

Les miroirs de la première détection des ondes gravitationnelles

Laurent PINARD

Responsable Technique

Laboratoire des Matériaux Avancés –IN2P3/CNRS – Lyon

<http://lma.in2p3.fr>

Pour le team VIRGO du LMA (C. Michel, B. Sassolas, L. Balzarini, J. Degallaix,
V. Dolique, R. Flaminio, D. Forest, M. Granata, B. Lagrange, N. Straniero,
J. Teillon, G. Cagnoli)

Plan de l'exposé

❖ Introduction

- Détection onde gravitationnelle : Evènement, Description
- Les détecteurs Advanced LIGO et Advanced Virgo

❖ Les miroirs des interféromètres de 2^{ème} génération

- Les substrats : matériaux, polissage
- Coatings haute réflectivité et antireflet

❖ Conclusion

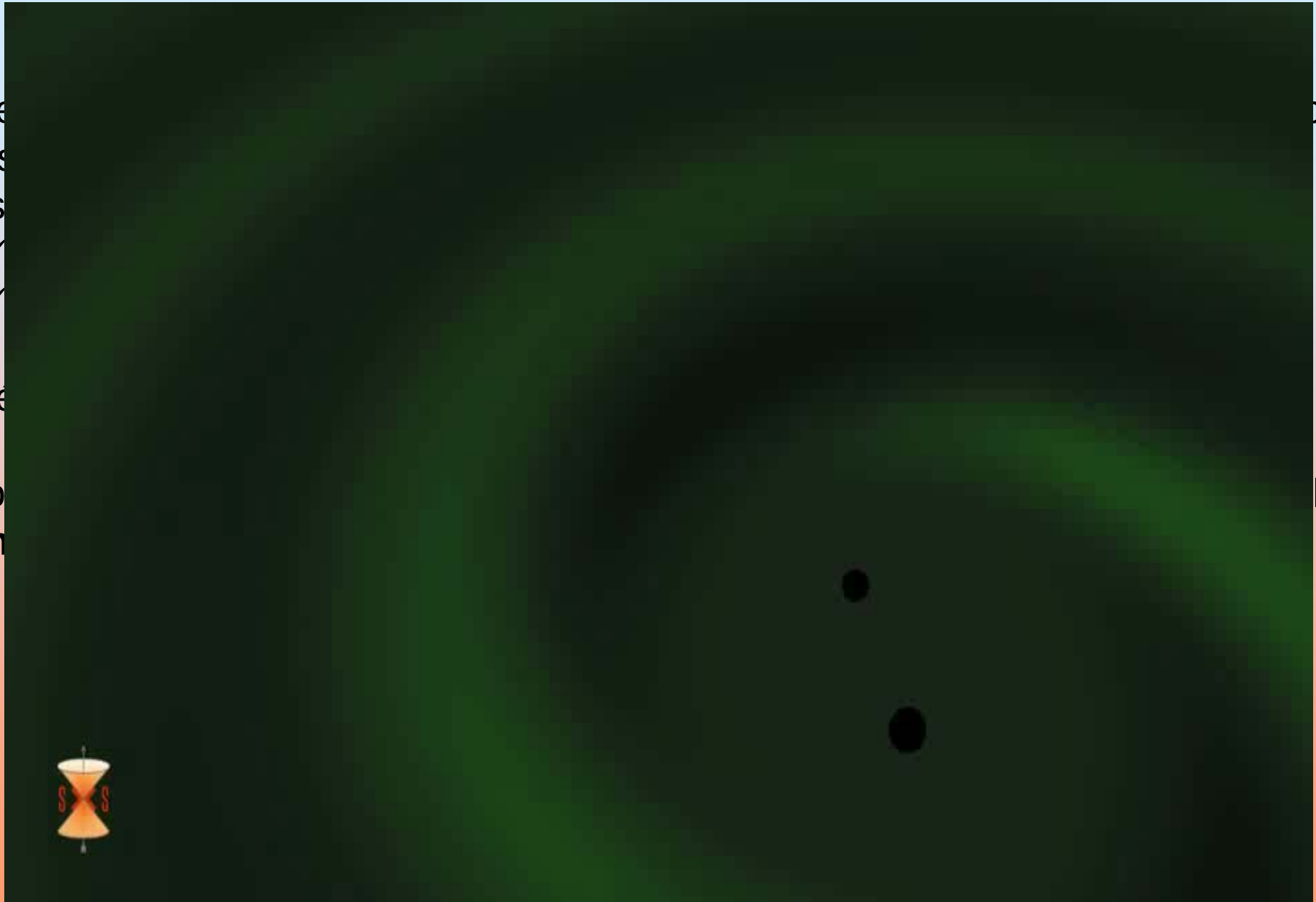
❑ Première détection **DIRECTE** d'une onde gravitationnelle (ondulation de l'espace temps) le 14/09/2015 par les deux détecteurs Advanced LIGO : Conférence de presse le 11 Février 2016 à Washington collaboration LIGO-Virgo

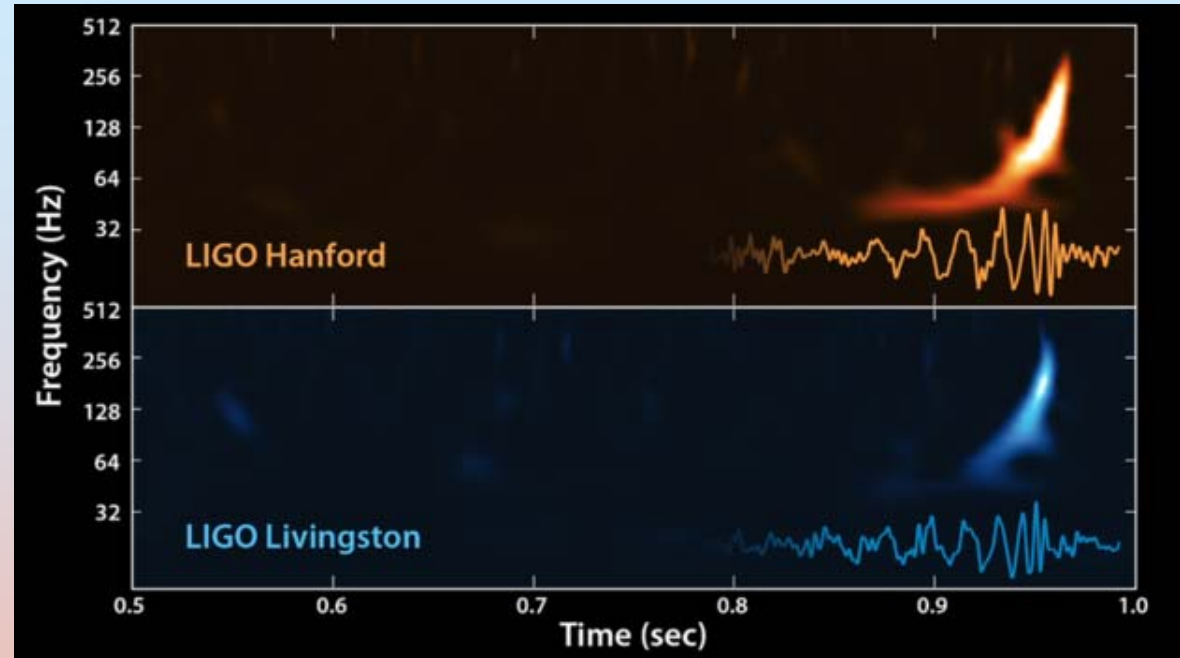
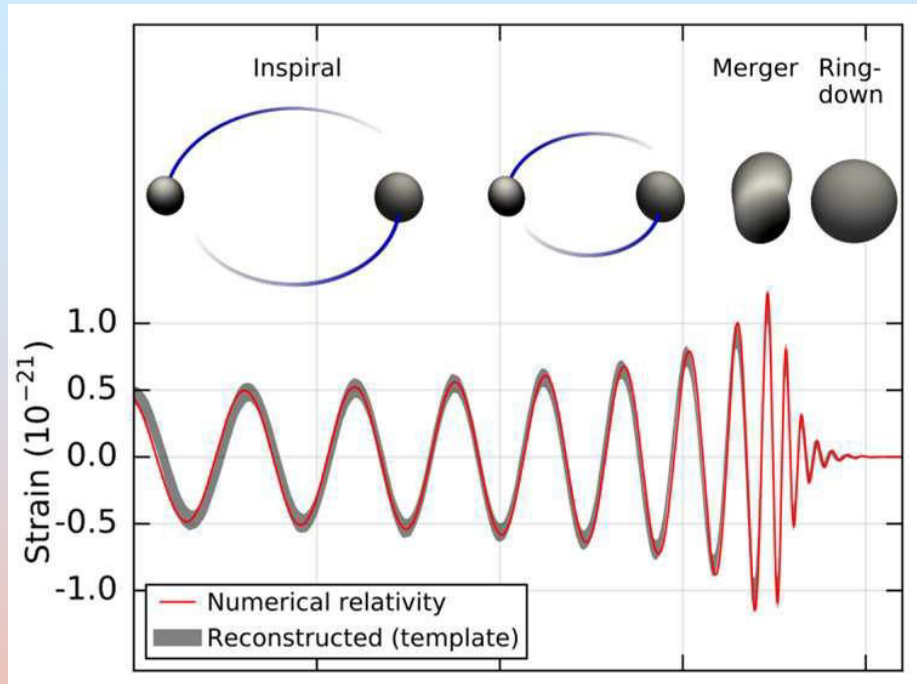
- ✓ <https://www.youtube.com/watch?v=vd1Pak5f6GQ>
- ✓ Article : PRL 116, 061102 (2016)

❑ Prédications d'Einstein en 1915 enfin vérifiées!!

