

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

Jerome Degallaix

Demandez le programme !

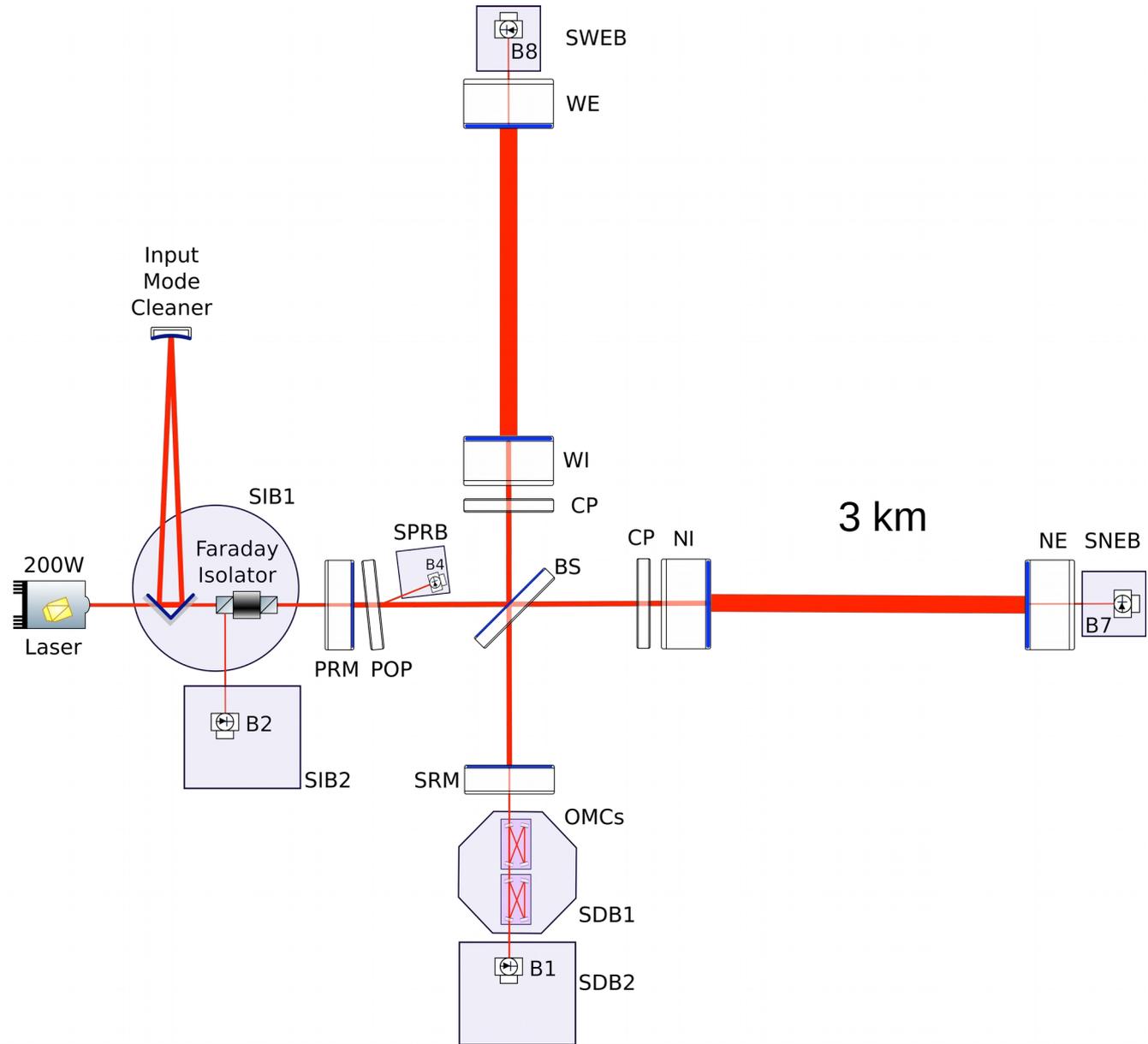


- Introduction sur les miroirs
 - ▶ de l'interféromètre
 - ▶ des cavités des bras
- Les grands miroirs des bras
- Quelques problèmes
 - ▶ les effets thermiques
 - ▶ la lumière diffusée
- Les miroirs de demain

I

Introduction

Le schéma optique simplifié



Du laser à la détection

Crédit: © Cyrille Frésillon / LMA / CNRS Photothèque

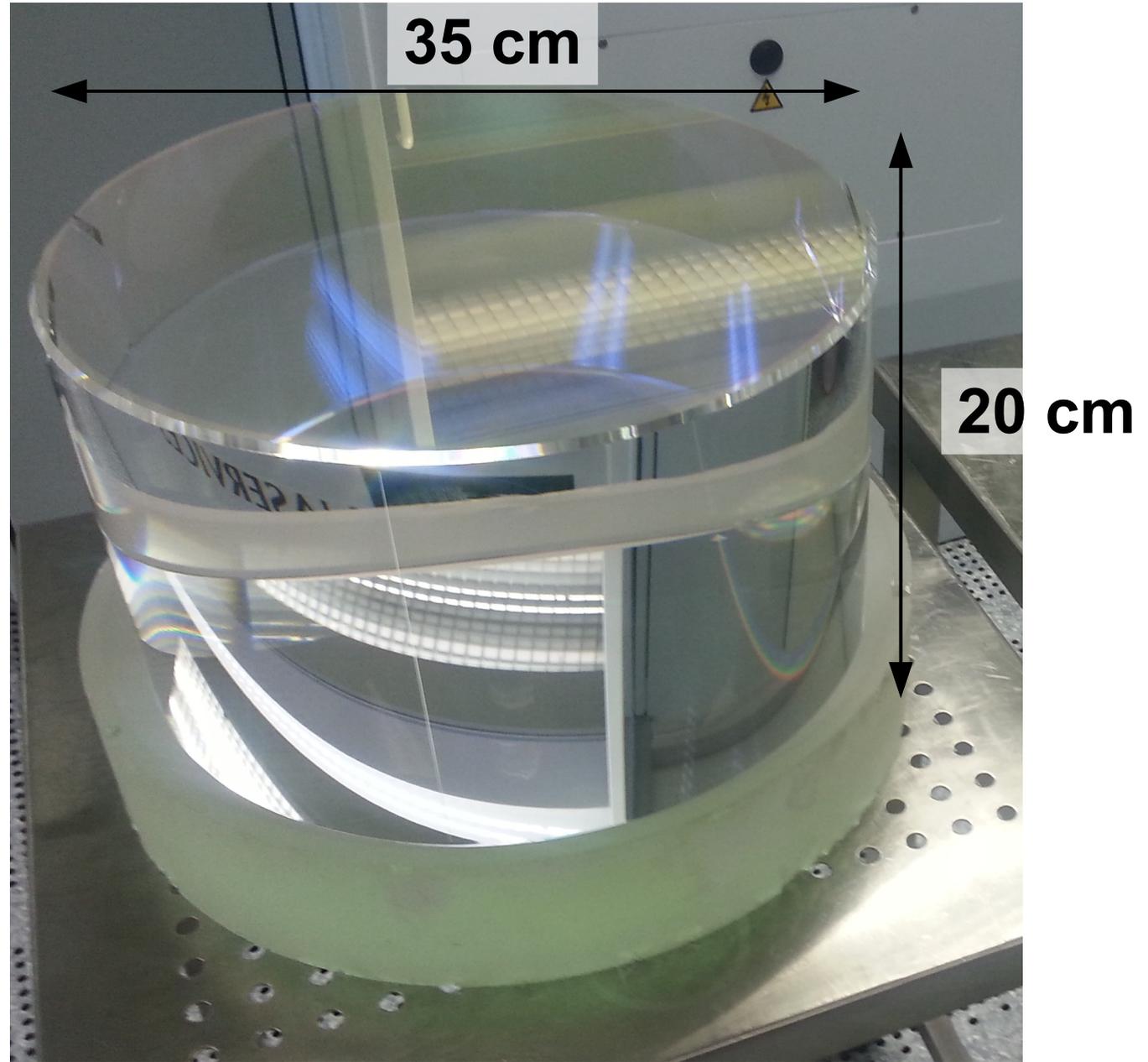
Des miroirs partout !



