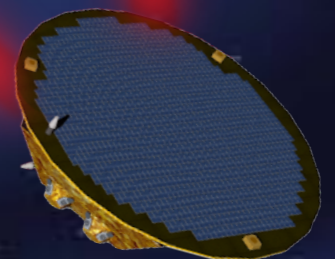
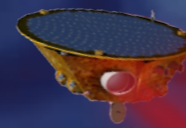








# Cours LISA

## Applications LISA - I

H. Halloin  
07.01.2021



-  Réponse et chaîne de mesure LISA
-  Banc Optique LISA
-  Mesure de phase
-  Tilt-to-length coupling
-  Lumière parasite et bruit de phase
-  Discussions



LISA France

# Réponse et chaîne de mesure LISA

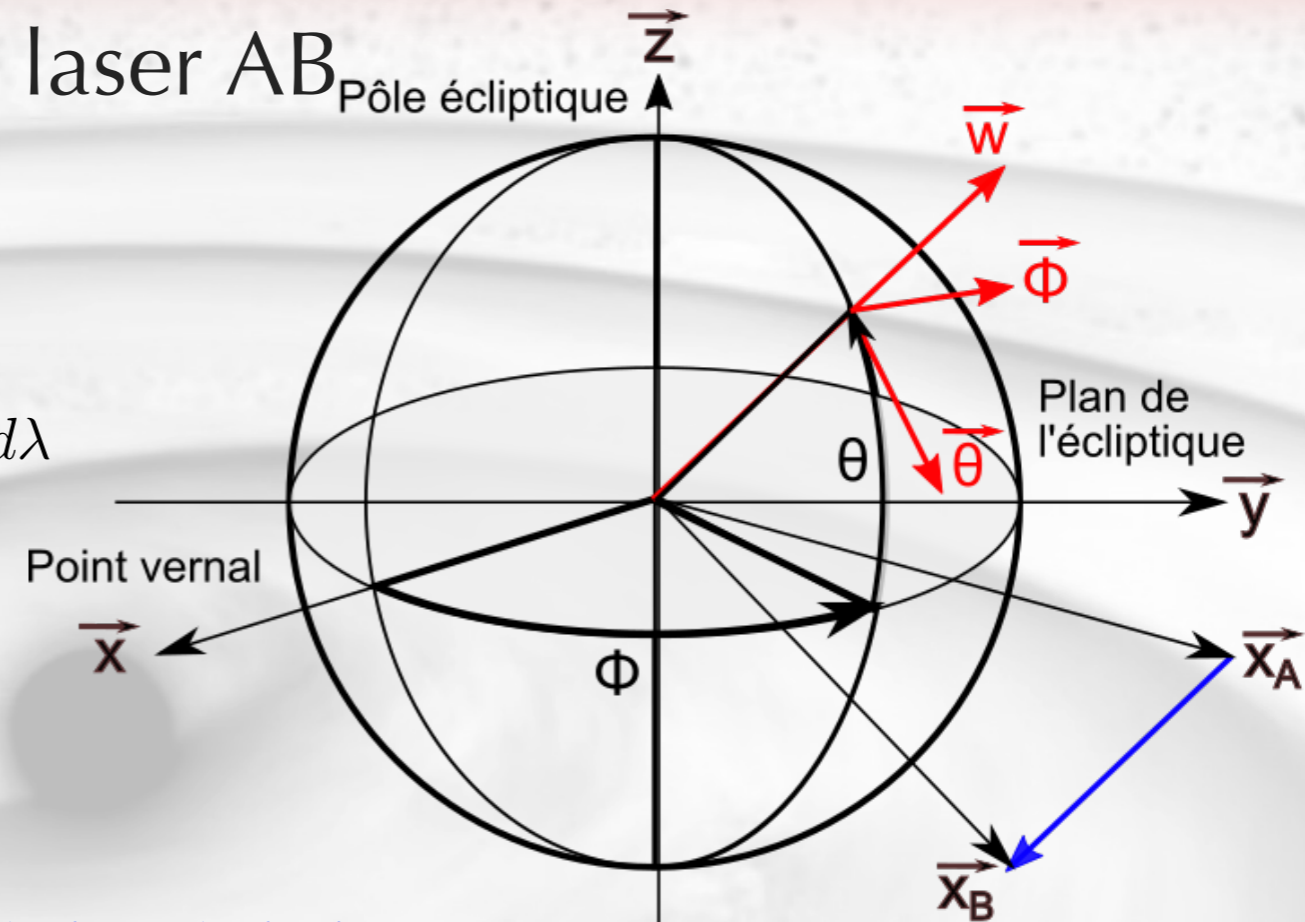
## Réponse élémentaire d'un lien laser AB à une OG

OG se propageant suivant  $-\vec{w}$

$$L = \|\vec{x}_B - \vec{x}_A\|, \quad \vec{n} = \frac{\vec{x}_B - \vec{x}_A}{L}, \quad d\vec{x} = \vec{n} d\lambda$$

$$\Rightarrow d\lambda \approx c \cdot \left[ 1 - \frac{1}{2} (h_+ \xi_+ + h_\times \xi_\times) \right] dt$$

$$\text{avec : } \xi_+ = (\vec{\theta} \cdot \vec{n})^2 - (\vec{\phi} \cdot \vec{n})^2, \quad \xi_\times = 2(\vec{\theta} \cdot \vec{n})(\vec{\phi} \cdot \vec{n})$$



Réponse nulle aux polarisation '+' et 'x' si:

le lien laser est dans la direction de la source

Réponse nulle à la polarisation '+' si:

le lien laser est dans le plan bissecteur à  $\phi$  et  $\theta$  ou orthogonal à celui-ci

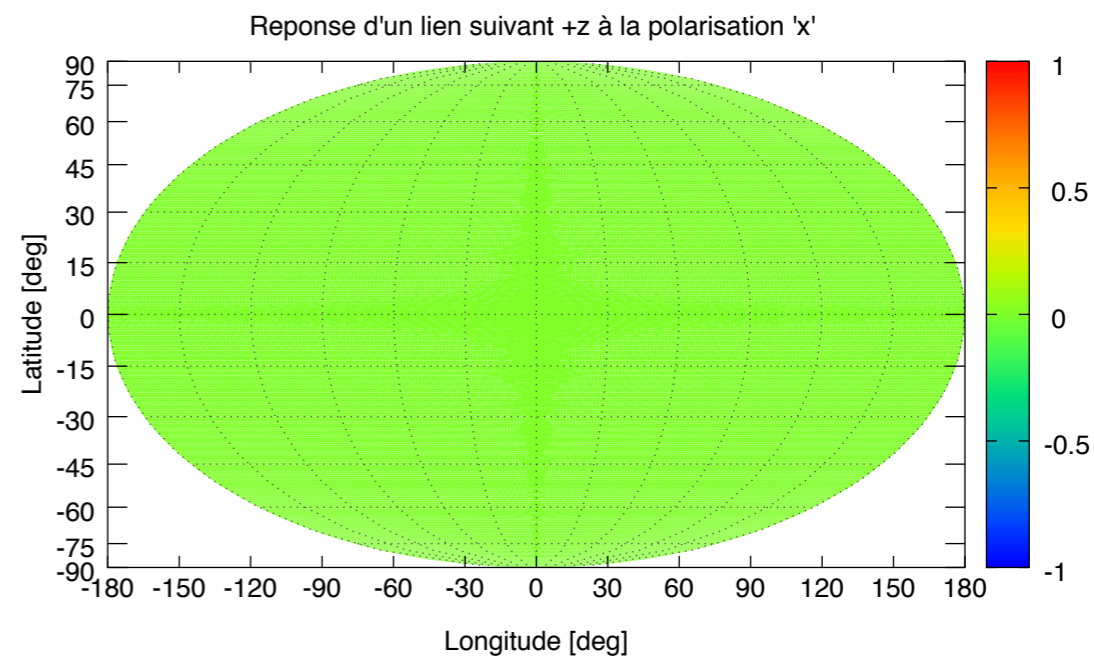
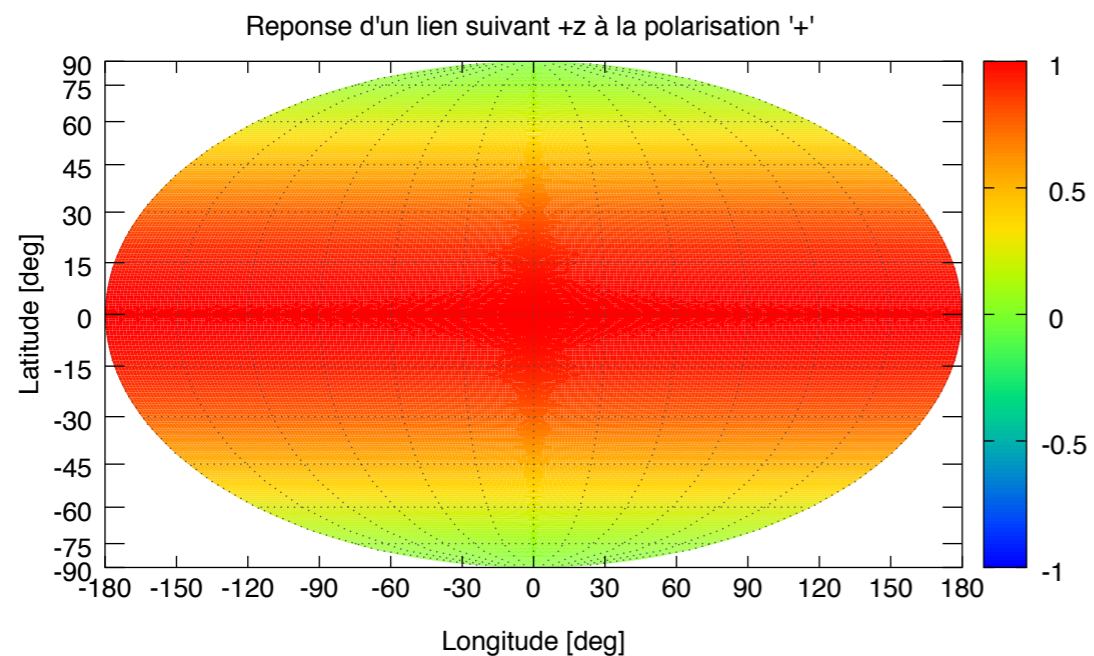
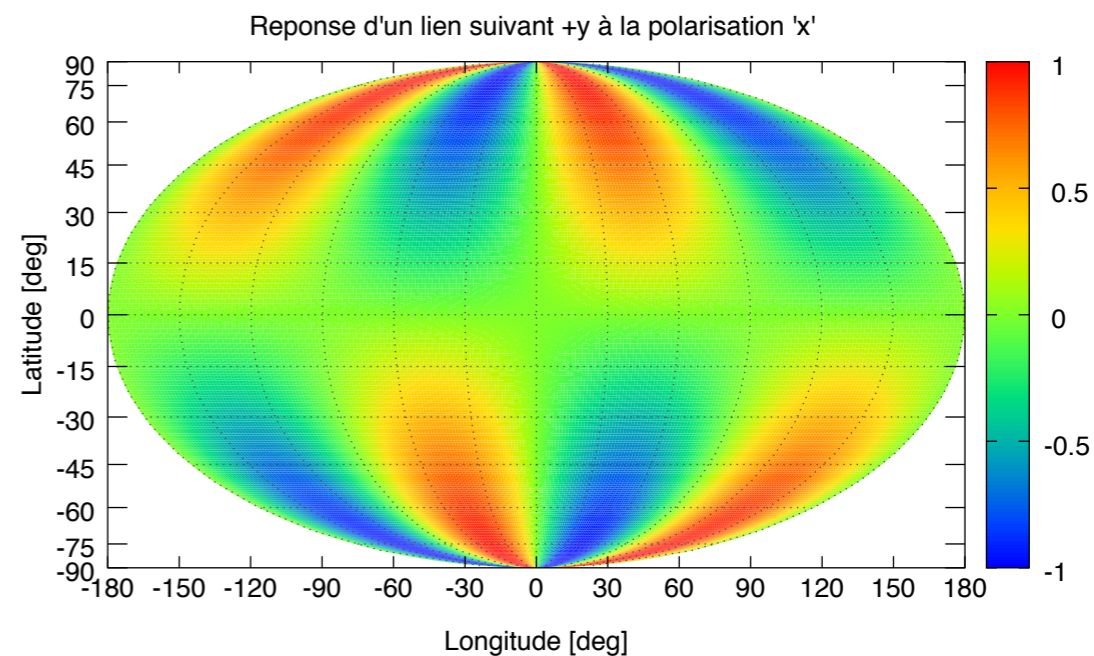
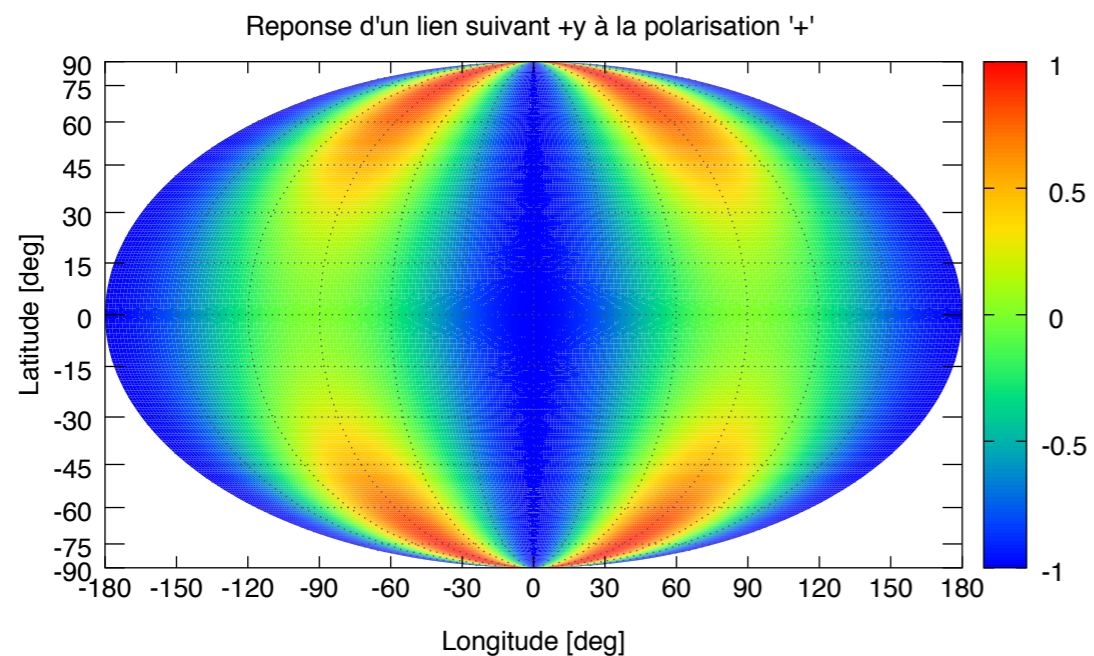
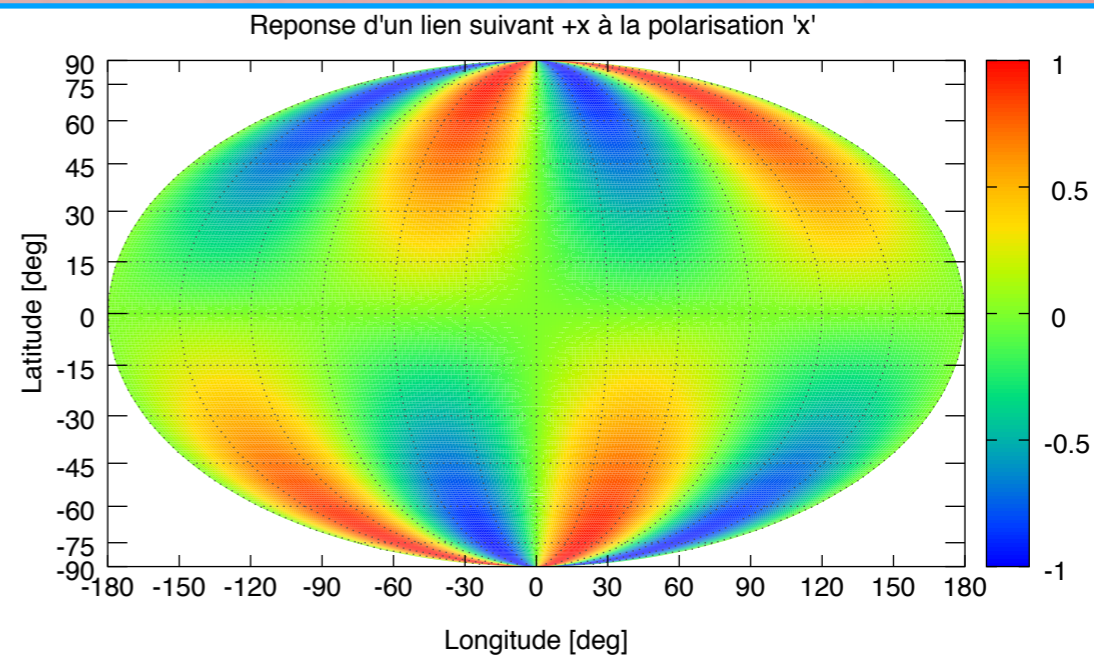
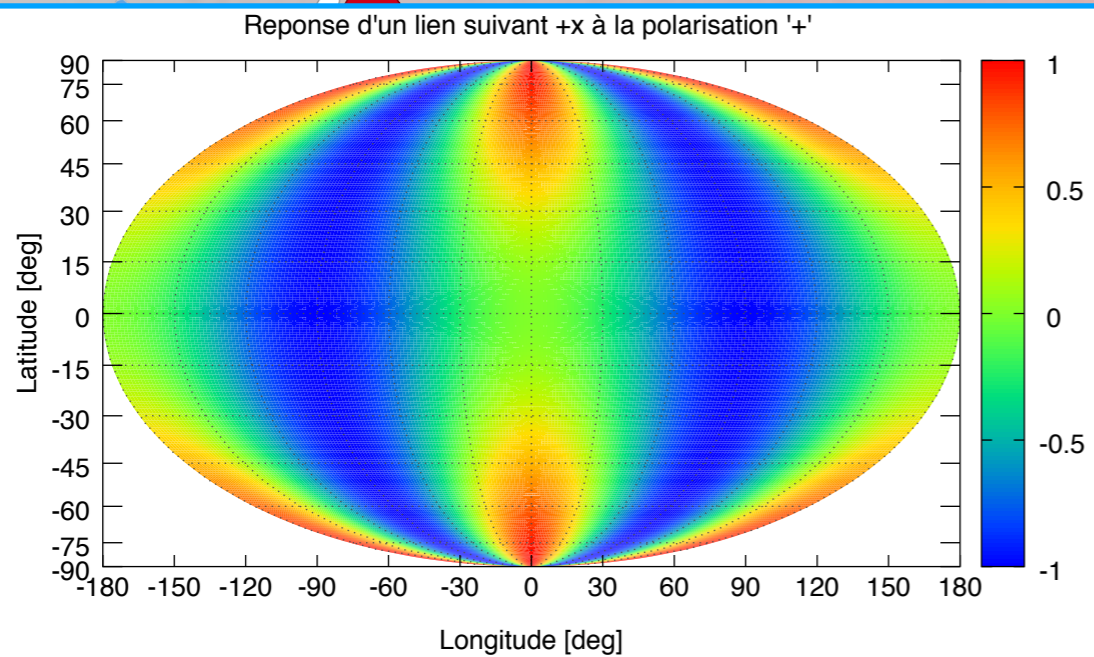
Réponse nulle à la polarisation 'x' si:

le lien laser est orthogonal à  $\phi$  ou  $\theta$

$$\vec{\theta} = -\frac{\partial \vec{w}}{\partial \theta} = \begin{pmatrix} \sin \theta \cos \phi \\ \sin \theta \sin \phi \\ -\cos \theta \end{pmatrix}$$

$$\vec{\phi} = \frac{\partial \vec{w}}{\cos \theta \partial \phi} = \begin{pmatrix} -\sin \phi \\ \cos \phi \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\vec{w} = \begin{pmatrix} \cos \theta \cos \phi \\ \cos \theta \sin \phi \\ \sin \theta \end{pmatrix}$$



Effet intégré : temps de parcours de la lumière entre A et B

Laser émis en A au temps  $t_A$  et reçu en B au temps  $t_B$

L : distance 'géométrique' entre A et B :  $L(t_B) = \|\vec{x}_B(t_B) - \vec{x}_A(t_B - L(t_B)/c)\|$

$$\frac{1}{c} \int_0^L d\lambda = \int_{t_A}^{t_B} \left[ 1 - \frac{1}{2} H \left( (1 - \vec{w} \cdot \vec{n}) t' + \vec{w} \cdot \vec{n} t_A - \frac{\vec{w} \cdot \vec{x}_A}{c} \right) \right] dt',$$


avec  $H(t) = h_+(t)\xi_+(t) + h_\times(t)\xi_\times(t)$

$$\Rightarrow \Delta t = t_B - t_A = \frac{L(t_B)}{c} + \frac{1}{2} \int_{t_A}^{t_B} H \left( (1 - \vec{w} \cdot \vec{n}) t' + \vec{w} \cdot \vec{n} t_A - \frac{\vec{w} \cdot \vec{x}_A}{c} \right) dt'$$

$$\approx \frac{L(t_B)}{c} + \frac{1}{2(1 - \vec{w} \cdot \vec{n})} \int_{t_B - (1 - \vec{w} \cdot \vec{n})L/c}^{t_B} H \left( \tau - \frac{\vec{w} \cdot \vec{x}_B}{c} \right) d\tau$$



**Temps de parcours  
en espace plat**

**Effet de la déformation de la  
métrique de l'espace-temps**

 Effet intégré : effet Doppler à la réception du faisceau laser

$$\frac{\delta\nu}{\nu_0}(t) = -\frac{d\Delta t}{dt_B}(t)$$

$$\approx -\frac{1}{2(1 - \vec{w} \cdot \vec{n})} \left[ H \left( t - \frac{\vec{w} \cdot \vec{x}_B}{c} \right) - H \left( t - \frac{\vec{w} \cdot \vec{x}_A + L}{c} \right) \right]$$

-  Ne dépend que de l'OG et de la réponse de LISA aux coordonnées spatiotemporelles à l'émission et à la réception
-  Il faut y ajouter l'effet Doppler lié à la variation de L
  -  Bien plus important (quelques MHz), mais variations très lentes

 Dans le domaine fréquentiel (transformée de Fourier)

 Suppose que  $L$  et la fonction de réponse de LISA sont quasi-stationnaires

$$\begin{aligned} \frac{\delta \tilde{\nu}}{\nu_0}(f) &= \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\delta \nu}{\nu_0}(t) e^{-2i\pi f t} dt = -\frac{\tilde{H}(f)}{2(1 - \vec{w} \cdot \vec{n})} \left[ e^{2i\pi \frac{\vec{w} \cdot \vec{x}_B}{c} f} - e^{2i\pi \frac{\vec{w} \cdot \vec{x}_{A+L}}{c} f} \right] \\ &= -\frac{i\pi L f}{c} \left( \xi_+ \tilde{h}_+(f) + \xi_- \tilde{h}_-(f) \right) \text{sinc} \left( \pi(1 - \vec{w} \cdot \vec{n}) \frac{L}{c} f \right) e^{2i\pi \frac{\vec{w} \cdot \vec{x}_M + L/2}{c} f}, \end{aligned}$$

avec :  $\vec{x}_M = \frac{\vec{x}_A + \vec{x}_B}{2}$



🌀 Dans le domaine fréquentiel (transformée de Fourier)

🌀 En intégrant, on obtient la réponse en phase :

$$\frac{\delta\tilde{\Phi}}{2\pi}(f) = i \frac{\delta\tilde{\nu}(f)}{2\pi f}$$

$$= \frac{L}{2\lambda_0} \left( \xi_+ \tilde{h}_+(f) + \xi_x \tilde{h}_x(f) \right) \text{sinc} \left( \pi(1 - \vec{w} \cdot \vec{n}) \frac{L}{c} f \right) e^{2i\pi \frac{\vec{w} \cdot \vec{x}_{M+L/2}}{c} f}$$

Effet élastique,  
proportionnel à L

Réponse de  
l'instrument

Pénalisation à  
hautes fréquences

Décalage d'origine  
en milieu du lien

🌀 A basses fréquences : déphasage proportionnel à L et à la déformation locale de l'espace-temps

🌀 Si  $\mathbf{w} \perp \mathbf{n}$  (réponse continue maximale): réponse nulle aux fréquences multiples de  $c/L$  (120 mHz pour 2.5 Mkm)

🌀 La réponse d'un interféromètre de Michelson s'obtient alors en :

🌀 Calculant la réponse aller-retour sur un bras (suivant  $\mathbf{n}$  puis  $-\mathbf{n}$ )

$$\left. \frac{\delta \tilde{\Phi}}{2\pi} \right|_{AR} (f) = \frac{L}{2\lambda_0} \left( \xi_+ \tilde{h}_+(f) + \xi_\times \tilde{h}_\times(f) \right) \times \left[ \text{sinc} \left( \pi(1 - \vec{w} \cdot \vec{n}) \frac{L}{c} f \right) + \text{sinc} \left( \pi(1 + \vec{w} \cdot \vec{n}) \frac{L}{c} f \right) e^{2i\pi \frac{L}{c} f} \right] e^{2i\pi \frac{\vec{w} \cdot \vec{x}_{M+L/2}}{c} f}$$

🌀 Soit, en approximation basses fréquences :

$$\left. \frac{\delta \tilde{\Phi}}{2\pi} \right|_{AR} (f) \underset{2\pi \frac{L}{c} f \ll 1}{\approx} \frac{L}{\lambda_0} \left( \xi_+ \tilde{h}_+(f) + \xi_\times \tilde{h}_\times(f) \right) \Leftrightarrow \left. \frac{\delta \Phi}{2\pi} \right|_{AR} (t) \underset{2\pi \frac{L}{c} f \ll 1}{\approx} \frac{L}{\lambda_0} (\xi_+ h_+(t) + \xi_\times h_\times(t))$$

🌀 Puis en combinant les réponses AR sur 2 bras  $\mathbf{n}_1$  et  $\mathbf{n}_2$  :

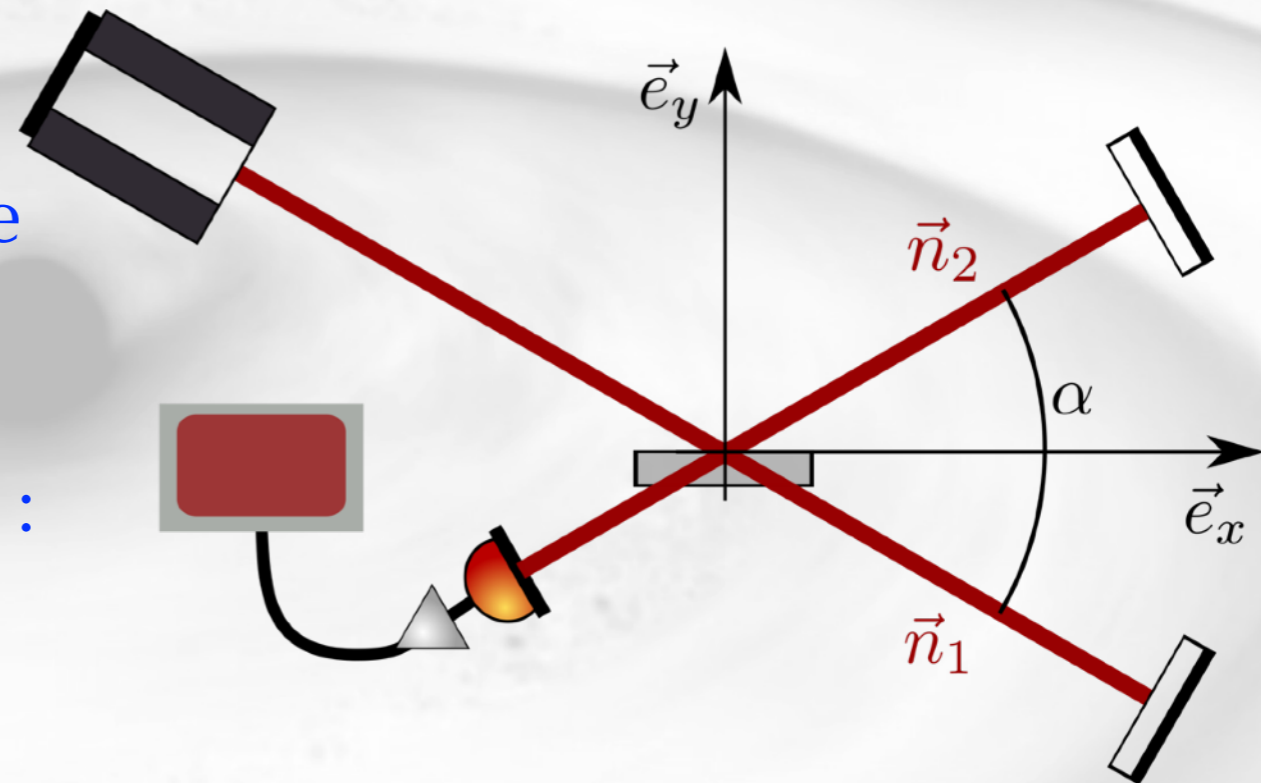
$$\left. \frac{\delta \Phi}{2\pi} \right|_{Michelson} (f) = \left| \left. \frac{\delta \Phi}{2\pi} \right|_{AR,2} (f) - \left. \frac{\delta \Phi}{2\pi} \right|_{AR,1} (f) \right|$$

$$\left. \frac{\delta\Phi}{2\pi} \right|_{\text{Michelson}}(f) = \left| \left. \frac{\delta\Phi}{2\pi} \right|_{AR,2}(f) - \left. \frac{\delta\Phi}{2\pi} \right|_{AR,1}(f) \right|$$

Peut s'exprimer analytiquement (mais formule longue...)

