

Nouvelles avancées sur les couches minces IBS pour les miroirs des interféromètres gravitationnels de deuxième génération : bruit thermique, uniformité, traitement correctif

L. Pinard

**Responsable Technique
Laboratoire des Matériaux Avancés – CNRS/IN2P3 - FRANCE**

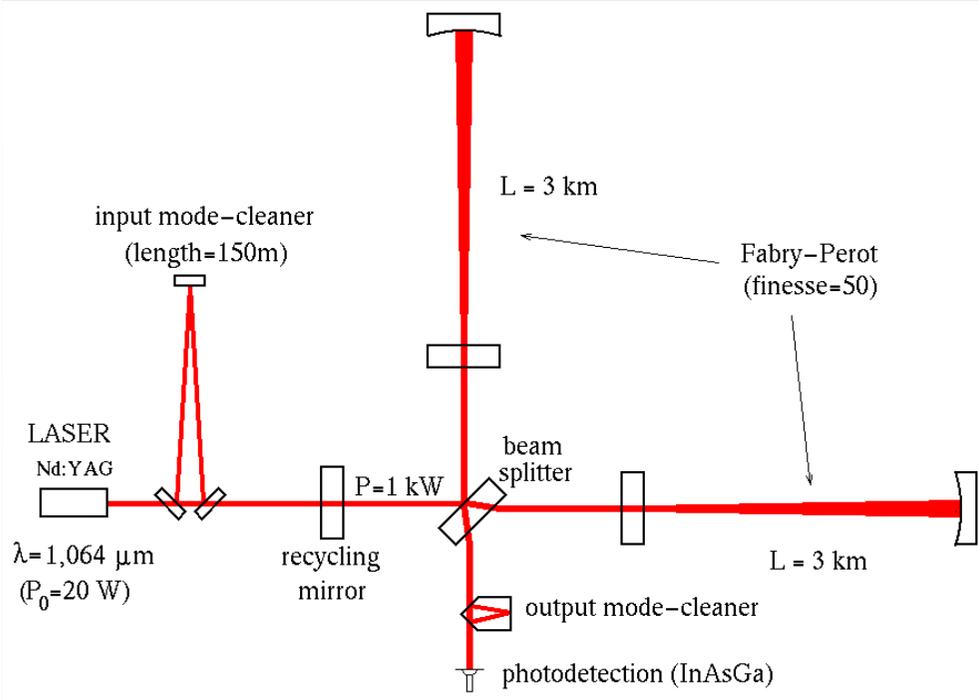
- ❑ Introduction : Besoins des interféromètres gravitationnels de 2^{ème} génération
- ❑ Amélioration du bruit thermique des couches minces
- ❑ Amélioration de la planéité des substrats : Traitement Correctif
- ❑ Amélioration de l'uniformité des dépôts IBS
- ❑ Conclusion et Perspectives

- ❑ Besoins des interféromètres gravitationnels de 2^{ème} génération en terme de composants optiques :
 - ✓ Miroirs en silice plus massifs : 40 kg, Ø35 cm, 20 cm épais
 - ✓ Pertes dans les cavités FP : < 50 ppm par aller-retour
 - ✓ Planéité substrats <0.5 nm RMS sur Ø15 cm
 - ✓ Polissage ionique
 - ✓ Traitement Correctif développé par le LMA
 - ✓ Les coatings ne doivent pas détériorer cette planéité
 - ✓ uniformité meilleure que 1 pour mille
 - ✓ rayon de courbure préservé
 - ✓ Réduire le bruit thermique dû aux couches minces

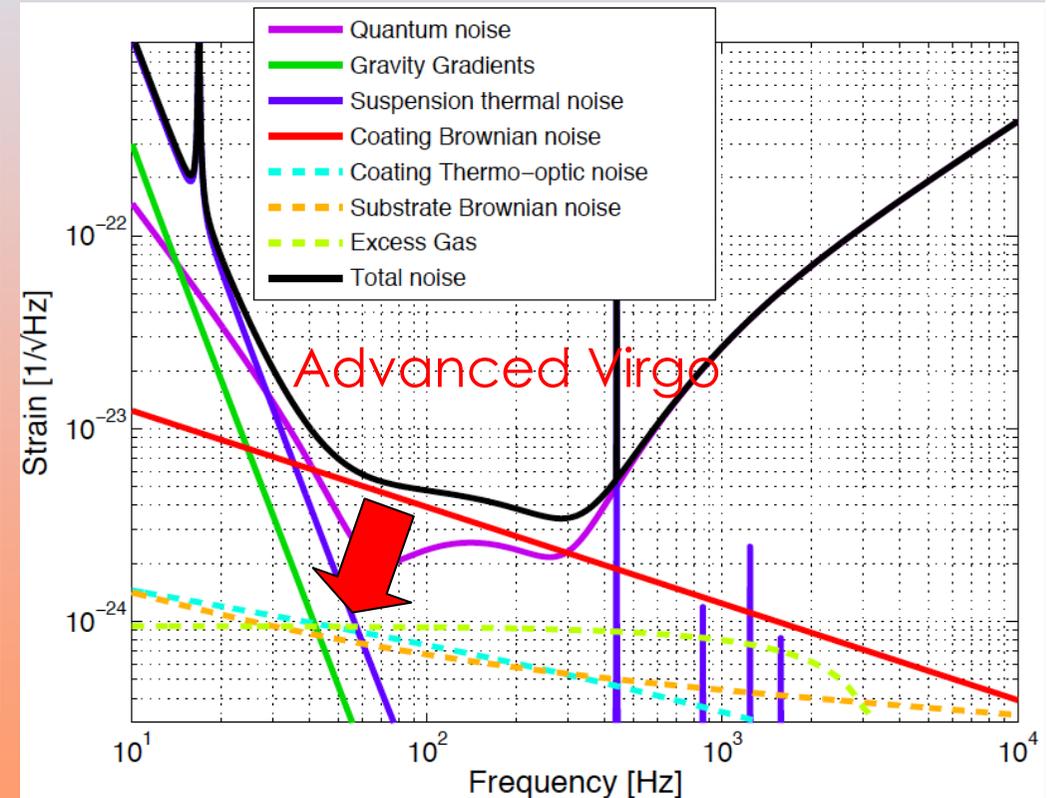
Amélioration du bruit thermique

□ Bruit thermique lié des couches diélectriques = source importante de bruit thermique dans la zone cruciale de fréquence (~ 100 Hz)

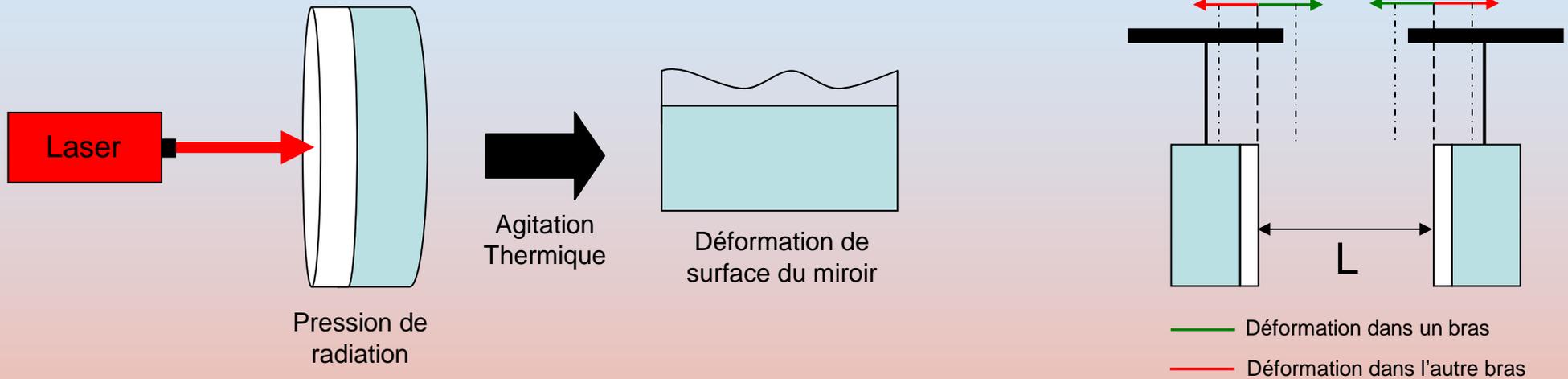
↳ Limite la sensibilité des détecteurs



Virgo technical note VIR-0128A-12



➤ Bruit Brownien : mouvement aléatoire relié à la dissipation d'énergie thermique



- La matière est constituée d'atomes
- Ces atomes sont sous agitation constante (mouvements désordonnés et aléatoires)
- La vitesse d'agitation augmente avec la température

➔ Déformation thermo induite du miroir en surface ($f=50-500\text{Hz}$)
Fluctuation de la position du miroir

Amélioration du bruit thermique

Diminuer la Température
(Cryogénie)

Réduire les pertes des matériaux
(Matériaux & géométrie)

$$S_x(f) = \frac{2k_B T (1 - \sigma^2)}{\pi^{3/2} f w Y \phi_{eff}}$$

Augmenter la taille du faisceau
(faisceaux plats, faisceaux gaussiens d'ordre plus élevé)

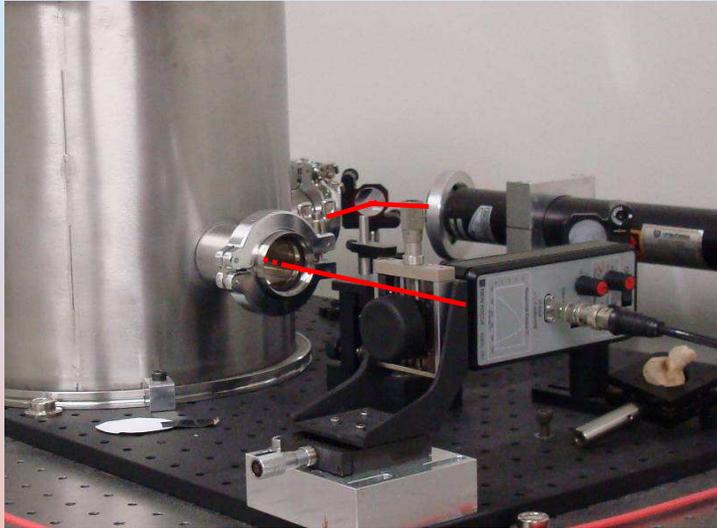
Avec

$$\Phi_{eff} = (b_L d_L + b_H d_H)$$

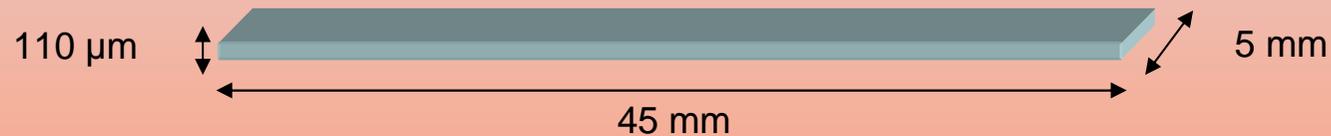
$$b_{H,L} = \frac{\lambda_0}{\pi^{1/2} w} \frac{\Phi_{L,H}}{n_{L,H}} \left(\frac{Y_{L,H}}{Y_s} + \frac{Y_s}{Y_{L,H}} \right)$$

$$Y_{s,L,H} = \text{Module_de_Young}$$

Banc de mesure facteur de qualité Q



- Cantilever : Silice *SUPRASIL 311* (*HERAEUS*)



But: Avoir une mesure des pertes mécaniques **rapide** et de **faible coût**

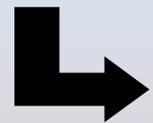


Mesure à basse fréquence (60 Hz – 1000 Hz)



Amélioration du bruit thermique

□ Ta_2O_5 : source dominante de pertes par dissipation dans les empilements SiO_2 / Ta_2O_5



Ratio ~ 6 entre SiO_2 et Ta_2O_5

$$\Phi_{SiO_2} \sim 0.5 \cdot 10^{-4}$$

$$\Phi_{Ta_2O_5} \sim 3 \cdot 10^{-4}$$

Pertes membrane de Suprasil : $\Phi = 4 \cdot 10^{-6}$ - pas limité par la lamelle

BUT : Améliorer le facteur de qualité mécanique du matériau haut indice sans modifier les pertes optiques

