



SILENTSYS
ultralow noise systems



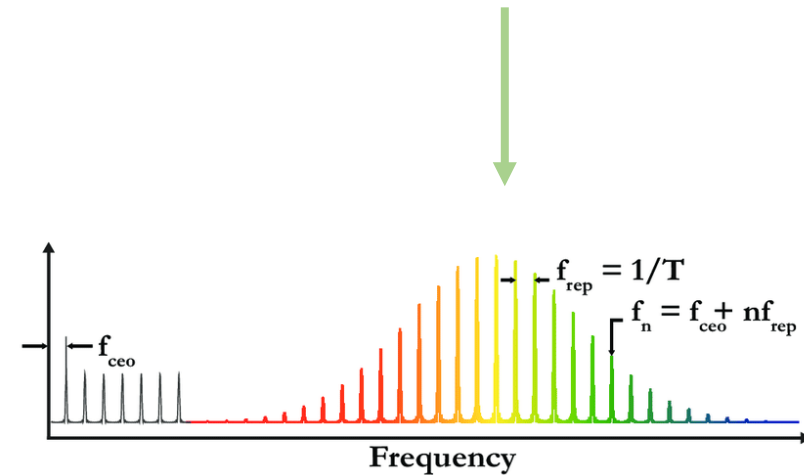
*STabilisation de peigne de fréquences compact par auto-injection **Rf** Synchronne (STARS)*

Assemblée générale de la Fédération de recherche First TF, 5 octobre 2022

Tatiana STESHCHENKO, Karim MANAMANI, Vincent RONCIN et Frédéric DU BURCK (LPL)

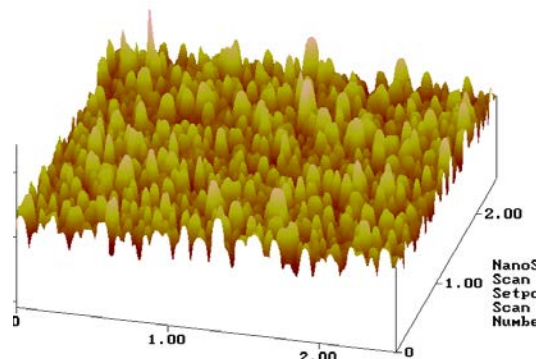
Pierre BROCHARD (SILENTSYS)

Peignes de fréquences à semi-conducteurs pour la métrologie des fréquences



Stabilisation métrologique :

1. Injection optique stabilisée dans le mode ν_0 , avec Référence de fréquence + transfert de stabilité via une cavité en anneau fibrée
2. Injection électrique à f_{rep}



Particularités des diodes :

1. Mode lock passif bas bruit
2. $f_{rep} > 10$ GHz (modes optiques puissants)
3. Raccordement optique / RF direct
4. Intégrabilité sur plateforme Silicium (SiPhotonics)

Contexte du projet... *peignes de fréquences à semiconducteurs*

Historique du projet :

2014, Thèse d'Amine CHAUCHE-RAMDANE (soutenue en 2018)

2015 -> 2017, projet **SPIRAL** (Institut FOTON, III-V Lab, TRT)

2016, Post-doc de Pierre GRUNIG

2017, Thèse de Karim MANAMANNI (soutenue en 2020)

2018, Post-doc de Omar SAHNI

2018, Projet **MODIQ** (Innoptics, III-V Lab)

2020, Thèse de Tatiana STESHCHENKO (soutenance prévue en 2023)

2021, Projet **STARS** (Silentsys)

Développement lasers stabilisés sur référence moléculaire HCN et cavité de transfert à fibre,

Développement référence C₂H₂ + premiers tests d'injection optique stabilisée,

Deuxième version de la cavité de transfert + premiers tests d'injection optique et électrique.

Publications et communications:

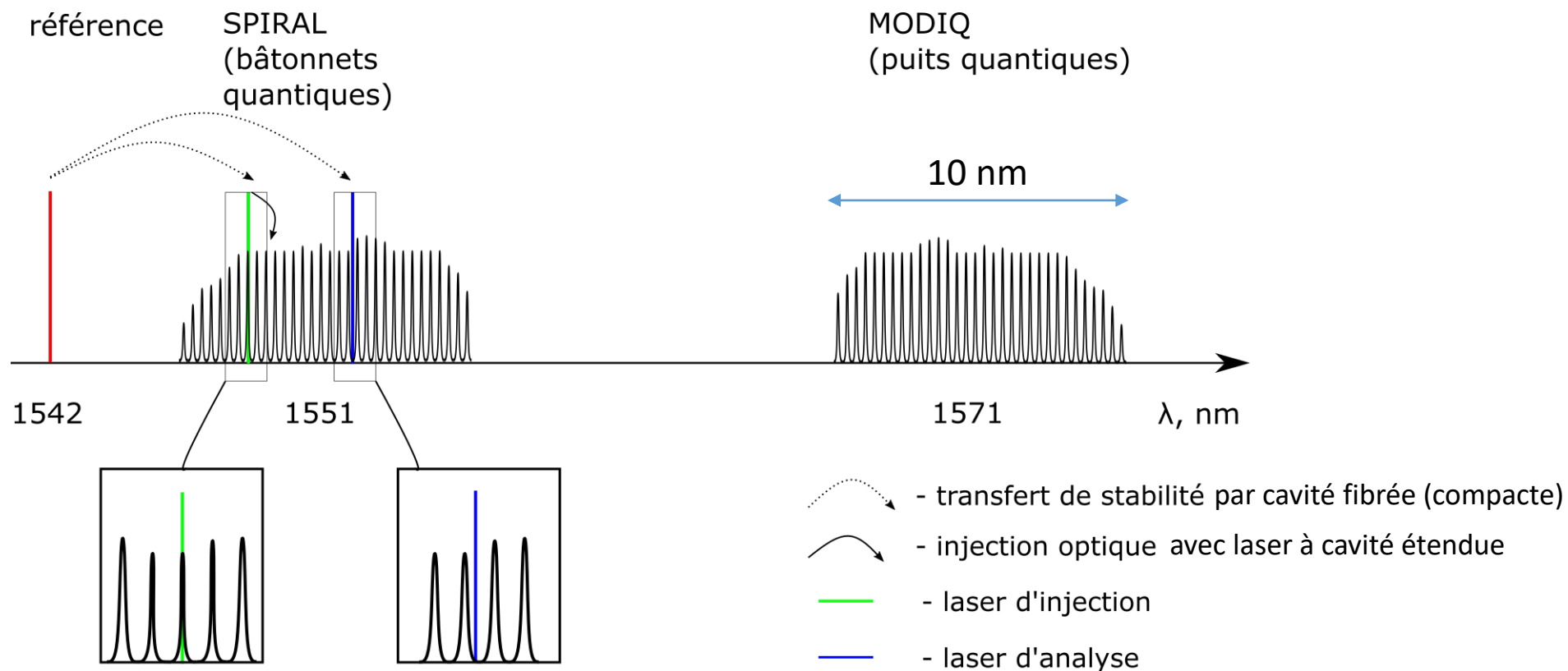
Articles dans revues à comités de lecture : **6** publiées + **1** accepté à *Optics Letters* + **1** soumis à *IEEE PTL*

