

REOSC

BANC INTERFÉROMÉTRIQUE POUR LA MÉTROLOGIE D'OPTIQUES HAUTES PERFORMANCES

—
Renaud Mercier Ythier
renaud.mercier-ythier@safrangroup.com

Octobre 2023



Sommaire

- **Design d'un banc interférométrique : cas pratique le banc ELT M1**
 - Problématiques/spécification du banc WFE
 - Principe de l'interférométrie
 - Architecture du banc
 - Techniques d'acquisition de la phase
 - Longueur d'onde et cohérence

-1

Design d'un banc interférométrique : cas pratique le banc ELT M1





-1.1

PRINCIPE DE L'INTERFÉROMÉTRIE

Interférométrie homodyne

On considère 2 ondes monochromatiques, la seconde ayant un retard δ par rapport à la première. On considère que les deux champs sont colinéaires (cas scalaire) et qu'ils se superposent dans le plan du capteur :

$$\mathbf{E}_{total} = \mathbf{E}_1 e^{i(2\pi \frac{L+\delta}{\lambda} - \omega t)} + \mathbf{E}_2 e^{i(2\pi \frac{L}{\lambda} - \omega t)}$$

$$\mathbf{E}_{total} = \mathbf{E}_2 e^{i(2\pi \frac{L}{\lambda} - \omega t)} \left(1 + \frac{\mathbf{E}_1}{\mathbf{E}_2} e^{i(2\pi \frac{\delta}{\lambda})} \right)$$

$$I = |\mathbf{E}_{total}|^2 = E_2^2 \left(1 + \frac{E_1}{E_2} e^{i(2\pi \frac{\delta}{\lambda})} \right) \cdot \left(1 + \frac{E_1}{E_2} e^{-i(2\pi \frac{\delta}{\lambda})} \right)$$

$$I = E_2^2 \left(1 + \left(\frac{E_1}{E_2} \right)^2 + 2 \cdot \frac{E_1}{E_2} \cos 2\pi \frac{\delta}{\lambda} \right)$$

$$I = I_0 \left(1 + m \cdot \cos 2\pi \frac{\delta}{\lambda} \right)$$

Interférométrie hétérodyne

Les 2 ondes qui interfèrent ne sont pas à la même fréquence. On mesure un battement entre ces deux mesures :

$$I = I_0(1 + m \cdot \cos \Phi(t))$$

Exemple : LISA : mesure d'une cible se déplaçant à la vitesse v .

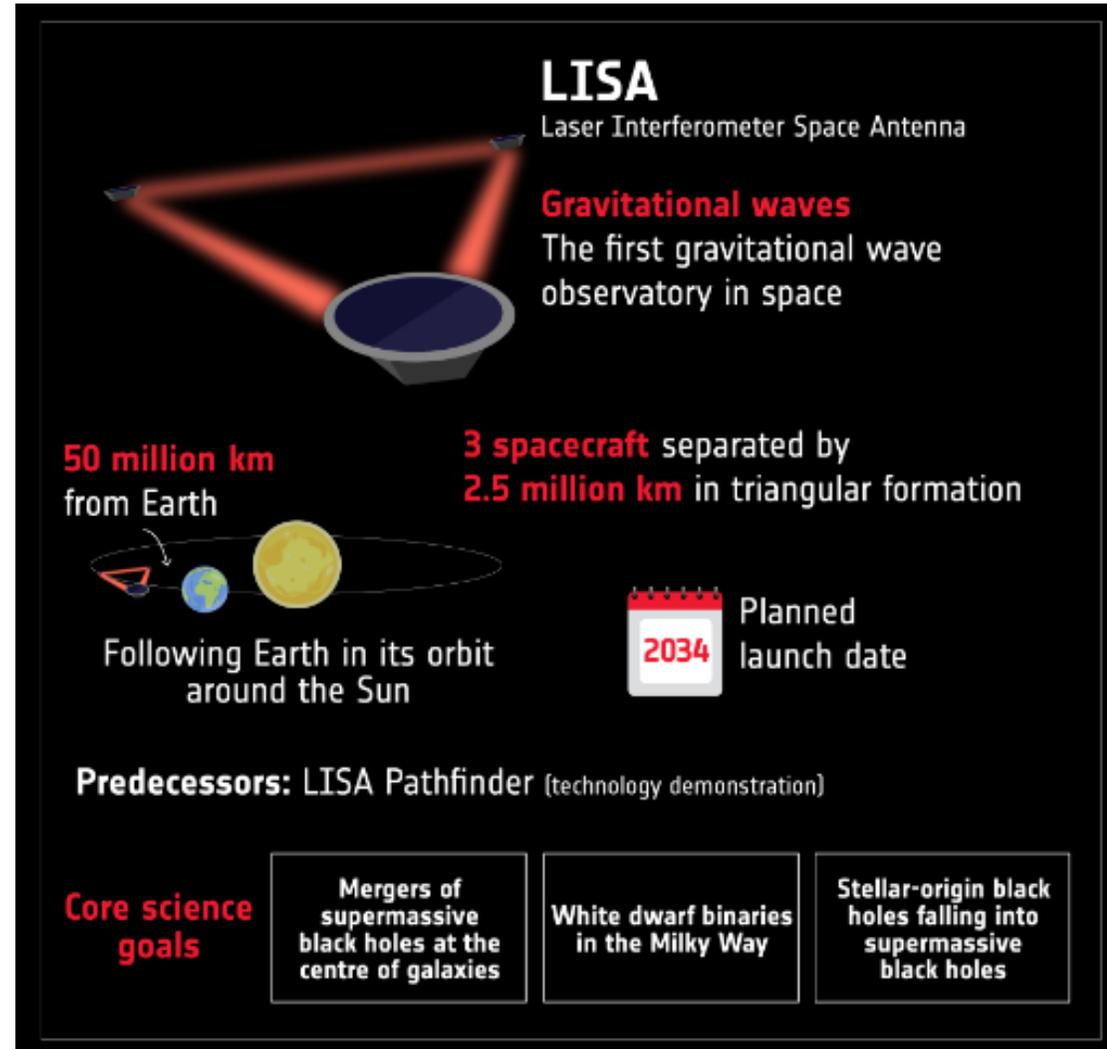
$$\Phi(t) = 2\pi\nu_0(d_0(t) - c \cdot t) - 2\pi\nu_r(d_r - c \cdot t)$$

$$\Phi(t) = 2\pi\nu_0(d_0 - (c - 2v) \cdot t) - 2\pi\nu_r(d_r - c \cdot t)$$

$$\Phi(t) = \left(\omega_r - \omega_0 \left(1 - \frac{2v}{c} \right) \right) \cdot t + K$$

On détecte ici la variation de fréquence par effet Doppler $\frac{2v}{c} \cdot \omega_0$