❑ Coalescence et fusion de deux trous noirs de masse **#30 fois** celle du soleil il y a **1,3 milliard d'années**, se déplaçant à **1/2C**

- ☐ Prétempérature pressurisée
- ☒ Prétempérature pressurisée
- ☒ Prétempérature pressurisée
- ☐ Prétempérature pressurisée
- ☐ Coefficient de dilatation 1,3 m





- ❑ Concordance entre Simulation et Signaux mesurés (détection simultanée sur les deux détecteurs, écart 8 msec)
- ❑ 1^{ère} détection d'un signal provenant de trous noirs (pas d'autres moyens)
- ❑ Nouvelle ère qui commence : Astronomie Gravitationnelle



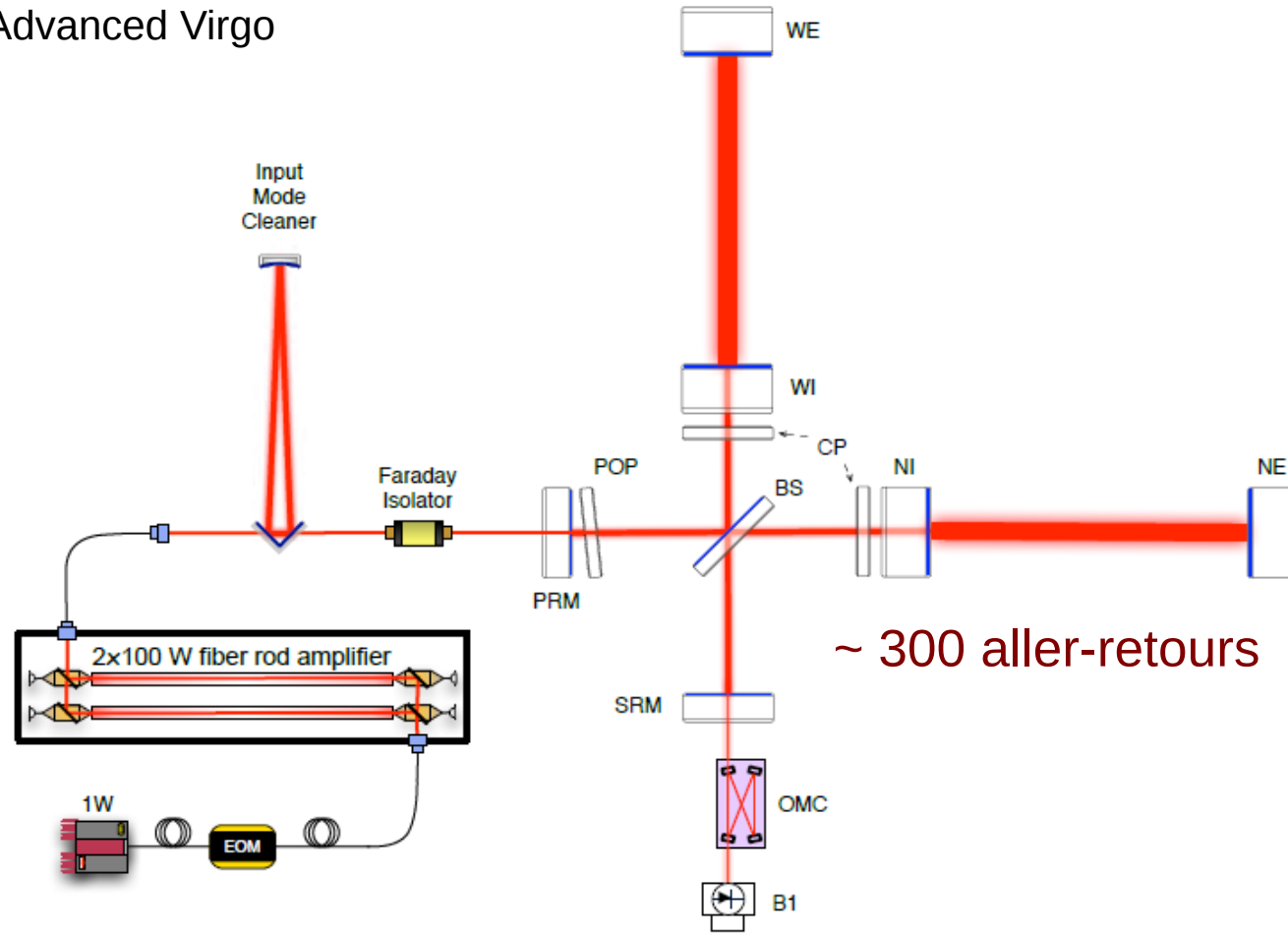
3 Interféromètres de type Michelson ayant des bras de 3 ou 4 km en Italie près de Pise ou aux Etats Unis

1 détecteur en construction au Japon et bientôt aussi en Inde (LIGO India)

Futur réseau de détecteurs : triangulation possible pour déterminer la position de l'évènement cataclysmique



Advanced Virgo



- ❑ Mesure des variations relatives de distance de l'ordre de 10^{-19} m (à 100 Hz)
- ❑ Nécessaire d'avoir des GRANDS miroirs ($\varnothing 35$ cm, ep. 20 cm) ayant de très faibles pertes optiques/mécaniques
- ❑ **Le LMA a réalisé les miroirs d'Advanced LIGO et Advanced Virgo : L'onde gravitationnelle mesurée (et les futures...) est passée entre 2 miroirs traités au LMA**

❑ Pour Advanced Virgo :

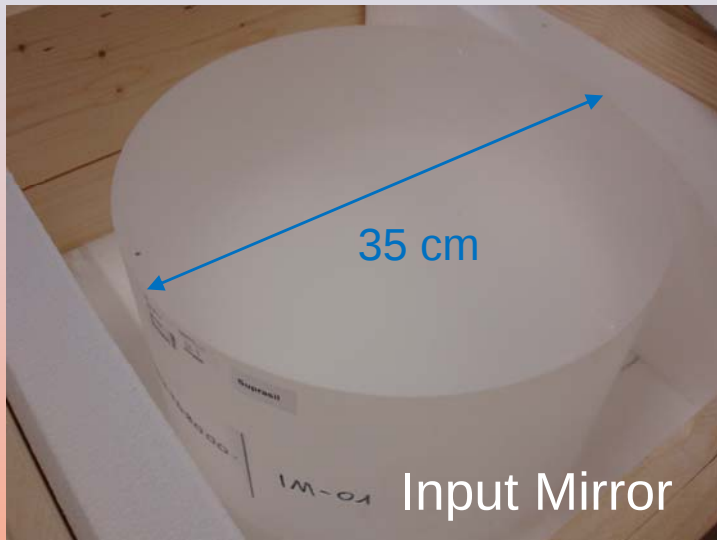
Pertes par aller retour = **75 ppm** (spécif.)



25 ppm : Abs+Diff+T

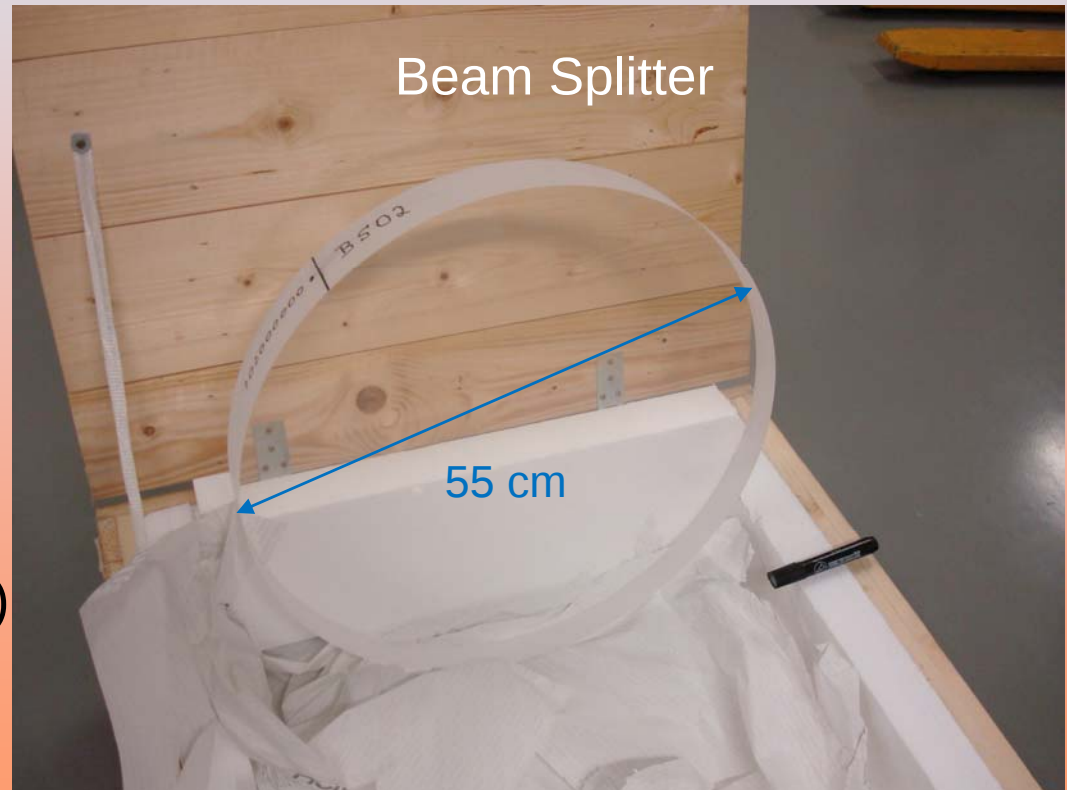


50 ppm : défauts de planéité
spécif. très sévère



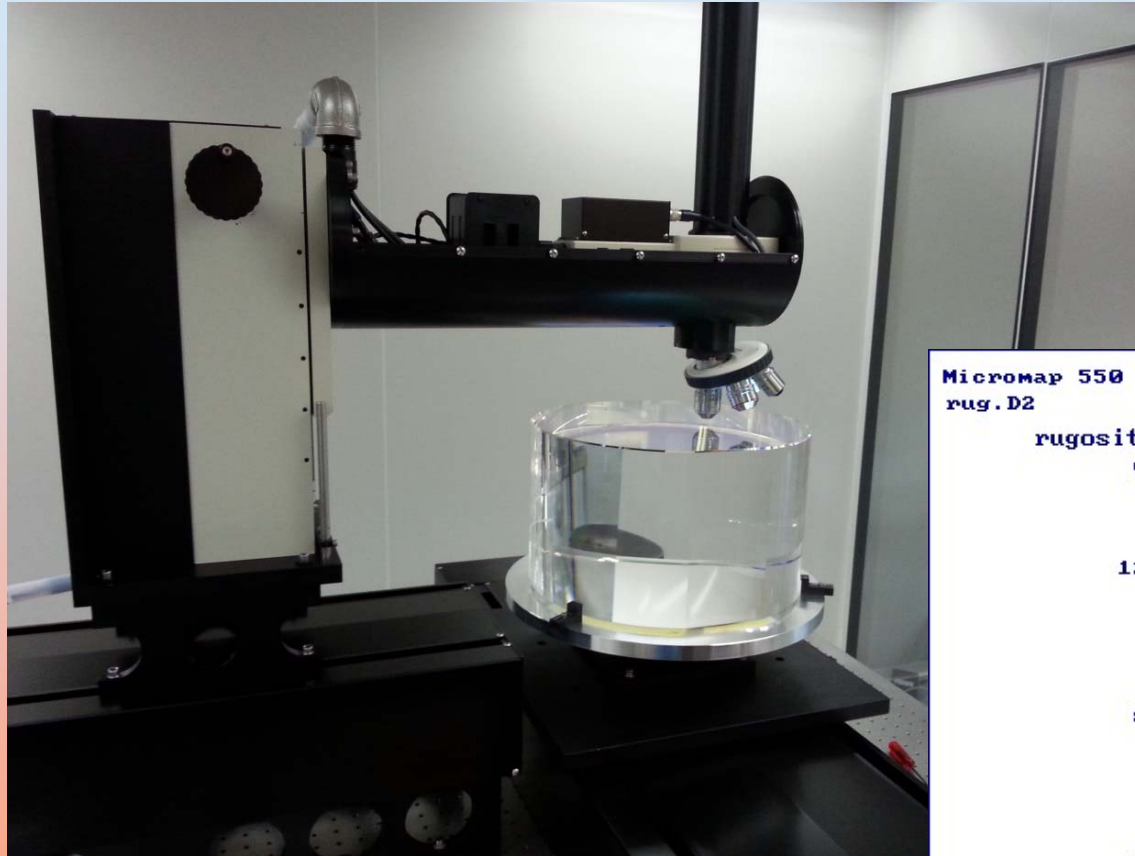
Substrat :