Conférences internationales : **8**

Conférences et colloques nationaux : **15**

Contexte du projet... *peignes de fréquences à semiconducteurs*

Stabilisation métrologique par injection optique grâce à la cavité de transfert à fibre



Peigne	Structure	λ_0 , nm	f_{rep} , GHz	Δf_{rep} , kHz	$\Delta\nu_0$, MHz
SPIRAL	Q-dash	1550	10,095	1-20	4-20
MODIQ	Q-well	1571	10,72	20-200	10-50

Projet STARS (collaboration avec SILENTSYS)

Volet 1 :

Filtrage des modes optiques (1 ou 2 modes) -> réalisation d'un filtre optique stabilisé (FBG stabilisé en température)



Volet 2 :

Exploration des possibilités de stabilisation du peigne par injection électrique (2 modes filtrés)



Injection électrique à f_{rep} :

- Auto-injection (OEO)
- PLL opto-électronique

Volet 3 :

Stabilisation du peigne par correction électrique des fluctuations de fréquence (1 mode filtré)



OFD (Optical Frequency Discriminator):

- Conversion fluctuations de fréquence en tension
- Ultrabas bruit (plancher mieux que $0.1\text{Hz}^2/\text{Hz}$)
- Compacte (format boîte à chaussure)

1. Caractérisation du bruit dans la diode laser « peigne de fréquences »
2. Etude de l'injection optique
 - 2.1 Caractérisation de l'injection optique
 - 2.2 Résultats de stabilisation du peigne
3. Etude de l'injection électrique (STARS)
 - 3.1 Injection électrique externe asynchrone
 - 3.2 Injection électrique synchrone (auto-injection)
4. Perspectives

1. Caractérisation du bruit dans la diode laser

Propriétés du peigne à semiconducteurs

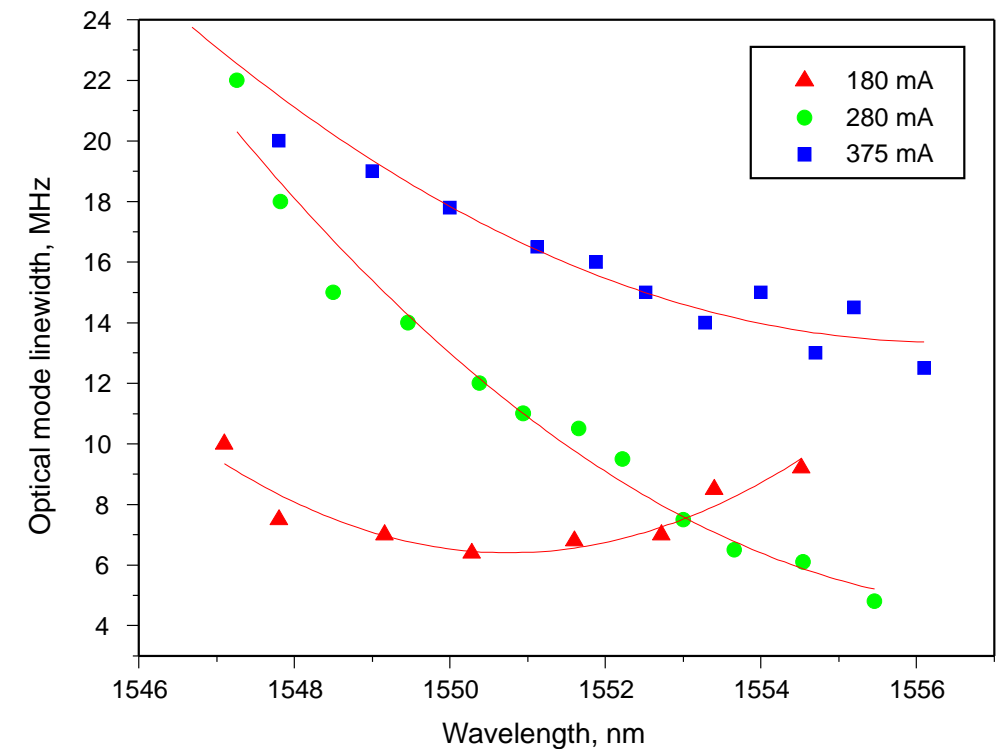
- Une cavité peu sensible au bruits acoustiques
- Une longueur optique sensible au fluctuations du courant et de température
- Un couplage phase-amplitude qui élargit les modes optiques
- Un processus de « mode-locking » dominé par le bruit d'émission spontanée

Couplage du bruit dans les peignes à semiconducteurs

- Fluctuations du courant -> élargissement « commun » des modes (Voigt)
- Verrouillage en phase des modes -> Four-Wave-Mixing

Mode lock passif -> corrélations des bruits entre les différentes fréquences du peigne ?

