



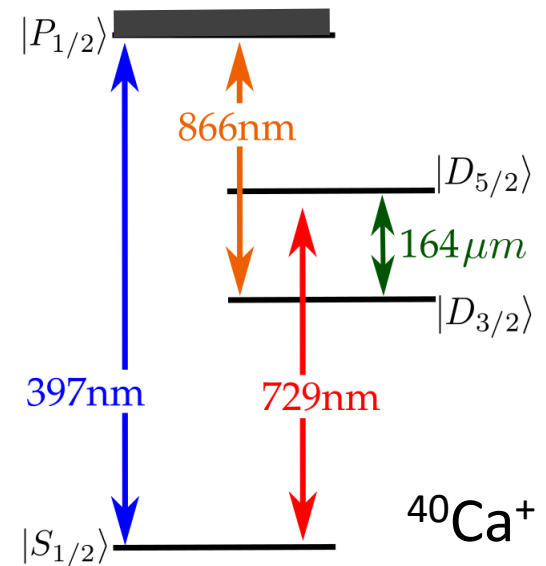
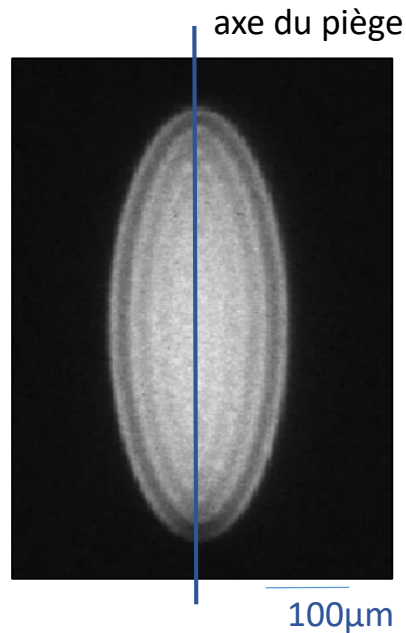
Impact de la cohérence des lasers sur une transition THz à 3 photons

Gaëtan Hagel, Marie Houssin, Grégoire Vallet,
Caroline Champenois

PIIM, Aix-Marseille Université - CNRS

Objectif et motivations

- Etude d'une transition CPT à 3 photons optiques
 - Domaine THz (1,8 THz)
 - Mesure absolue grâce au signal Refimeve
 - Référence pour spectroscopie moléculaire (largeur <kHz)
 - Effet Doppler du 1^{er} ordre réduit ou supprimé
 - Cristaux d'ions



Transition CPT à 3 photons

Piégeage cohérent dans une superposition d'états métastables

→ résonance noire

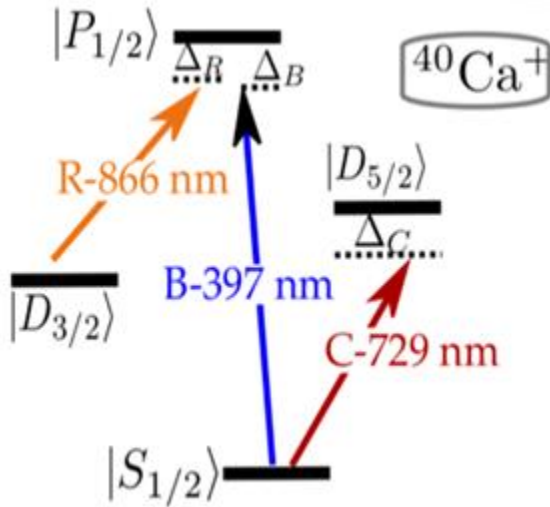
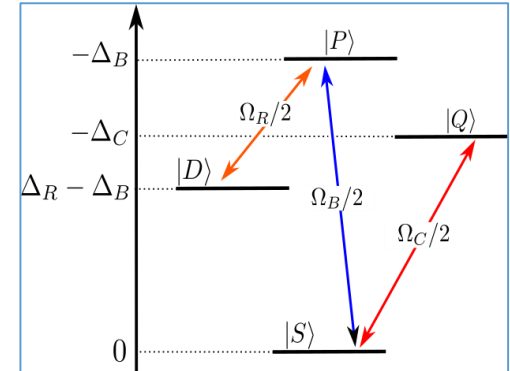
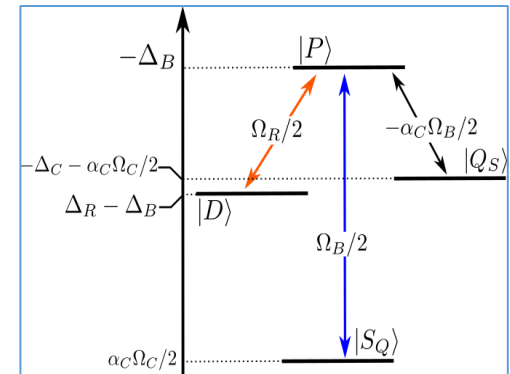


Schéma en N



Transition $S \rightarrow D_{5/2}$ faible

$$\alpha_C = \frac{\Omega_C}{2\Delta_C} \ll 1$$



Piégeage cohérent si $\Delta_R - \Delta_B = -\Delta_C - \alpha_C \frac{\Omega_C}{2}$

$$f_R + f_C - f_B = f_{THz}$$

Sans effet Doppler du premier ordre si $\vec{k}_B - \vec{k}_C - \vec{k}_R = \vec{0}$

