

## INTRODUCTION AUX TECHNIQUES DE FABRICATION OPTIQUE

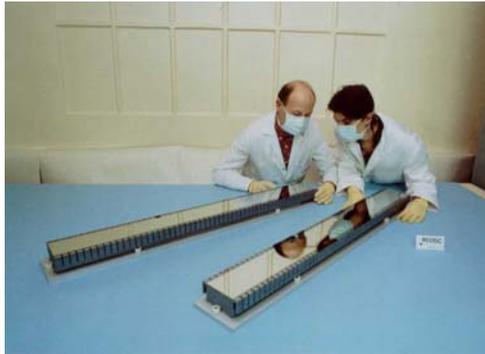
## SOMMAIRE DU COURS

- Le besoin à satisfaire
- Matériaux optiques réfractifs
- Matériaux pour substrats miroir
- Une introduction à la fabrication optique
- Ebauche et usinage des verres d'optique
- Le doucissage
- Procédés d'obtention d'un poli optique
- Maîtrise de la forme au cours du polissage
- Autres procédés de fabrications optique
- Structures allégées pour miroirs
- Le contrôle des surfaces optiques

# TECHNIQUES DE FABRICATION OPTIQUE

## LE BESOIN (1)

Au sol comme dans l'espace, la science et l'observation ont besoin d'éléments 'optiques' pour collecter le flux électromagnétique et produire des images



**Domaine spectral** : X, UV, Vis, IR, IR lointain

Selon la partie du spectre électromagnétique où l'on se situe les surfaces nécessaires devront répondre à des spécifications différentes.

⇒ **L'ingénieur et le scientifique doivent définir, spécifier, suivre la fabrication et savoir contrôler les éléments optiques qui leur sont nécessaires.**

## LE BESOIN (2)

### Qu'est ce qu'une bonne surface optique ?

Les besoins fonctionnels liés à une surface optique sont de 3 natures :

- **Répondre à une définition mathématique**

Plan, sphère, parabole, ...

Basses fréquences spatiales

période =  $\emptyset$  à  $\emptyset / 250$

- **Assurer la réflexion / transmission sans pertes par diffusion**

Rappel : Total Integrated Scattering =  $(4\pi \sigma / \lambda)^2$

Hautes fréquences spatiales

période =  $1\lambda$  à  $250\lambda$

- **Ne pas dégrader le contraste de l'image**

Flux diffusé près de la tâche de diffraction

Moyennes fréquences spatiales

période =  $250\lambda$  à  $\emptyset / 250$

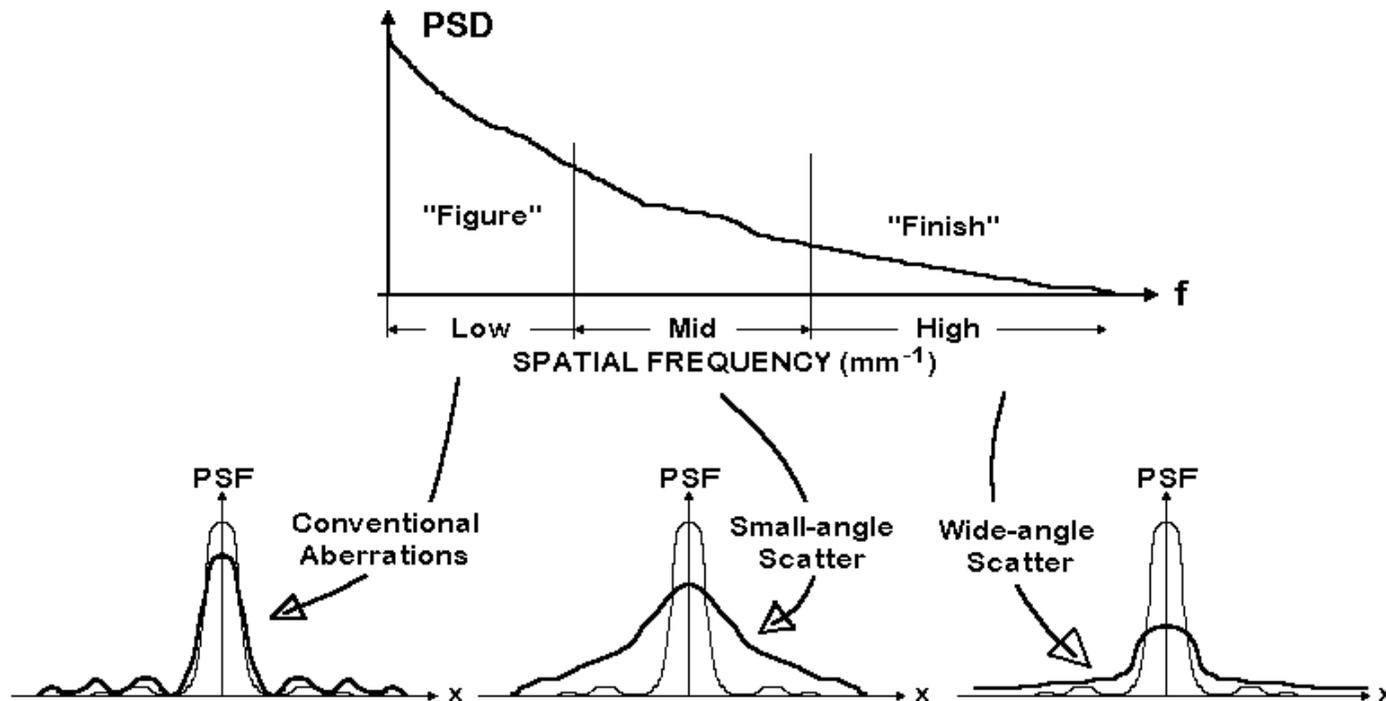


# TECHNIQUES DE FABRICATION OPTIQUE

## LE BESOIN (3)

Le meilleur outil mathématique de spécification d'une surface optique est la Densité Spectrale d'Energie ou **Power Spectral Density (PSD)**

$$\text{PSD}(\mu, \nu) = | \text{TF } f(x, y) |^2$$



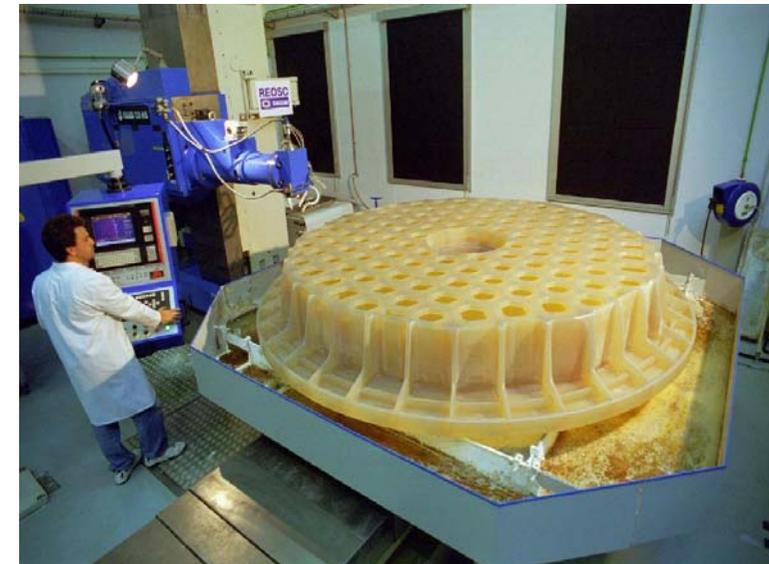
# TECHNIQUES DE FABRICATION OPTIQUE

## LE BESOIN (4)

Qu'est ce qu'un bon substrat de miroir ?

<b>Polissable</b>	Eviter la diffusion
<b>Raide</b>	Maintenir la forme sous perturbations gravité, efforts parasites, ... (qq nm pour plusieurs m)
<b>Résistant</b>	Survivre à l'environnement (lancement)
<b>Léger</b>	Masse = coûts induits (lancement, structure télescope, ...)
<b>Stable</b>	Conserver sa forme dans le temps
<b>Dimension</b>	Flux collecté et/ou résolution
<b>Prix</b>	Rendre la science accessible !

Etc ...



Miroir primaire SOFIA

# TECHNIQUES DE FABRICATION OPTIQUE

## LES MATERIAUX OPTIQUES REFRACTIFS (1)

### Nature des verres

Les verres d'optique sont des mélanges, à l'état amorphe, de divers oxydes.

Silicium, Bore, Sodium, Potassium, ...  $\Rightarrow$  Verres courants

Phosphore, Fluor, Lanthane, Titane, ...  $\Rightarrow$  Verres spéciaux

### Matières plastiques

Composés organiques

### Cristaux

Filière spécialisées

### Propriétés optiques et autres critères de choix

$n$  : Indice de réfraction

Transmission

Dimension

$\nu$  : Constringence

Homogénéité

Prix

$P$  : Rapport de dispersion partielle

Bulles & inclusions

$dn/dT$ , dilatation

Polissabilité, oxydation, ...

