



# Des miroirs hors norme à l'écoute de l'espace temps

Jerome Degallaix

# Demandez le programme !

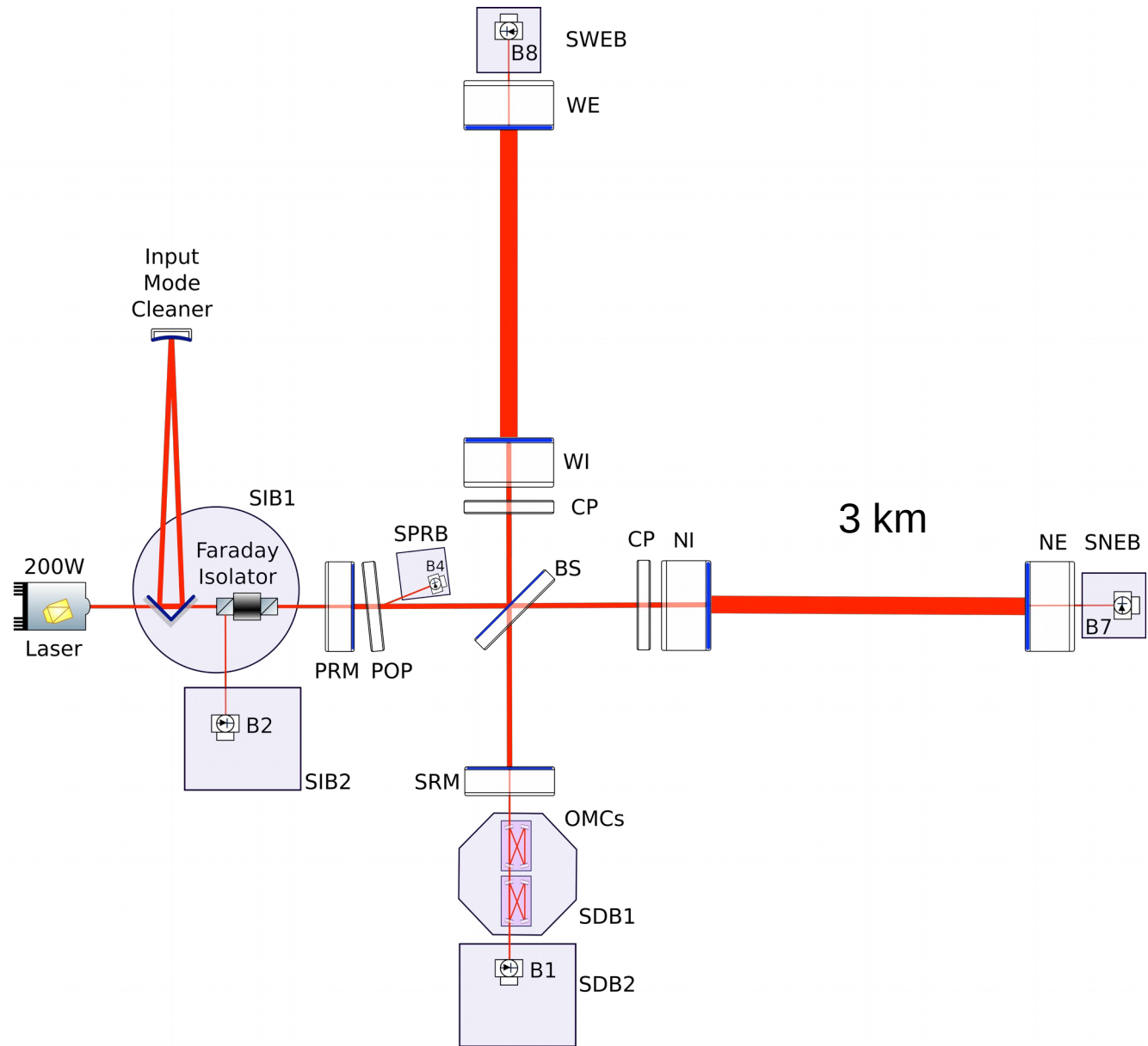


- Introduction sur les miroirs
  - ▶ de l'interféromètre
  - ▶ des cavités des bras
- Les grands miroirs des bras
- Quelques problèmes
  - ▶ les effets thermiques
  - ▶ la lumière diffusée
- Les miroirs de demain

