

Sources lasers ultra-stables à $1,56 \mu\text{m}$ pour l'interférométrie atomique sur le rubidium

Permanents :

P. Cladé

S. Guellati-Khélifa

F. Nez

L. Julien

F. Biraben

Doctorants :

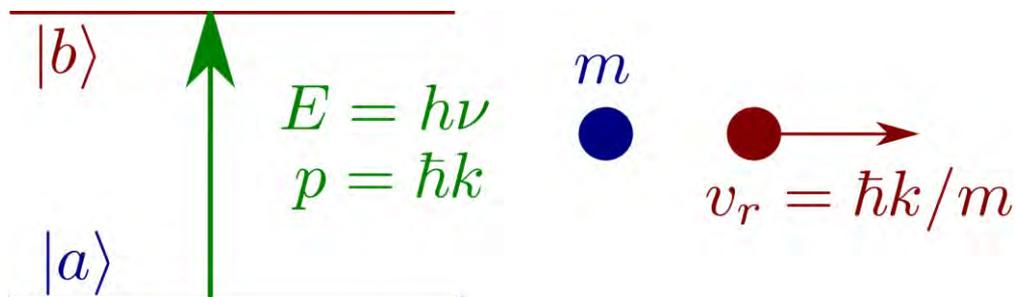
M. Andia

R. Jannin

C. Courvoisier

H. Fleurbaey

Vitesse de recul d'un atome qui absorbe un photon :



Détermination de la constante de structure fine α :

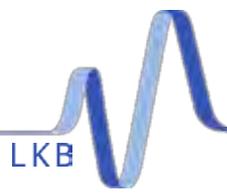
$$\alpha^2 = 2R_\infty \frac{m_{\text{Rb}}}{m_e} \frac{h}{m_{\text{Rb}}}$$

CODATA 2012 :

$$R_\infty : 5.9 \times 10^{-12}$$

$$\frac{m_p}{m_e} : 9.5 \times 10^{-11}$$

$$\frac{m_{\text{Rb}}}{m_p} : 2 \times 10^{-10}$$



➤ Test des calculs de l'électrodynamique quantique :

- Mesure de l'anomalie du moment magnétique de l'électron a_e (g-2).
- Théorie de l'électrodynamique quantique :

$$a_e = A_1 \frac{\alpha}{\pi} + A_2 \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^2 + A_3 \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^3 + A_4 \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^4 + \dots + a_e(\text{muon, tau, weak, hadron})$$