Le dispositif expérimental

Piège de Paul quadripolaire linéaire, $r=3,93\text{mm}$

$$\Omega_{RF} = 5,2 \text{ MHz}$$

$$V_{RF} = 940 V_{pp}$$

$$V_{DC} = 1200V$$

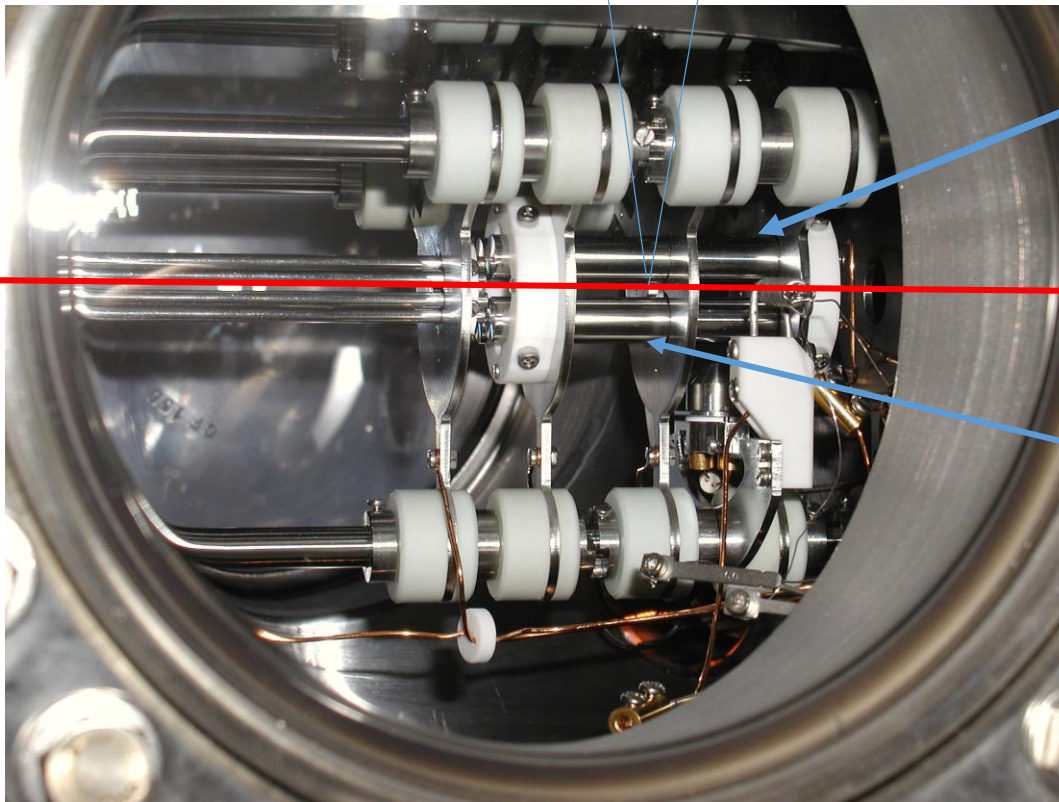
Collection de la
fluorescence à 397nm



Piège où sont créés
les ions par photo-
ionisation

Axe des lasers

Piège
d'interrogation



Le dispositif expérimental : refroidissement

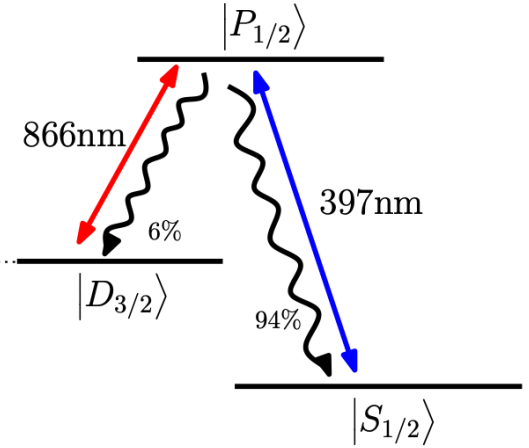
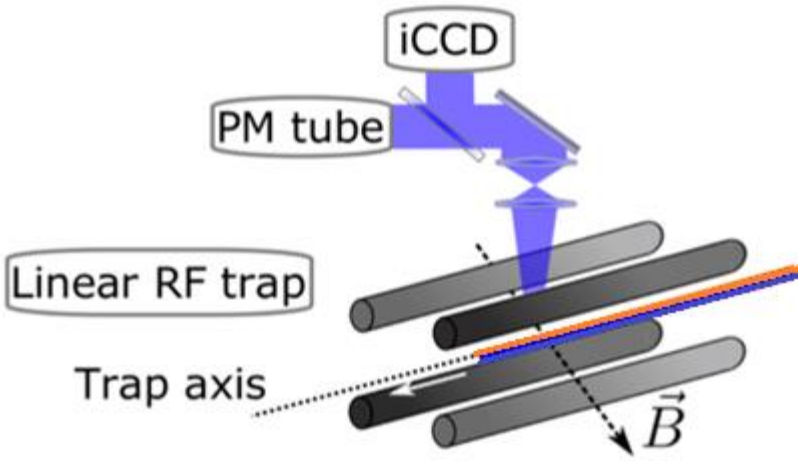
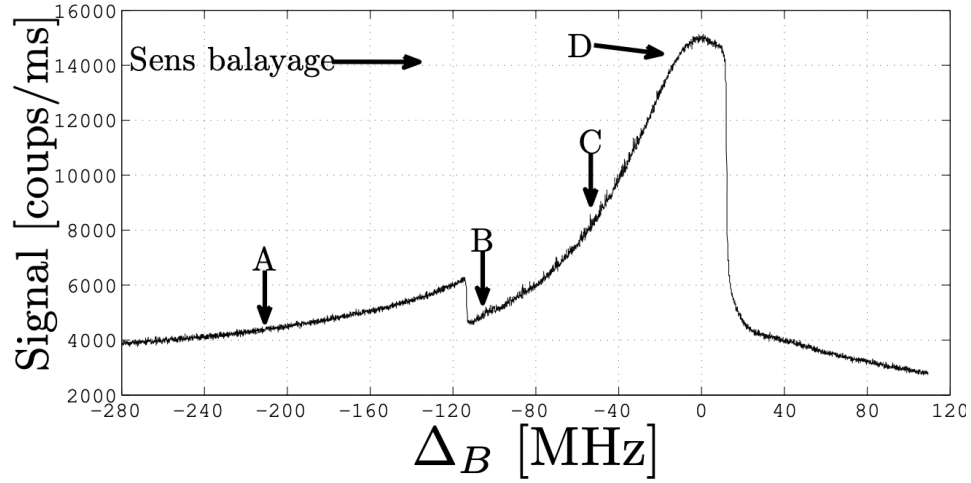
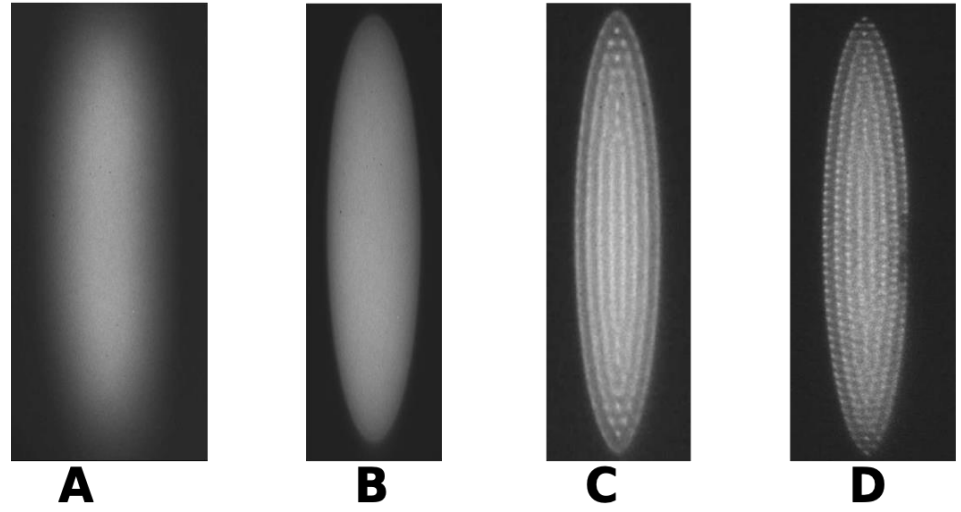


