



**FIRST
TF**



Abdessamad MBARDI



2020-2023

Spectroscopie de l'ion moléculaire H_2^+ pour une nouvelle détermination de la constante fondamentale m_p/m_e .

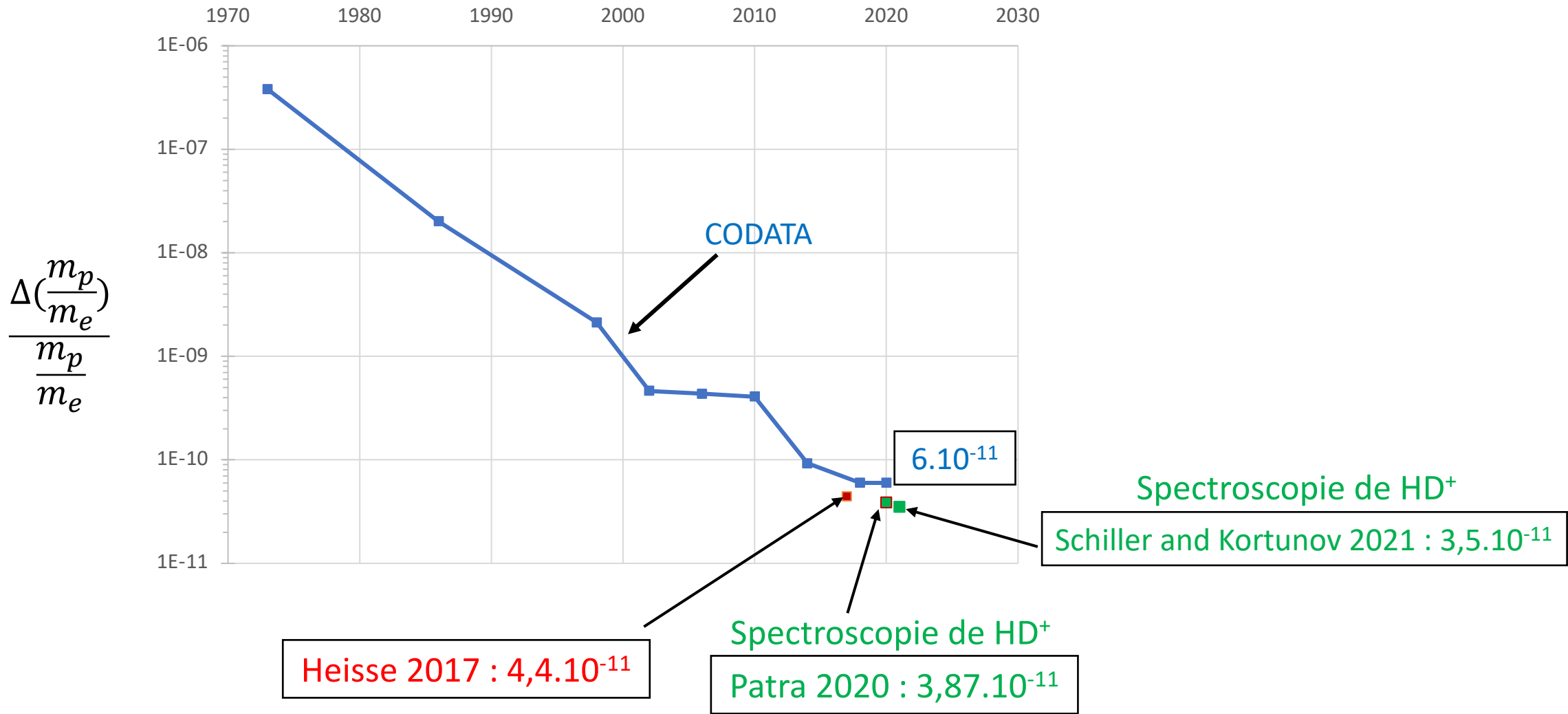
Sous la direction de

Laurent HILICO et Bérengère ARGENCE

Equipe Ions piégés

Etat de l'art de m_p/m_e :

Année



Domaine de travail :

- **Activité expérimentale :** Spectroscopie vibrationnelle de H_2^+
- **But :** Une nouvelle détermination de m_p/m_e

