

Exploitation Optimale du Signal REFIMEVE+ pour la Spectroscopie de très haute résolution en fréquence

Mathieu Collombon, Gaëtan Hagel, Marie Houssin,
Caroline Champenois

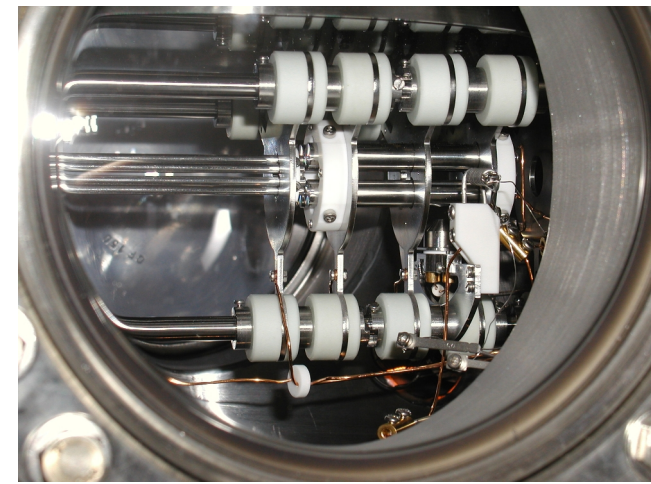
Confinement d'**I**ons et **M**anipulation **L**aser (CIML)

PIIM - AMU - CNRS

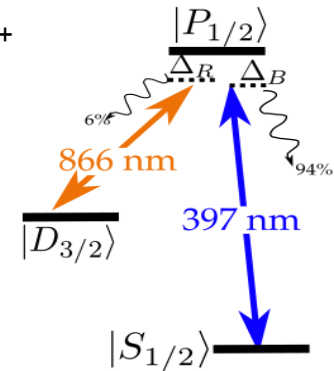
-
- Spectroscopie très haute résolution à CIML
 - Etat actuel et enjeux expérimentaux
 - REFIMEVE+ → CIML
 - CIML → REFIMEVE+

Spectro très haute résolution @ CIML

- Nuage de Ca^+ en piège quadrupolaire

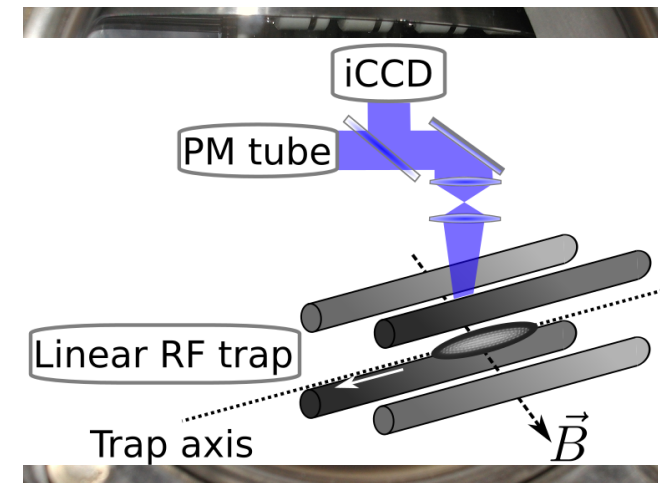
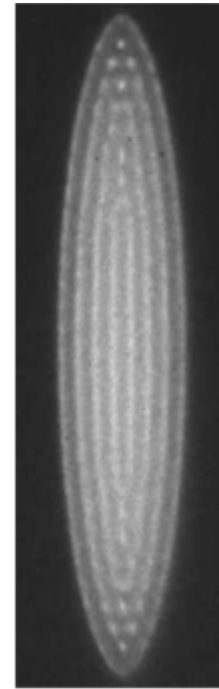
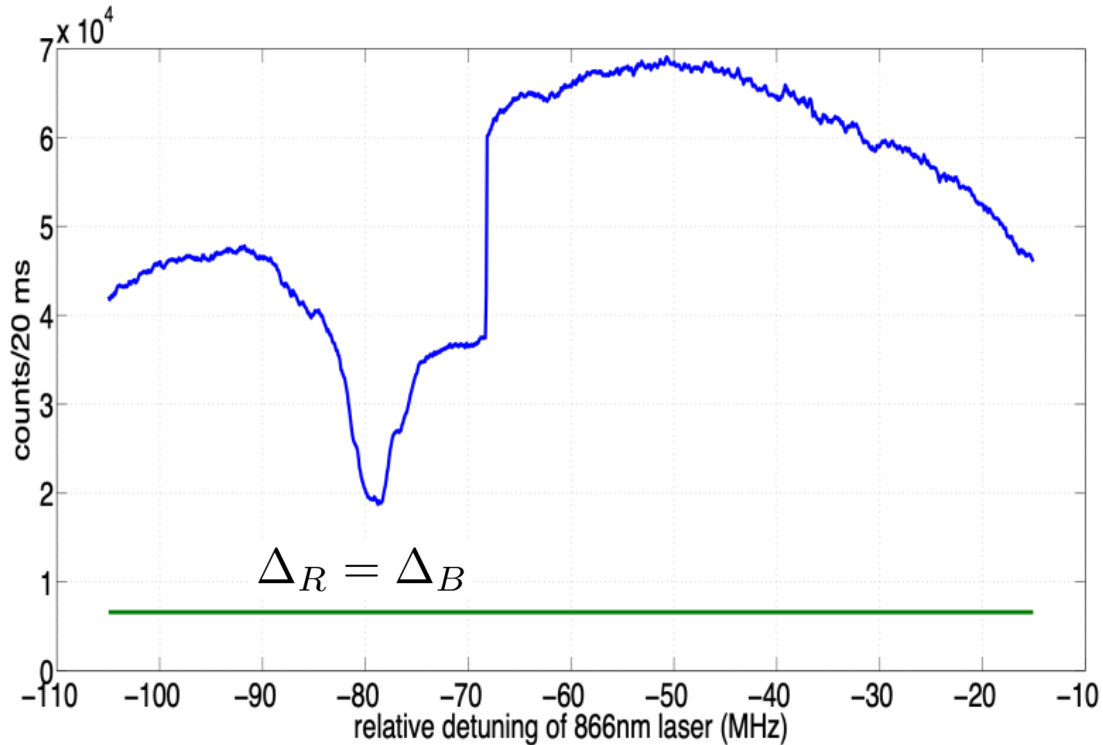


