

Développement des miroirs pour le détecteur d'ondes gravitationnelles Advanced Virgo

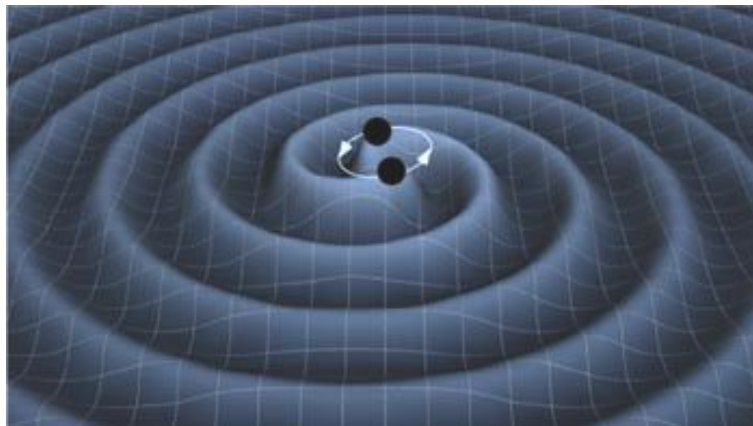
R. Bonnand.

4 Décembre 2011.

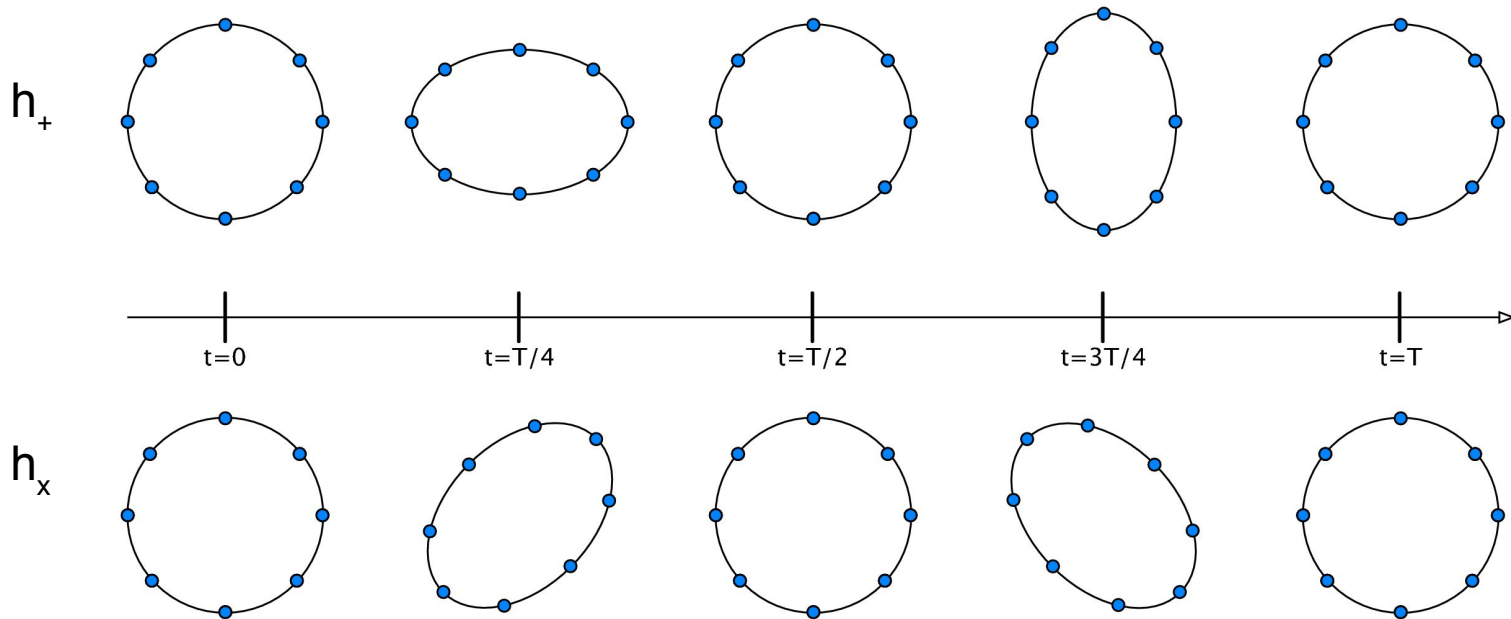
JRJC 2011, Annecy.

- Les ondes gravitationnelles.
- La détection des ondes gravitationnelles par interférométrie.
- Le projet Advanced Virgo.
- Développement des miroirs.
 - Le polissage.
 - Le traitement correctif.
 - Uniformité du dépôt de couches minces.

- Prédites par Einstein dans la théorie de la relativité générale (1916).
- Onde Gravitationnelles (OG) = perturbations de l'espace-temps.
- OG solutions de l'équation d'Einstein liant la métrique de l'espace temps au contenu énergétique de l'univers.
- Générées par accélération de masses.
- *Exemples:* coalescence de 2 trous noir.



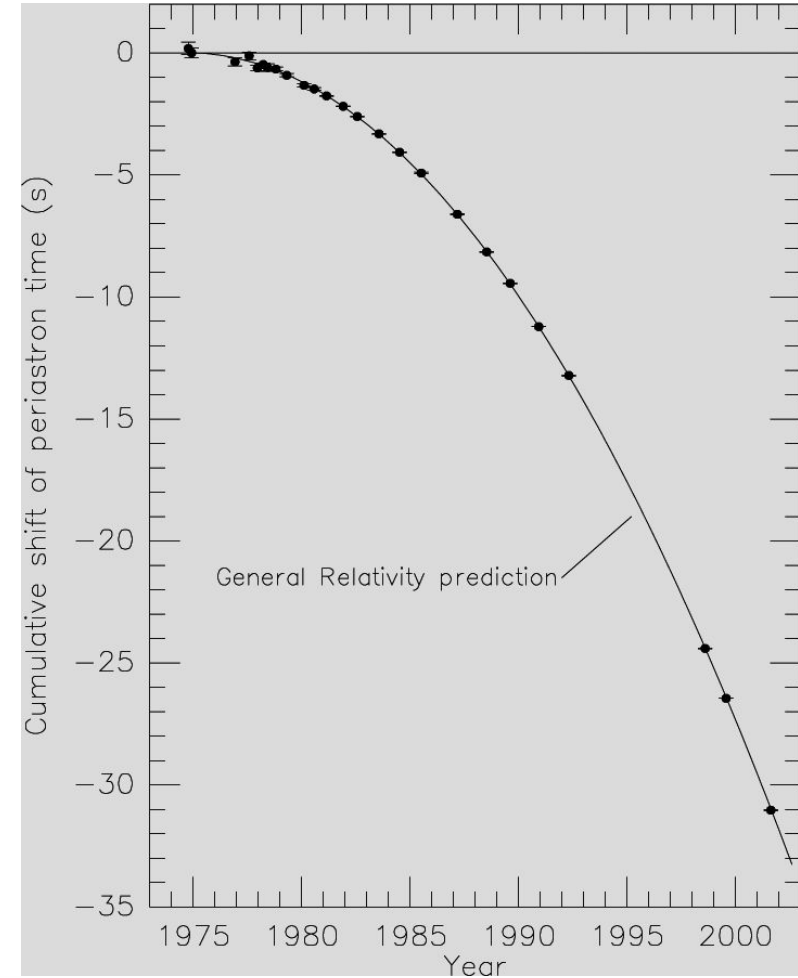
- 2 états de polarisation de l'onde gravitationnelle, h_+ et h_x .
- Effet de l'OG sur des masses libres disposés en cercle:



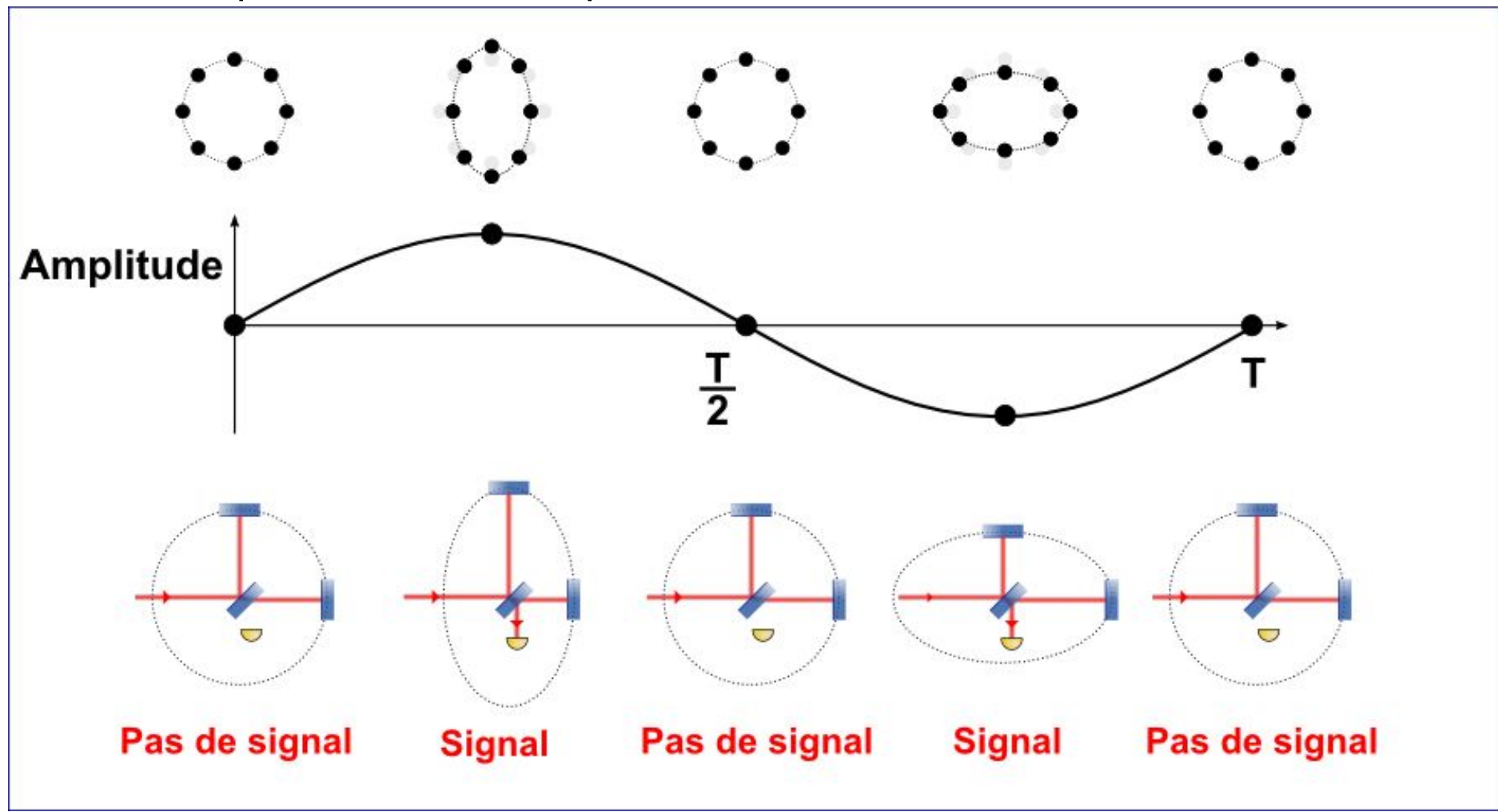
- Amplitude de l'onde gravitationnelles très faible, $\Delta L = 1 \times 10^{-18}$ m.
- Les différentes sources d'OG: supernovae, pulsar, coalescence d'objet binaire et fond stochastic.

- La preuve indirecte:
 - Système binaire pulsar – étoile à neutron
 - Découverte par Taylor et Hulse, prix Nobel en 1993

- Mais pas de détection directe pour l'instant!



- Principe de la détection par interférométrie laser:



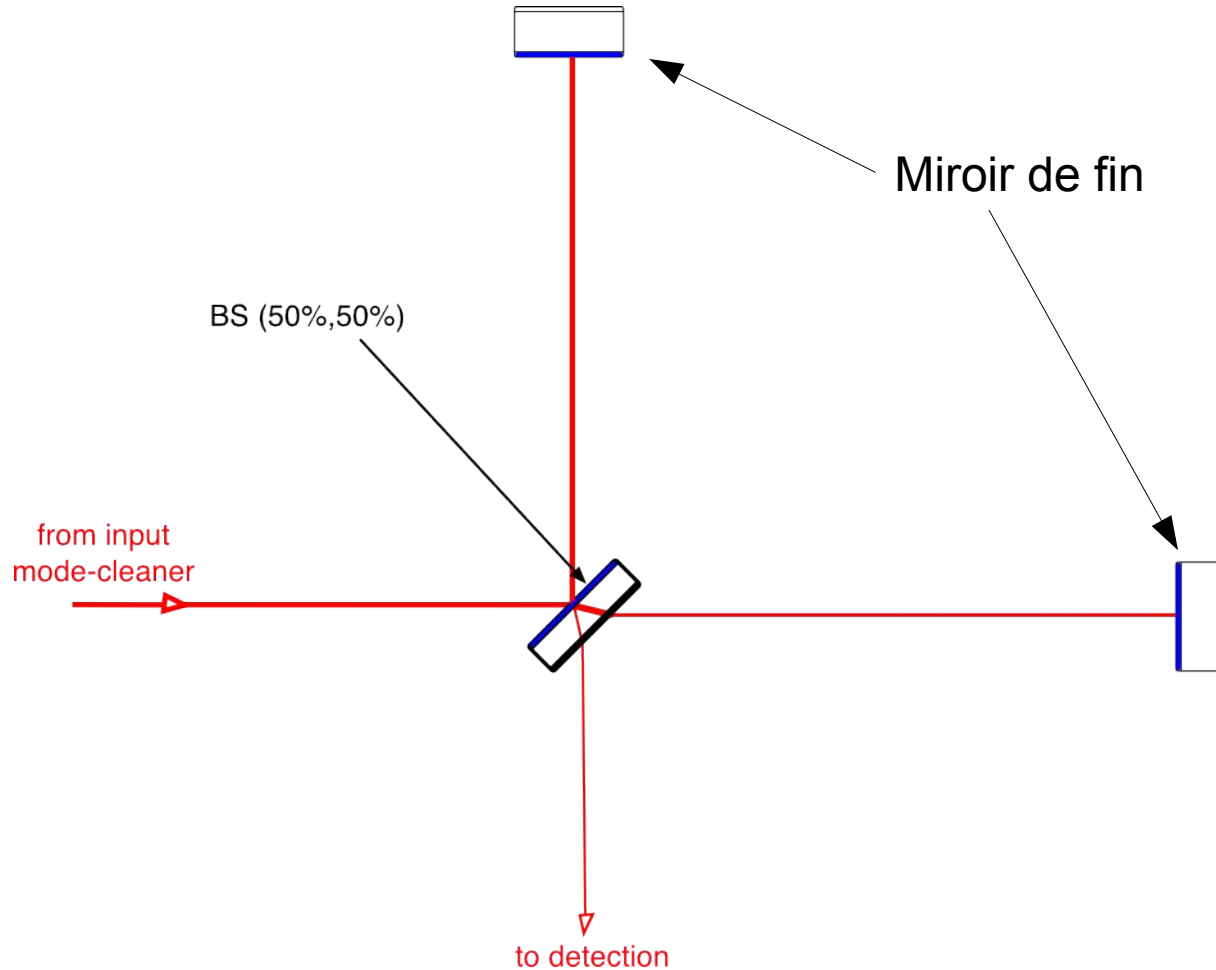
- L'interféromètre Virgo à Cascina.