Schéma de refroidissement

Signal de fluorescence à 397nm sur le PM



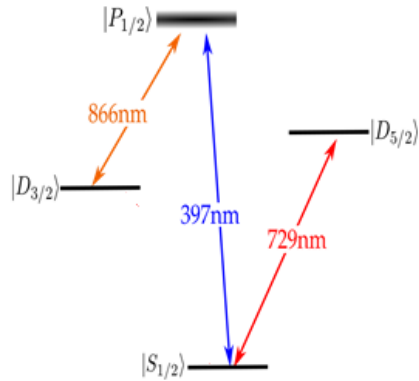
Observation des ions



Signal de fluorescence sur la caméra CCD

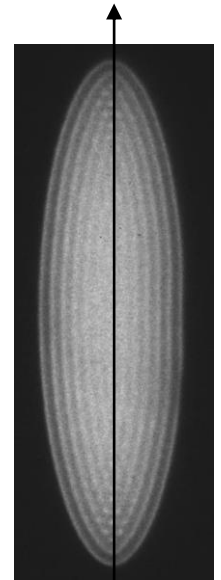
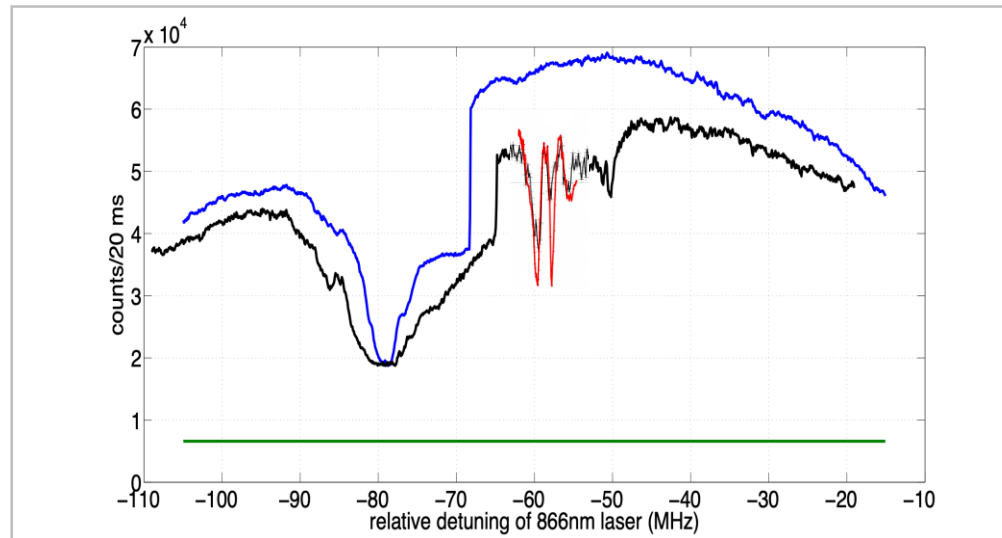
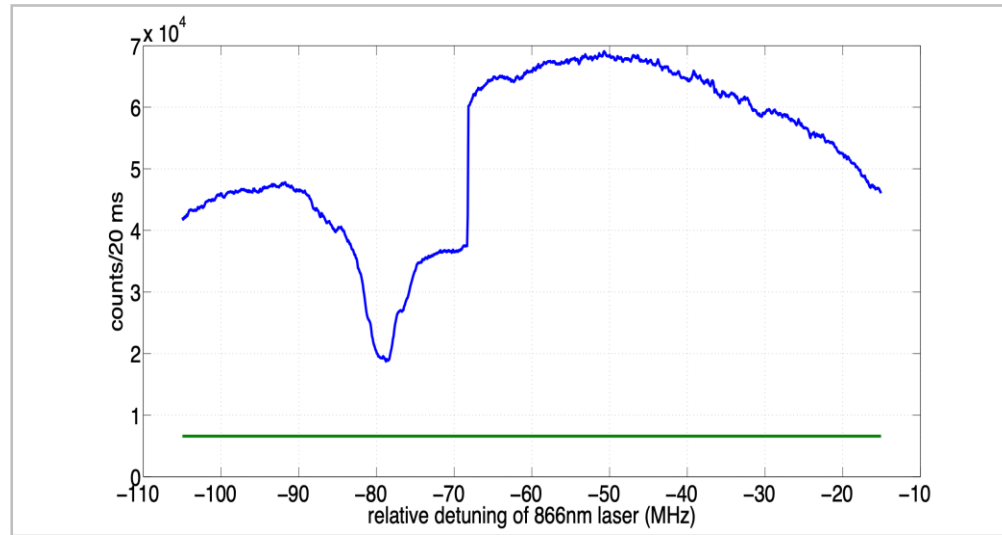
Observation de la transition à 3 photons

