



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

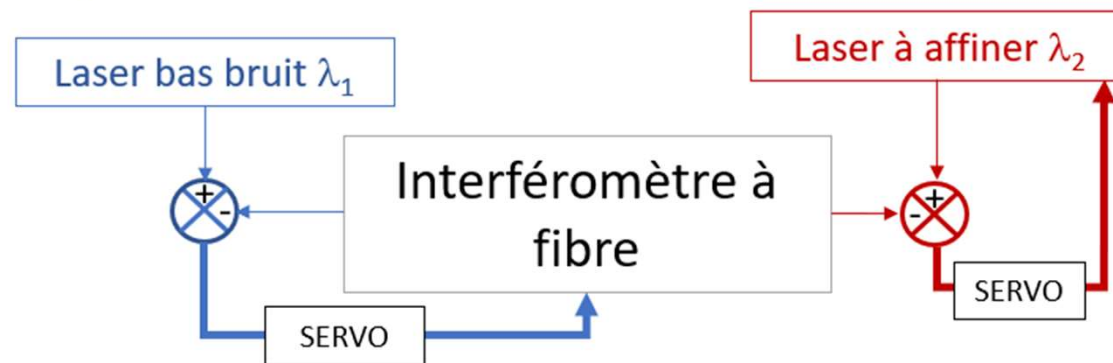
- **Contexte initial**
- **Asservissement Pound-Drever-Hall sur un interféromètre à fibre: améliorations et limites**
- **Transfert spectral par asservissement hétérodyne**
- **Conclusion**

Plan

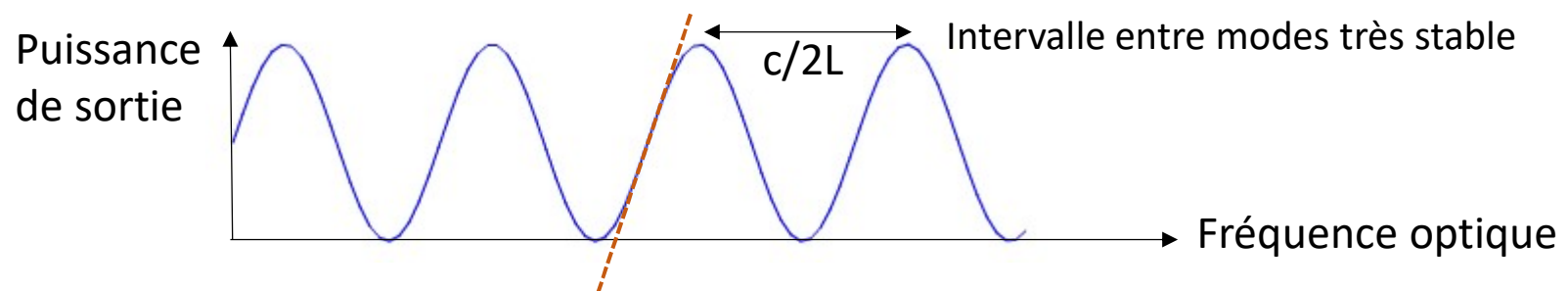
- **Contexte initial**
- **Asservissement Pound-Drever-Hall sur un interféromètre à fibre: améliorations et limites**
- **Transfert spectral par asservissement hétérodyne**
- **Conclusion**

Contexte général

Transfert spectral de cohérence via un interféromètre à fibre



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

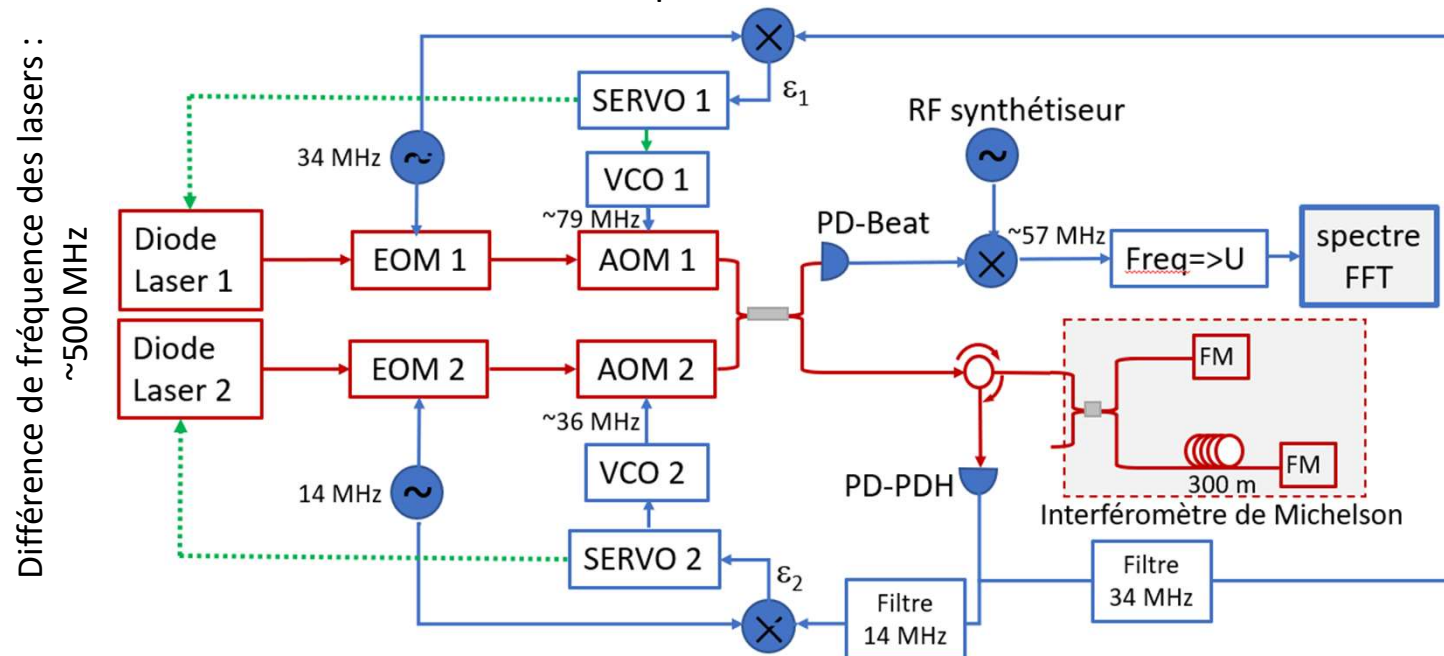


- Interféromètre à deux bras avec un désaccord de 1 km correspond à une cavité Fabry-Pérot de finesse 50 000

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

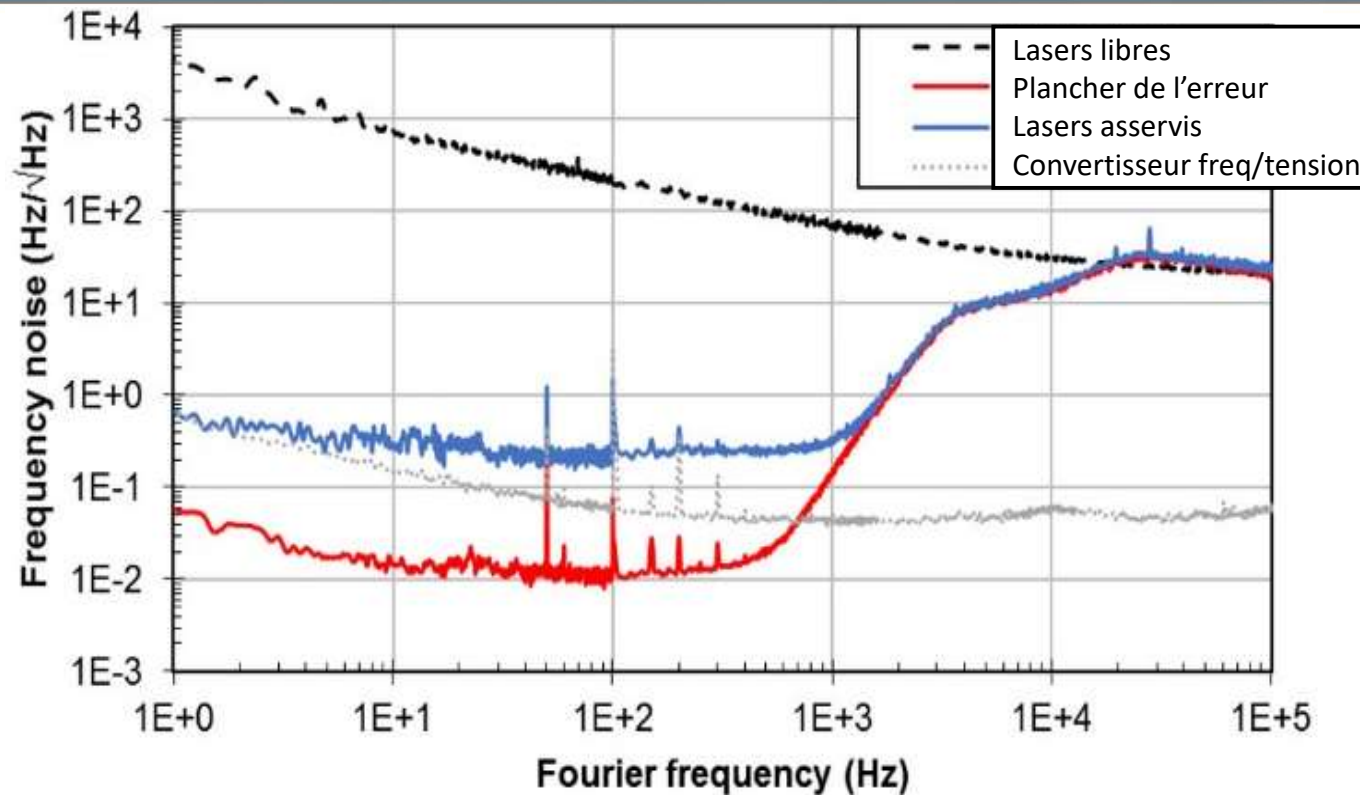


Expériences précédentes (2016)