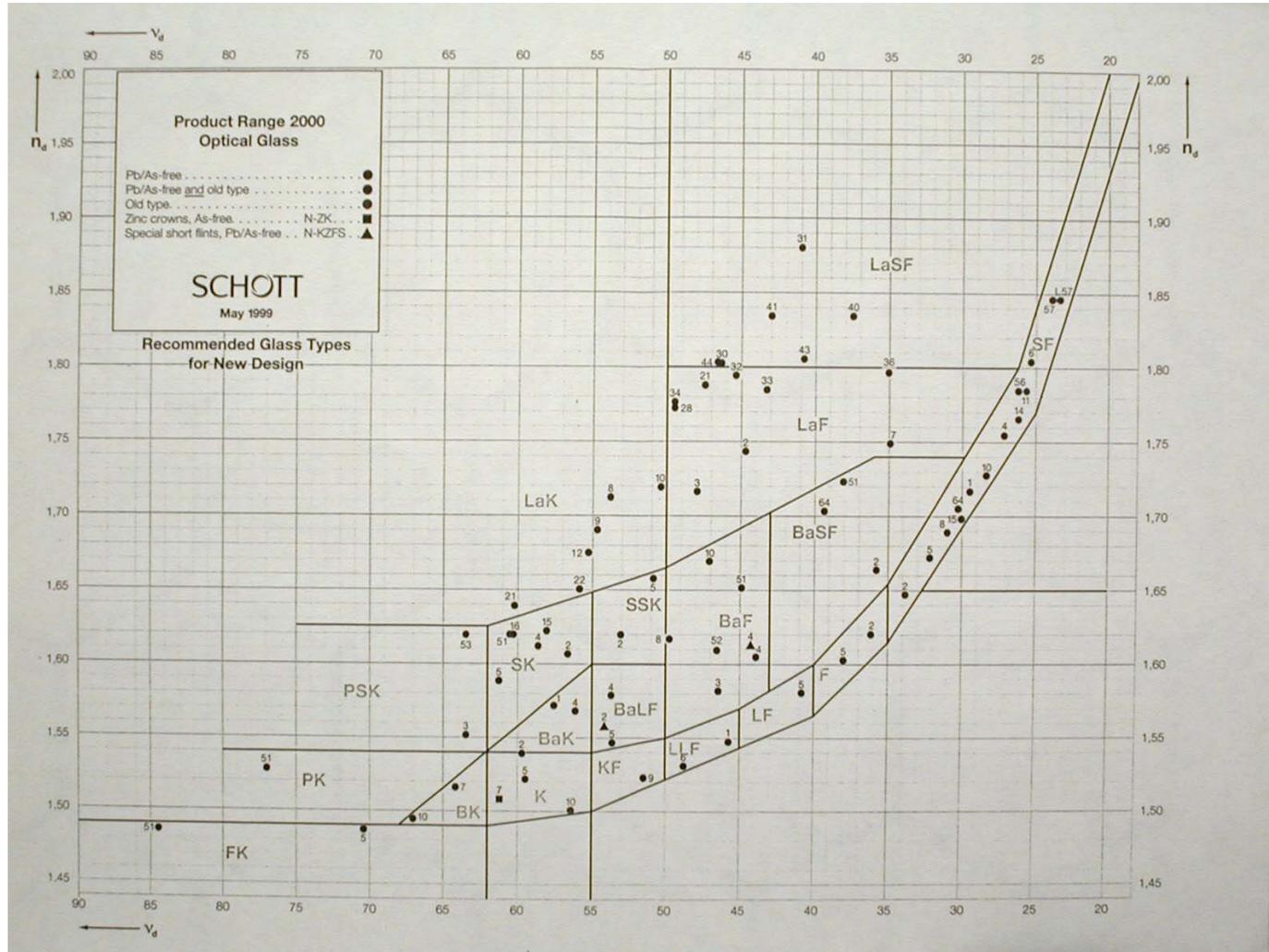


Les verriers réduisent leur carte des verres et travaillent à réduire les éléments polluants (plomb, arsenic, ...) de leur composition.

# TECHNIQUES DE FABRICATION OPTIQUE

## LES MATERIAUX OPTIQUES REFRACTIFS (2)

### Carte des verres Schott



# TECHNIQUES DE FABRICATION OPTIQUE

## LES SUBSTRATS POUR MIROIRS (1)

### D'autres matériaux que les verres sont envisageables :

- Faible  $\alpha$**  : Silice fondue, ULE (Corning), Zerodur (Schott), Sitall (LZOS)
- Métaux** : Aluminium, Béryllium, ...
- Céramiques** : SiC, C/SiC, ...
- Autres** : Silicium, Saphir, ...

### Les critères de comparaisons sont mécaniques :

- Densité  $\rho$  : Masse par unité de volume
- Module d'Young E : Rapport élongation / contrainte)
- Limite  $\mu$  élastique : Contrainte produisant une élongation relative de  $10^{-6}$
- Coeff. dilatation  $\alpha$  : Elongation relative par  $^{\circ}\text{C}$
- Diffusivité D : Propagation de chaleur dans le matériau
- Chaleur spécif. C : Energie nécessaire pour augmenter la  $T^{\circ}$
- Conductivité K : Capacité à transmettre une puissance thermique

# TECHNIQUES DE FABRICATION OPTIQUE

## LES SUBSTRATS POUR MIROIRS (2)

Des facteurs de mérite aident à la sélection du meilleur matériau :

- Raideur spécifique : Flexion d'une pièce sous son poids
- Distorsion thermique du 1er ordre : Déformation sous gradient imposé
- Distorsion thermique : Déformation sous transitoires thermiques
- Changement dimensionnel : Gonflement sous flux thermique

PROPERTIES	Aluminium	Beryllium	SiC CVD	SiC RB	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZERODUR	ULE	Fused Silica	BK7	Silicon
<b>Physical</b>										
Density $\rho$ (Kg m <sup>-3</sup> x10 <sup>3</sup> )	2,73	1,85	3,21	2,92	3,75	2,53	2,2	2,201	2,51	2,33
<b>Mechanical</b>										
Young Modulus E (GPa)	69	303	466	311	390	91	67.6	72.5	83	134
Microyield Stress (MPa)	98	35	N/A	N/A	N/A	10	10	10	10	10
<b>Thermal</b>										
CTE $\alpha$ (10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> )	23,9	11,4	2,4	2,57	7,1	0,02	0,03	0,51	7,1	2,55
Diffusivity D (m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> x 10 <sup>-6</sup> )	65,97	64,3	89,9	80	?	0,8	0,776	0,812	?	72
Specific Heat C (J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	960	1820	700	770	1088	821	766	772	858	720
Conductivity K (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	237	220	202	156	26	1,64	1,31	1,38	1,12	149
<b>FIGURES OF MERIT</b>										
<b>Structural (higher is better)</b>										
Specific stiffness E/ $\rho$	25,3	163,8	145,2	106,5	104,0	36,0	30,7	32,9	33,1	57,5
<b>Thermal (lower is better)</b>										
1st order distorsion $\alpha$ /K	0,101	0,052	0,012	0,016	0,273	0,012	0,023	0,369	6,34	0,017
Thermal distorsion $\alpha$ /D	0,362	0,177	0,027	0,032	?	0,025	0,039	0,628	?	0,035
Dimensionnal change $\alpha\rho$ /K	0,275	0,096	0,038	0,048	1,024	0,031	0,050	0,813	15,912	0,040

# TECHNIQUES DE FABRICATION OPTIQUE

## INTRODUCTION A LA FABRICATION OPTIQUE Les grandes étapes

La réalisation d'un composant optique se décompose en 3 étapes principales :

### L'ébauchage

Partir d'un bloc grossier et générer la forme de base souhaitée

### Le doucissage

Affiner la texture et la forme de la surface par rodage.

Enlèvement de matière par abrasion

### Le polissage

Donner à la surface sa texture finale, petite devant la longueur d'onde

Réduire les irrégularités de forme au niveau souhaité.

Enlèvement de matière par un procédé mécanique et chimique

# TECHNIQUES DE FABRICATION OPTIQUE

## EBAUCHAGE DES PIÈCES OPTIQUES - Le Sciage

La première étape consiste à usiner les blocs bruts pour générer les formes souhaitées.