➤ Redéfinition du kilogramme : h et N_A fixés

Balance du watt

$$\frac{h}{M}$$

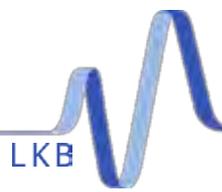


Projet Avogadro

$$\frac{M}{m}$$

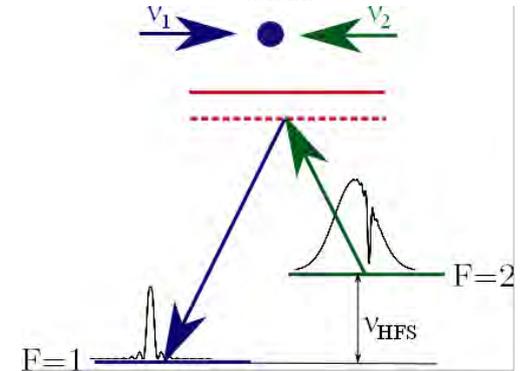


$$\frac{h}{m_u} = \frac{\alpha^2 c A_r(e)}{2R_\infty}$$

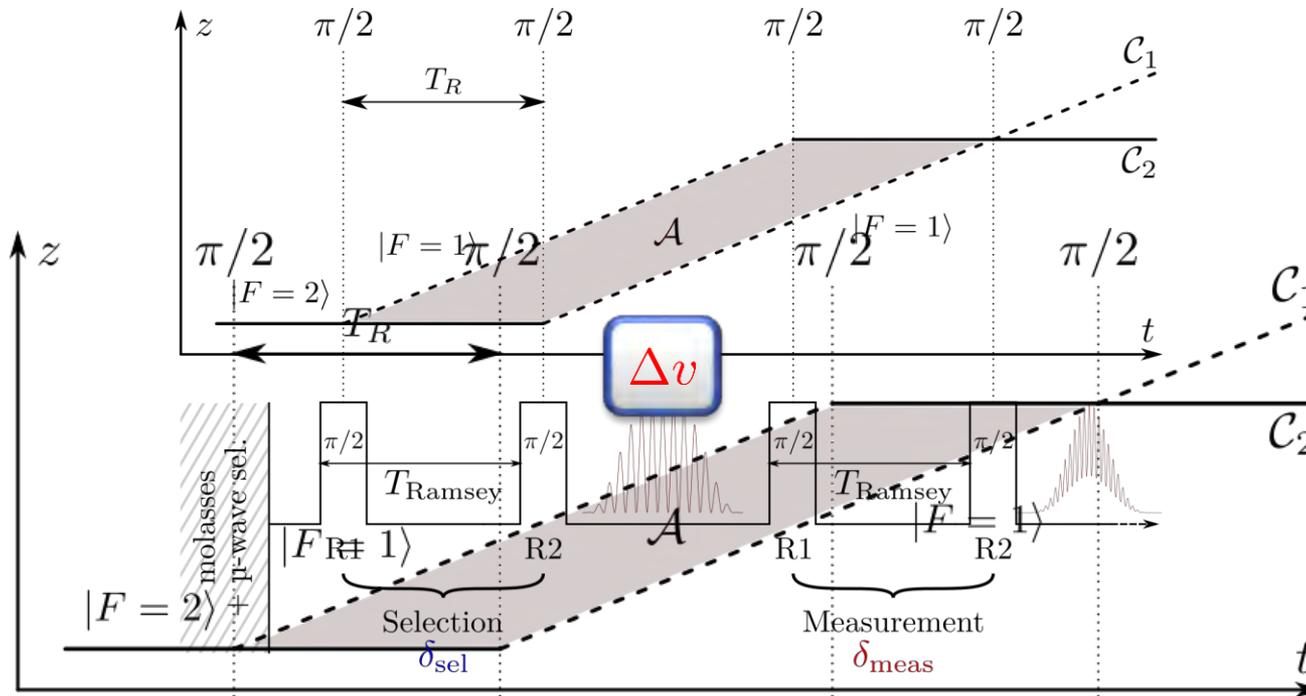


Interféromètre atomique Ramsey Bordé

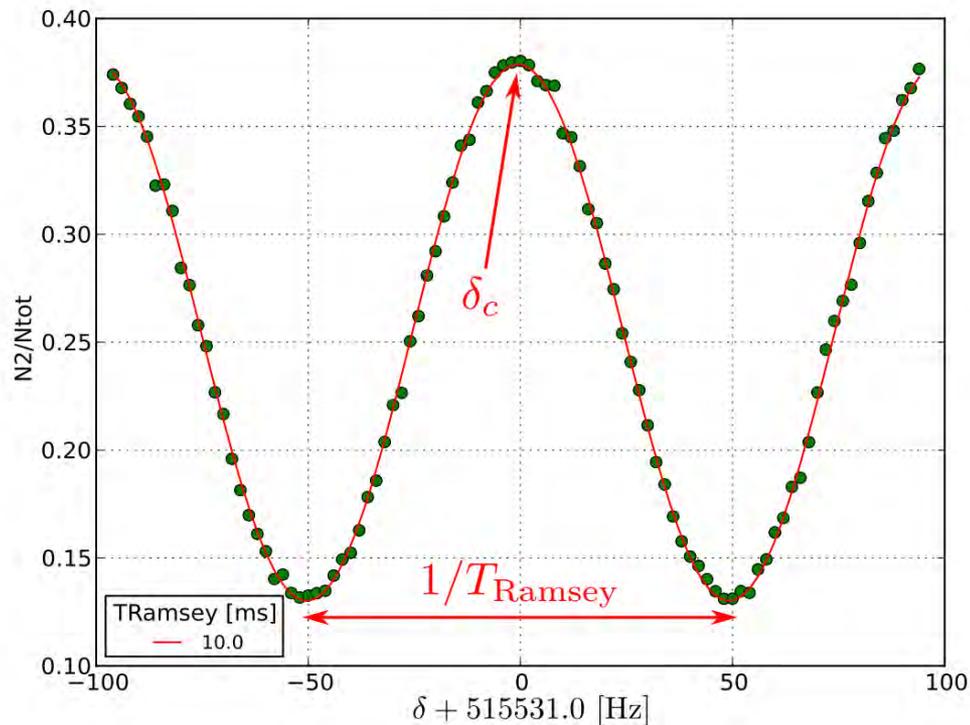
- Mesure du décalage Doppler dû à une variation de vitesse Δv



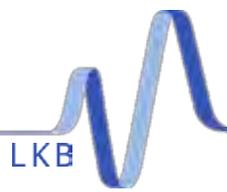
$\Omega\tau = \pi/2$
(Ω fréquence de Rabi)



- Centre de la frange centrale δ_c
- 1 point = 1 une séquence complète (850 ms)
- Incertitude typique sur δ_c : 0.1 Hz (10 nm/s)



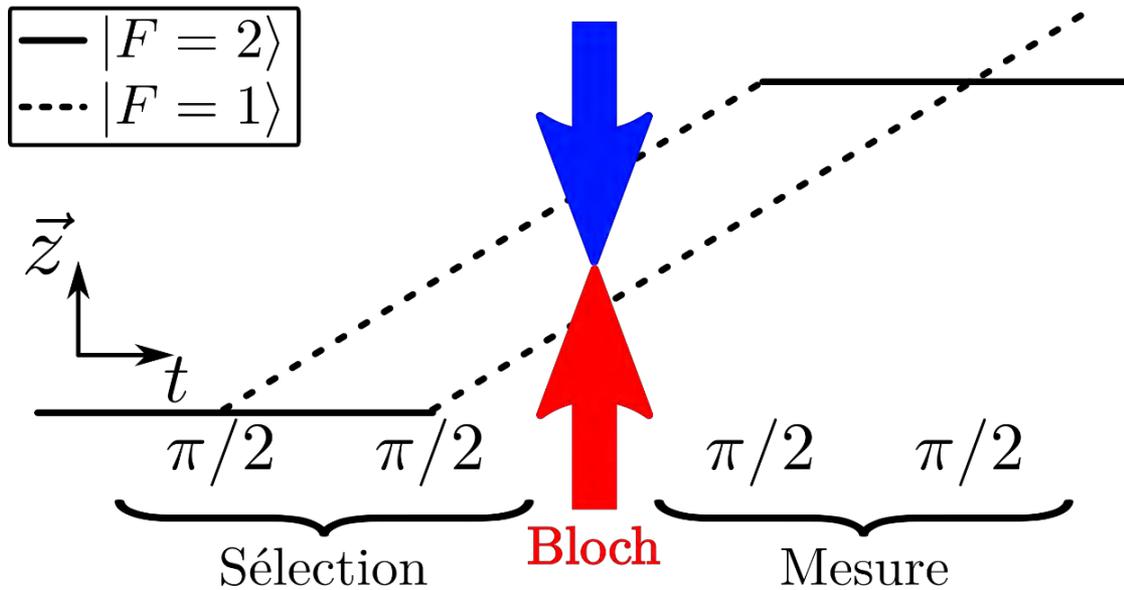
$\Delta v \approx 15 \text{ kHz } (v_r)$
 $\sigma_v/v_r \approx 10^{-5}$



Mesure de la vitesse de recul



- N oscillations de Bloch $\longrightarrow 2 N v_r$
- L'incertitude statistique varie en $1/(2N)$



$\Delta\nu \approx 15 \text{ kHz } (v_r)$
 $\sigma_{\sqrt{2}v_r} \approx 10^{-5}$



$N = 500$ oscillations
 $\Delta\nu \approx 1000 \times v_r$
 $\sigma_{\sqrt{v_r}} \approx 10^{-8}$

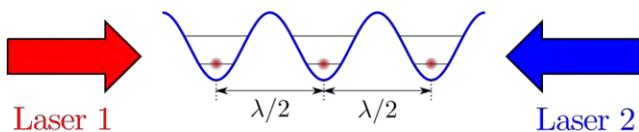
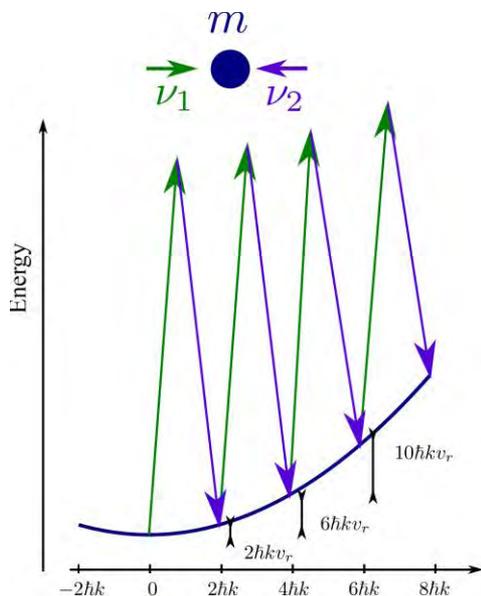
➤ Succession de transitions Raman dans le même niveau hyperfin

$$\Delta p = 2\hbar k$$

- Accélération cohérente par passages adiabatiques

$$\nu_2 - \nu_1 = \alpha t$$

Grande efficacité : 1000 x v_r (vitesse de recul)



