

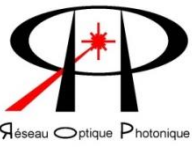
Mesure de forme et de rugosité des surfaces optiques

J. Floriot, M. Thomasset, M. Roulliay

Laboratoire d'Astrophysique de Marseille
Synchrotron Soleil
Laboratoire Charles Fabry

Sommaire

- ✓ **Les paramètres d'intérêts des surfaces optiques et domaines des fréquences spatiales**
- ✓ **Techniques interférométriques:**
 - Rappel de quelques fondamentaux
 - Interférométrie de Fizeau
 - Phase-shifting
- ✓ **Quelques techniques non-interférométriques pour la mesure de forme**
- ✓ **Mesure de la rugosité**
- ✓ **Présentation du ROP Intercomparaison (Muriel)**
- ✓ **Résultats obtenus sur quelques miroirs (Marc)**



Paramètres d'intérêt pour la caractérisation/spécification des surfaces optiques

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \alpha_1 r^2 + \alpha_2 r^4 + \alpha_3 r^6 + \alpha_4 r^8 + \alpha_5 r^{10} + \alpha_6 r^{12}$$

Forme idéale du miroir
(conique, termes d'asphéricité,
polynômes de Zernike)

Forme réelle du miroir

Courbure

Domaine des basses
fréquences spatiales

Erreur/défaut de forme

Topographie

Domaine des moyennes
fréquences spatiales

Défauts locaux:
cosmétique;
scratch-dig

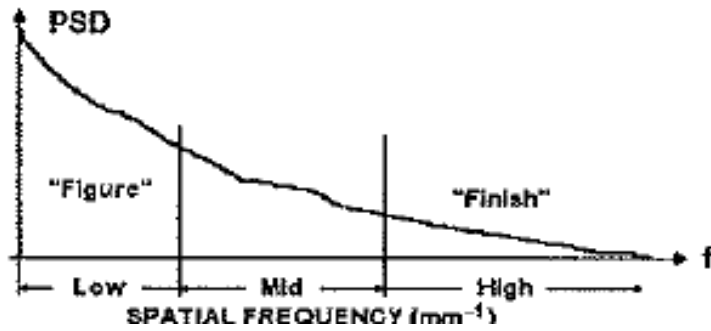
Rugosités

Domaine des hautes
fréquences spatiales

Densité spectrale de puissance (PSD) et domaines de fréquences spatiales

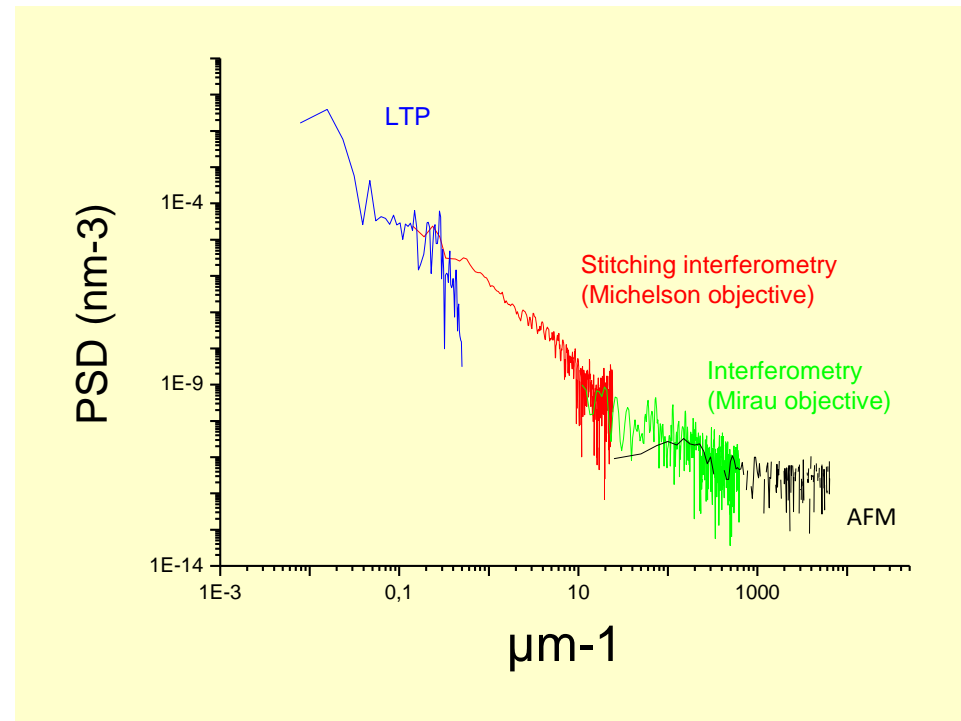
Formules mathématiques: $PSD(u, v) = \frac{1}{A} |\tilde{H}(u, v)|^2$

$$\tilde{H}(u, v) = \int_{-b/2}^{b/2} \int_{-a/2}^{a/2} h(x, y) e^{-2\pi j(ux+vy)} dx dy,$$



Domaines fréquentiels:

- ✓ Dépendent de l'application
- ✓ Les limites entre les domaines sont floues.
- ✓ Différentes techniques pour chaque domaine



	Périodicité	Polynômes de Zernike	Type de mesure
Basses fréquences spatiales	De 1 à 10 cycles/pupille	3 ^{ème} ordre (11 premiers termes)	Erreur de forme
Moyennes fréquences spatiales	De 10 à 100 cycles/pupille	36 premiers termes	Erreur de forme
Hautes fréquences spatiales	> 100 cycles/pupille	Au-delà du 36 ^{ème} terme	Rugosité (mesure locale) Défauts locaux

Les différentes techniques de mesure en fonction du domaine fréquentiel considéré

	Mesure de la forme	Mesure de la topographie	Mesure de la rugosité	Type de mesure	Type de résultat
LTP (Long Trace Profiler)	X	X	-	Pentes locales par déflectométrie	Profils 1D
Interférométries: Fizeau, Twyman-Green, à décalage latéral	X	X	-	Altitudes locales	Carte 2D
Shack-Hartmann	X	X	-	Front d'onde	Cartes 2D
Interférométrie en lumière blanche	-	-	X	Altitudes locales, défauts locaux	Carte 2D, profils
AFM (microscope à force atomique)	-	-	X	Altitudes locales, défauts locaux	Carte 2D, profils
Autres microscopies	-	-	X	Altitudes locales, défauts locaux	Carte 2D, profils

Interférométrie à 2 ondes: fondamentaux

2 champs électromagnétiques polarisés suivant les vecteurs \vec{e}_1 et \vec{e}_2

$$\vec{E}_1(\vec{r}, t) = A_1(\vec{r}) \exp[i(-\omega_1 t + \vec{k}_1 \cdot \vec{r} - \varphi_1)] \vec{e}_1$$

$$\vec{E}_2(\vec{r}, t) = A_2(\vec{r}) \exp[i(-\omega_2 t + \vec{k}_2 \cdot \vec{r} - \varphi_2)] \vec{e}_2$$

E champ électrique
 k vecteur d'onde
 ω pulsation
 φ phase à l'origine

Champ électrique résultant :

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_1(\vec{r}, t) + \vec{E}_2(\vec{r}, t)$$

Le détecteur est sensible à : $I(\vec{r}, t) = \langle |\vec{E}(\vec{r}, t)|^2 \rangle$

$$I(\vec{r}, t) = \langle |\vec{E}_1(\vec{r}, t)|^2 \rangle + \langle |\vec{E}_2(\vec{r}, t)|^2 \rangle + 2 \Re e \langle \vec{E}_1(\vec{r}, t) \cdot \vec{E}_2^*(\vec{r}, t) \rangle$$

Intensité moyenne

Terme d'interférences

$$2 \Re e \langle \vec{E}_1(\vec{r}, t) \cdot \vec{E}_2^*(\vec{r}, t) \rangle = 2 A_1(\vec{r}) A_2(\vec{r}) \langle \cos \left((\omega_2 - \omega_1)t + (\vec{k}_1 - \vec{k}_2) \cdot \vec{r} + \varphi_2 - \varphi_1 \right) \rangle \vec{e}_1 \cdot \vec{e}_2$$

Cohérence
temporelle

Cohérence
spatiale

Cohérence de
polarisation

Cohérence mutuelle des 2 ondes qui interfèrent

✓ L'émission lumineuse est un phénomène aléatoire.

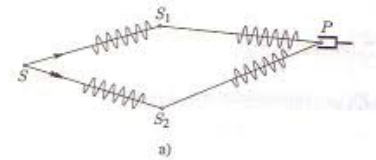
- Si E_1 et E_2 proviennent de 2 sources indépendantes, les ondes ne sont pas synchrones, la différence de phase est une fonction aléatoire et la valeur moyenne du terme d'interférences est nulle (il y a incohérence):

$$I = I_1 + I_2$$

- Les ondes sont incohérentes

✓ Obtention de la cohérence mutuelle des 2 ondes (ondes synchrones):

- Obtenir 2 ondes issues de la même source primaire.
- Au point d'observation, les trains d'onde qui interfèrent proviennent du même train d'onde initial; leur différence de phase n'est plus aléatoire.
- Les 2 ondes ont la même fréquence et la même phase à l'origine.
- La valeur moyenne du terme d'interférences n'est plus nulle (il y a cohérence):



$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left(\frac{2\pi \delta}{\lambda}\right) \quad \delta : \neq \text{de chemin optique}$$

✓ Différents types d'interféromètres:

- À division du front d'onde: fentes de Young, biprisme de Fresnel...
- A division d'amplitude: Michelson et ses dérivés, Newton, Fizeau...

Franges d'interférences et leur contraste/visibilité

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left(\frac{2\pi \delta}{\lambda}\right)$$

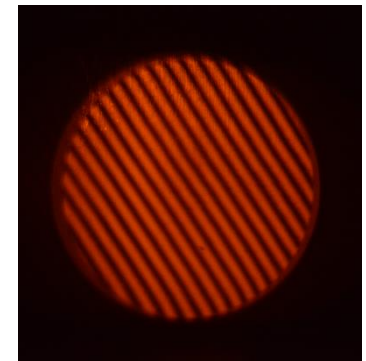
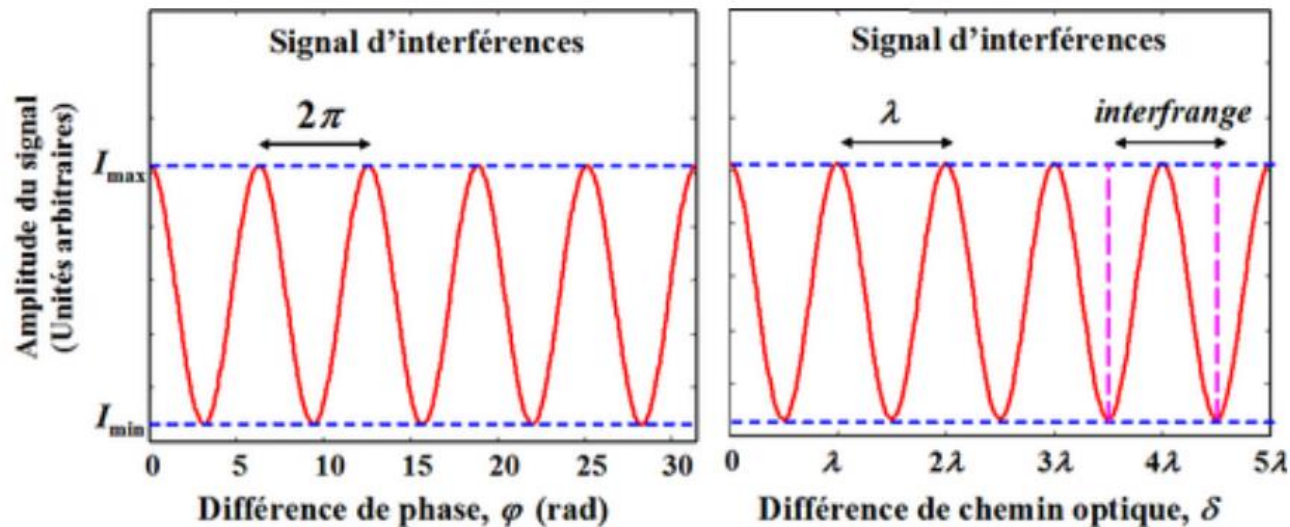
$$\delta \sim \Delta h(x,y)$$

