

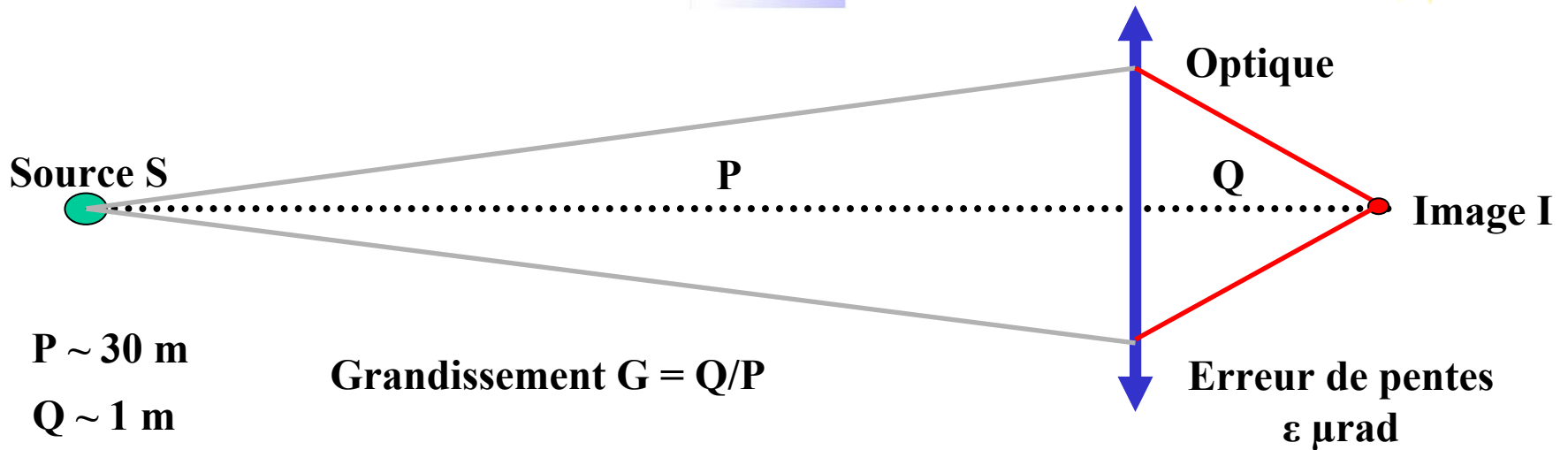


*Imagine Optic*



# **OPTIQUE ACTIVE POUR LES SYNCHROTRONS**

Pascal Mercère  
Synchrotron SOLEIL



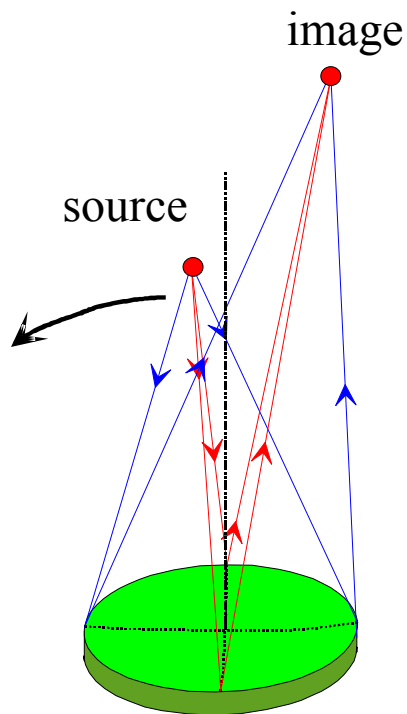
	Section courte	Section moyenne	Aimant de courbure
$\sigma_x$ ( $\mu\text{m}$ )	388	182	60.1
$\sigma_z$ ( $\mu\text{m}$ )	8.1	8.1	24.9
$\sigma_{x'}$ ( $\mu\text{rad}$ )	14.5	30.5	134.8
$\sigma_{z'}$ ( $\mu\text{rad}$ )	4.6	4.6	2.1

### Taille image

Convolution

- Image géométrique de la source
- Erreurs de forme de l'optique de focalisation  
(facteur limitant)

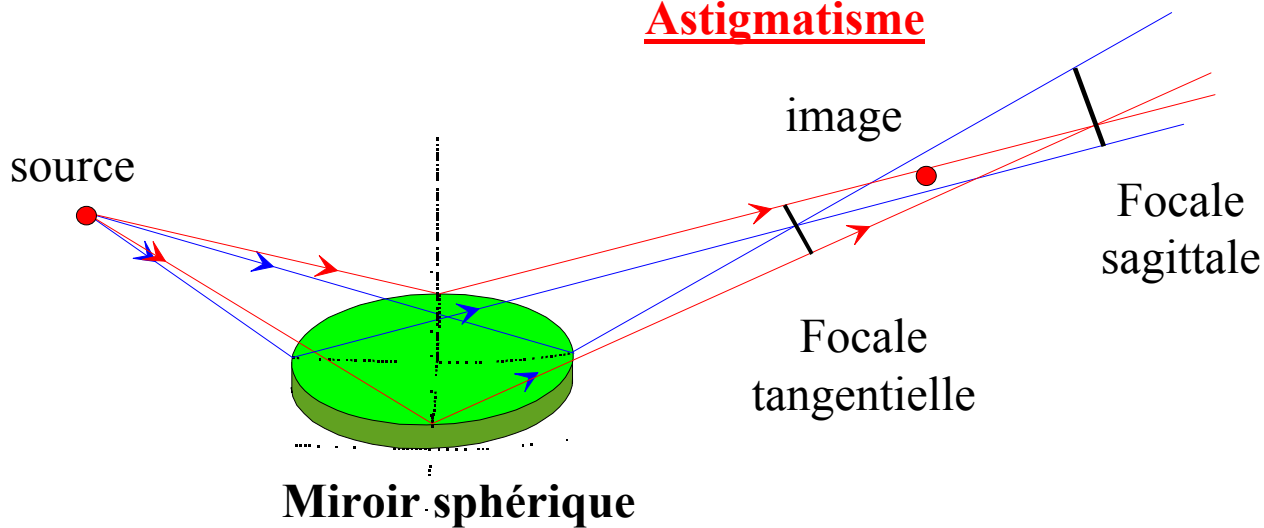
### Optiques de focalisation



Miroir sphérique

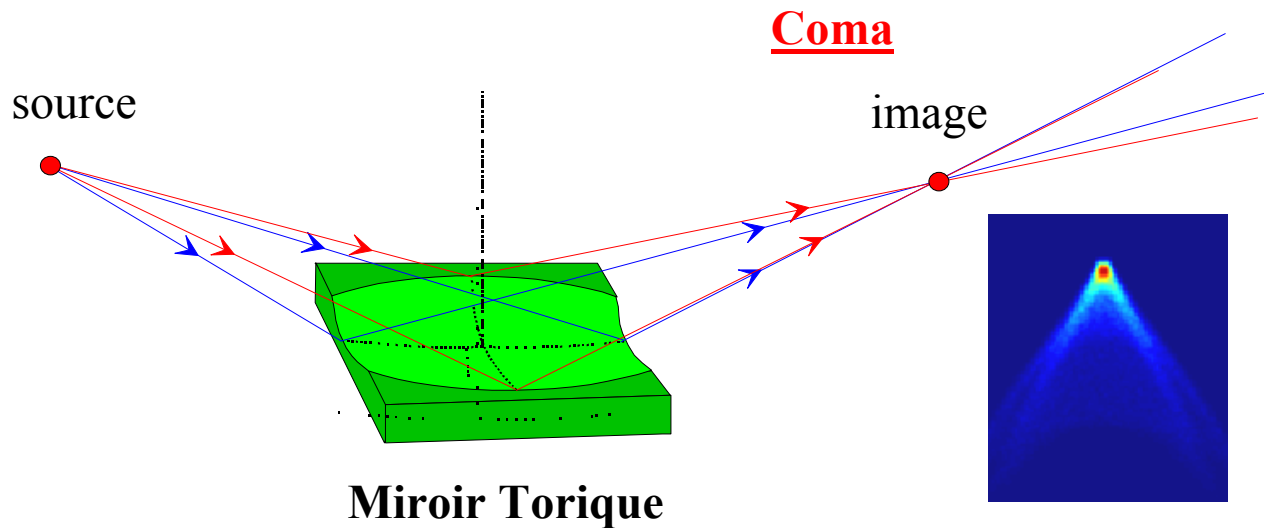
Quasi-stigmatique en incidence normale

### Astigmatisme



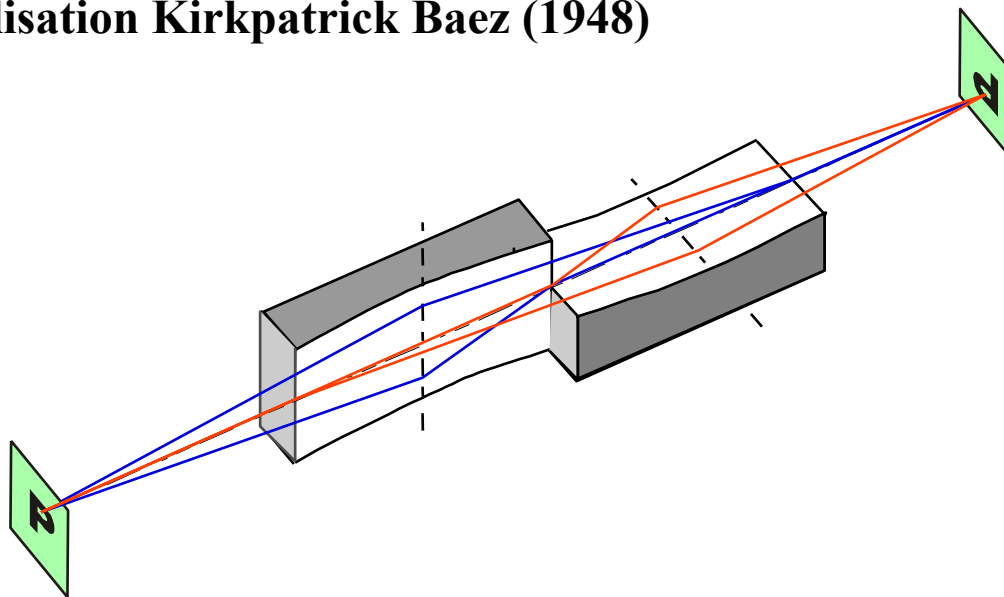
Miroir sphérique

### Coma

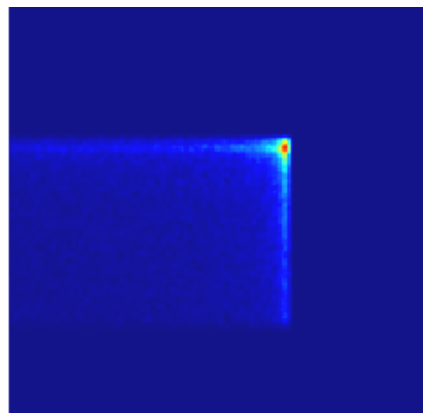


Miroir Torique

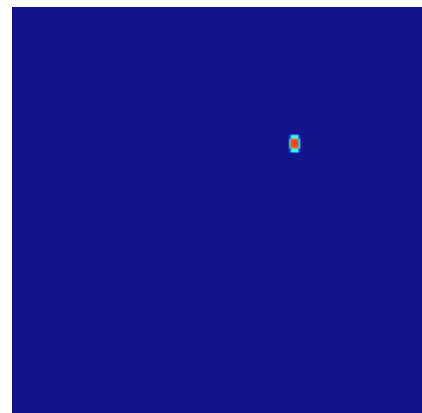
## Miroirs de focalisation Kirkpatrick Baez (1948)



**KB cylindrique**

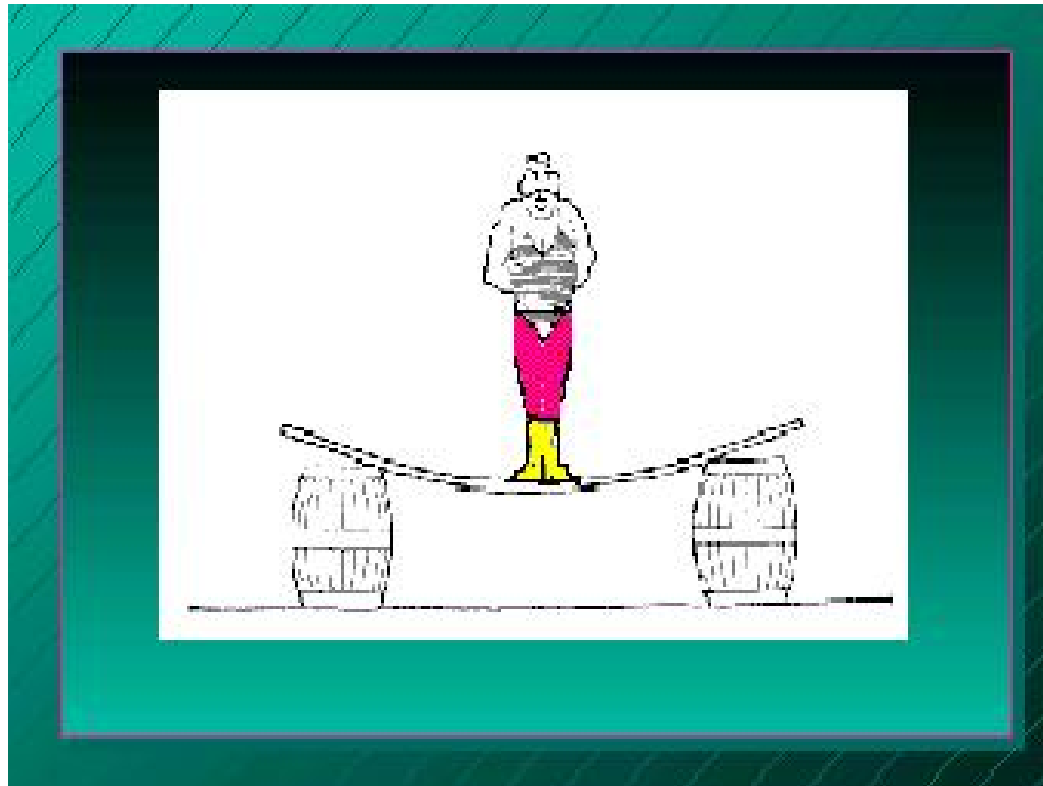


**KB elliptique**



Les miroirs elliptiques sont difficiles à réaliser dans la masse avec de très bonnes spécifications en terme d'erreurs de forme ( $<1 \mu\text{rad rms}$ ) et de rugosité ( $\sim 1 \text{ \AA rms}$ )