Sensibilité recherchée :
10 pm sur une distance
de 1 million de
kilomètres, soit une
variation relative de
distance $\delta L/L < 10^{-21}$



LISA
 Laser Interferometer Space Antenna

Gravitational waves
 The first gravitational wave observatory in space

50 million km from Earth

3 spacecraft separated by **2.5 million km** in triangular formation

Following Earth in its orbit around the Sun

2034 Planned launch date

Predecessors: LISA Pathfinder (technology demonstration)

Core science goals

- Mergers of supermassive black holes at the centre of galaxies
- White dwarf binaries in the Milky Way
- Stellar-origin black holes falling into supermassive black holes

Ondes gravitationnelles

5 détecteurs interférométriques terrestres :

- Virgo (Pise): bras $L=3$ km
- LIGO (US): 3 interféros $L=4$ km et 2 km
- GEO (Hannovre): $L=0.6$ km
- TAMA (Japon) : $L=0.3$ km

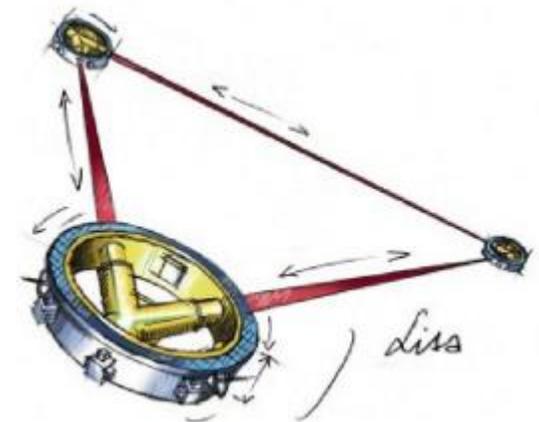
Interféromètres de Michelson, limités par les bruits sismiques => bande de fréquence mesurable > 1 Hz

Lisa : projet spatial

Bras $L=2.5$ millions de km

Pas de limitation par les bruits sismiques

Bande de fréquence mesurable $f < c/L$: 10^{-5} Hz à 10^{-1} Hz => mesure des étoiles binaires et de leur coalescence



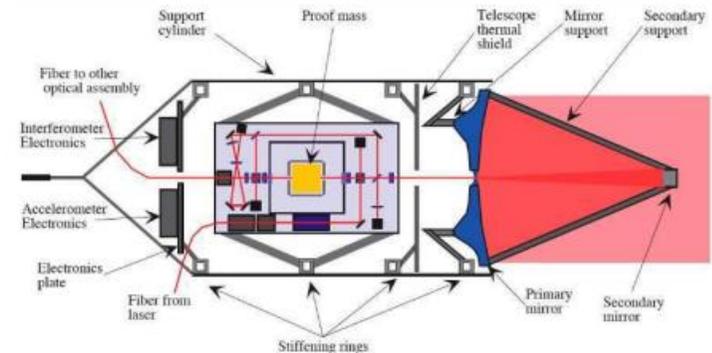
Principe de Mesure

Mesure d'une masse en chute libre

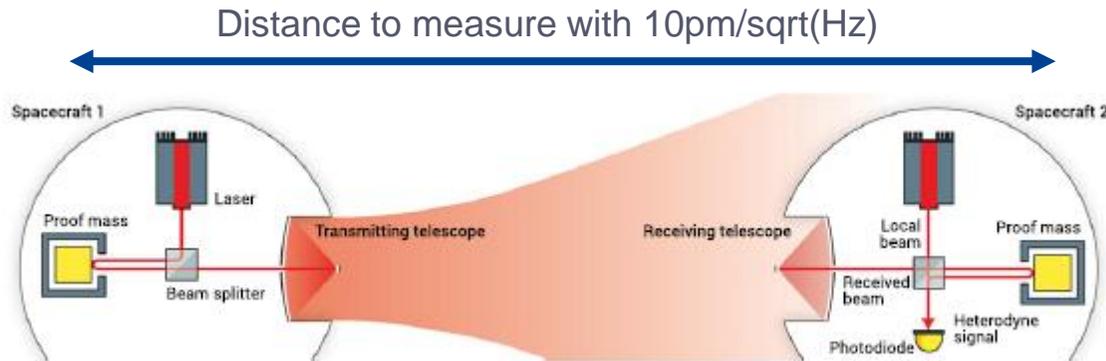
une masse de référence au centre de chaque banc optique isolée des perturbations des micro-fusées réparties sur la circonférence du satellite => corrige les forces qui peuvent agir sur le satellite : pression de radiation des photons solaires / vent solaire...

Principe validé par LISA pathfinder en 2017 :

accélération relative $< 10^{-16}$
100 x mieux qu'attendu !



LISA : architecture optique



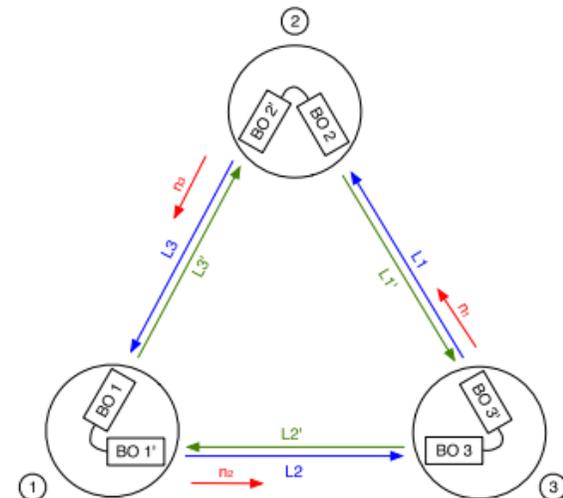
Heterodyne interferometer => mesure de la variation de fréquence du faisceau par effet Doppler

1 W émis => 100 pW reçus
après 5 10^9 m !

=> Pas d'aller retour du faisceau

=> interférence faite entre deux faisceaux issus de deux lasers différents.

3S/C with 4 to 6 links
2 measurement per spacecrafts



Interférométrie homodyne

$$I = a(x, y) + b(x, y) \cdot \cos 2\pi \frac{\delta(x, y)}{\lambda}$$

Différence de marche par rapport à un front d'onde de référence ?
Longueur d'onde connue et constante => cohérence et stabilité de la source ?
Contraste et intensité moyenne pouvant varier spatialement => définition et comment remonter à la phase ?



