



Surfaces Optiques

Sébastien de Rossi

Bibliographie

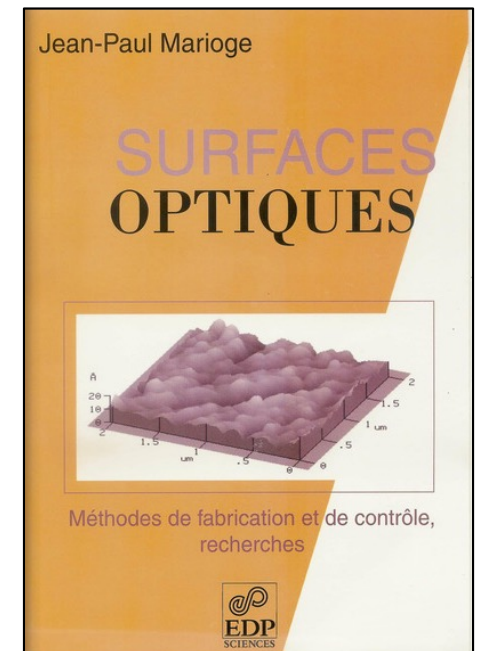
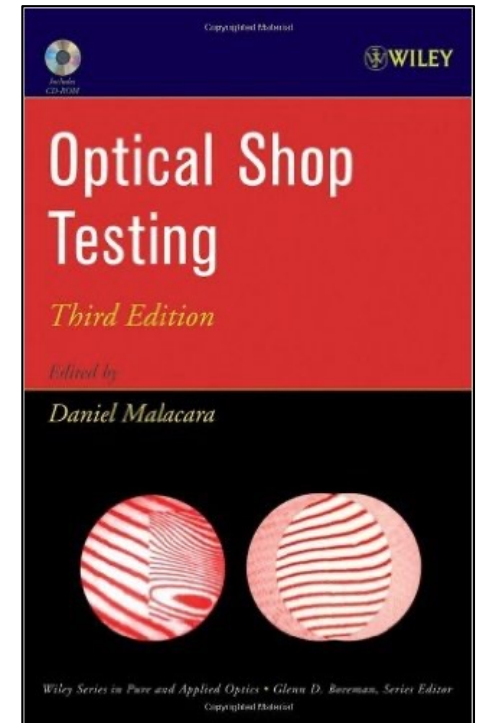
Il existe un nombre très important de techniques de contrôle des systèmes optiques et des surfaces, et leurs études complètes dépassent le cadre du cours.

Le livre « **Optical Shop Testing** » est un excellent ouvrage pour tout savoir. Il est disponible en pdf, rohr.aiax.de/optical-shop-testing.pdf

Le site de James C. Wyant est très complet sur les bases de la métrologie optique

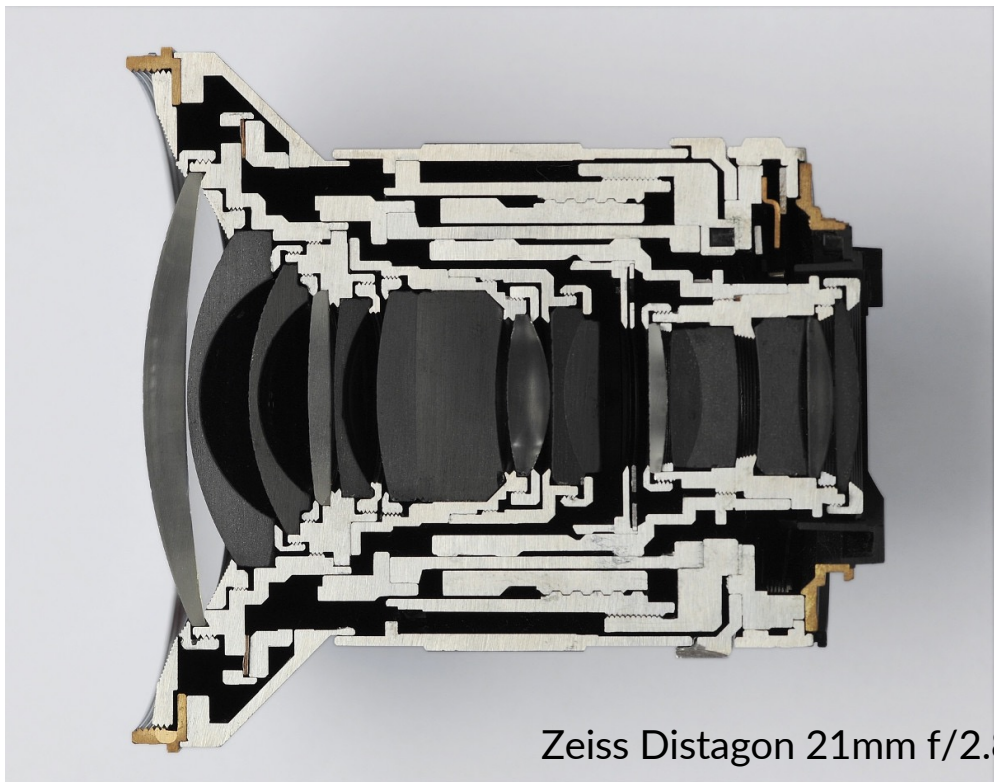
wp.optics.arizona.edu/jcwyant/courses/opti-513-optical-testing/

Le livre « **Surfaces Optiques** » traitent en profondeur des procédés de fabrication et des techniques associées (centrage, débordage, adhérence, collage). Il aborde également les normes.



Un système optique est un ensemble de dioptries/surfaces agencés suivant une formule (matière(s), géométrie, tolérances) et disposés dans une monture mécanique (matière(s), géométrie, tolérances).

L'objectif de ce cours est de voir pourquoi et comment les défauts de réalisation des surfaces affectent les performances du système optique.



Système réel
=
Système théorique
(diffraction vs aberrations)
+
Défauts des surfaces
+
Défauts de montage
(aberrations d'excentrement, tilt)
+
Contraintes environnementales
Contraintes thermiques ...

Une surface optique est caractérisée par sa topographie $Z(x,y)$. Les défauts sont caractérisés par l'écart entre la surface réelle fabriquée et la surface théorique conçue. On définit usuellement les écarts PV et RMS comme :

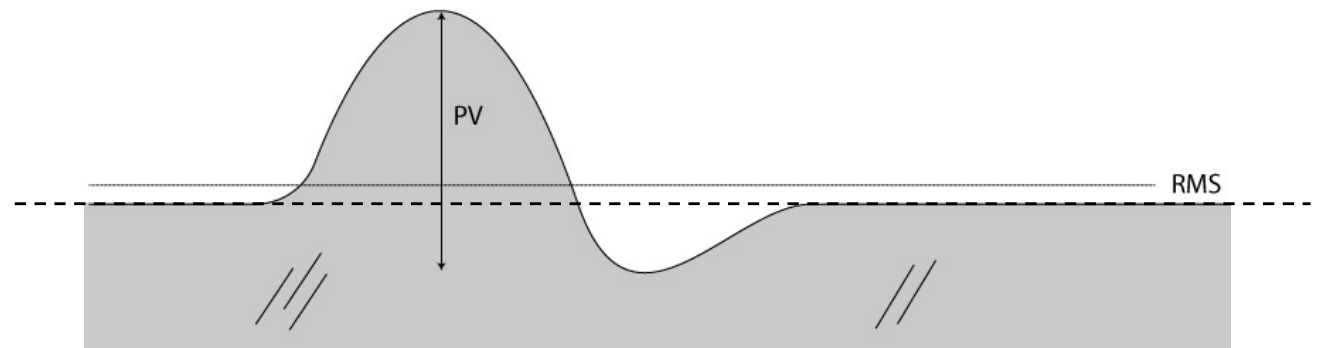
- **Ecart Pic à Vallée PV ou R_z** (Norme ISO 10110)

$$PV = Z_{max} - Z_{min} = \max(Z(x,y)) - \min(Z(x,y))$$

- **Ecart quadratique moyen (variance) RMS ou R_q** (Norme ISO 10110)

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Z_i - \bar{Z})^2}$$

N nb points échantillonnage



- **PV**

fortement impacté par un défaut local (rayure par exemple) qui pourtant ne perturbe pas les performances générales

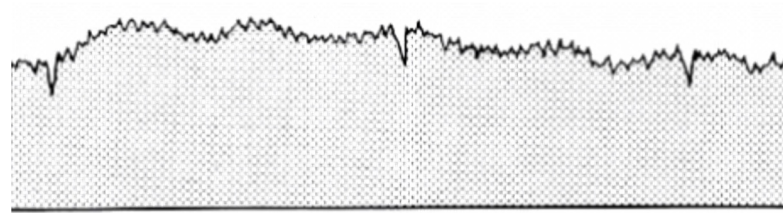
- **RMS**

minimise les défauts locaux
meilleur indicateur de la qualité globale

exemple où deux surfaces donnent le même PV mais des RMS différents !



Les **défauts non locaux** sont généralement séparés en bande de fréquences spatiales. Ils affectent l'ensemble de la pupille. A chaque bande, sa technique de mesure. 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.



- défaut basse fréquence

forme



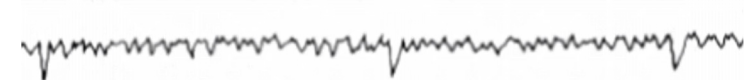
- défaut moyenne fréquence

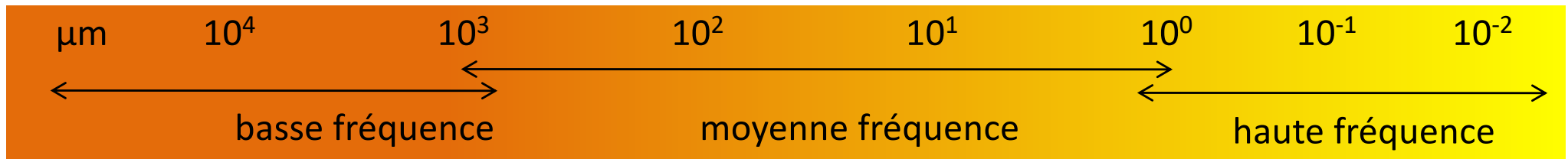
ondulation



- défaut haute fréquence

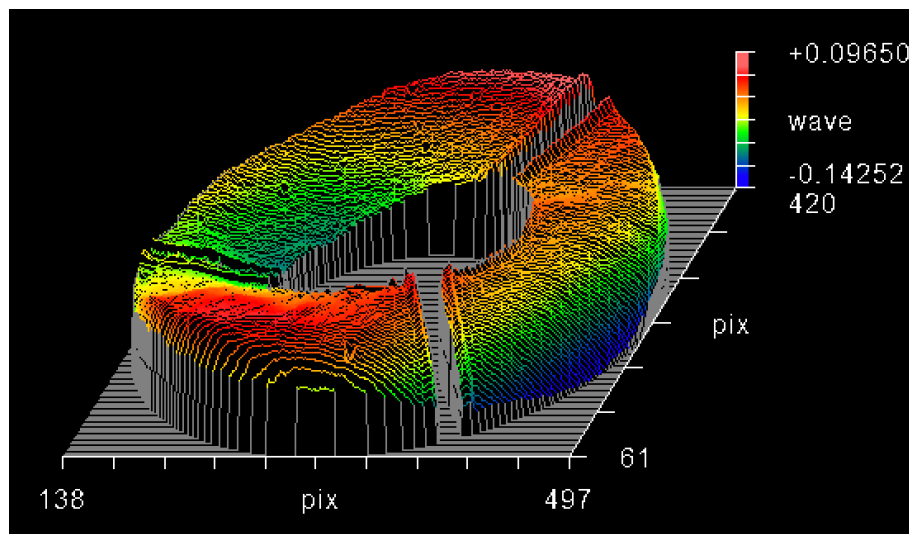
rugosité



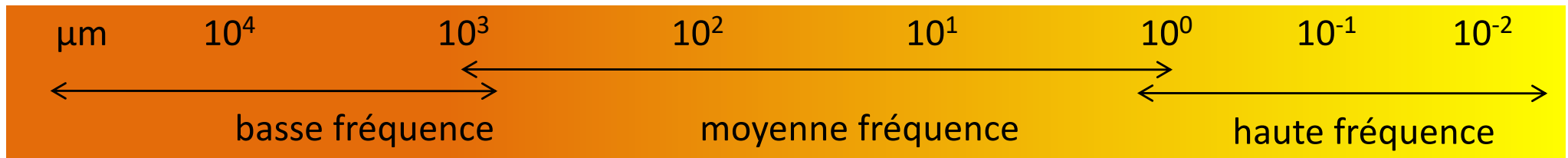


- défaut basse fréquence

Ces défauts génèrent les aberrations optiques. Ils affectent la résolution dans l'image. Le RMS global est usuellement décomposé en **polynômes de Zernike** (ordre 16 maximum – quelques ondulations sur la pupille). L'intérêt de cette décomposition réside dans le fait que les polynômes sont directement visualisés par les techniques interférométriques utilisées pour les quantifier.

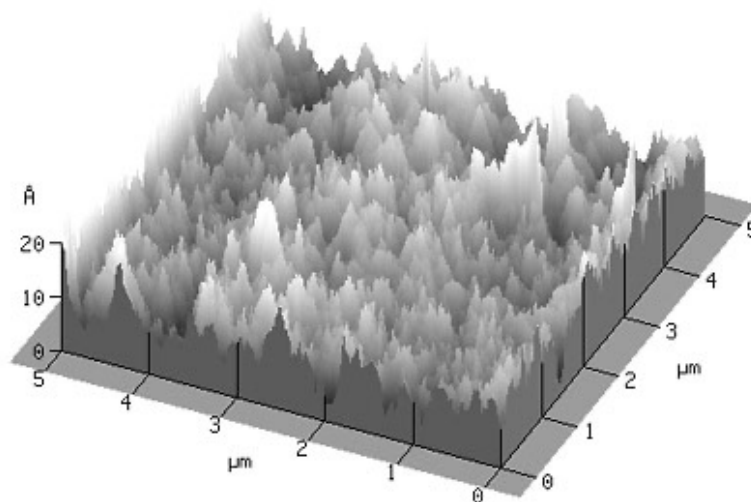


Front d'onde émergent d'un système optique mesuré par interférométrie

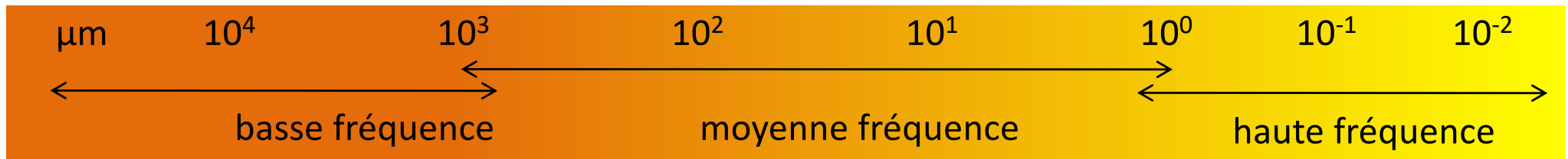


- défaut haute fréquence

Ces défauts (souvent aléatoires) génèrent de la diffusion et engendrent une perte de transmission. Ils peuvent être analysés en fréquences spatiales (analyse de Fourier) par l'étude de la **densité spectrale de puissance (PSD)**. La mesure 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.

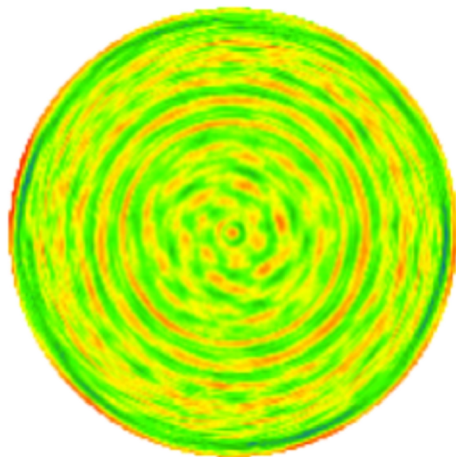


Surface optique vue par microscopie à force atomique



- défaut moyenne fréquence

Ces défauts génèrent de la lumière parasite proche du rayon idéal. Ils diminuent le contraste de l'image. L'analyse (Fourier ou Zernike d'ordre élevé) va dépendre des moyens et des besoins. Ils sont mesurés essentiellement par interférométrie faible cohérence. Leur modélisation est plus difficile (pas vraiment de la forme, pas vraiment de la rugosité statistique).



Ondulation moyenne fréquence
créée par l'outil de polissage

La forme se mesure sur l'ensemble de la surface, la rugosité se mesure sur des champs millimétriques voire moins. L'ondulation nécessite souvent un troisième appareil. La lumière est envoyée en dehors de la PSF mais moins « loin » que la rugosité.