**SOLUTION** → partir d'un miroir plan et le contraindre de manière à approcher la forme elliptique

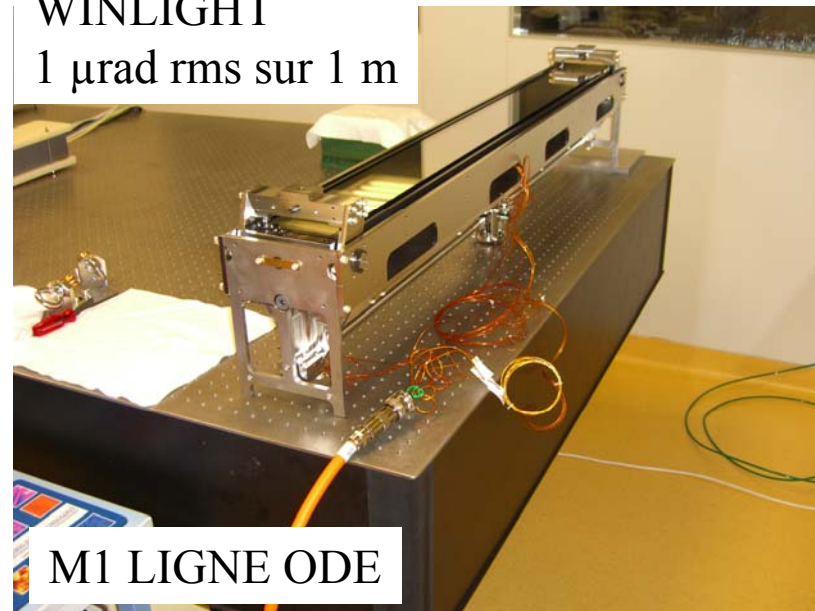


SYNCHROTRONIX  
0.7  $\mu$ rad rms sur 170 mm



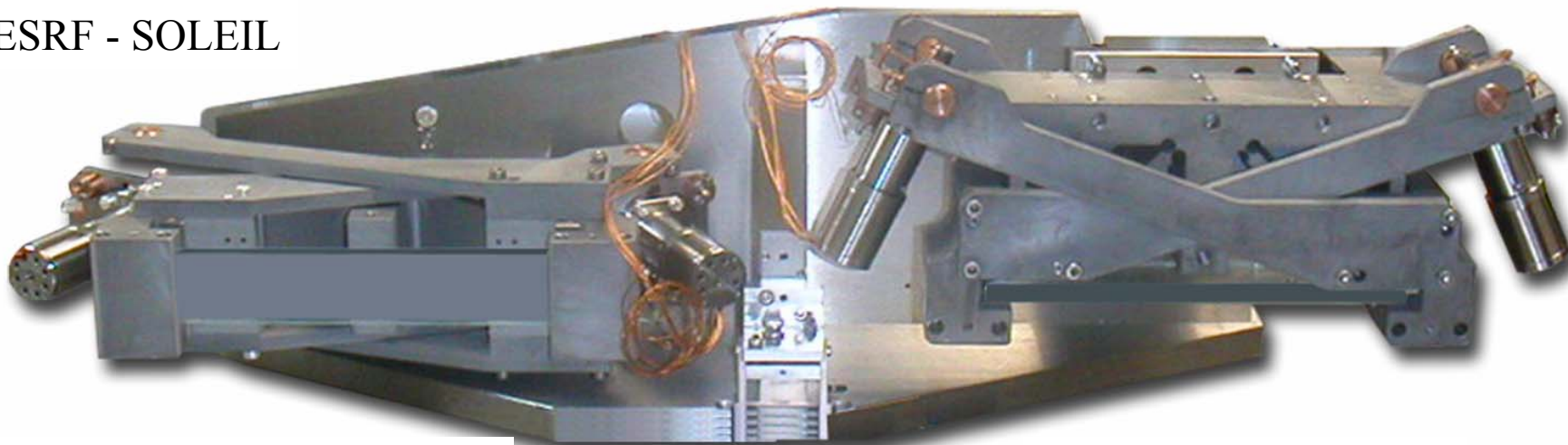
M3 LIGNE METROLOGIE

WINLIGHT  
1  $\mu$ rad rms sur 1 m



M1 LIGNE ODE

ESRF - SOLEIL



KB ACTIF – LIGNE LUCIA

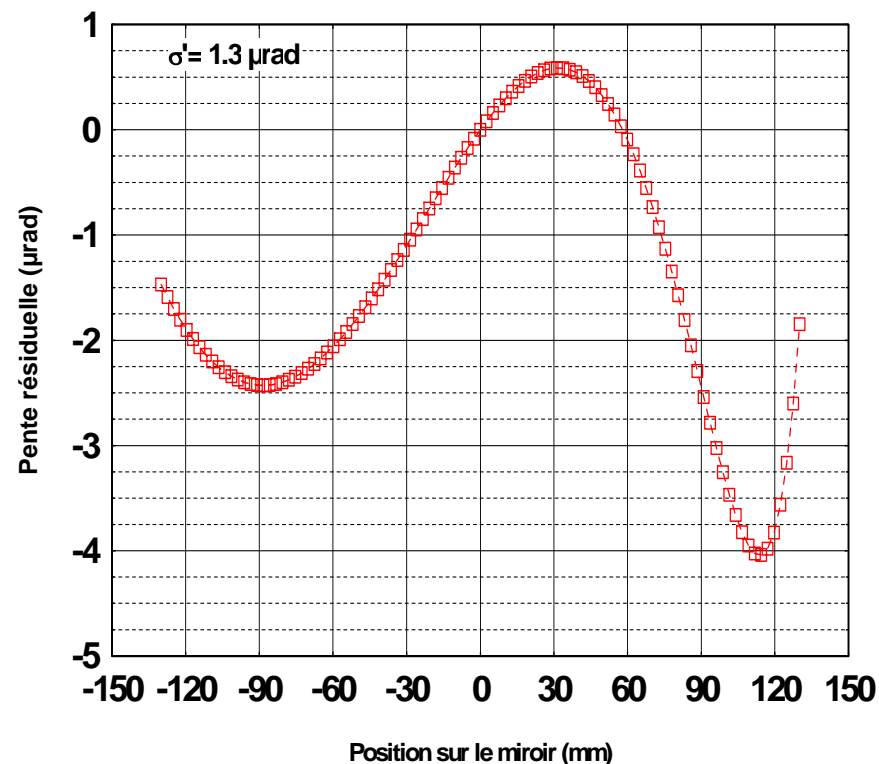
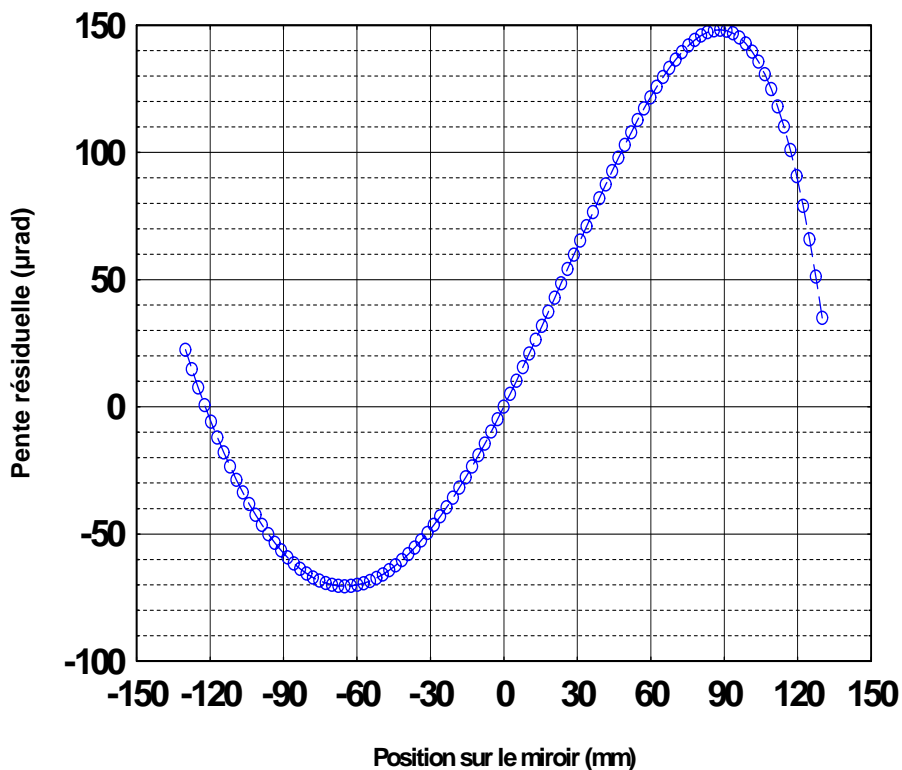
1  $\mu$ rad rms sur 170 mm

$P = 31000 \text{ mm} / Q = 250 \text{ mm} / \theta = 4.36 \text{ mrad}$



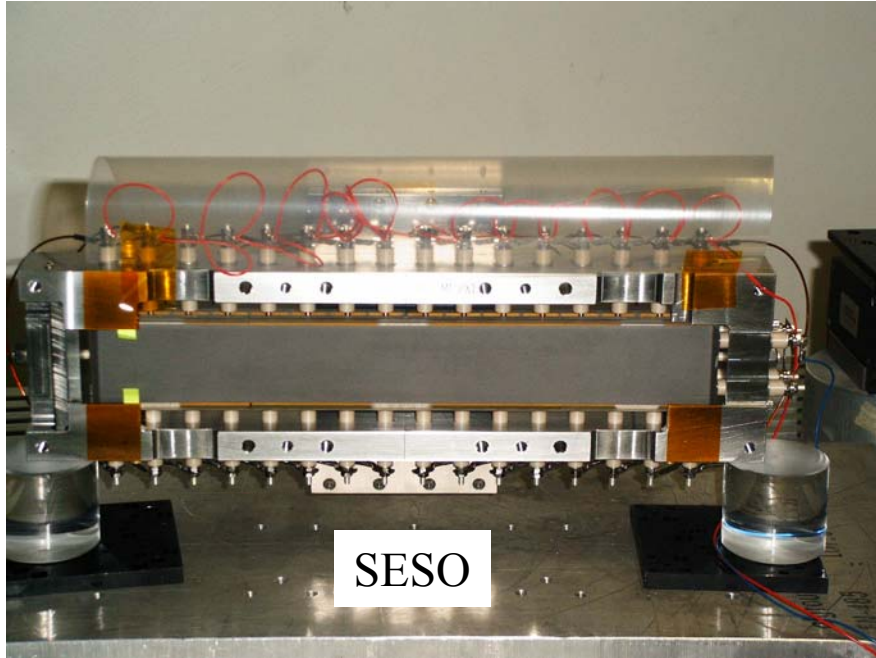
Erreurs de pente résiduelles = 78  $\mu\text{rad rms}$

Erreurs de pente résiduelles = 1.3  $\mu\text{rad rms}$

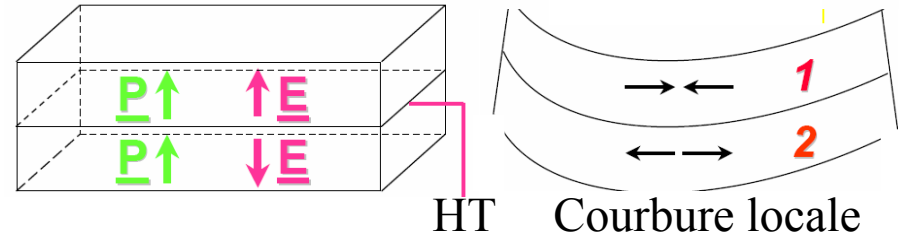
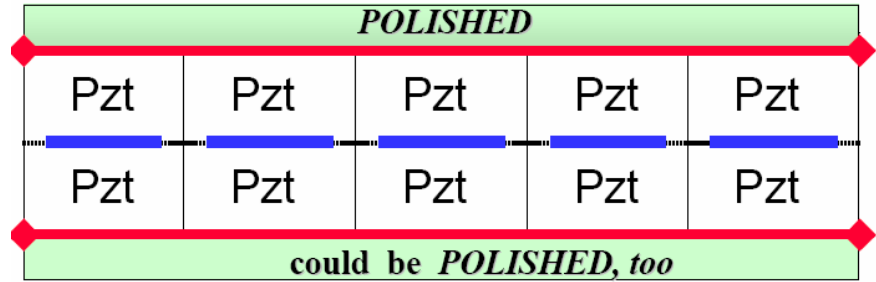