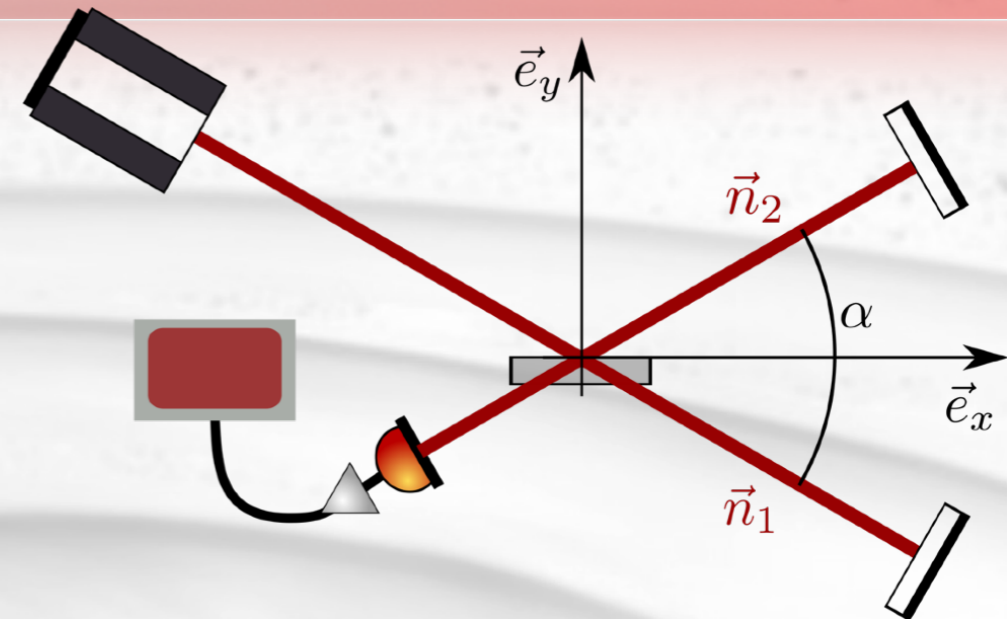
Simplifications :

- $\mathbf{e}_x$  suivant la bissectrice  $\mathbf{n}_1$  et  $\mathbf{n}_2$
- $\mathbf{e}_y$  suivant la direction orthogonale (dans le plan  $\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2$ )
- $\alpha$  l'angle entre  $\mathbf{n}_1$  et  $\mathbf{n}_2$
- Approximation basses fréquences :
  - $\Phi$  : angle d'azimuth ( $\in$  plan XY)
  - $\theta$  : angle d'élévation



$$\left. \frac{\delta\Phi}{2\pi} \right|_{\text{Michelson}}(t) \underset{2\pi \frac{L}{c} f \ll 1}{\approx} \frac{2L}{\lambda_0} \sin \alpha \times \left[ \sin 2\phi \frac{1 + \sin^2 \theta}{2} h_+(t) + \cos 2\phi \sin \theta h_\times(t) \right]$$

## Réponse BF d'un interféromètre de Michelson



$$\left. \frac{\delta\Phi}{2\pi} \right|_{\text{Michelson}}(t) \underset{2\pi \frac{L}{c} f \ll 1}{\approx} \frac{2L}{\lambda_0} \sin \alpha$$

Pénalisation pour des bras non orthogonaux ( $\sqrt{3}/2 \sim 0,87$  pour LISA)

$$\times \left[ \sin 2\phi \frac{1 + \sin^2 \theta}{2} h_+(t) + \cos 2\phi \sin \theta h_\times(t) \right]$$

Réponse '+' nulle pour une source dans le plan bissecteur ou orthogonal à celui-ci (i.e.  $\Phi = 0^\circ, \pm 90^\circ, 180^\circ$ )

Réponse '+' augmente avec  $\theta$  (élévation), symétrique Nord/Sud

Réponse 'x' augmente avec  $\theta$  (élévation), nulle dans le plan équatorial ( $\theta=0^\circ$ ), antisymétrique Nord/Sud

Réponse 'x' nulle pour une source dans les plans méridiens à  $\Phi = \pm 45^\circ, \pm 135^\circ$

## Réponse BF

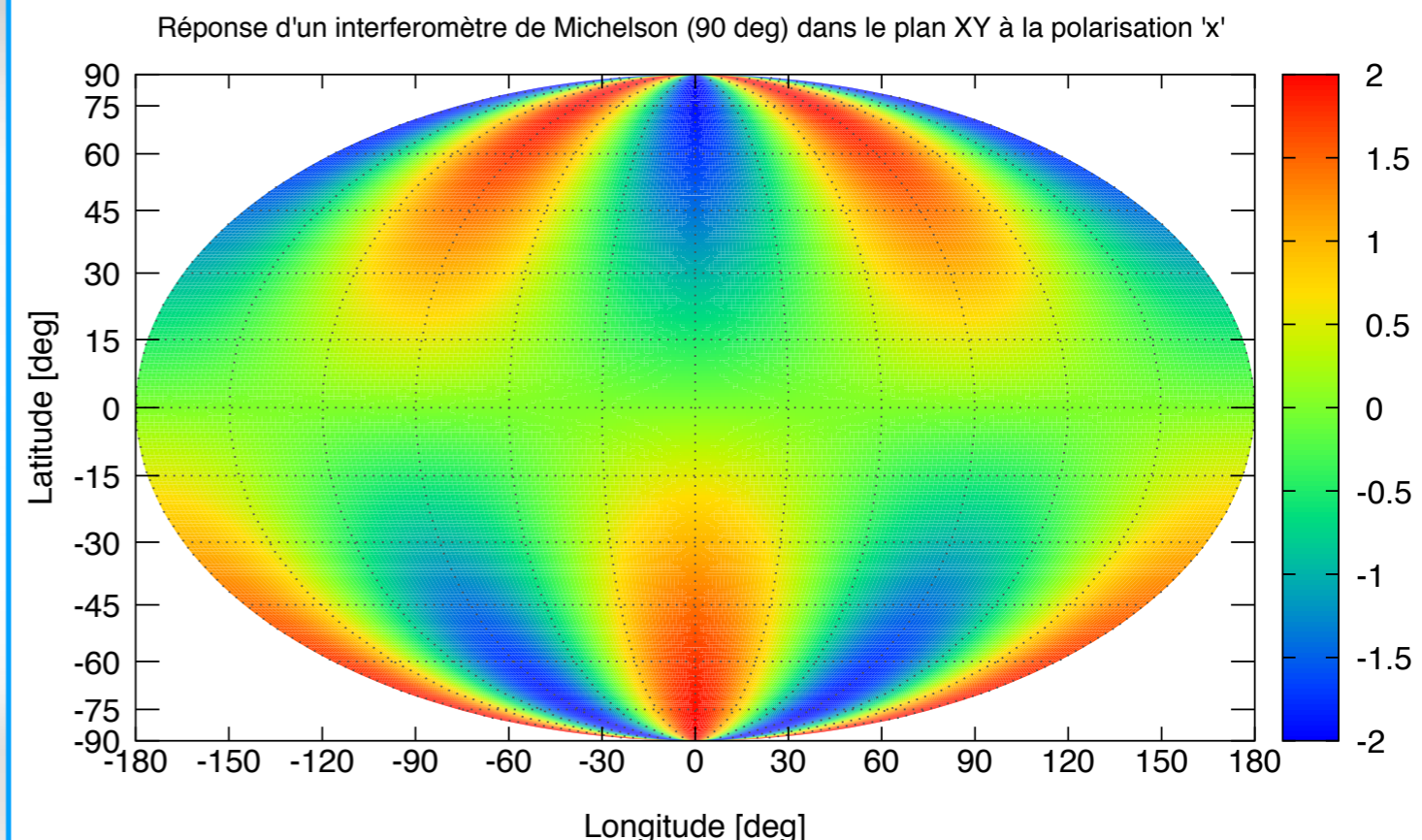
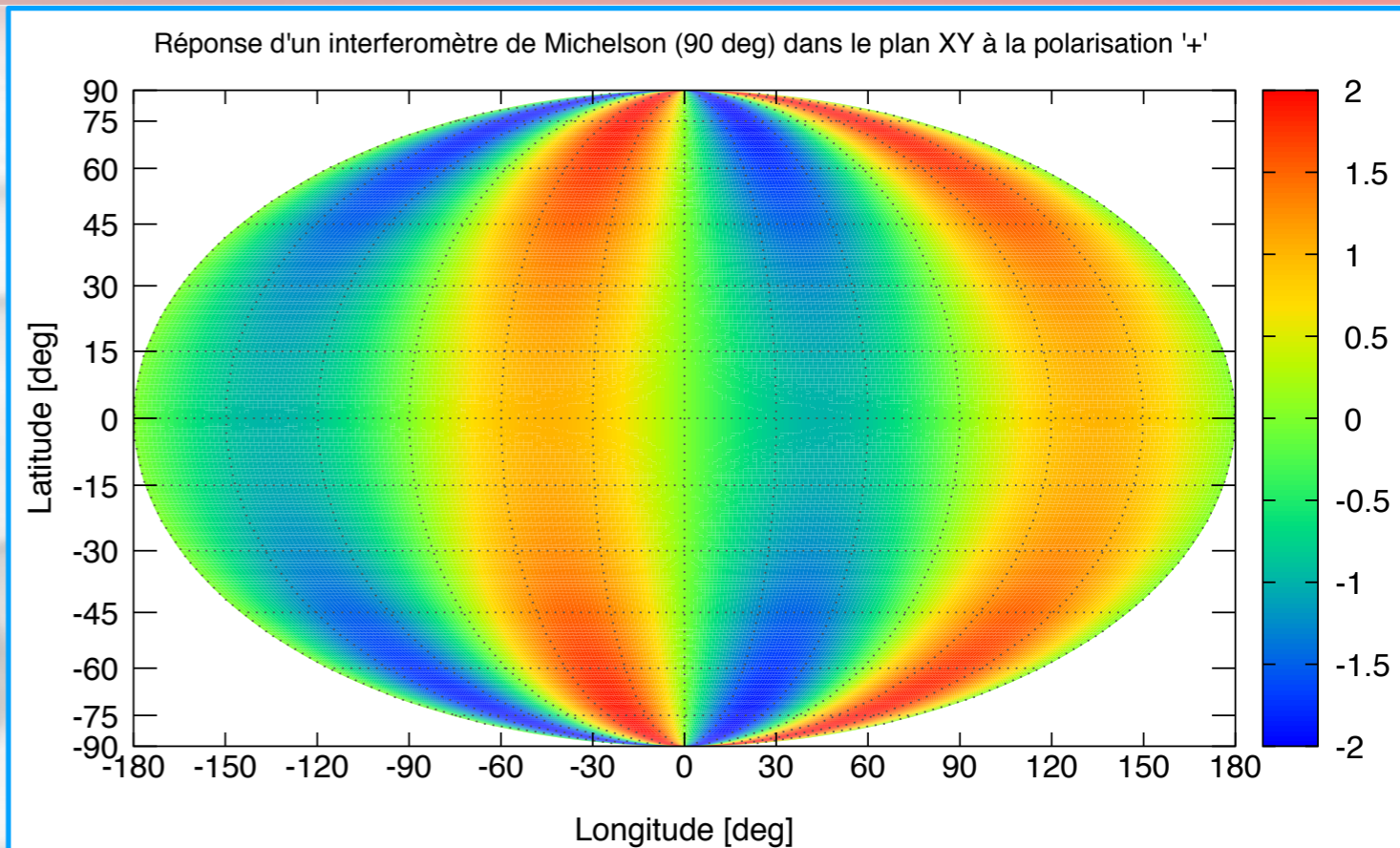
Pour une distribution isotrope de sources décorréées (phase et polarisation) et de même amplitude

$$\left. \frac{\delta\Phi}{2\pi} \right|_{\text{Michelson}} \underset{2\pi \frac{L}{c} f \ll 1}{\approx} \frac{2L}{\lambda_0} \sqrt{\frac{2}{5}} \sin \alpha \cdot h$$

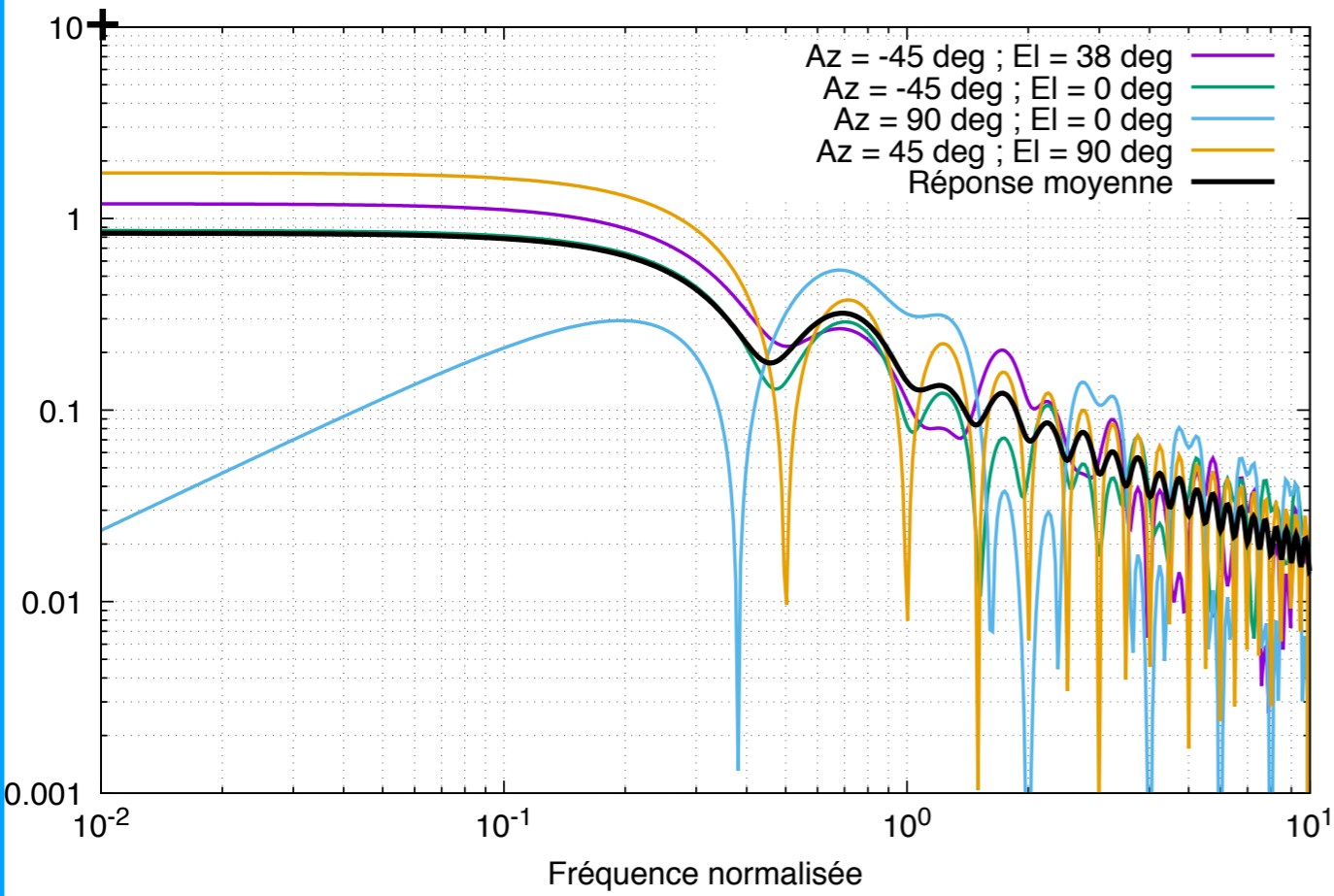
$$\underset{2\pi \frac{L}{c} f \ll 1}{\approx} \frac{L}{\lambda_0} \sqrt{\frac{6}{5}} \cdot h \quad \text{pour LISA}$$

Plus complexe quand la fréquence augmente...

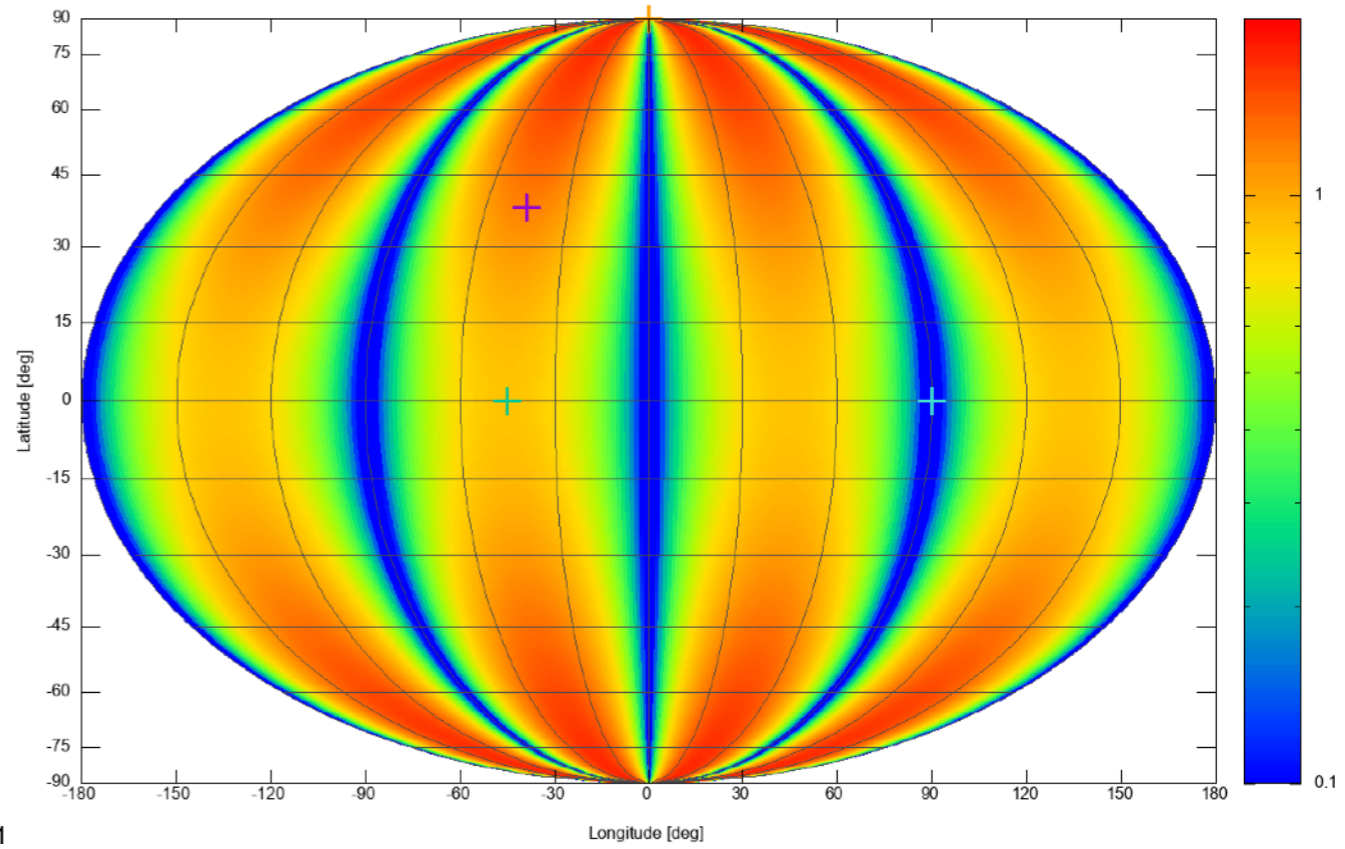
- Toujours analytique (dans le domaine fréquentiel) dans une direction donnée
- Couplage entre réponse fréquentielle et direction de la source
- Réponse isotrope non analytique, calculable à partir d'un nombre discret de sources 'bien distribuées'



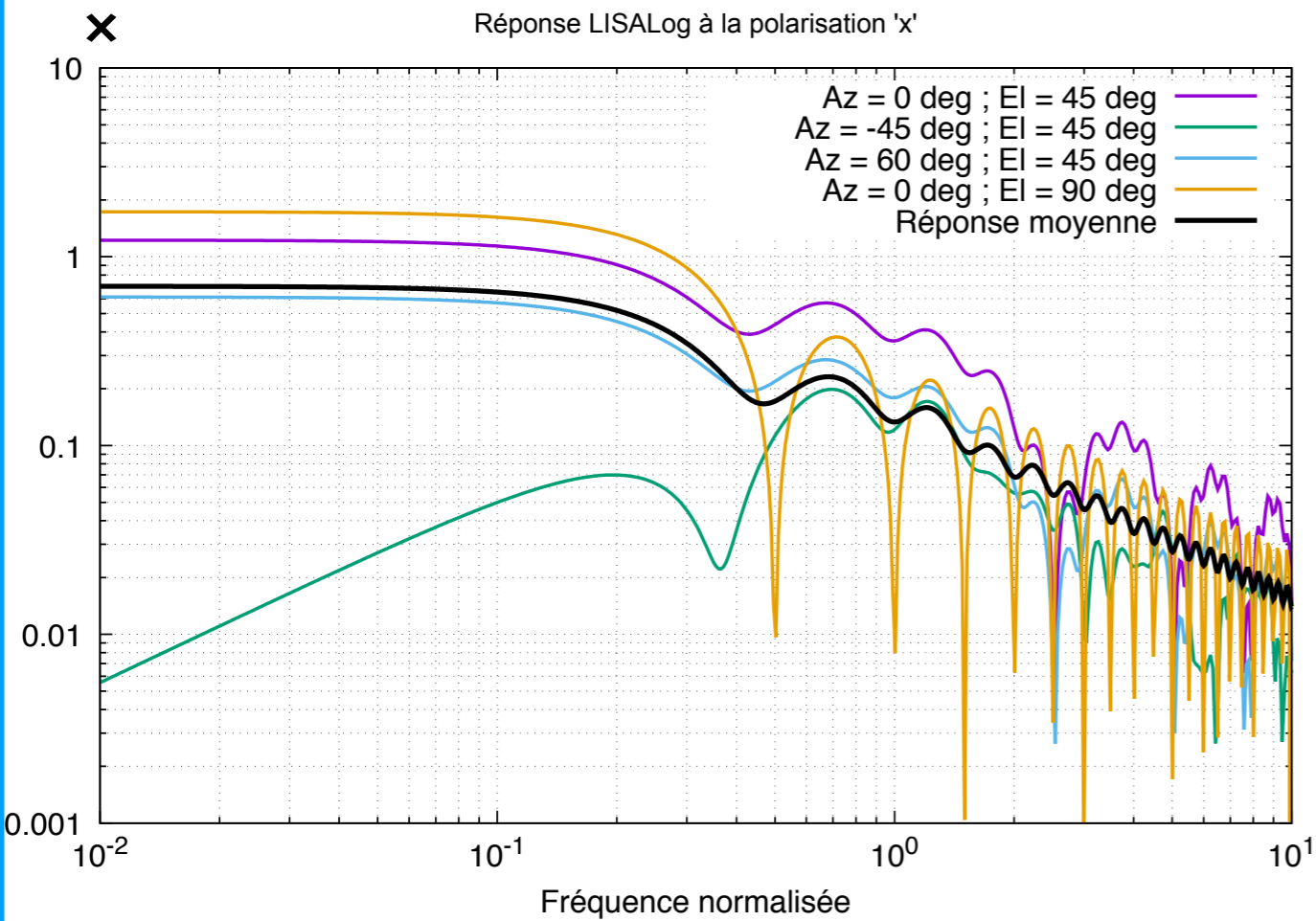
Réponse LISALog à la polarisation '+'



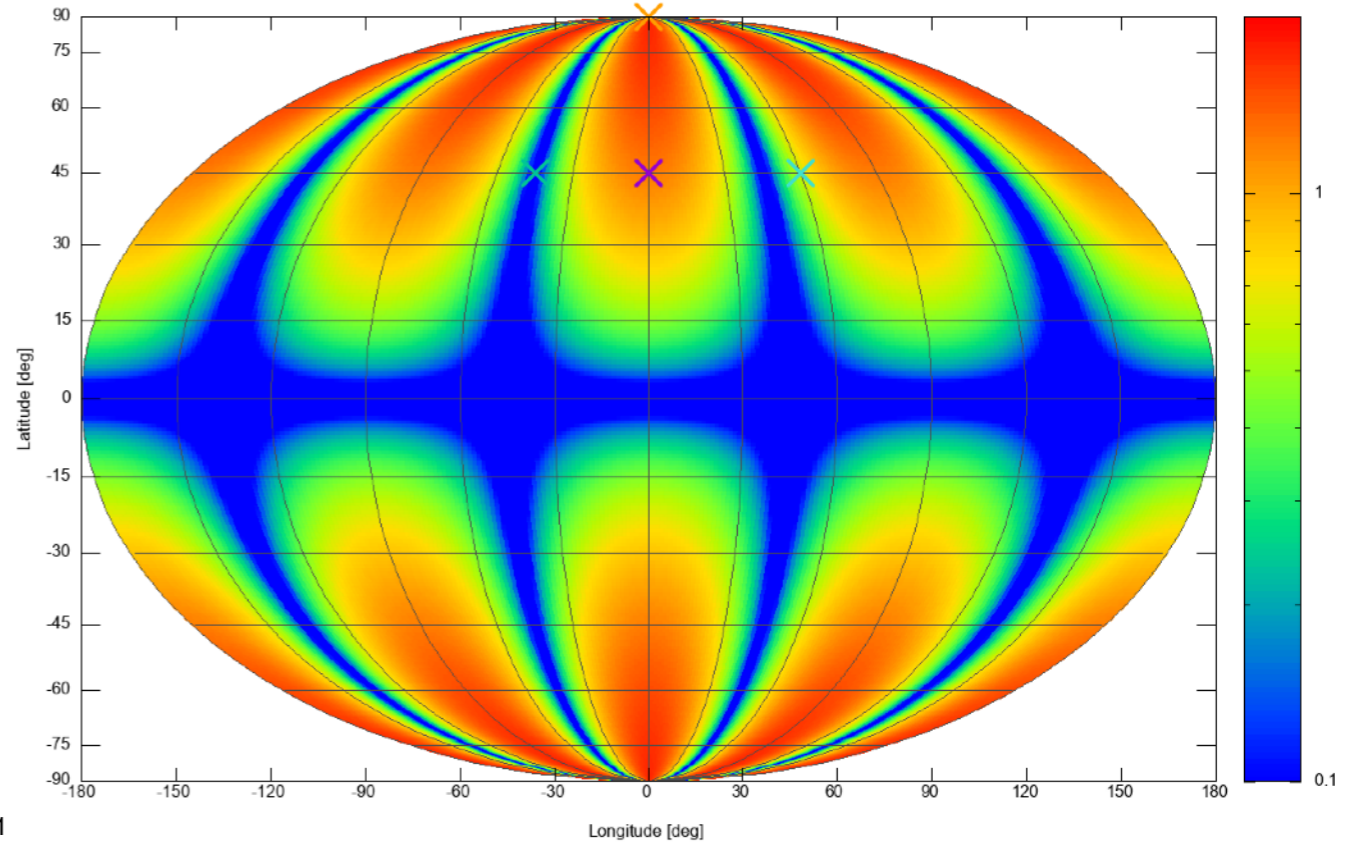
Réponse LISALog à la polarisation '+' dans le plan XY à  $f^*/L/c = 0.000$



Réponse LISALog à la polarisation 'x'



Réponse LISALog à la polarisation 'x' dans le plan XY à  $f^*/L/c = 0.000$



# Effet d'une OG sur un interféromètre

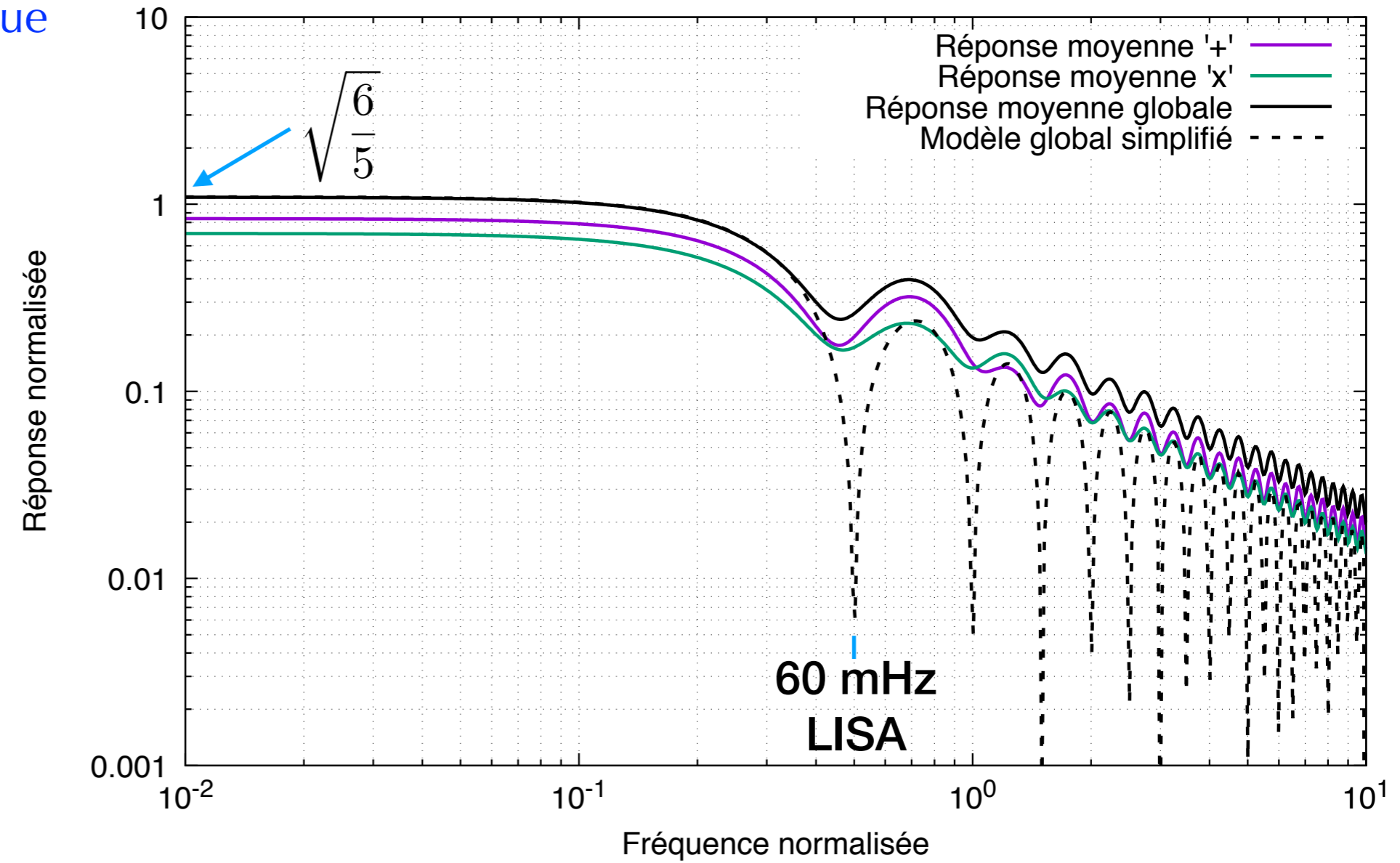
Modèle fréquentiel 'isotrope' approché

- Dépendance fréquentielle pour une source au zénith
- Limite basse fréquence remise à l'échelle de la réponse analytique

$$\left. \frac{\delta\Phi}{2\pi} \right|_{\text{Michelson}} \approx \frac{2L}{\lambda_0} \sqrt{\frac{2}{5}} \sin \alpha \cdot \left| \text{sinc} \left( 2\pi \frac{L}{c} f \right) \right| \cdot h$$