- * Piège RF macroscopique
- * 21 mm x 4 mm
- * 60 à 3000 Ca^+

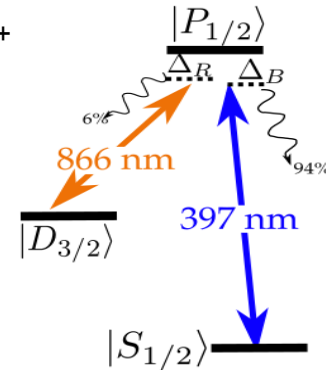


Spectro très haute résolution @ CIML

- Nuage de Ca⁺ en piège quadrupolaire

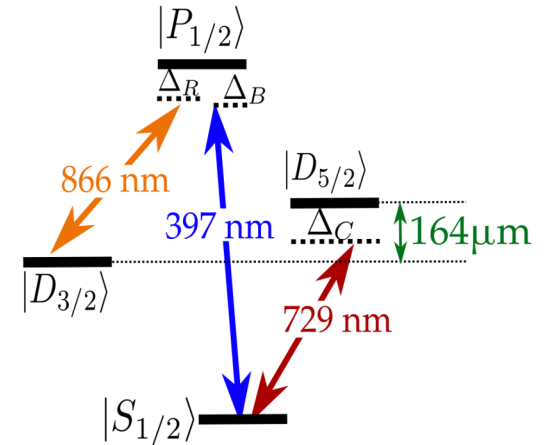
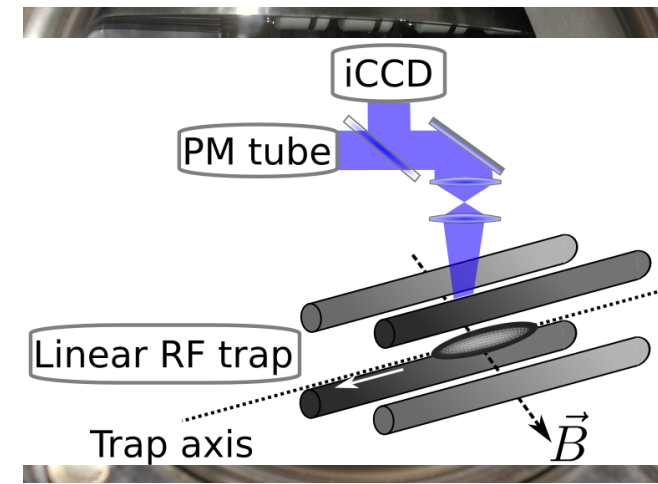
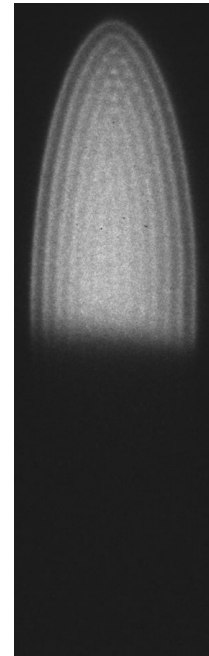
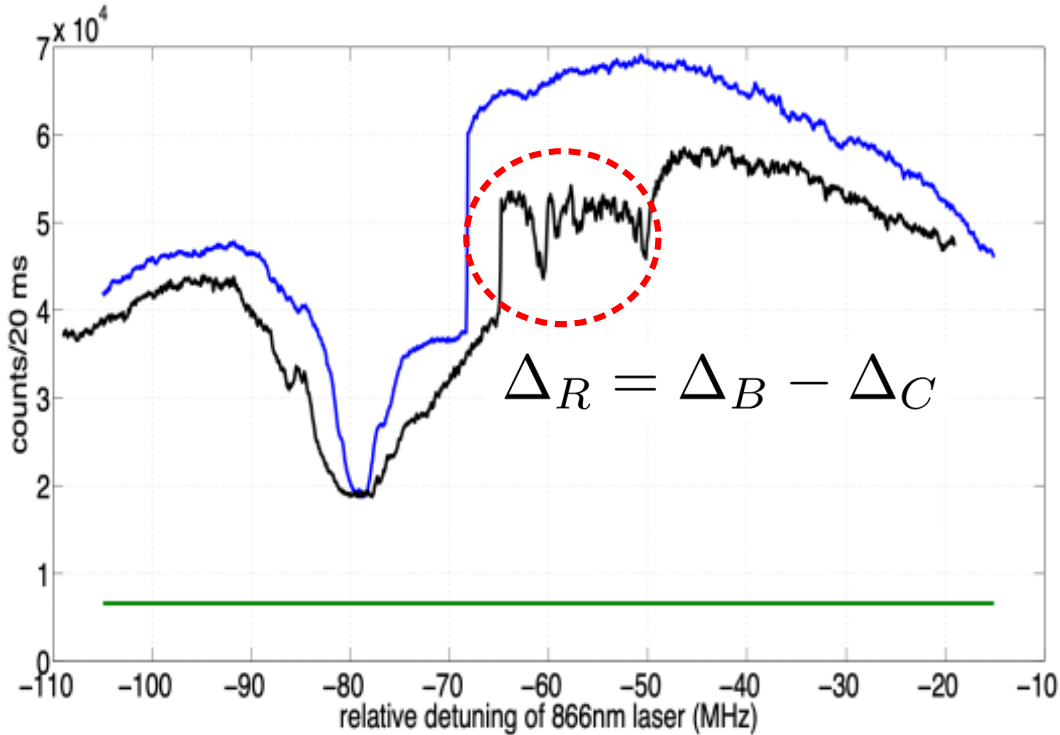