Les grands miroirs des bras



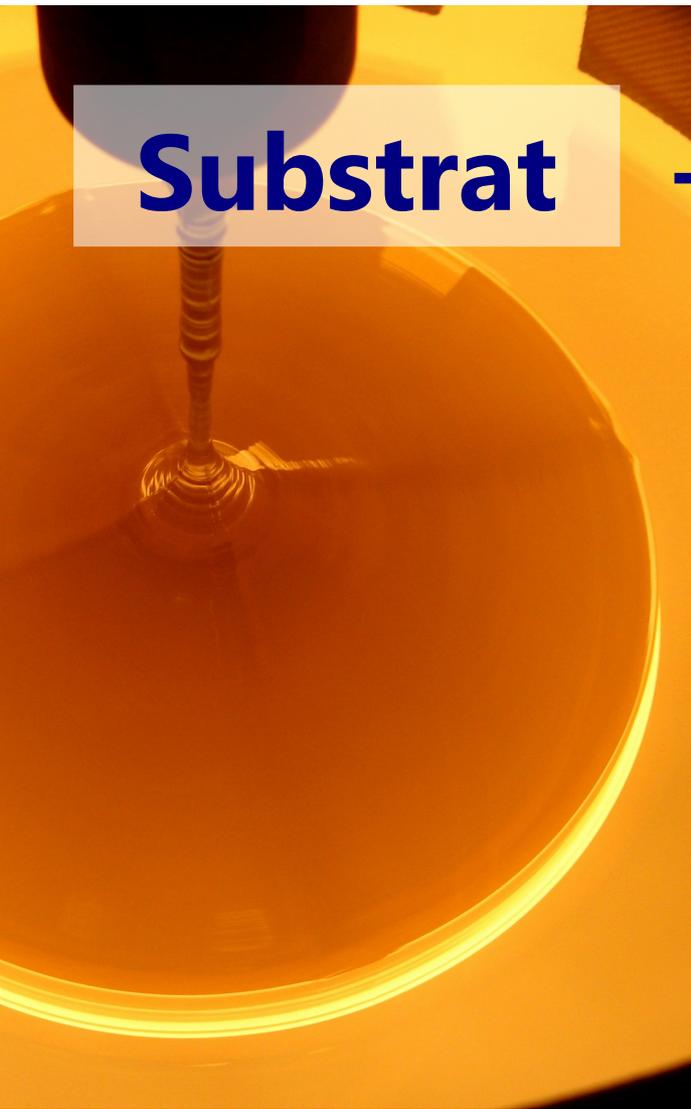
La vue d'un miroir des bras



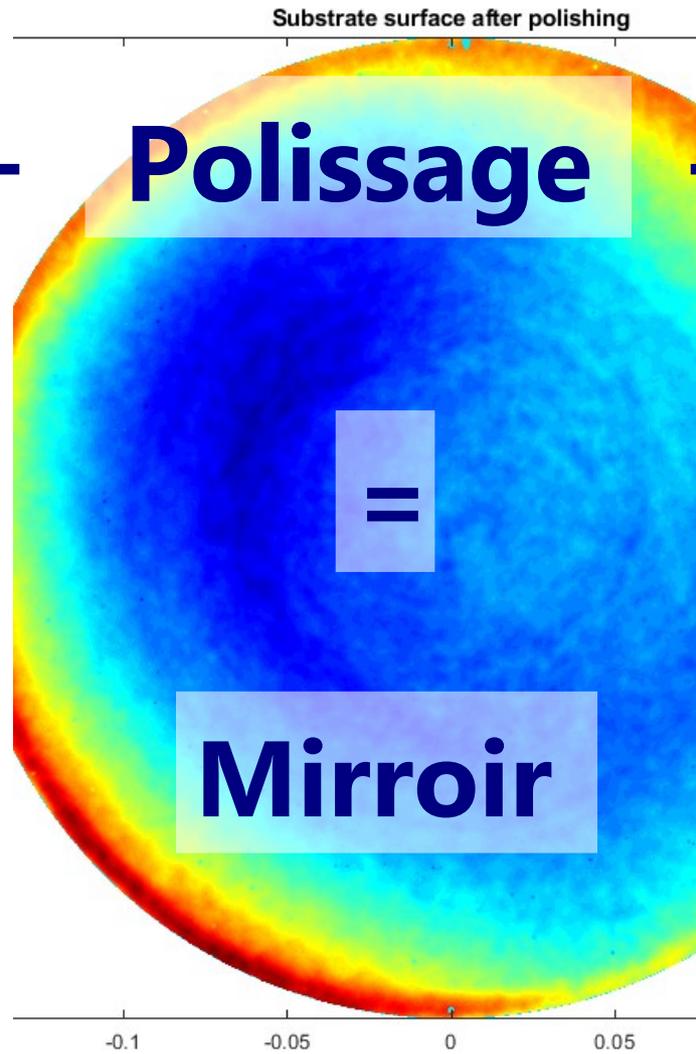
II

Les miroirs les plus critiques :
ceux des bras

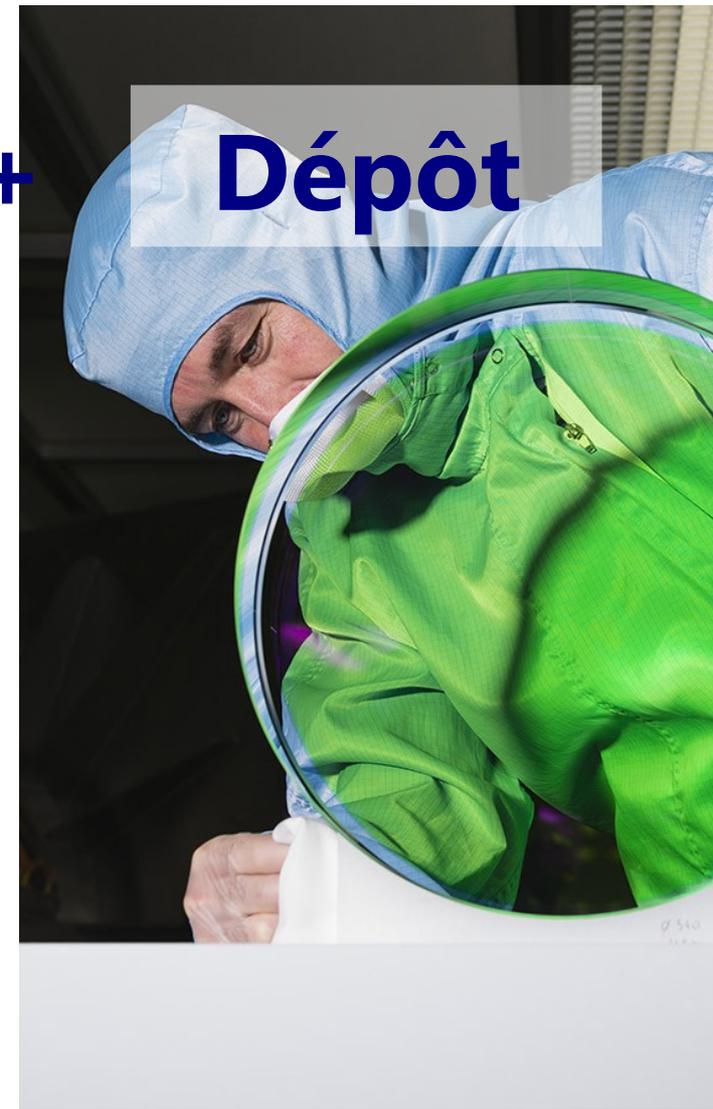
Les 3 ingrédients d'un miroir:



+

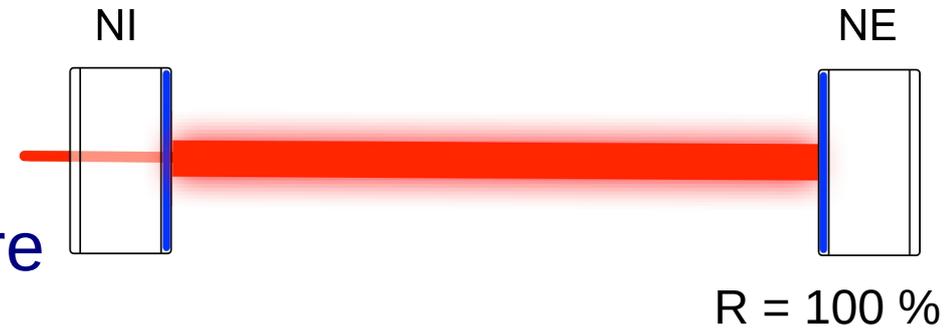


+



The arm cavities

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

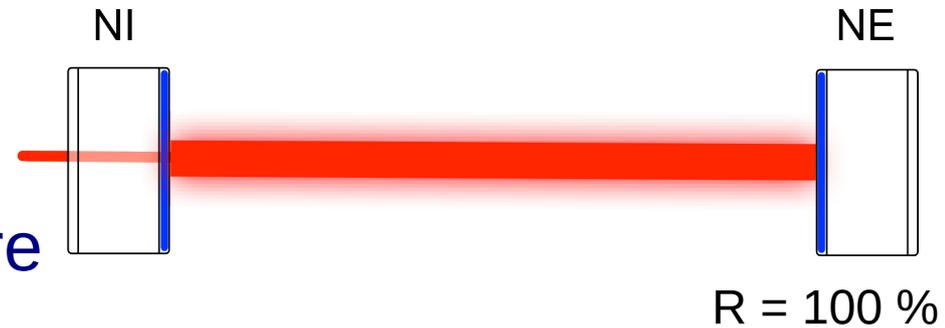


- 2 paramètres essentiels
 - La finesse

- 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



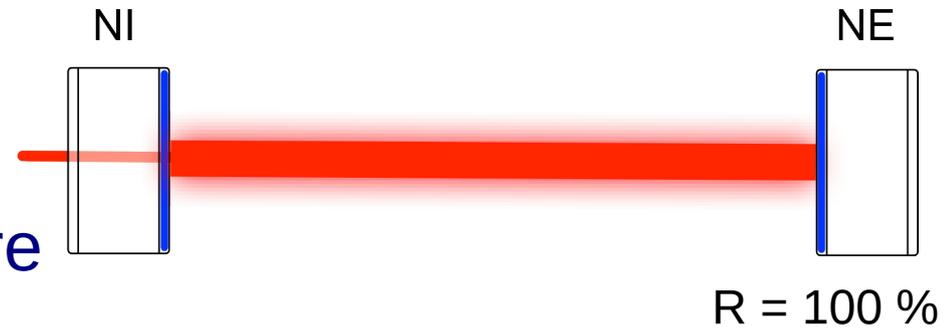
Définie la puissance
réfléchie par les bras