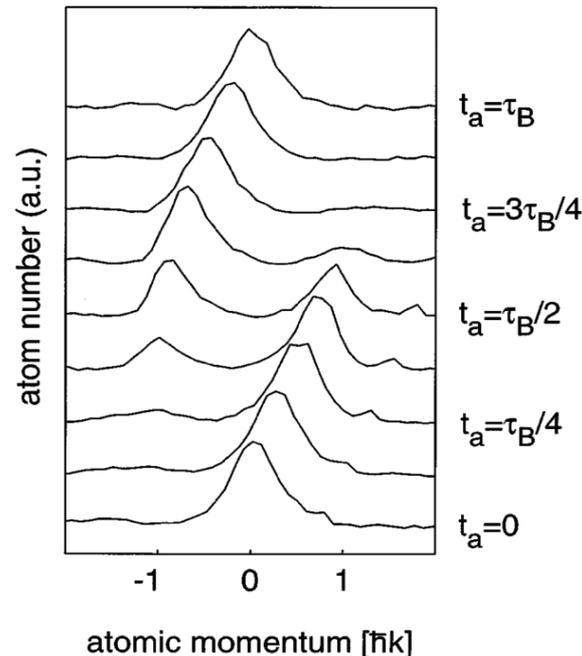
- Rampe de fréquence : $d\nu/dt$
- Force d'inertie $F = m\lambda/2 d\nu/dt$

$$q(t) = q_0 + \frac{F}{\hbar} t$$

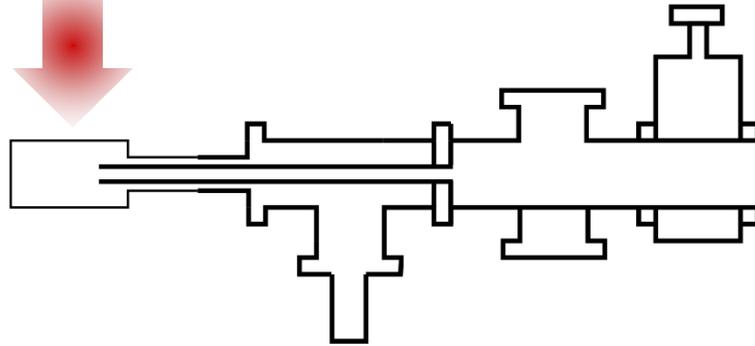
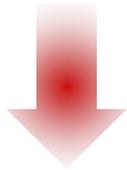
➤ **super-réseaux** :
(Leo Bastard in 1993)

➤ **atomes froids** :
(M. Raizen, C. Salomon in 1996)

Ben Dahan *et al.*, PRL, 1996

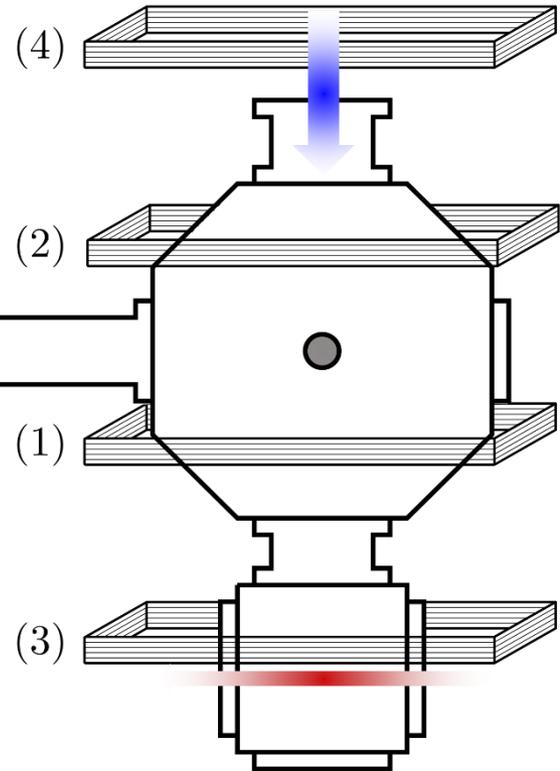


2D-MOT



Blindage magnétique

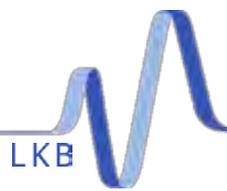
Faisceaux lasers Raman et Bloch



Détection par temps de vol

rubidium 87 :

Paramètres typiques du nuage atomique :
 $N \approx 10^8$ atomes; taille ≈ 1.7 mm; $T = 4 \mu\text{K}$



Budget des incertitudes



Source	Correction	Uncertainty 10^{-10}
Laser frequencies		1.3
Beams alignment	-3.3	3.3
Wavefront curvature and Gouy phase	-25.1	3.0
2nd order Zeeman effect	4.0	3.0
Gravity gradient	-2.0	0.2
Light shift (one photon transition)		0.1
Light shift (two photon transition)		0.01
Light shift (Bloch oscillations)		0.5
Index of refraction atomic cloud and atom interactions		2.0
Global systematic effects	-26.4	5.9
Statistical uncertainty		2.0
Rydberg constant and mass ratio		2.2
Total uncertainty		6.6

