



Assemblée générale du Labex First-TF
Institut d'optique d'Aquitaine, jeudi 8 juin 2017

Mise en évidence expérimentale d'un plancher
de bruit de fréquence au niveau de $0,1 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$
dans l'asservissement d'un
laser sur un interféromètre de Michelson à fibre

Frédéric Audo, Jean-Pierre Coulon, Fabien Kéfélian

Laboratoire ARTEMIS

Observatoire de la Côte d'Azur, Université de Nice, CNRS

Région



Provence-Alpes-Côte d'Azur

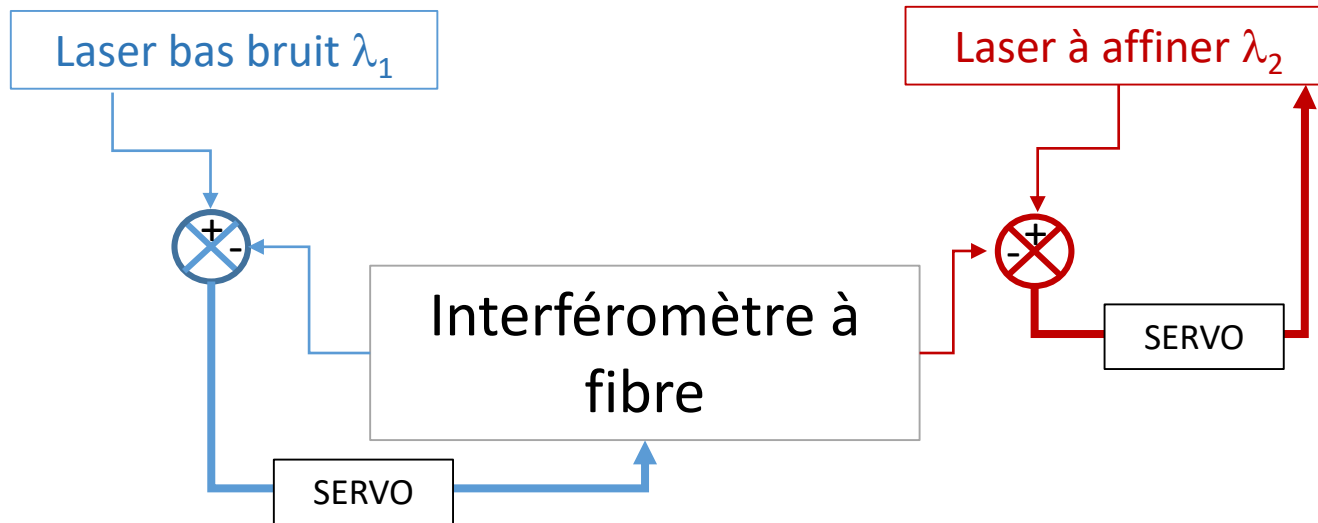


Observatoire
de la CÔTE d'AZUR

Membre de UNIVERSITÉ CÔTE D'AZUR 

Contexte de l'étude

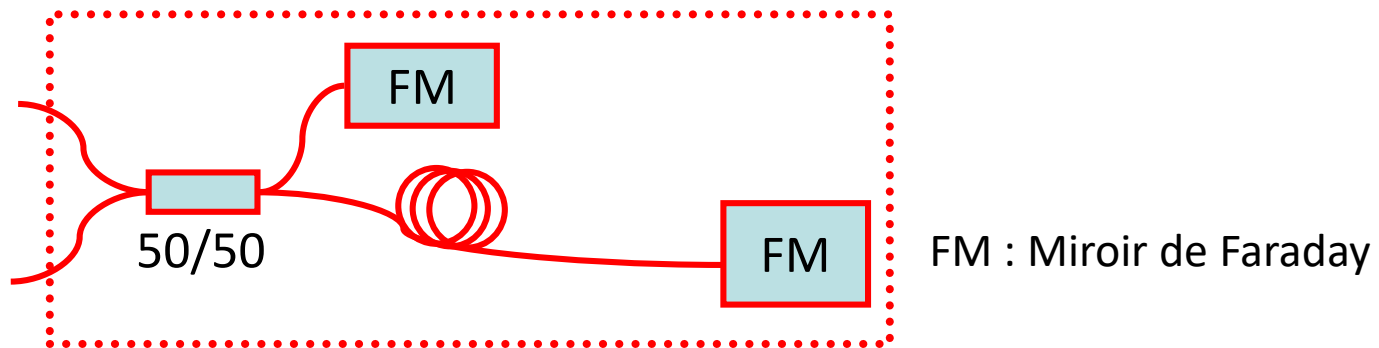
- Projet de transfert spectral de cohérence via un interféromètre à fibre



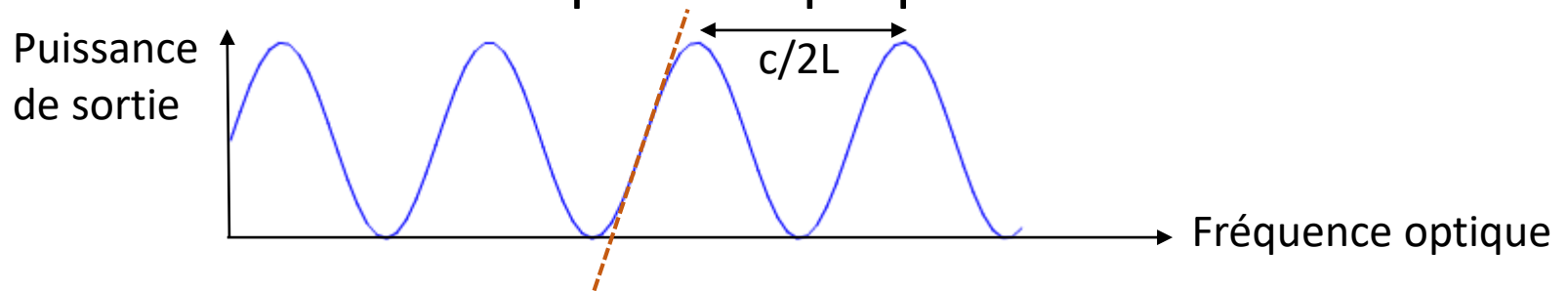
- Même principe que la cavité Fabry-Perot de transfert
- Utilise la stabilité entre modes de l'interféromètre
- Asservissement en fréquence (et non en phase)