Variations des hauteurs à la surface de l'échantillon

$$C = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{2\sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2} = 1 \text{ si } I_1 = I_2$$

$$2\pi\delta / \lambda = \Delta\phi$$

Différence de phase



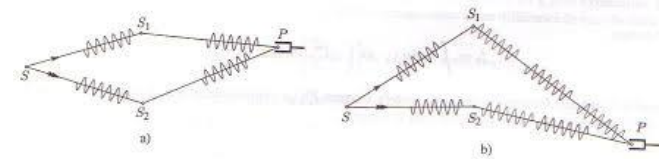
Cohérence temporelle

✓ **Source lumineuse présentant une largeur de spectre $\Delta\lambda$ non nulle:**

- Chaque λ donne son système de franges.
- Ils coïncident uniquement pour la différence de marche nulle (frange « blanche »)
- Ils sont décalés les uns par rapport aux autres.
- Si $\Delta\lambda$ est trop grand, brouillage (incohérence temporelle)

✓ **Condition de cohérence temporelle:**

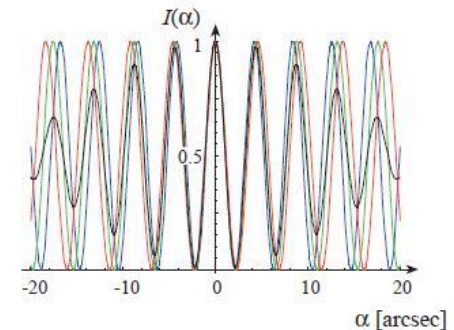
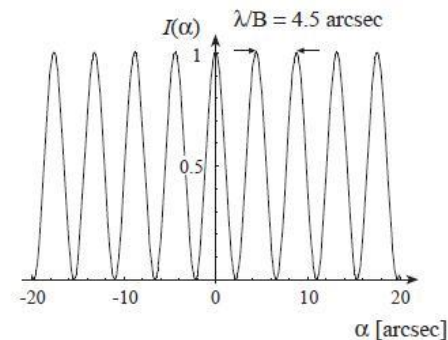
- $\Delta\phi \ll 2\pi$
- Temps de cohérence: $\tau_c = 1 / \Delta\nu$
- Longueur de cohérence: $L_c = c \tau_c = \lambda^2 / \Delta\lambda$



- Si $\delta \ll L_c$ les trains d'onde interférant au point d'observation sont issus d'un même train d'onde et présentent donc un déphasage stationnaire → interférences
- Si $\delta > L_c$ les trains d'onde interférant au point d'observation sont issus de 2 trains d'onde différents. Déphasage aléatoire → pas d'interférences.

✓ **Ordres de grandeur des longueurs de cohérence:**

- Raie du sodium: 3cm
- Laser multimode: 20cm
- Laser monomode: 300m
- Laser monomode stabilisé: 3km



✓ **Problématique liée à l'étendue spatiale de la source:**

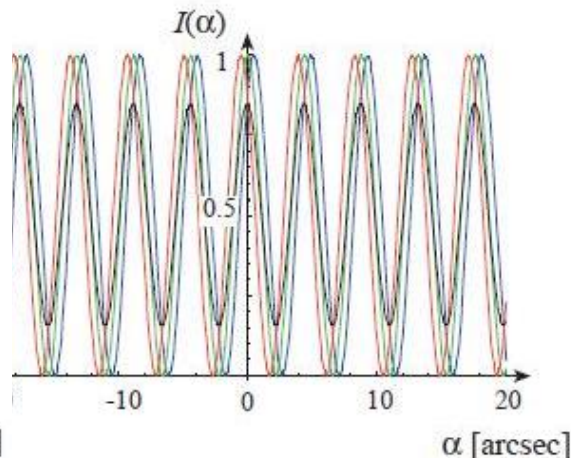
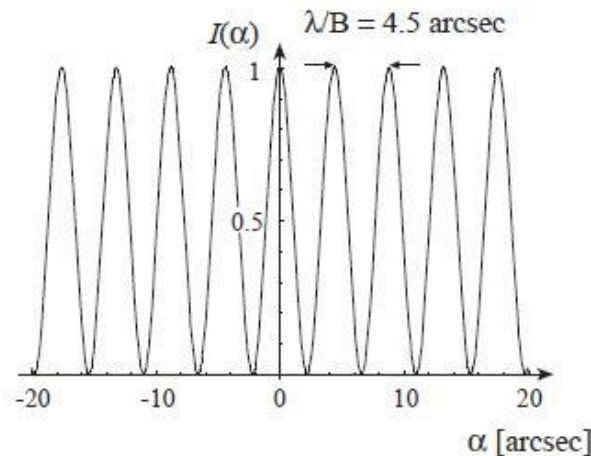
- Chaque point de la source émet indépendamment de ses voisins.
- Chaque point donne son système de franges.
- Ils sont décalés les uns par rapport aux autres.
- Si la source est trop étendue, brouillage (incohérence spatiale)

✓ **Condition de cohérence spatiale:**

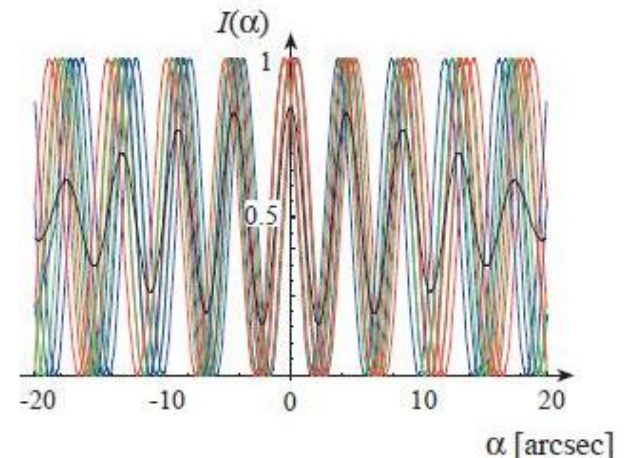
- $\Delta\phi \ll 2\pi$
- Largeur de cohérence spatiale: $w_c = \lambda / \Delta\theta$
- Surface de cohérence spatiale: $S_c = (\lambda / \Delta\theta)^2$

✓ **Ordres de grandeur des surfaces de cohérence spatiale:**

- Laser He-Ne: 1mm^2
- Soleil: $3 \times 10^{-3} \text{mm}^2$

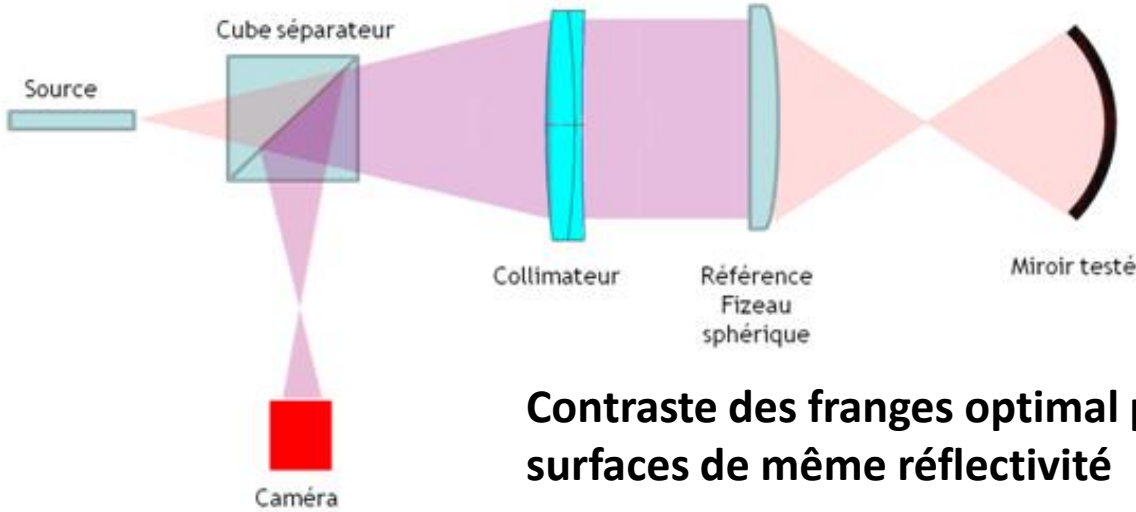


Cohérence spatio-temporelle (degré de cohérence complexe, fonction de corrélation spatio-temporelle, théorème de Van Cittert-Zernike...)



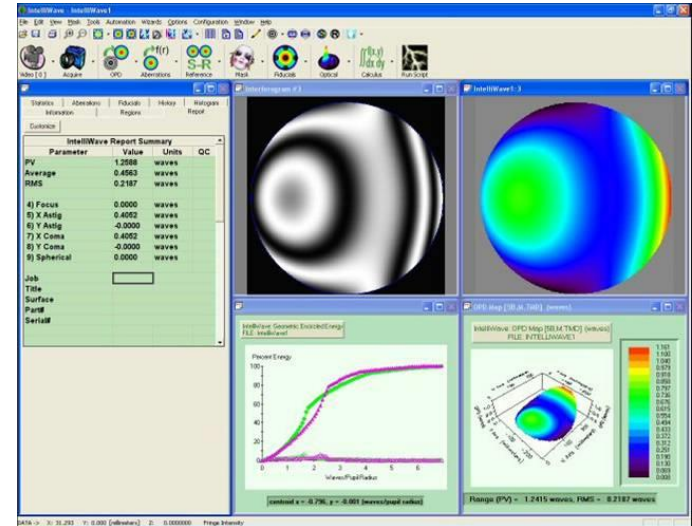
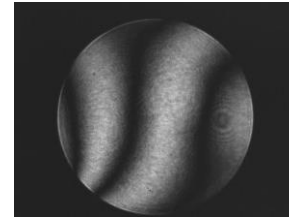
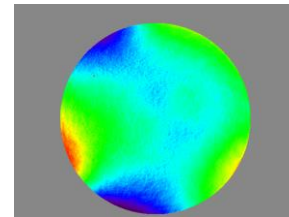
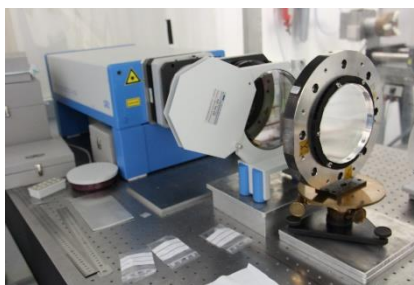
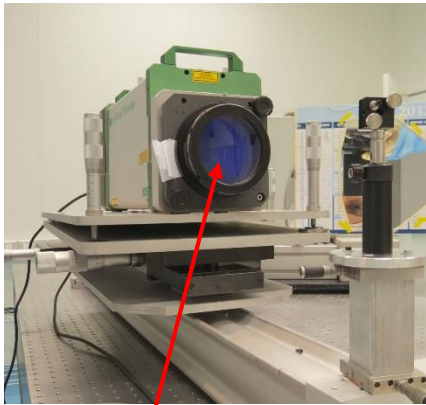


Interférométrie de Fizeau: principe



- ✓ Choisir le calibre avec la bonne ouverture pour éclairer la totalité du miroir et assurer "l'autocollimation"
- ✓ Le centre de courbure du miroir est positionné au foyer de l'interféromètre (null test)
- ✓ L'interféromètre mesure l'uniformité d'épaisseur du gap d'air.