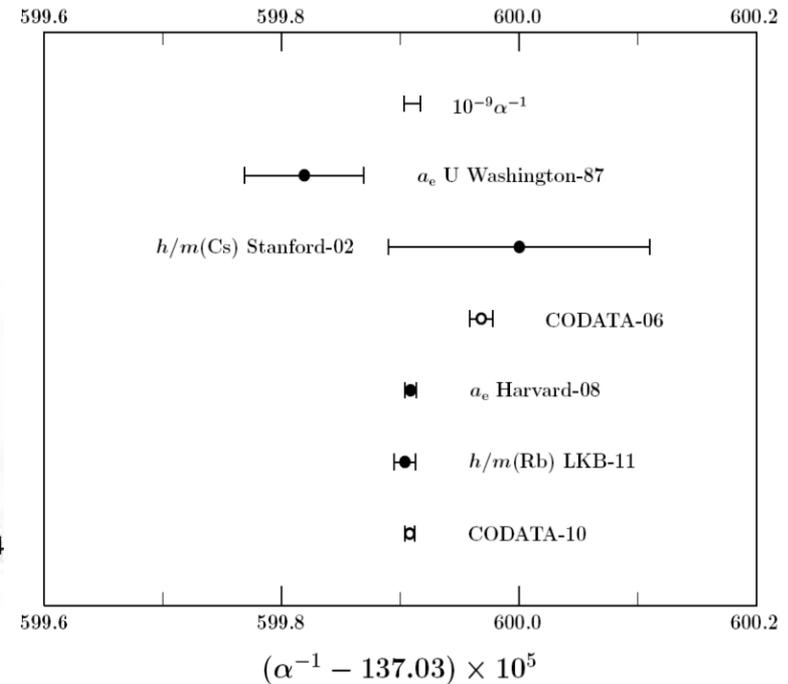
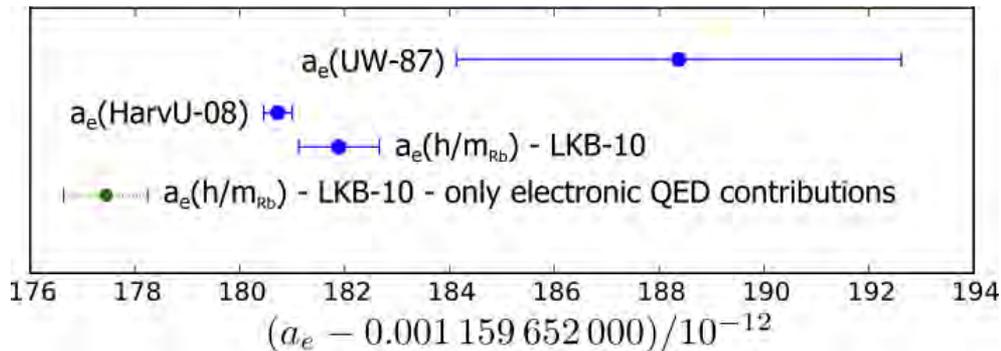
Bouchendira et al., *Phys. Rev. Lett.* 106, 080801 (2011)

$$\alpha^{-1} = 137.035\,999\,037\,(91) [6,6 \times 10^{-10}] \text{ (CODATA 2010)}$$

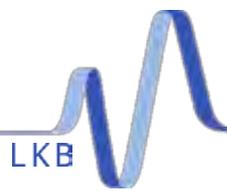
- Le test le plus précis de la QED (LKB / Harvard)

$$a_e = A_1 \frac{\alpha}{\pi} + A_2 \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^2 + A_3 \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^3 + A_4 \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^4 + \dots$$

$$+ a\left(\frac{m_e}{m_\mu}, \frac{m_e}{m_\tau}, \text{weak, hadron}\right).$$



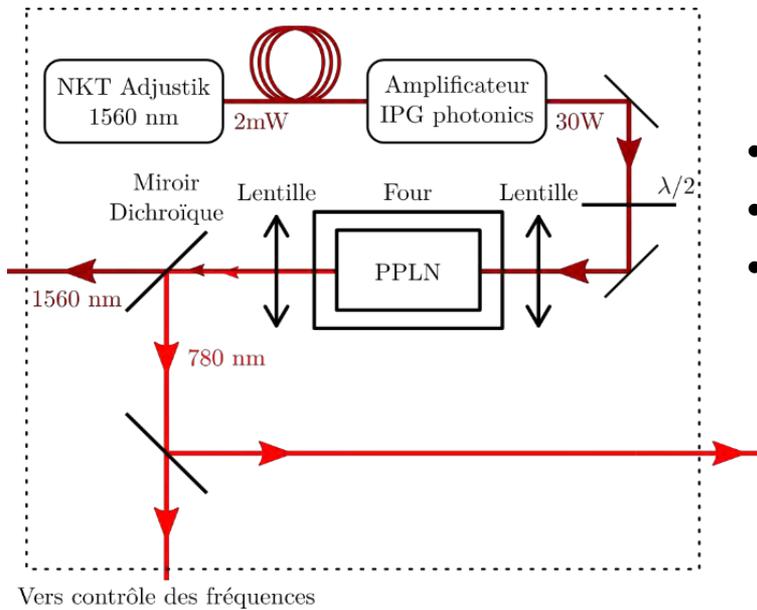
$$\alpha^{-1} = 137.035\,998\,997\,(90) [6,6 \times 10^{-10}] \text{ (CODATA 2014)}$$



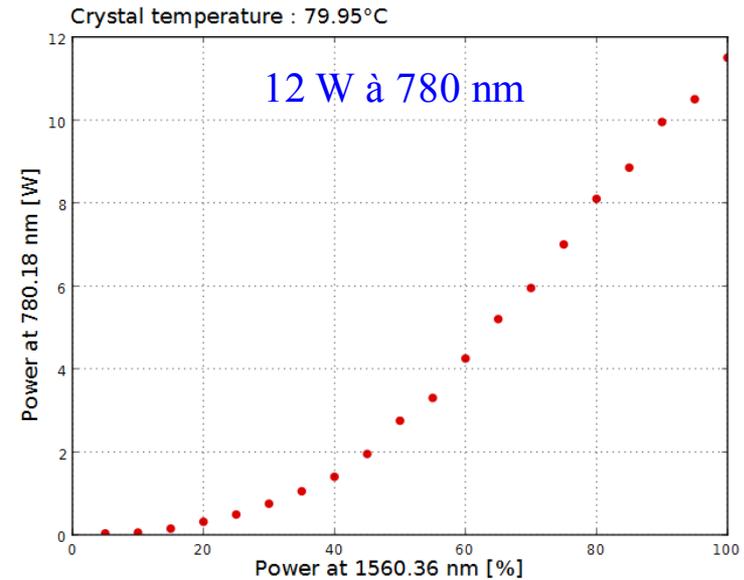
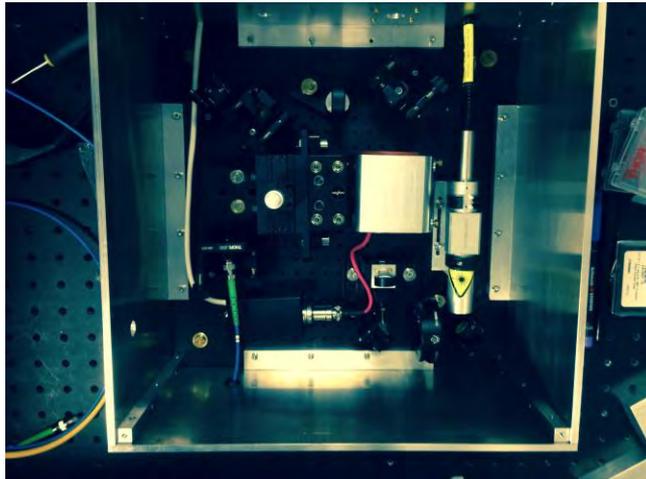
Source	Correction	Uncertainty
Courbure du front d'onde et phase de Gouy		
<ul style="list-style-type: none"> • Onde plane $p = \hbar k$ • Faisceau gaussien $p = \hbar k_{eff}$ 		
$k_{eff} = \frac{d\phi}{dz} = k - \frac{2}{k} \left[\frac{1}{w^2} - \frac{r^2}{w^4} + \frac{k^2 r^2}{4R^2} \right]$		
<p>➤ <i>waist</i> plus grand \longrightarrow puissance laser plus élevée</p>		
Rydberg constant and mass ratio		2.2
Total uncertainty		6.6