Miroir bimorphe - 16 électrodes - Ligne PX 1



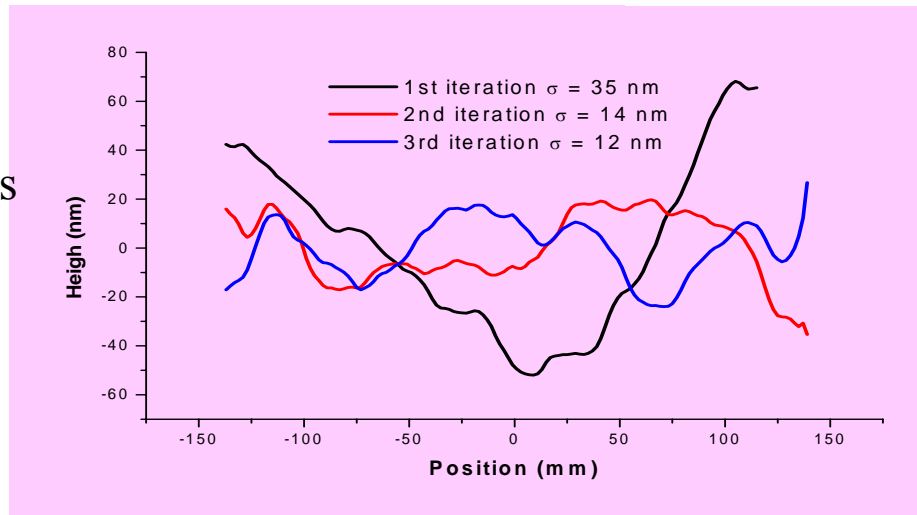
SESO



Available bimorph mirrors lengths:  
100/150/200/300/450/600/750/900/1050/1200/1350/1500 mm

Driving Electrodes length from 140 mm down to < 20 mm

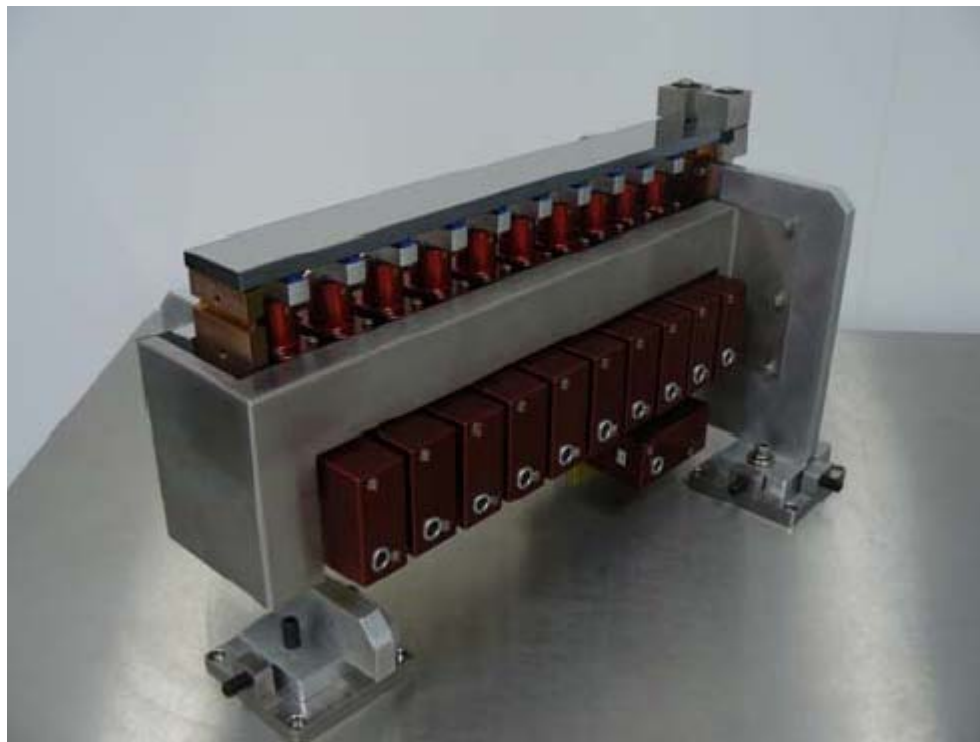
$\sigma = 0.6 \mu\text{rad rms}$   
sur 250 mm



Faible dynamique en courbure  
Temps de mise en position  
(5 à 15 min/électrode)  
Instabilités et Dérives  
Haute tension 2000V



## MIROIR ACTIF POUR RAYONS X MARX



## PROJET MARX

### Objectifs

- Développement d'un miroir actif à base d'actionneurs mécaniques pour la micro- et la nano-focalisation des faisceaux de rayons X
- Développement d'un senseur de front d'onde rayons X pour l'alignement in-situ

Début du projet      Janvier 2006

### Partenaires

- SOLEIL :                    Management, expertise et mise en oeuvre sur rayonnement synchrotron
- ISP SYSTEM :            Développement du miroir actif
- IMAGINE OPTIC :        Développement du senseur de front d'onde

### Financement

50% ANR

50% Partenaires du projet

## PROJET MARX

### Conditions

→ Démagnification de la source  $> 100$

$P = 35000 \text{ mm} / Q = \text{de l'infini à } 300 \text{ mm} / \Theta = 0.25^\circ$

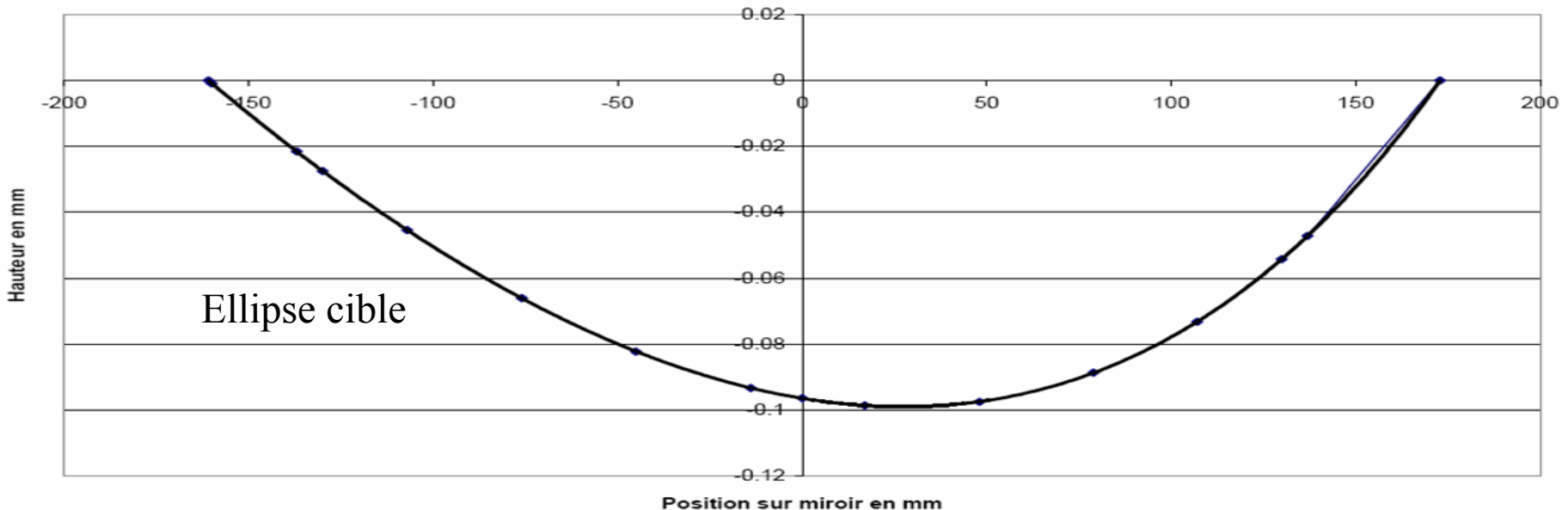
Courbure de 100 m (flèche de l'ordre de  $100 \mu\text{m}$ )

→ Large gamme d'ellipses disponible

→ Longueur utile de l'ordre de 300 mm

→ Erreurs de pentes en correction  $\sim 0.5 \mu\text{rad rms}$

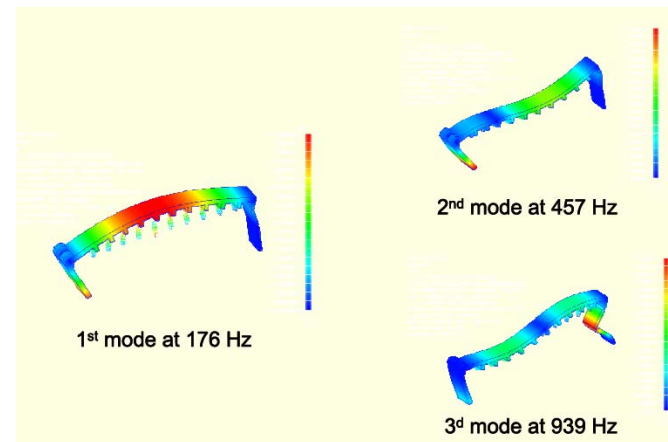
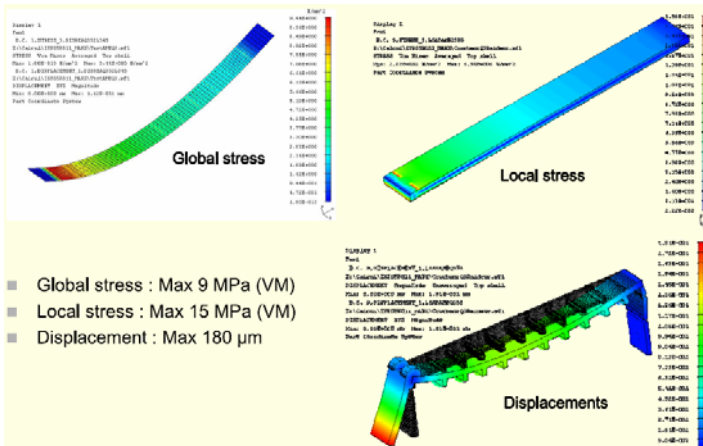
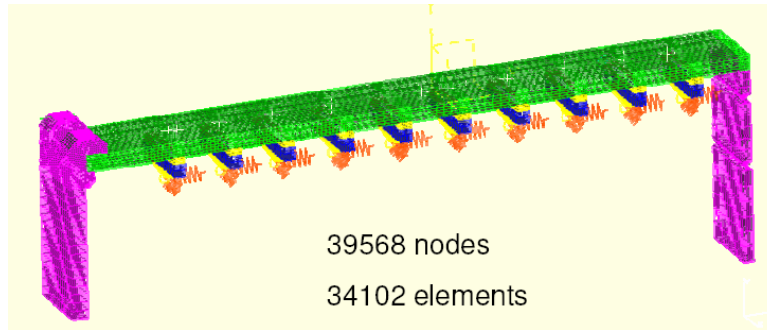
→ Dynamique suffisante pour permettre la correction des défauts de polissage du miroir, ainsi que les aberrations du système optique et du faisceau X incident.



$$y = 4.867354E-17x^6 + 2.051636E-14x^5 + 7.638995E-12x^4 + 4.380278E-09x^3 + 3.147065E-06x^2 - 1.828971E-04x - 9.642216E-02$$

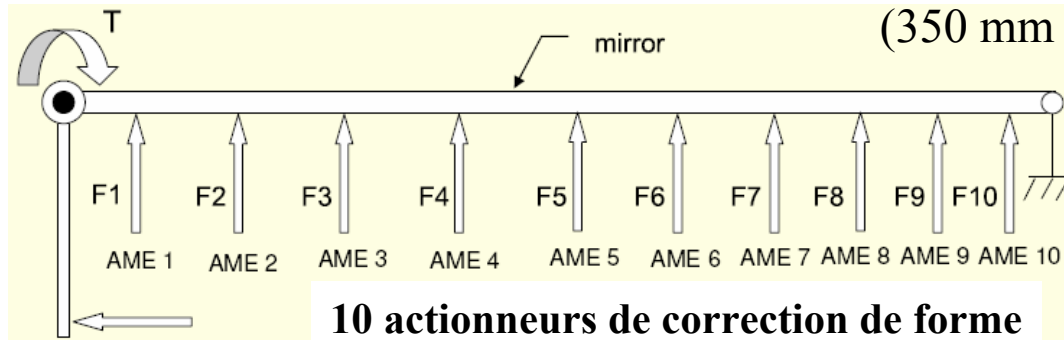
## ANALYSE PAR ELEMENTS FINIS

- Pour déterminer les caractéristiques du miroir (matériau, géométrie, dimensions).
- Pour déterminer les caractéristiques des actionneurs (force, résolution).
- Pour optimiser le nombre d'actionneurs et leur positions le long du miroir.
- Pour évaluer le niveau de stress du miroir (au repos et sous contraintes).
- Pour évaluer la dynamique et les modes propres du système.



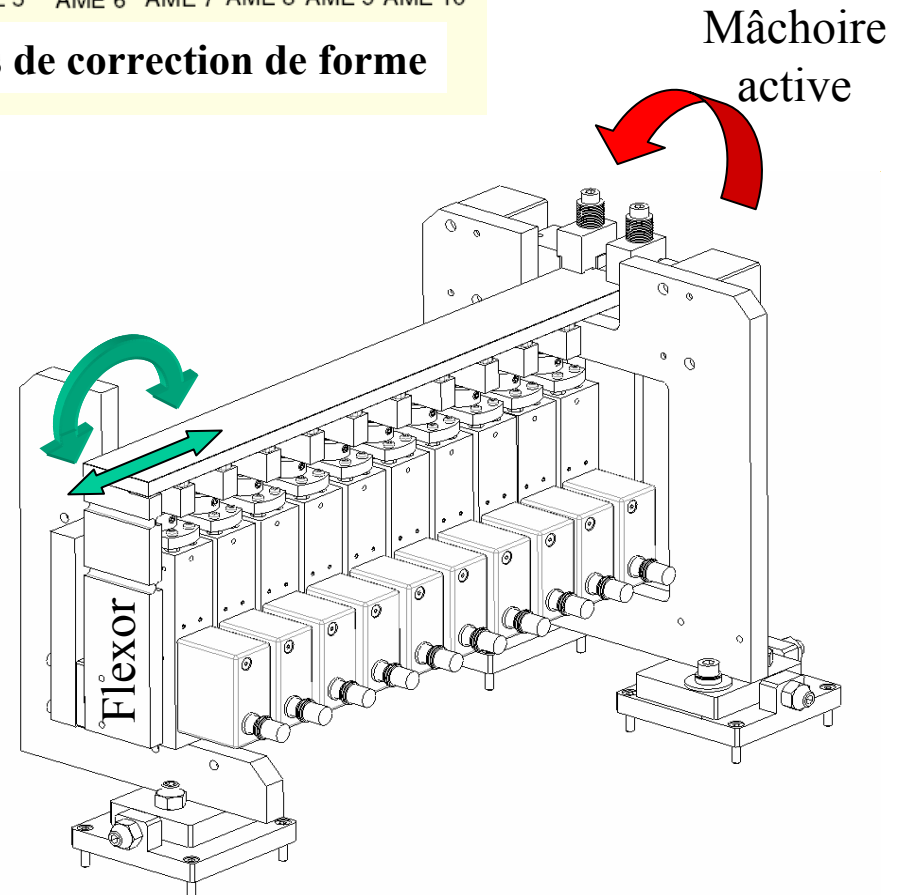
## PRINCIPE

Plan rectangulaire en Silicium  
(350 mm × 40 mm × 8 mm)



### 1 actionneur de courbure

- Conception permettant de générer naturellement une forme elliptique avec un seul actionneur de courbure (**brevet ISP**).
- Une extrémité du miroir est maintenue par un flexor (autorisant rotation et translation), l'autre par une mâchoire active.
- Les actionneurs de correction de forme sont fixés à des patins souples, collés en face arrière du miroir. Ces patins permettent de limiter les effets d'empreintes.