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

$G = 40$

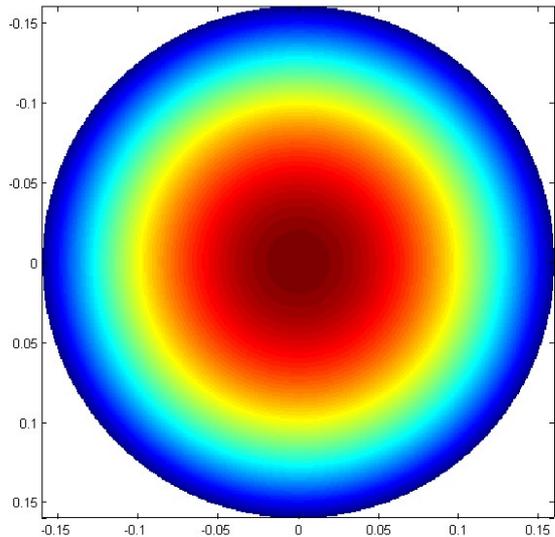
Les pertes par aller retour (RTL)

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

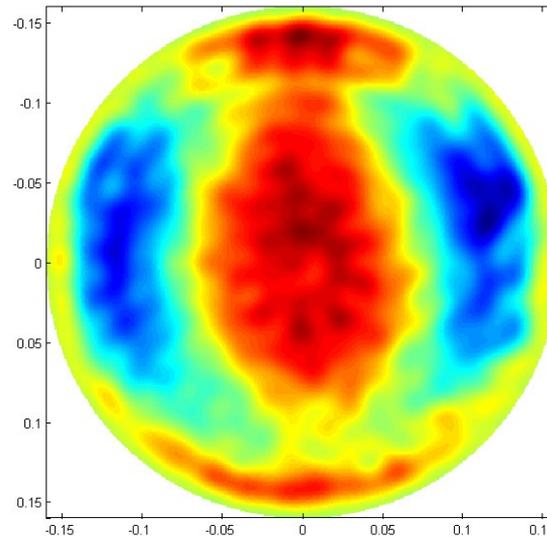
Les pertes par aller retour (RTL)

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

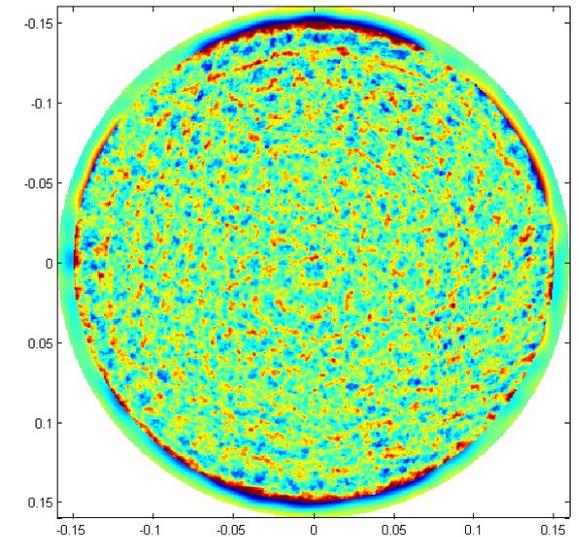
Erreur de courbure



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
- 2×10 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

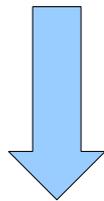
- propriétés optiques exceptionnelles
 - absorption en volume < 1 ppm/cm @ 1064 nm
 - biréfringence < 1 nm / cm
 - homogénéité $\Delta n < 2 \times 10^{-6}$
 - 3D isotropique
- disponible en grande taille
- polissage et traitement bien maîtrisés

Heraeus Suprasil 3001 & 3002

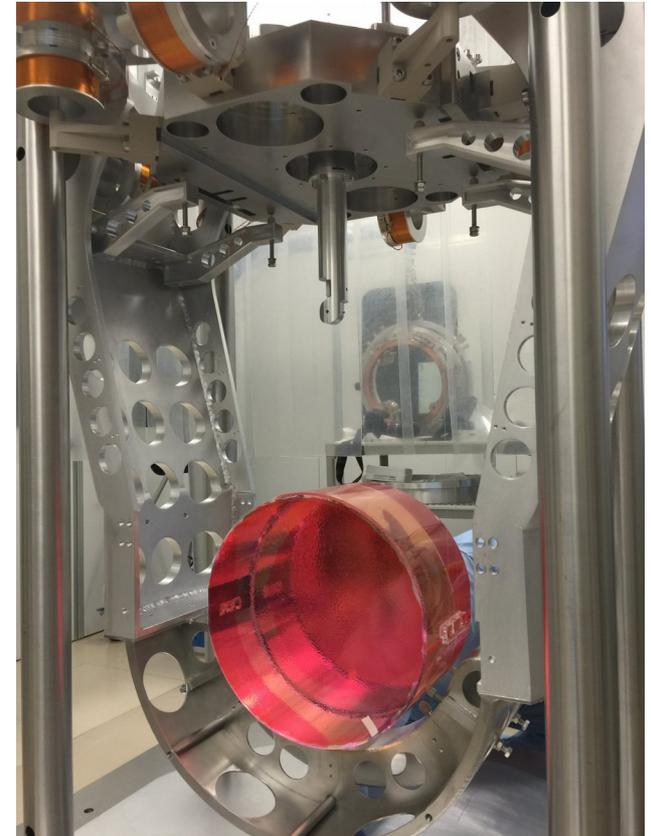
Le substrat roi: la silice fondue

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

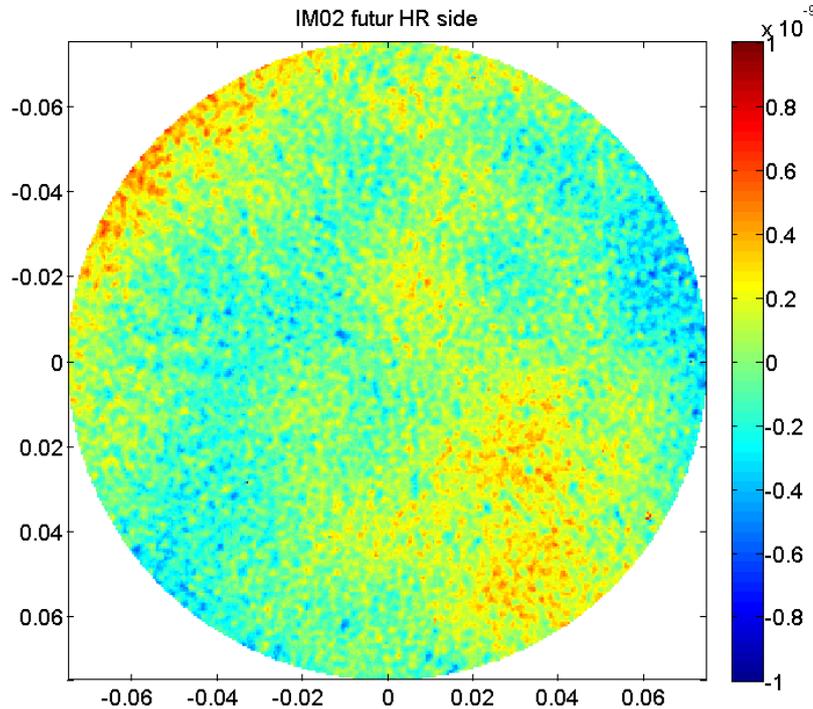


Un polissage remarquable

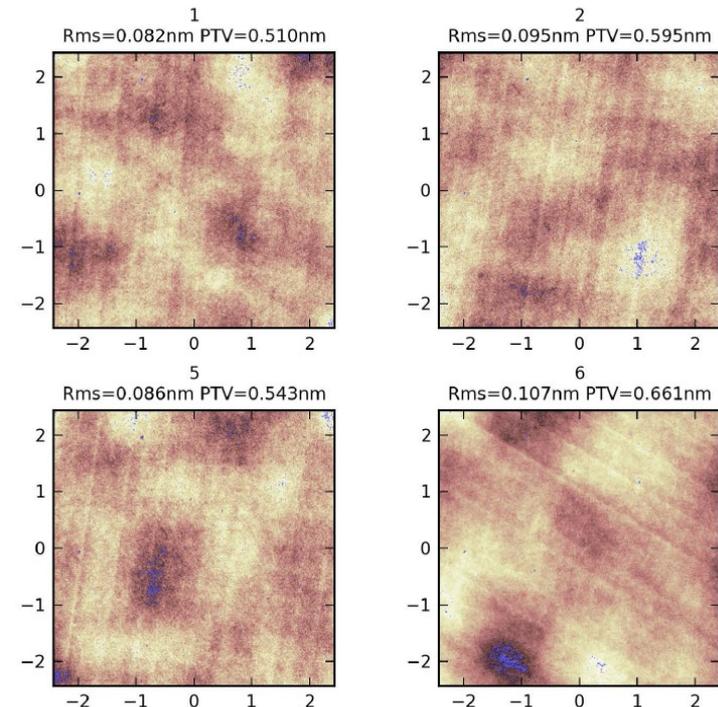
Possibilités de polissage exceptionnelle pour la silice

