



# Transfert de cohérence spectral via un interféromètre à fibre:

*plancher de bruit et méthodes d'asservissement*

*Stéphanie GRABIELLE, Debanjan Show, Jean-Pierre Coulon, Fabien Kéfélian  
Laboratoire ARTEMIS (CNRS /Observatoire Côte d'Azur/Université Côte d'azur)*



# Plan

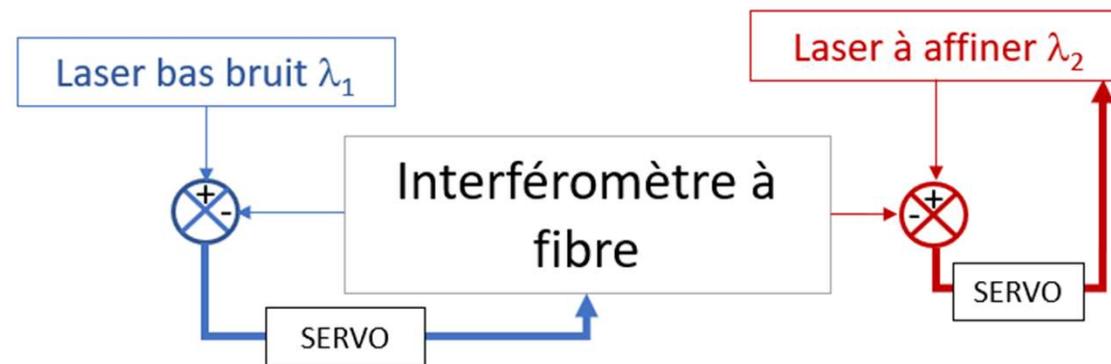
- **Contexte initial**
- **Asservissement Pound-Drever-Hall sur un interféromètre à fibre: améliorations et limites**
- **Transfert spectral par asservissement hétérodyne**
- **Conclusion**

# Plan

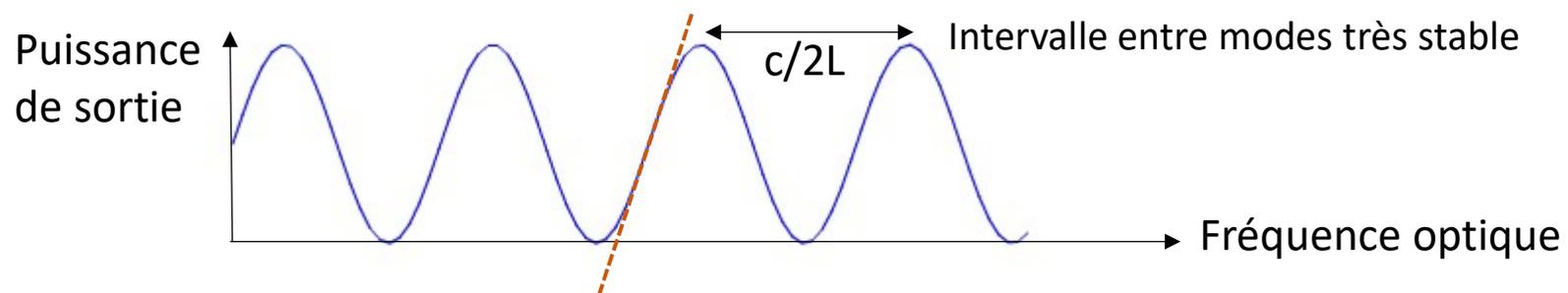
- **Contexte initial**
- **Asservissement Pound-Drever-Hall sur un interféromètre à fibre: améliorations et limites**
- **Transfert spectral par asservissement hétérodyne**
- **Conclusion**

# Contexte général

## Transfert spectral de cohérence via un interféromètre à fibre



- Discriminateur de fréquence optique similaire à la cavité Fabry-Pérot de transfert

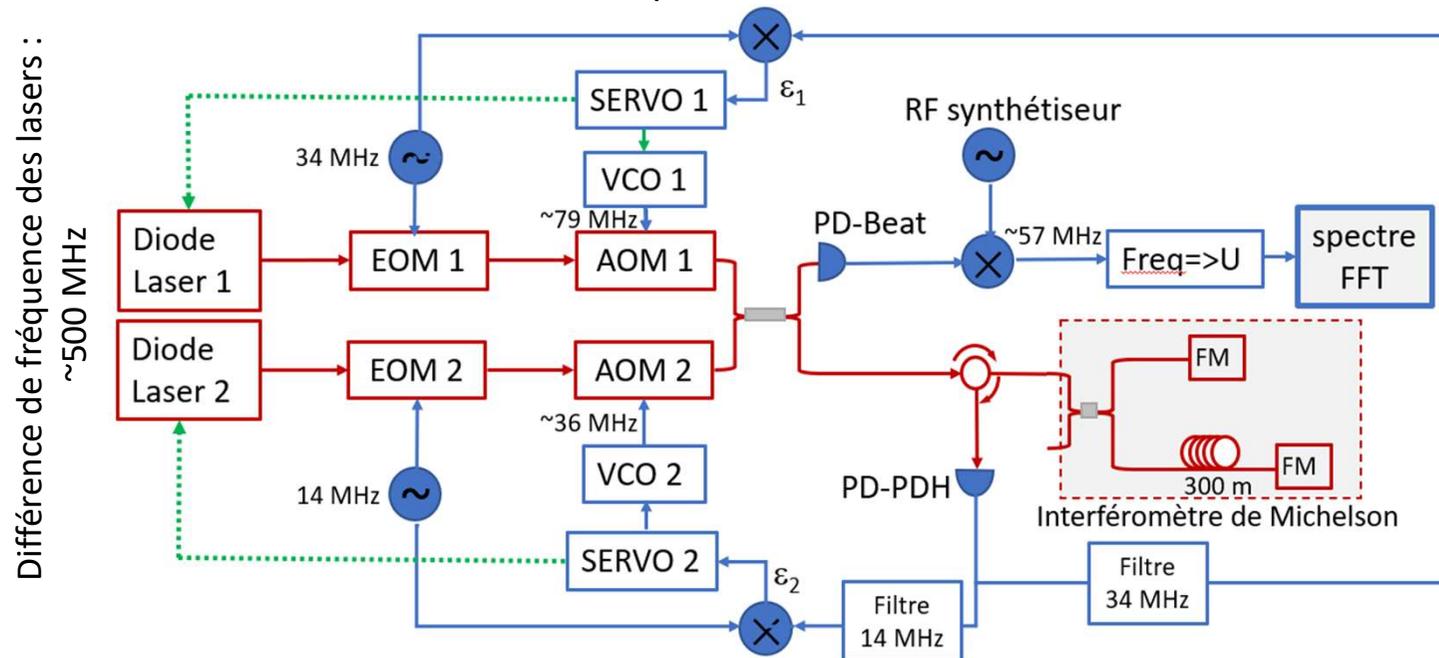


- Interféromètre à deux bras avec un désaccord de 1 km correspond à une cavité Fabry-Pérot de finesse 50 000

# Contexte initial

**Objectifs:** Mesurer le plancher de bruit d'asservissement Pound-Drever-Hall hors boucle d'un laser

**Méthode:** Caractérisation du bruit hors boucle par mesure du battement de deux diodes laser RIO asservies sur un même interféromètre pour s'affranchir du bruit de la fibre

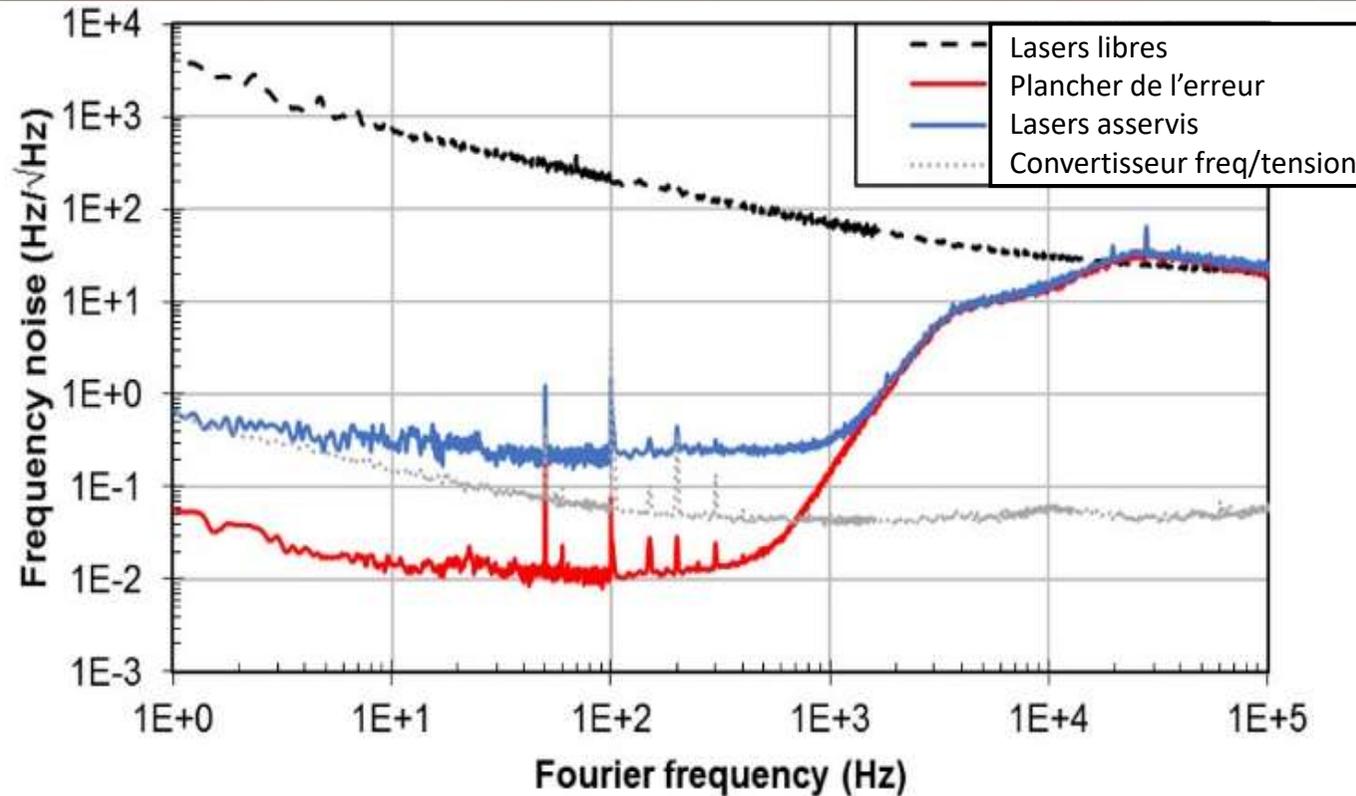


## Expériences précédentes (2016)

Bande d'asservissement: 30 kHz

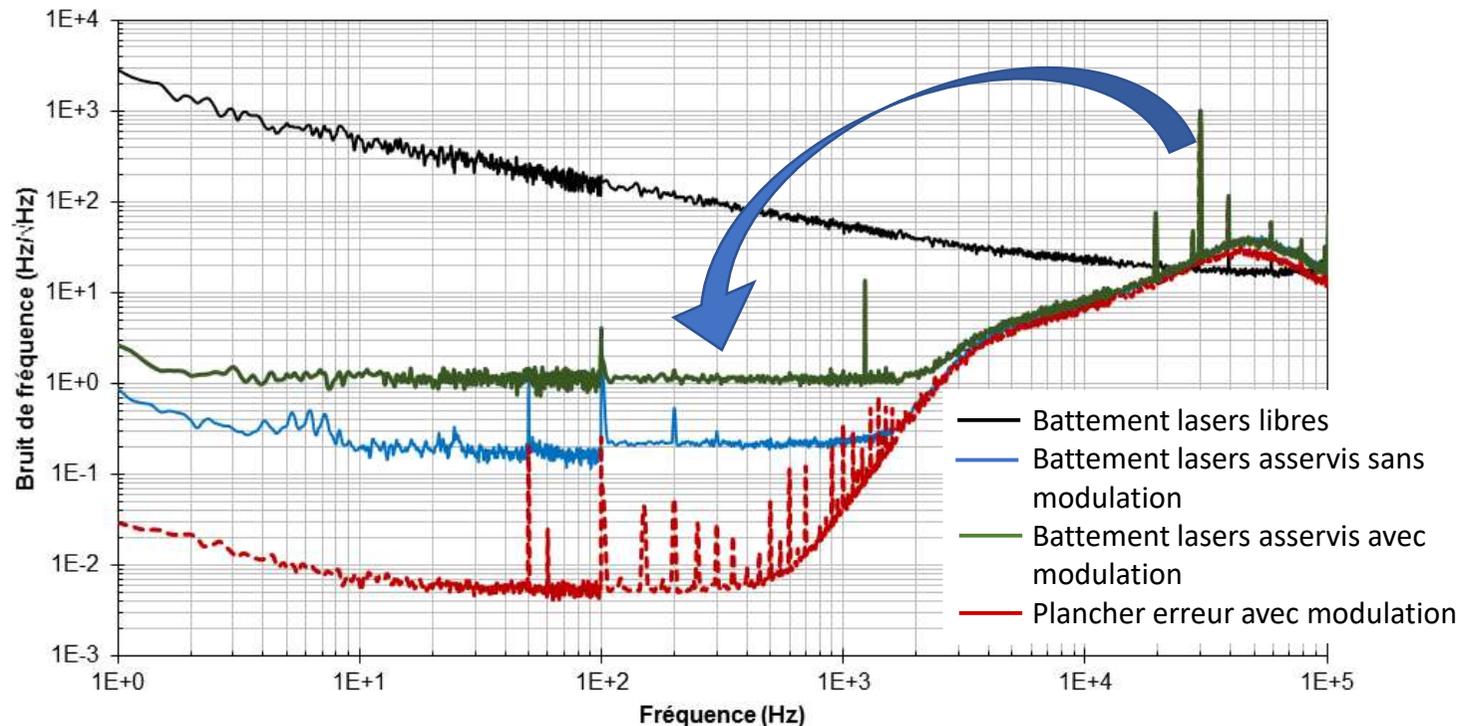
ISL de l'interféromètre 333 kHz

# Résultats précédents



Plancher de l'erreur  $< 2 \times 10^{-2} \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$  sur [20 Hz – 300 Hz] (ou  $4 \times 10^{-4} \text{ Hz}^2/\text{Hz}$ )  
Mise en évidence d'un bruit hors boucle blanc  $\sim 2 \times 10^{-1} \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$  (ou  $4 \times 10^{-2} \text{ Hz}^2/\text{Hz}$ )

