

# VECSEL bifréquence et bipolarisé pour horloge atomique à piégeage cohérent d'atomes de Cs

**Paul Dumont, Sylvie Janicot, Patrick Georges, Gaëlle Lucas-Leclin**

Laboratoire Charles Fabry, Institut d'Optique Graduate School, CNRS, Université Paris-Saclay, 91127 Palaiseau cedex, France

**François Tricot, David Holleville, Stéphane Guérandel**

LNE-SYRTE, Systèmes de Référence Temps-Espace, Observatoire de Paris, CNRS, UPMC, 75014 Paris, France

**Grégoire Pillet, Ghaya Baili, Loïc Morvan, Daniel Dolfi**

Thales Research & Technology - France, Palaiseau, 91767 Palaiseau, France

**Grégoire Beaudoin, Isabelle Sagnes**

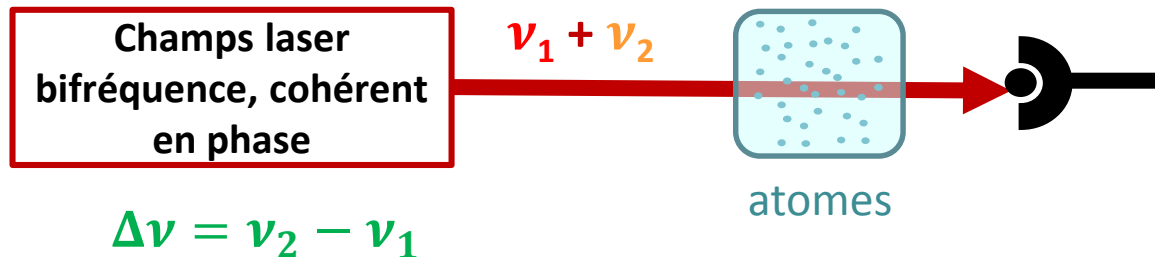
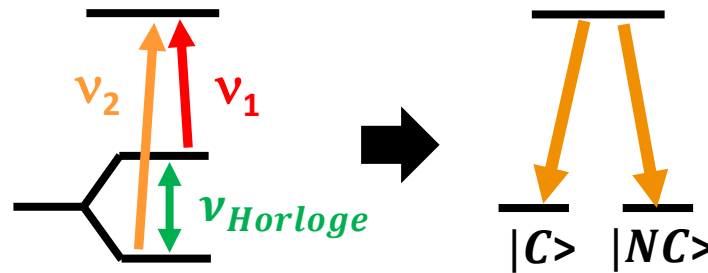
Laboratoire de Photonique et de Nanostructures, CNRS UPR20, 91440 Marcoussis, France

Thèse financée par



# Piégeage cohérent d'atomes (CPT)

Interrogation optique de la transition micro-onde du niveau fondamental d'un atome par deux faisceaux laser cohérents  $\nu_1$  et  $\nu_2$

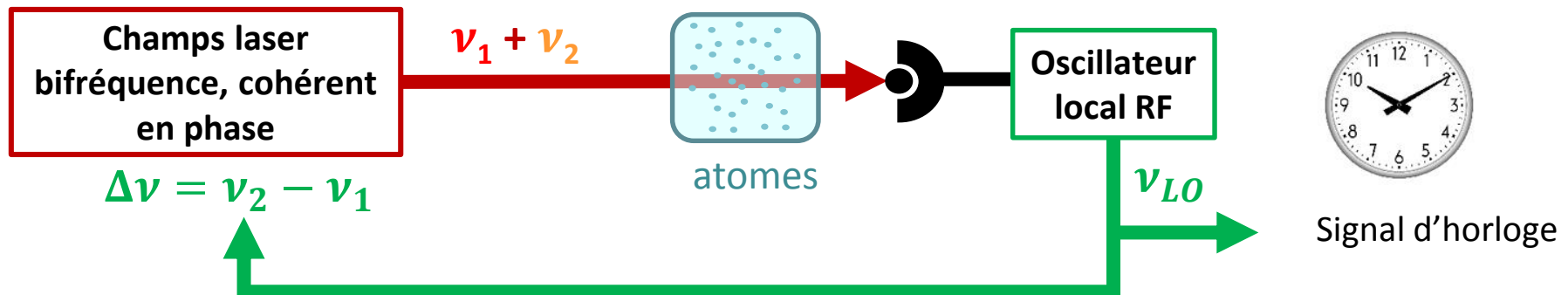
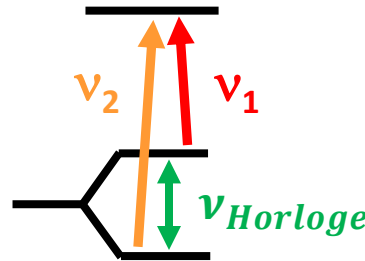


# Horloge atomique utilisant le piégeage cohérent d'atomes (CPT)

Interrogation optique de la transition micro-onde du niveau fondamental d'un atome par deux faisceaux laser cohérents  $\nu_1$  et  $\nu_2$

Avantages:

- Simplicité
- Compacité
- Faible consommation



En fonctionnement :  $\nu_{LO} = \Delta\nu = \nu_{Horloge}$

# Quel système laser pour une horloge CPT à Cs ?

Longueur d'onde	Ecart hyperfin
894 nm (raie D1) 852 nm (raie D2)	9.2 GHz

## Sources laser à SCs :

Émission à 890 nm avec l'InGaAs

Émission à 850 nm avec le GaAs

→ Diodes & VCSELs

Avantages: Compacité, Durée de vie

Génération du signal RF sur porteuse optique :

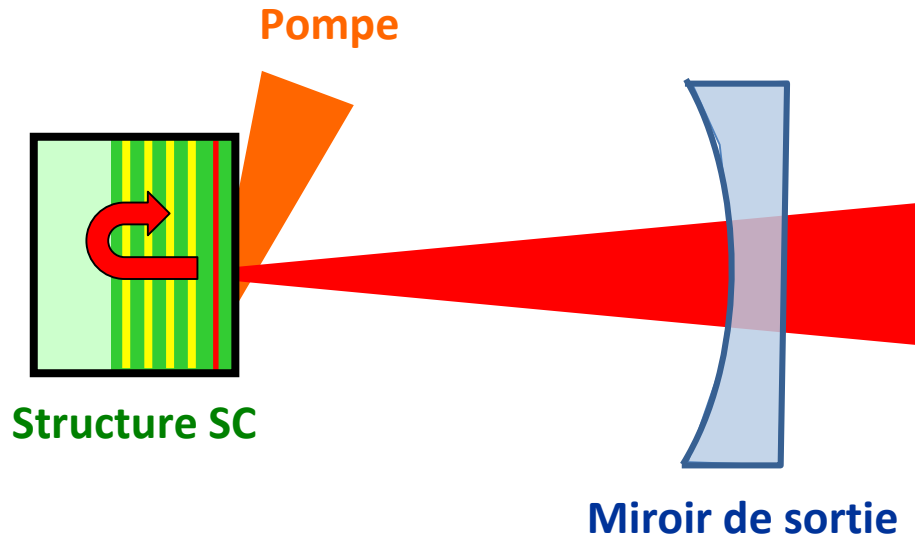
→ Génération de bandes latérales par modulation RF