Amélioration du bruit thermique

- ❑ Différents oxydes testés : ZrO_2 , Nb_2O_5 ,...
- ❑ Dopage du Ta_2O_5 avec différents atomes (Co, W, Ti...)
 ✓ Meilleur résultat obtenu avec le dopage Ti : absorption plus basse, indice plus haut



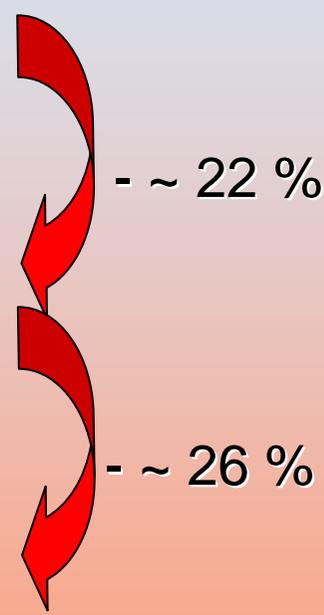
$\Phi_{Ta_2O_5} = 3 \cdot 10^{-4}$

Ti doping

$\Phi_{Ta_2O_5} = 2.4 \cdot 10^{-4}$

Optimisation des paramètres de dépôt

$\Phi \sim 1.9 \cdot 10^{-4}$



Miroir Multicouche (HL)¹⁹ HLL @ 1064 nm

Propriétés Optiques inchangées, voire meilleures

Absorption : < 0.5 ppm

Diffusion < # 5 ppm



Amélioration du bruit thermique

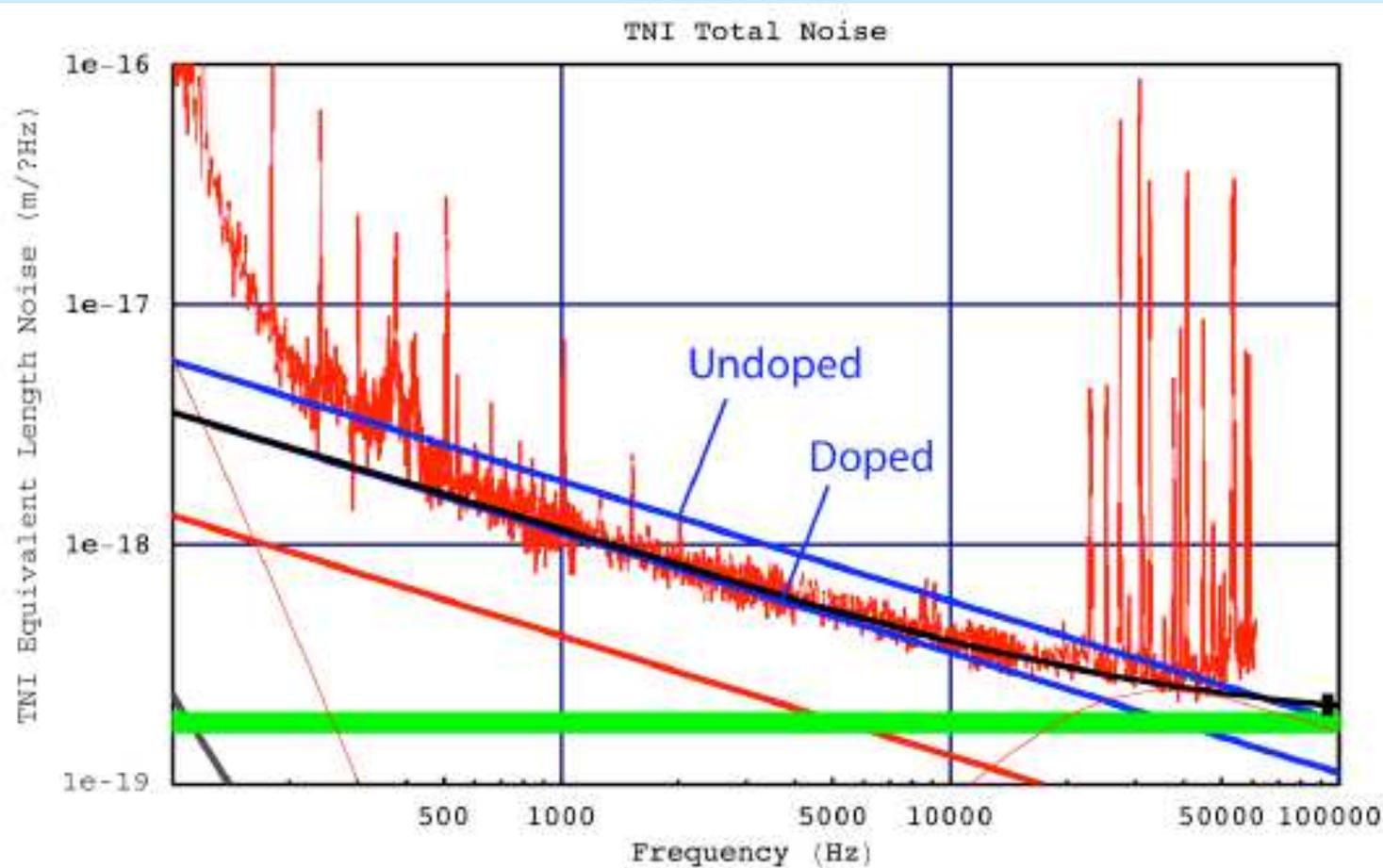
Modifier l'empilement de couches minces sans
changer la réponse optique

Coatings Optimisés



<p>Mirror transmission : 278 ppm H:Ta2O5 (n : 2.035-i.3.10⁻⁸, Φ : 3.10⁻⁴) L:SiO2 (n:1.465-i.4.10⁻⁸, Φ : 5.10⁻⁵)</p>	
Miroir – Couches quart d'onde	Lowest noise end tweaked stacked doublet (PINTO-University of Sannio)
(HL) ₁₃ HLL	0.56H(1.38L 0.62H) ₁₆ 0.16L
Epaisseur Ta ₂ O ₅ : 1830 nm Epaisseur SiO ₂ : 2722 nm	Epaisseur Ta ₂ O ₅ : 1347 nm Epaisseur SiO ₂ : 4032 nm

Utilisés pour les coatings Advanced LIGO, Faible absorption (0.2 ppm)

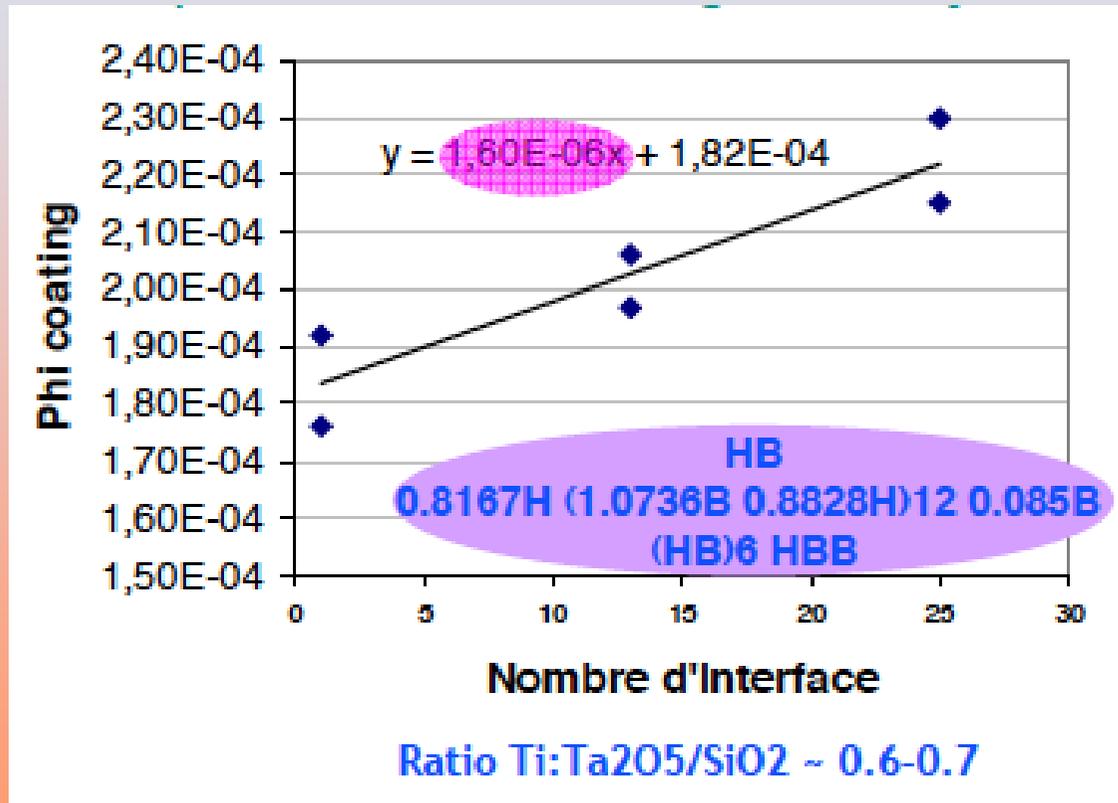


Miroirs « dopés, optimisés » testés sur l'expérience TNI (Thermal Noise Interferometer) (E. BLACK – LIGO)

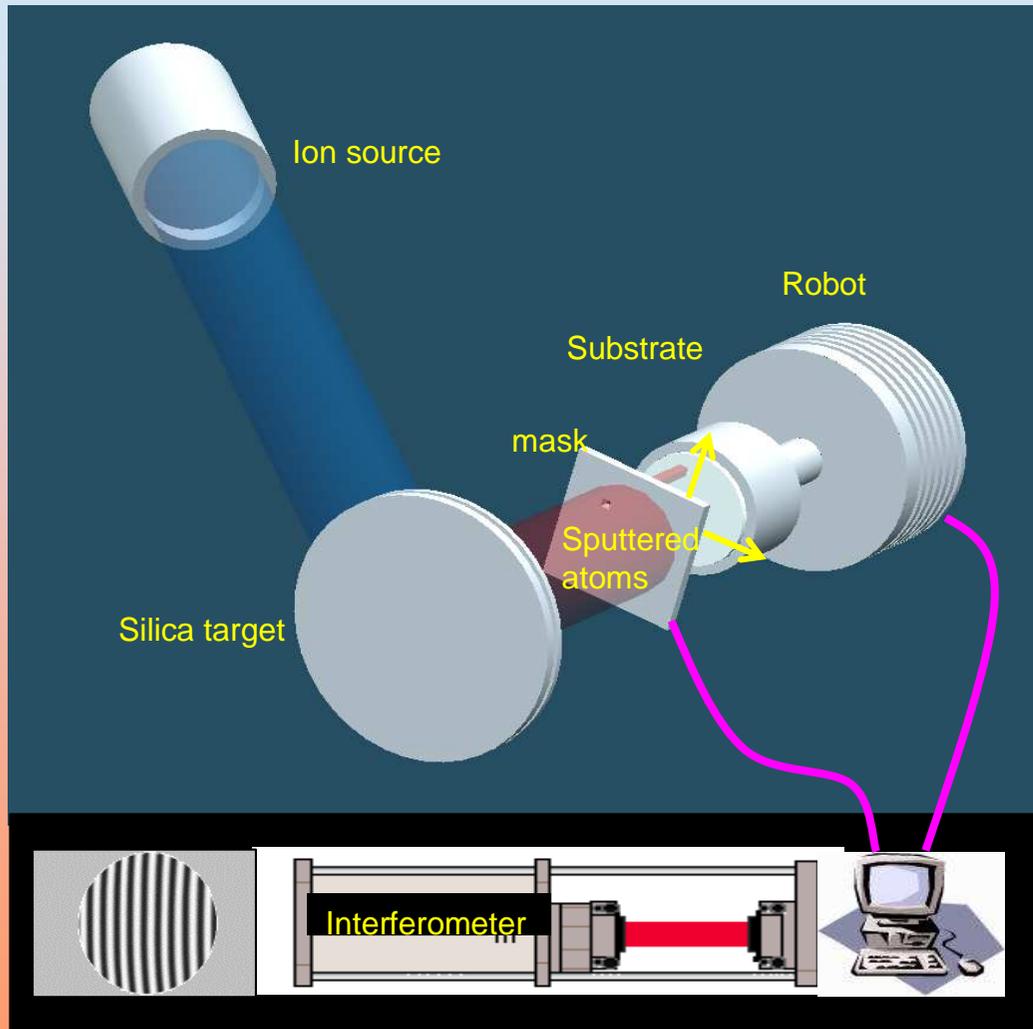


Courtesy E.BLACK & A. VILLAR

- ❑ Etude en cours : rôle des interfaces dans les pertes
- ❑ Pertes mesurées sur les empilements supérieures à la théorie
Contribution des interfaces sur les pertes mécaniques