## Actionneur AME

- Basé sur un moteur pas-à-pas.
- Tête flottante maintenue par des ressorts
- Patin souple (Al/PU) pour limiter les effets d'empreintes
- Force : +/- 30 N
- Répétabilité : 10 mN
- Hystérésis : 0.1%
- Calibré en absolu
- Pas de dérive dans le temps
- Facilité de maintenance, chaque actionneur pouvant être remplacé individuellement

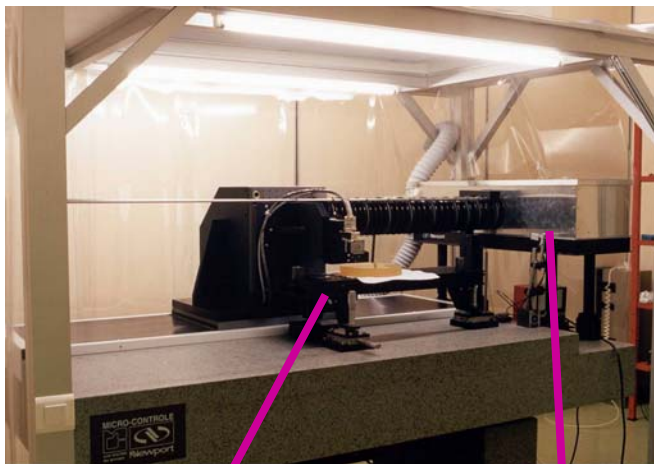
## Brevet ISP



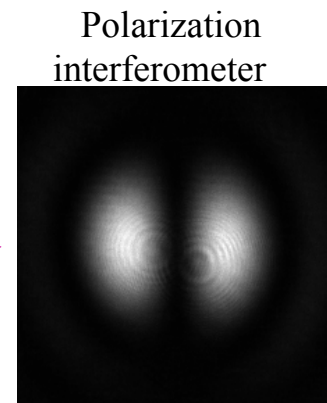
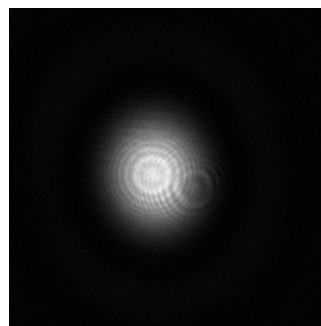
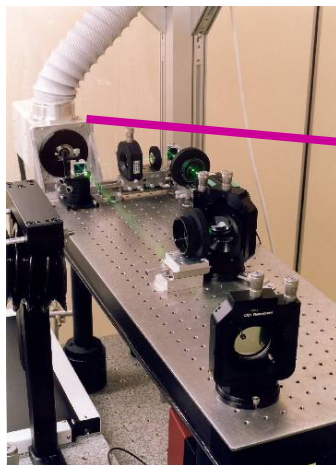
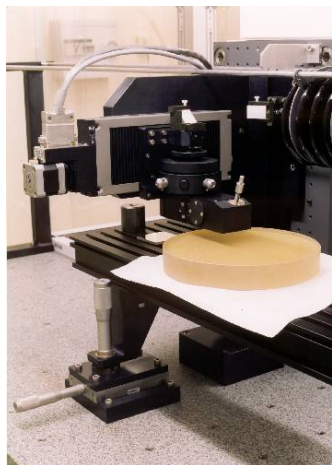
AME20 used for lasers, primed at MICRONORA 2006 (international exhibition of micro mechanic industry)

## METROLOGIE DU MIROIR NU

### Long Trace Profiler (LTP) – Laboratoire de Métrologie Optique de SOLEIL



- Mesure des pentes locales en 1D.
- Mesure de miroirs face dessus, dessous ou sur le côté.
- Longueur maximum des miroirs : 1 m.
- Précision : courbure 0.3% / erreurs de pentes 0.2  $\mu$ rad r.m.s.
- Calibration : sur surface plane de référence - précision : 0.1 %.
- Rayons de courbure : de 3 m à l'infini.
- Mesure de densité de traits des réseaux.
- Reconstruction de surfaces 2D par algorithme Stitching.



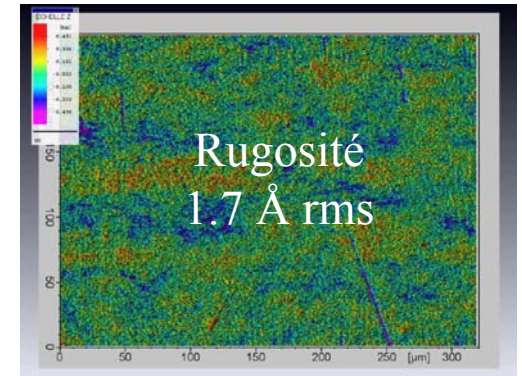


## Mesure LTP du miroir seul

Dimensions du miroir: 350 mm × 40 mm × 8 mm

3 traces espacées de 10 mm

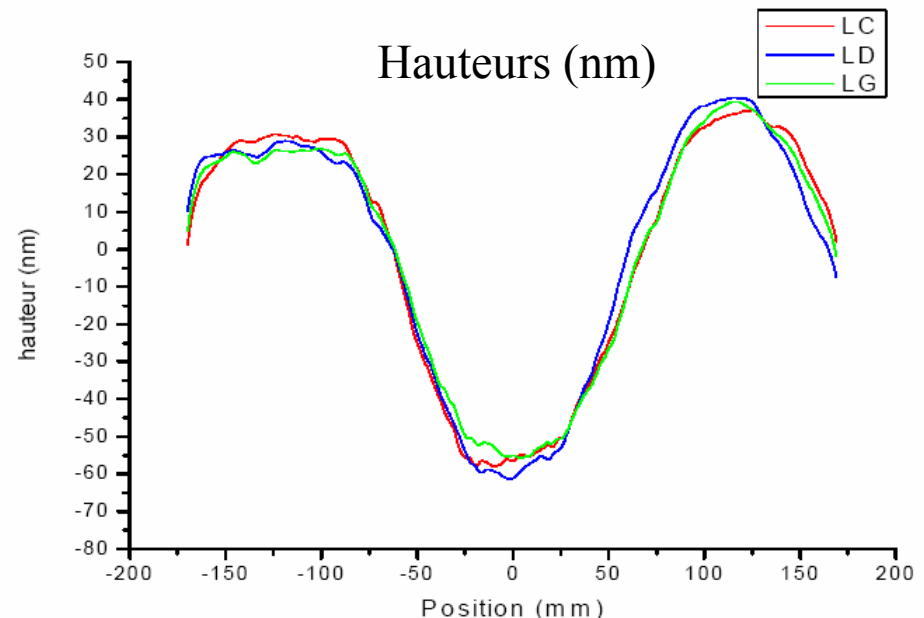
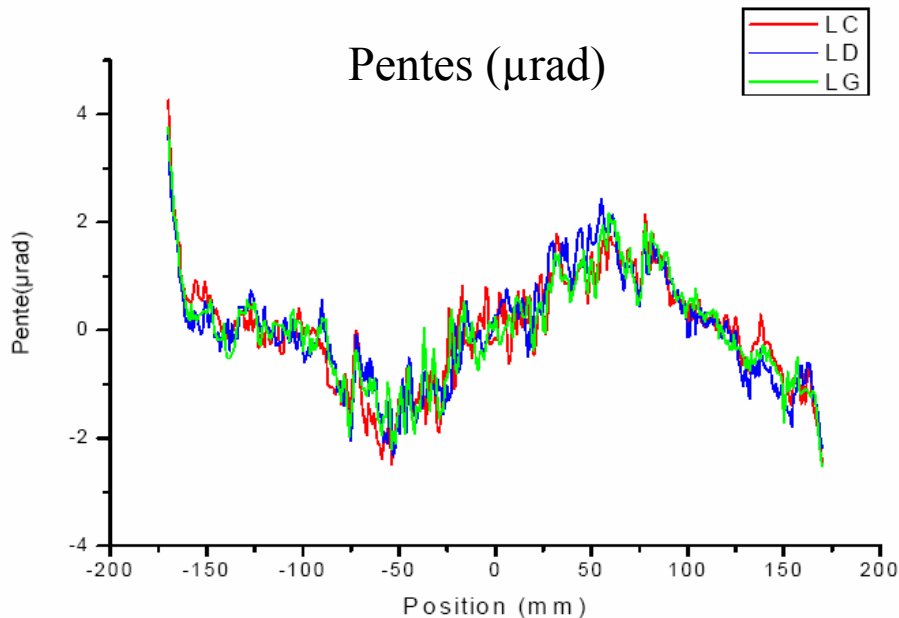
Mesures sur 340 mm par pas de 1 mm