- ✓ Silice faible absorption (Suprasil 3002)
- ✓ Diamètre = 35 cm,
- ✓ Epaisseur = 20 cm, Poids = 40 kg
- ✓ Cout 130 k€ (sans polissage)

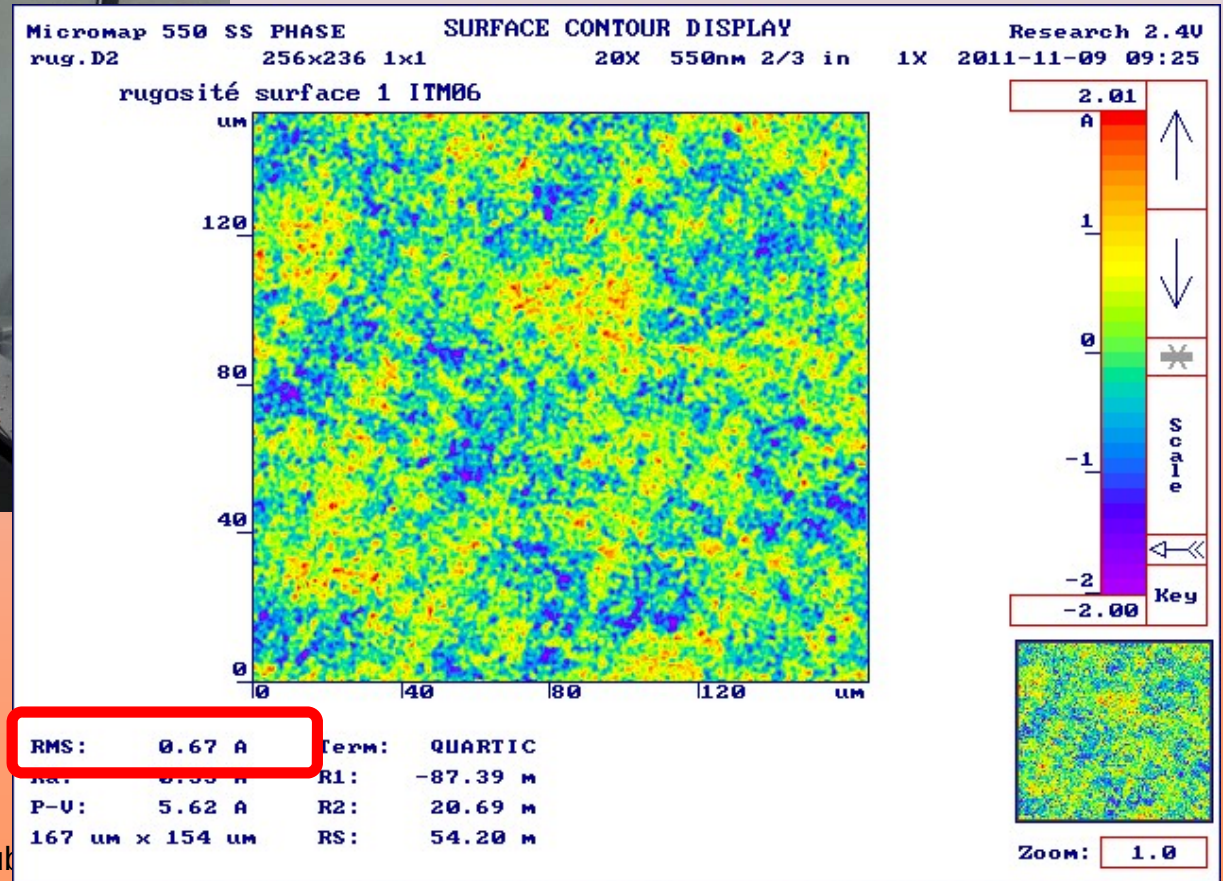


Les miroirs des interféromètres : le Substrat

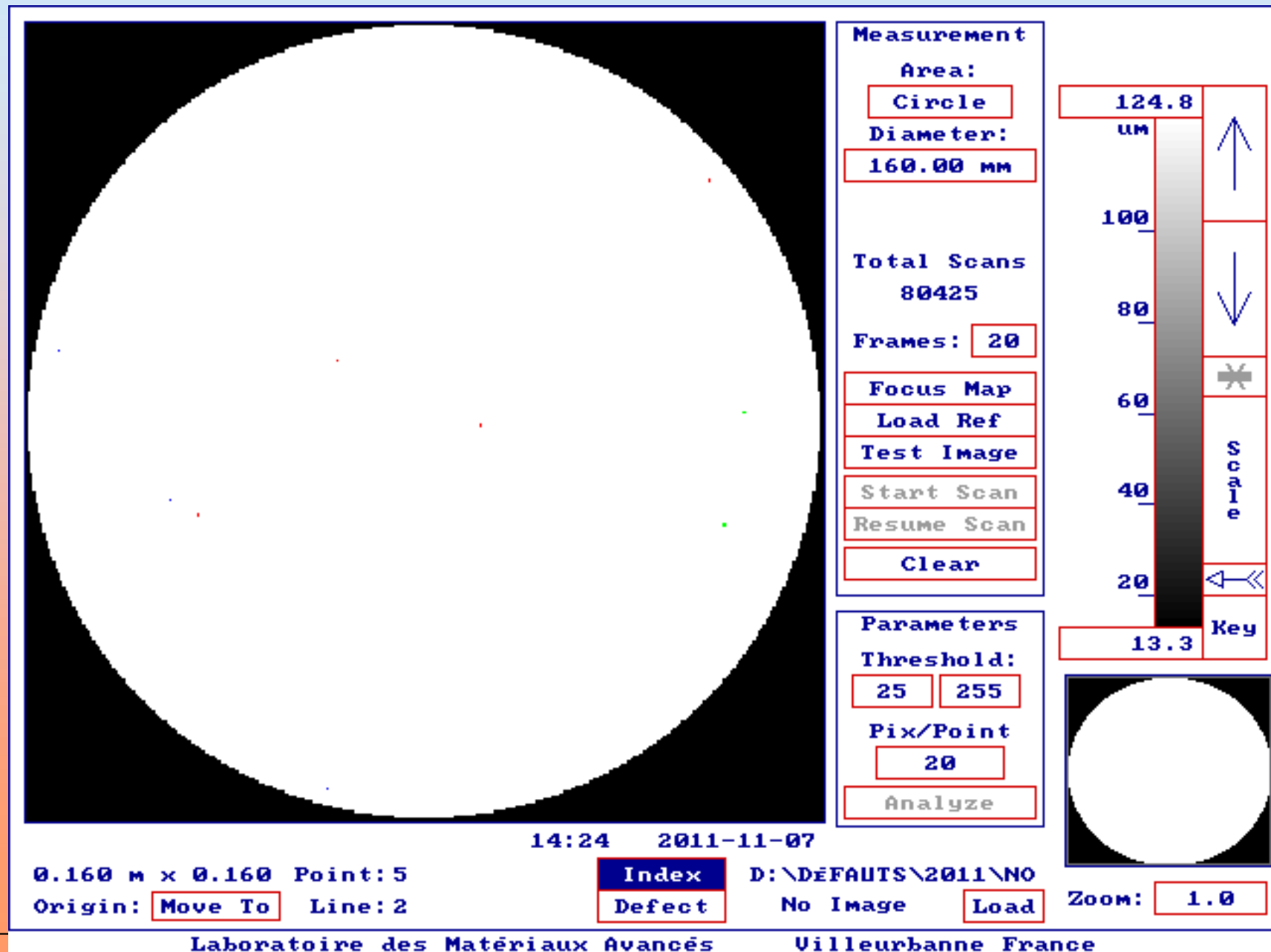
❑ Polissage : Spécifications sur le nombre de défauts ponctuels et la microrugosité ($<1 \text{ \AA RMS}$) très sévères pour ne pas générer de la diffusion.



0.67 +/- 0.1 Angströms RMS

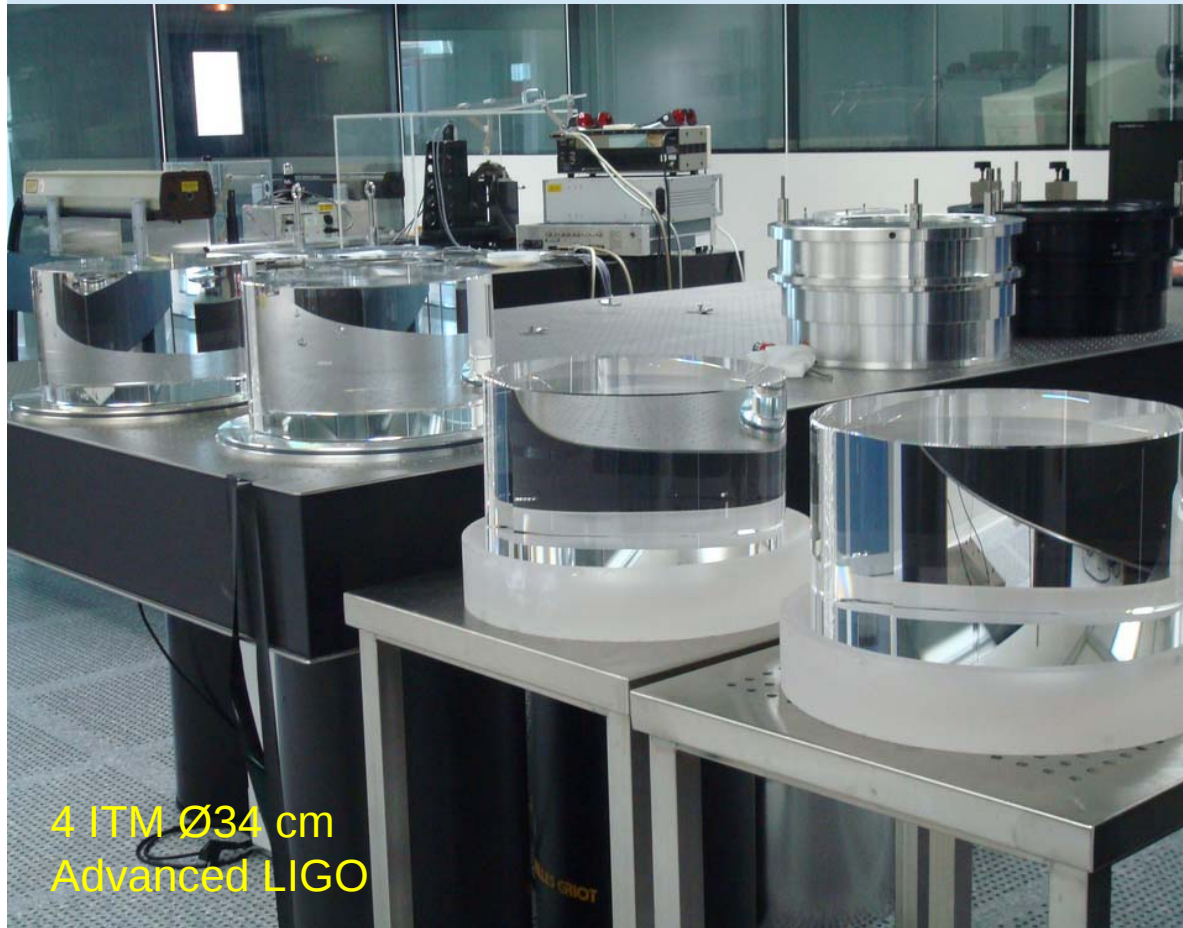


- ❑ Détection de défauts sur un substrat Advanced Virgo : 10 défauts ponctuels sur Ø16 cm (taille max 10 µm)