→ Asservissement en phase d'un laser esclave sur un laser maître (OPLL)

**Solution non explorée : VECSEL bifréquence et bipolarisé**

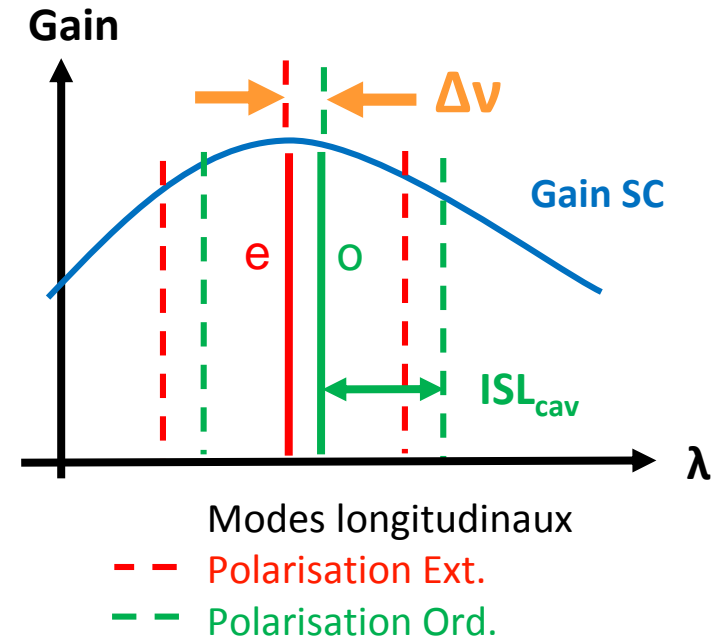
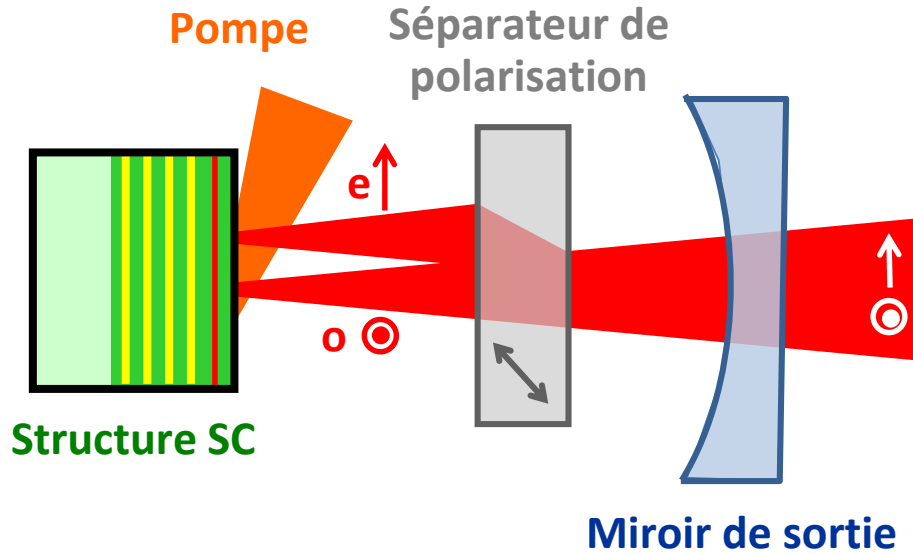
1. Description du VECSEL bifréquence
2. Caractérisation et performances du VECSEL bifréquence
3. Conclusion et perspectives

**VECSEL:** Vertical External Cavity Surface Emitting laser



## Avantages:

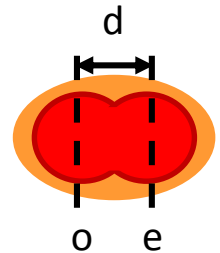
- Utilisation de structures SCs émettant à la longueur d'onde de design
- Ajout d'éléments intra-cavité pour contrôler les propriétés d'émission
- Absence d'oscillations de relaxations → Profil de bruit d'intensité plat

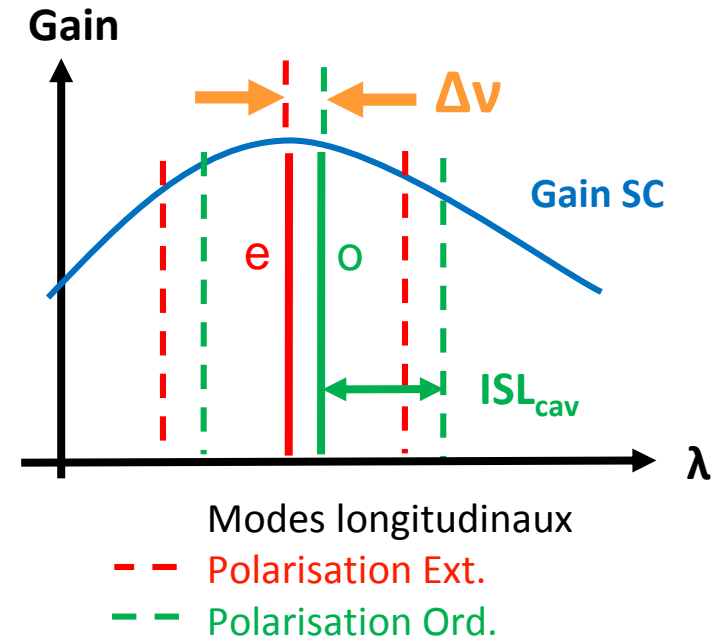
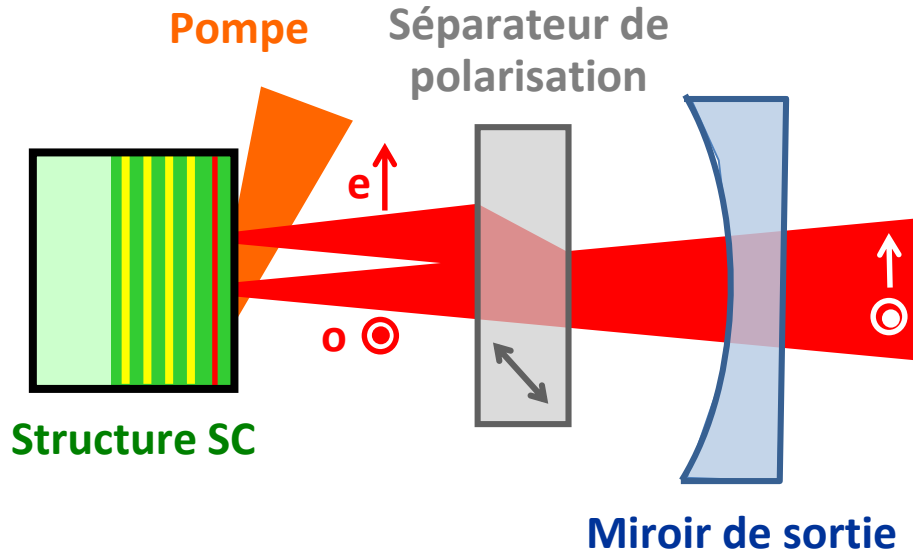