### Le Sciage

Plusieurs procédés sont utilisables :

Scies à fil + abrasifs

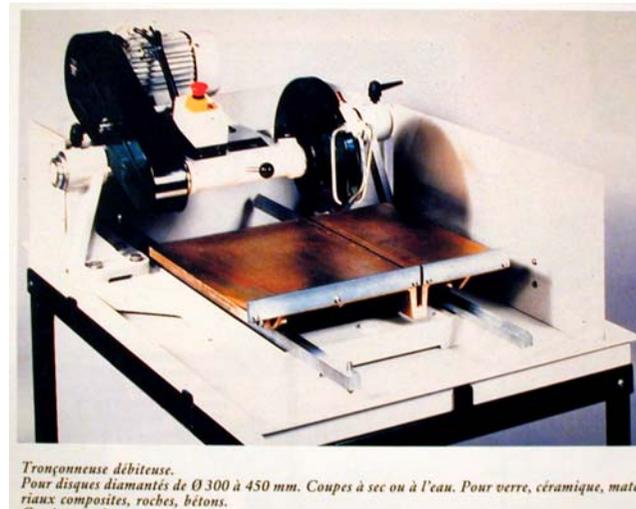
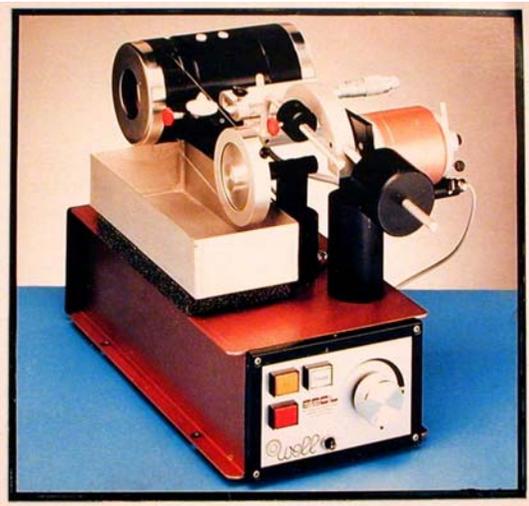
Scie à fil diamanté

Scie à ruban diamanté

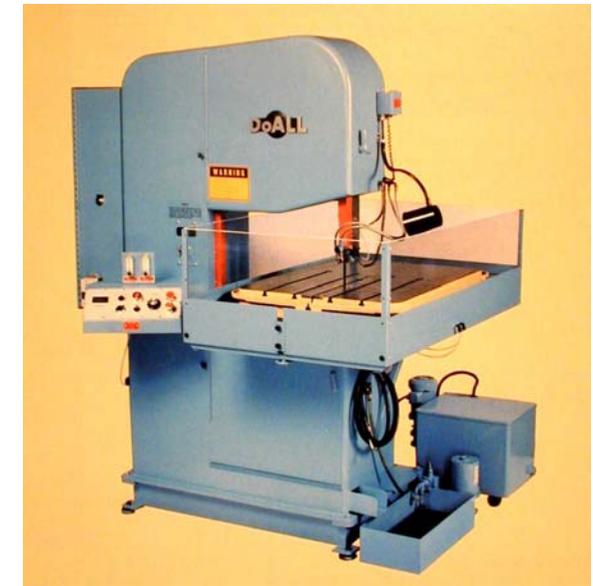
Scie à disque diamanté - tronçonneuse



Diamond edge bands and the proper coolant make it easy to cut this 4 x 6 in. block of fused quartz.



Tronçonneuse débituse.  
Pour disques diamantés de Ø 300 à 450 mm. Coupes à sec ou à l'eau. Pour verre, céramique, matériaux composites, roches, bétons.



# TECHNIQUES DE FABRICATION OPTIQUE

## EBAUCHAGE DES PIECES OPTIQUES : Le Fraisage

### Le Fraisage

Fraiseuse classique mais adaptée à l'usinage des verres et céramiques.

Récupération / filtrage des poudres

Protection des glissières et roulements

Fraises diamantées

SAGEM / REOSC a développé l'**allègement** de miroirs par usinage pour optiques spatiales



Utilisation de plus en plus intensive de commande numériques (CN)

**Attention** : Le verre est fragile - Veiller à fixer avec de purs **efforts en compression**

# TECHNIQUES DE FABRICATION OPTIQUE

## EBAUCHAGE : Perçage, mise en courbe, débordage, ...

### Mise en courbe - Inclinaison de la meule

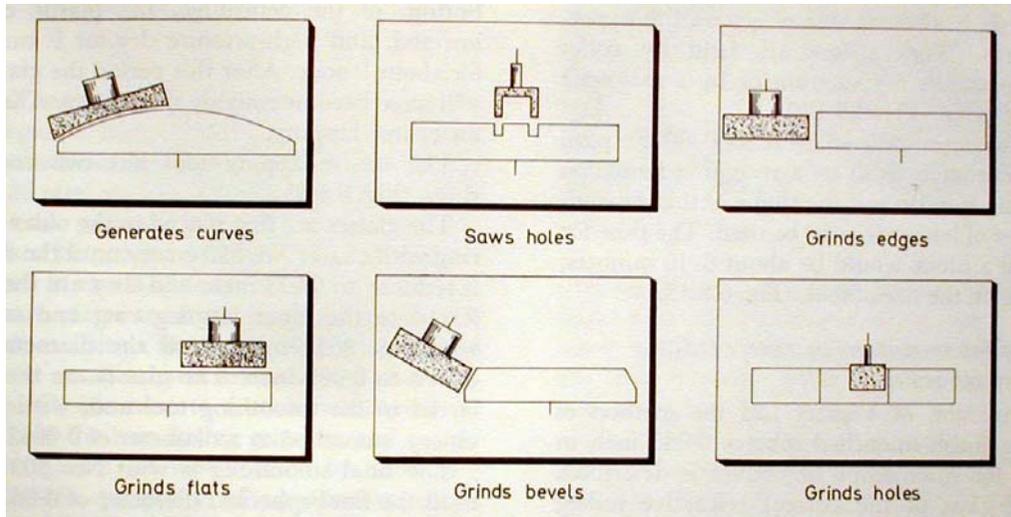
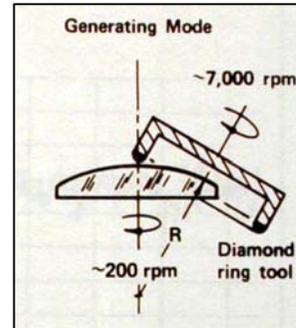
Meule cloche

Inclinaison

Décentrement

Rotation de la pièce

} génère une sphère



# TECHNIQUES DE FABRICATION OPTIQUE

## LE RODAGE - LE DOUCISSAGE

Le **rodage** consiste à **frotter** la surface d'une pièce contre la surface d'un **outil**, d'étendue comparable, en interposant des **grains abrasifs**, plus **durs** que la pièce.

Les grains abrasifs sont de dimension significative : 200  $\mu\text{m}$  à 5  $\mu\text{m}$ .

Leurs arêtes vives créent des **micro cassures** de surface produisant l'enlèvement de matière recherché.

Les points en saillie subissent une plus forte pression et s'usent plus vite.

Il y a donc un automatique **nivellement des irrégularités**.

La nature **aléatoire** des trajectoires de frottements relatifs fait converger la surface de la pièce, et de l'outil, vers la **sphère**, invariante par translation sur elle-même.

La texture s'affine par **diminution progressive de la taille des grains** abrasifs.

En dessous de 5  $\mu\text{m}$  le phénomène devient moins stable. Il faut changer de méthode et passer au polissage.

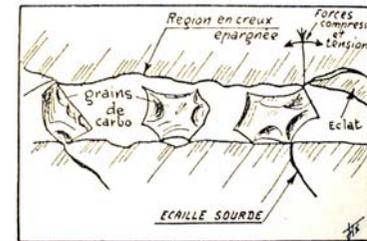


Fig. 13. — Mécanisme de l'abrasion (J. Strong).

# TECHNIQUES DE FABRICATION OPTIQUE

## LES POUDRES ABRASIVES

<u>Dureté Mohs</u>		<u>Grain moyen - Grade SiC</u>		<u>Abrasifs courants</u>	
0	Eau distillée				
1	Talc	42 µm	280	Carbure de Silicium	SiC
2	Gypse	36 µm	320	Carbure de Bore	B <sub>4</sub> C
3	Calcaire	25 µm	400	Alumine ou Corindon	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
4	Fluorine	20 µm	500	Oxyde de fer (rouge)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
5	Apatite	16 µm	600	Oxyde de cérium	CeO <sub>2</sub>
6	Orthose	12 µm	800	Oxyde de Zirconium	ZrO <sub>2</sub>
7	Quartz	10 µm	1000	Diamant	C <sub>4</sub>
8	Topaze	9 µm	1600		
9	Corindon				
10	Diamant				

# TECHNIQUES DE FABRICATION OPTIQUE

## ABRASIFS LIBRES - ABRASIFS LIES

### Abrasifs libres :

Les grains d'abrasifs sont simplement insérés entre pièce et outil lors du travail.

- Maintien de la concentration
- Micro fissures peu profondes
- Pas de direction privilégiée

Plus artisanal mais travail de qualité.

**Attention** à la distribution des granulométrie.

Quelques gros grains perdus dans un grain fin réduisent à néant les efforts déployés.

**Optique = Propreté + soin + rigueur**

### Abrasifs liés :

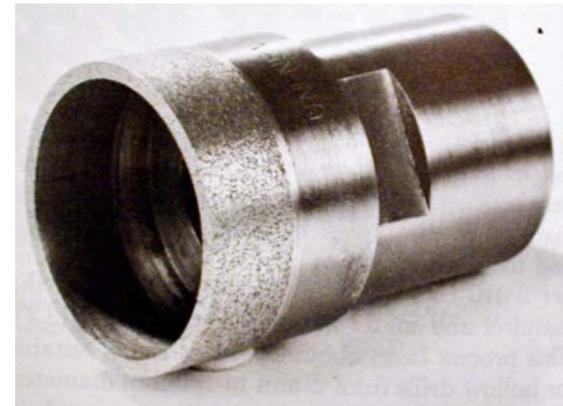
Les grains abrasifs sont liés à l'outil

- Métal imprégné d'abrasif
- Grains fixés en surface par brasure
- Papiers abrasifs, ...