Bande d'asservissement: 30 kHz

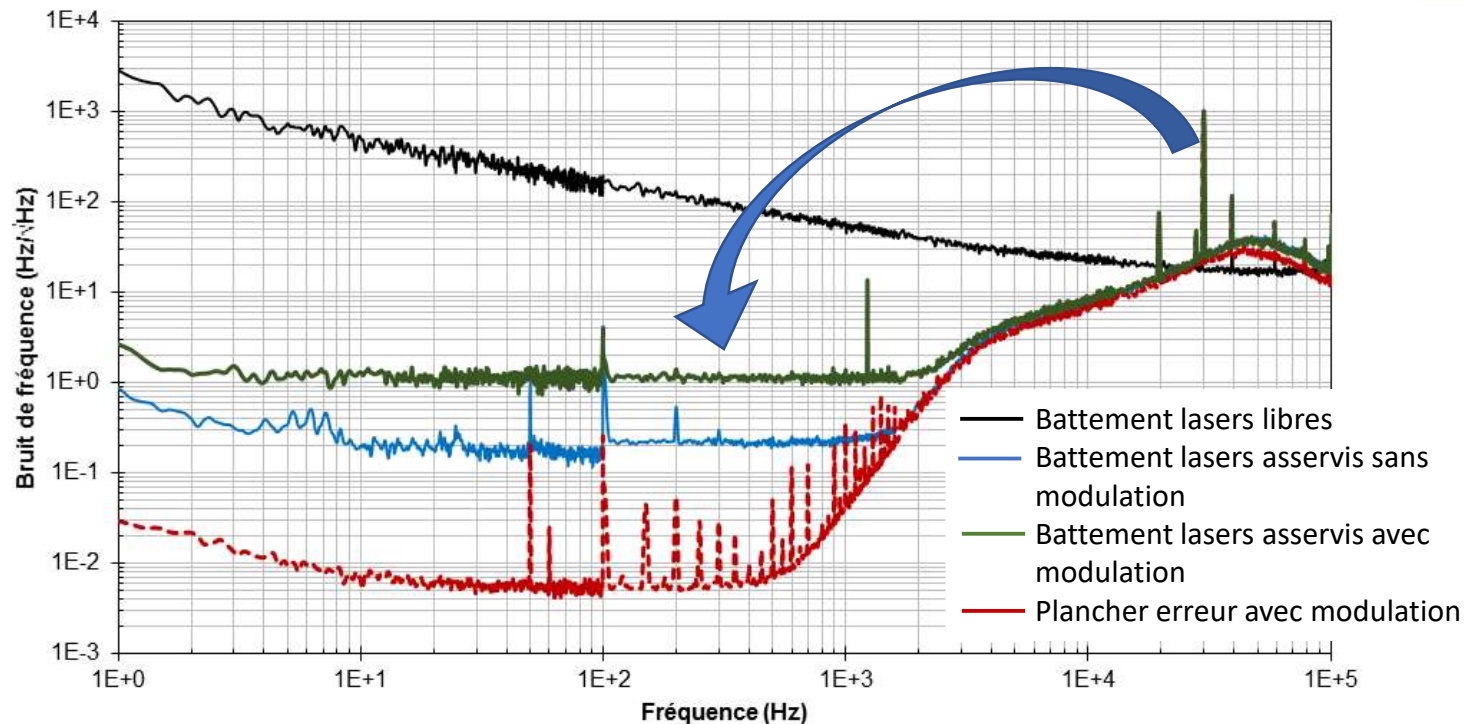
ISL de l'interféromètre 333 kHz

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

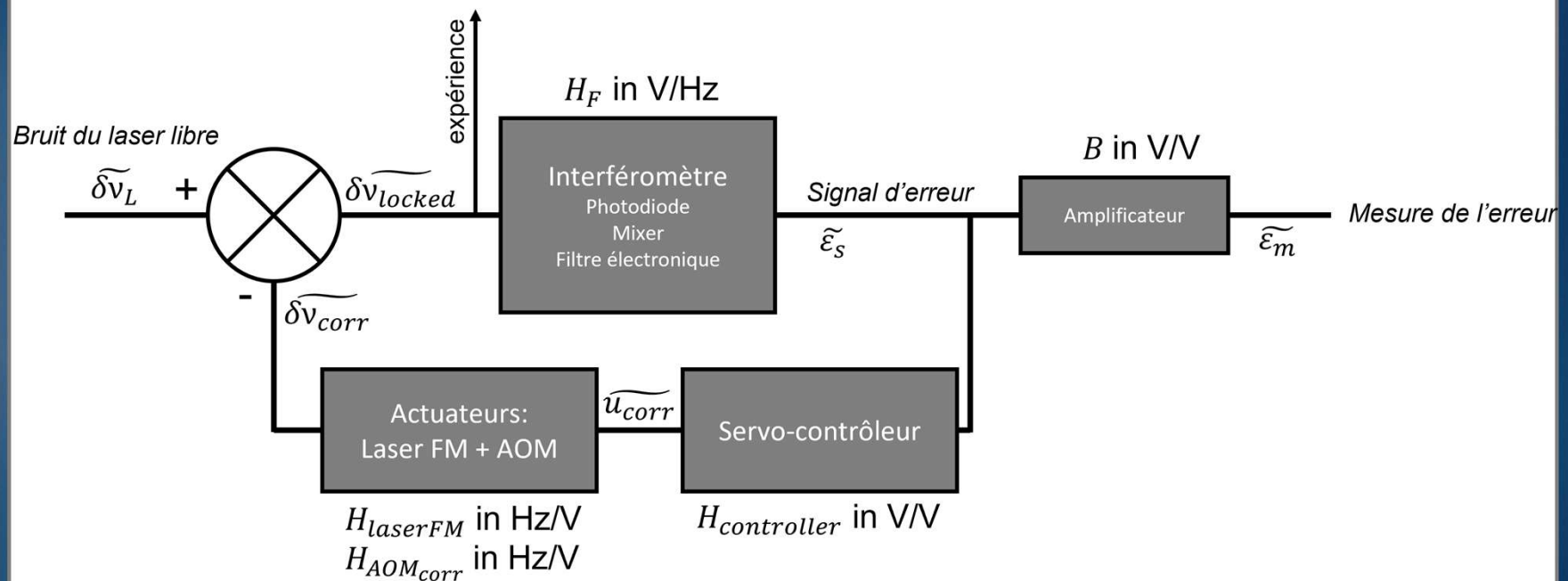
Améliorations

Objectifs:

Réduire le plancher de bruit hors boucle

Comment?

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



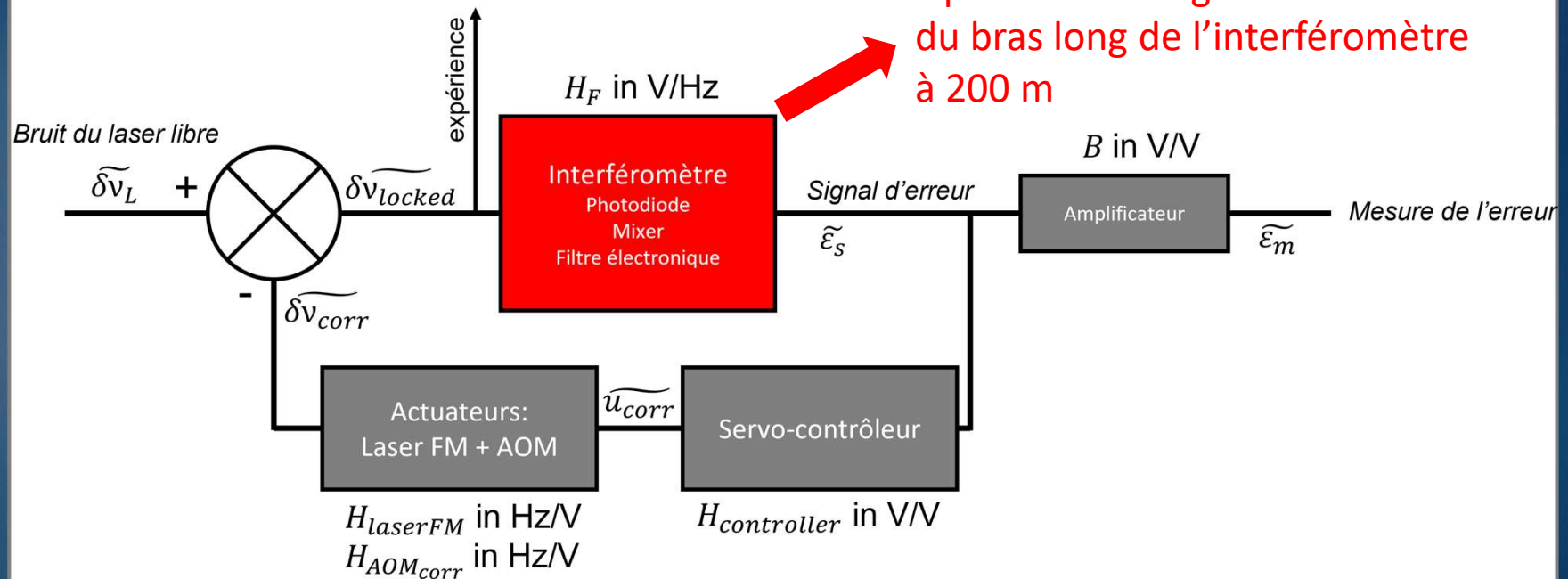
Améliorations

Objectifs:

Réduire le plancher de bruit hors boucle

Comment?

Augmenter la bande d'asservissement



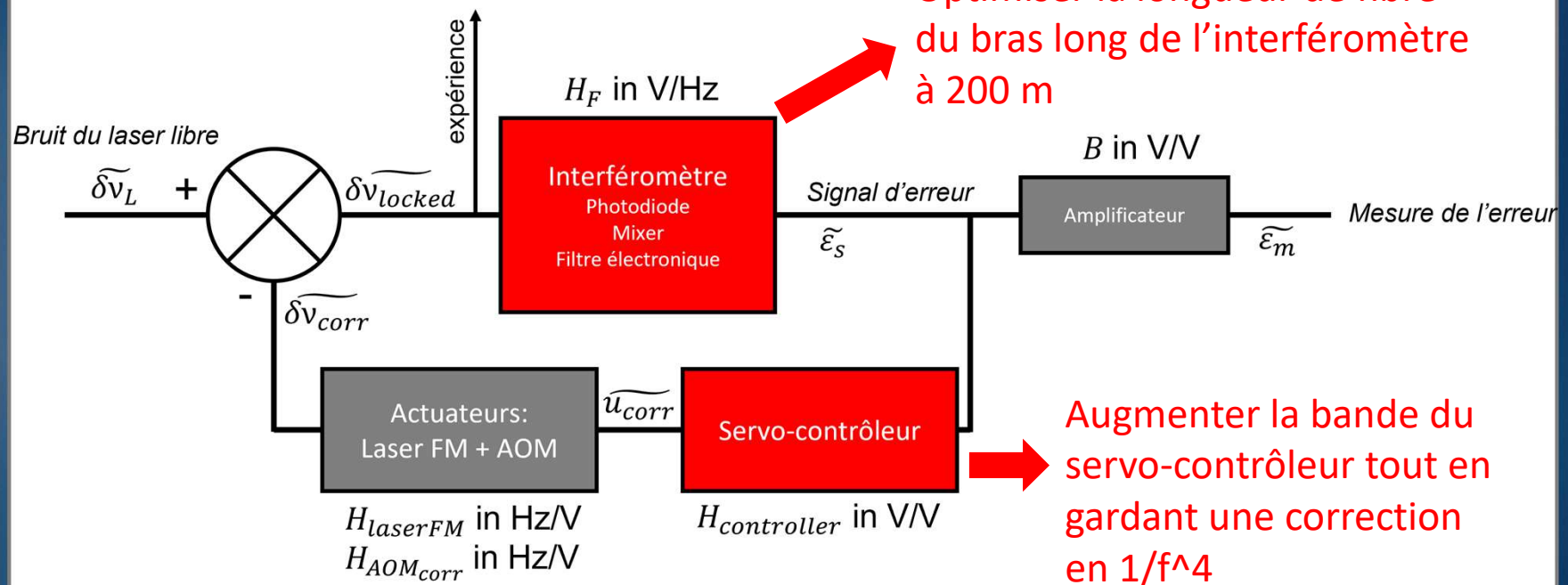
Améliorations

Objectifs:

Réduire le plancher de bruit hors boucle

Comment?

Augmenter la bande d'asservissement



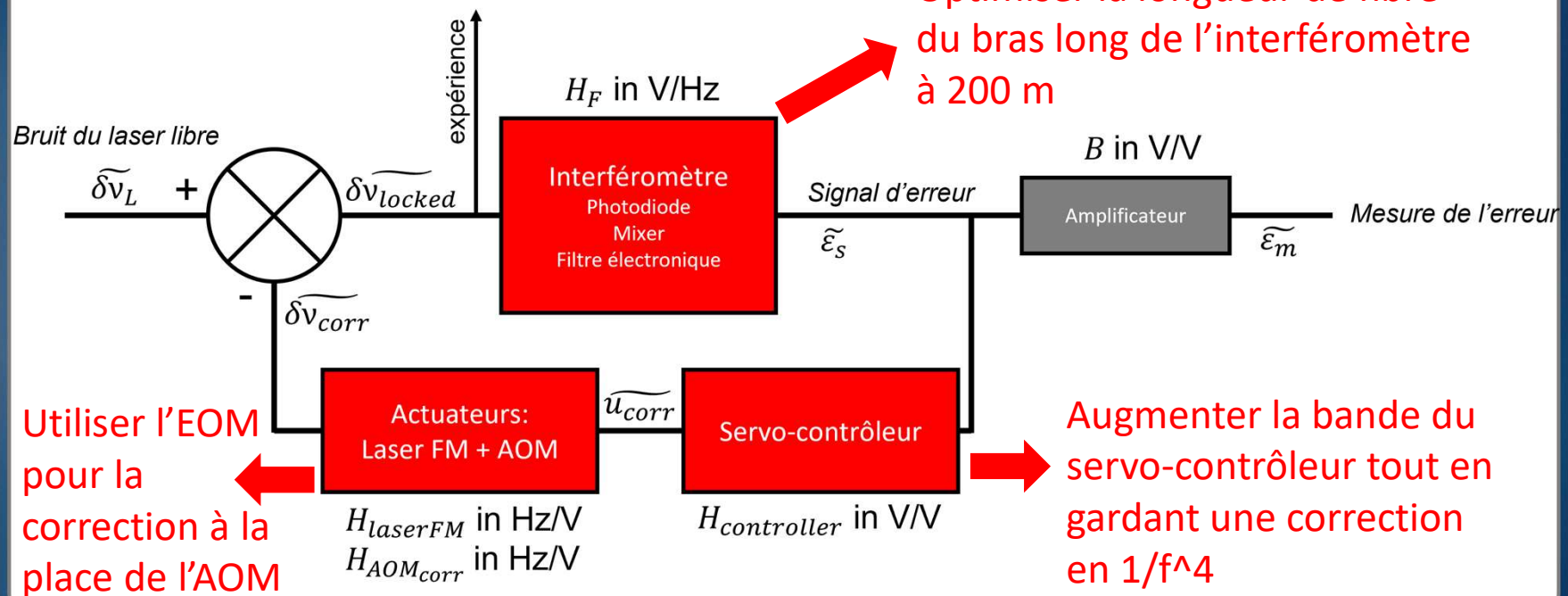
Améliorations

Objectifs:

Réduire le plancher de bruit hors boucle

Comment?