Bouchendira et al., *Phys. Rev. Lett.* 106, 080801 (2011)

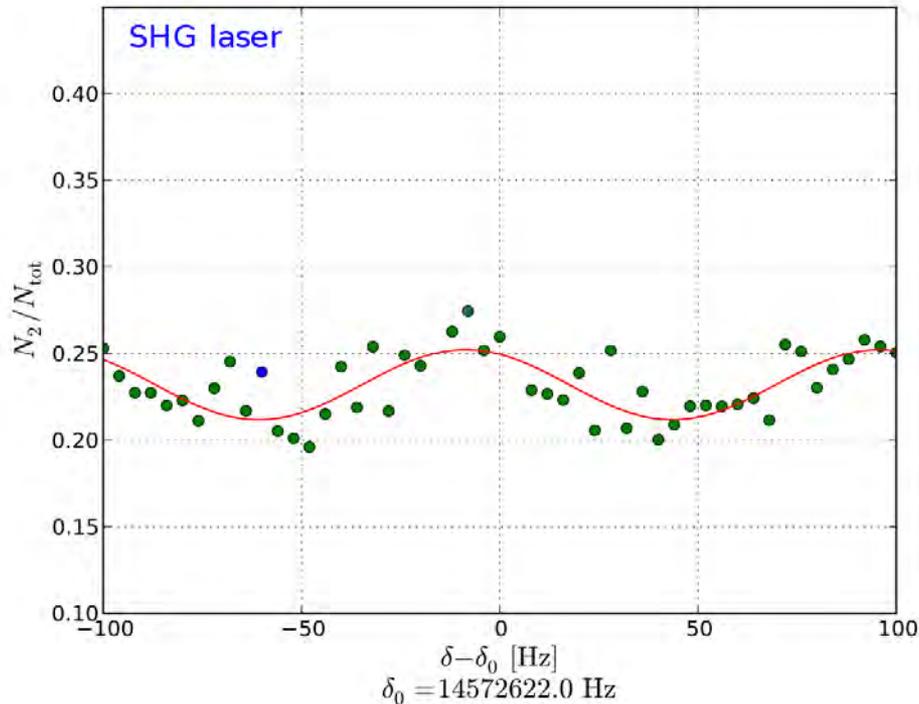
Nouvelle source laser pour les OB

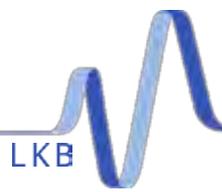


- Laser à fibre : 5 mW @1560 nm
- Amplificateur : 30 W @1560 nm
- Doublage de fréquence : cristal PPLN

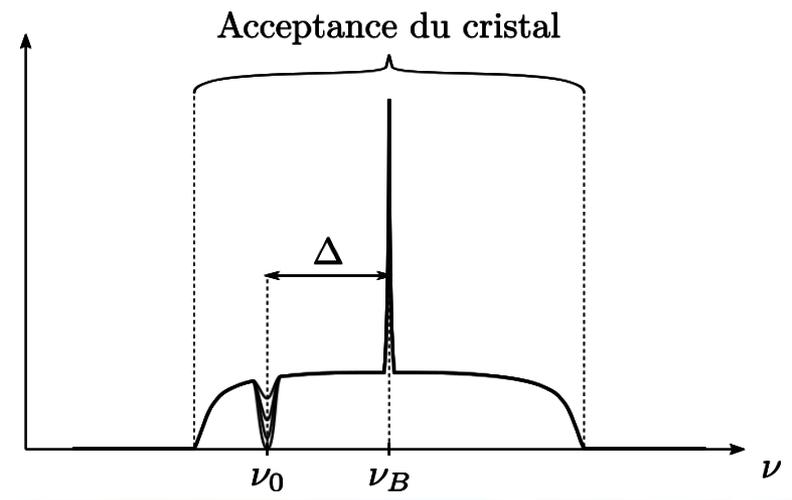
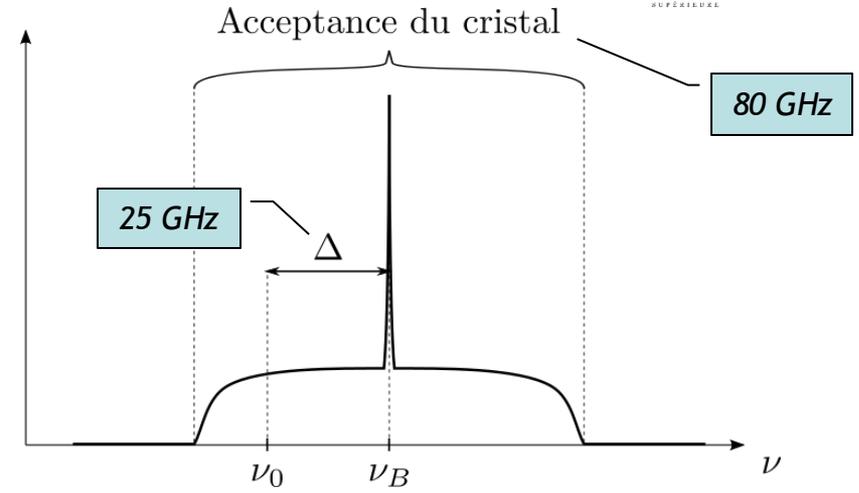
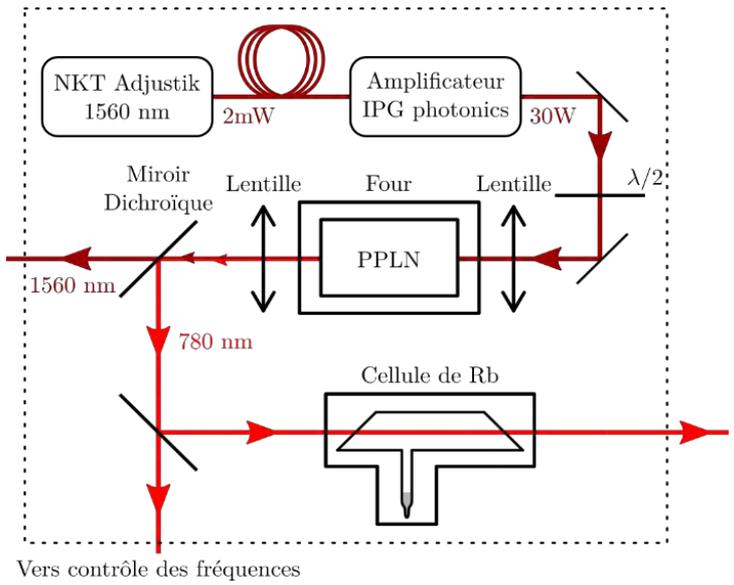