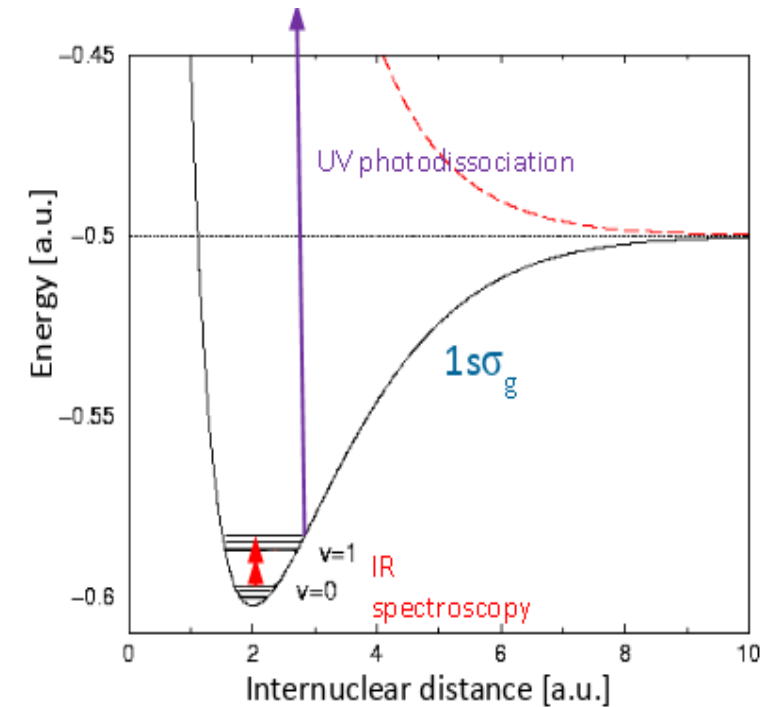
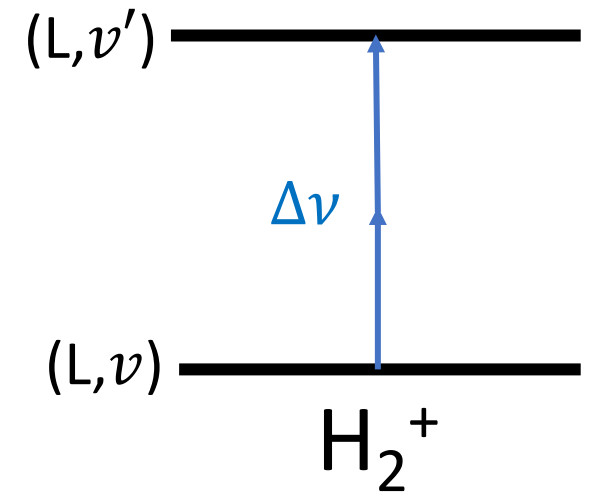
Pourquoi ça peut marcher ?

- Approximation harmonique : $\hbar\omega(v + \frac{1}{2})$
- Fréquence de transition : $\Delta\nu \sim \frac{\omega}{2\pi} \propto \left(\frac{m_p}{m_e}\right)^{-\frac{1}{2}}$

Objectif :

CODATA {
• Valeur numérique : **1836,152 673 43**
• Incertitude relative : **6.0×10^{-11}**

Faire mieux que CODATA : $\frac{\Delta\left(\frac{m_p}{m_e}\right)}{\left(\frac{m_p}{m_e}\right)} \sim 6.0 \times 10^{-12} \rightarrow \frac{\Delta\omega}{\omega} \sim 3.0 \times 10^{-12}$



Outils et méthode expérimentale :

Préparation de H_2^+ à l'état ($L=2, \nu=0$) :