Augmenter la bande d'asservissement



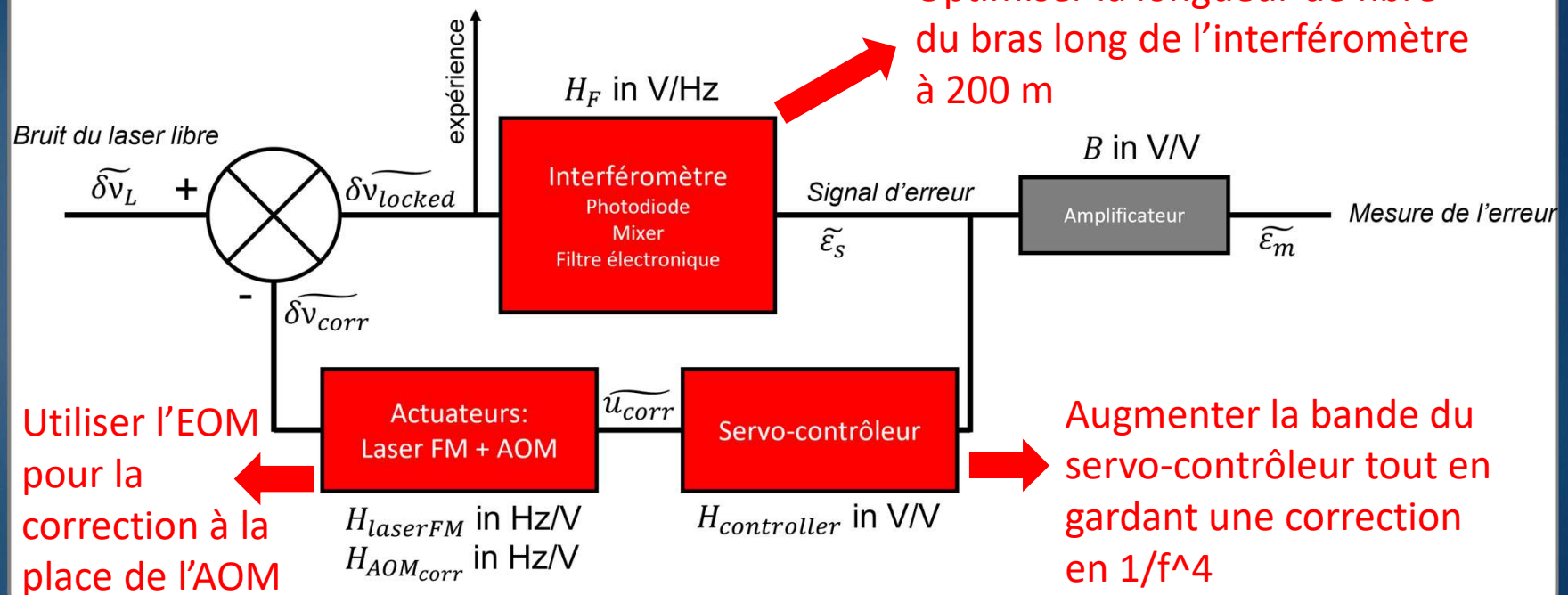
Améliorations

Objectifs:

Réduire le plancher de bruit hors boucle

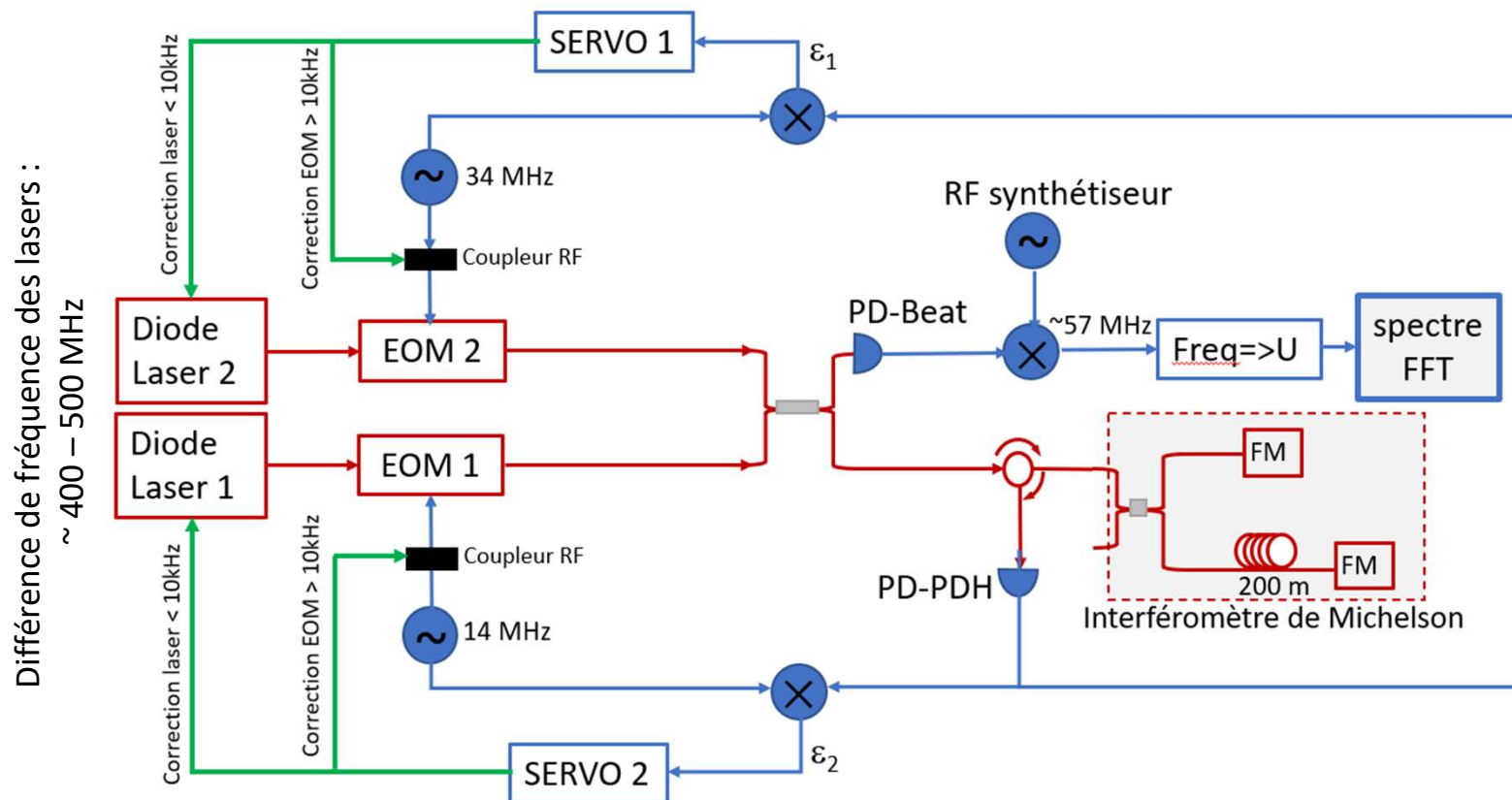
Comment?