Evolution parabolique des largeurs des modes optiques si bruit lorentzien, évolution linéaire si bruit gaussien,

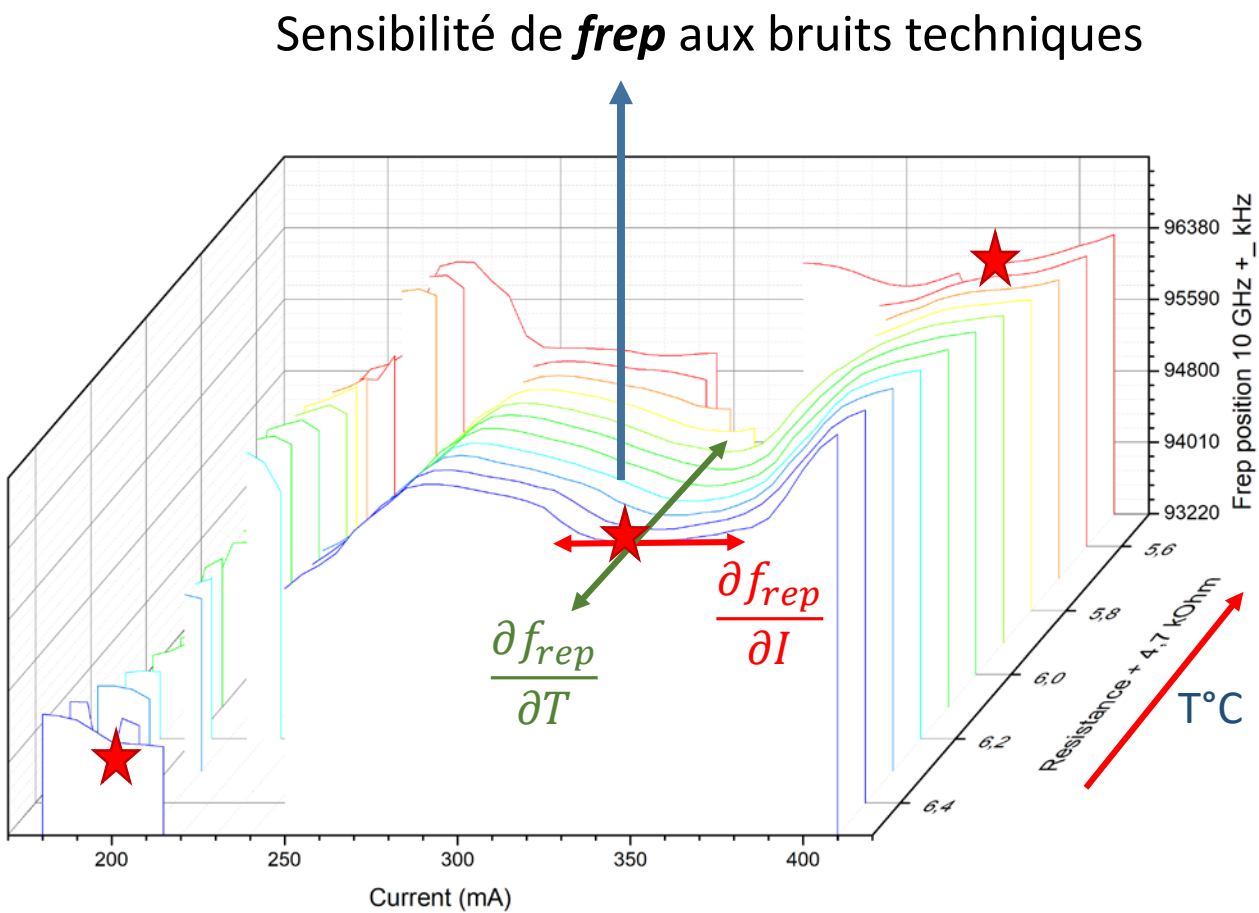
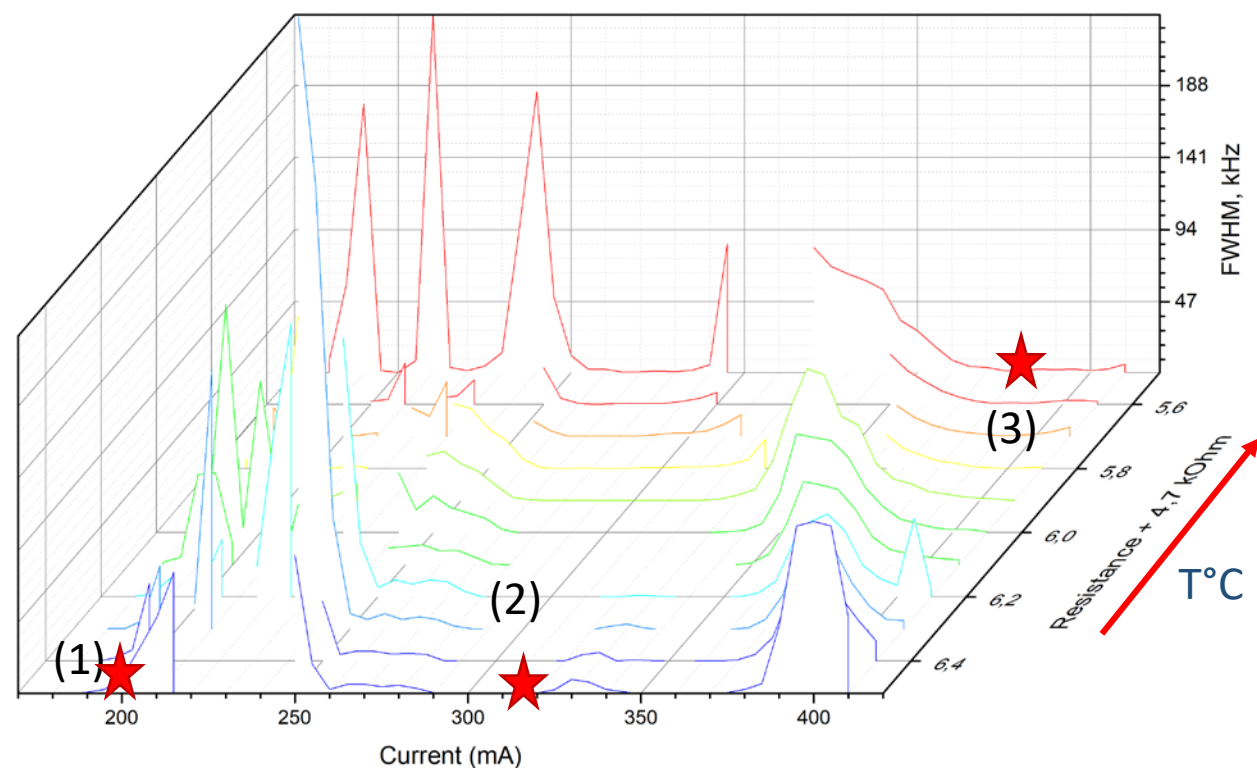