Micro fissures plus profondes

Stries et traces d'outil

Mieux adapté à la production



# TECHNIQUES DE FABRICATION OPTIQUE

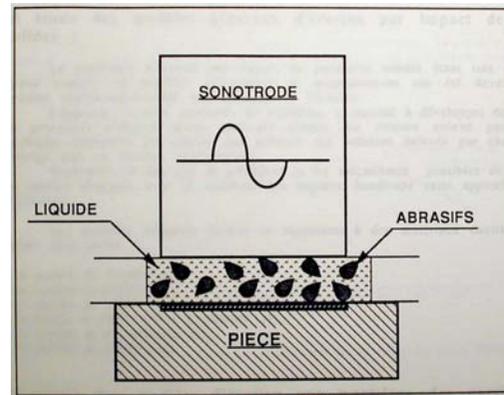
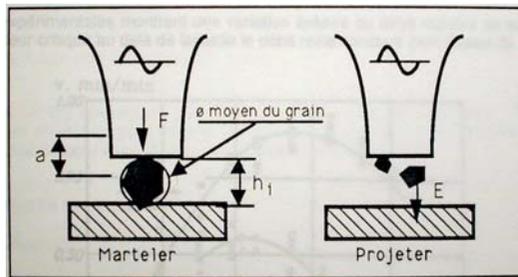
## USINAGE PAR ULTRA-SONS

### Principe :

Une **sonotrode** est activée par un courant accordé sur les fréquences ultra sonores (10-40 kHz) pouvant apparaître dans le fluide chargé de grains abrasifs.

Deux modes d'actions cohabitent :

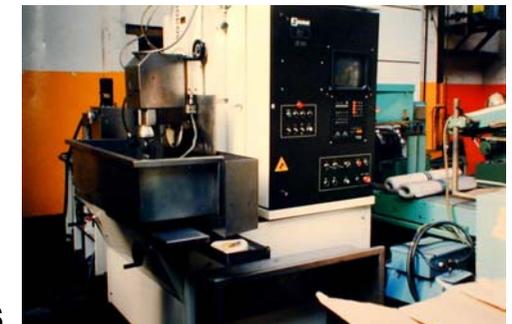
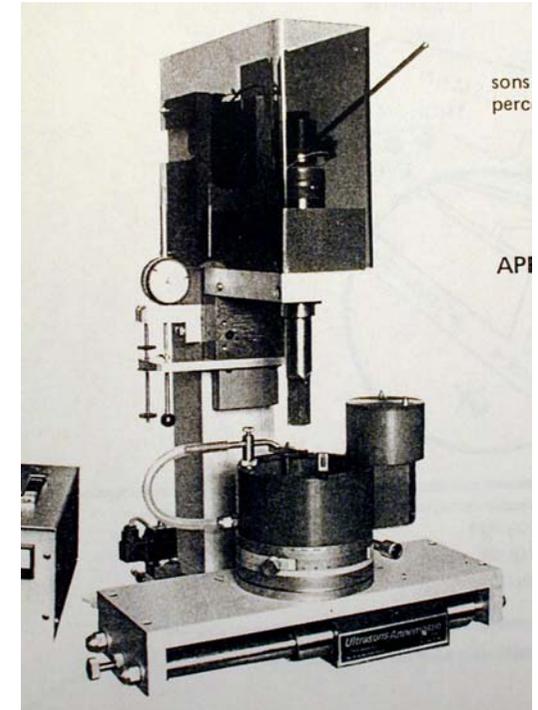
Le martelage  
La projection



### Applications :

Percages, empreintes de formes complexes, miroirs allégés, ...

Poste d'usinage US



Prototypé de machine CN - US

# TECHNIQUES DE FABRICATION OPTIQUE

## LES DEFATS SOUS LA SURFACE

En optique de précision, les défauts sous la surface sont difficiles à faire disparaître et ont des conséquences parfois très importantes sur les performances recherchées :

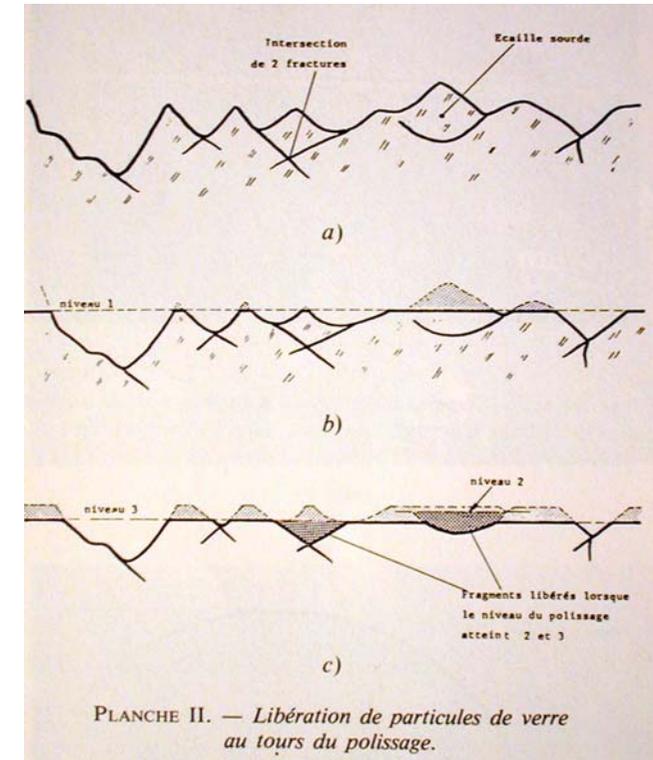
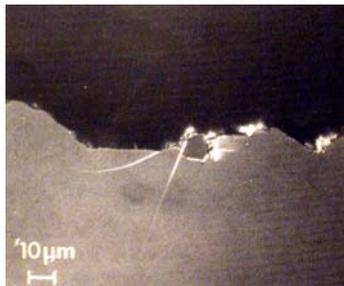
Tensions résiduelles de surface

Incrustation de contaminants

Diffusion lumineuse

Réapparition lors du travail avec un grain plus fin  
ou lors du polissage

Baisse de tenue aux flux laser intenses



⇒ Il faut bien s'assurer que chaque étape de doucissage a bien fait disparaître tous les défauts sous la surface engendrés par les plus gros grains de l'étape précédente.

# TECHNIQUES DE FABRICATION OPTIQUE

## THEORIE DU POLISSAGE

Le **polissage** fait appel aux mêmes considérations statistiques que le doucissage mais :

- les grains abrasifs sont microscopiques : environ  $0.5 \mu\text{m}$  ( $0.05$  à  $1.5 \mu\text{m}$ )
- l'outil, le polissoir, est recouvert de **poix** :
  - capable de mouler, à la longue, la forme de la pièce : elle **flue**
  - **temporairement rigide** pendant le temps d'une course d'outil
  - dans laquelle les grains abrasifs s'**incrudent**

L'usure de la pièce est alors obtenue par un complexe mélange de :

- **abrasion** similaire au rodage
- **fluage** ou étalement des aspérités de verre
- **action physico-chimique** (dureté abrasif, type d'oxyde, PH et nature du milieu suspenseur, concentration, nature de l'outil, ...)

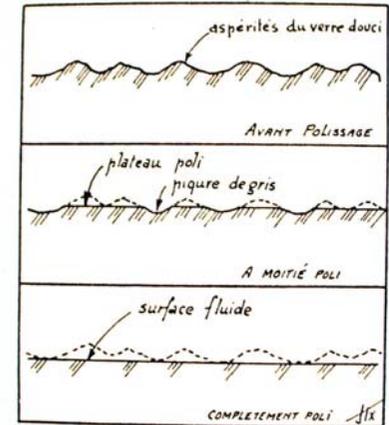


Fig. 14. — Illustration de la théorie de Lord Rayleigh.



**Loi de Preston** : Vitesse d'usure =  $k * \text{Pression} * \text{Vitesse}$

# TECHNIQUES DE FABRICATION OPTIQUE

## POLISSAGE TRADITIONNEL

**But :**

Reproduire un mouvement le plus aléatoire possible pour tendre rapidement vers la sphère

**Solution :**

Utilisation de machines à 1 ou 2 excentriques avec :

- vitesses variables
- excentrique variables
- pression variable

Il subsiste néanmoins une grande part de savoir-faire nécessaire au technicien pour faire un travail de précision.

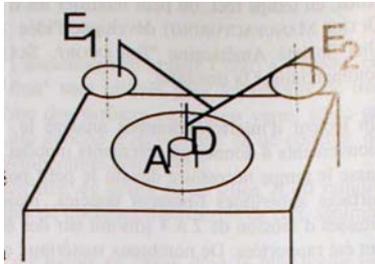


Figure 2-10  
Machine à double excentrique

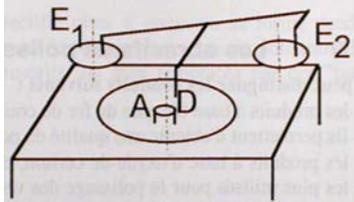


Figure 2-11  
Machine à double excentrique

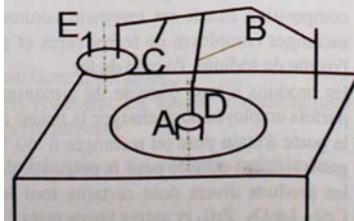


Figure 2-12  
Machine à simple excentrique



# TECHNIQUES DE FABRICATION OPTIQUE

## POLISSAGE PLANETAIRE

### Principe :

Un grand polissoir tourne autour de son axe central . Les pièces sont disposées dans des satellites qui tournent autour de leur axe propre

=> Le frottement relatif pièce - polissoir équivaut à une translation pure.