# Origine du bruit blanc hors boucle



**Observation:** Modulation à 30 kHz d'un des lasers génère un bruit blanc qui augmente le plancher de bruit résiduel du battement des deux lasers

**Explication:** Non-linéarité du discriminateur de fréquence

$$\sin(\varepsilon(t)) \sim \varepsilon(t) - \frac{(\varepsilon(t))^3}{3!} + o((\varepsilon(t))^3)$$

# Plan

- Contexte initial
- **Asservissement Pound-Drever-Hall sur un interféromètre à fibre: améliorations et limites**
- Transfert spectral par asservissement hétérodyne
- Conclusion

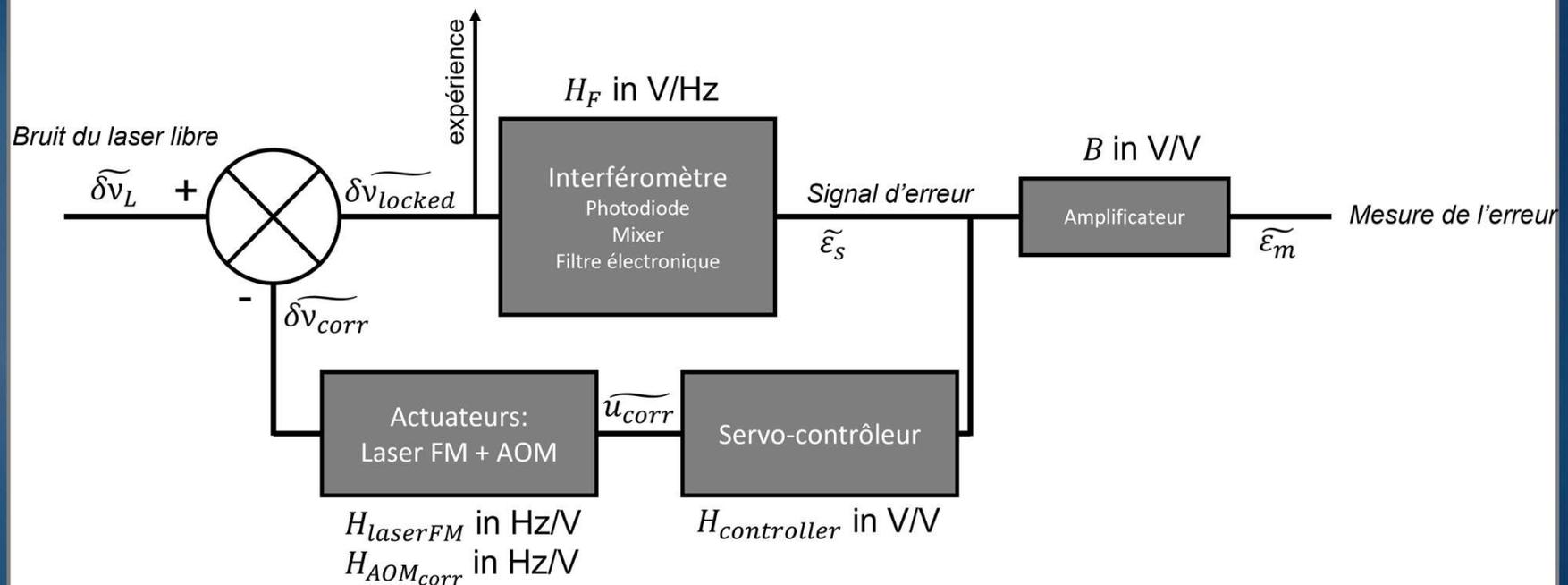
# Améliorations

## Objectifs:

Réduire le plancher de bruit hors boucle

## Comment?

Augmenter la bande d'asservissement au-delà de 30 kHz



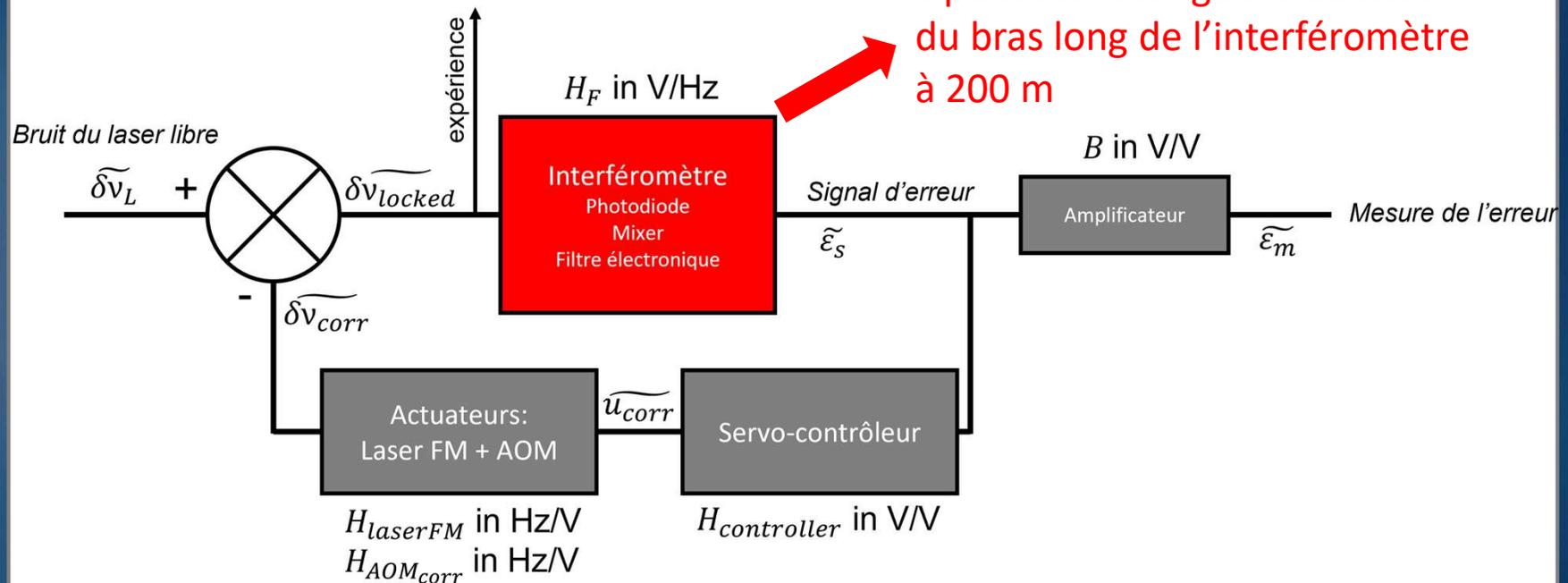
# Améliorations

## Objectifs:

Réduire le plancher de bruit hors boucle

## Comment?

Augmenter la bande d'asservissement



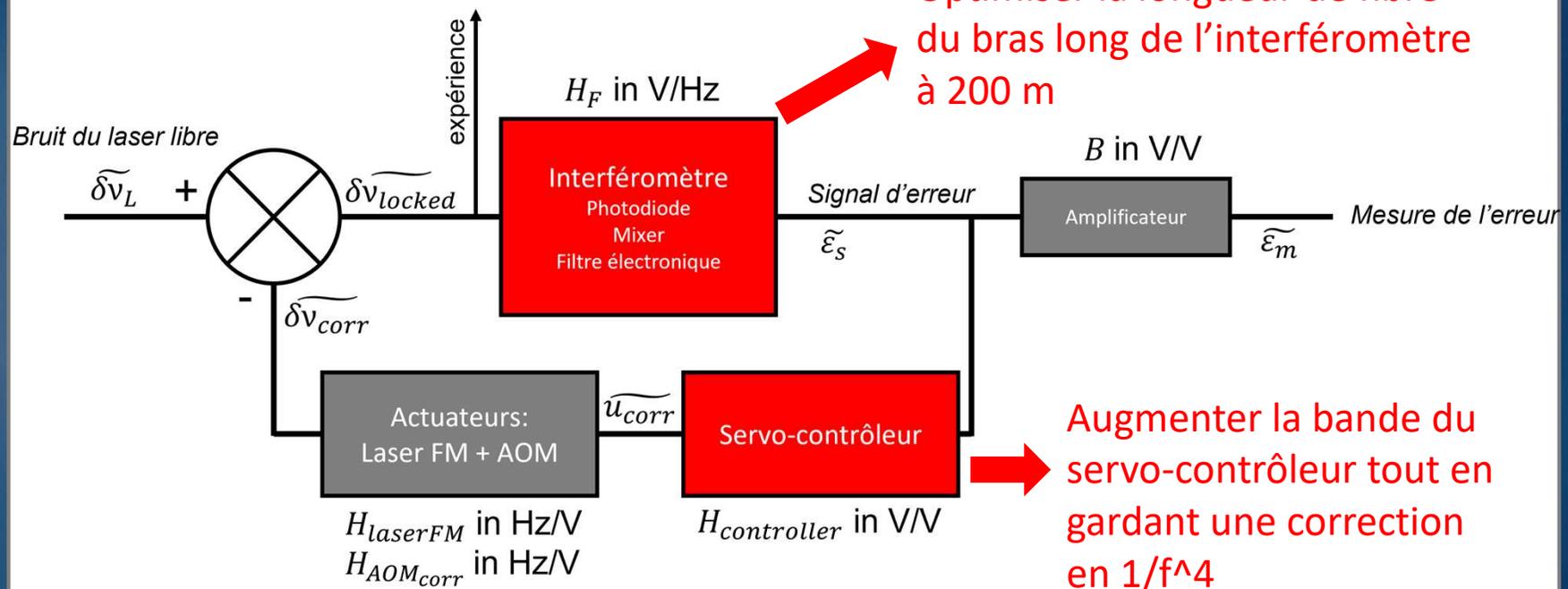
# Améliorations

## Objectifs:

Réduire le plancher de bruit hors boucle

## Comment?

Augmenter la bande d'asservissement



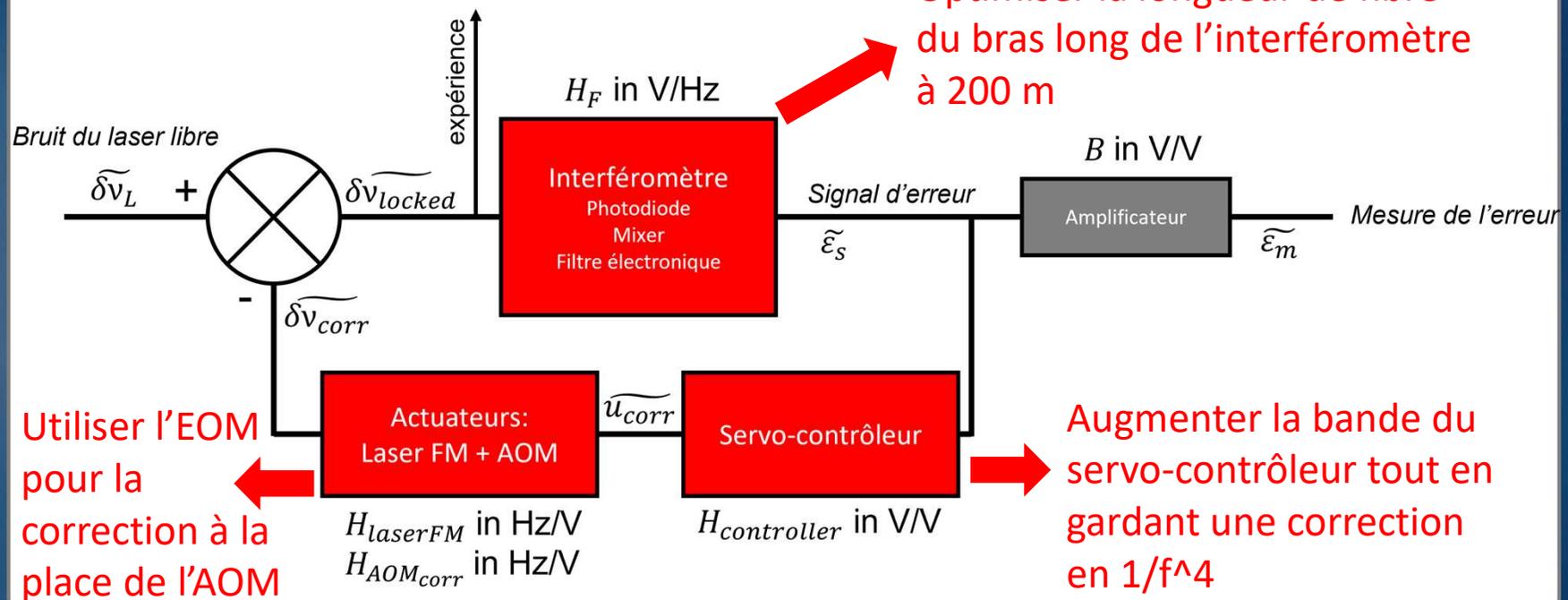
# Améliorations

## Objectifs:

Réduire le plancher de bruit hors boucle

## Comment?

Augmenter la bande d'asservissement



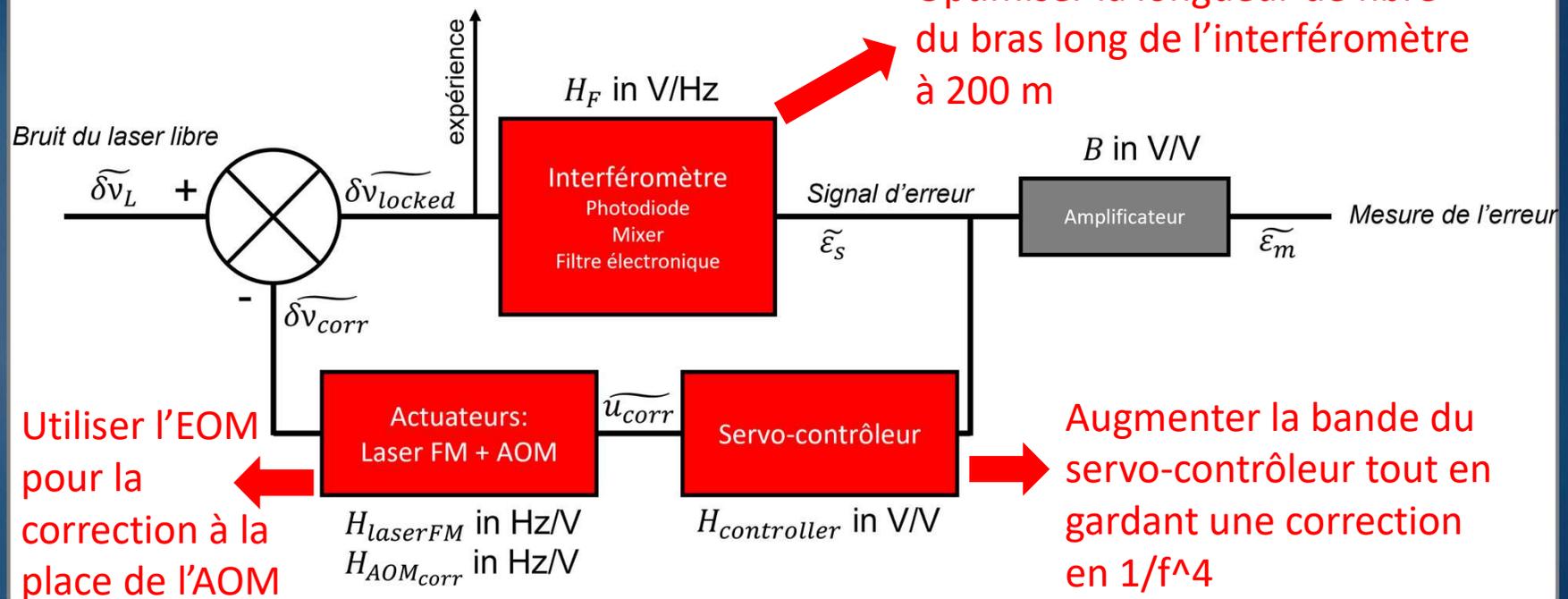
# Améliorations

## Objectifs:

Réduire le plancher de bruit hors boucle

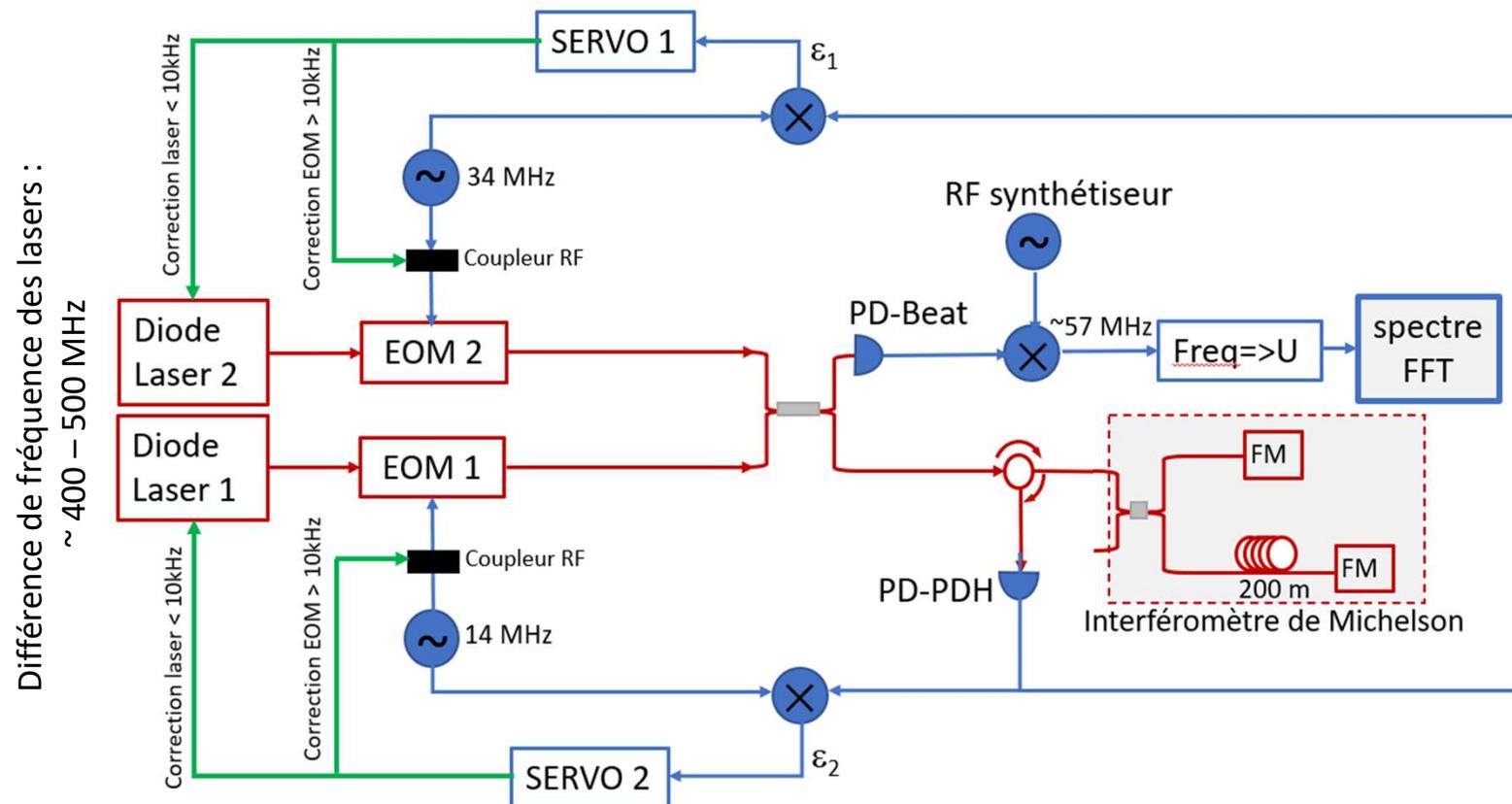
## Comment?