Les miroirs des interféromètres : le Substrat

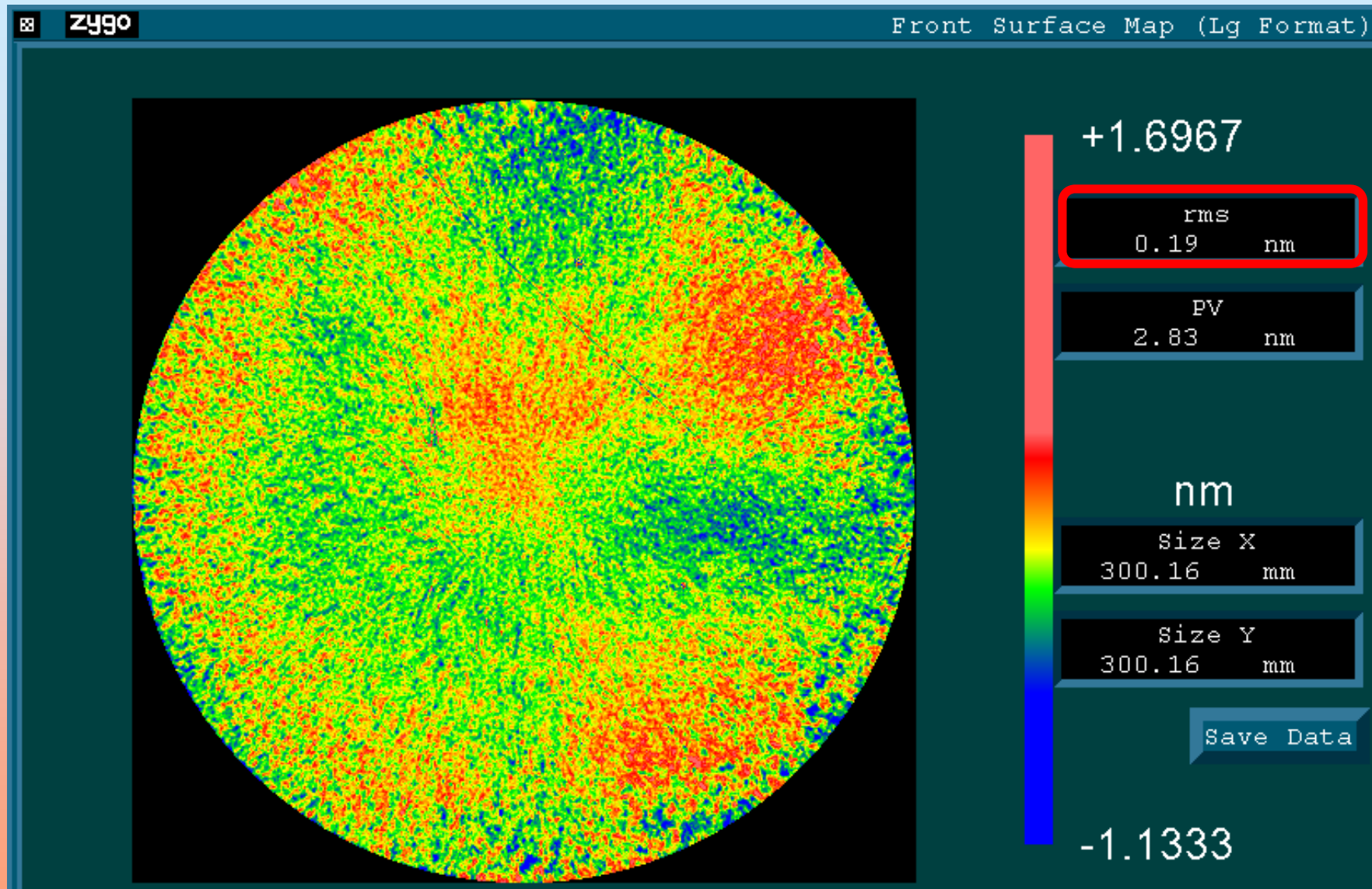
- ❑ Polissage : Planéité requise : $< 0,5 \text{ nm RMS}$ sur $\varnothing 15 \text{ cm}$ (jamais réalisé auparavant) - Polissage ionique (ZYGO corp.)



4 ITM $\varnothing 34 \text{ cm}$
Advanced LIGO



IM $\varnothing 35 \text{ cm}$
Advanced Virgo



Substrat IM Advanced Virgo : 0.19 nm RMS - 2,8 nm PV (30 cm diam.)

- ❑ Spécifications sur les coatings également très sévères comparées à celles des miroirs de 1^{ère} génération
 - ✓ Réflexion/Transmission à 532 nm et 1064 nm
 - ✓ Transmission matching entre les miroirs: $2|(T1 - T2) / (T1 + T2)| < 0.01$
 - ➔ *Traiter deux substrats à la fois*
 - ✓ Contraintes sur le bruit thermique des dépôts
 - ✓ Epaisseur totale du matériaux Haut indice (Ti-Ta₂O₅) aussi faible que possible, Design Optimisé
 - ✓ Très faible absorption : **< 0.5 ppm à 1064 nm**
 - ✓ Diffusion moyenne : **< 10 ppm à 1064 nm**
 - ✓ Réflexion résiduelle Antireflet très basse à 1064 nm: **< 100 ppm, Goal 50 ppm**
 - ✓ Uniformité des dépôts : **< 0,5 nm RMS Ø15 cm**, (amplitude de tous les tous les coef. Zernike **< 0.5 nm**)

Les miroirs des interféromètres : les coatings

Absorption/Diffusion

- ❑ Amélioration de l'absorption moyenne sur Ø15/16 cm à 1064 nm des miroirs HR avec la combinaison du Ti:Ta₂O₅ et du design optimisé (R&D commencée avec LIGO en 2006)
 - ✓ 0.5-0.6 ppm pour les miroirs de Virgo+ (2009)
 - ✓ Pour les 10 ITMs LIGO : **0.22 +/- 0.03 ppm**
 - ✓ Pour les 10 ETMs LIGO: **0.27 +/- 0.07 ppm** (Mesures LMA)
 - ✓ Idem pour les miroirs Advanced Virgo
- ❑ Valeurs confirmées par les mesures faites à Caltech par LIGO sur un banc d'absorption différent, ainsi que par des mesures in-situ

Les miroirs des interféromètres : les coatings

Absorption/Diffusion

- ❑ Pour améliorer la diffusion après dépôt :
 - ✓ Nouvelle machine de nettoyage humide, meilleure efficacité sur les petites particules

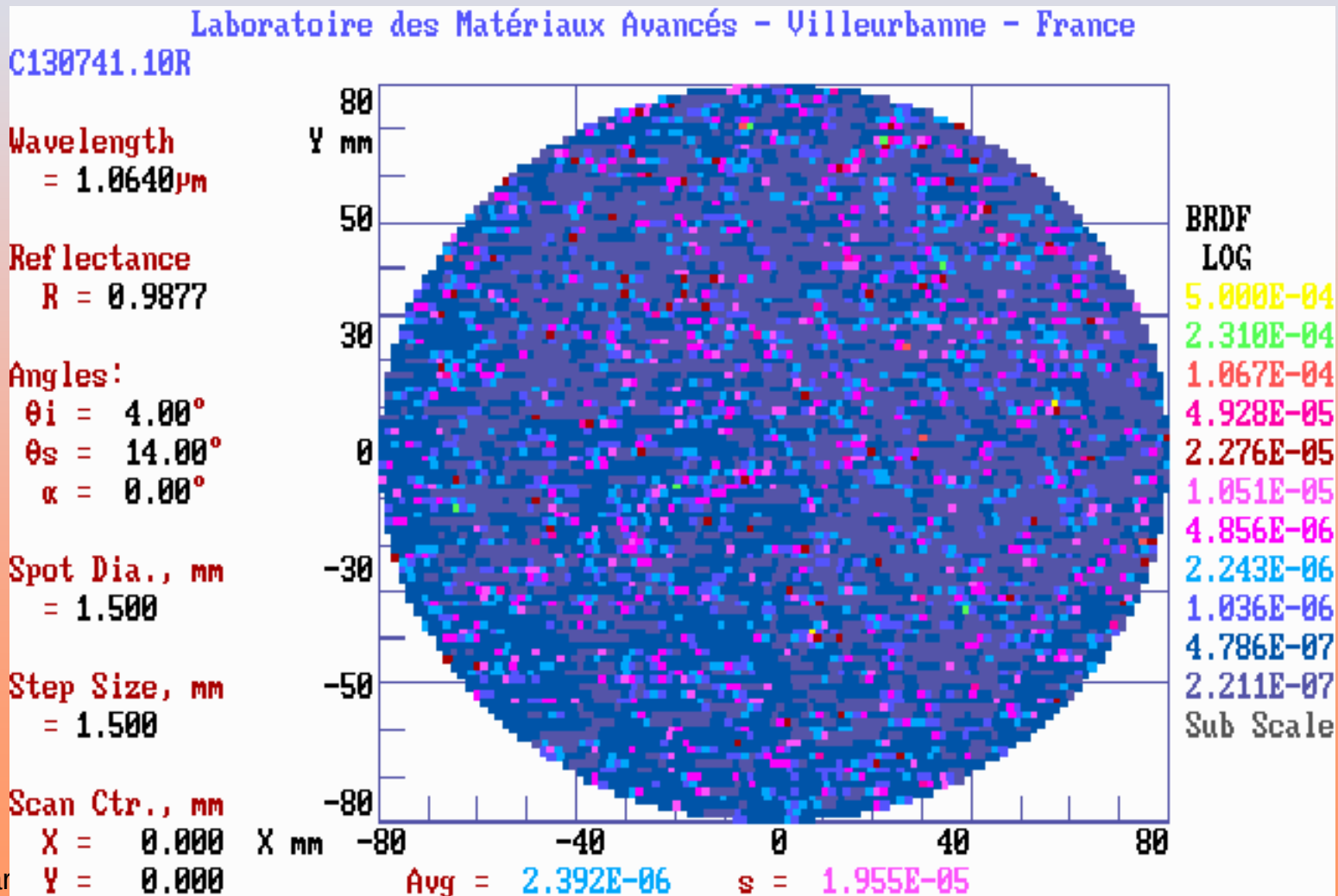


- ✓ Amélioration du contrôle de surface avant de fermer la porte de la chambre (observation visuelle dans le noir avec une lampe halogène puissante)