1. Caractérisation du bruit dans la diode laser : *frep*

Régimes de fonctionnement du MLLD

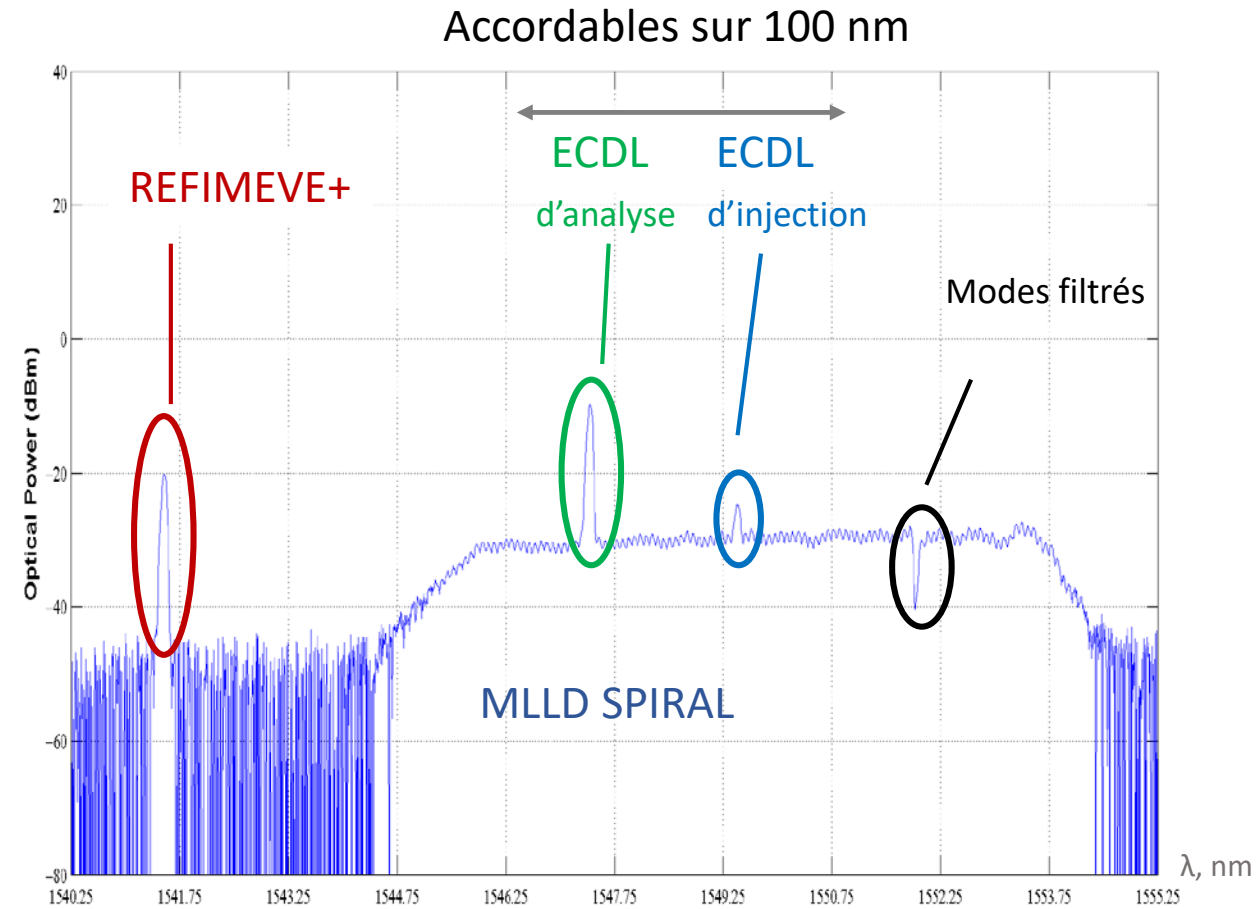
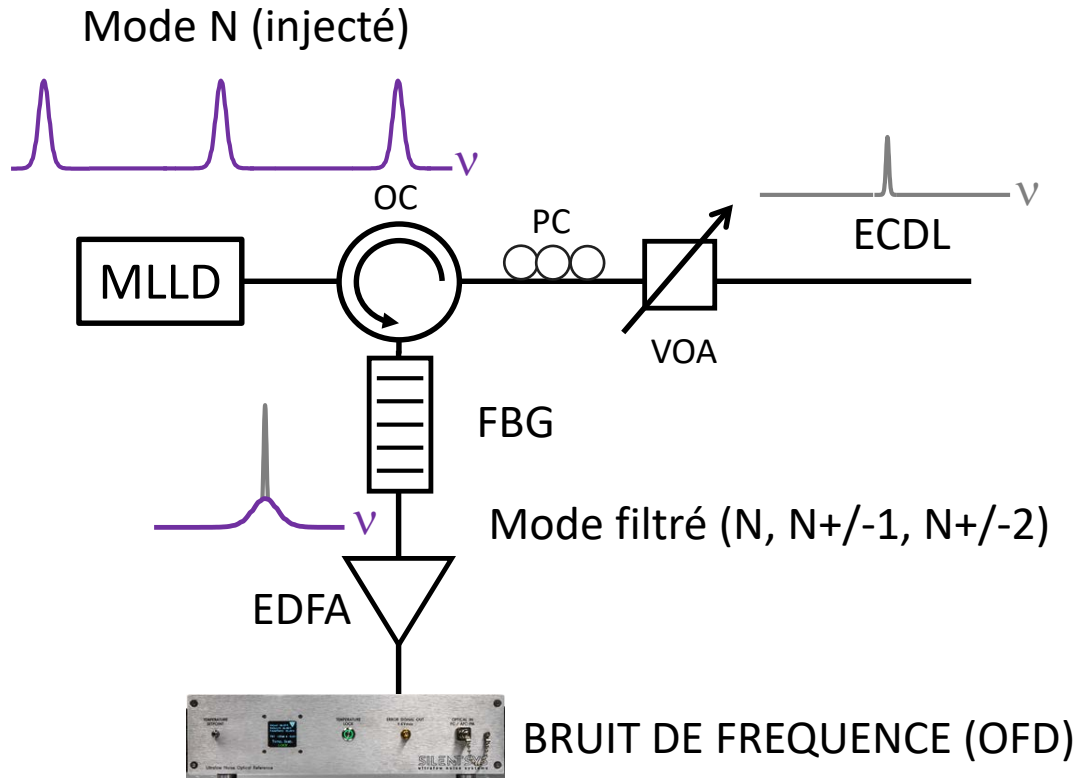
Détermination des régimes de fonctionnement en fonction du courant et de la T°C