### Avantage :

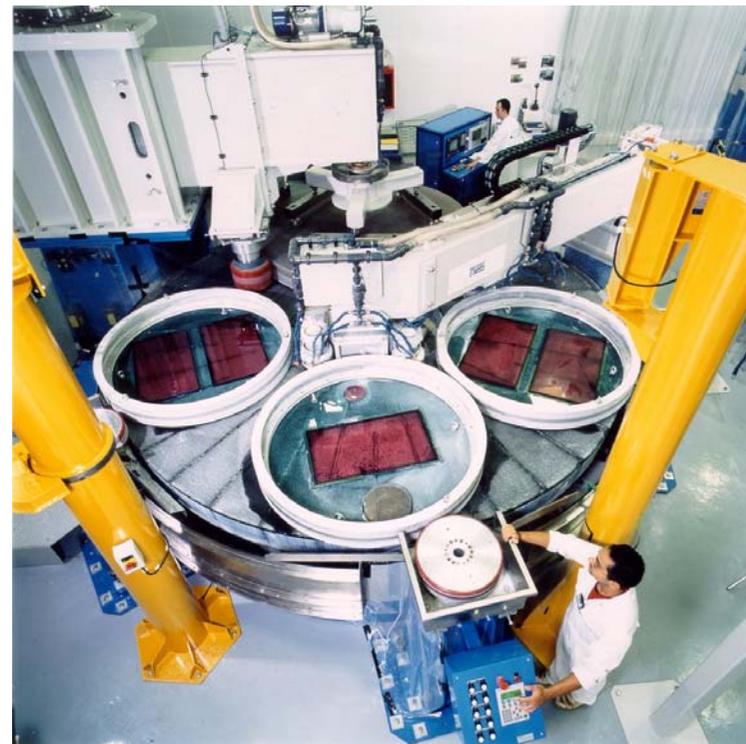
Usure uniforme pour tout contour des pièces

Idéal pour les pièces planes de contour quelconque

- glaces de photocopieurs,
- lames ampli Mégajoule,
- optiques planes de série, ...



Version **double face** pour polir les deux faces optiques en une seule opération. (Ex : wafer en  $\mu$ electronique)



Machine planétaire LMJ - LIL

# TECHNIQUES DE FABRICATION OPTIQUE

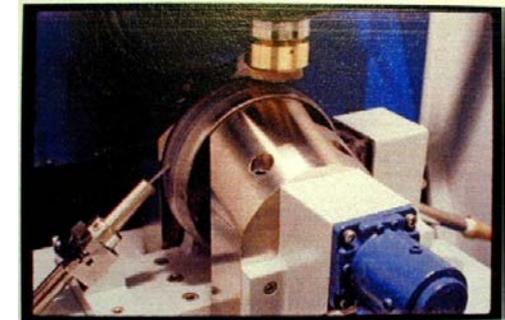
## FINITION DE FORME PAR POLISSAGE NUMERIQUE



Polissage sur CN ou robotisé



Usinage par faisceau d'ions



Magnétorhéologie

# TECHNIQUES DE FABRICATION OPTIQUE

## POLISSAGE ASSISTE PAR ORDINATEUR

SAGEM / REOSC a développé sa technologie de polissage robotisé assisté par ordinateur.

### Un procédé rigoureux :

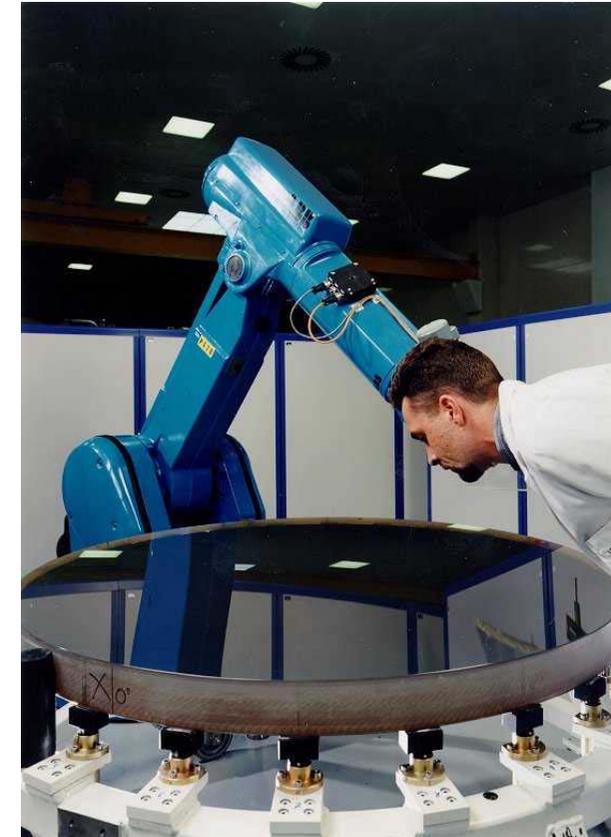
- Mesure
- Création d'une carte des défauts
- Calcul des trajectoires
- Simulation - Optimisation
- Exécution sous contrôle numérique

### Efficacité - Flexibilité :

- Convergence déterministe
- Contour de pièce quelconque
- Profil asphérique quelconque
- Qualité de poli type laser



Poste de micro-PAO



Robot de PAO

Une variante de micro Polissage Assisté par Ordinateur est adaptée aux pièces de petites dimensions.

# TECHNIQUES DE FABRICATION OPTIQUE

## POLISSAGE PAR FAISCEAU D'IONS

### Principe :

Un faisceau d'ions (Argon) vient frapper la surface optique à usiner et arrache de la matière.

### Avantages :

Enlèvement de matière sans contact.

- Pas d'effet de bord
- Pas de capitonnage pour les substrats allégés

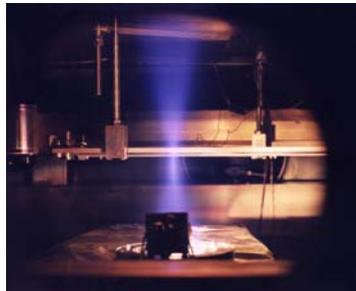
Très haute précision

**Inconvénient :** sous vide

SAGEM est équipé en grande dimension jusqu'à 2.5-m

### Tous matériaux :

Verres, SiC, Nickel, ...



Usinage ionique à StP du Perray - Capacité 1.6-m

# TECHNIQUES DE FABRICATION OPTIQUE

## POLISSAGE MAGNETO RHEOLOGIQUE

### Principe :

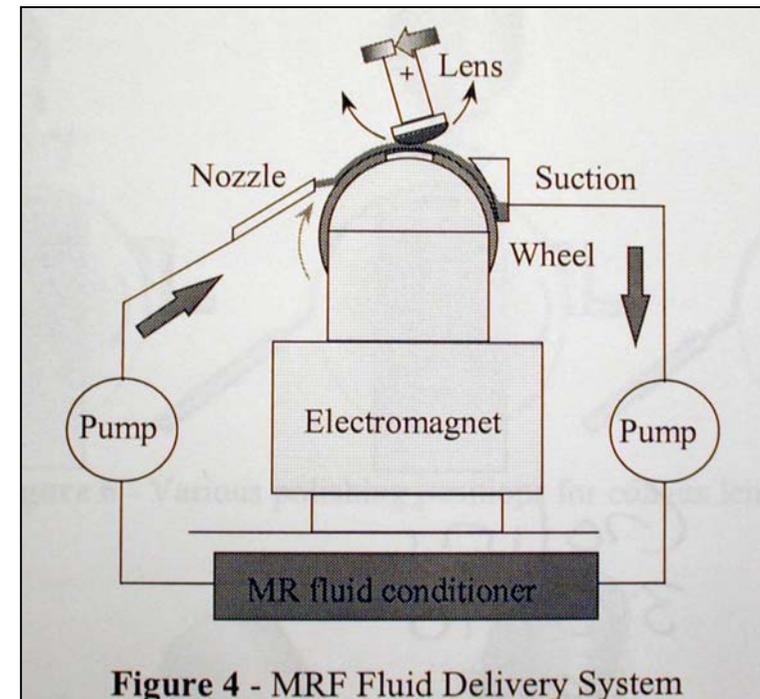
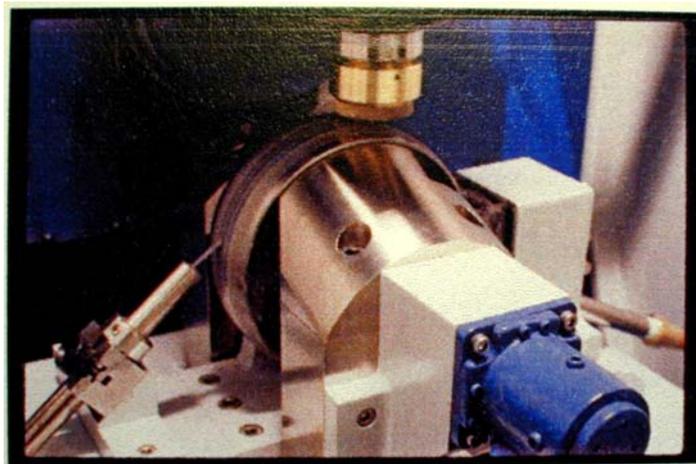
Un fluide, changeant de viscosité selon le champ magnétique auquel il est soumis, est chargé avec des grains abrasifs.