Contraste des franges optimal pour des surfaces de même réflectivité



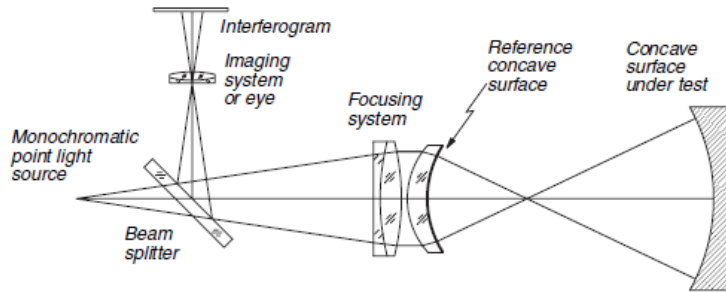
Calibre de référence monté sur platine tip-tilt équipée de cales piézos

Exemples d'interféromètres de Fizeau du LAM

Logiciel dédié pour piloter l'interféromètre et reconstruire l'erreur de forme à partir des franges

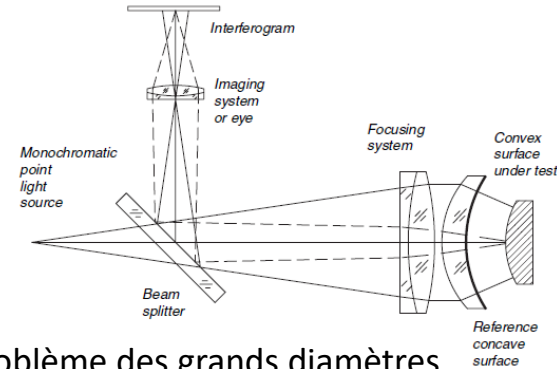
Quelques configurations null-test typiques en interférométrie Fizeau

Surface concave



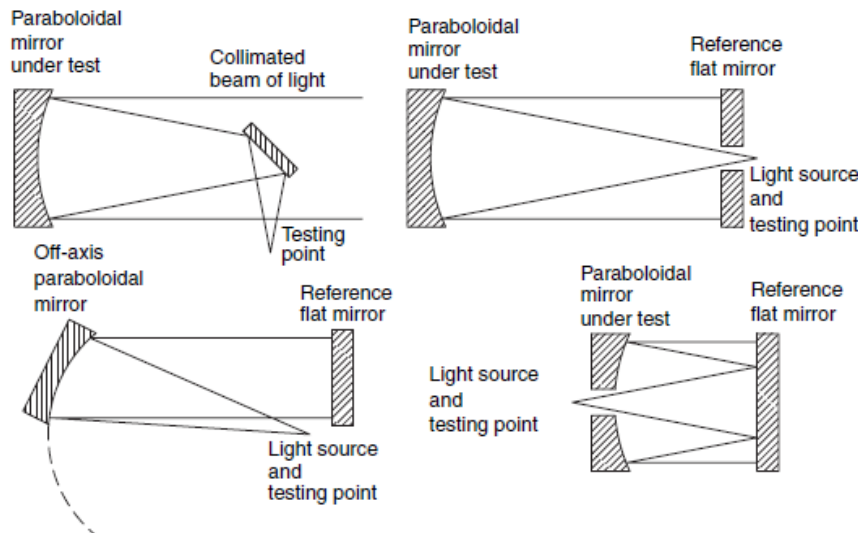
Problème des grands rayons de courbure

Surface convexe

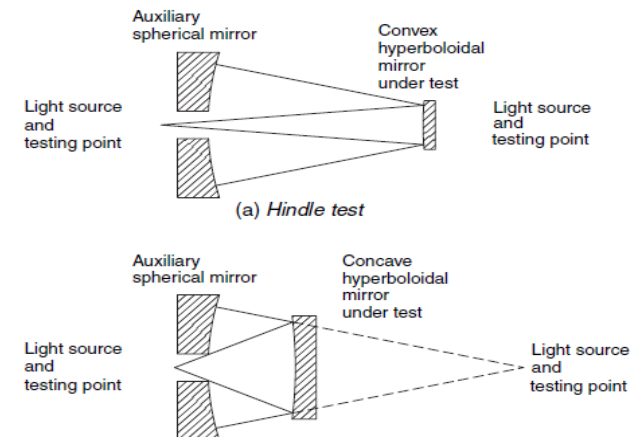


Problème des grands diamètres

Surface parabolique (besoin d'un plan additionnel)



Configurations de Hindle pour les surfaces hyperboliques (conjugaison near focus – far focus)



Besoin d'un miroir sphérique annexe de grande qualité optique

Phase shifting 1/2

- ✓ Permet d'atteindre une plus grande précision de mesure car l'intensité de chaque pixel dépend de la phase locale.
- ✓ Permet d'être limité par la taille pixel en terme de résolution spatiale contrairement aux techniques de tracé des contours de frange.
- ✓ **Principe:**
 - Acquisition de plusieurs interférogrammes déphasés les uns par rapport aux autres d'une quantité contrôlée précisément.
 - Par combinaison des différents interférogrammes, on extrait l'information des hauteurs de la surface mesurée.
- ✓ **Mise en œuvre en interférométrie Fizeau:**
 - Le calibre est monté sur des piézos
 - Possible aussi par décalage de longueur d'onde
- ✓ **2 types de phase-shifting:**
 - Temporel: peut être sensible aux vibrations et à la turbulence
 - Simultané: met en œuvre des effets de polarisation pour séparer les faisceaux déphasés au niveau du détecteur
- ✓ **Algorithmes de phase-shifting:**
 - Un grand nombre d'algorithmes existante
 - Le plus répandu: 4-steps (90° steps)

$$I(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos [\varphi(x, y) + \Delta\varphi_i]$$

Information de phase à
extraire

Déphasage contrôlé
introduit

4-step algorithm

$$I_1(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos[\phi(x, y)]$$

$$I_2(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos[\phi(x, y) + \pi/2]$$

$$I_3(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos[\phi(x, y) + \pi]$$

$$I_4(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos[\phi(x, y) + 3\pi/2]$$



$$I_1(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos[\phi(x, y)]$$

$$I_2(x, y) = I'(x, y) - I''(x, y) \sin[\phi(x, y)]$$

$$I_3(x, y) = I'(x, y) - I''(x, y) \cos[\phi(x, y)]$$

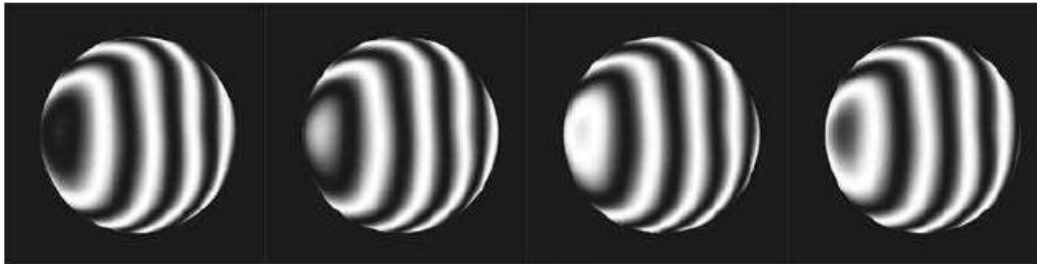
$$I_4(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \sin[\phi(x, y)]$$



$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \left[\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \right]$$



Déroulement de la phase pour
lisser les repliements de 2π de la
fonction arctan



L'intensité de chaque pixel varie en fonction de la phase locale. La connaissance et donc la calibration des piézos est primordiale.

Qualité du phase shifting (fonction de modulation): $\gamma = I''(x, y) / I'(x, y) \approx 1$
Gaussienne étroite bien piquée autour de 1

$$\begin{aligned} \gamma(x, y) &= \frac{I''(x, y, \Delta)}{I'(x, y)} \\ &= \frac{\left\{ [1 - \cos(\alpha)](I_1 - I_3) \right\}^2 + [\sin(\alpha)(2I_2 - I_1 - I_3)]^2 \right\}^{1/2}}{[I_1 + I_3 - 2I_2 \cos(\alpha)] \sin(\alpha)} \end{aligned}$$

Autres techniques interférométriques et procédures de mesures particulières

- ✓ Interféromètre de Twyman-Green, de Mach-Zender
- ✓ Interférométrie avec CGH
- ✓ Interférométrie à décalage latéral...



See «Optical Shop Testing » par D. Malacara chez Wiley (3^{ème} édition)

Procédures de mesures particulières:

- ✓ Mesure absolue de plans (fabrication de 3 plans en même temps et combinaisons des mesures dans des orientations différentes pour extraire les formes de chacun)
- ✓ Rotation des optiques avec un pas dédié et combinaisons des mesures pour extraire la contribution « calibre » et la contribution « surface testée » (cf présentation de Marc)



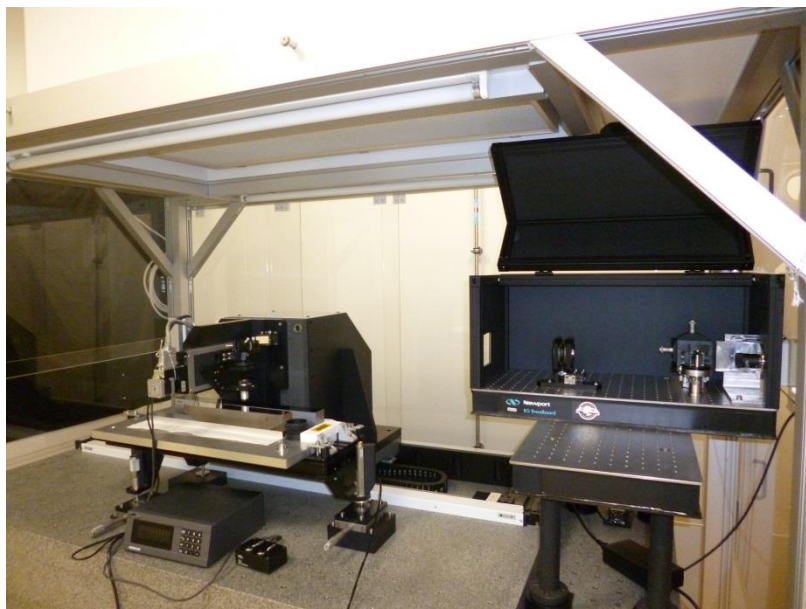
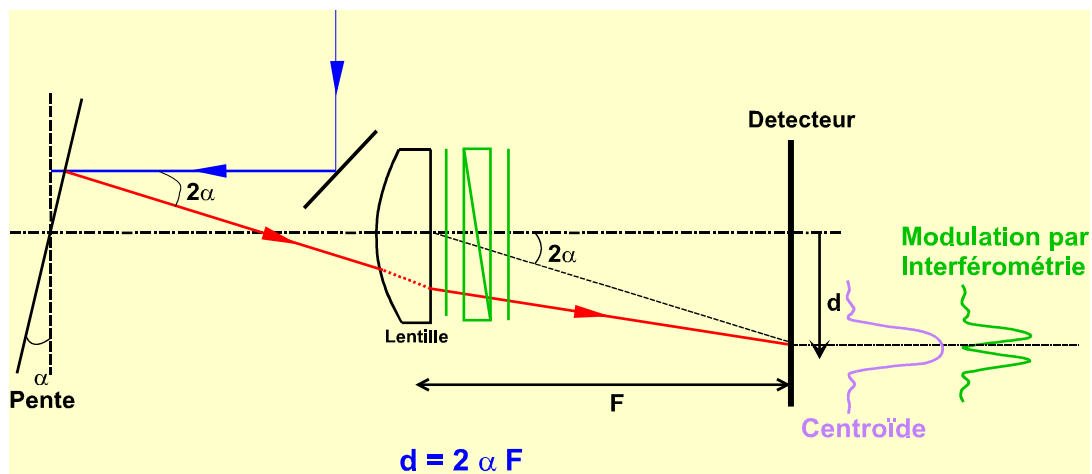
Long-trace profiler

- ✓ Mesure de profils 1D: bien adapté aux miroirs toriques X en silicium pour synchrotron (très allongés car utilisés en incidence rasante)
- ✓ Déflectométrie: mesure des pentes locales par balayage d'un pentaprisme

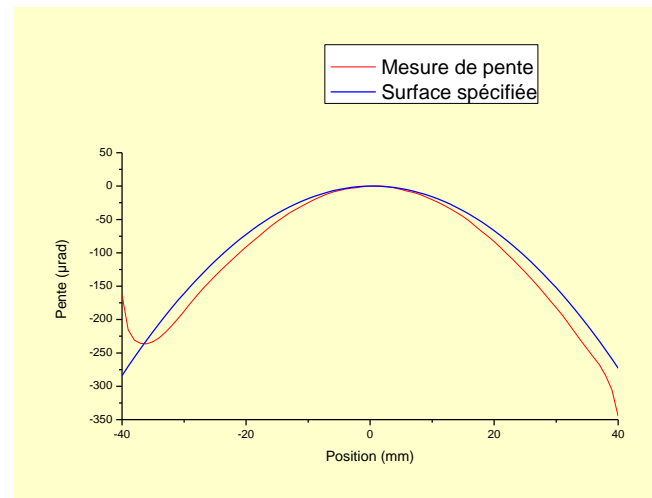
Taille spot 2 mm
 RoC > 10 m
 Sensibilité 50 nrad rms
 Pas besoin de référence
 Déplacement max: 1m