- Pureté spectrale de *frep*
- Fréquence *frep*



2. Caractérisation de l'injection optique

Dispositif de caractérisation STARS

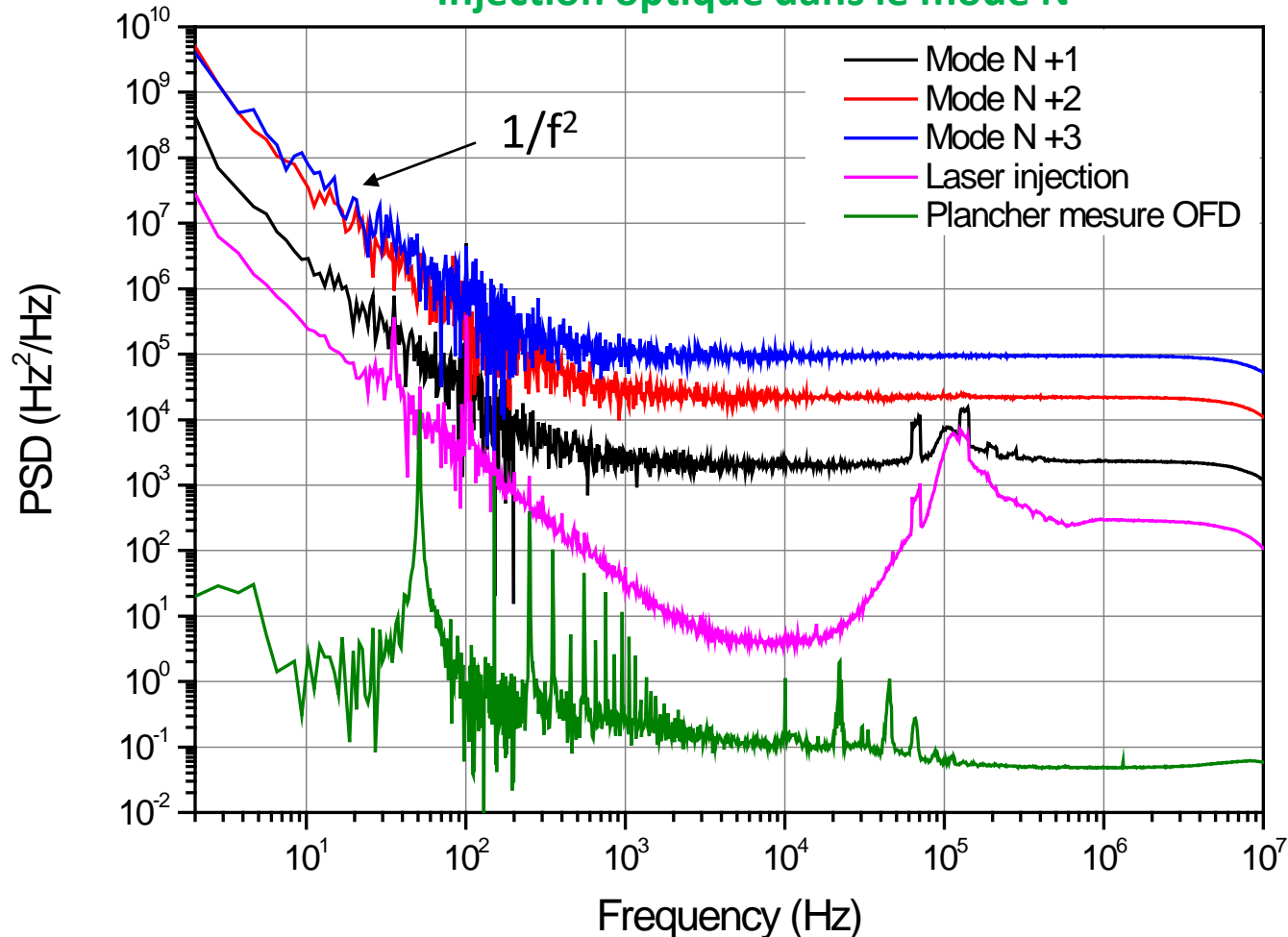


FBG AOS (Advance Optic Solutions) : stabilisation thermique, 20 GHz à -20 dB (réflexion), stabilité < 125 MHz, accordabilité ~1 nm (~10 x frep)