Potentiel des interféromètres à fibre

- Bobine de fibre : interféromètre à deux bras à grand désaccord très compact



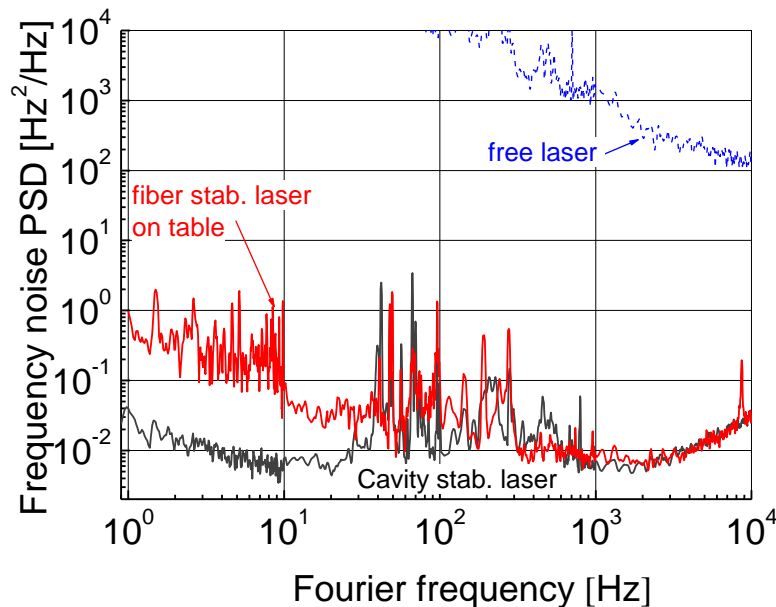
- Discriminateur de fréquence optique



- Ex : Bobine 1 km \Leftrightarrow cavité 10 cm avec $F \sim 50\,000$

Potentiel des interféromètres à fibre

- Étude de la stabilisation de laser sur interféromètre à fibre au Syrte en 2008-2010



Laser à fibre 1540 nm
Bobine de 1 km bien isolée

Kéfélian *et al.*,
Opt. Lett. (2009)

Jiang *et al.*,
Opt. Express (2009)

- Mode de l'interféromètre stable => intervalle entre modes très stable

Contexte de l'observation du phénomène

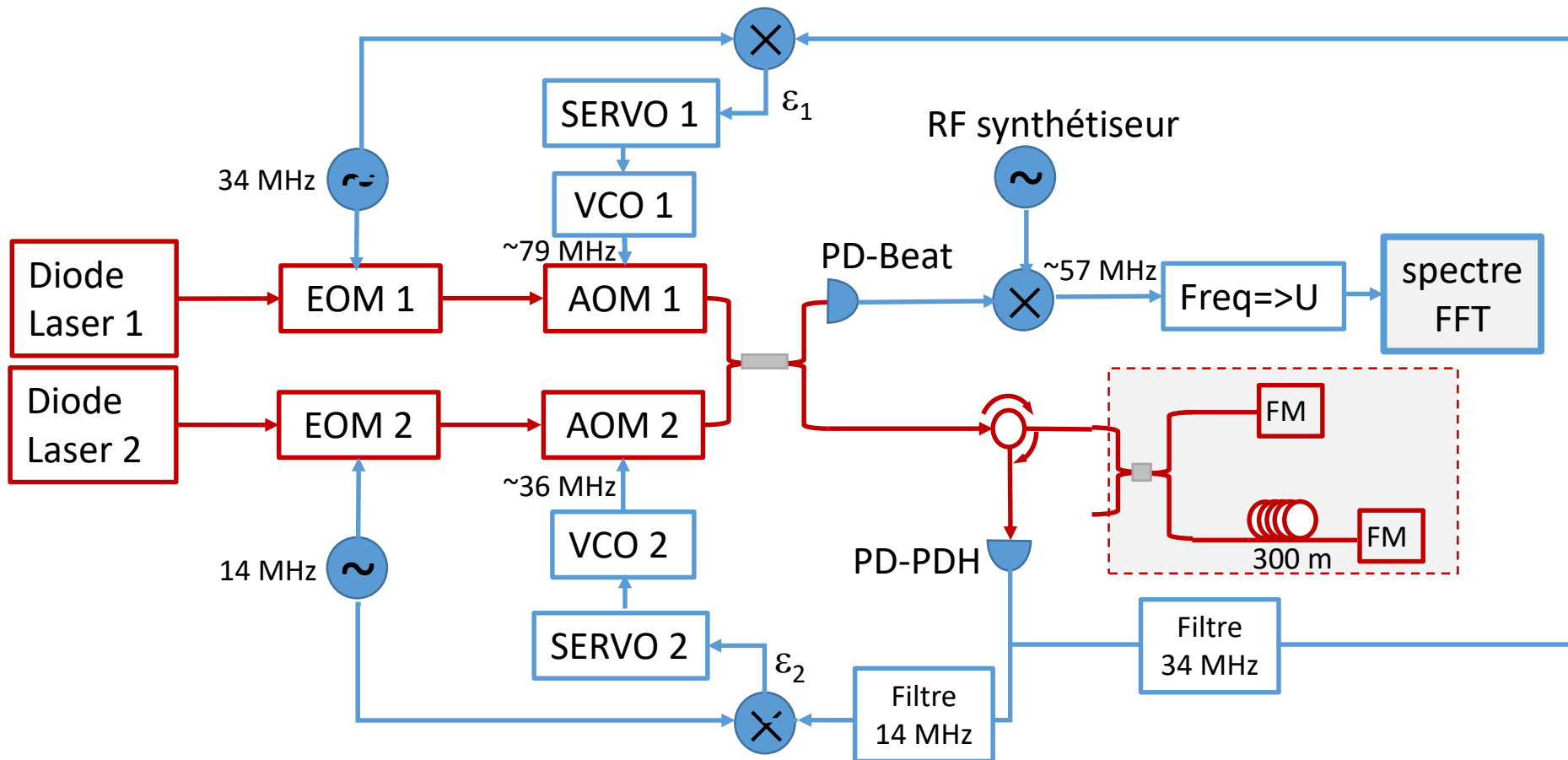
Objectif : Mesurer le plancher de bruit du double asservissement entre deux modes pour un intervalle faible (< 20 GHz)

=> Asservissement simultané deux lasers (diodes laser RIO 1542 nm) sur un même interféromètre