-1.2

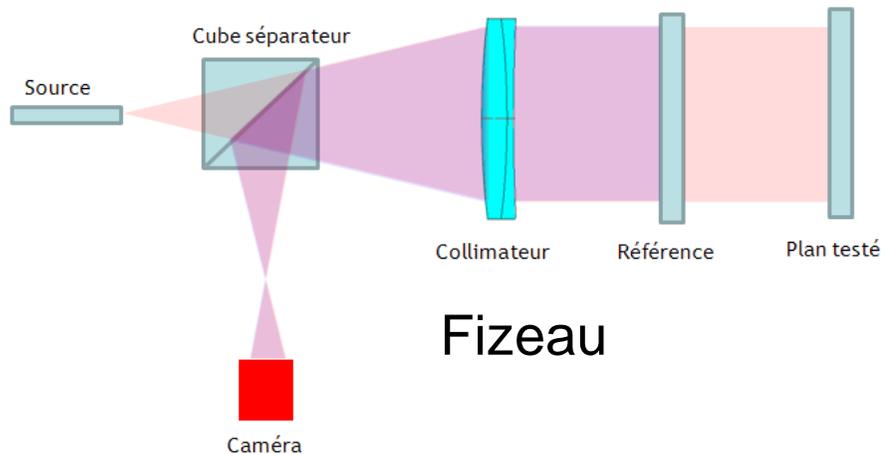
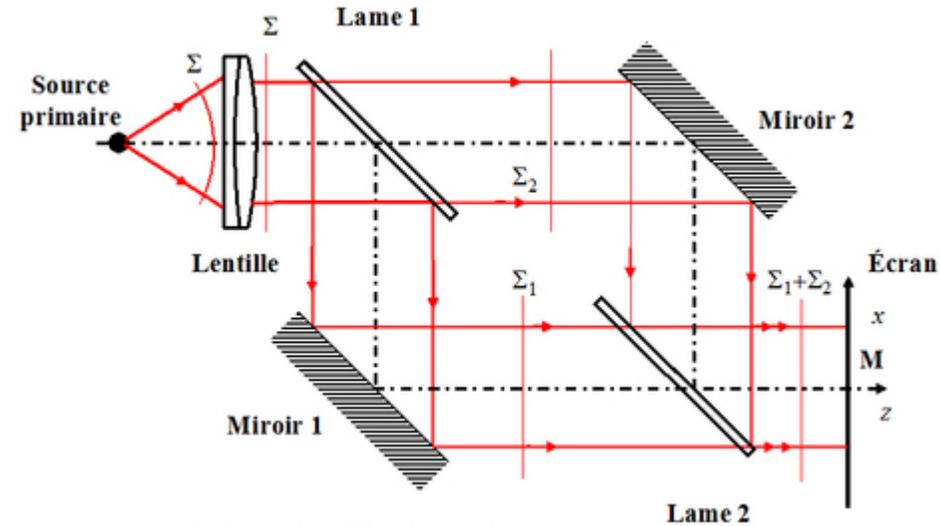
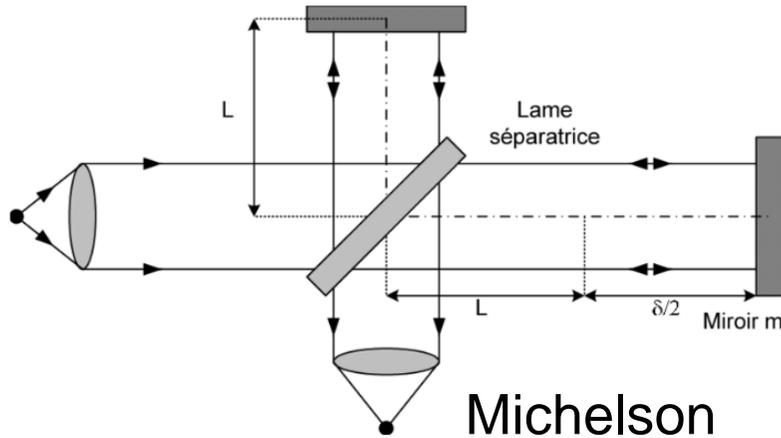
ARCHITECTURE DU BANC : DÉFINITION DE LA CAVITÉ INTERFÉROMÉTRIQUE

┌ Définition de la cavité interférométrique

$$I = a(x, y) + b(x, y) \cdot \cos 2\pi \frac{\delta(x, y)}{\lambda}$$

Différence de marche par rapport à un front d'onde de référence => définition et qualité de cette référence ?

Interféromètres avec référence absolue



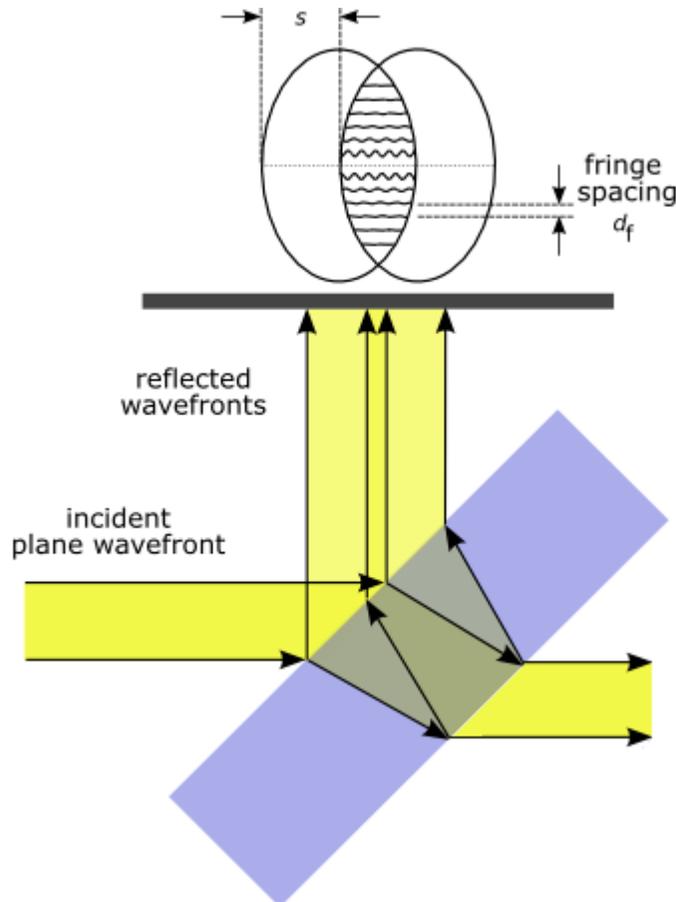
Avantages Fizeau :

- Chemin commun jusqu'à la surface de référence
- Pas de lame semi

Avantage Michelson :

- Possibilité d'ajouter des composants différents entre les deux voies (cf polarshift)

Interféromètres auto-référencés : shearing



Interféromètre différentiel
(shearing)

On mesure le déphasage

$$\varphi(x + d, y) - \varphi(x, y) \approx d \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial x}$$

On peut ainsi remonter au gradient de la phase recherchée, puis après intégration à la phase