La « dureté » de l'outil dépend de l'intensité du champ magnétique

L'efficacité de l'outil dépend de la concentration

Zone d'attaque ajustée par enfoncement dans le fluide

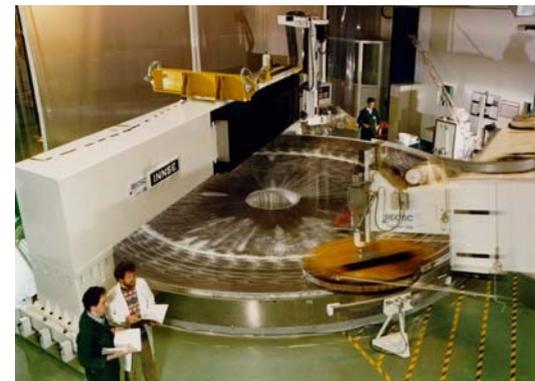
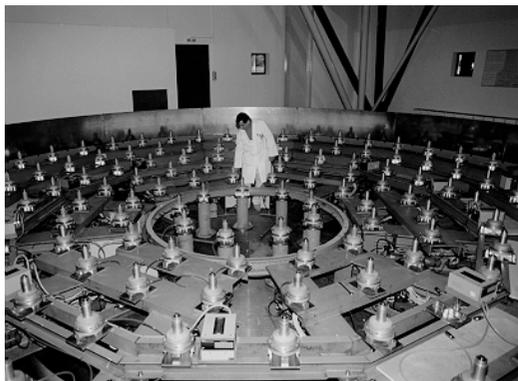
Pilotage sous CN pour polissage automatique



# TECHNIQUES DE FABRICATION OPTIQUE

## ATELIER GRANDS MIROIRS SAGEM / REOSC

Pour manipuler, usiner, polir et tester les miroirs géants des projets VLT et Gemini, SAGEM a mis en place un atelier unique au monde



# TECHNIQUES DE FABRICATION OPTIQUE

## USINAGE DIAMANT

**Principe** : Un tour de précision usine des surfaces de révolution avec une pointe diamant.

Un état de surface acceptable est obtenu pour les matériaux ductiles (Al, Cu, Ge, ...)

Applications : production rapide et économique de

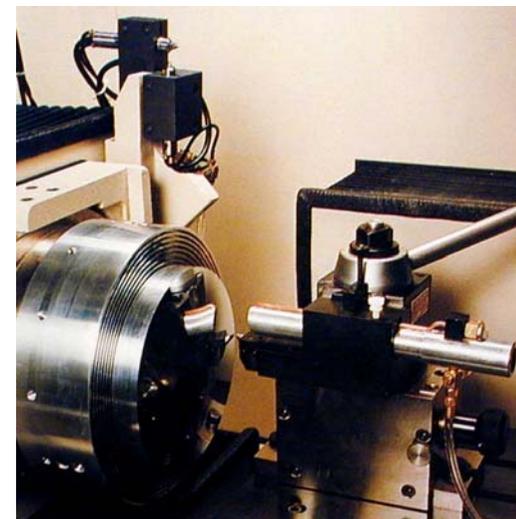
Optiques IR

Asphériques

Miroirs et nanomécaniques

Asphéro-diffractifs

Cristaux KDP LMJ, ...



Usinage des KDP LMJ en Fly Cutting



Asphéro diffractifs



Opto-mécanique fine

# TECHNIQUES DE FABRICATION OPTIQUE

## AUTRES METHODES DE FABRICATION

### LE MOULAGE :

La forme optique est directement obtenue par moulage du composant.

Beaucoup de progrès réalisés en dimension et qualité de forme.

Pour les grandes séries.

Optiques plastiques :

PMMA et autres

jusqu 'à 15 cm environ

Optiques verre :

jusqu 'à 5-10 mm de diamètre.

Lecteurs CD, ...

### LA REPLICATION :

Réalisation d 'une ébauche de la pièce proche de la forme finale.

Utilisation d 'un « master » négatif de la pièce à réaliser.

Interposition d 'une résine qui, en polymérisant, produit la surface optique souhaitée.

Application miroirs : facile

Application lentilles : correspondance entre l 'indice du verre et de la résine. (Photo)

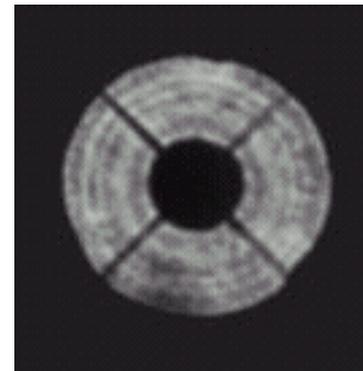
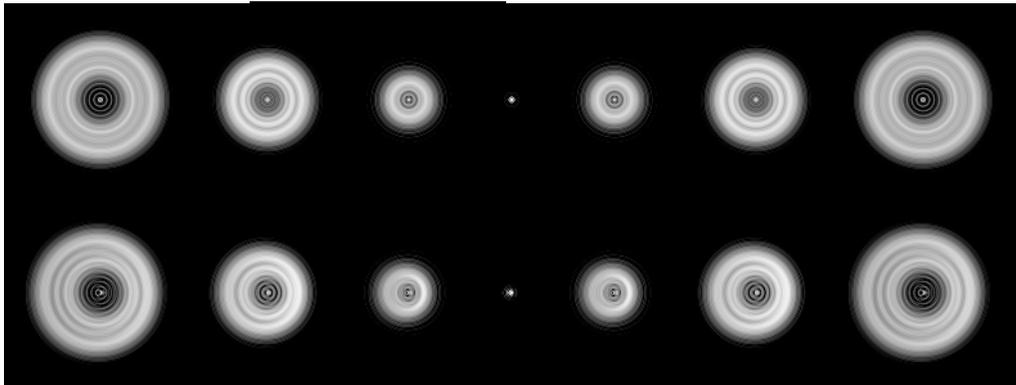
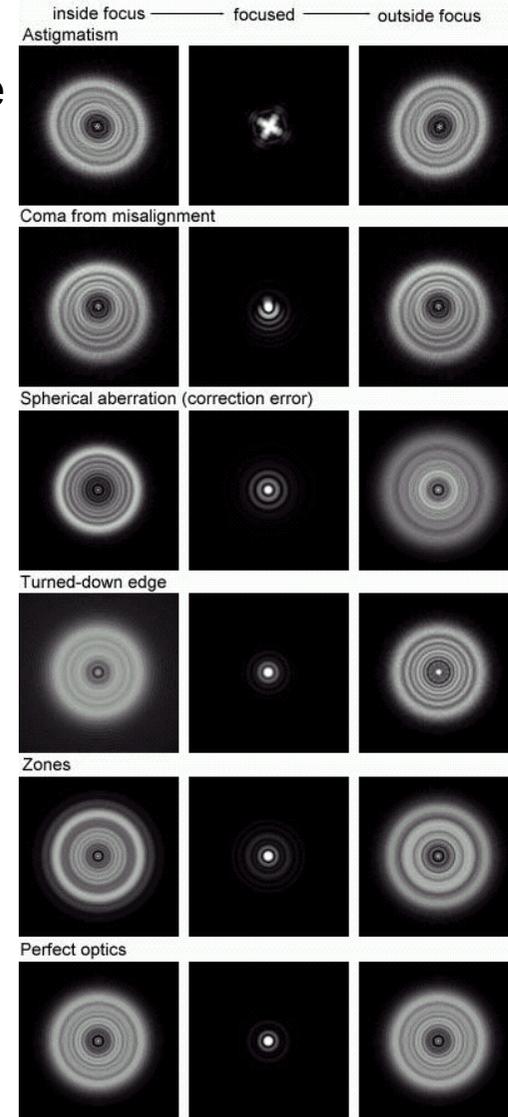
# TECHNIQUES DE FABRICATION OPTIQUE

## CONTRÔLE OPTIQUE : The Star Test

Le « **Star Test** » consiste simplement à observer l'image d'une étoile et à en déduire des informations qualitatives sur les aberrations résiduelles ou les défauts d'alignement de l'optique.

Forte sensibilité sur les images **intra** et **extra focales**

De petites courbures locales de la surface d'onde se traduisent par des variations d'éclairement dans l'image extra ou intra-focale qui donnent des renseignements et permettent de localiser certains défauts.