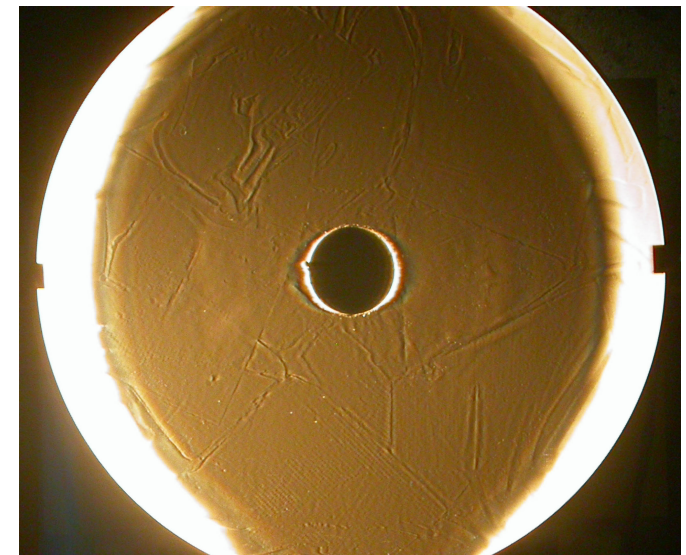
Surtout critique pour les méthodes de surfacage non "traditionnelles", CNC (computer numerical control), MRF (magneto rheological finishing) et retouches ioniques : défauts avec des fréquences bien définies.

Les défauts localisés s'apparentent le plus souvent à des défauts d'aspect. Ils diffusent, diffractent, absorbent la lumière. Leur modélisation est difficile (connaissance de leur forme, de l'état de surface des flancs).

Mais en général ils se comportent comme la rugosité en mettant un voile de lumière parasite mais avec moins d'énergie. **Leur influence est souvent surestimée** (moins gênants que la rugosité, mais visibles à l'examen direct) sauf si le dioptré est dans un plan conjugué de l'image car la visibilité sera directe (cosmétique si observation visuelle). Ils doivent être pris en compte si un traitement automatique d'image est utilisé. Ils peuvent être également gênant lors d'utilisation de puissance optique laser très importante.

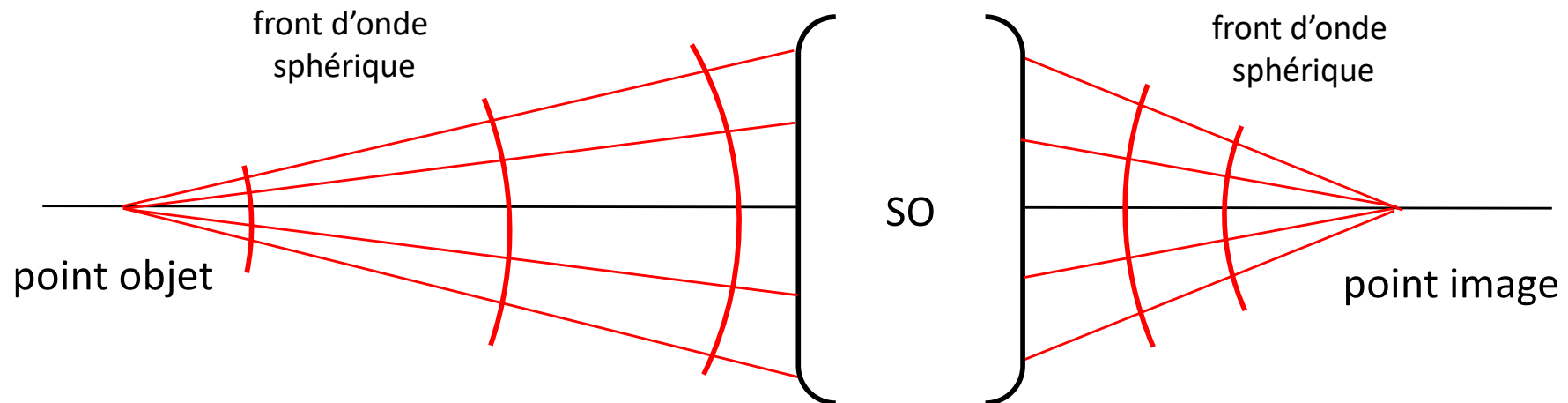
Les principaux défauts sont :

- les **ébréchures** : éclatements des bords et des arêtes
- les **rayures** et **frayures** : sillons continus ou discontinus dont la largeur et la profondeur peuvent être irrégulières, la frayure étant une petite rayure
- les **filandres** : défauts superficiels continus, linéaires, visibles sous certaines incidences seulement
- les **piqûres** : défauts ponctuels de surface
- le **gris localisé** : concentration de piquûres de faibles dimensions ne couvrant qu'une partie de la surface
- les **bulles** crevées : défauts dus à des inclusions gazeuses dans la matière débouchant sur la surface
- les coups, marques et traces laissées par une mauvaise manipulation.
- les taches, oxydations locales et les défauts des traitements de surface.



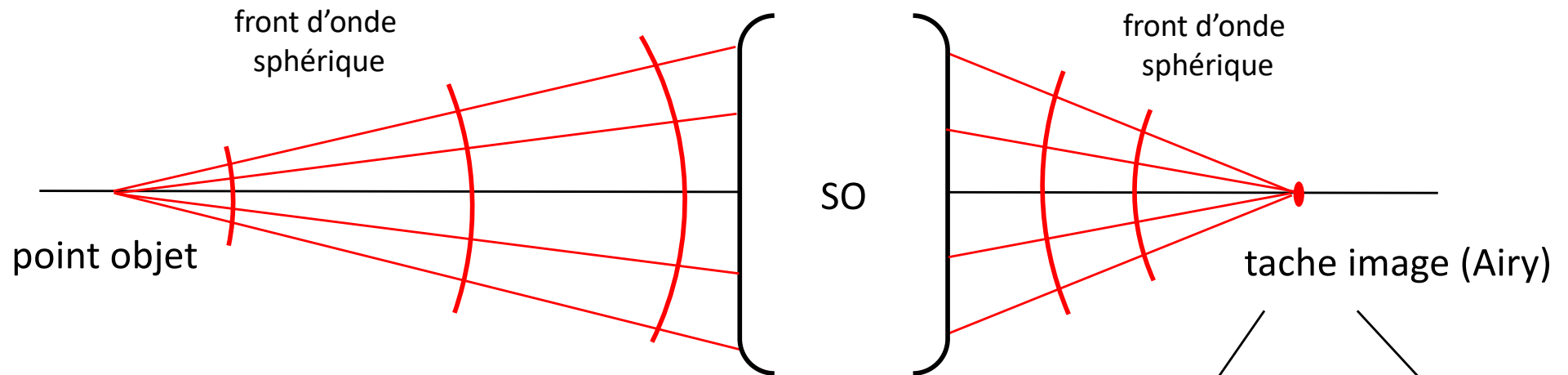
défauts locaux visibles en strioscopie

système optique stigmatique

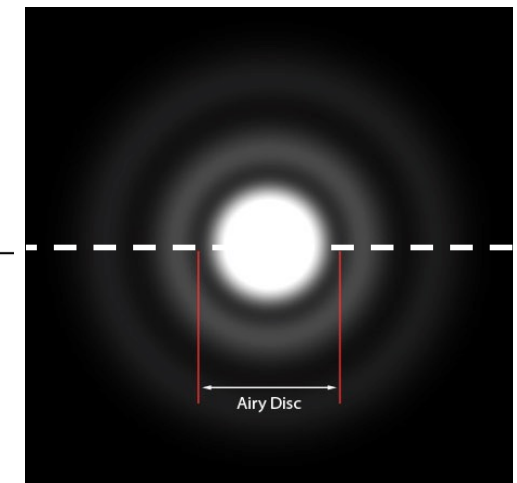
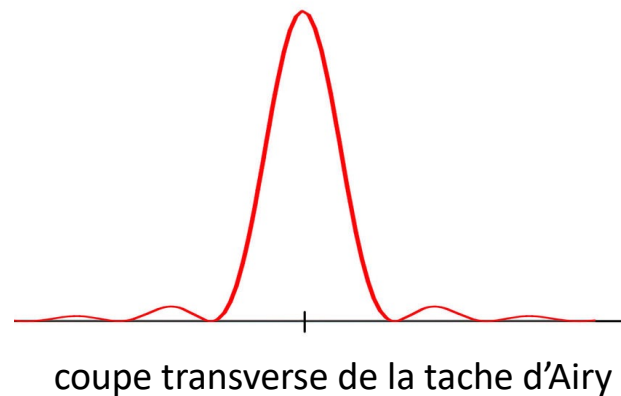


Dans un système optique stigmatique, tous les rayons passent par le même point image. La surface d'onde émergente est sphérique, les rayons géométriques sont perpendiculaires à la surface d'onde et convergent tous vers le même point.

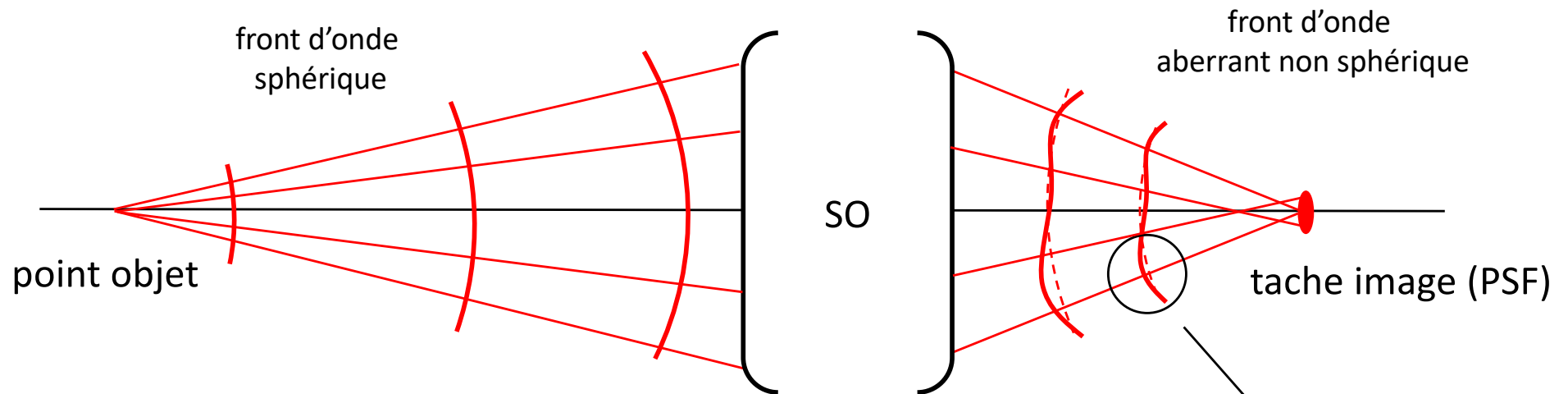
système optique limité par la diffraction



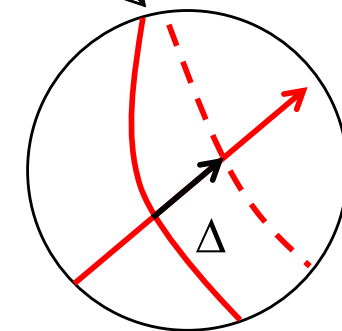
Le phénomène de **diffraction** est un écart à la propagation géométrique et nécessite un modèle ondulatoire. L'image d'un point est une tache dont la dimension dépend de la longueur d'onde et de la dimension finie des éléments (ouverture).



système optique aberrant



Si La surface d'onde émergente n'est plus sphérique, elle présente un écart à la surface d'onde Δ avec la sphère de référence, les rayons ne passent plus par un point unique, et les écarts dans la plan image engendrent une **aberration transversale** dans l'image.



Δ = écart normal
(Wave Front Error)

L'intérêt de la surface d'onde est que,

- le produit de l'indice et de l'écart normal ($n'\Delta$) se conserve à la traversée d'une optique stigmatique.
- lorsqu'il y a plusieurs éléments traversés successivement, il suffit d'ajouter les écarts normaux introduits par chacun des éléments.
- connaissant l'écart normal à la sortie, on peut tout en déduire ...

Si à la sortie du système optique,

- $n'\Delta \ll \lambda \rightarrow$ **on parle de régime diffractif**

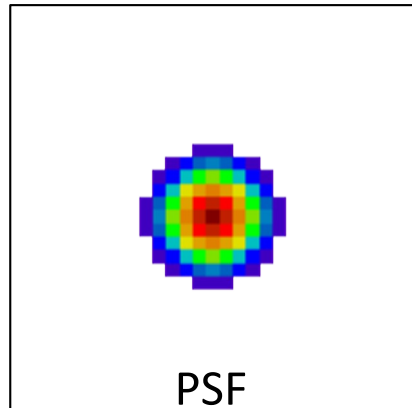
L'image d'un point objet est quasiment une tache d'Airy. L'énergie perdue dans le lobe central, au profit des anneaux, est uniquement conditionnée par l'écart normal du défaut de fabrication. Le rapport de Strehl quantifie cette perte centrale.

rapport de Strehl

$$R \sim 1 - \frac{4\pi^2 \Delta_{RMS}^2}{\lambda^2}$$

- $n'\Delta \gg \lambda \rightarrow$ **on parle de régime géométrique**

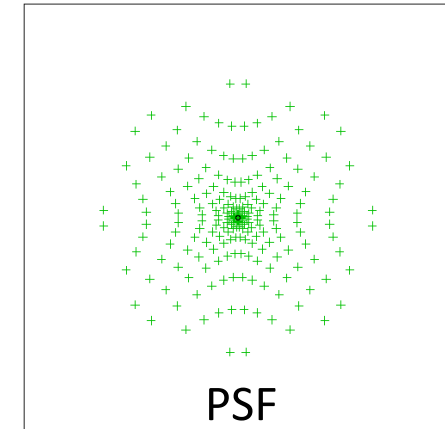
Il suffit de suivre les rayons à travers le système pour savoir où l'énergie tombera dans le plan image. Les défauts de réalisation des surfaces agissent sur les rayons par leurs défauts de pentes.

régime
diffractif

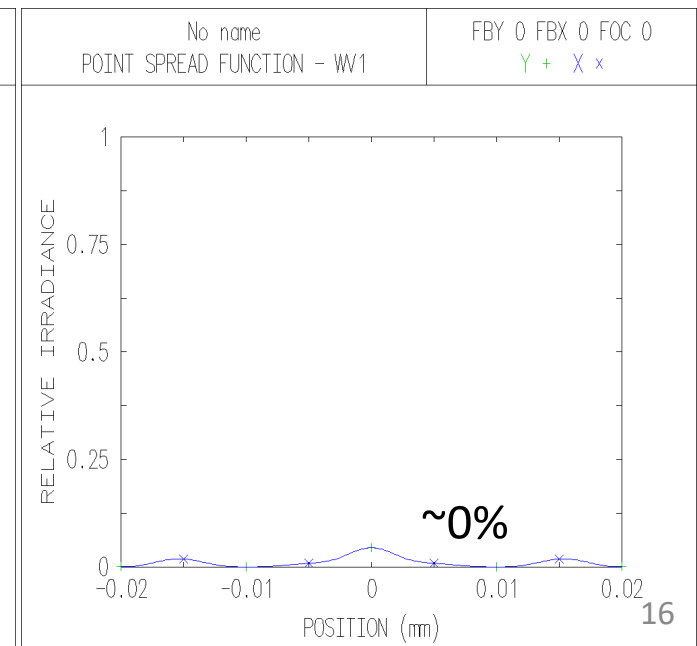
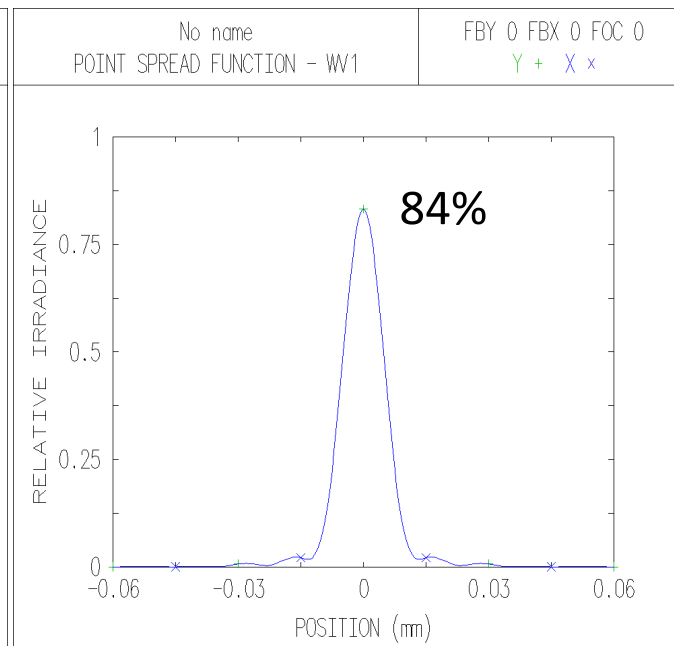
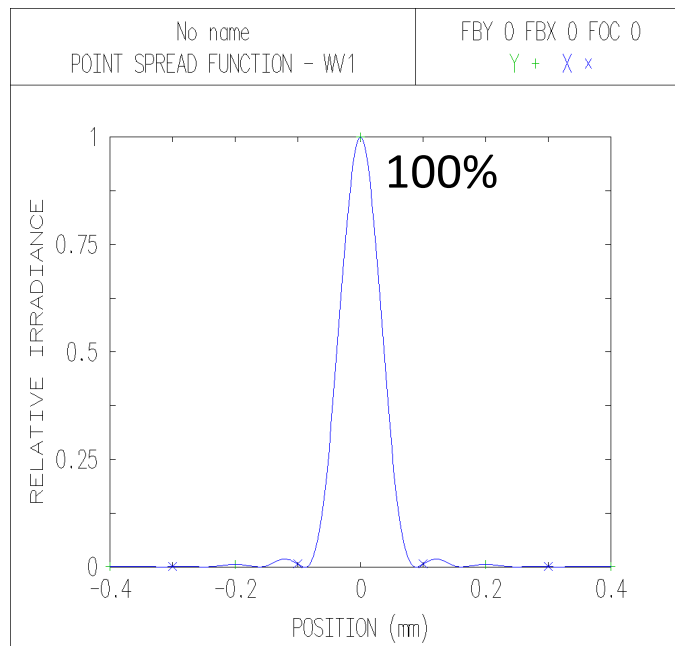
$$\Delta_{RMS} = 0$$

