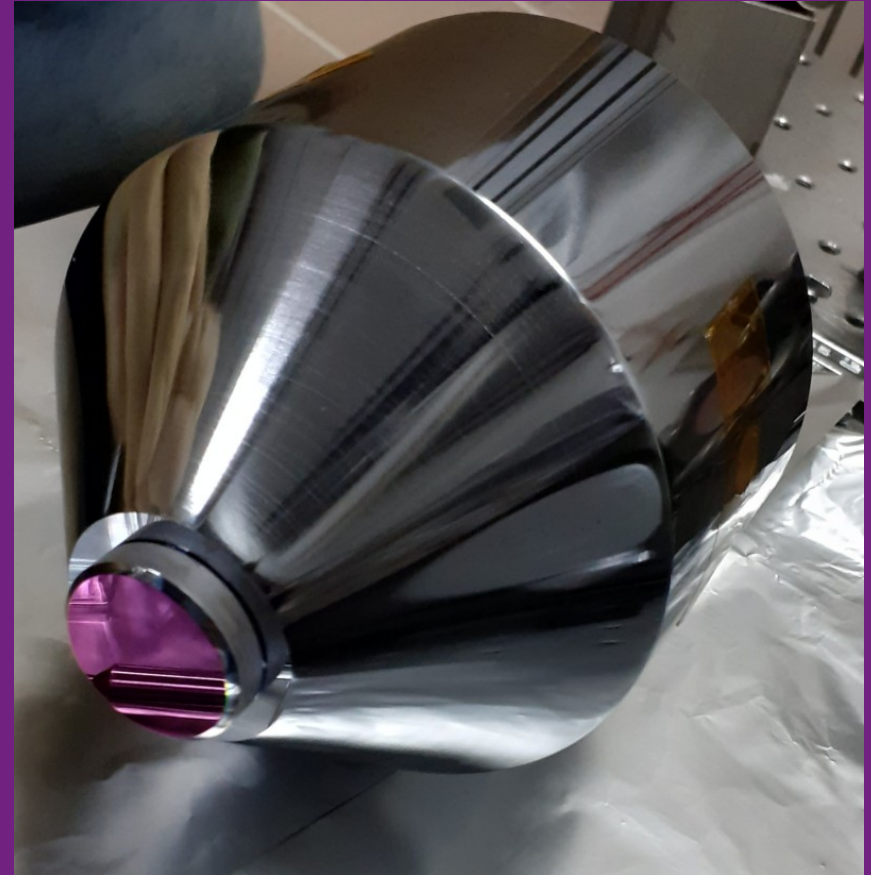


# CAVITÉS CRYOGÉNIQUES EN SILICIUM

Jonathan Gillot, Jacques Millo,  
Clément Lacroûte, Falzon Santerelli  
Tetsing-Talla, Joannès Barbarat,  
Vincent Giordano, Yann Kersalé.

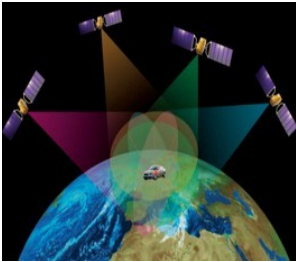
*Équipe OHMS / Département TF*



# APPLICATIONS DE LA MÉTROLOGIE TF

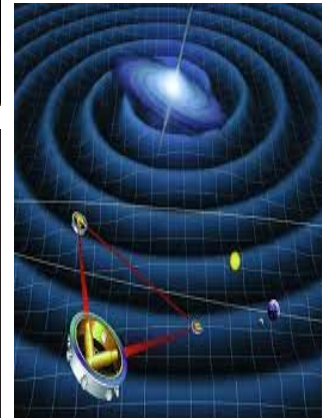
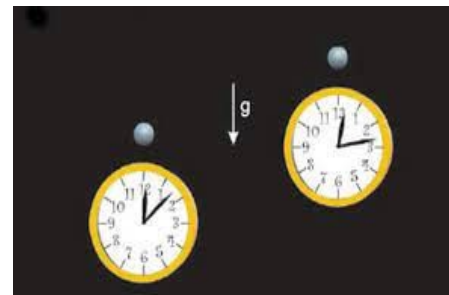
## Applications « sociétales »

Télécoms, radars, navigation spatiale, synchronisation des réseaux, temps légal

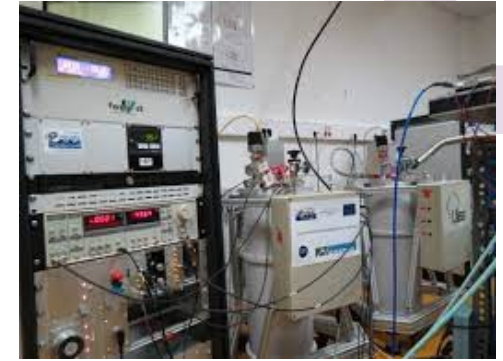
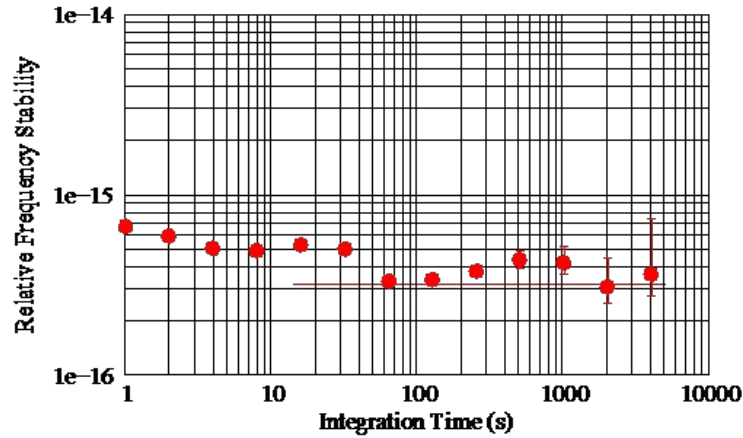


## Physique fondamentale

Invariance de Lorentz, matière noire, relativité générale, géométrie relativiste



# LA MÉTROLOGIE TF À FEMTO-ST

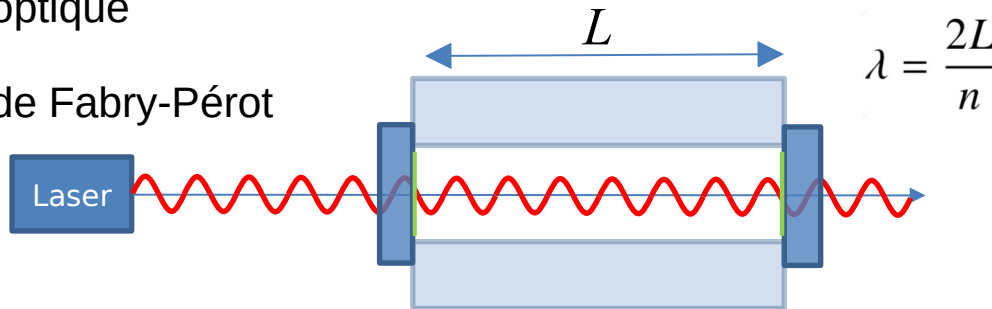


Saphirs cryogéniques  
micro-ondes limités à  $\sigma_y \approx \text{qq. } 10^{-16}$