Brunel et al, *Opt. Lett.* 22, 384 (1997)  
Baili et al, *Opt. Lett.* 34, 3421 (2009)

Effet du séparateur de polarisation biréfringent :

- **Séparation spatiale des faisceaux** dans le milieu à gain : réduction du couplage entre les polarisations
- **2 cavité en 1** : 2 ISL différents  $\rightarrow \Delta\nu = 2 \times \frac{ISL}{\lambda} L_{cav} (n_e - n_o)$





Brunel et al, *Opt. Lett.* 22, 384 (1997)

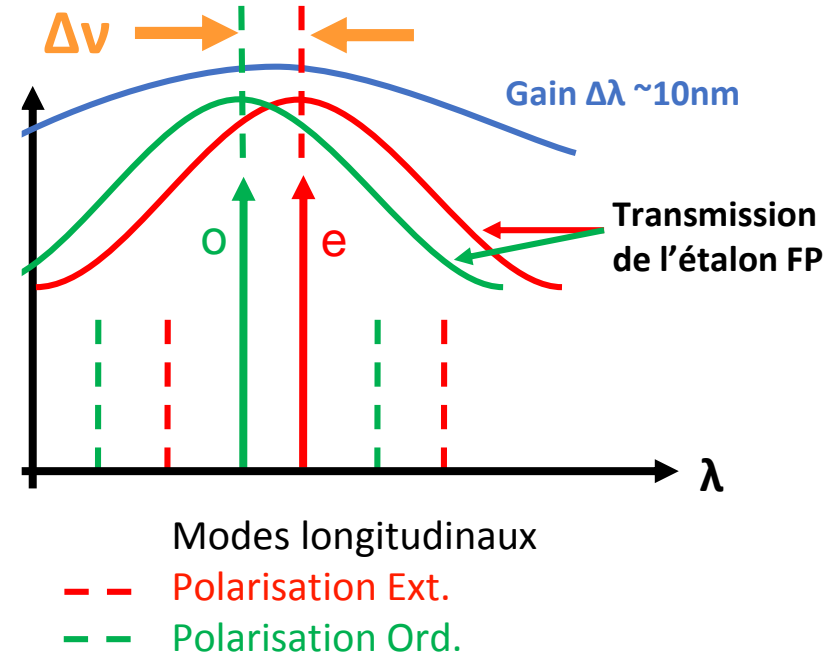
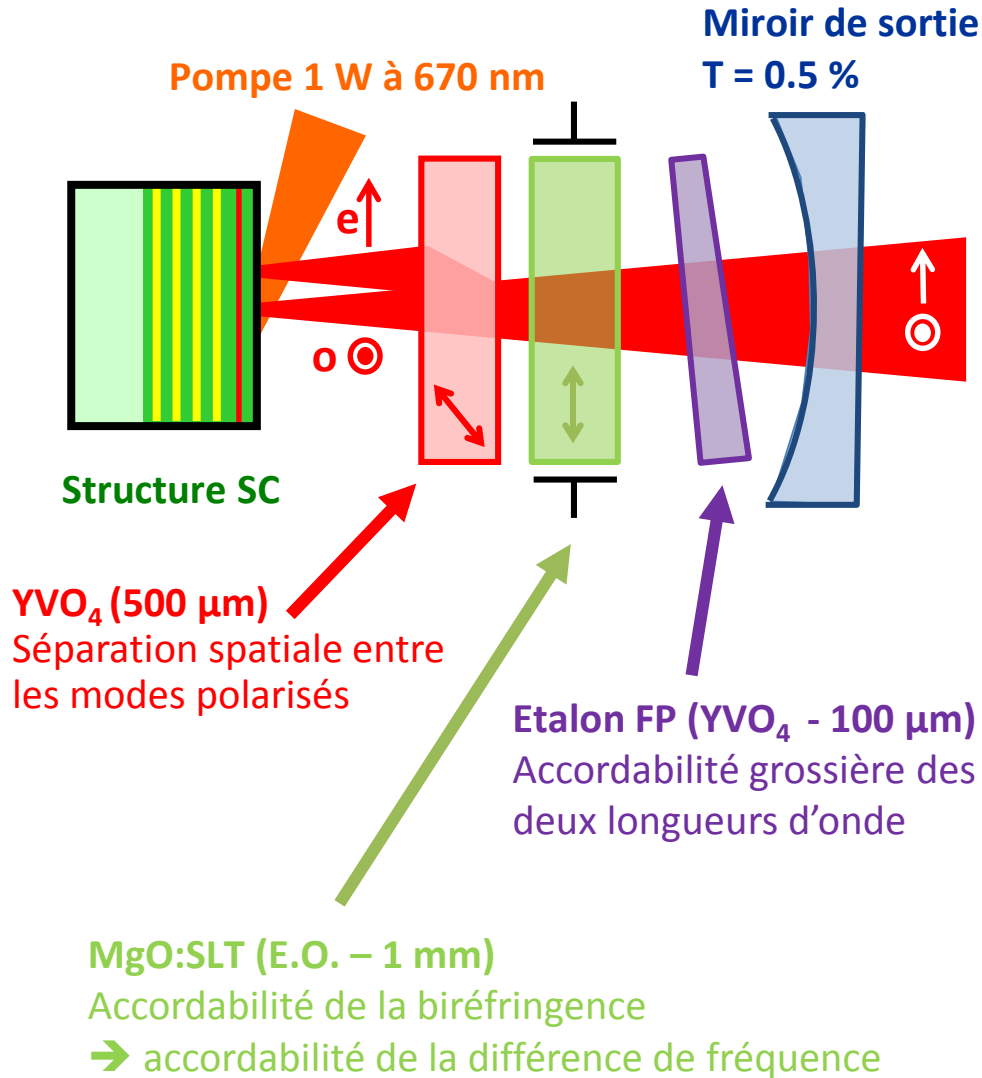
Baili et al, *Opt. Lett.* 34, 3421 (2009)