Balayage à 866nm,
avec les deux lasers
de refroidissement



On ajoute le laser
à 729nm

Les 3 lasers sont
asservis en phase



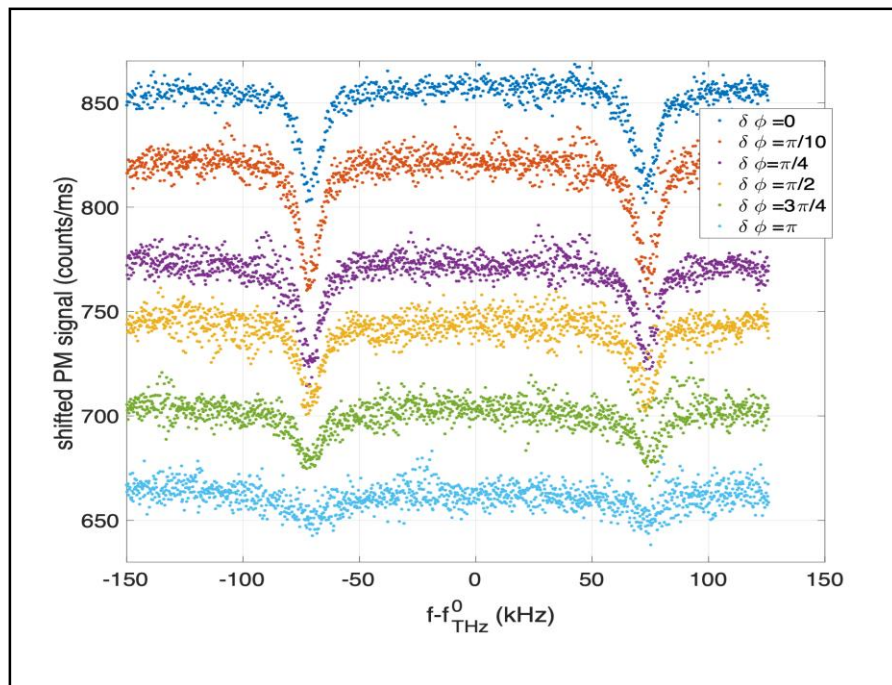
lasers

Impact de la dégradation de la cohérence

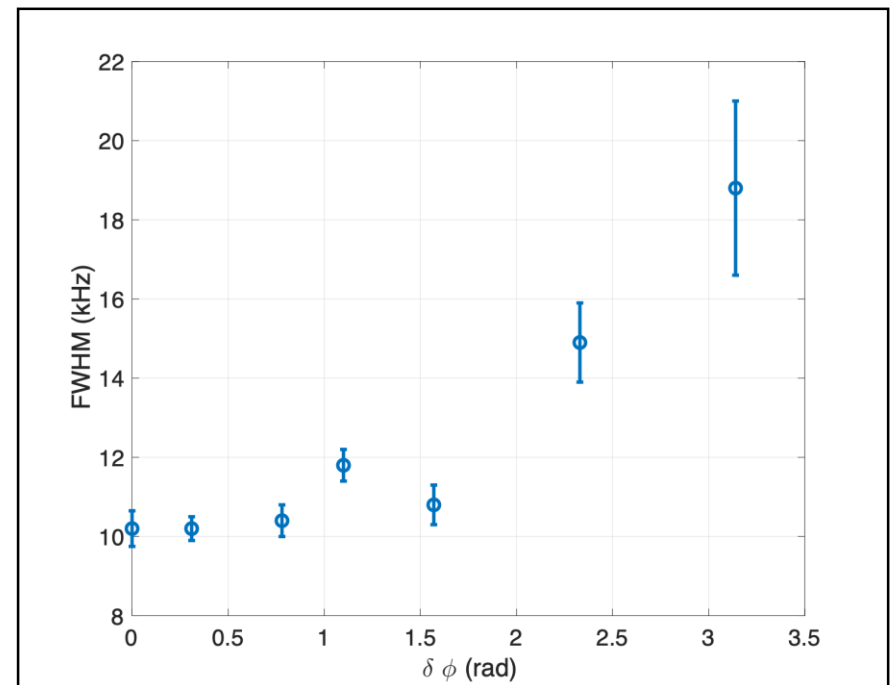
Les 3 lasers sont asservis en phase

+

Bruit blanc de phase d'amplitude $\delta\phi$ dans la bande 0- 100 kHz sur le laser à 866nm