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

$RMS < 0.1\text{ nm}$

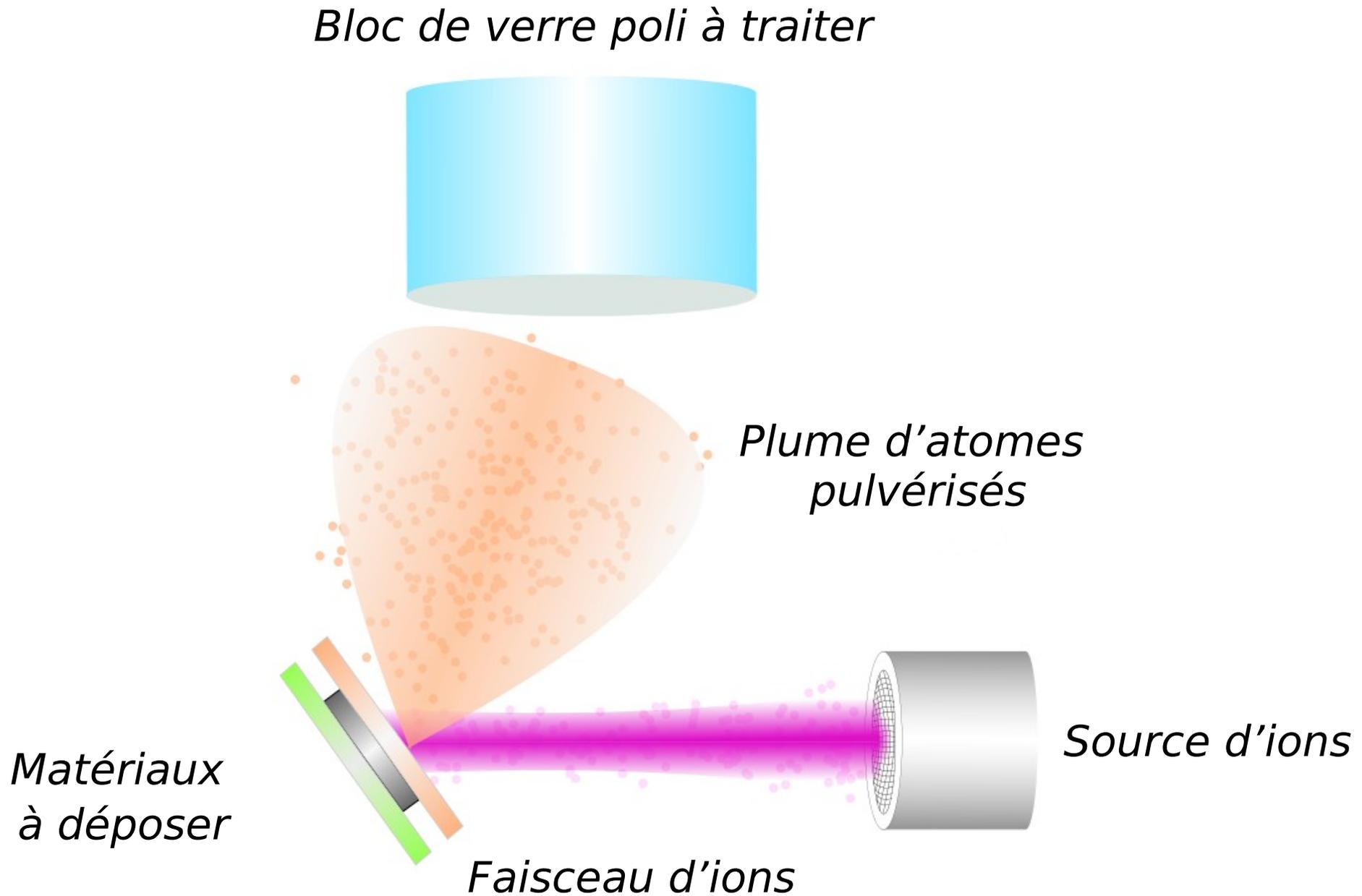


La machine de dépôt IBS dans la salle blanche du LMA (Lyon)

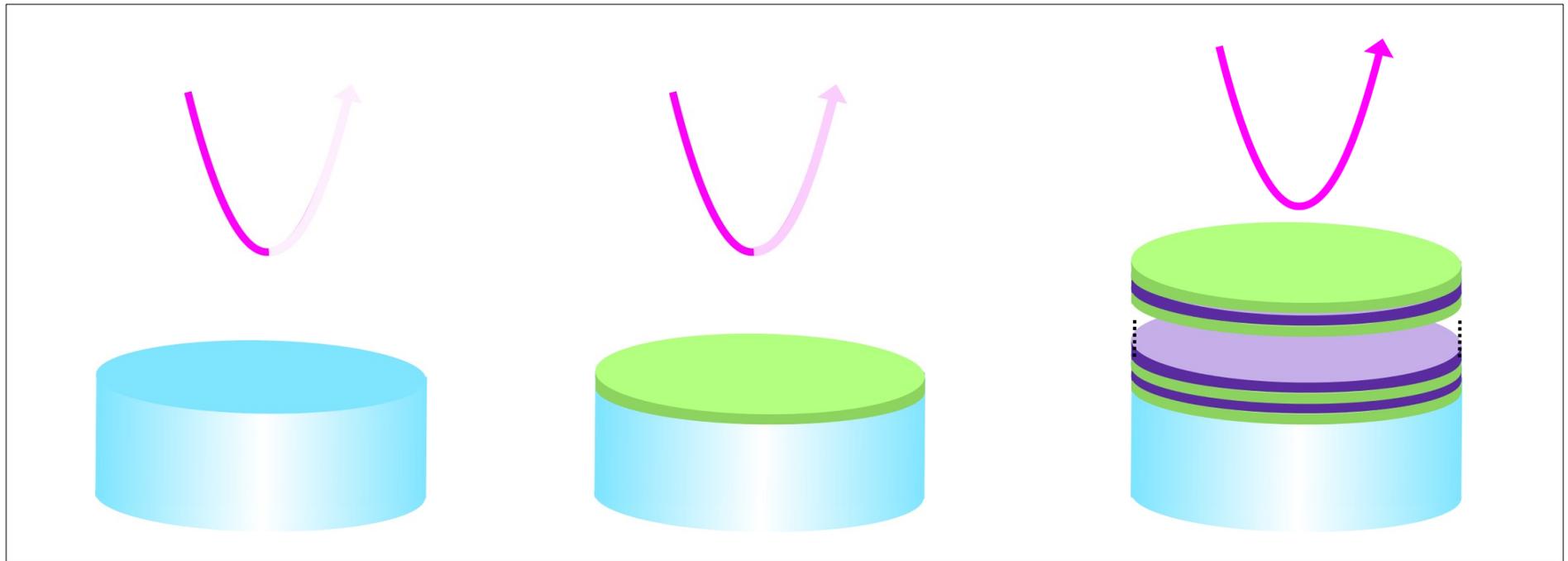


Où a été fait le traitement des miroirs les plus critiques de tous les détecteurs d'ondes gravitationnelles

Procédé de pulvérisation par faisceau d'ions



Principe d'un miroir multicouches



1 surface, $R \sim 4\%$

2 surfaces, $R \sim 20\%$

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

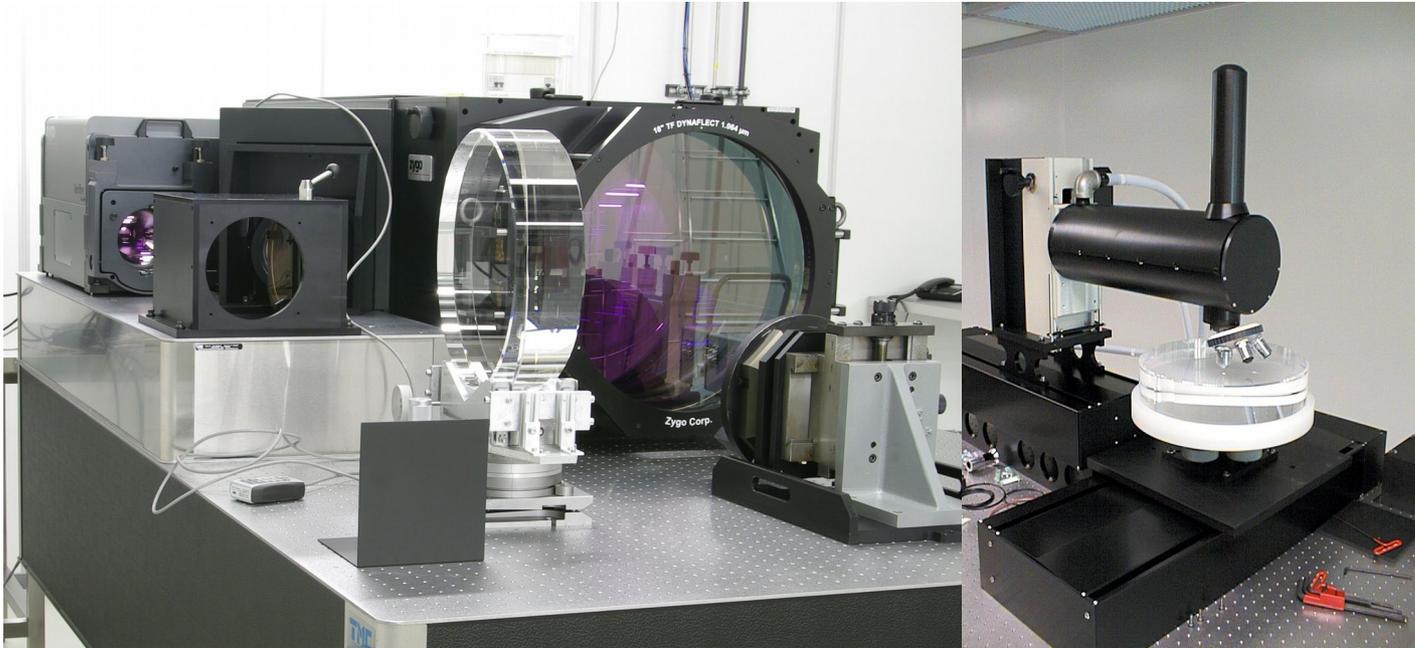
Empilement de 20 paires¹
de couches d'oxyde de tantale et silice (verre)