Fréquences optiques

Cavité optique  
interféromètre de Fabry-Pérot



$$\frac{\delta\nu}{\nu} = \frac{\delta L}{L}$$

Cavité ultra-stable

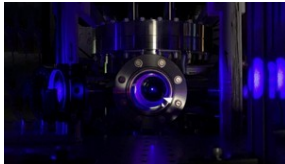


Laser ultra-stable

## Laser asservi sur une cavité



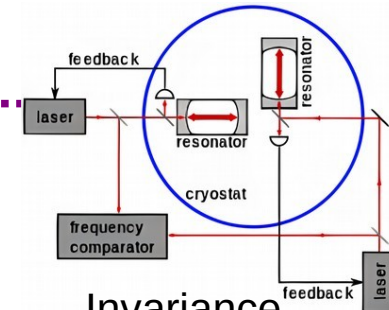
Pour la métrologie  
Temps-Fréquence et  
les applications  
fondamentales



Oscillateur local  
pour les horloges  
optiques



Comparaisons  
longues distances



Invariance  
de Lorentz



Détection de  
matière noire

## COMMENT OBTENIR UNE CAVITÉ ULTRA-STABLE ?

**Bruit thermique ↔ limite de stabilité**

$$\frac{S_L(f)}{L^2} \propto \frac{T}{w_0 L^2} \left( \frac{1}{Q_{sub}} + \frac{k}{w_0} \frac{1}{Q_{coat}} \right) \frac{1}{f}$$

- Réduire la température T de la cavité
- Augmenter la longueur de la cale d'espacement
- Utiliser les matériaux disposant des facteurs de qualité élevés

**Facteur de qualité  
mécanique**

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_{diel} = 2,5 \times 10^3 \\ Q_{ULE} = 6 \times 10^4 \\ Q_{FS} = 10^6 \\ Q_{Si} = 5 \times 10^7 \end{array} \right.$$

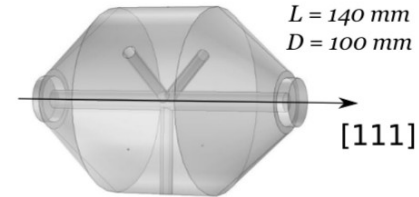
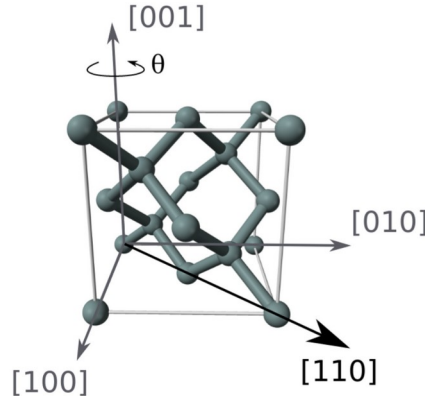
**Cryogénie + silicium**



# COMMENT FABRIQUER UNE CAVITÉ ULTRA-STABLE ?

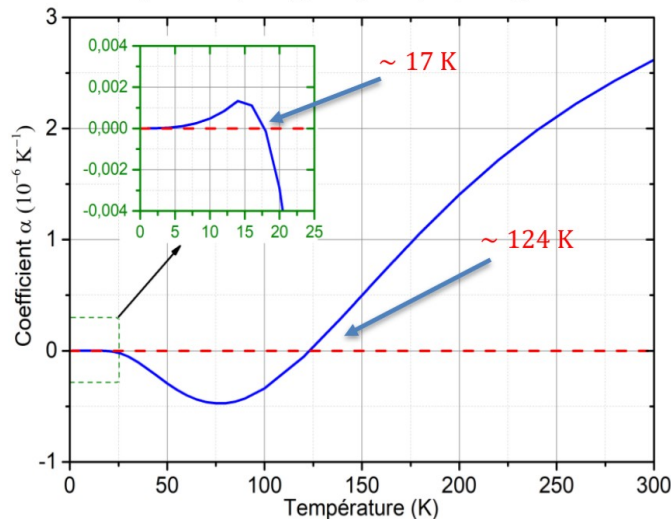
## LES PROPRIÉTÉS DU SILICIUM

- ◆ Structure cristalline type « diamant »
- ◆ Bloc monocristallin



- ◆ Deux points d'inversion en température

Lyon et al., J. App. Phys. 48, 3 (1977), 865



$$L(T) = L(T_0)[1 + \alpha(T)\Delta T + \alpha'(T)(\Delta T)^2]$$

Choix de  $T_0$  :

- $\alpha'(17 \text{ K}) \ll \alpha'(124 \text{ K})$
- $\sigma_{\text{th}}(17 \text{ K}) \ll \sigma_{\text{th}}(124 \text{ K})$

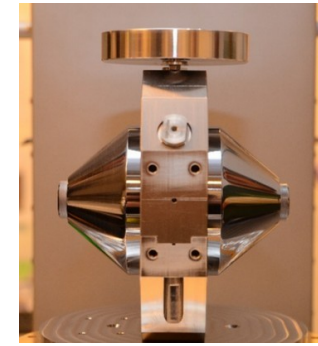
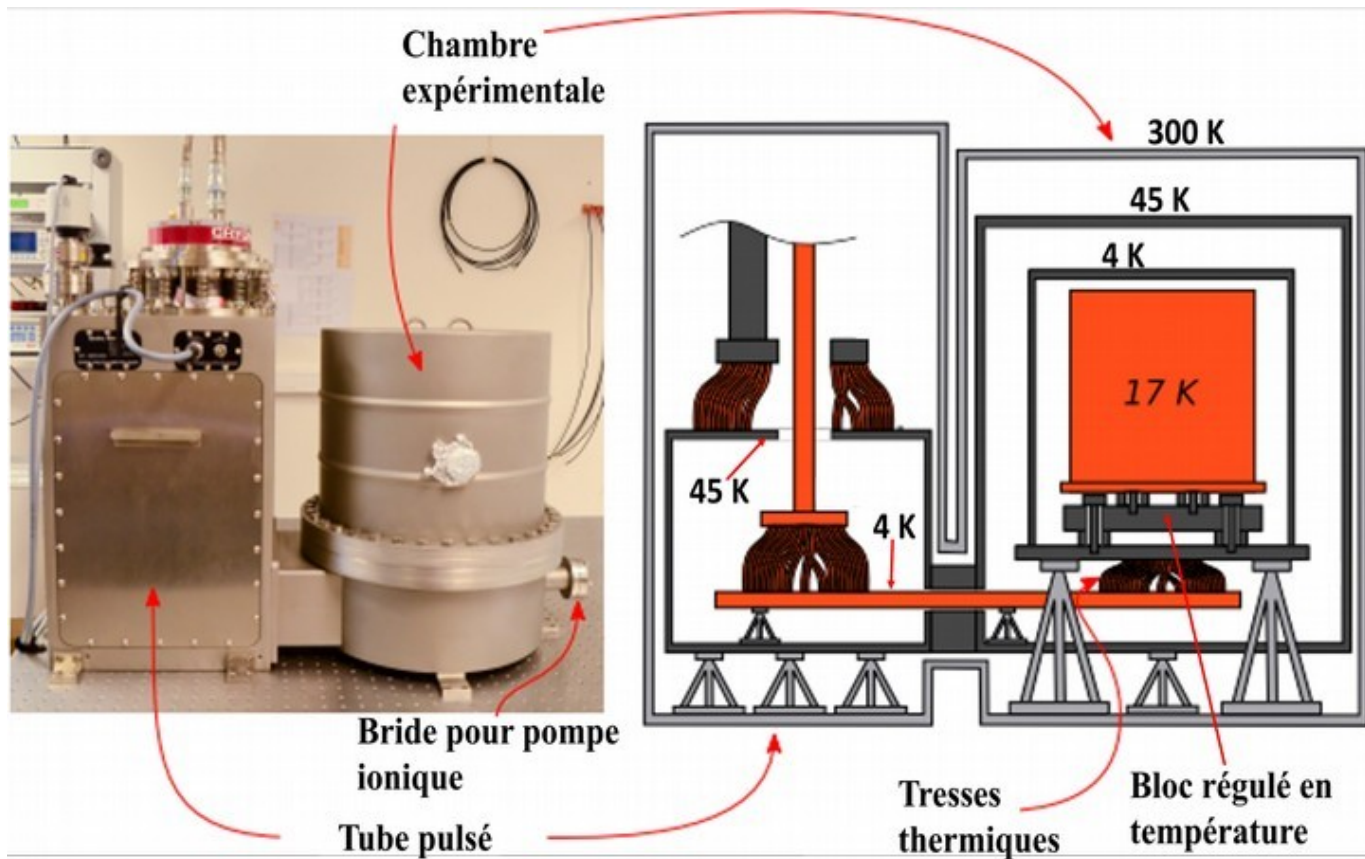
Limite du bruit thermique pour