## Emission simultanée sur 2 modes longitudinaux à polarisations croisées dans la même cavité laser

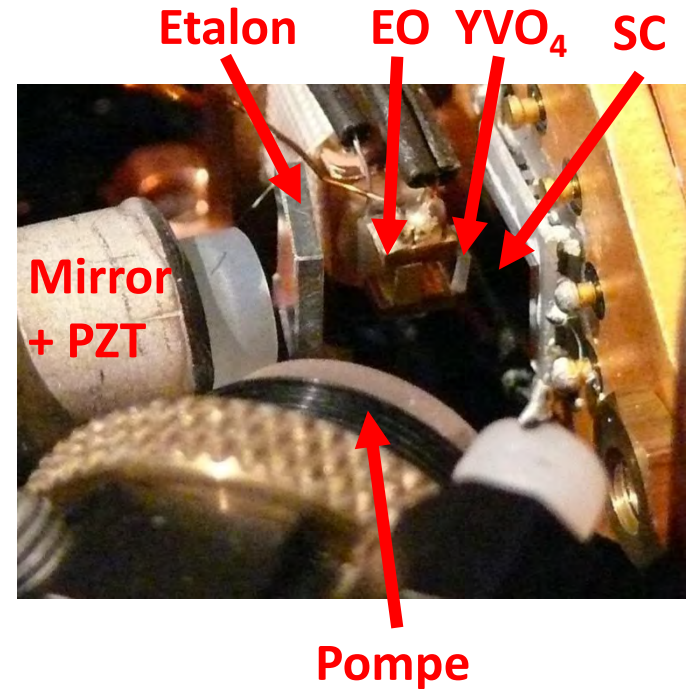
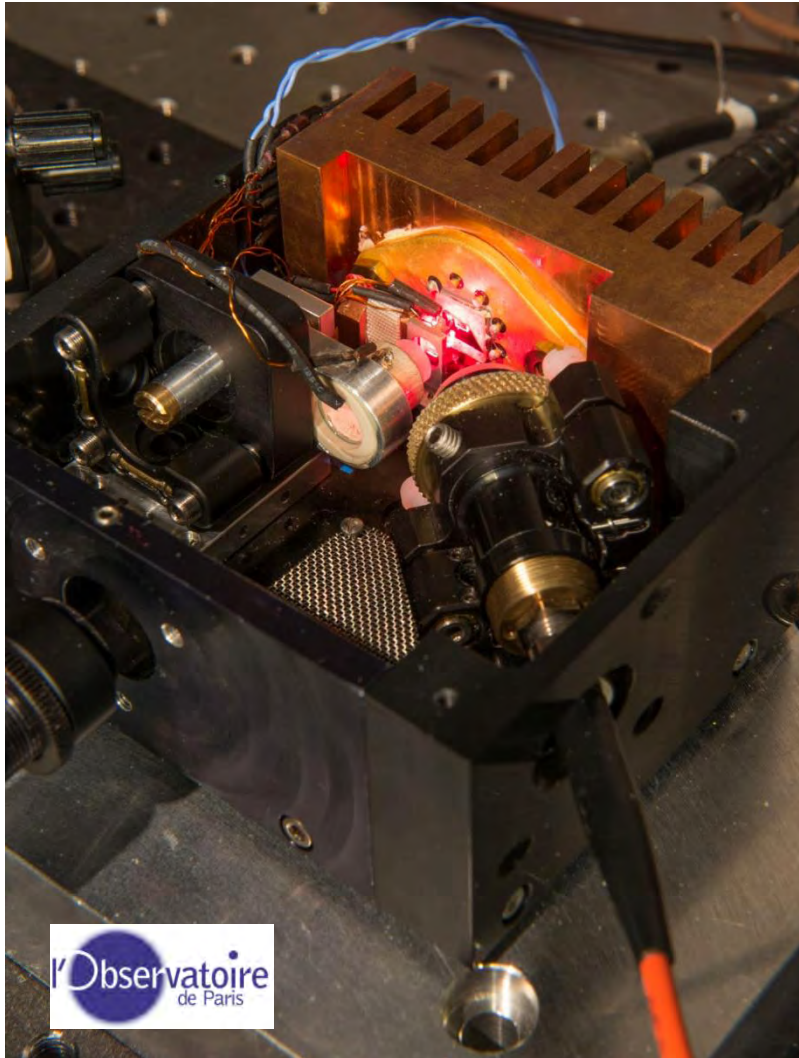
Les fluctuations de puissance et de fréquence entre les deux modes sont fortement corrélées