Augmenter la bande d'asservissement



Analyse des signaux jusqu'à 2 MHz

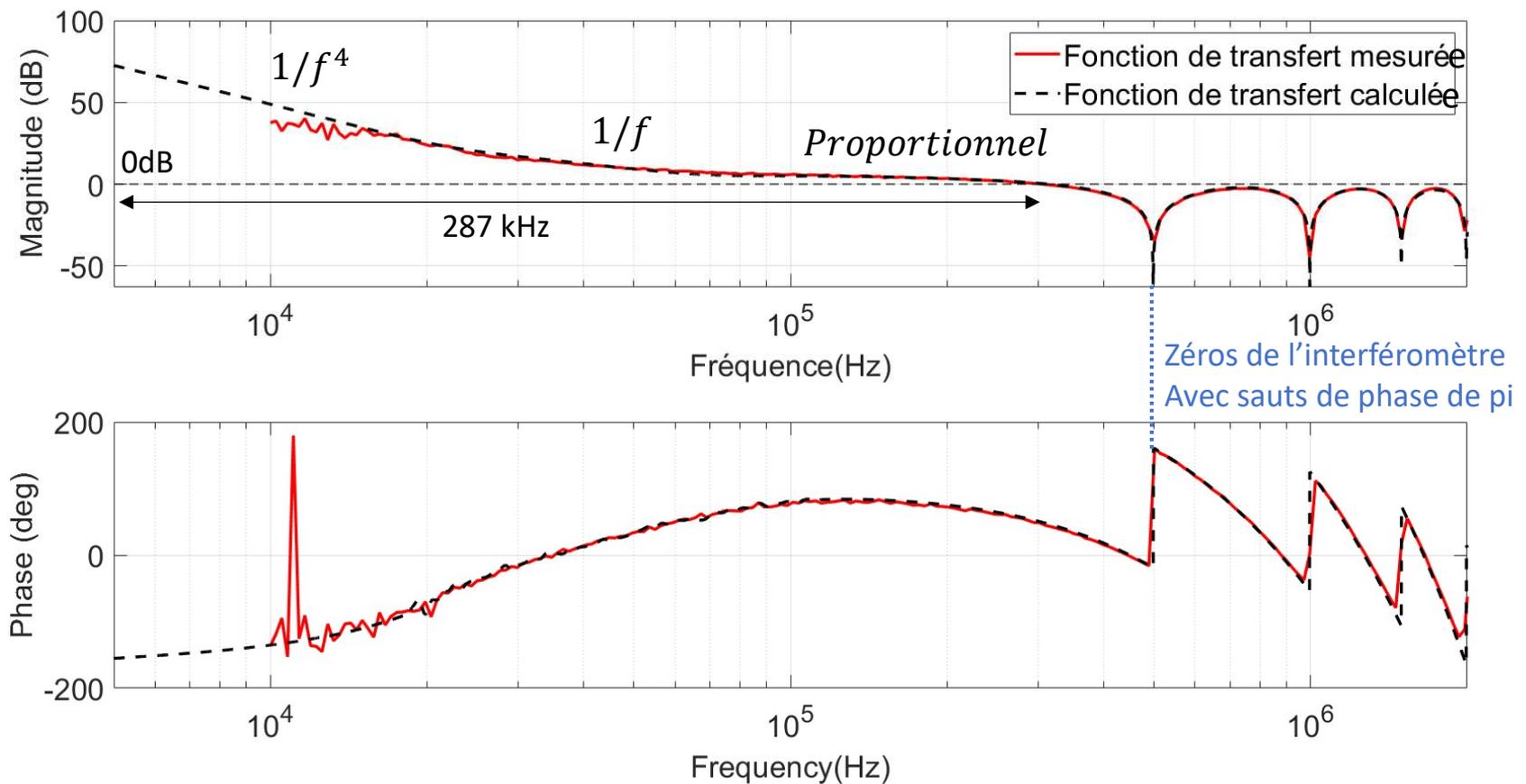
# Nouveau montage expérimental



ISL de l'interféromètre 498 kHz

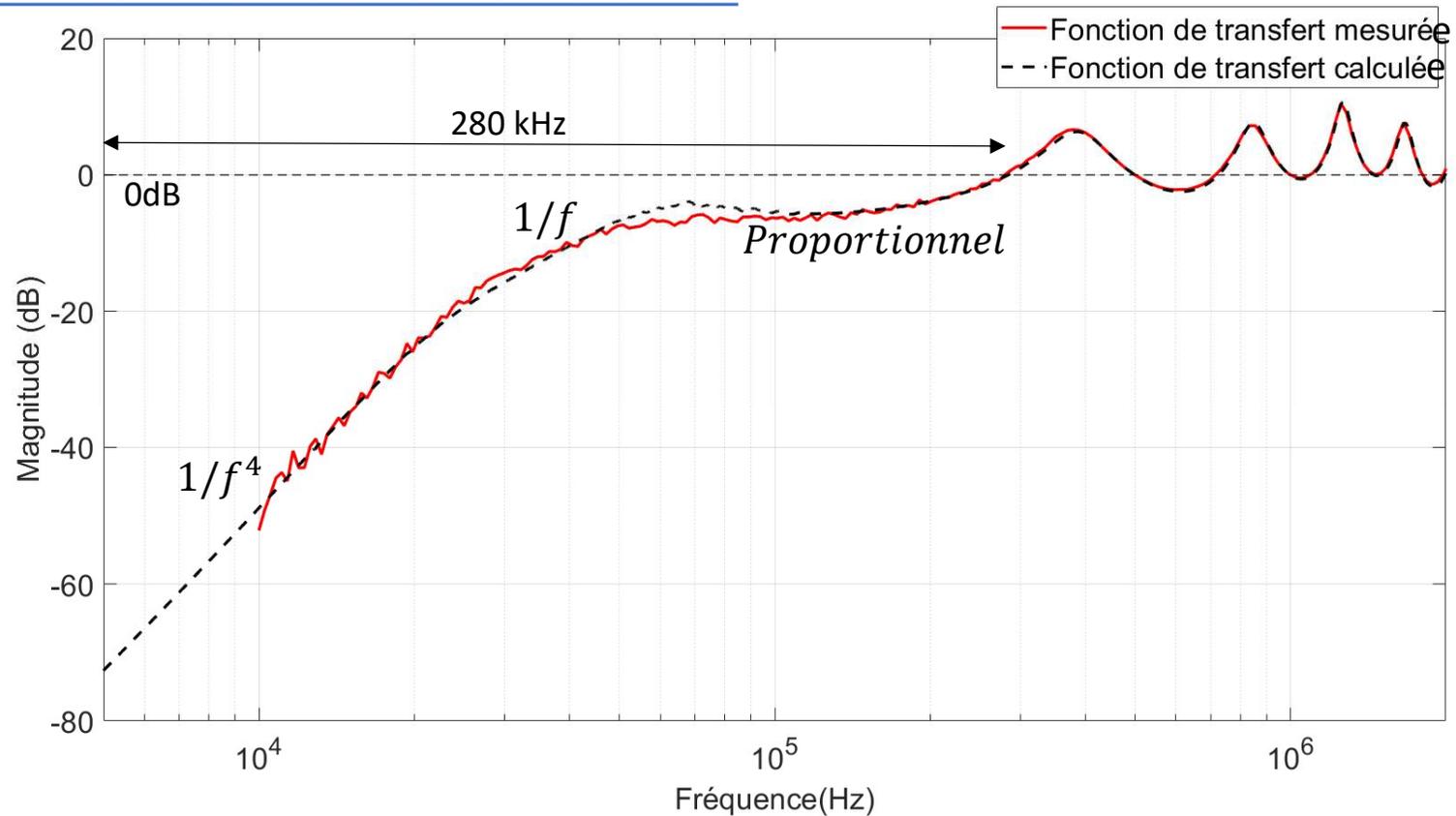
# Fonction de transfert globale

## Fonction de transfert en boucle ouverte



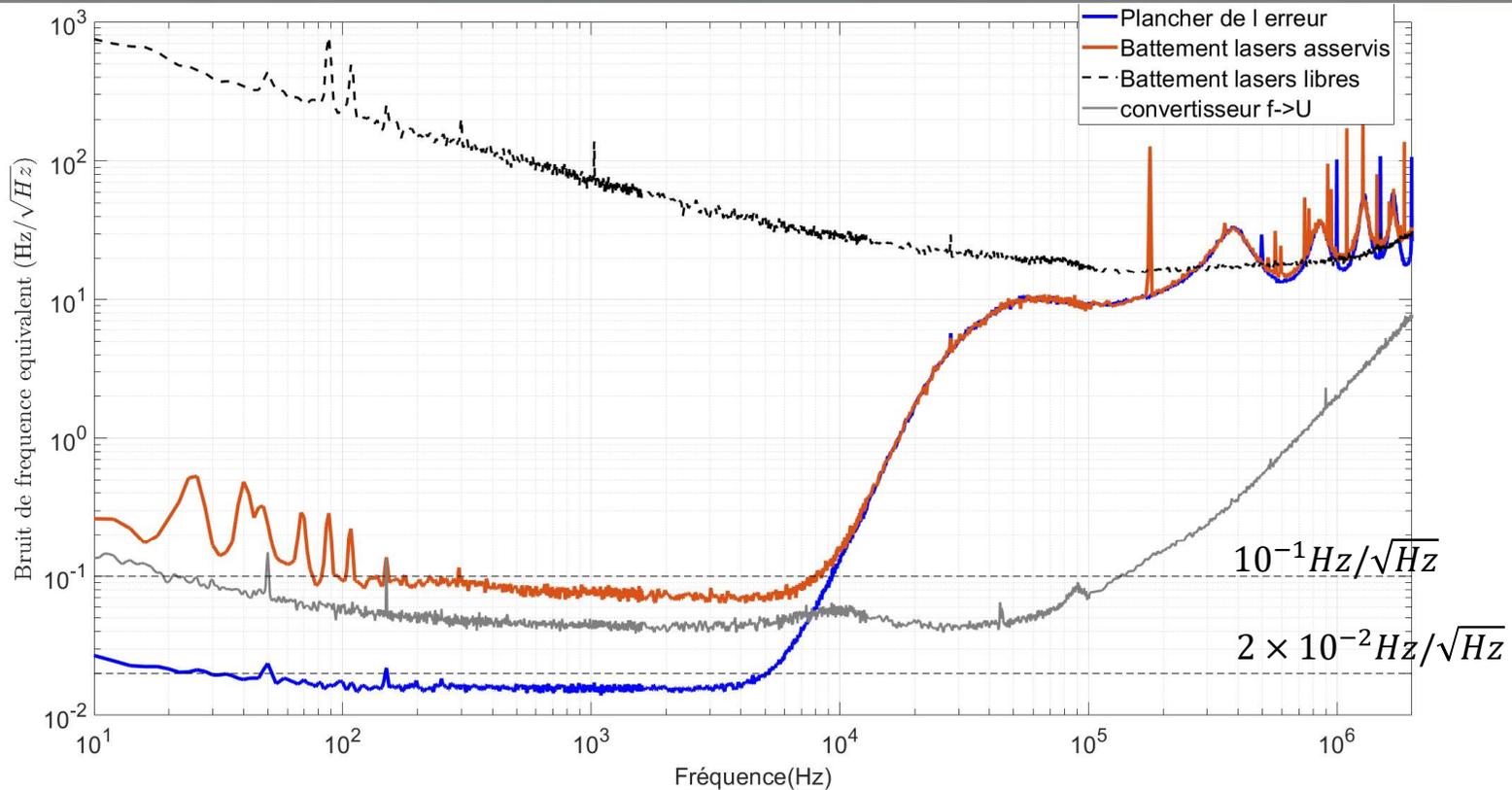
# Fonction de transfert globale

## Fonction de transfert en boucle fermée



Bande d'asservissement  $\times 9.3$  : 30 kHz  $\rightarrow$  280 kHz

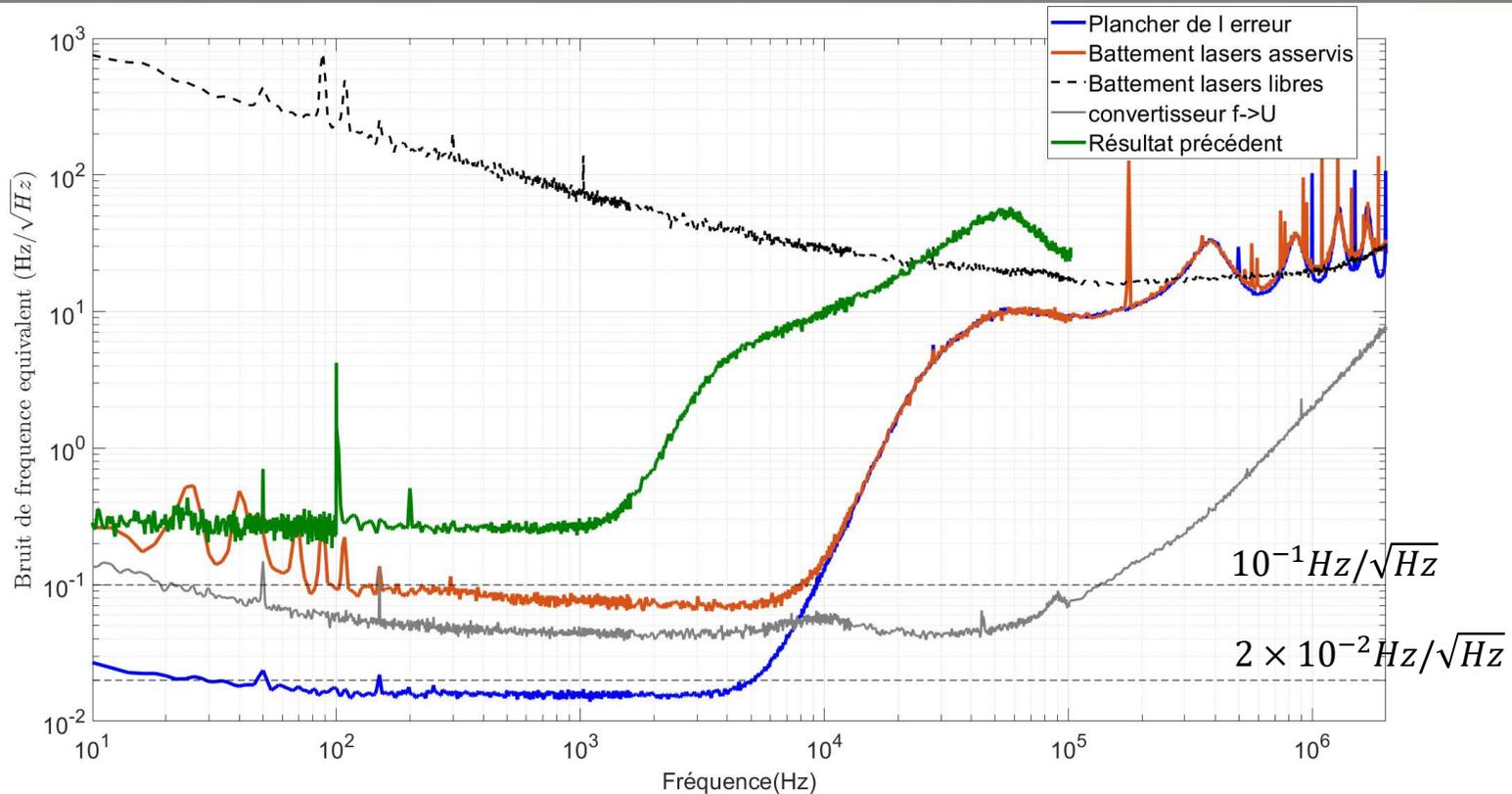
# Planchers de bruit



Plancher de l'erreur  $< 2 \times 10^{-2} \text{Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$  sur [30 Hz – 5 kHz] (ou  $4 \times 10^{-4} \text{Hz}^2/\text{Hz}$ )

Plancher du bruit de battement  $< 10^{-1} \text{Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$  sur [120 Hz – 8 kHz] (ou  $< 10^{-2} \text{Hz}^2/\text{Hz}$ )

# Planchers de bruit



**Plancher de l'erreur  $< 2 \times 10^{-2} \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$  sur [30 Hz – 5 kHz] (ou  $4 \times 10^{-4} \text{ Hz}^2/\text{Hz}$ )**  
**Plancher du bruit de battement  $< 10^{-1} \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$  sur [120 Hz – 8 kHz] (ou  $< 10^{-2} \text{ Hz}^2/\text{Hz}$ )**

# Limitations et perspectives

- Plancher de bruit  $\sim 7 \times 10^{-2} \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$  sur [1 kHz – 6 kHz] (ou  $4,9 \times 10^{-3} \text{ Hz}^2/\text{Hz}$ )
- Convertisseur de Fréquence  $\in [4,3 \times 10^{-2} - 5 \times 10^{-2} \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}]$  sur [1 kHz – 6 kHz] (ou  $2,5 \times 10^{-3} \text{ Hz}^2/\text{Hz}$ )

➡ **La limite du convertisseur fréquence-tension est presque atteinte**

- Modèle simple de non-linéarité du discriminateur de fréquence n'explique pas la différence entre plancher de bruit et plancher d'erreur

➡ **Amélioration de la modélisation en cours**

**Autres sources de bruit?**

**Pistes en cours d'études:**

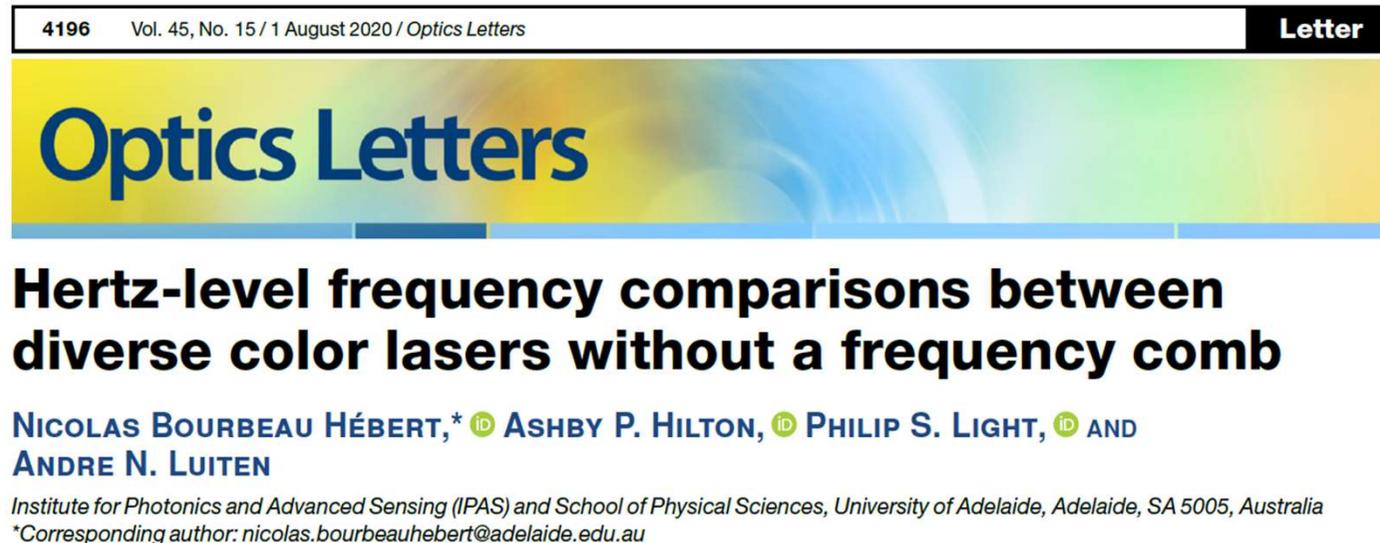
- Couplage de parasites par l'EOM en fonction de l'amplitude de la modulation
- Couplage entre les signaux de correction des deux lasers à haute fréquence (>1MHz)