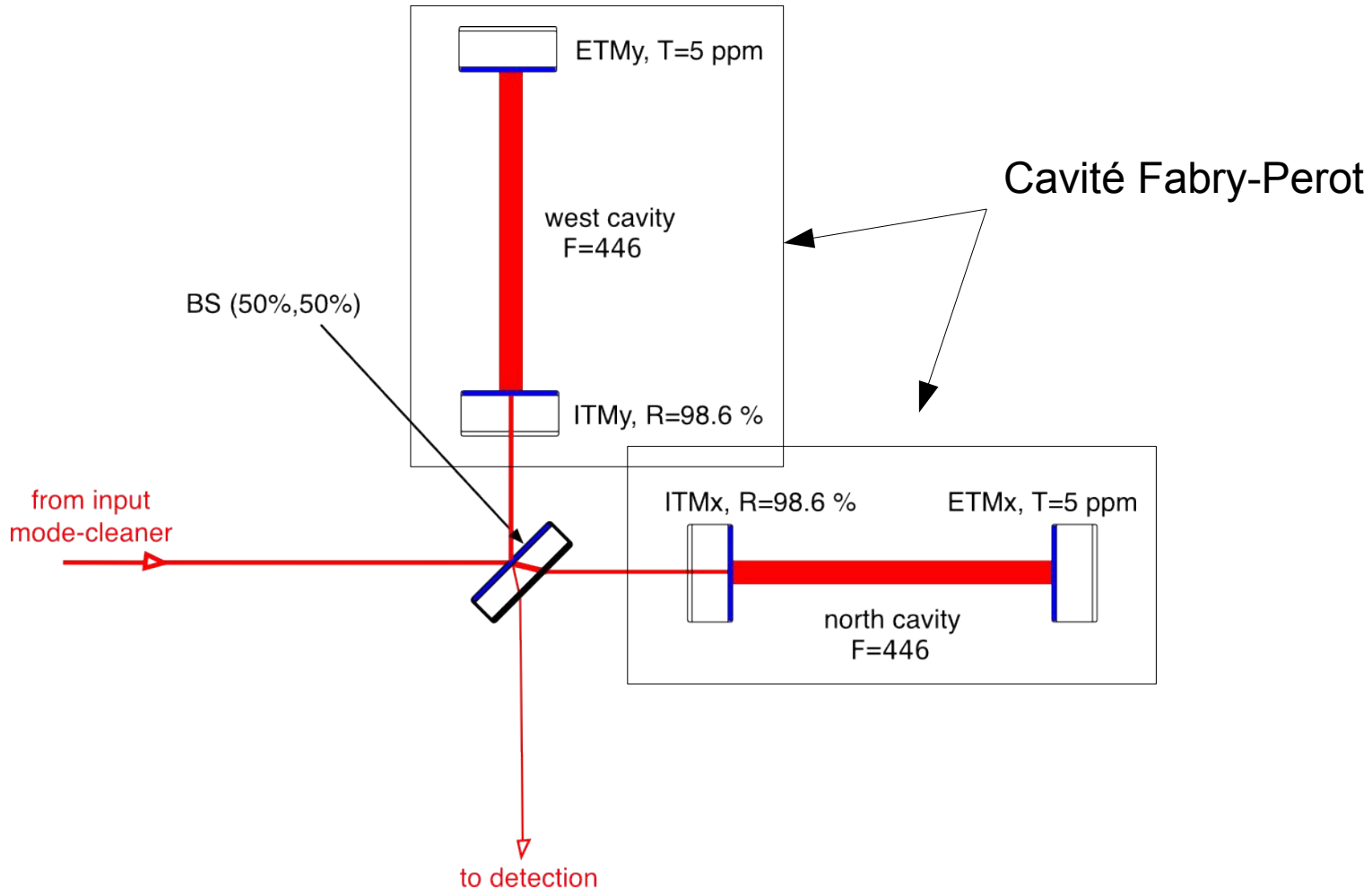
- Un réseau de détecteur d'ondes gravitationnelles:



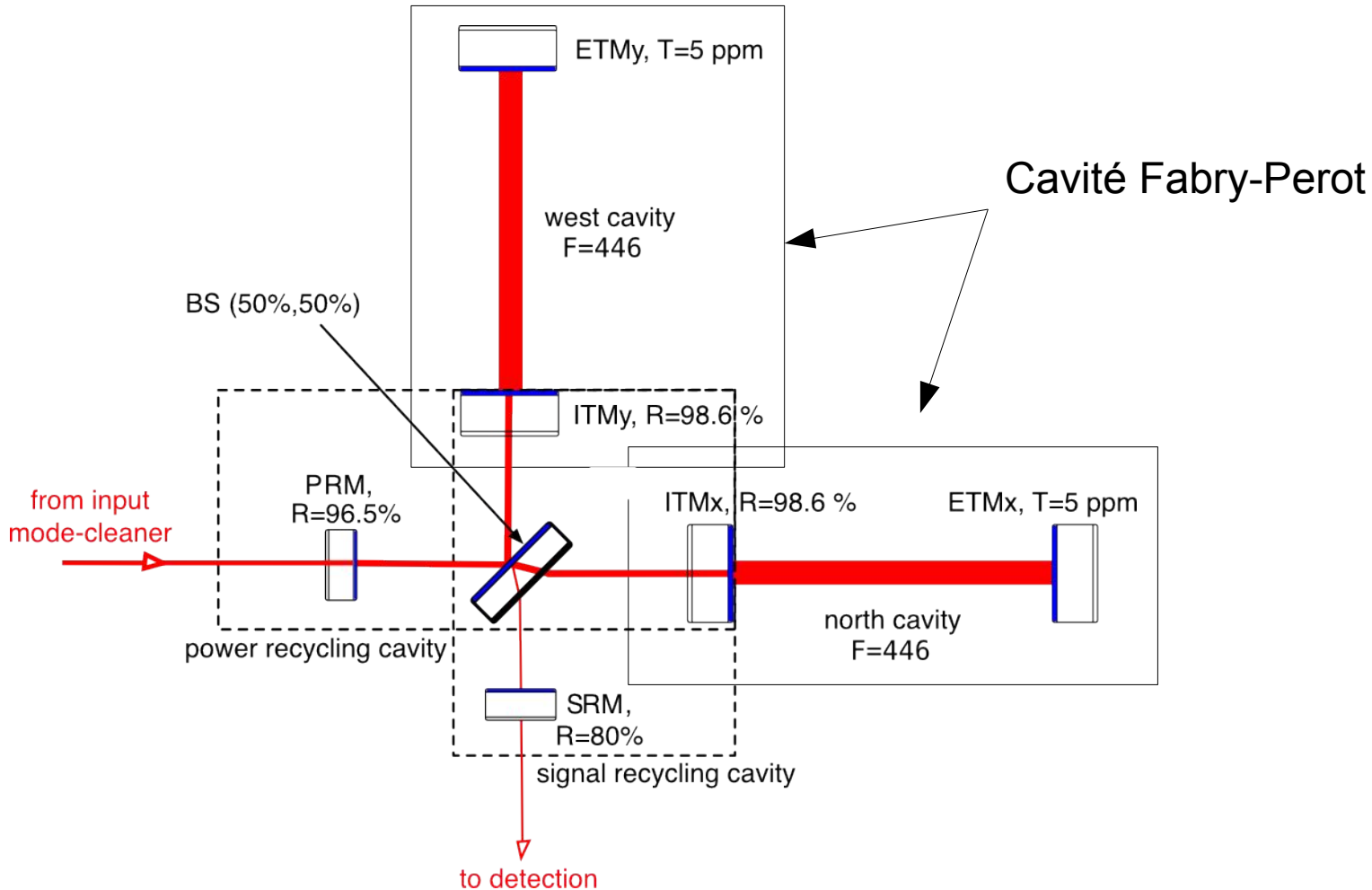
- Un interféromètre de Michelson



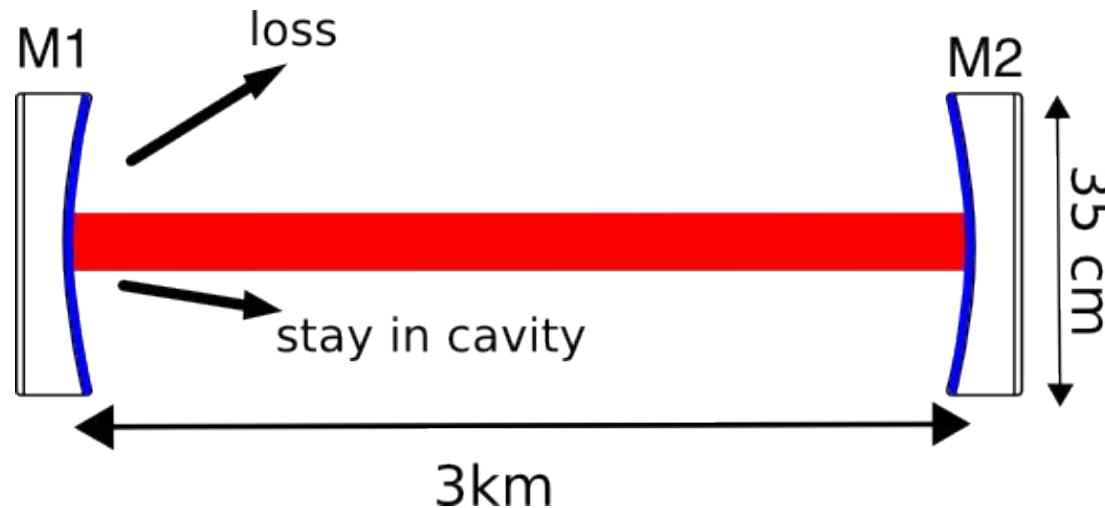
- Un interféromètre de Michelson amélioré!



- Un interféromètre de Michelson amélioré!



- Objectif:** Maximiser la puissance dans les bras.
 < 50 ppm de pertes par aller retour (RTL) dans les cavités Fabry-Perot due à la surface des miroirs.



- Il faut des miroirs presque parfait, le meilleur que l'on puisse atteindre!

- **Miroir** = substrat + polissage
+ dépôt multicouche.
- **Substrat:**
 - 40 kg de verre ultra pur.
 - 35 cm de diamètre.
 - 20 cm d'épaisseur.
- **Polissage** ultra-précis (~ qq nanomètres).
- **Dépôt:**
 - Alternance de couches minces bas et haut indice.
 - Uniformité du dépôt ultra précise.

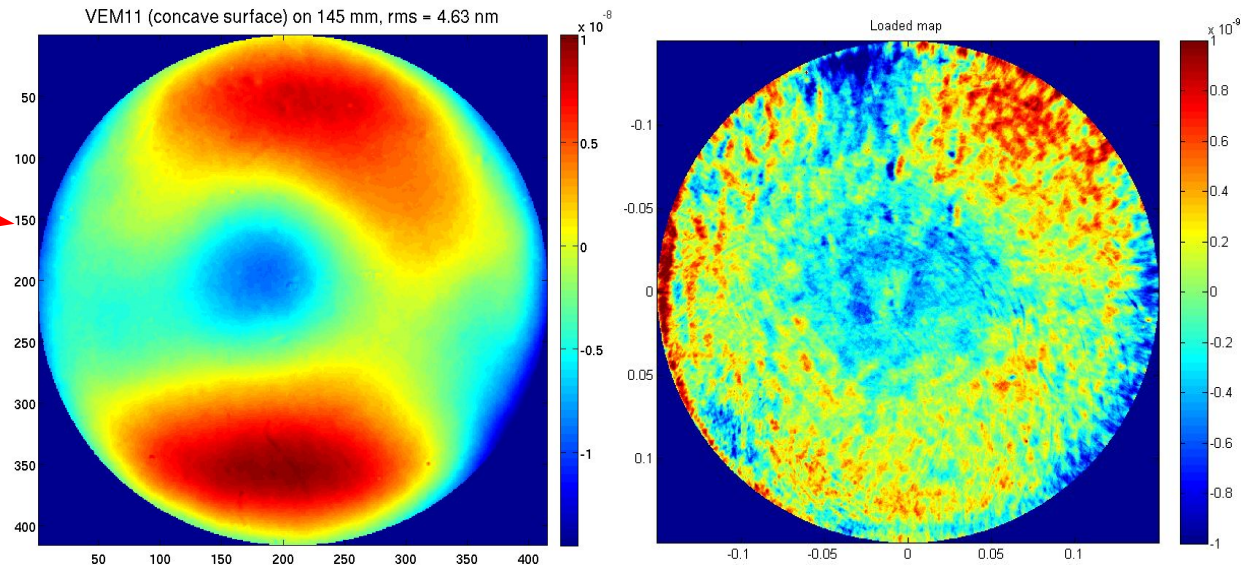


Le polissage

- Surface définie comme une fluctuation de hauteur par rapport à une surface parfaitement plane, $h(x,y)$.

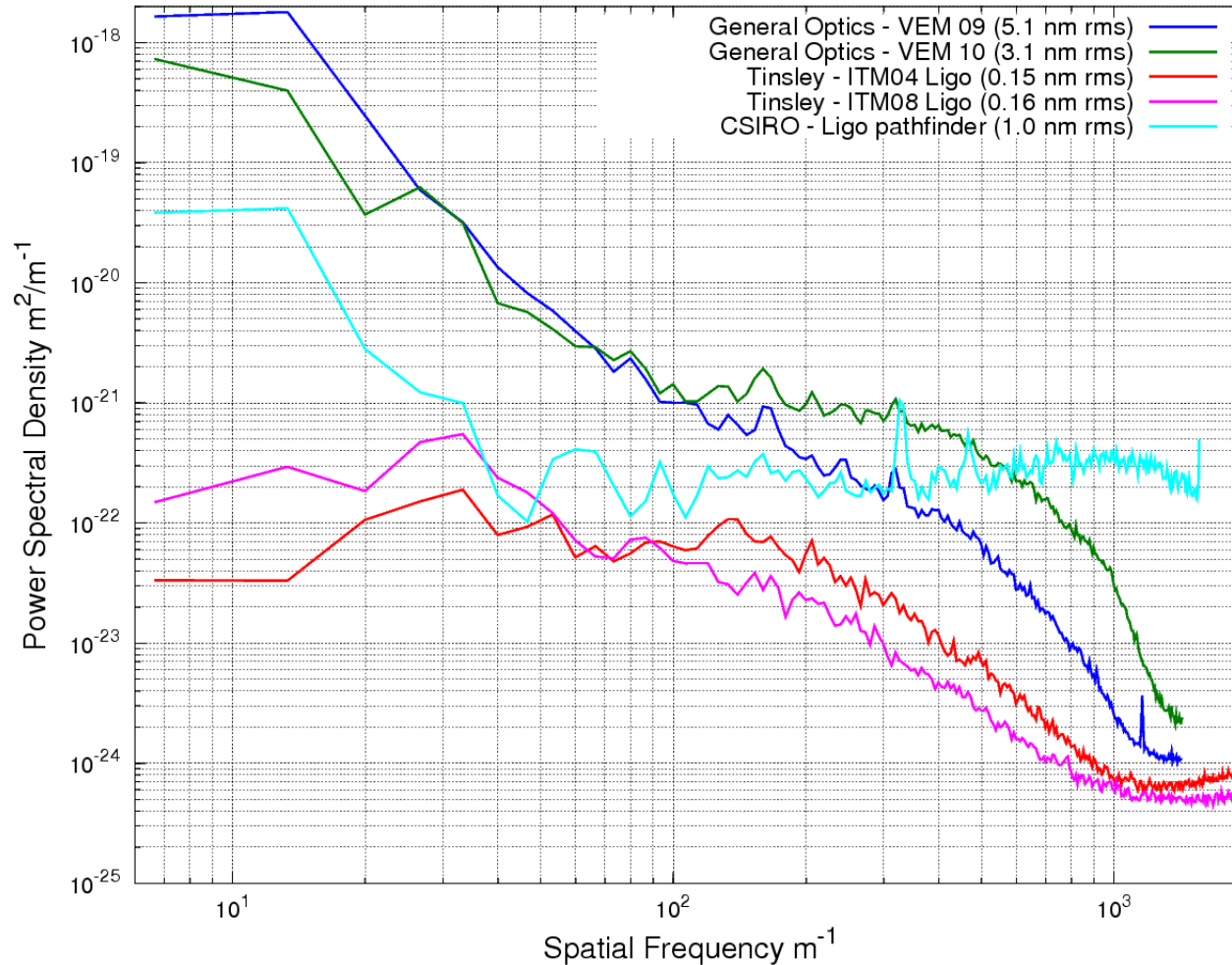
Substrat Virgo,
1ere génération

Substrat aLIGO,
2nde génération
(à droite)



- On peut calculer la planéité de la surface, caractérisé par un RMS (\sim qq nm).
- Et la PSD (densité spectrale de puissance), la répartition des défauts en fonction de leur fréquence spatiale.