Principe du Traitement Correctif



- But: Obtenir une planéité sur un substrat de silice de 0.5 nm RMS ou moins sur diamètre 150 mm.
- Comment:
 - Mesure de la surface du substrat:
 - Phase Shifting Interferometry.
 - Deposer de la silice là où c'est nécessaire (trou):
 - IBS
 - Masque
 - Robot
- Correction : échelle # 1 cm (dimension du masque)



Amélioration de la planéité des substrats : Traitement Correctif

Robot installé sur la chambre de dépôt IBS (2011)

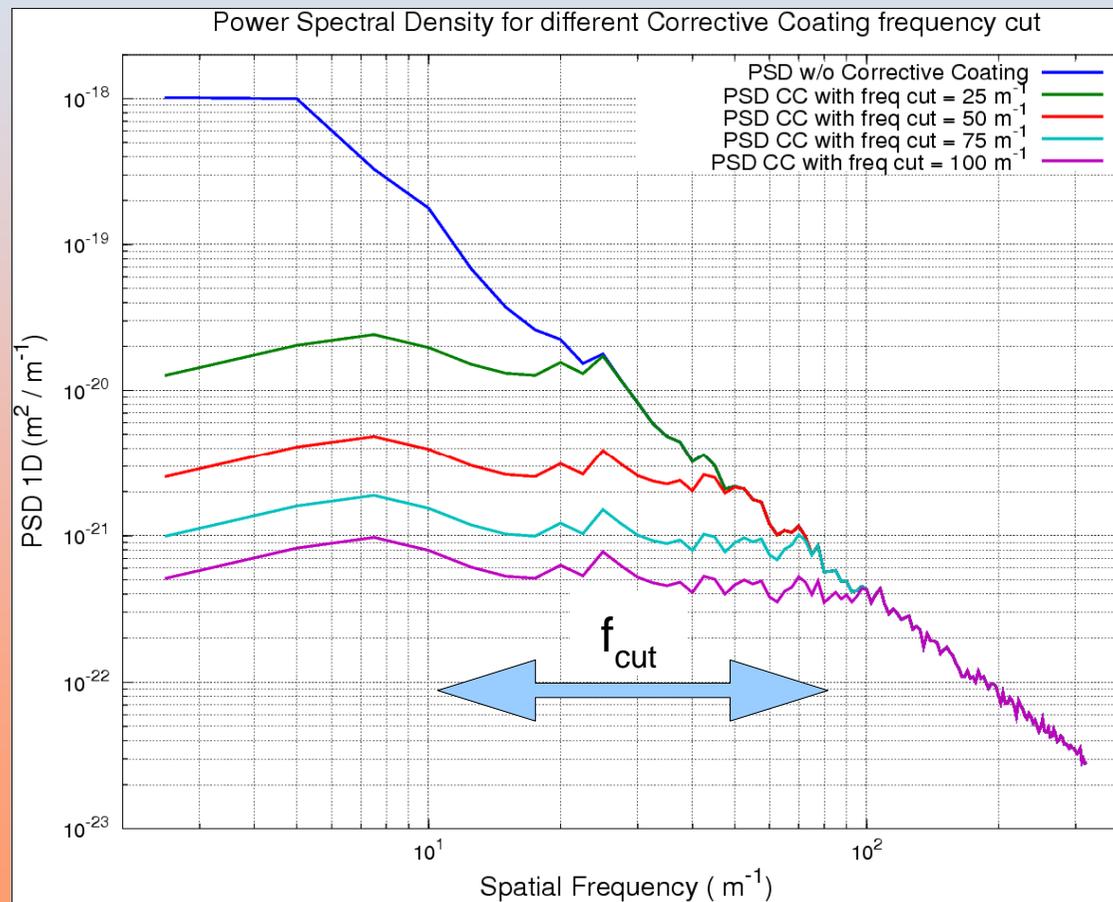




Amélioration de la planéité des substrats : Traitement Correctif

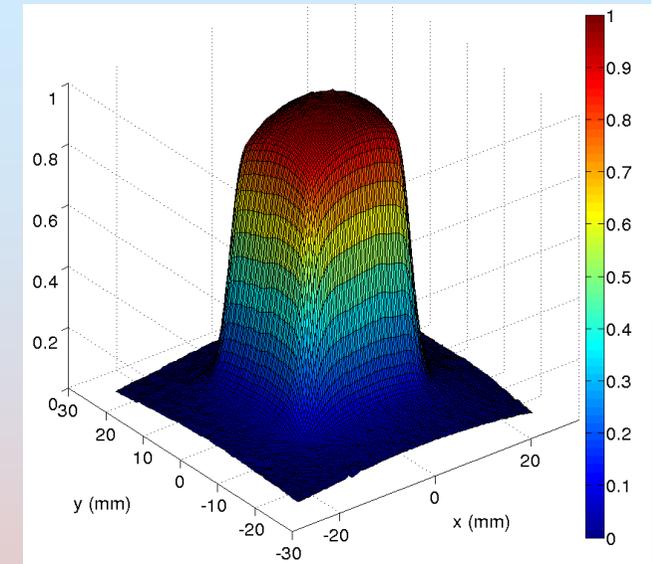
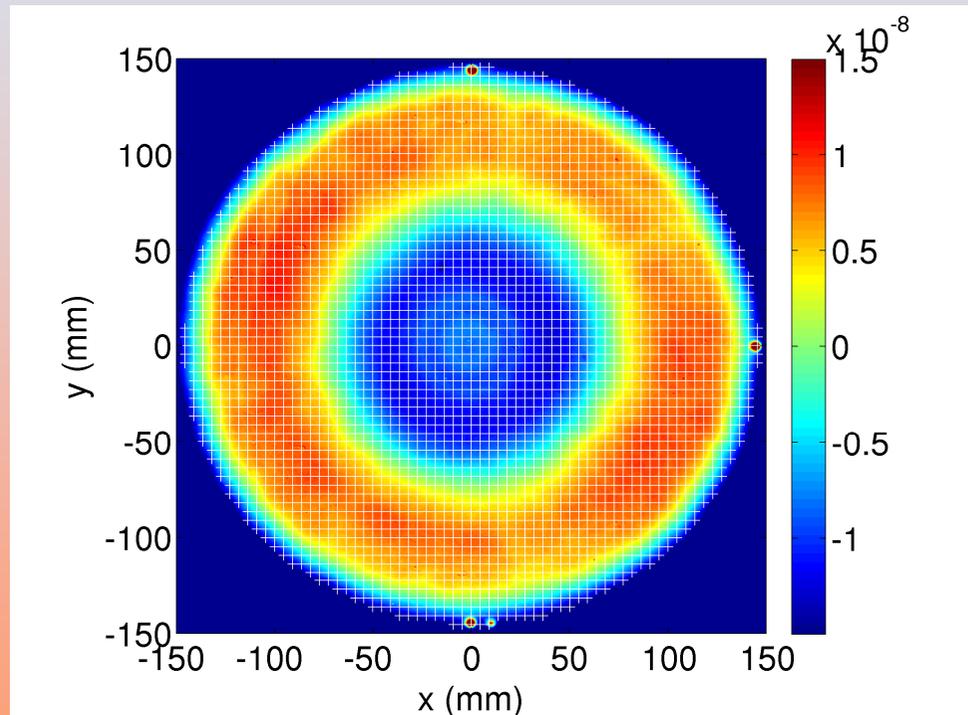
- ❑ Le traitement correctif aplatit la PSD 2D en dessous d'une fréquence de coupure qui est liée à la taille du masque.

$$f_{\text{cut}} = 1 / \text{taille masque.}$$



Amélioration de la planéité des substrats : Traitement Correctif

- ❑ Simulation de la correction avec des empreintes de masque réelles.
- ❑ Le substrat se déplace le long d'une grille régulière avec une pas ~ 4.5 mm et stoppe durant le temps requis.



Empreinte du masque

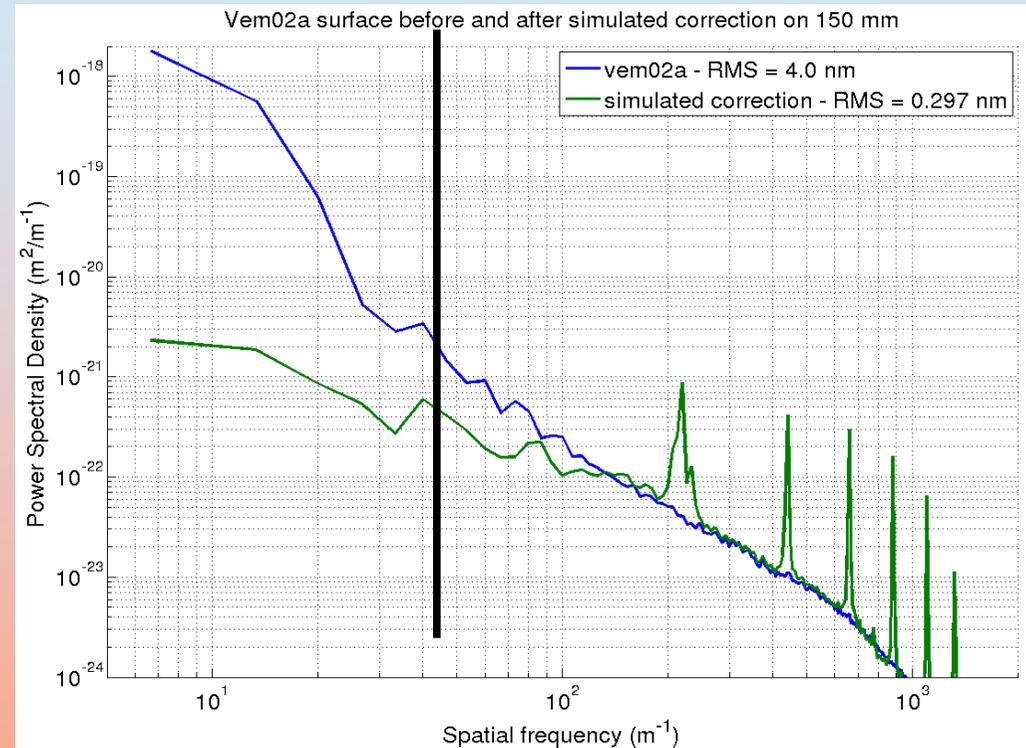
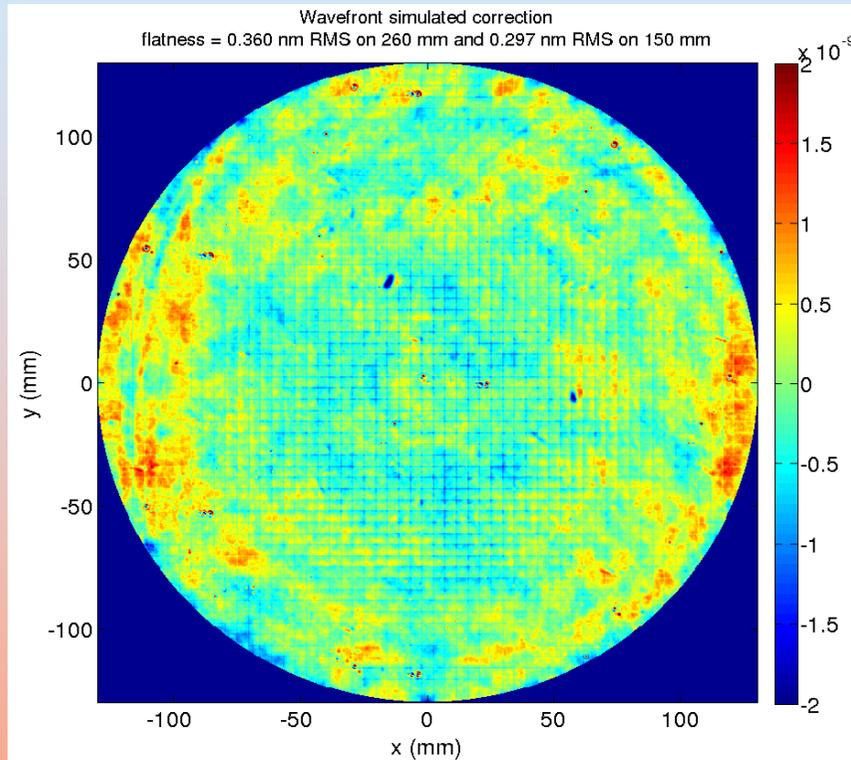
Front d'onde du substrat
 $\varnothing 35$ cm à corriger :
 7 nm rms

- ❑ Temps de dépôt calculé à chaque point, Résolution d'un système d'équation avec ~ 3200 inconnues.