Exemple aberration sphérique

$$\Delta_{RMS} = \lambda/14$$

régime
géométrique

$$\Delta_{RMS} = 4\lambda$$

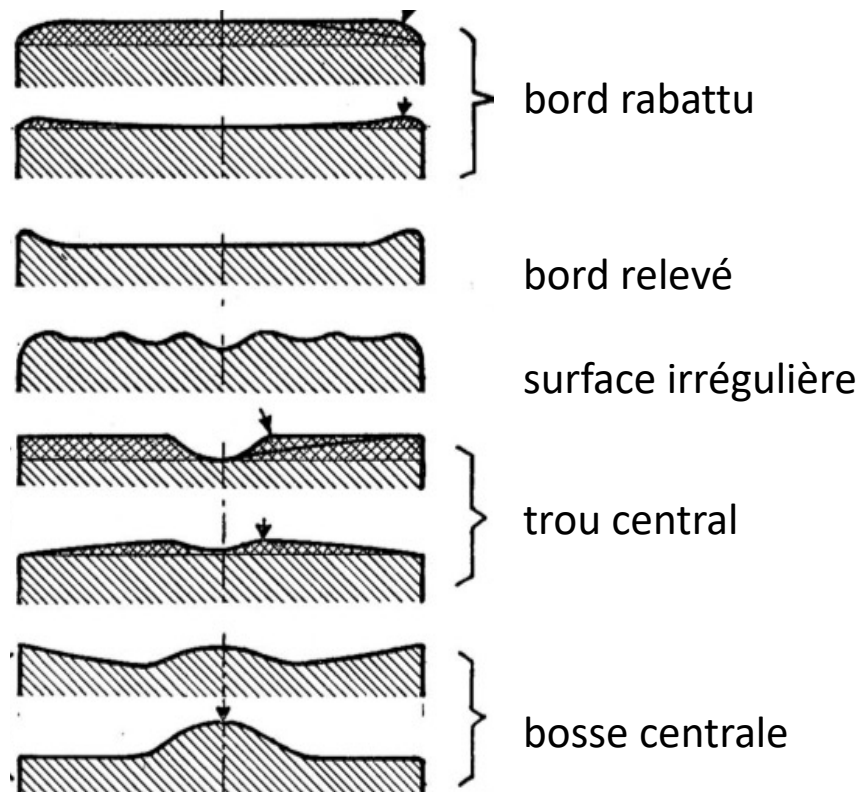


→ **Les défauts basses fréquences (ou défauts de forme)** vont agir sur la surface d'onde traversant le système au même titre que les aberrations de conception ou d'excentrement.

Ils vont donc dévier les rayons **et** introduire un écart normal Δ qui se propagera à travers le système.

Ces défauts affectent la résolution dans l'image.

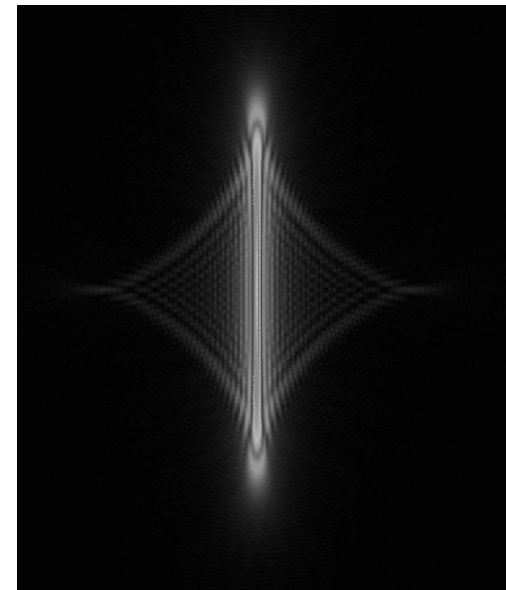
Les défauts de forme de type **couronne concave ou convexe** sont classiquement des défauts de rodage. Ils s'apparentent à de l'**aberration sphérique**.



Quelques défauts classiques BF dans le processus de polissage.

Les défauts en forme de type « **selle de cheval** » ou **défaut de cylindre** proviennent souvent des contraintes créées mécaniquement au montage/démontage. Ils s'apparentent à de l'**astigmatisme**.

Les défauts d'excentrement (mauvais alignement) entraînent souvent de la coma et de l'astigmatisme.



Exemple
astigmatisme (cylindre)
 $\Delta_{PV} = 10 \lambda$

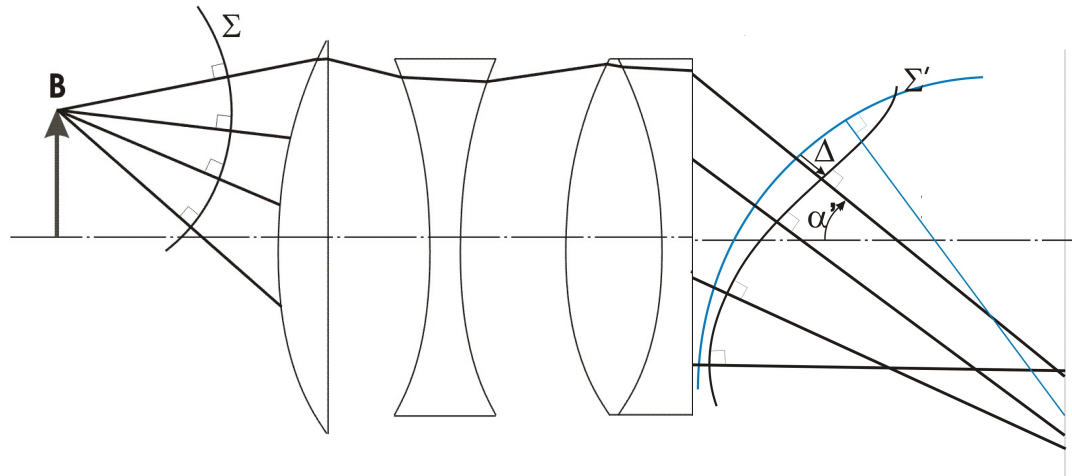
Une bonne optique doit obéir au critère de ...

Rayleigh $\Delta_{PV} < \lambda/4$

- il ne prend pas en compte la surface effective des défauts
deux points font le P-V !
- il dépend de la forme
même PV pour : $\lambda/4$ défocus, $\lambda/4$ aberration sphérique, $\lambda/3$ coma, $\lambda/2$ astigmatisme

Maréchal $\Delta_{RMS} < \lambda/14$

- quasi indépendant de la forme du défaut
- au delà de $\lambda/14$, le système se dégrade rapidement. En deçà, il y a peu à gagner (notion de système limité par la diffraction)



L'écart aberrant Δ_{PV} (resp. Δ_{RMS}) du front d'onde à la sortie d'un système optique composé de plusieurs surfaces est obtenu en additionnant (resp. quadratiquement) les écarts introduits par chacune des surfaces.

$$\Delta_{PV} = \sum_N \Delta_{PV-surface\ N} \qquad \Delta_{RMS} = \sqrt{\sum_N \Delta_{RMS-surface\ N}^2}$$

Remarque : l'indice est supposé égal à 1 donc omis

Il est souvent utile pour identifier les contraintes de fabrication sur les surfaces de faire l'hypothèse que les défauts des N surfaces sont de même valeur. On obtient alors,

$$\Delta_{PV} = N \times \Delta_{PV-surface} \qquad \Delta_{RMS} = \sqrt{N} \times \Delta_{RMS-surface}$$

On voit donc que si un système est composé d'un grand nombre N de surfaces, cela imposera des contraintes très fortes sur les défauts PV de chaque surface et ce d'autant plus que le défaut final est faible (limite de diffraction par exemple). L'effet est moins important pour le RMS car on diviserait par la racine de N .

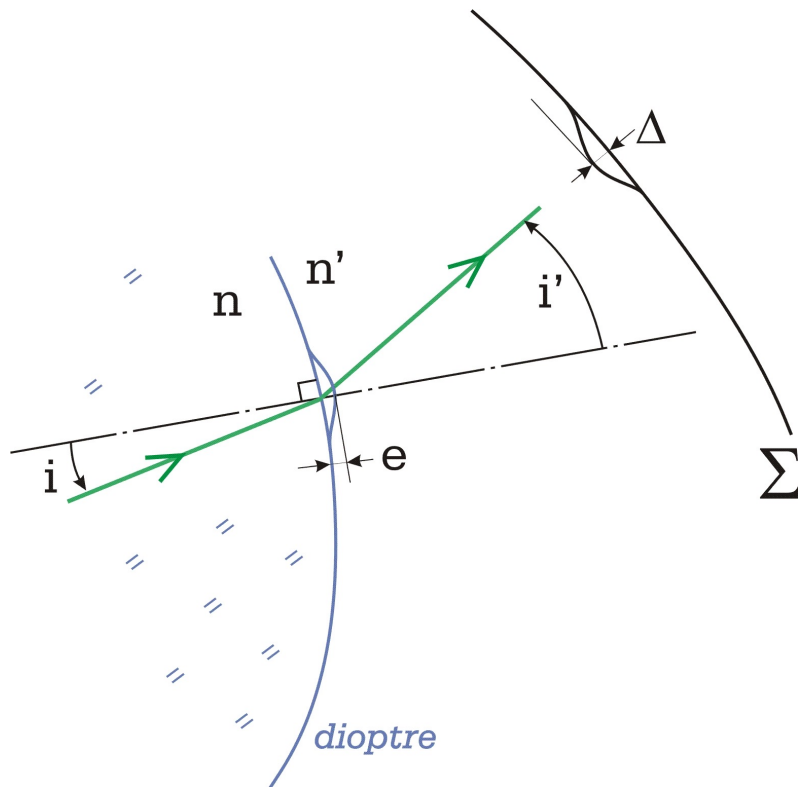
En revanche si N est petit mais supérieur à 1, la division par la racine de N peut être limite car la compensation partielle n'est pas garantie.

Puis à partir du défaut de front d'onde issue d'une surface, on en déduit le défaut de forme (ou surface) associé via la relation page suivante.

Si le nombre de surfaces est grand, on peut supposer que des compensations partielles compensent certains défauts et donc il arrive que certains fournisseurs d'optique appliquent une hypothèse optimiste telle que,

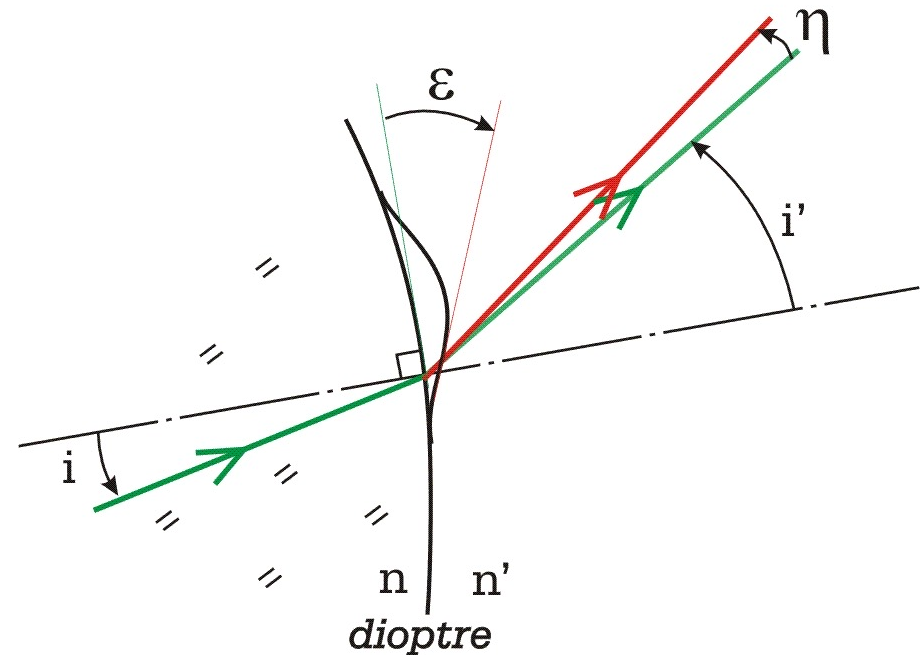
$$\Delta_{PV} = \sqrt{N} \times \Delta_{PV-surface}$$

Influence sur la surface d'onde
d'un défaut d'épaisseur e



$$n'\Delta = e \times [n' \cos i' - n \cos i]$$

Influence sur les rayons
d'un défaut de pente ε



$$\eta = \varepsilon \times \left[1 - \frac{n \cos i}{n' \cos i'} \right]$$

Dans le cas de l'incidence normale, la relation précédente pour le front d'onde montre la différence entre un dioptré (du verre dans le visible) et un miroir pour un même défaut d'épaisseur e .

$$\Delta_{miroir} = 2 \times e$$

$$\Delta_{dioptré} = (n-1) \times e \xrightarrow{n=1,5} \Delta_{dioptré} = \frac{e}{2}$$

Donc pour un même défaut du front d'onde la surface du miroir devra être quatre fois meilleure que la surface d'un dioptré.

Exemples

défaut de surface (par dioptre) pour obtenir un système limité par la diffraction ?