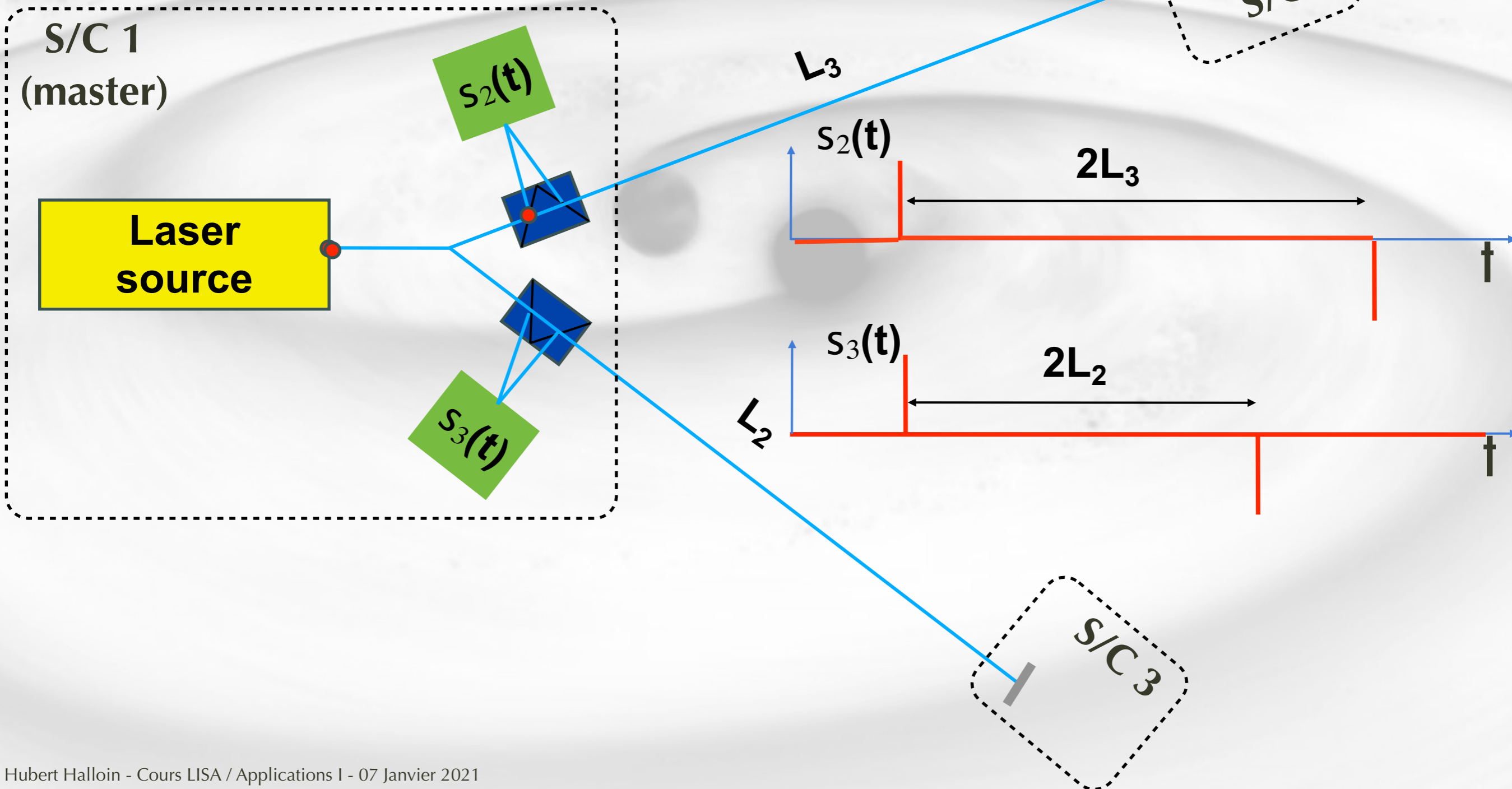
$$\approx \frac{L}{\lambda_0} \sqrt{\frac{6}{5}} \cdot \left| \text{sinc} \left( 2\pi \frac{L}{c} f \right) \right| \cdot h \quad \text{pour LISA}$$

Réponses moyennes LISALog



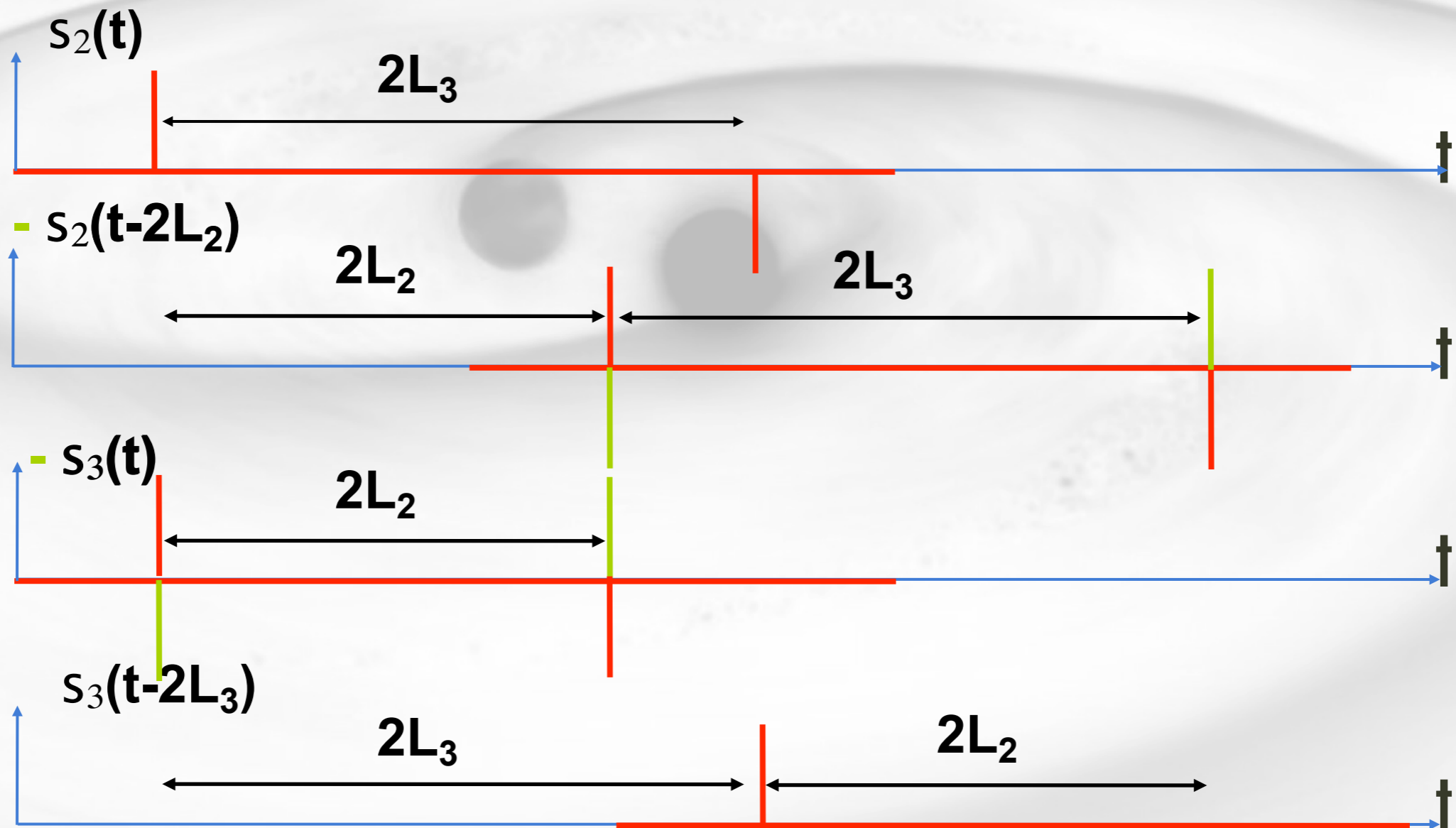
# Time Delay Interferometry

- Bras instationnaires et longueurs variables
- Couplage avec le bruit de fréquence du laser
- Fonction de transfert instrumentale variable





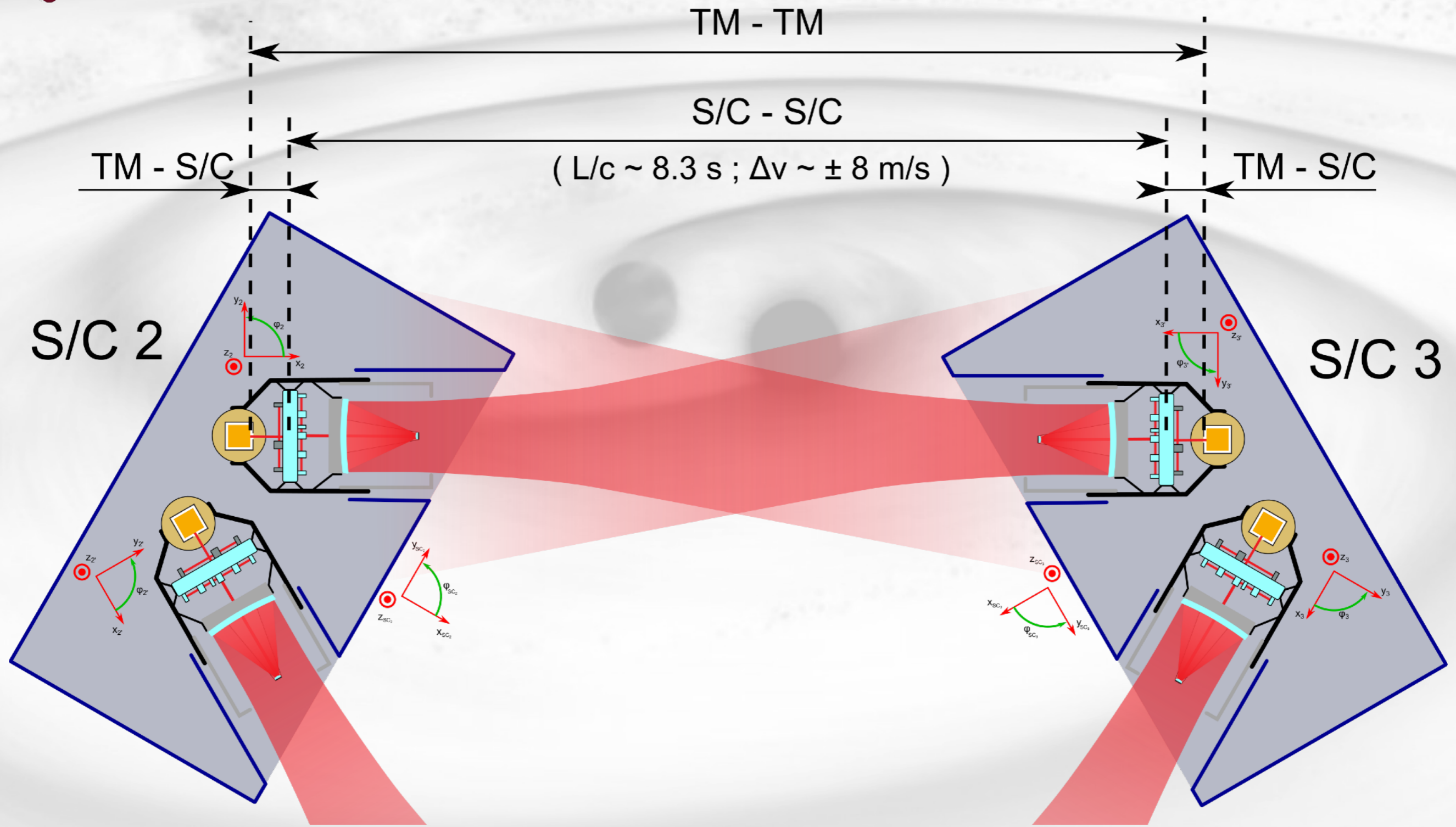
- Application de la méthode d'interférométrie retardée
  - Plus généralement TDI recombine l'ensemble des mesures interférométriques utiles (dont le recalage des horloges) de l'ensemble de la constellation
  - Fonction de transfert TDI aux OG complexe
    - cf. présentation d'Antoine...



$$s_2(t) + s_3(t-2L_3) - [s_3(t) + s_2(t-2L_2)] = 0 \dots$$




# Décomposition de la mesure d'un bras

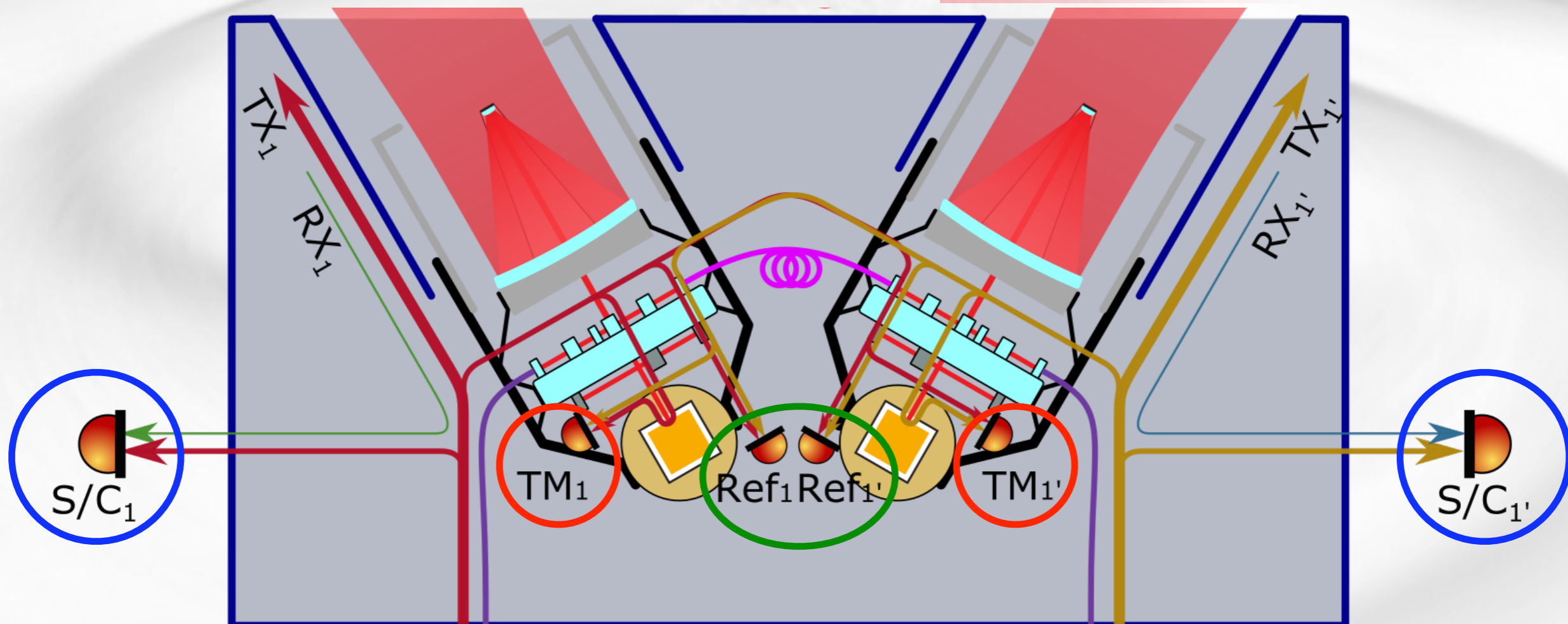
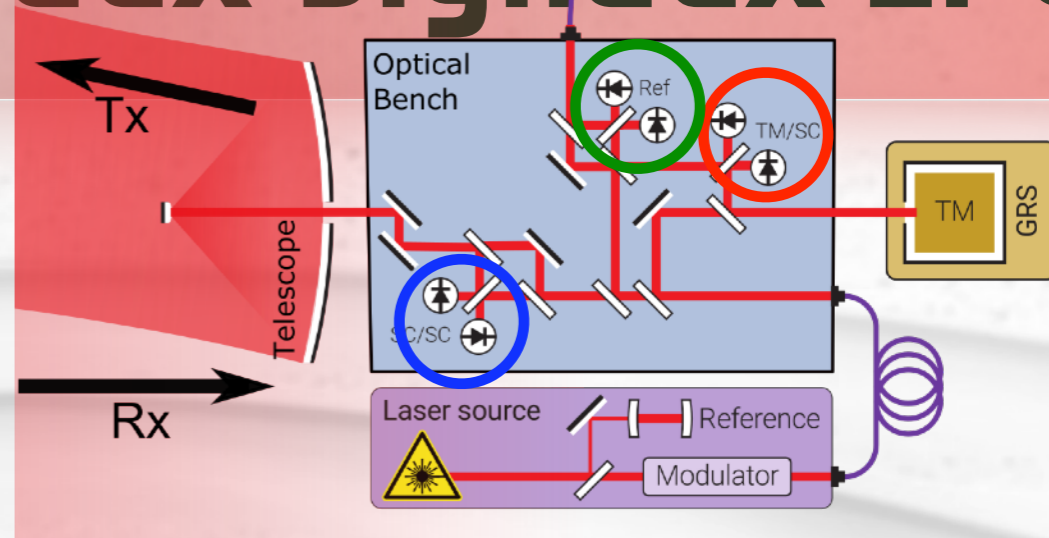
3 mesures TM  $\rightarrow$  TM



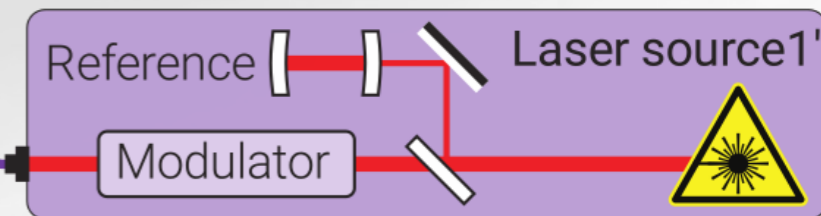
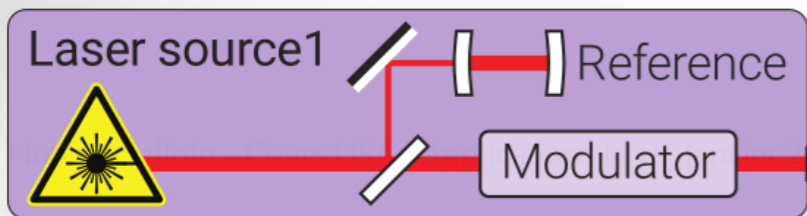
# Principaux signaux IFO

3 signaux interférométriques par banc :

-  SC/SC
-  TM/SC
-  Ref

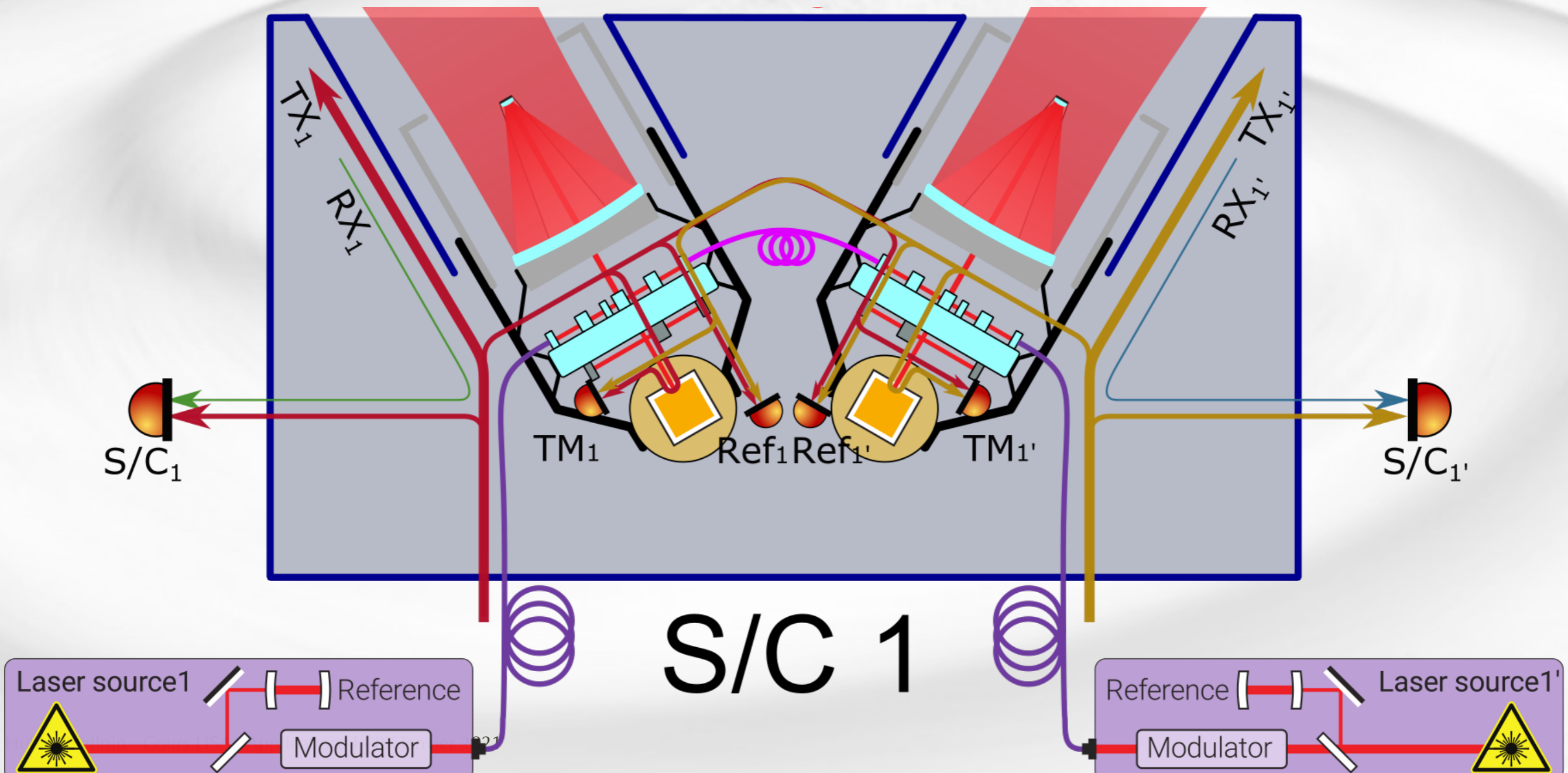


S/C 1



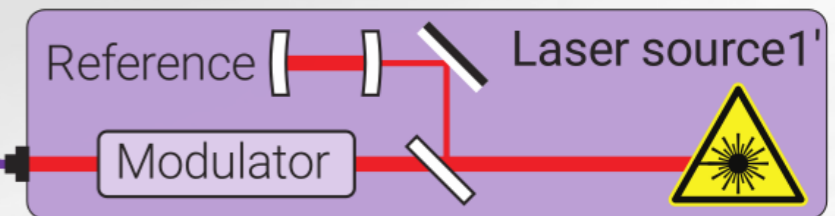
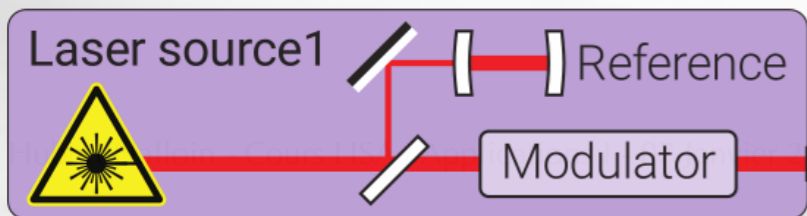
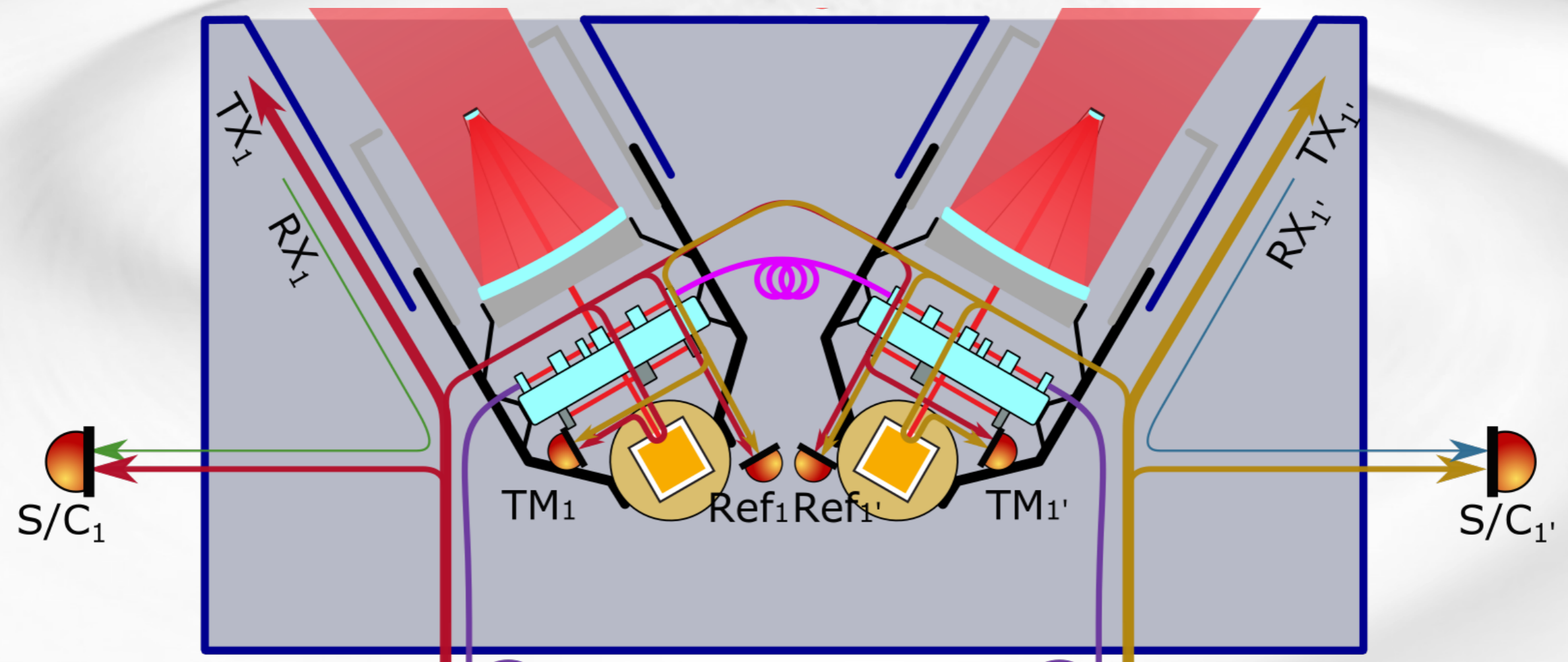
# Principaux signaux IFO

- 📡 Calculez les fréquences (ou phases) mesurées par les différents interféromètres, en fonction :
  - 📡 des fréquences des lasers locaux et distants
  - 📡 des bruits liés uniquement au mouvement du satellite (par rapport aux masses test) et au backlink



# Principaux signaux IFO

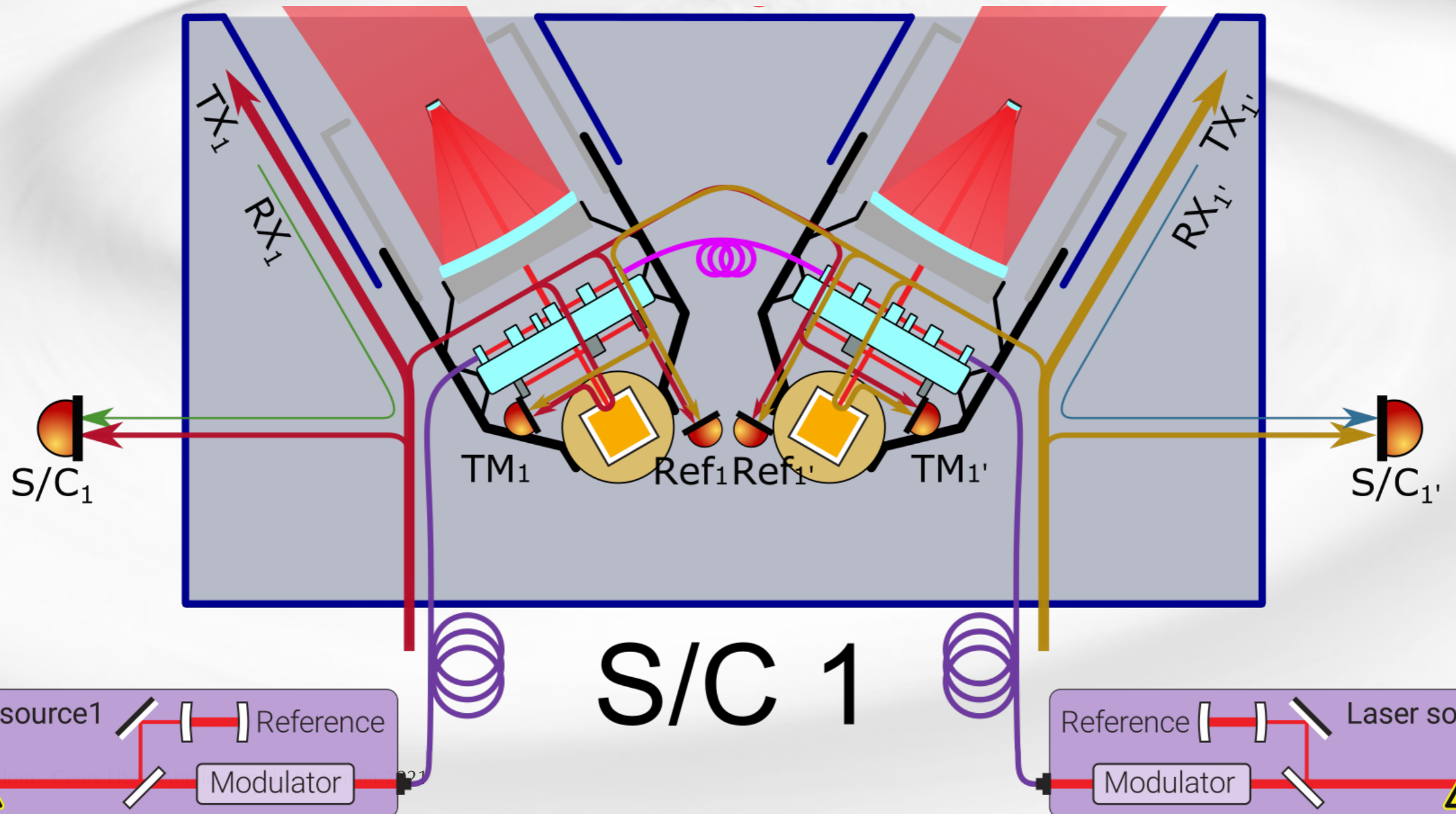
- On suppose que les faisceaux reçus sont une copie en phase parfaite (et sans délai) des faisceaux émis
- Comment se manifeste l'effet des ondes gravitationnelles ?
- Quelle combinaisons de mesure permet de récupérer un signal 'à la Michelson'?