Asservissement en fréquence par Pound-Drever-Hall

Montage expérimental

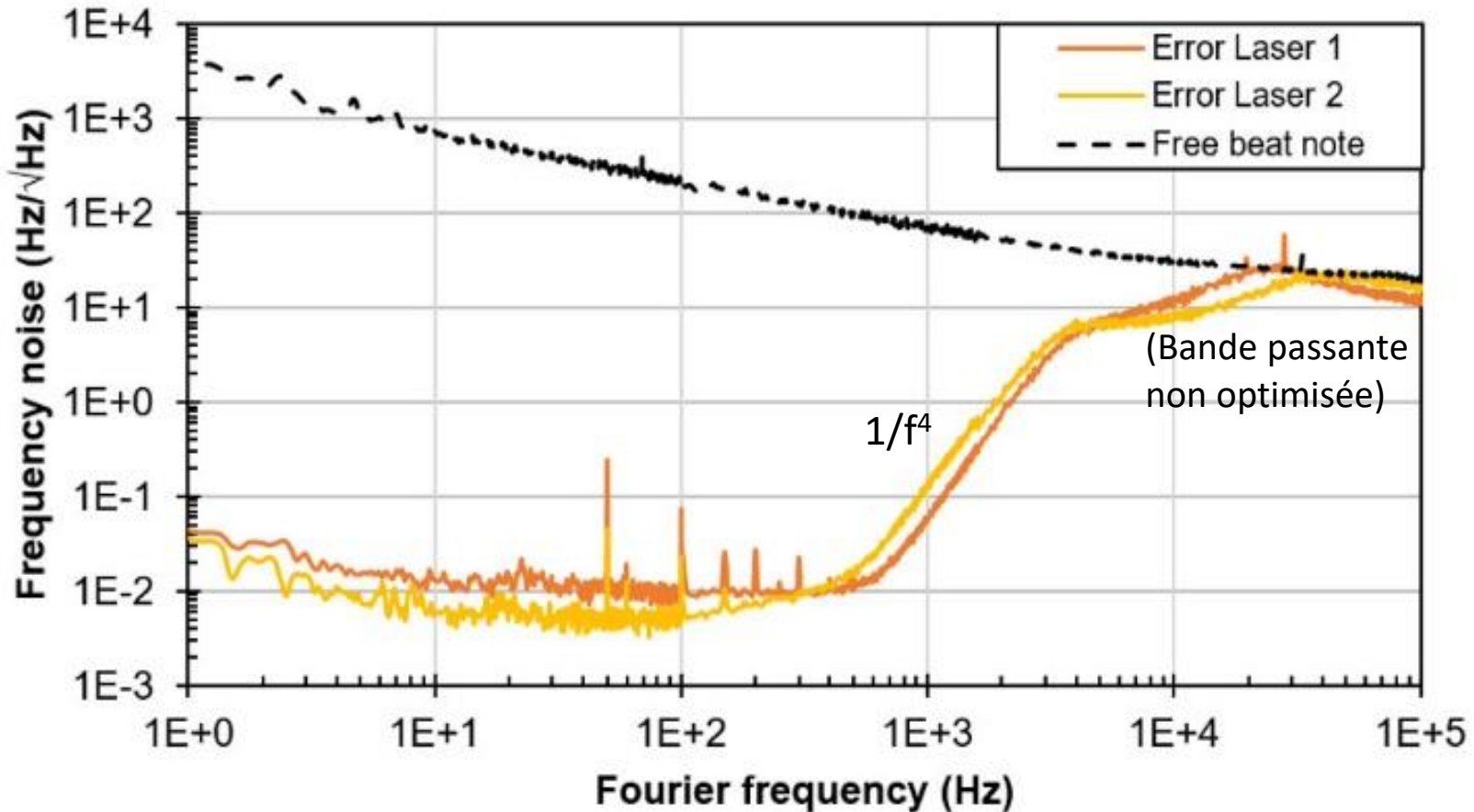
Double asservissement Pound-Drever-Hall



*Différence de fréquence des lasers : ~300 MHz

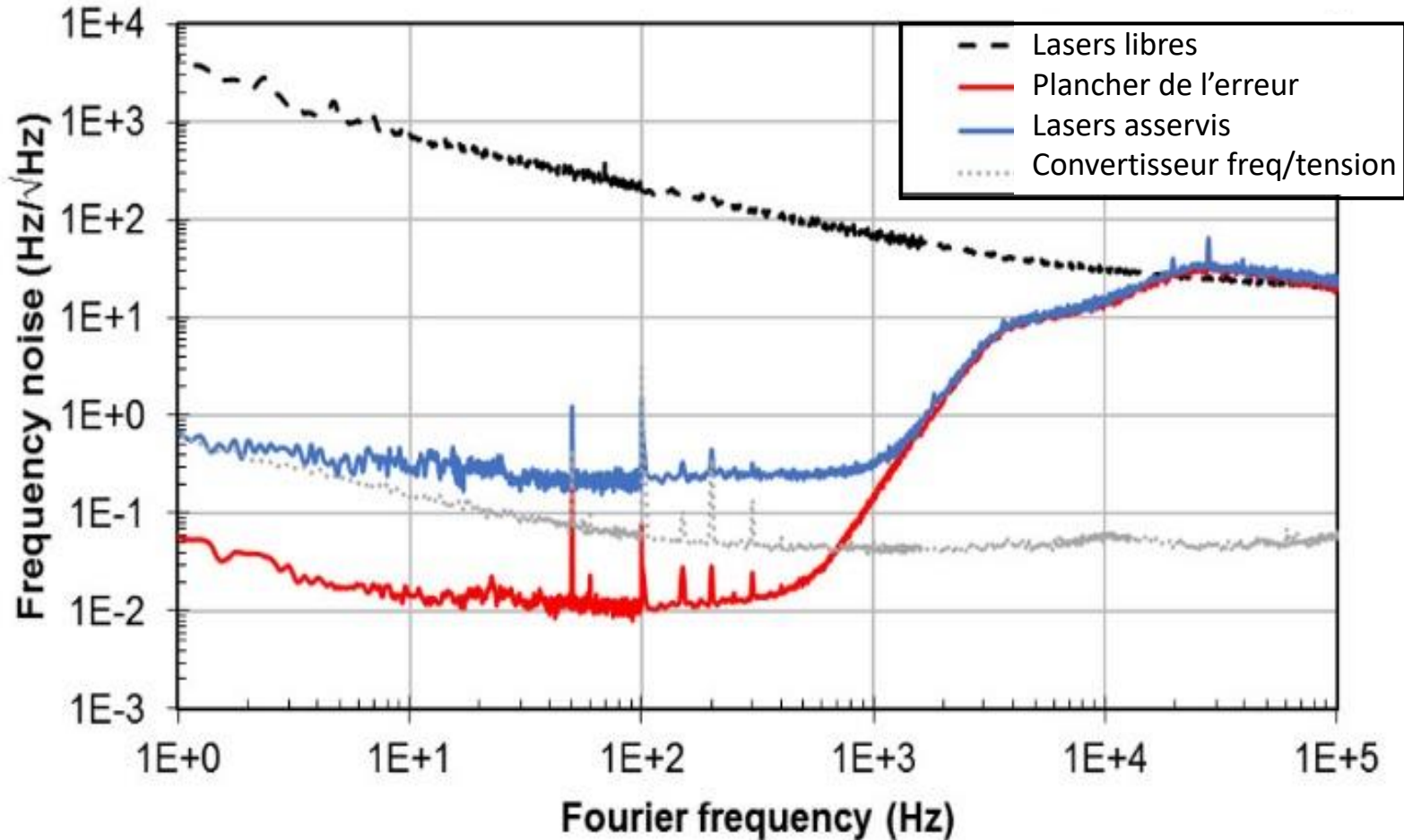
*ISL de l'interféromètre 333 kHz

Signaux d'erreur (bruit *in loop*)



Plancher du bruit « in loop » : 10^{-2} Hz/√Hz
(~3 nV/√Hz en sortie du mixer)