- 4 lentilles ($n=1,6$) à $\lambda = 500 \text{ nm}$

$$\Delta_{PV-total} = \frac{\lambda}{4} = 125 \text{ nm} \rightarrow \Delta_{PV-surface} = \frac{125}{8} = 15,6 \text{ nm} \rightarrow e_{PV-surface} = \frac{15,6}{n-1} = 26 \text{ nm}$$

$$\Delta_{RMS-total} = \frac{\lambda}{14} = 36 \text{ nm} \rightarrow \Delta_{RMS-surface} = \frac{36}{\sqrt{8}} = 12,7 \text{ nm} \rightarrow e_{RMS-surface} = \frac{12,7}{n-1} = 21 \text{ nm}$$

- 2 miroirs à $\lambda = 13 \text{ nm}$

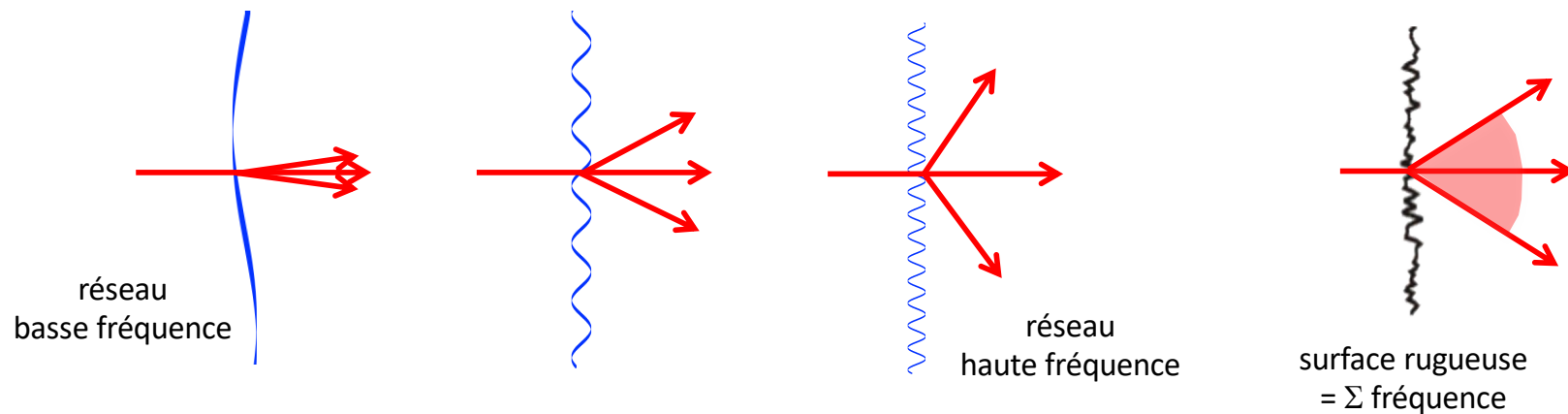
$$\Delta_{PV-total} = \frac{\lambda}{4} = 3,25 \text{ nm} \rightarrow \Delta_{PV-miroir} = \frac{3,25}{2} = 1,6 \text{ nm} \rightarrow e_{PV-surface} = \frac{1,6}{2} = 0,8 \text{ nm}$$

$$\Delta_{RMS-total} = \frac{\lambda}{14} = 0,9 \text{ nm} \rightarrow \Delta_{RMS-surface} = \frac{0,9}{2} = 0,45 \text{ nm} \rightarrow e_{RMS-surface} = \frac{0,45}{2} = 0,23 \text{ nm}$$

sub-nano !

la compensation partielle étant peu probable
j'ai divisé le RMS par 2 et non par racine de 2

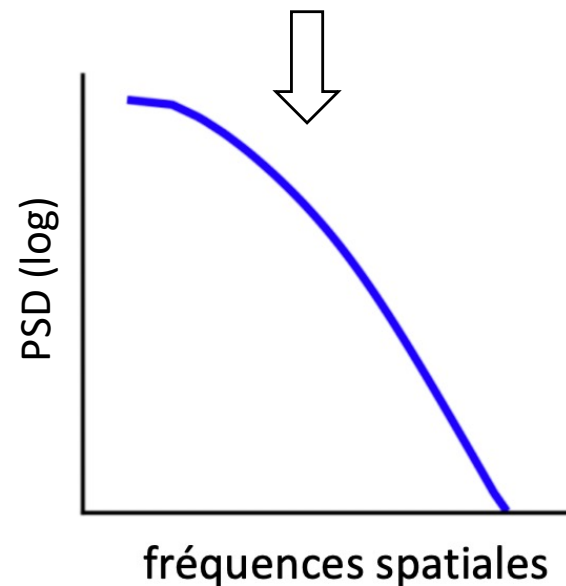
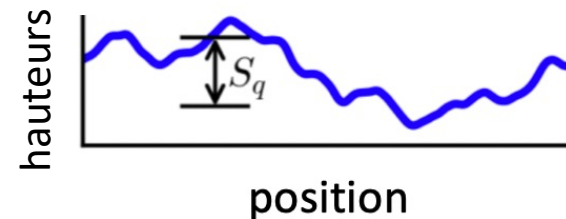
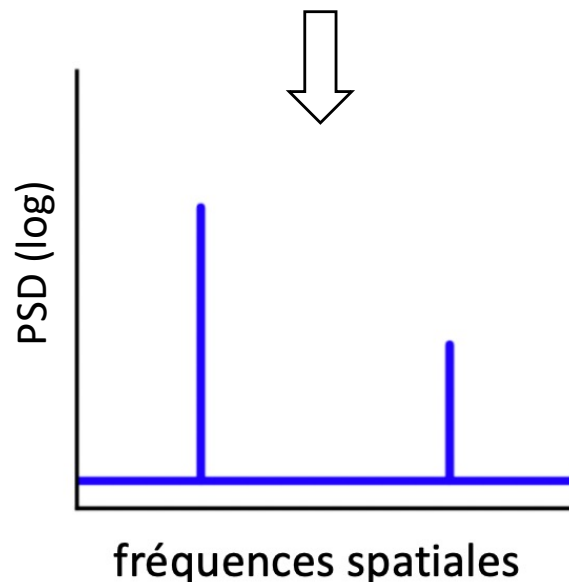
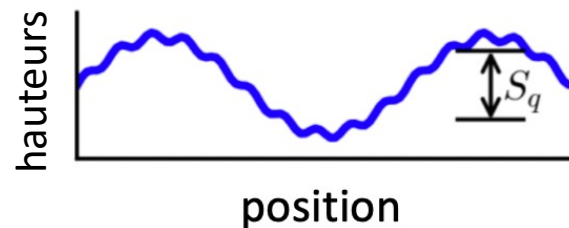
La diffraction par une structure périodique (type réseau) engendre des rayons ayant une direction bien définie (ordres de diffraction). Plus la période est petite (plus la fréquence spatiale est grande) plus l'angle de diffraction est important. Une structure de période inférieure à la longueur d'onde ne diffracte pas.



Une surface ayant une distribution aléatoire de **hautes fréquences** spatiales (**rugosité**) diffractera la lumière dans un halo de **diffusion** et engendrera une perte de transmission et couvrira l'image d'un voile très étendu sans en altérer directement la résolution.

Dans un système optique l'influence de la rugosité va dépendre des conditions de l'imagerie : point brillant sur fond sombre; tache sombre sur fond brillant; présence d'une source brillante dans le champ.

Les défauts HF (et même BF et MF) sont traditionnellement analysés à l'aide de l'outil statistique : variance des hauteurs et densité spectrale de puissance (PSD). La PSD, module carré de la TF des hauteurs, rend possible la détermination de l'efficacité fréquentielle de n'importe quel procédé pour la diminution des défauts.



L'écart type des hauteurs représente la **rugosité** σ de la surface (cas stationnaire et surface de mesure suffisamment grande). Avec l'égalité de Parseval, la rugosité est directement reliée au spectre des hauteurs (TF).

$$R_q^2 = \sigma^2 = \frac{1}{S} \iint_S |Z(x, y)|^2 dx dy = \frac{1}{S} \iint_{Freq} |\tilde{Z}(f_x, f_y)|^2 df_x df_y$$

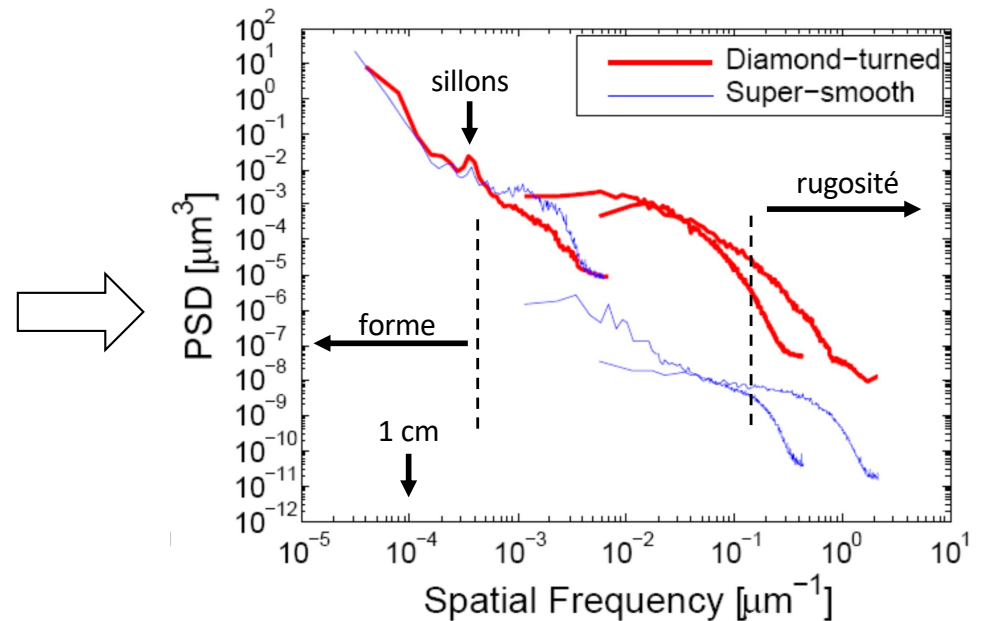
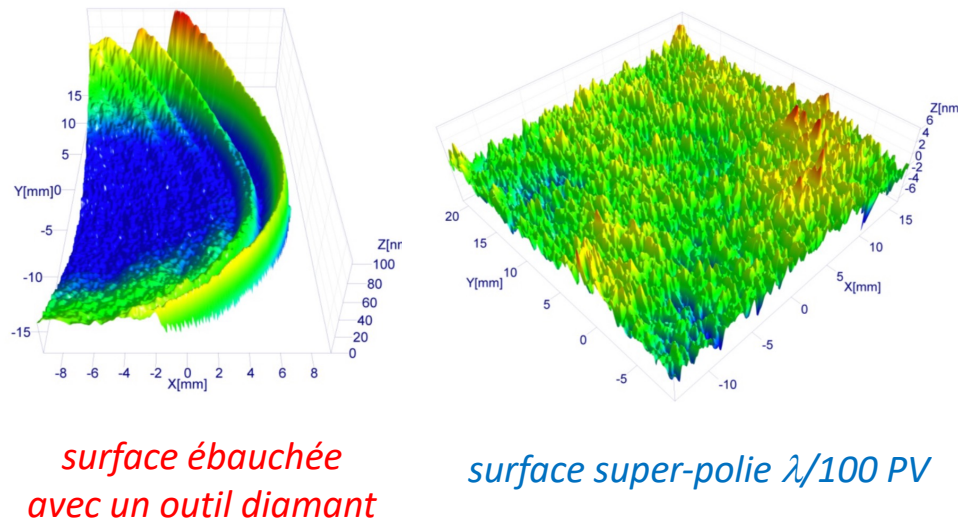
La **densité spectrale de puissance** (PSD) représente le module carré de la TF des hauteurs.

$$PSD(f_x, f_y) = \frac{1}{S} \left| \iint_S Z(x, y) e^{i2\pi(f_x x + f_y y)} dx dy \right|^2 = \frac{1}{S} |\tilde{Z}(f_x, f_y)|^2$$

La rugosité représente donc l'aire sous la PSD. **Elle dépend donc de la plage spectrale utilisée pour la mesure** (et donc de l'instrument)

$$\sigma^2 = \iint_{Freq} PSD(f_x, f_y) df_x df_y = \int_{\substack{\text{en coordonnées} \\ \text{polaires}}} PSD(f) f df = \int_{f=f_{min}>0}^{f_{max}<1/\lambda} PSD(f) f df$$

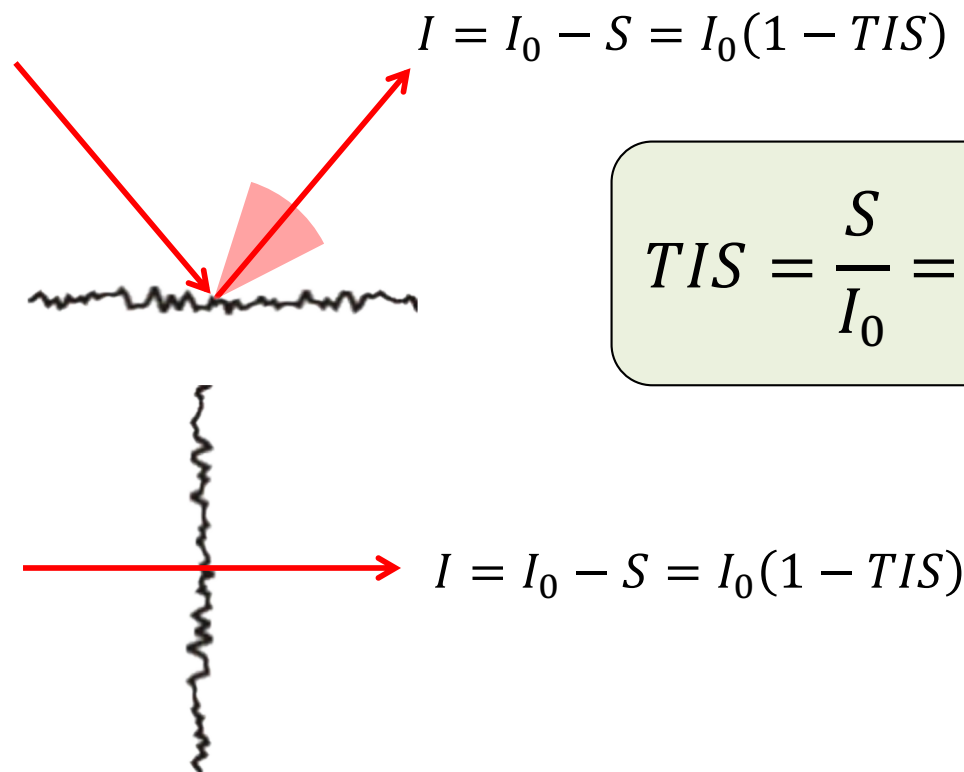
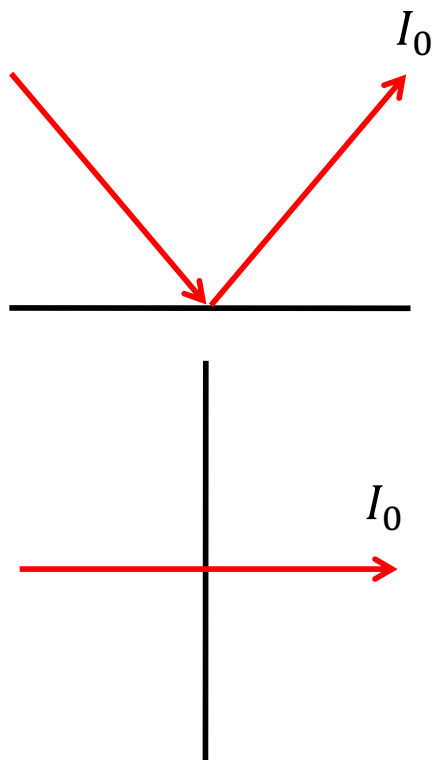
Exemple



Les PSD sont calculées à partir des profils de hauteurs des surfaces mesurés avec un microscope interférométrique. A basse fréquence, la PSD est équivalente dans les deux surfaces. Puis aux hautes fréquences la surface super-polie possède une PSD beaucoup moins importante.

Les sillons observés sur la surface ébauchée avec un outil diamant (période de l'ordre de 3 mm) engendre une fréquence caractéristique sur la PSD à $3 \cdot 10^{-4} \mu\text{m}^{-1}$.