# Plan

- **Contexte initial**
- **Asservissement Pound-Drever-Hall sur un interféromètre à fibre: améliorations et limites**
- **Transfert spectral par asservissement hétérodyne**
- **Conclusion**

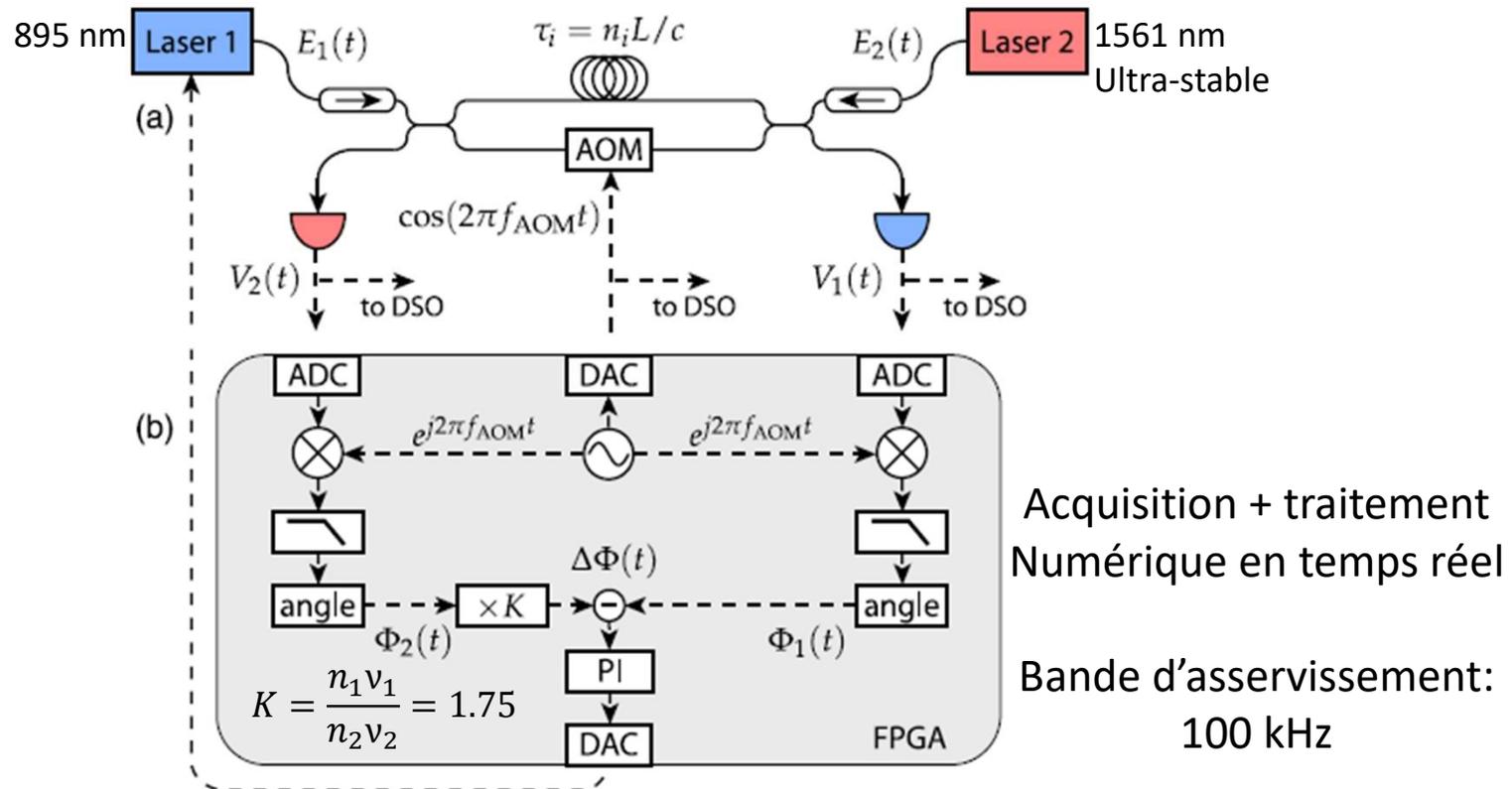
# Contexte

Travaux de Bourbeau Hébert et. al (2020): transfert spectral de cohérence entre deux lasers de grandes différences de longueurs d'onde via un interféromètre à fibre



# Contexte

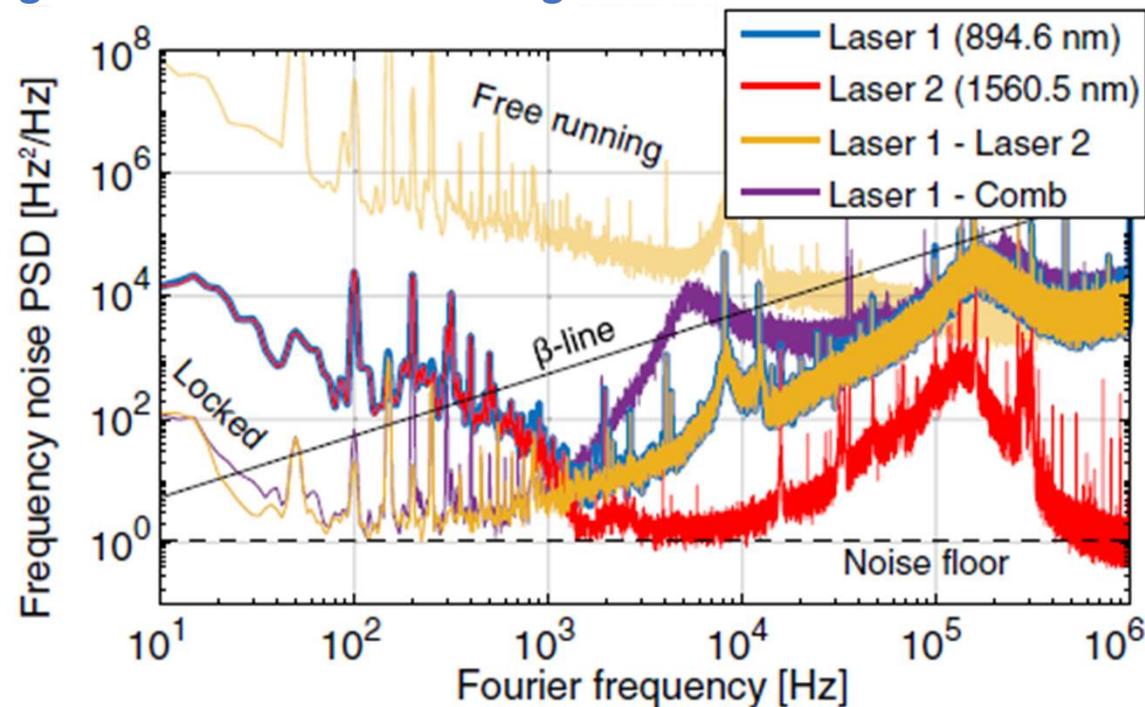
Travaux de Bourbeau Hébert et. al (2020): transfert spectral de cohérence entre deux lasers de grandes différences de longueurs d'onde via un interféromètre à fibre



➔ Transfert spectral de cohérence par asservissement unique

# Contexte

Travaux de Bourbeau Hébert et. al (2020): transfert spectral de cohérence entre deux lasers de grandes différences de longueurs d'onde via un interféromètre à fibre



- **Plancher de bruit de battement** des lasers asservis limités à  $1 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$  par l'acquisition numérique
- Cette technique permet de **s'affranchir des fluctuations de délais de l'interféromètre**

# Objectifs

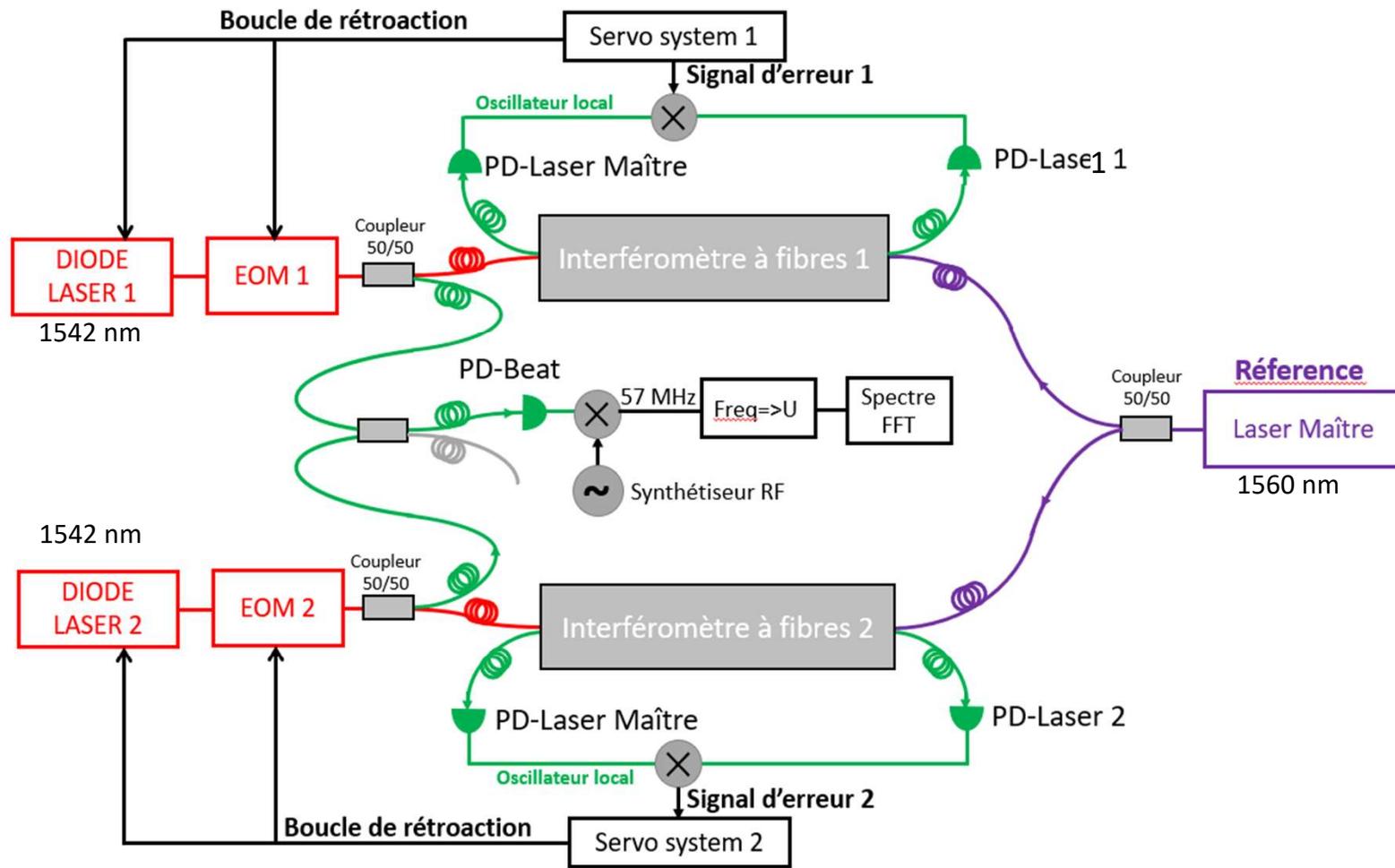
- Utiliser la **simplicité de l'asservissement unique par méthode hétérodyne** pour le **transfert spectral de cohérence entre deux lasers** de différence de longueurs d'onde égale à **18 nm**.
- Conserver la **spécificité de la boucle d'asservissement analogique** utilisée en Pound-Drever-Hall