PSDs of mirror maps for different polishers computed over 150 mm



- PSD caractéristique du polisseur.

- Simulations FFT (logiciel SIESTA) d'une cavité Fabry-Perot avec miroirs simulés ayant des formes de PSD équivalentes au différents polisseurs.
- La forme de la PSD est importante, la planéité RMS n'est pas suffisante.
- Pertes dans une cavité FP différentes pour un même RMS suivant le polisseur.

Polisseur	CSIRO	General Optic
RTL < 50 ppm (90 % confiance)	0.5 nm rms	1.0 nm rms

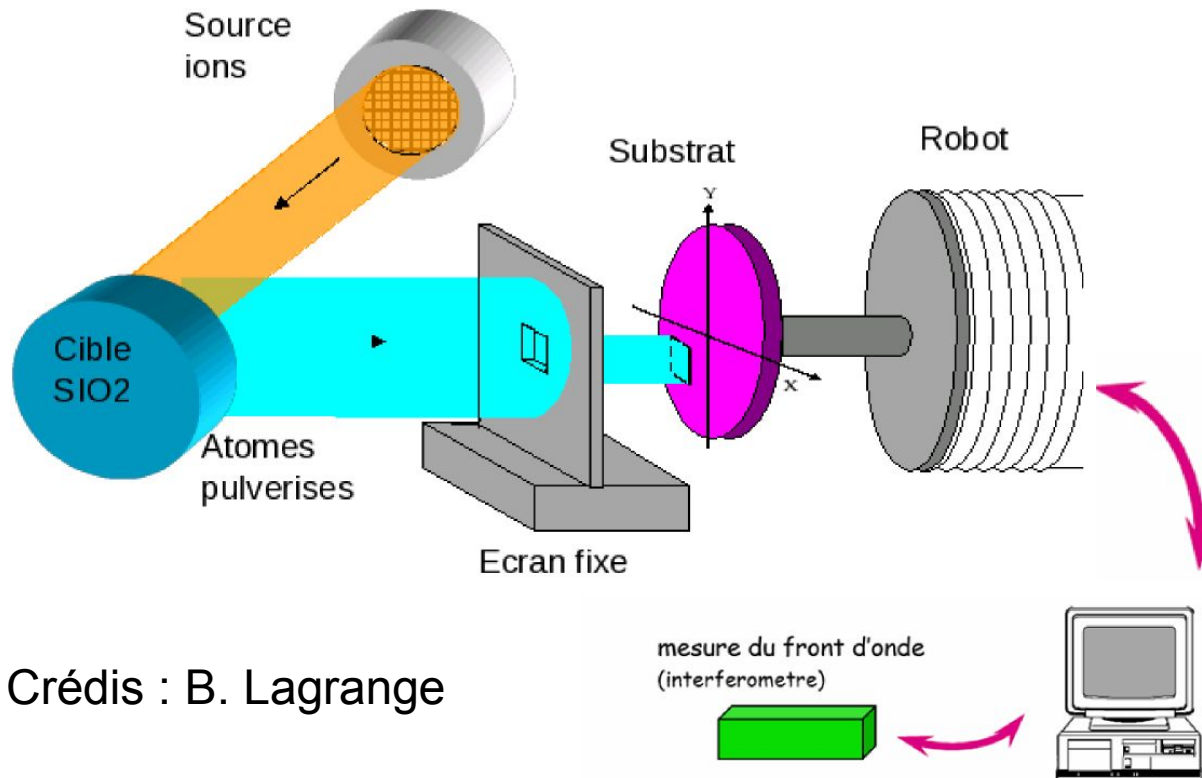
=> Spécifications sur les fréquences 50 m⁻¹ – 1000 m⁻¹ => RMS < 0.15 nm.

Lumière diffracté par défauts avec $f > 50 \text{ m}^{-1}$ sort de la cavité.

- Surface doit être mesuré avec précision.
 - Mesure par interférométrie « Phase-Shift » avec un interféromètre de Fizeau.
 - Mesure perturbé par vibrations, turbulence de l'air, etc...
- 
- Capable de mesurer au LMA des surfaces sub-nanométriques planes mais pas des surfaces courbes. Banc de mesure en cours d'amélioration.
 - **Mesure de surface sub-nanométrique est un challenge !**

Le Traitement Correctif

- Le polissage classique (par abrasion) ne permet pas d'atteindre des niveaux de planéité suffisants.
- Technique du traitement correctif:



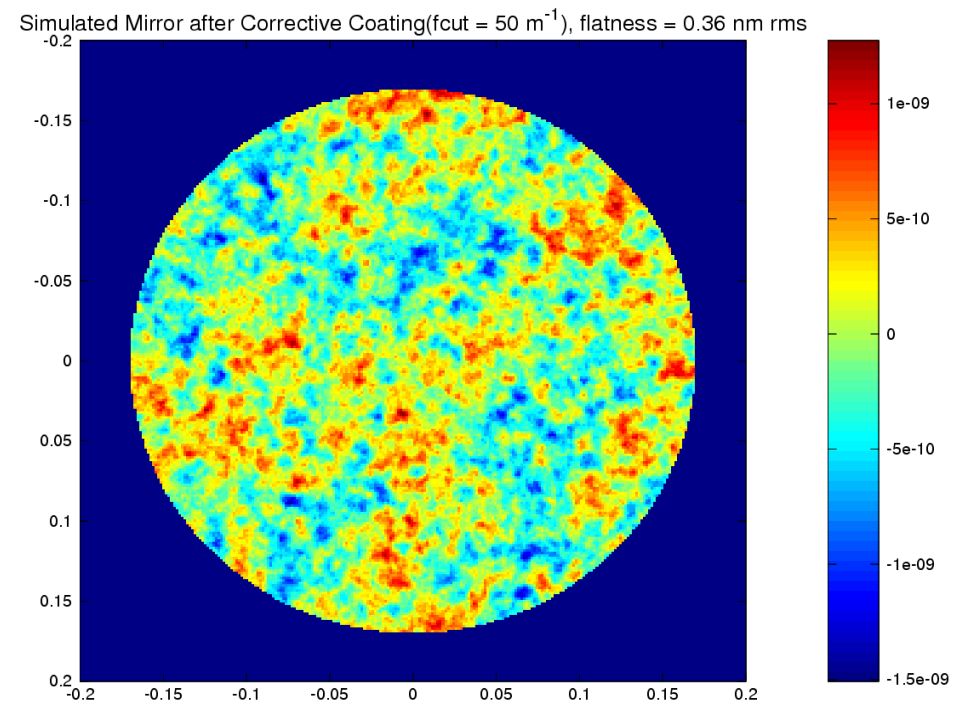
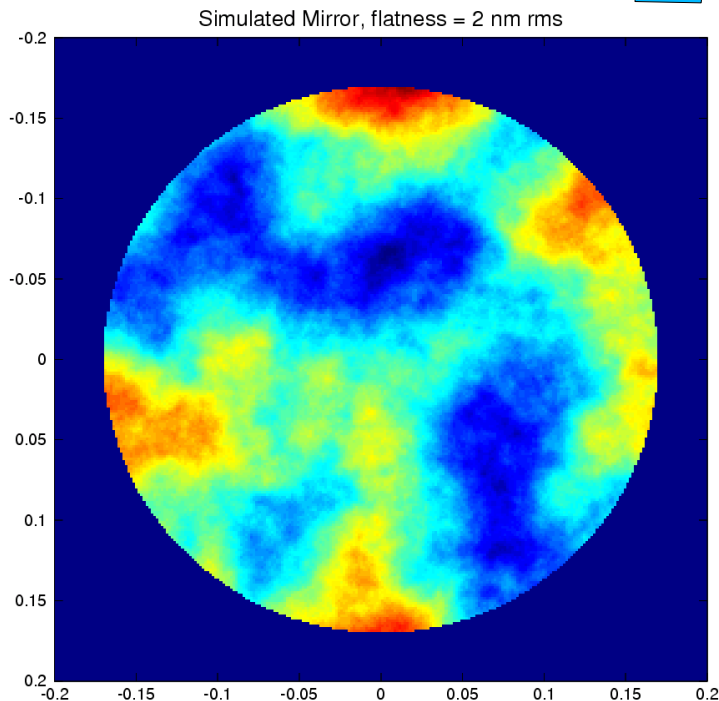
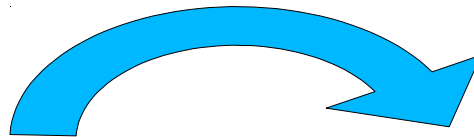
Crédits : B. Lagrange