Une autre grandeur simple à utiliser est la fraction de la lumière transmise (ou réfléchie dans le spéculaire) perdue par diffusion sur la rugosité, appelée **TIS, Total Integrated Scattering**. Pour les faibles rugosités, le TIS est l'équivalent du rapport de Strehl pour les faibles aberrations.



$$TIS = \frac{S}{I_0} = 1 - \frac{I}{I_0}$$

Dans une distribution gaussienne des hauteurs, on montre que,

$$TIS = 1 - \frac{I}{I_0} = 1 - e^{-\frac{4\pi^2}{\lambda^2} \times \langle (n'\Delta)^2 \rangle} \underset{\Delta \ll \lambda}{\sim} \frac{4\pi^2}{\lambda^2} \times \langle (n'\Delta)^2 \rangle$$

où $\langle (n'\Delta)^2 \rangle$ représente la variance du front d'onde perturbé par la rugosité de surface R_q . L'expression de $\langle (n'\Delta)^2 \rangle$ se retrouve avec les relations vues pour l'écart normal, à savoir :

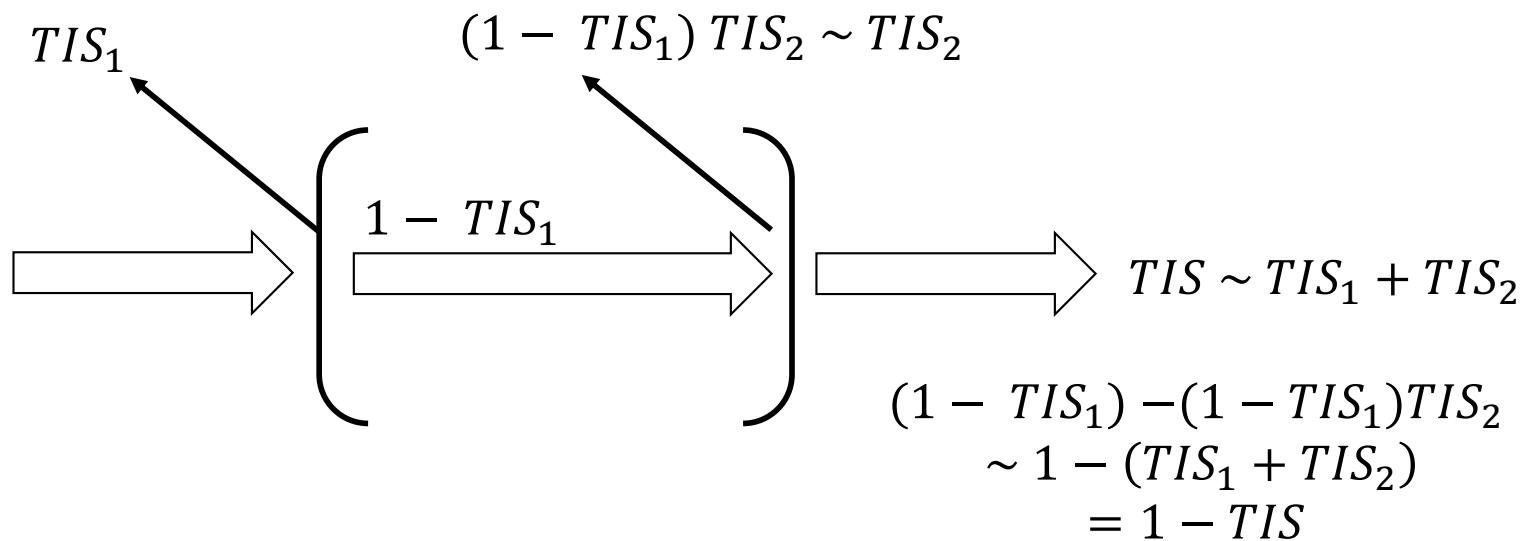
$$n'\Delta = R_q \times [n' \cos i' - n \cos i]$$

en incidence normale ($i=i'=0$), on a

$$\langle (n'\Delta)^2 \rangle = (n - 1)^2 \times R_q^2 \quad \text{en transmission d'un dioptre}$$

$$\langle (n'\Delta)^2 \rangle = 4R_q^2 \quad \text{en réflexion}$$

Si les pertes par diffusion sont faibles ($TIS \ll 1$) à chaque dioptre alors
la perte totale du système est égale à la somme des pertes



Exemples en incidence normale

un miroir

$$R_q = \lambda \rightarrow TIS = 1 - e^{-16\pi^2} \sim 1 \quad \text{Dans le visible une rugosité de } 1 \mu\text{m} \text{ suffit à diffuser toute la lumière}$$

$$R_q = \lambda/10 \rightarrow TIS \sim 0,8 \quad \text{@500nm une rugosité de 50 nm diffuse 80\%}$$

$$R_q = \lambda/100 \rightarrow TIS \sim 0,02 \quad \text{@500nm une rugosité de 5 nm diffuse 2\%}$$

6 lentilles $n = 1,5$ @500 nm

$$R_q = 10 \text{ nm} \rightarrow TIS = 12 \times \frac{4\pi^2}{\lambda^2} \times (n - 1)^2 \times R_q^2 \sim 0,04$$

équivalent à une seule réflexion vitreuse en incidence normale

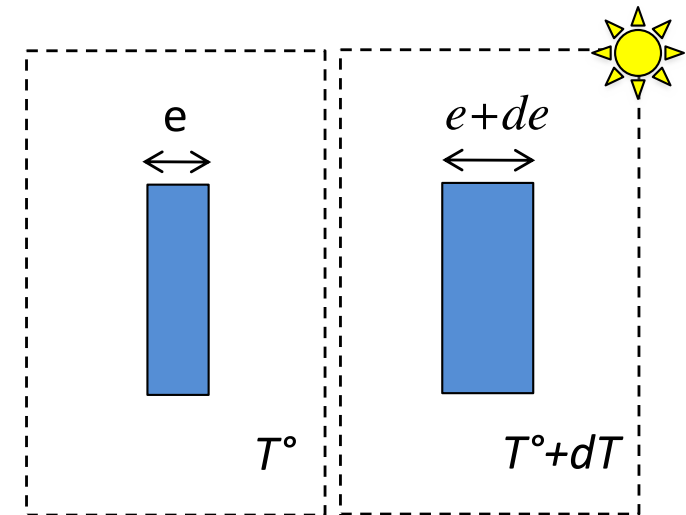
10 lentilles $n = 1,5$ @500 nm

$$R_q = 5 \text{ nm} \rightarrow TIS \sim 0,02 \quad \text{équivalent à un seul miroir de même rugosité (5nm=500nm/100=\lambda/100)}$$

Sous l'effet d'une variation de température homogène dT un matériau subit une dilatation/contraction linéique de , tel que,

$$de = \alpha \times e \times dT$$

α est appelé **coefficient de dilatation thermique (K^{-1})**. Il dépend également de la température. Cela entraîne une variation relative des épaisseurs, diamètres, rayons de courbure et focales dans les systèmes optiques.

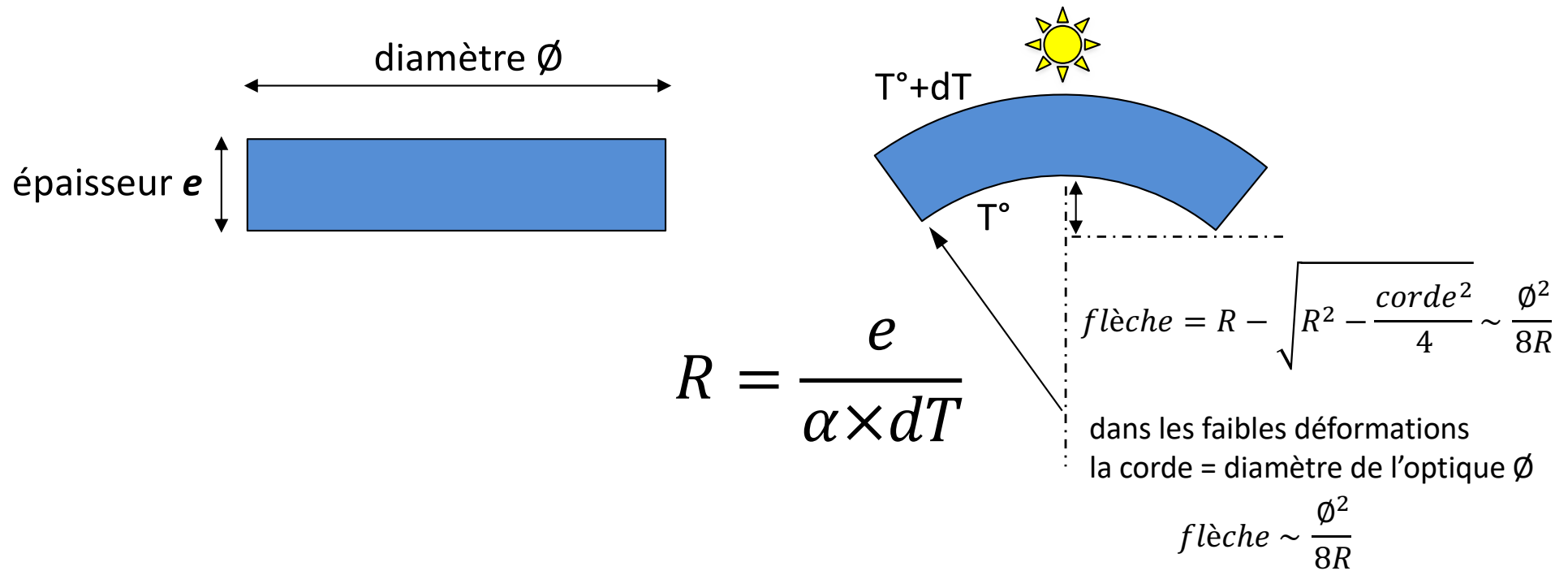


matériau	Zerodur	Silice	SiC	BK7	F2
α (K^{-1})	$\pm 2.10^{-8}$	$0,55.10^{-6}$	4.10^{-6}	$7,1.10^{-6}$	$8,2.10^{-6}$

zérodur = Silice + quartz

SiC (carbure de silicium) : très rigide (permet de fabriquer des miroirs très minces donc légers)

Sous l'effet d'un gradient de température dT un matériau subit un stress thermique qui engendre une déformation (courbure), telle que,

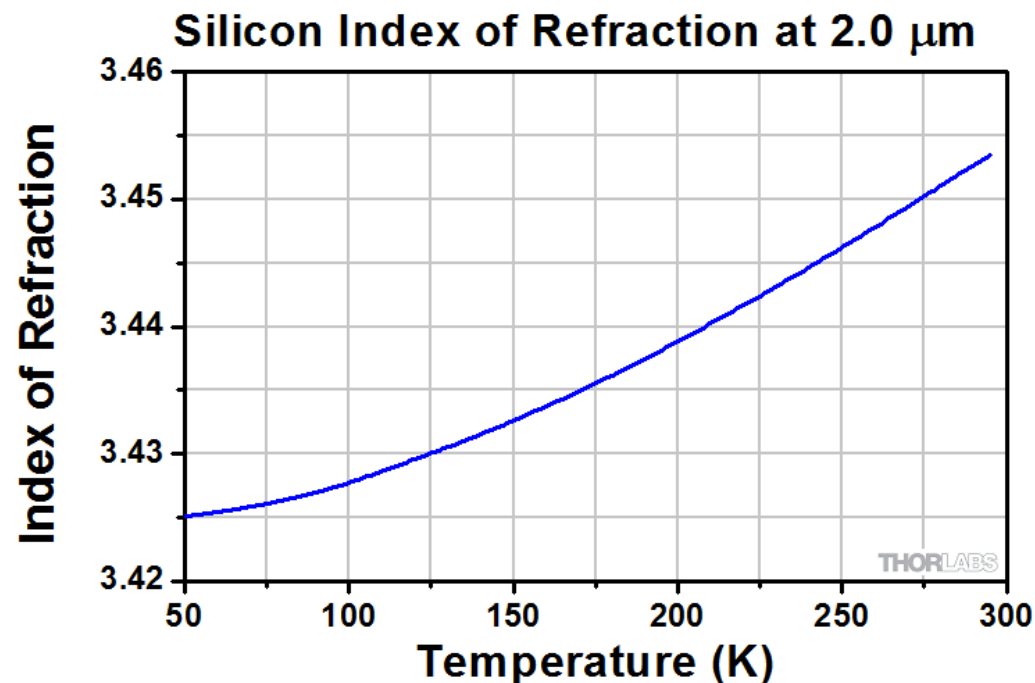


Du point de vue des rayons qui sont incidents, l'effet est plus violent en réflexion qu'en transmission.

Sous l'effet d'une variation de température homogène dT un matériau subit également une variation de son indice de réfraction, tel que,

$$n(T) = n_0 + \frac{\partial n}{\partial T} dT = n_0 + \beta dT$$

β est appelé **coefficient thermo-optique**.



Dans une lentille d'épaisseur e et d'indice n , l'effet de dilatation thermique et l'effet thermo-optique se combinent et engendrent une variation du front d'onde transmis, ce qui se traduit au 1^{er} ordre par une défocalisation.

La variation de l'écart normal s'écrit,

$$\Delta = (n - 1)e$$

$$\rightarrow d\Delta = (n - 1)de + edn$$

$$\rightarrow d\Delta = (n - 1)\alpha edT + e\beta dT = e(n - 1) \left[\alpha + \frac{\beta}{n - 1} \right] dT = WFE_{defocus}$$

La variation relative du front d'onde traduit le déplacement de l'image

$$\frac{1}{\Delta} \frac{d\Delta}{dT} = \frac{1}{f'} \frac{df'}{dT} = \alpha + \frac{\beta}{n-1}$$

à 546 nm sauf Ge	N-BK7	N-F2	Silice	PK51	Ge à 10μm
$\alpha \times 10^{-6}$	7,1	8,2	0,55	12,4	
$\beta \times 10^{-6}$	3	4,4	12,8	-6,7	~ 400
$\left[\alpha + \frac{\beta}{n-1} \right] \times 10^{-6}$	13	15	24	-0,2 à +0,4	140 à 170
K W/m/K	1,1	0,78	1,38	0,65	60 à 70

K = Conductibilité thermique (lié à la vitesse de propagation de la chaleur)

Remarque

Le germanium, utilisé dans les systèmes optiques infrarouge, présente une variation relative très importante et nécessite donc une thermalisation des optiques ou un système de mise au point automatique.

Les règles de la métrologie

~~

Si vous pouvez le tester alors vous pouvez le faire

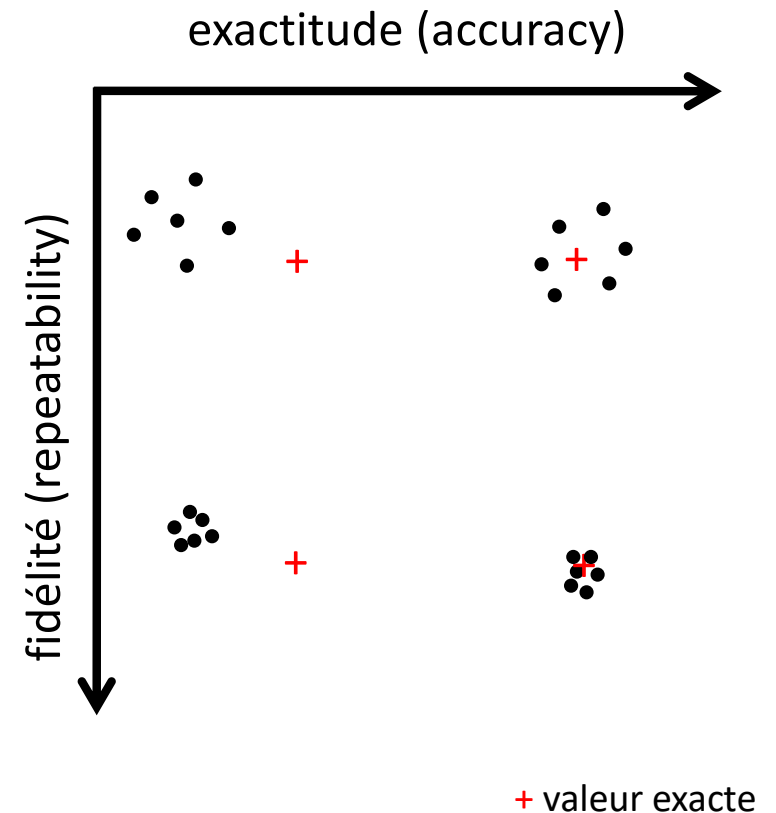
Si vous achetez une optique, vous devez être capable de la tester

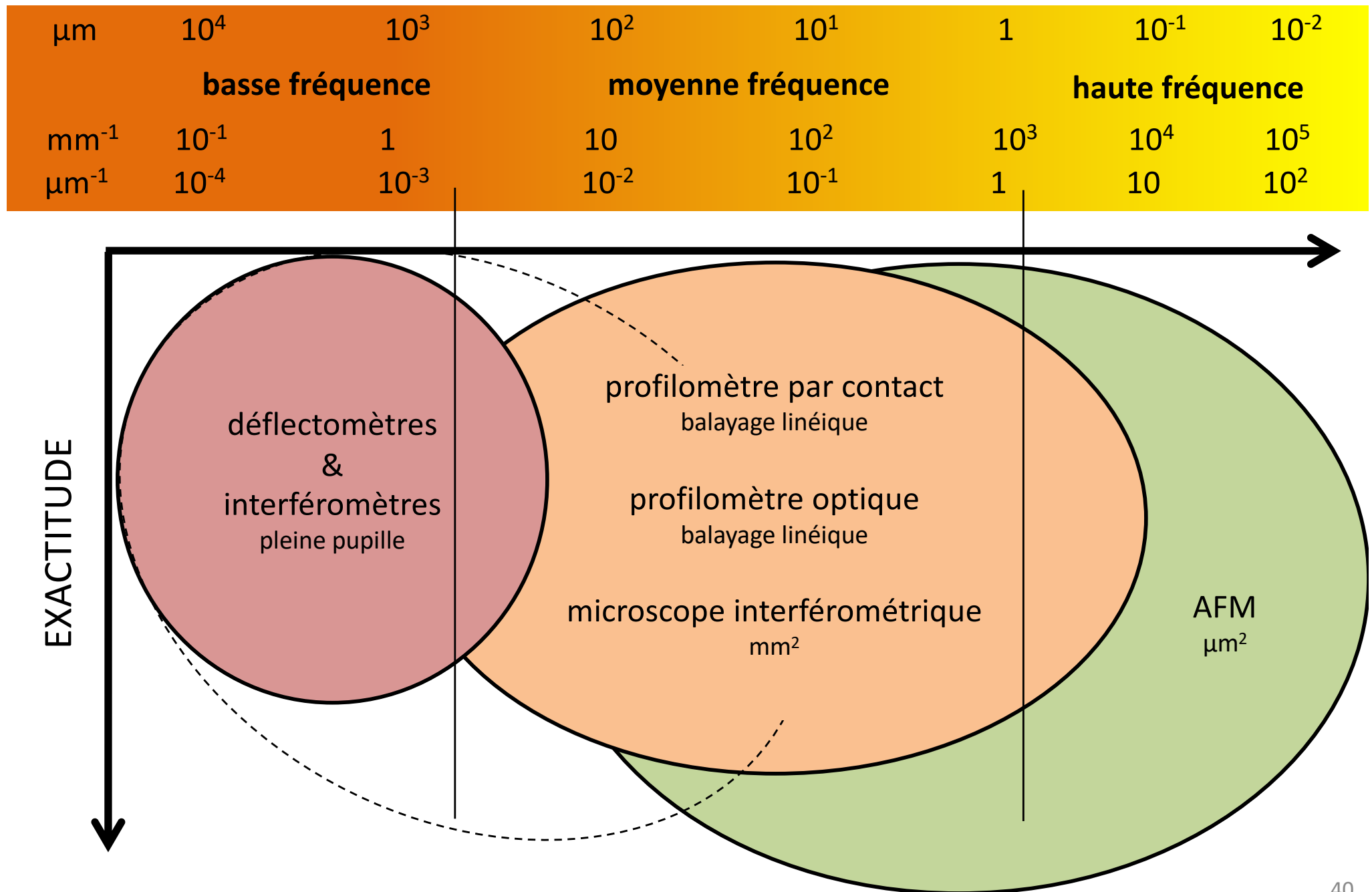
Si vous laissez croire au vendeur que vous allez tester l'optique à la réception alors vous en aurez probablement une meilleure

L'**exactitude** (relative) est définie comme l'écart entre la **valeur exacte** et la **valeur moyenne** mesurée. L'exactitude indique comment une erreur systématique affecte la mesure.