I

Introduction

# Le schéma optique simplifié



# *Du laser à la détection*

Crédit: © Cyrille Frésillon / LMA / CNRS Photothèque

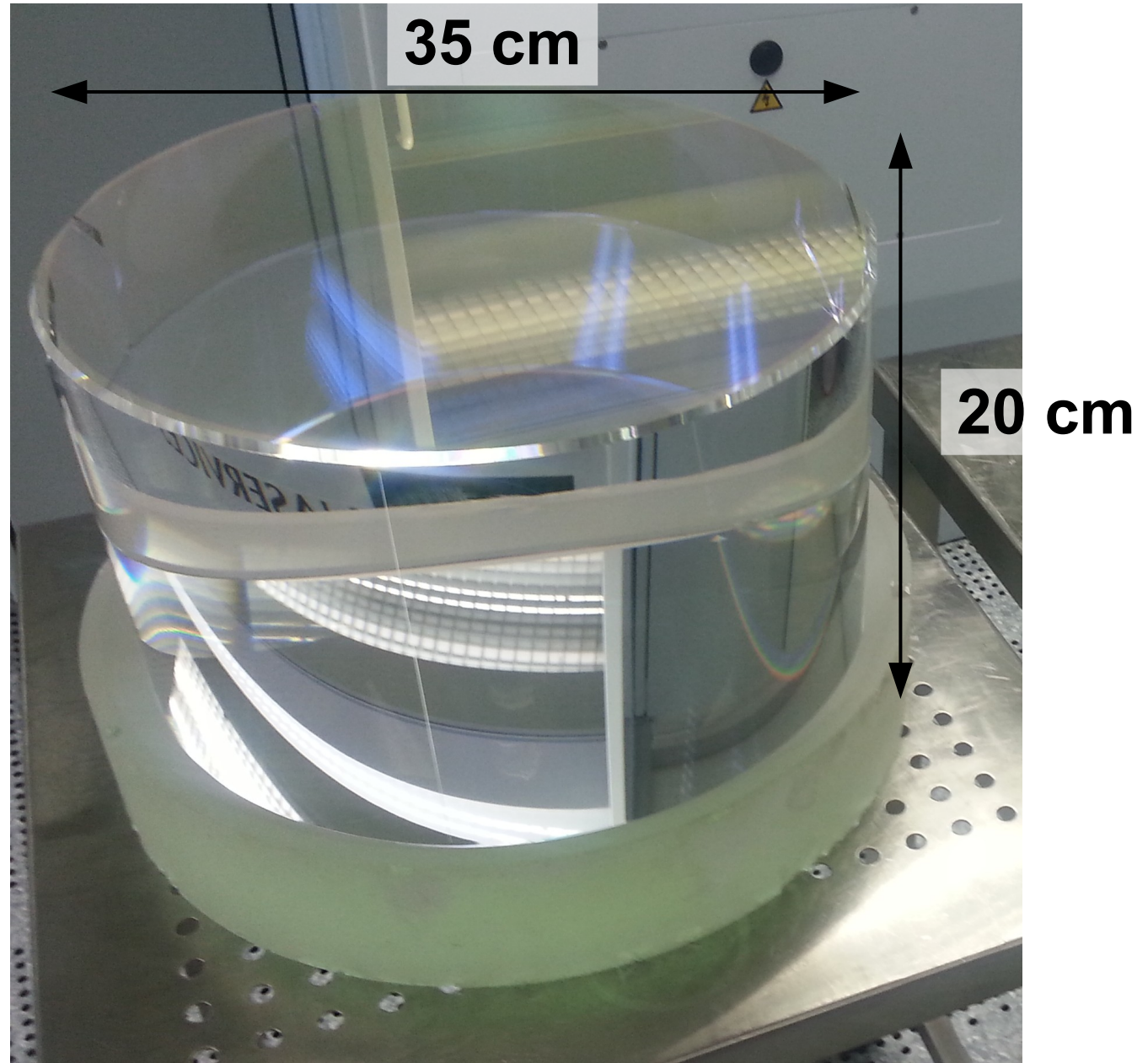
***Des miroirs partout !***



# Les grands miroirs des bras



# La vue d'un miroir des bras

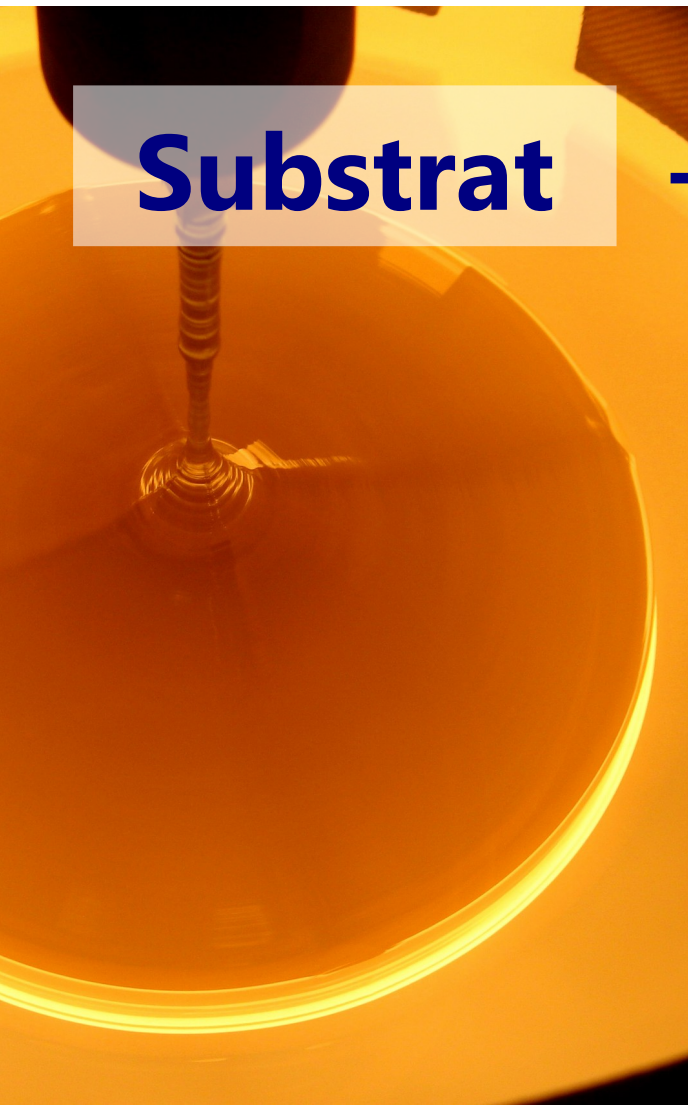


II

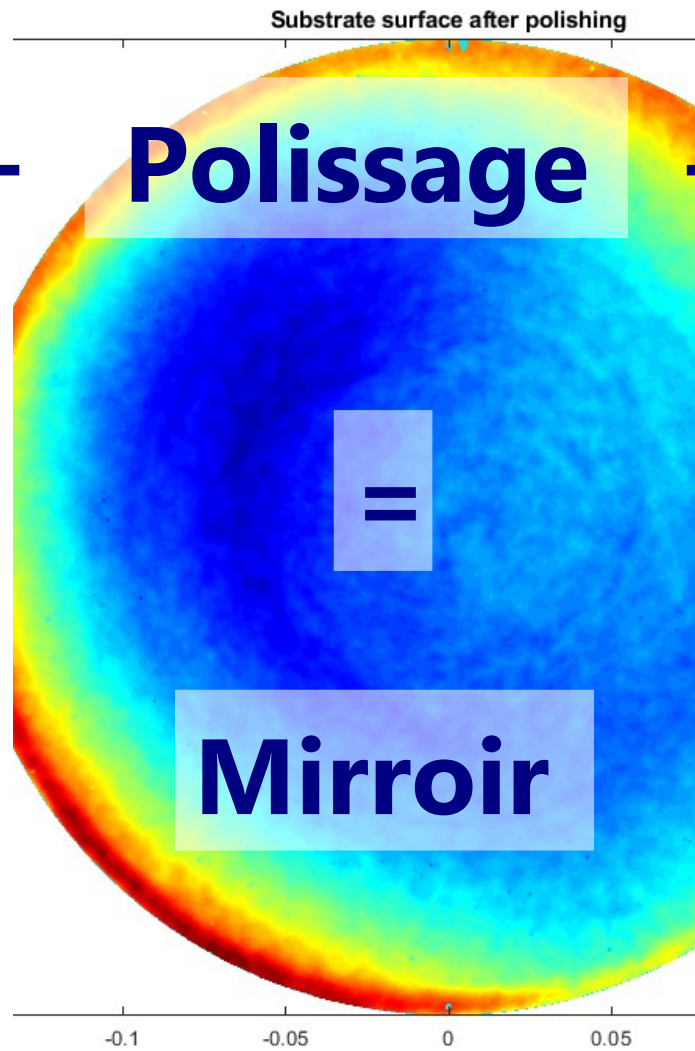
Les miroirs les plus critiques :  
ceux des bras



# Les 3 ingrédients d'un miroir:

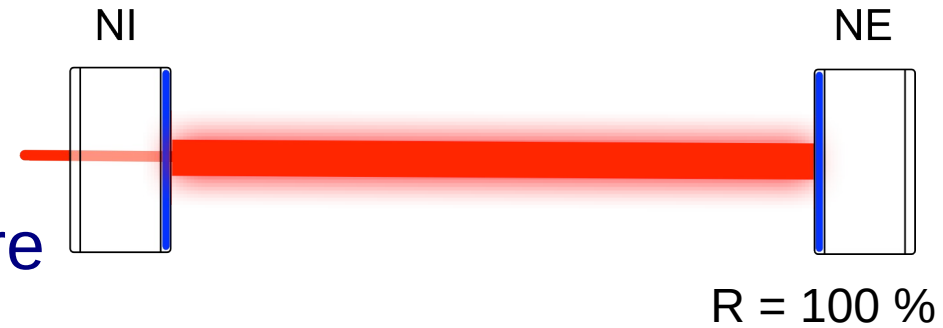


+



# The arm cavities

- Cavités longues de 3 km
- Où le signal de l'onde est imprimé sur la phase de la lumière

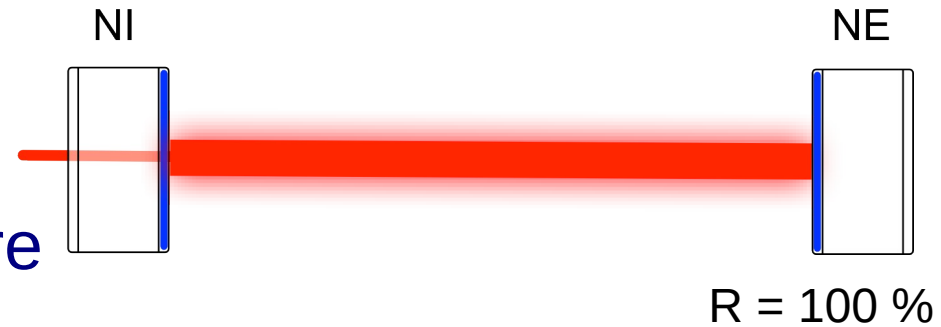


- 2 paramètres essentiels
  - La finesse

- Les pertes par aller retour

# The arm cavities

- Cavités longues de 3 km
- Où le signal de l'onde est imprimé sur la phase de la lumière



- 2 paramètres essentiels

- La finesse



Définie la bande passante  
du détecteur



Transmission du  
miroir d'entrée

- Les pertes par aller retour



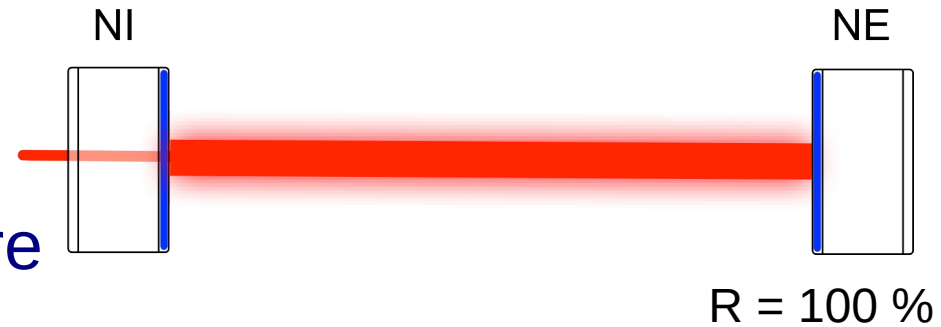
Définie la puissance  
réfléchiée par les bras



Gain de recyclage de puissance

# The arm cavities

- Cavités longues de 3 km
- Où le signal de l'onde est imprimé sur la phase de la lumière



- 2 paramètres essentiels

- La finesse 450



Définie la bande passante du détecteur



Transmission du miroir d'entrée  $T = 1.4\%$

- Les pertes par aller retour



75 ppm

Définie la puissance réfléchie par les bras



Gain de recyclage de puissance

$G = 40$

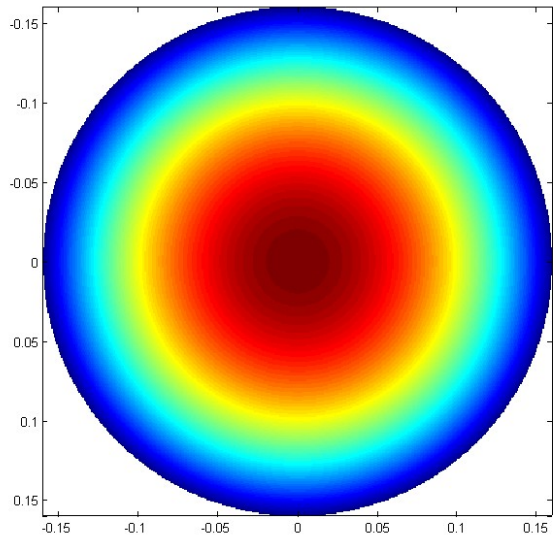
# Les pertes par aller retour (RTL)

- 
- Un chiffre critique
  - Qui est ridiculement petit  $< 0.01\%$
  - Contraintes sur la surface du miroir

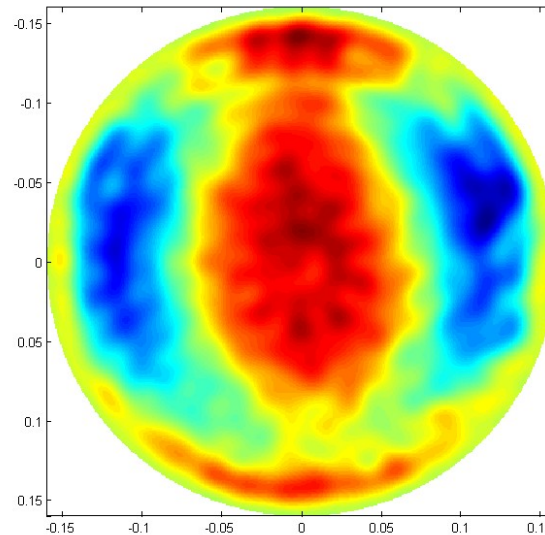
# Les pertes par aller retour (RTL)