2. Caractérisation de l'injection optique

Bruit de fréquence : caractérisation avec l'OFD de Silentsys

Injection optique dans le mode N



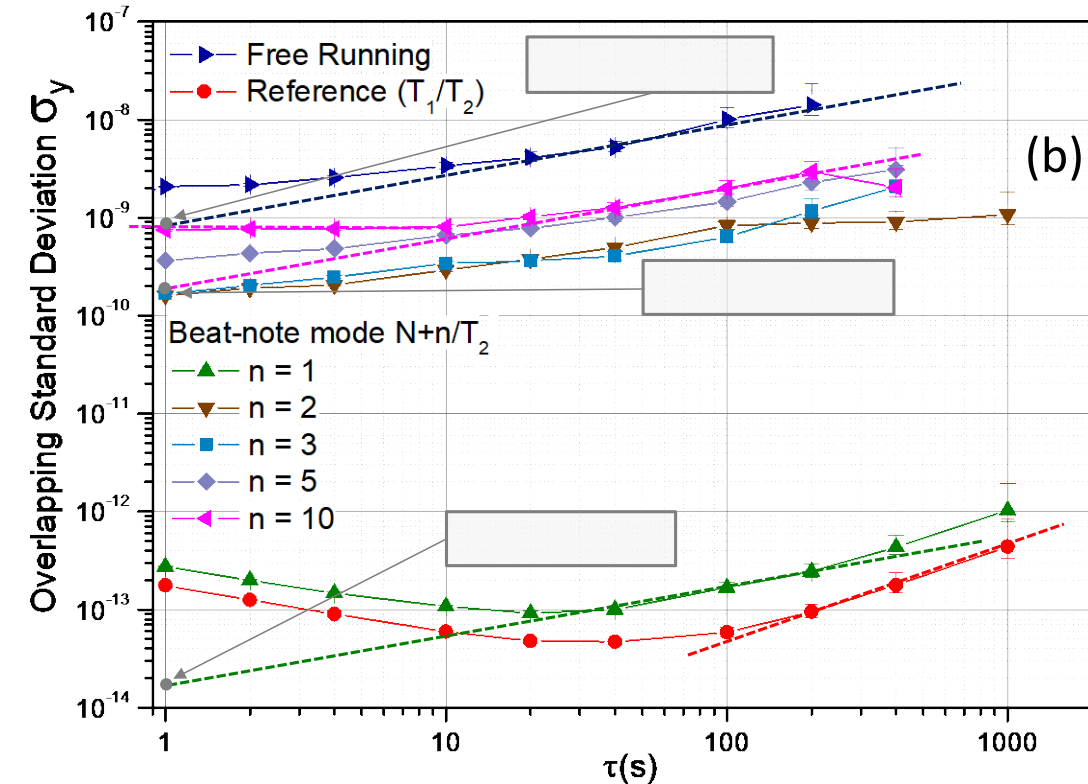
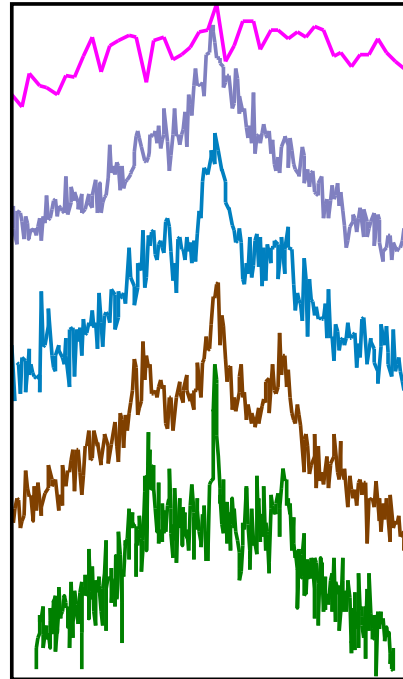
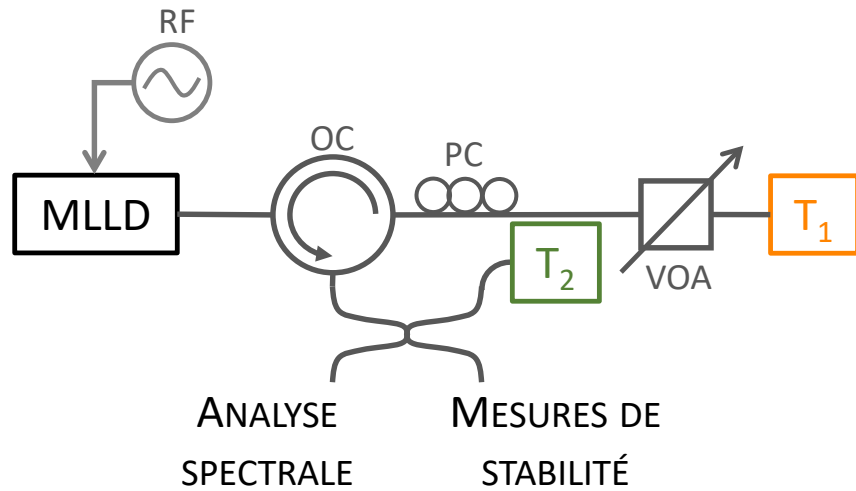
Résultats préliminaires !

Etudes à mener avec un OFD adapté (fenêtre de conversion plus large) et injection contrôlée :

- Bruit sous injection optique (étude systématique)
- Bruit sous injection électrique
- Utilisation du signal pour la correction sur le courant

2. Résultats de stabilisation par injection optique

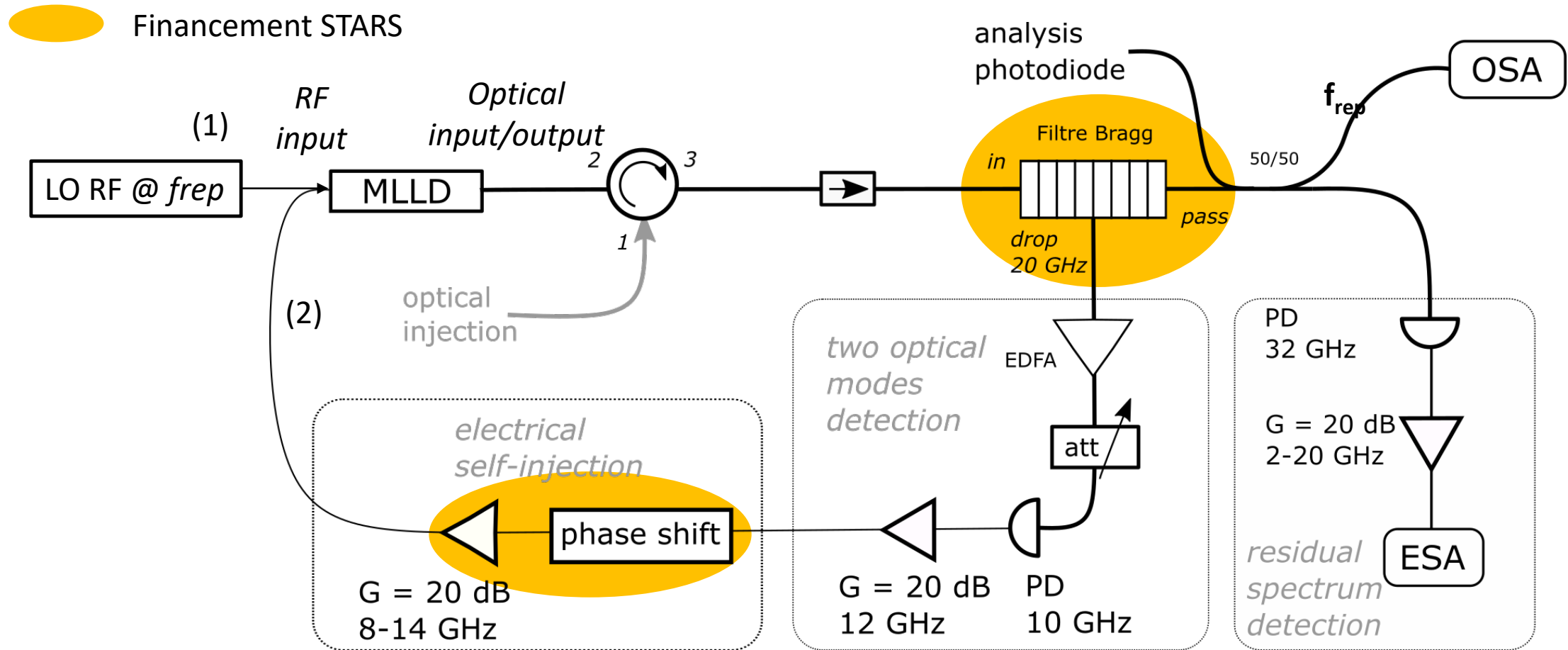
Injection optique stabilisée avec T_1 + caractérisation dans le peigne avec T_2