- * Piège RF macroscopique
- * 21 mm x 4 mm
- * 60 à 3000 Ca⁺



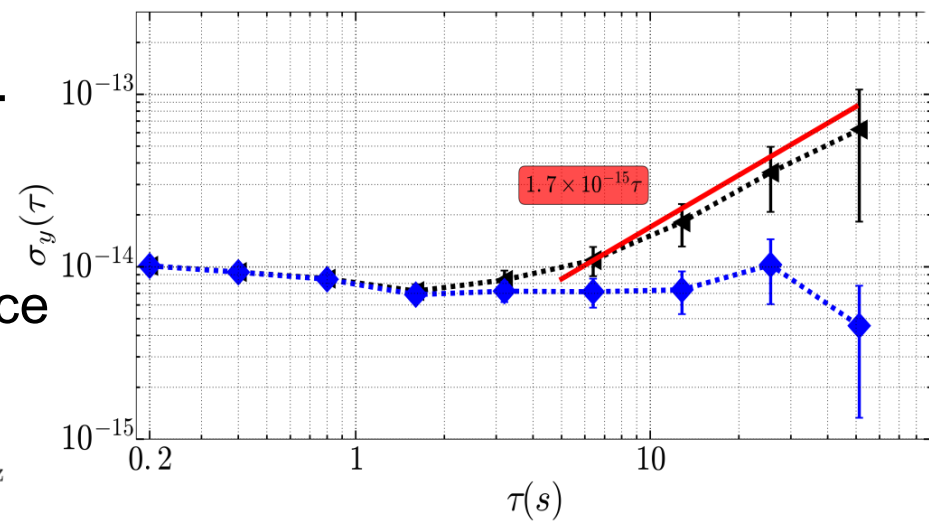
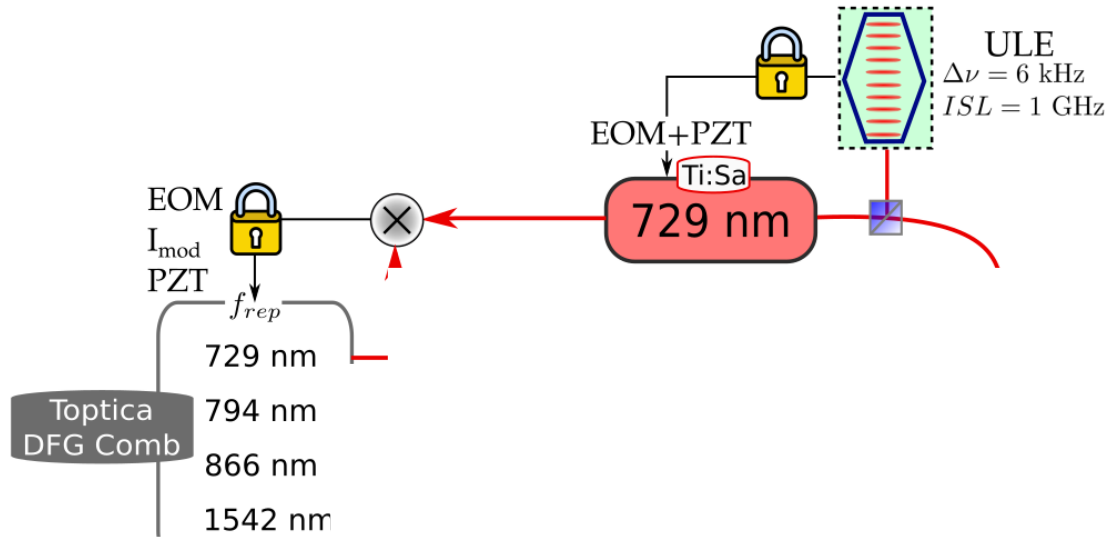
Spectro très haute résolution @ CIML

- Nuage de Ca⁺ en piège quadrupolaire
- Piégeage cohérent de population à 3 photons (CPT)