- Ionisation à (3+1) photons des molécules H_2 (REMPI)
- Source laser à 303 nm

Piégeage des ions : Piège de Paul linéaire

Refroidissement sympathique par B_e^+ refroidis par laser à 313nm



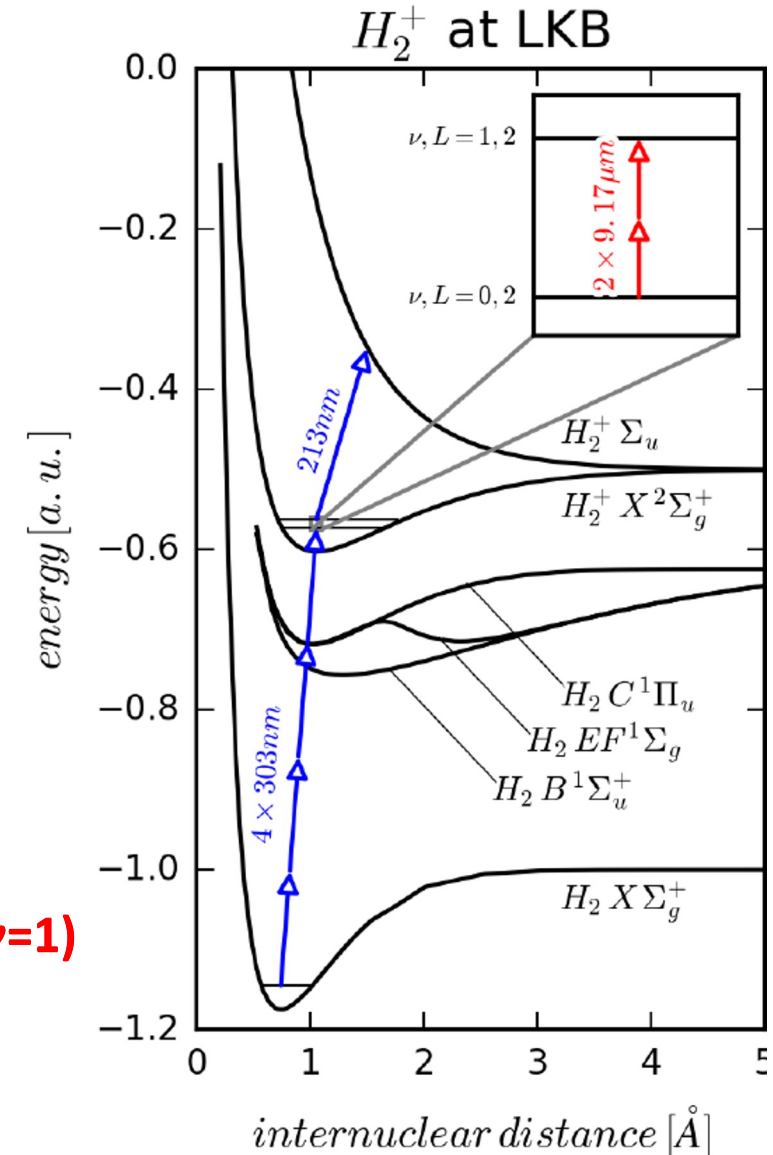
Cristal d'ions

Spectroscopie RMPD :

- Excitation à 2 photons @9.17 μm (QCL) : ($L=2, \nu=0$) \rightarrow ($L=2, \nu=1$)
- Dissociation à 213nm : Détection de la transition

\longrightarrow Signal de spectroscopie : Perte d'ions

Objectif : 10^{-12} x 33THz \longrightarrow 33Hz

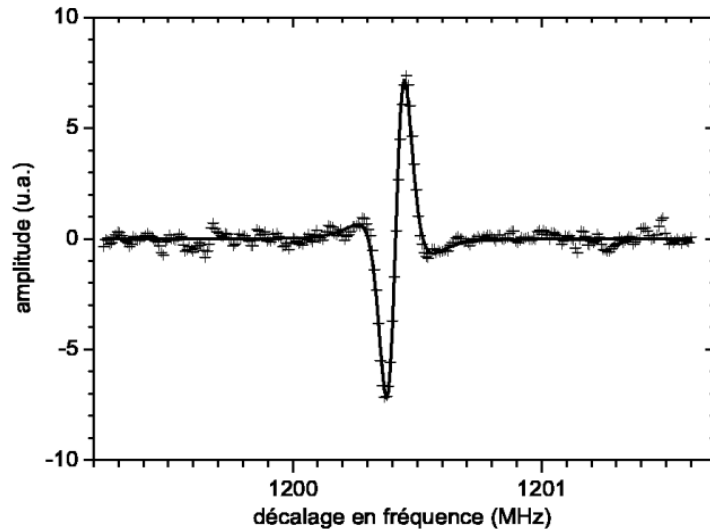


Référence de fréquence pour l'asservissement du QCL

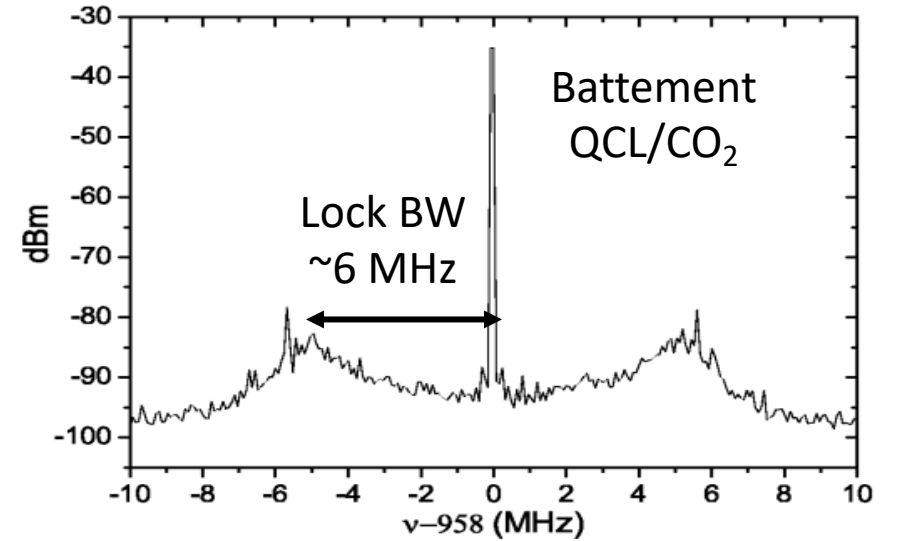
- QCL (9.17 μm) asservi sur un laser à CO_2