- Un chiffre critique
- Qui est ridiculement petit  $< 0.01\%$
- Contraintes sur la surface du miroir

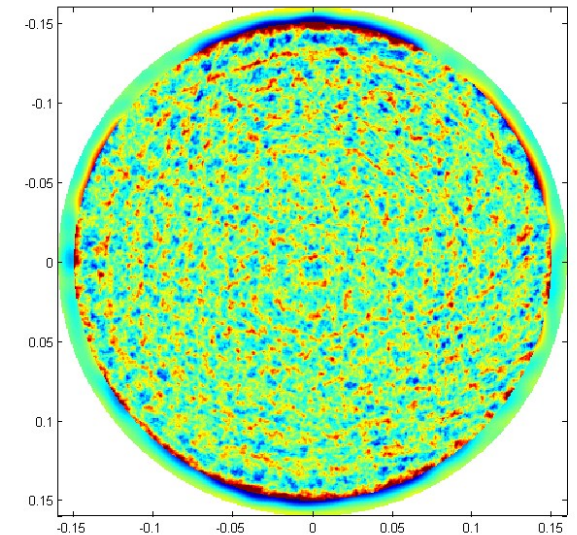
*Erreur de courbure*



*Fréquences spatiales petites ( $f < 50 \text{ m}^{-1}$ )*



*Grandes fréquence spatiales ( $f > 50 \text{ m}^{-1}$ )*



Mauvais contraste, modes optiques d'ordre supérieur, lumière perdue

Lumière perdue

# Les pertes par aller retour (RTL)



- Un chiffre critique
- Qui est ridiculement petit  $< 0.01\%$
- Contraintes sur la forme du miroir

Le budget des pertes est composé de

- 50 ppm à cause des basses fréquences spatiales
- $2 \times 10$  ppm des hautes fréquences spatiales
- 5 ppm pour l'absorption + transmission miroir de fin

**Contraintes très sévères sur le polissage  
et le dépôt**

# Le substrat roi: la silice fondue



LE substrat de choix pour les interféromètres actuels

Un choix bien justifié

- propriétés optiques exceptionnelles
  - absorption en volume  $< 1$  ppm/cm @ 1064 nm
  - biréfringence  $< 1$  nm / cm
  - homogénéité  $\Delta n < 2 \times 10^{-6}$
  - 3D isotropique
- disponible en grande taille
- polissage et traitement bien maîtrisés

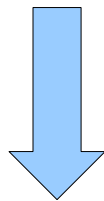
Heraeus Suprasil 3001 & 3002



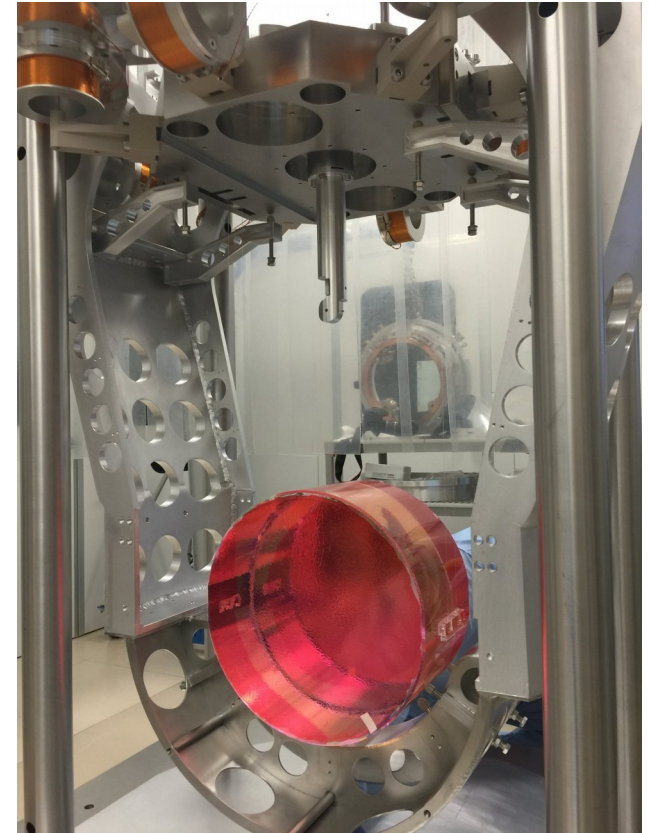
# Le substrat roi: la silice fondue

Quelques propriétés particulièrement intéressantes pour les détecteurs d'OG

- très faible bruit thermique
- possibilité de suspension monolithique



Réduction du déplacement de la surface du miroir à cause du bruit thermique

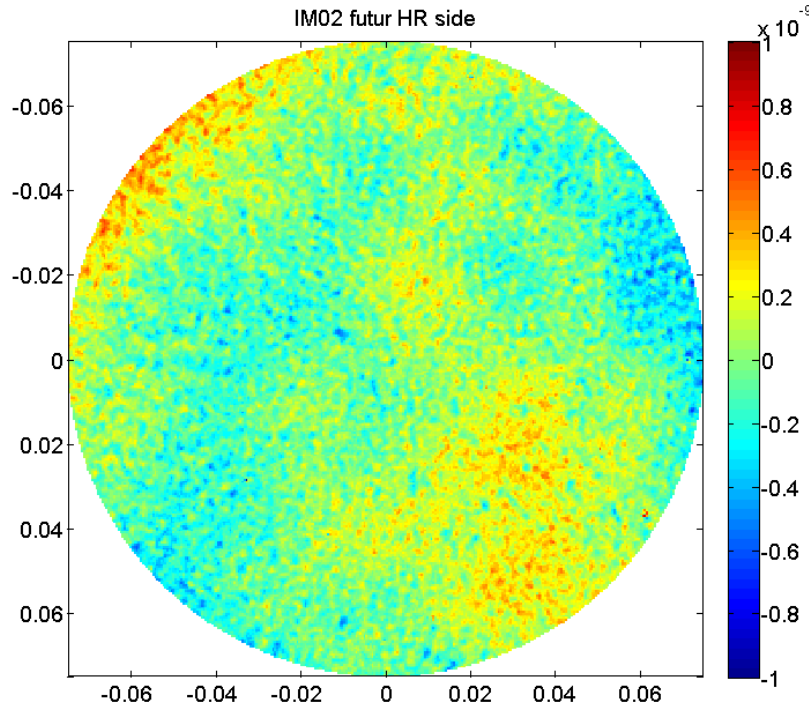


# Un polissage remarquable

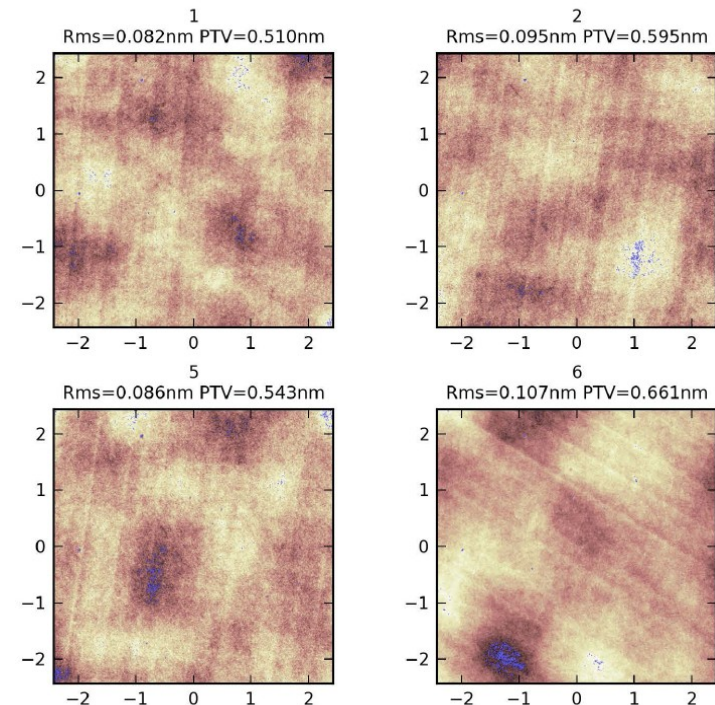
Possibilités de polissage exceptionnelle pour la silice

Différence de rayon de courbure  $< 2\text{m}$  (rayon  $\sim 1.5\text{ km}$ )  
(sur 4 miroirs polis)

Planéité de la surface :



Rugosité :