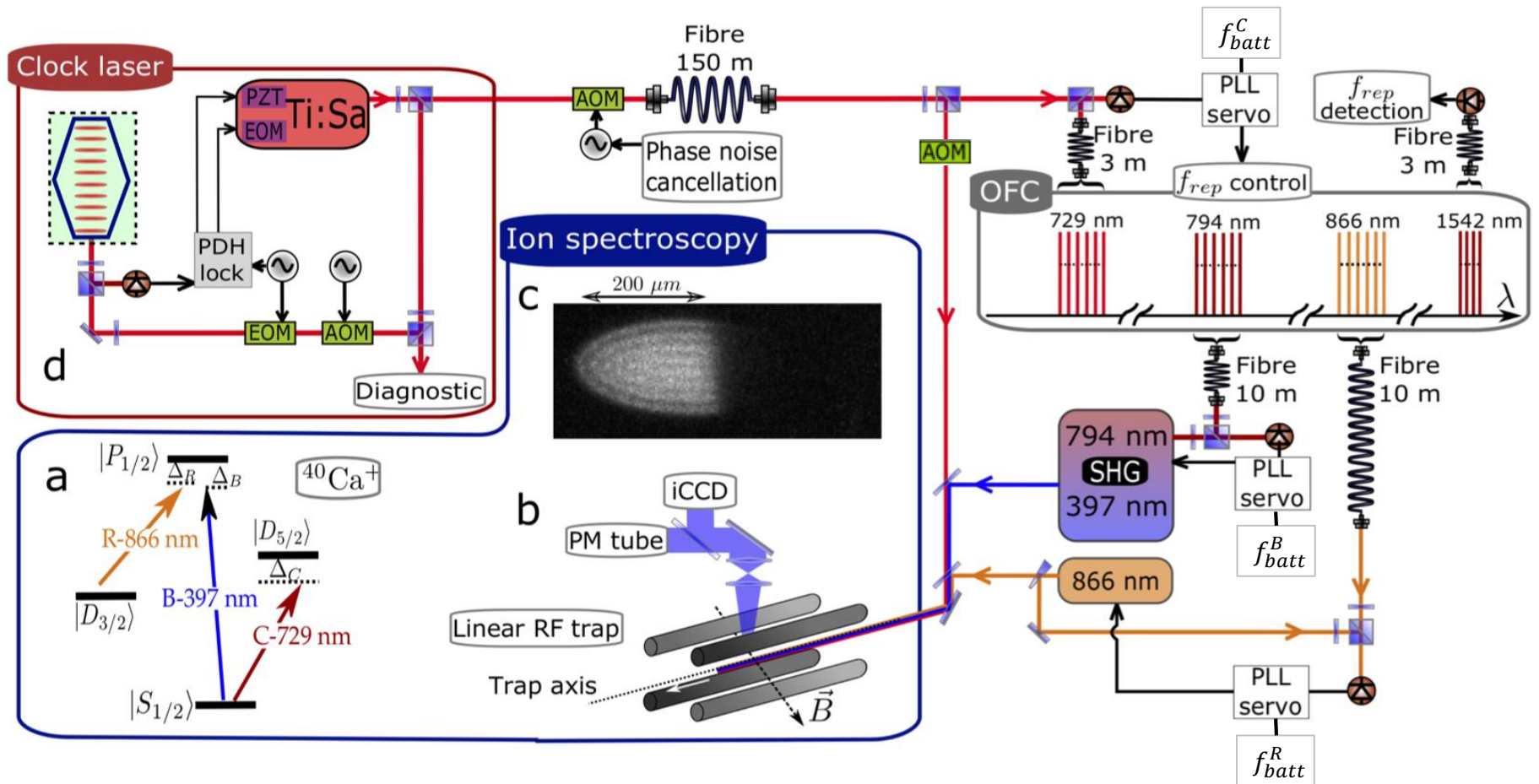


Le contraste diminue avec la perte de cohérence



La largeur de la raie augmente avec la perte de cohérence

Asservissement des lasers



Peigne de fréquence (OFC) pour asservir simultanément les 3 lasers en phase

- Référence local : laser à 729nm asservi sur cavité ULE ($F=220\,000$), $\Delta\nu\sim 4\text{Hz}$
- OFC asservi en phase sur le laser à 729nm
- Lasers 866 nm et 794 nm asservis en phase sur l'OFC

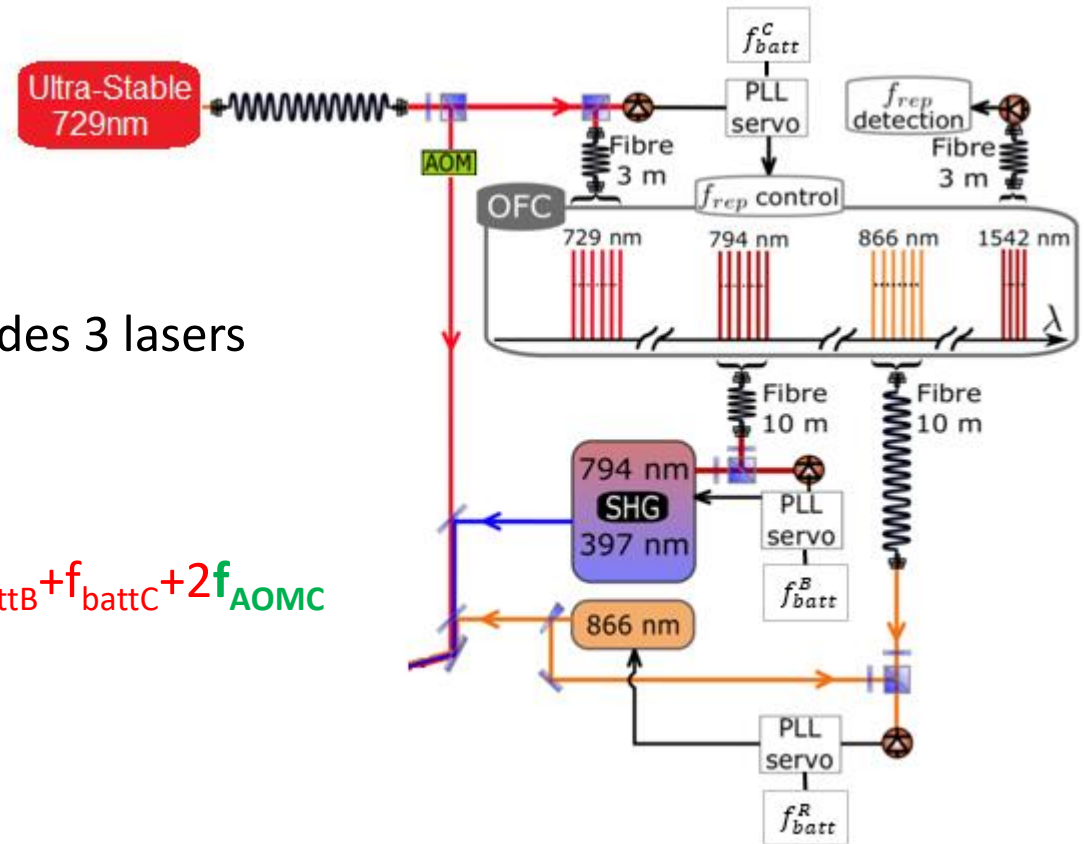
Asservissement des lasers

Le peigne est généré par différence de deux peignes → il est sans offset

Autre intérêt de l'asservissement des 3 lasers sur le peigne (OFC) :