- Précision du robot
~ qq 1/10^e de mm.
- Corrige les défauts
basse fréquence.

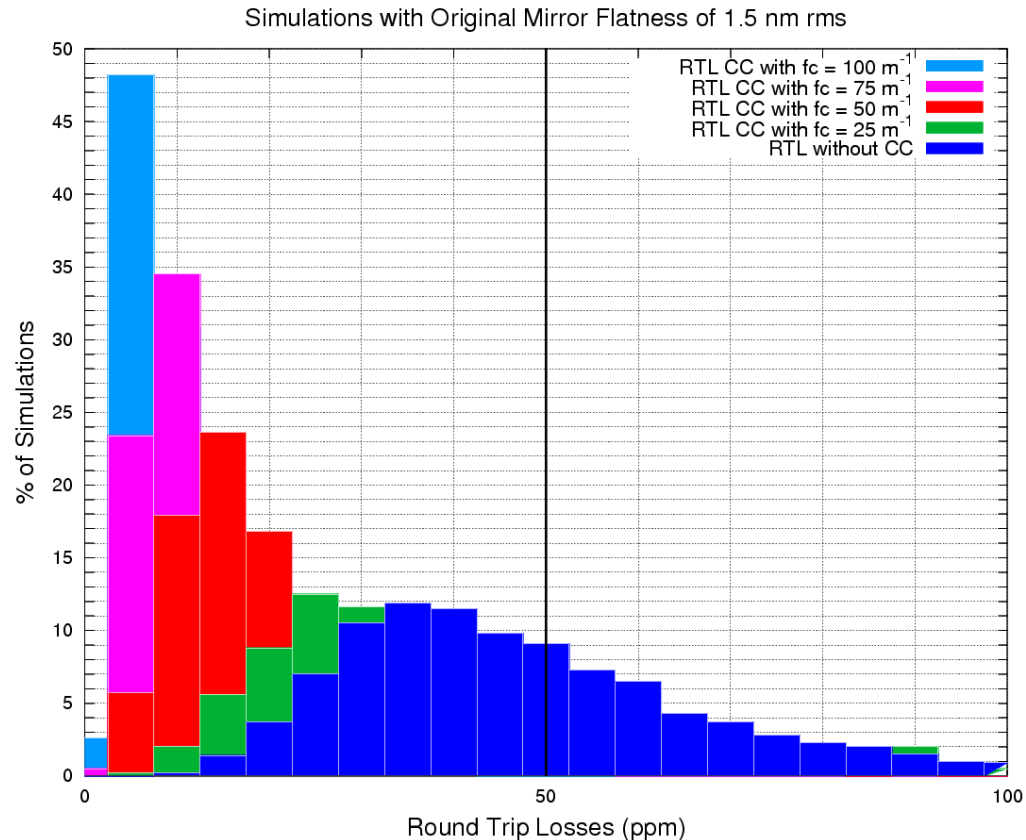
- Traitement correctif simulés dans le domaine des fréquences, on applique un filtre qui aplatit la PSD en deçà d'une certaine fréquence (ici 50 m^{-1}).

Traitement Correctif

Echelle de couleur
différente !



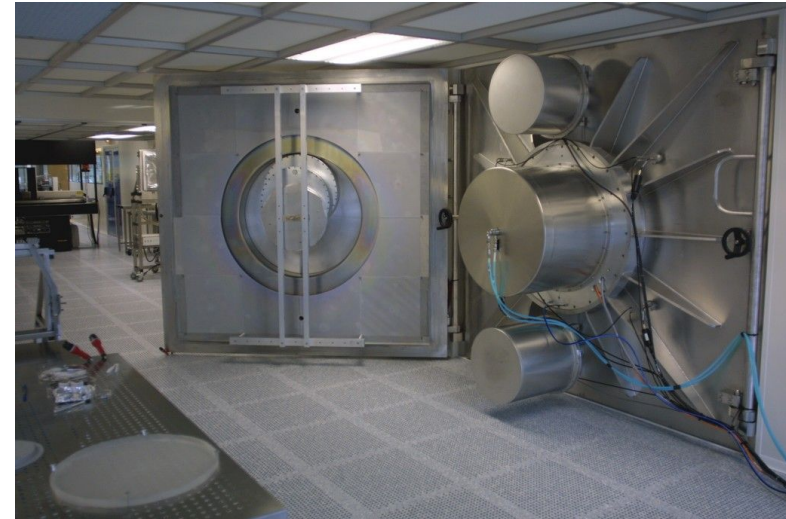
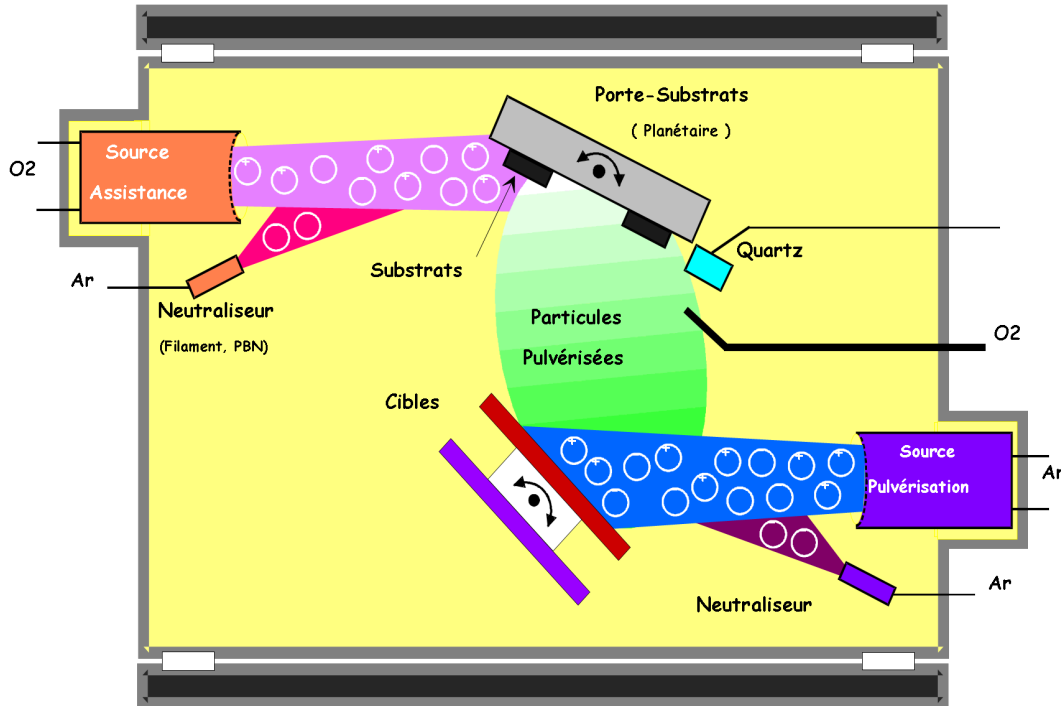
- Simulations FFT avec cartes simulés du traitement correctif.
- Il faut corrigé un miroir ayant un RMS de 1.5 nm au départ pour atteindre les spécifications (pertes par aller retour < 50 ppm)!