Amélioration de la planéité des substrats : Traitement Correctif

- ❑ Surface simulée après correction (RoC de -70 km sur 300 mm enlevé)



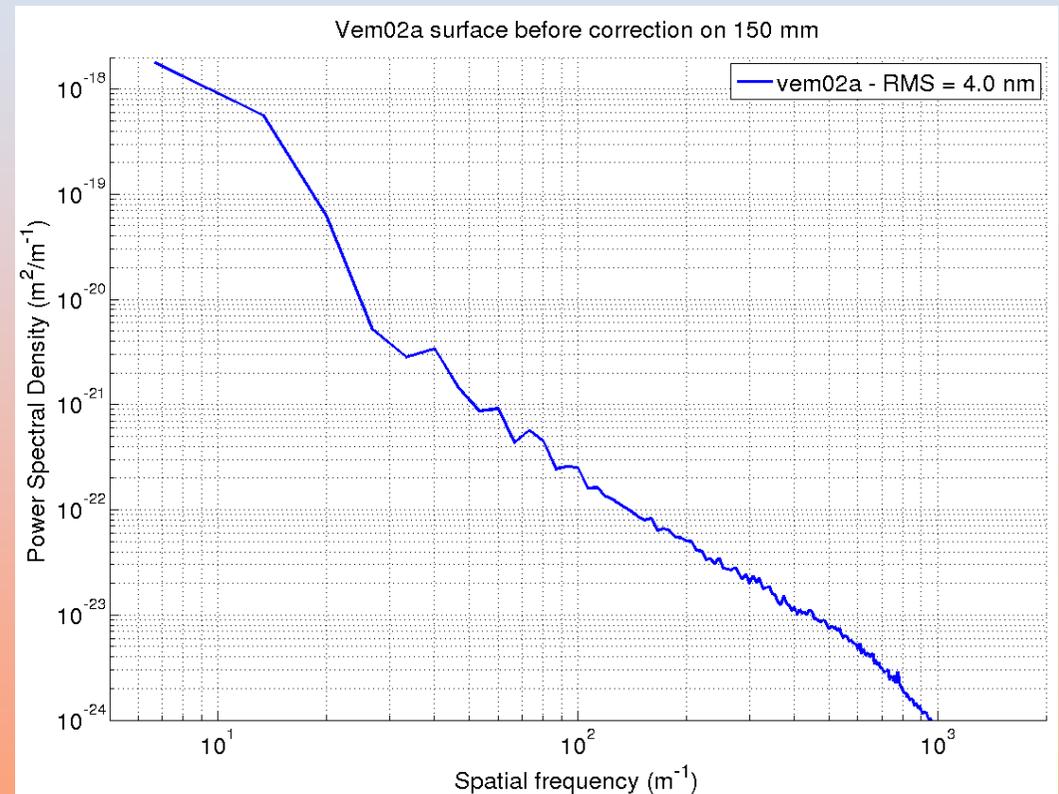
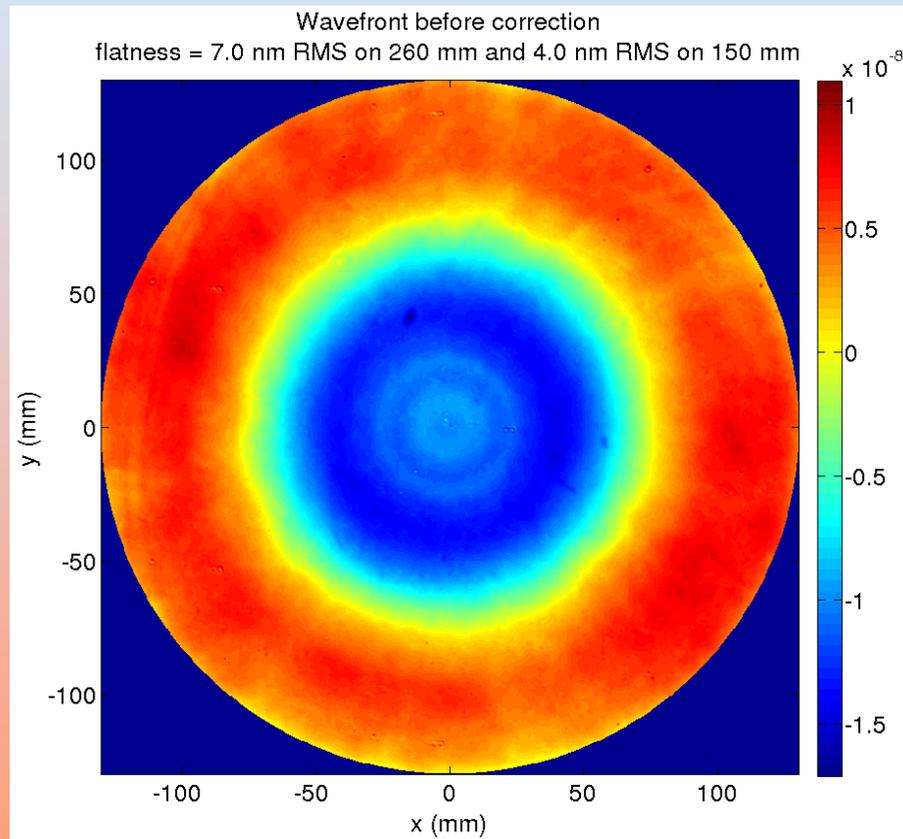
Planéité = 0.360 nm RMS \varnothing 260 mm
0.297 nm RMS \varnothing 150 mm

Correction avec un masque carré de
21.5 mm $\Rightarrow f_{\text{cut}} \sim 50 \text{ m}^{-1}$.



Amélioration de la planéité des substrats : Traitement Correctif

- ❑ Surface du substrat ($\varnothing 35$ cm, 10 cm épais) sur $\varnothing 260$ mm (RoC de -70 km sur 300 mm enlevé).



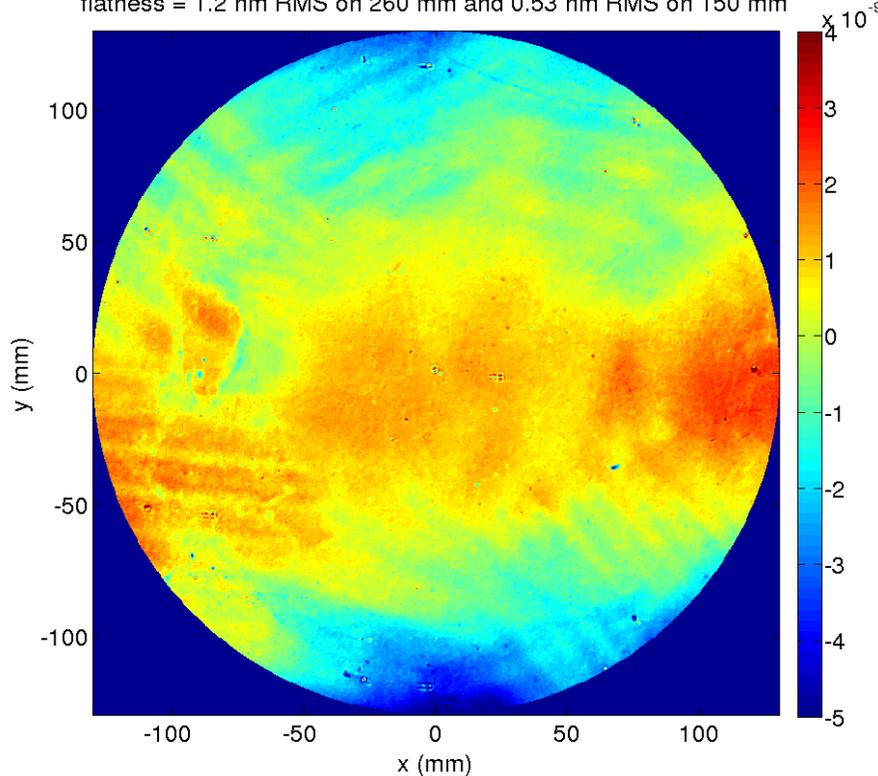
7.0 nm RMS sur $\varnothing 260$ mm et 4.0 nm RMS sur $\varnothing 150$ mm.



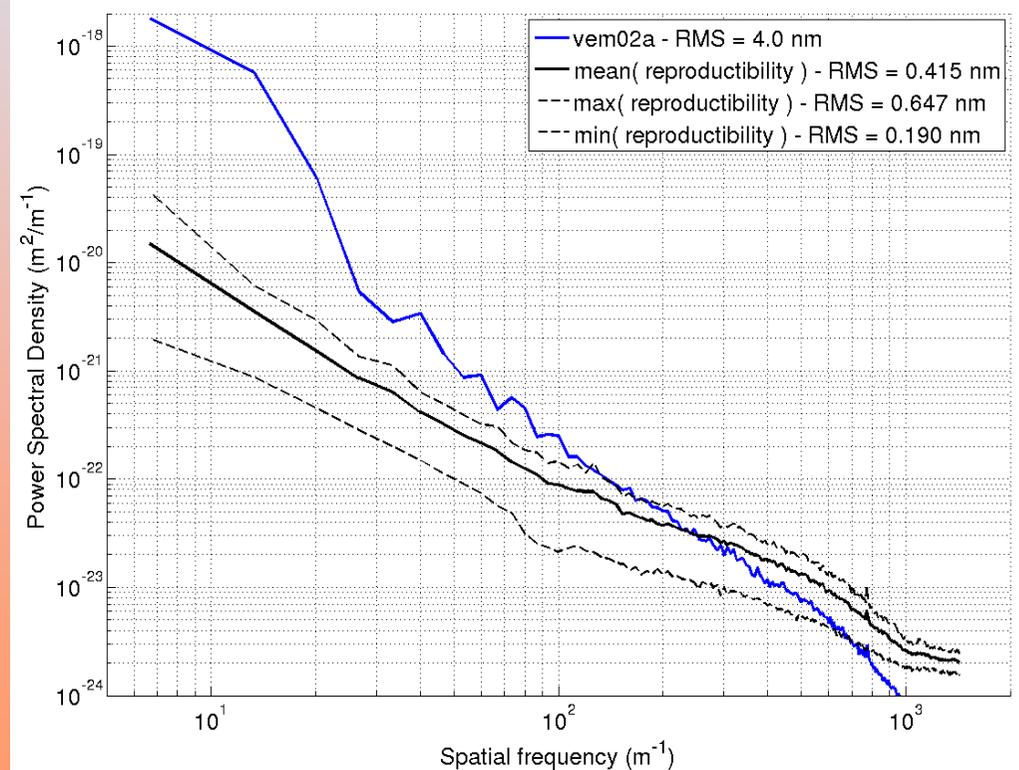
Amélioration de la planéité des substrats : Traitement Correctif

- ❑ Reproductibilité de la métrologie limitante
 - Couplage de zones, environnement, monture.
- ❑ Incertitude sur la mesure de l'astigmatisme à cause de la monture
- ❑ Nouveau système à l'étude (wavelength shifting ITF + Beam expander)

Subtraction of two measurements of vem02a before correction
flatness = 1.2 nm RMS on 260 mm and 0.53 nm RMS on 150 mm