# Cavité laser du VECSEL bifréquence



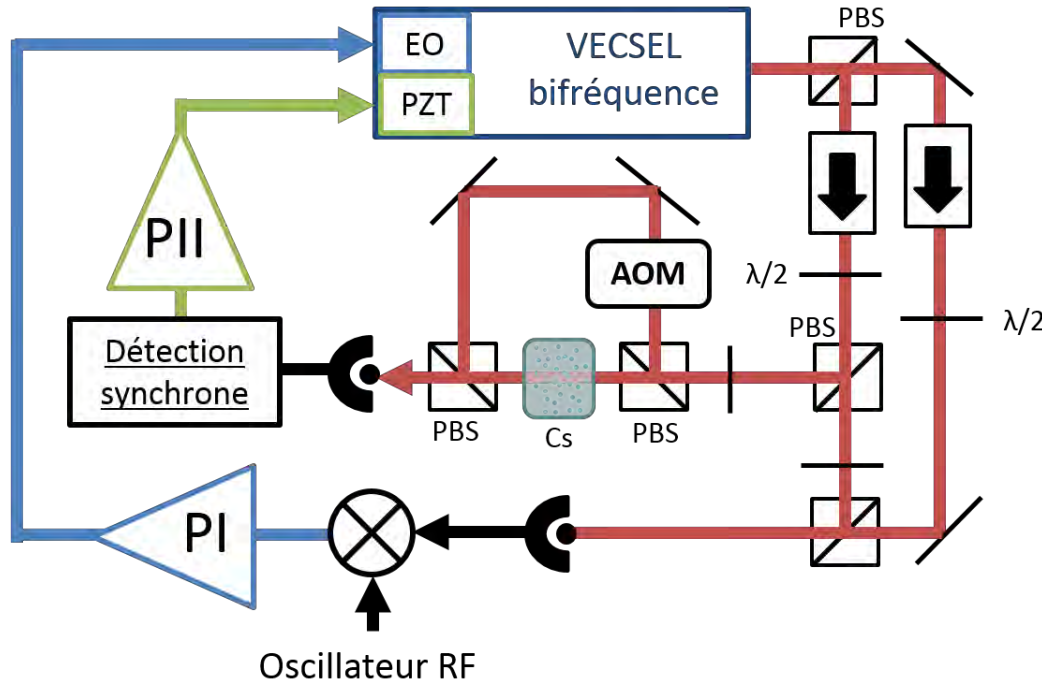
# Prototype du VECSEL bifréquence



Dimensions :  $90 \times 90 \times 50 \text{ mm}^3$

Longueur de cavité = 1 cm

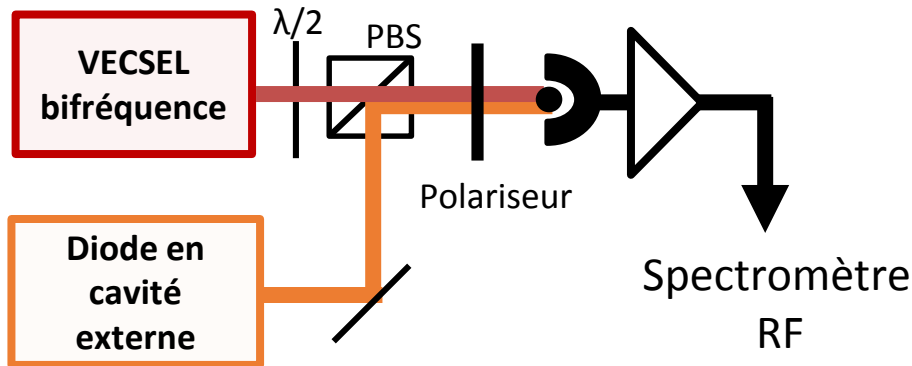
1. Description du VECSEL bifréquence
2. Caractérisation et performances du VECSEL bifréquence
3. Conclusion et perspectives



- Cavity vide et fonctionnement multimode : 140 mW max
- Cavity bifréquence : 8 mW par polarisation
- Accordabilité de l'émission autour de 852 nm
- Accordabilité de la différence de fréquence autour de quelques GHz

1. Asservissement de la fréquence ordinaire  $\nu_{ord}$  sur la raie D2 (F=3  $\rightarrow$  e) : Absorption saturée sur une cellule séparée, **rétro-action sur un piézo-électrique.**
2. Asservissement de la différence de fréquence  $\Delta\nu$  sur un OL 9,2 GHz : **rétro-action sur le cristal EO intra-cavité.**

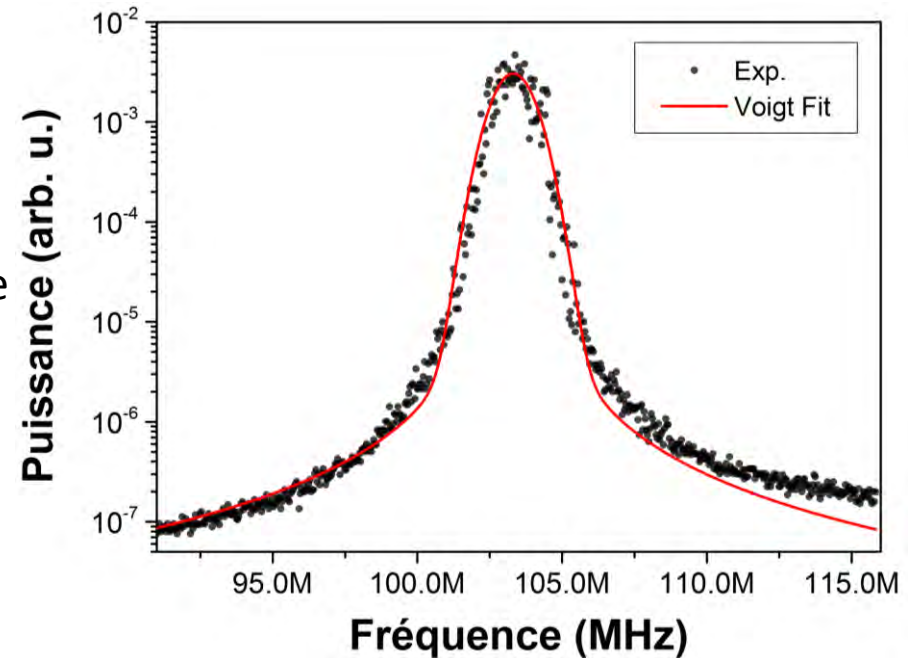
Mesure par battement hétérodyne :



Diode en cavité externe = laser de référence avec une largeur de raie max de 300 kHz at 1 s

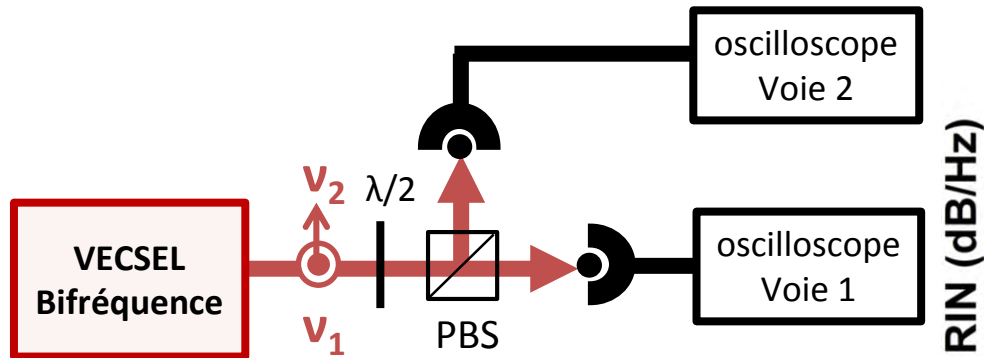
SPAN = 25 MHz

$T_{\text{int}} = 40$  ms

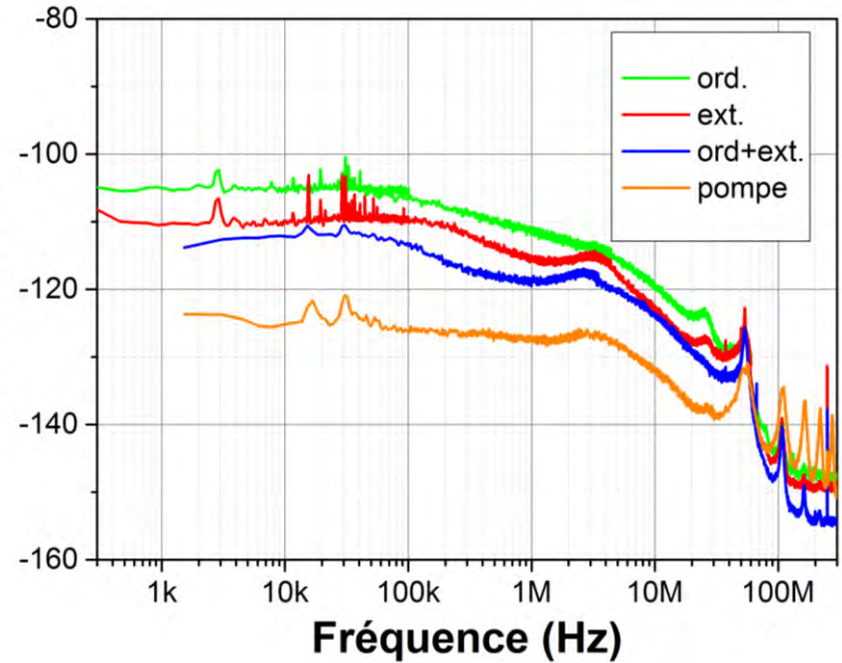


Largeur de raie du VECSEL bifréquence = 2 MHz à 1 ms  
Adaptée pour des expériences de CPT