$L = 14 \text{ cm}$  et  $T = 17 \text{ K}$

$$\begin{cases} S_{\varphi, \text{th}}(1 \text{ Hz}) \approx -47 \text{ dBrad}^2/\text{Hz} \\ \sigma_{y_{\text{th}}} \approx 3 \times 10^{-17} \end{cases}$$

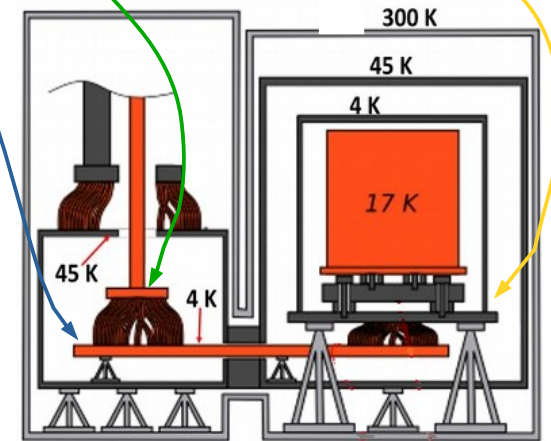
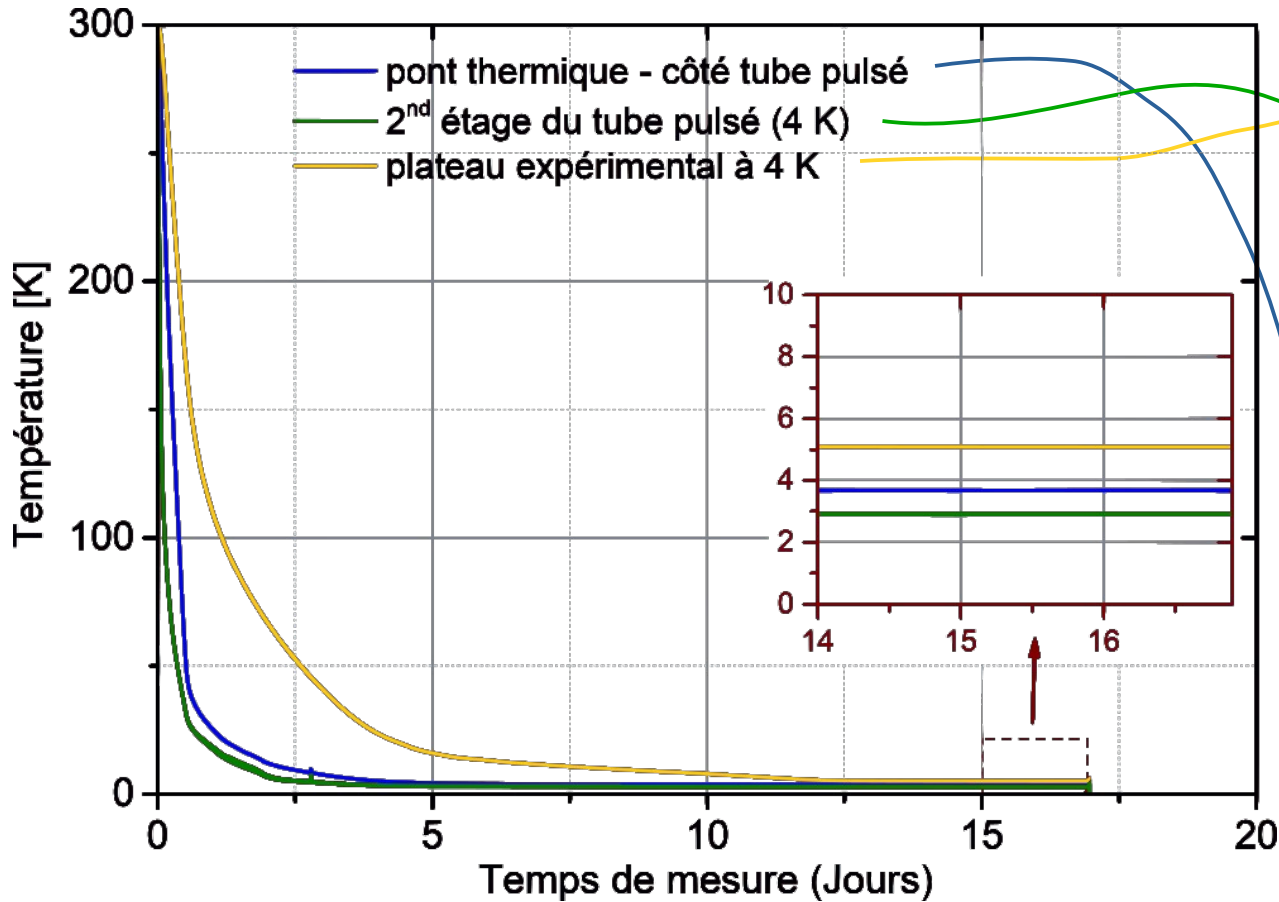
# COMMENT OBTENIR UNE CAVITÉ ULTRA-STABLE ?