¹ réseau de Bragg avec matériaux haut et bas indices de réfraction (Ta₂O₅ et SiO₂)

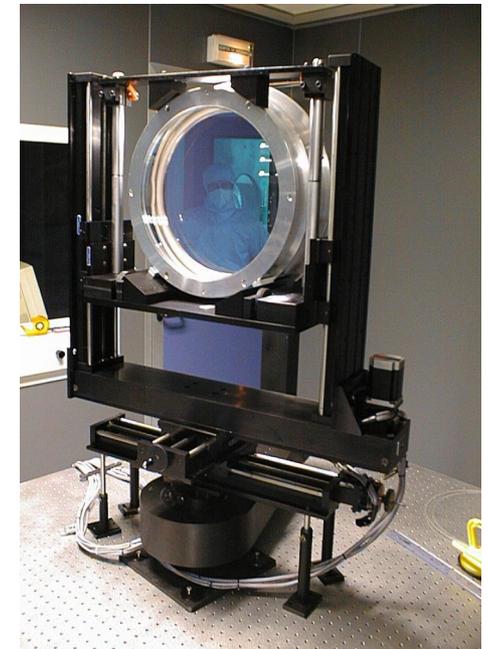
La métrologie

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)



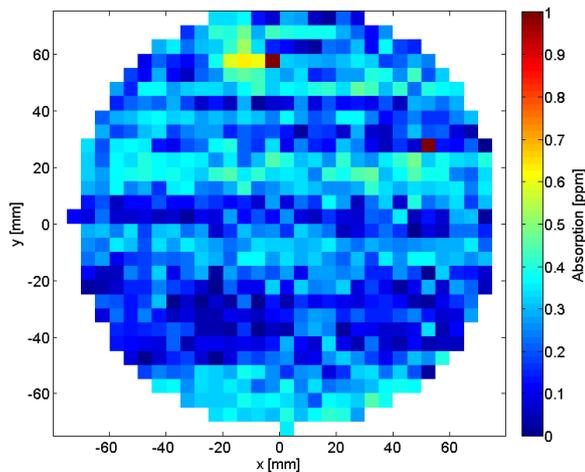
Mesure de diffusion

Performances après dépôt

- Planéité identique malgré le dépôt de 6 μm
- Transmission identique pour les miroirs d'entrée (à 0.002 % près)
- Transmission des miroirs de fin : 4 ppm

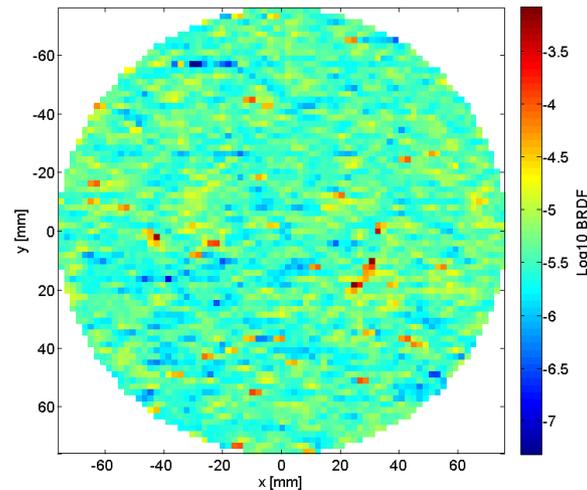
Performances typiques à 1064 nm

Absorption



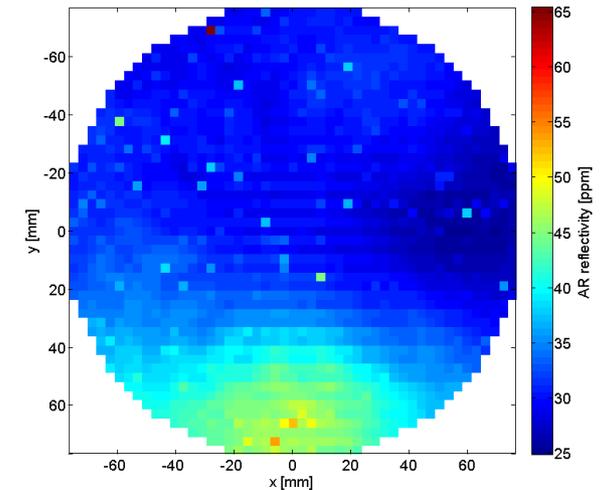
0.2 ppm

Diffusion



4 ppm

réflectivité AR



30 ppm

Performances after coating



- Planéité identique malgré le dépôt de 6 μm
- Transmission identique pour les miroirs d'entrée (à 0.002 % près)
- Transmission des miroirs de fin : 4 ppm

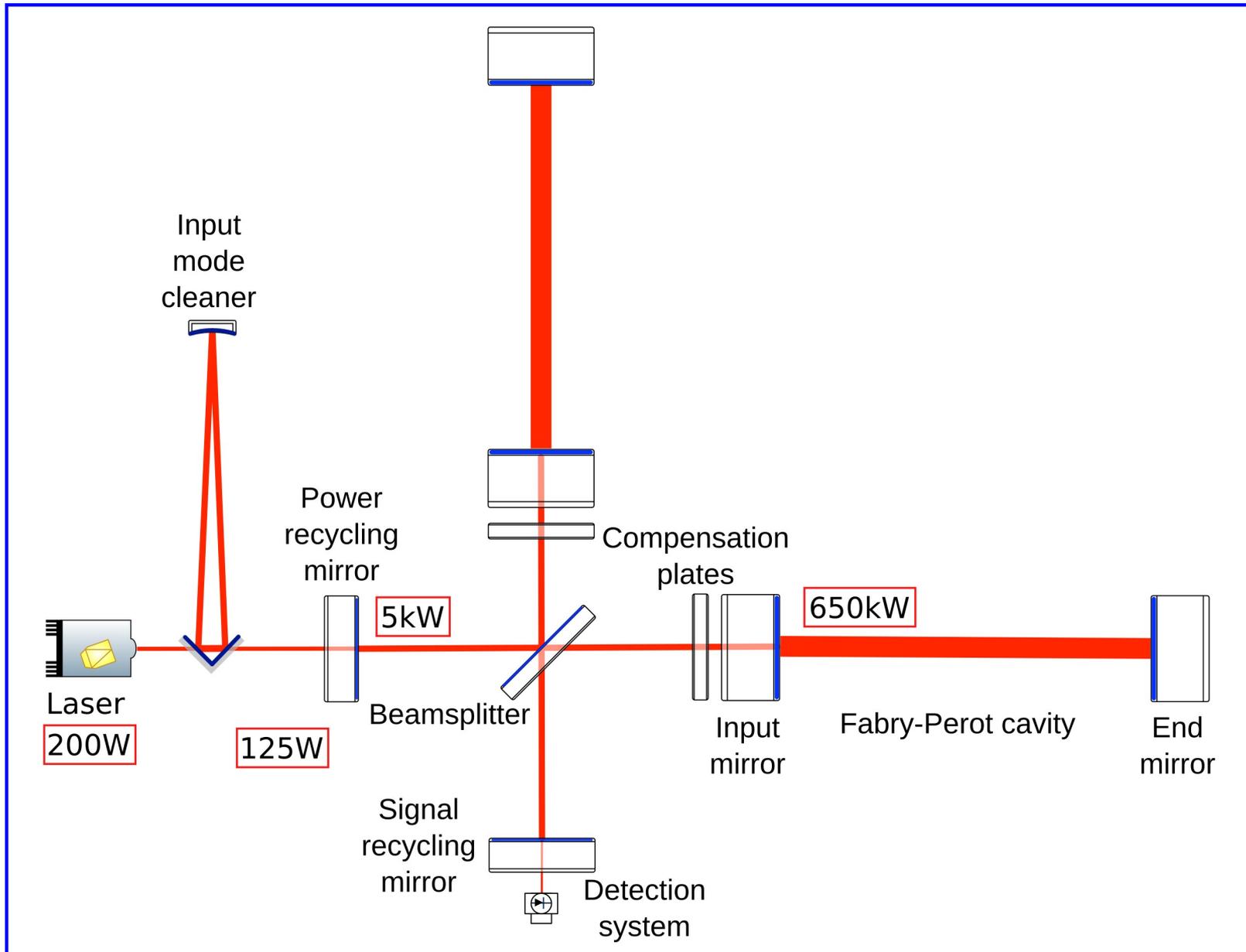
Mesure in-situ après installation Advanced Virgo