# Bruit d'intensité laser (RIN)



Taux de pompage :  $r_o = 1,4$  /  $r_e = 1,6$

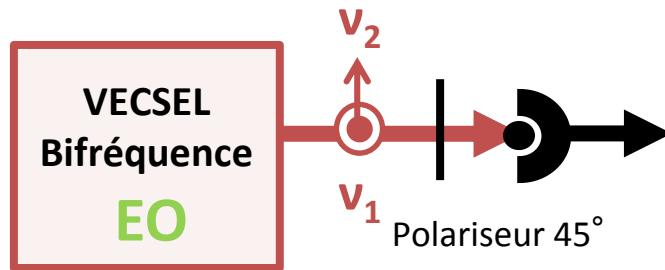


Pour  $f < 100$  kHz, le niveau de RIN est limité par le transfert du RIN de la pompe au laser avec une fonction de transfert  $H_0 = \frac{r^2}{(r-1)^2} = +11$  dB

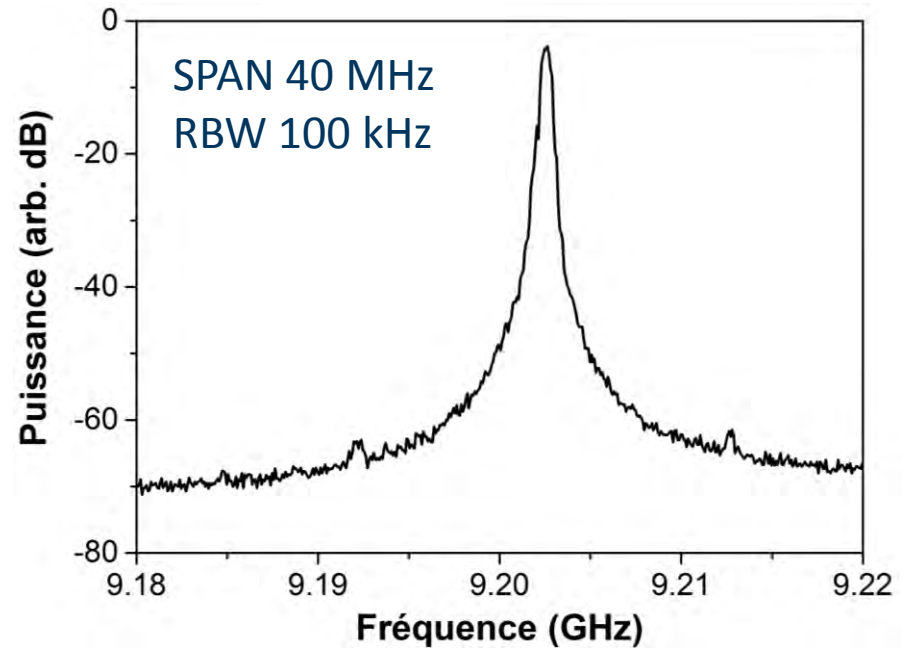
Niveaux typiques du RIN =  $-110$  dB/Hz pour  $f < 100$  kHz