Calcul du centroïde du spot sur la camera et de son déplacement en fonction de la pente locale

Mode interférométrique



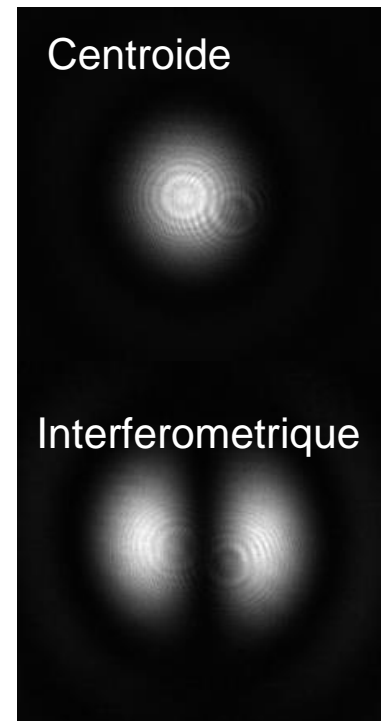
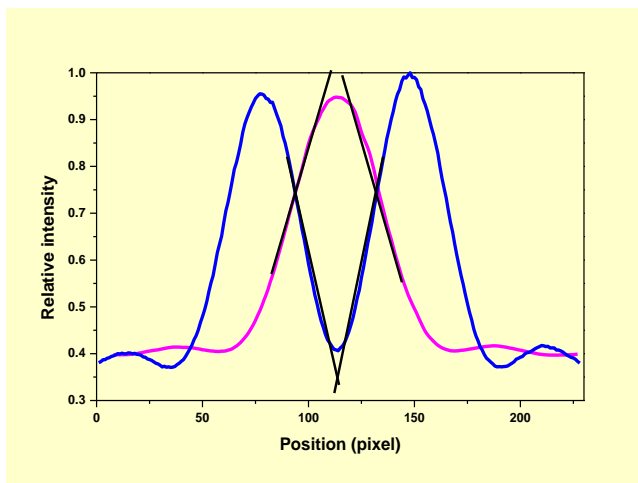
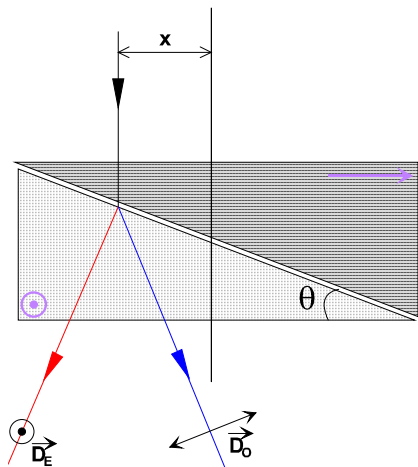
LTP du laboratoire de métrologie du synchrotron Soleil



Mesure faite au synchrotron Soleil

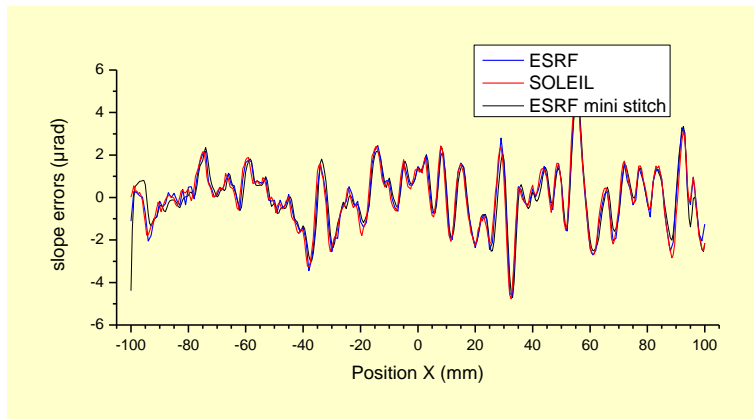
Long-trace profiler: mode interférométrique

Décalage latéral de 2 faisceaux qui interfèrent. Les 2 faisceaux sont issus d'un prisme de Wollaston.
 Une frange noire module l'intensité du spot et augmente la précision de calcul du centroïde.

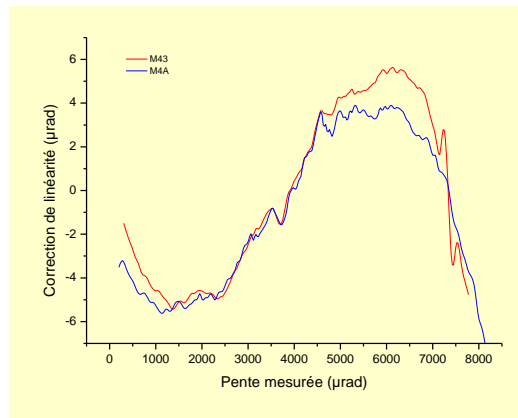


Calibration de la fonction d'appareil avec un super-plan

Profil en pente du miroir reconstruit



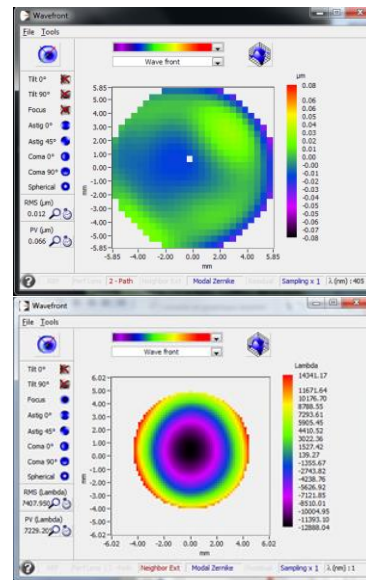
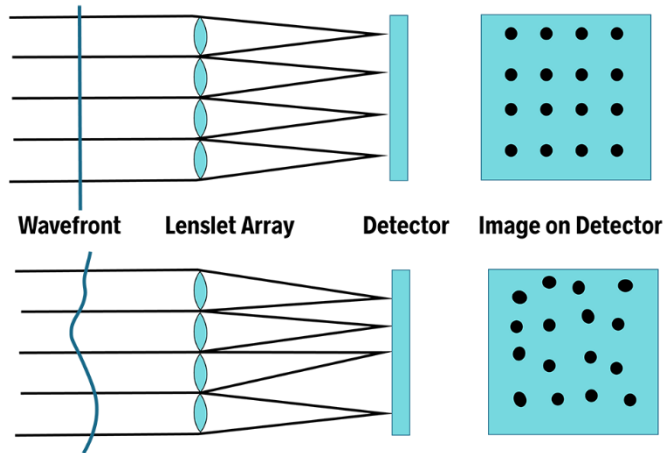
Fonction d'appareil reconstruite



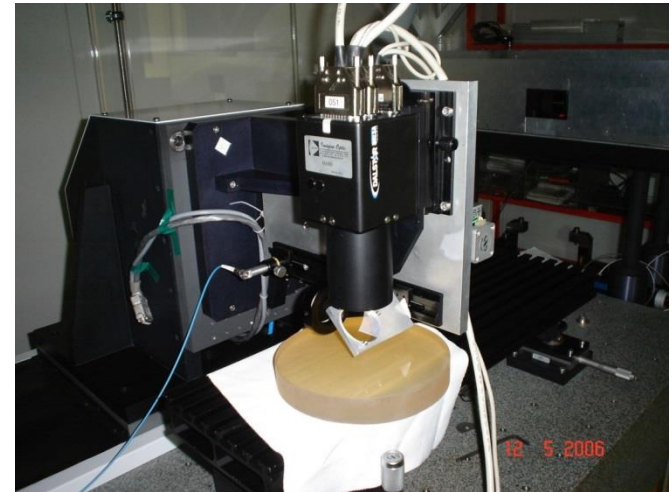
Images provenant des travaux faits au laboratoire de métrologie du synchrotron Soleil

Analyseur de front d'onde Shack-Hartmann

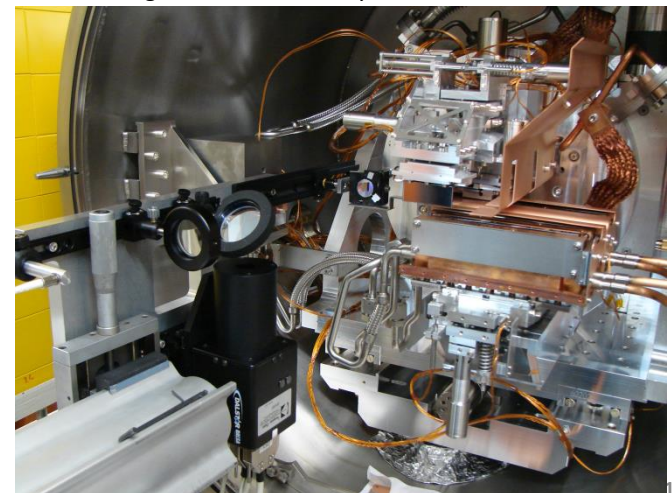
- Matrice de microlentilles placée devant une CCD. Chaque microlentille donne une tache d'Airy sur la CCD.
- Un front d'onde aberrant génère des déplacements des taches proportionnels à la pente locale du front d'onde.
- Reconstruction du front d'onde par intégration numérique.
- Grande dynamique de mesure (fortes courbures)
- Peu sensible aux vibrations, achromatique



Laboratoire de métrologie du synchrotron Soleil



Ligne de lumière du synchrotron Soleil



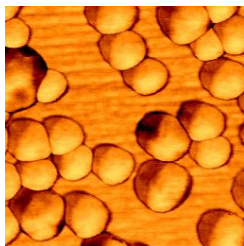
HASO 32 du LAM

Mesure de rugosité et de topographie par AFM

- Champ : 100 X 100 μm^2
- Sensibilité : 12 pm
- Z : piezo
- XY : flexion
- Mode contact (tapping) pour la rugosité fine
- Mode non-contact pour la topographie

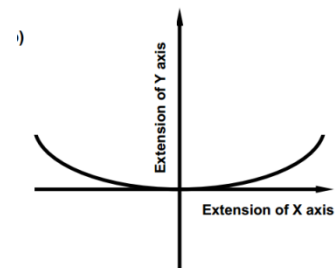
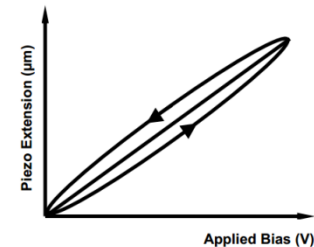
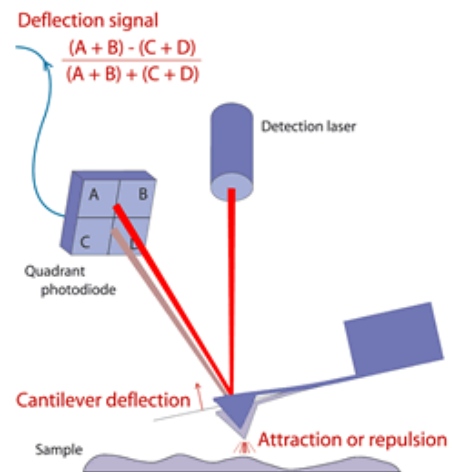
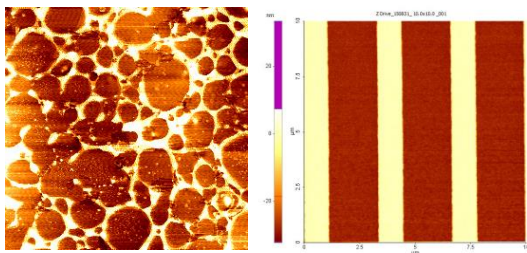


Synchrotron
Soleil



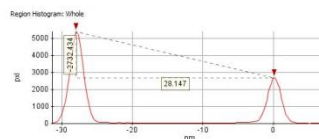
Topographie

Rugosités
10 X 10 μm



Attention à la non-linéarité et à l'hystérésis !