LD:  $R = 10.06 \text{ km}$      $\sigma = 1 \text{ } \mu\text{rad rms}$

LC:  $R = 10 \text{ km}$      $\sigma = 1 \text{ } \mu\text{rad rms}$

LG:  $R = 9.6 \text{ km}$      $\sigma = 1 \text{ } \mu\text{rad rms}$

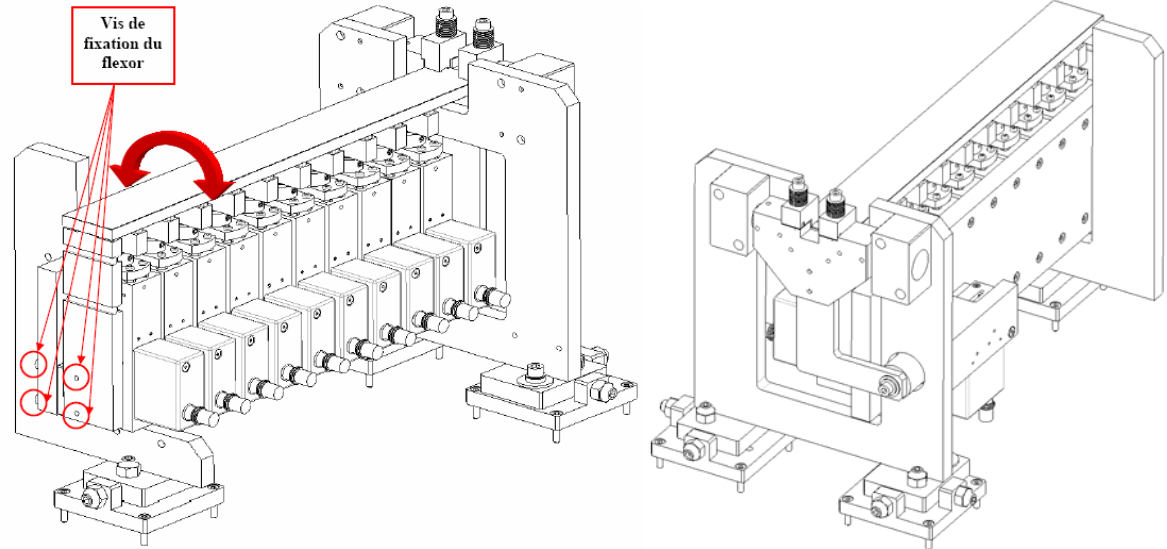


## METROLOGIE DU SYSTEME MARX

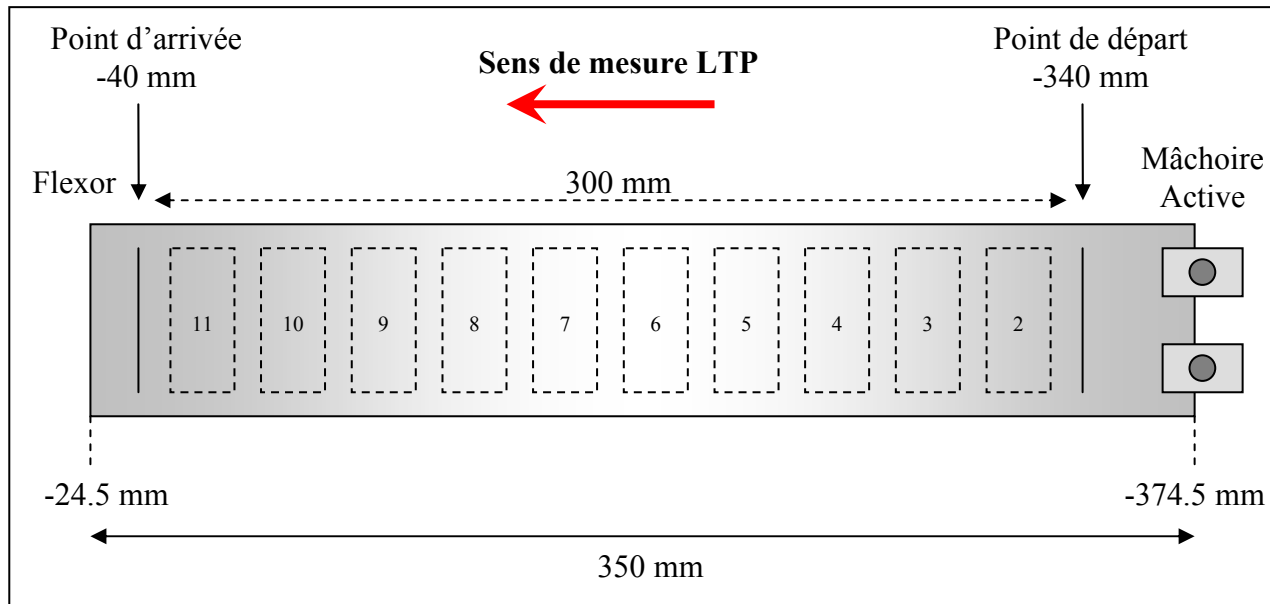
### Alignement du miroir

#### Réglage du twist

- sur tête interférométrique
- sur LTP

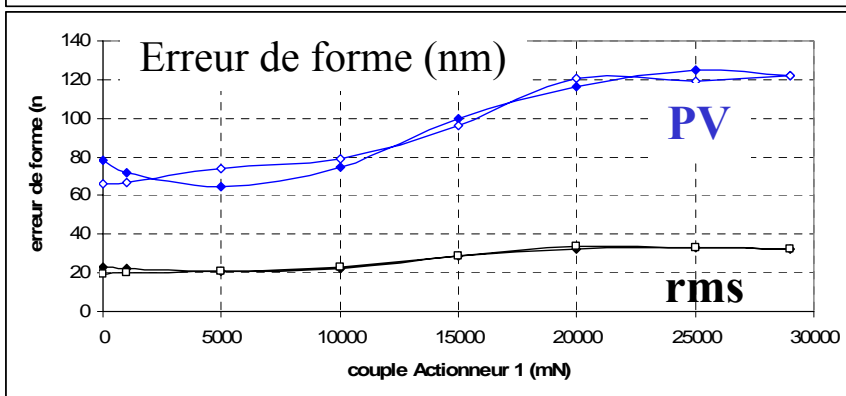
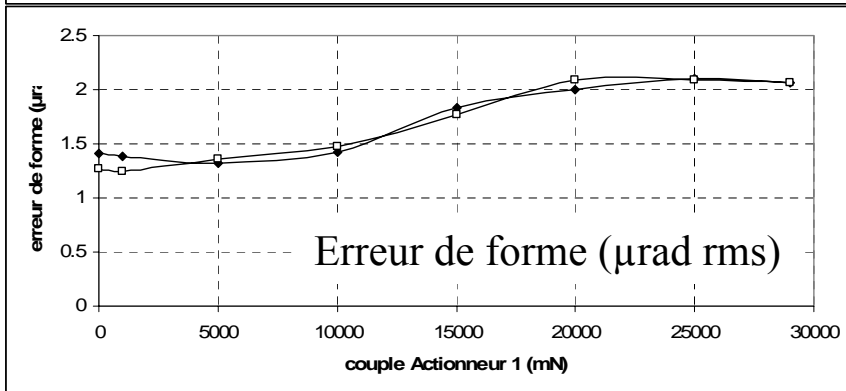
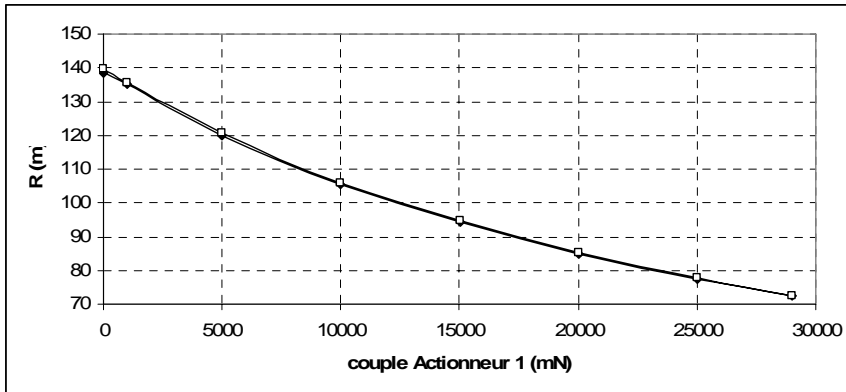


### Mesures LTP

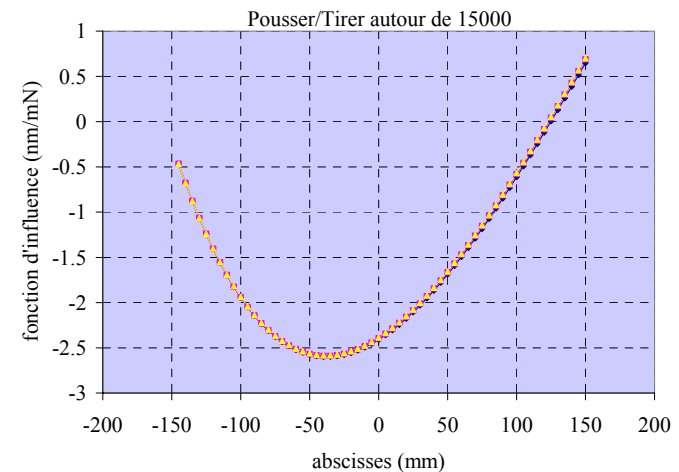
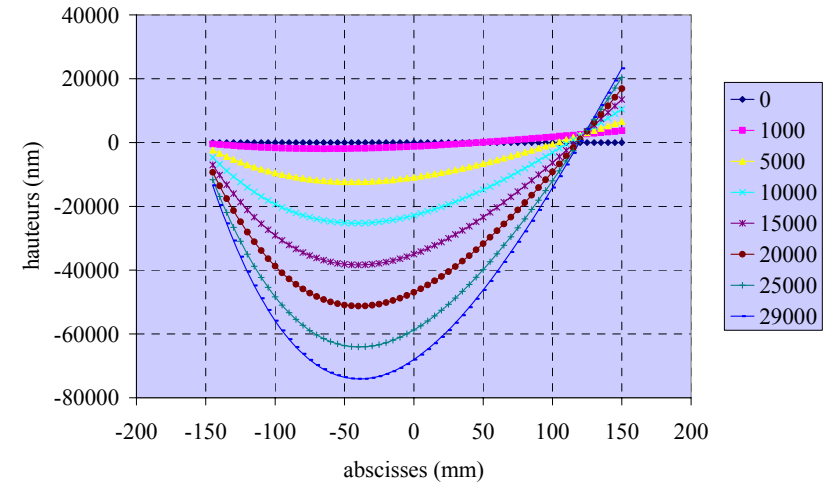


**Mesures sur 300 mm  
par pas de 1 mm**

## Actionneur de courbure



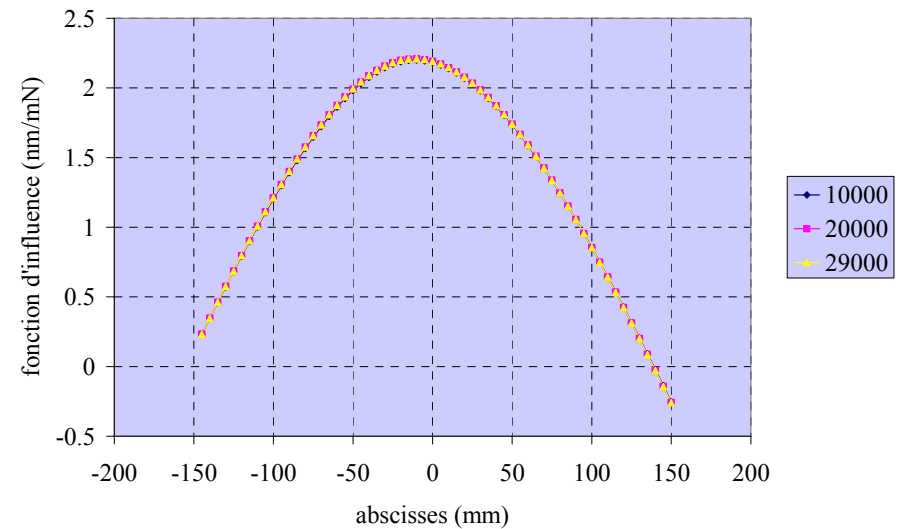
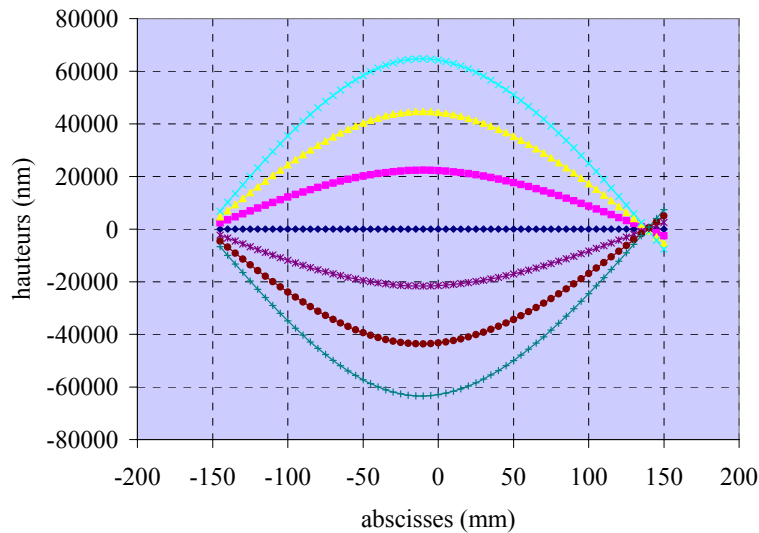
Le miroir est précontraint ( $R = 140$  m)  
 Dynamique de 140 à 72 m  
 (variation de flèche de 80 à 160 μm)



## Actionneurs de correction de forme

→ Cas de l'actionneur n°6

## FONCTIONS D'INFLUENCE



Mesures successives pour différentes valeurs de force appliquée sur l'actionneur n°6 (la surface du miroir au repos est soustraite)

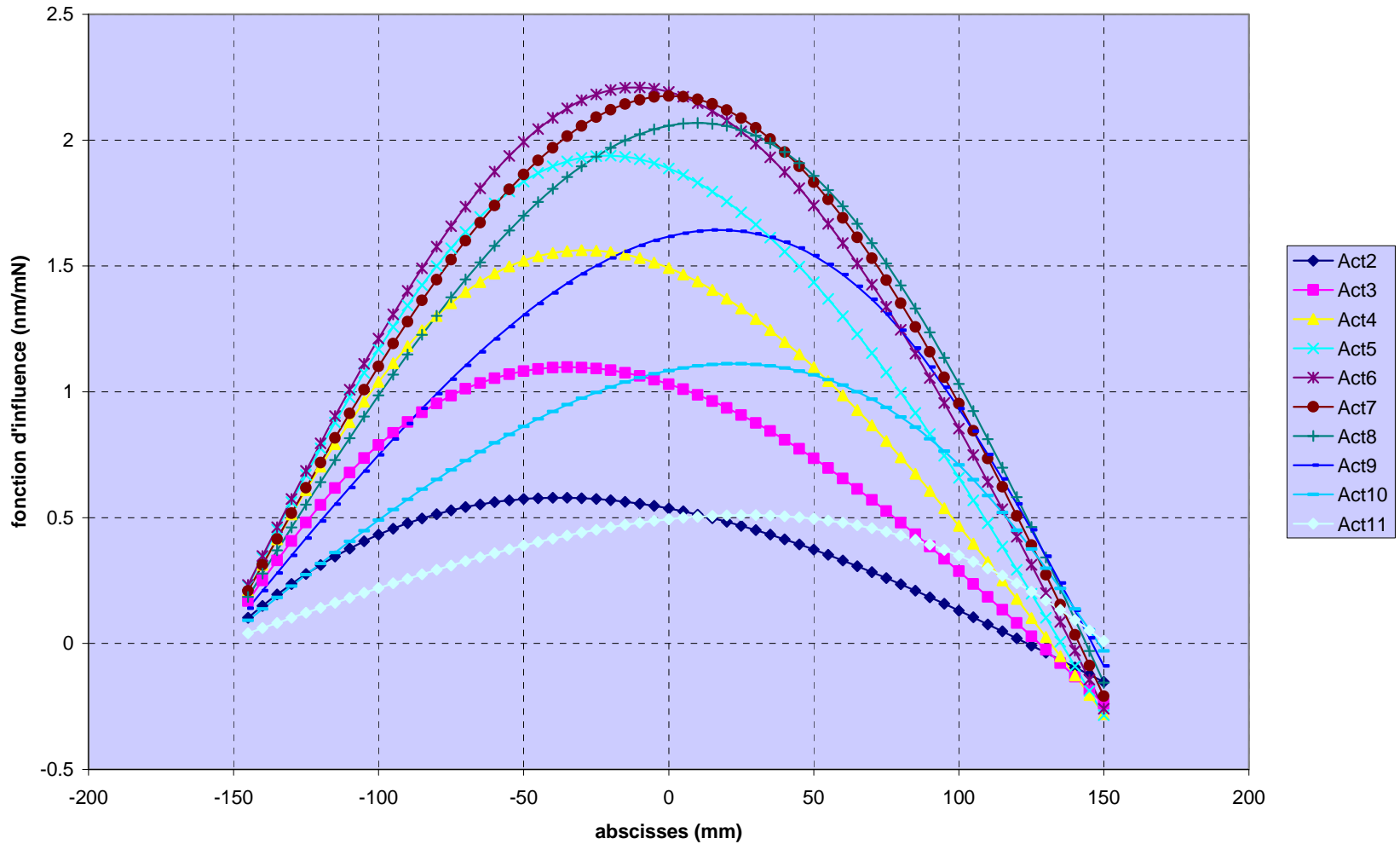
→ Les déformations de surfaces apparaissent symétriques.