Les miroirs des interféromètres : les coatings

Absorption/Diffusion

- ❑ Diffusion moyenne des coatings HR sur Ø15/16 cm:
 - ✓ Sur les 12 miroirs d'entrée (LIGO ou VIRGO) : **3.7 +/- 1.2 ppm**
 - ✓ Sur les 12 miroirs d'extrémité (LIGO ou VIRGO) : **4.9 +/- 1.5 ppm**
 - ✓ Meilleur résultat : **2.3 ppm**



Les miroirs des interféromètres : les coatings

Uniformité des dépôts

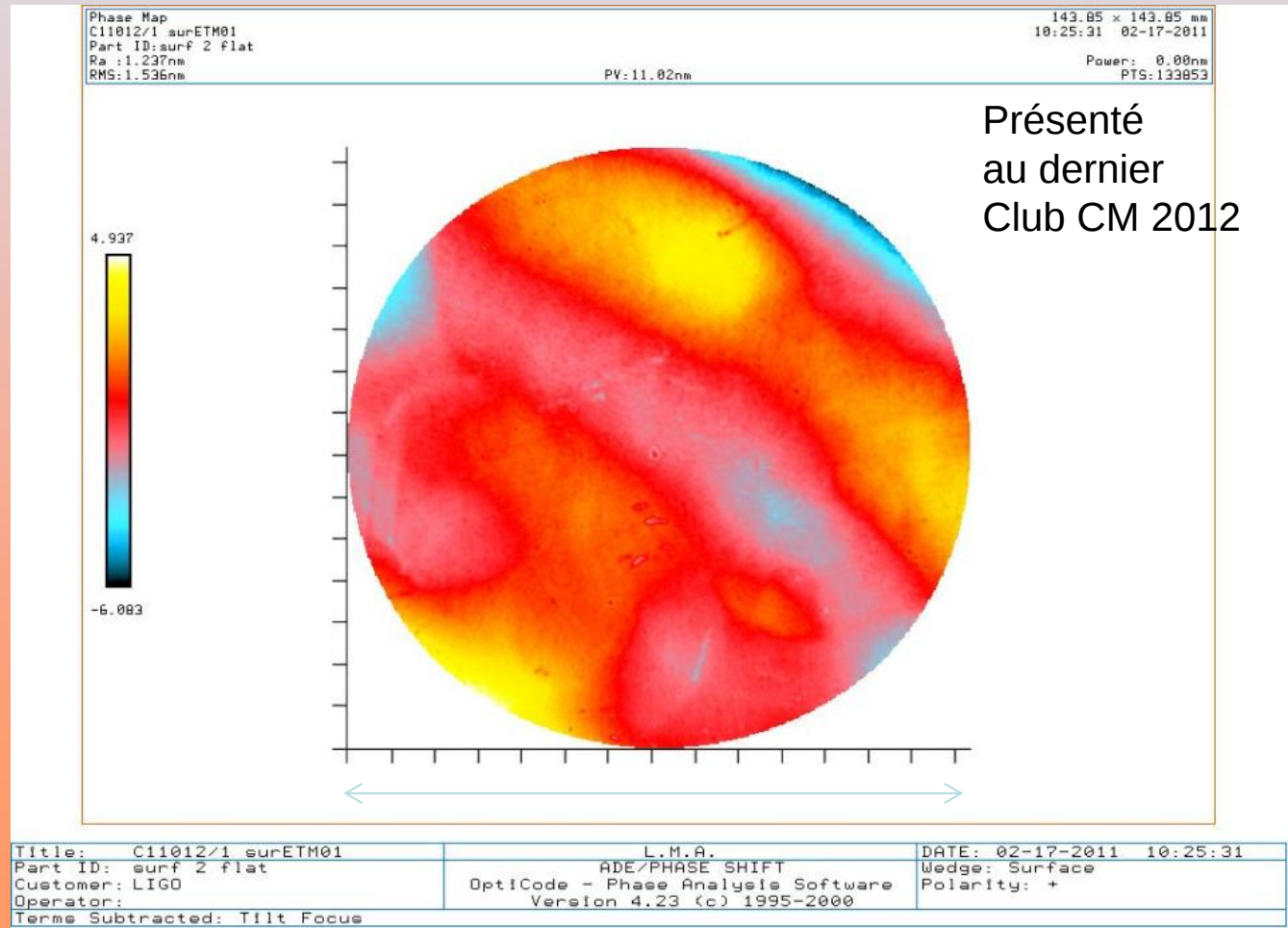
Un travail de plus de 4 ans

- ❑ Première solution utilisée: les deux substrats traités en même temps avec une rotation simple et des masques (les substrats sont fixes)

**1,5 nm RMS on Ø16 cm,
Beaucoup de Poly. Zernike > 0,5 nm
Pas suffisant**



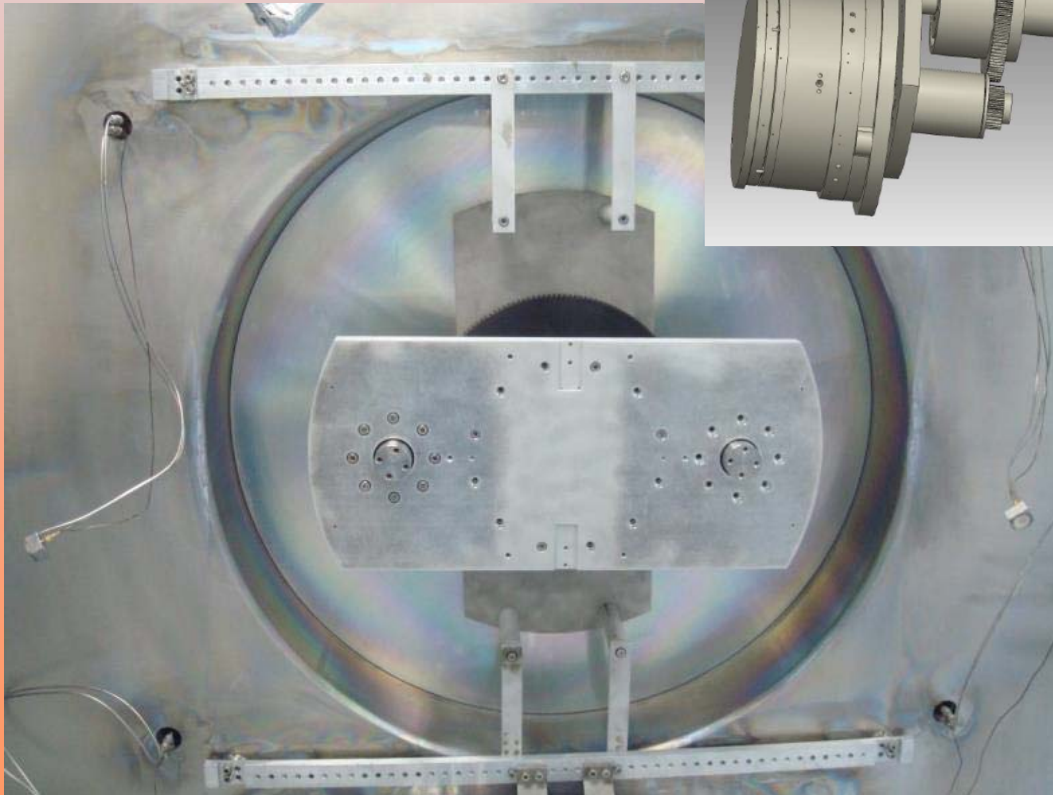
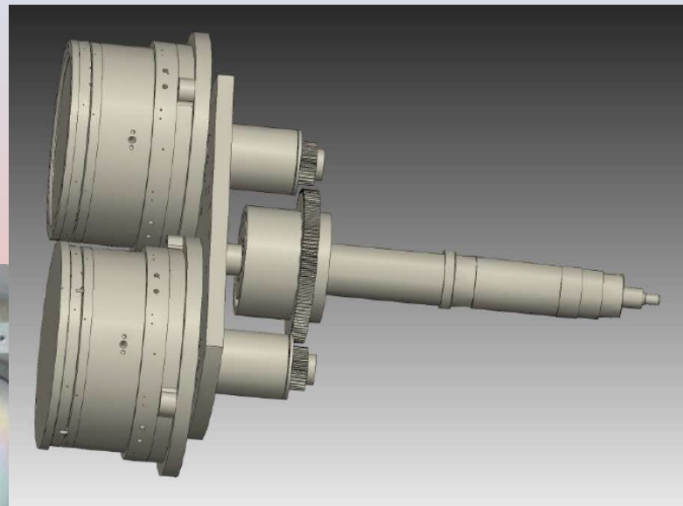
Marseille – 18 mars 2016