Augmenter la bande d'asservissement



Analyse des signaux jusqu'à 2 MHz

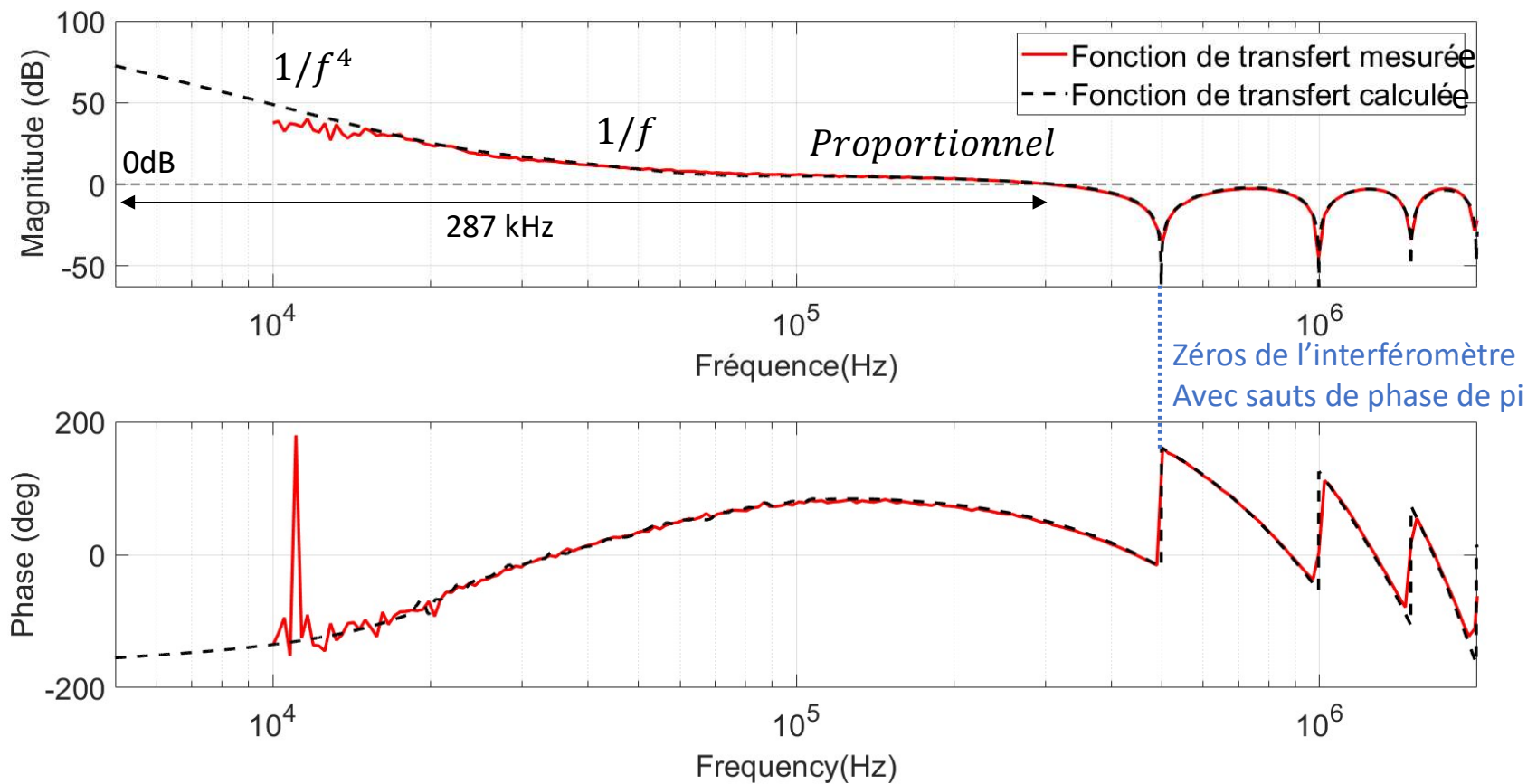
Nouveau montage expérimental



ISL de l'interféromètre 498 kHz

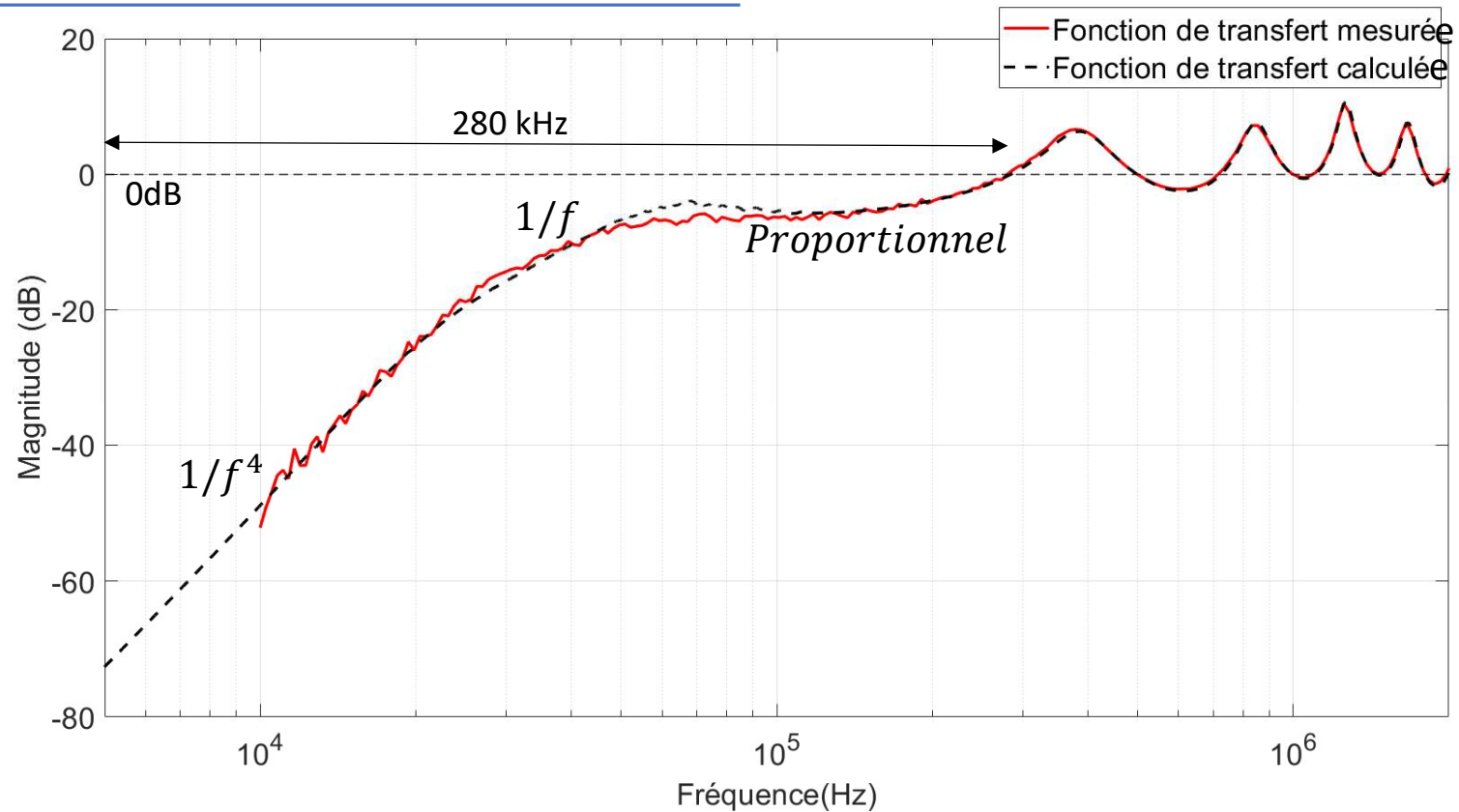
Fonction de transfert globale

Fonction de transfert en boucle ouverte



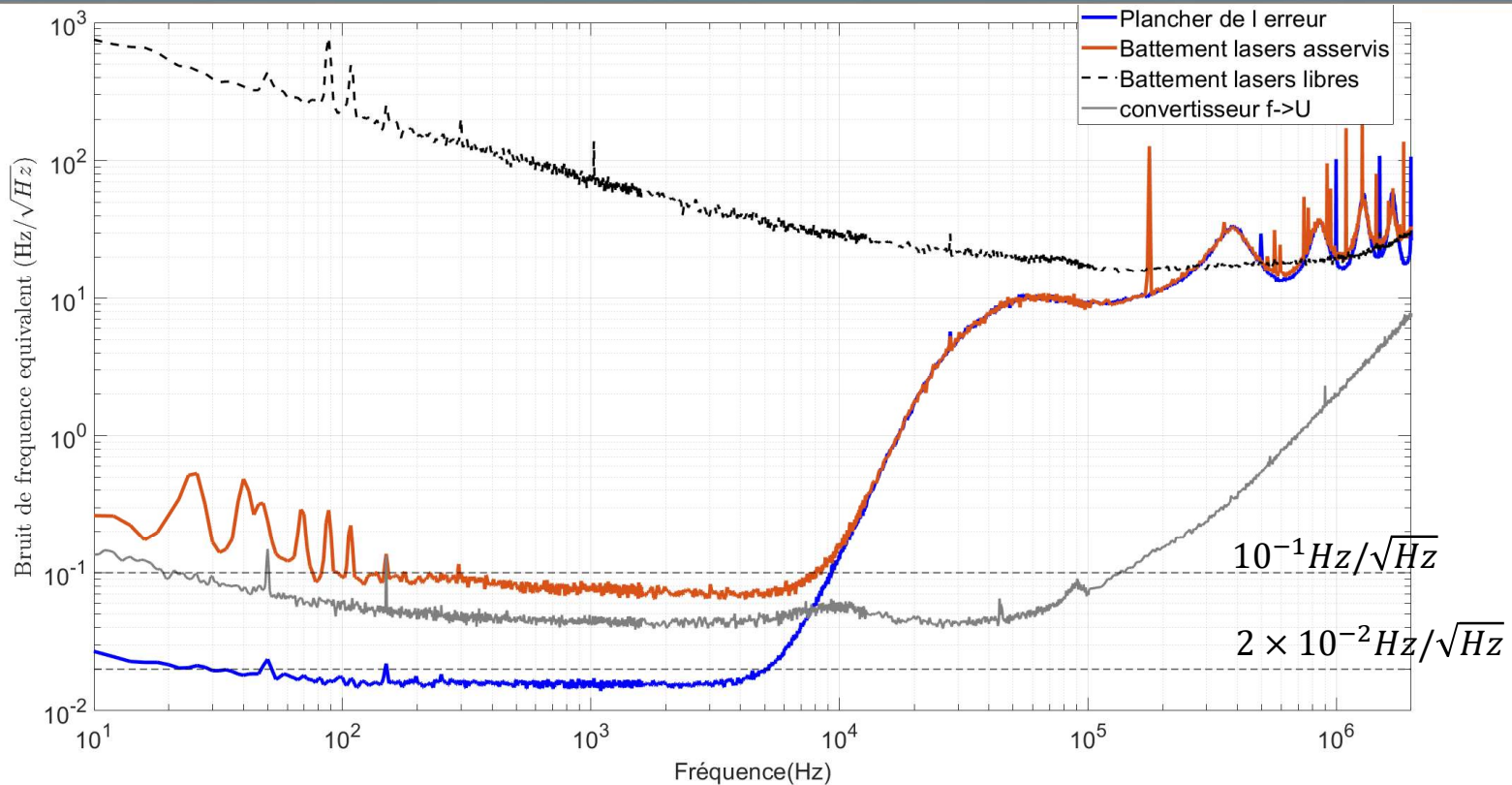
Fonction de transfert globale

Fonction de transfert en boucle fermée



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

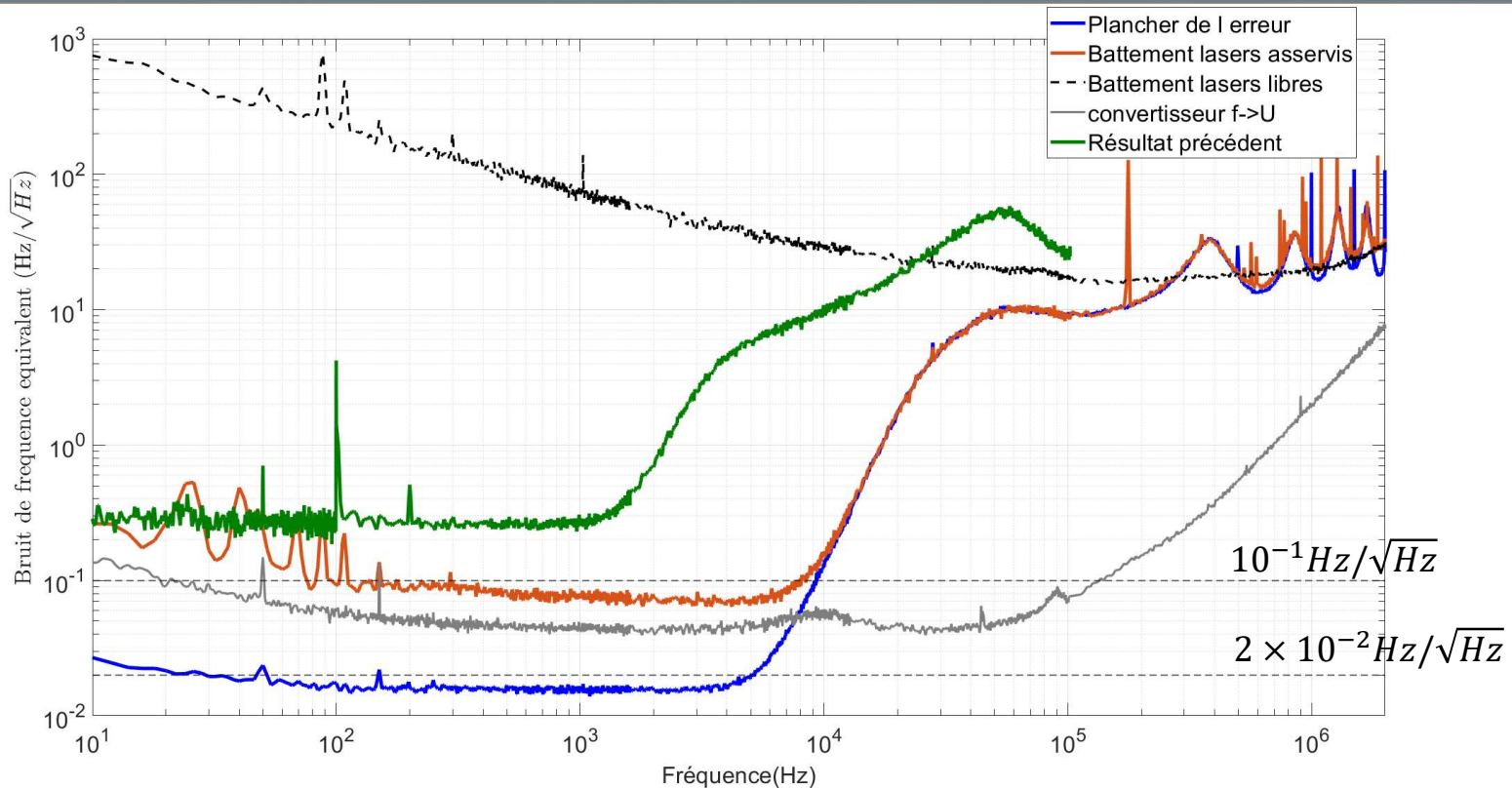
Planchers de bruit



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:

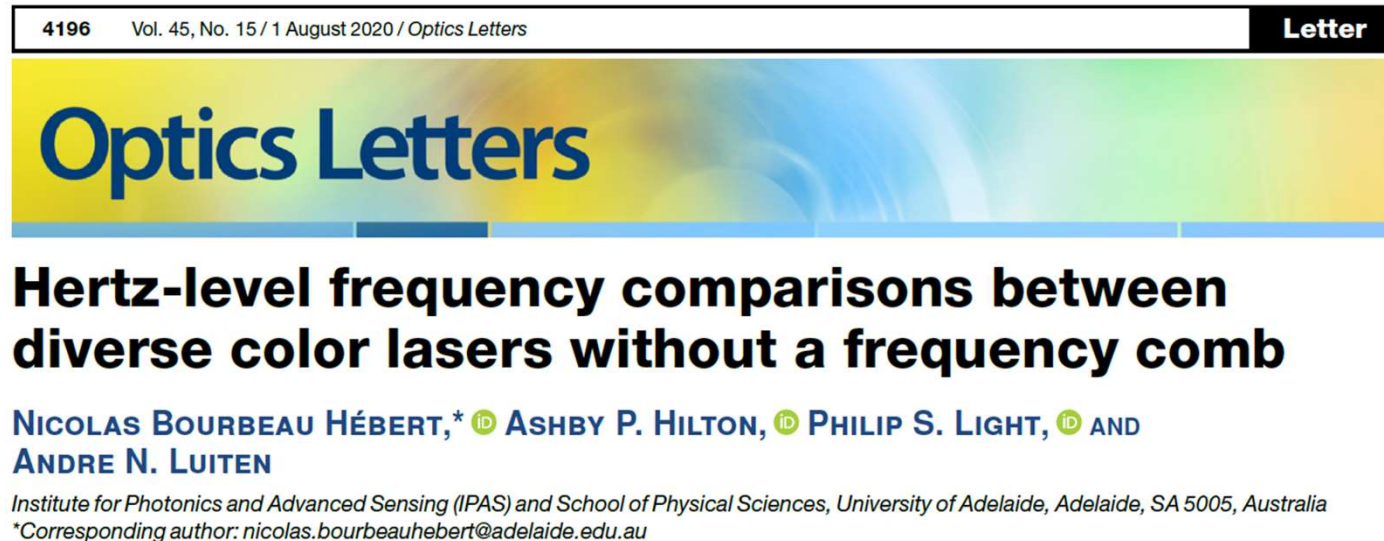
- Couplage de parasites par l'EOM en fonction de l'amplitude de la modulation
- Couplage entre les signaux de correction des deux lasers à haute fréquence (>1MHz)