$$f_{\text{THz}} = f_R - f_B + f_C$$

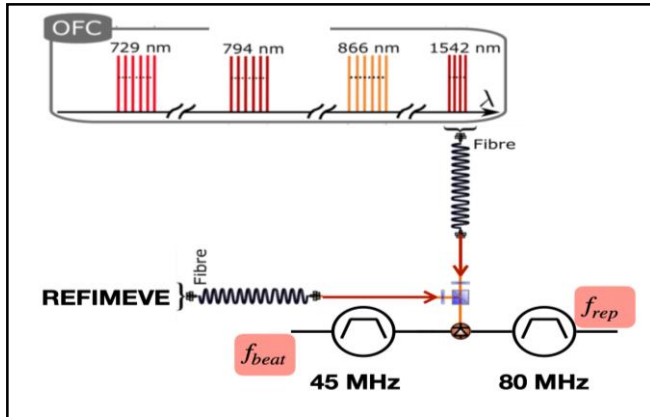
$$= (n_R - 2n_B + n_C) * f_{\text{rep}} + f_{\text{battR}} - 2 * f_{\text{battB}} + f_{\text{battC}} + 2f_{\text{AOMC}}$$



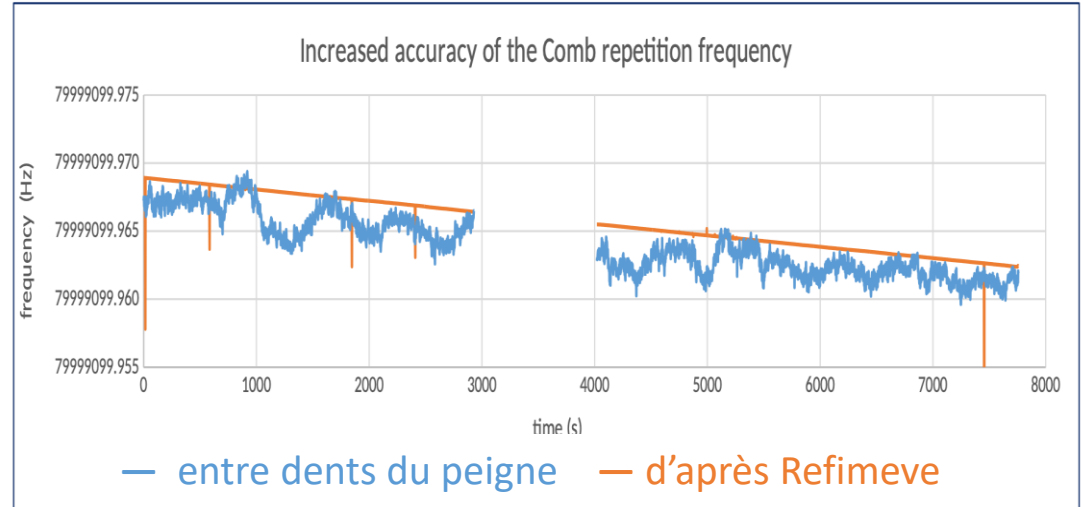
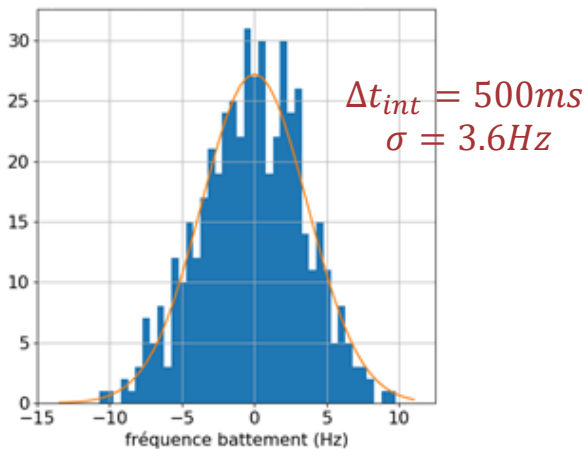
La connaissance de f_{rep} et f_{AOMC} suffit pour déterminer f_{THz}

Une incertitude de 1mHz (10^{-11}) sur f_{rep} induit une incertitude de 23Hz sur f_{THz}

Mesure absolue de fréquence grâce à Refimeve



f (REFIMEVE+) à Marseille :
194 400 008 500 000 Hz



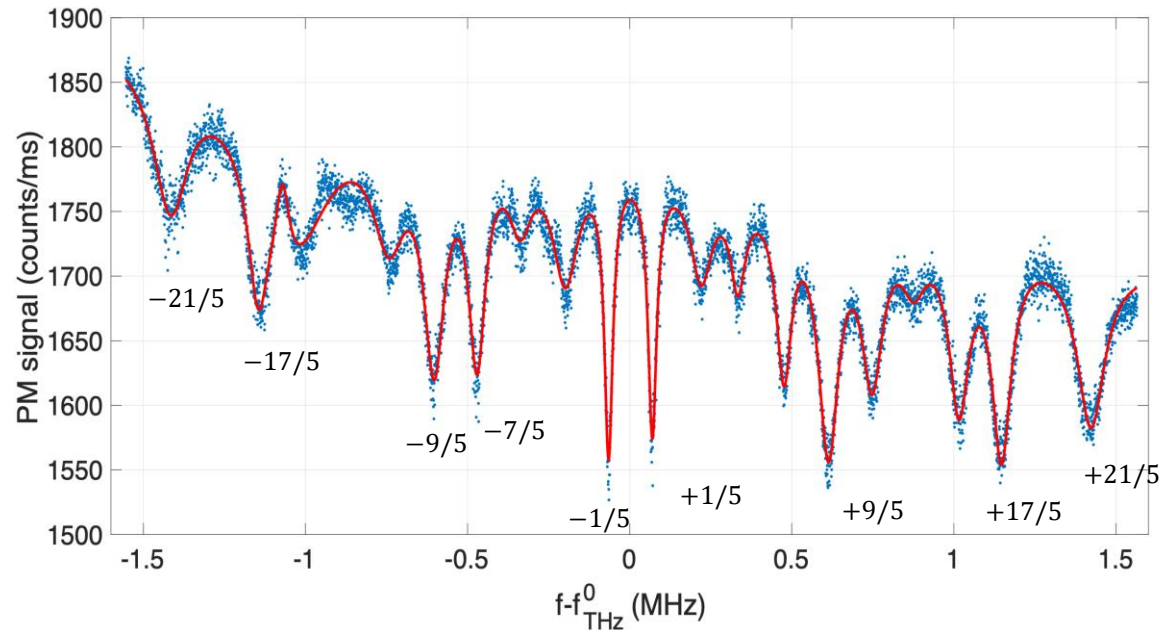
- La dérive du laser ultrastable est corrigée a posteriori
- La précision apportée par Refimeve sur f_{rep} est $\pm 1,5\mu\text{Hz}$ soit 50mHz sur f_{THz}