## Objectif de l'étude:

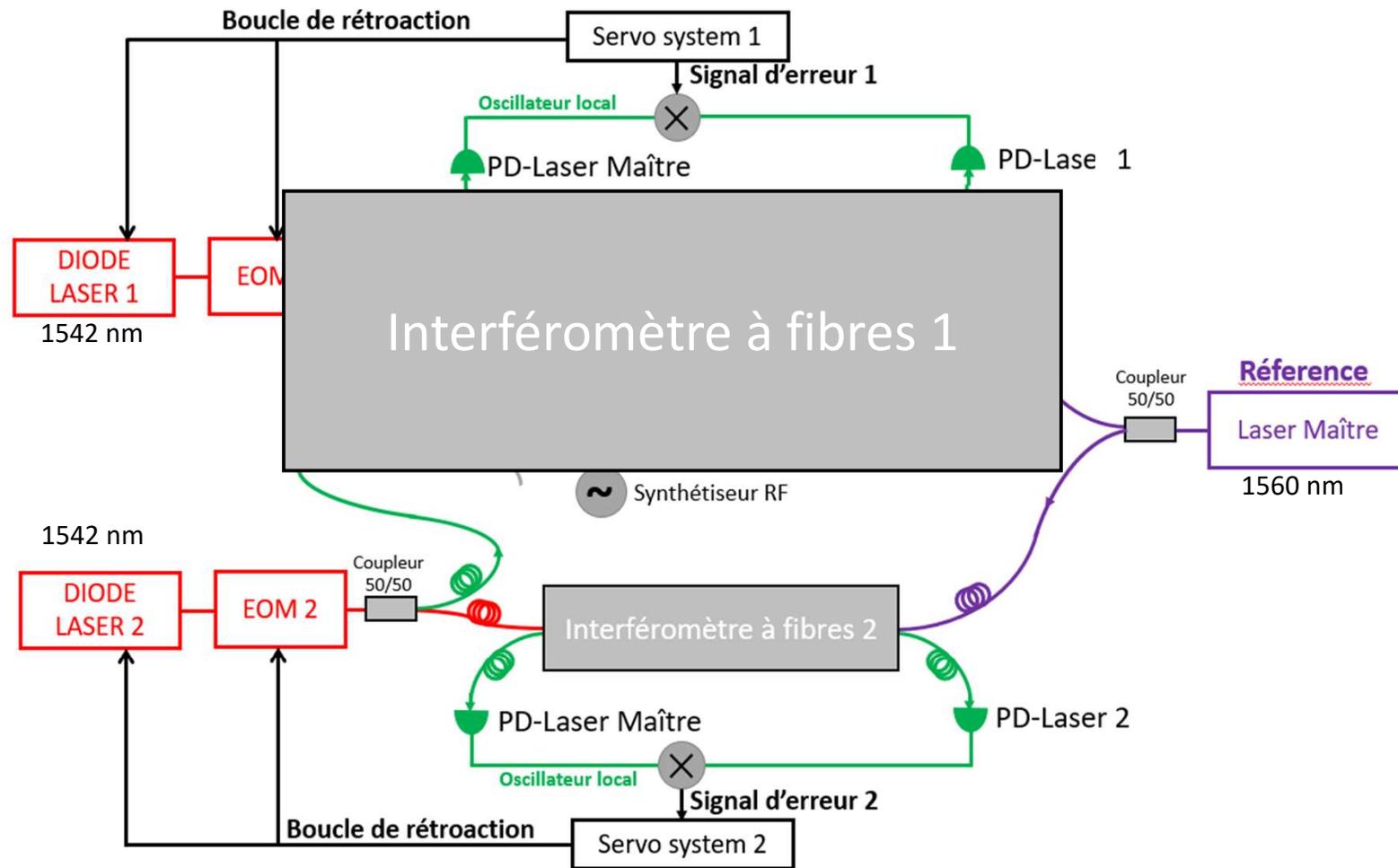
**Quelles sont les limitations du plancher de bruit de battement en tout analogique?**

- Expérience d'asservissement simple de deux lasers (diode laser RIO à 1542 nm) sur un laser maître (diode laser RIO à 1560 nm) via deux interféromètres à fibres.
- Mesure du bruit de battement des deux lasers esclaves asservis sur le laser maître