## LA CRYOGÉNIE



# COMMENT OBTENIR UNE CAVITÉ ULTRA-STABLE ?

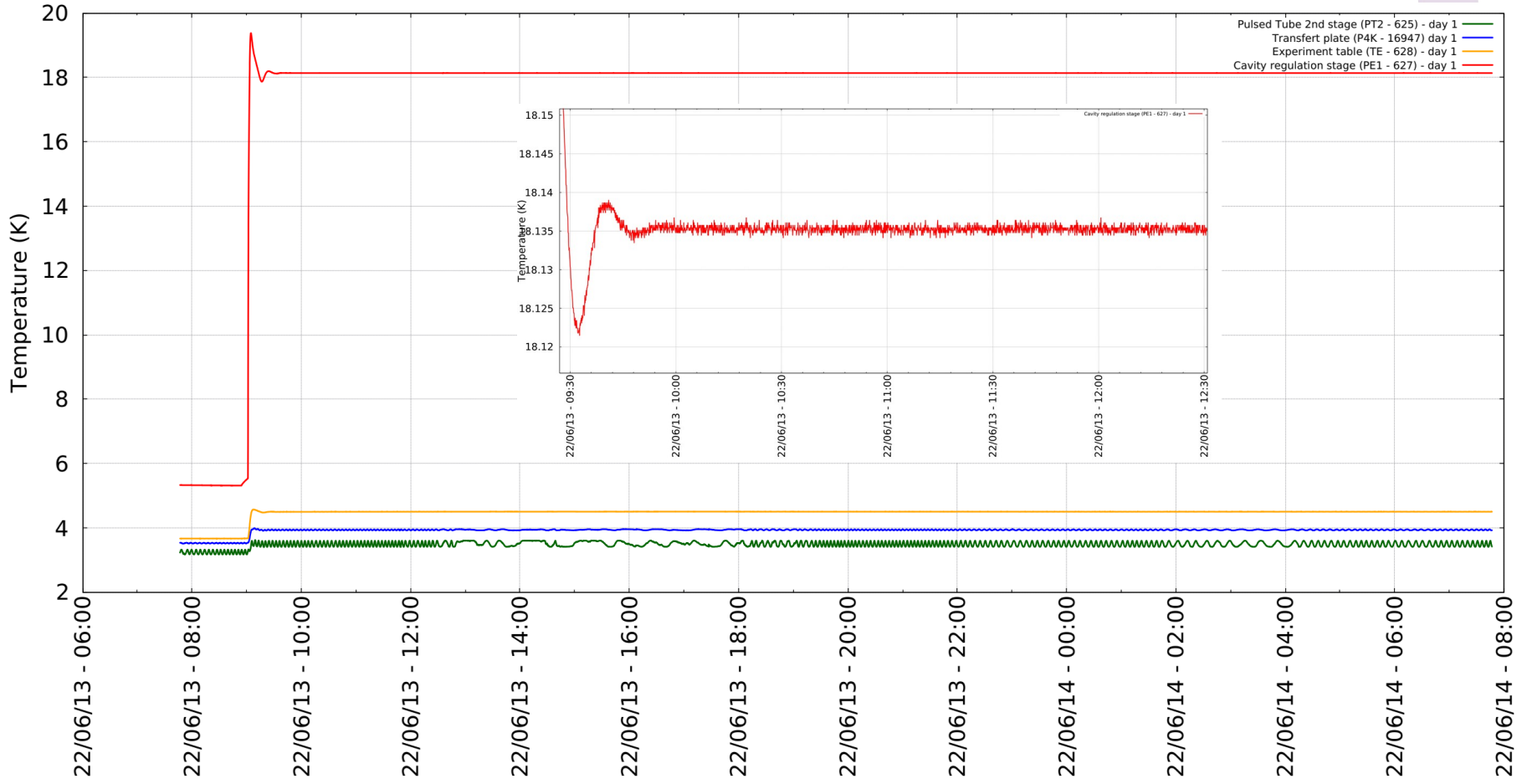
## DESCENTE EN TEMPÉRATURE





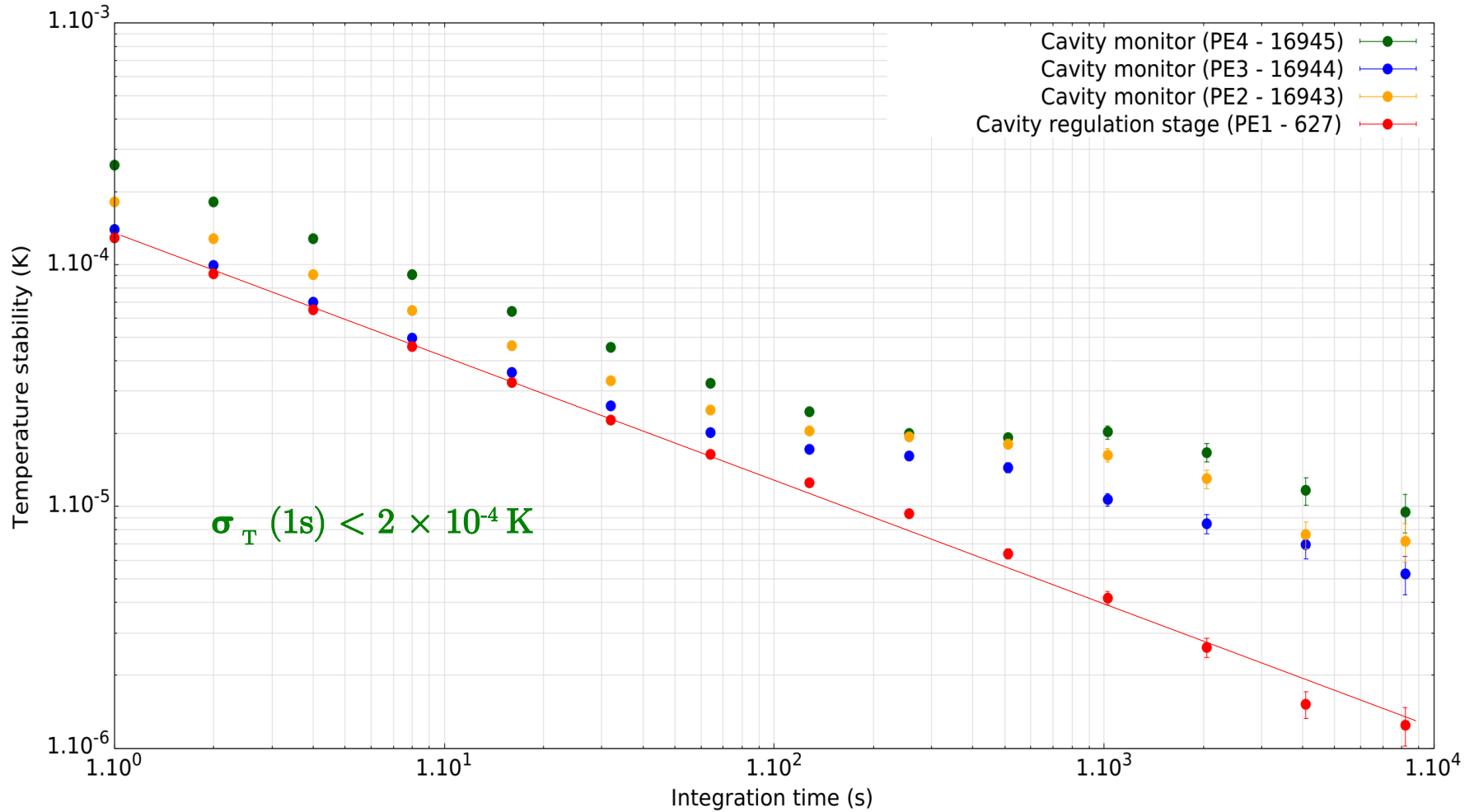
# COMMENT OBTENIR UNE CAVITÉ ULTRA-STABLE ?

## DESCENTE EN TEMPÉRATURE



# COMMENT OBTENIR UNE CAVITÉ ULTRA-STABLE ?

## DESCENTE EN TEMPÉRATURE



# EFFETS DÉGRADANTS LA STABILITÉ

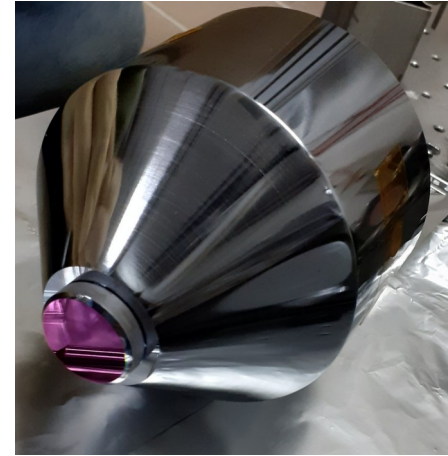
## Objectif

◆  $\sigma_y = 3 \times 10^{-17}$  à FEMTO-ST (silicium 17 K)

État de l'art :  $\sigma_y = 4 \times 10^{-17}$  au PTB – JILA (silicium 124 K)

$$\sigma_y = 3 \times 10^{-17} \rightarrow \delta L = 4,4 \times 10^{-18} \text{ m}$$

200 fois plus petit qu'un proton...