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

III

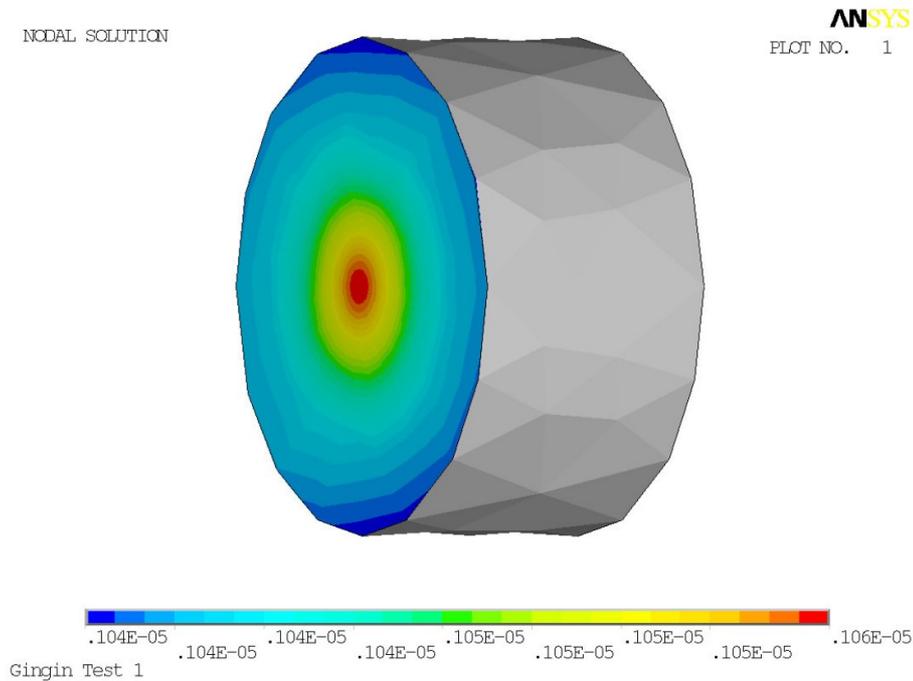
Quelques problèmes optiques

Une histoire de puissance

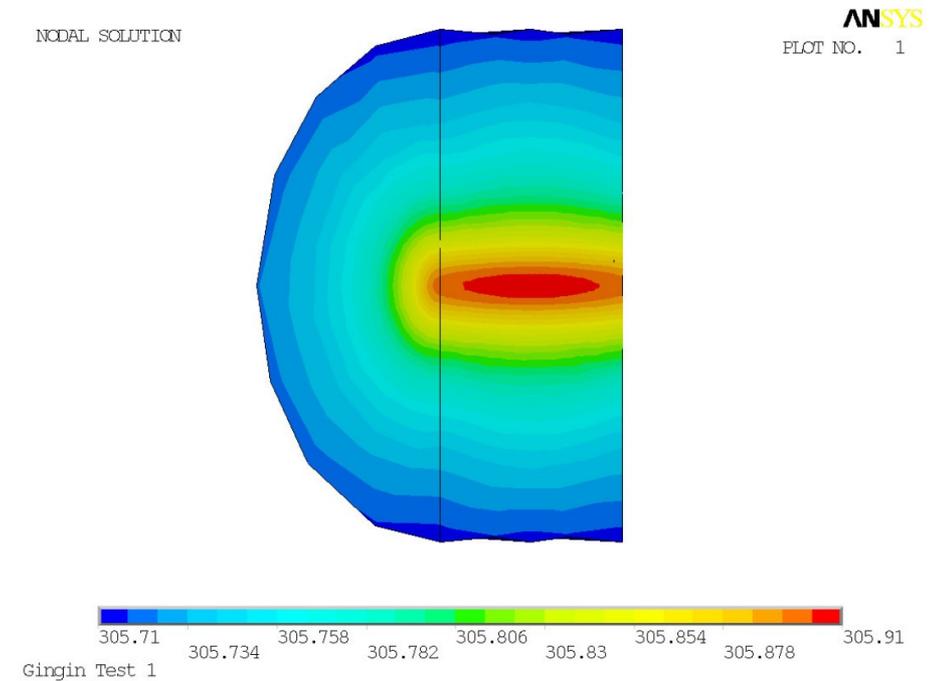


Effet de l'absorption optique

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



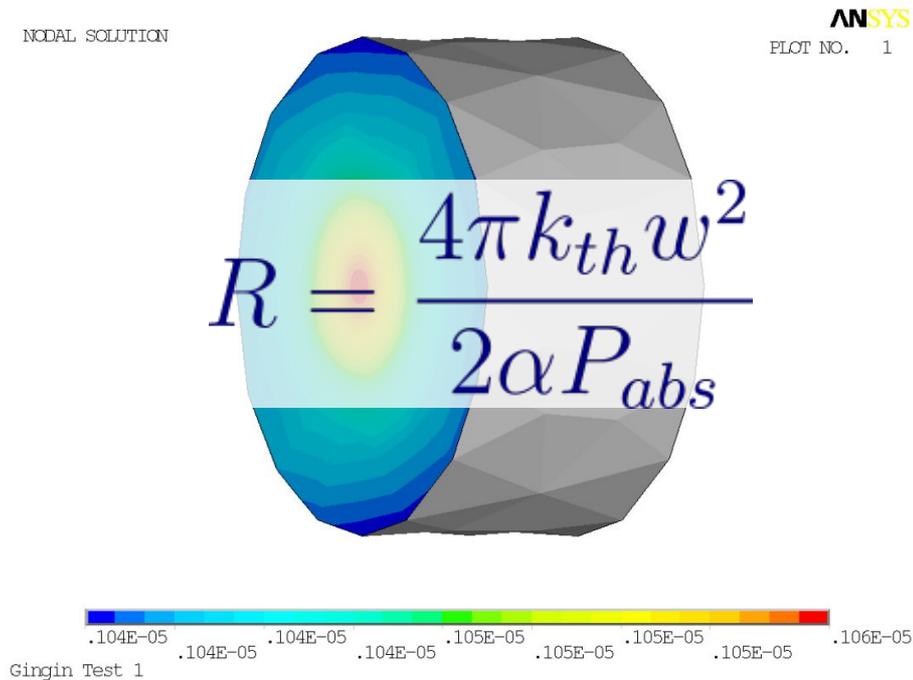
Absorption du coating



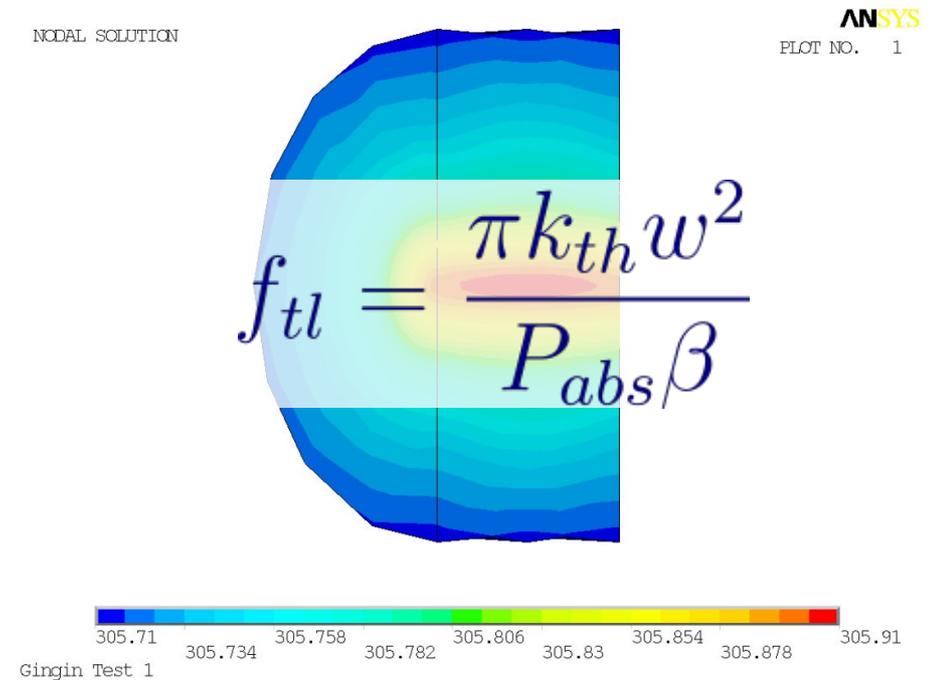
Absorption du substrat

Effet de l'absorption optique

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

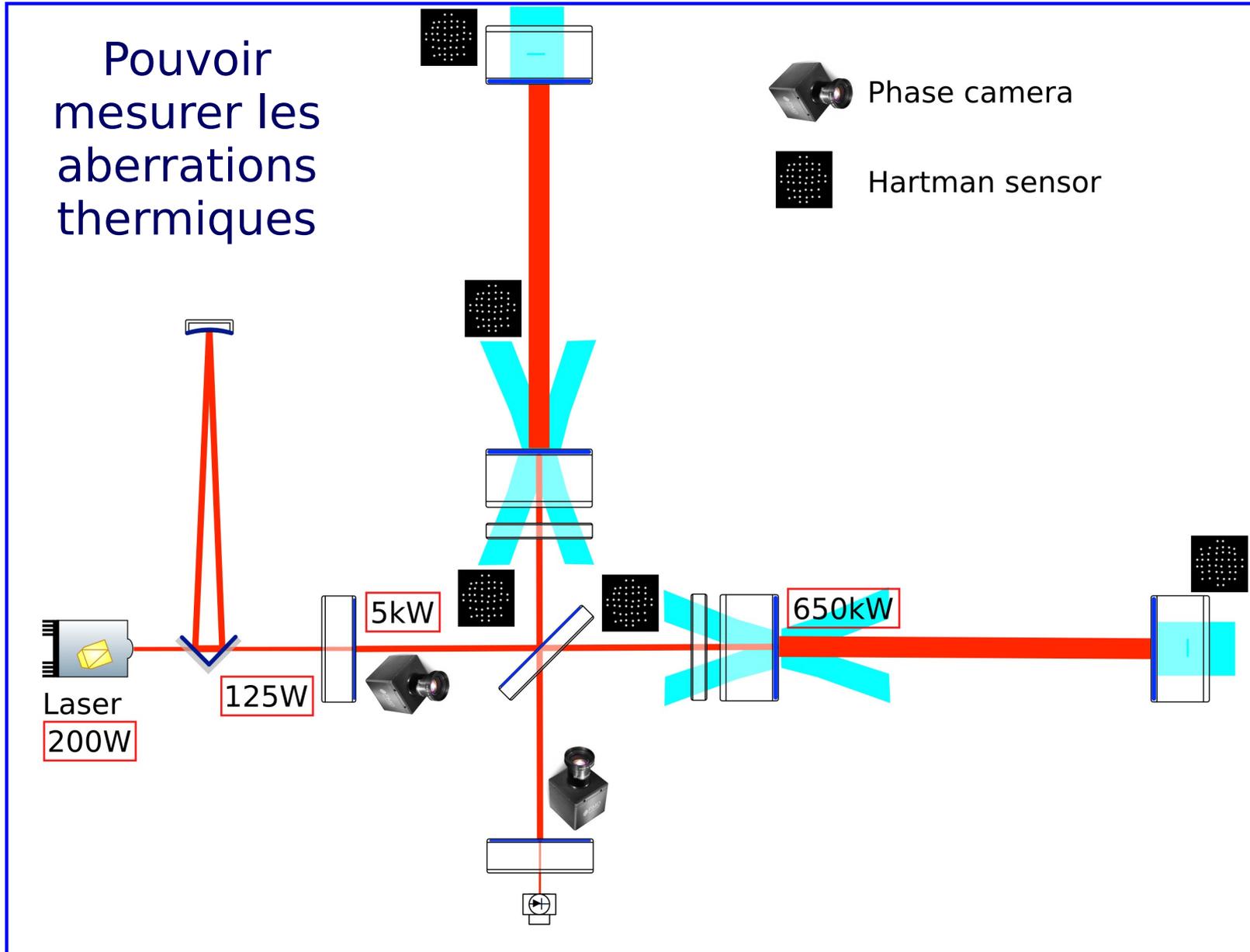