La fréquence, corrigée de l'effet Zeeman, est comparée à une mesure sur un ion unique

$$f_{THz}^0 = f(3D_{3/2} - 3D_{5/2}) = 1.819599021534(8)THz$$

Phys. Rev. Lett. **120** (2018) 253601

Spectroscopie de la transition à 3 photons : déplacements et largeur de raie



Avec \vec{B} ambient,
20 raies Zeeman

3 jeux de bobines de
Helmholtz contrôlent

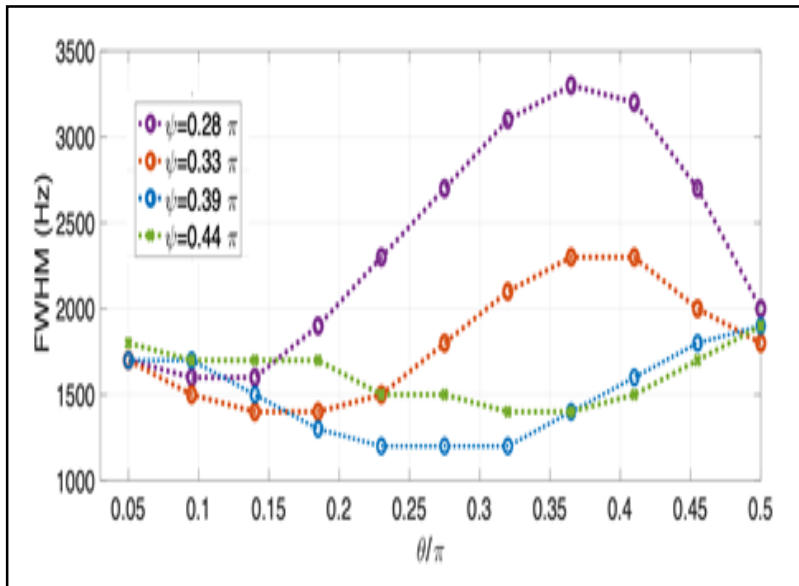
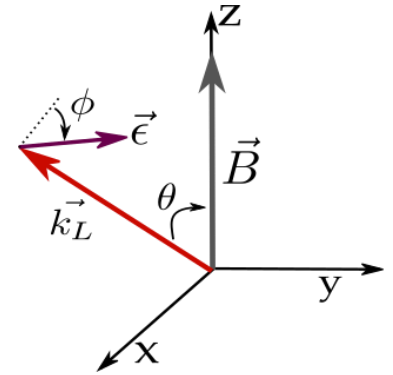
- \vec{B}
- raies Zeeman excitées

Principales causes d'élargissement et d'inexactitude :

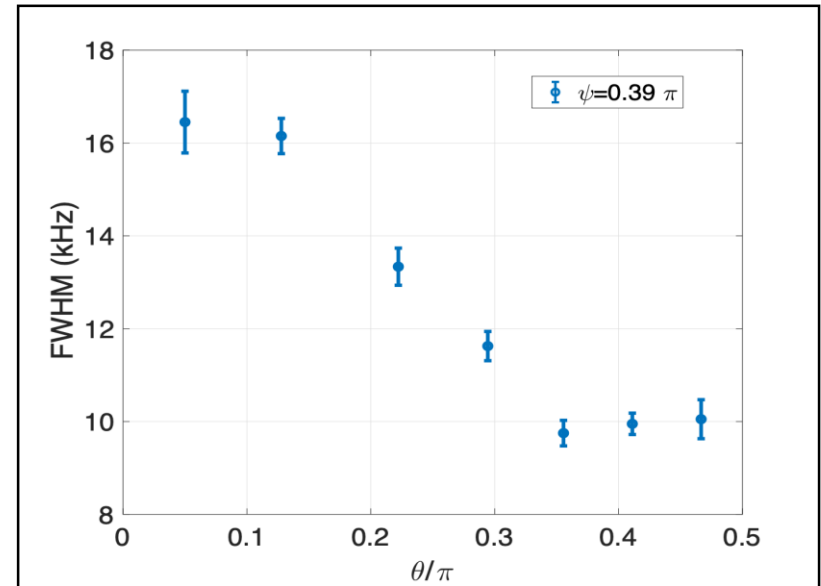
- Le déplacement lumineux à 866nm
- L'effet Zeeman : influence de m_{THz} , mesure de \vec{B} , fluctuations de \vec{B}

Effet Zeeman : minimisation

- Choix de la transition à $m_{THZ} = \pm 1/5$
- Pour \vec{k} , $\vec{\epsilon}$ et \vec{B} formant un trièdre ($\theta=\pi/2$ et $\Phi=0$), les règles de sélection ne permettent pas d'observer cette transition
- Choix (guidé par simulation) de la meilleure orientation du champ magnétique pour une largeur minimale de la raie