S/C 1

# Principaux signaux IFO

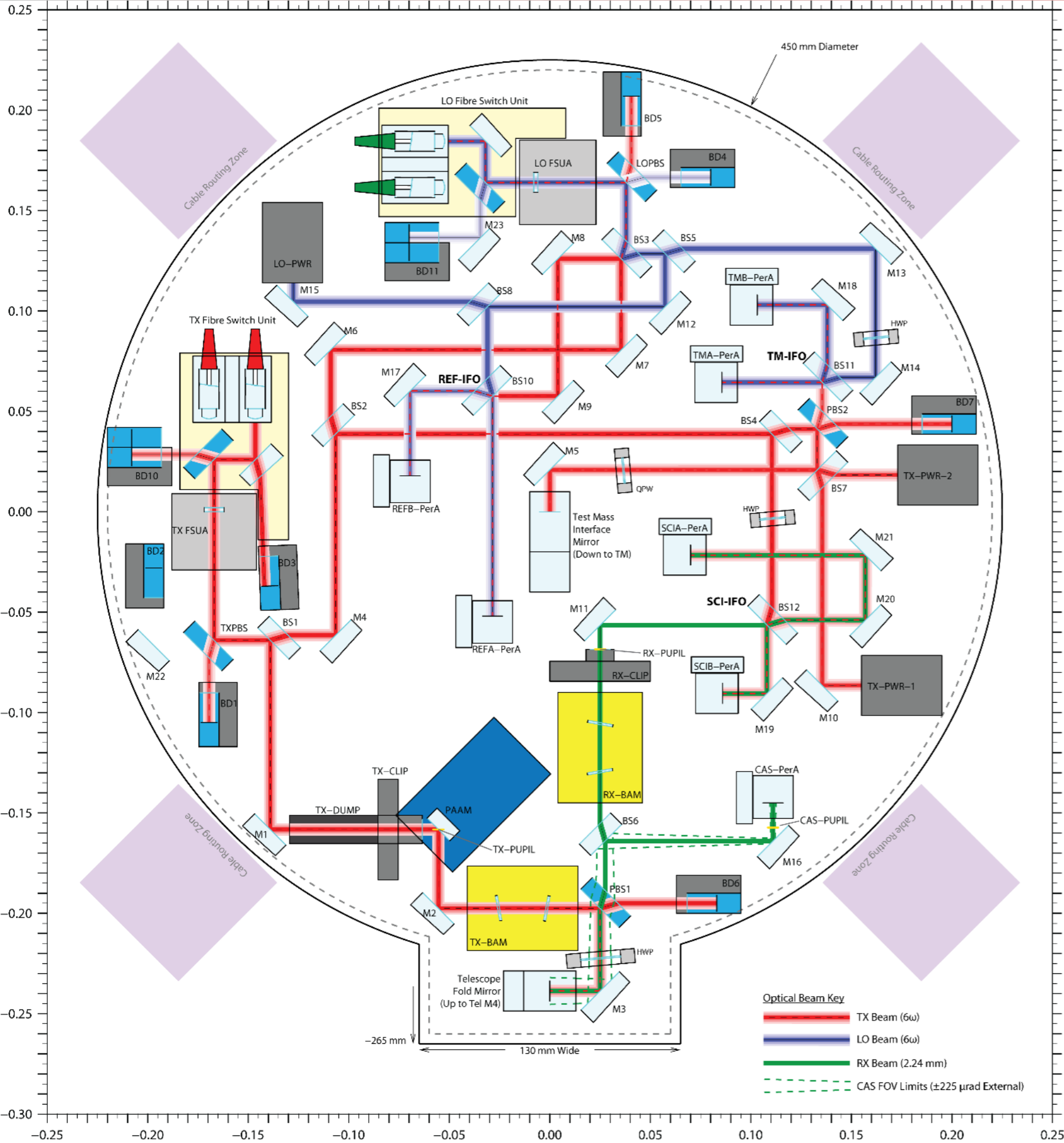
- Dans LISA, les lasers sont verrouillés en phase deux par deux :
  - soit en 'transpondeur' : p. ex, le laser 1 sur  $RX_1$  (en utilisant  $S/C_1$ )
  - soit en 'adjacent' : p. ex., le laser 1' sur le laser 1 (via  $Ref_1'$  ou  $Ref_1$ )
  - > permet de maîtriser la dynamique en fréquence des signaux
  - > induit des corrélations sur les bruits, mais ne change pas le principe de la mesure.





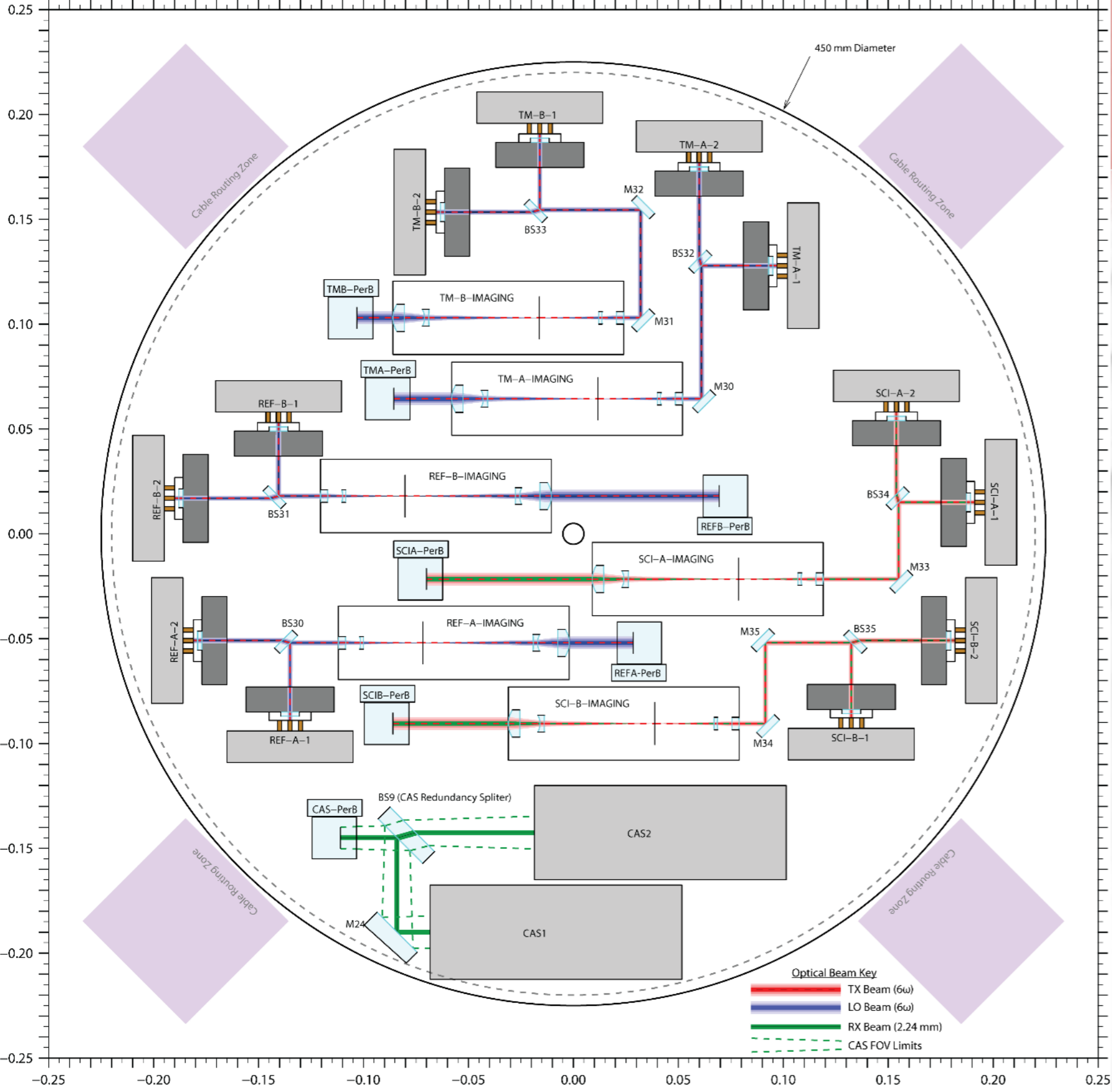
# Banc optique LISA

# Face avant

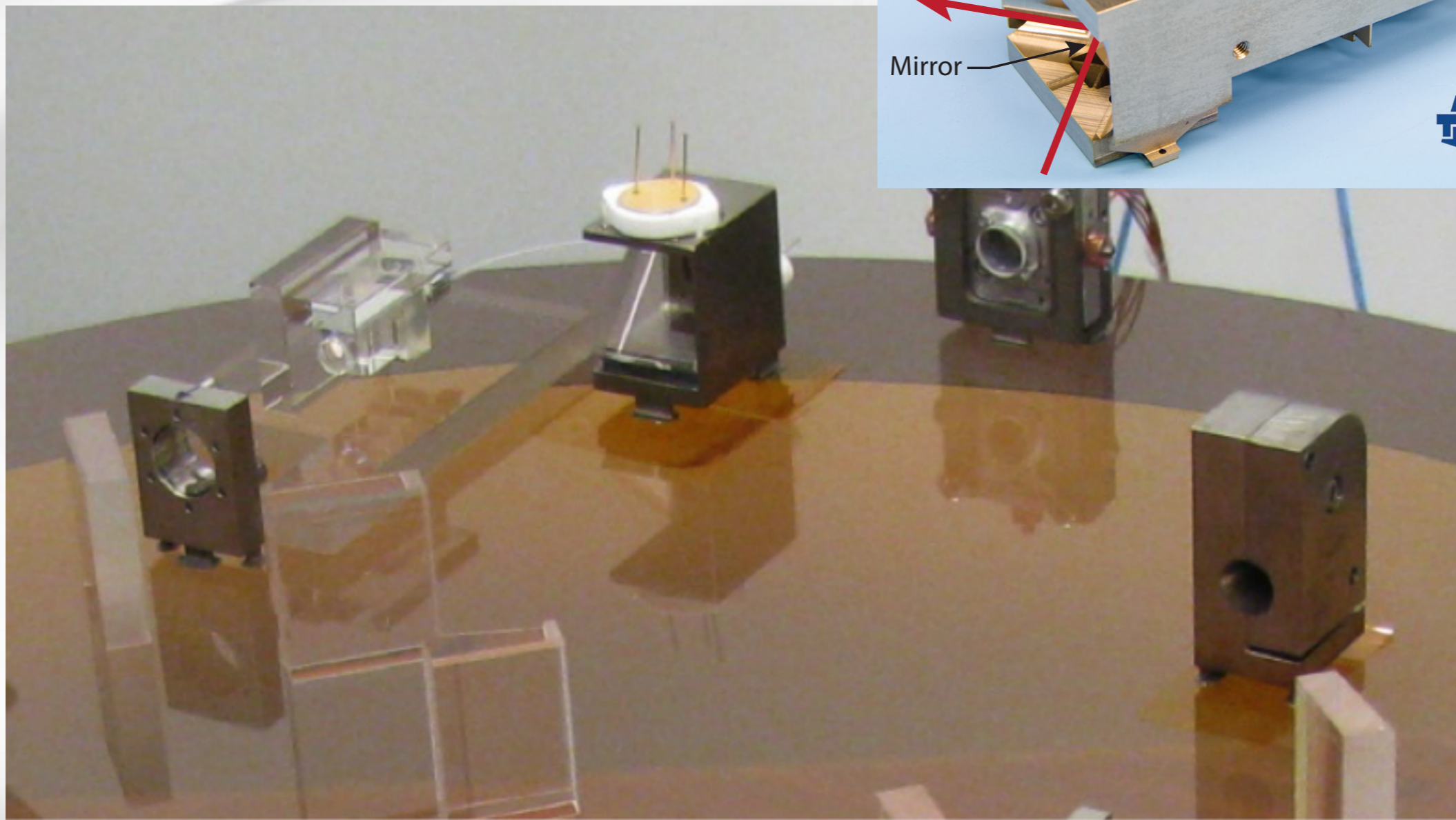
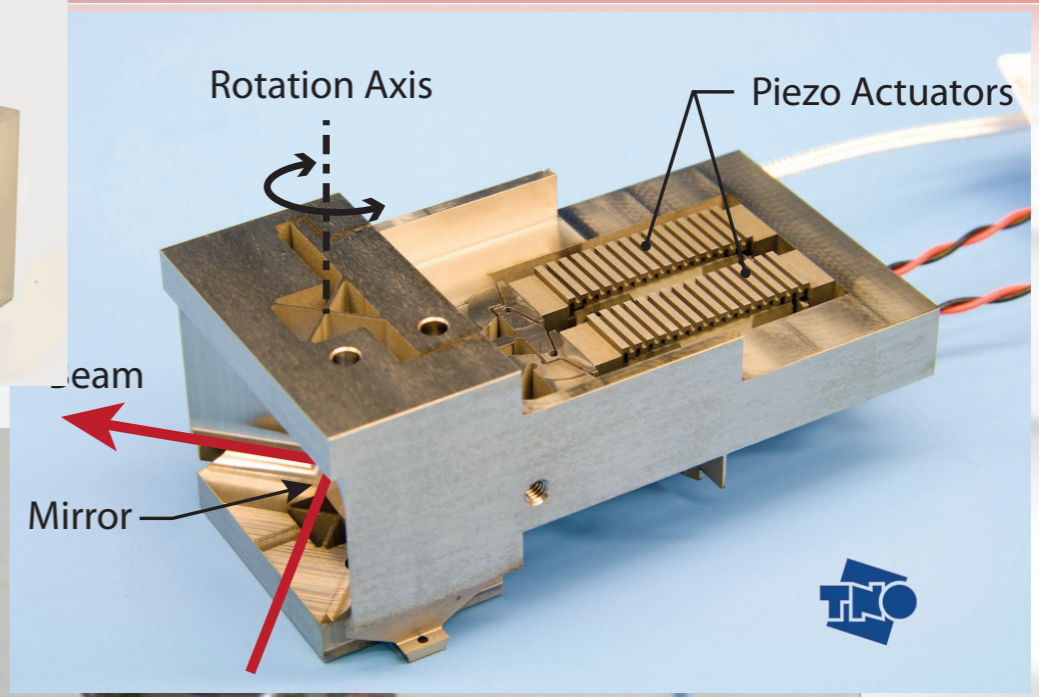
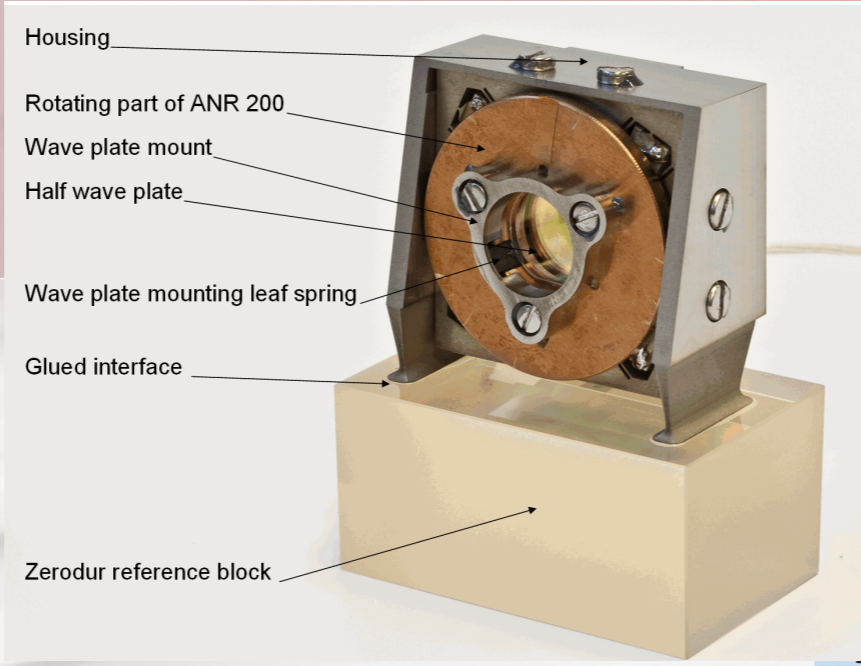




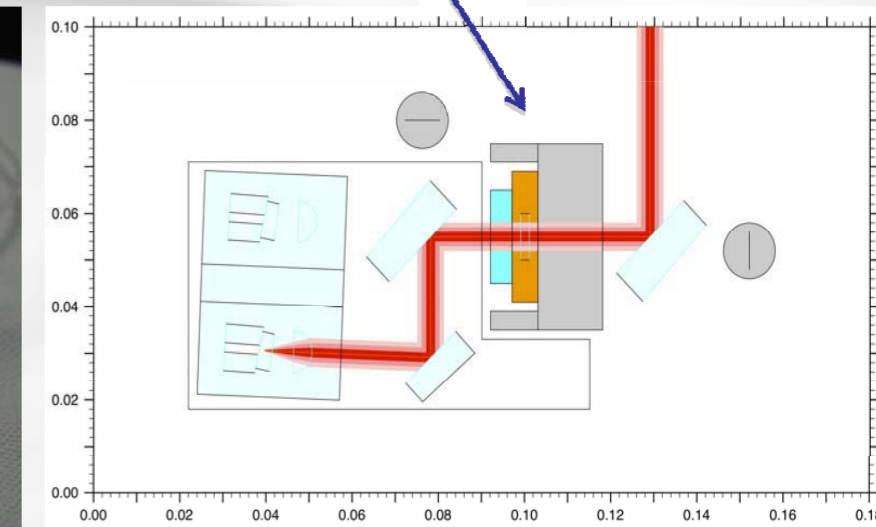
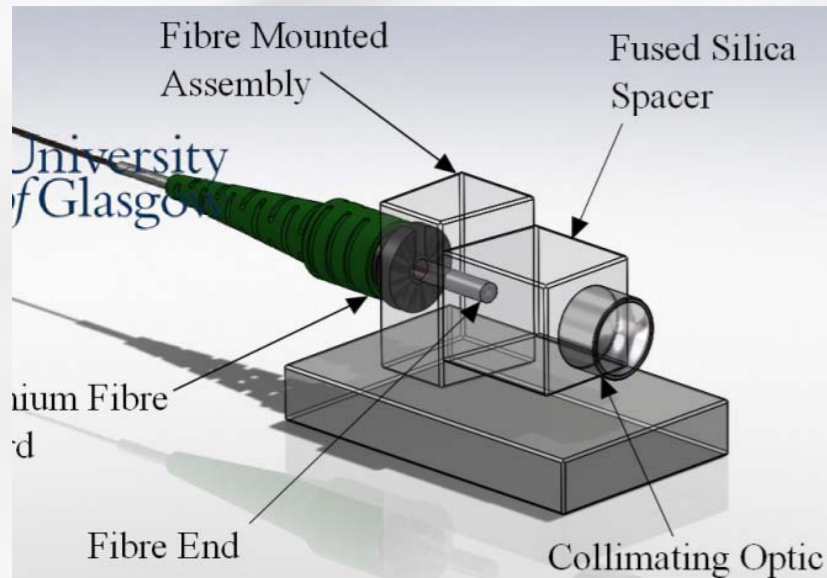
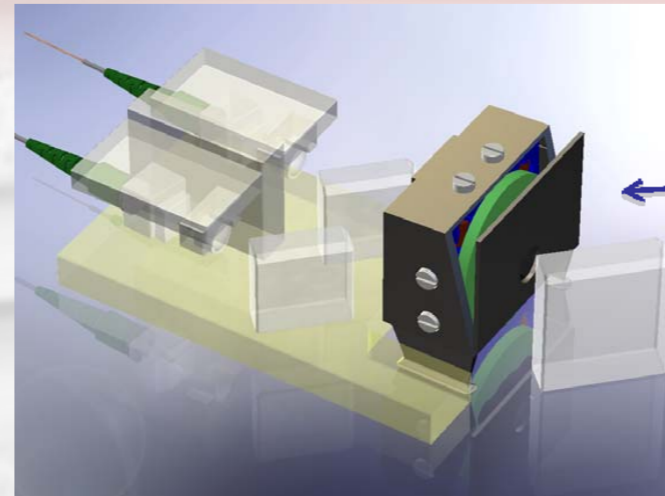
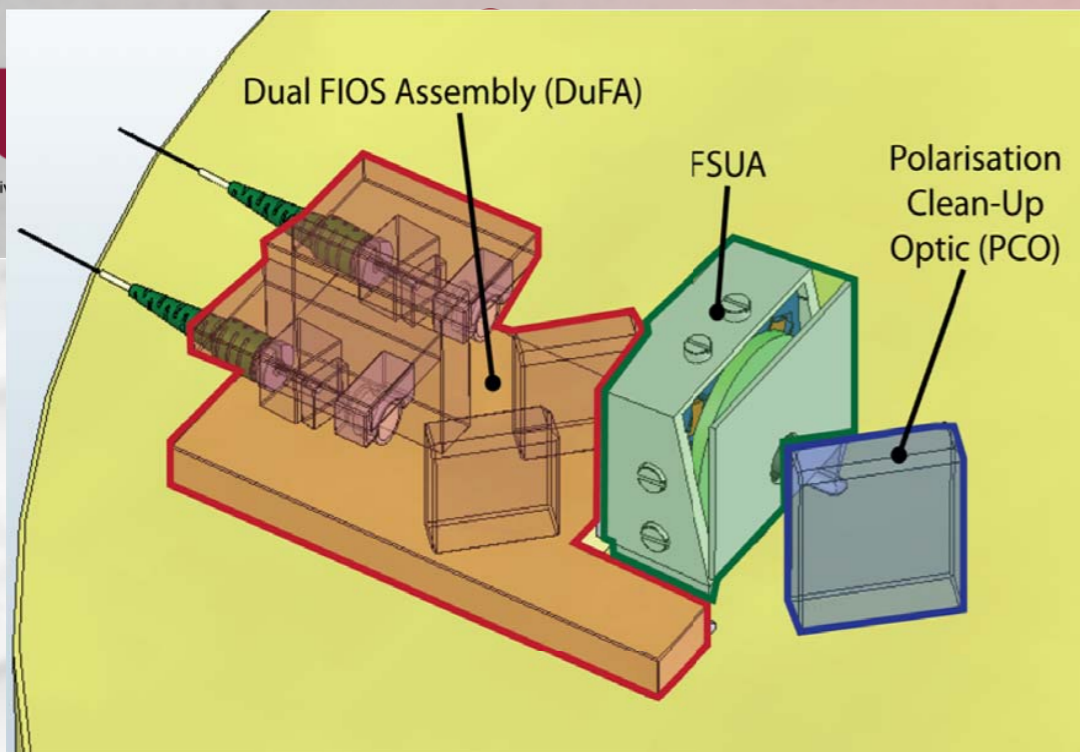
# Face arrière



LISA OB Concept Layout (B-Side) V1.1, Ewan Fitzsimons, September 2020

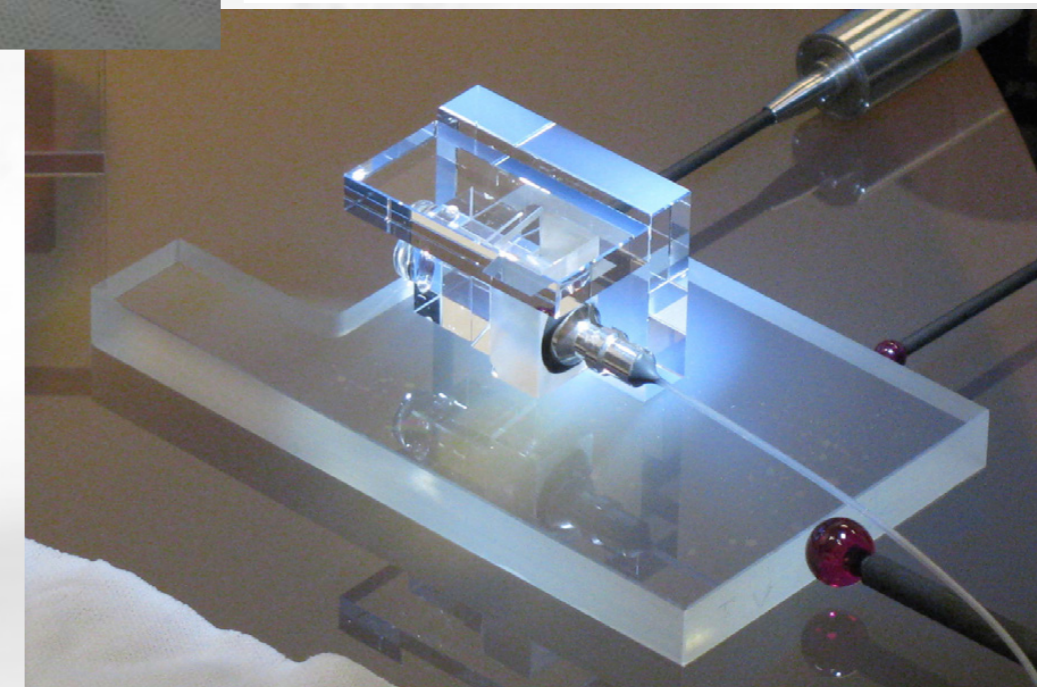


# Injection fibre





## 3 éléments




- FIOS : Fiber injection Optical System
  - évolution de l'injecteur LISA Pathfinder
  - conception monolithique
  - 2 fibre avec polarisations orthogonales
- FSU : Fiber Switch Unit
  - tourne la polarisation de  $90^\circ$  (lame 1/2 onde orientable)
- Polarisation Clean-up Optics
  - filtre la polarisation voulue en sortie

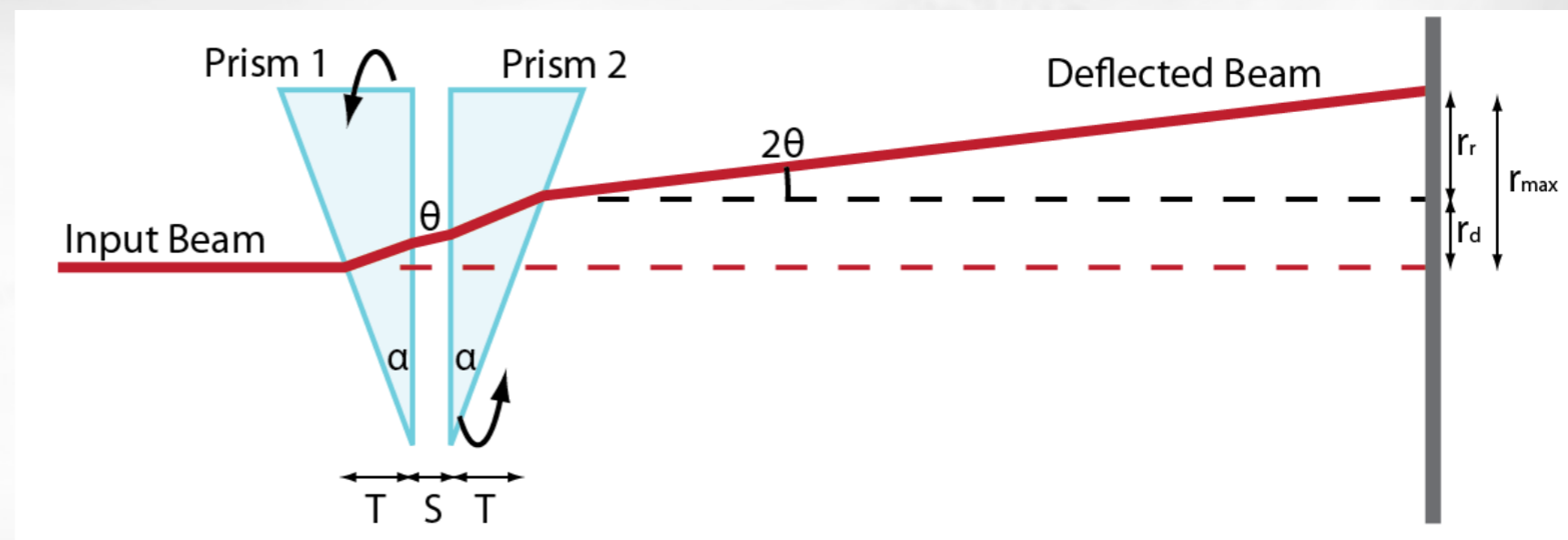
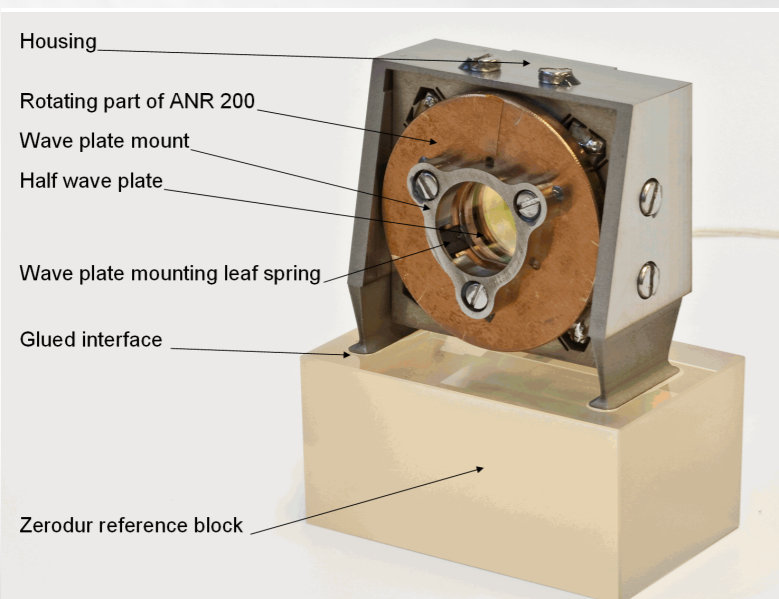
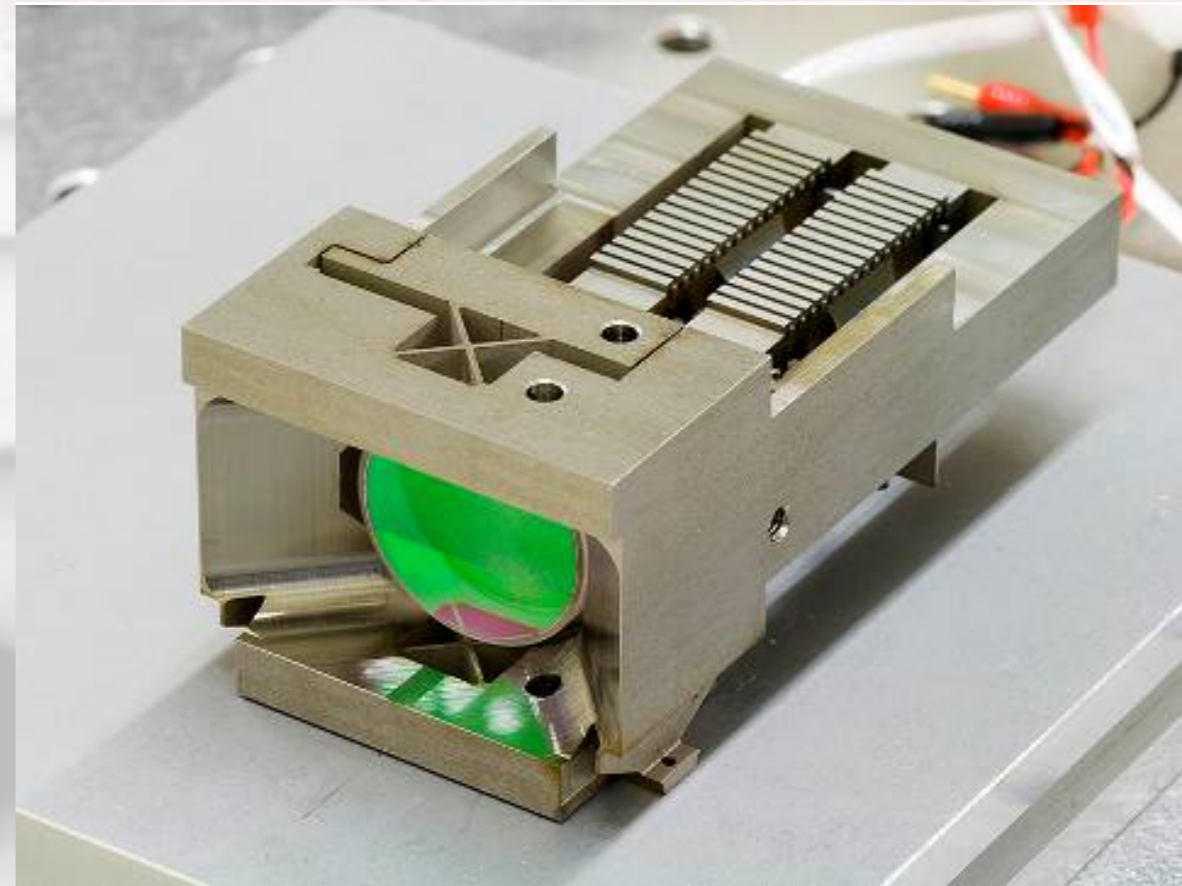