Rms = 1.5 nm	No CC	CC with $F_c = 25 \text{ m}^{-1}$	CC with $F_c = 50 \text{ m}^{-1}$	CC with $F_c = 75 \text{ m}^{-1}$	CC with $F_c = 100 \text{ m}^{-1}$
Simulations RTL < 50 ppm	61.3 %	71.6 %	95.9 %	99.6 %	100 %

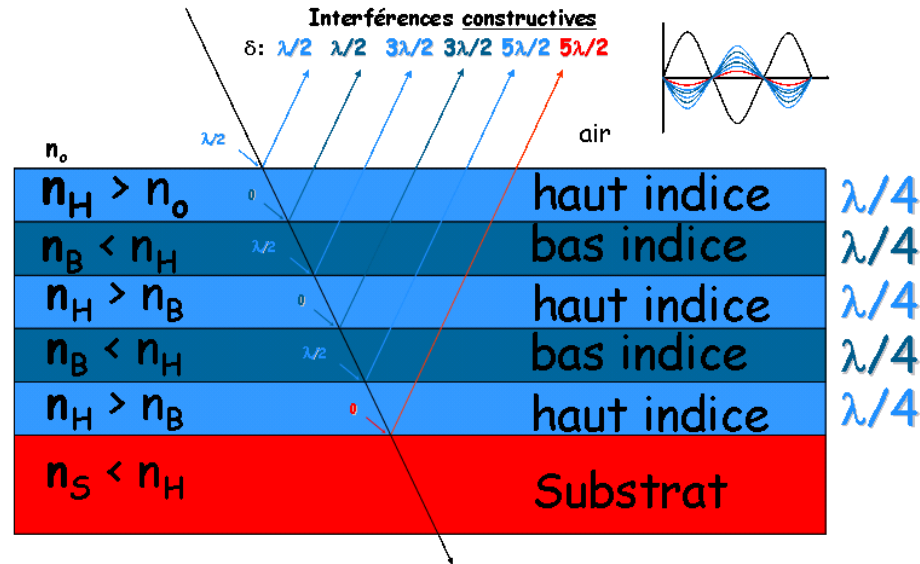
Le Dépôt de Couches Minces

- Dépôt de couche minces par pulvérisations d'ions.



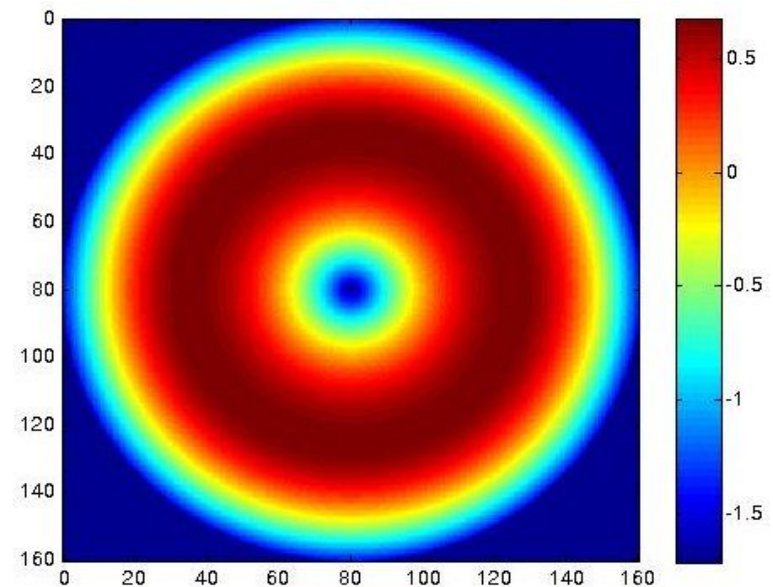
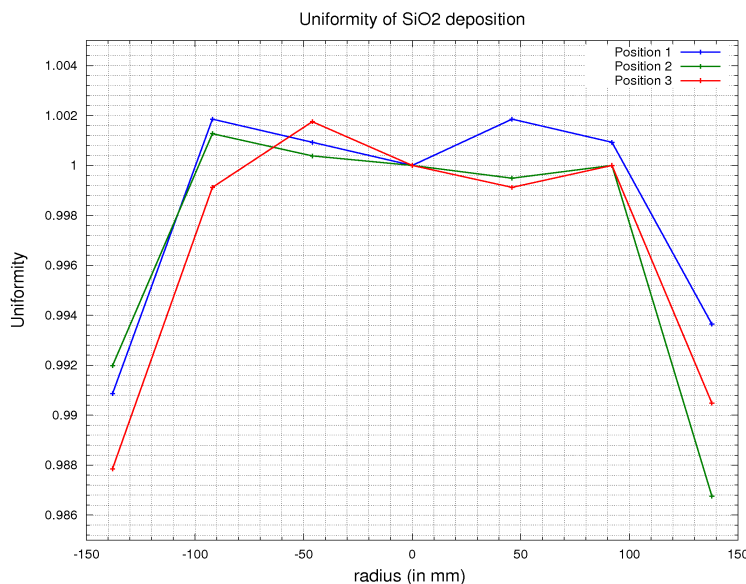
- Grand Coater permet de déposer sur $\sim 1\text{m}^2$.
- Permet de traiter 2 miroirs à la fois.

- On dépose une alternance de couche bas (SiO₂) et haut (Ti:Ta₂O₅) indice.



- Uniformité du dépôt pourrait dominer dans la planéité des miroirs!
- Planéité du miroir < 0.5 nm RMS (diamètre de 150 mm)
- Epaisseur totale de $\sim 3 \mu\text{m}$ à $6 \mu\text{m}$.
 ==> Uniformité du dépôt $\sim 0.1\%$ (Pic - Vallée)

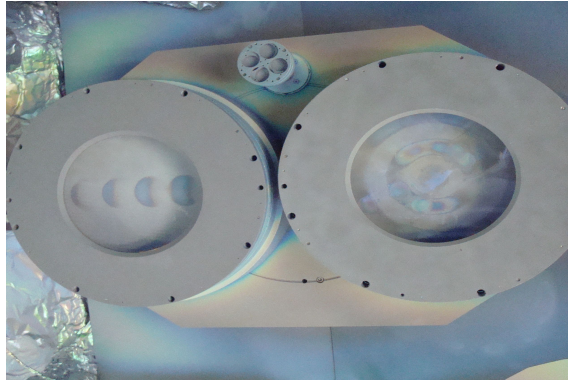
- On mesure l'uniformité du dépôt de chaque matériel par rapport à la position.
- Uniformité du dépôt multicouche est estimé en combinant les profils d'uniformité de SiO_2 et $\text{Ti:Ta}_2\text{O}_5$.
- On peut optimiser l'uniformité de chaque matériel en jouant sur l'angle des cibles.