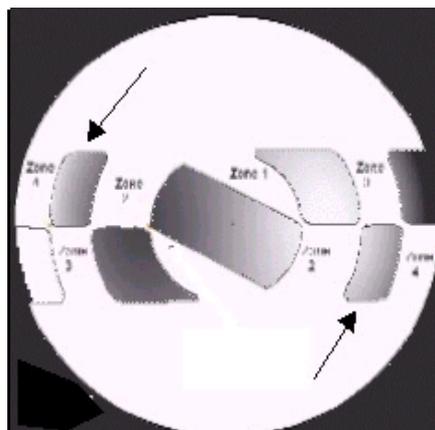
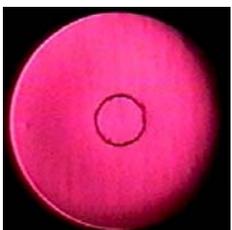
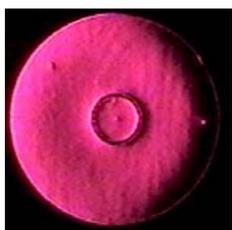
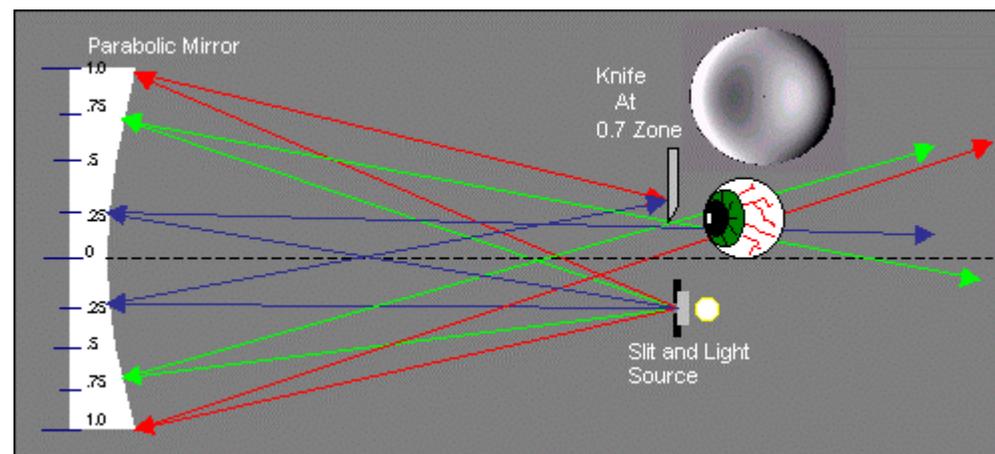
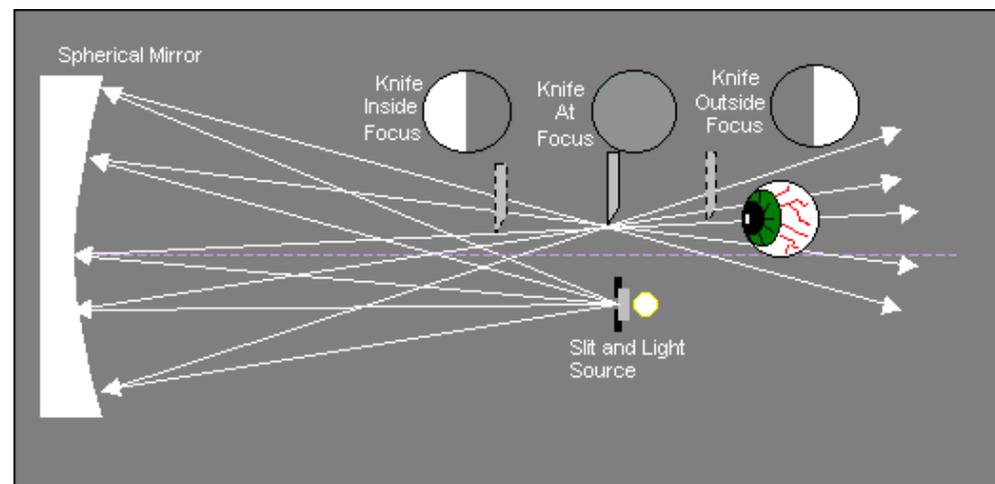
# TECHNIQUES DE FABRICATION OPTIQUE

## CONTRÔLE OPTIQUE : Test de Foucault

Un couteau est placé au niveau de l'image et coupe le faisceau.

L'examen de la pupille avec ce faisceau tronqué fait apparaître des ombres qui nous renseignent sur les aberrations présentes.

Mesures quantitatives possibles avec un écran dans la pupille et mesure de la position axiale du couteau.



Ecran de Couder

# TECHNIQUES DE FABRICATION OPTIQUE

## CONTRÔLE OPTIQUE : Test de Hartmann

### Idée :

Retrouver le cheminement de rayons lumineux

### Méthode :

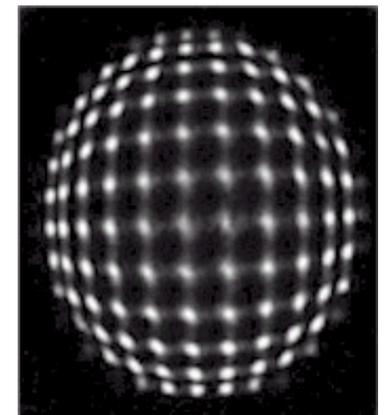
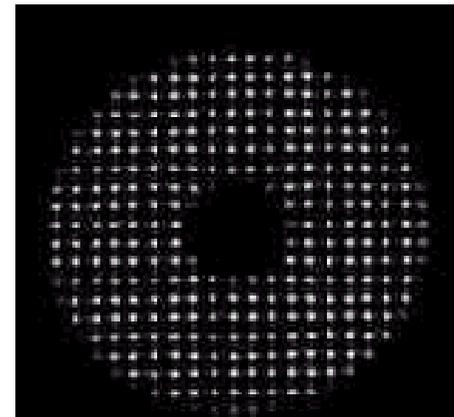
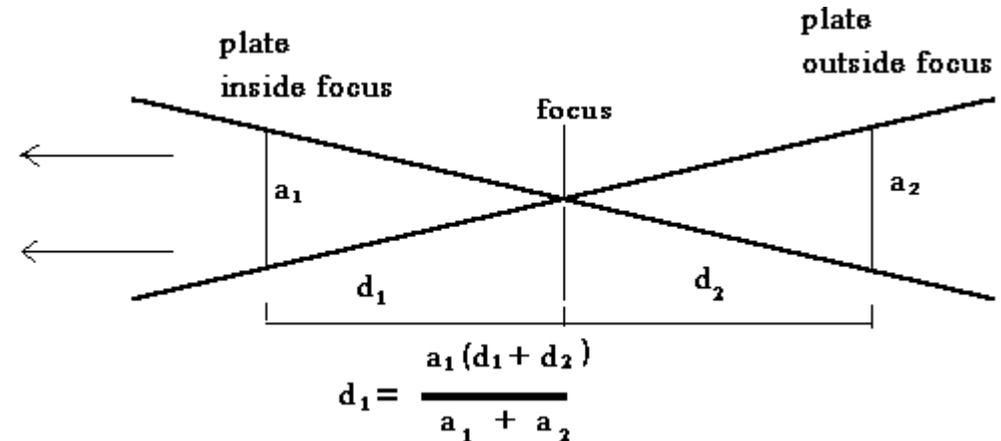
Placer un écran percé de trous dans la pupille

Eclairer avec une source ponctuelle

Prendre deux clichés dans 2 plans différents au niveau de l'image.

Mesurer les positions des taches image

Calculer les erreurs du front d'onde à partir :  
de la configuration source - image - optique  
des positions des taches



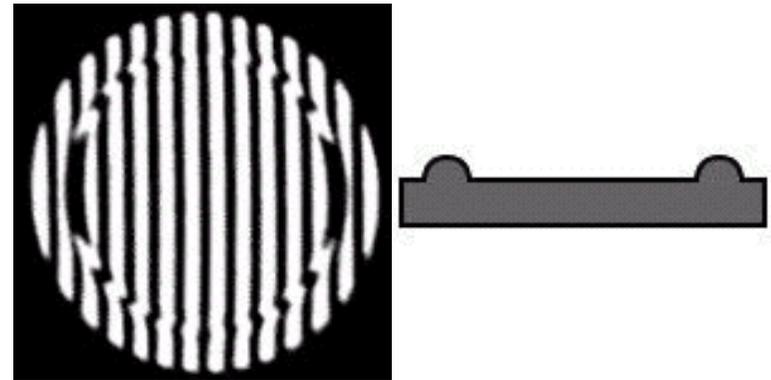
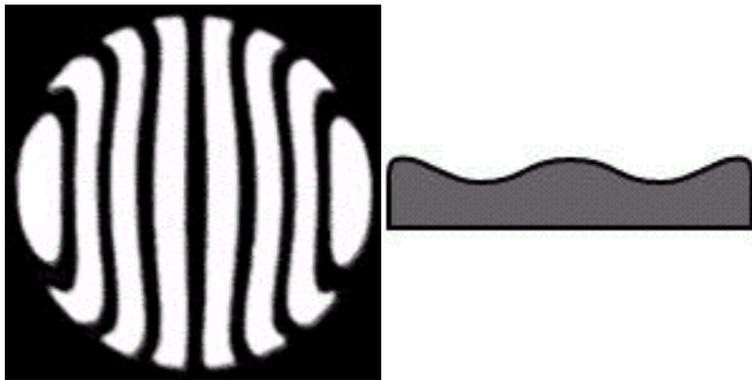
# TECHNIQUES DE FABRICATION OPTIQUE

## CONTRÔLE OPTIQUE : Test de Ronchi

**Idée :**

Placer une grille au niveau de l'image

Observer plus loin les déformations des lignes causées par les aberrations optiques