La **fidélité** caractérise le caractère répétable de la mesure (on parle parfois de « répétabilité » mais ce mot n'existe pas en français).

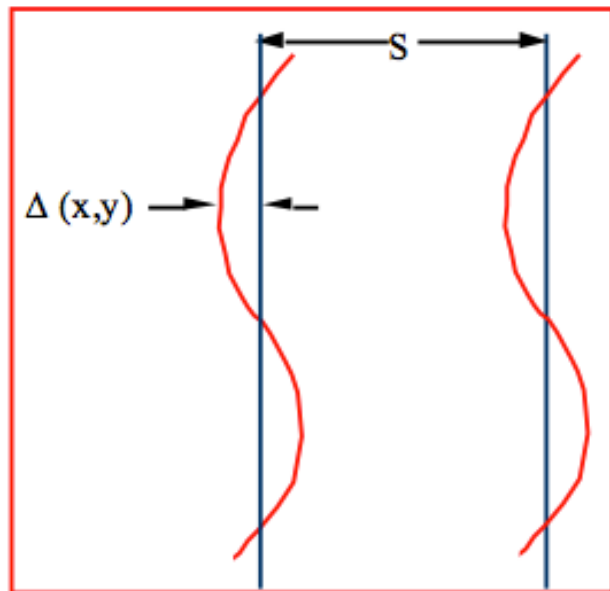
Les **erreurs aléatoires** incluent : la turbulence atmosphérique, les vibrations mécaniques, le bruit de photons; le bruit du détecteur. Ces erreurs aléatoires ont par définition une valeur moyenne nulle, mais pas forcément un effet moyen nul.





Contrôle interférométrique (à 2 ondes)

Les franges d'interférence jouent le rôle de règle de mesure. L'analyse classique consiste à détecter le centre des franges et évaluer l'écart à la rectitude. Une démodulation par TF permet une meilleure estimation de la phase (cf TP Fizeau 1A) et un traitement en temps réel. L'augmentation de la précision de mesure passe par la technique du décalage de phase.

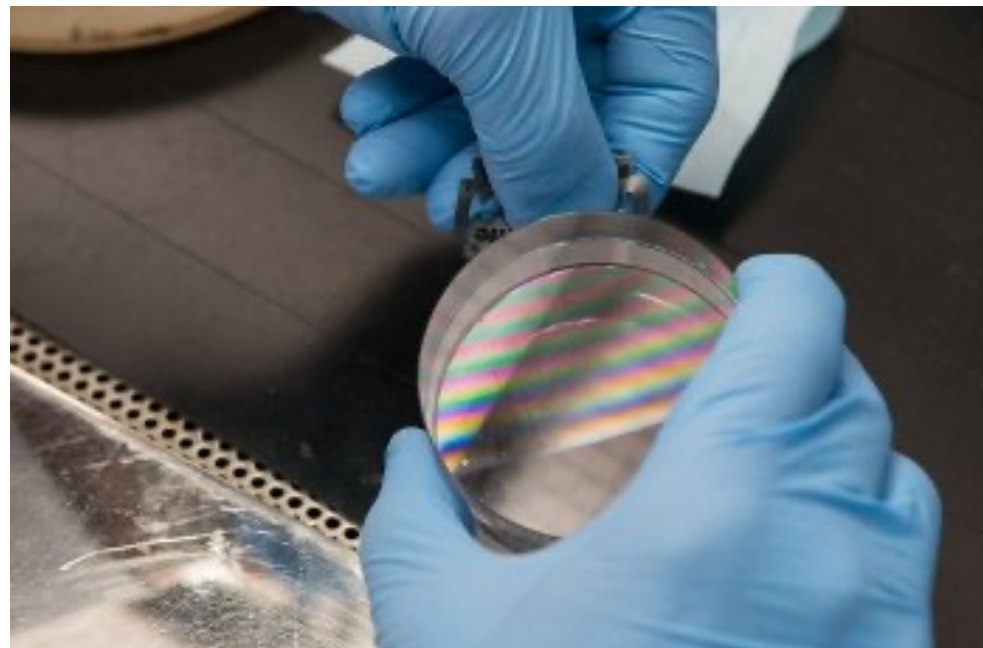
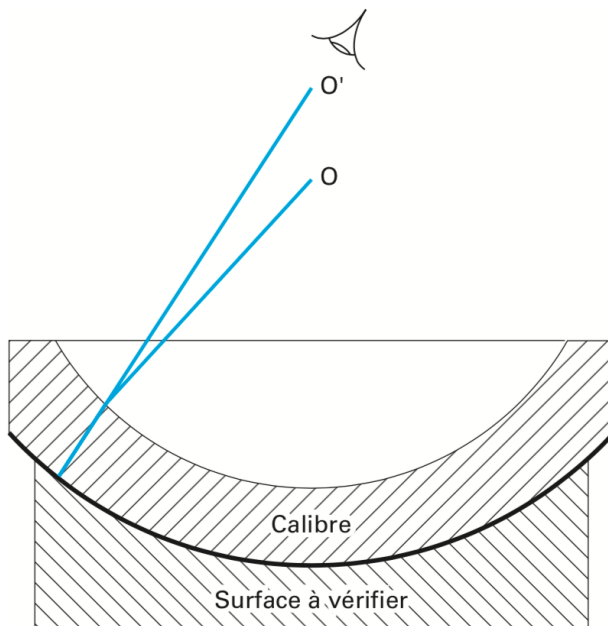


Le défaut de hauteur de la surface testée vaut,

$$h(x, y) = \frac{\lambda}{2} \times \frac{\Delta(x, y)}{S}$$

Contrôle interférométrique (à 2 ondes)

En atelier, le contrôle de la surface en cours de polissage est effectué à l'aide d'un calibre (surface optique polie de rayon de courbure connu). Les calibres sont fabriqués par paire de rayon fixe. Un opticien de précision peut « ressentir » un défaut de l'ordre de $\lambda/40$. La fabrication d'un calibre prend plusieurs jours et coute cher. Il est donc préférable d'utiliser des calibres existants et ajuster le design optique en conséquence.



Contrôle interférométrique

La mesure interférométrique est toujours relative à une référence de phase (plan ou sphère étalon). Il est également nécessaire de prendre en compte les défauts de l'interféromètre.

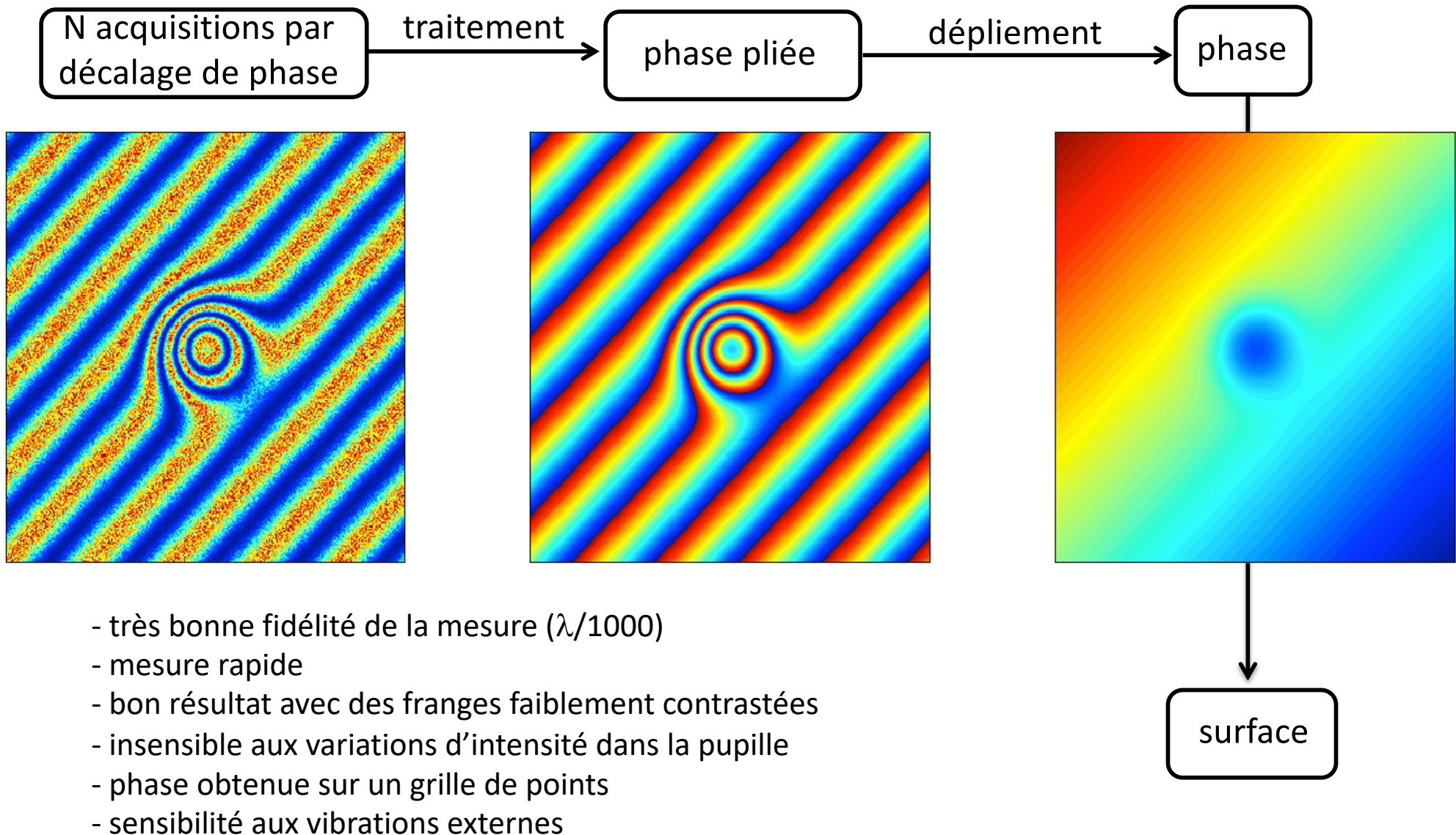
$$\Delta_{\text{REF}} + \Delta_{\text{DEFAULT}} = \Delta_{\text{voulu}}$$

Par exemple, si la référence est à $\lambda/10$ PV et que l'exactitude de la mesure doit être à $\lambda/10$ PV, l'interféromètre ne doit présenter aucun défaut !

Une référence à $\lambda/20$ autorise un défaut de l'interféromètre à $\lambda/20$.

Pour obtenir des exactitudes sub-nanométrique il est nécessaire d'effectuer un étalonnage de l'interféromètre et éventuellement d'avoir recours à des techniques de mesures absolues de plans ou de sphères.

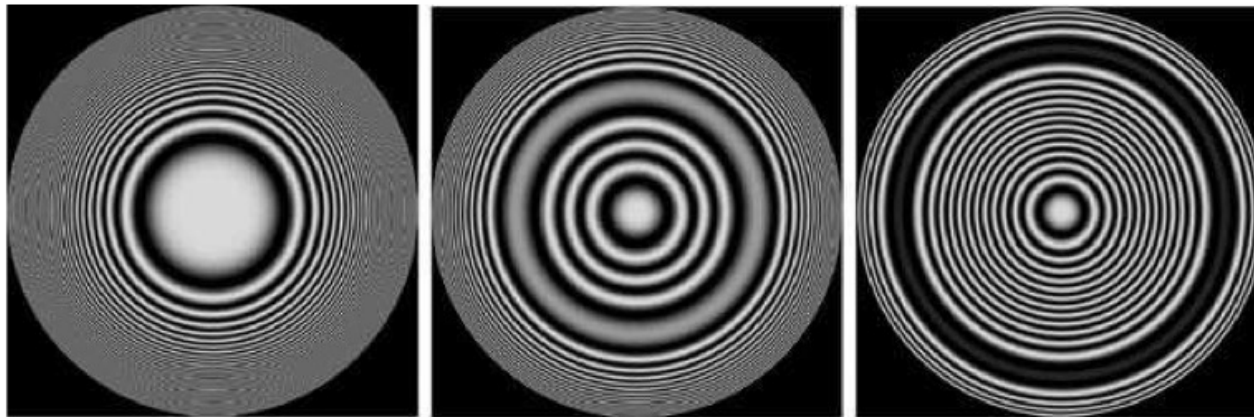
Contrôle interférométrique : décalage de phase



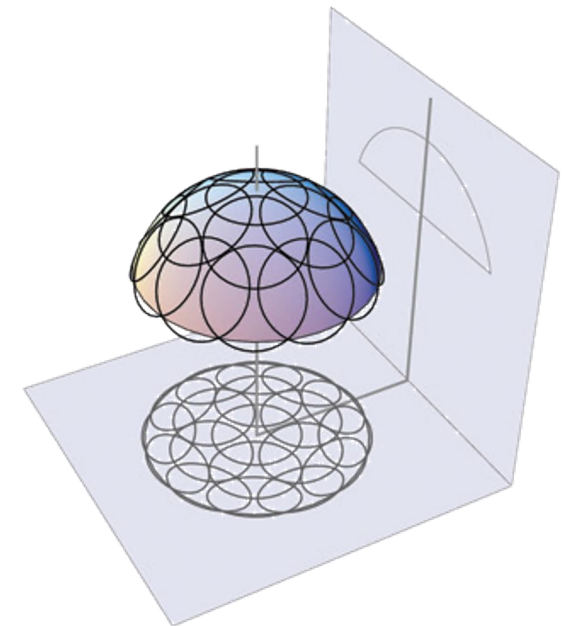
Contrôle interférométrique

Interféromètre à sous pupille

Pour la mesure de grande surface et/ou de surface asphérique la dynamique d'échantillonnage de l'interféromètre n'est pas suffisante. Il est nécessaire de recourir à une technique de recouvrement par sous pupille (par défocus ou transversale). Cela nécessite un ajustement très précis de chaque mesure entre elles et d'un algorithme de reconstruction supplémentaire.