Bruit entre les deux lasers



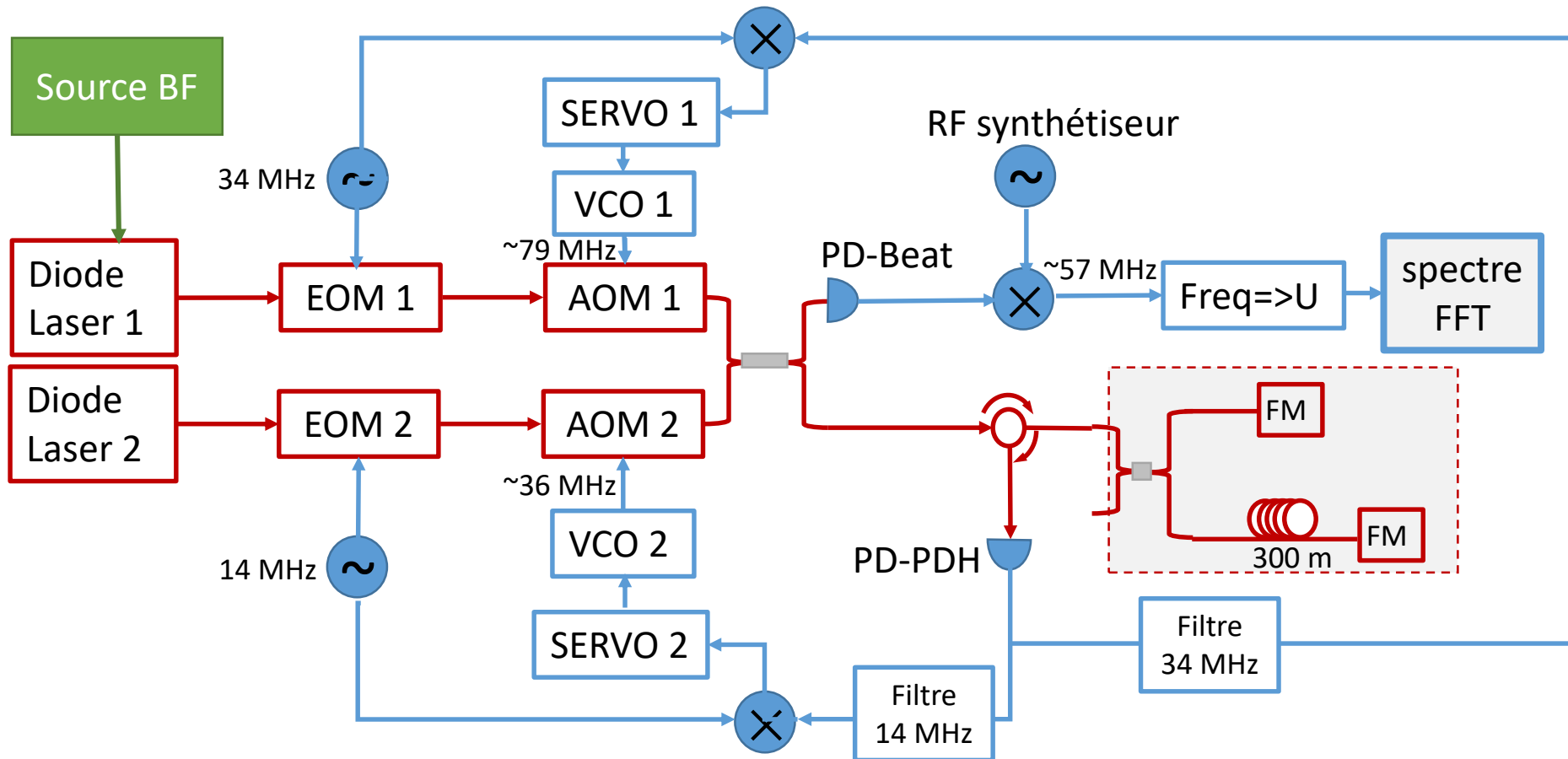
Mise en évidence d'un bruit hors boucle blanc $>0,1 \text{ Hz/Hz}^{1/2}$

Cause possible du bruit hors boucle

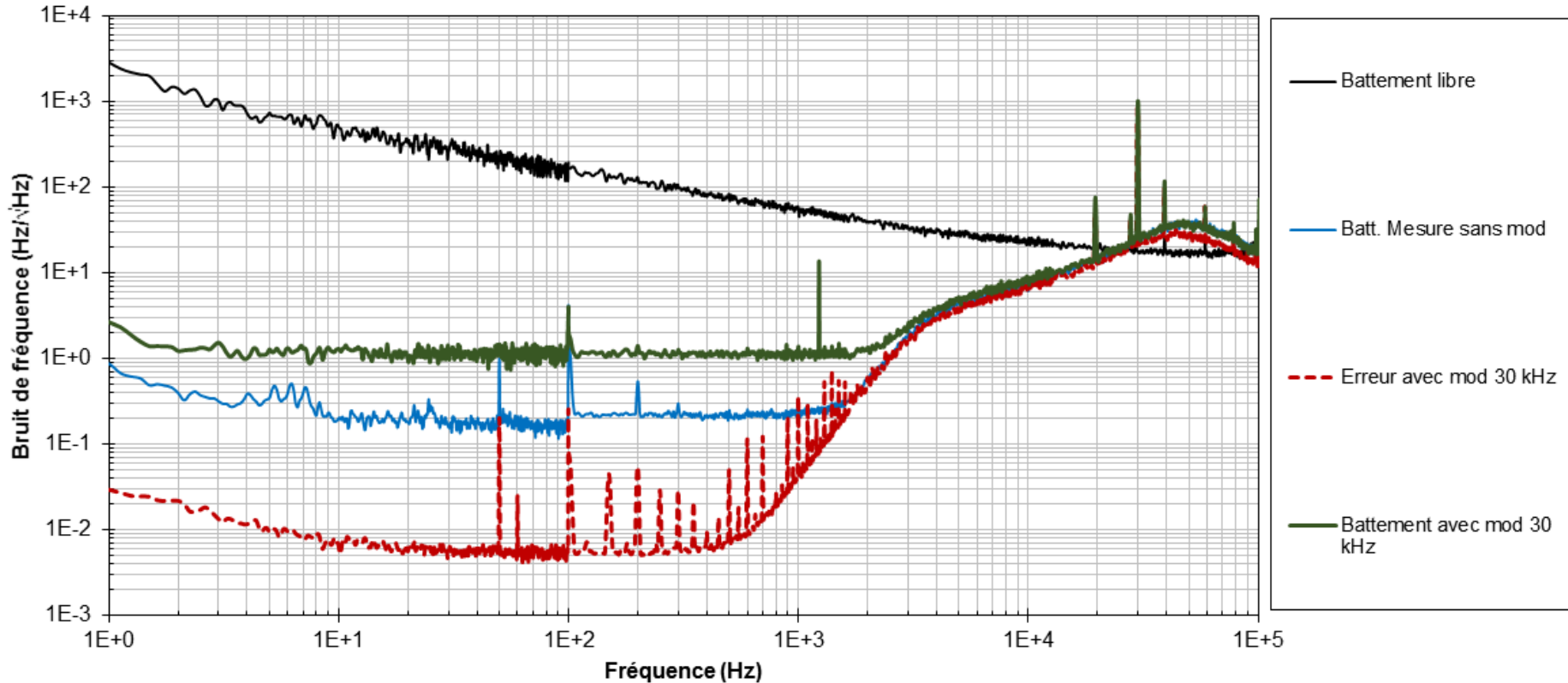
- Bruit de la fibre ?
- Shot noise ?
- Bruit photodiode ?
- Modulation d'amplitude résiduelle EOM ?
- Diaphonie entre les deux Pound-Drever-Hall ?
- Modes secondaires des diodes lasers ?
- Saturation électronique ?
- Retrodiffusion Rayleigh ?