## Option 1

-  In-plane : pied déformable (1 fois)
-  Out-of-plane : pointage miroir (piezo)

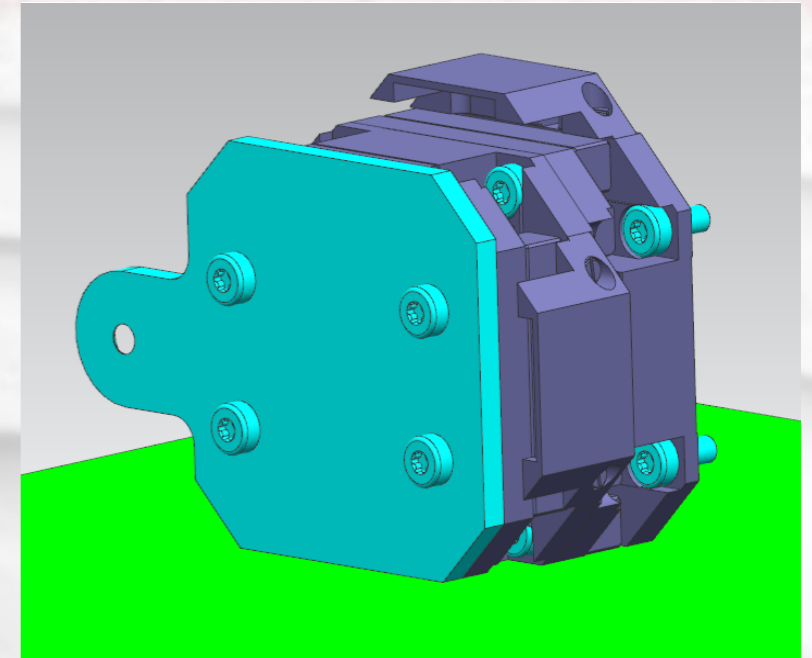
## Option 2

-  Risy prism scanner (RPS)
-  2 degrés de liberté
-  Utilisation des mécanismes FSU



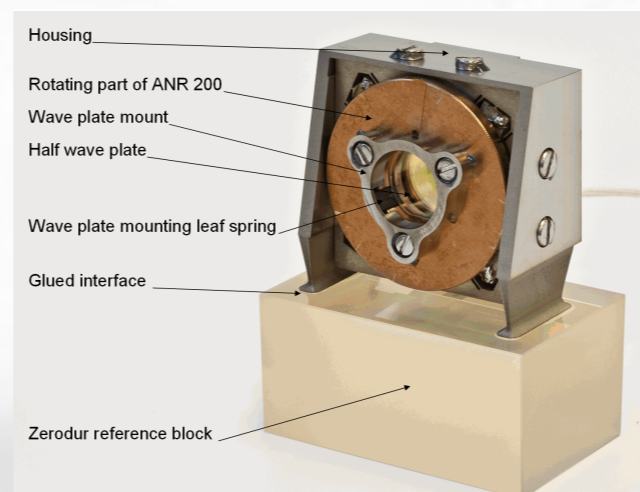
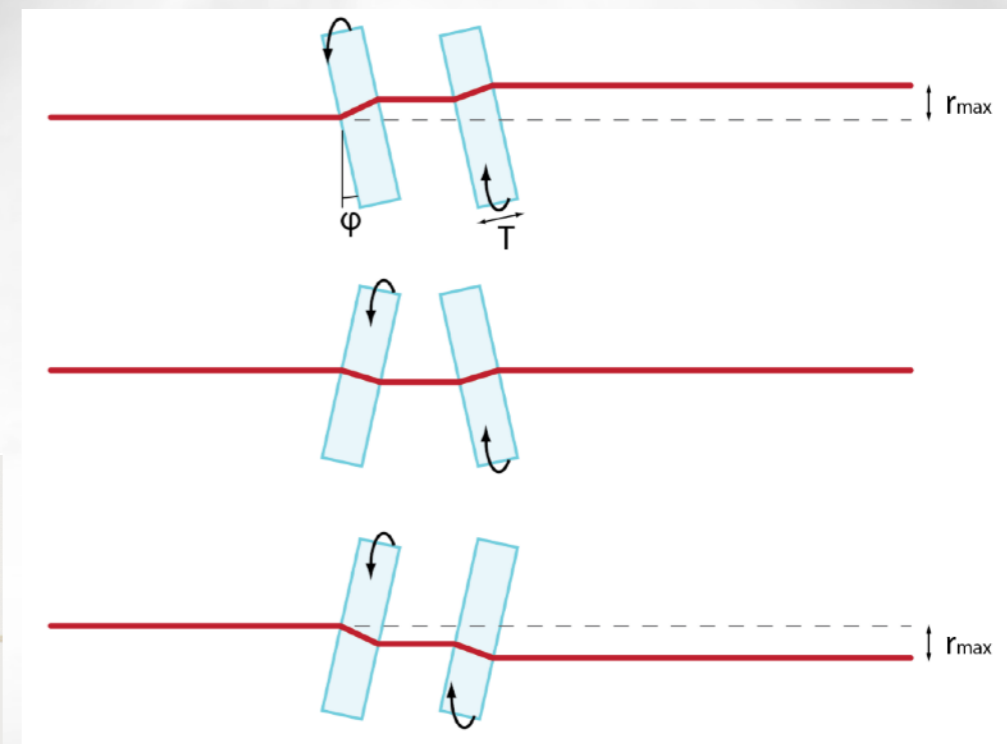
## Option 1

- Active Aperture
- Diaphragme se déplaçant sur 2 axes
- Agit en biaisant l'éclairement sur la photodiode (asymétrie de front d'onde)



## Option 2

- Beam Alignment Mechanism
- Même principe que RPS mais lame à faces parallèles inclinées
- Agit directement sur l'alignement du faisceau entre télescope et banc optique
- Ré-utilise les actuateurs FSU





# Mesures de phase

On souhaite mesurer la phase d'un signal par rapport à une porteuse fixe :

Approximation de bande passante étroite  $s(t) = A \cos(2\pi ft + \varphi(t))$

$$\text{avec : } \frac{d\varphi}{dt}(t) \ll 2\pi f$$

Principe général : multiplication par un signal sinusoïdal

Signaux en phase et en quadrature

$$s_I(t) = s(t) \times \cos(2\pi ft) = +\frac{A}{2} \cos \varphi(t) + \frac{A}{2} \sin(4\pi ft + \varphi(t))$$

$$s_Q(t) = s(t) \times \sin(2\pi ft) = -\frac{A}{2} \sin \varphi(t) + \frac{A}{2} \sin(4\pi ft + \varphi(t))$$

$$I(t) = h_B(t) * s_I(t) = +\frac{A}{2} \cos \varphi(t) \text{ In phase}$$

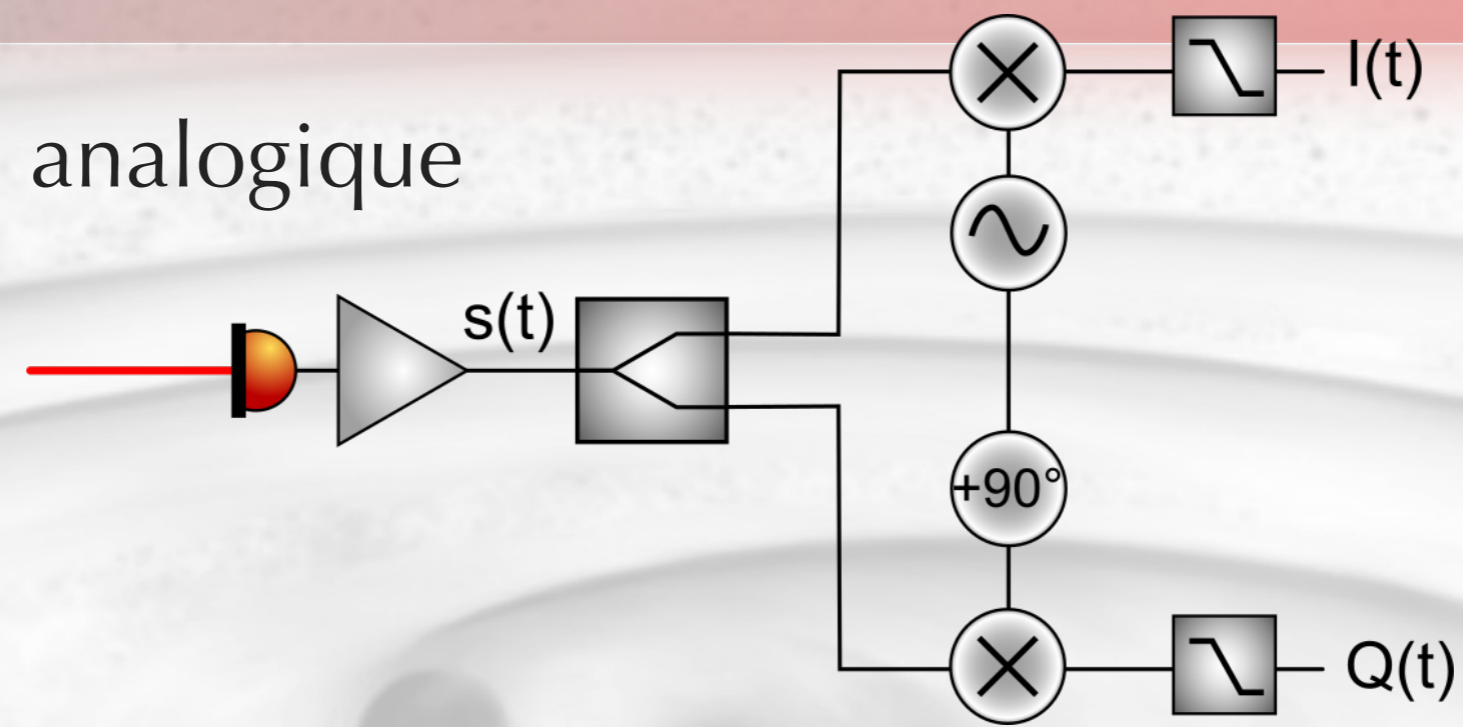
$$Q(t) = h_B(t) * s_Q(t) = -\frac{A}{2} \sin \varphi(t) \text{ In quadrature}$$

avec  $h_B$  : Filtre passe-bas de bande passante  $B < f$

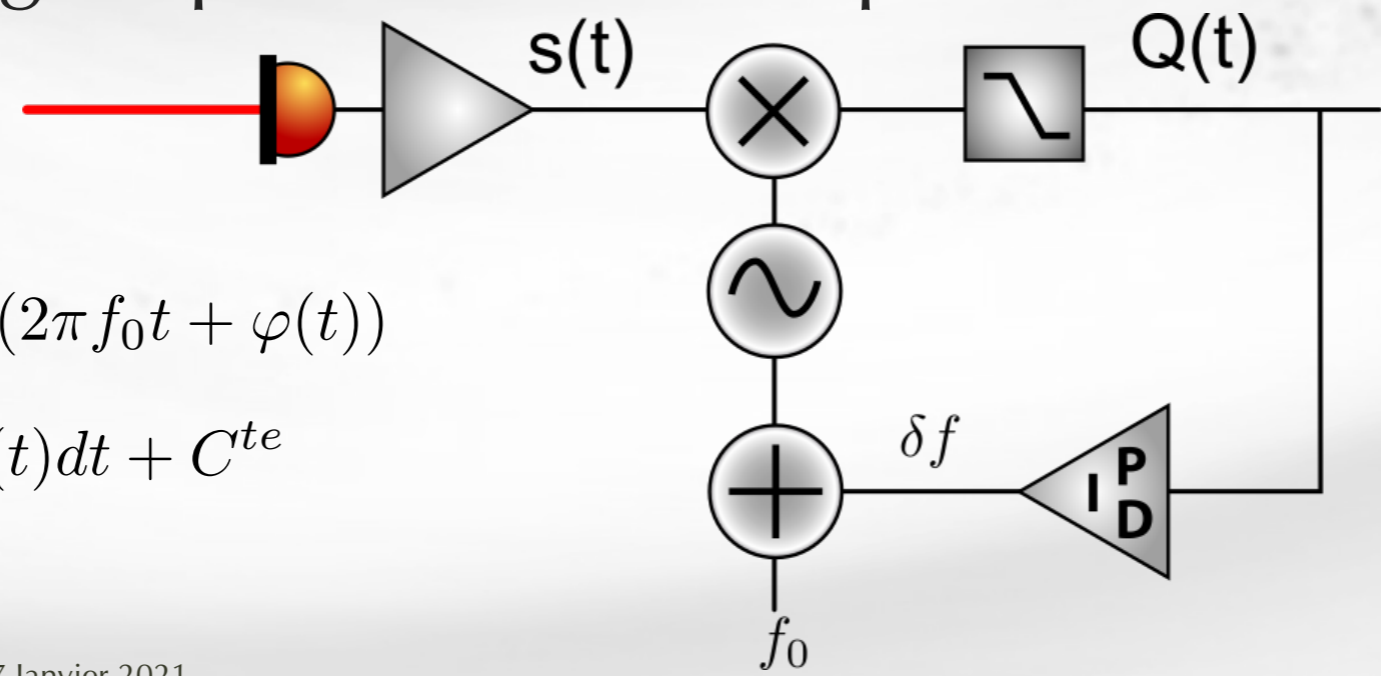
Le rapport  $Q/I$  donne la phase  $\frac{Q}{\sqrt{I^2+Q^2}}$  l'amplitude

Si la phase est faible :  $Q(t) \Rightarrow$  phase,  $I(t) \Rightarrow$  amplitude

## Démodulation analogique



On peut aussi asservir l'oscillateur local (en phase ou en fréquence) pour compenser les fluctuations de phase (et obtenir un signal parfaitement en quadrature) => PLL (Phase locked loop)

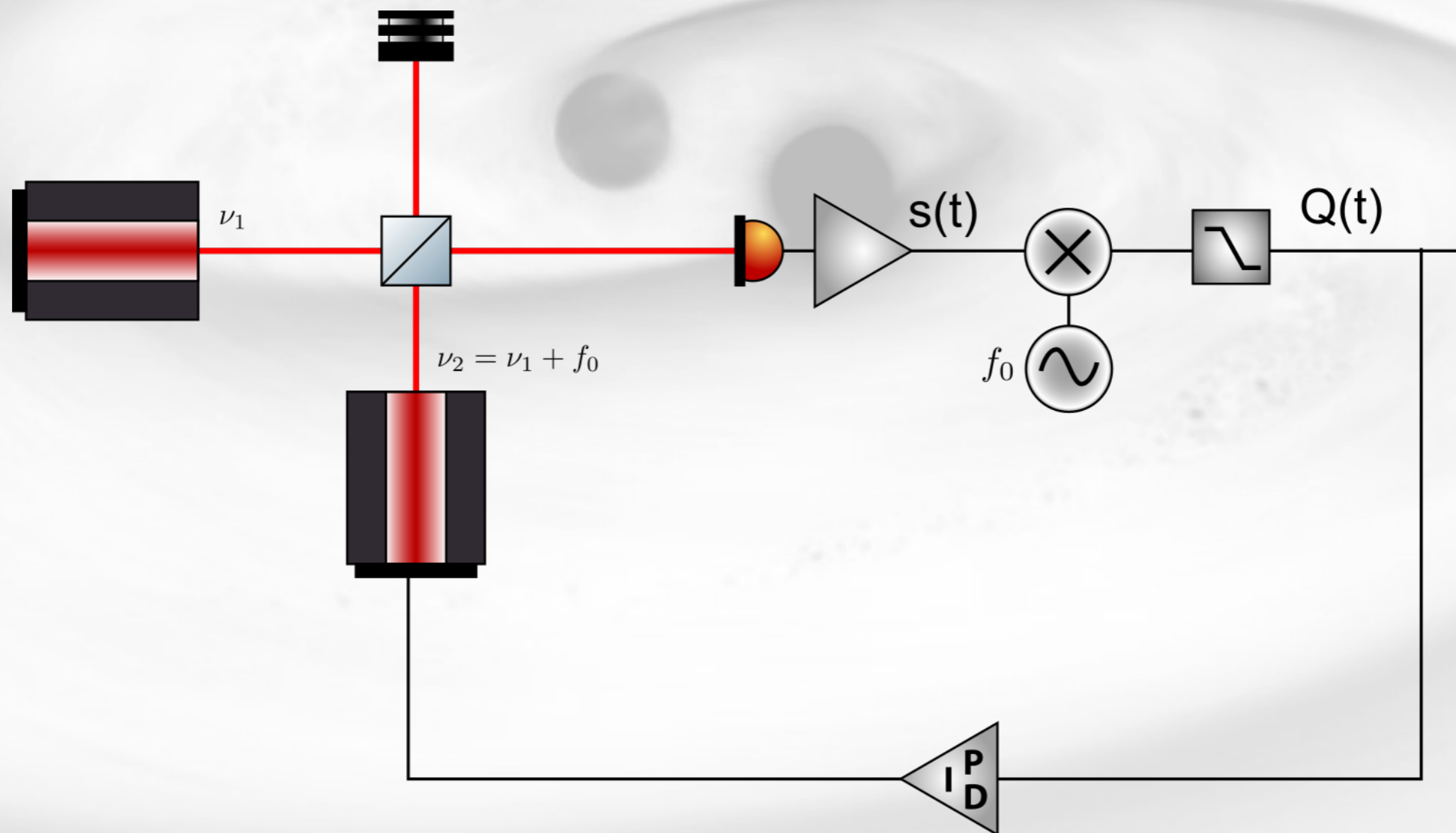


$$s(t) = A \cos(2\pi f_0 t + \varphi(t))$$

$$\Rightarrow \varphi(t) = \int \delta f(t) dt + C^{te}$$



- Technique utilisé pour la verrouillage en phase d'un laser sur un autre
- Très commun dans les expériences de labo
- Similaire dans LISA, mais mesure de phase différente



## Demodulation analogique ou numérique ?

### Avantages analogiques:

-  Assez simple à mettre en oeuvre
-  La numérisation se fait sur des signaux de faible dynamique (en fréquence)





### Désavantages analogiques:

-  Bruit de phase résiduel lié à la stabilité de l'oscillateur RF, en particulier s'il est ajustable
-  Perte de la moitié du signal par démodulation
-  Bruits corrélés et décorrélés, fonctions de transfert dépendant de l'environnement, calibrations individuelles nécessaires

### Avantages numériques :

-  Pas de pertes de signal
-  Flexibilité des filtres et boucles d'asservissement, reconfiguration possible par programmation.
-  Bruits numériques maîtrisés et parfaitement reproductibles, pas de sensibilité à l'environnement
-  Synchronisation plus simple par rapport à l'horloge locale

### Désavantages numériques:

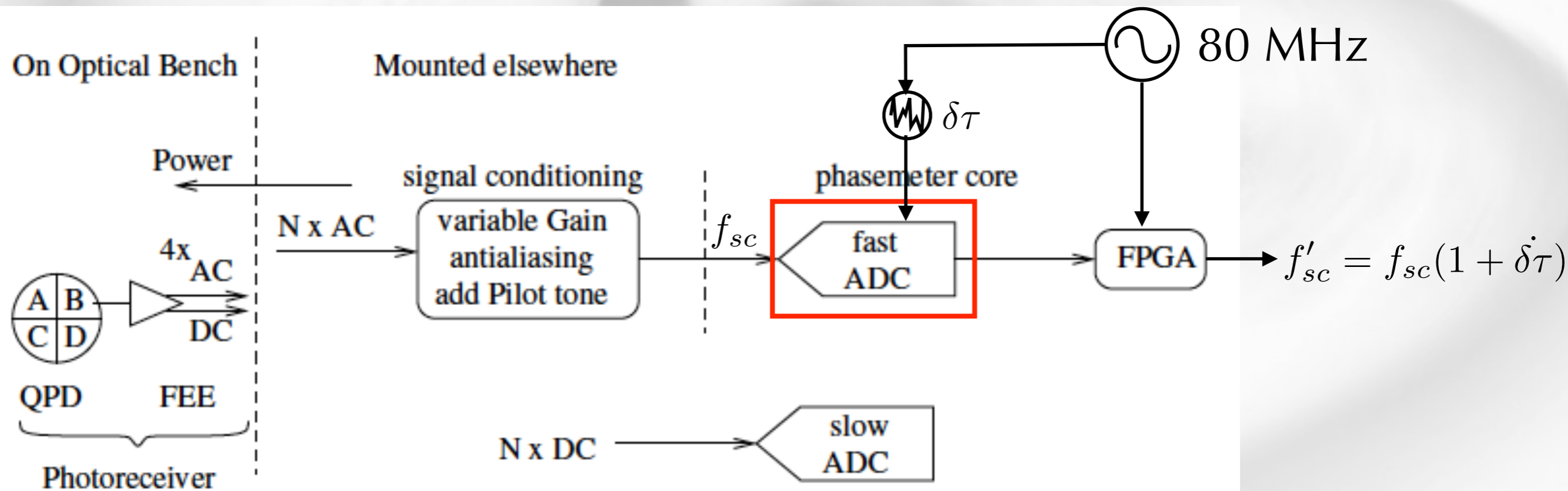
-  Bruit de quantification
  -  bruit en  $1/f$  après intégration de la fréquence numérisée vers la phase
-  Nécessité d'un échantillonnage rapide et 'propre'
  -  principal facteur limitant (pour LISA) : gigue d'acquisition des ADC

## Cahier des charges:

-  Numériser des signaux entre 5 et 25 MHz
-  Déterminer la phase avec une stabilité de  $1 \mu\text{cycle}/\sqrt{\text{Hz}}$  entre 1 mHz et 10 Hz, par rapport à l'horloge locale
  -  i.e.  $40 \text{ fs}/\sqrt{\text{Hz}}$  pour un signal à 25 MHz ...
-  Décimer / filtrer les mesures à quelques Hz, sans bruit additionnel
-  Fonctions auxiliaires :
  -  Mesures des bruits/dérives relatives des horloges
  -  Détermination de la distance inter-satellite
  -  Transfert de données entre satellites
  -  Verrouillage en phase des laser,
  -  Acquisition de la constellation par FFT (analyseur de spectre)

 Technologie basée sur une PLL numérique (All Digital PLL : ADPLL)

- 🌀 Synchronisation des mesures avec l'horloge locale
- 🌀 La principale source de bruit de phase résiduel est lié à la numérisation (ADC) en entrée
- 🌀 Bruit interne à l'ADC : différence entre le front d'horloge de numérisation et la numérisation effective



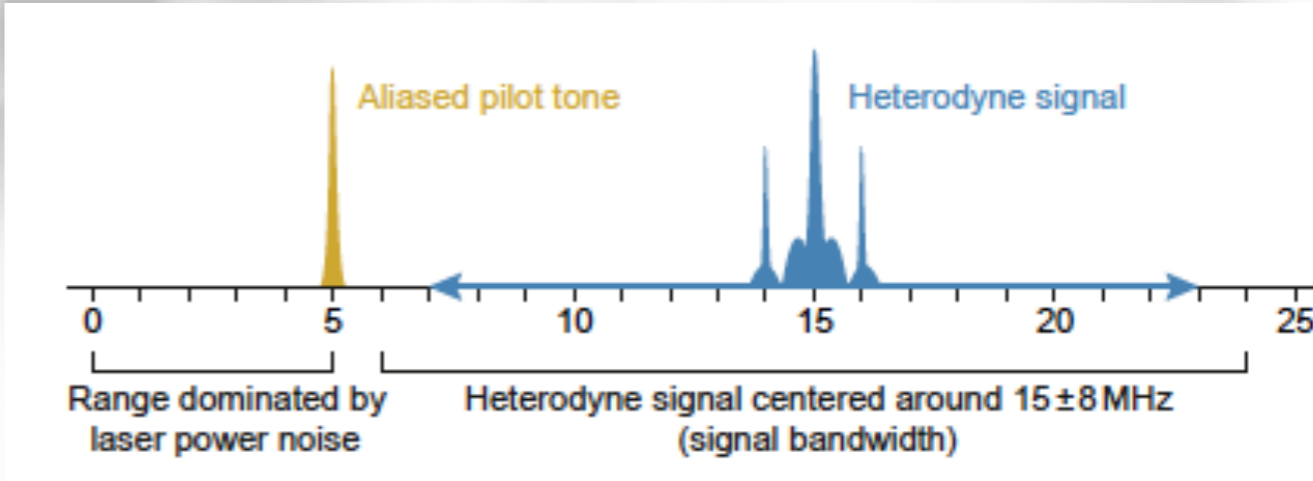
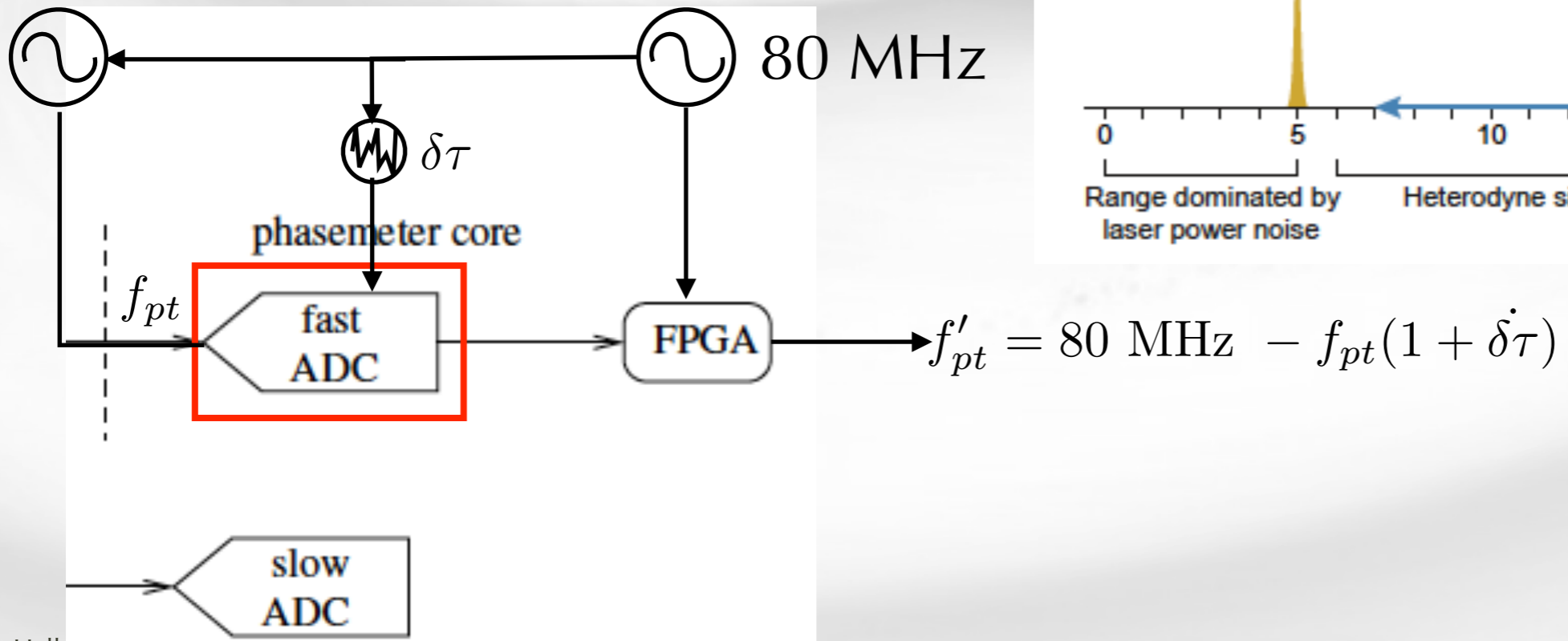
## Synchronisation des mesures avec l'horloge locale

- Solution technique :** mesurer un battement de fréquence connu avec le même ADC
- Crucial :** générer un signal RF de faible bruit de phase par rapport à l'horloge locale
- Subtilité :** utiliser l'aliasing pour maximiser l'effet
- Le signal replié doit rester hors de la bande passante scientifique (7-20 MHz)**

**Signal corrigé :**

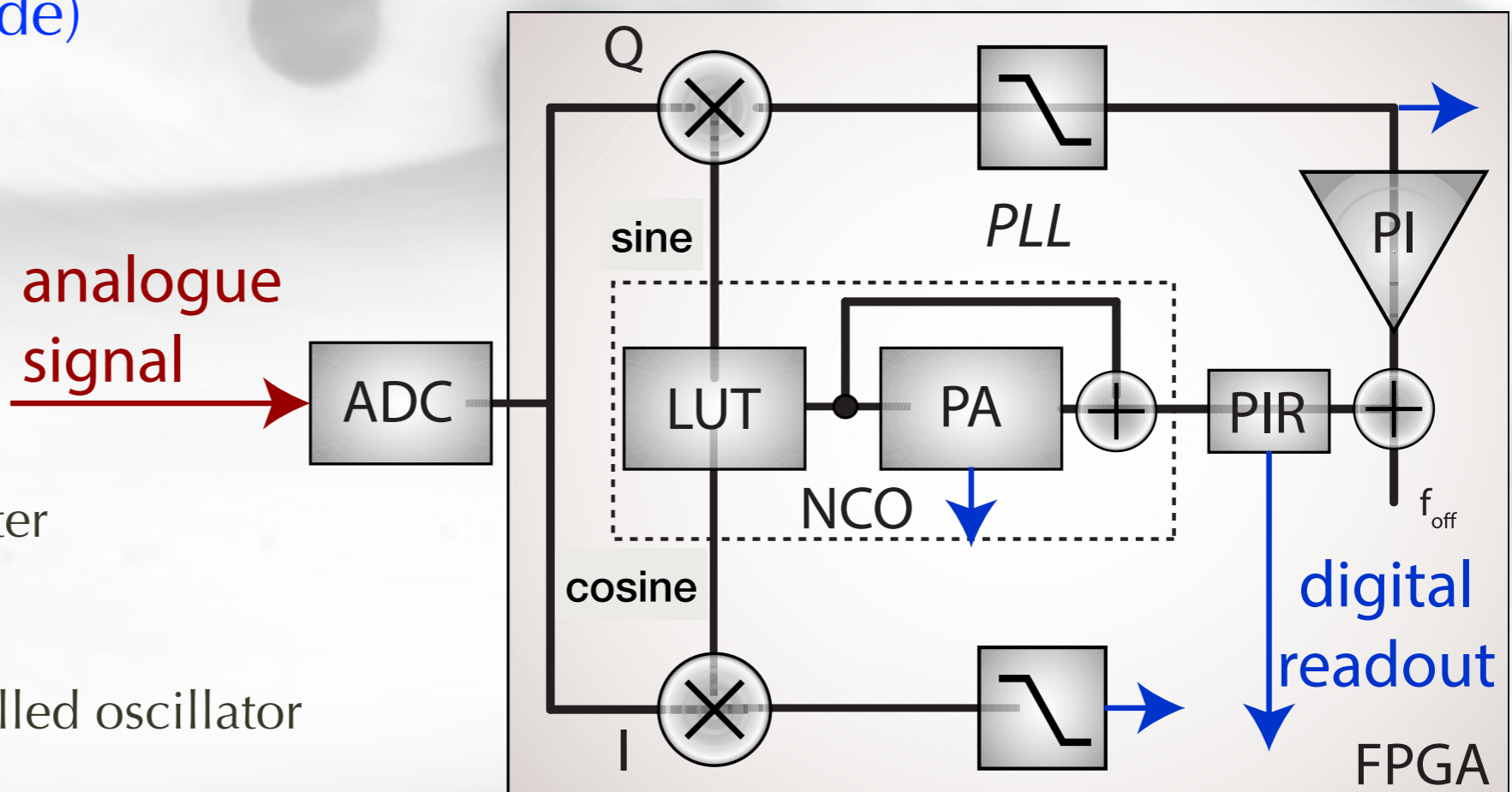
$$f_{sc} = \frac{75 \text{ MHz}}{80 \text{ MHz} - f'_{pt}} f'_{sc}$$