## Effets dégradant la stabilité :

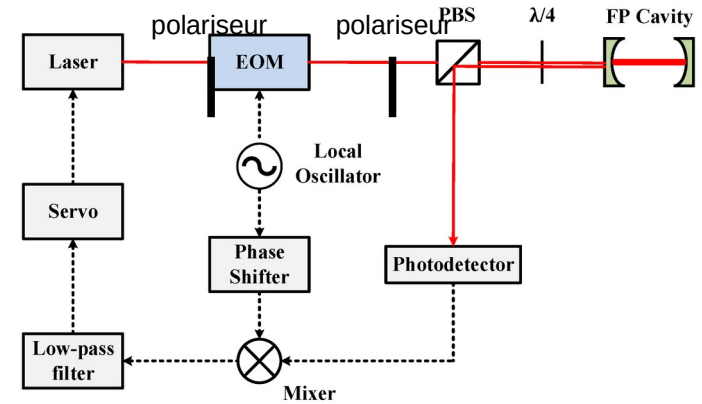
- ◆ Modulation d'amplitude résiduelle
- ◆ Vibrations ( $< 10^{-10} \text{ m.s}^{-2}$ )
- ◆ Fluctuations de puissance laser (60 pW)

# EFFETS DÉGRADANTS LA STABILITÉ

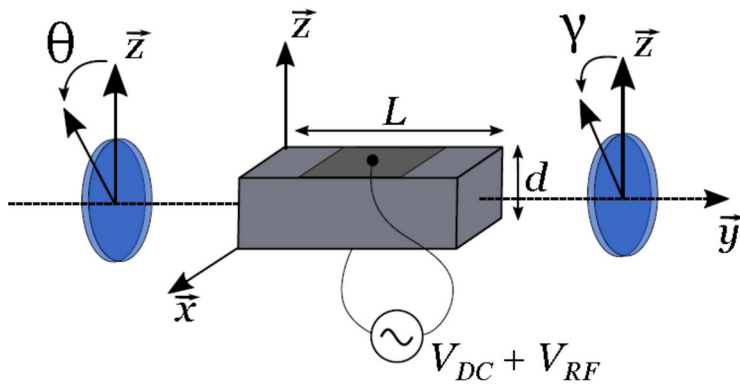
## MODULATION D'AMPLITUDE RÉSIDUELLE

### ◆ Asservissement Pound-Drever-Hall

Modulation de la phase de la lumière avec un cristal électro-optique (biréfringent)



### ◆ Modulation d'amplitude résiduelle (RAM)



$$E(t) = E_T \left( 1 + m_0 e^{j\alpha} \sin(\Omega t) \right) e^{j(\omega t + \beta_z \sin(\Omega t))}$$

Modulation d'amplitude résiduelle :

$$m_0 \simeq 2 \frac{a}{b} J_1(\xi)$$

$$\alpha \simeq \Delta\Phi + \pi/2$$

$$M = \Re[m] \simeq -2 \frac{a}{b} J_1(\xi) \sin \Delta\Phi$$

$$\Delta\Phi = \Delta\phi_n + \Delta\phi_{T^\circ} + \Delta\phi_{DC}$$

Trois boucles d'asservissement :

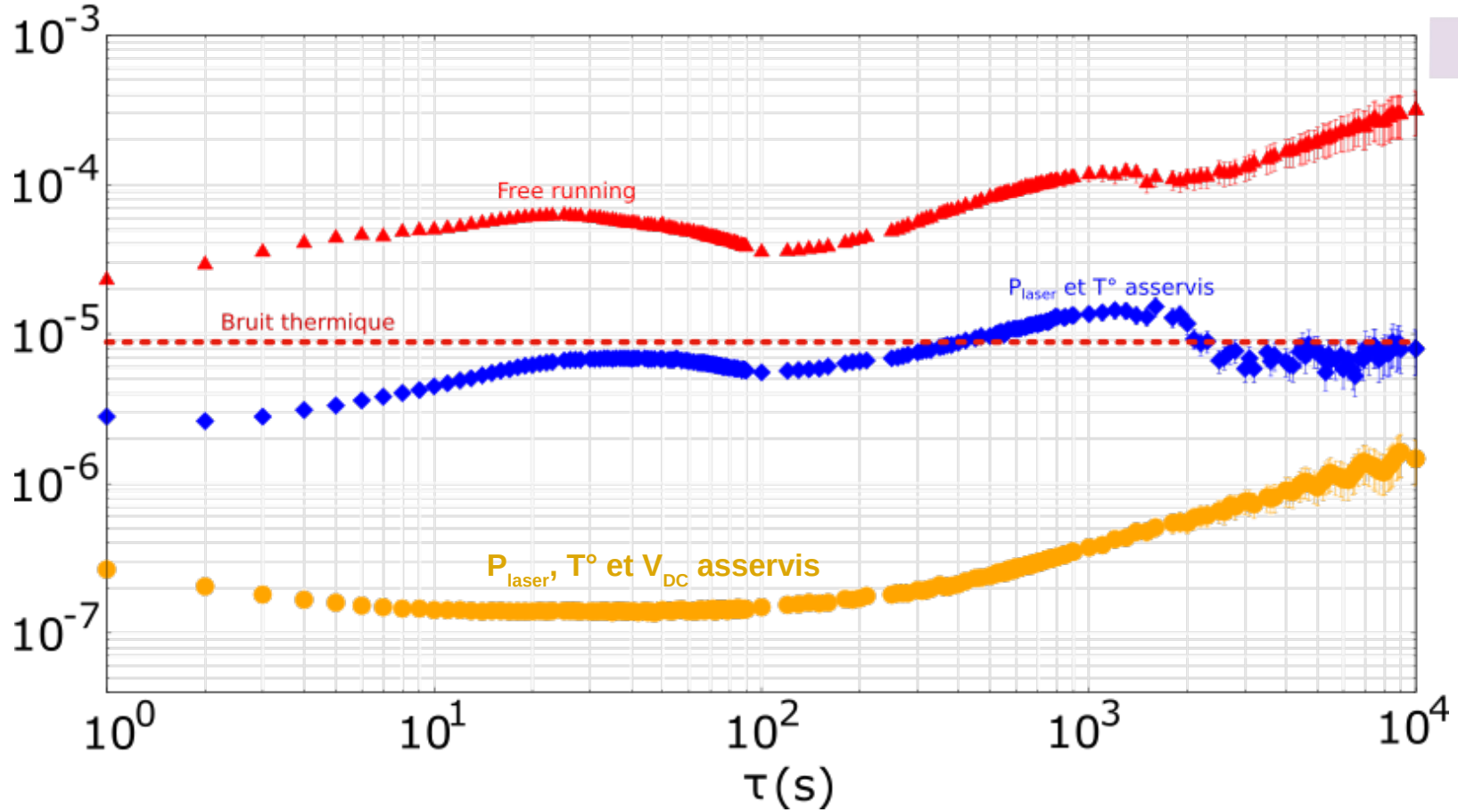
- ◆ Température du cristal
- ◆ Tension DC sur l'EOM
- ◆ Puissance laser

# EFFETS DÉGRADANTS LA STABILITÉ

## MODULATION D'AMPLITUDE RÉSIDUELLE

$\sigma_M$

Digital control of residual amplitude modulation at the  $10^{-7}$  level for ultra-stable lasers, J. Gillot et al. *Opt. Exp.*, 30, 20, 2022.