Spectro très haute résolution @ CIML

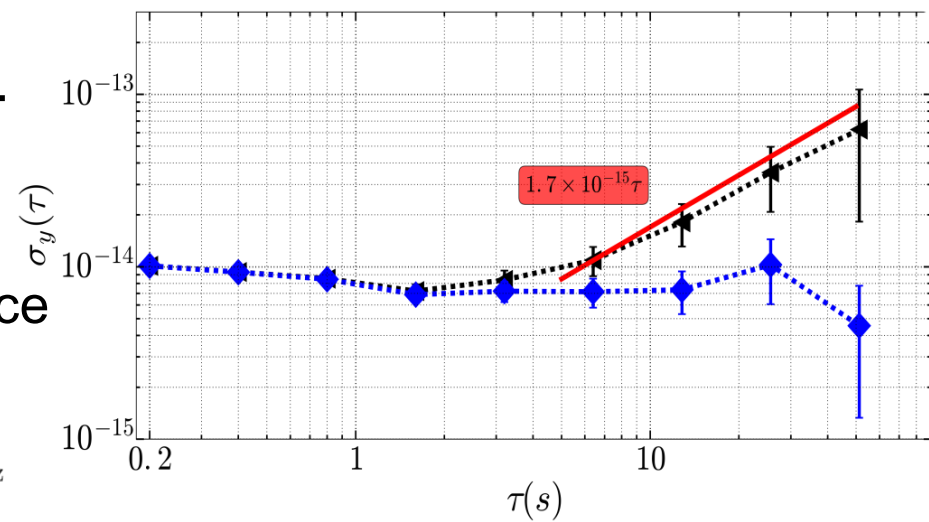
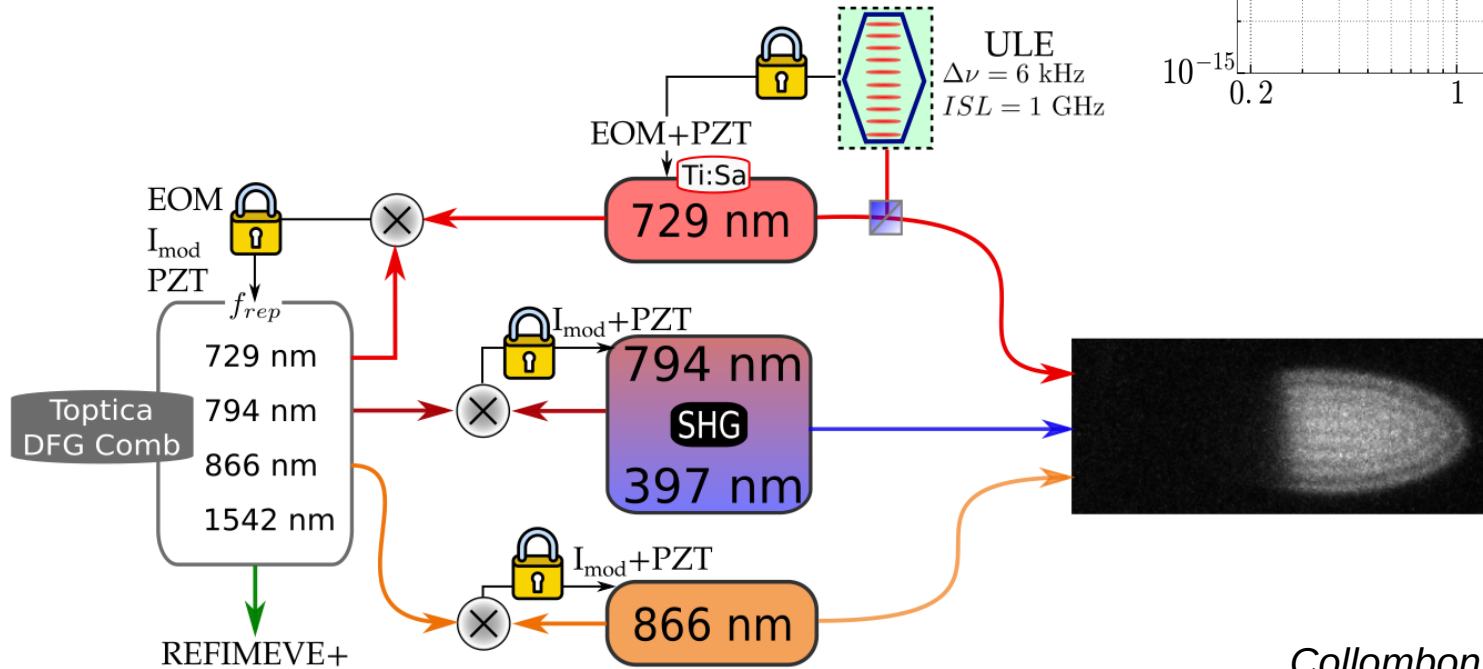
- Asservissement en phase des trois lasers
- Laser 729nm ultrastable + Peigne de fréquence



Collombon et. al *Optics Letters* 44 (2019)

Spectro très haute résolution @ CIML

- Asservissement en phase des trois lasers
- Laser 729nm ultrastable + Peigne de fréquence



Collombon et. al *Optics Letters* 44 (2019)

Etat actuel et enjeux expérimentaux

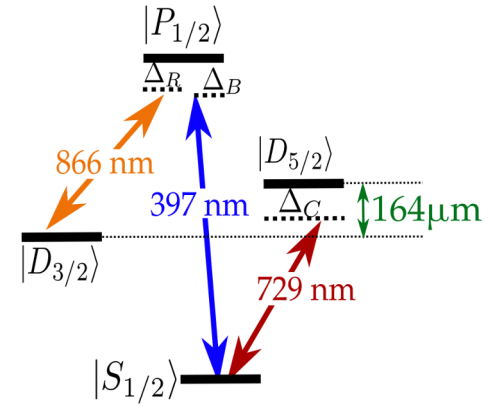
- Mesure de la transition $D_{3/2} \rightarrow D_{5/2}$ à 1.819 THz
- $\nu_{THz} = \nu_R - \nu_B + \nu_C + syst.$
- Etude des effets systématiques
- Incertitude actuelle +/- 80 Hz sur ν_{THz}

Enjeux :