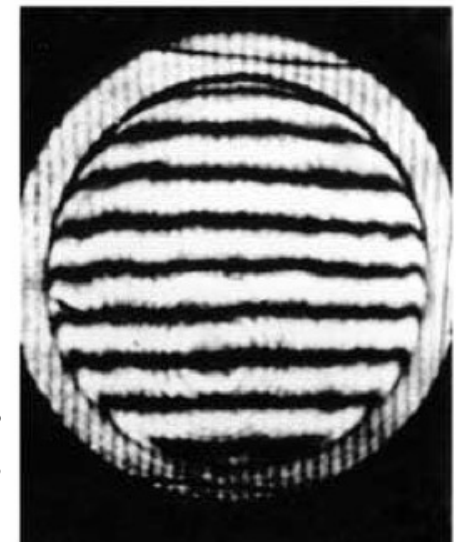
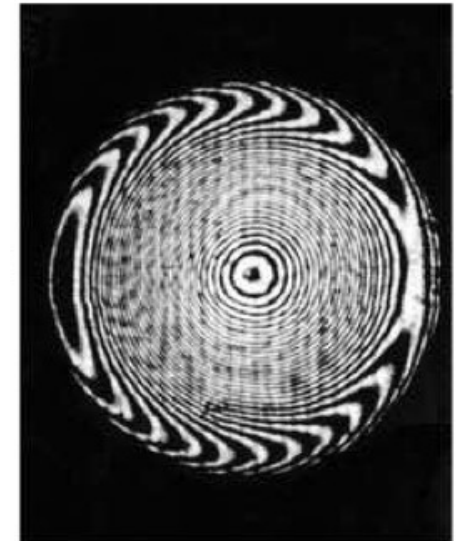
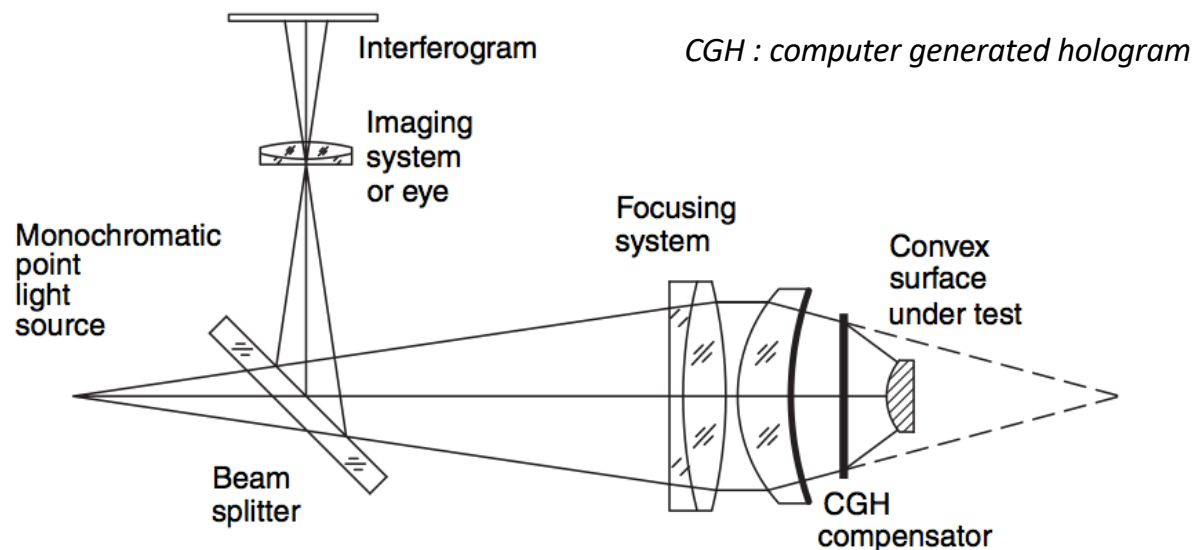
interférogrammes d'une surface asphérique avec 3 défocus



Contrôle interférométrique

Interférométrie assistée par holographie numérique

Pour la mesure de surface asphérique (par exemple, les miroirs de 8m du VLT), on peut également recourir à la génération d'un front d'onde de référence à l'aide d'un hologramme synthétique. Chaque surface testée doit avoir son propre hologramme.

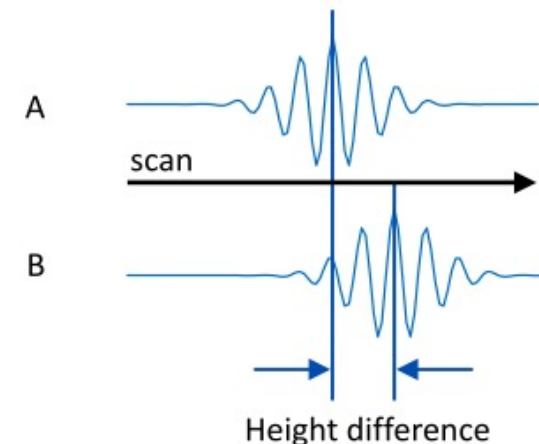
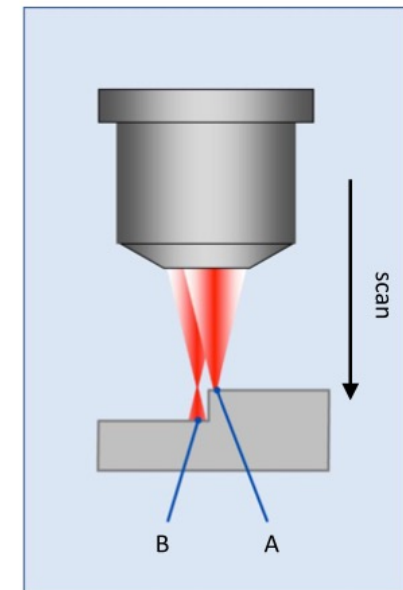
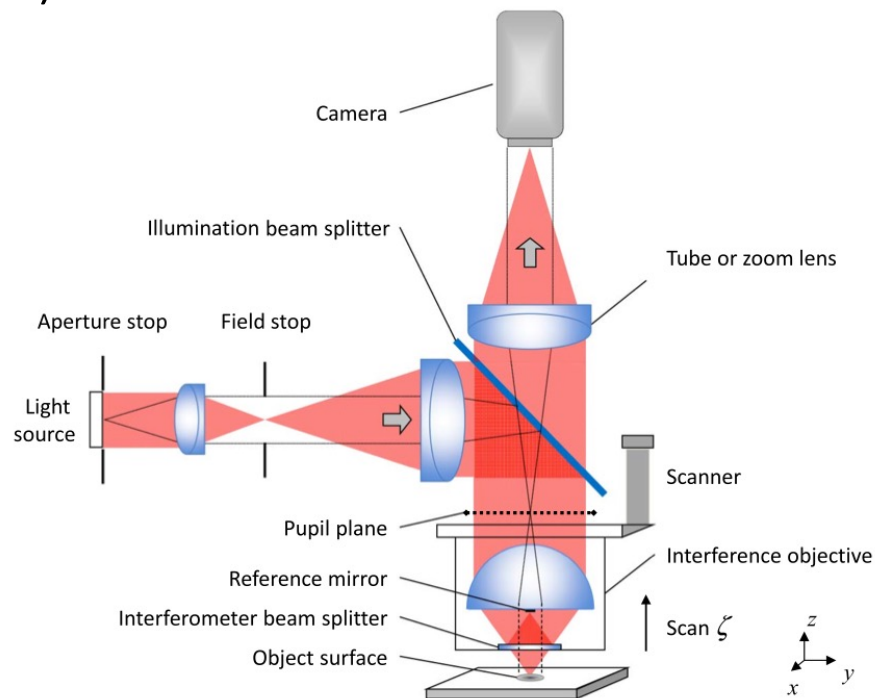


*interférogrammes d'une parabole
sans et avec hologramme*

Contrôle interférométrique

Profilomètre optique

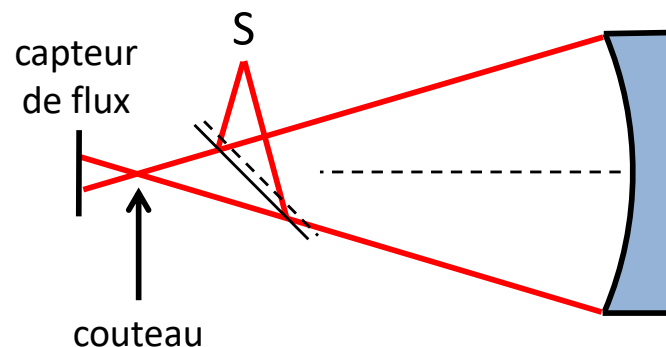
L'utilisation d'une source de faible cohérence temporelle permet de localiser les franges dans un certain volume de mesure. Ce principe de tomographie optique couplé à un microscope permet des mesures de rugosité ou de forme sur des petits champs (dépend du grandissement de l'objectif).



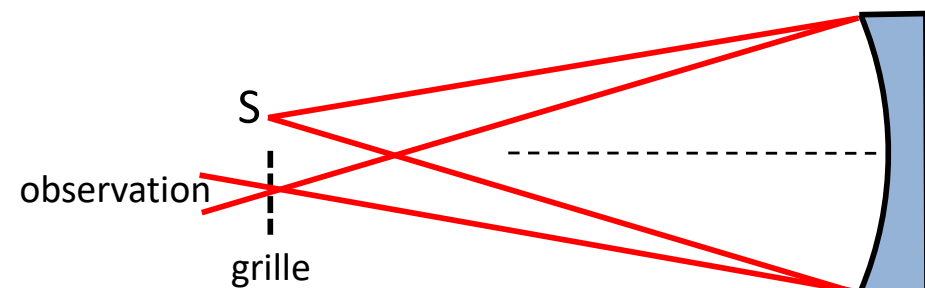
Contrôle par déflectométrie

Le principe fondamental de toutes techniques de déflectométrie est de détecter le déplacement latéral de rayon lumineux réfléchi/transmis par une surface permettant de mesurer la pente du front d'onde et de remonter à la topographie de la surface. Ces méthodes sont très sensibles au calibrage de la géométrie du système employé.

Couteau de Foucault (1858)

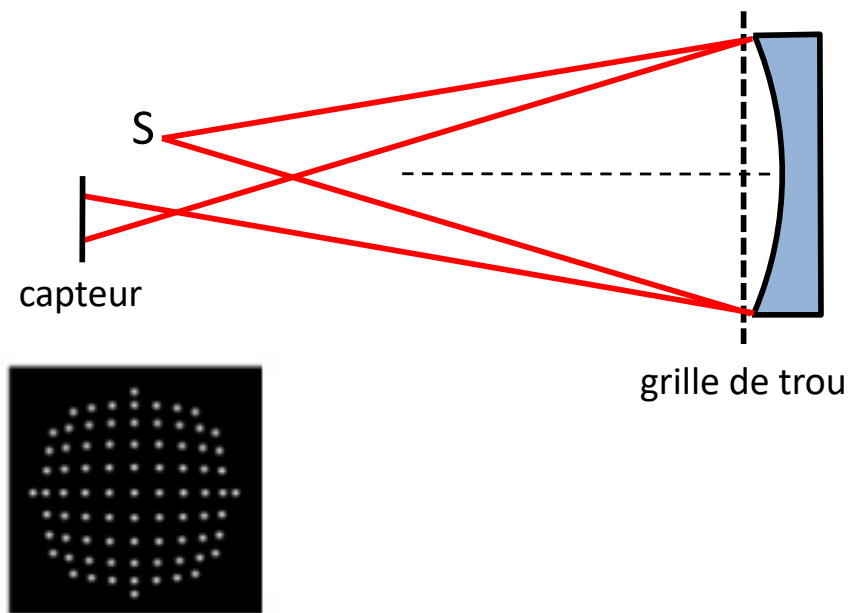


Test de Ronchi (1923)



Contrôle par déflectométrie

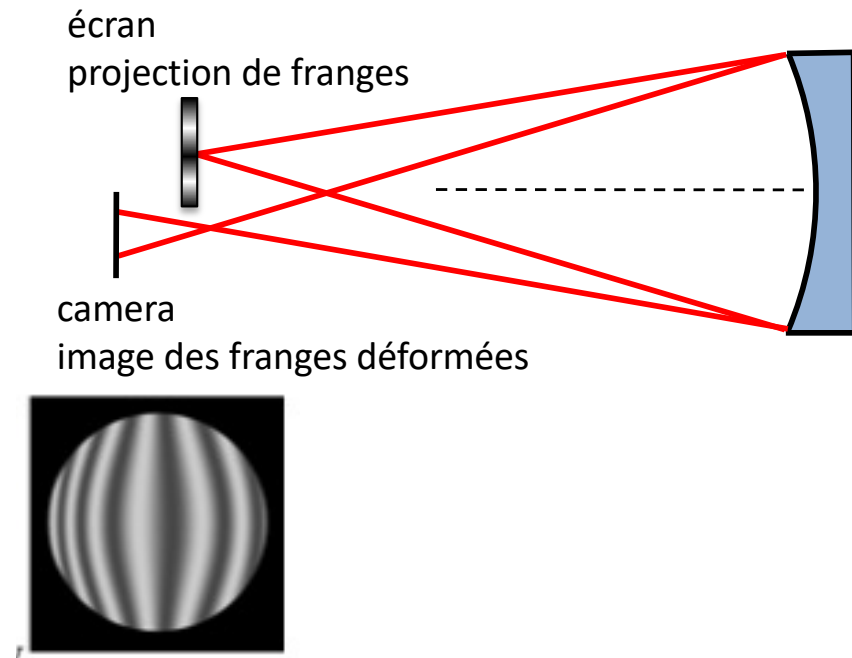
Test de Hartmann (1900)



Shak-Hartmann (1971)

Le capteur inclut une matrice de μ lentilles et échantillonne directement le front d'onde.

Déflectométrie par mesure de phase (2004) « Hartmann numérique HD »



Méthode BF/MF	Avantages	Inconvénients
Interférométrie*	précision sub-nano comportement bien connu disponibilité commerciale	dynamique faible coût élevé alignement difficile lourd
Interférométrie sous pupille*	précision nano grande dynamique	coûté élevé lourd
Méthode optique à balayage*	grande dynamique optimal pour les BF géométrie variée et grand volume	sensible à l'environnement coût élevé temps d'acquisition (si surface)
Défectométrie par mesure de phase	grande dynamique précision sub-nano (mode phase shift) faible sensibilité à l'environnement alignement facile coût assez faible	calibrage délicat sensible à la lumière parasite temps d'acquisition
Hartmann, Ronchi, Foucault...	mesure rapide interprétation intuitive	faible résolution spatiale exactitude limitée
calibres * disponibilité commerciale	faible coût interprétation intuitive	exactitude contact avec la pièce limité aux petites surfaces

Méthode HF	Avantages	Inconvénients
profilométrie mécanique*	précision sub-nano haute résolution indépendant des propriétés optiques	contact temps d'acquisition (si surface) artéfact du à la forme de la pointe
microscope interférométrique*	rapide précision nano	limité aux faibles rugosités artéfact avec les films transparents temps d'acquisition (si grande surface)
gonio-diffusiomètre*	rapide insensible aux vibrations	nécessite un modèle pour le traitement des données
AFM*	précision sub-nano haute fréquence accessible	petit champ de mesure artéfact du à la forme de la pointe sensible aux vibrations

* disponibilité commerciale

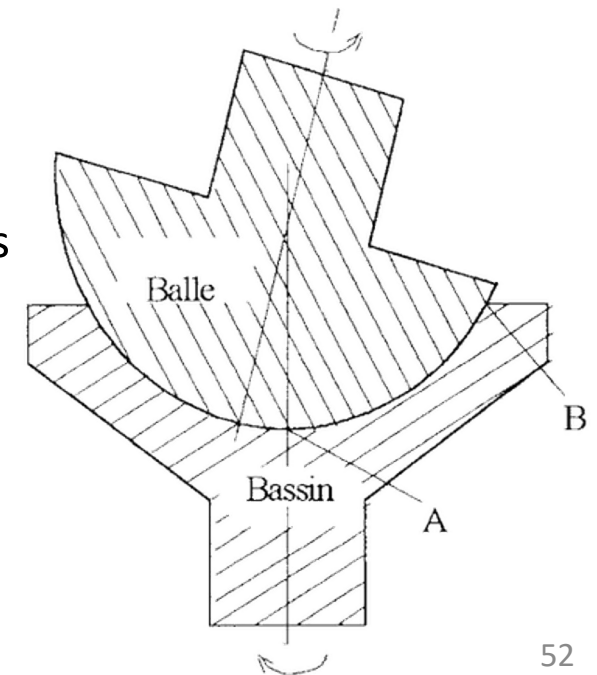
Un principe fondamental : le rodage

Pour surfacer le verre, seul un procédé d'abrasion par **rodage mutuel** semble pertinent pour la transformation de matière brute en une optique polie et prête à être traitée. Ce principe de base de la fabrication de surfaces sphériques a été « inventé » par Newton. Par exemple, deux surfaces rodées l'une sur l'autre produisent par usure mutuelle deux sphères de même rayon.

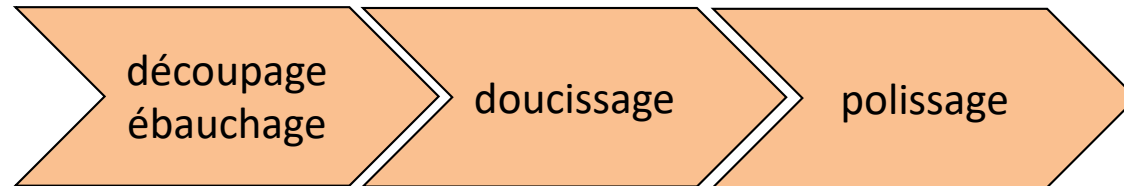
Un processus purement mécanique ne suffit pas car les précisions requises pour les surfaces optiques sont de l'ordre de la dizaine de nanomètre pour la forme et sub-nanomètre pour la rugosité.

Le procédé de fabrication comporte donc plusieurs étapes...