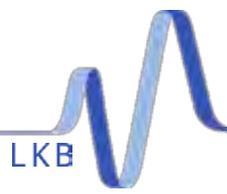
- Puissance Bloch disponible x 4 \longrightarrow Diamètres des faisceaux lasers x 2
- Premiers tests avec 500 oscillations de Bloch : **perte de 80% des atomes**



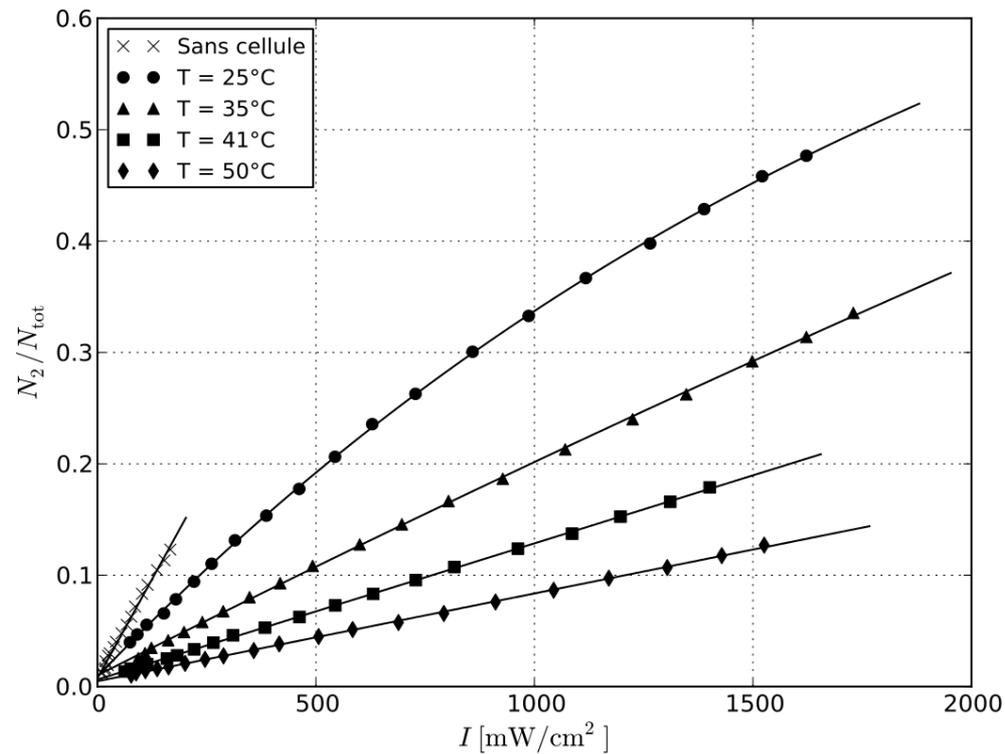
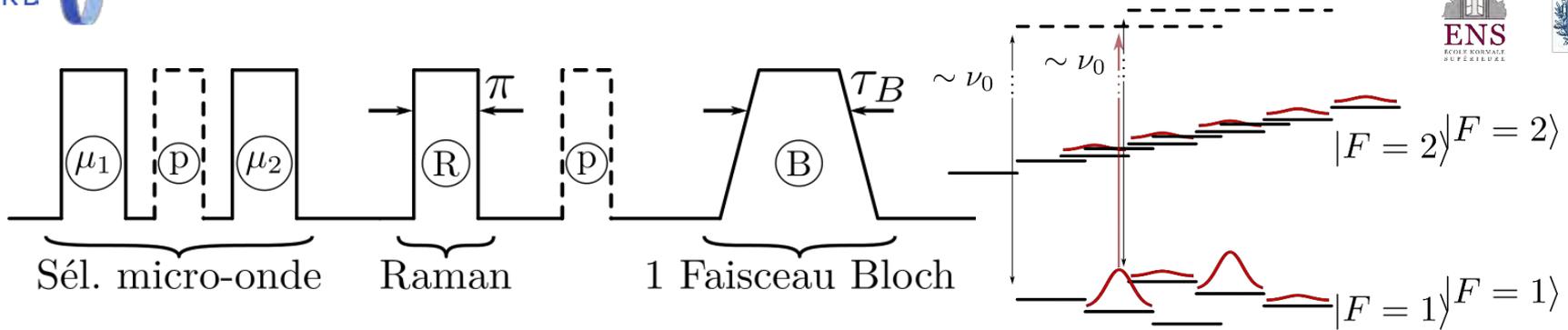


Émission Spontanée Amplifiée (ESA)