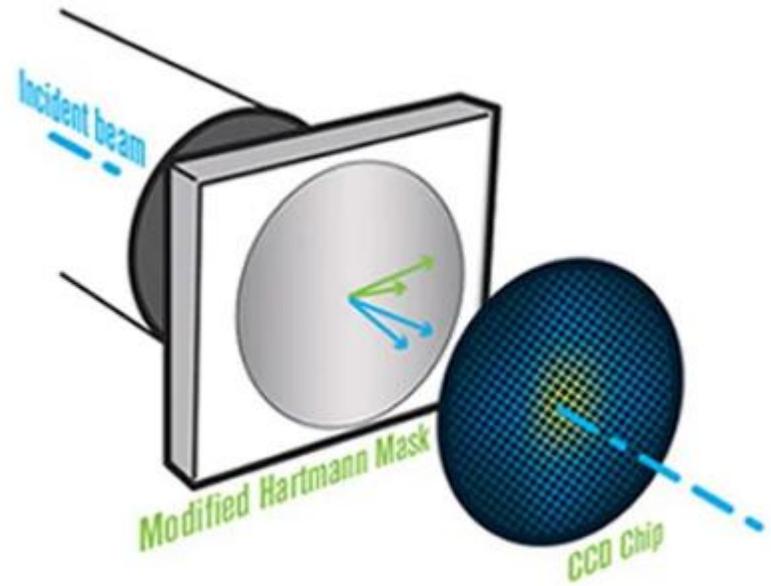
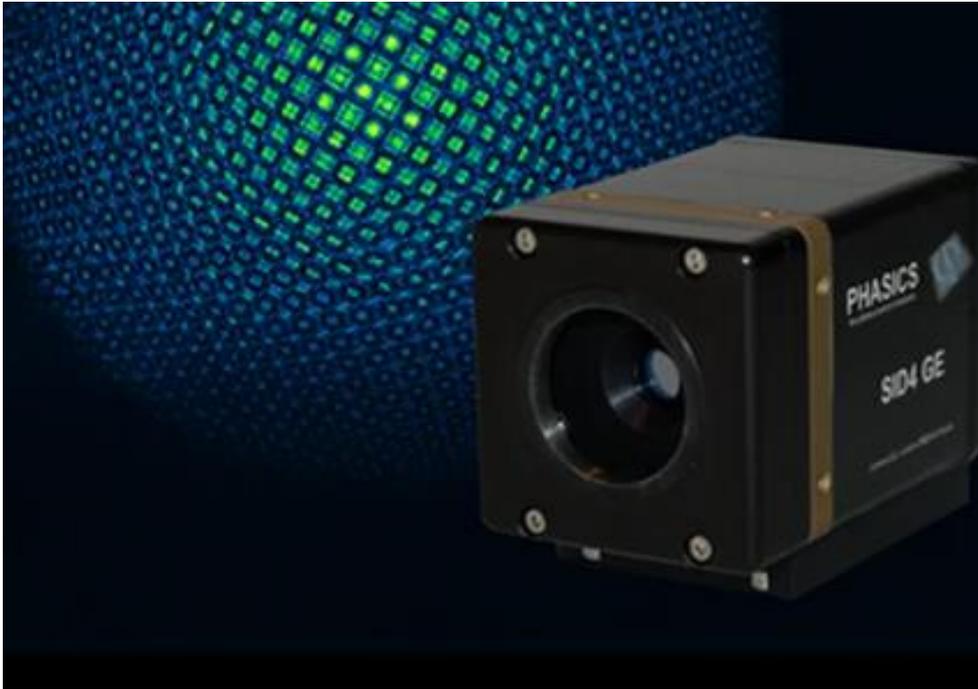
Avantages :

- Chemin commun entre les deux ondes => insensible aux vibrations, indice de l'air, cohérence de la source...
- Mesure de pente => précis dans les HF

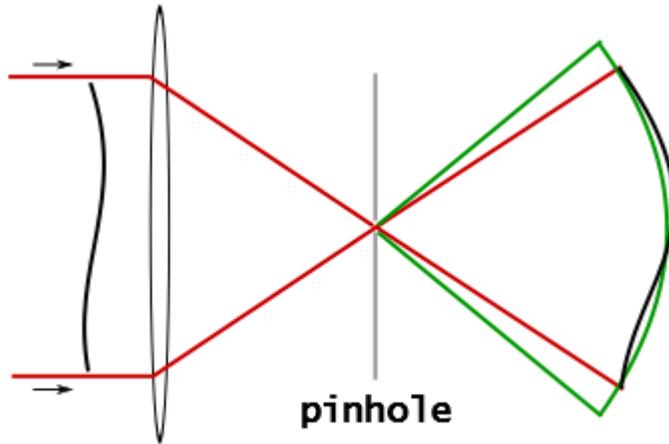
Inconvénients :

- Difficulté pour agir sur un front d'onde indépendamment de l'autre => pas de technique de phase-shift
- Erreurs lors de l'intégration des pentes (notamment dans les BFs)

Shearing : exemple capteur de front d'onde Phasics



Interféromètres auto-référencés : PDI



Point Diffraction
Interferometer

Un petit trou diffractant est placé dans le plan focal et génère une onde parfaitement sphérique de référence.

Avantages :

- Chemin commun entre les deux ondes => insensible aux vibrations, indice de l'air, cohérence de la source...
- Mesure de pente => précis dans les HF

Inconvénients :

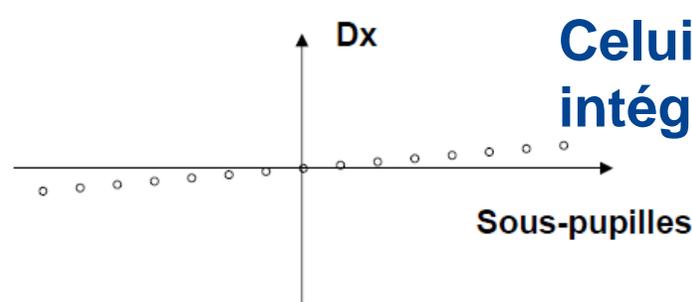
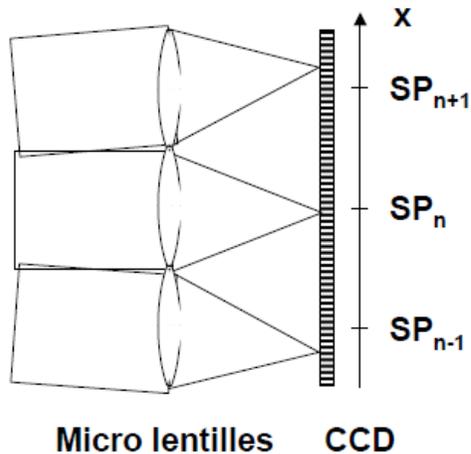
- Difficulté pour agir sur un front d'onde indépendamment de l'autre => pas de technique de phase-shift
- Erreurs lors de l'intégration des pentes (notamment dans les BFs)

Shack-Hartman

Capteur de Shack-Hartmann

HASO – Principe :

Faisceau avec focus



Une matrice de microlentilles vient mesurer les tilts locaux du front d'onde (mesure de pentes). Celui-ci est ensuite reconstruit par intégration modale.