Avec  $\sigma_M = 1,4 \times 10^{-7}$  et  $F = 250\,000$   $\longrightarrow$   $\sigma_y^{\text{RAM}} \approx 5 \times 10^{-19}$



# EFFETS DÉGRADANTS LA STABILITÉ

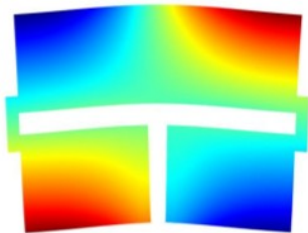
## LES VIBRATIONS

Minimiser la sensibilité de la cavité aux vibrations  $k_i$  ( $1/m.s^{-2}$ ) dans toutes les directions

$$S_{v,acc} = \sum_{i=x,y,z} k_i S_{a,i}$$

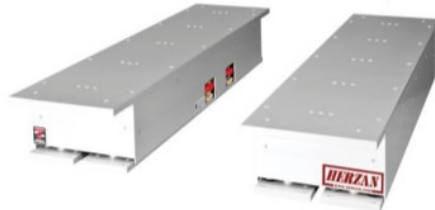
### Coef. de sensibilité :

- Conception
- Optimisation exp.



### Bruit d'accélération :

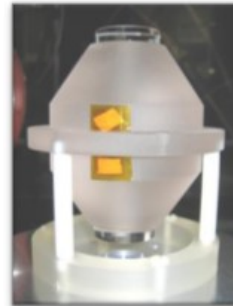
Réduction → système AVI



### Exemples de cavités :

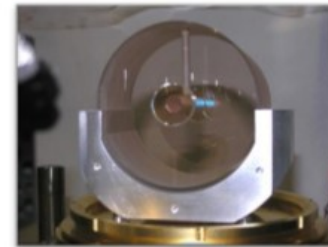
- Cavité verticale maintenue en 3 points
- Cavité horizontale maintenue en 4 points
- Cavité horizontale maintenue en 3 points

JILA



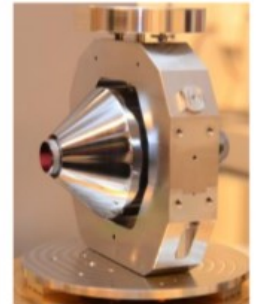
udlow et al. Opt. Lett. 32, 6 (2007), 641-643

SYRTE



Millo et al. Phys. Rev. A 79, 5 (2009), 053829

FEMTO-ST

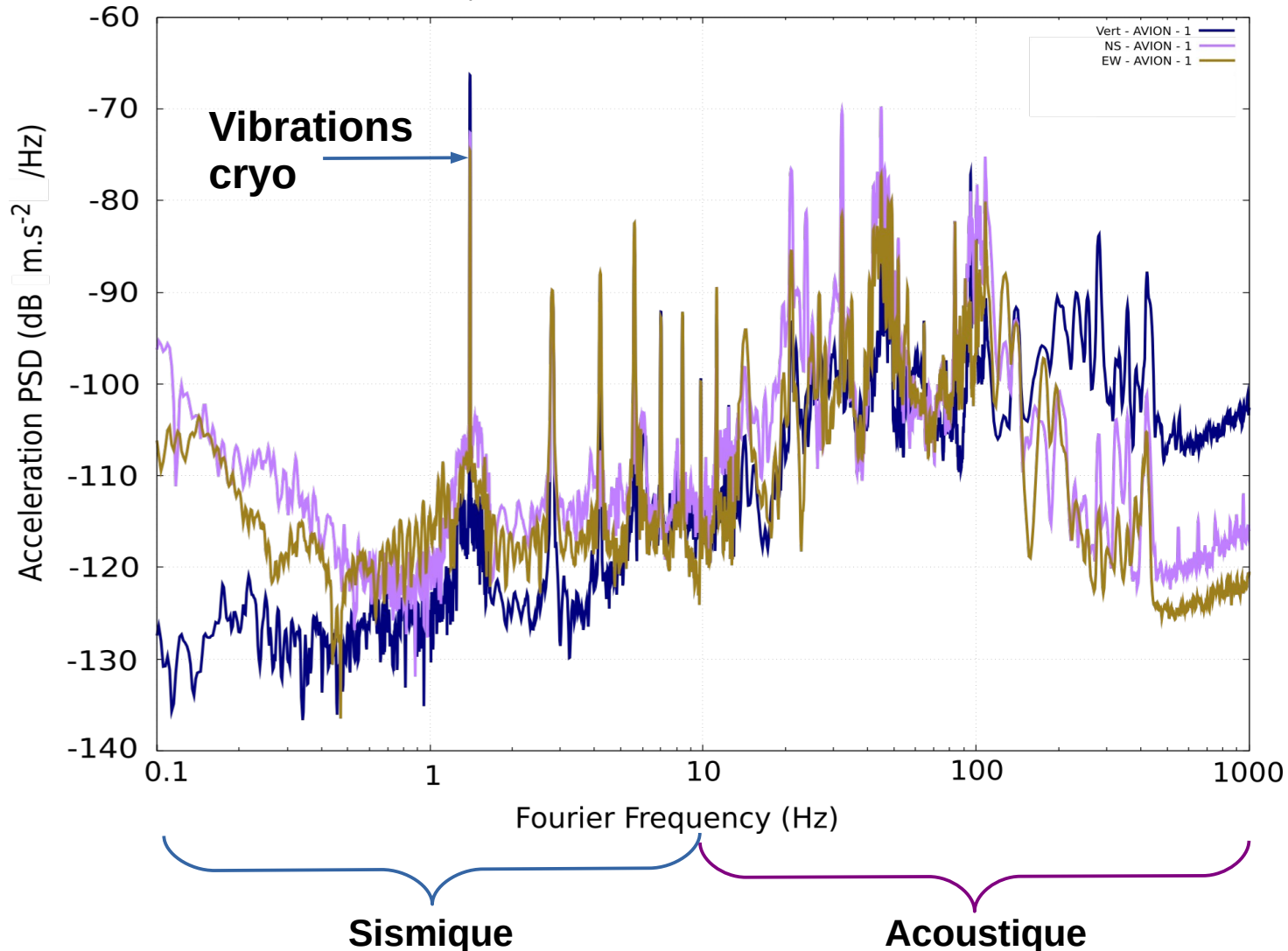


Tetsing talla et al. IFCS/ISAF (2020), pp. 1-3

	verticale [ $1/m.s^{-2}$ ]	horizontale [ $1/m.s^{-2}$ ]
JILA	$\sim 10^{-11}$	$\sim 10^{-11}$
SYRTE	$\sim 10^{-12}$	$\sim 10^{-11}$
FEMTO-ST (FEM)	$\sim 10^{-12}$	$\sim 10^{-12}$