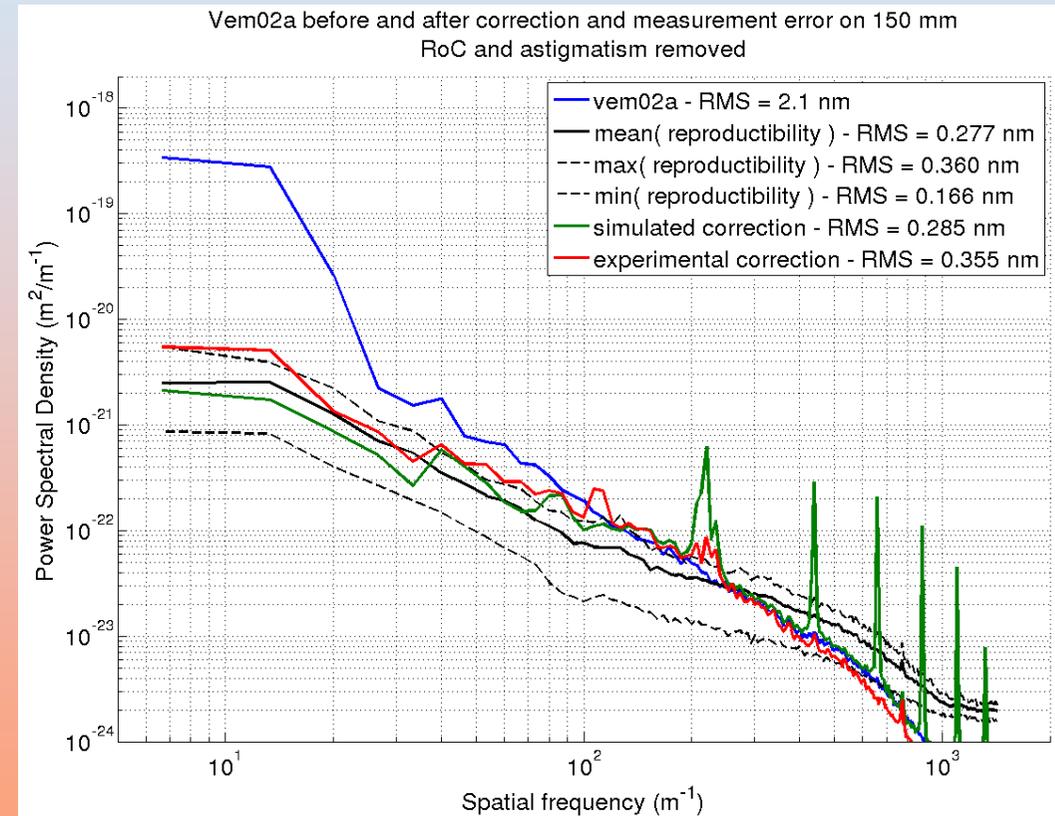
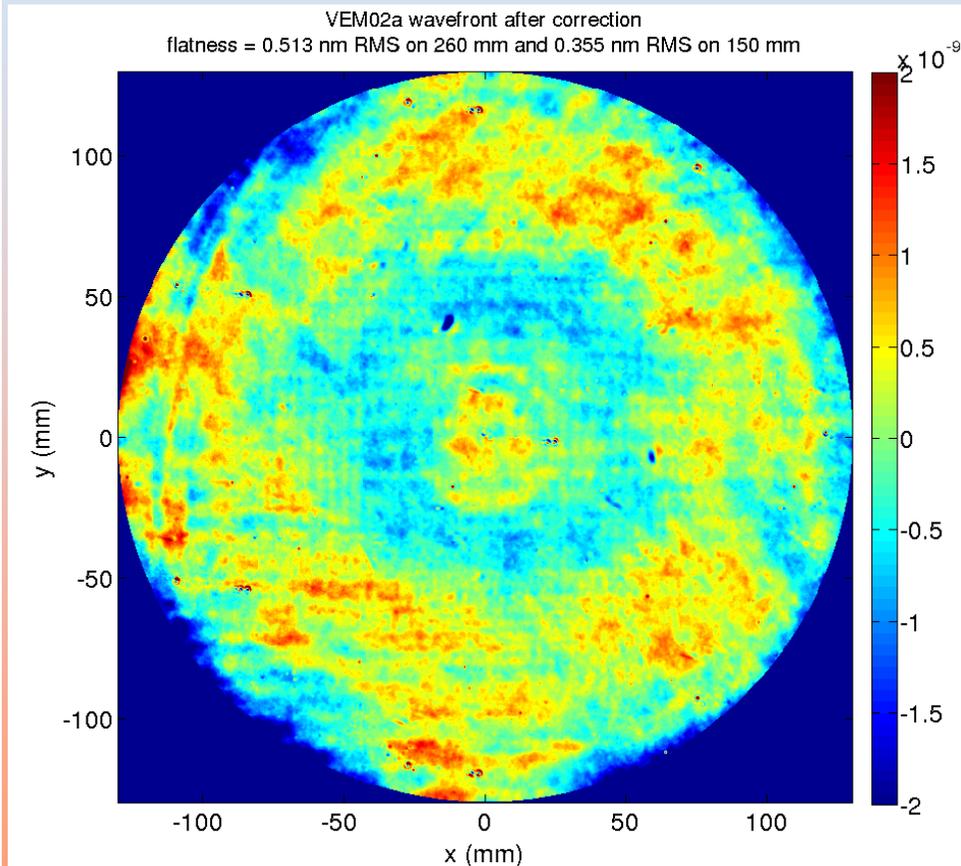
Vem02a before correction and measurement error on 150 mm





Amélioration de la planéité des substrats : Traitement Correctif

❑ Substrat Virgo après correction expérimentale (astig. soustrait)



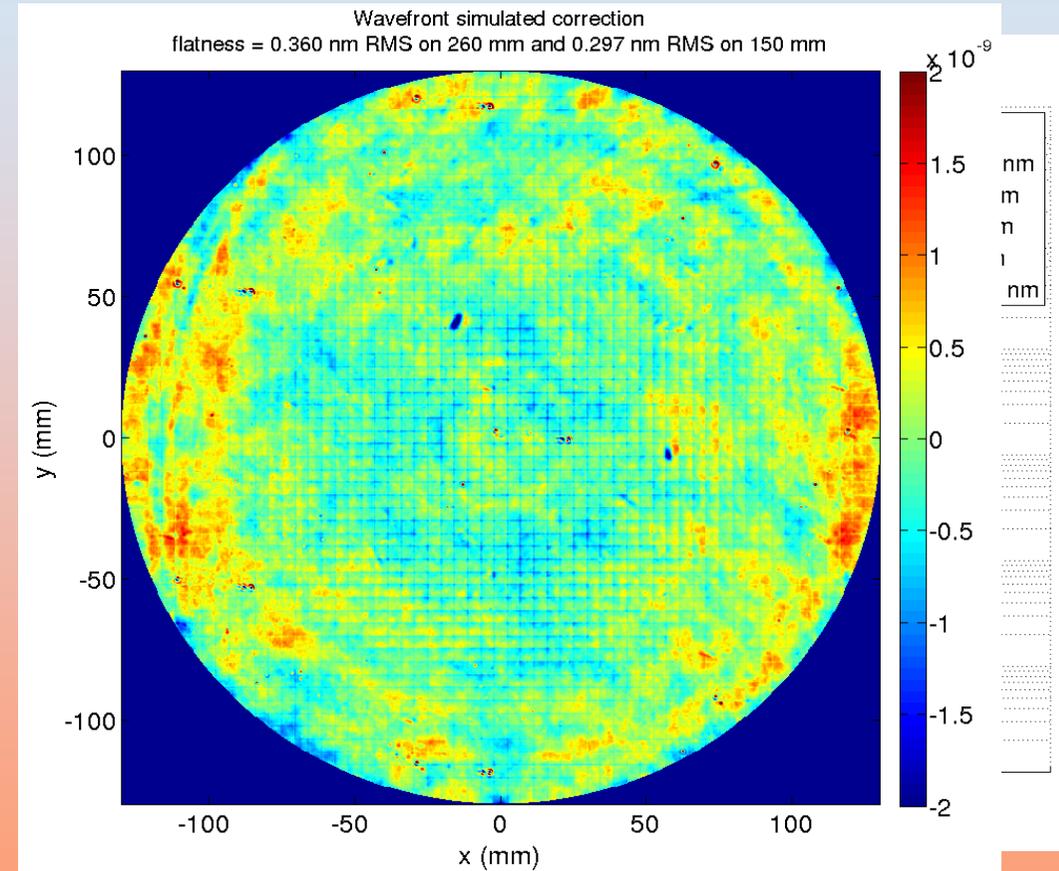
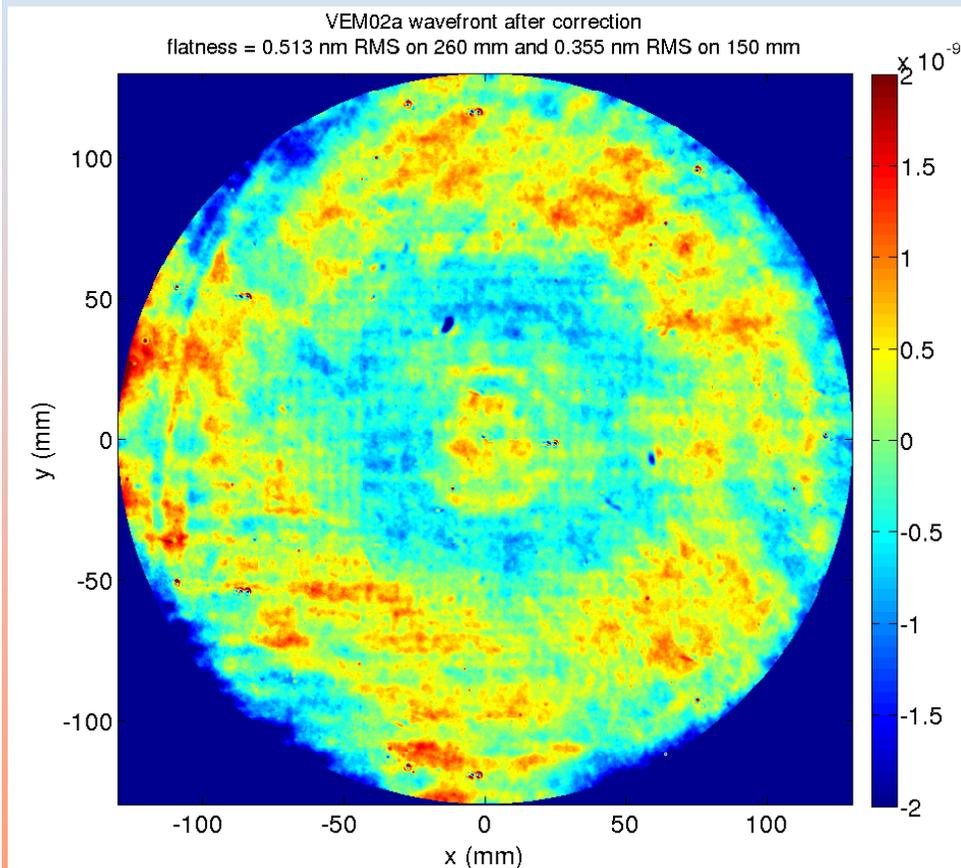
Planéité = 0.513 nm RMS \varnothing 260 mm , 0.355 nm RMS \varnothing 150 mm

Théorie : = 0.360 nm RMS \varnothing 260 mm, 0.297 nm RMS \varnothing 150 mm



Amélioration de la planéité des substrats : Traitement Correctif

- ❑ Substrat Virgo après correction expérimentale (astig. soustrait)