Fréquence de coupure de la cavité :  $f_c = 2$  MHz

# Spectre du battement en fonctionnement libre



Spectre RF centré à 9,2 GHz

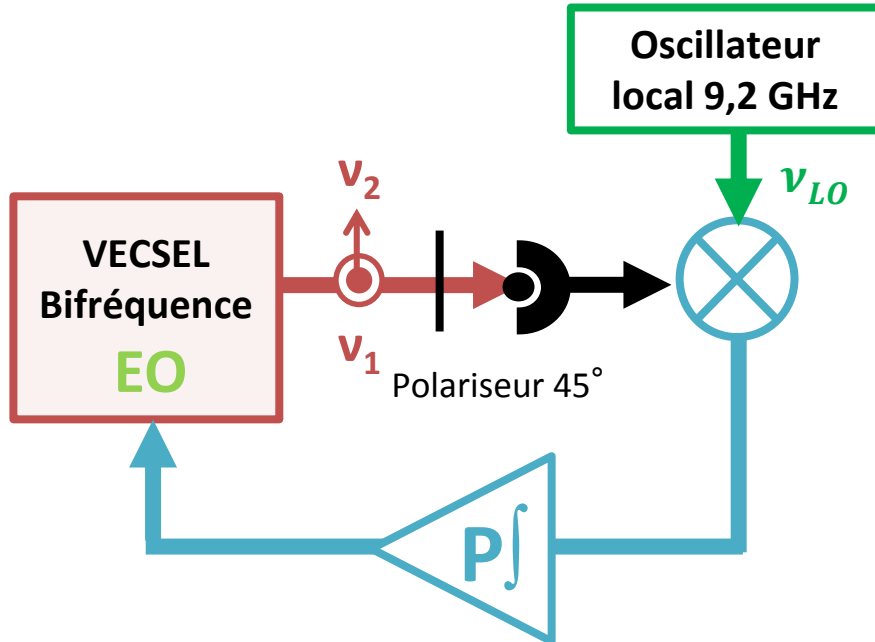


FWHM ~ 500 kHz  
durée de balayage 300 ms

→ Origine : toutes fluctuations non corrélées des fréquences des deux modes

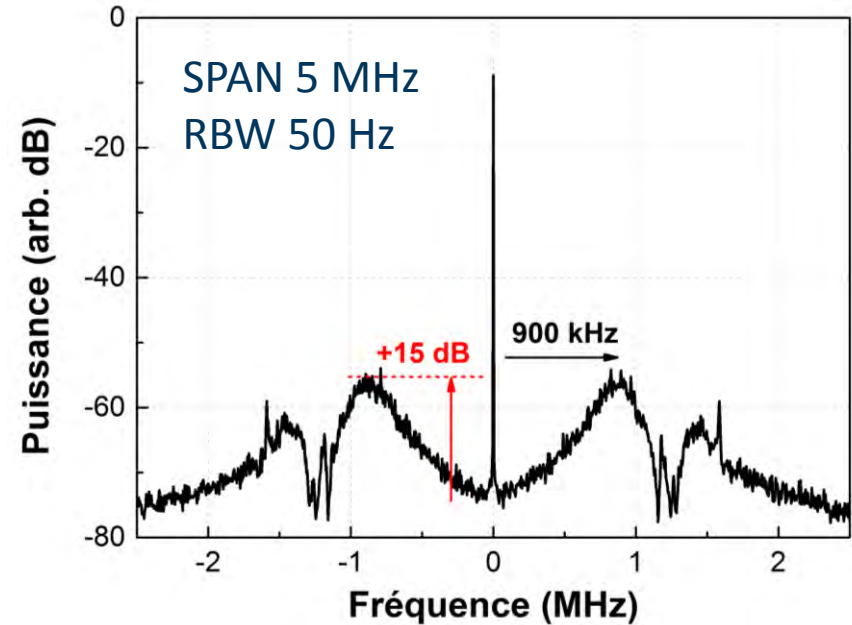


# Spectre du battement en fonctionnement asservi



Bande passante d'asservissement  $\sim 900$  kHz

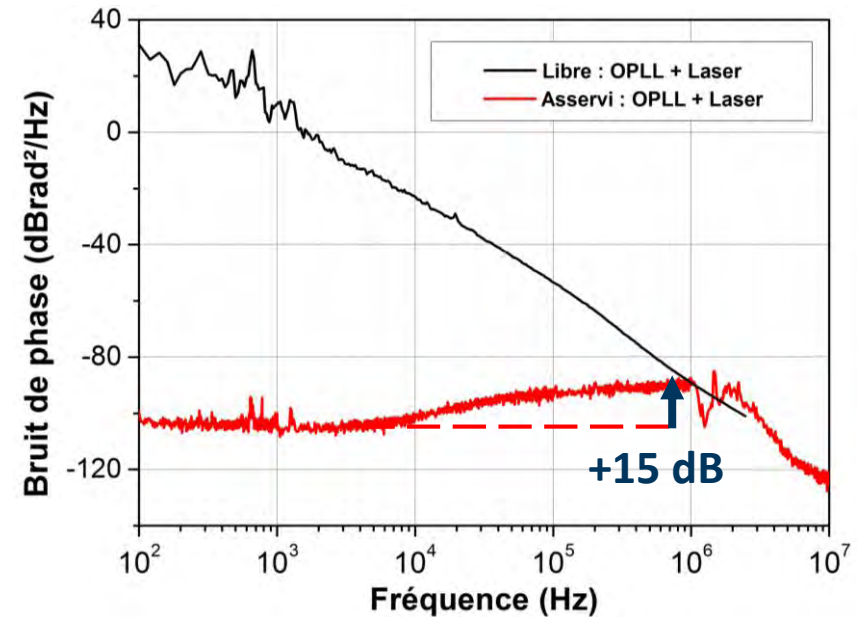
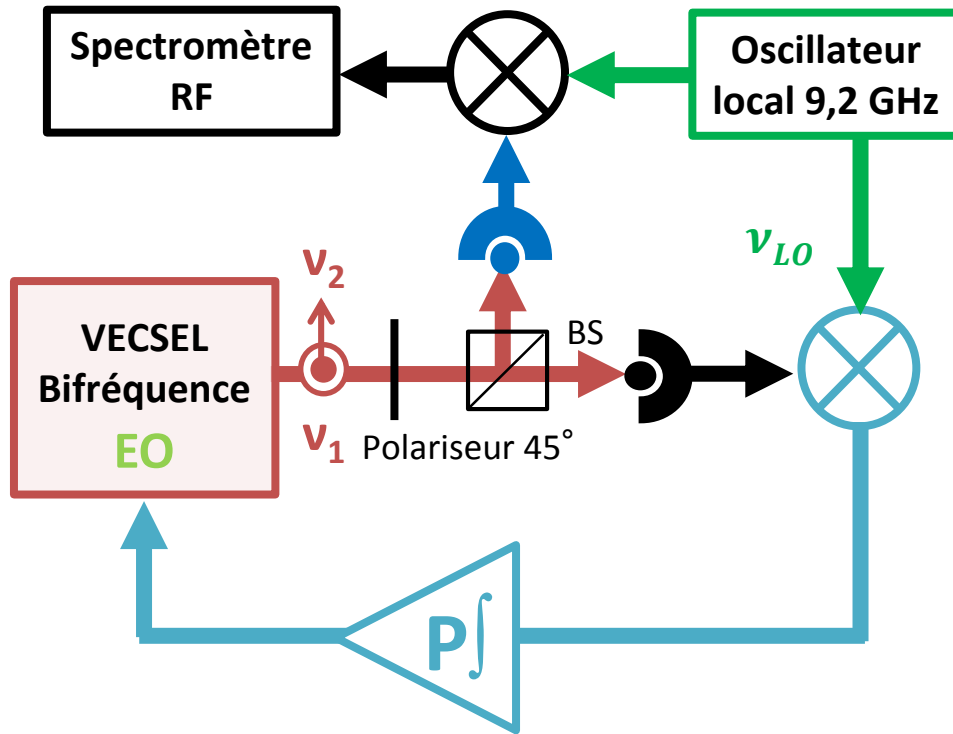
Spectre RF centré à 9,2 GHz



Largeur du pic limitée par la résolution du spectromètre



# Bruit de phase résiduel (Laser+OPLL) du battement



Plancher du bruit de phase résiduel :

**-105 dBrad<sup>2</sup>/Hz**

Augmentation à **-90 dBrad<sup>2</sup>/Hz** à haute fréquence

Le bruit de phase de l'oscillateur local est rejeté en tant que **source de bruit commune aux deux bras**

# Estimation théorique de la stabilité d'horloge

Impact des bruits du VECSEL Bifréquence sur l'horloge CPT-Ramsey du SYRTE\*

	Niveau de bruit	Ecart-type d'Allan à 1 seconde
<b>Bruit d'intensité laser</b>	<b>-110 dB/Hz</b>	<b><math>1,5 \times 10^{-12}</math></b>
<b>Bruit de phase du battement RF (contribution résiduelle Laser+OPLL)</b>	-90 dBrad <sup>2</sup> /Hz	$2,7 \times 10^{-13}$
<b>Bruit de fréquence laser</b>	$10^{10}$ Hz <sup>2</sup> /Hz	$7,7 \times 10^{-14}$

Ecart-type d'Allan total :  **$1,6 \times 10^{-12}$  à 1 seconde**

Enjeu : réduction de la **contribution du bruit d'intensité laser** par la réduction du RIN de la pompe