## LES VIBRATIONS

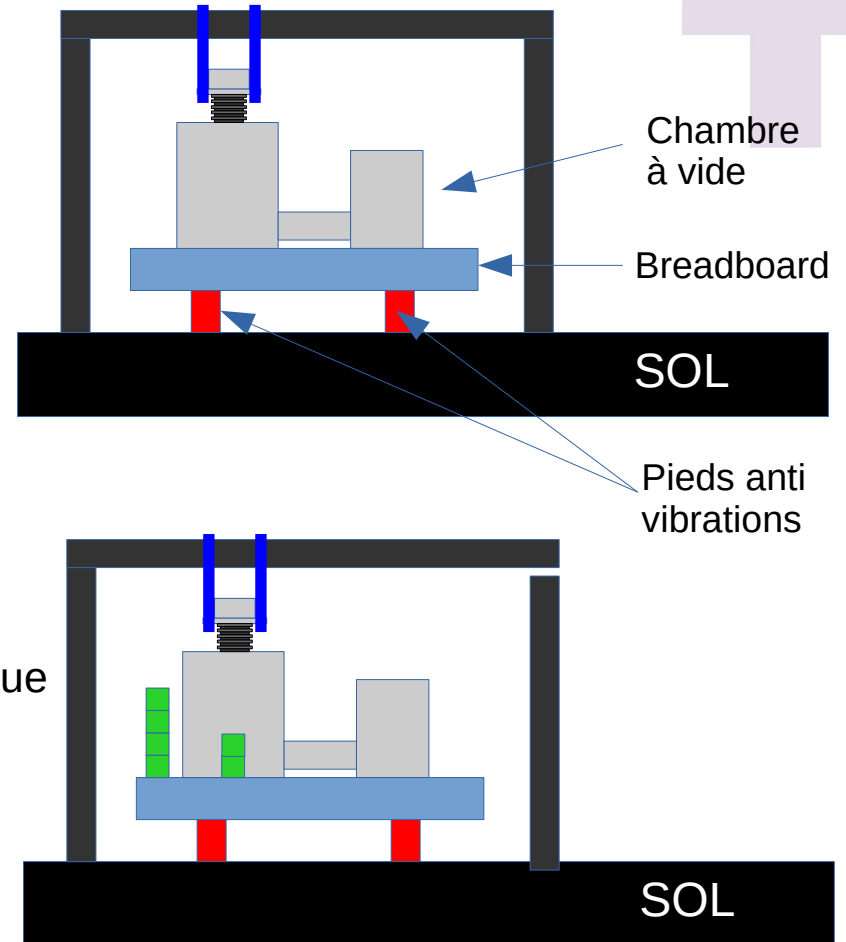
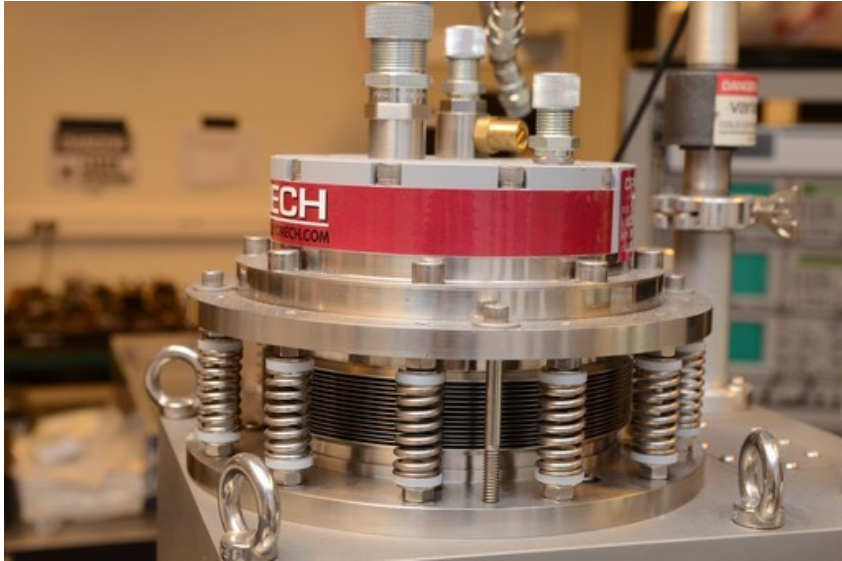
- ◆ Mesure des accélérations N/S , E/W et verticale avec un sismomètre



# EFFETS DÉGRADANTS LA STABILITÉ

## LES VIBRATIONS

- ◆ Tête du pulse tube fixée sur un bâti indépendant pour réduire les vibrations

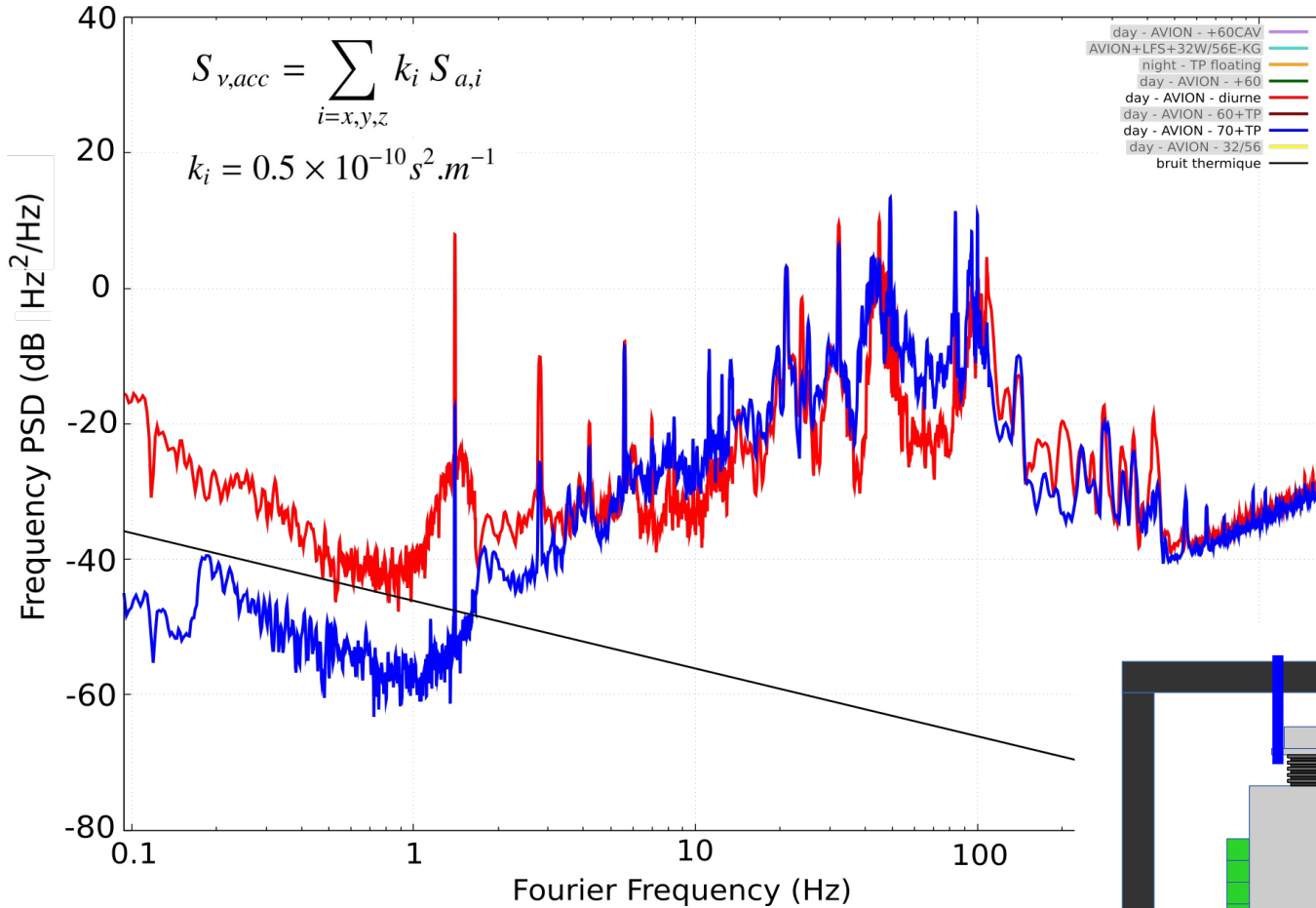


- ◆ Ballast pour compenser la pression atmosphérique
- ◆ Répartitions de poids (10 kg) sur le breadboard

# EFFETS DÉGRADANTS LA STABILITÉ

## LES VIBRATIONS

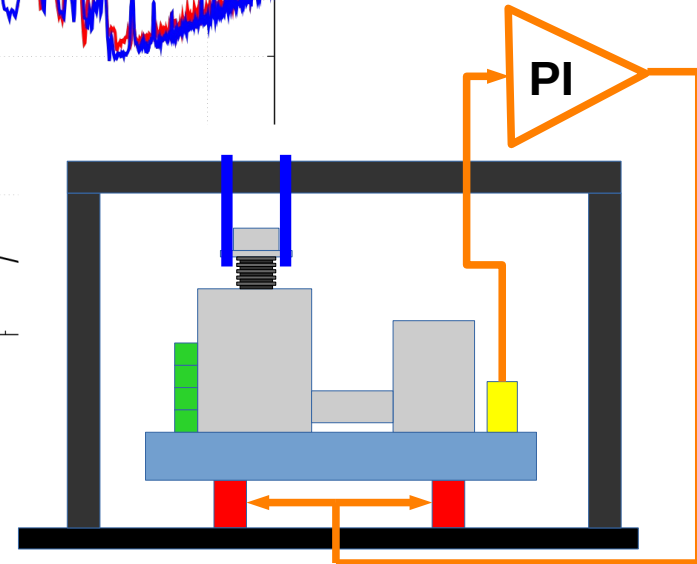
- ◆ Amélioration aux basses fréquences



- ◆ Peu pratique à long terme.