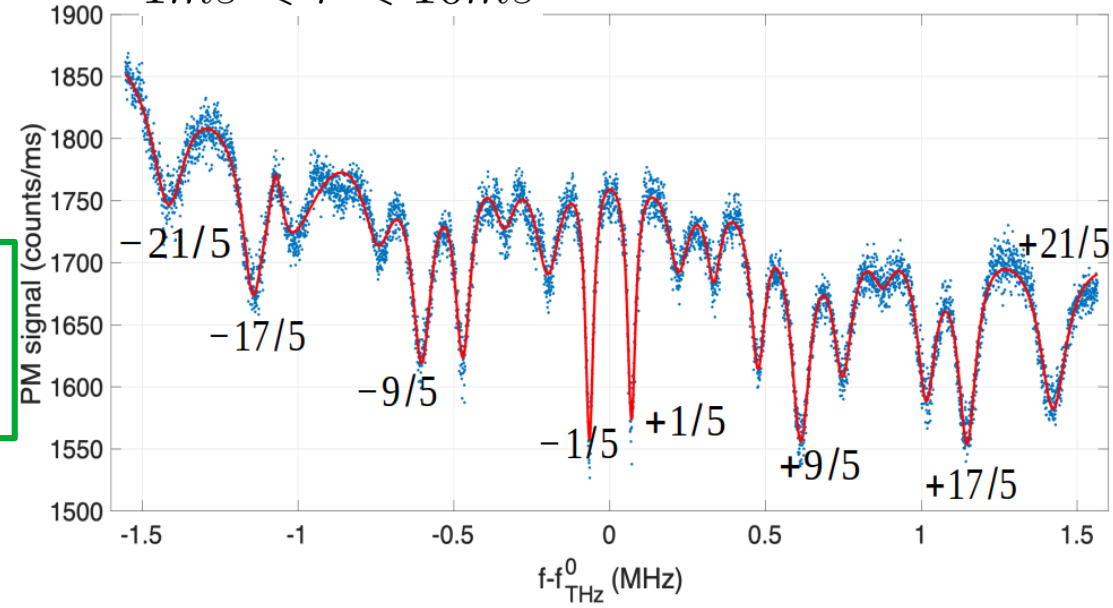
- Mesure absolue de la fréquence des lasers
- Contrôle dérive ULE

- Contrôle champs magnétique
- Réduction effet Doppler

Collombon et. al PRApplied 12 (2019) 034035



Temps d'interrogation :
 $1\text{ms} < \tau < 10\text{ms}$



Apport de REFIMEVE+

1) Sur la mesure absolue de fréquence via le peigne :

- Comptage de f_{rep} : $\sigma_{frep} \approx 1$ mHz

Typ. selon laser : $\nu_i = N_i \times f_{rep} \pm f_b^i \rightarrow 4 \text{ kHz} < \sigma_i < 9 \text{ kHz}$

Sur transition THz :

$$\begin{aligned}\sigma_{\nu_{THz}} &= (N_{866} + N_{729} - 2 \times N_{794}) \times \sigma_{frep} \\ &= 22744 \times \sigma_{frep} \\ &= 23 \text{ Hz}\end{aligned}$$

NB : 8 Hz d'incertitude dans la littérature !!
[Solaro et al. PRL 120 25, 2018]

- Comptage du battement REFIMEVE/Peigne : $\nu_{refi} = 194400008500000$ Hz

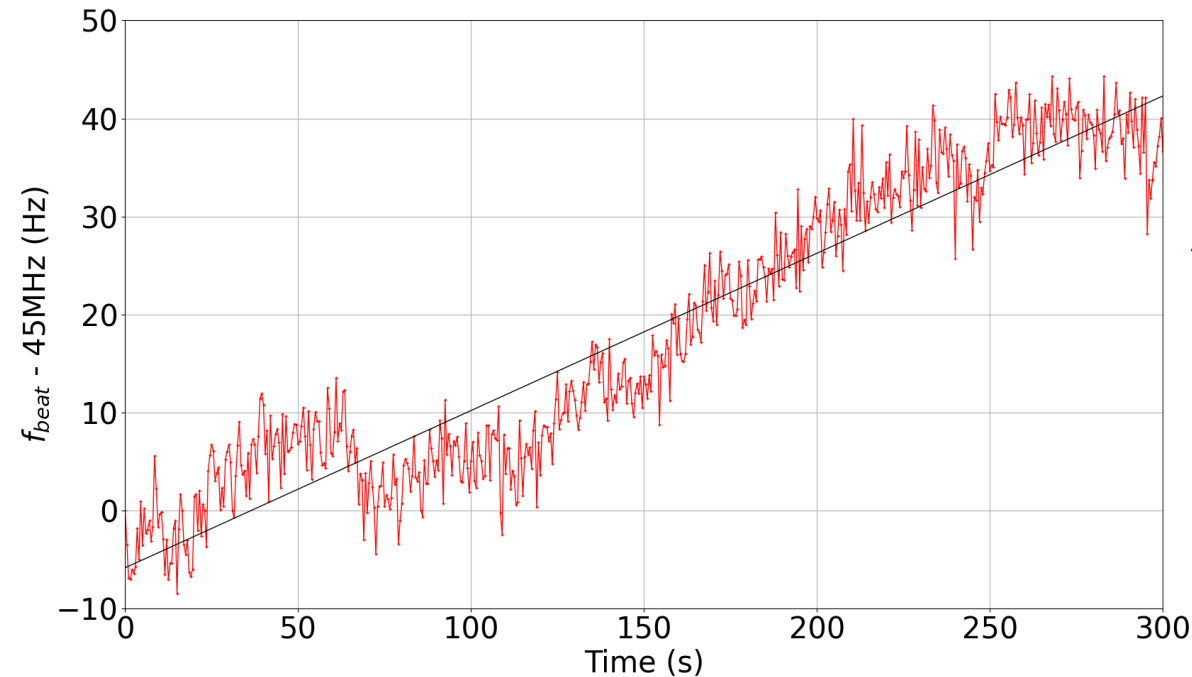
$$f_{rep} = (\underbrace{\nu_{refi}}_{\pm 5 \text{ Hz}} \pm \underbrace{f_b}_{\pm 1 \text{ mHz}}) \times \frac{1}{\underbrace{N_{1542}}_{2.4 \times 10^6}}$$