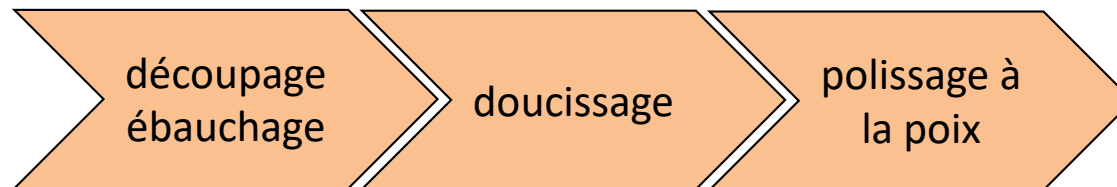
et il s'avère nécessaire de maîtriser tout le spectre des défauts à chaque étape.



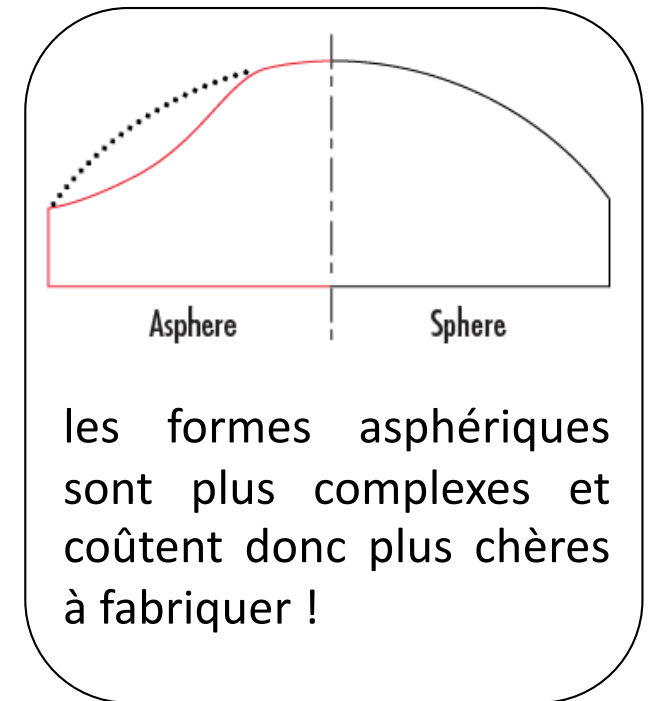
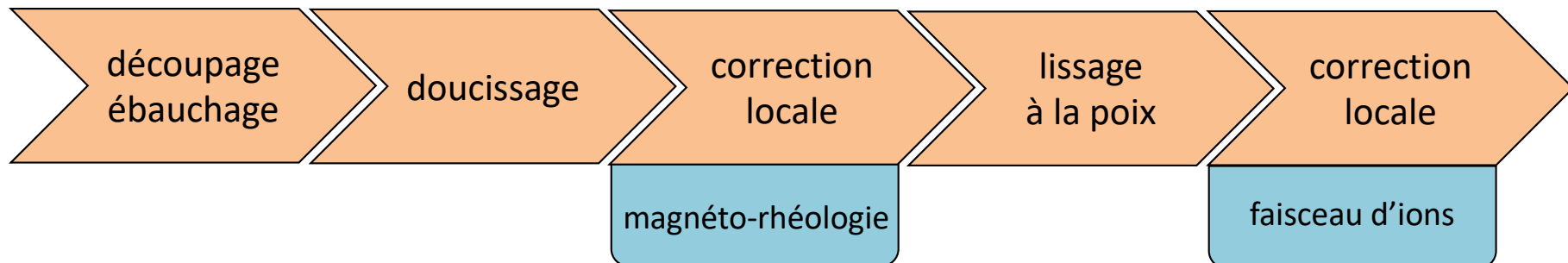
procédé classique (lunetterie)



optique de précision



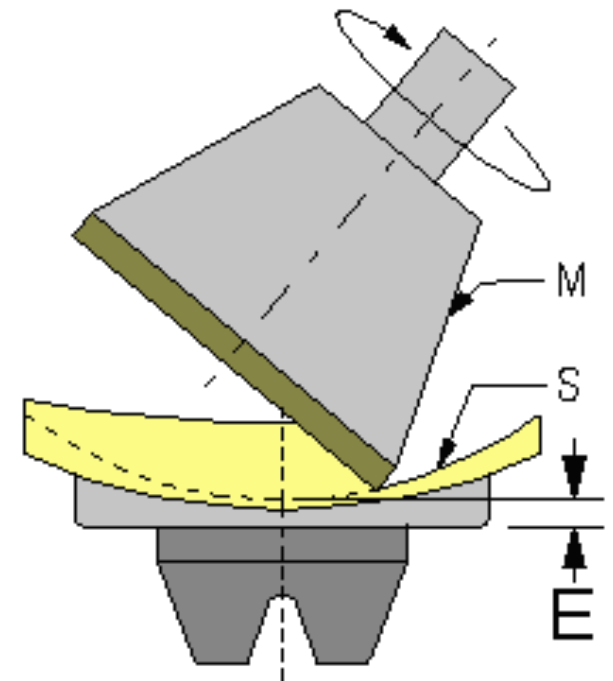
optique de précision industrielle



Découpage/Ebauchage

Son but est d'obtenir, à partir d'un bloc de verre, la forme géométrique globale souhaitée de la pièce et avec une rugosité moyenne de l'ordre du micron.

- outils diamantés
 - sciage à disque (ou à fil de laiton)
 - perçage avec des forets
 - fraisage
 - générateurs sphériques (grande quantité)
- outils en fonte (bassin, balle, plan) associés à des abrasifs (petite quantité) comme le carbure de bore, le carbure de silicium, le corindon, l'émeri, le grenat (centaine à dizaine de μm)





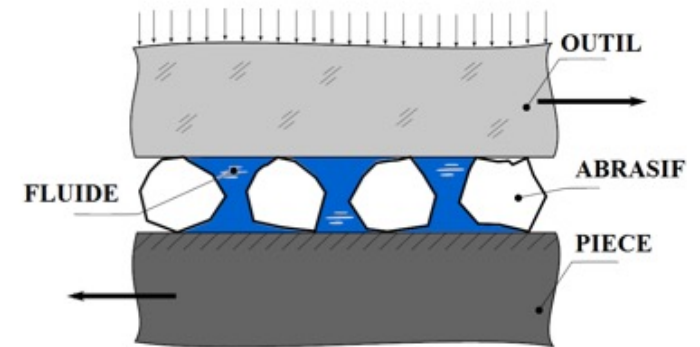
Réplique de la machine à ébaucher
imaginée par Leonard de Vinci



Ebauche d'un verre de lunette en 90 secondes
©Zeiss

Doucissage

Le doucissage consiste à affiner le grain de la surface du verre sans modifier ses rayons de courbure. Pour cela, le verre, solidement maintenu, est amené au contact d'un outil (en aluminium) à surface abrasive dont le rayon de courbure est exactement celui du verre à réaliser. Le doucissage est effectué avec des abrasifs libres (quelques microns), généralement constitués d'alumine Al_2O_3 ou de grenat.



Polissage

Le polissage effectue simultanément la diminution de la rugosité et la mise en forme à la précision demandée.

Le **polissage « rapide »** s'exécute sur un support tournant en aluminium rectifié sur lequel est collé un textile de polissage autocollant, comme il en existe pour la métallographie. Pour que le polissage puisse se faire, il faut un abrasif très fin et de dureté supérieure au verre : l'oxyde de cérium est utilisé de façon courante. Ce type de polissage est employé quand les qualités de surface demandent quelques nanomètres de rugosité et une centaine de nanomètres de régularité. Ce polissage « rapide » est très largement employé pour la lunetterie.

Le **polissage de précision** s'effectue sur un support viscoélastique comme la poix (résine issue de certains résineux), fluctue continuellement dans sa forme au cours du polissage. Elle oblige donc l'opérateur à rectifier continuellement la forme du support par un mouvement adéquat. Cette technique permet d'obtenir des rugosités sub-angström pour les plans et les sphères !

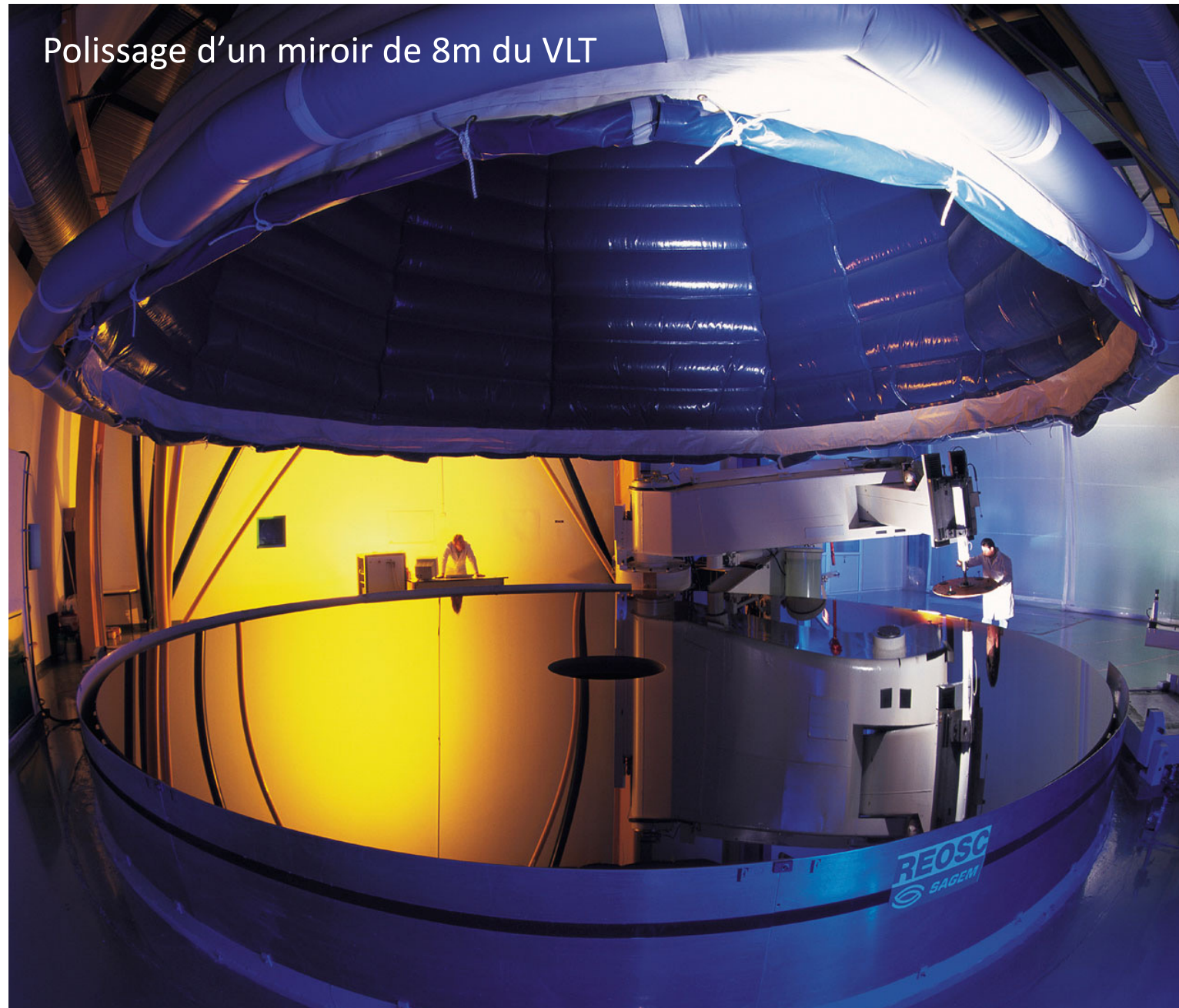
À ces dimensions, les aspects chimiques ne sont plus négligeables devant les aspects mécaniques : on parle de polissage mécano-chimique. Les mécanismes d'enlèvement matière ne sont toujours pas clairement identifiés et restent ambigus.



polissage industrielle
usine Sigma



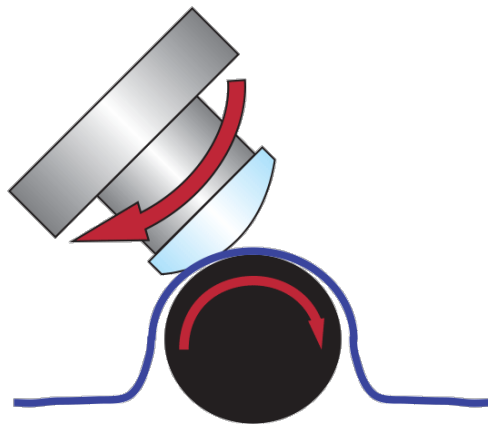
polissage manuel à la poix
atelier d'optique de l'Institut d'Optique



Polissage magnéto-rhéologique (MRF)

Il s'agit d'un procédé qui utilise un fluide de polissage chargé de particules magnétiques de penta-carbonyl de fer. Une machine MRF contrôle 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

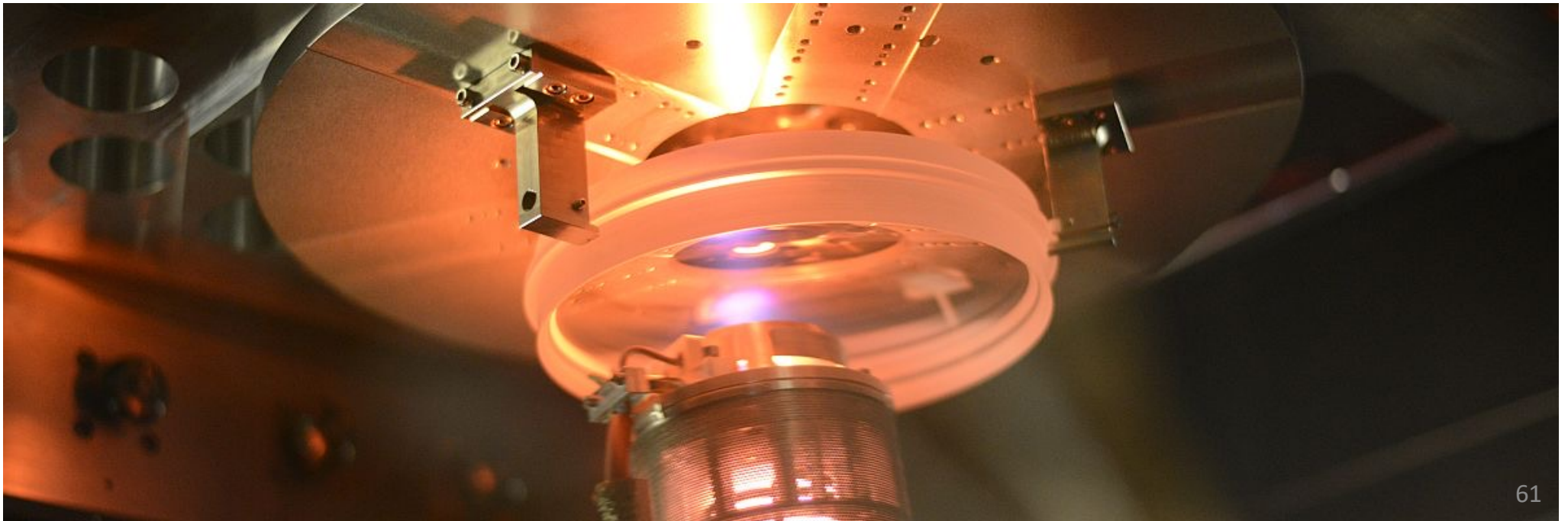
Le polissage MRF permet de corriger avec précision les défauts BF et MF, selon les dimensions de la fonction d'enlèvement matière. Les défauts HF ne peuvent être retouchés par MRF. Il faut donc souvent corriger les défauts HF par une opération de lissage.



Polissage ionique

La finition par usinage ionique (Ion Beam Finishing) est un procédé d'enlèvement matière différent des procédés traditionnels car il n'y a pas de contact outil/pièce. Le verre est bombardée avec un faisceau d'ions 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.

Cette technique très perfectionnée est comme la MRF reproductible et convergente. Mais elle est toutefois limitée par les tailles de faisceaux d'ions atteignables.



PROCEDE	CONVERGENCE	OBJECTIF	PRECISION ~ RMS	
			FORME	RUGOSITE
ébauchage	très bonne	forme	μm	$< 1 \mu\text{m}$
doucissage	bonne	enlèvement des SSD amélioration rugosité	$< \mu\text{m}$	$< 50 \text{ nm}$
polissage	mauvaise	amélioration forme amélioration rugosité	$< 50 \text{ nm}$	$< 10 \text{ nm}$
polissage poix	mauvaise	amélioration forme spécification finale HF	nm	$< \text{nm}$
polissage MRF	excellente	amélioration BF et MF	nm	$< \text{nm}$
usinage ionique	excellente	spécifications finales BF, MF	nm	$< \text{nm}$