Absorption du coating

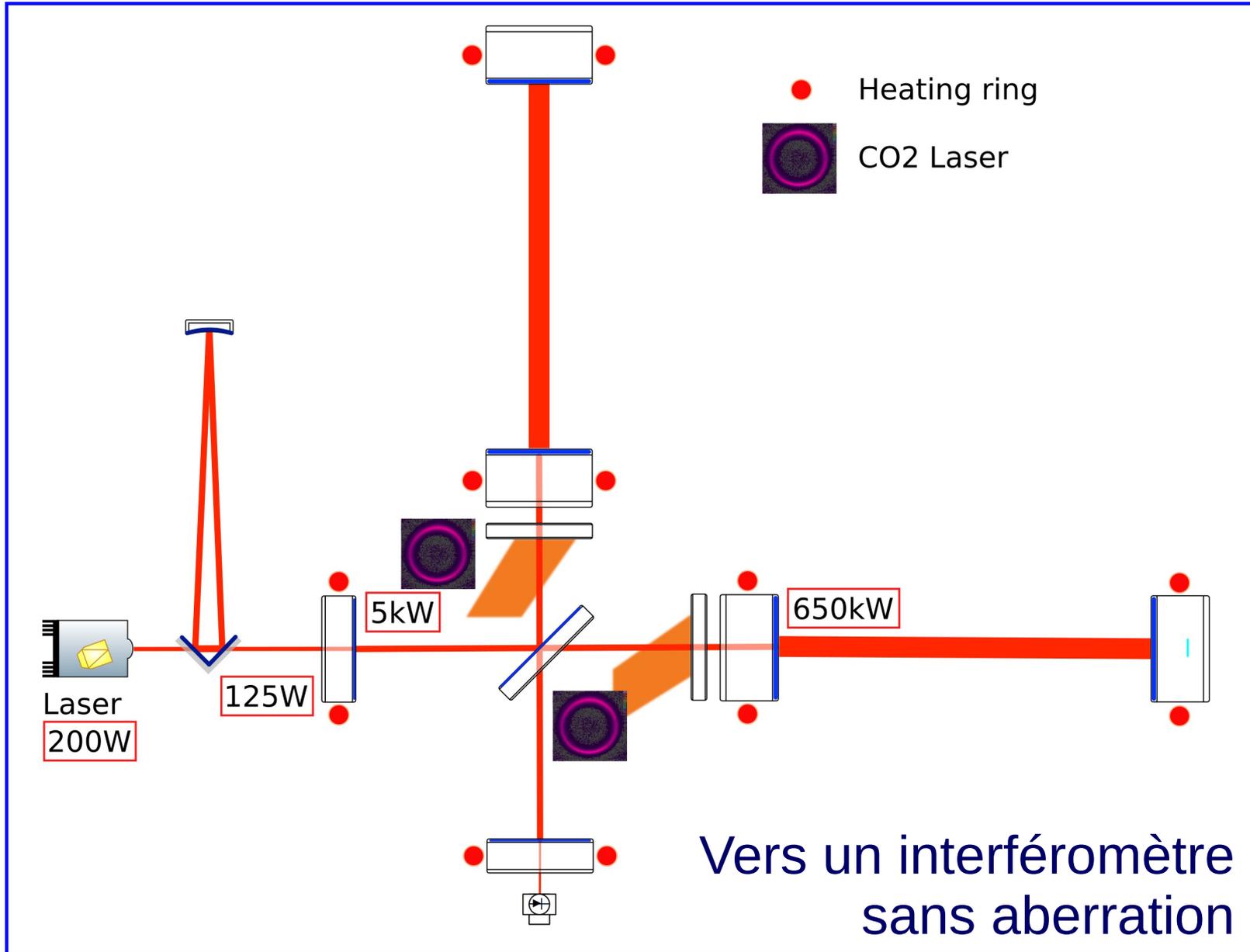


Absorption du substrat

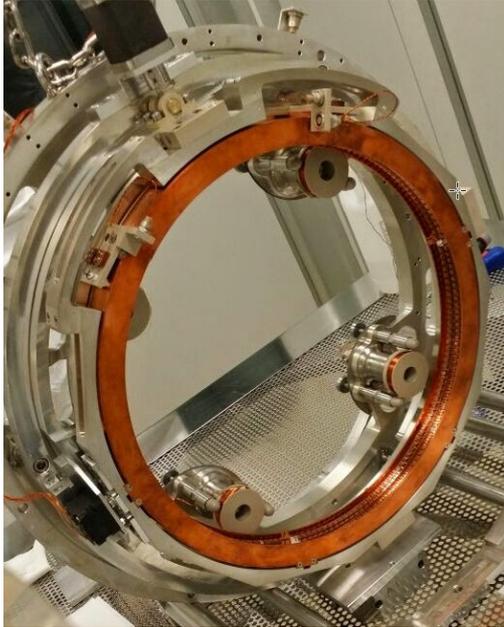
Le système de compensation thermique



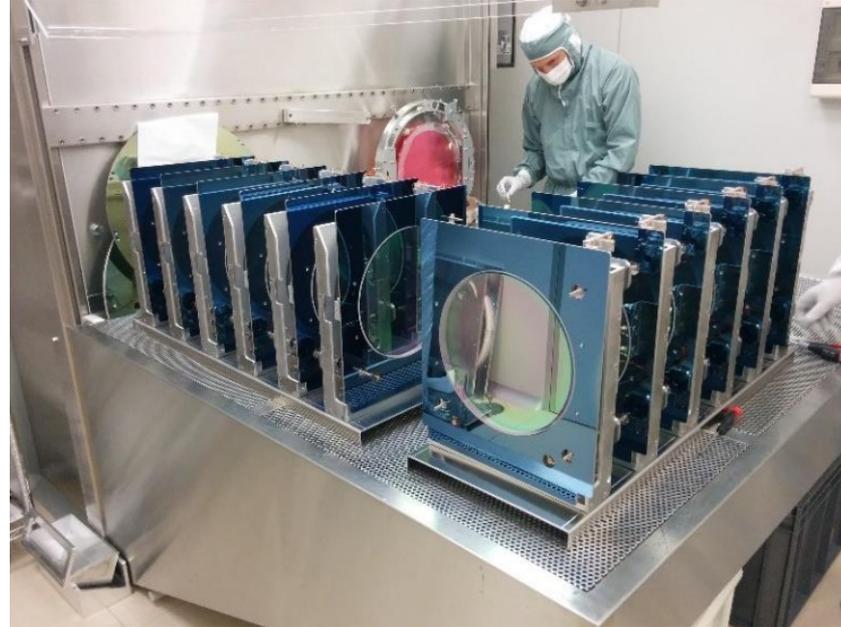
Le système de compensation thermique



Ce système en quelques images



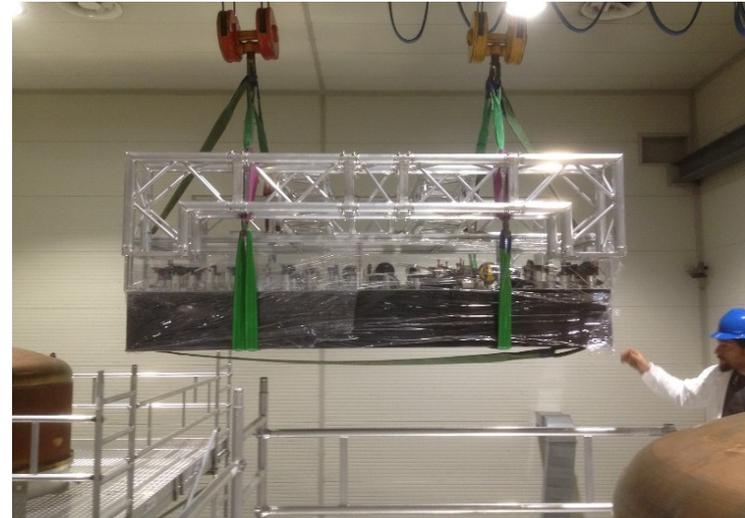
Anneau chauffant



Miroirs de renvoi pour le Hartman



Banc du laser CO₂



Installation sur le site

Un ennemi redoutable : la lumière diffusée



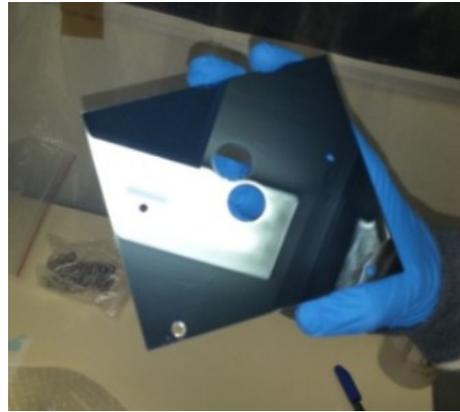
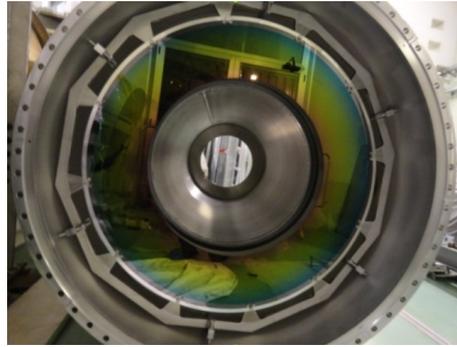