$$\sigma_{frep} \approx 2 \mu\text{Hz} \rightarrow \sigma_{\nu_{THz}} < 50 \text{ mHz} \quad !!$$

Apport de REFIMEVE+

2) Sur la mesure et la correction de dérive ULE (729nm) :

- Dérive typique cavité ULE : $< 1 \text{ Hz/s}$



Si comptage freq, $\sim 1\text{h}$ pour sortir du bruit de mesure !

Comptage du battement
REFIMEVE : $0.47 \times$ dérive

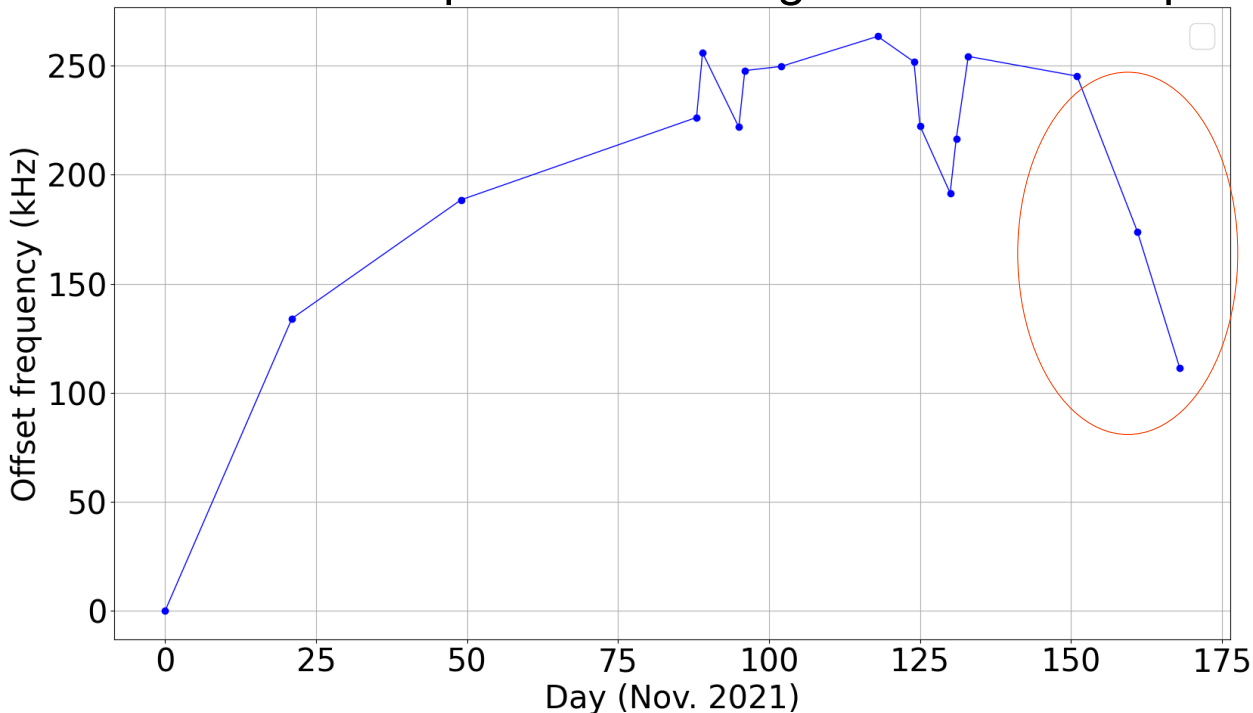
→ Ici 5 min suffisent pour extraire une dérive de 320 mHz/s sur le laser d'horloge.

Jusqu'à présent :
correction «à posteriori »

Apport de REFIMEVE+

2) Sur la mesure et la correction de dérive ULE (729nm) :