Histogramme

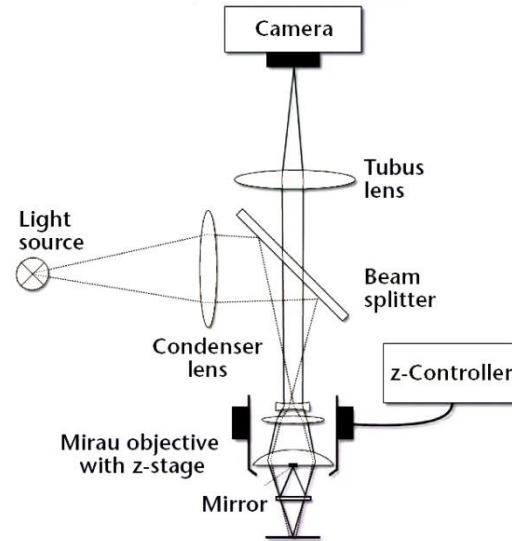




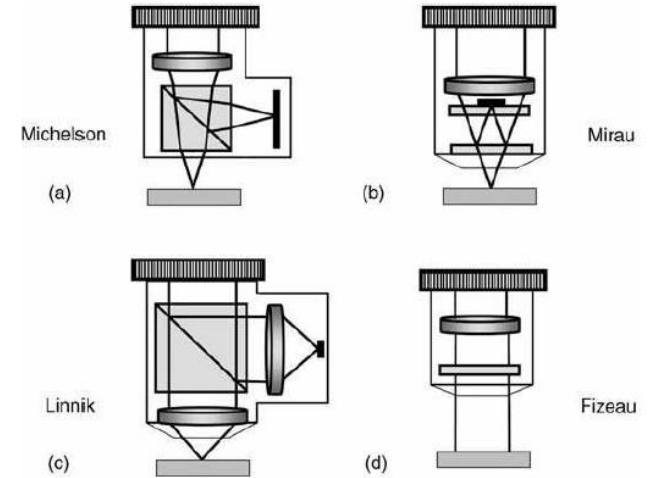
Réseau Optique Photonique

Mesure de rugosité par microscopie interférentielle en lumière blanche

Microscope du LAM



Différents type d'objectifs interférentiels

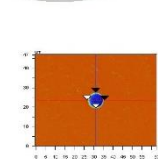
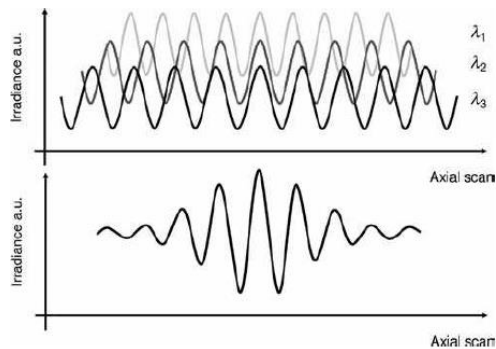


- Platines: 100x100 mm
- Objectifs: x10 et x50
- Résolution verticale: <1nm
- Environnement contrôlé

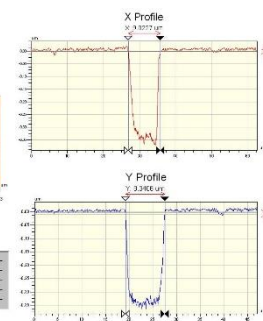
Interférences entre la surface test et une surface de référence.

Franges localisées sur la surface (best focus de la frange d'ordre 0) à cause de l'incohérence temporelle de la source.

Mesure des hauteurs de la surface sans ambiguïté par scan en z.



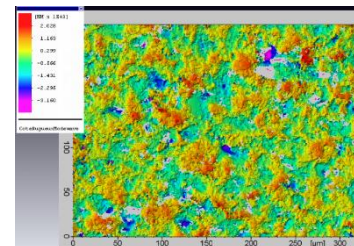
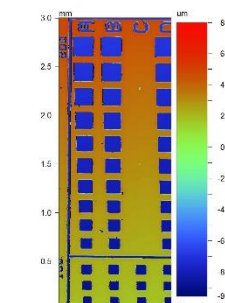
Amplitude	31.37	µm
Phase	21.54	deg
Offset	352.4	µm
Angle		deg



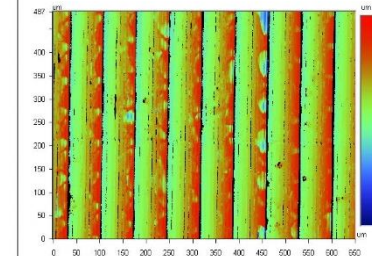
Surface Statistics:	
Rq:	4.51 µm
Rp:	4.99 µm
Rz:	15.41 µm
Rt:	17.52 µm
Set-up Parameters:	
Spec:	649 X 1669
Sampling:	1.86 µm
Processed Options:	
Texture Removal:	
Flt:	
Filtering:	
Date:	

Surface Data

Date: 06/07/2013
Time: 11:22:01



Surface Statistics:	
Rq:	612.29 µm
Rp:	736.38 µm
Rz:	1.56 µm
Rt:	3.44 µm
Set-up Parameters:	
Spec:	650 X 650
Sampling:	1.00 µm
Processed Options:	
Texture Removal:	
Date:	
Filtering:	
Date:	



Techniques pour la mesure de la topographie et de la rugosité fine

✓ Scanning probe microscopes (avec ou sans contact):

- Déplacement d'un stylet sur ou proche de la surface (qqe nm): résolution limitée par la courbure de l'extrémité du stylet
- Microscope à effet tunnel: pour surfaces conductrices, modes hauteur constante ou courant constant
- Microscope à force atomique: mode contact ou sans contact
- Microscopies électroniques

✓ Méthodes optiques:

- Microscopie confocale: la lumière est focalisée sur la surface et le système balaye la surface en conservant la mise point par ajustement vertical de la position de l'objectif. Résolution verticale limitée par le pas moteur.
- Microscopie confocale chromatique: objectif chromatique immobile et plage de mesure donnée fixée par la profondeur de champ chromatique

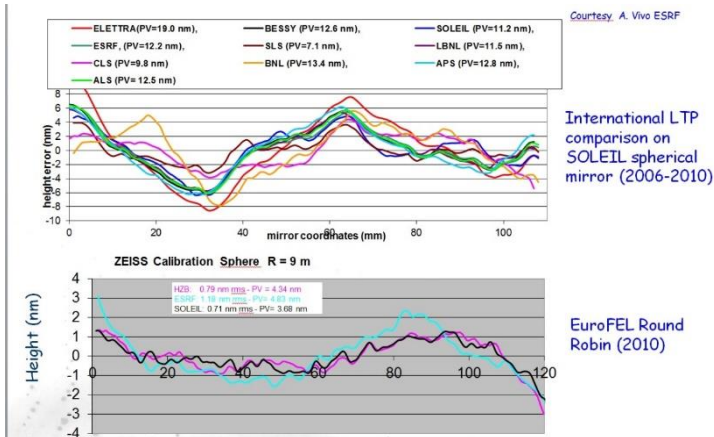
✓ Méthodes interférométriques:

- Interférométrie à 2 longueurs d'onde, à multiples longueurs d'onde
- Interférométrie en lumière blanche (WLI, VSI, OCT...)
- Interférométrie à balayage de longueur d'onde
- Interférométrie à polarisation (Nomarski...)

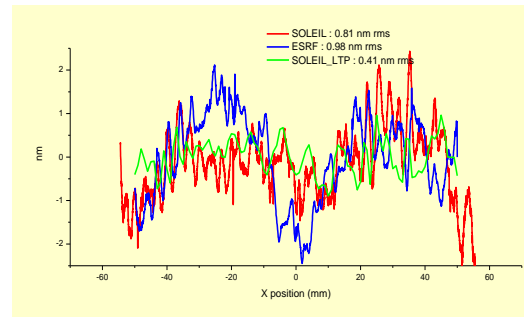
✓ Méthodes par diffusion lumineuse:

- Total Integrated Scattering (TIS): $\sigma^2 = (\lambda/4\pi)^2 \times \text{TIS}$; mesure par sphère intégrante du flux total diffusé par la surface
- Bidirectional reflectance distribution function (BRDF): mesure résolue angulairement

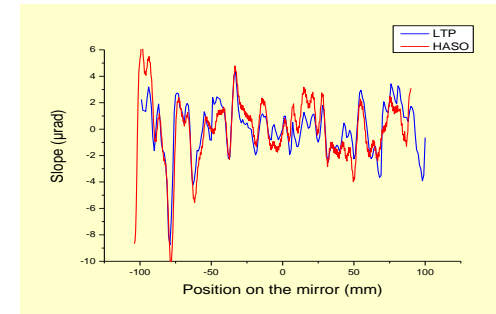
- ✓ Grande diversité des techniques disponibles pour la mesure de forme et de rugosité.
- ✓ Aspects critiques :
 - Calibrations des instruments (fonction d'appareil)
 - Calibration des optiques de référence en interférométrie
 - Environnement: température, vibrations, turbulence
 - Définition de procédures (norme ISO 10110)
 - Mesures absolues très difficiles
- ✓ Utilité des inter-comparisons:
 - Comparer des techniques différentes sur une même optique ou des différences de mises en œuvre
 - « Qualifier » les instruments de chaque institution
 - Converger vers des recommandations de « bonnes pratiques », voire des procédures communes



Interférométrie stitching



Comparaison 2 méthodes



Métrologie interférométrique

CEA/CESTA : Stéphane Bouillet et Frédéric Audo

LAM : Johan Floriot

LCF : Marc Roulliy

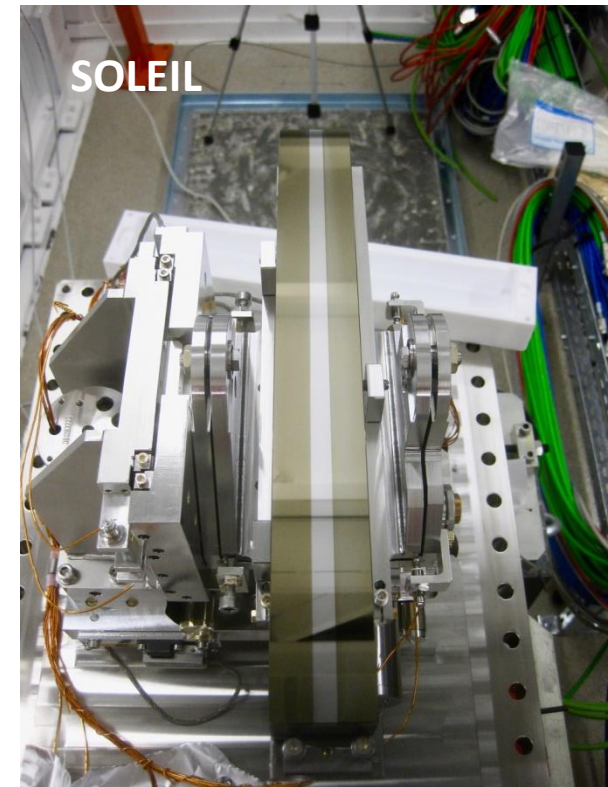
LMA : Laurent Pinard

LULI : Sylvain Savalle

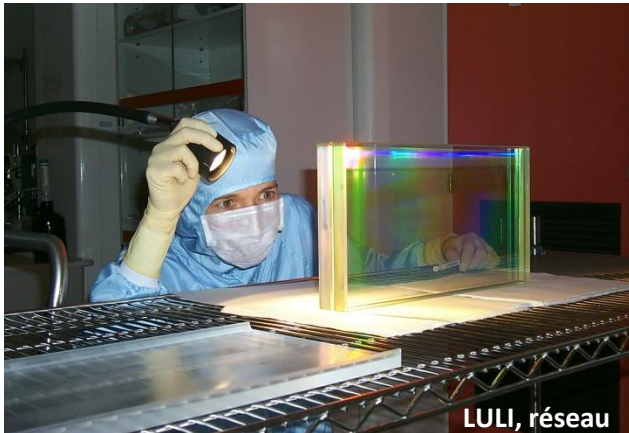
SOLEIL : Sylvain Brochet et Muriel Thomasset

Appel candidature : RIO 2018 et ROP janvier 2019

1^{ère} réunion : septembre 2019



- Visite des labos : LCF, CEA/CESTA SOLEIL planifié (printemps 2021)
- Partage de méthodologie, d'outils d'analyse
- MyCore pour dépôts des données
- Inter-comparaison : forme de surface et rugosité
- Achat d'un miroir de référence (stockage au LULI)
- 2021 : Etalonnage du miroir par les membre du GT selon une seule et unique méthode



Les intervenants et les programmes

- Laboratoire d'Astrophysique de Marseille (LAM)
- Laboratoire pour l'Utilisation des Lasers Intenses (LULI)
- Laboratoire des Matériaux Avancés (LMA)
- Laboratoire Charles Fabry (LCF)
- CEA CESTA (CESTA)
- Laboratoire de Metrologie d'Optique de Soleil (SOLEIL)
et on en attend évidemment d'autres !