Plan

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

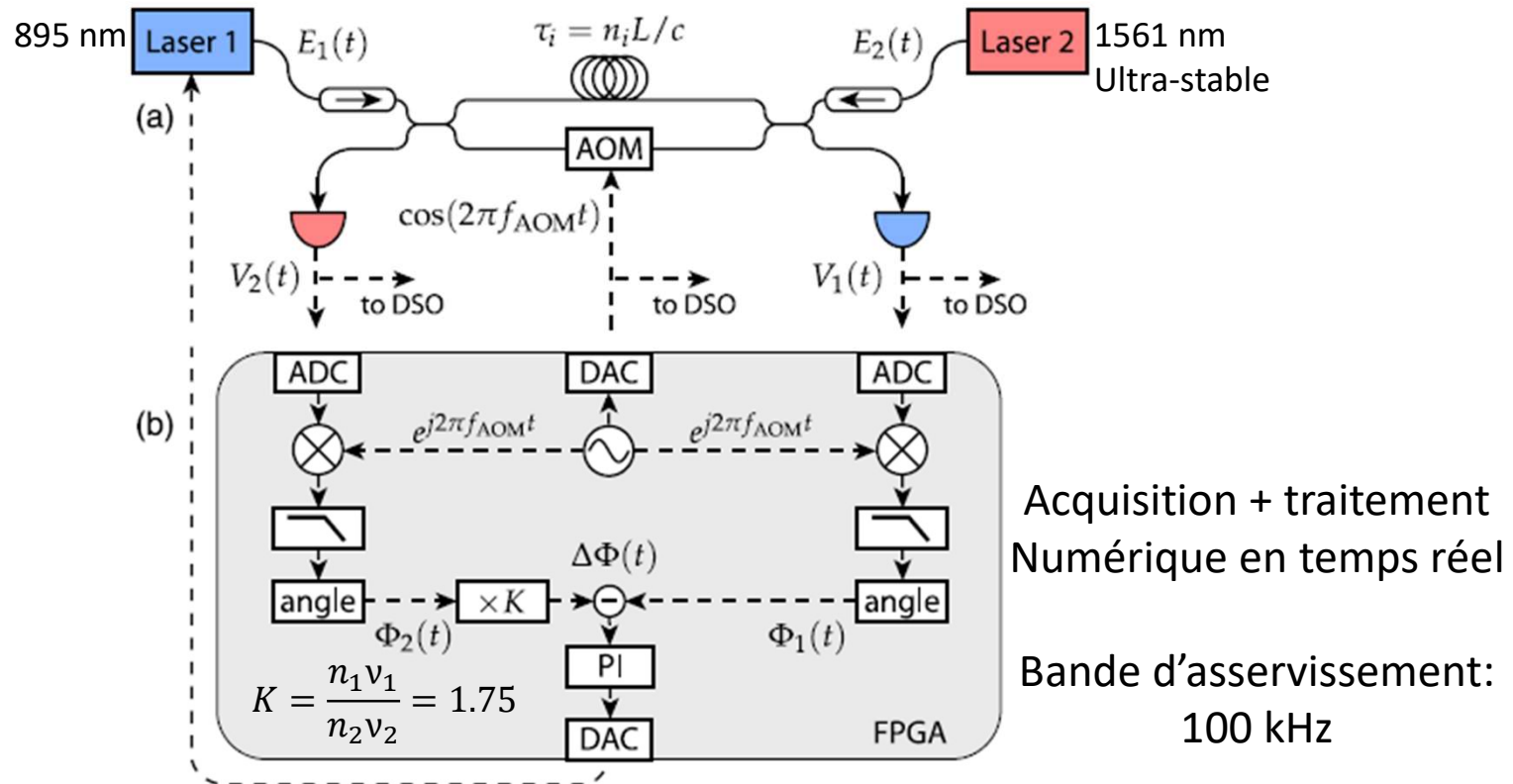
Contexte

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

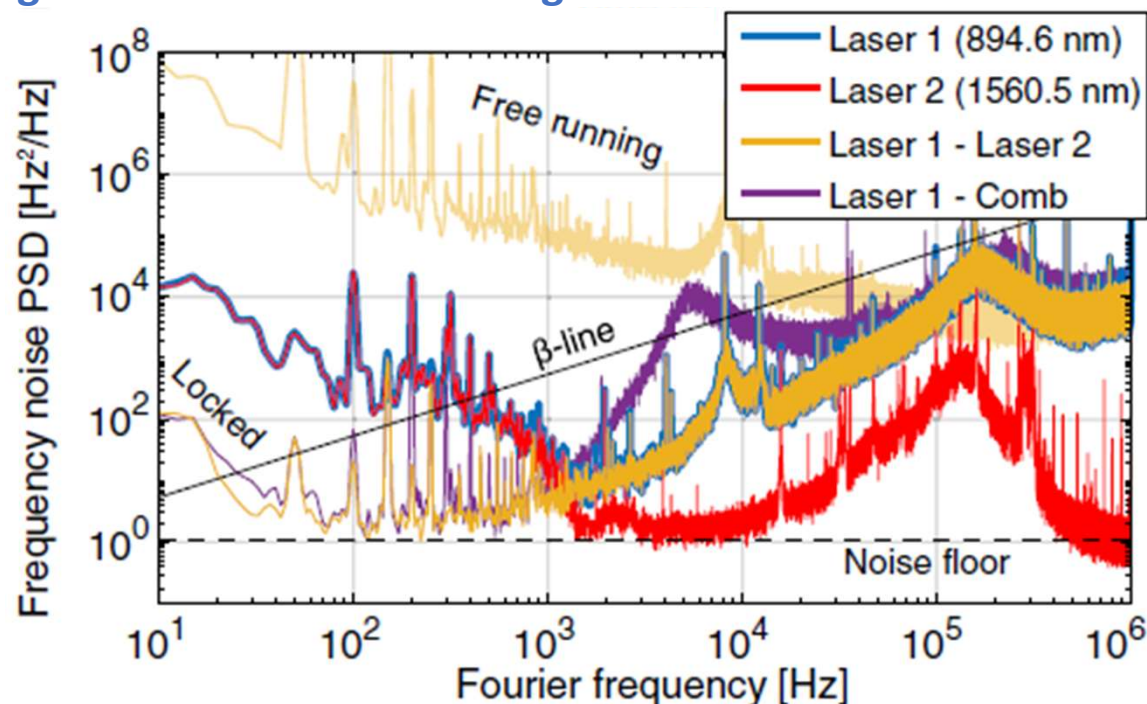
Travaux de Bourbeau Hébert et. al (2020): transfert spectral de cohérence entre deux lasers de grandes différences de longueurs d'onde via un interféromètre à fibre



➔ 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

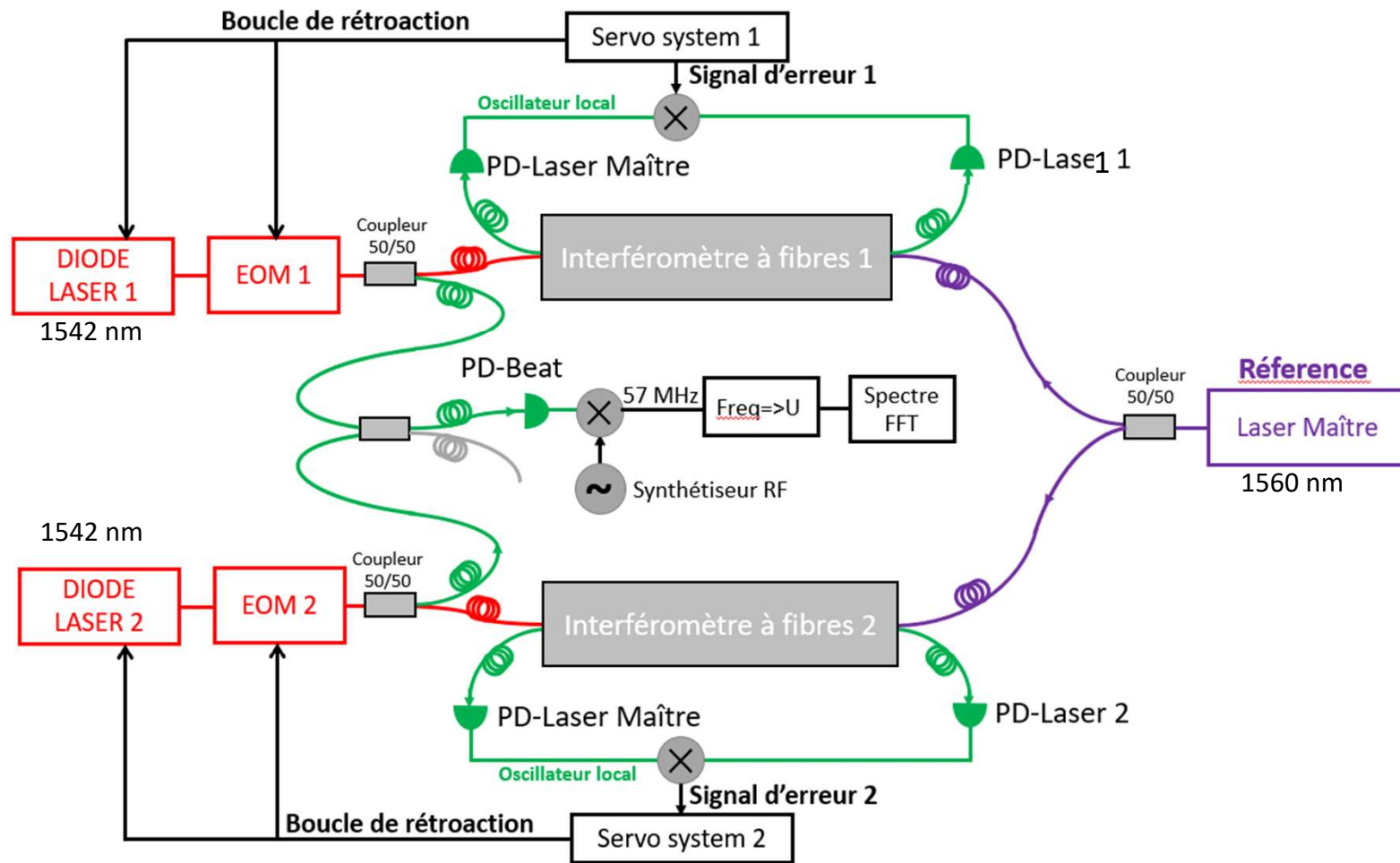
- Utiliser la **simplicité de l'asservissement unique** par **méthode hétérodyne** pour le **transfert spectral de cohérence** entre deux lasers de différence de longueurs d'onde égale à **18 nm**.
- Conserver la **spécificité de la boucle d'asservissement analogique** utilisée en Pound-Drever-Hall

Objectif de l'étude:

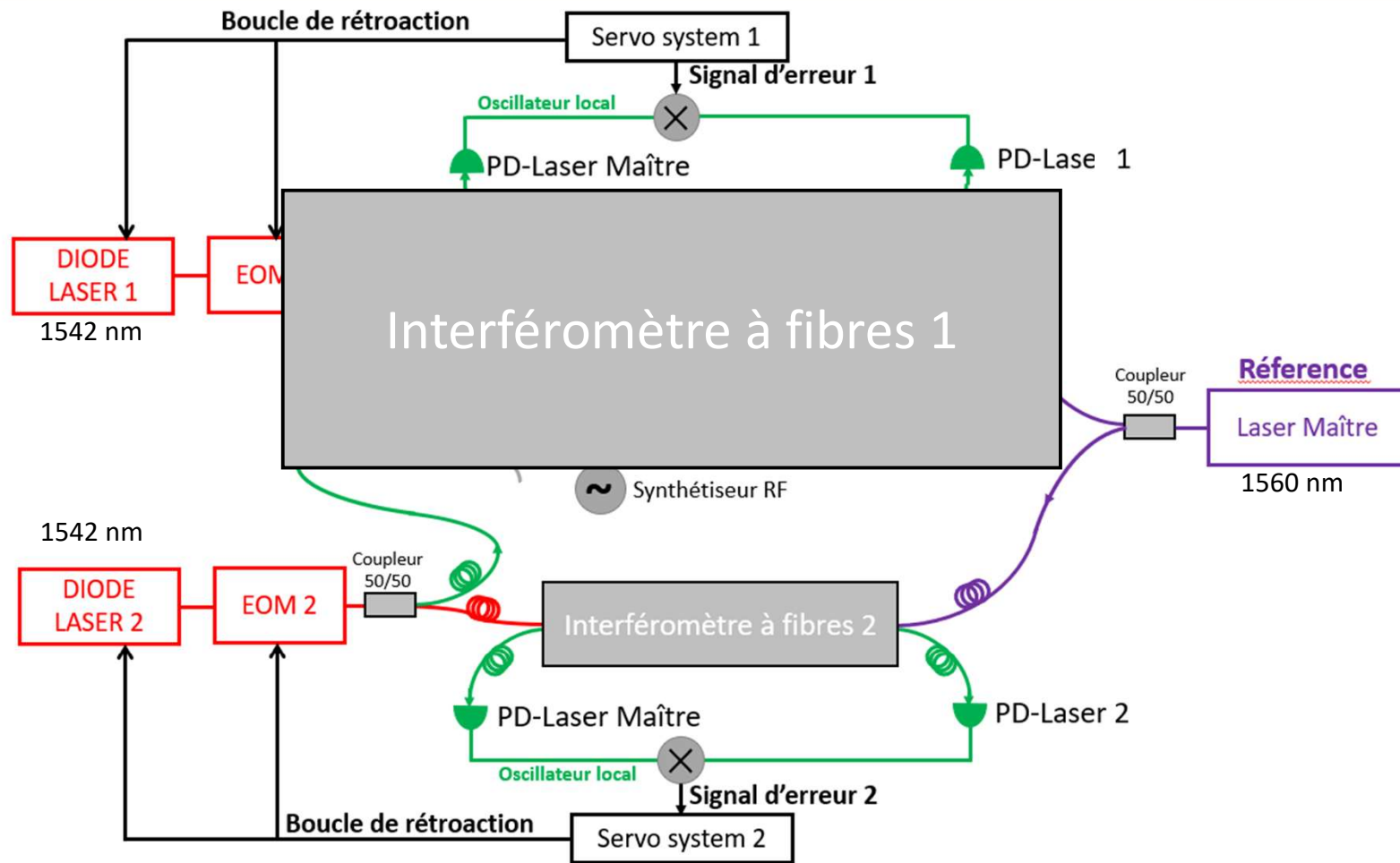
Quelles sont les limitations du plancher de bruit de battement en tout analogique?