Fonctions d'influence identiques pour des valeurs de Pousser/Tirer différentes

→ Système linéaire

## Actionneurs de correction de forme

## FONCTIONS D'INFLUENCE

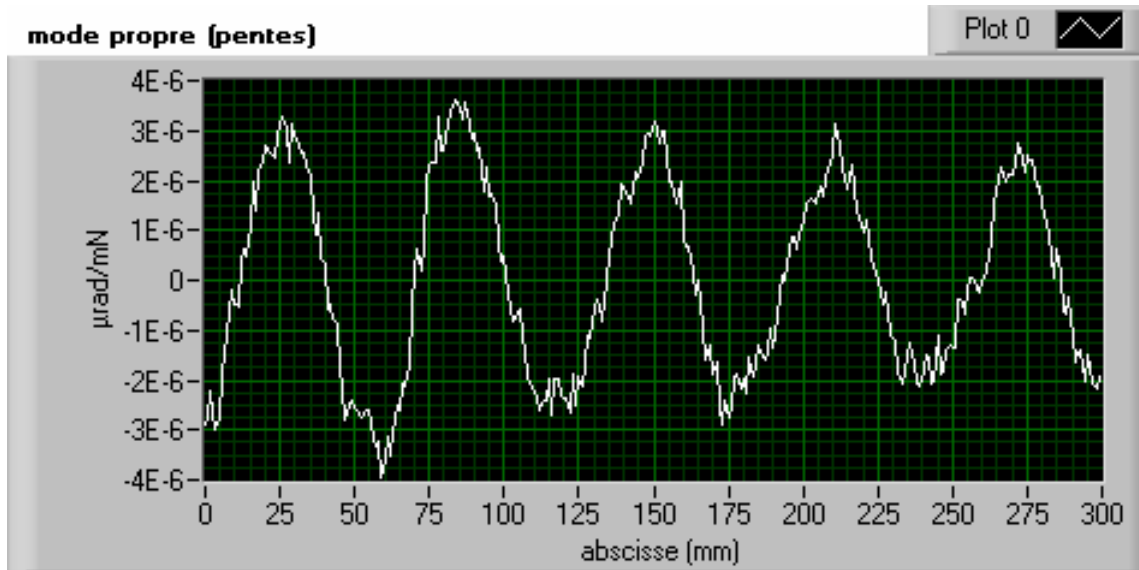


Les actionneurs de bord déforment la surface 4 fois moins ( $\sim 0.5$  nm/mN) que ceux du centre ( $\sim 2$  nm/mN).

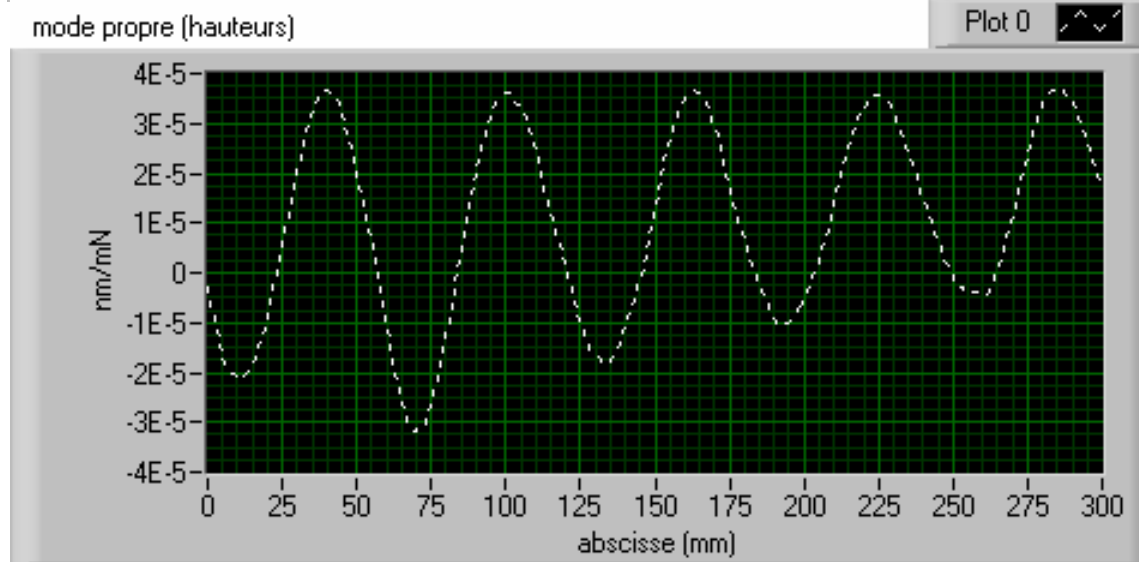
Actionneurs de correction de forme

**MODES PROPRES**

PENTES

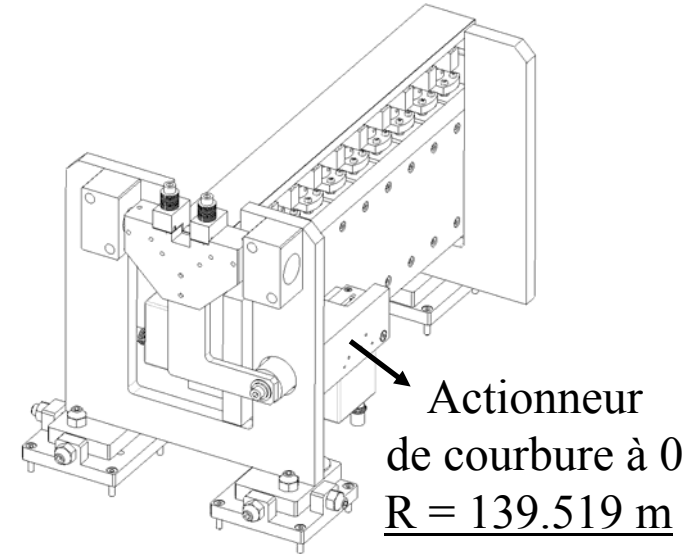
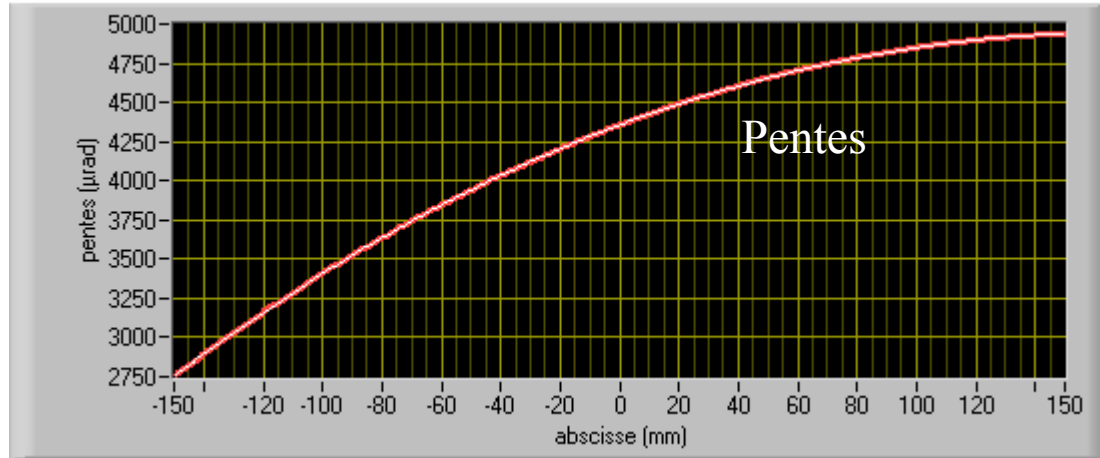


HAUTEURS

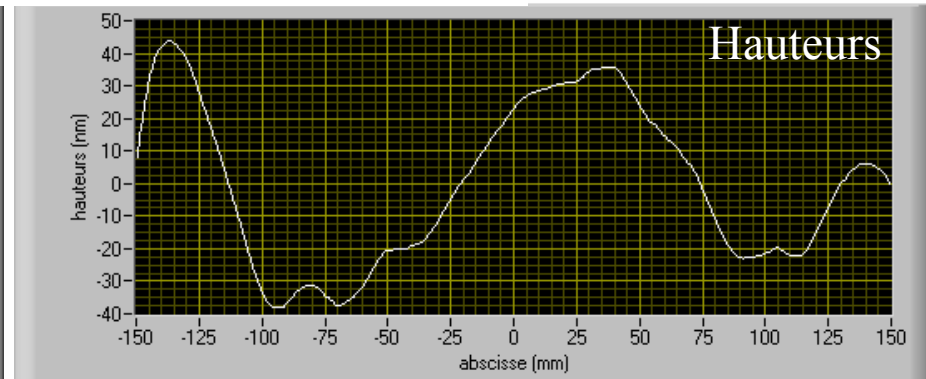
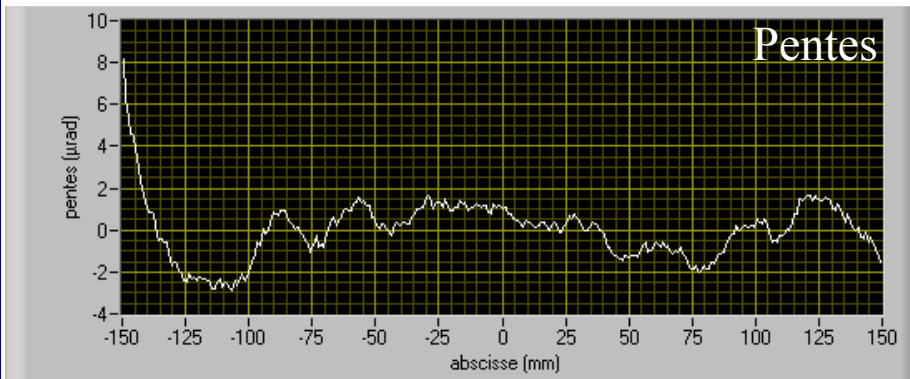


Mesure du miroir "au repos" (tous les actionneurs à 0)

$R = 139.519 \text{ m}$  / Polynôme  $(x) = (6.861348E-6)x^3 + (-2.265158E-2)x^2 + (7.144831E+0)x + (4.354531E+3)$



$R = 139.519 \text{ m}$  /  $\sigma = 1.421 \text{ } \mu\text{rad rms}$  /  $h = 24.5 \text{ nm rms}$  /  $H = 81.9 \text{ nm PV}$



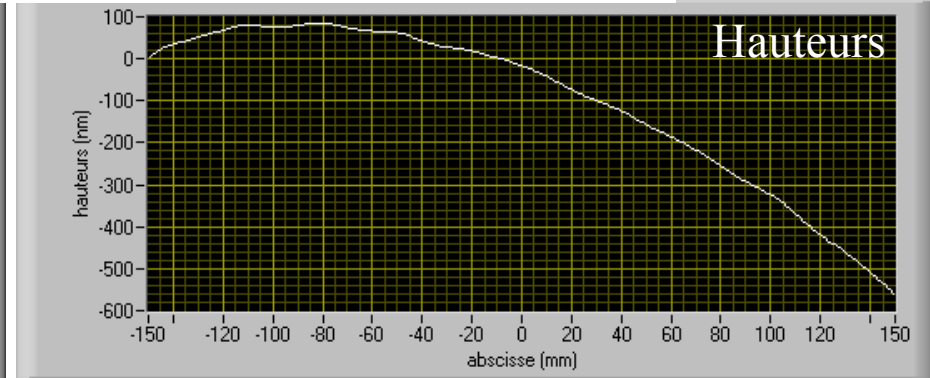
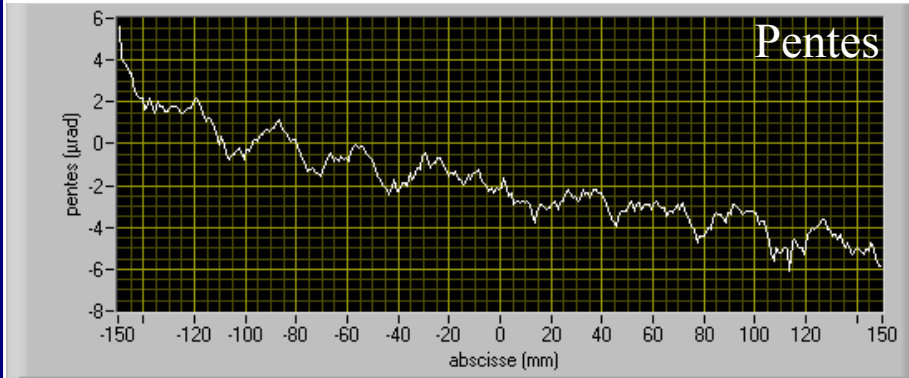


## Correction sur les 10 actionneurs de forme

(Couples entre -7N et +6N)

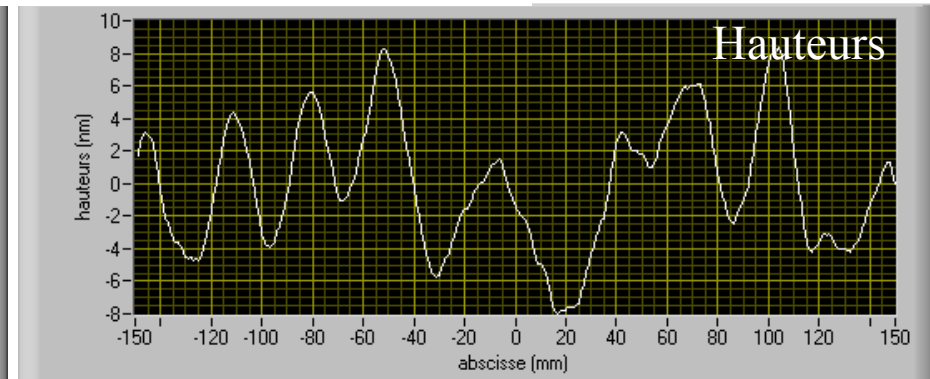
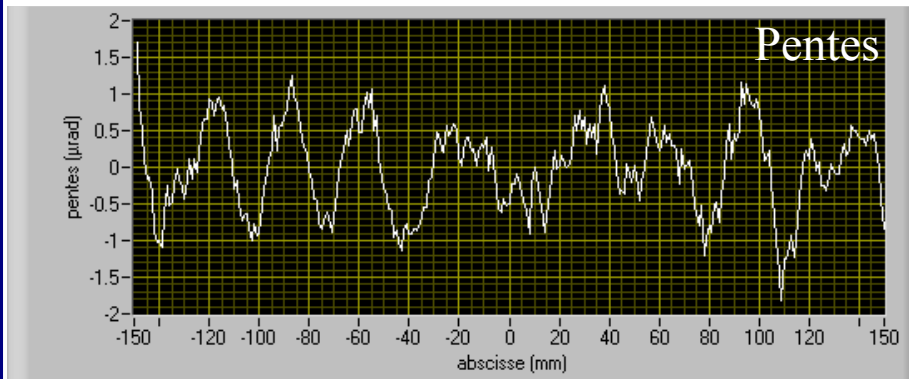
### Résiduel de forme par rapport à la consigne