Planéité = 0.513 nm RMS \varnothing 260 mm , 0.355 nm RMS \varnothing 150 mm

Théorie : = 0.360 nm RMS \varnothing 260 mm, 0.297 nm RMS \varnothing 150 mm

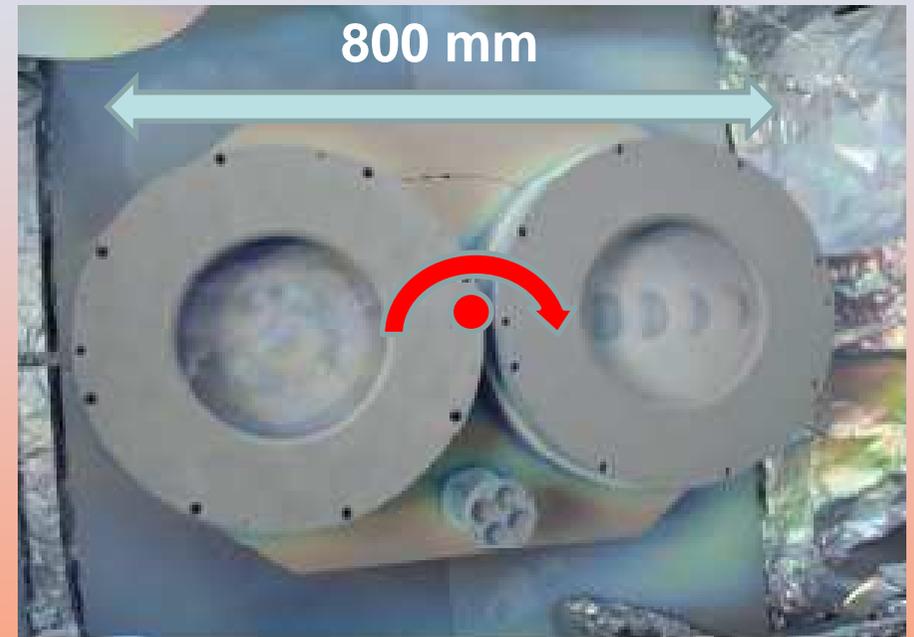
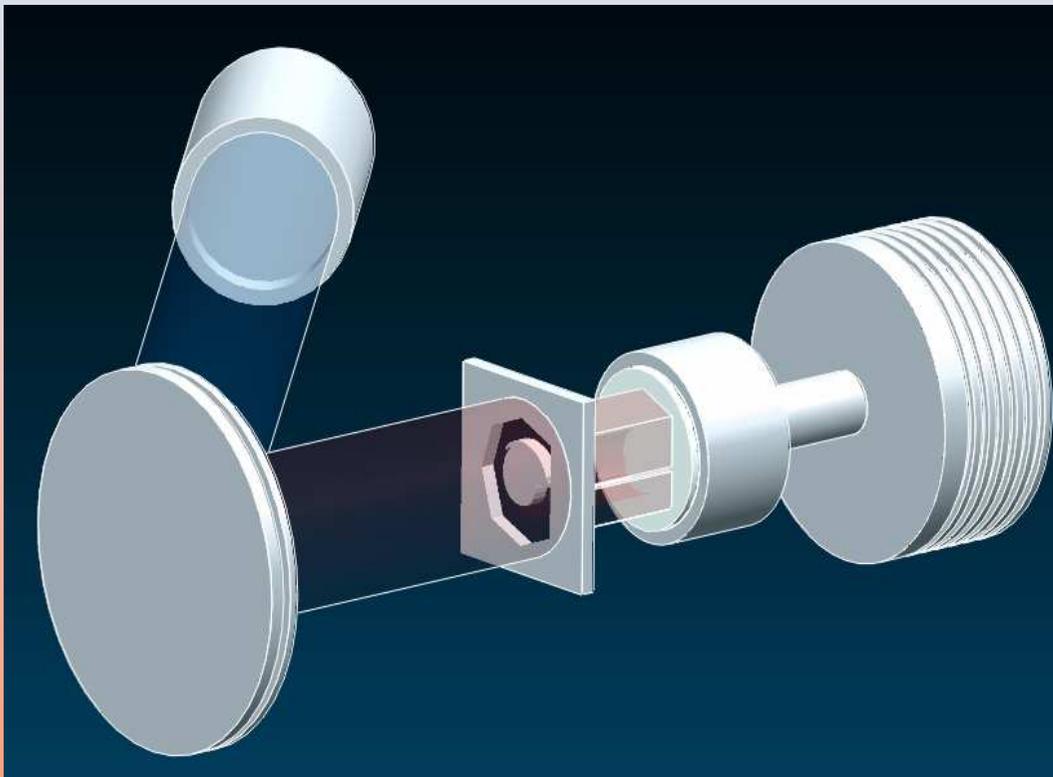


Amélioration de l'uniformité des dépôts IBS

- ❑ Spécifications très sévères sur l'uniformité des dépôts pour les ITF gravitationnels de 2^{ème} génération
 - ❑ Préserver la planéité des substrats (RTL < 50 ppm)
 - ❑ Pas de coeff. de Zernike d'ordre 2 > 0.5 nm
 - ❑ Ne pas changer le RoC (flèche max acceptable 8nm)
 - ❑ Appairage en transmission des miroirs (meilleure que 1%) : traiter 2 pièces à la fois

- ❑ Jusqu'à maintenant : chambre équipée d'une rotation simple pour les substrats. Deux solutions :
 - ❑ Traiter une pièce à la fois au centre en optimisant les paramètres de dépôt (angles des cibles....). Problème potentiel pour avoir la même transmission
 - ❑ Traiter deux pièces à la fois avec la simple rotation et des masques. Apparaige transmission OK

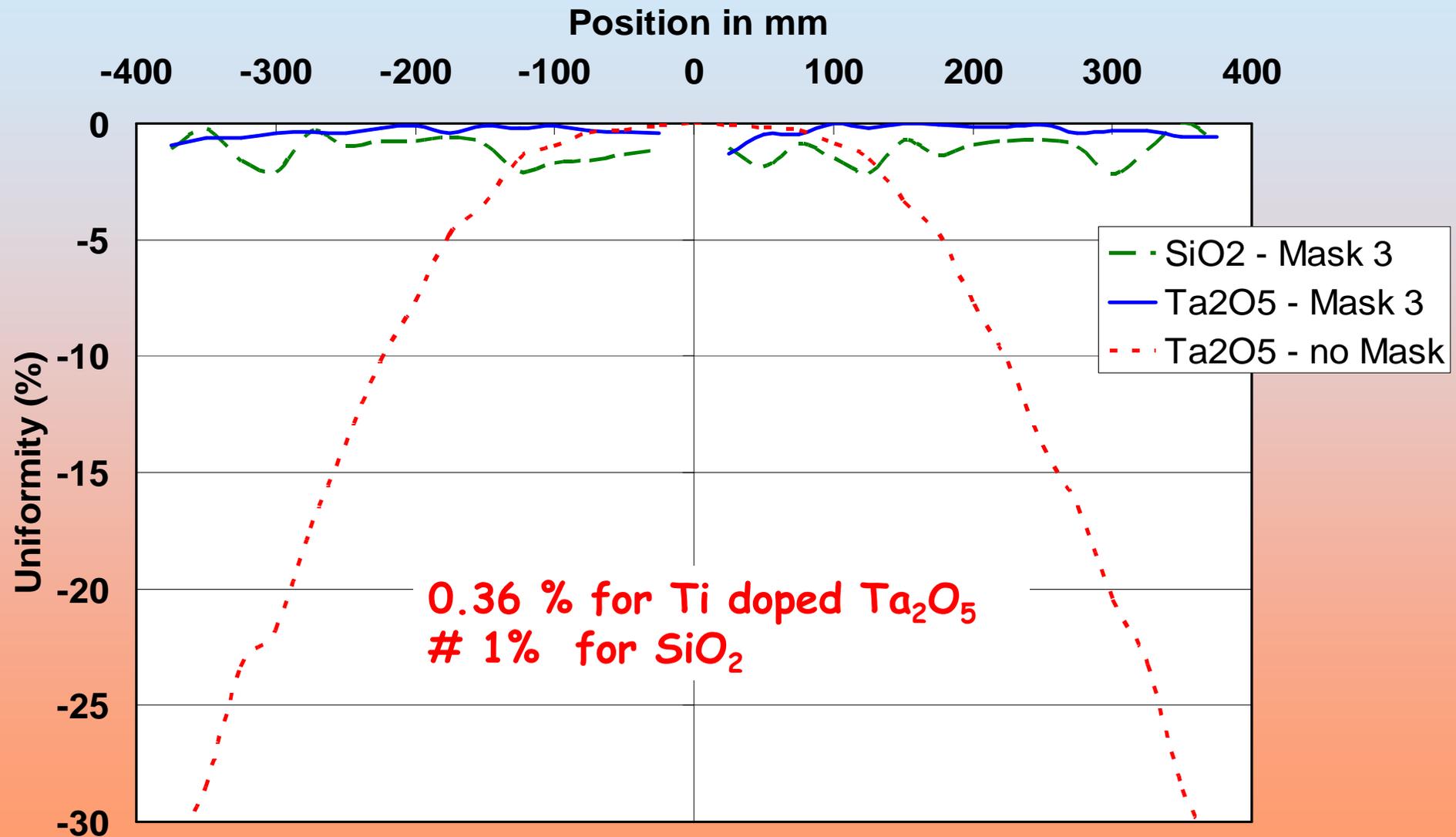
- ❑ Miroirs « jumeaux » avec technique de masquage
- ❑ Outils de simulation développés en interne pour calculer le masque



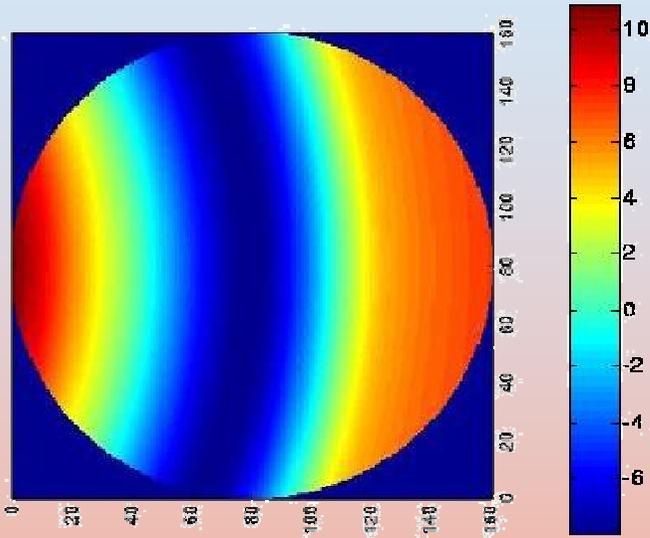


Amélioration de l'uniformité des dépôts IBS

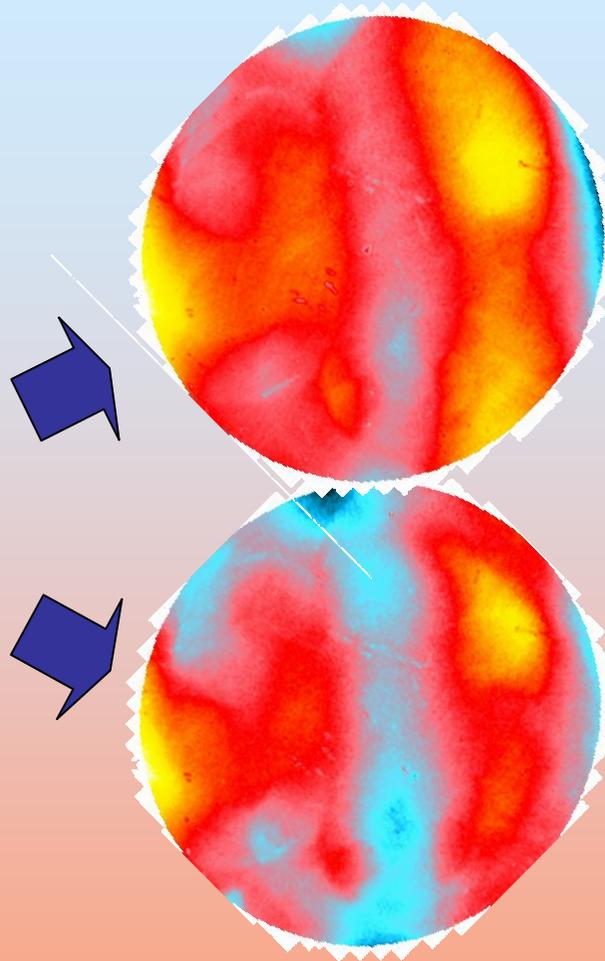
- Uniformité des deux matériaux sur 800 mm de diamètre



Miroirs « jumeaux »



Uniformité attendue
PV ~18nm sur \varnothing 160mm



HR coating sur
substrat 1 :

PV ~11nm &
RMS~1.5nm

HR coating sur
substrat 2 :