- 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

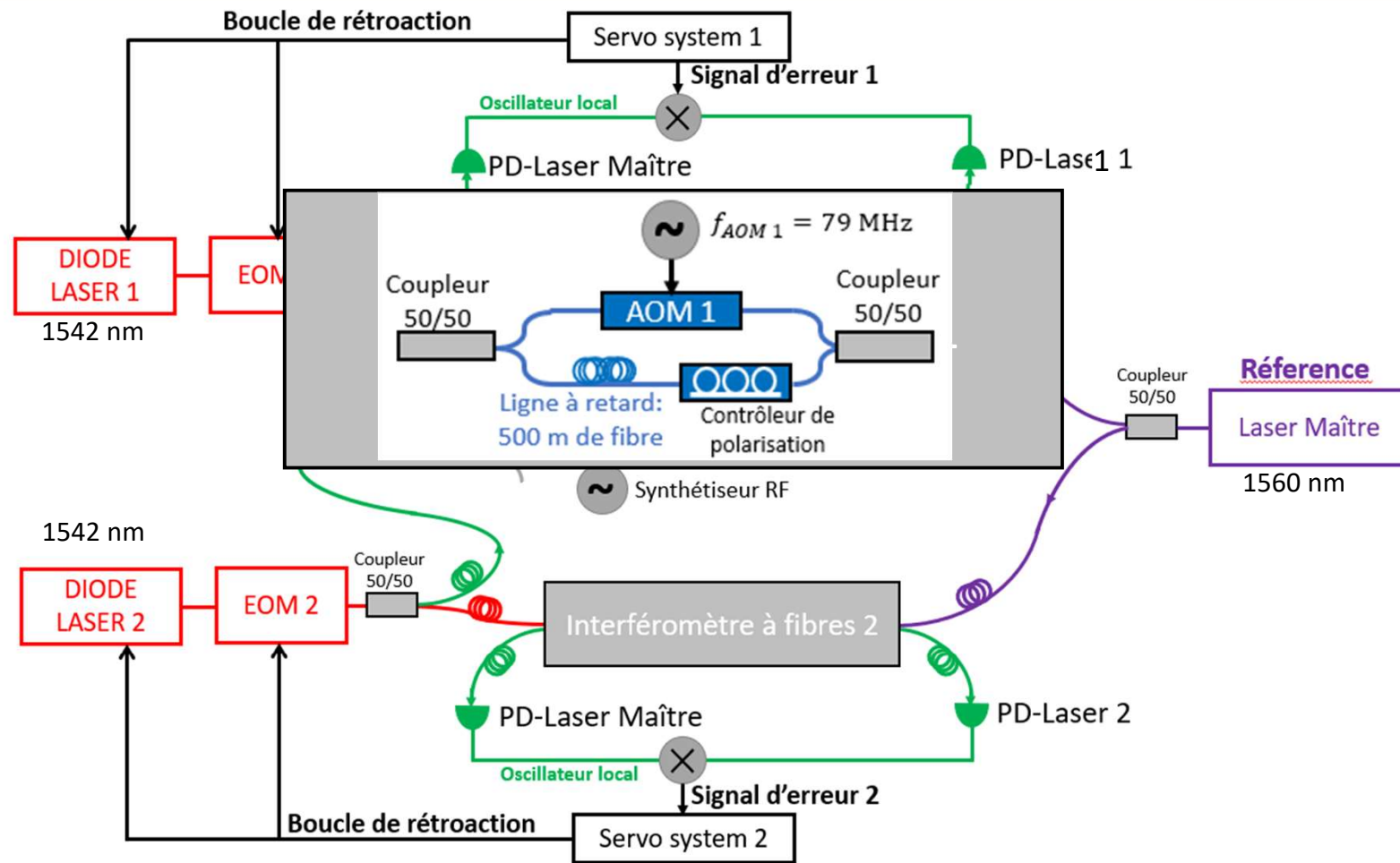
Montage expérimental



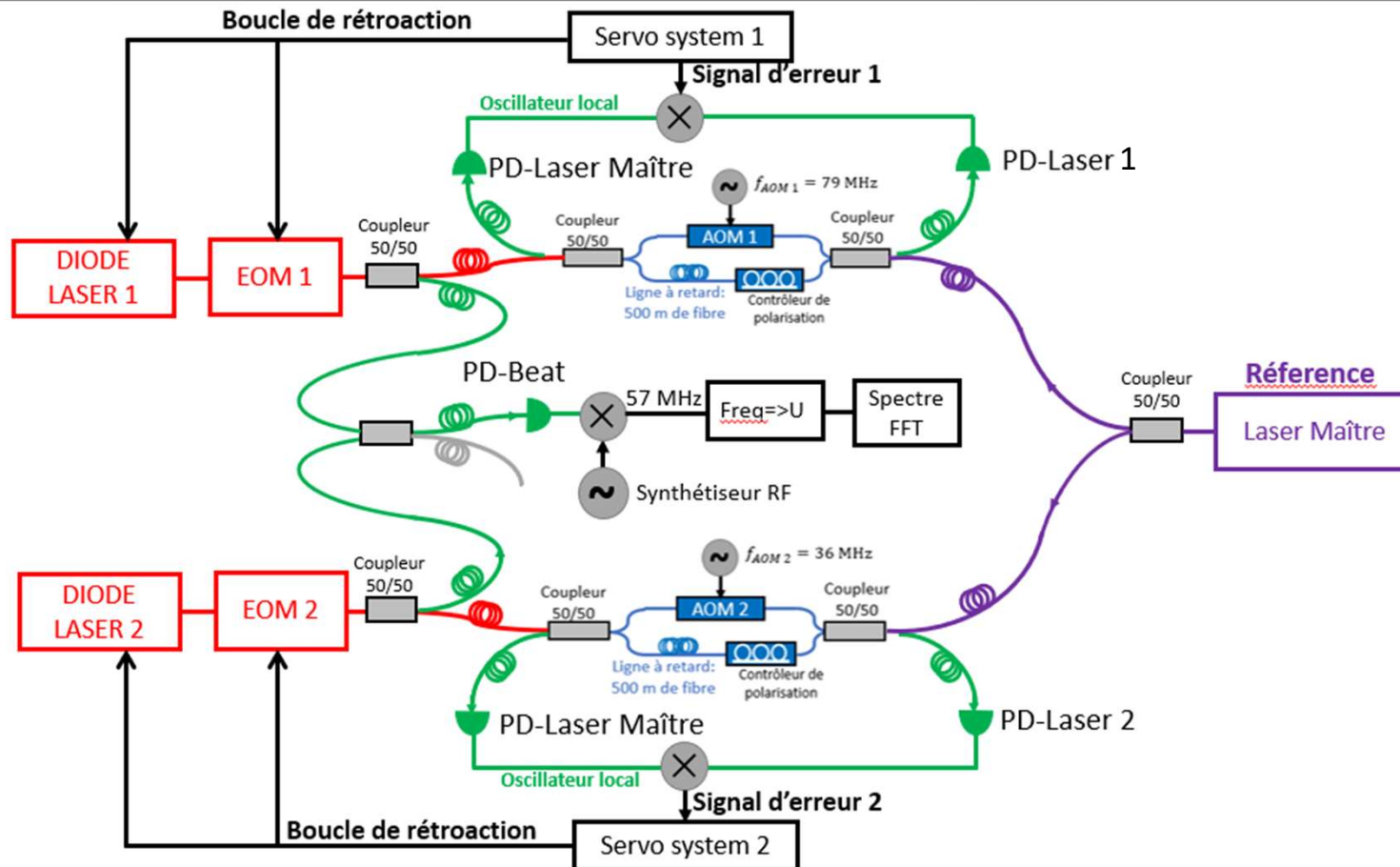
Montage expérimental



Montage expérimental



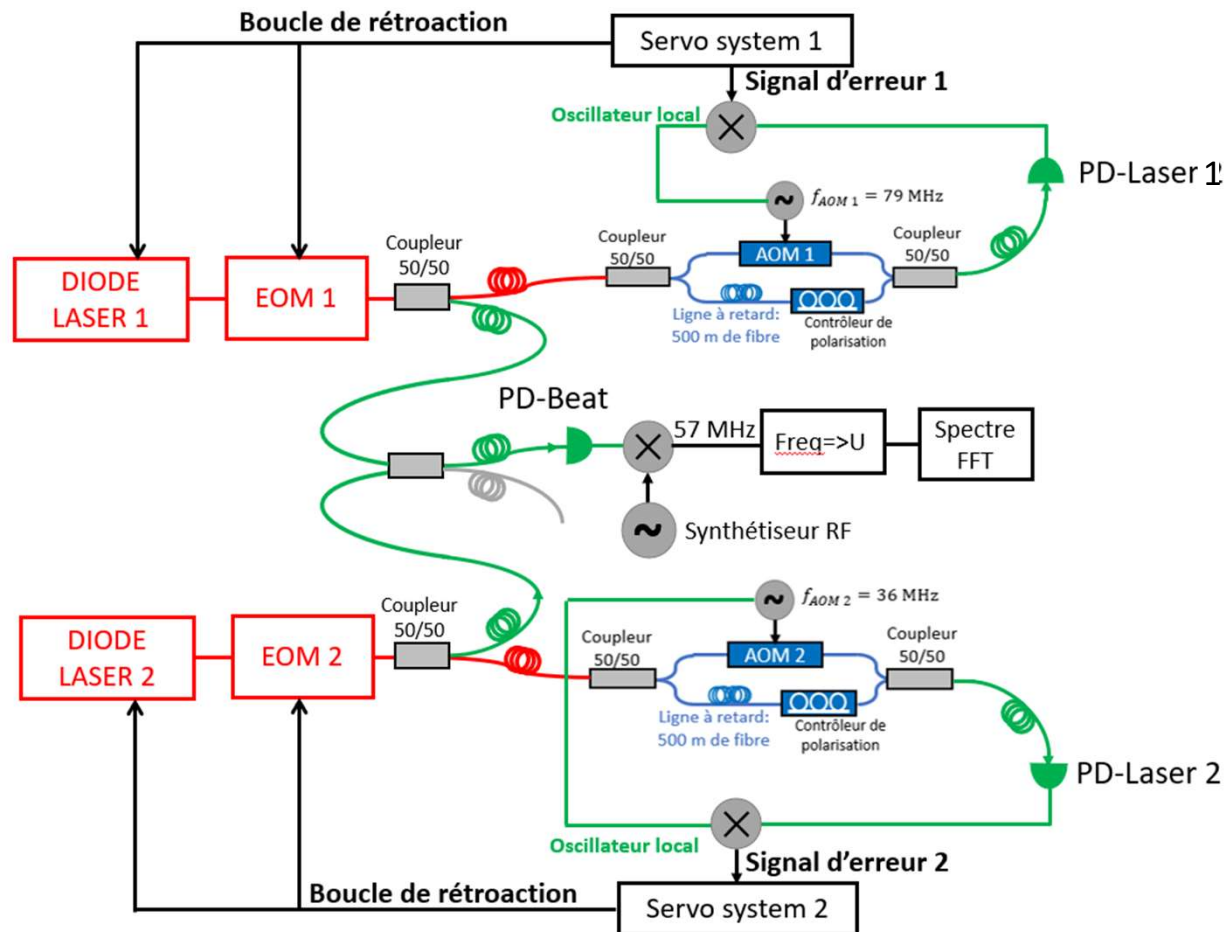
Montage expérimental - Détails



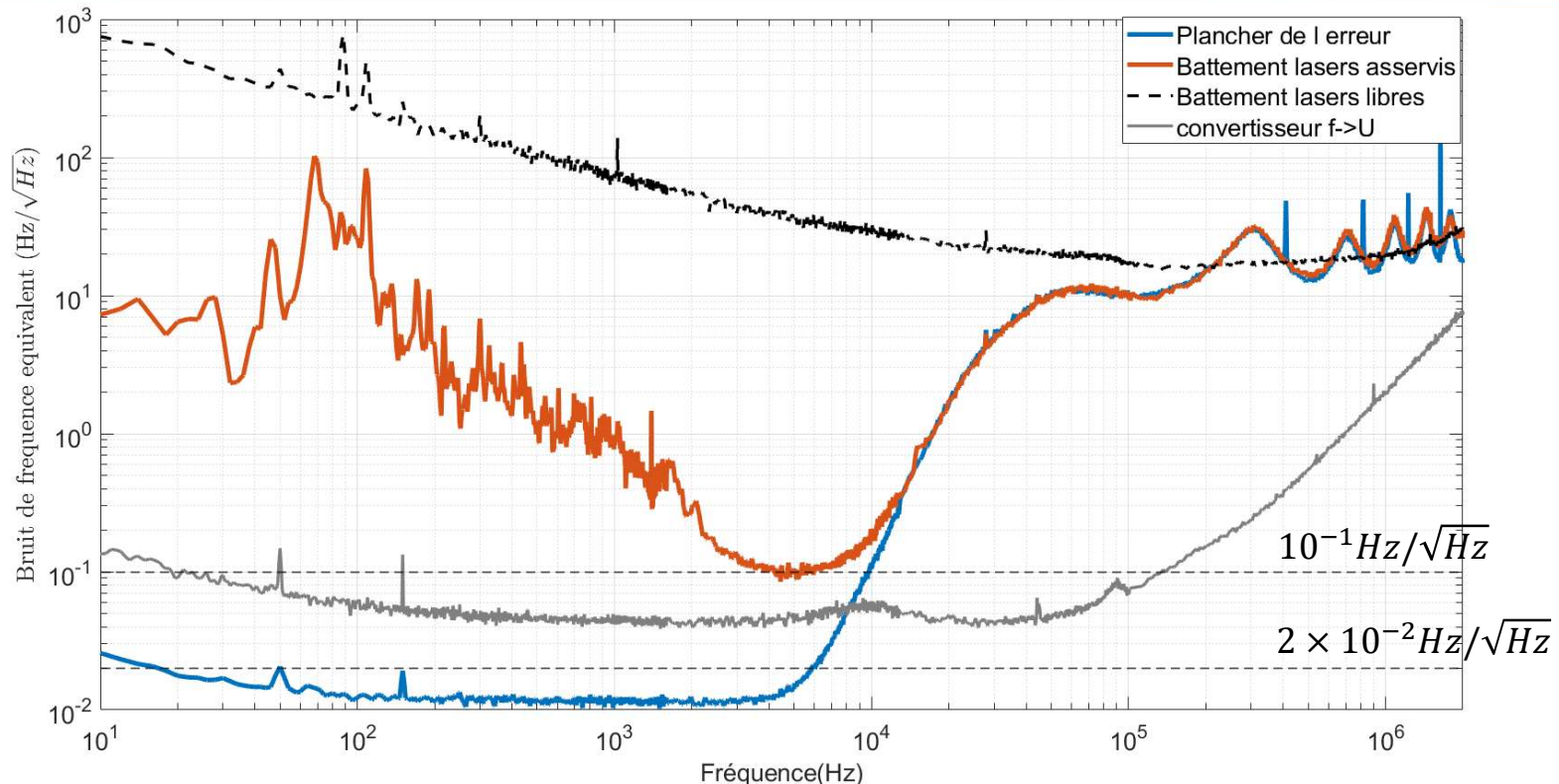
On s'attend à être limité par la somme des bruits des fibres

Etape préalable: asservissement sur interféromètre

Montage expérimental



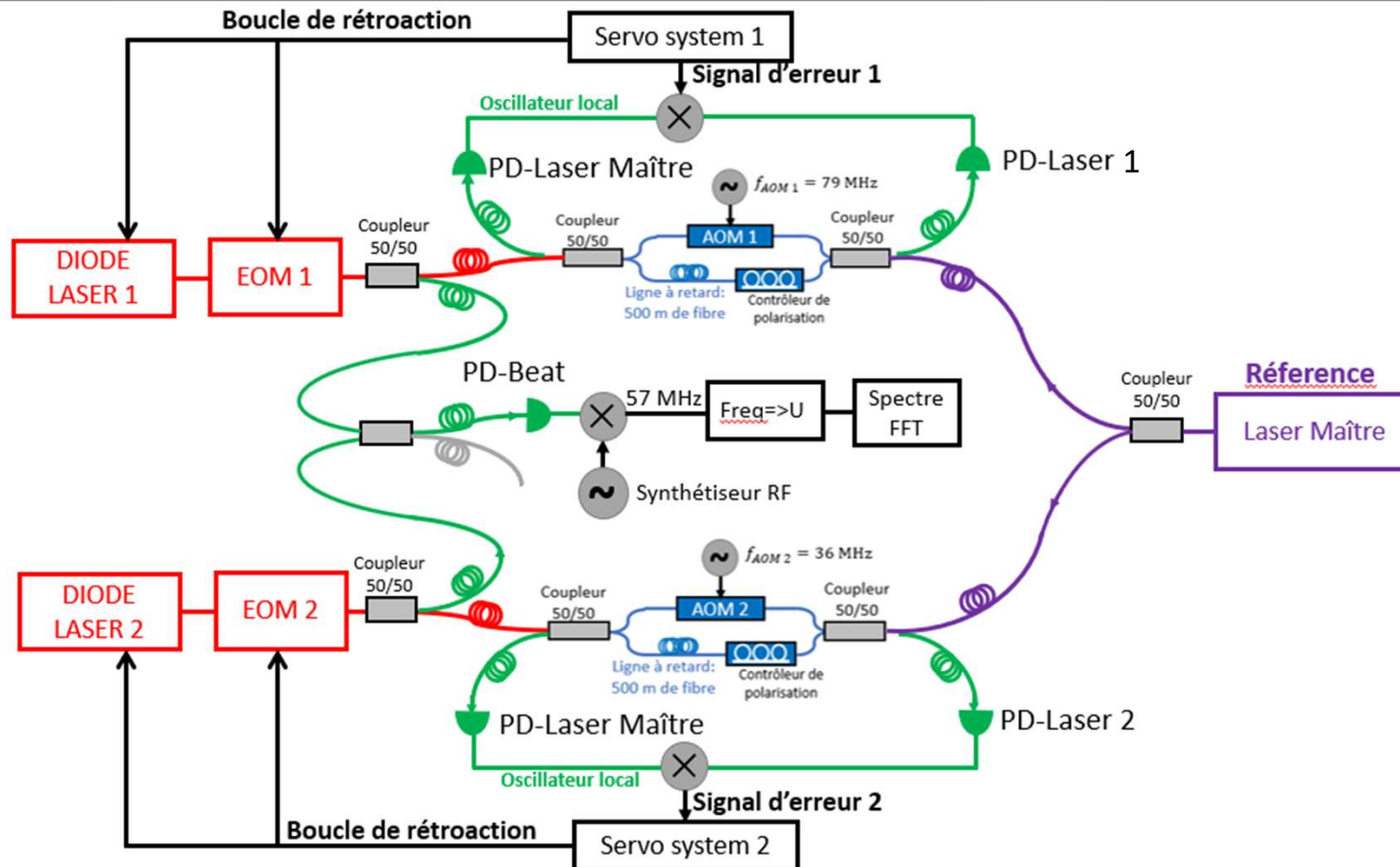
Planchers de bruit



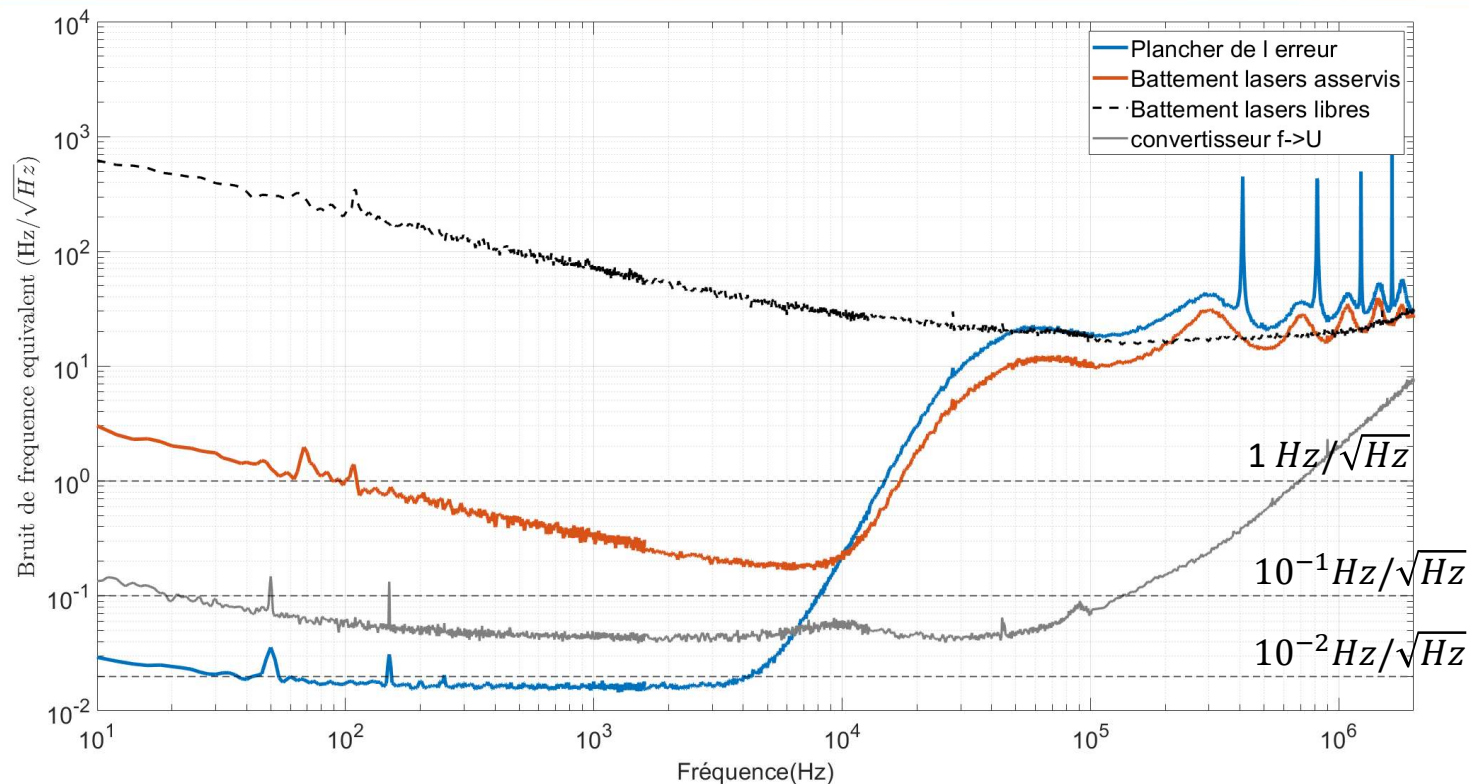
Plancher de l'erreur $< 2 \times 10^{-2} \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ sur [20 Hz – 6 kHz] (ou $4 \times 10^{-4} \text{ Hz}^2/\text{Hz}$)