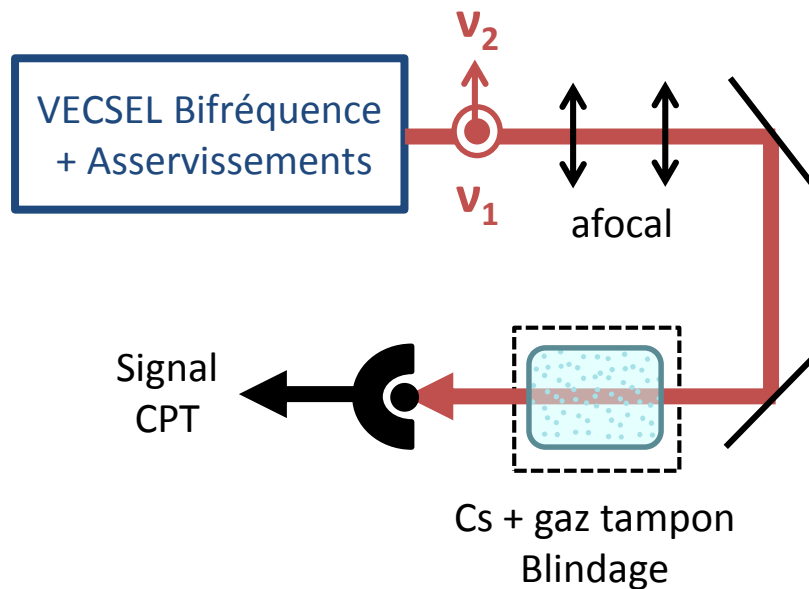
\*Danet et al, Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr., (2014)

# Premier signaux CPT en interrogation continue

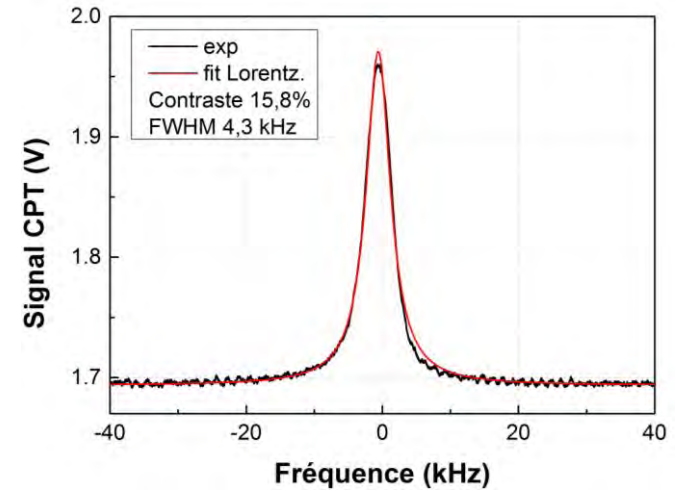
Asservissement en longueur d'onde : **OFF**

Asservissement de la différence de fréquence : **ON**

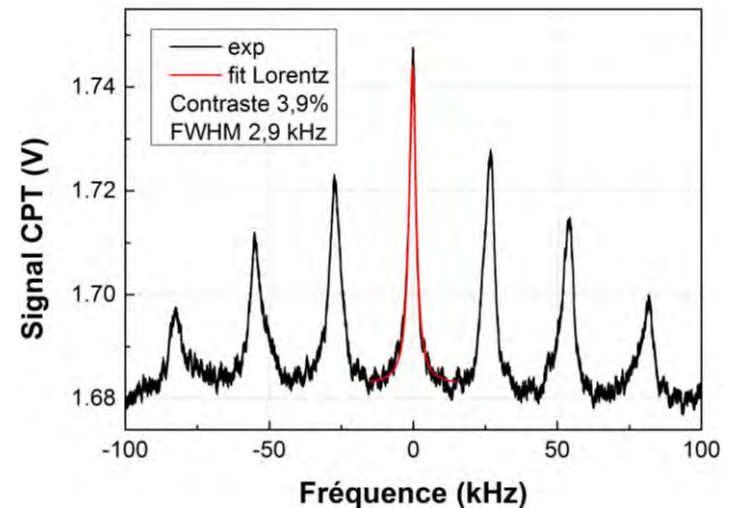
Balayage de la différence de fréquence sur 200 kHz à 2 Hz autour de 9,192 GHz



Sans champ magnétique :



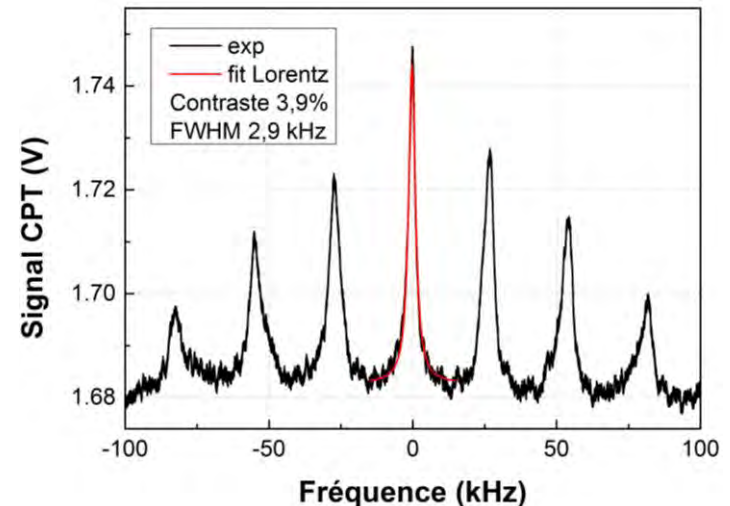
Avec champ magnétique :



1. Description du VECSEL bifréquence
2. Caractérisation et performances du VECSEL bifréquence
3. Conclusion et perspectives

### Validation du VECSEL bifréquence sur une expérience de piégeage cohérent d'atomes de Cs

- ➔ Amélioration du signal CPT et estimation d'une stabilité expérimentale
- ➔ Comparaison avec l'estimation théorique à  $1,6 \times 10^{-12}$  à 1 seconde
- ➔ Etude de la corrélation des bruits d'intensité et de son impact sur la stabilité d'horloge



Travaux dans le cadre du projet ANR ChoCoLa (Concepts innovants pour une Horloge Compacte à Laser bifréquence métrologique)

Axes d'améliorations du VECSEL bifréquence :

- Réduction du RIN du laser de pompe :  
Emetteur non-fibré  
Asservissement de la puissance  
→ Réduction de 10 dB min attendue
- Emission sur la raie D1 (894 nm) :  
1<sup>er</sup> VECSEL à 894 nm : 100 mW en fonctionnement multimode (cavité vide)