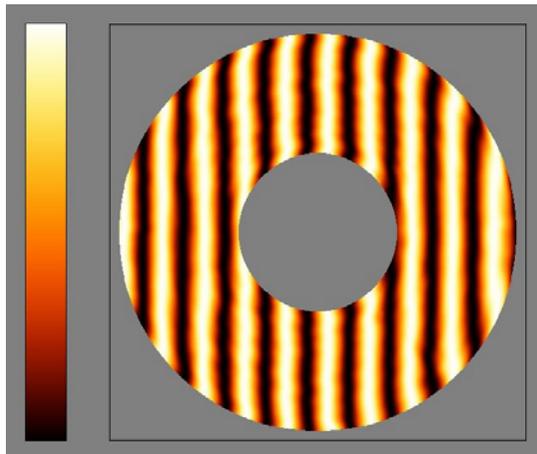
# TECHNIQUES DE FABRICATION OPTIQUE

## CONTRÔLE DES SURFACES OPTIQUES : Méthodes modernes

**But :** Etablir une cartographie complète de la surface

Couvrir le spectre complet des fréquences spatiales nécessaires (PSD)

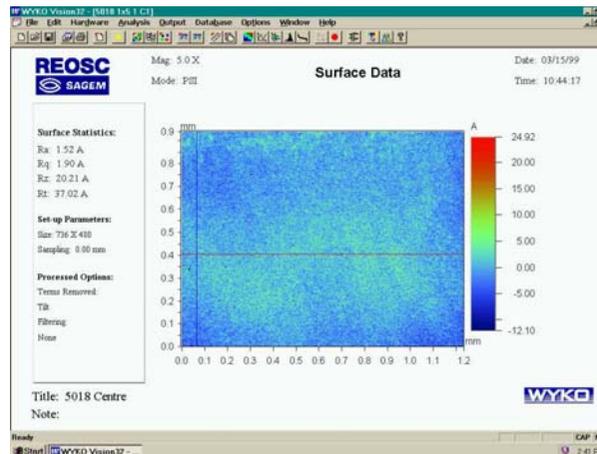
■ **BF :** de  $\varnothing$  à 0.5 mm



**Interférométrie visible**



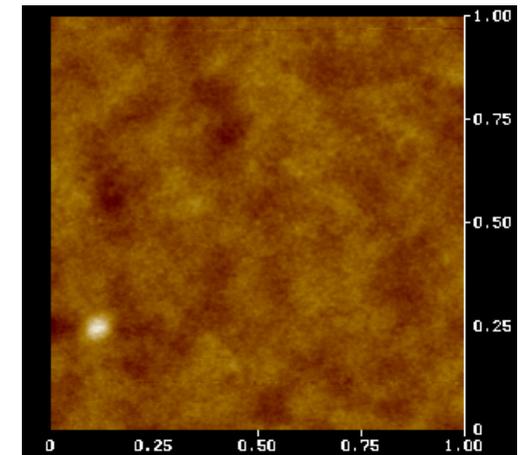
■ **MF :** de 1mm à 2  $\mu$ m



**Micro-interférométrie**



■ **HF :** de 5  $\mu$ m à 10 nm

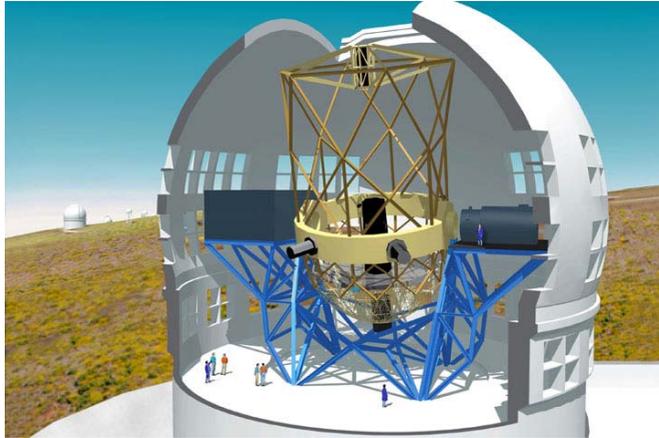


**AFM**

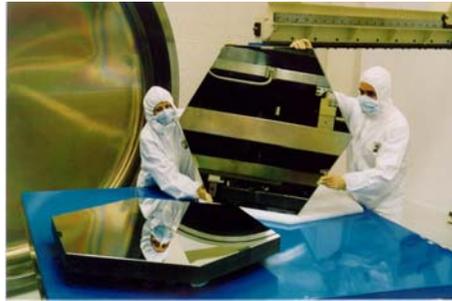


# TECHNIQUES DE FABRICATION OPTIQUE

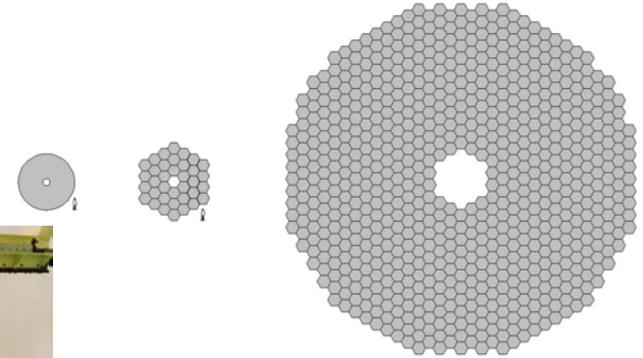
## APRES LE VLT : GTC ET LES MIROIRS SEGMENTES



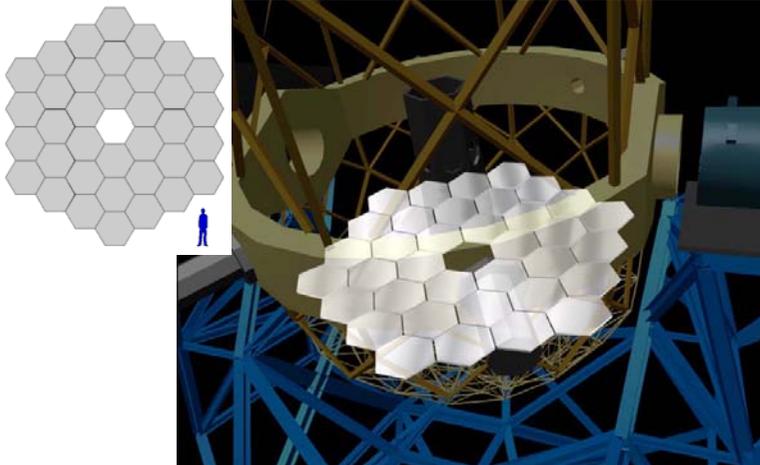
Le Gran Telescopio Canarias



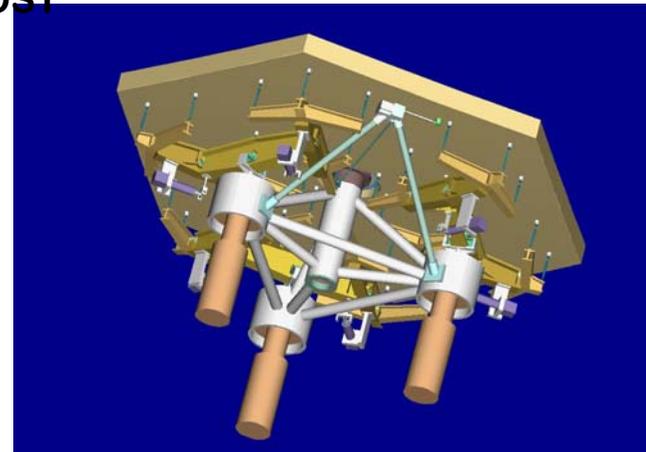
Segments proto  
LAMOST



Vers les Extremely Large  
Telescopes



36 segments de 1.8-m



Support actif de chaque segment

# TECHNIQUES DE FABRICATION OPTIQUE

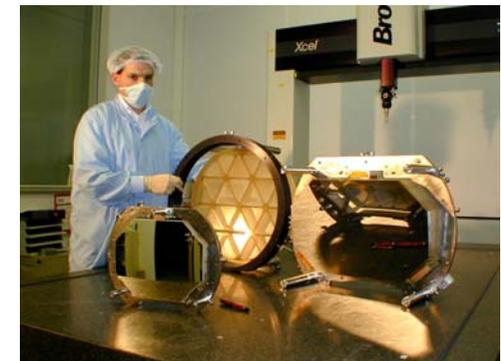
## QUELQUES REALISATIONS SAGEM - REOSC



Miroir Primaire THEMIS



Sphero-paraboliques OCM



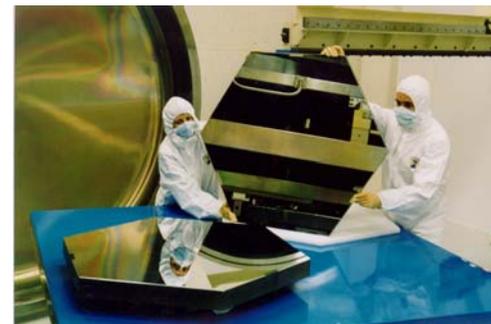
3 miroirs P5-Cartosat



Miroir Primaire ISO



Lentille carrée LIL



Segments proto LAMOST



Miroir RocSat en SiC