Explication du phénomène

Effet d'une perturbation sinusoïdale



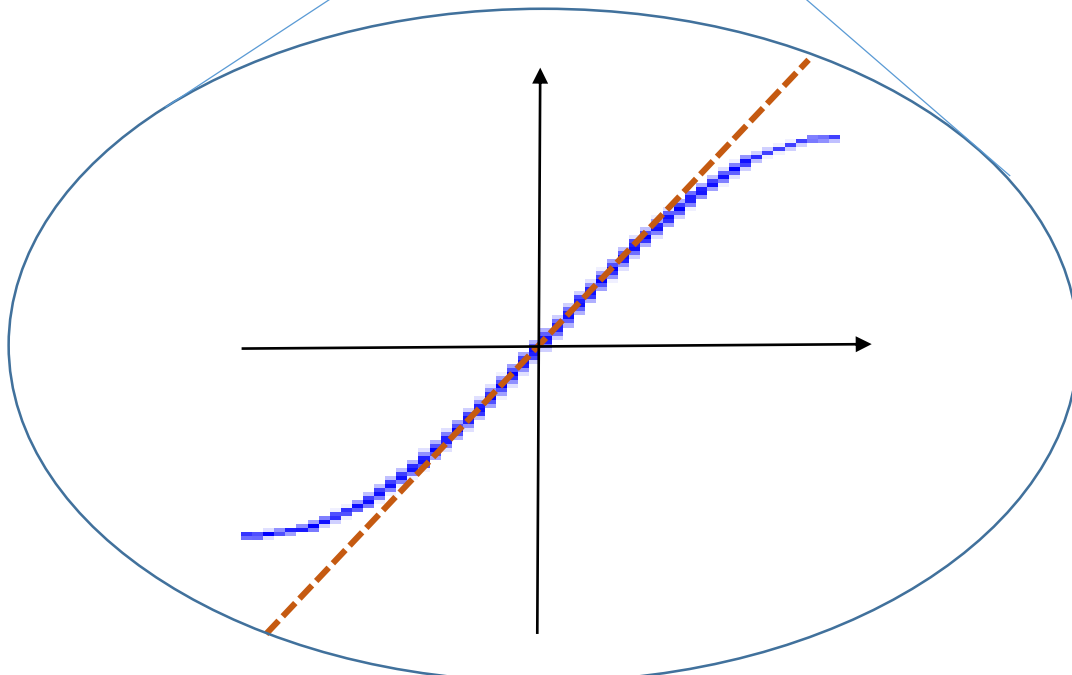
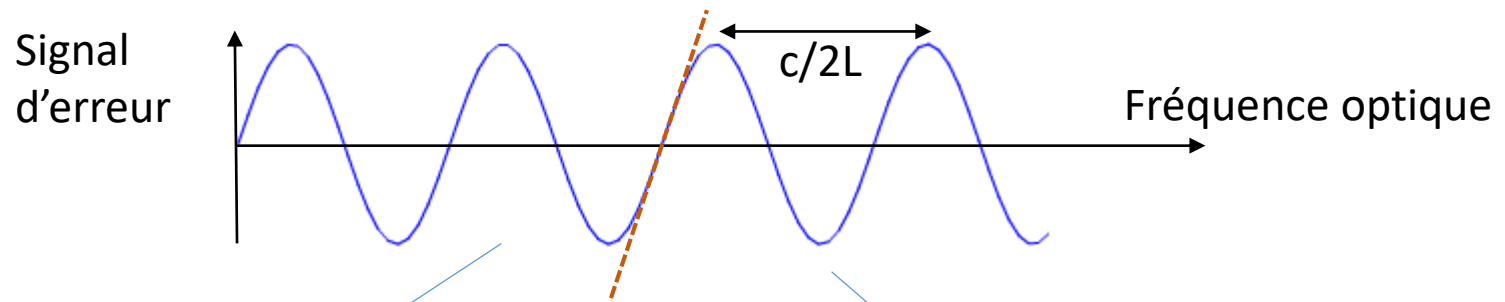
Effet d'une perturbation sinusoïdale