$R = 139.519 \text{ m} / \sigma = 2.186 \text{ } \mu\text{rad rms} / h = 189.465 \text{ nm rms} / H = 643.172 \text{ nm PV}$



### Résiduel de forme par rapport au meilleur fit elliptique

$R = 139.6 \text{ m} / \sigma = 0.59 \text{ } \mu\text{rad rms} / h = 3.921 \text{ nm rms} / H = 16.317 \text{ nm PV}$

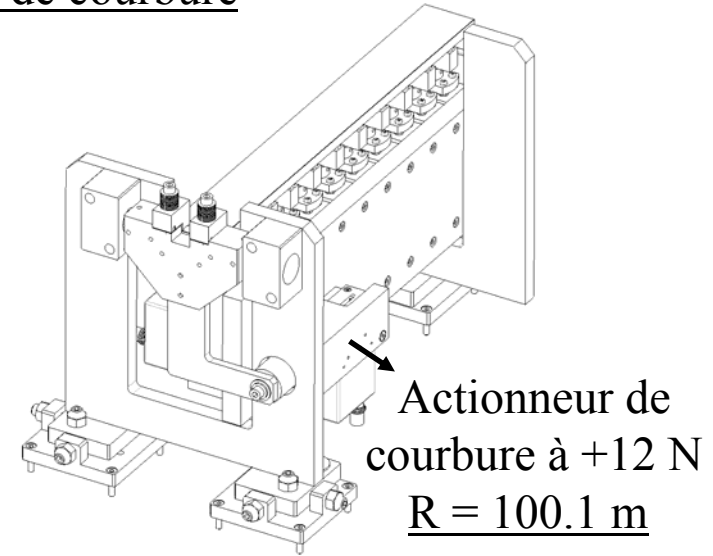
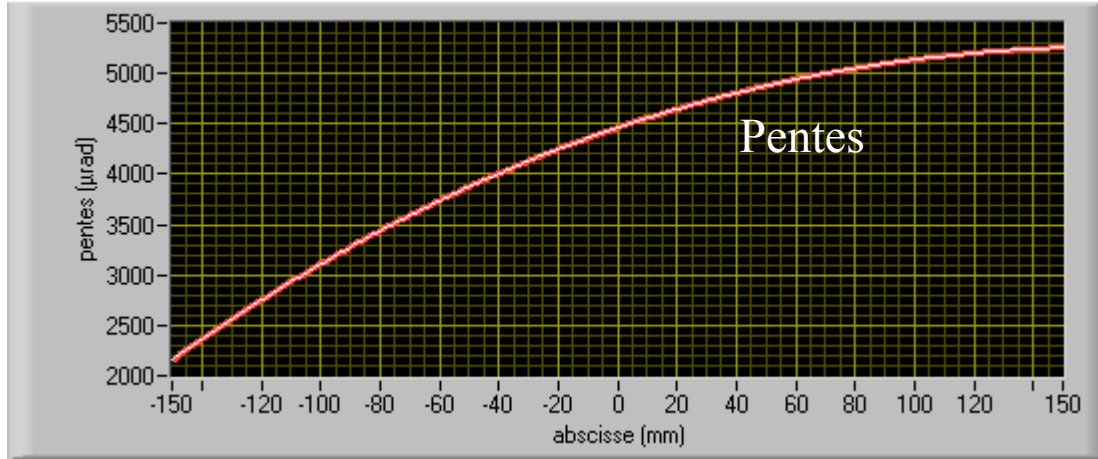


→ Correction en 1 seule itération du résiduel de forme

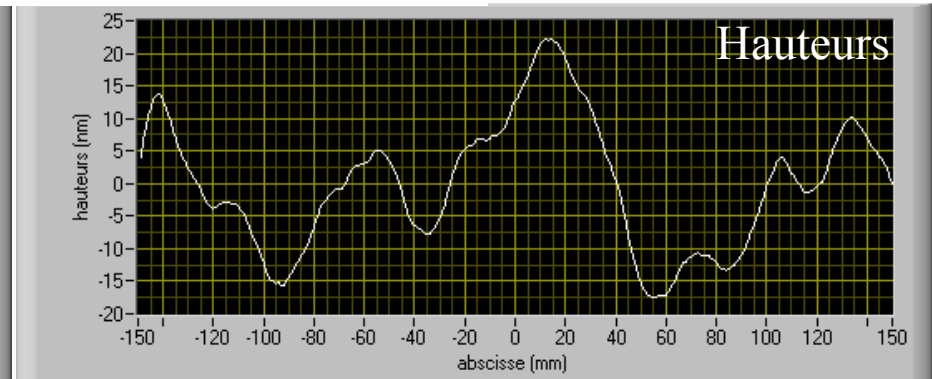
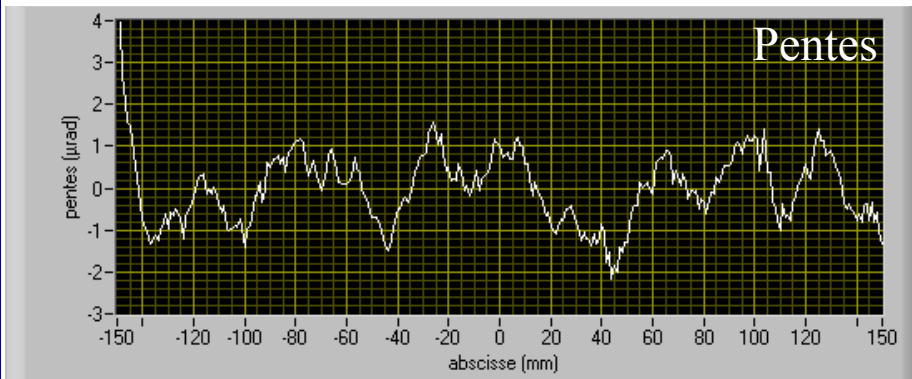
→ Légère dérive en courbure pouvant être corrigée par l'actionneur de courbure

## Miroir maintenu en correction et courbé à 100 m de rayon de courbure

$R = 100.1 \text{ m}$  / Polynôme  $(x) = (1.707792E-5)*x^3 + (-3.372105E-2)*x^2 + (9.985369E+0)*x + (4.459692E+3)$



$R = 100.1 \text{ m}$  /  $\sigma = 0.84 \text{ } \mu\text{rad rms}$  /  $h = 9.86 \text{ nm rms}$  /  $H = 39.66 \text{ nm PV}$



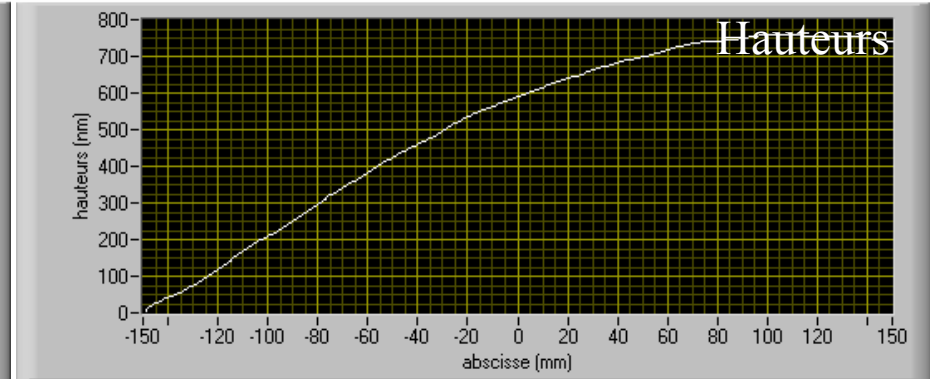
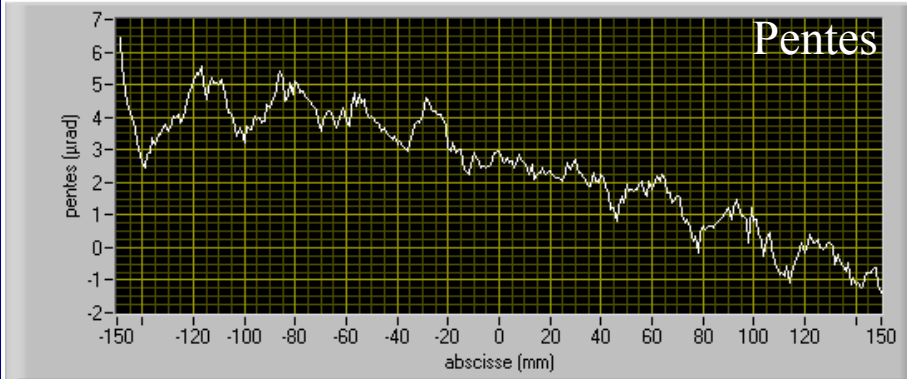
Faible dégradation du résiduel de forme

## Correction sur les 10 actionneurs de forme

(Couples entre -10N et +9N)

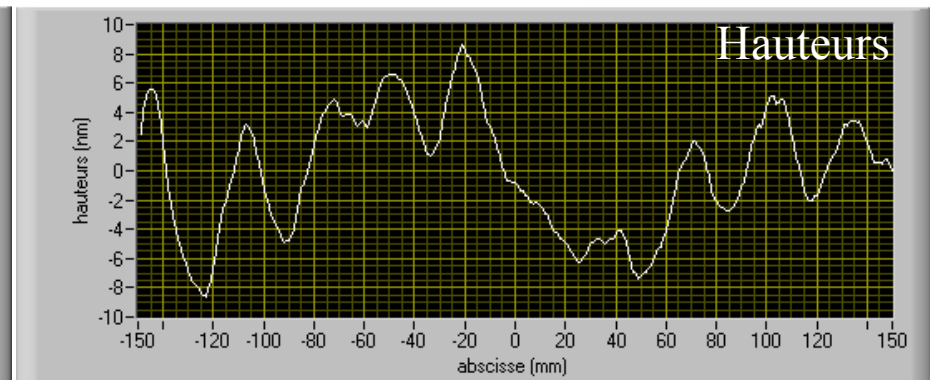
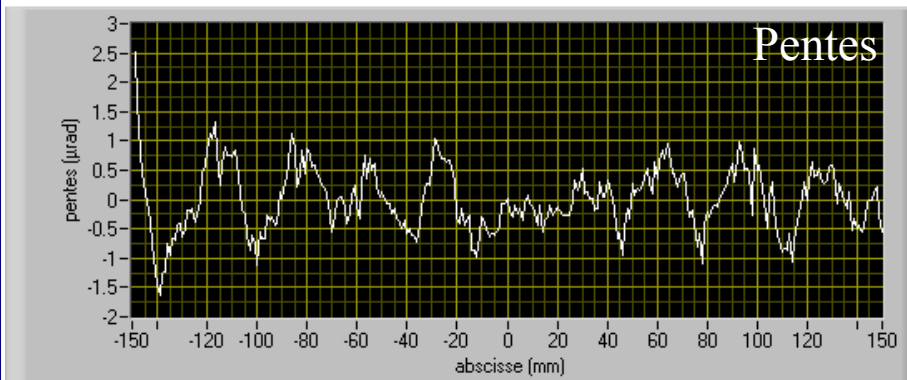
### Résiduel de forme par rapport à la consigne

$R = 100.1 \text{ m} / \sigma = 1.781 \text{ } \mu\text{rad rms} / h = 239.37 \text{ nm rms} / H = 754.86 \text{ nm PV}$



### Résiduel de forme par rapport au meilleur fit elliptique

$R = 100.32 \text{ m} / \sigma = 0.548 \text{ } \mu\text{rad rms} / h = 4.129 \text{ nm rms} / H = 17.208 \text{ nm PV}$



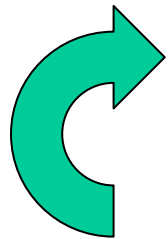
- Correction en 1 itération du résiduel de forme (même matrice d'interaction)
- Légère dérive en courbure

## CONCLUSION

- Gamme de courbure de 140 à 72 m (flèche de 80 à 160  $\mu\text{m}$ ).
- Miroir **linéaire**.
- **1 seule matrice d'interaction nécessaire**.
- Correction du résiduel de forme à **0.6  $\mu\text{rad rms}$** , en 1 itération
- Dérive en courbure par rapport à la consigne de départ.