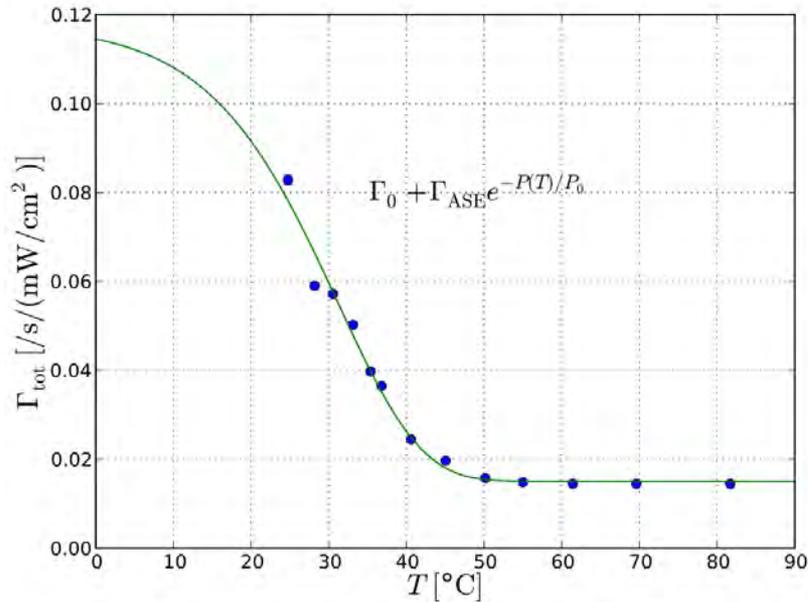




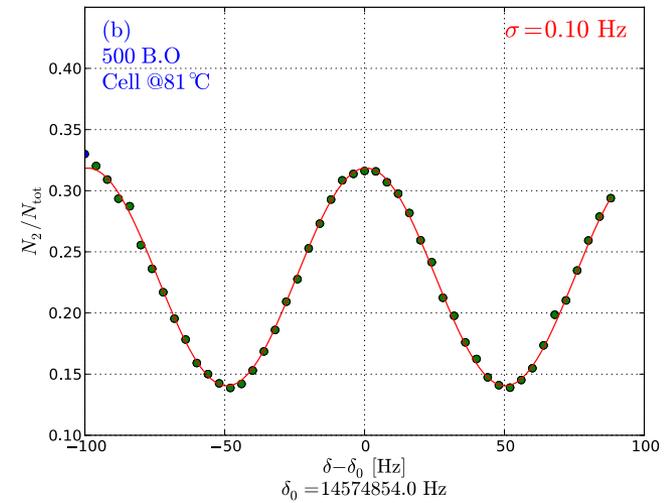
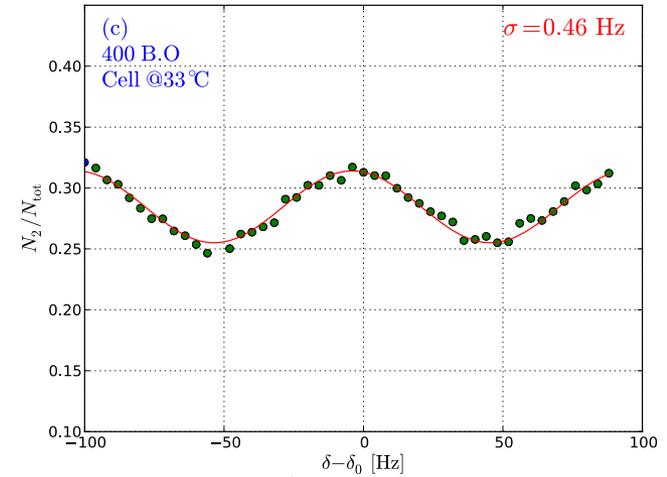
Mesure du taux d'ESA



T > 50°, filtrage total de l'ASE



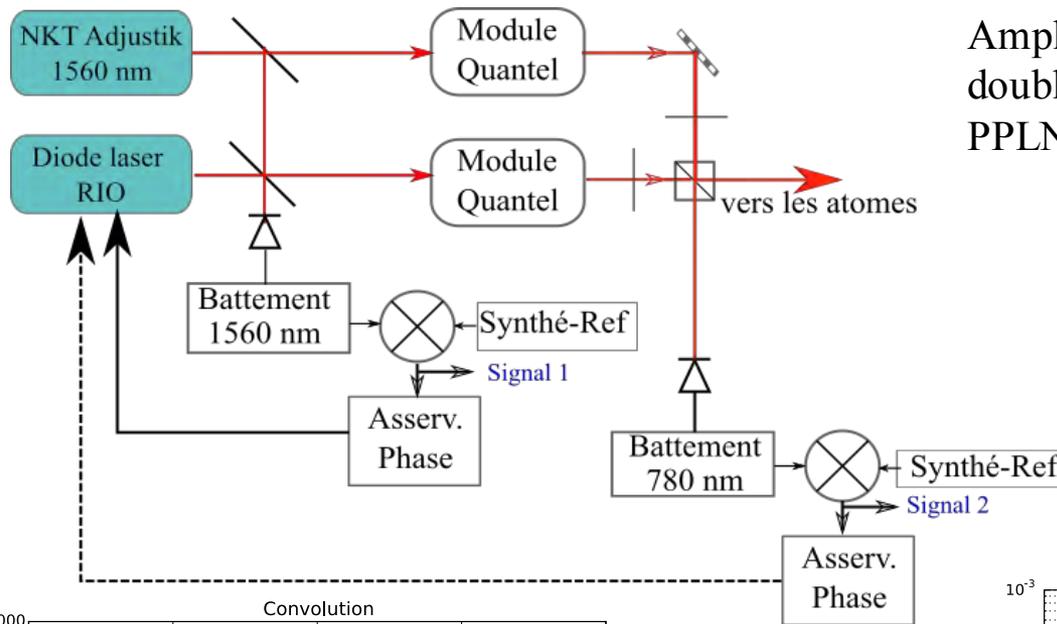
Andia et al., *J. Opt. Soc. Am. B, OSA*, 2015, 32, 1038-1042



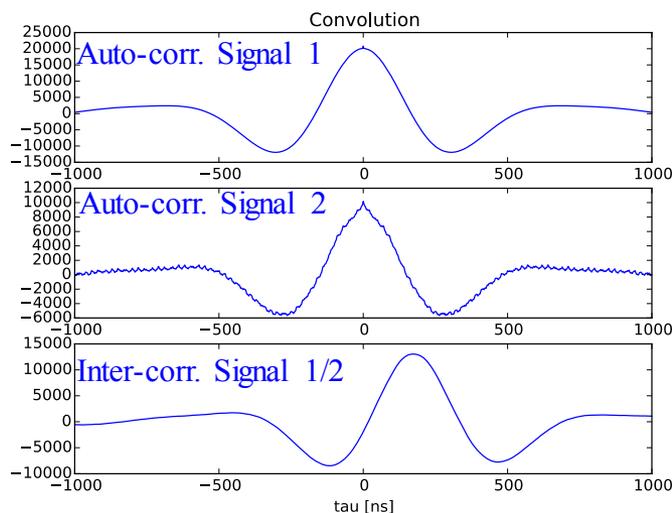
Sources lasers pour l'interférométrie atomique