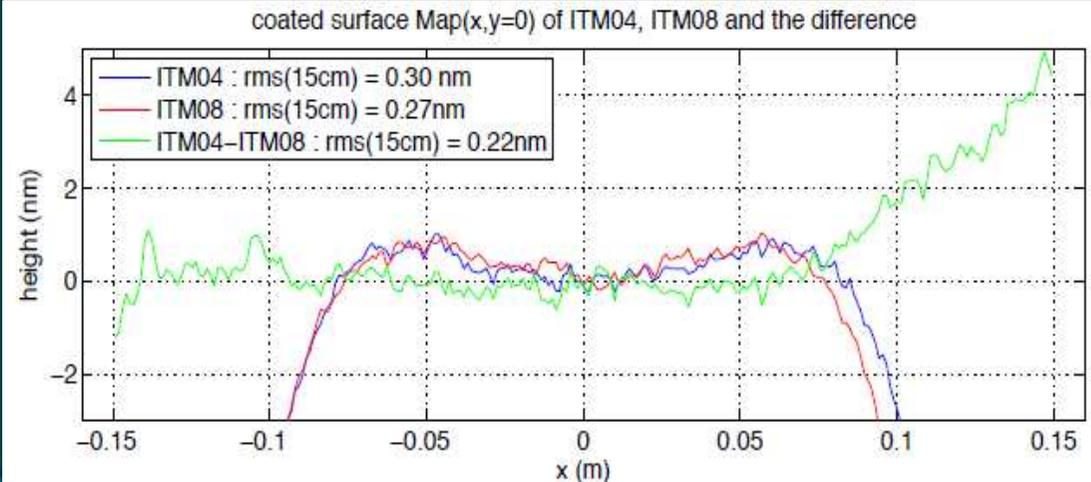
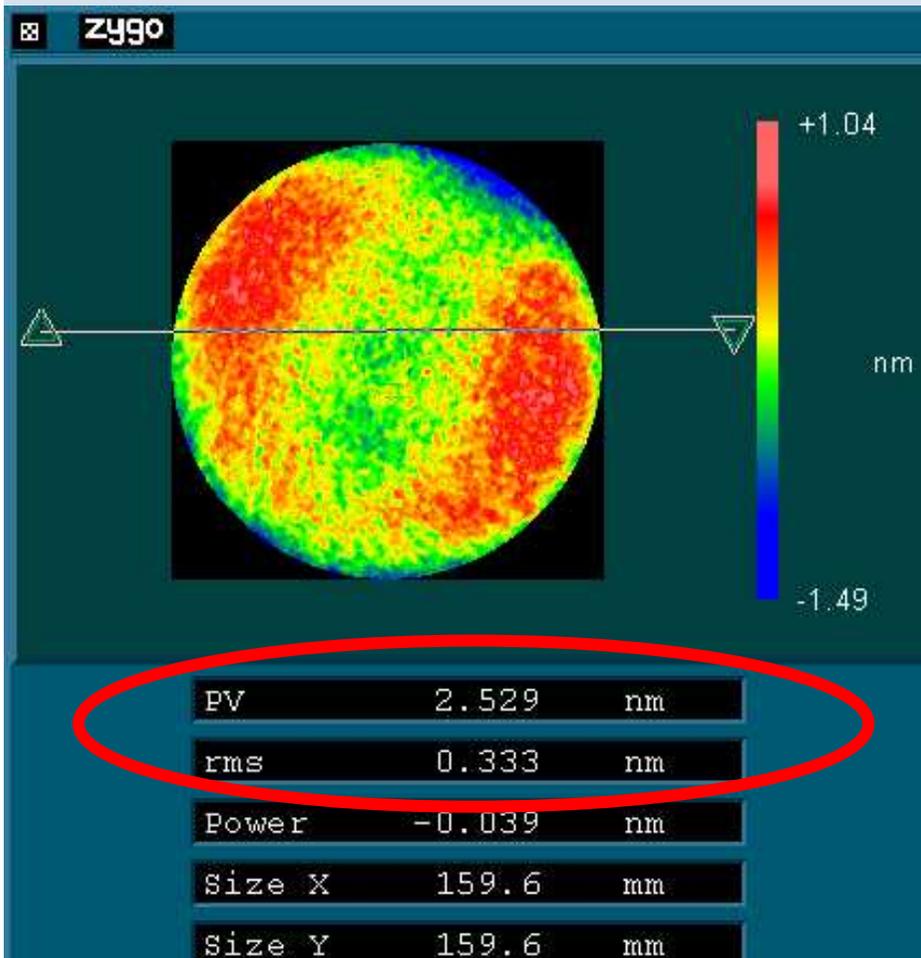
PV~11nm &
RMS~1.6nm

- Variation de courbure (flèche) OK (<8nm)
- Coef. Zernike supérieurs à 0.5 nm : pas acceptable pour Adv. LIGO et Adv. Virgo
- Pertes par aller-retour dans la cavité ~100 – 200 ppm



Amélioration de l'uniformité des dépôts IBS

- ❑ Retour à la rotation simple avec optimisations de la machine de dépôt
- ❑ Très bonne uniformité obtenue sur 160 mm de diamètre : #1 pour mille pour les deux matériaux.



**0,3 nm RMS sur Ø160 mm après dépôt
Miroir d'entrée AdV LIGO
(HR coating T=1.4% à 1064 nm)**

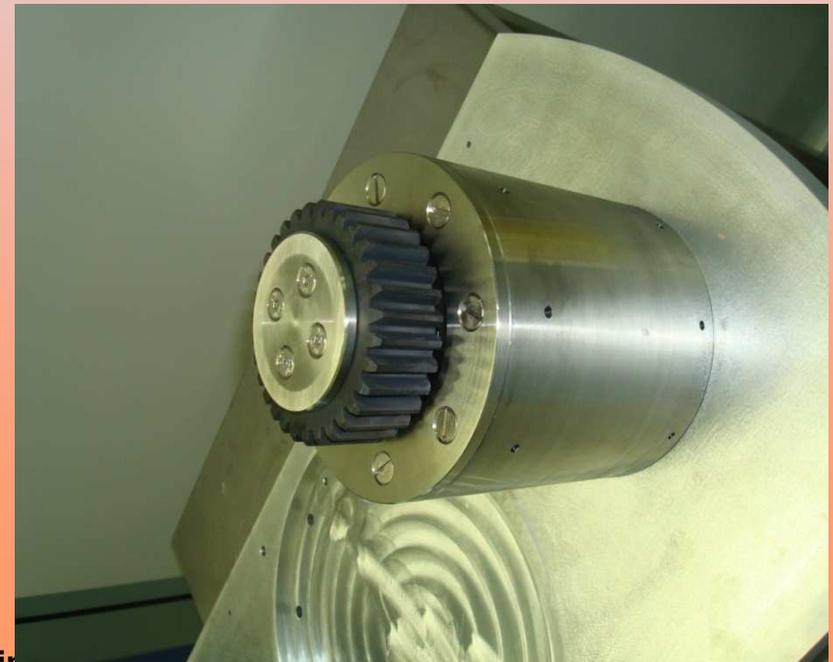
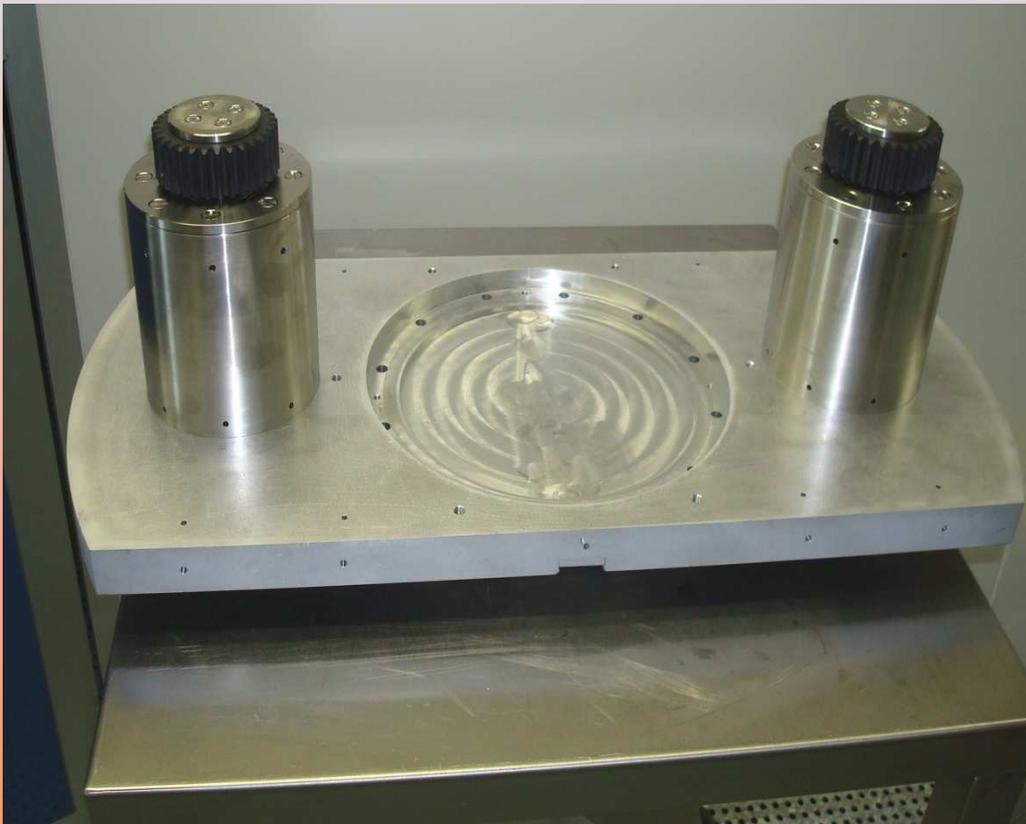
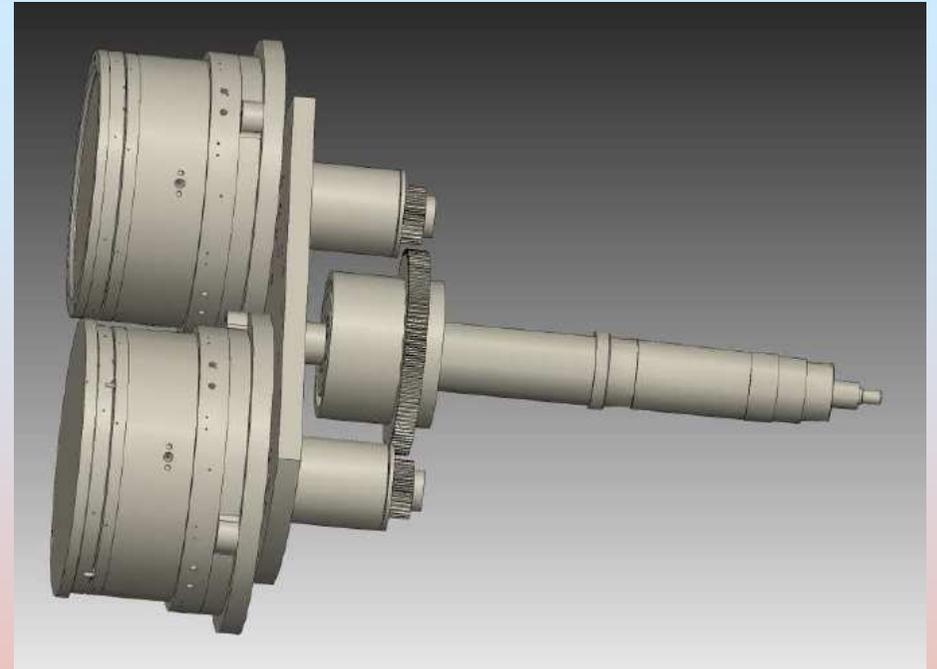
(Caltech measurements)



Amélioration de l'uniformité des dépôts IBS

- ❑ Appairage des deux miroirs IM dans les spécifications même si traités dans deux runs différents : très bonne répétabilité de la machine
- ❑ Le profil du dépôt génère de l'aberration sphérique
 - ❑ OK pour les miroirs d'entrées (IM) (transmission # 1%)
 - ❑ Pas bons pour les miroirs de sortie (EM) (transmission 4 ppm) car dépôt deux fois plus épais, aberration sphérique hors spec.
- ❑ **Seule Solution : Implanter un mouvement planétaire des substrats dans la machine**
- ❑ Avantages : traitement de deux substrats à la fois avec une très bonne uniformité en épaisseur.