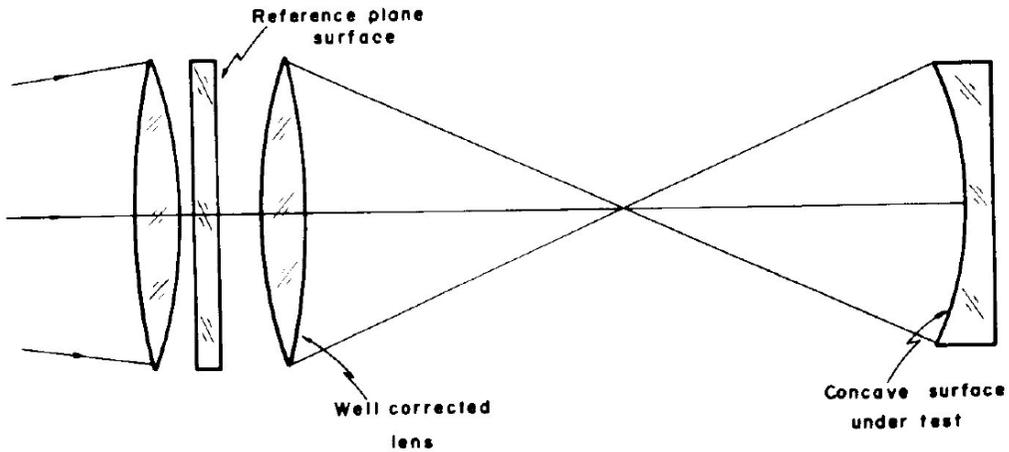
Avantages :

- Mesure géométrique rapide / pas de reconstruction de phase à partir d'un interférogramme
- Forte dynamique

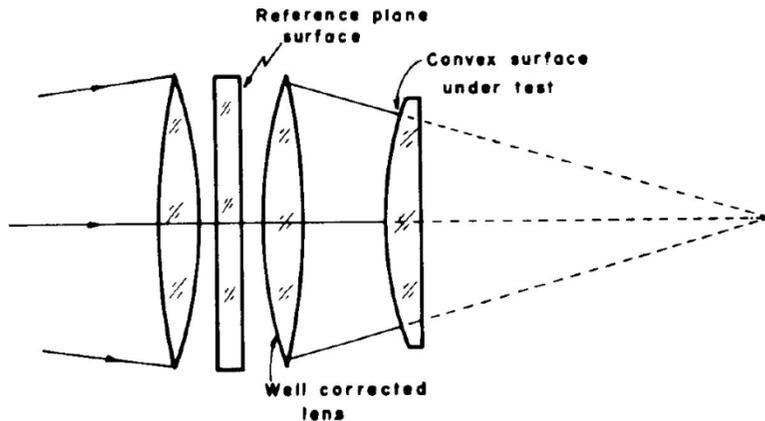
Inconvénients :

- Résolution spatiale faible
- Nécessite un faisceau collimaté sur les microlentilles
- Erreurs lors de l'intégration des pentes (notamment dans les BFs)