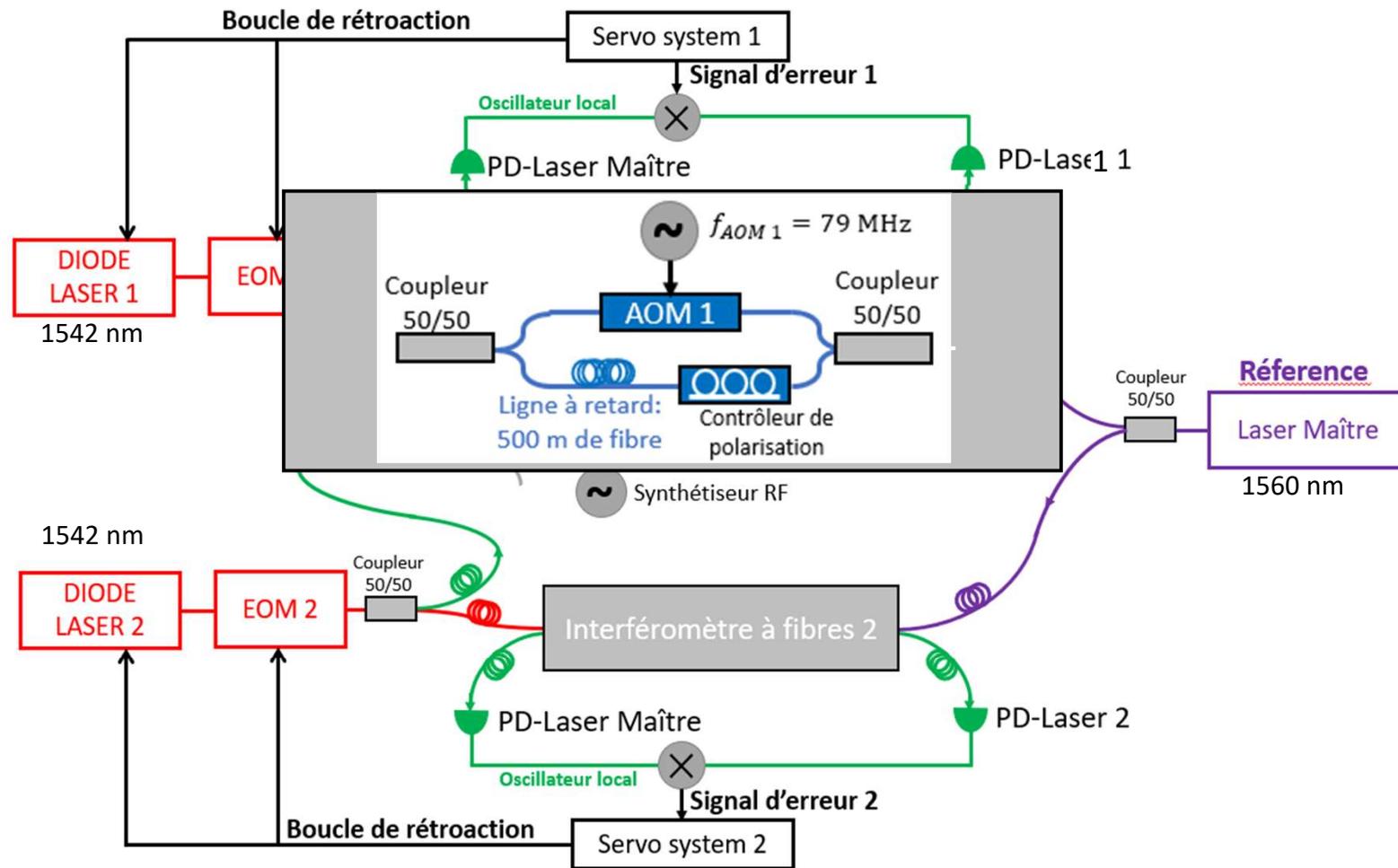
# Montage expérimental



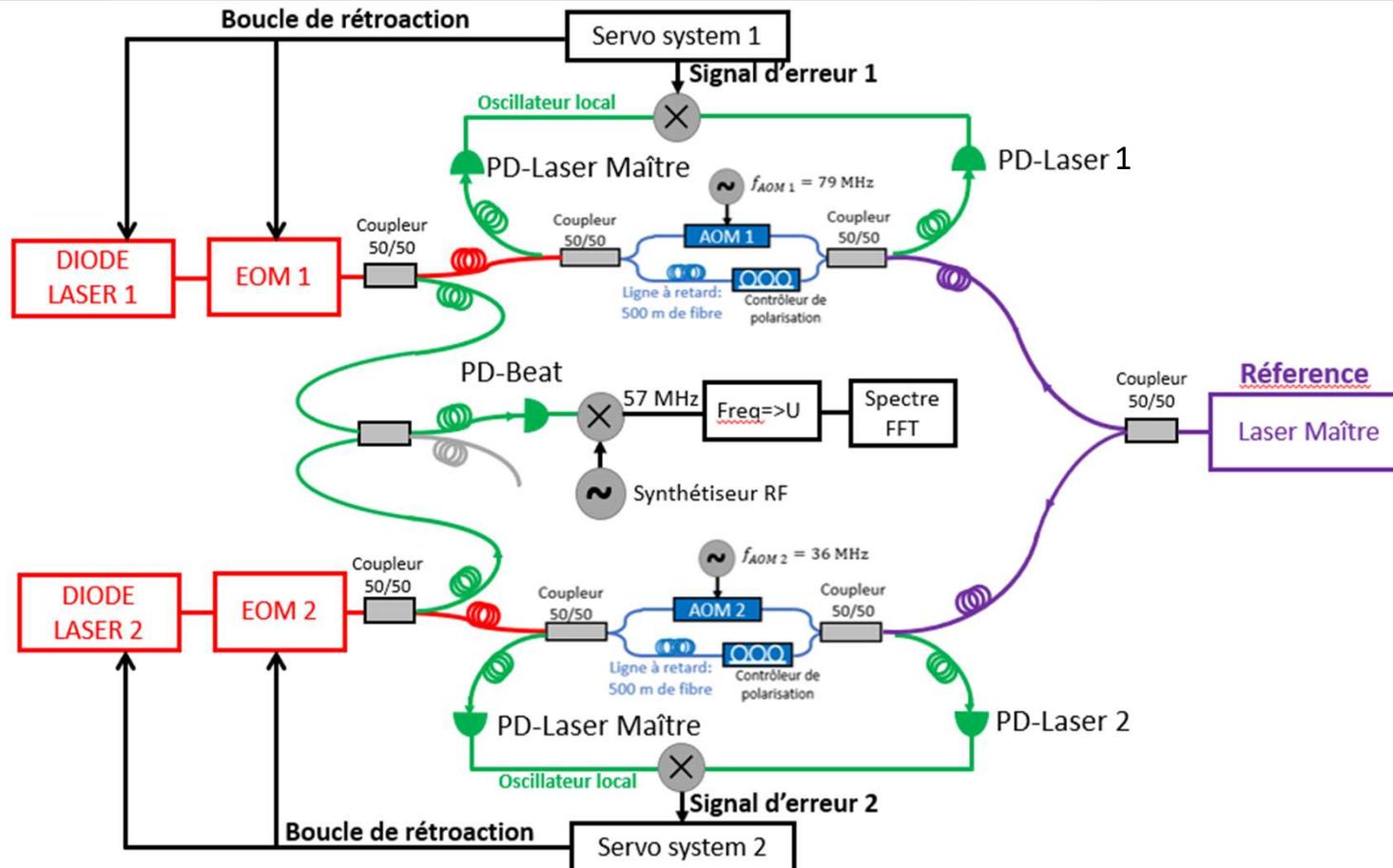
# Montage expérimental



# Montage expérimental



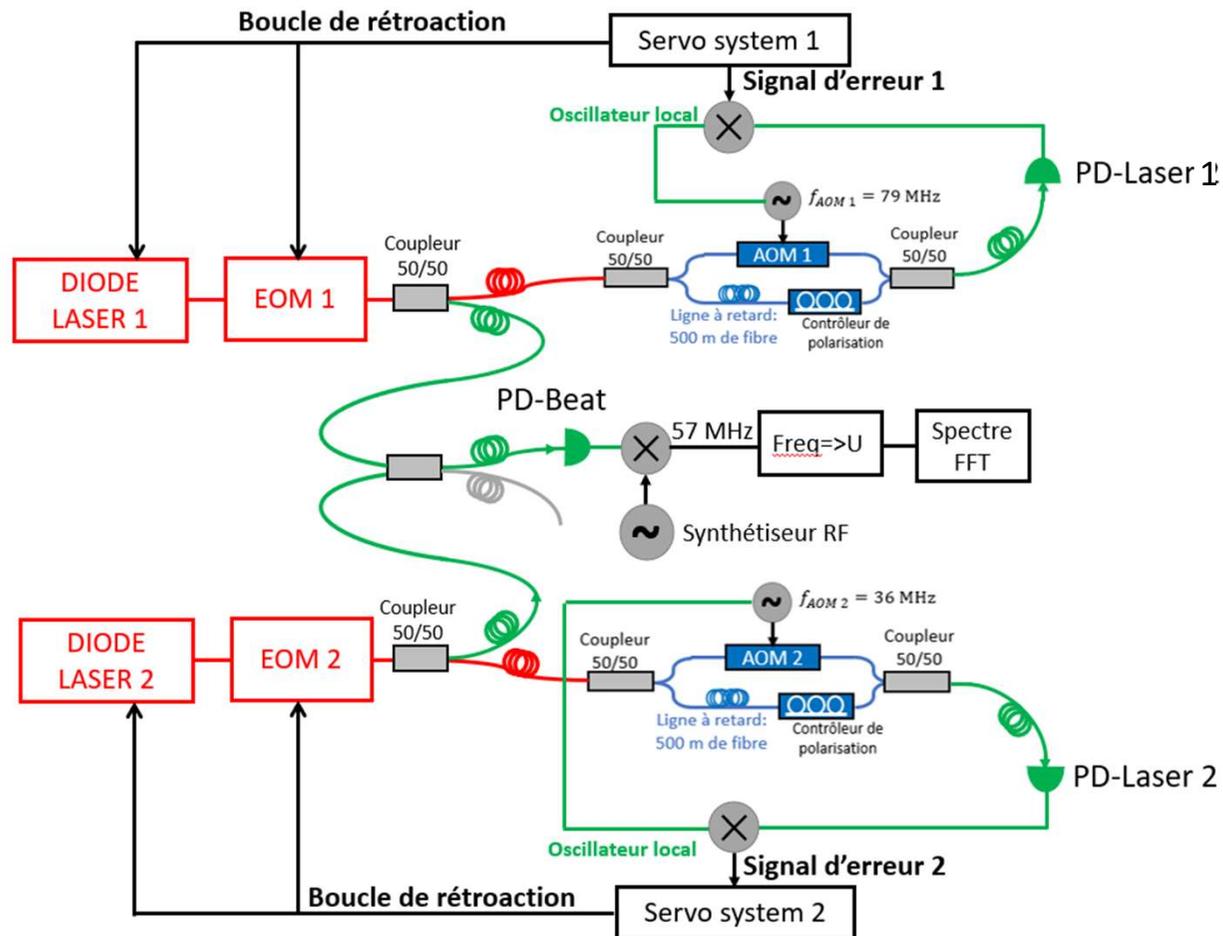
# Montage expérimental - Détails



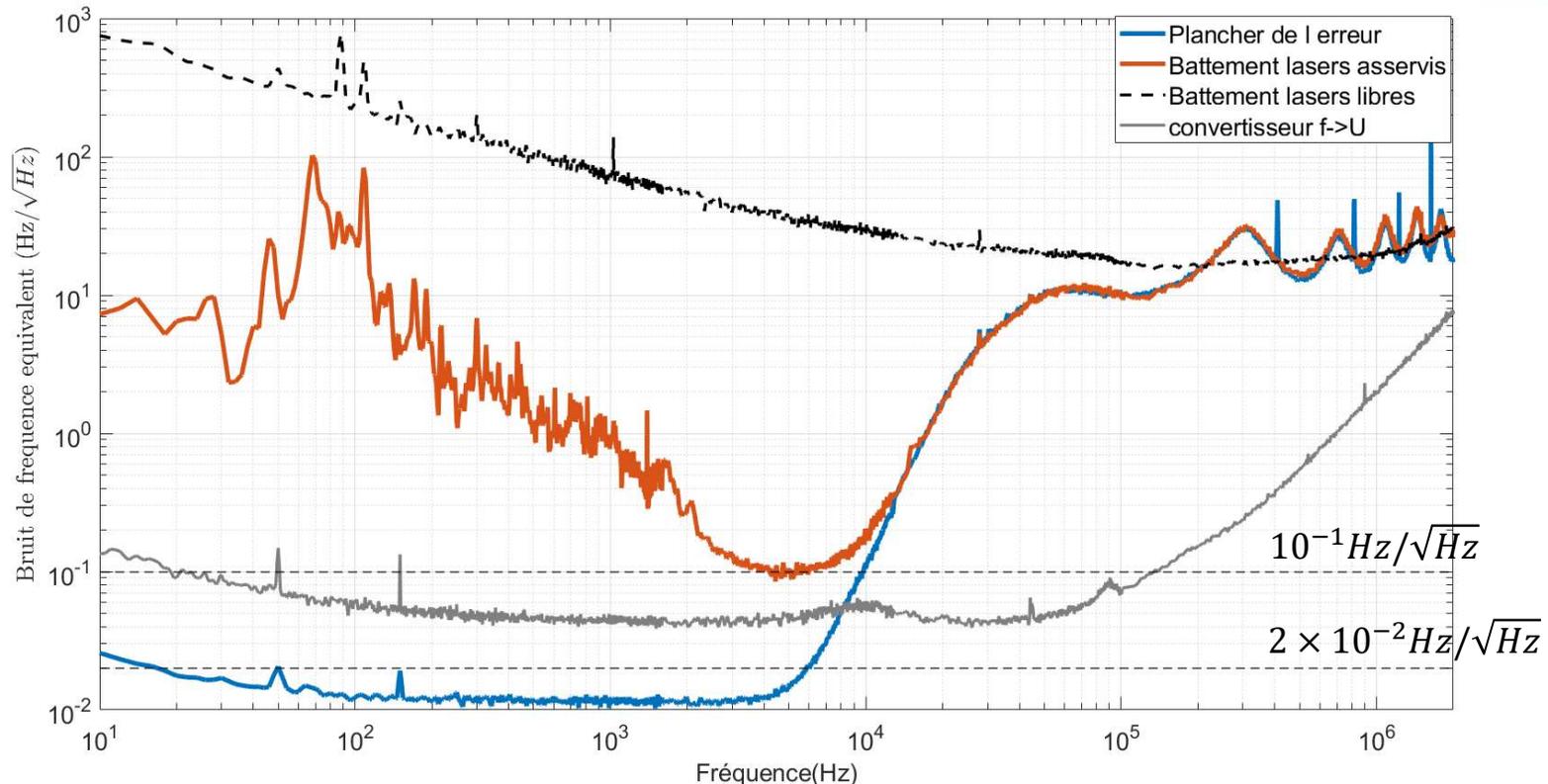
On s'attend à être limité par la somme des bruits des fibres

# Etape préalable: asservissement sur interféromètre

## Montage expérimental



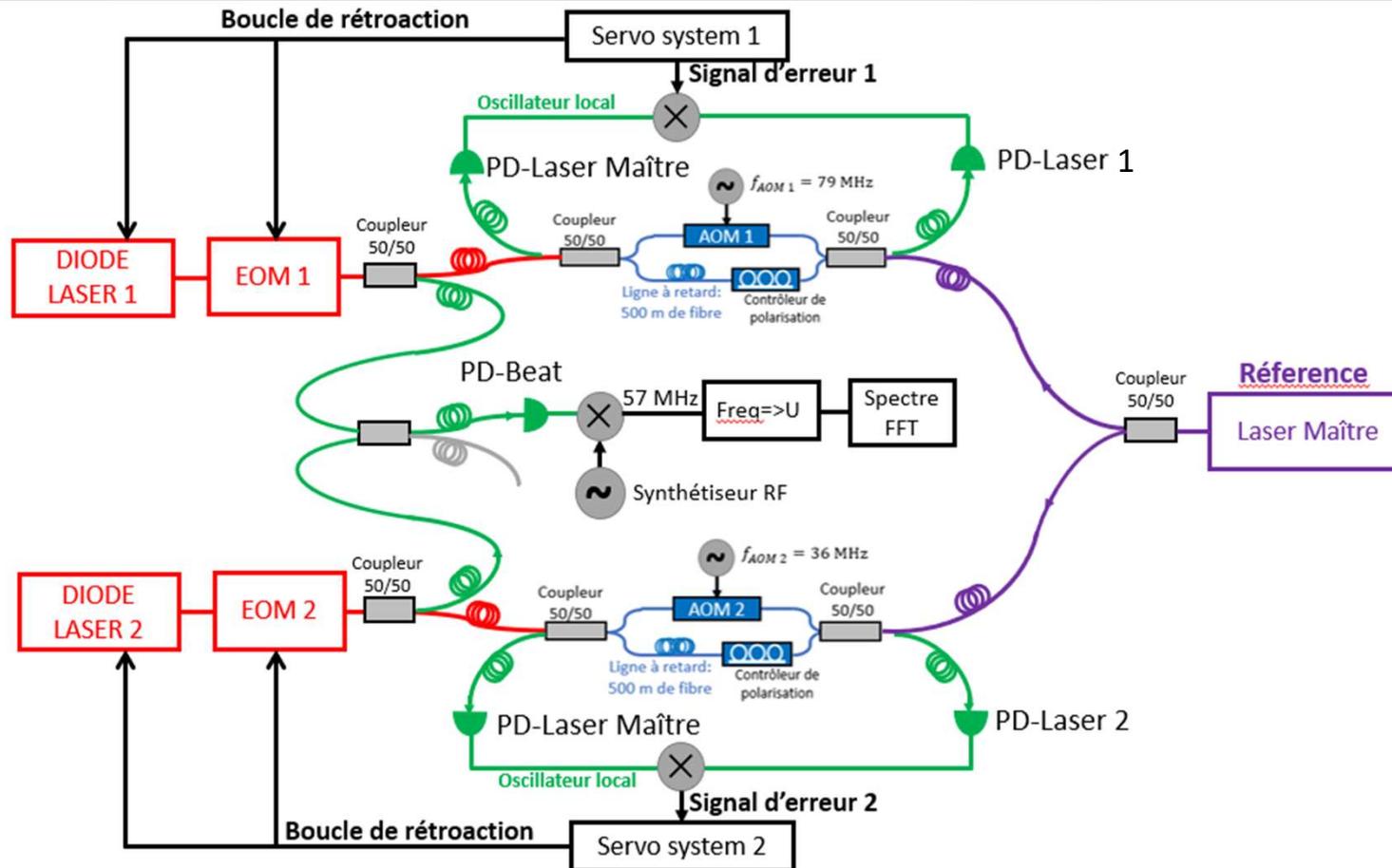