$RMS < 0.2\text{ nm}$  ( $PV = \lambda/300$ )  
sur diamètre 150 mm

$RMS < 0.1\text{ nm}$

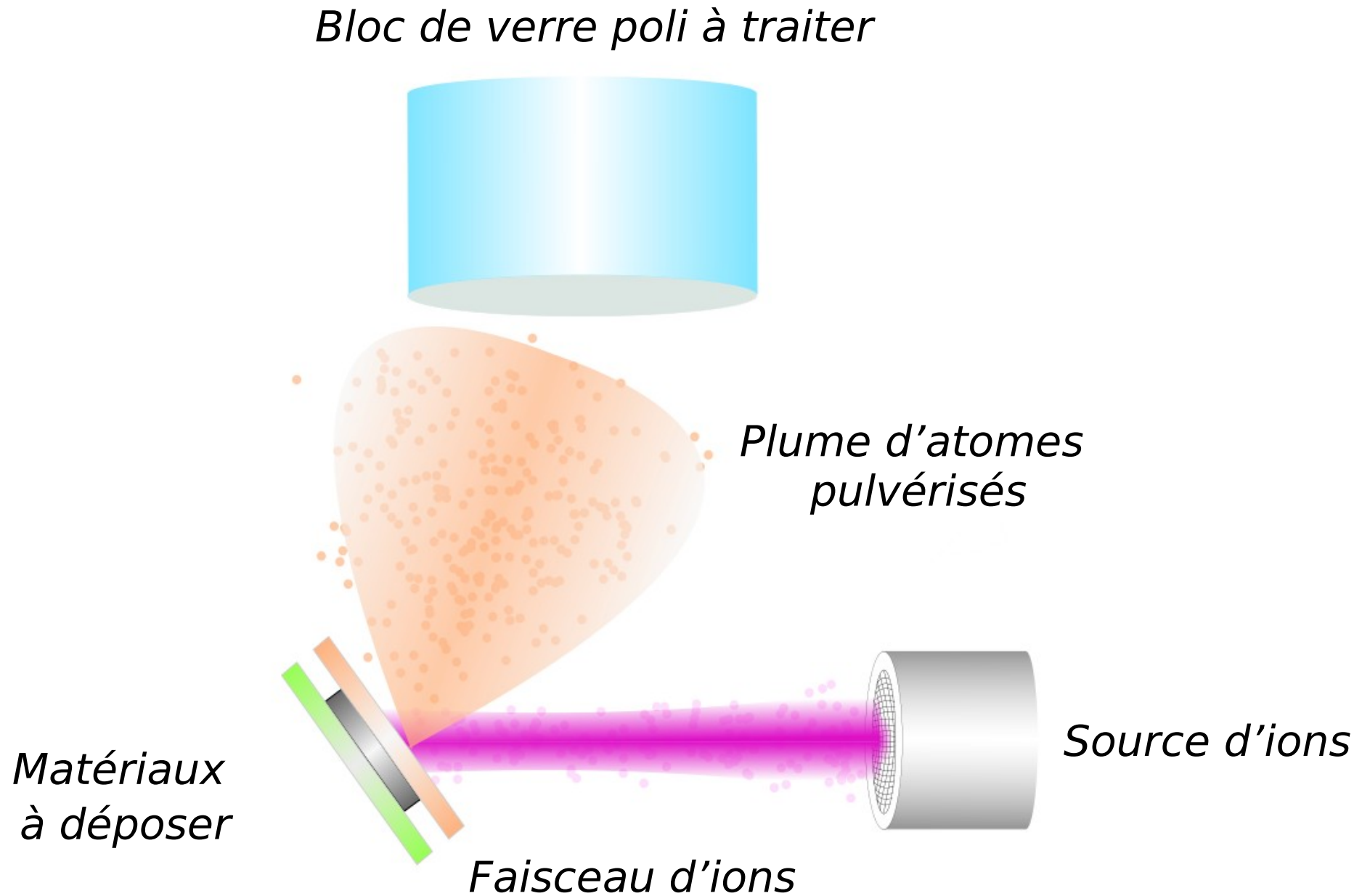


*La machine de dépôt IBS dans la salle blanche du LMA (Lyon)*

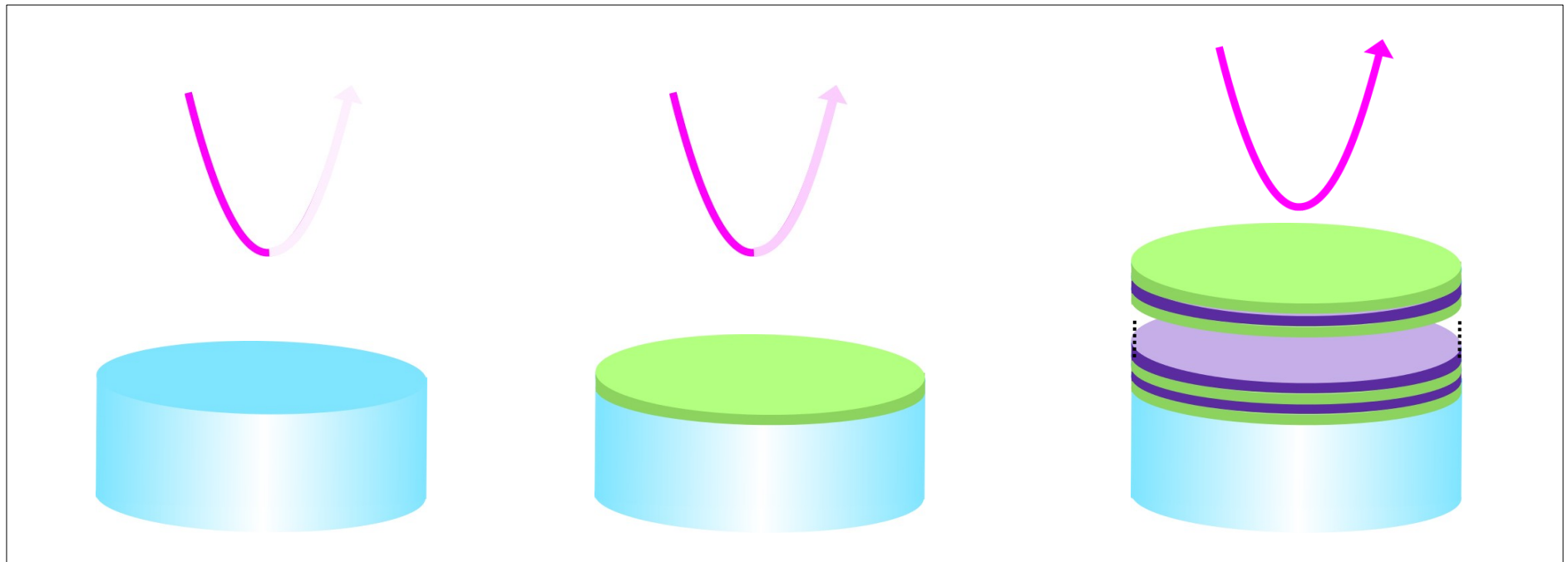


*Où a été fait le traitement des miroirs les plus critiques de tous les détecteurs d'ondes gravitationnelles*

# Procédé de pulvérisation par faisceau d'ions



# Principe d'un miroir multicouches



*1 surface,  $R \sim 4\%$*

*2 surfaces,  $R \sim 20\%$*

*40 surfaces,  
 $R \sim 100\%$*

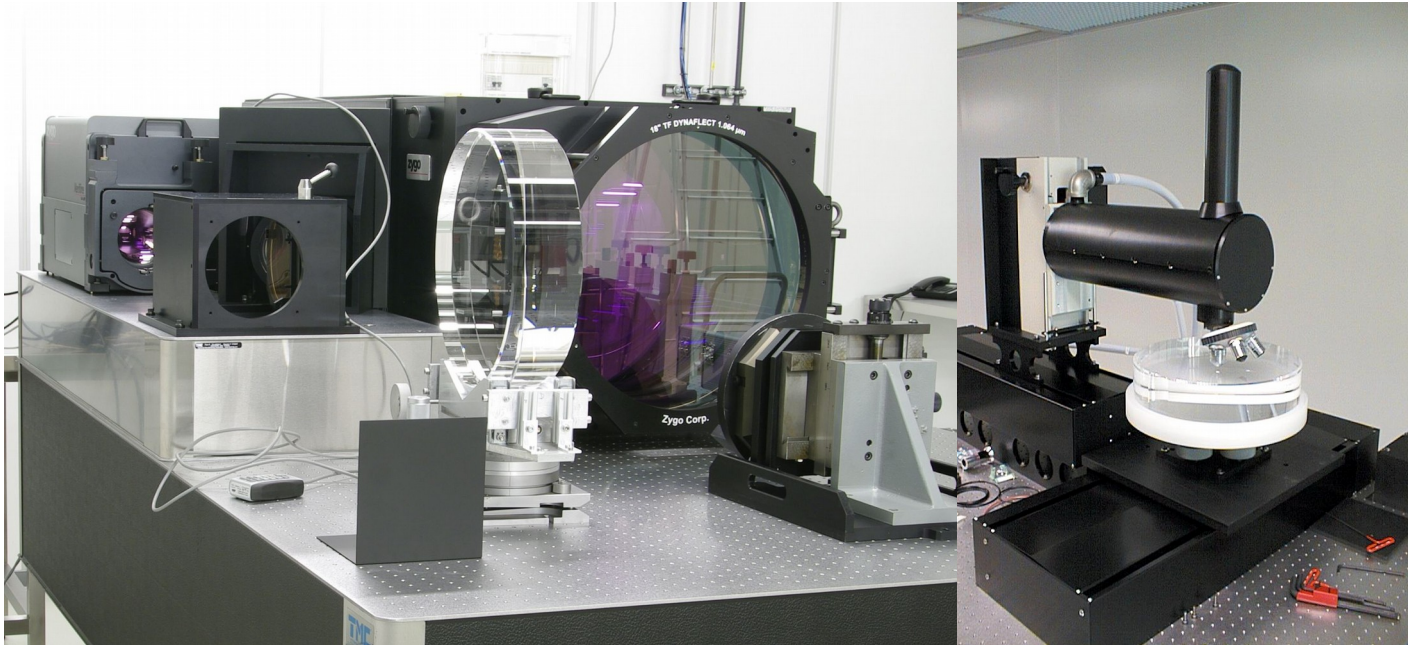
Empilement de 20 paires<sup>1</sup>  
de couches d'oxyde de tantale et silice (verre)

<sup>1</sup> réseau de Bragg avec matériaux haut et bas indices de réfraction (Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> et SiO<sub>2</sub>)