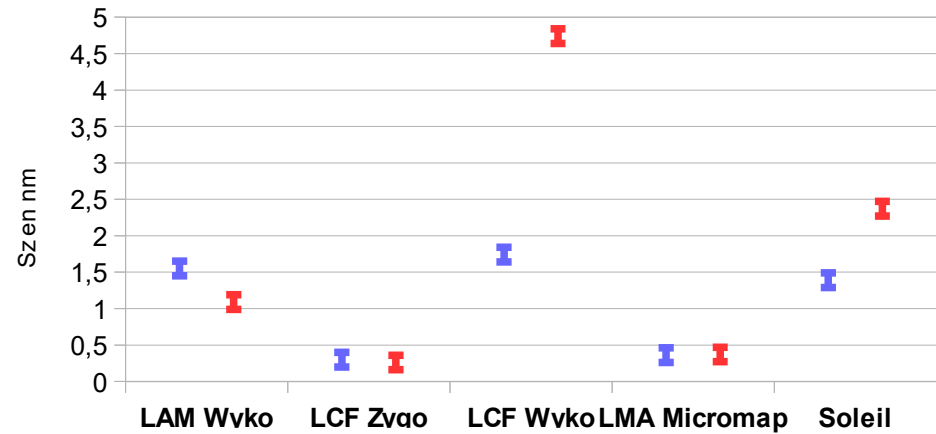
- Mesures de rugosité
 - Référence Si (diam 25,4mm en dessous de 0,1nm)
 - Référence SiO₂ (diam 25,4mm en dessous de 0,1nm)

- Mesures de surface
 - Reference plane avec défauts (LAM_Flat), diam 80mm, $\lambda/5$
 - Reference plane (LCF_Flat) diam 100mm, $\lambda/100$
 - Reference spherique (LAM_Spher) diam 40mm, RC 75,9mm, $\lambda/5$

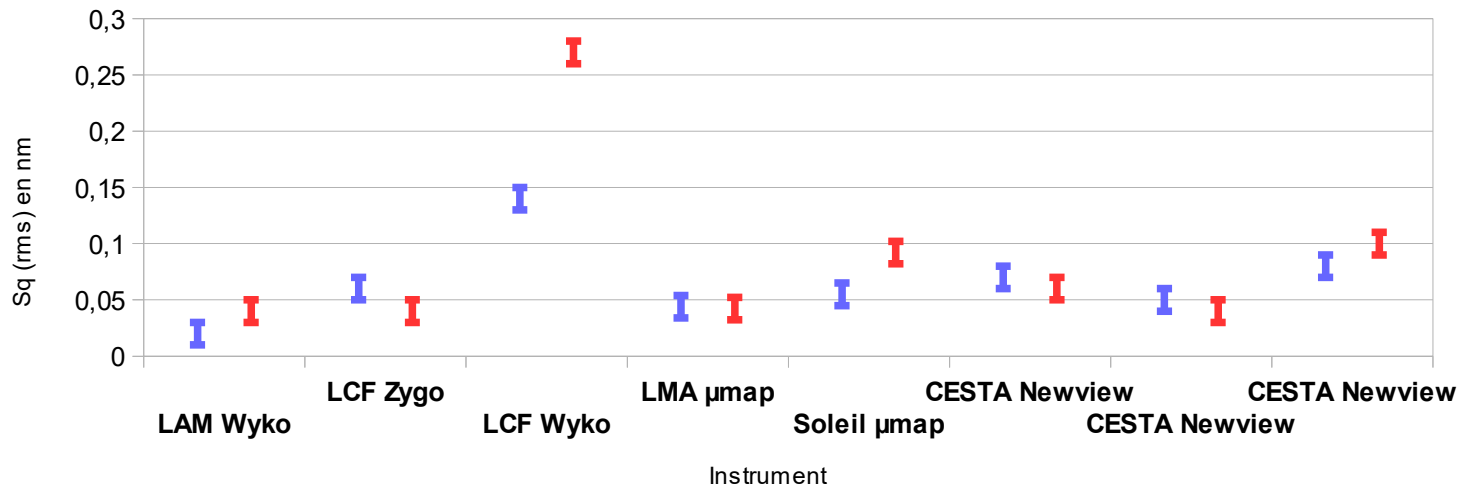
Mesures de rugosité

Si
SiO₂

Sz (PV)



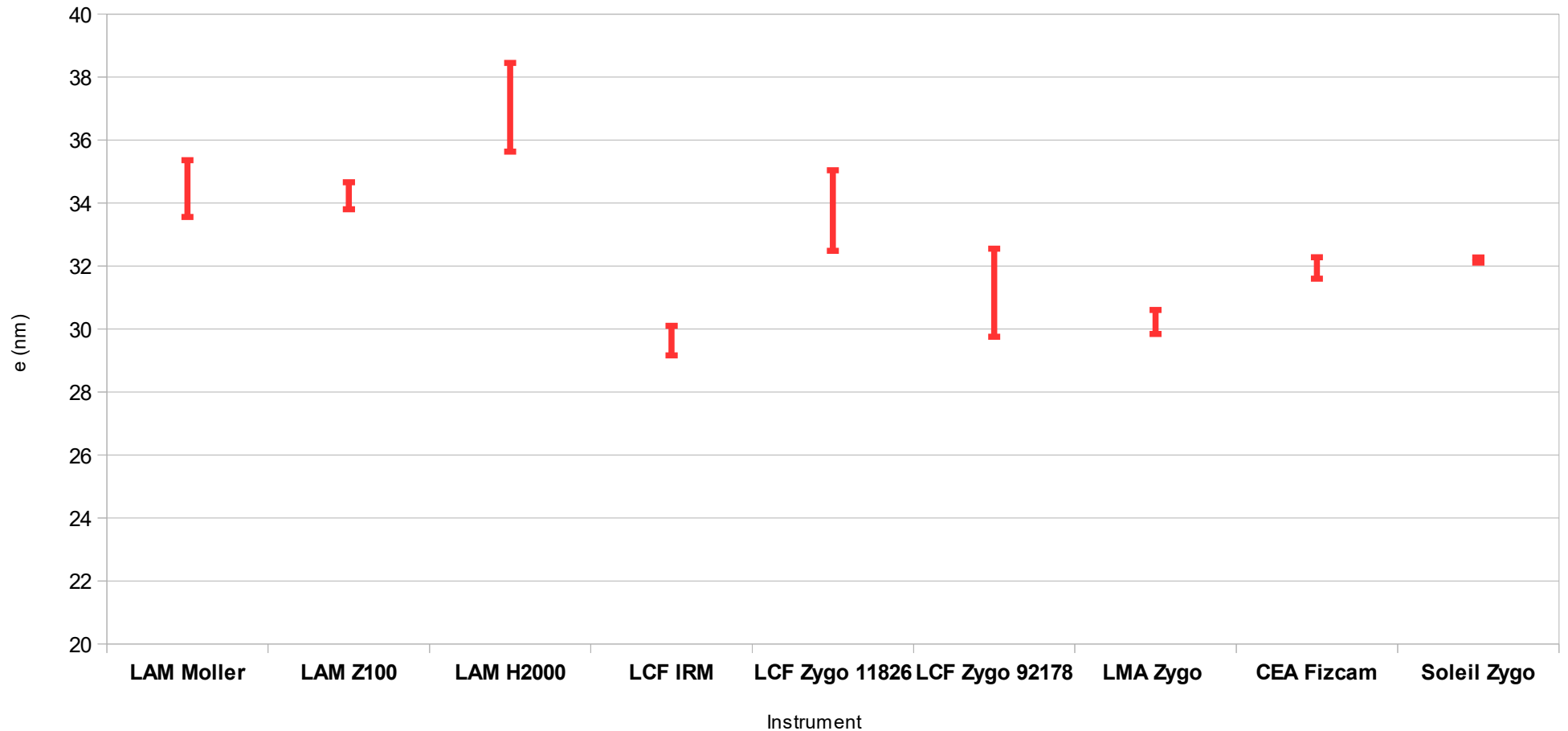
Sq (rms)



Reference plane avec défauts (LAM_Flat), diam 80mm, $\lambda/5$

LAM_Flat

erreur de forme (nm rms)



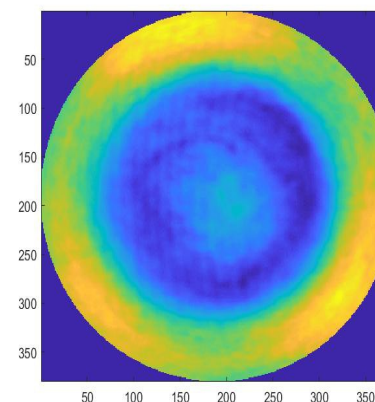
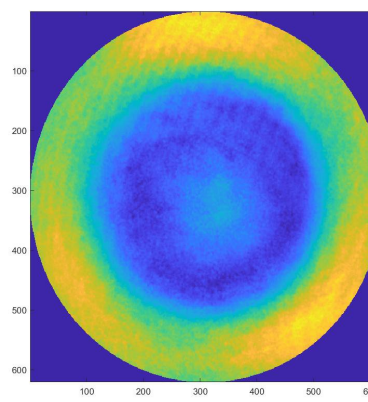
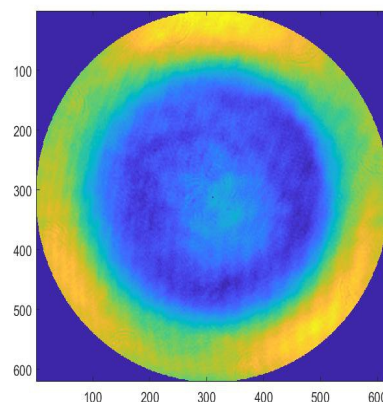
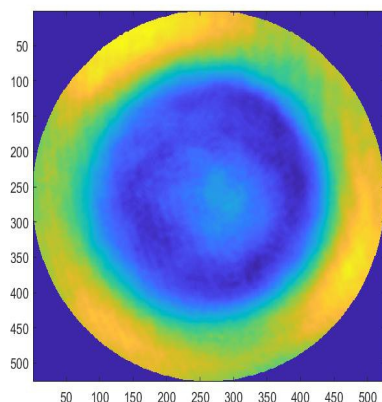
Reference plane avec défauts (LAM_Flat), diam 80mm, $\lambda/5$

LAM Moller

LAM Z100

LAM H2000

LCF IRM



PV 120 nm

RMS 34,46
+/- 0,9 nm

PV 127 nm

RMS 34,23
+/- 0,43 nm

PV 204 nm

RMS 37,04
+/- 1,41 nm

PV 115 nm

RMS 29,63
+/- 0,47 nm

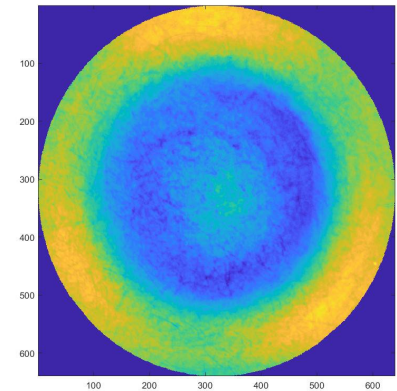
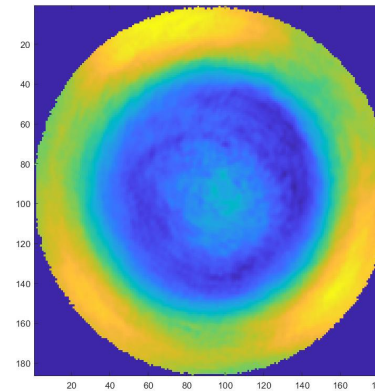
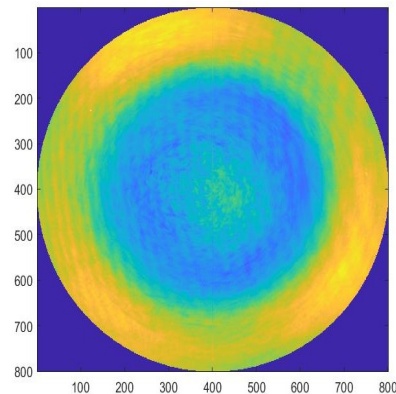
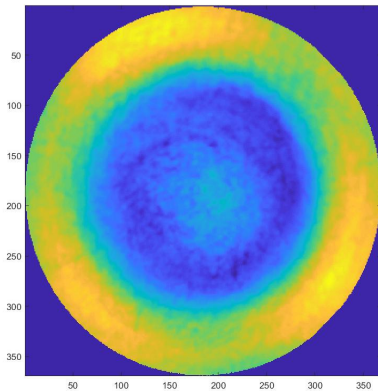
Reference plane avec défauts (LAM_Flat), diam 80mm, $\lambda/5$