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

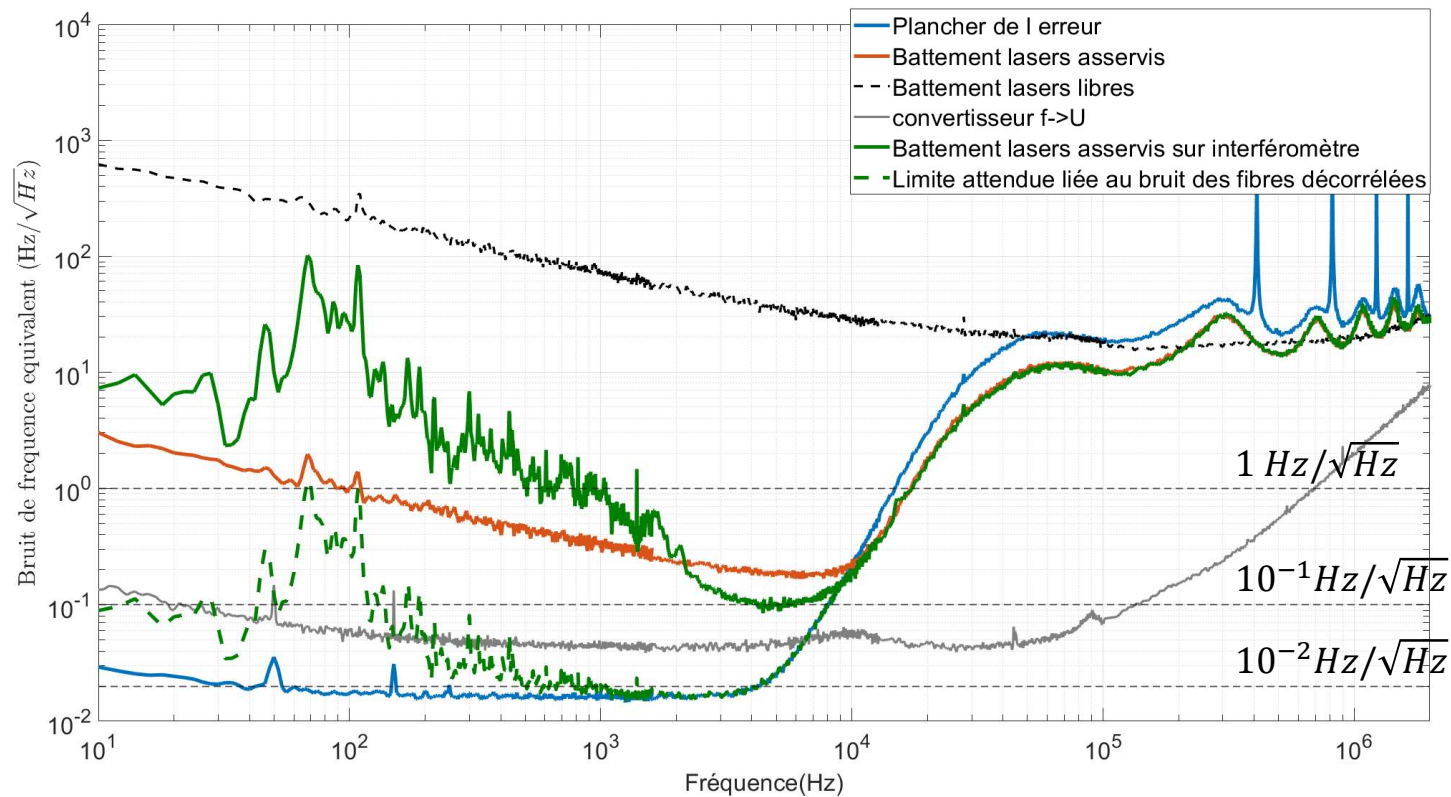


Plancher de l'erreur $< 2 \times 10^{-2} \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ sur [30 Hz – 5 kHz] (ou $4 \times 10^{-4} \text{ Hz}^2/\text{Hz}$)

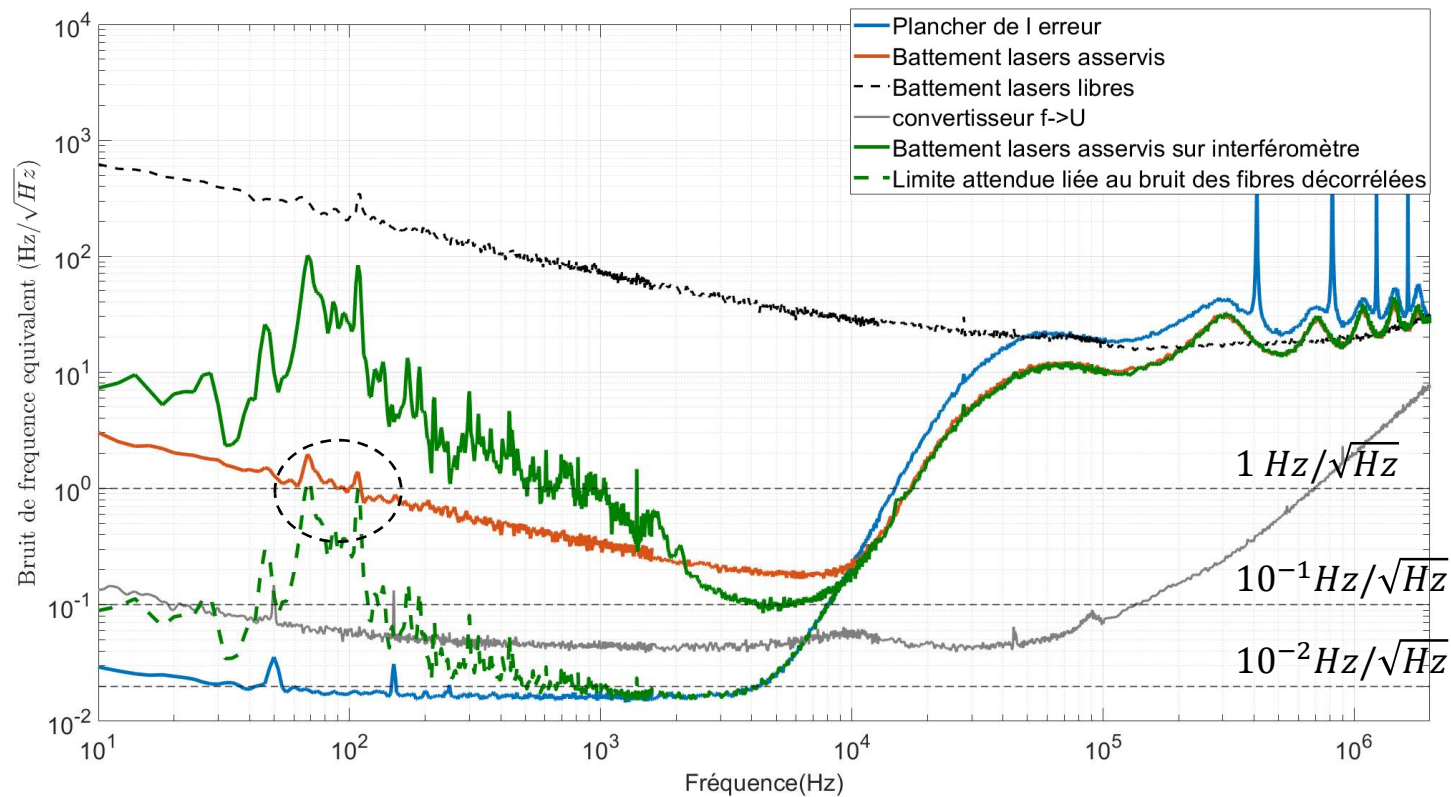
Plancher du bruit de battement $< 1 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ sur [100 Hz – 17 kHz]

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

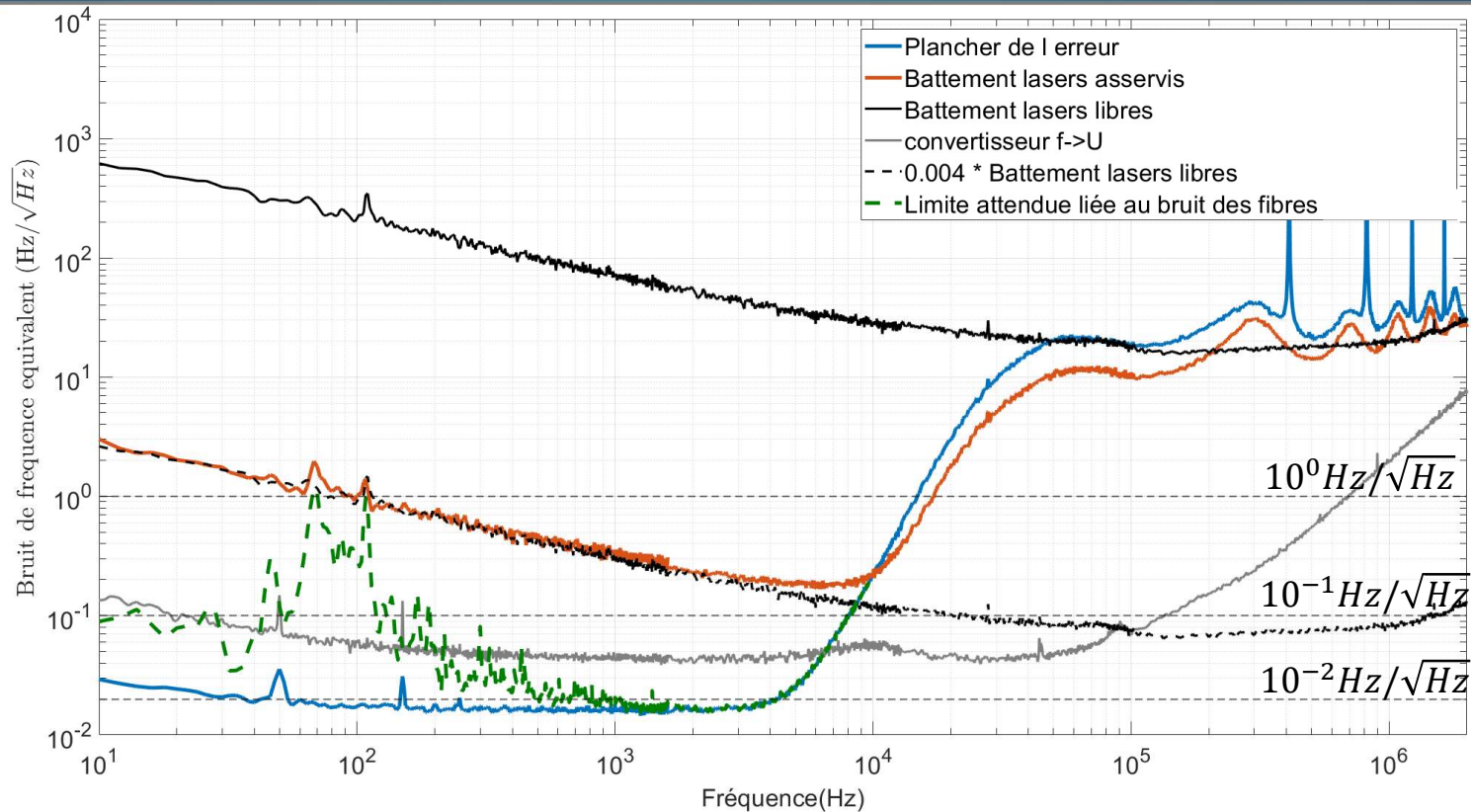


Asservissement sur laser maître: Planchers de bruit et limitations



- 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