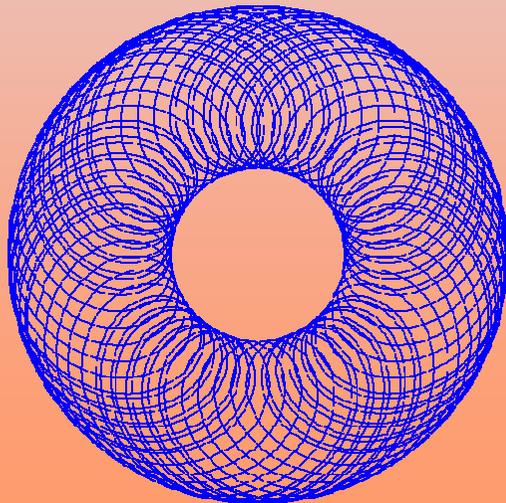
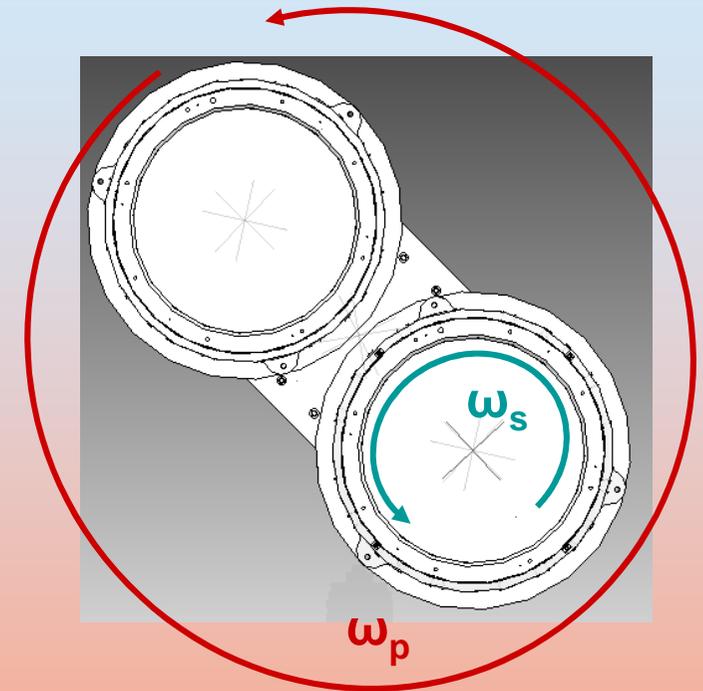
Mouvement planétaire
Installation en cours
Premiers dépôts en Juillet



Mouvement planétaire : une solution pour atteindre l'uniformité sur les EM

Avec un mouvement planétaire on peut :

1. Traiter deux miroirs avec un bon appairage des transmissions
2. Améliorer d'un facteur 5 par rapport à la rotation simple l'uniformité
3. Fournir des surfaces avec de faibles aberrations

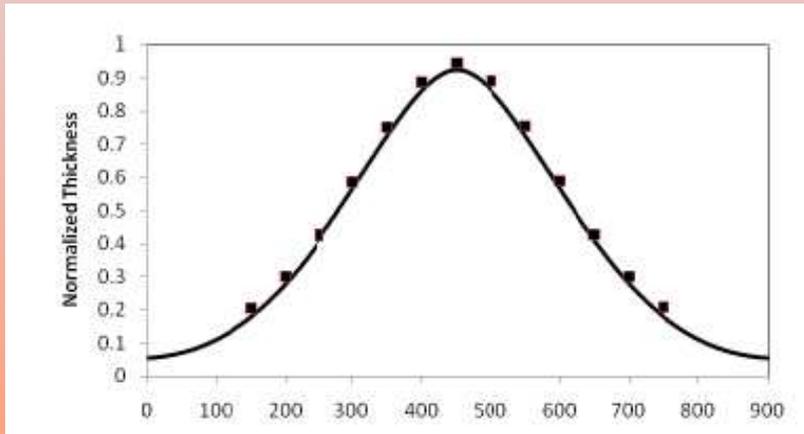
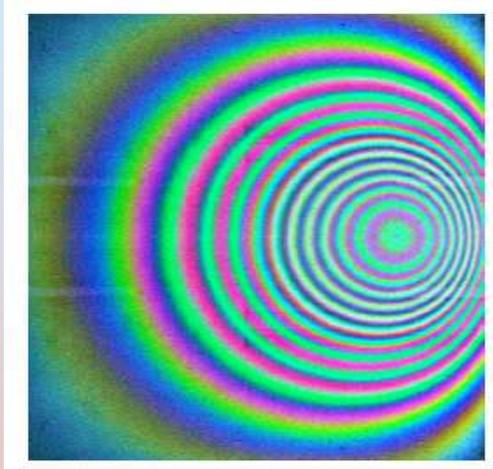


Pour optimiser les paramètres du mouvement, la distribution du dépôt à chaque position doit être connue



On doit savoir la forme de la plume du matériau pulvérisé en 2D

Comment construire ce modèle?



Déposer une monocouche
en statique

Prendre une photo

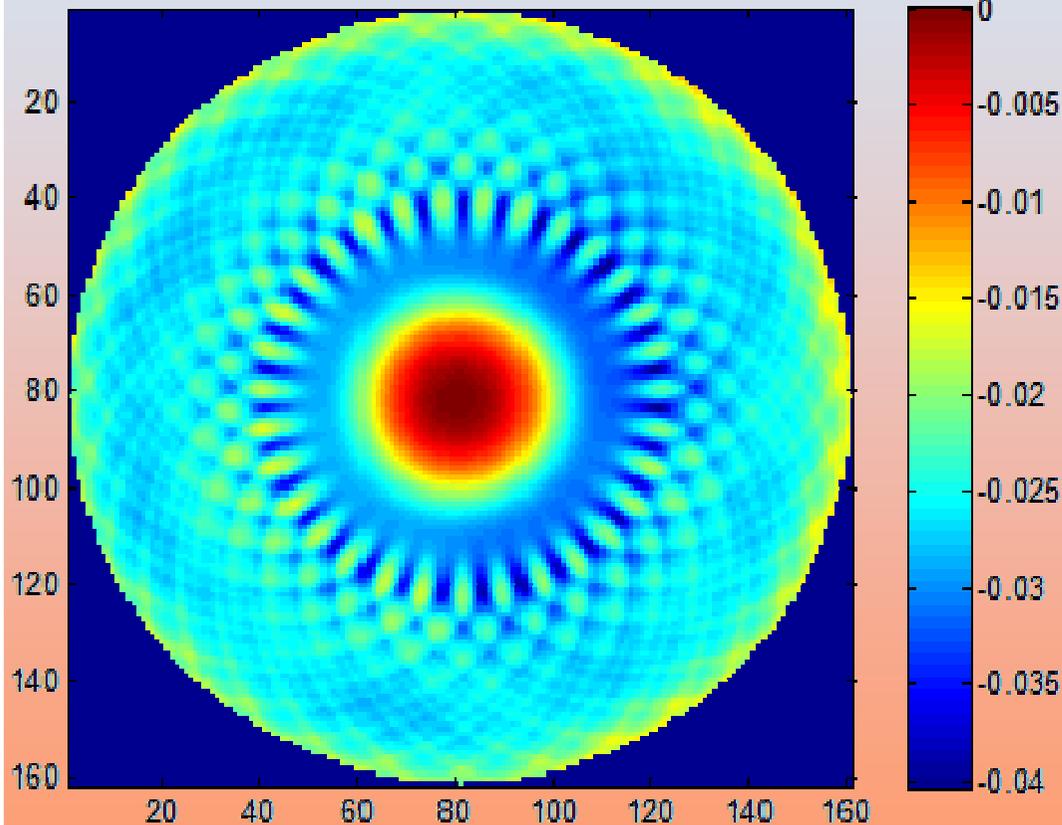
Extraire le profil d'épaisseur

Ajuster avec une
gaussienne

**Dépôt HR = empilement de deux matériaux (SiO_2 & Ta_2O_5)
On doit trouver un modèle pour chaque matériau**

ETM Coating multilayer T= 4 ppm @ 1064nm:
(épaisseur 6.8 μm)

Thickness uniformity (%) over
 $\varnothing 160\text{mm}$ (power removed)



PV ~ 2.5nm & RMS~0.3nm

- masquage
- mouvement planétaire

- ✓ Changement de courbure : < 1.5 nm
- ✓ Coeff. Zernike d'ordre supérieur à deux < 0.5 nm
- ✓ Pertes dans cavité < 10 ppm



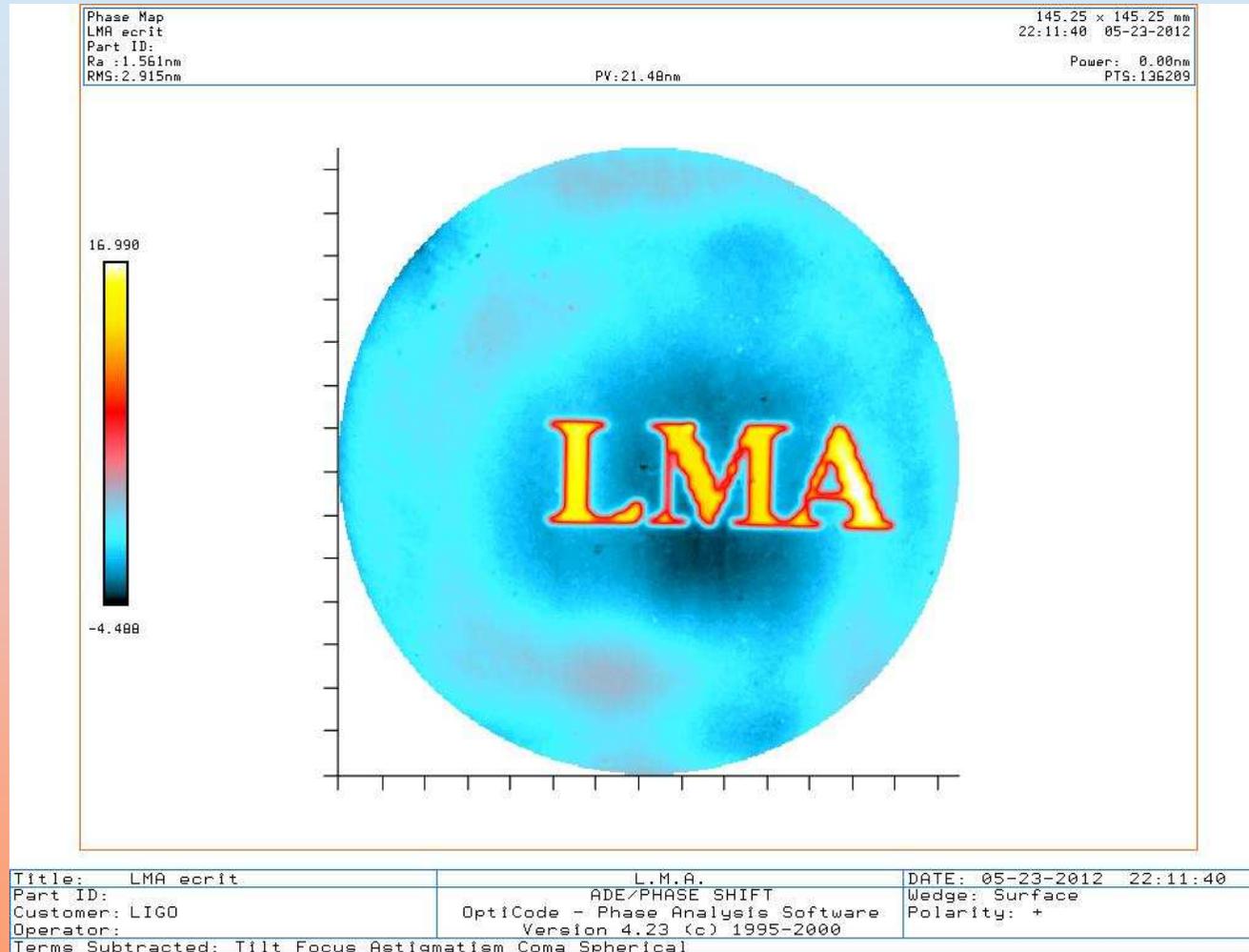
Conclusions et Perspectives

- Bruit thermique des couches minces IBS
 - Ta₂O₅ dopé Ti meilleur candidat pour l'instant
 - Dépôts optimisés : gain supplémentaire sur le bruit thermique
 - Etude des interfaces en cours, de nouveaux matériaux, de nouvelles techniques de dépôt

- Traitement Correctif
 - Preuve expérimentale que cela marche et que l'on atteint les spécifications de planéité pour les substrats pour les ITF gravitationnels de 2^{ème} générations
 - Corrections des substrats Advanced Virgo, nouvelle métrologie

- Uniformité des dépôts IBS
 - Planéité de 0.3 nm rms sur Ø160 mm
 - Pour améliorer encore : mouvement planétaire en cours de développement

MERCI DE VOTRE ATTENTION



***Ecrit sur une substrat de silice avec le traitement correctif
Mesure expérimentale***