Les miroirs des interféromètres : les coatings

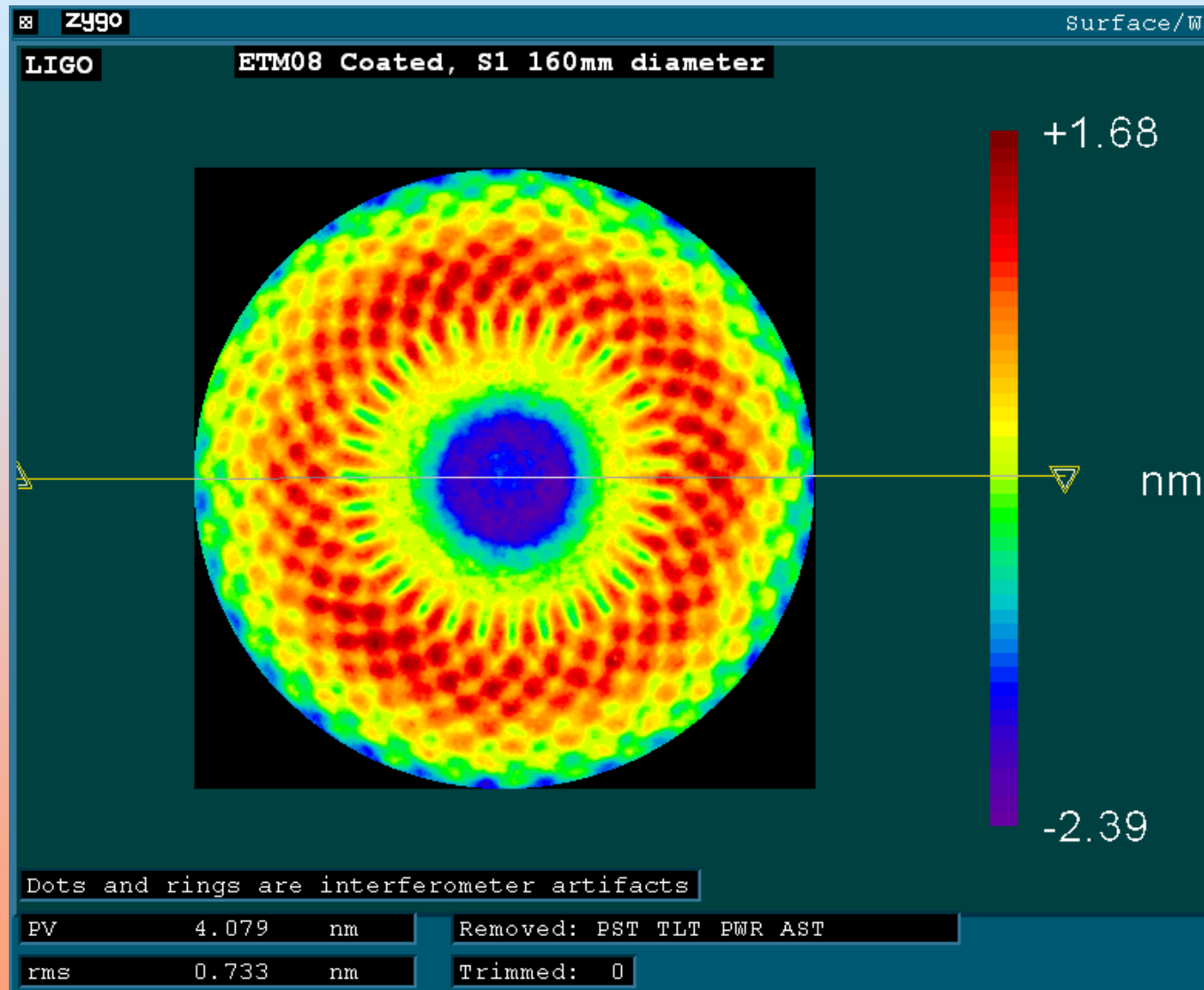
Uniformité des dépôts

- ❑ **Challenge** : préserver la planéité des substrats après dépôt par Ion Beam Sputtering, surtout pour les EM (dépôt HR, 6 μ m d'épais, T=4 ppm)
- ❑ **Technique utilisée** : mouvement planétaire (développé en 2012) avec masquage, optimisation pendant un an



Les miroirs des interféromètres : les coatings

Uniformité des dépôts

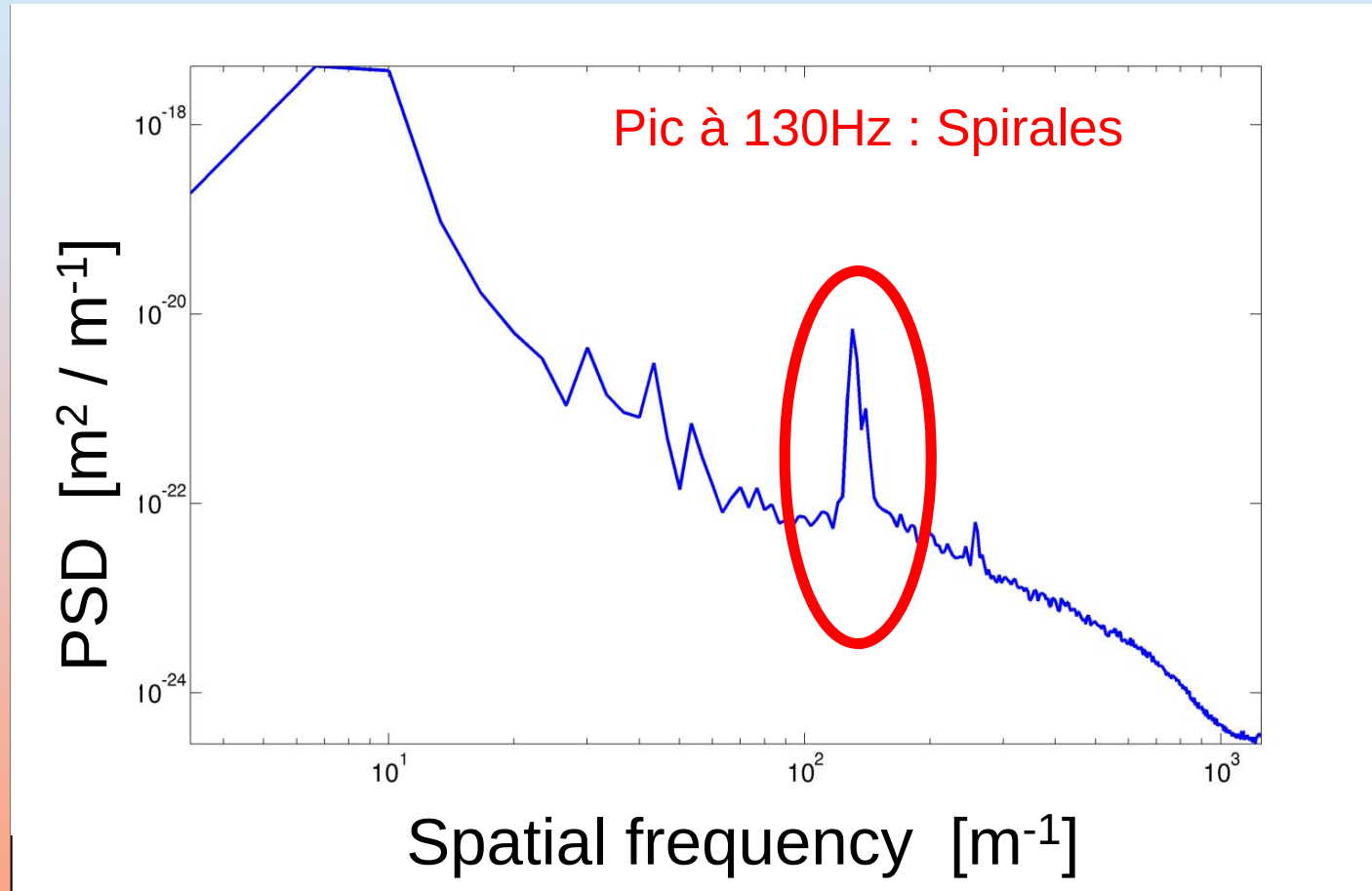


0,73 nm RMS
MAIS
Pertes par aller-retour
sont bonnes (13 ppm)

- ☐ **Spirales** : combinaison du mouvement planétaire et du masquage (discontinuité) : sans masque, pas de spirales – Amplitude PV max : 1 nm – Prévu par simulation

Uniformité des dépôts

- ❑ **Spirales** : Problème pour Advanced LIGO pas pour Advanced Virgo : lumière diffusée par les spirales réfléchi par les tubes à vide et réinjectée dans l'ITF. (bruit)



- ❑ **Un vrai challenge** : supprimer des spirales de 1-1,5 nm PV comparées à l'épaisseur totale du coating HR de 6000 nm pour les End mirrors sans dégrader l'uniformité globale du coating.

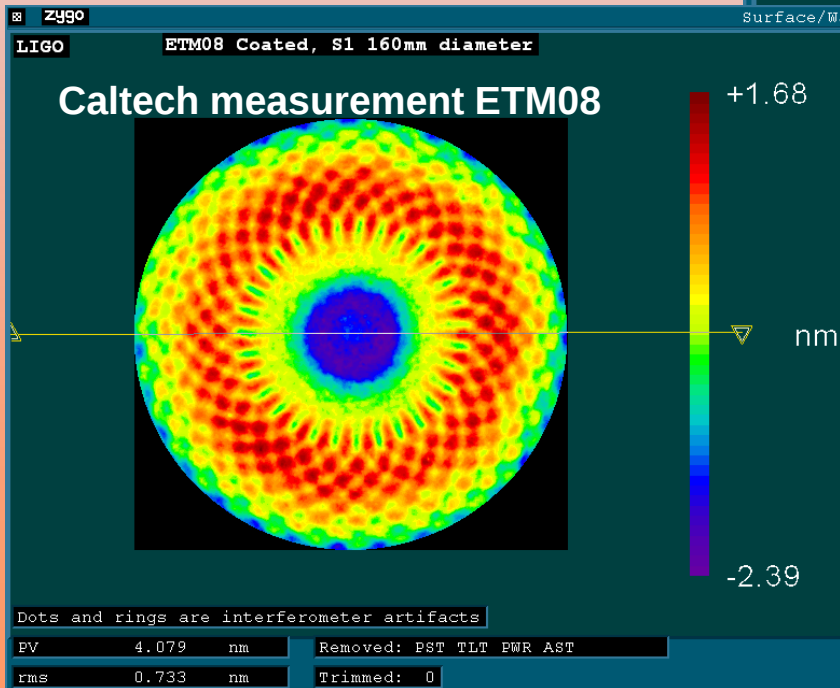
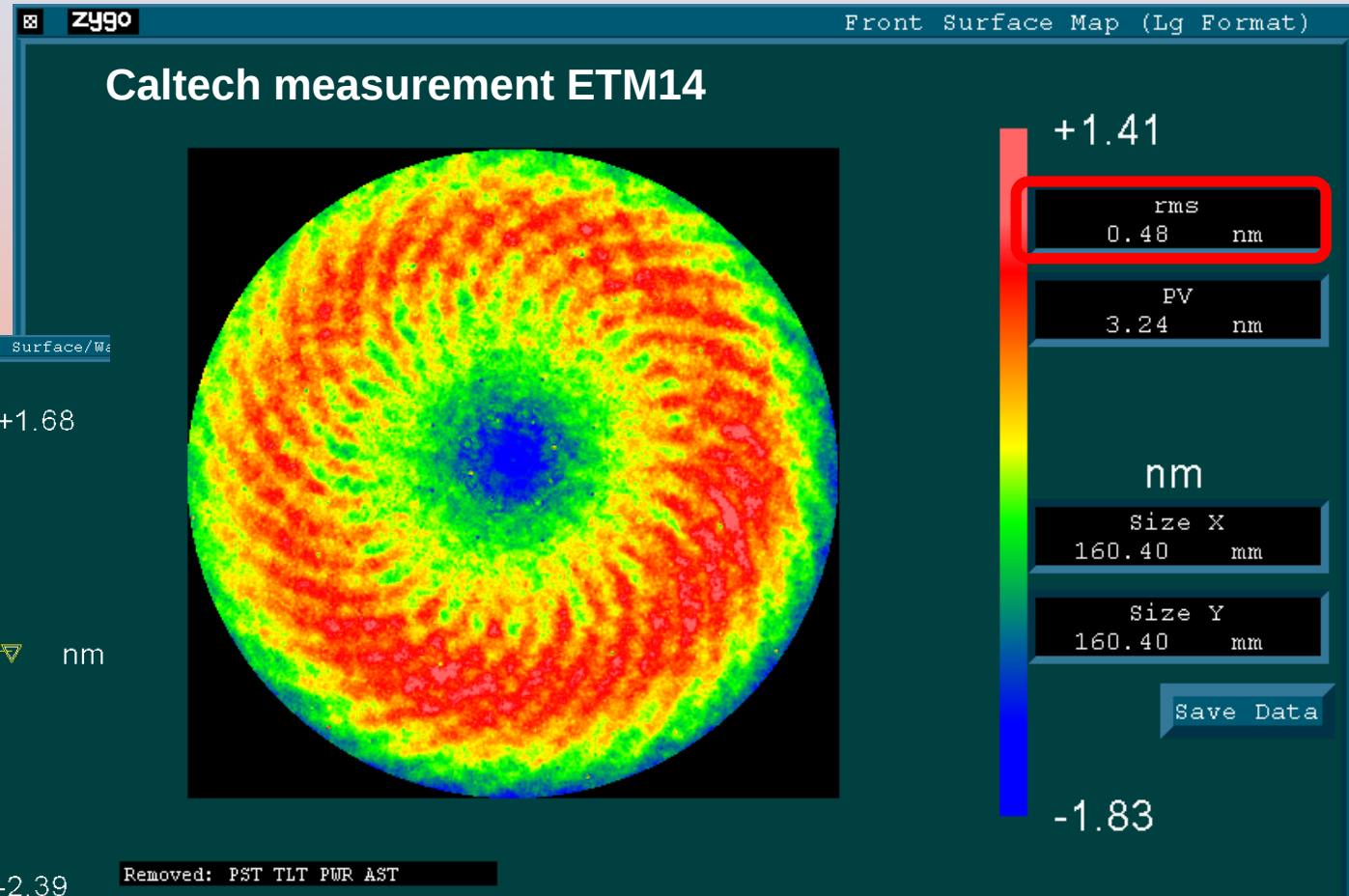
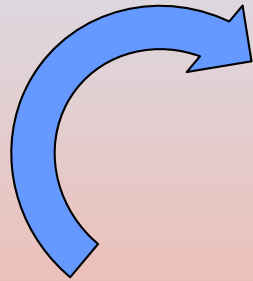
But : Réduire l'amplitude du pic d'un facteur 10 au moins