Asservissement en phase

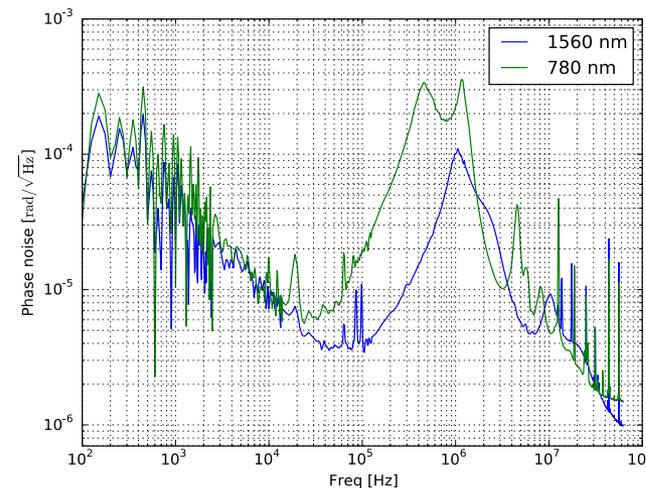
LKB



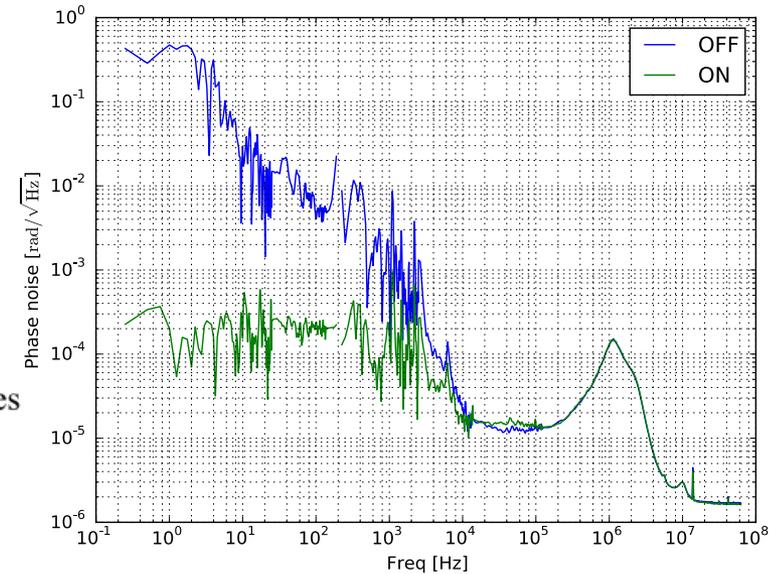
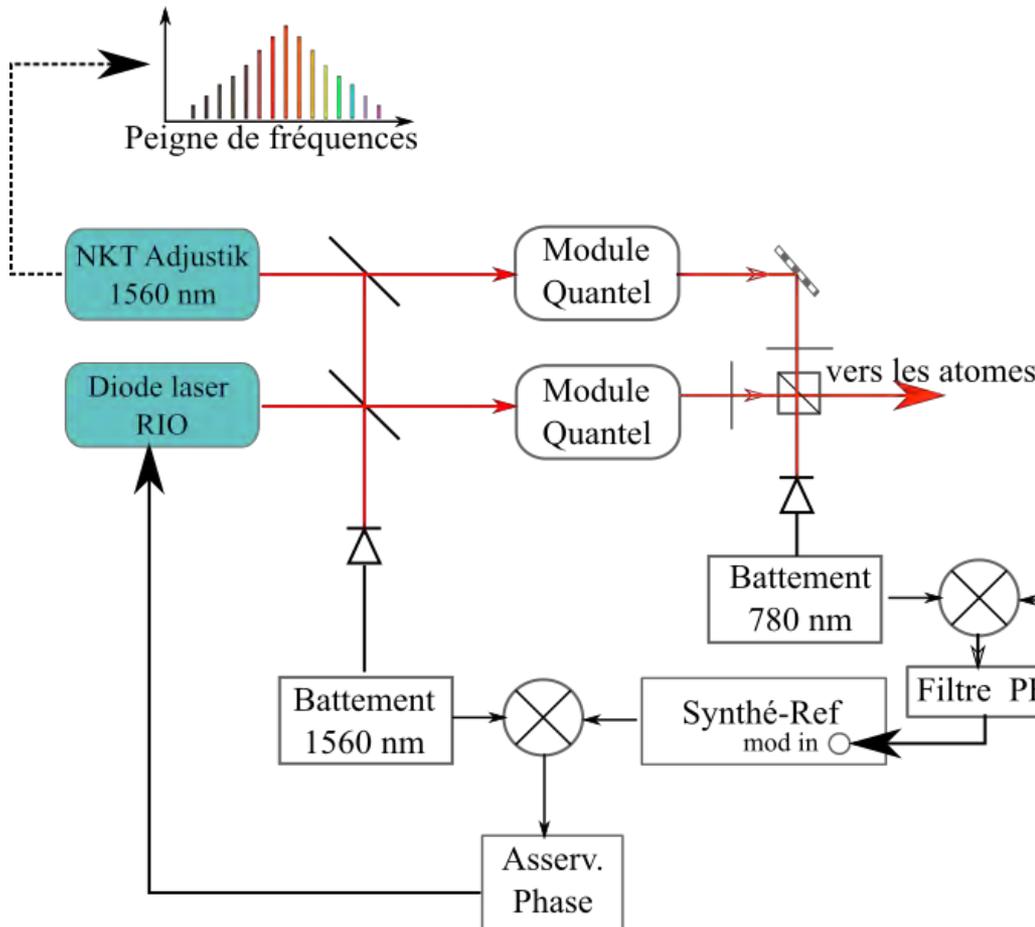
Amplificateur à fibre (35 m) + un étage de doublage de fréquence dans un cristal PPLN en espace libre.

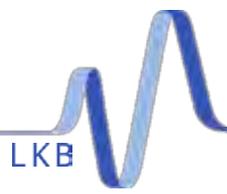


Délai de 200 ns



Sources lasers pour l'interférométrie : correction du bruit accumulé dans la fibre





- Détermination de la constante de structure fine avec une incertitude relative de 7×10^{-10}
- ➔ **Test le plus précis des calculs de la QED**

Améliorations récentes :

- Nouvelles sources lasers pour les OB et l'interférométrie atomique
Réduction de l'effet de la phase de Gouy par un facteur 4.
- Nouveau dispositif expérimental : condensat de Bose-Einstein
Gravimètre compact utilisant les OB sensibilité (préliminaire) de $7 \times 10^{-7} \text{ g}/\sqrt{\text{Hz}}$
Séparatrices à large transfert d'impulsions avec les OB.

Perspectives

- Interféromètre atomique symétrique utilisant des séparatrices à large transfert d'impulsions à l'aide des oscillations de Bloch.

➔ **Incertain sur α au niveau de 10^{-10}**