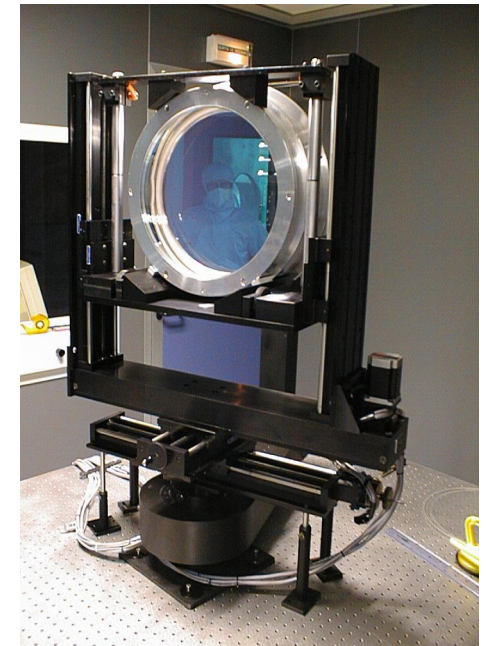
# La métrologie

Étape essentielle pour connaître les caractéristiques des miroirs :

- transmission
- absorption optique
- front d'onde (mesure la planéité)
- profilomètre (mesure la rugosité / défauts)
- diffusion



*Mesure de surface (planéité et rugosité)*



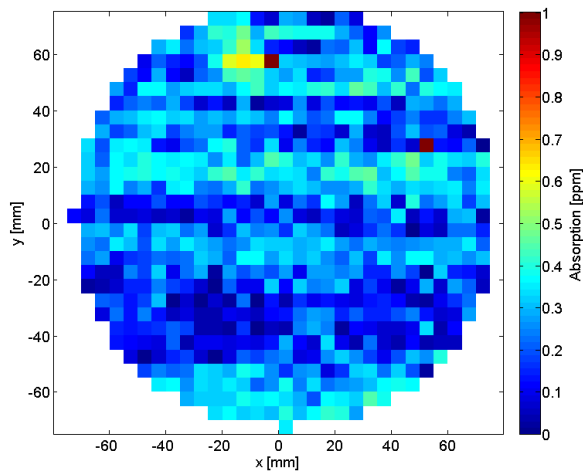
*Mesure de diffusion*

# Performances après dépôt

- Planéité identique malgré le dépôt de 6  $\mu\text{m}$
- Transmission identique pour les miroirs d'entrée (à 0.002 % près)
- Transmission des miroirs de fin : 4 ppm

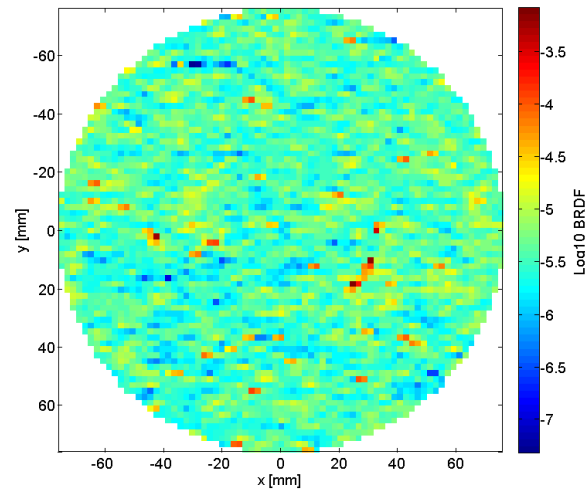
## Performances typiques à 1064 nm

Absorption



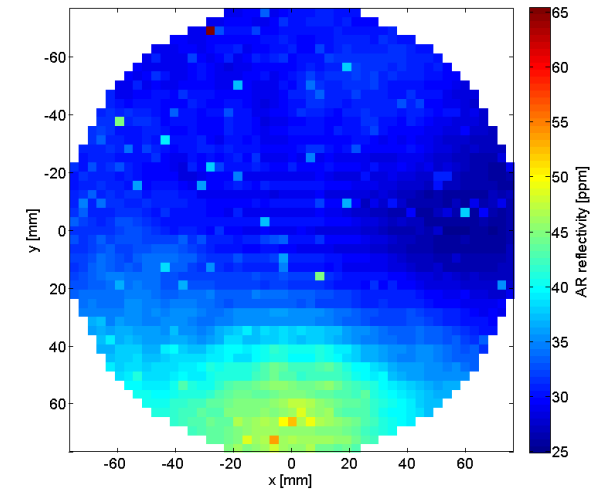
0.2 ppm

Diffusion



4 ppm

réflectivité AR



30 ppm



# Performances after coating



- Planéité identique malgré le dépôt de 6  $\mu\text{m}$
- Transmission identique pour les miroirs d'entrée (à 0.002 % près)
- Transmission des miroirs de fin : 4 ppm

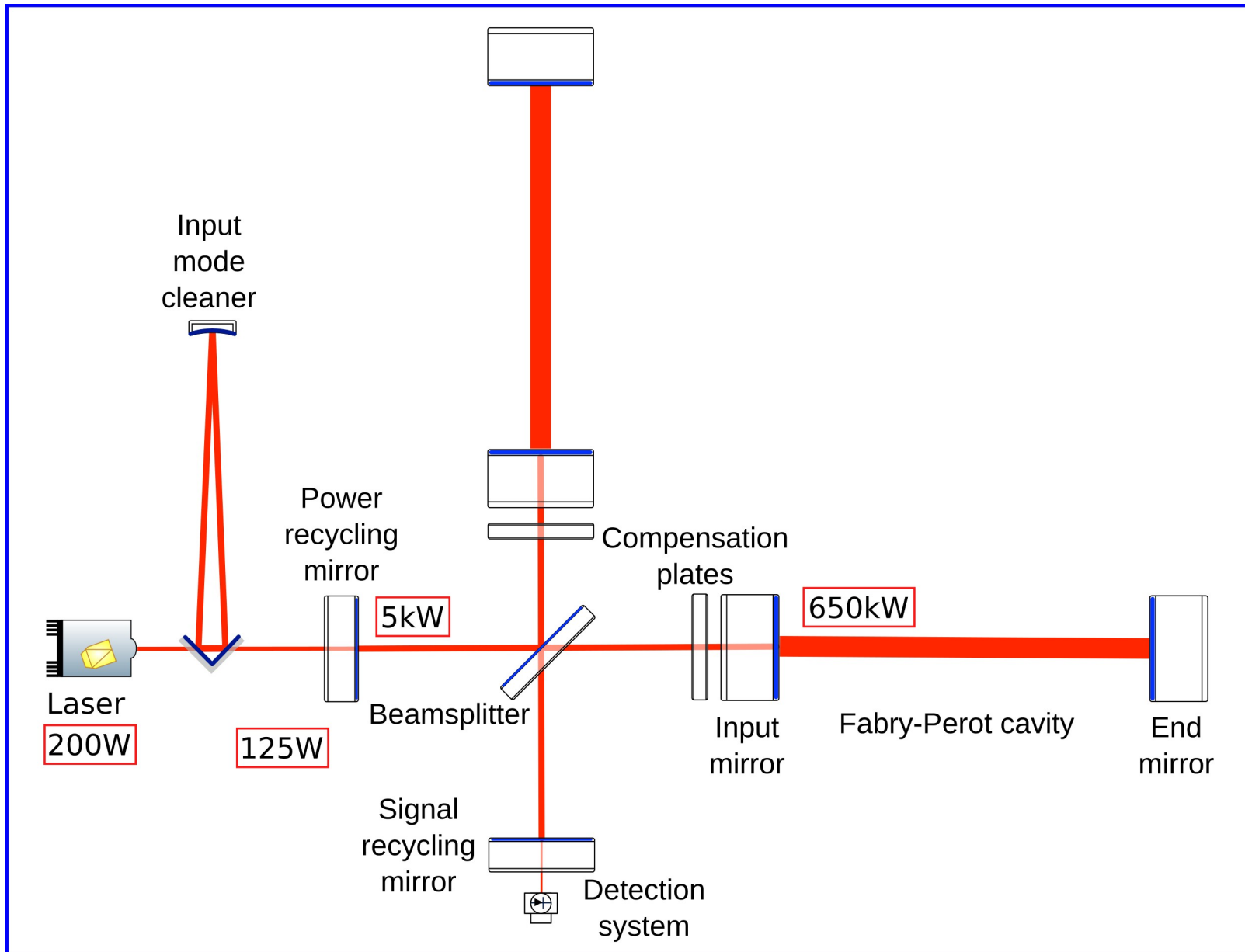
## Mesure in-situ après installation Advanced Virgo

- Finesse mesurée des cavités similaires (460 et 455)
- Pertes optiques des cavités dans les spécifications (59 et 57 ppm)
- Excellent contraste

