauts HF et une partie des défauts MF.

2.3.7 Synthèse

Les différentes caractéristiques des procédés de fabrication sont présentées dans la Table 2.4.

⇒ On voit ainsi que le procédé pour lequel des améliorations peuvent être apportées est le procédé de lissage, le seul capable de corriger les défauts HF, qui a une mauvaise convergence.

Le polissage optique est un procédé complexe, très difficile à maîtriser industriellement. Pour cette raison, il a souvent été abordé de manière principalement empirique, qui fait qu'aujourd'hui encore, les mécanismes d'action sont encore mal connus et le succès du polissage repose encore beaucoup sur le savoir-faire de polisseurs expérimentés. Des procédés récents ont montré de très bonnes convergences (microrectification, MRF et usinage ionique particulièrement) et sont indiscutablement l'avenir du polissage optique de précision. Cependant, ces procédés ont un rayon d'action limité en termes fréquentiels et des pro-