Fizeau : architecture pour contrôler des surfaces courbes



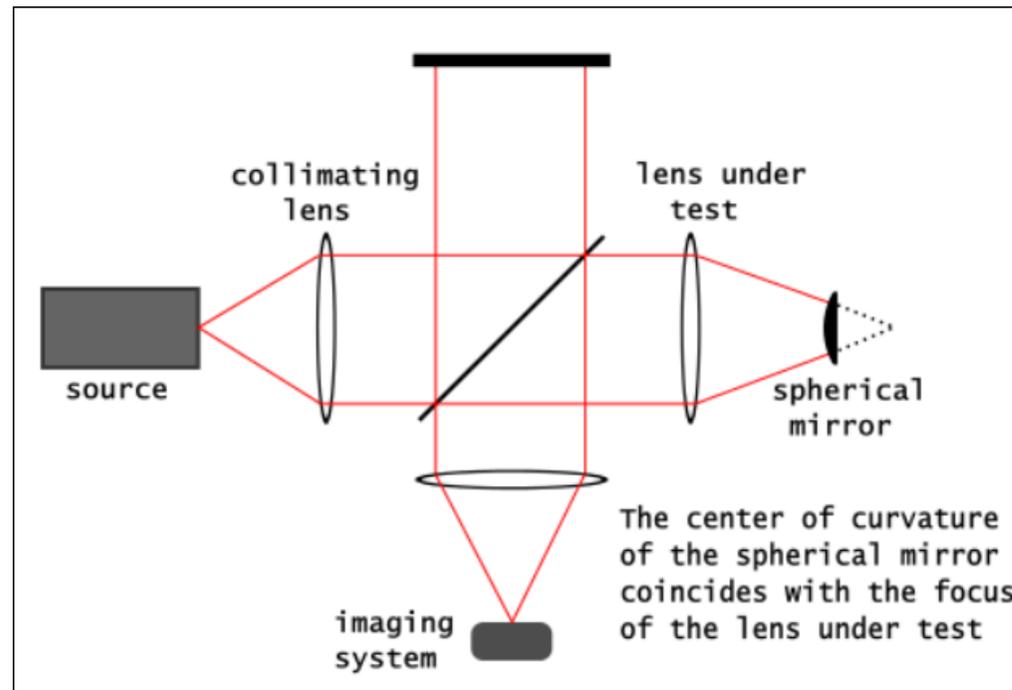
Contrôle d'une face concave



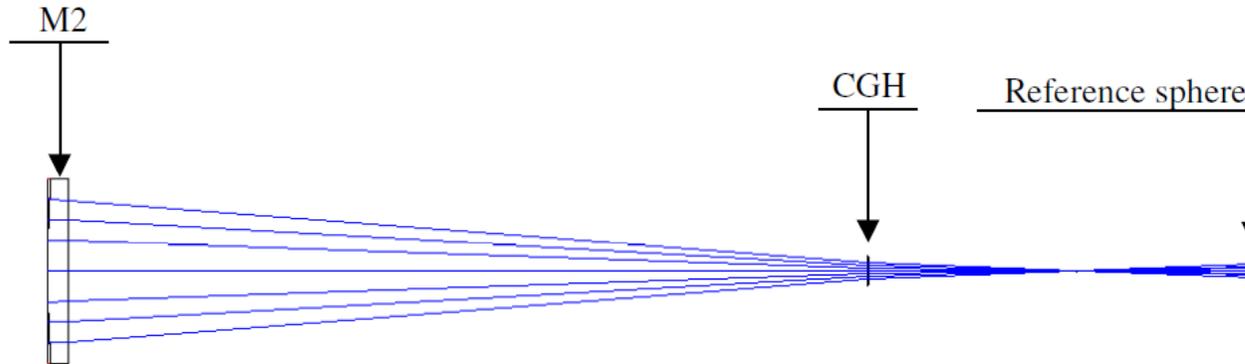
Contrôle d'une face convexe

Twyman-Green : principe général

- Equivalent à Michelson pour optiques non planes



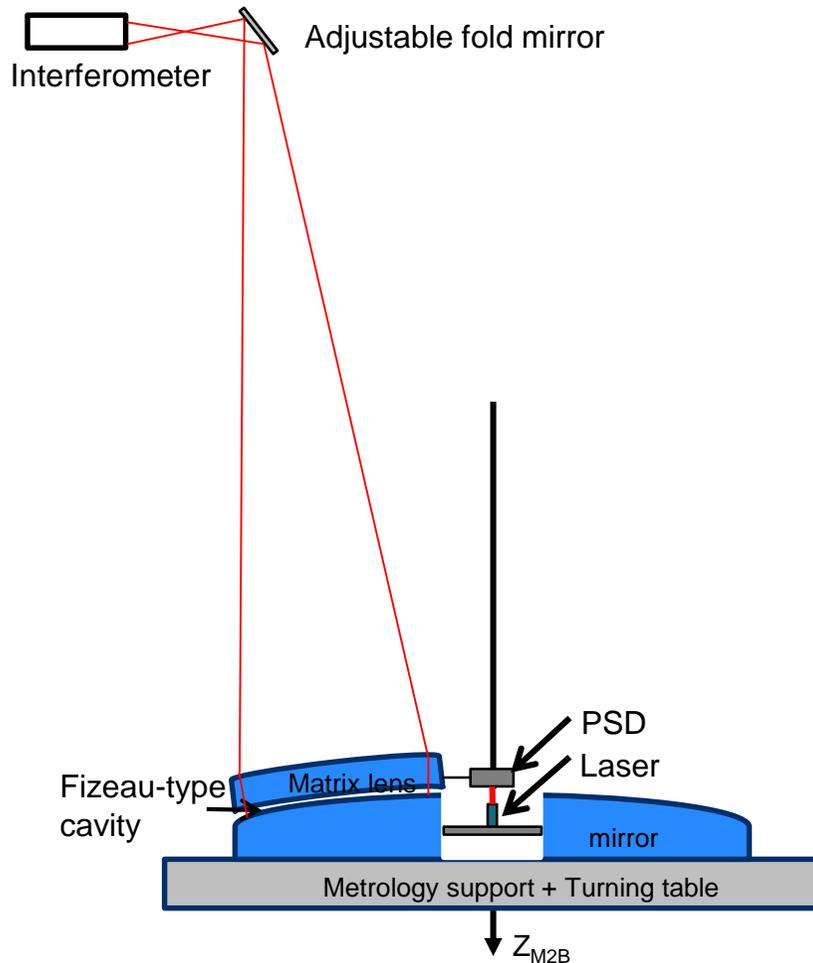
Contrôle de surfaces asphériques avec un correcteur



Utilisation d'un correcteur pour rendre la combinaison stigmatique pour les surfaces asphériques

Le correcteur peut-être dioptrique ou fabriqué holographiquement (CGH : Computer Generated Hologram)

Architecture de bancs WFE



Banc Matrice

- Contrôle de miroirs asphériques convexes
- Mise en forme du faisceau par la matrice
- Stitching pour les très grands miroirs

Différence de marche : source d'erreurs

Différence de marche :

$$\delta = n \cdot L$$

Erreurs sur δ :

$$d\delta = dn \cdot L + n \cdot dL$$

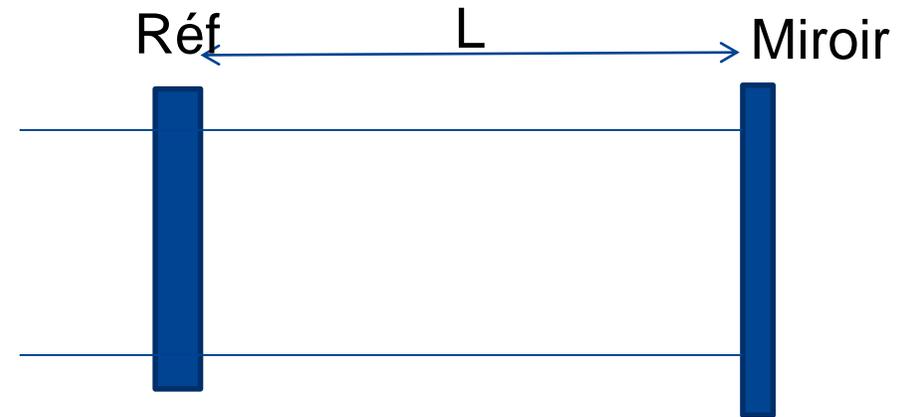
Sources d'erreur :

dn :

Variation de l'indice de l'air en fonction de T, P

dL :

- vibrations
- variations de forme en fonction de T => choix de matériaux à faible coef d'expansion thermique (CTE Zerodur : 10^{-8} /K)



Variations de l'air

Variation de l'air avec T et P : $\frac{dn}{dT} \approx 10^{-6} K^{-1}$, $\frac{dn}{dP} \approx 3 \cdot 10^{-9} Pa^{-1}$