75 MHz



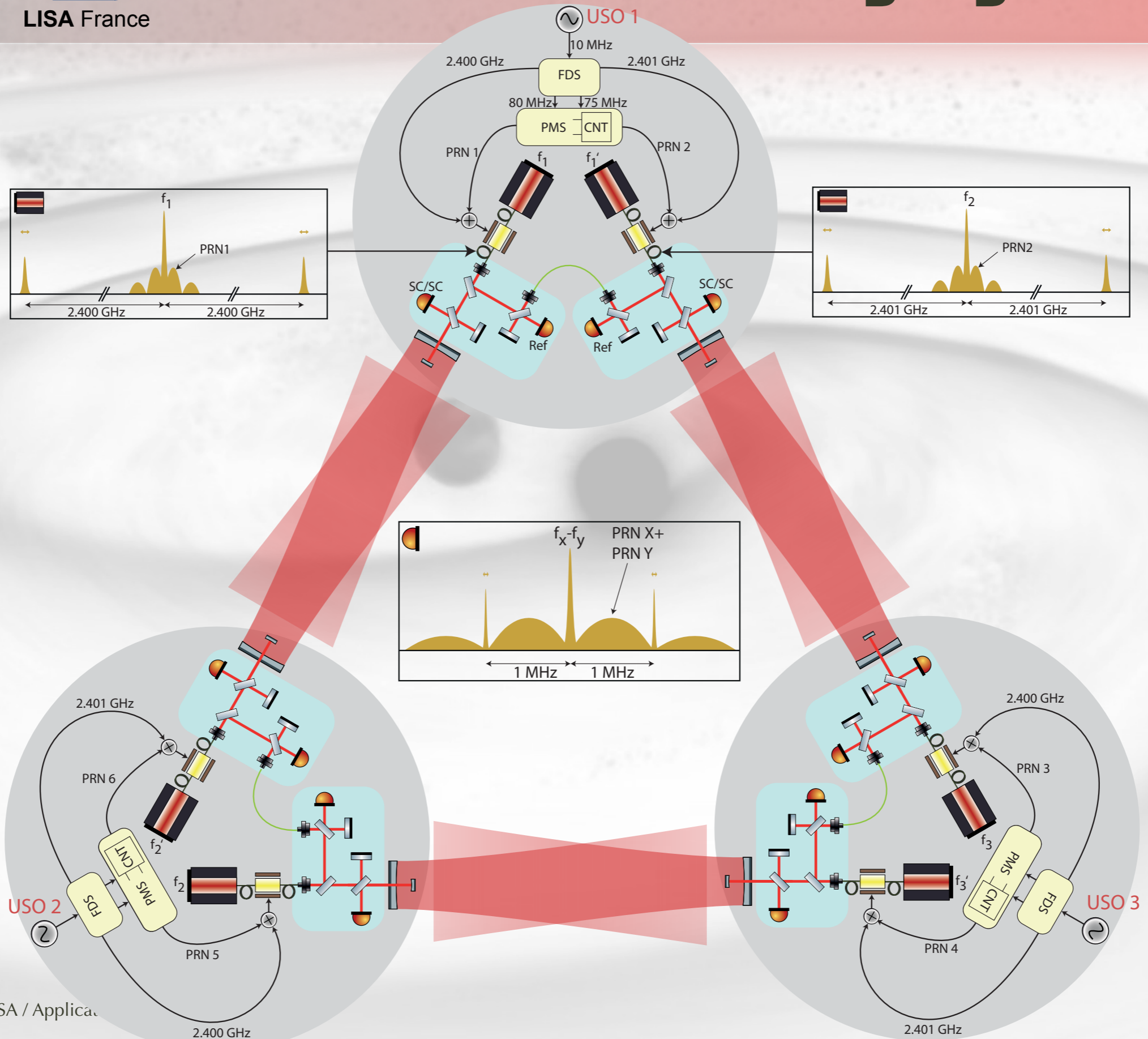
## Principe de l'ADPLL

- Implémenté dans un FPGA, 4 voies par (segment de) photodiode : Science, sideband / sideband (x2), pilot tone
- La mesure principale est dans le PIR: contient l'incrément de phase par front d'horloge, i.e. la fréquence ...
- Si la DPLL n'est pas assez 'rigide' : utilisation aussi de I et Q (donne aussi l'amplitude)



PIR: Phase increment register  
 PA : phase accumulator  
 LUT : Look-Up Tables  
 NCO : Numerically controlled oscillator

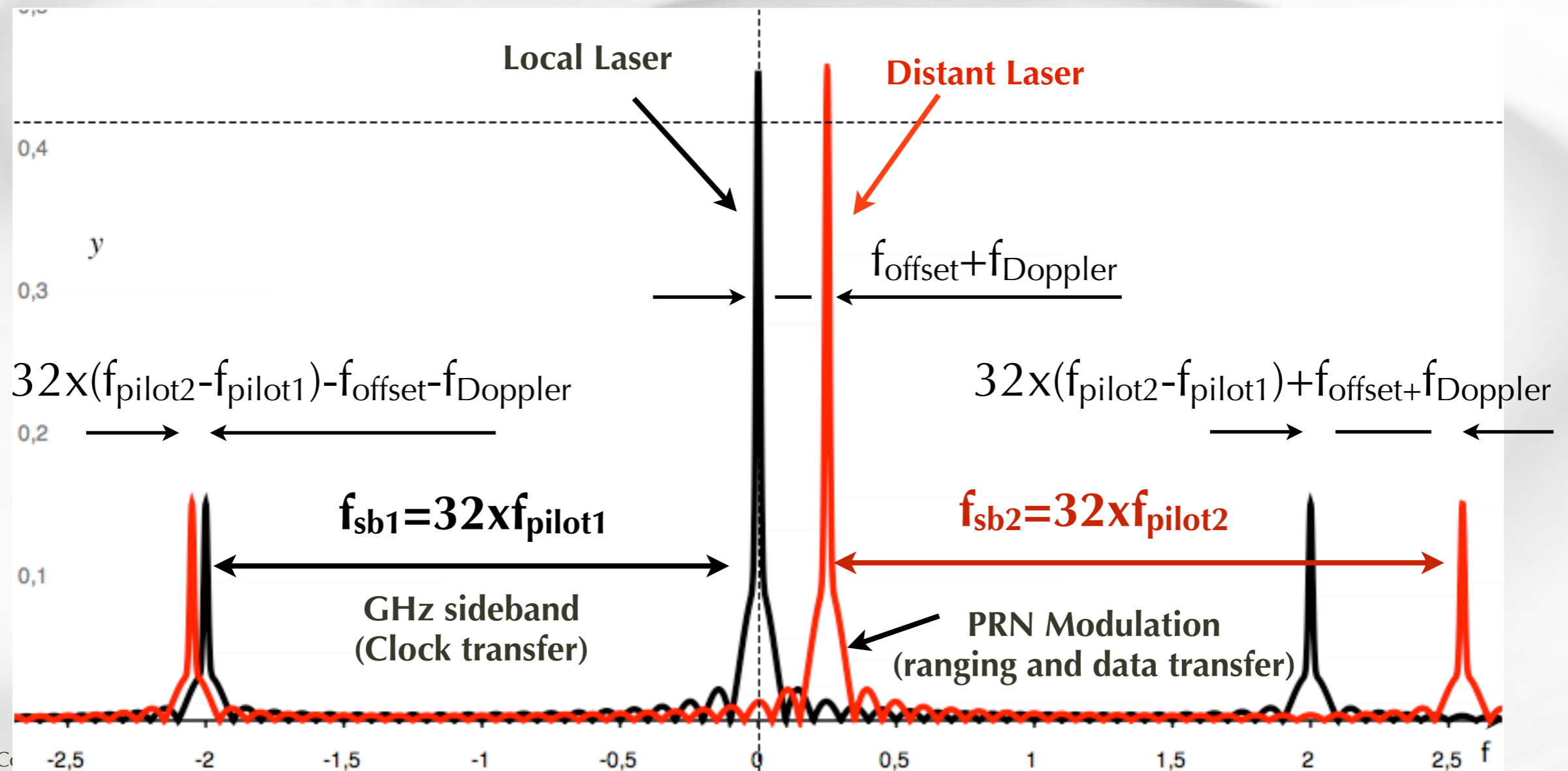
# LISA Clock and ranging scheme



3 beatnotes, with at least 2 in the photodiode bandpass (5-25 MHz)

Optical powers :

- ~100's pW at carrier frequency (science signals),
- ~10's pW in sidebands (~2.5 GHz from carrier, clock synchronisation),
- ~1's pW for PRN code (ranging)

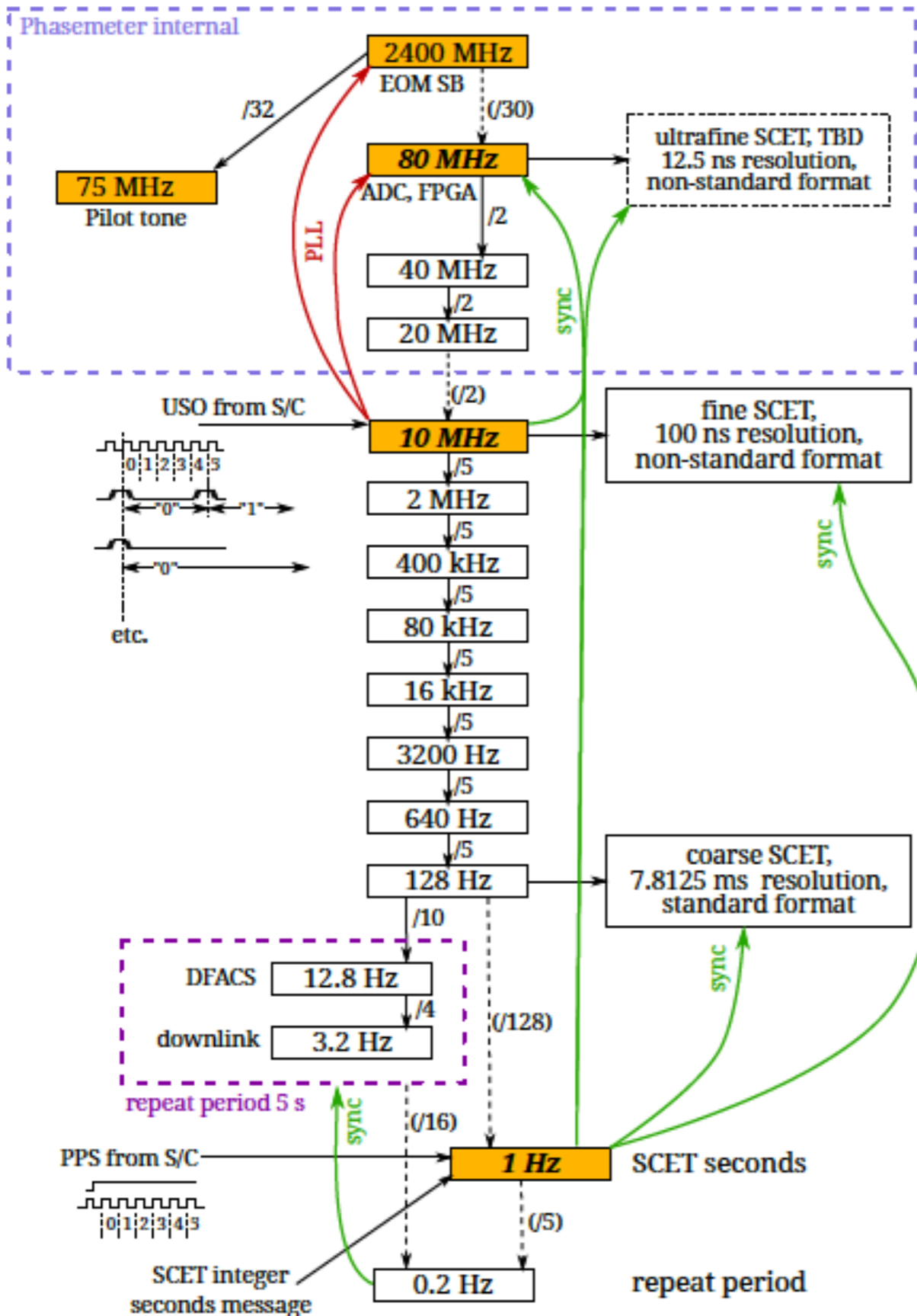





# Proposal for coherent frequencies and data rates

## Scheme A: 3.2Hz / 12.8 Hz

For discussion. This is one possible chain for illustration.



# Phasemètre LISA

 Vue globale de la distribution de fréquences (à confirmer)

- 🌐 Il y a d'autres moyens de mesurer une phase ...
- 🌐 LISA Pathfinder : battement à fréquence fixe de 1 kHz
  - 🌐 => phasemètre à transformée de Fourier monobin
  - 🌐 Pas besoin de correction de jitter des ADC en raison de la faible valeur de la fréquence porteuse
  - 🌐 Pas utilisable pour LISA (haute fréquence, porteuse variable, ...)
- 🌐 Compteurs : mesures des temps de passage par 0 du signal
  - 🌐 **Avantage :**
    - 🌐 Peu sensible à la forme exacte du signal
  - 🌐 **Inconvénient :**
    - 🌐 Sensible à la référence de zéro de l'instrument et au bruit à faible amplitude du signal
    - 🌐 Possibilité de suivre plusieurs fréquences simultanément ?
  - 🌐 => pas avantageux pour LISA (signaux 'purement' sinusoïdaux)



# Tilt-to-Length Coupling

Doc de ref pour LISA :

LISA Tilt-to-Length and Optical Alignment Analysis, LISA-UKOB-INST-TN-004

TTL

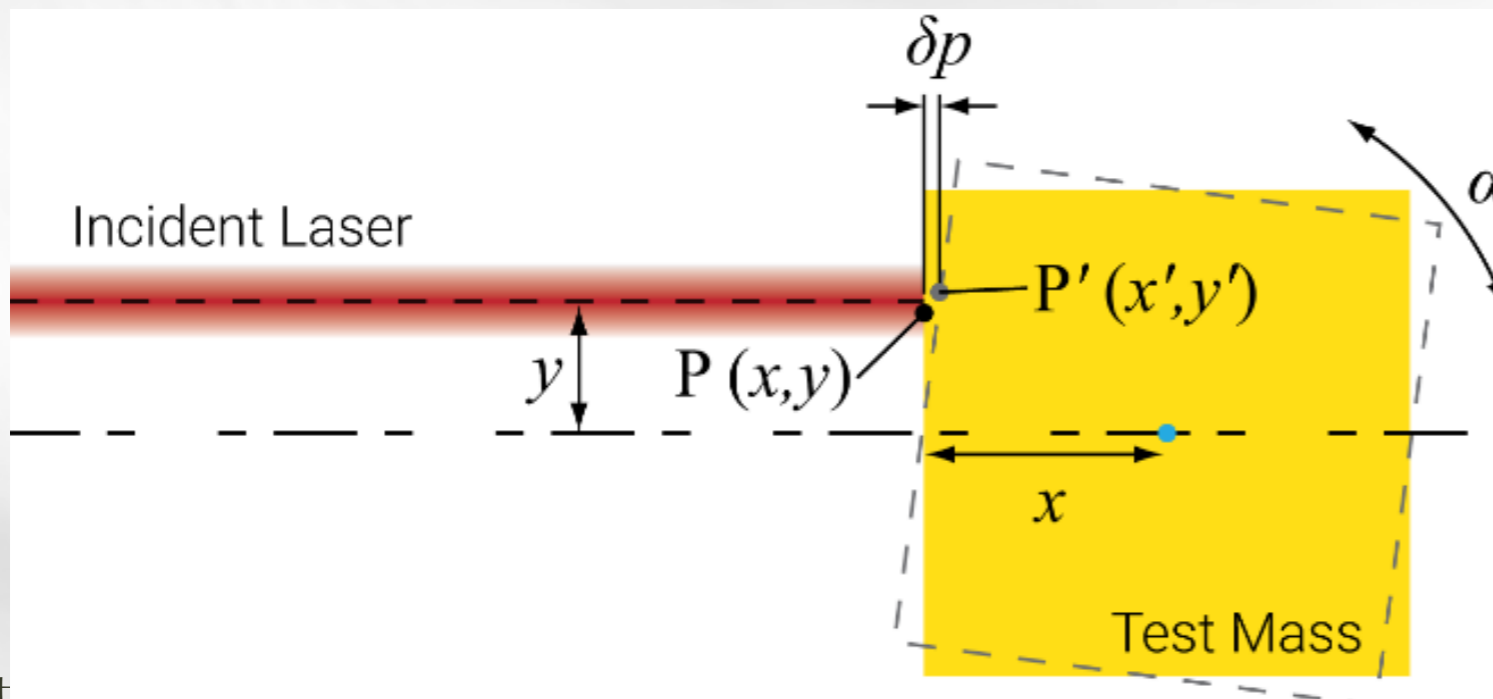
tout mécanisme de couplage entre une rotation du faisceau par rapport au système optique et la phase longitudinale mesurée par l'interféromètre

Typiquement deux 'origines' :

Alignement des composants par rapport à l'axe du faisceau / au centre de rotation => effets géométriques

Dissymétries d'intensité et/ou de front d'onde à la surface du capteur

Exemple : couplage entre rotation OB/TM et désaxe faisceau



$$\delta p \approx y \cdot \sin \alpha$$

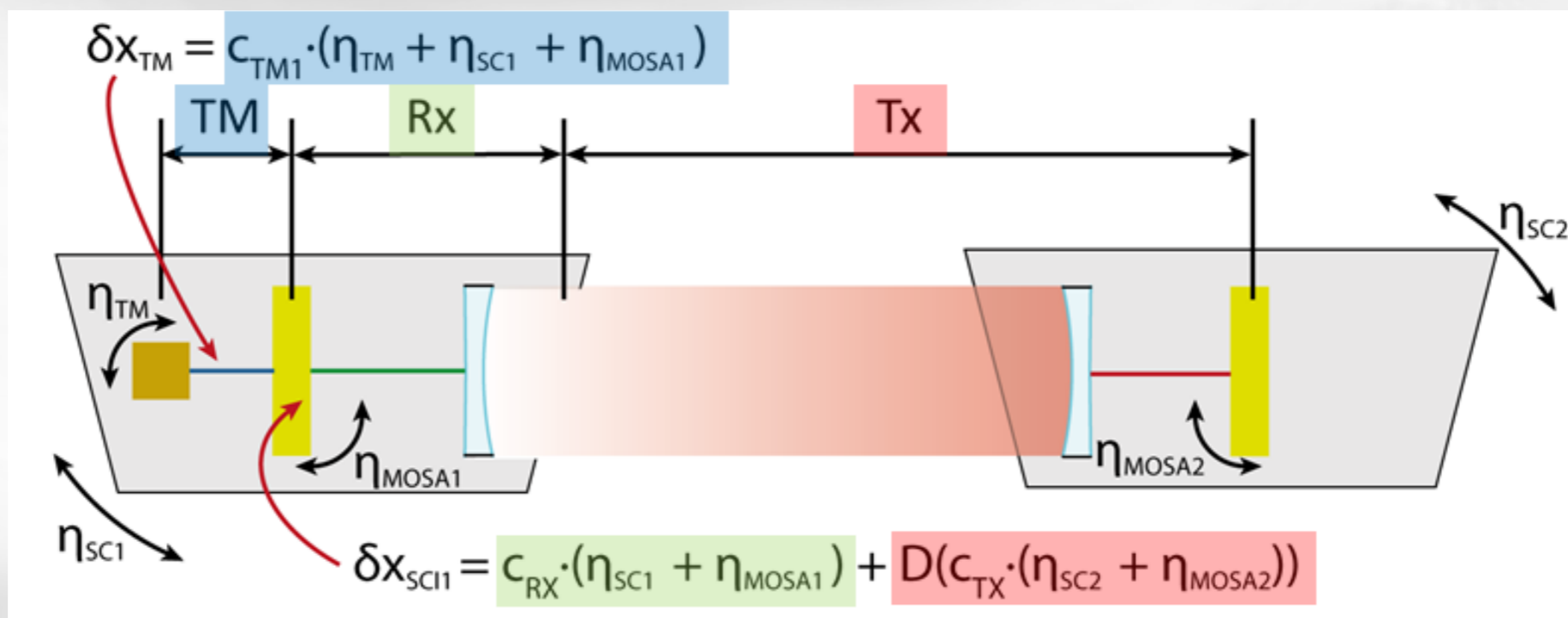
$$\Rightarrow \frac{\partial \delta p}{\partial \alpha} \approx y$$

$$\tilde{\alpha} \approx 10 \text{ nrad}/\sqrt{\text{Hz}}, \quad \delta \tilde{p} \leq 0,2 \text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}}$$

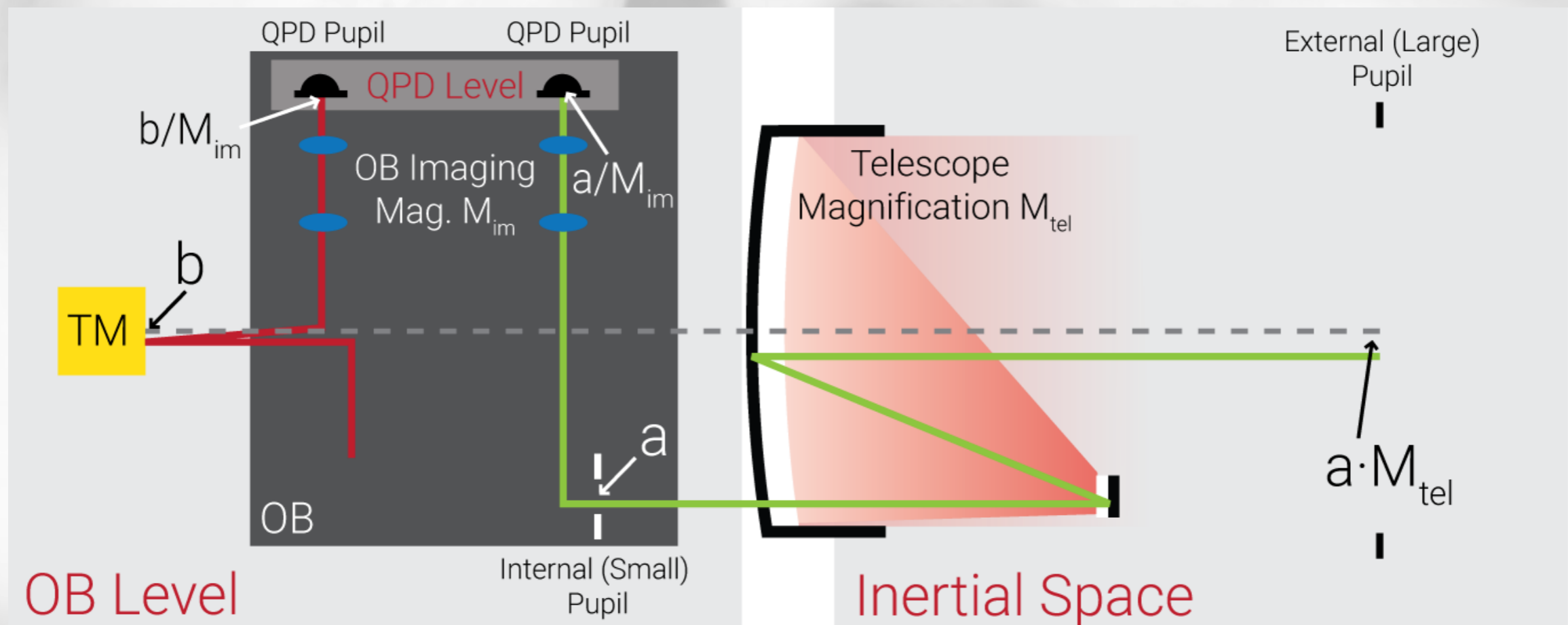
$$\Rightarrow \frac{\partial \delta p}{\partial \alpha} \leq 20 \text{ } \mu\text{m}/\text{rad}, \text{ spec TTL}$$

$$\Rightarrow y \leq 20 \text{ } \mu\text{m}, \text{ précision d'alignement}$$

- La situation de LISA est plus complexe vis-à-vis du TTL et nécessite la prise en compte de nombreux effets locaux et 'distants'
- Contributeurs au TTL d'une mesure en bout de bras séparés en 3 ensembles :
  - Tx** : couplage avec l'orientation du banc distant (i.e. lié à la 'qualité' du faisceau émis et les alignements internes du S/C distant) par rapport à un ref. inertiel
  - Rx** : couplage avec l'orientation du banc local par rapport au même ref. inertiel (i.e. lié à la qualité de 'réception' du faisceau et les alignements OB et telescope)
  - TM** : couplage avec l'orientation relative de la TM par rapport au banc (i.e. lié à l'alignement relatif entre le banc optique et la TM)
- En vol, ces différentes contributions sont 'mêlées' et retardées par les combinaisons TDI (indispensable pour sortir le signal du bruit laser)

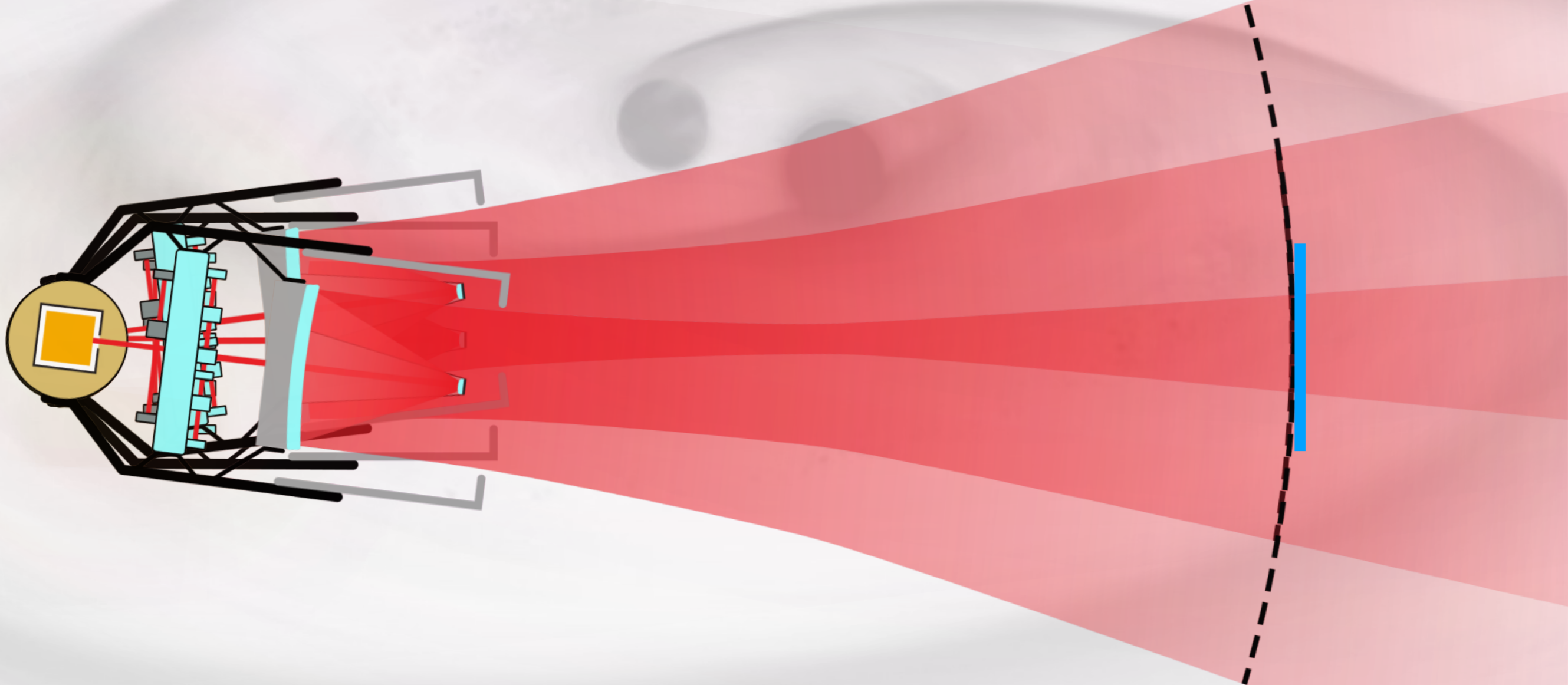


- Remarque : la valeur du TTL dépend du référentiel utilisé
- En raison de l'agrandissement (afocal) du telescope ( $\times 134$ ) : 1 mm/rad inertiel ('inter-satellite')  $\leftrightarrow$  7.5  $\mu\text{m}/\text{rad}$  sur le banc optique
- Le choix du référentiel dépend de l'angle de rotation considéré et du phénomène physique