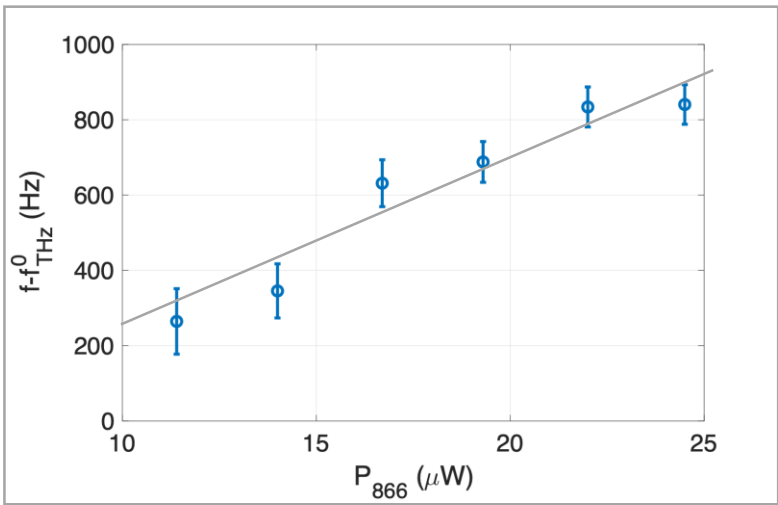
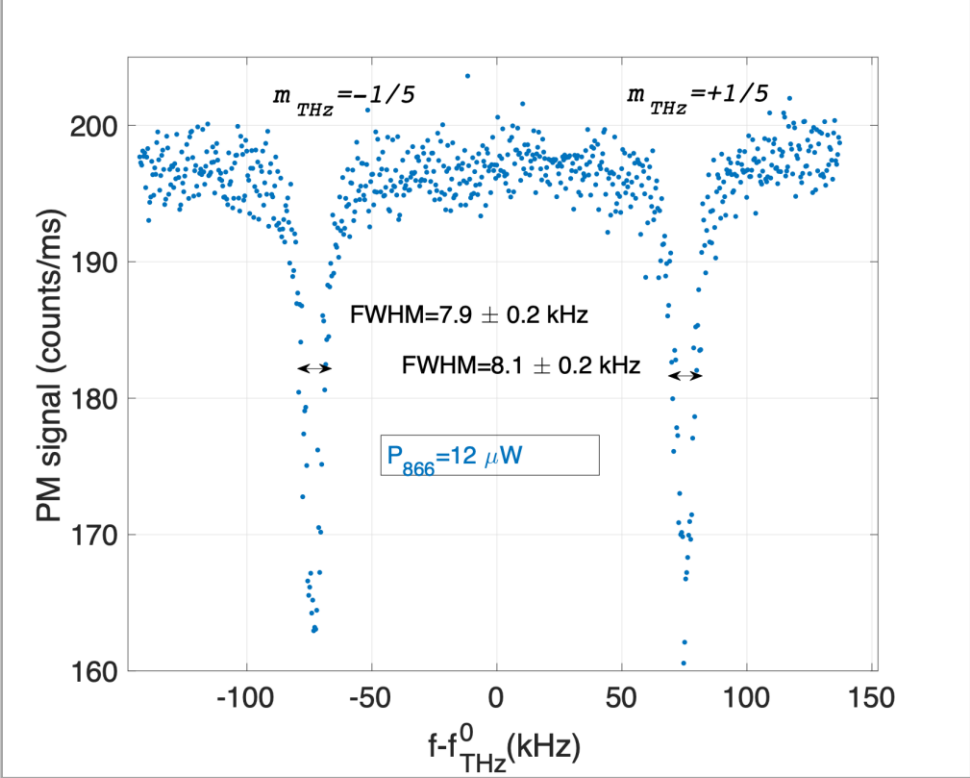
Simulations pour $m_{THZ} = \pm 1/5$



Largeurs mesurées

- Diminution de la norme du champ

Influence du déplacement lumineux induit par le laser à 866nm sur la transition $m_{THZ} = \pm 1/5$



Raie THz de largeur d'environ 8 kHz

Limite pour $P_{866} \rightarrow 0$
 $\delta f_{THZ} = -200 \pm 140$ Hz

L'écart entre les raies permet d'évaluer $\frac{\mu_B B}{h}$ avec une incertitude de 0,5kHz

Conclusion

- La stabilité court terme du laser à 729 nm
- L'asservissement en phase des lasers par l'intermédiaire du peigne
- L'exactitude et la stabilité à long terme apportées par Refimeve

ont permis d'obtenir une raie THz

- de largeur d'environ 8 kHz
- décalée de 200 Hz avec un signal de 200 coups/ms et un contraste de 15% en une mesure de 1 seconde

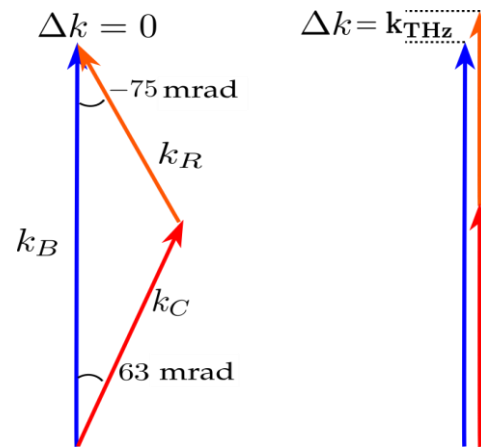
Les limitations principales à ce stade sont

- L'élargissement Doppler résiduel de l'ordre de 4kHz
- L'effet Zeeman due aux fluctuations du champ de l'ordre de 3kHz

Perspectives

Réduction de la largeur de raie

- Réduction des fluctuations de champ magnétique à l'aide d'une régulation sur un deuxième jeu de bobines de Helmholtz
- Configuration sans effet Doppler



Analyse plus fine de la cohérence de chacun des lasers et de la cohérence relative en lien avec les simulations

Des schémas d'interrogations pulsés ?

Merci pour votre attention



Remerciements aux financeurs