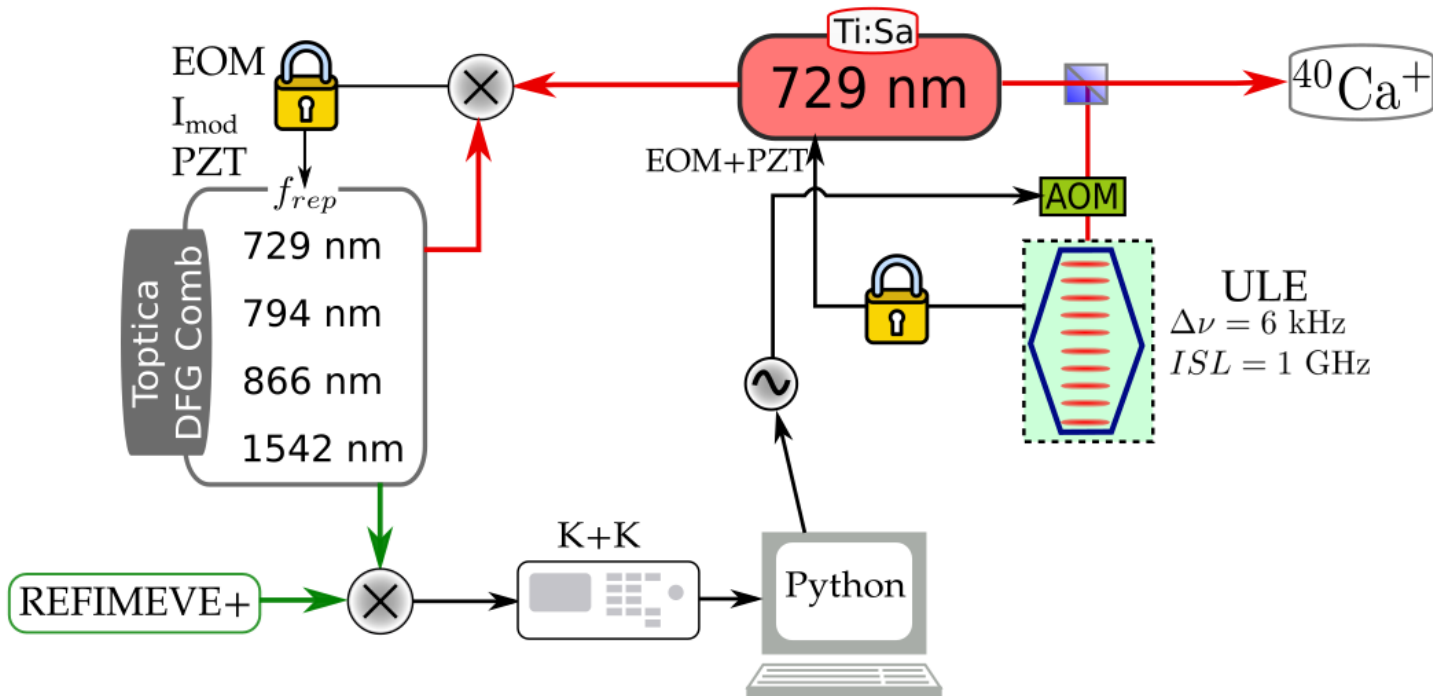
- Exemple de suivi long terme de la fréquence ULE



Décrochage
asservissement
température ULE !

Apport de REFIMEVE+ : perspectives

Ajustement dynamique des données (~5min) puis correction *in situ*

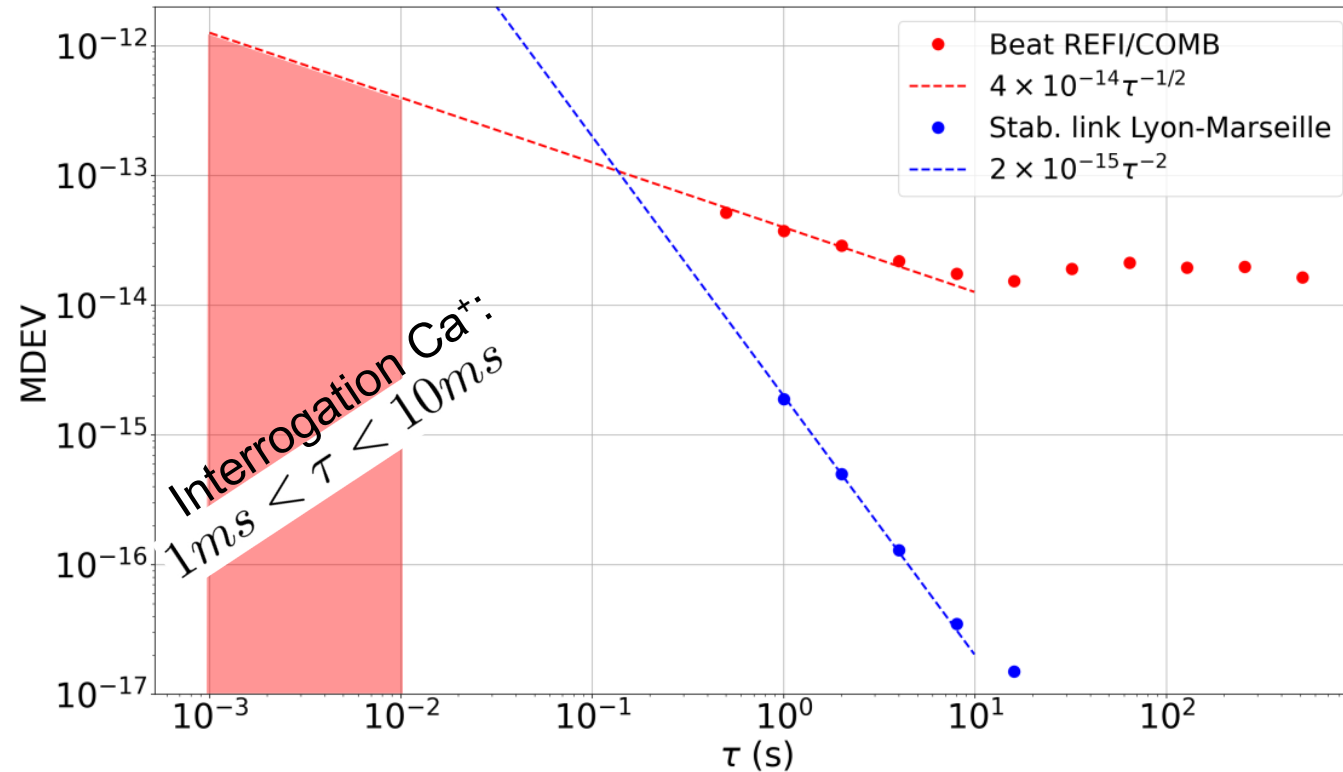


Objectif : rester dans les ± 1 Hz

Temporalité de la correction :
Entre 0.5 s et 1 s selon
importance de la dérive.