La modulation sinusoïdale génère du bruit blanc

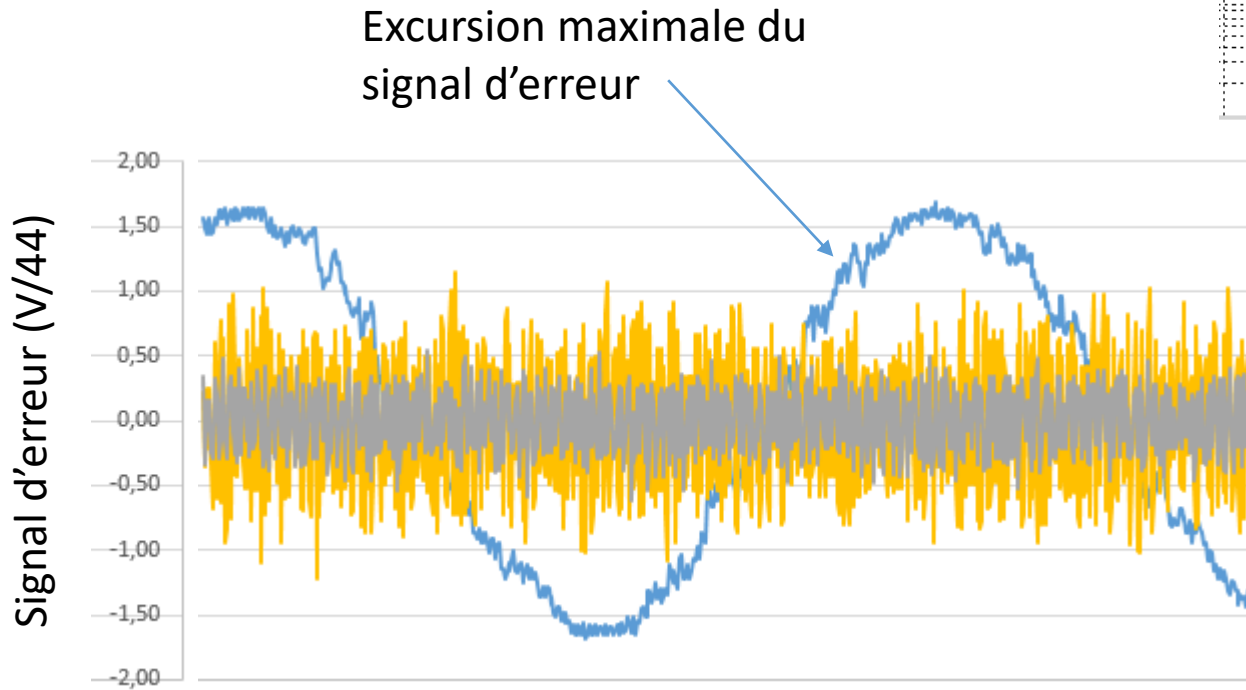
=> Phénomène non linéaire

Non-linéarité du discriminateur de fréquence



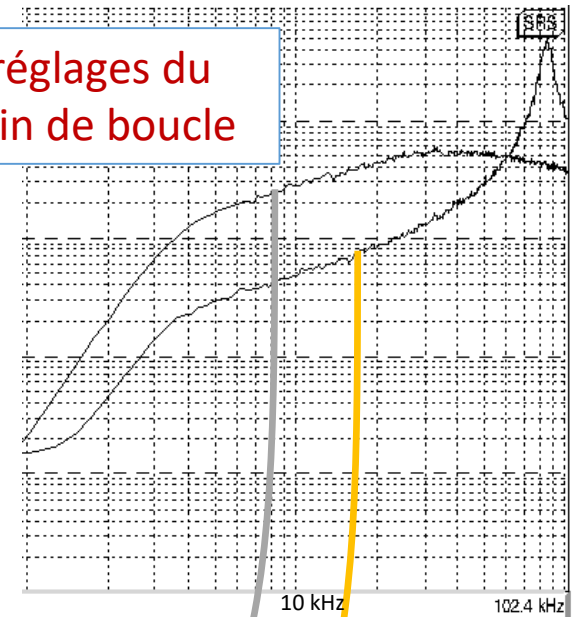
$$\sin(x) = x - \frac{x^3}{6} + O(x^5)$$

Amplitude relative du signal d'erreur

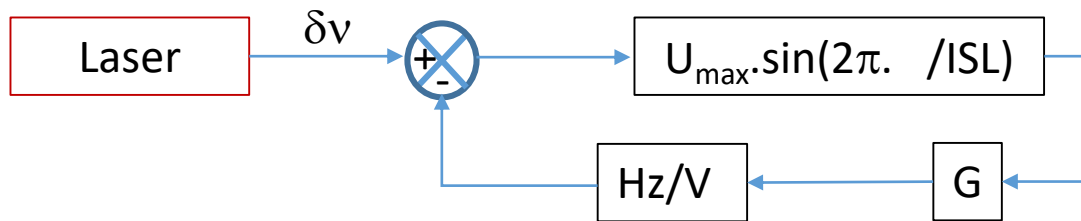


2 réglages du gain de boucle

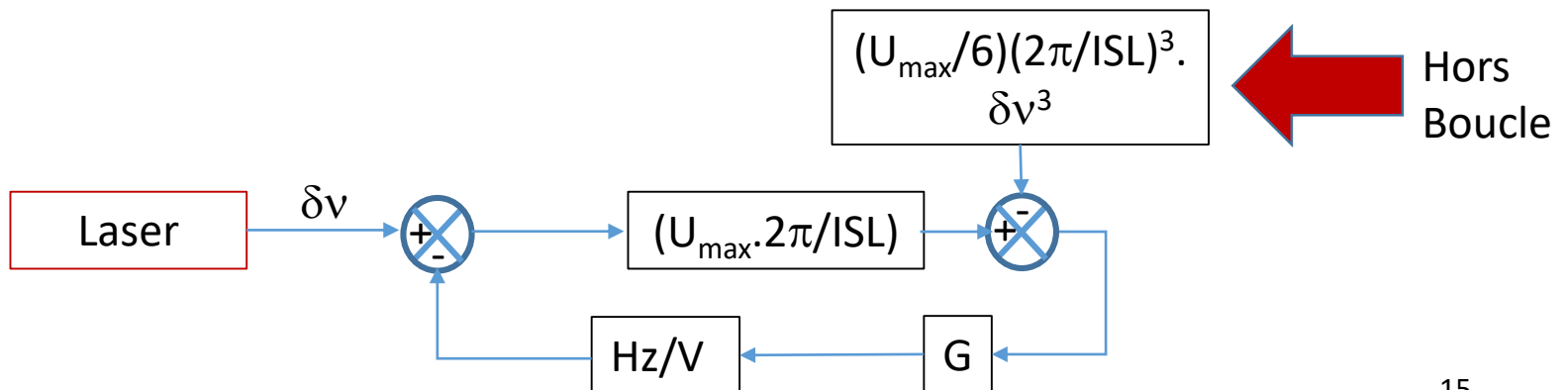
SPECTRE



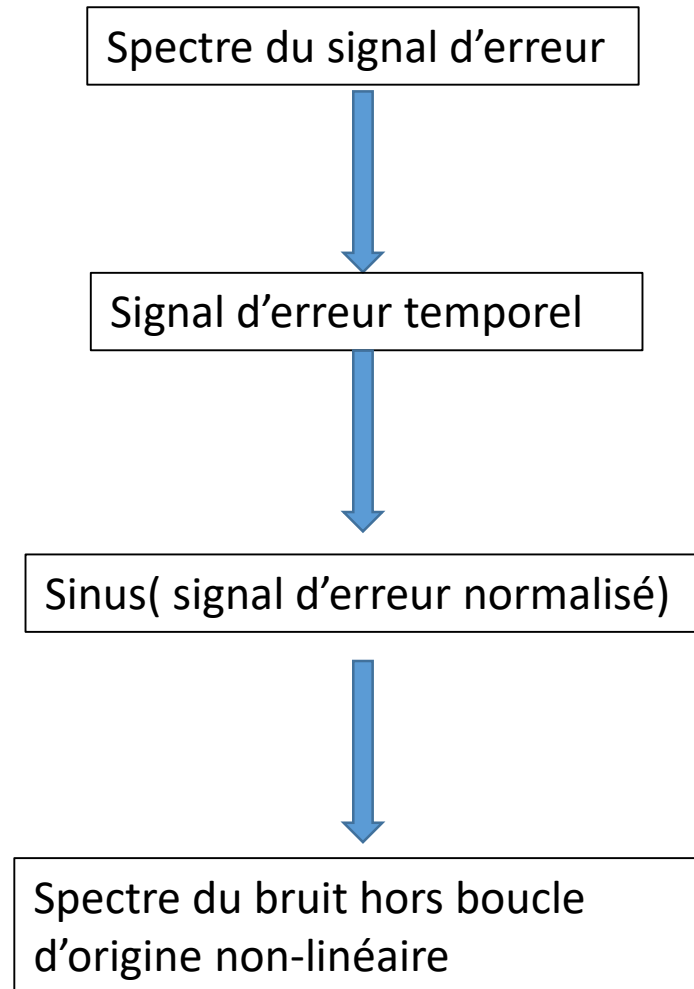
Influence de la non-linéarité du discriminateur de fréquence