Les miroirs des interféromètres : les coatings

Uniformité des dépôts

❑ 1ère étape : augmenter la distance entre masque et substrat .

- ✓ La transition entre les pics et les vallées lissées: variation presque sinusoïdale
- ✓ Run de test montre une amélioration d'un **facteur 4**, uniformité du coating toujours bonne

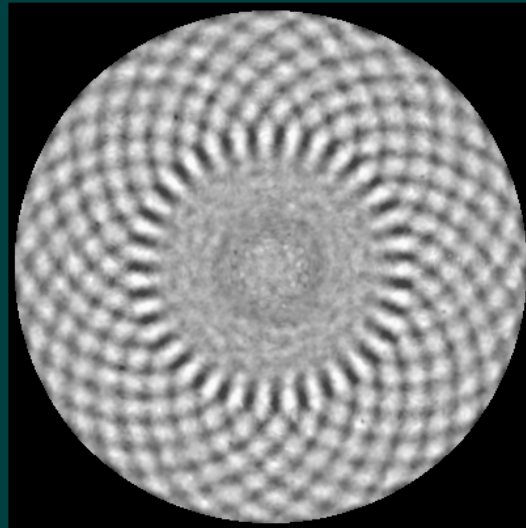


Les miroirs des interféromètres : les coatings

Uniformité des dépôts

- ❑ 2ème étape: Génération de deux spirales en opposition de phase (décalées d'une demi période) – Suppression des spirales par interférences destructives
 - ✓ Amplitude spirales réduite d'un facteur 25 par rapport au début
 - ✓ Uniformité toujours OK

NO SPIRAL REDUCTION



Front Surface Map (Lg Format)

+1.00

rms
0.25 nm

PV
1.90 nm

nm

Size X
156.40 mm

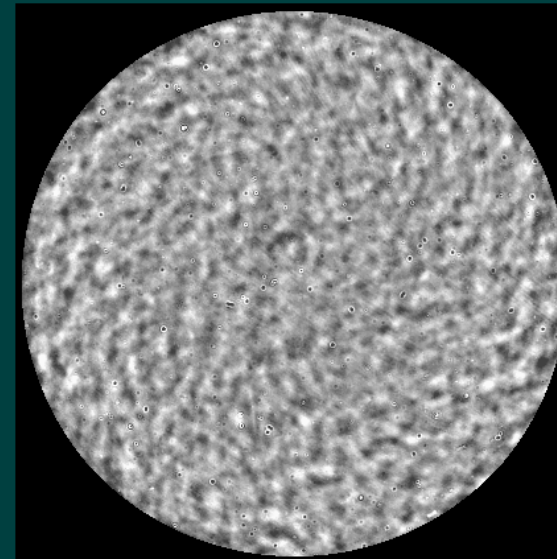
Size Y
156.40 mm

Save Data

-1.00

Removed: PST TLT PWR AST

SPIRAL REDUCTION



Front Surface Map (Lg Format)

+1.00

rms
0.26 nm

PV
5.34 nm

nm

Size X
156.28 mm

Size Y
156.28 mm

Save Data

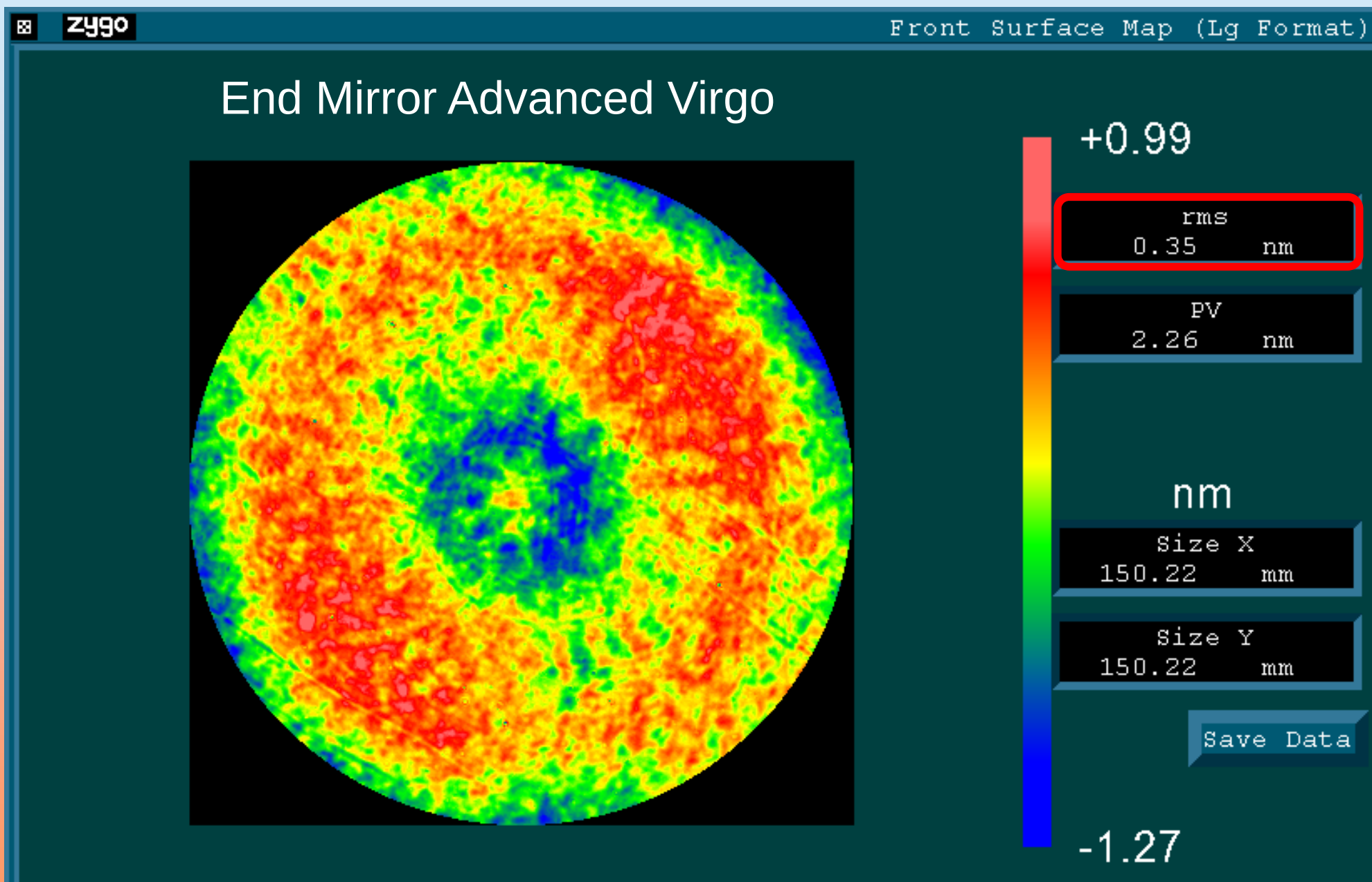
-1.00

Removed: PST TLT PWR AST

Filtre passe-haut appliqué aux deux cartes (même échelle)

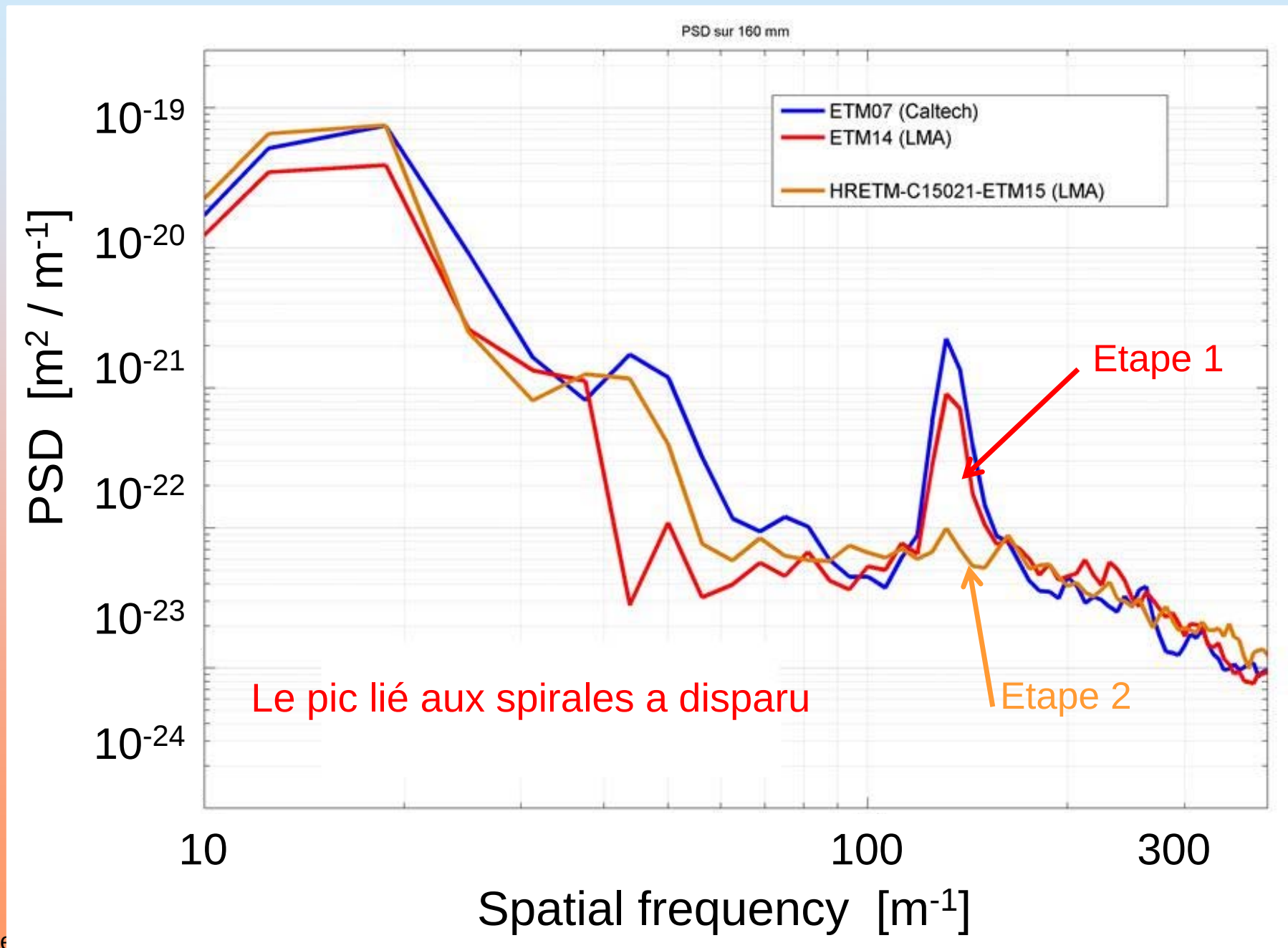
Les miroirs des interféromètres : les coatings