Diagnostic du signal REFIMEVE+ : perspectives

Quelles sont les performances effectives du signal REFIMEVE+ à ~1000km de la source ?

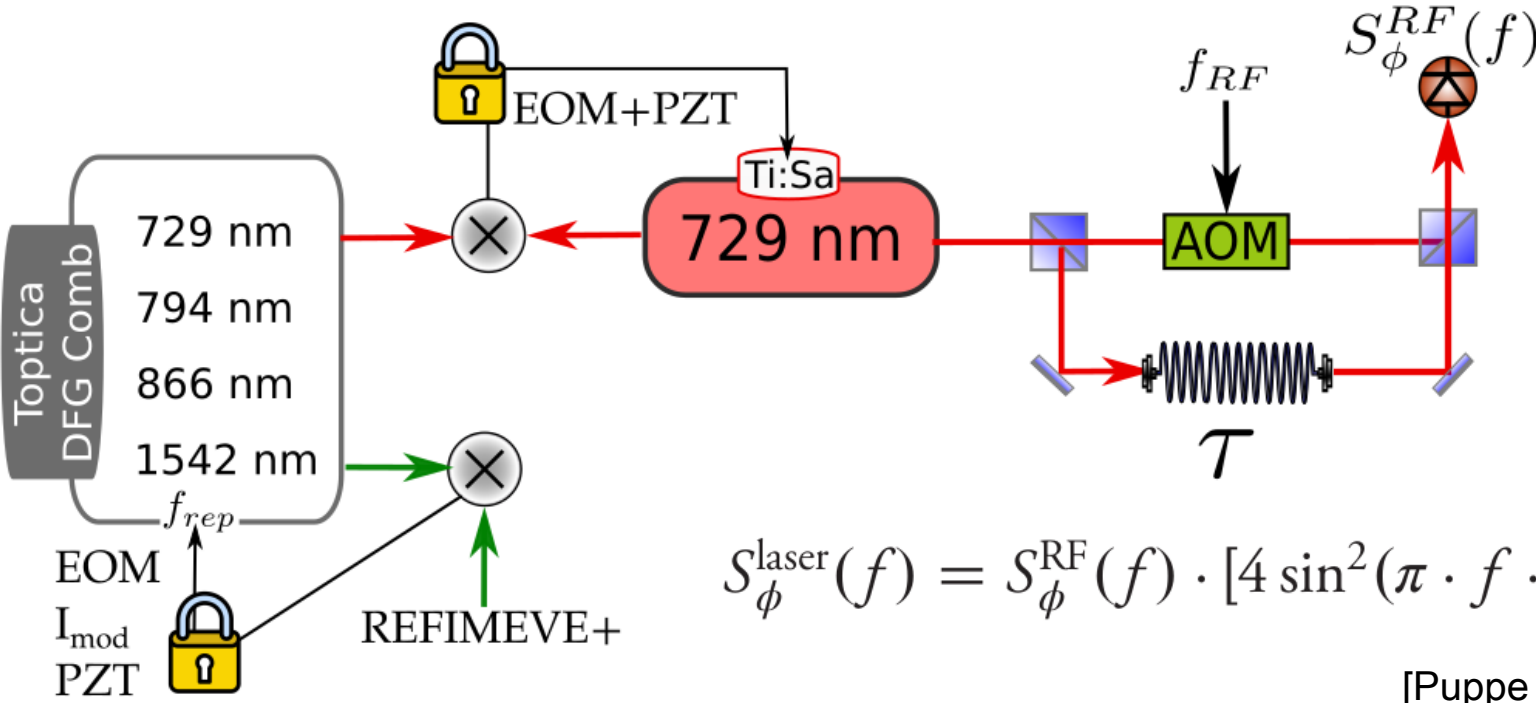


Quelle perf. aux temps courts (<1s) ?

Diagnostic du laser d'horloge après déménagement (deuxième cavité ULE)

Diagnostic du signal REFIMEVE+ : perspectives

Mesure de bruit de phase par autocorrélation ?



Certainement limité par le bruit de fibre ?

Des retours ?

$$S_{\phi}^{\text{laser}}(f) = S_{\phi}^{\text{RF}}(f) \cdot [4 \sin^2(\pi \cdot f \cdot \tau)]^{-1}$$

[Puppe et al. Optics Letters 41,8 2015]

Conclusion

- Apport essentiel de REFIMEVE+ pour la spectroscopie très haute résolution :
 - Gain d'un facteur 1000 sur la mesure de la fréquence THz → champs libre pour l'étude des effets systématiques
 - Suivi et correction active de la dérive à venir (impossible auparavant)
- Perspective intéressante pour le diagnostique de REFIMEVE+ :
 - Seul labo « lointain » (1000km) équipé d'un laser ultrastable+peigne
 - Étude des performances de REFIMEVE+
 - Performance aux temps courts (<1s)
 - Dynamique des bruits non corrigés ?

Merci à tous-tes !



Merci aux personnels de support techniques :

Didier Guyomarc'h, Guillaume Serrin, Gaël Roussin
Rémy Rigard-Cresson, Jean-François Pioche et Hulya Kirmaci



Merci à Etienne Cantin (REFIMEVE+)