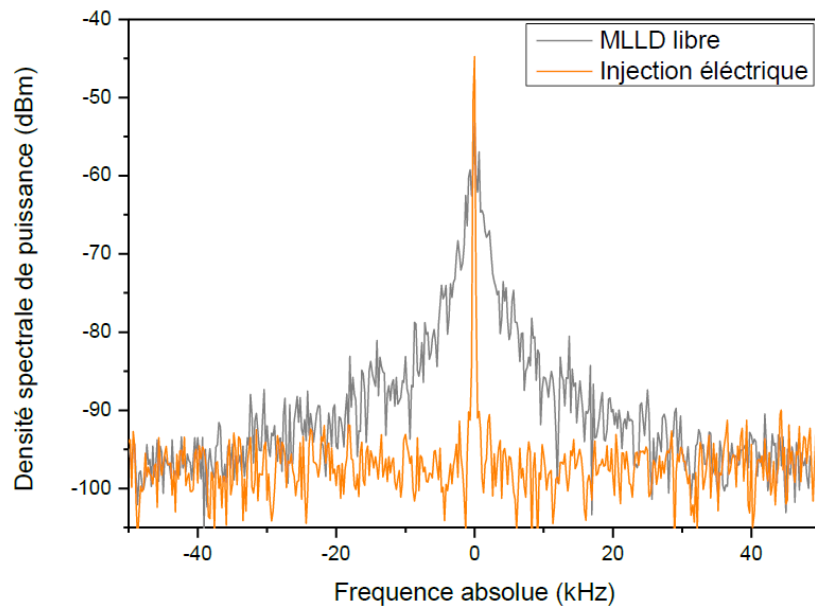
- Bruit en $1/f^2$ -> stabilité en $\tau^{1/2}$
- Aujourd'hui, battement T_1/T_2 dans la gamme des 10^{-15}