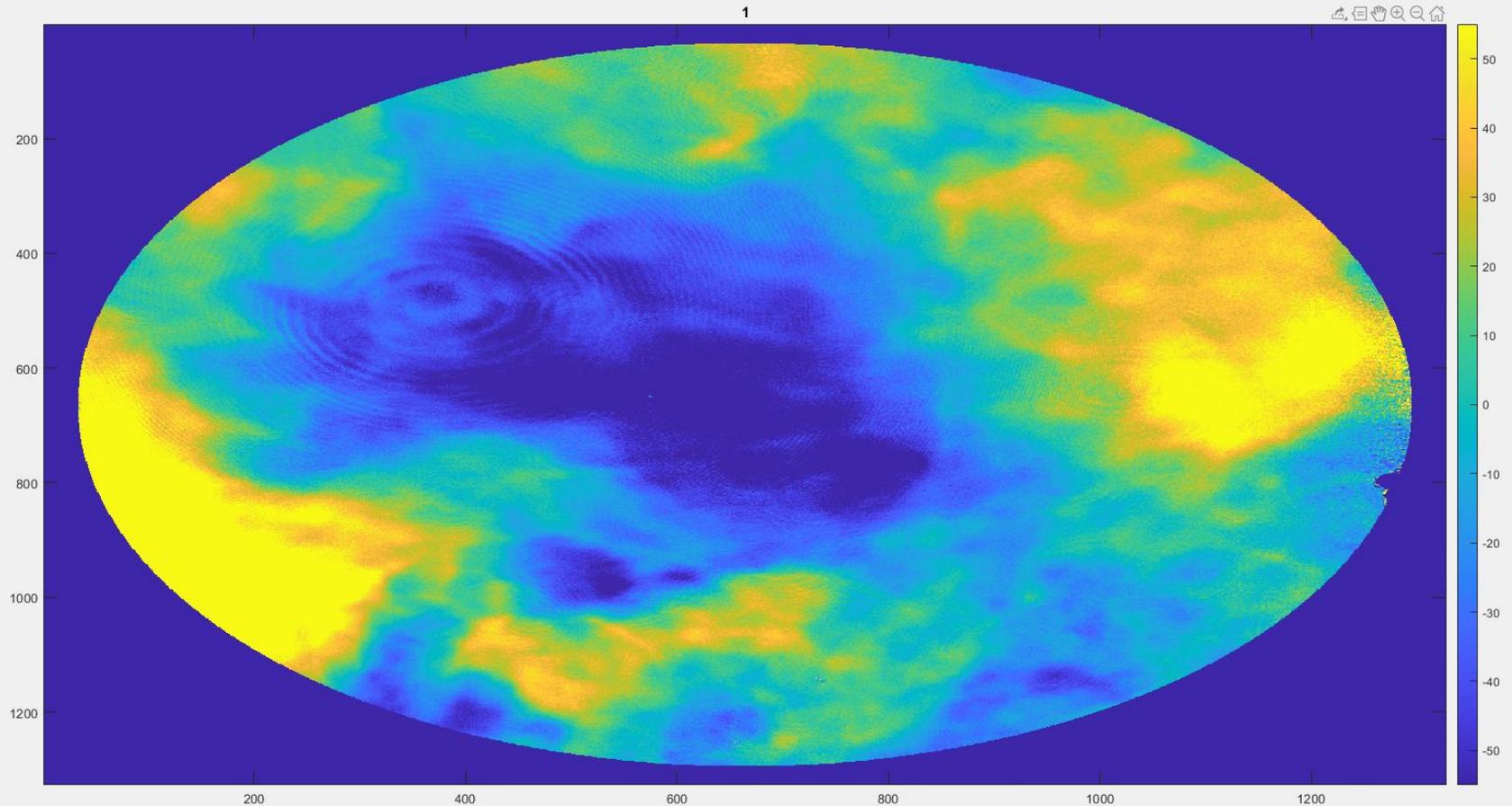
Il faut maîtriser les gradients températures et de pression :

- **Gradients longitudinaux : génèrent principalement focus et piston, mais attention au phase-shift et à la longueur de la cavité**
- **Gradients latéraux : génèrent tilt et aberrations => critiques pour miroir de taille > 1 m**

Solutions :

- **Banc sous vide : très efficace mais cher**
- **Contrôle thermique + moyennage => on peut atteindre $dT=0.01^\circ$**
- **Cavité courte et banc vertical**

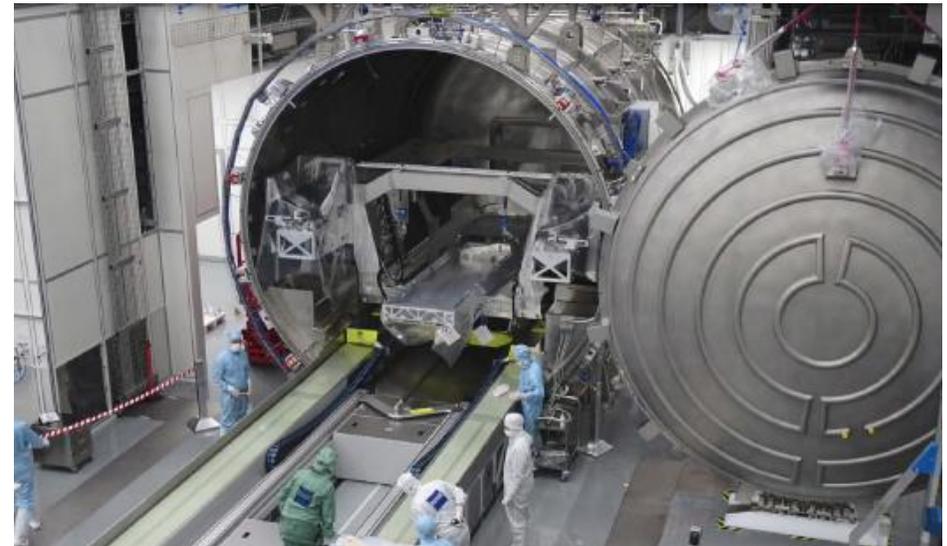
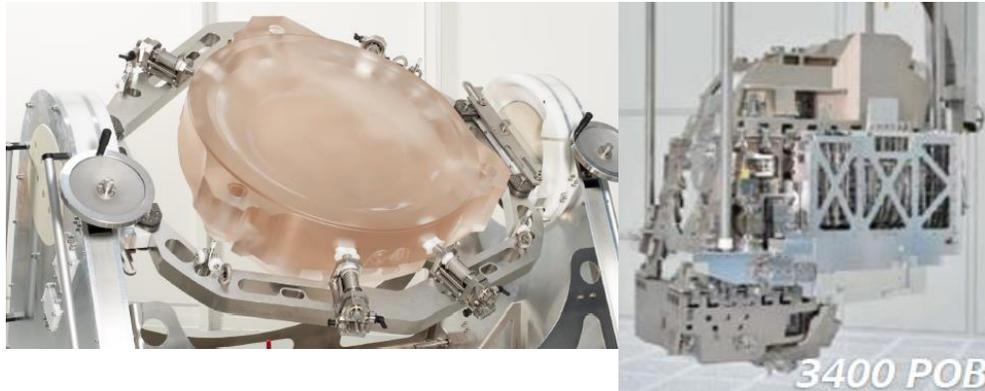
Variation de l'air sur une pupille de 1 m et cavité de 2m



Exemple de banc sous vide : Zeiss SMT

Mesure des optiques
EUV pour l'industrie du
semi-conducteur

Précision recherchée :
20 pm !!!