LCF Zygo 11826

Soleil Zygo

LMA Zygo

CEA Fizcam



PV 125 nm

RMS 33,76
+/- 1,28 nm

PV 137 nm

RMS 32,19
+/- 0,08 nm

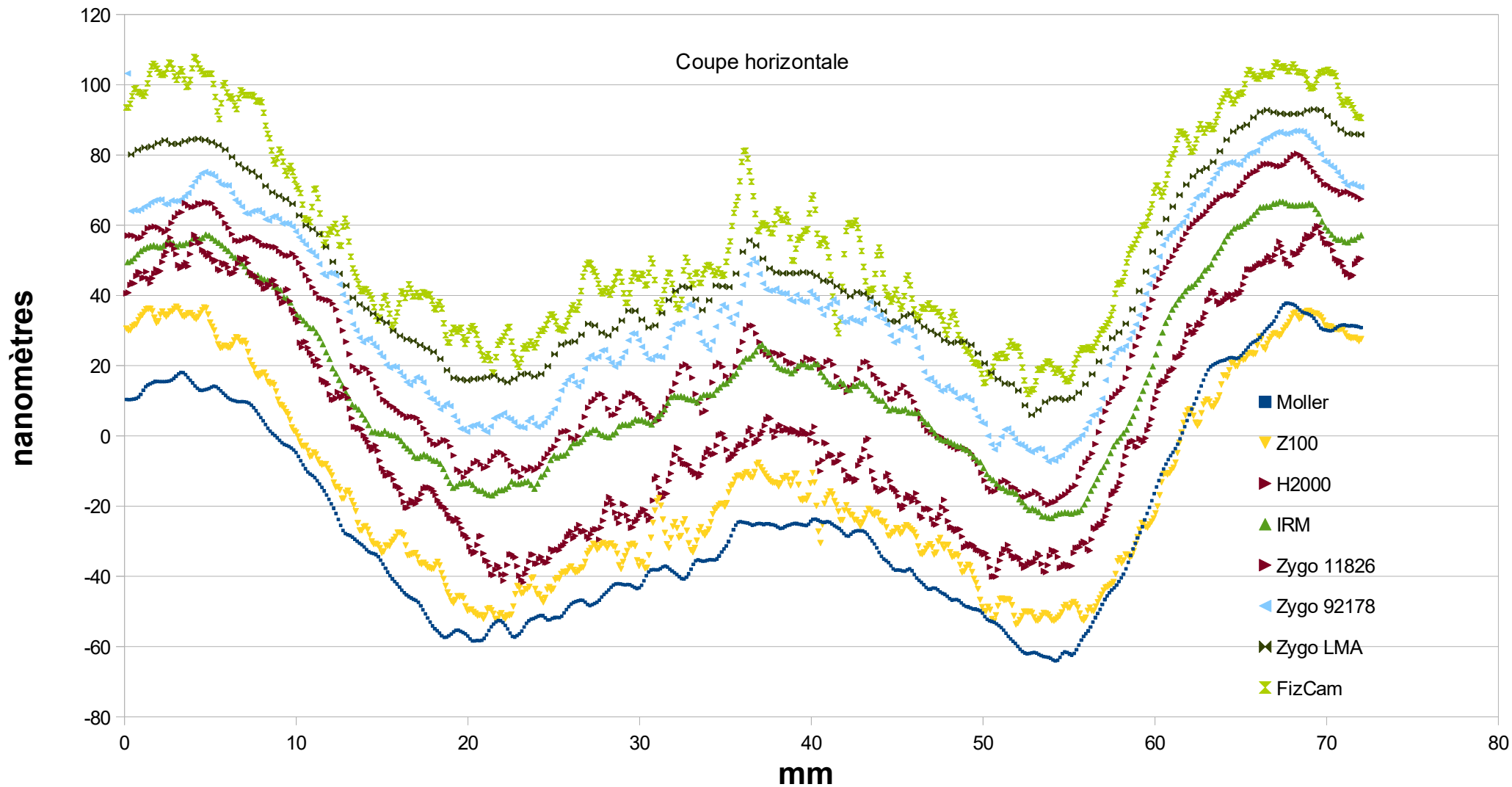
PV 110 nm

RMS 30,21
+/- 0,38 nm

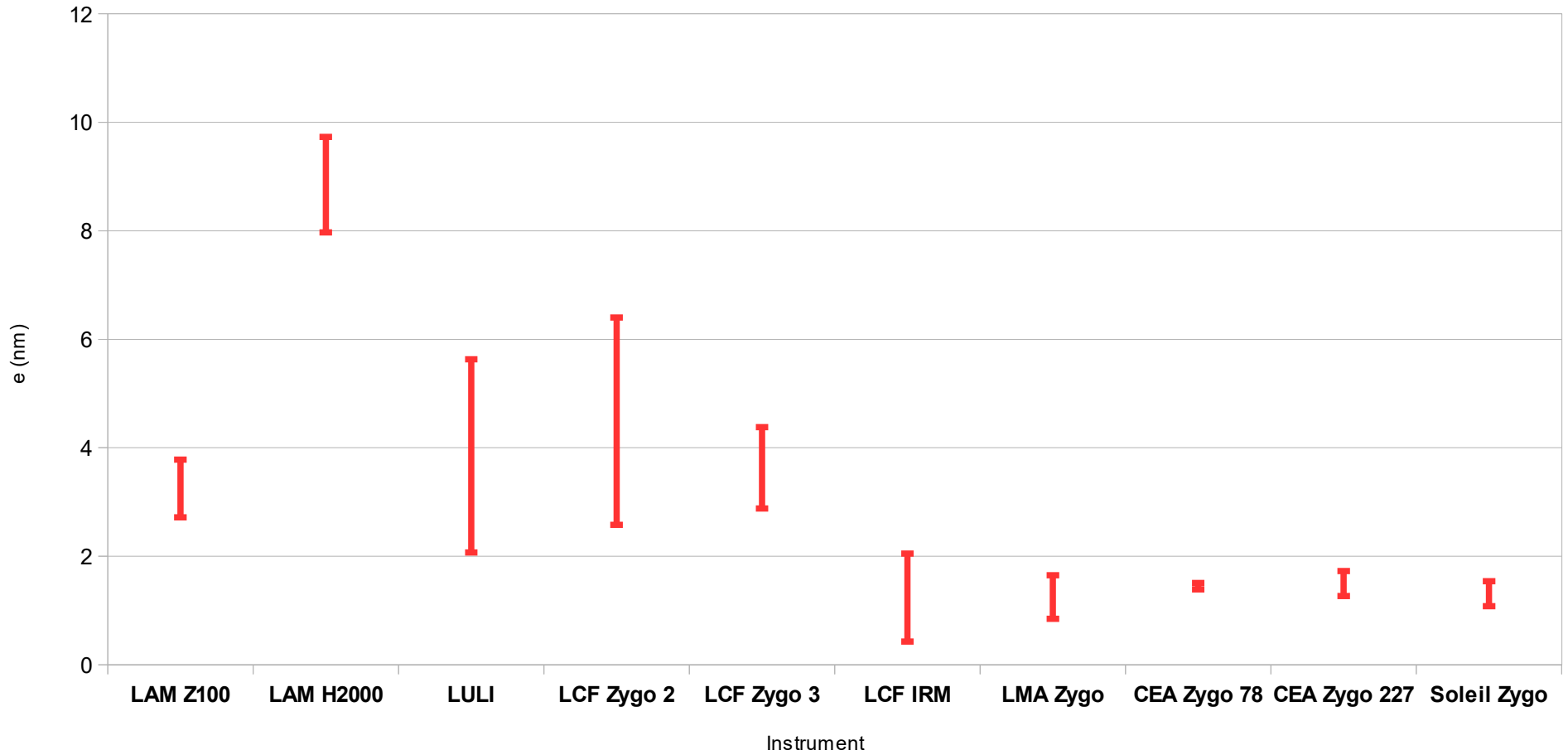
PV 143 nm

RMS 31,94
+/- 0,34 nm

Reference plane avec défauts (LAM_Flat), diam 80mm, $\lambda/5$



Référence plane (LCF_Flat), diam 100mm, $\lambda/100$



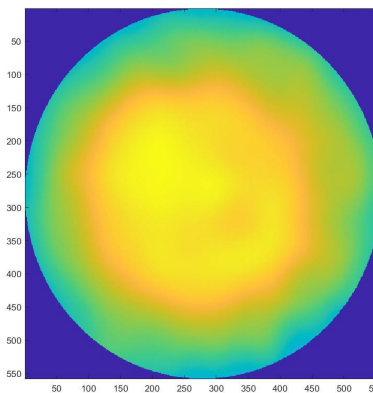
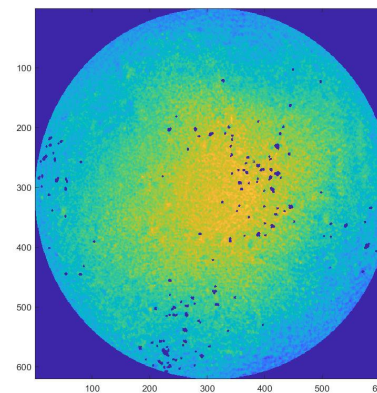
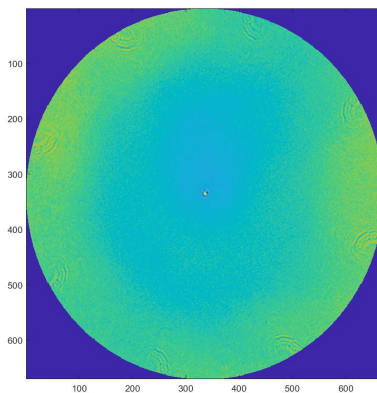
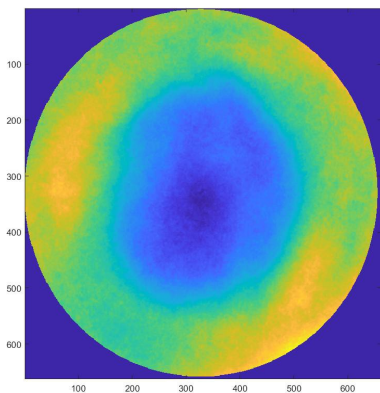
Référence plane (LCF_Flat), diam 100mm, $\lambda/100$

LAM Moller

LAM Z100

LAM H2000

LULI



PV 18 nm

RMS 3,96
+/- 0,53 nm

PV 45 nm

RMS 3,25
+/- 0,88 nm

PV 65 nm

RMS 8,85
+/- 1,78 nm

PV 27 nm

RMS 3,85
+/- 1,91 nm

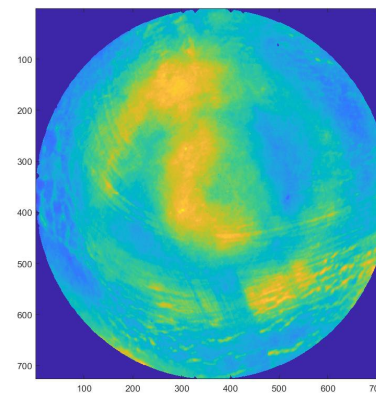
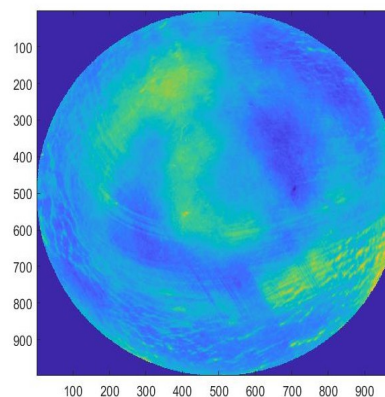
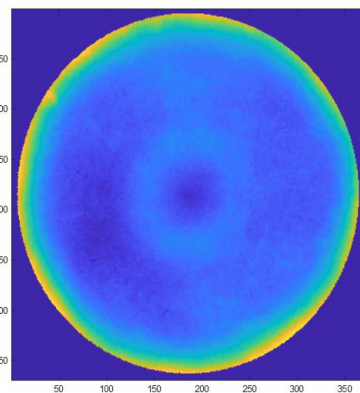
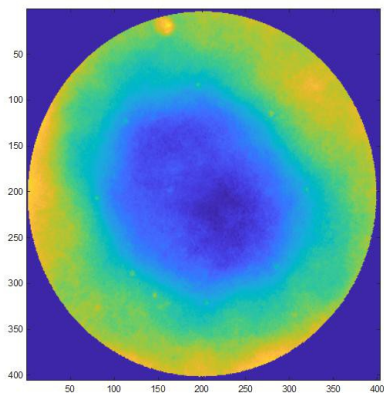
Référence plane (LCF_Flat), diam 100mm, $\lambda/100$