$$\sin(x) = x - x^3/6 + O(x^5)$$

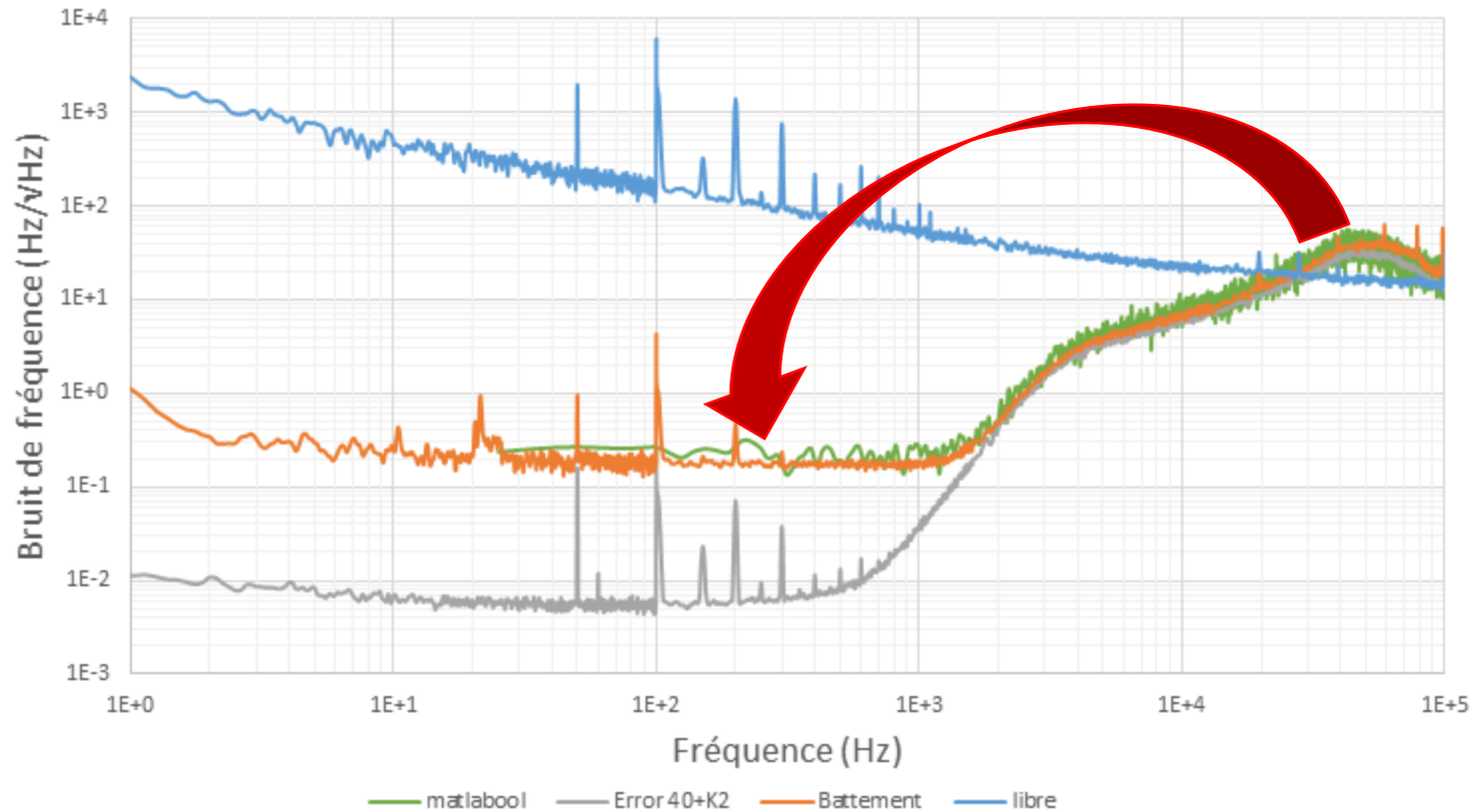


Modèle prévisionnel



Modèle perturbatif
simple passage

Comparaison mesure-simulation



De quoi dépend ce
plancher ?

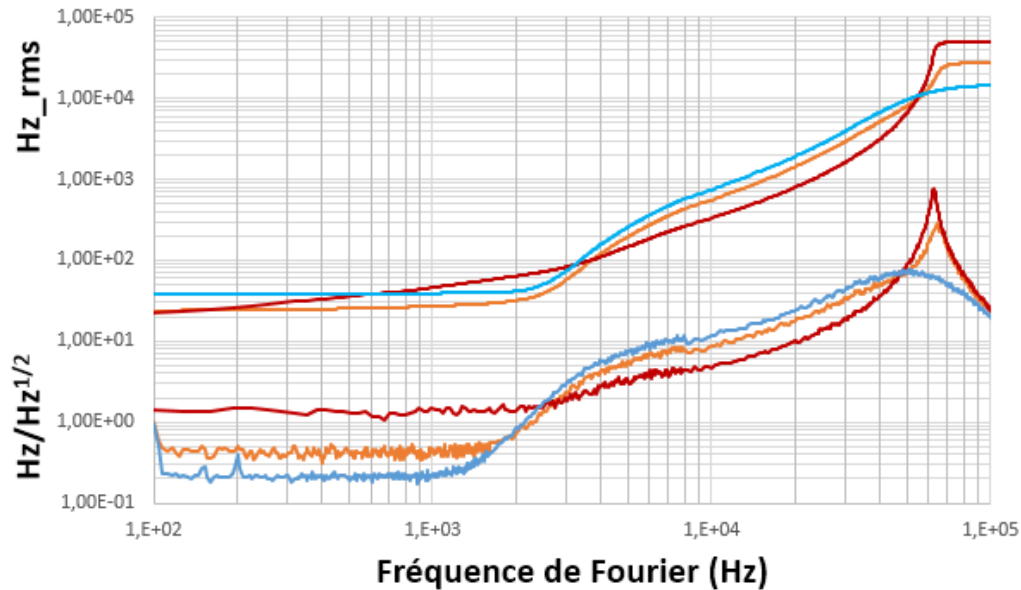
Comment le minimiser ?

Considérations générales

- L'effet dépend de :
$$\frac{\text{Signal d'erreur}}{\text{Intervalle spectrale libre}}$$
- Signal d'erreur dépend de :
 - Bruit du laser libre
Ex : avec 2 lasers à fibre Kohéras, bruit 2x plus petit, plancher bruit => 0,07 Hz/√Hz
 - Réglage de l'asservissement
- Intervalle spectrale libre dépend de la longueur

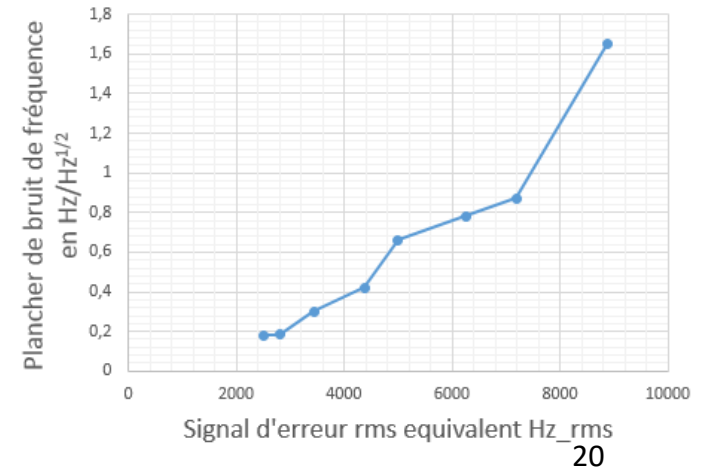
Influence du réglage de l'asservissement