Cas pratique : banc ELT M1

Formule segments :

$$Z = \frac{\rho^2/R}{1 + \sqrt{1 - (1+k)\rho^2/R^2}}$$

- Ellipsoïde proche d'une parabole concave
- RNom= 68 685 mm
- kNom= -0.996473
- Taille segments : 1.5 m pointe à pointe

Performances recherchées :

- 50 nm rms SFE / 15 nm rms residual
- Focus < 200 nm ptv / segment

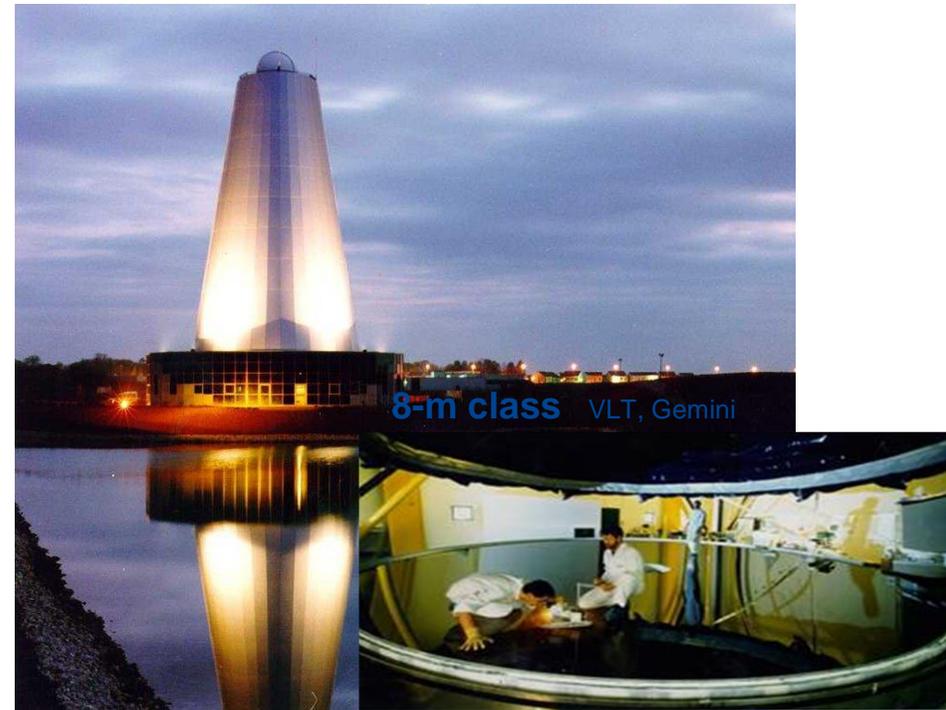
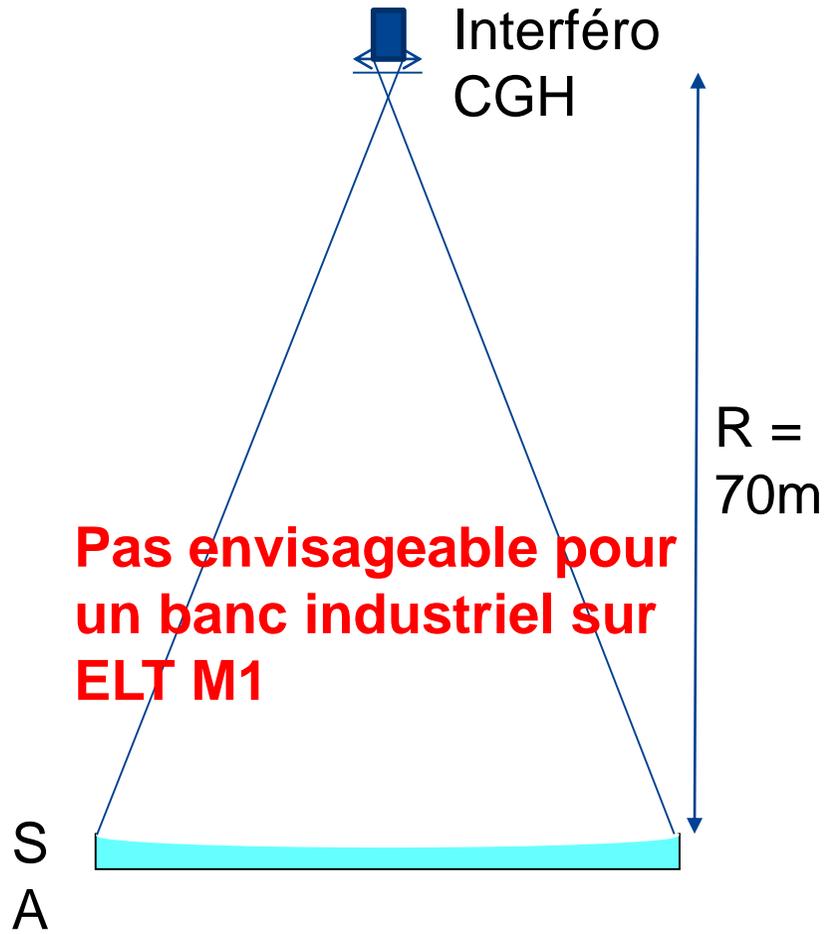


Problématiques du banc ELT M1

- **Performance**
quelques nm rms d'erreur acceptables
- **Mesure de segments à grand rayon de courbure**
R ~ 70 m
- **Gestion de l'environnement : thermique et vibrations**
Évolution du banc avec la température : miroir et cavité
Erreur de phase-shift liée aux vibrations
- **Alignement**
Positionnement des optiques à des précisions micrométriques
- **Calibration**
Fabrication d'optiques étalon pour calibrer l'interféromètre
- **Banc industriel**
Mesure de 933 segments de 132 types différents
Temps de mesure < 1 h

Quel banc interférométrique pour chaque segment ELT M1 ?

Mesure avec CGH sur banc vertical

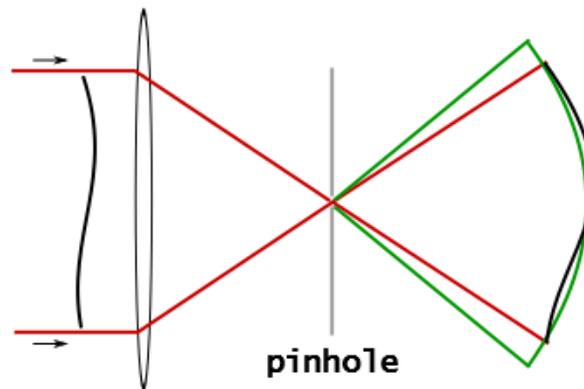


Ex : Mesure M1 du VLT

Quel banc interférométrique pour chaque segment ?

Alternatives :

- Shearing ou PDI



- Introduction d'un élément réduisant la cavité