LCF Ref TP2

LCF Ref TP3

Soleil Zygo

CEA mesure finale



PV 20 nm

RMS 4,49
+/- 0,75 nm

PV 21 nm

RMS 3,63
+/- 0,81 nm

PV 10,7 nm

RMS 1,31
+/- 0,20 nm

PV 6,4 nm

RMS 1,43 nm

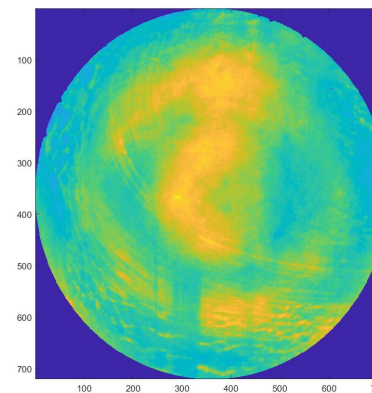
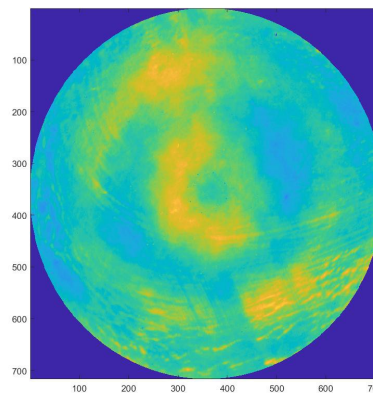
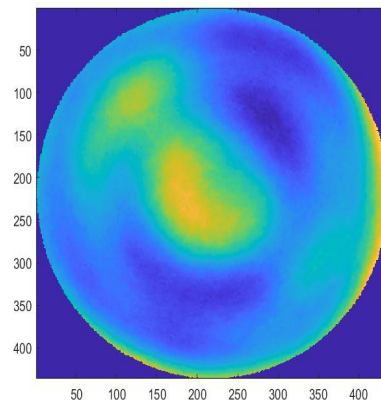
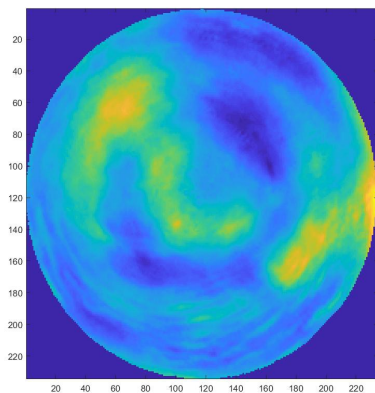
Référence plane (LCF_Flat), diam 100mm, $\lambda/100$

LMA Zygo

LCF IRM

CEA Ref 78

CEA Ref 227



PV 7 nm

RMS 1,25
+/- 0,06 nm

PV 6,9 nm

RMS 1,24
+/- 0,4 nm

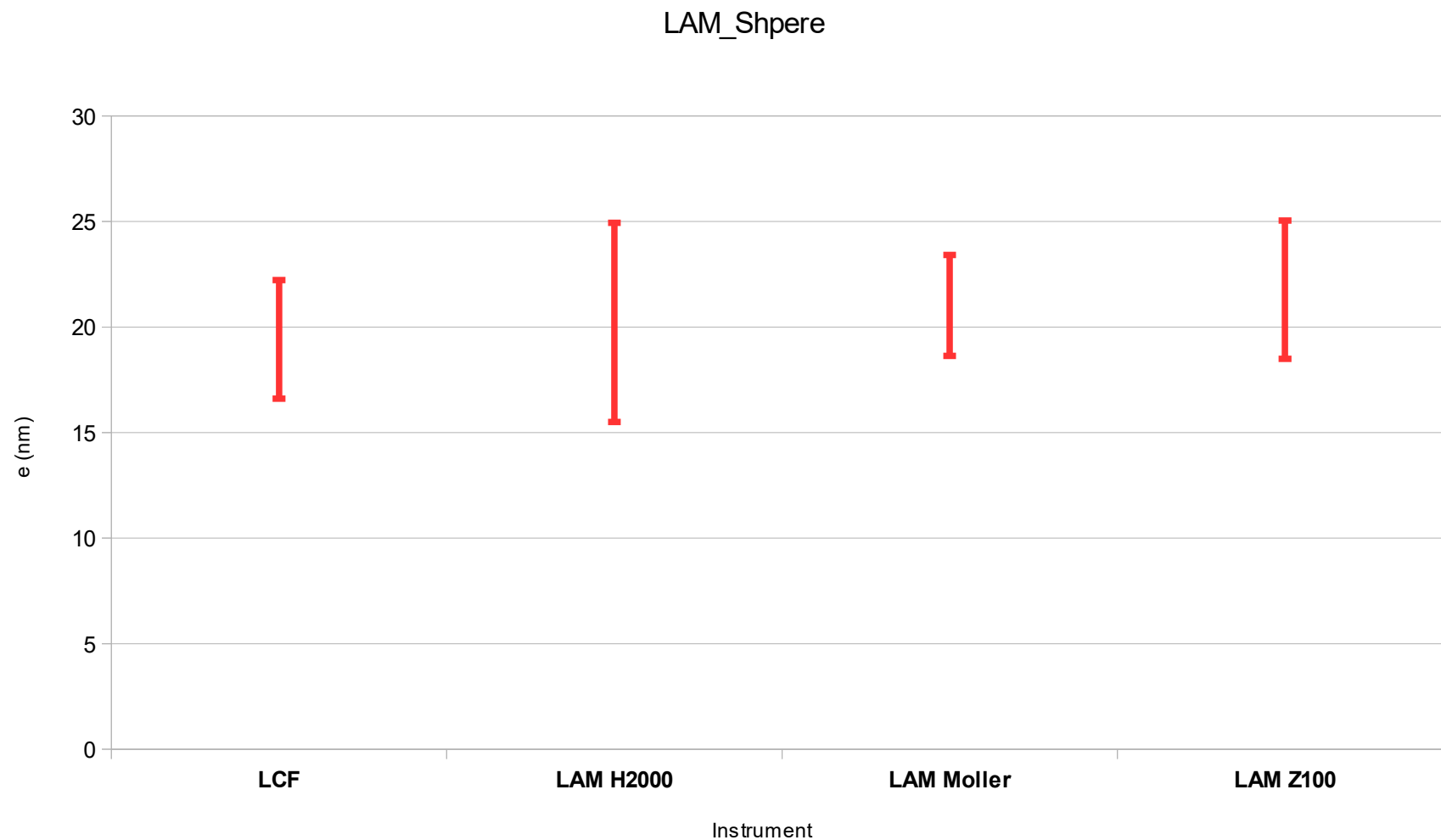
PV 6,6 nm

RMS 1,45
+/- 0,23 nm

PV 7,2 nm

RMS 1,50
+/- 0,23 nm

Référence sphérique (RC 75,9mm) (LAM_Spher), diam 40mm, $\lambda/5$



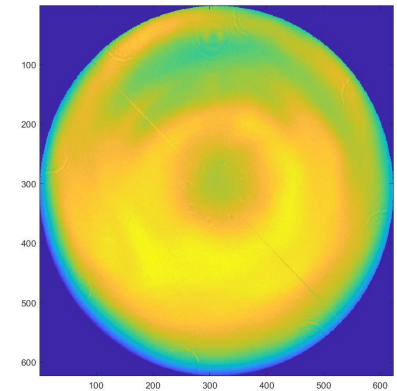
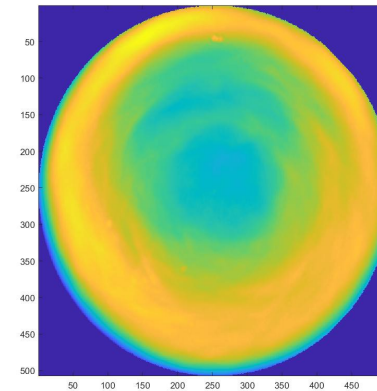
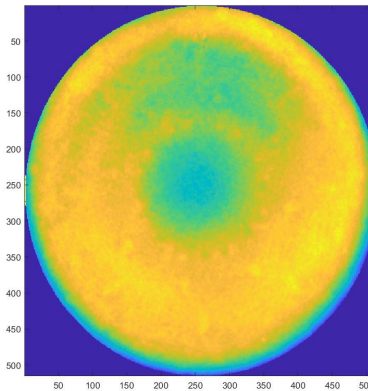
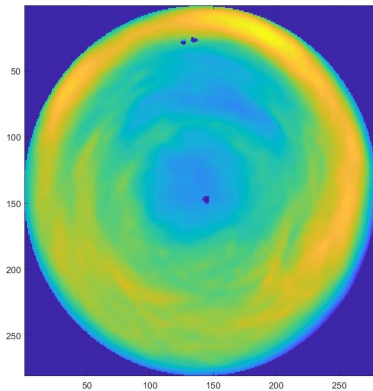
Référence sphérique (RC 75,9mm) (LAM_Spher), diam 40mm, $\lambda/5$

LCF IRM Ref 1,5

LAM H2000

LAM Moller

LAM Z100



PV 144 nm

RMS 19,4
+/- 2,8 nm

PV 151 nm

RMS 20,2
+/- 4,7 nm

PV 136 nm

RMS 21,0
+/- 2,4 nm

PV 130 nm

RMS 21,8
+/- 3,3 nm

Méthode de mesure des surfaces par rotations

- Rotations de la surface mesurée par paliers de 45°
- Réorientation du plan de phase à 0°
- Analyse des erreurs de forme individuelles, puis moyennées par 2, par 4 et par 8.
 - Recherche du meilleur plan ou de la meilleure sphère et de l'erreur résiduelle
- Points d'attention :
 - Rotations précises pour un recouvrement des pixels aux moyennages.
 - Centrages et identifications précises des zones utiles (90%) de la surface pour la même raison.

Méthode de mesure des surfaces par rotations

Référence

Surface à mesurer

Mesure

$S_{\text{ref}}, \sigma_{\text{ref}}$

$S_{\text{surf}}, \sigma_{\text{surf}}$

$S_{\text{mes}}, \sigma_{\text{mes}}$



$$S_{\text{mes}} = S_{\text{surf}} - S_{\text{ref}}$$

Pour des défauts aléatoirement répartis, on a :

$$\sigma_{\text{mes}}^2 = \sigma_{\text{ref}}^2 + \sigma_{\text{surf}}^2 \text{ pour les mesures individuelles}$$

$$\sigma_{\text{mes}}^2 = 1/2 \sigma_{\text{ref}}^2 + \sigma_{\text{surf}}^2 \text{ pour les moyennes par 2}$$

$$\sigma_{\text{mes}}^2 = 1/4 \sigma_{\text{ref}}^2 + \sigma_{\text{surf}}^2 \text{ pour les moyennes par 4}$$

$$\sigma_{\text{mes}}^2 = 1/8 \sigma_{\text{ref}}^2 + \sigma_{\text{surf}}^2 \text{ pour la moyenne des 8}$$

Méthode de mesure des surfaces par rotations

N	Ec
1	4,285
1	4,788
1	5,3207
1	5,153
1	5,314
1	6,558
1	4,940
1	4,117
2	4,218
2	4,877
2	4,932
2	5,764
2	4,960
2	5,071
2	4,275
2	4,293
4	4,379
4	4,893
8	4,493

0°
45°
90°
135°
180°
225°
270°
315°
0 et 90°
45 et 135°
...

0, 90, 180, 270°
45, 135, 225, 315°
Les 8