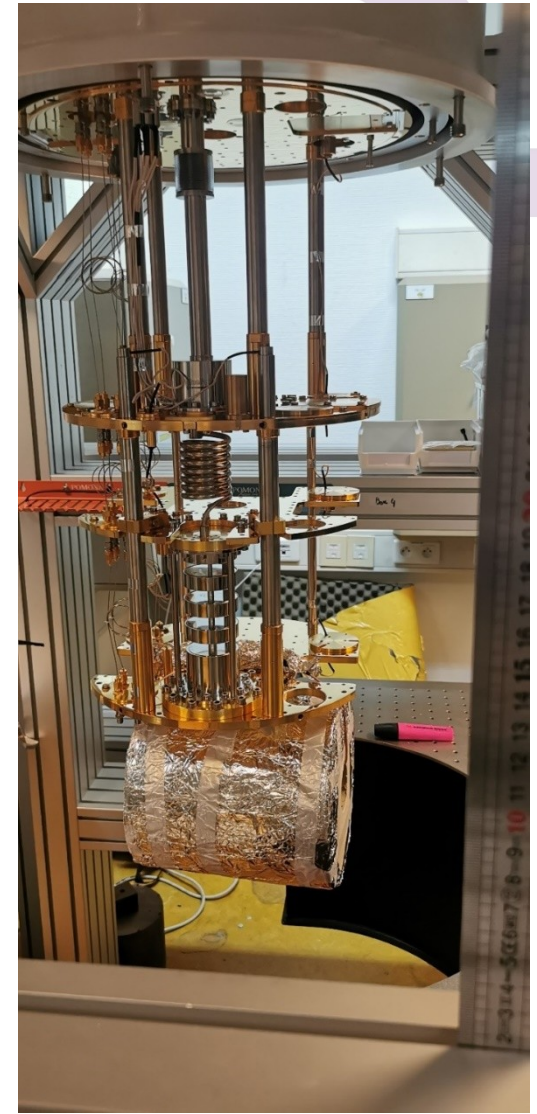
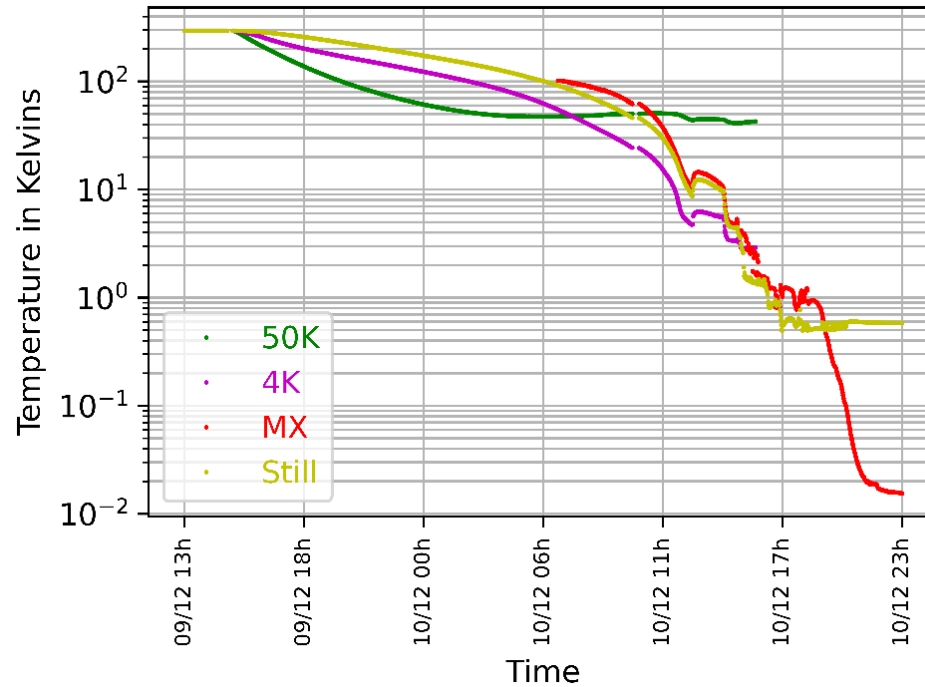
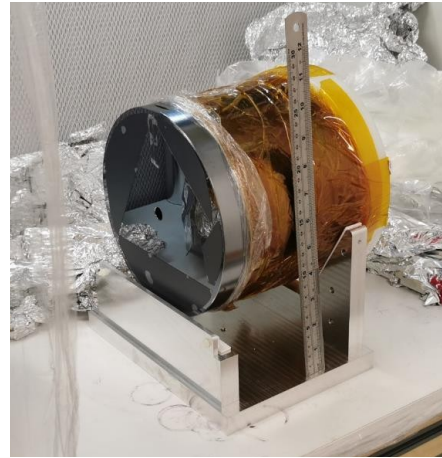
Mise en place d'un système de compensation actif...



# CAVITÉ SUB-KELVIN

## CARACTÉRISTIQUES

- ◆  $L = 18 \text{ cm}$ ,  $d = 20 \text{ cm}$
- ◆ Cryogénérateur à dilution  $T \approx 170 \text{ mK}$
- ◆ Stabilité visée:  $\sigma_y \approx 10^{-18}$





## CONCLUSION

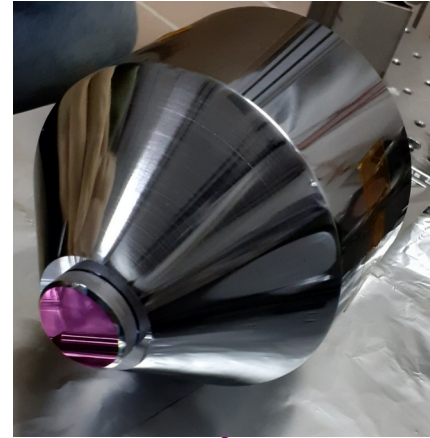
### • CAVITÉ 17 K – L = 14 cm

#### ◆ Objectif

$$\sigma_y = 3 \times 10^{-17}$$

#### ◆ Effets dégradant la stabilité :

- Modulation d'amplitude résiduelle ( $< 1,4 \times 10^{-7}$ )
- Vibrations ( $< 110 \text{ dB}(\text{m.s}^{-2})^2 / \text{Hz}$ )
- Fluctuations de puissance laser ( $< 100 \text{ pW}$ )



### • CAVITÉ SUB-K – L = 18 cm

#### ◆ Objectif

$$\sigma_y \approx 10^{-18}$$

#### ◆ En cours :

- Conception de la pièce de maintien
- Banc de mesure de finesse
- Collage des miroirs très prochainement