# Planchers de bruit



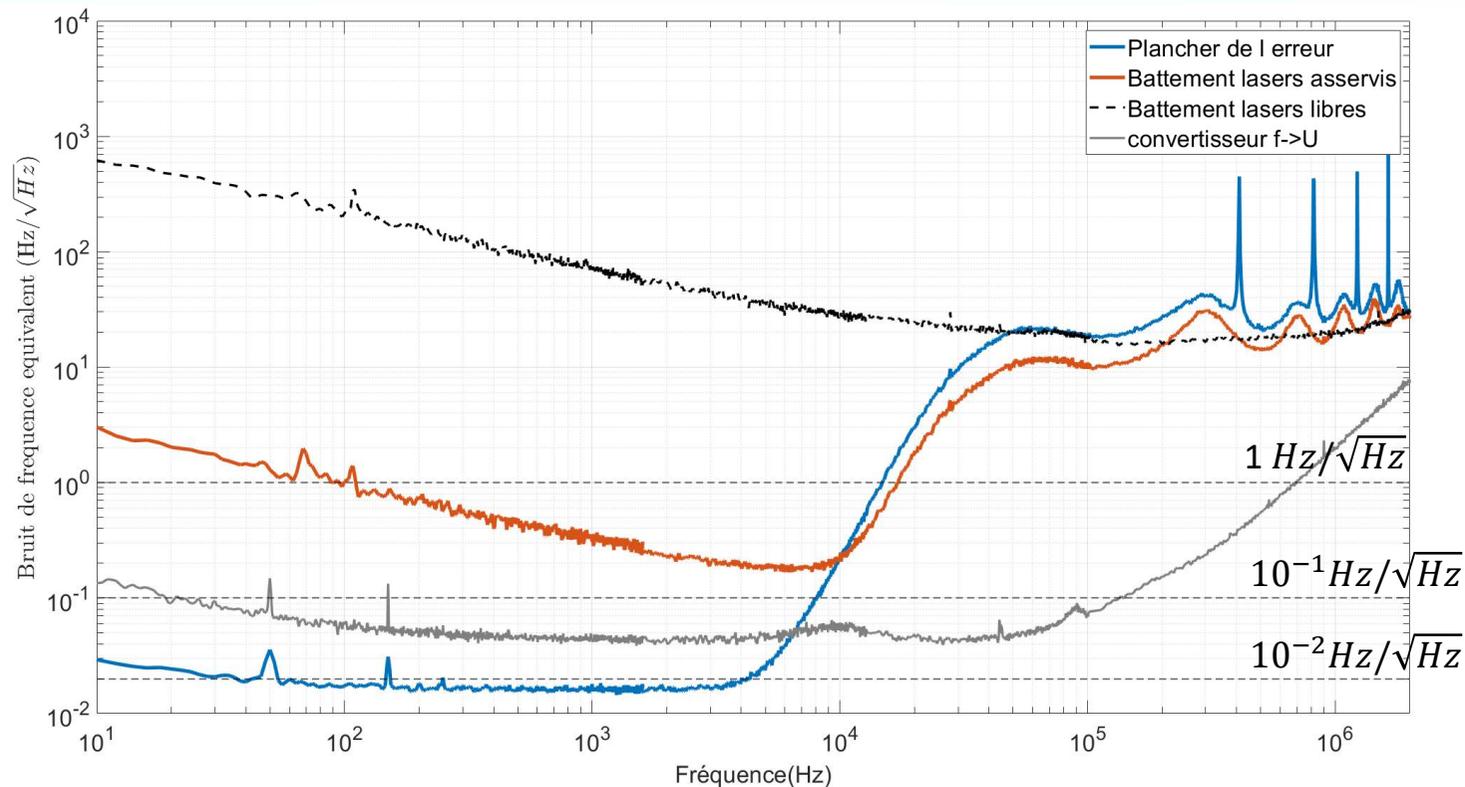
Plancher de l'erreur  $< 2 \times 10^{-2} \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$  sur [20 Hz – 6 kHz] (ou  $4 \times 10^{-4} \text{ Hz}^2/\text{Hz}$ )

Plancher du bruit de battement atteint  $10^{-1} \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$  sur [4 kHz – 6 kHz] (ou  $10^{-2} \text{ Hz}^2/\text{Hz}$ )