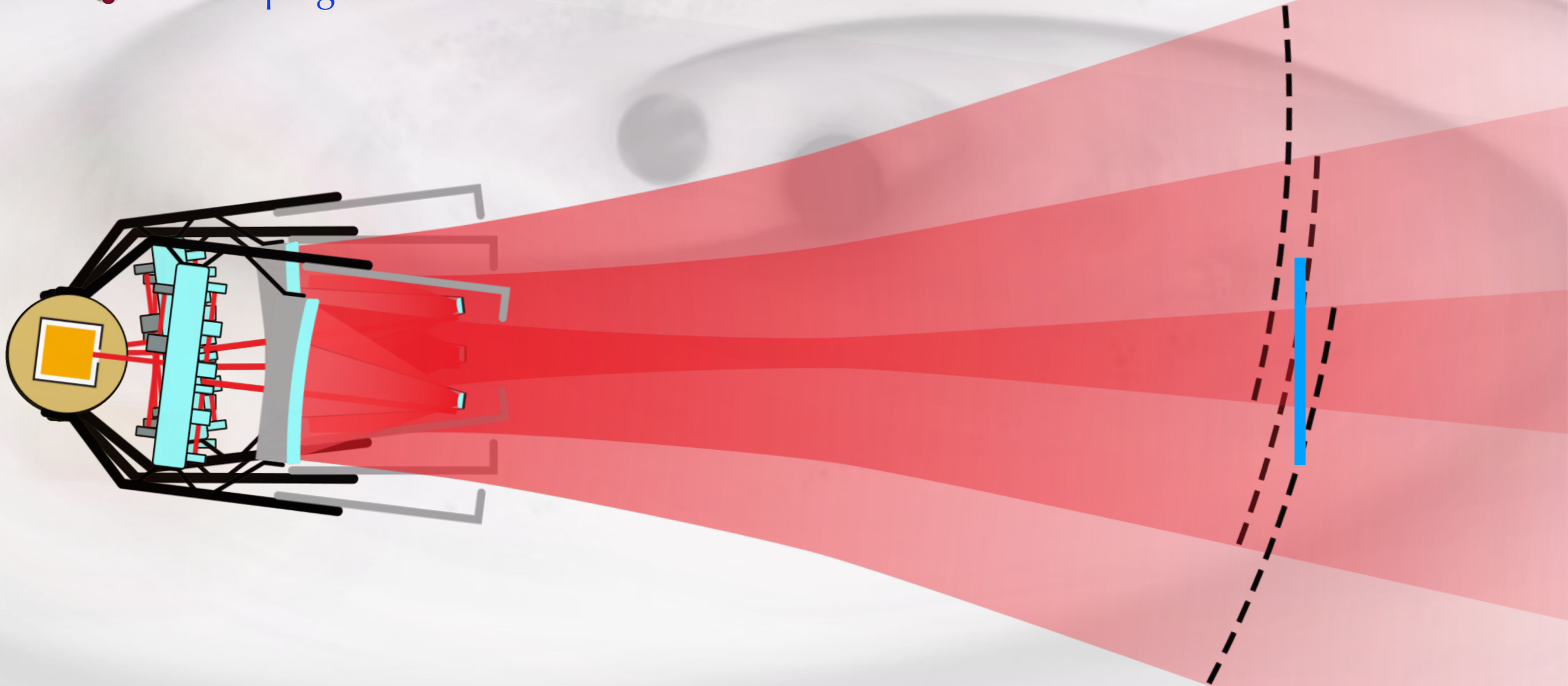
# Principaux contributeurs Tx

- Centrage du faisceau sur le diaphragme de la pupille 'interne' (petite) du telescope
  - Alignement parfait : le front d'onde à 2,5 Mkm est une sphère centrée sur la TM du satellite émetteur
  - => pas de couplage avec l'orientation du satellite







# Principaux contributeurs Tx

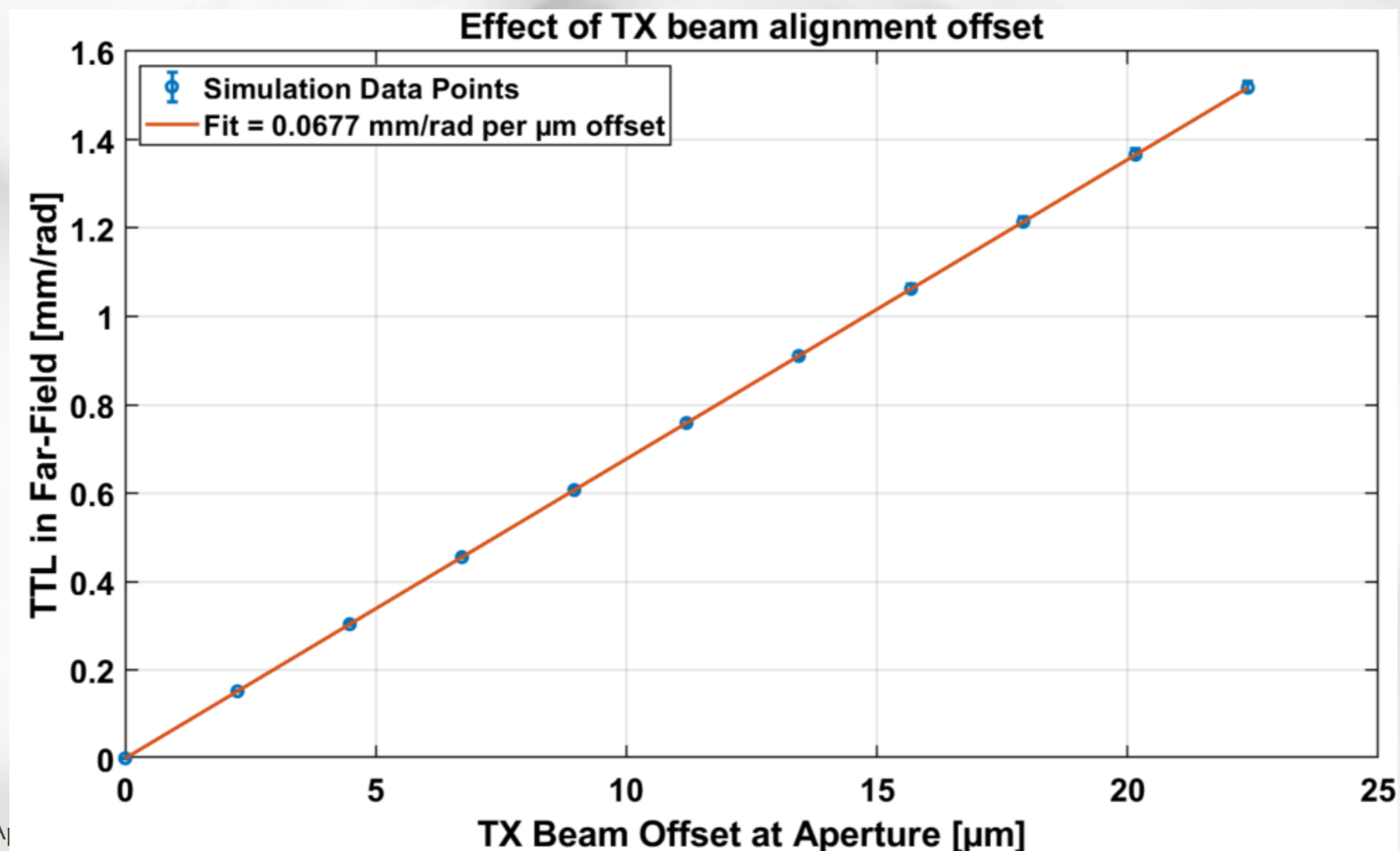
- Centrage du faisceau sur le diaphragme de la pupille 'interne' (petite) du telescope
  - Alignement imparfait : l'éclairement du telescope en emission n'est pas homogène (clip asymétrique du faisceau en sortie de banc) => tilt du front d'onde
  - => couplage avec l'orientation du satellite









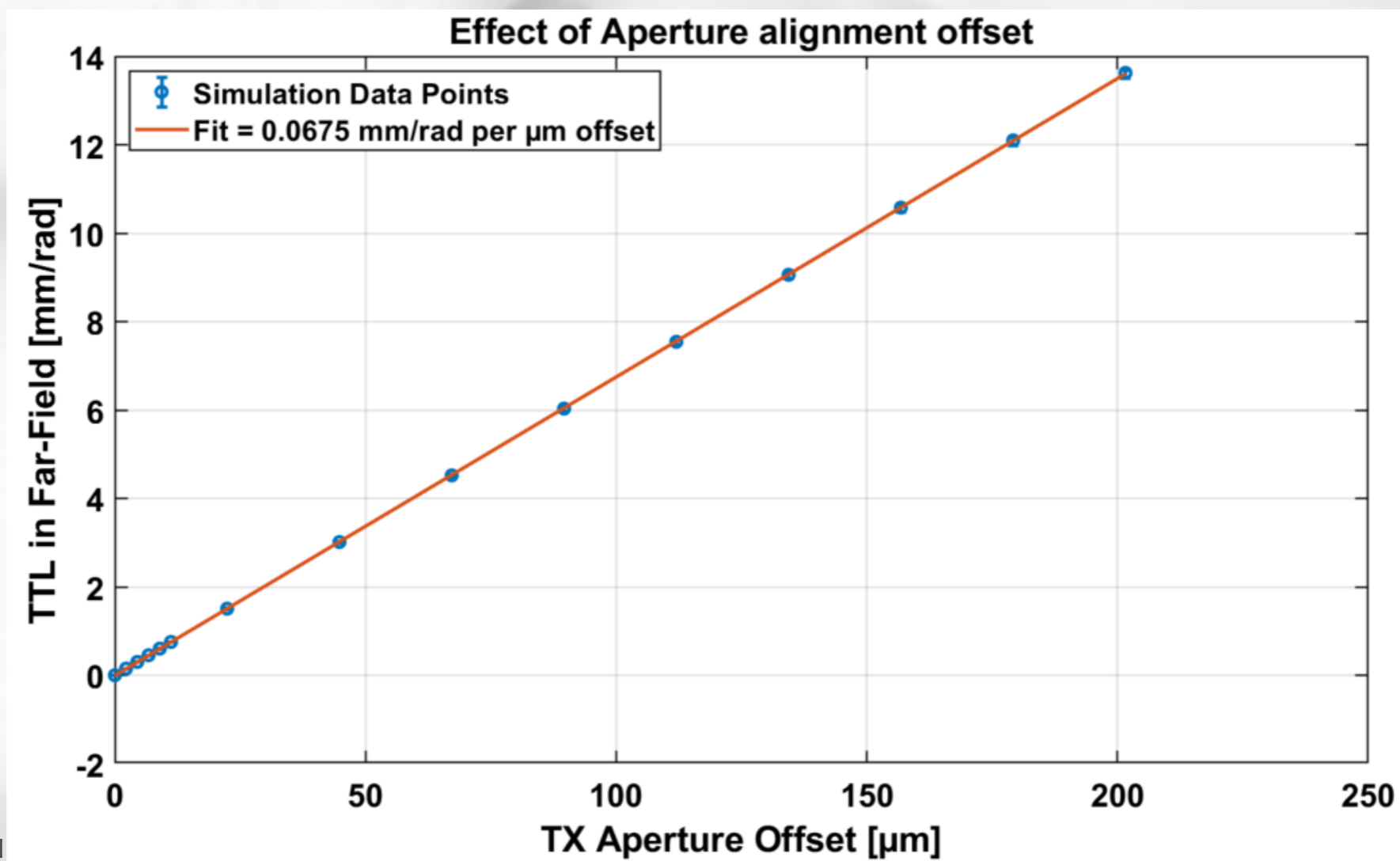
# Principaux contributeurs Tx

-  Centrage du faisceau sur le diaphragme de la pupille 'interne' (petite) du telescope
-  => calcul du TTL induit à partir de simulation de champ lointain pour un faisceau tronqué
-  Effet linéaire en fonction du décentrage de la pupille : 68  $\mu\text{m}/\text{rad}$  (inertiel) ou 0,51  $\mu\text{m}/\text{rad}$  (OB) par  $\mu\text{m}$  de décentrage
-  => 10  $\mu\text{m}$  de décentrage induisent un TTL de 0,7 mm / rad (inertiel)



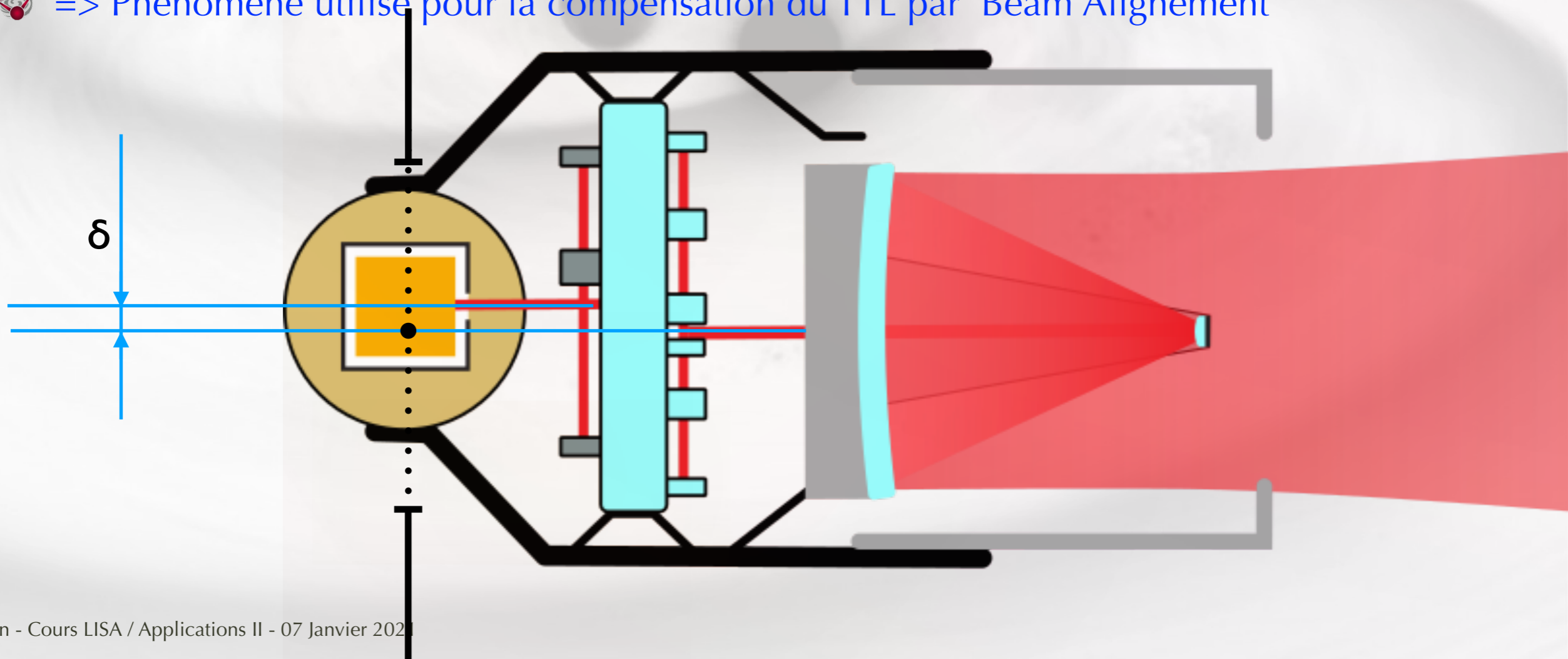
# Principaux contributeurs Tx

-  Centrage du diaphragme de sortie OB sur la pupille la pupille 'interne' (petite) du telescope
  -  => même phénomène physique que le désalignement du télescope (éclairage asymétrique du télescope)
  -  Subtile différence (faisceau tronqué + décentrage dans le télescope) mais résultats de simulation identiques : 68  $\mu\text{m}/\text{rad}$  (inertiel) ou 0,51  $\mu\text{m}/\text{rad}$  (OB) par  $\mu\text{m}$  de décalage du diaphragme
  -  => Phénomène utilisé pour la compensation du TTL par 'Active Aperture'



# Principaux contributeurs Tx

- 🌀 Alignement de la pupille image (en émission par le télescope) par rapport à l'axe sensible (émis par le banc optique vers la TM)
  - 🌀 Effet purement géométrique (bras de levier: 1 mm de décalage induit 1 mm/rad de TTL)
  - 🌀 4 contributeurs identifiés
    - 🌀 OB : Alignements internes et incertitudes de localisation optique par rapport au référentiel mécanique ( $\sim 20 \mu\text{m OB} \Rightarrow 2,7 \text{ mm/rad inertiel}$ )
    - 🌀 MOSA : incertitude sur la connaissance et l'alignement des pupilles OB et Telescope ( $30 \mu\text{m OB} \Rightarrow 4 \text{ mm/rad inertiel}$ )
    - 🌀 Telescope : incertitude sur la localisation de la pupille interne par rapport au référentiel mécanique ( $30 \mu\text{m OB} \Rightarrow 4 \text{ mm/rad inertiel}$ ) et incertitude sur la position relative des grandes et petites pupilles ( $\sim 1 \text{ mm}$ )
  - 🌀  $\Rightarrow$  Phénomène utilisé pour la compensation du TTL par 'Beam Alignment'



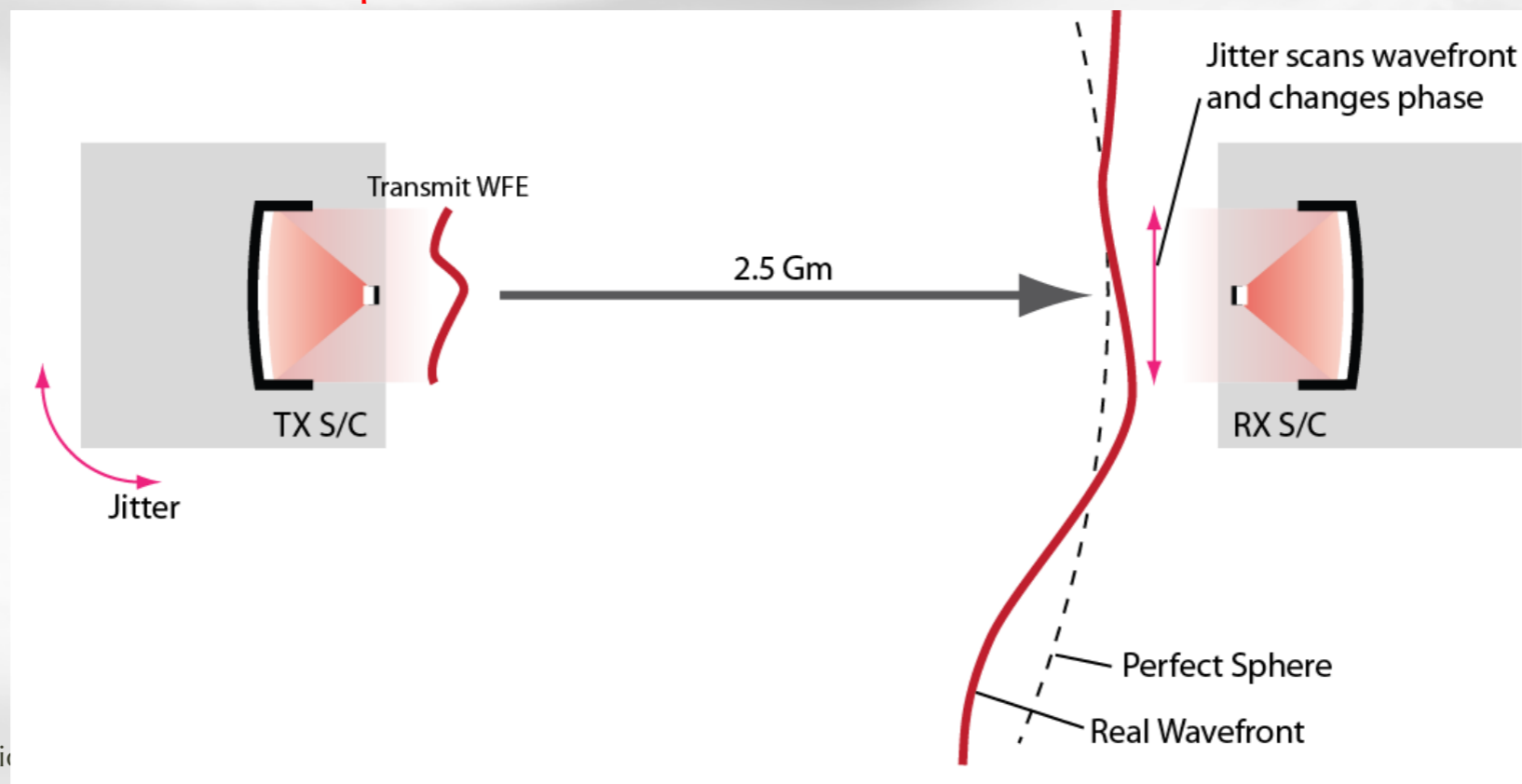
## 🌀 Déformation du front d'onde émis

### 🌀 Lié à la qualité optique du télescope

- 🌀 'granularité' et forme des surfaces optiques après polissage
- 🌀 simulations optique : une qualité de  $\lambda/20$  (50 nm) RMS induit un TTL  $< 3.4$  mm/rad (inertiel) dans 99% des défauts possibles

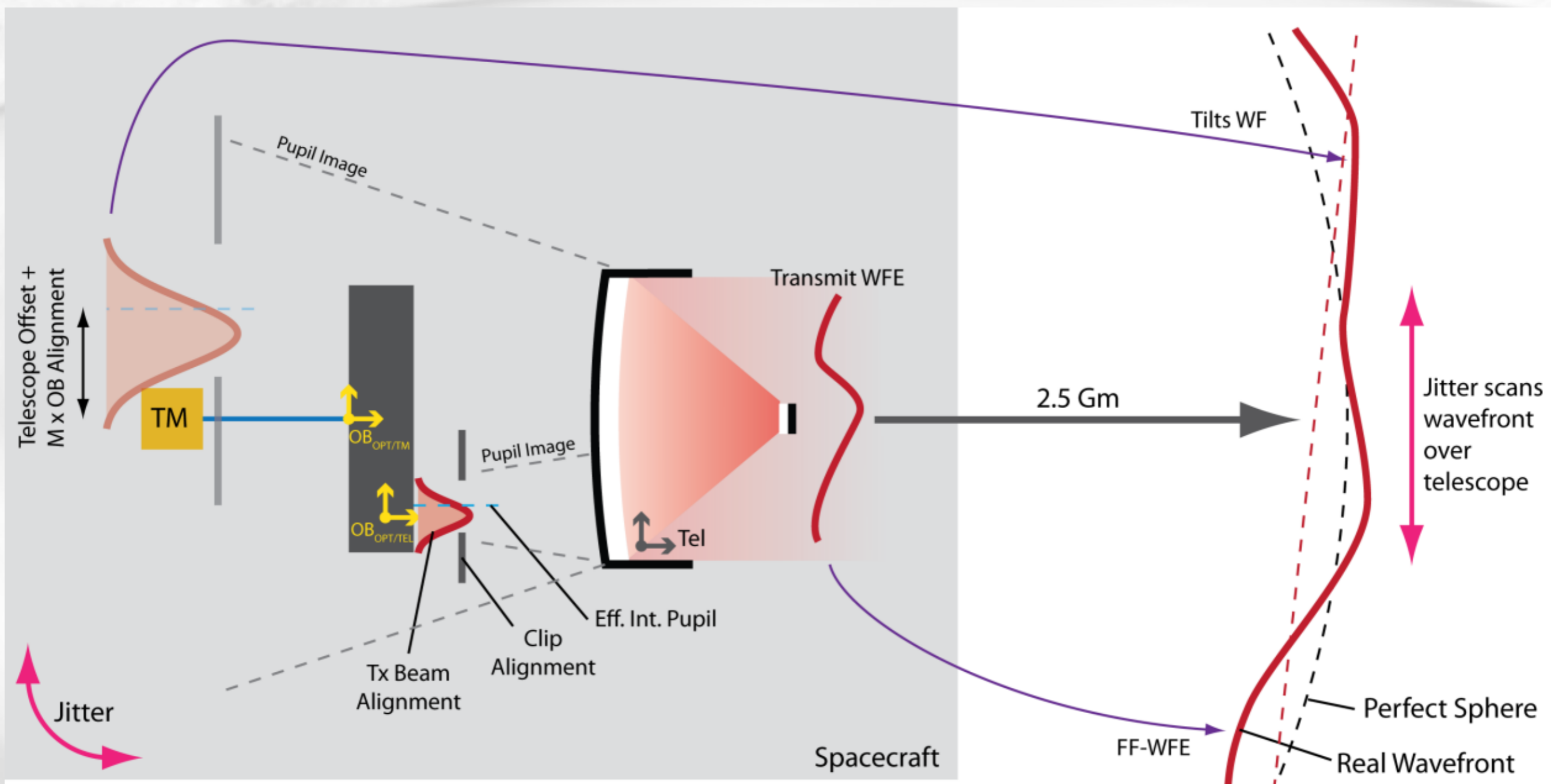
### 🌀 Couplage avec la fréquence d'actuation du PAAM

- 🌀 Si le PAAM bouge trop fréquemment ( $< 10$  ks)  $\Rightarrow$  glitches périodiques dans la bande de mesures
- 🌀 Si le PAAM reste longtemps à la même position  $\Rightarrow$  dégradation du front d'onde hors axe (donc TTL augmente)
- 🌀 Aussi un impact sur la puissance optique reçue mais effet mineur
- 🌀  $\Rightarrow$  estimation de  $\sim 70$   $\mu\text{m/rad}$  (inertiel)



# Principaux contributeurs Tx

## Résumé ...

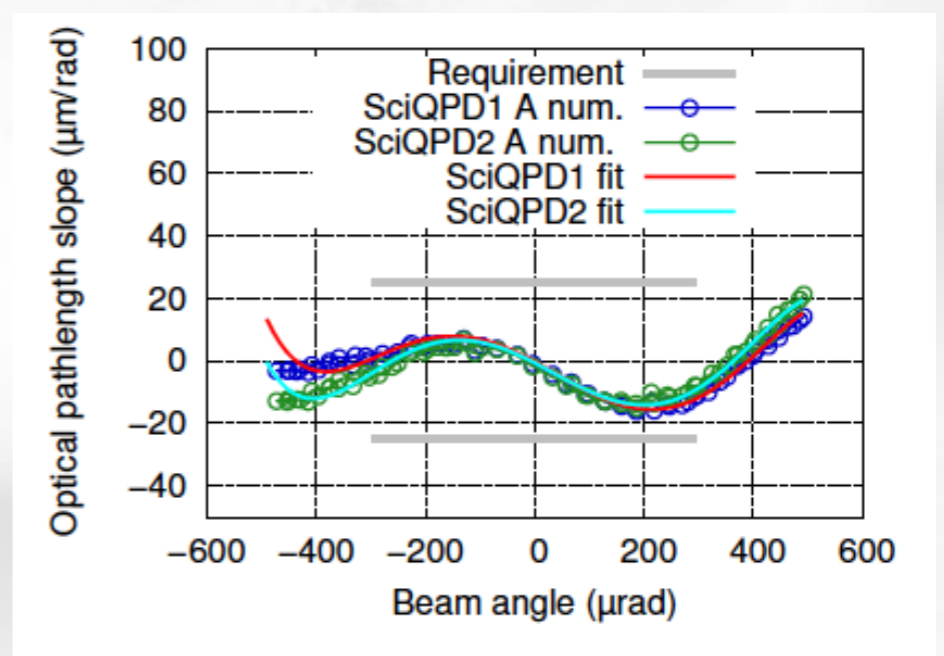
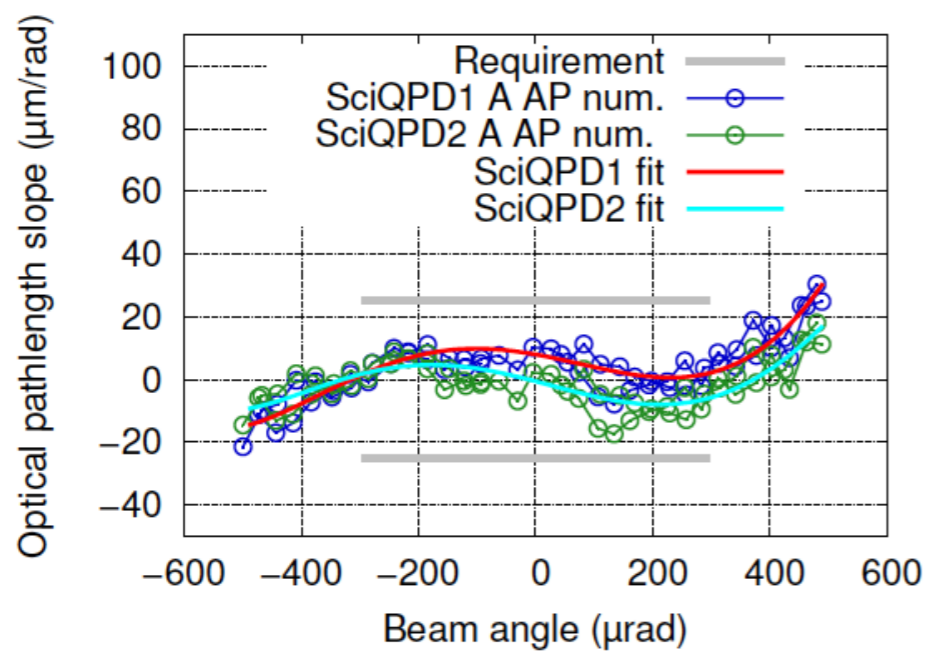
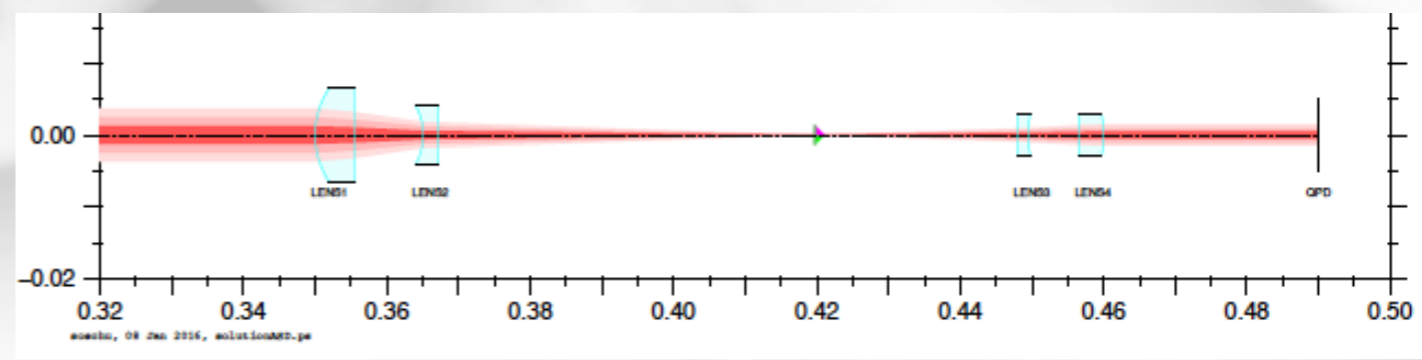
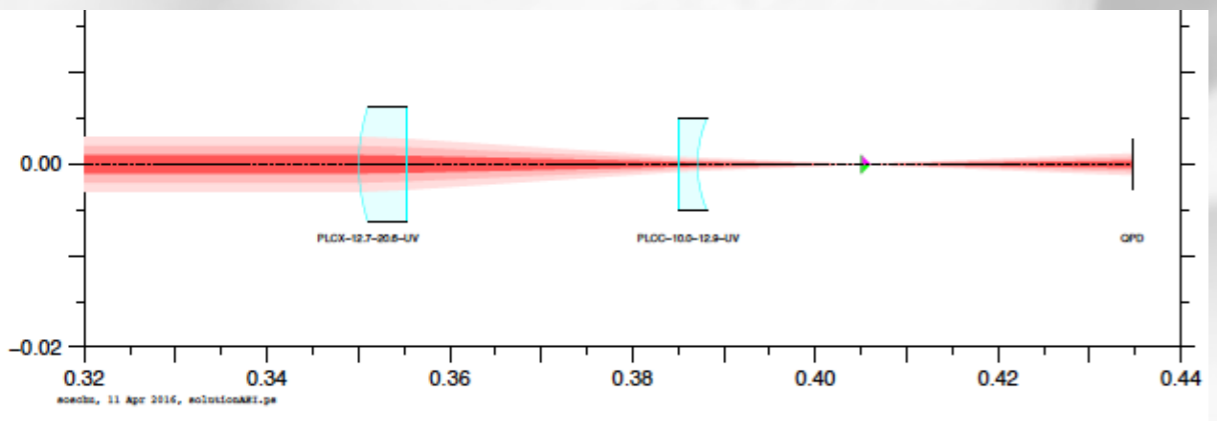