III

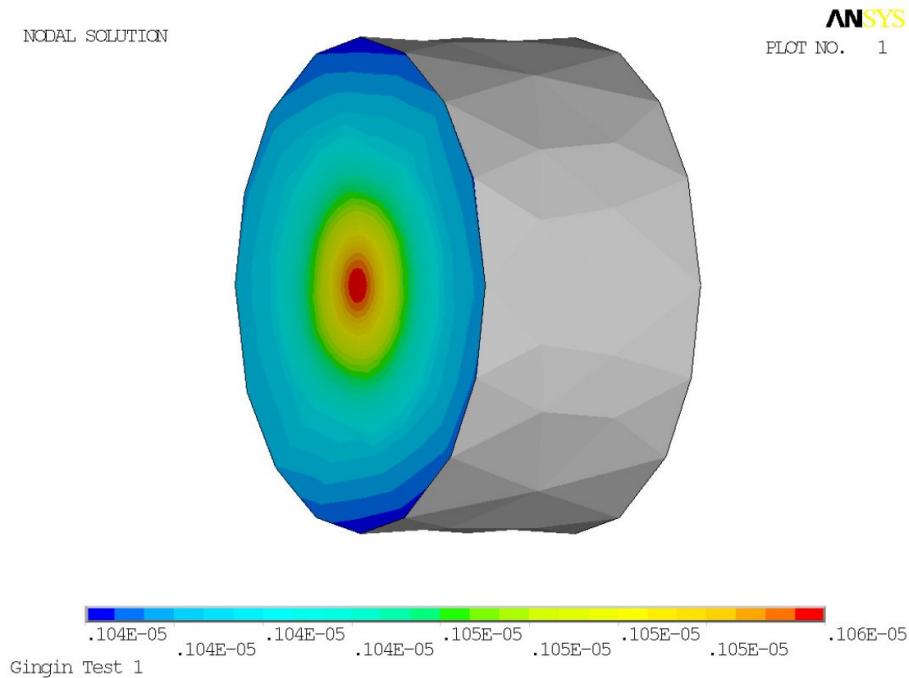
Quelques problèmes optiques

# Une histoire de puissance

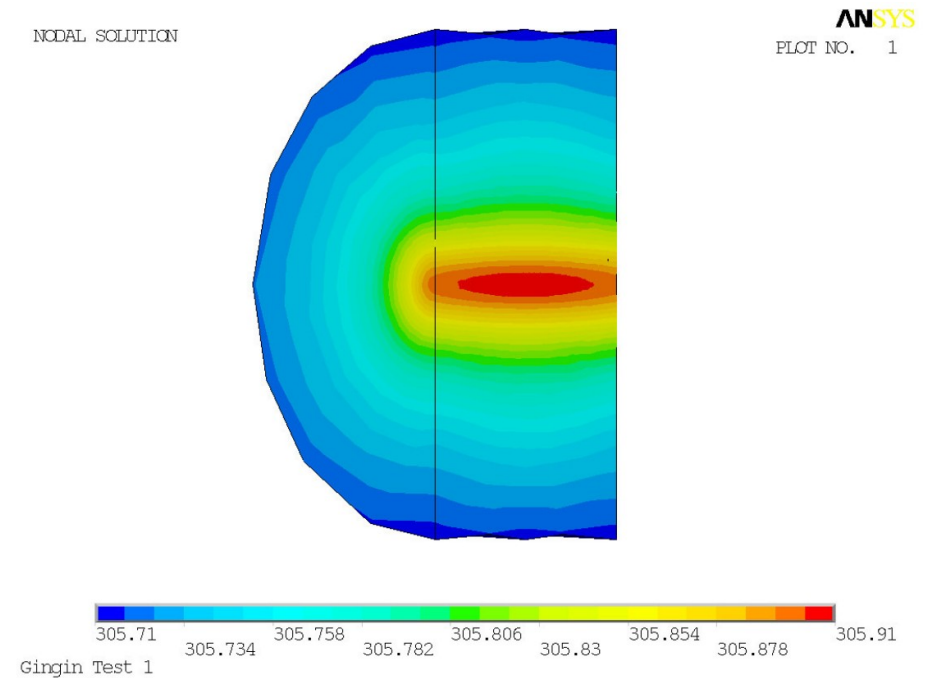


# Effet de l'absorption optique

Une partie infime ( $\sim$ ppm) du faisceau laser est absorbée et convertie en chaleur.



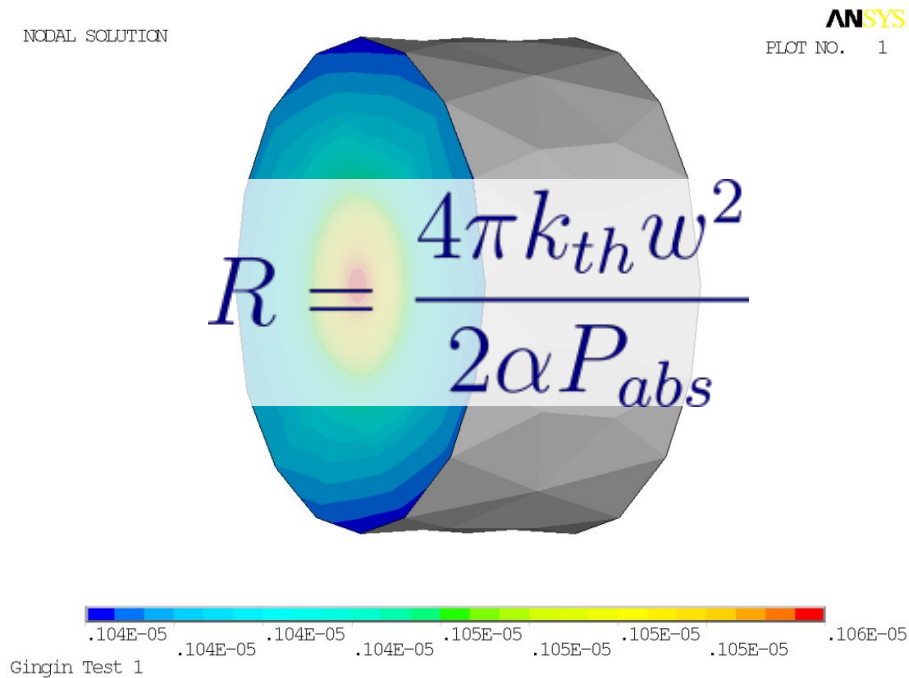
*Absorption du coating*



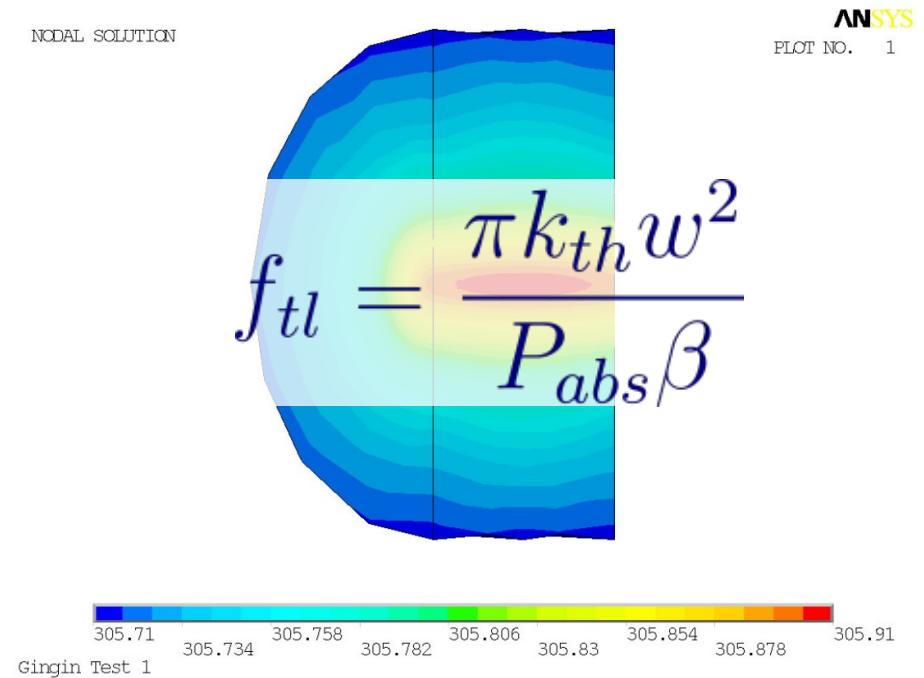
*Absorption du substrat*

# Effet de l'absorption optique

Une partie infime (~ppm) du faisceau laser est absorbée et convertie en chaleur.