# Montage expérimental



# Asservissement sur laser maître: Plancher de bruit

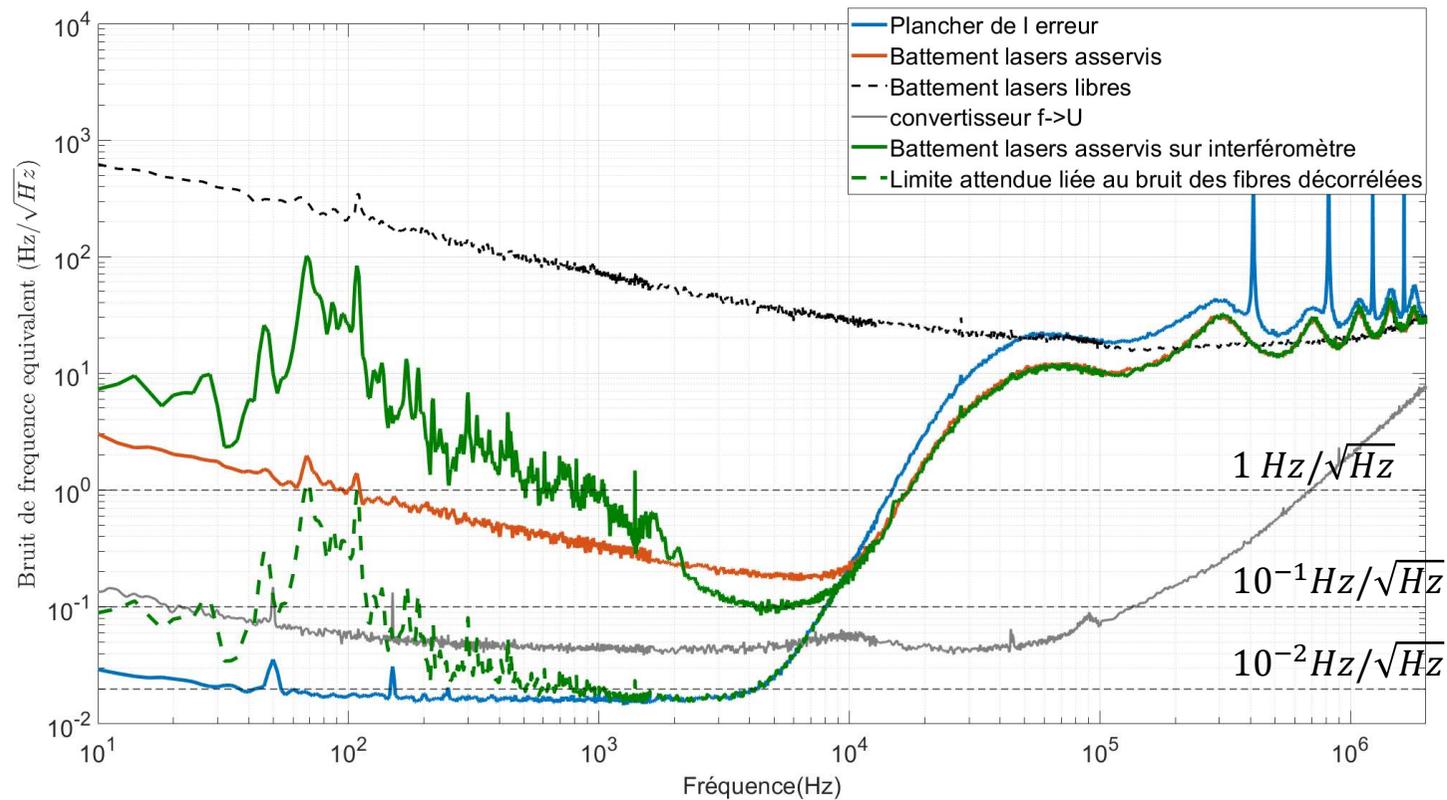


Plancher de l'erreur  $< 2 \times 10^{-2} \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$  sur [30 Hz – 5 kHz] (ou  $4 \times 10^{-4} \text{ Hz}^2/\text{Hz}$ )

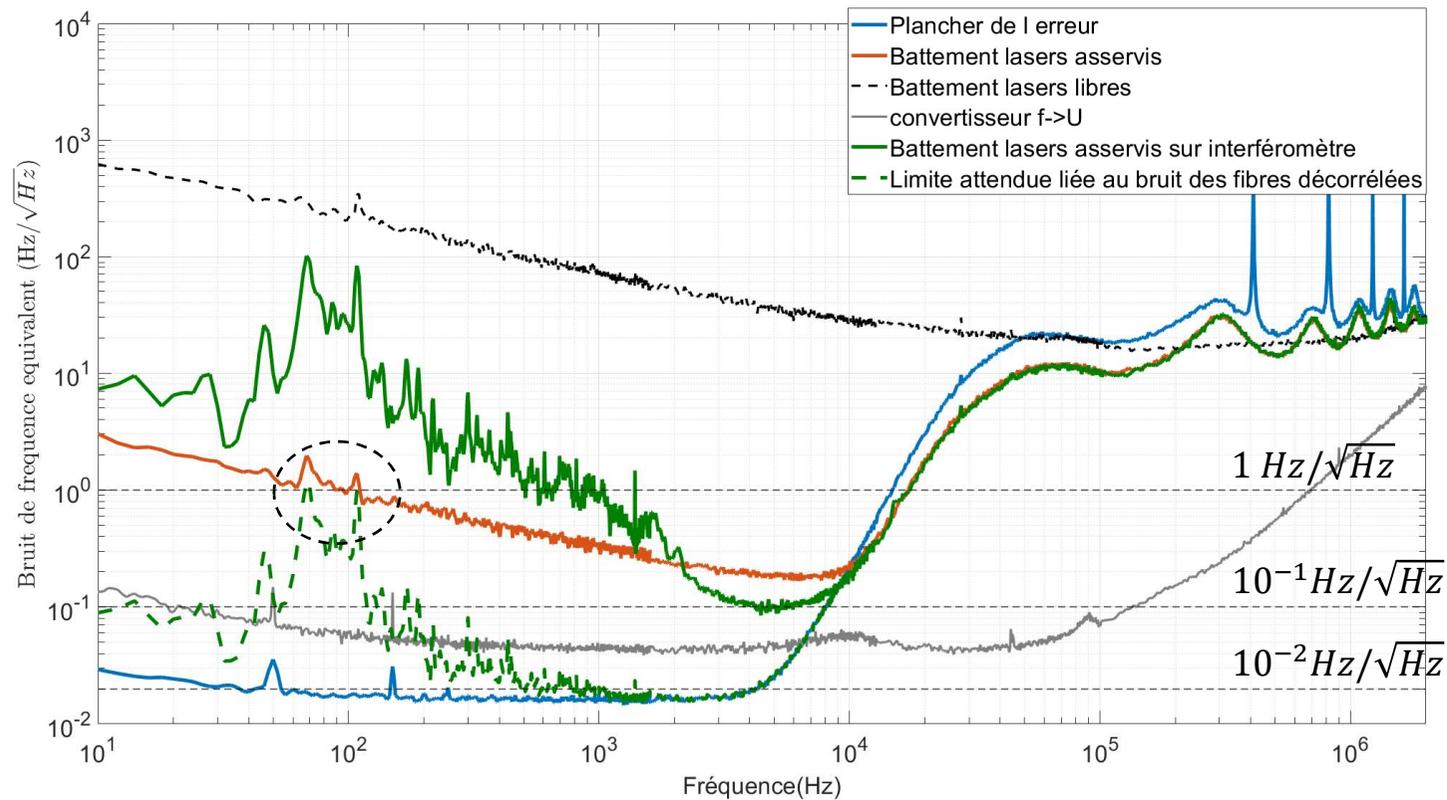
Plancher du bruit de battement  $< 1 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$  sur [100 Hz – 17 kHz]

Plancher du bruit de battement  $\sim 2 \times 10^{-1} \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$  sur [4 kHz – 9 kHz] (ou  $4 \times 10^{-2} \text{ Hz}^2/\text{Hz}$ )

# Asservissement sur laser maître: Planchers de bruit et limitations

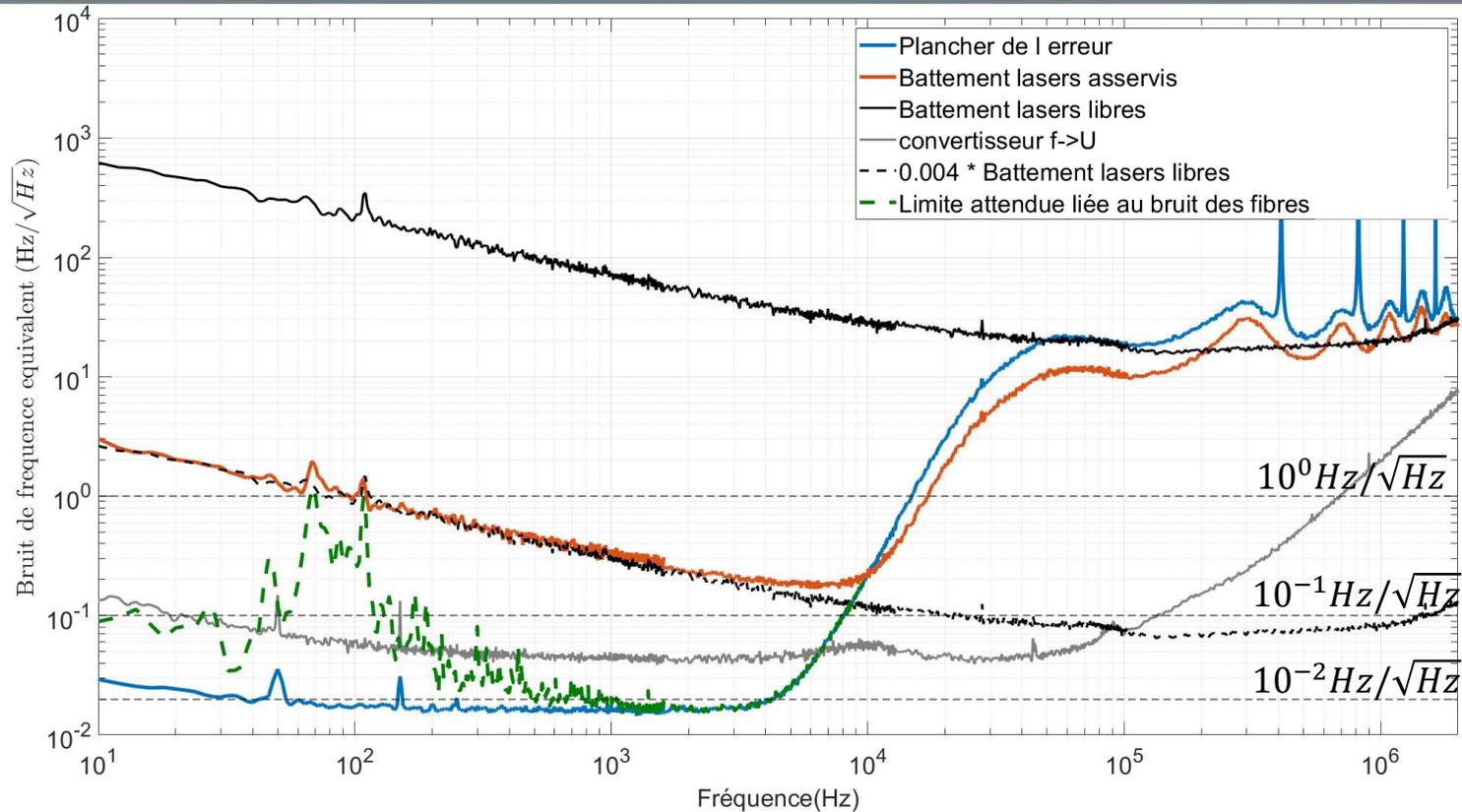


# Asservissement sur laser maître: Planchers de bruit et limitations



- Pas de limitation du plancher de bruit par un bruit résiduel dû aux fibres ( $f < 60$  Hz et  $f > 120$  Hz)

# Asservissement sur laser maître: Planchers de bruit et limitations



- Pas de limitation du plancher de bruit par un bruit résiduel dû aux fibres ( $f < 60 \text{ Hz}$  et  $f > 120 \text{ Hz}$ )
- Limitation du plancher de bruit à 4 ‰ du battement des lasers libres pour  $f < 4 \text{ kHz}$

# Plan

- **Contexte initial**
- **Asservissement Pound-Drever-Hall sur un interféromètre à fibre: améliorations et limites**
- **Transfert spectral par asservissement hétérodyne**
- **Conclusion**

# Bilan et perspectives

## Asservissement Pound-Drever-Hall sur un interféromètre à fibre

- Bande d'asservissement  $\times 9.3$  :  
30 kHz  $\rightarrow$  280 kHz  

- Plancher du bruit de battement  
 $< 10^{-1} \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$  sur [120 Hz – 8 kHz]  
(ou  $< 10^{-2} \text{ Hz}^2/\text{Hz}$ )

## Transfert spectral de cohérence par asservissement hétérodyne

- Plancher du bruit de battement des lasers asservis:  
 $2 \times 10^{-1} \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$  sur [4 kHz – 9 kHz]  
 $< 1 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$  sur [100 Hz – 17 kHz]
- Limitation du plancher de bruit à 4 ‰ du battement des lasers libres

# Bilan et perspectives

## Asservissement Pound-Drever-Hall sur un interféromètre à fibre

- Bande d'asservissement  $\times 9,3$  :  
30 kHz  $\rightarrow$  280 kHz  

- Plancher du bruit de battement  
 $< 10^{-1} \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$  sur [120 Hz – 8 kHz]  
(ou  $< 10^{-2} \text{ Hz}^2/\text{Hz}$ )

### Perspectives:

- Rechercher les causes des limitations des planchers de bruit de battement
- Etudier les possibilités de transfert spectral de cohérence des deux méthodes pour différents décalages de longueur d'onde des deux lasers asservis

## Transfert spectral de cohérence par asservissement hétérodyne

- Plancher du bruit de battement des lasers asservis:  
 $2 \times 10^{-1} \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$  sur [4 kHz – 9 kHz]  
 $< 1 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$  sur [100 Hz – 17 kHz]
- Limitation du plancher de bruit à 4 ‰ du battement des lasers libres