- Contributeurs communs à Tx
  - Alignement du telescope par rapport à l'OB (effets géométriques)
  - Erreurs internes au telescope de localisation et orientation des pupilles
- Alignement du diaphragme d'entrée de l'OB sur la petite pupille du telescope
  - Agit sur la distribution d'intensité sur les QPD du banc
  - Crée un TTL en raison de la taille finie des QPD et (surtout) de la distance entre quadrants
  - Valeur TTL par simulations :  $0,27 \mu\text{m}/\text{rad}$  (OB)  $\leftrightarrow$   $36 \mu\text{m}/\text{rad}$  (inertiel) par  $\mu\text{m}$  de décalage du diaphragme
  - Effet utilisé pour la correction TTL par 'Active Aperture'
    - compensation de  $5 \text{ mm}/\text{rad}$  (inertiel)  $\Rightarrow$  déplacement de  $140 \mu\text{m}$

# Principaux contributeurs Rx

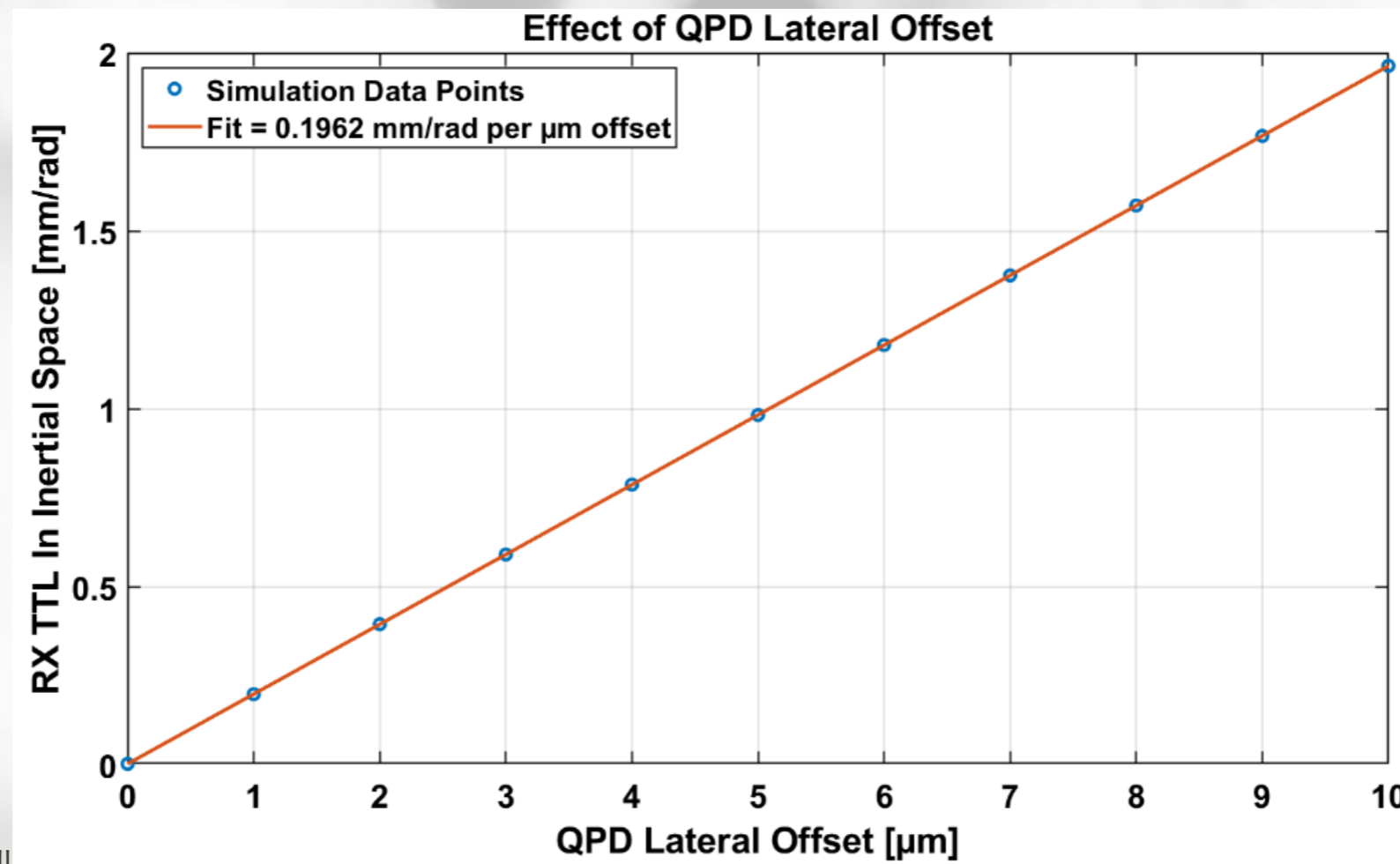
## 🌀 Système d'imagerie des QPD

- 🌀 Nécessaire pour adapter le diamètre du faisceau sur le banc (2.24 mm) à la taille des photodiodes (1 mm)
- 🌀 => système de compression optique / 2.5
- 🌀 Systèmes à 2 ou 4 lentilles
- 🌀 Optimisés pour minimiser le TTL
- 🌀 Specs intrinsèques évaluées à  $\sim 13 \mu\text{m}/\text{rad}$  OB ( $1,7 \text{ mm}/\text{rad}$  inertiel)



## Alignement des QPD

- Créé du TTL en raison de l'éclairement asymétrique des quadrants et la zone morte entre quadrants
- => le centre de rotation du front d'onde (nominalement à la surface de la QPD) n'est plus au centre et le front d'onde est échantillonné de façon asymétrique.
- Alignement à  $10 \mu\text{m}$  =>  $15 \mu\text{m}/\text{rad}$  (OB) ( $2 \text{ mm}/\text{rad}$  inertiel)
- Rq: la QPD peut être centré efficacement en équilibrant les amplitudes des battements sur chaque quadrant





## Specifications

-  Le bruit angulaire (par rapport à un ref inertielle) d'un MOSA est estimé à  $\sim 10 \text{ nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$

-  La contribution de bruit allouée est de  $\sim 1 \text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}}$  (sur un lien laser)

-   $\Rightarrow$  il faut un résidu de TTL 'effectif'  $< 0,1 \text{ mm/rad}$

-  Estimation du TTL après intégration :  $\sim 5 - 10 \text{ mm/rad}$


-  Erreurs d'alignements, imperfection de front d'onde, etc.

-  Effet du lancement :  $\sim 1 \text{ mm/rad}$  additionnel ?

-  Dérives en orbite

-  court et long terme

-  Stratégie de compensation proposée

-  Au sol : mesure et compensation du TTL par BAM ou AAM

-  Objectif de  $0.5 \text{ mm/rad}$  résiduel

-  En orbite :

-  Après lancement :  $\sim 1 \text{ mm/rad}$

-  Soustraction de 90% par corrélation avec bruit de pointage (mesuré sur le banc optique via les QPD)

-  Méthode similaire effectuée sur LISA Pathfinder

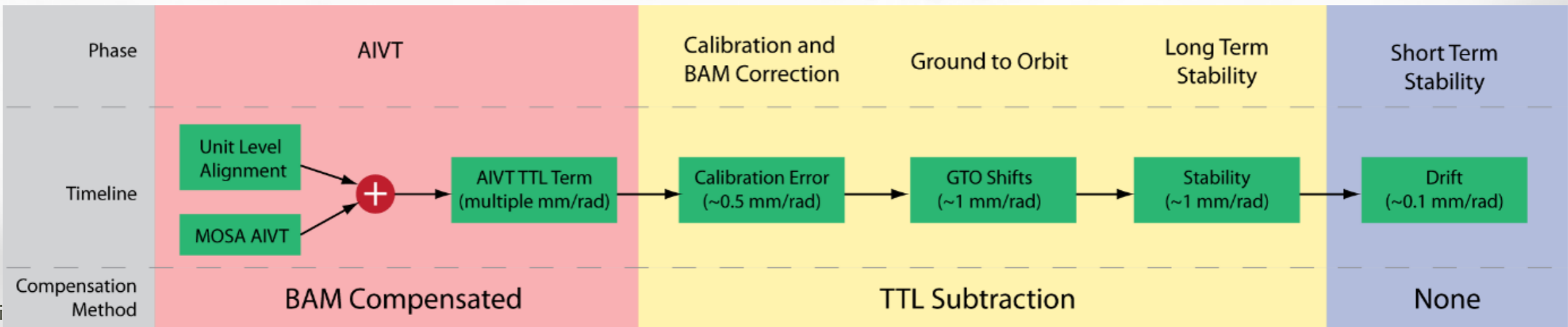
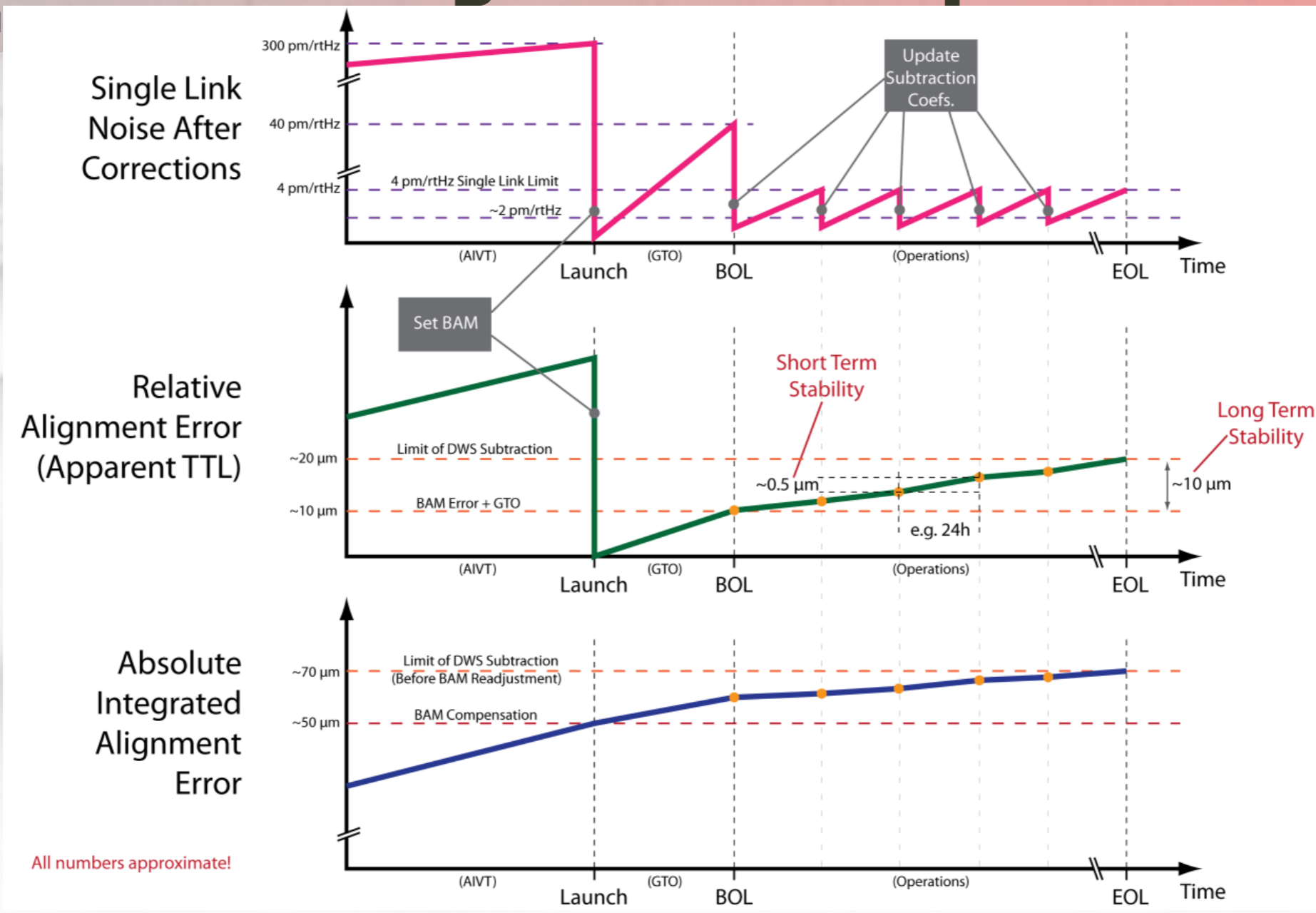
-  A priori limité par le bruit de lecture des angles et la complexité des réponses TDI

-  Limite long terme : dérive au-delà de la dynamique de soustraction

-  Possibilité d'utiliser alors BAM/AAM mais a priori difficile à régler en orbite (bruits lasers / TDI...)



# Stratégie de compensation TTL





LISA France

# Lumière parasite et bruit de phase

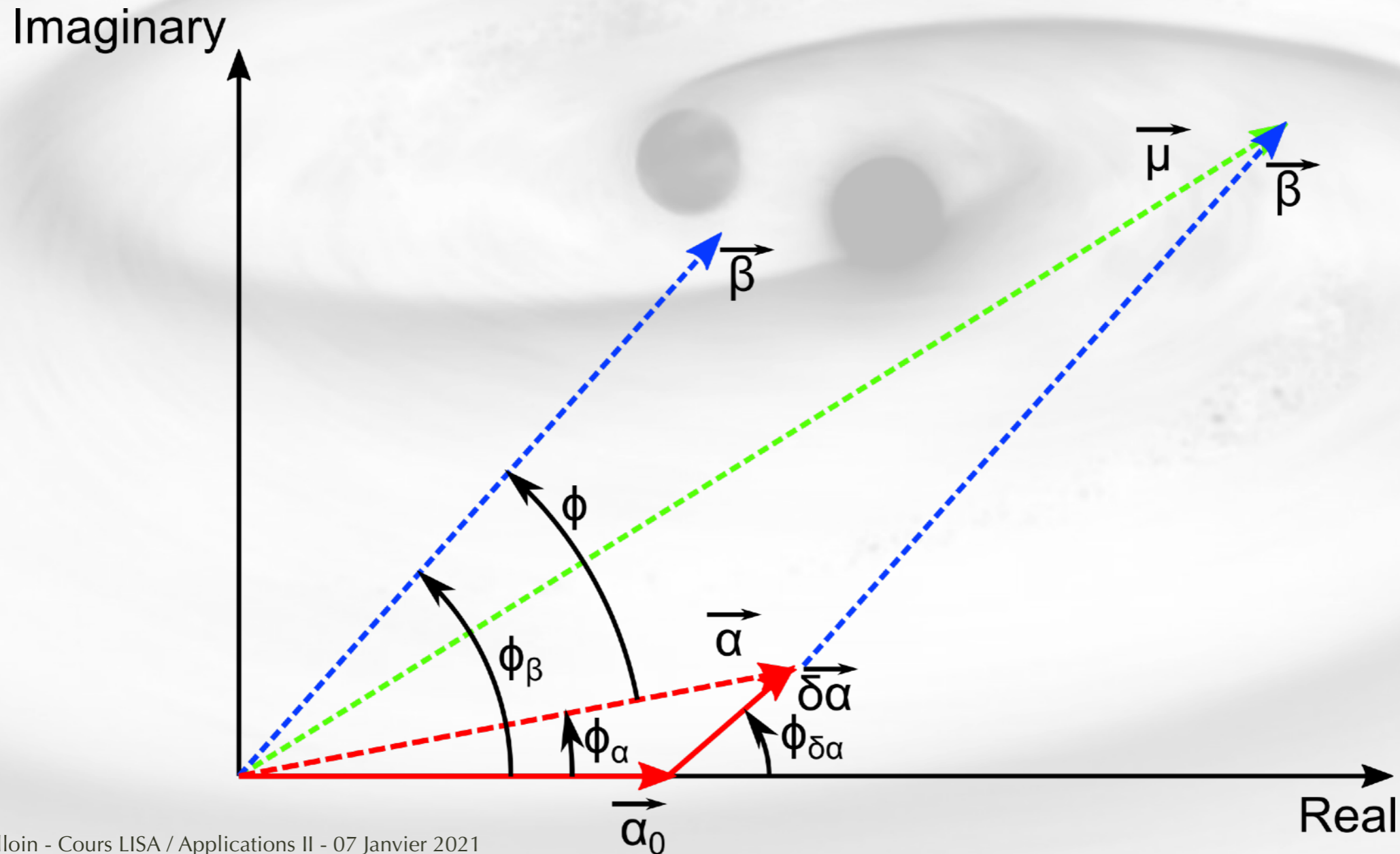
- 🌀 Lumière parasite : fraction de lumière arrivant sur un détecteur par un chemin non prévu
  - 🌀 p.ex. après diffusion / réflexion partielle sur une surface optique
- 🌀 Dans LISA, la lumière parasite va impacter la performance finale par ses fluctuations de phase
  - 🌀 Des fluctuations d'intensité (tavelures) pourraient impacter la camera d'acquisition et les mesures de phase (A étudier !)
- 🌀

# Lumière parasite

Par exemple : lumière parasite de Tx

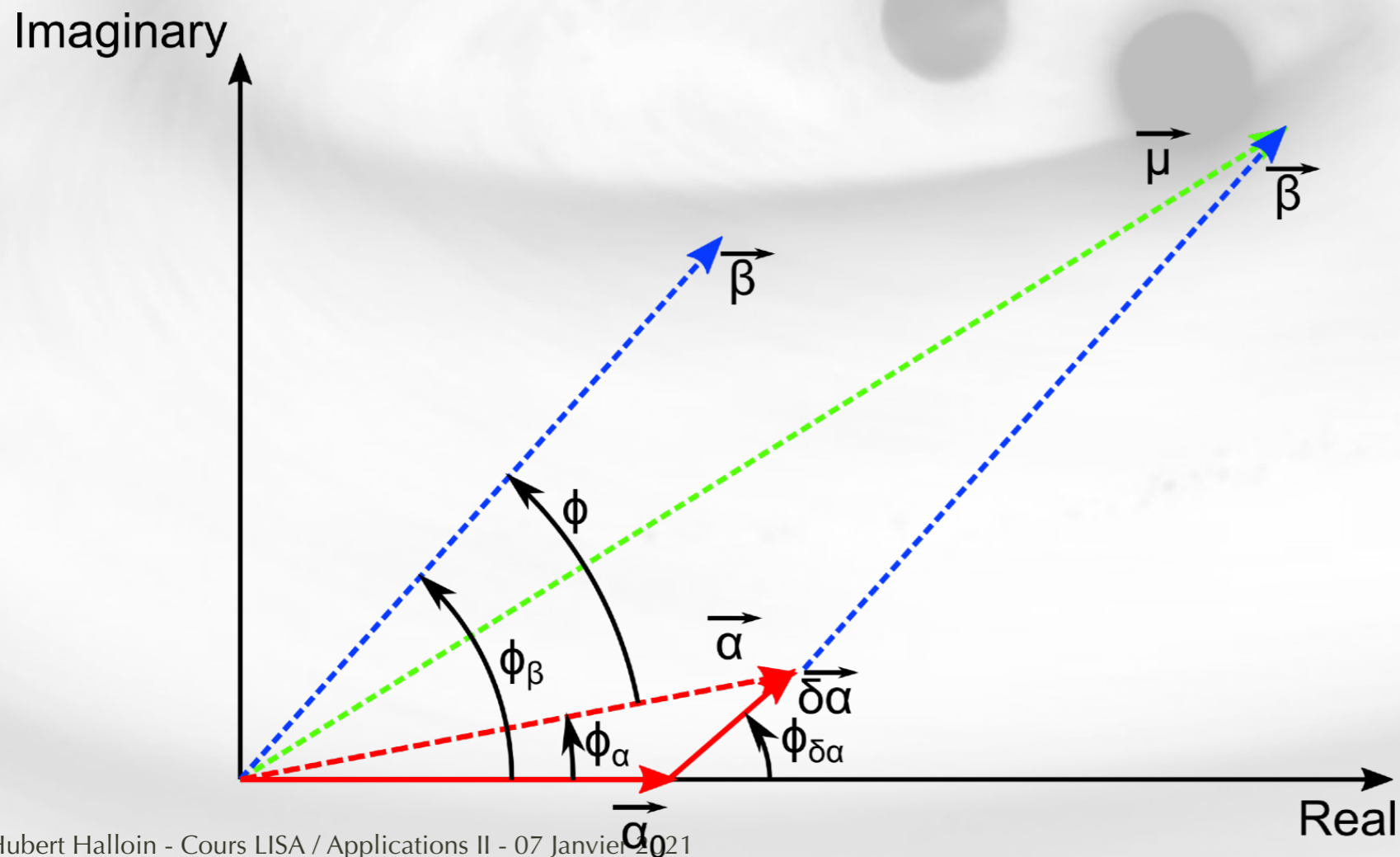
- $\alpha$  : faisceau Tx 'nominal'
- $\delta\alpha$  : faisceau parasite (de même mode que  $\alpha$ )

- $\Phi_{\delta\alpha}$  : phase relative entre  $\alpha$  et  $\delta\alpha$  (bruit + offset)
- $\beta$  : faisceau Rx
- $\mu$  : battement de  $\alpha$  et  $\beta$
- $\Phi$  : phase mesurée
- $\Phi_\alpha$  : Erreur de phase liée à  $\delta\alpha$



## Remarques :

- Ne dépend pas de Rx
- Couplage non linéaire dans le cas général
- Linéarisation en amplitude : OK si fraction de lumière parasite  $< 10^{-5}$  en puissance (erreur  $< 1$   $\mu$ cycle)
- Linéarisation en phase : pas évident a priori, on ne maîtrise pas l'offset et le bruit peut être non négligeable ( $2\pi \leftrightarrow 1$   $\mu\text{m}$  de chemin optique!)



$$\phi_\alpha = \arctan \frac{\epsilon_\alpha \sin \phi_{\delta\alpha}}{1 + \epsilon_\alpha \cos \phi_{\delta\alpha}}$$

$$\approx \epsilon_\alpha \sin \phi_{\delta\alpha} \text{ avec } \epsilon_\alpha = \frac{\|\delta\vec{\alpha}\|}{\|\vec{\alpha}_0\|}$$

## Effets non linéaires

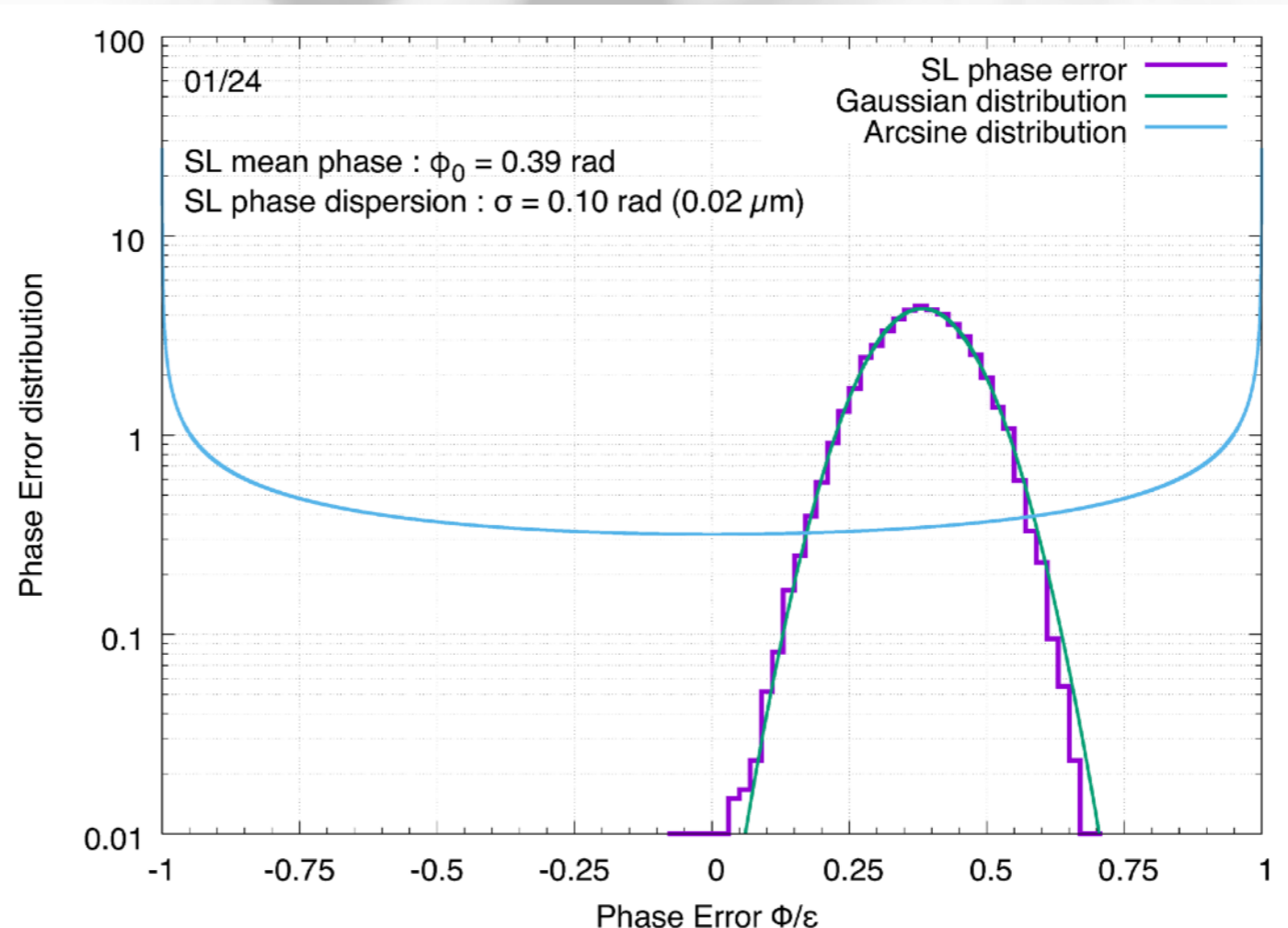
une dérive linéaire de la phase parasite crée une erreur sinusoïdale

$$\Phi(t) = \epsilon \cdot \sin(\phi_0 + \sigma \cdot t)$$

L'erreur de phase n'est pas un bruit gaussien même si le bruit de phase de la lumière parasite l'est.

$$\phi(t) = \phi_0 + \delta\phi(t) \text{ avec } \langle \delta\phi(t) \rangle_t = 0 \text{ (e.g. } \delta\phi \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2))$$

$$\Rightarrow \Phi(t) = \epsilon \cdot \sin \phi(t) = \Phi(t) = \epsilon \cdot \sin(\phi_0 + \delta\phi(t))$$



🔗 Pour un bruit de phase faible ( $\delta\Phi \ll 1$ )

🔗 Le bruit de phase induit est immédiat :

🔗 Utilisé pour le dimensionnement de l'instrument

$$S_{\Phi}(f) \approx \epsilon \cdot \cos^2 \phi_0 \cdot S_{\phi}(f) \leq \epsilon \cdot S_{\phi}(f)$$

🔗 Principales sources identifiées de lumière parasite dans LISA

🔗 Lumière rétro-diffusée par le télescope

🔗 Diffusion par la rugosité des surfaces optiques (contamination particulaire, micro-météorites)

🔗 Couplage avec la dilatation thermique de l'interface OB/Telescope

🔗 Lumière rétro-diffusée par la fibre 'back-link'

🔗 Affecte la réciprocity du bruit de phase

🔗 Couplage avec la dilatation thermique, les vibrations, les déformations, ...

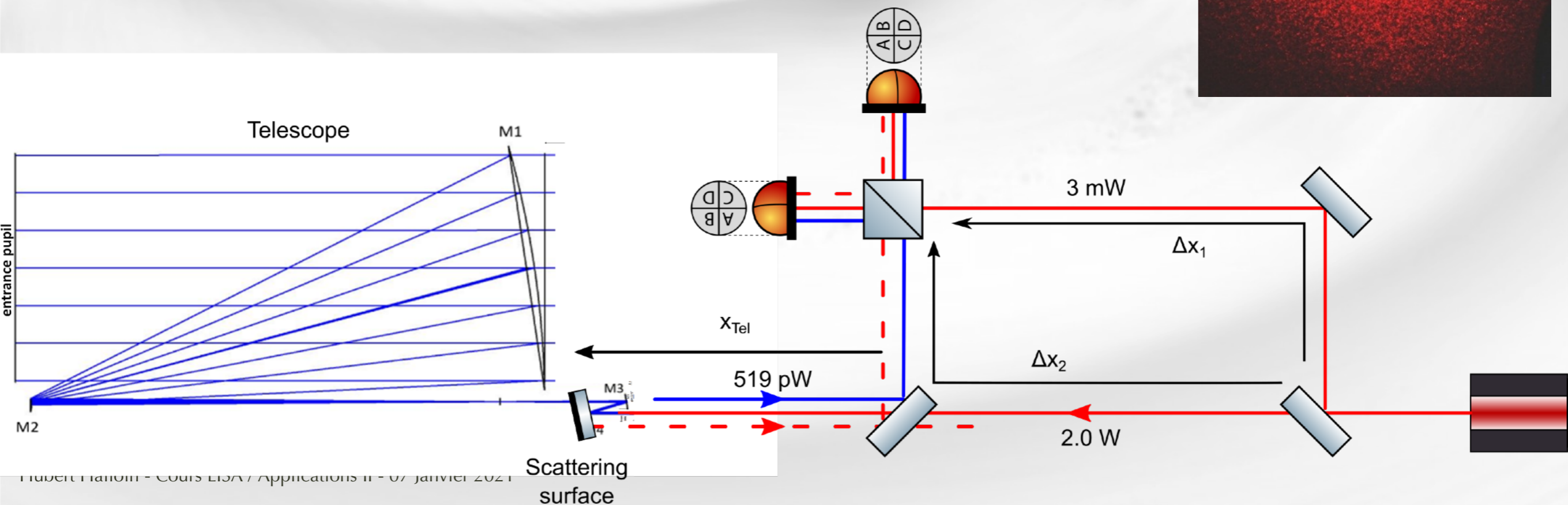
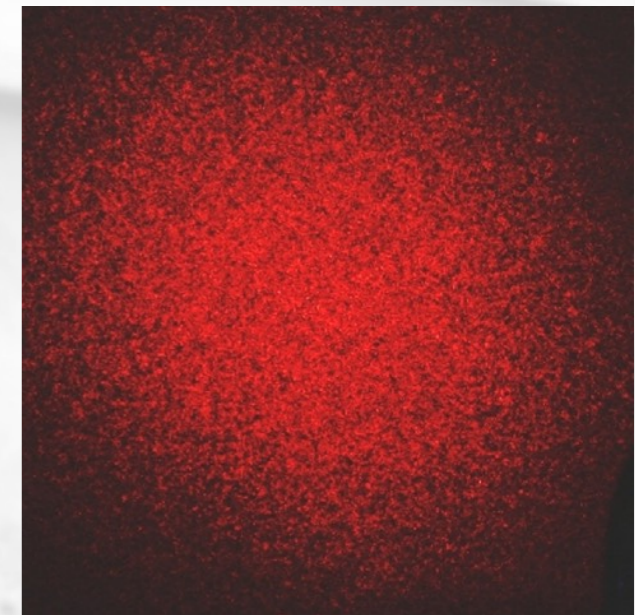
🔗 Encore beaucoup d'études à mener ...

🔗 Influence des tavelures ?

🔗 Contamination moléculaire ?

🔗 Couplage effectif des faisceaux parasite dans l'IFO (recouvrement, polarisation, etc) ?

🔗 Faisceaux parasite dans le banc optique ? Sur la fenêtre d'entrée du GRS ?







Discussions...