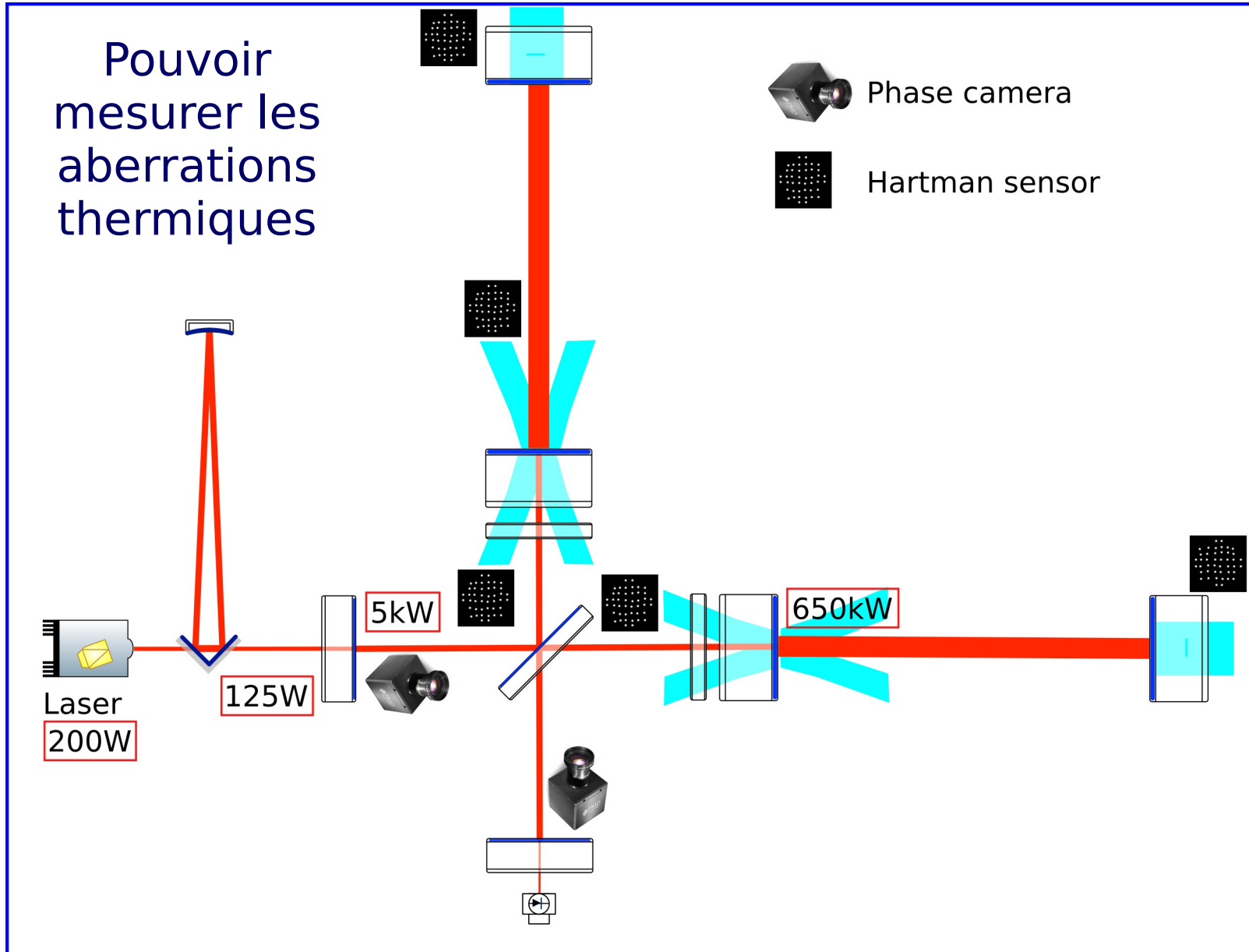


*Absorption du coating*

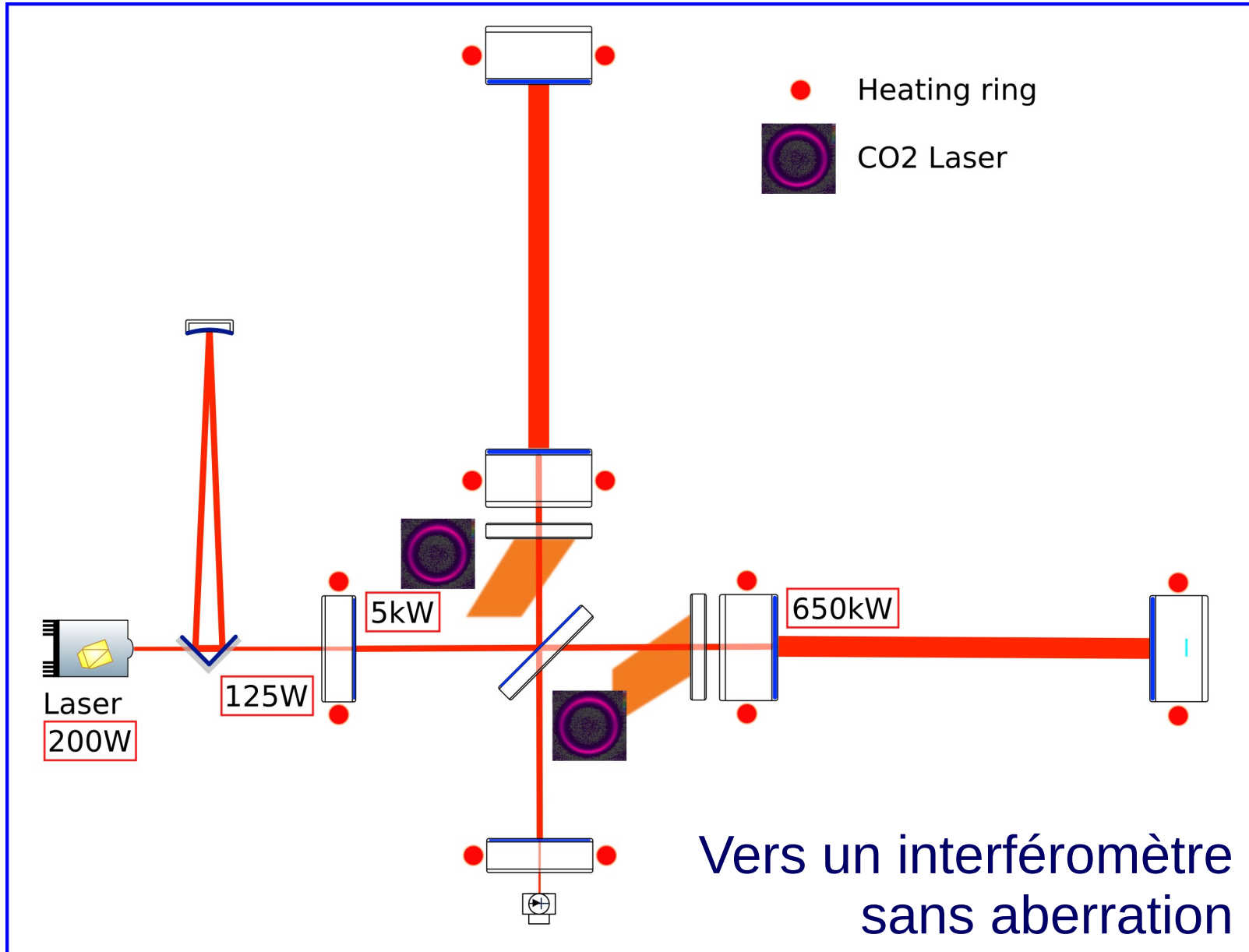


*Absorption du substrat*

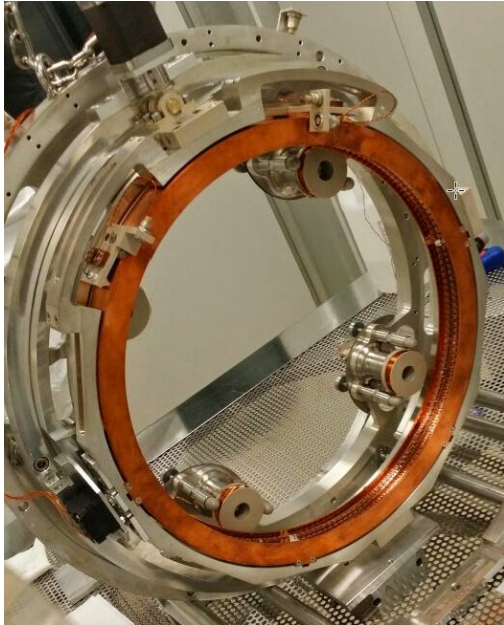
# Le système de compensation thermique



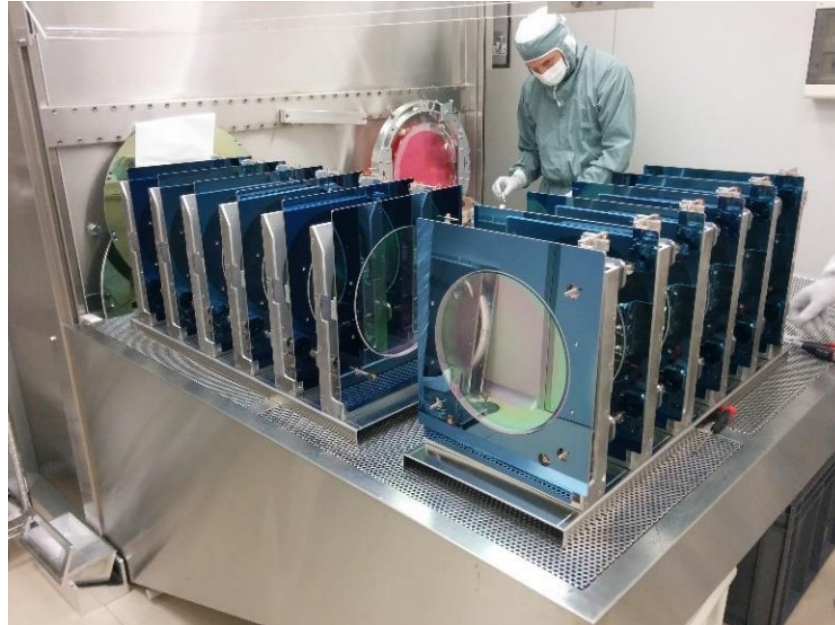
# Le système de compensation thermique



# Ce système en quelques images



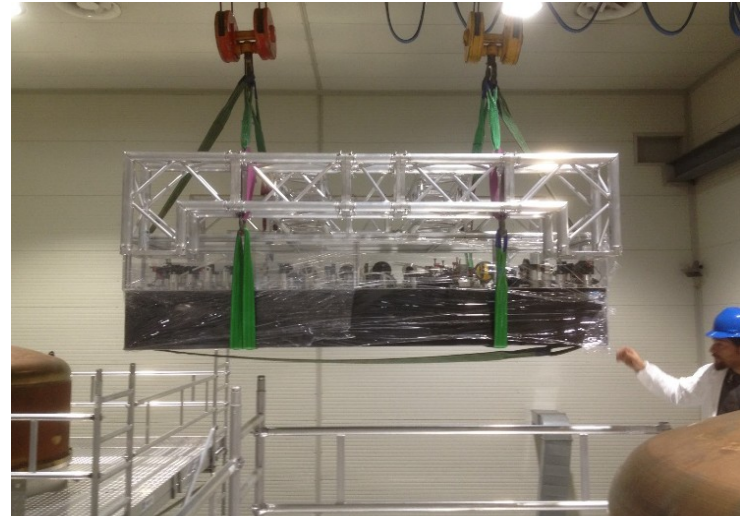
*Anneau chauffant*



*Miroirs de renvoi pour le Hartman*



*Banc du laser CO<sub>2</sub>*



*Installation sur le site*



# Un ennemi redoutable : la lumière diffusée



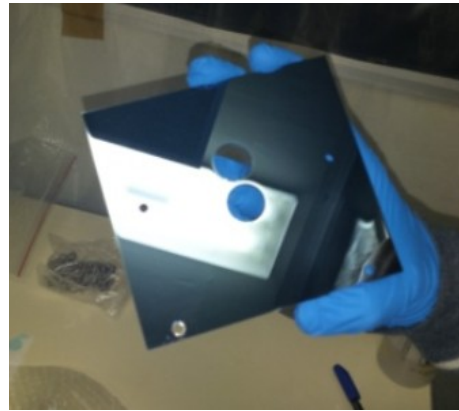
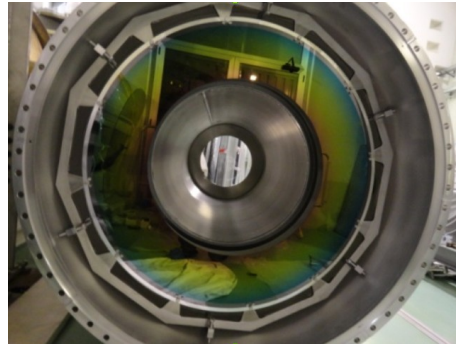
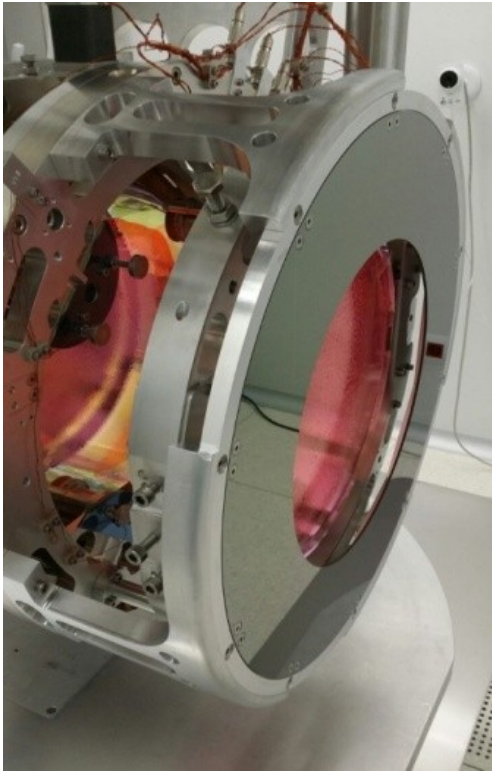
Tous les interféromètres ont déjà été limités par la lumière diffusée !

C'est une source de pertes optiques mais aussi de bruit quand cette lumière se recombine avec le faisceau principal.

Recherches pour :

- comprendre son origine, l'estimer
- réduire le nombre de défaut dans les couches
- simuler son chemin optique, influence sur la sensibilité