Spectre du bruit de fréquence du battement et intégrale rms



Exemple : Fibre de 300 m

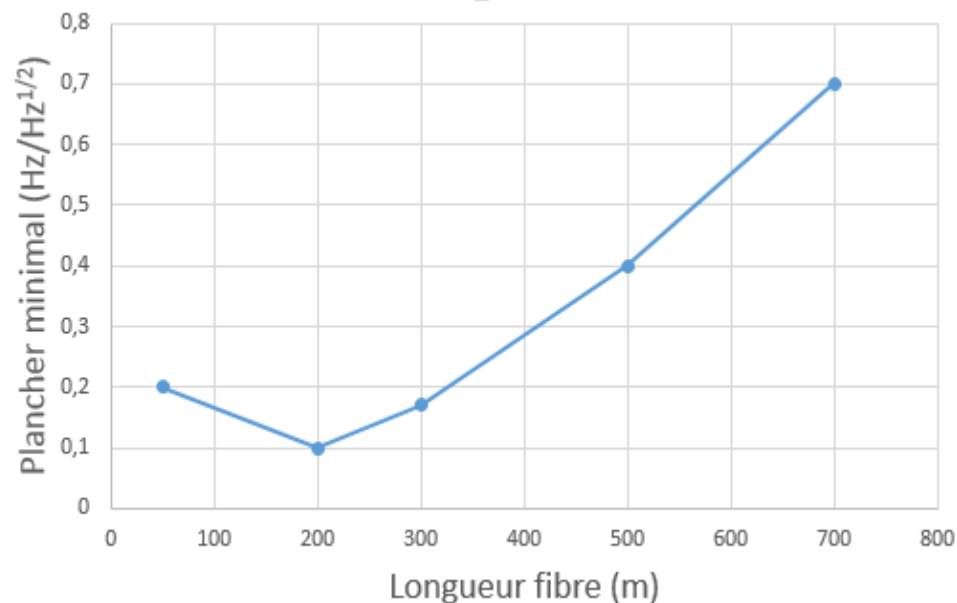
- Sur-oscillation :
⇒ ↑ erreur rms
⇒ ↑ plancher



Influence de la longueur de la fibre

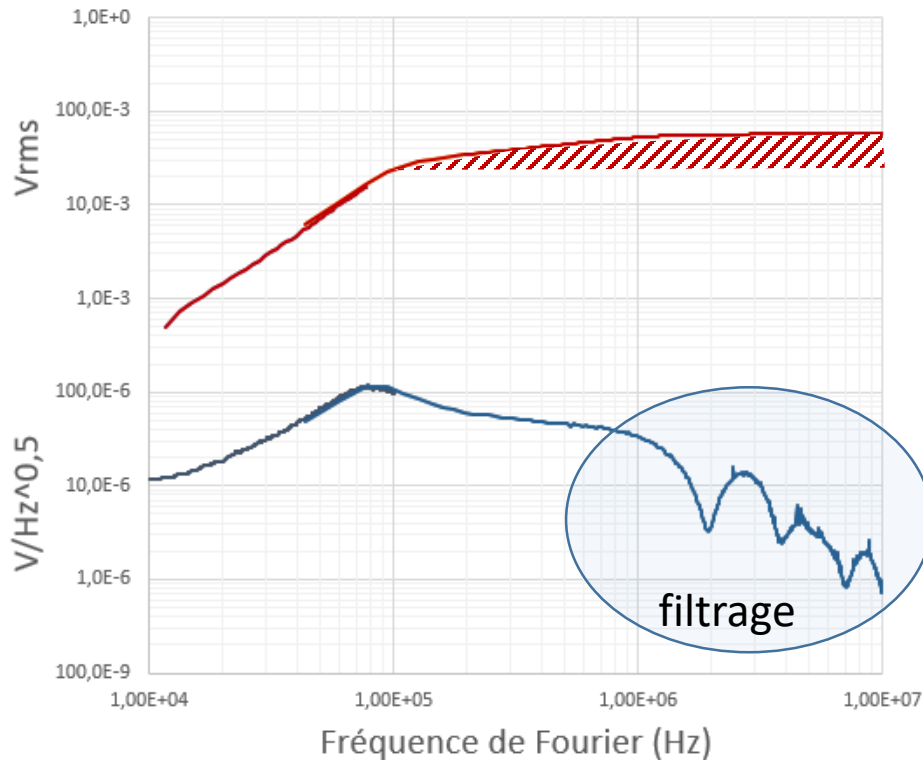
Longueur de la fibre	Plancher minimal
700 m	0,7 Hz/Hz ^{1/2}
500 m	0,4 Hz/Hz ^{1/2}
300 m	0,17 Hz/Hz ^{1/2}
200 m	0,1 Hz/Hz ^{1/2}
50 m	0,2 Hz/Hz ^{1/2}

Bande d'asservissement similaire



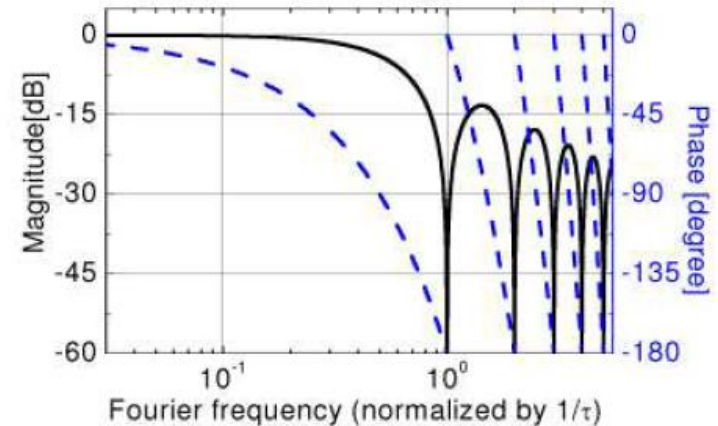
Le plancher remonte pour des longueurs courtes

Impact du bruit au dessus de 100 kHz



Exemple avec la fibre de 50 m

- Réponse en fréquence du discriminateur :



- Fibre courte : Fréquence de coupure de l'interféromètre haute
Ex: 50 m => 2 MHz
- Contribution importante du bruit entre 1 MHz et 100 MHz

Résumé concernant la longueur

Influence de la longueur :

-Lorsque $L \uparrow \Rightarrow ISL \downarrow$ donc l'impact de la nonlinéarité diminue

-**MAIS** lorsque $L \uparrow$ l'interféromètre filtre mieux le bruit et peut \downarrow le signal d'erreur

-**DE +** la longueur peut impacter la bande passante d'asservissement

La longueur optimale dépend du spectre du bruit du laser, et de la vitesse de contrôle

CONCLUSION

- Mise en évidence expérimentale de l'impact de la non-linéarité d'un discriminateur de fréquence optique
- Résultat généralisable aux cavités et plus généralement à tout asservissement (ex : puissance)
- Méthode numérique pour estimer l'impact du phénomène
- A faire : déterminer une figure de mérite en fonction du bruit intégré RMS et d'un modèle standard de spectre de bruit FM
- A faire : Linéariser électroniquement (\arcsin ou $+x^3/6$)