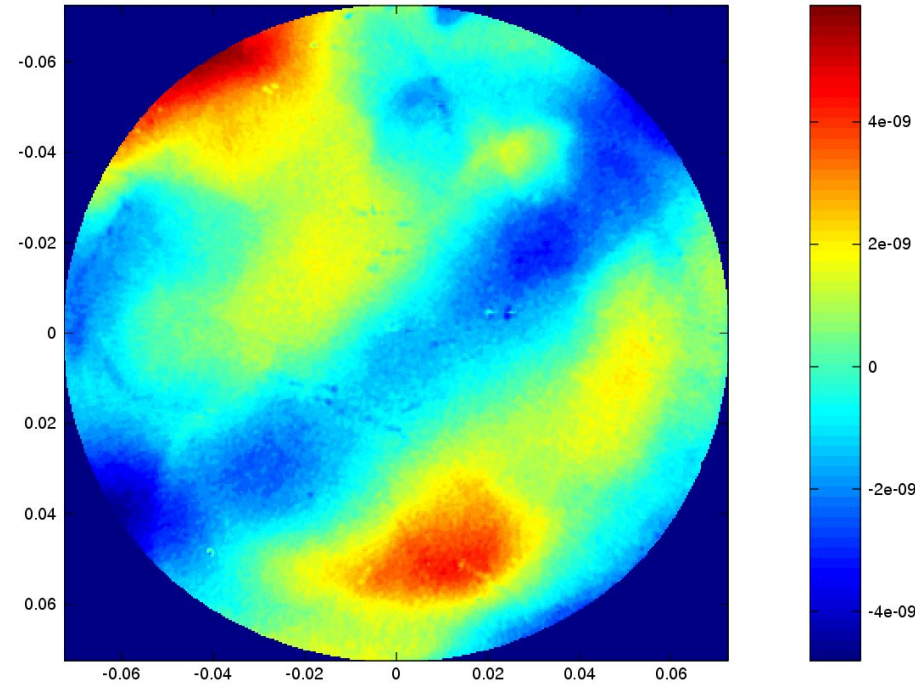
- Métrologie actuelle au LMA est à la limite pour la mesure de surface courbe.
- Un miroir a été traité pour aLIGO et mesuré à Caltech.
 - RMS = 0.56 nm
 - Pic-Vallé = 4.4 nm

Diamètre 160mm
- **On est à la limite des spécifications requises par aLIGO!**

- Traitement de 2 miroirs test à la fois avec rotation simple et masque pour aLIGO:

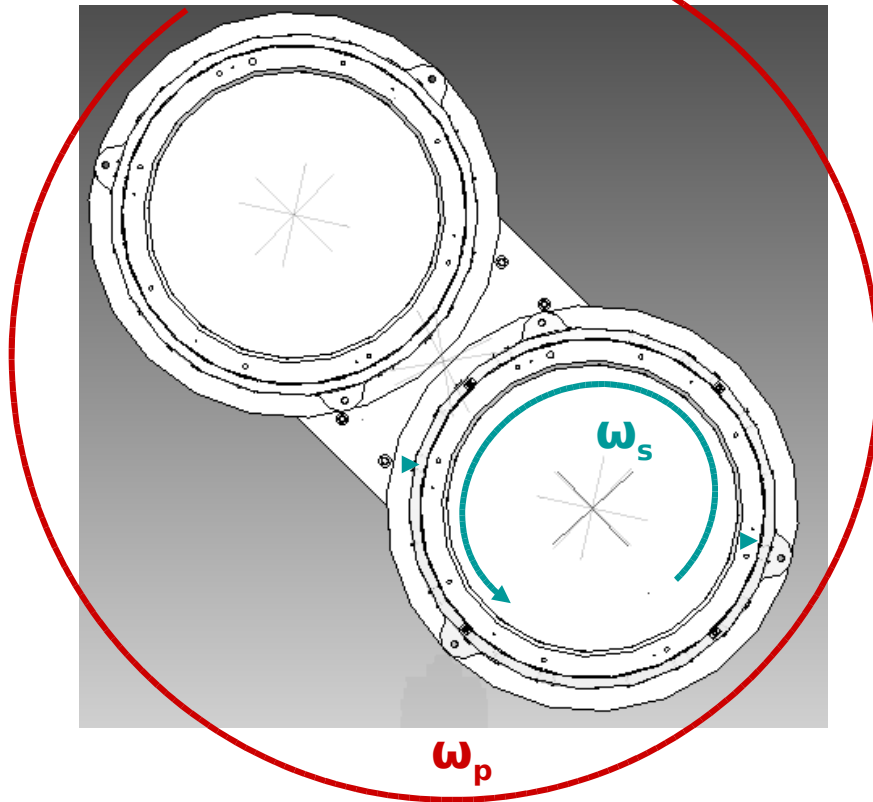


Coating Uniformity - 2 mirrors at once, simple rotation and mask



- Planéité du dépôt: 1.6 nm rms.
- Carte du dépôt dans simulation d'une cavité AdV. Virgo.
 - Carte sur ITM → Round Trip Losses = 84 ppm.
 - Carte sur ETM → Round Trip Losses = 163 ppm.
- Pas suffisant!**

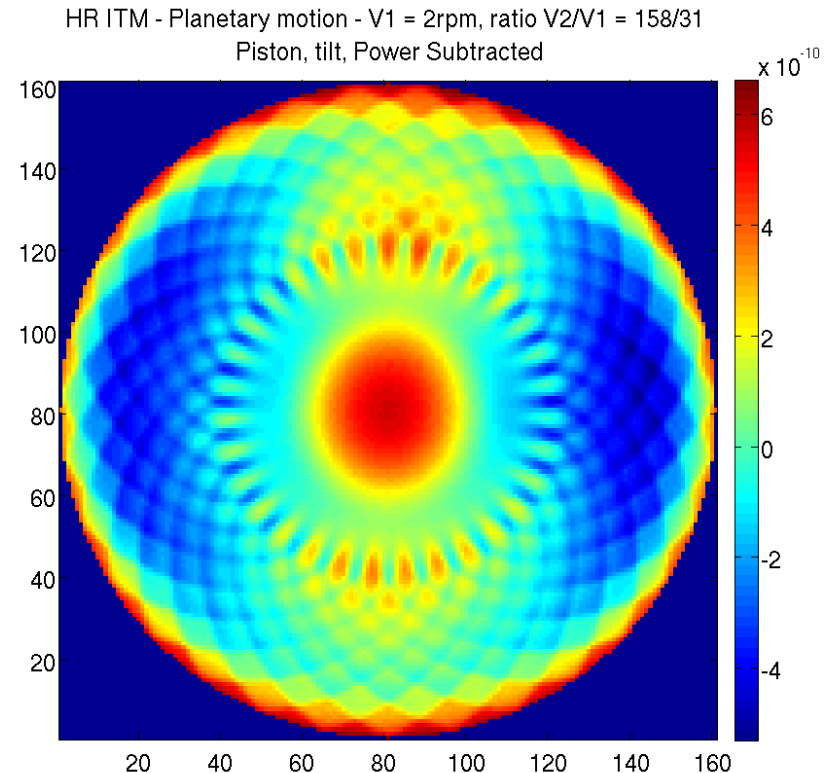
- Système planétaire à l'étude.



- Permet de traiter 2 miroirs à la fois.
- Mouvement planétaire ω_s et ω_p .
- Masquage.

Crédits : C. Michel

- Simulation du système planétaire dans Grand Coater.
- Plume du dépôt de chaque matériel est modélisée
- HR ITM (R = 98.6%, épaisseur $\sim 3 \mu\text{m}$).
 - RMS = 0.23 nm (diamètre 160 mm)
- HR ETM (T = 5 ppm, épaisseur $\sim 6 \mu\text{m}$).
 - RMS = 0.46 nm (diamètre 160 mm)
- Simulation Cavité Adv. Virgo:
 - RTL ~ 20 ppm.



- La détection des ondes gravitationnelles est un challenge scientifique et technologique!
- Les détecteurs d'ondes gravitationnelles 2nde génération comme Advanced Virgo requiert des miroirs ayant une surface la plus plane possible (au mieux de l'état de l'art voir au delà).
- Il faut un polissage extrêmement précis (\sim qq nm pic-vallée).
=> Technique de traitement correctif devrait permettre de corriger l'état de surface d'un substrat et d'atteindre la précision requise.
- Uniformité du dépôt doit être contrôlé à \sim 0.1% (PV).
=> Mouvement planétaire semble être une solution viable.