3. Etude de l'injection électrique : Injection électrique externe

Montage expérimental

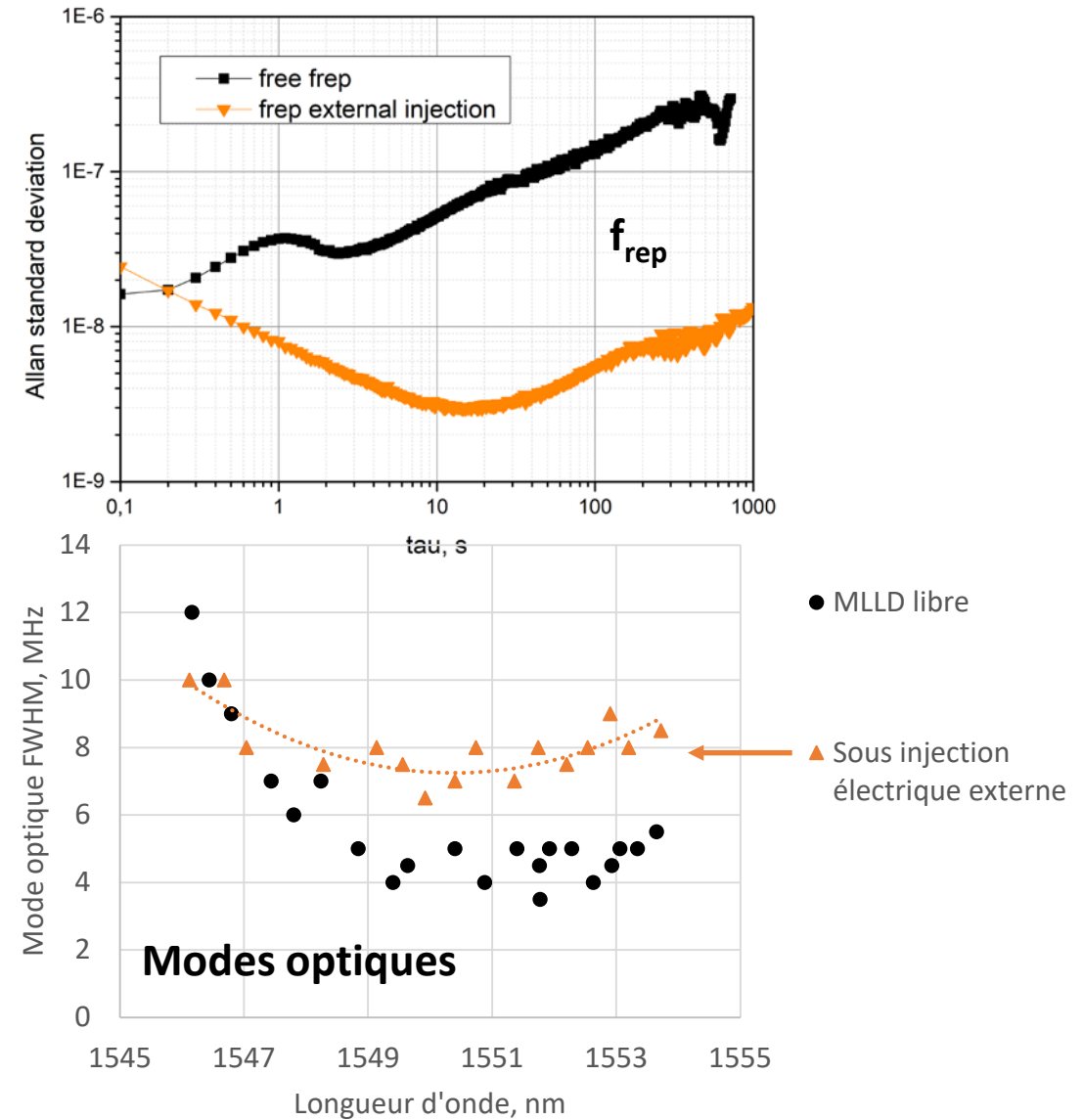


3. Etude de l'injection électrique (1) : Injection électrique externe asynchrone

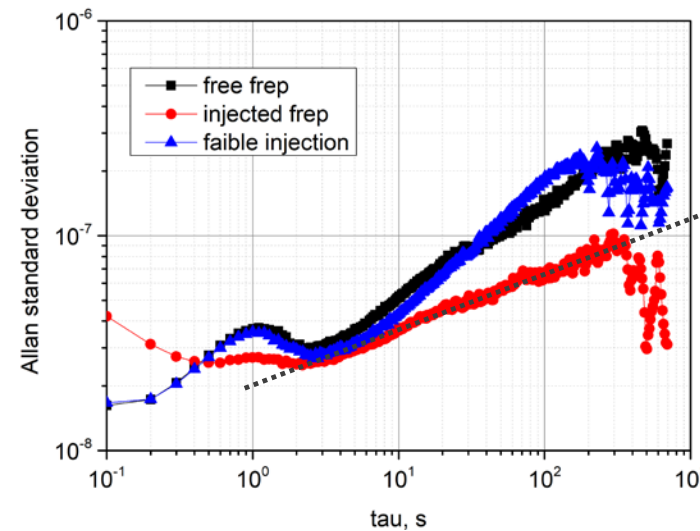
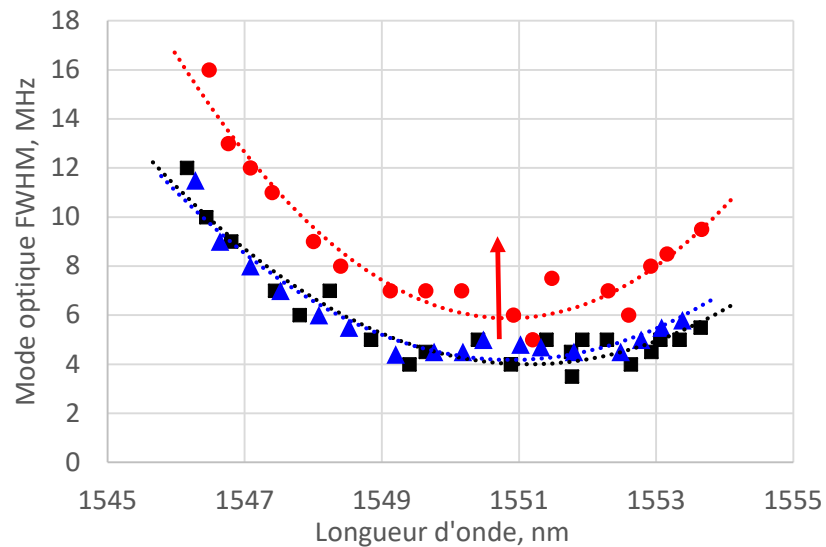
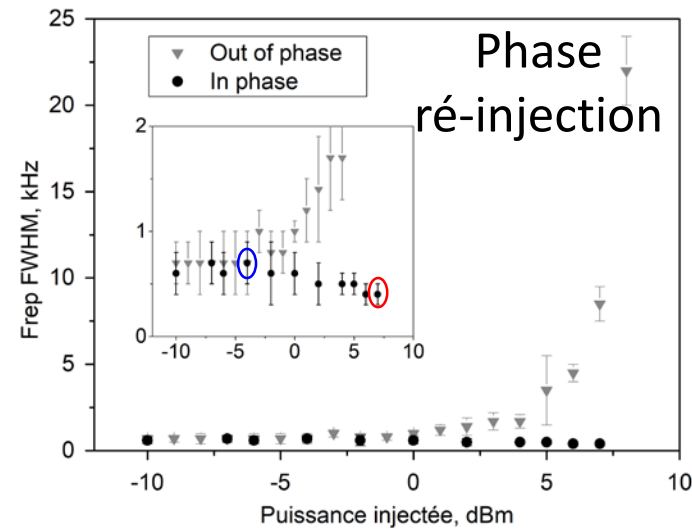
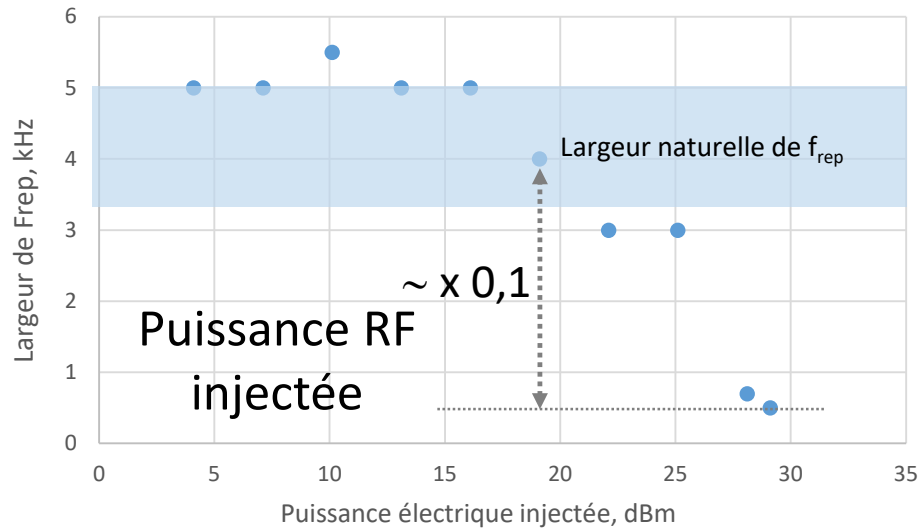


Réduction de largeur 1 kHz \rightarrow qq Hz

- Méthode robuste,
- Dégrade la largeur des modes optiques,
- Désynchronisation si couplé avec l'injection optique.



3. Etude de l'injection électrique (2) : Auto-injection électrique synchrone



- Faible impact sur la largeur des modes optiques (ne modifie pas le point fixe),
- Dégrade le rapport signal à bruit,
- Grande sensibilité à la phase de réinjection,
- Modification du bruit basse fréquence ,
- La phase réinjectée « pilote » la fréquence *f_{rep}*

4. Perspectives

- Utiliser l'instrumentation développée pour l'étude systématique des bruits dans le MLLD et l'impact de la stabilisation
- Tester la réinjection électrique avec une PLL à f_{rep} (volet 2)
- Corriger le bruit de fréquence « commun » avec l'OFD de SILENTSYS (volet 3)
- Stabiliser simultanément des deux paramètres du peigne par injection électrique (f_{rep}) et optique (ν_0)

- Le Labex First-TF, le soutien technique et administratif de Fatim et Marine
- Le soutien technique et administratif du LPL (Haniffe Mouhamad et Fabrice Wiotte; Carole Grangier et Maryse Médina)
- Les collègues et partenaires industriels qui soutiennent le projet depuis plusieurs années

Merci pour votre attention...