- trouver le matériau pour la piéger (et où positionner les ouvertures ?)

# Les stratégies sur l'interféromètre



*Piège à lumière autour des miroirs, dans les tubes à vide et sur les bancs optiques*

*Optiques importantes sous vide et suspendues*

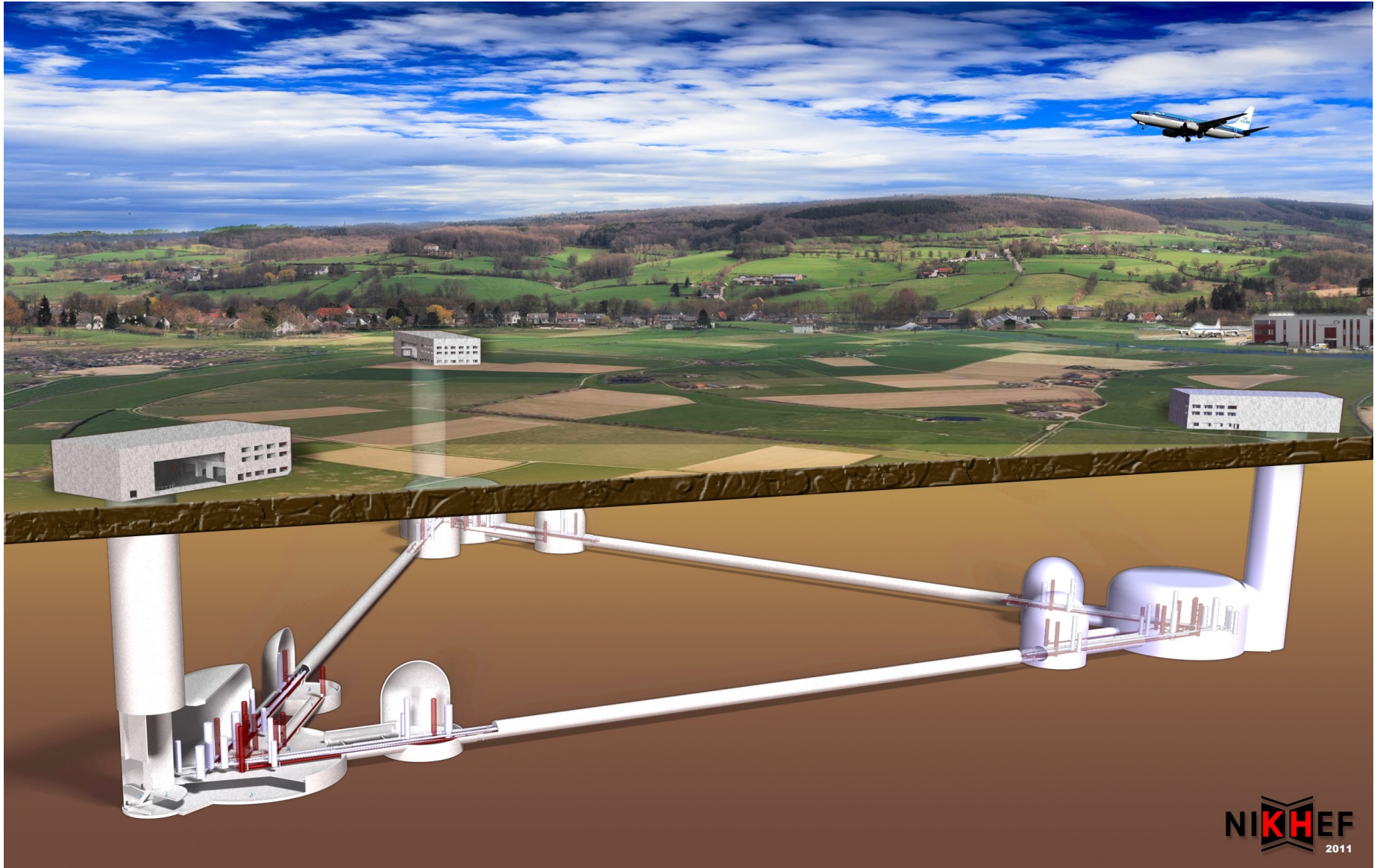


IV

Les miroirs de demain

# Le Einstein Telescope

Bras de 10 km, souterrain, partiellement cryogénique



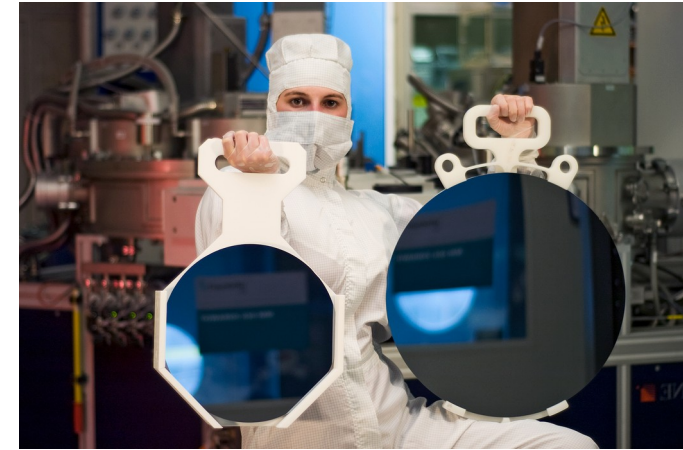
# Les futurs miroirs

- Toujours plus grands !
  - ▶ diamètre de 600 mm
  - ▶ > 100 kg

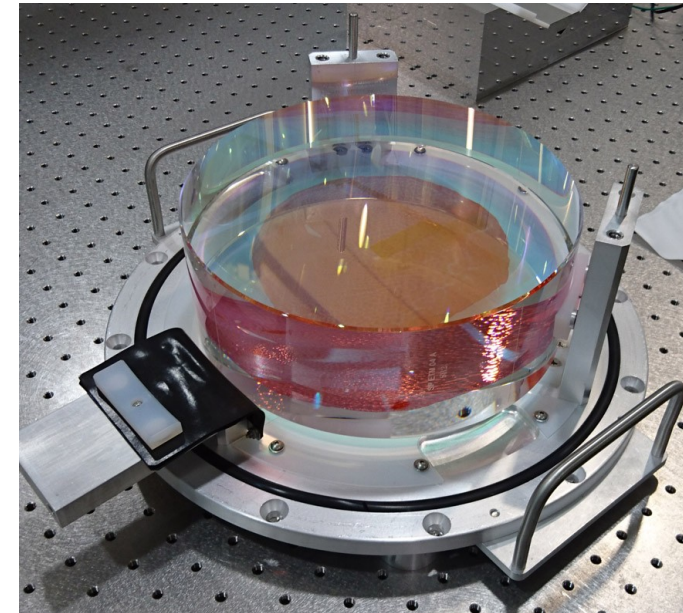
## Le défis des miroirs froids :

- Des nouveaux substrats
  - ▶ en silicium
  - ▶ en saphir
- Des couches minces améliorées

Intense recherche mondiale  
dans ce domaine



*Wafer de silicium de diamètre  
300 et 450 mm*



*Sapphire substrate*

# Conclusion



- Les miroirs les plus précis à l'écoute de l'univers
- Résultat de formidables avancées technologiques au niveau du verre, polissage, dépôt et de la métrologie
- Et la recherche continue...