Uniformité des dépôts

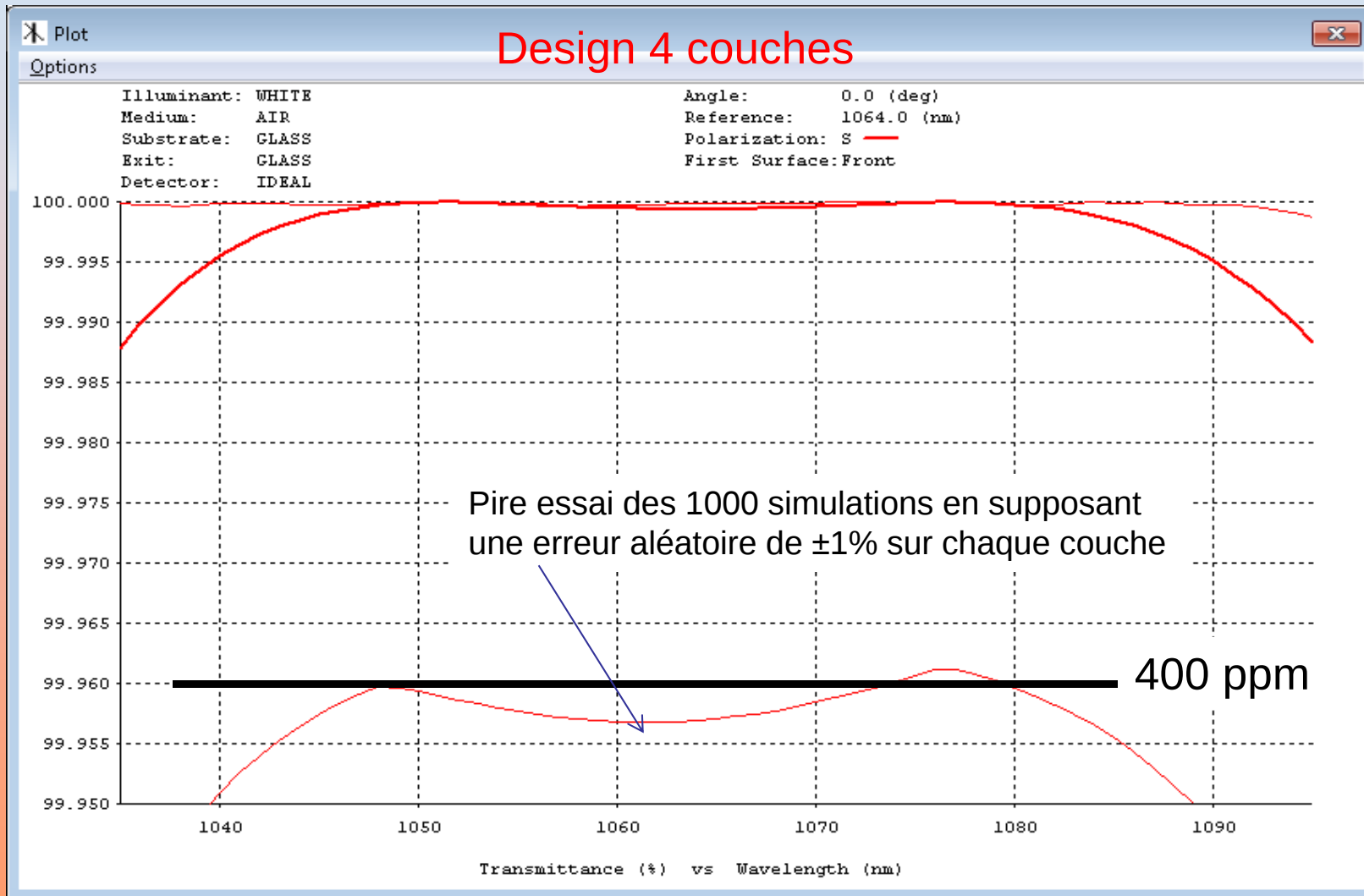


Les miroirs des interféromètres : les coatings

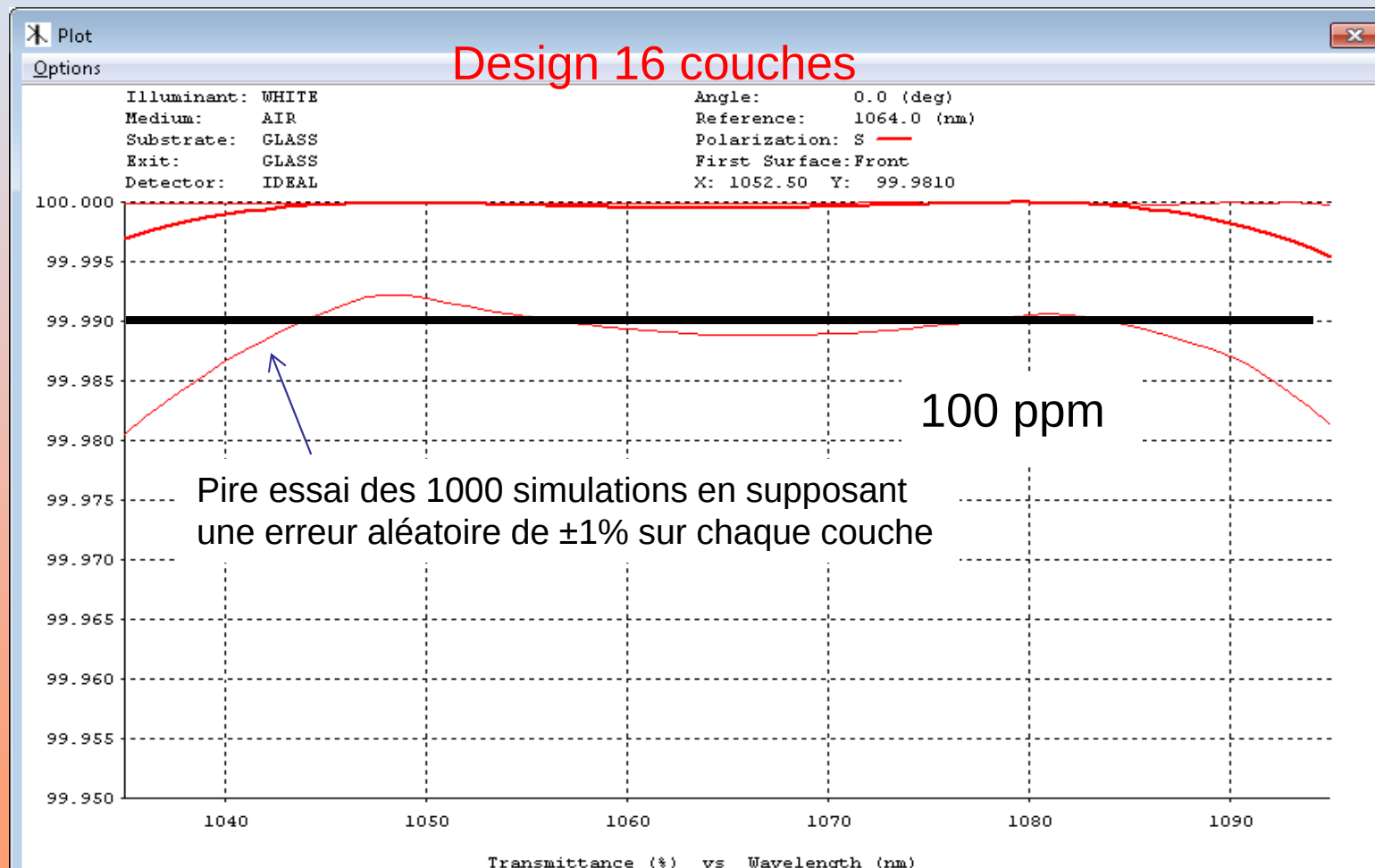
Uniformité des dépôts



- ✓ Spécification à 1064 nm : **$R < 100$ ppm, goal 50 ppm**
- ✓ Très difficile à atteindre avec un design simple (4 couches) : sensible aux erreurs de fabrication



- ✓ Nouveau design étudié avec 3 bandes pour Advanced Virgo (532, 800 et 1064 nm) : 16 couches, robuste aux erreurs de fabrication (pire cas : 100 ppm)
- ✓ Statistique : **100% des runs $R < 100$ ppm, 80% des runs $R < 50$ ppm**



❑ Le LMA a produit les miroirs de grande dimension qui ont participé à la première détection DIRECTE d'une onde gravitationnelle sur terre par les interféromètres Advanced LIGO (24 ans de travail !!!). Les performances des couches minces réalisées par IBS ont été une nouvelle fois repoussées.

❑ Spécifications atteintes pour la microrugosité, défauts, planéité

❑ Gain en performances énorme par rapport à la première génération : presque une décade (planéité de 4 nm RMS avant contre 0,5 nm RMS maintenant)

❑ Spécifications sur les coatings aussi atteintes (diffusion, absorption, uniformité : 5 ans de travail)

❑ Nouvelle R&D sur les coatings pour les upgrades futurs:

❑ Planéité/uniformité $< 0,5$ nm RMS à atteindre sur **Ø30 cm voire Ø40 cm**

❑ Recherche de nouveaux matériaux amorphes « bas bruit thermique »

❑ Amélioration du procédé

❑ Mise en place contrôle in-situ multi longueur d'onde