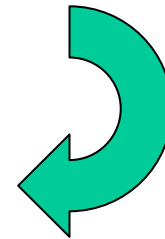
- Upgrades:

- Suppression de la contrainte initiale → gamme de courbure de  $\infty$  à 55 m
- Intégration de l'actionneur de courbure dans la boucle d'asservissement:



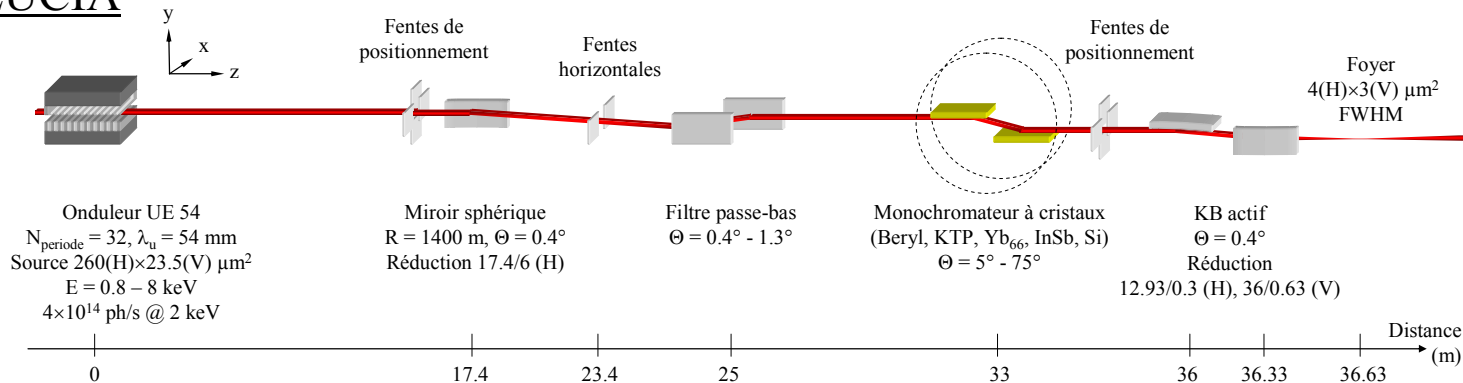
1- correction du résiduel de forme avec les 10 AME de forme

2- correction de la dérive en courbure avec l'AME de courbure

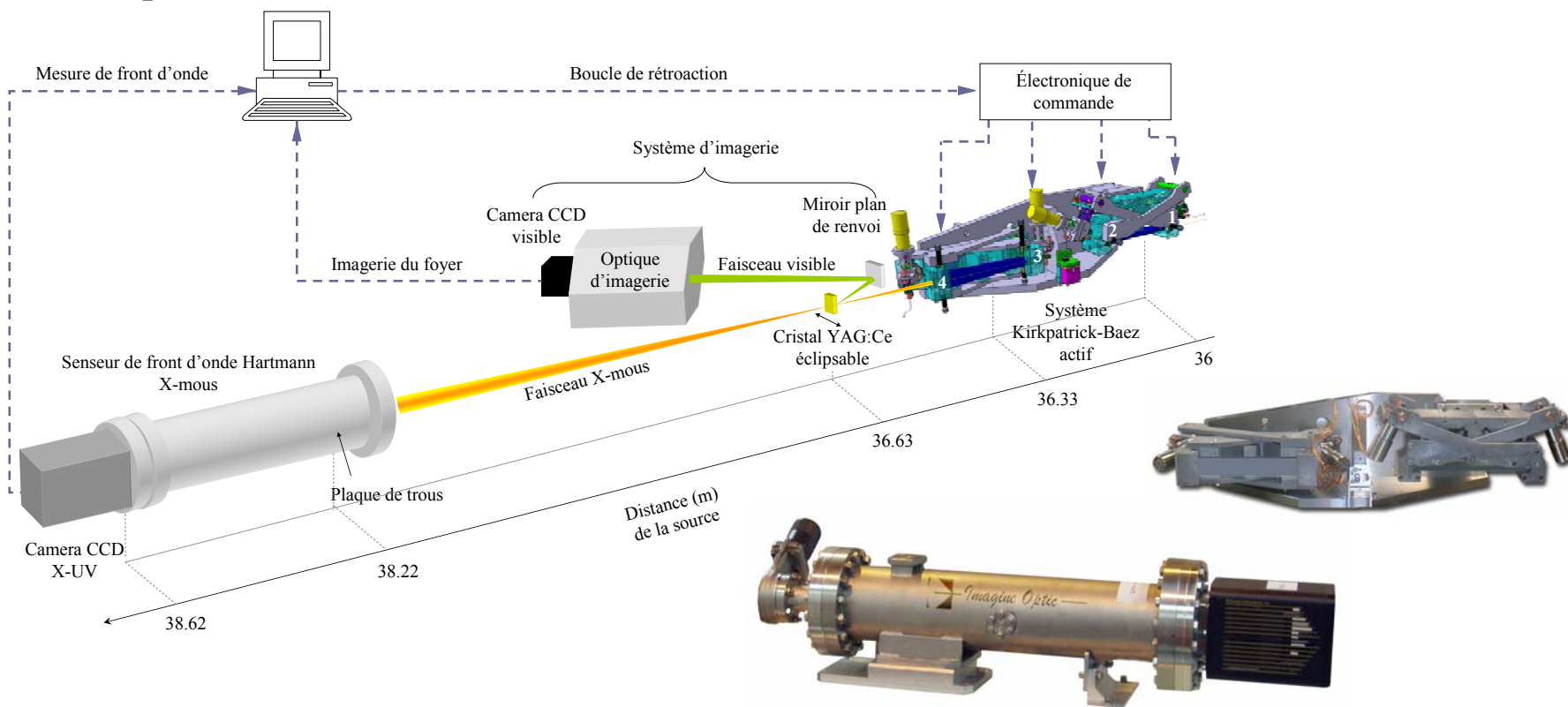


- Couplage avec senseur de front d'onde X et Mise en oeuvre sur rayonnement synchrotron d'ici fin 2008

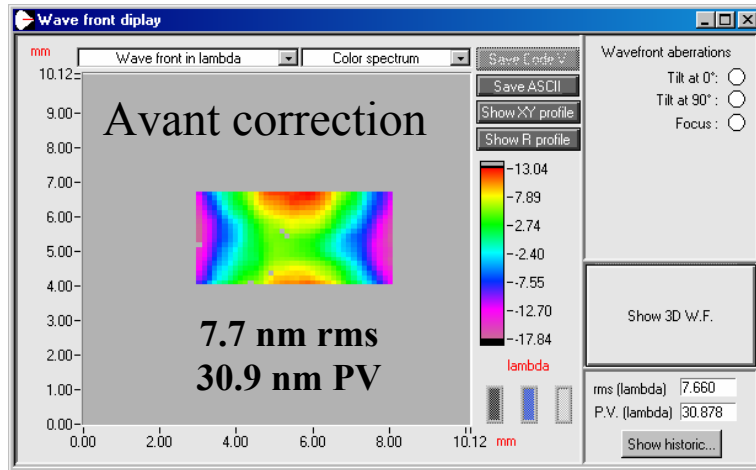
Ligne LUCIA



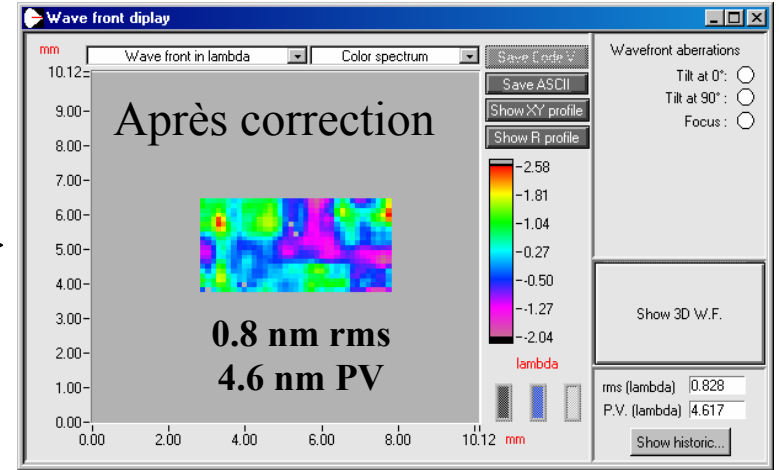
Station expérimentale



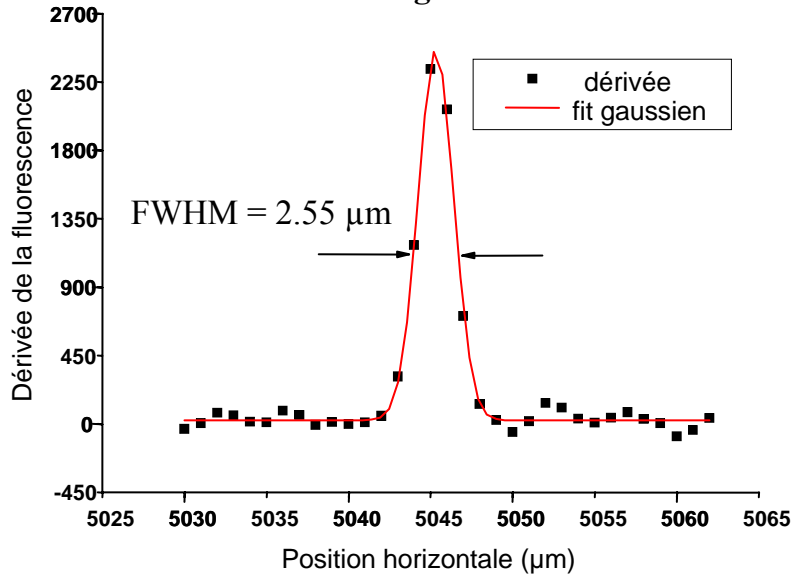
# Boucle de correction à 3.64 keV



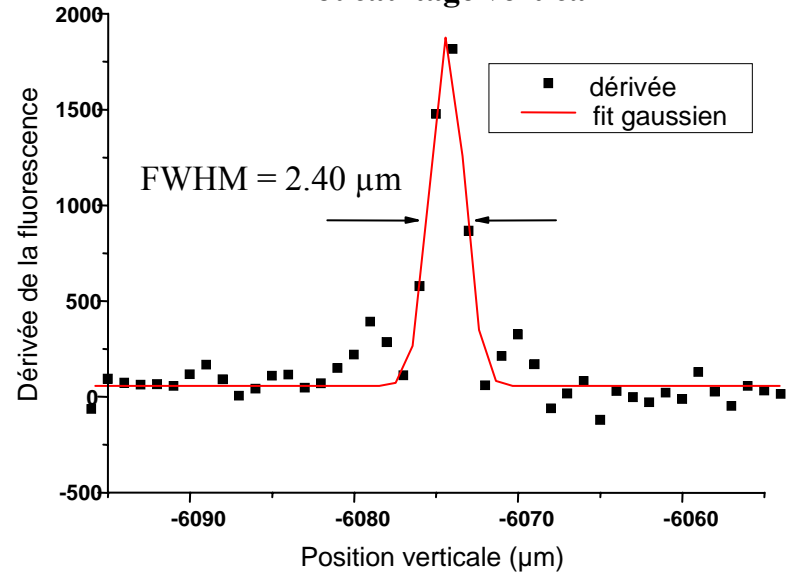
CSO



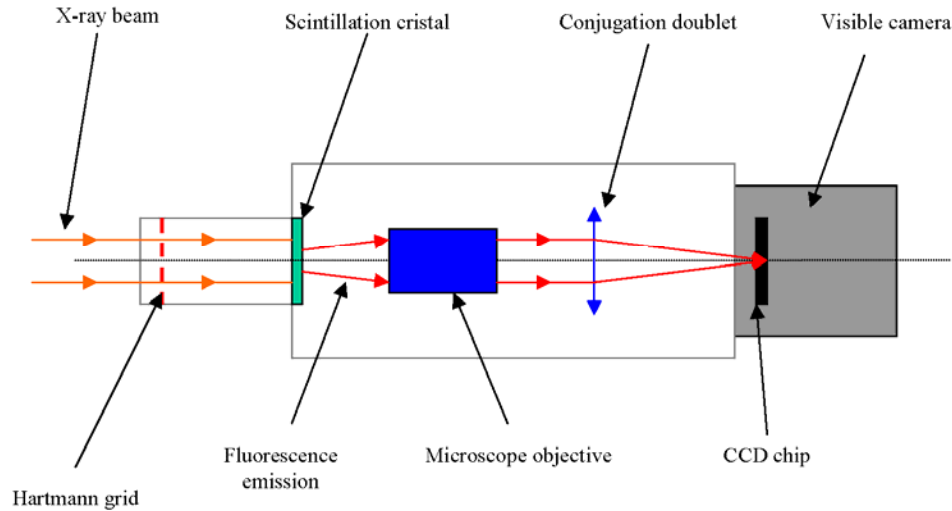
Foucaultage horizontal



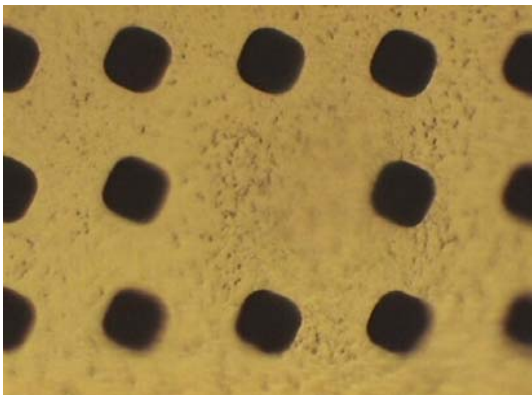
Foucaultage vertical



- utilisation de senseurs dit en détection indirecte – adaptés pour les rayons X durs.



Trous de 8  $\mu\text{m}$  / pas de 20  $\mu\text{m}$   
**microscope optique ( $\times 100$ )**



640x480 pixels (7.4 $\mu\text{m}$ /pixel)  
 Grandissement x4.5  
 Pas de grille 20  $\mu\text{m}$   
 Distance grille / YAG:Ce : 14 mm

**Sensibilité : 0.023 nm rms**

**Incertitude : 0.25 nm rms**

**limitée par le procédé de calibration**



## THANKS TO THE MARX PROJECT TEAM

### SYNCHROTRON SOLEIL

Mourad Idir  
Thierry Moreno  
Muriel Thomasset  
Sylvain Brochet

### IMAGINE OPTIC

Guillaume Dovillaire  
Johan Floriot  
Emeric Lavergne  
Jérôme Legrand  
Xavier Levecq  
Samuel Bucourt

**Imagine optic**  
**18 rue Charles de Gaulle**  
**91400 ORSAY**  
[contact@imagine-optic.com](mailto:contact@imagine-optic.com)

### ISP SYSTEM

Paul Sauvageot  
Lionel Escolano  
Nicolas Nivelet  
Benjamin Saux

**ISP SYSTEM**  
**ZI de La Herray - BP 10047**  
**65501 VIC EN BIGORRE Cedex**  
[contact@isp-system.fr](mailto:contact@isp-system.fr)