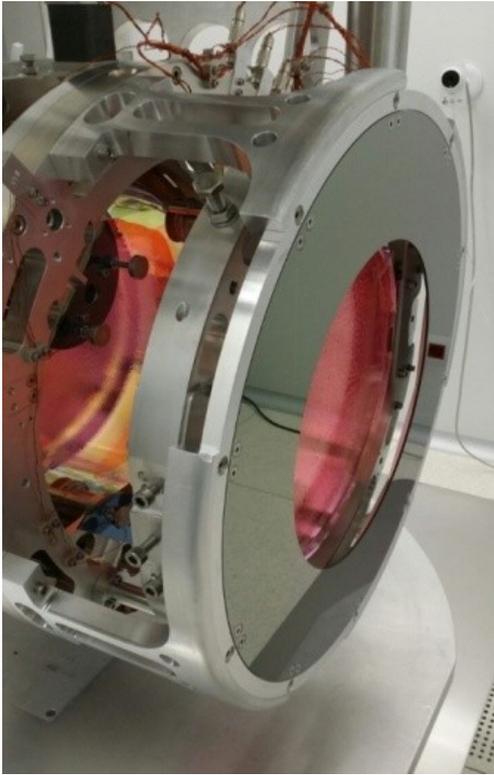
Tous les interféromètres ont déjà été limités par la lumière diffusée !

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

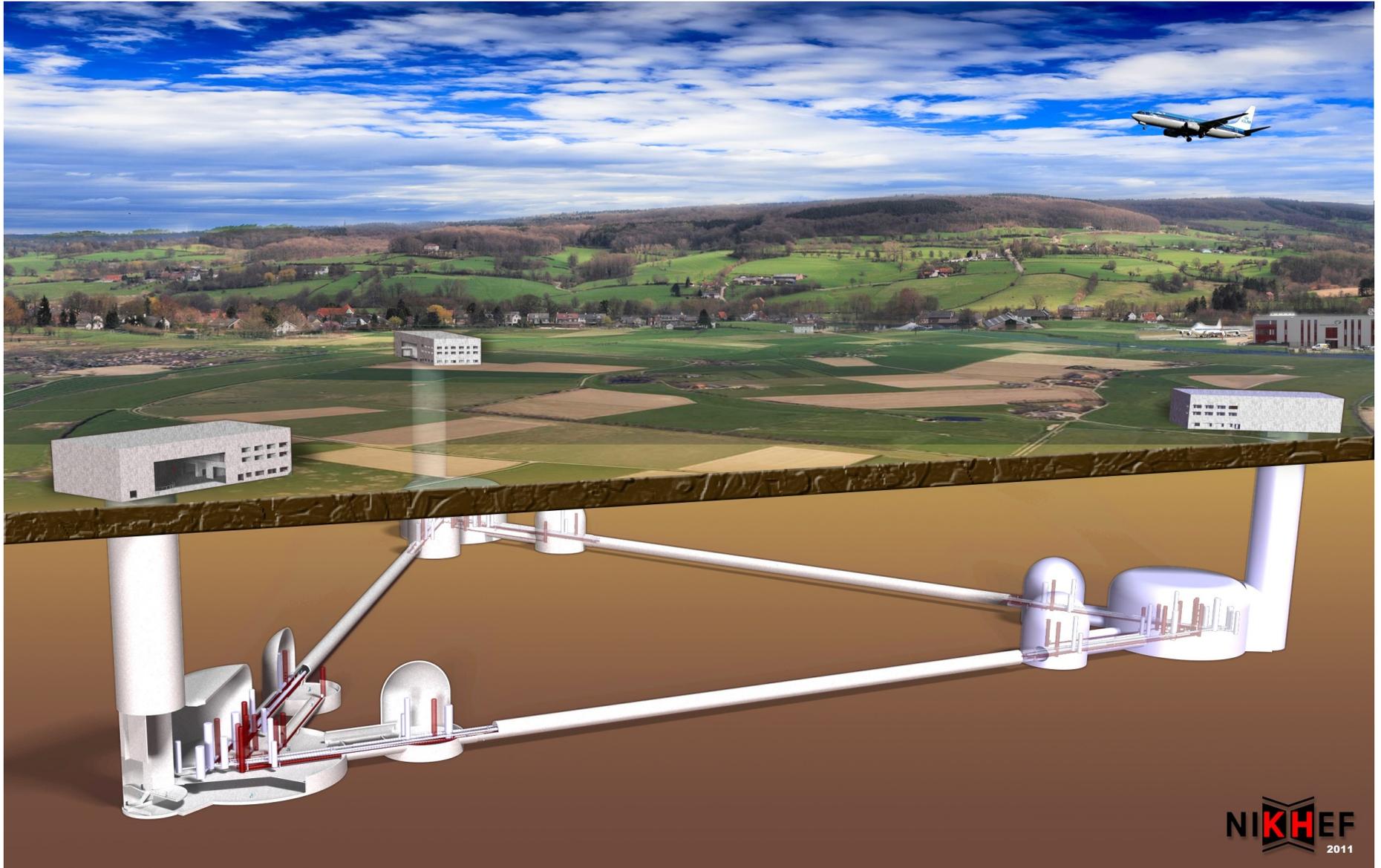


IV

Les miroirs de demain

Le Einstein Telescope

Bras de 10 km, souterrain, partiellement cryogénique



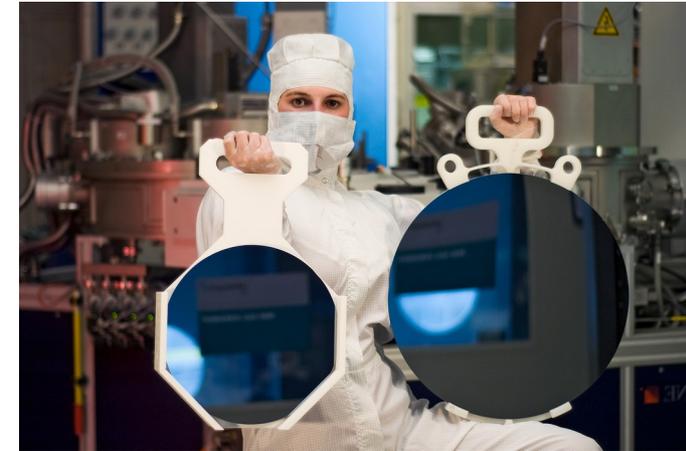
Les futurs miroirs

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

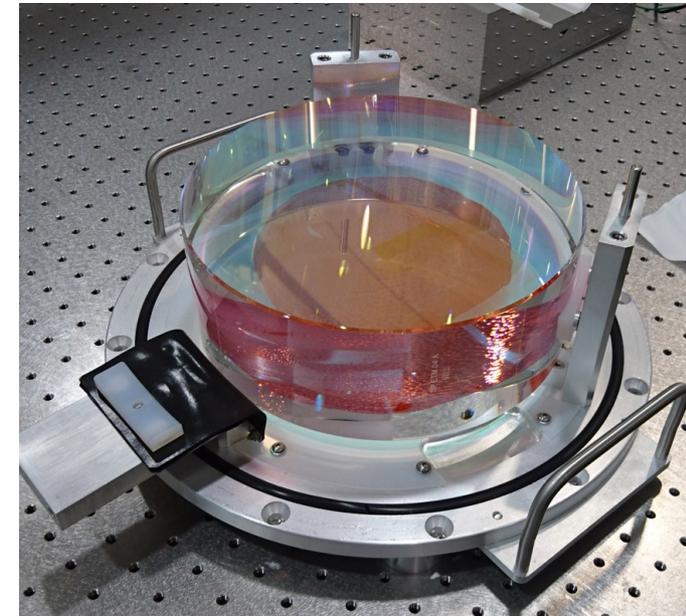
Le défis des miroirs froids :

- 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...