L'ancien système

- CO_2 asservi sur une raie de l'acide formique (HCOOH) (absorption saturée)



exactitude $\sim \text{kHz} \gg 33\text{Hz}$

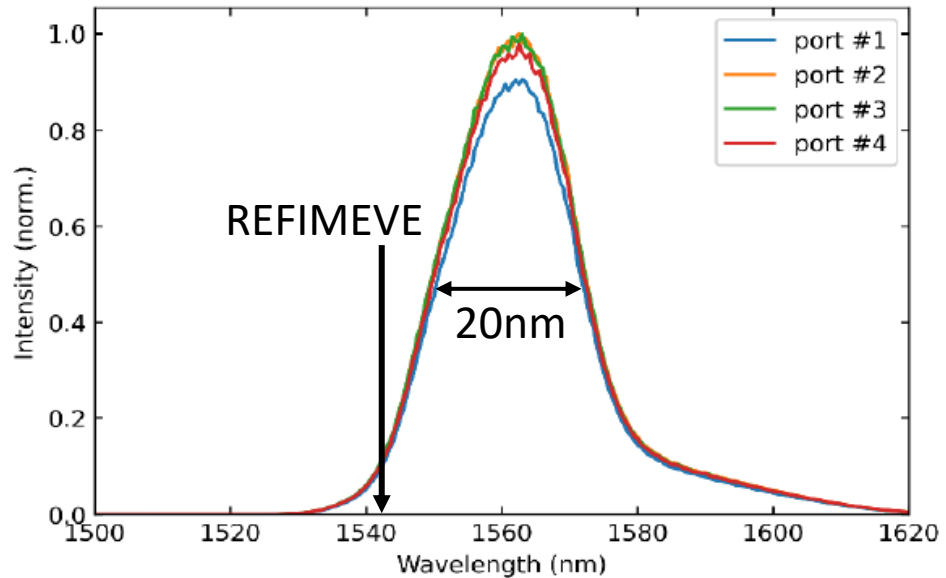


Nouvelle méthode

- Utilisation d'un peigne de fréquence référencé sur le signal T-REFIMEVE

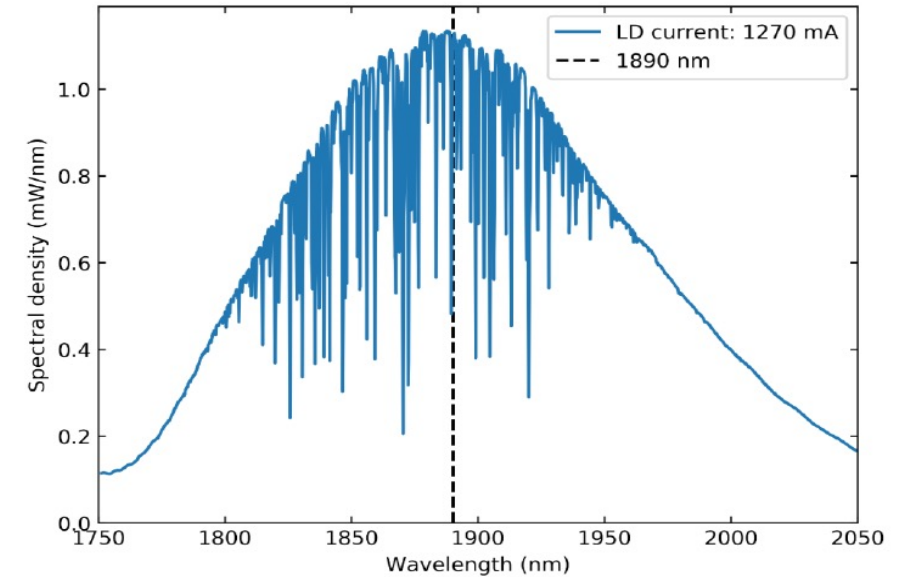
Peigne de fréquence et T-REFIMEVE :

- Modes du peigne : $f_n = f_0 + n f_{rep}$
- Sortie principale @1.56 μm



Extension

- Module d'extension @1.9 μm

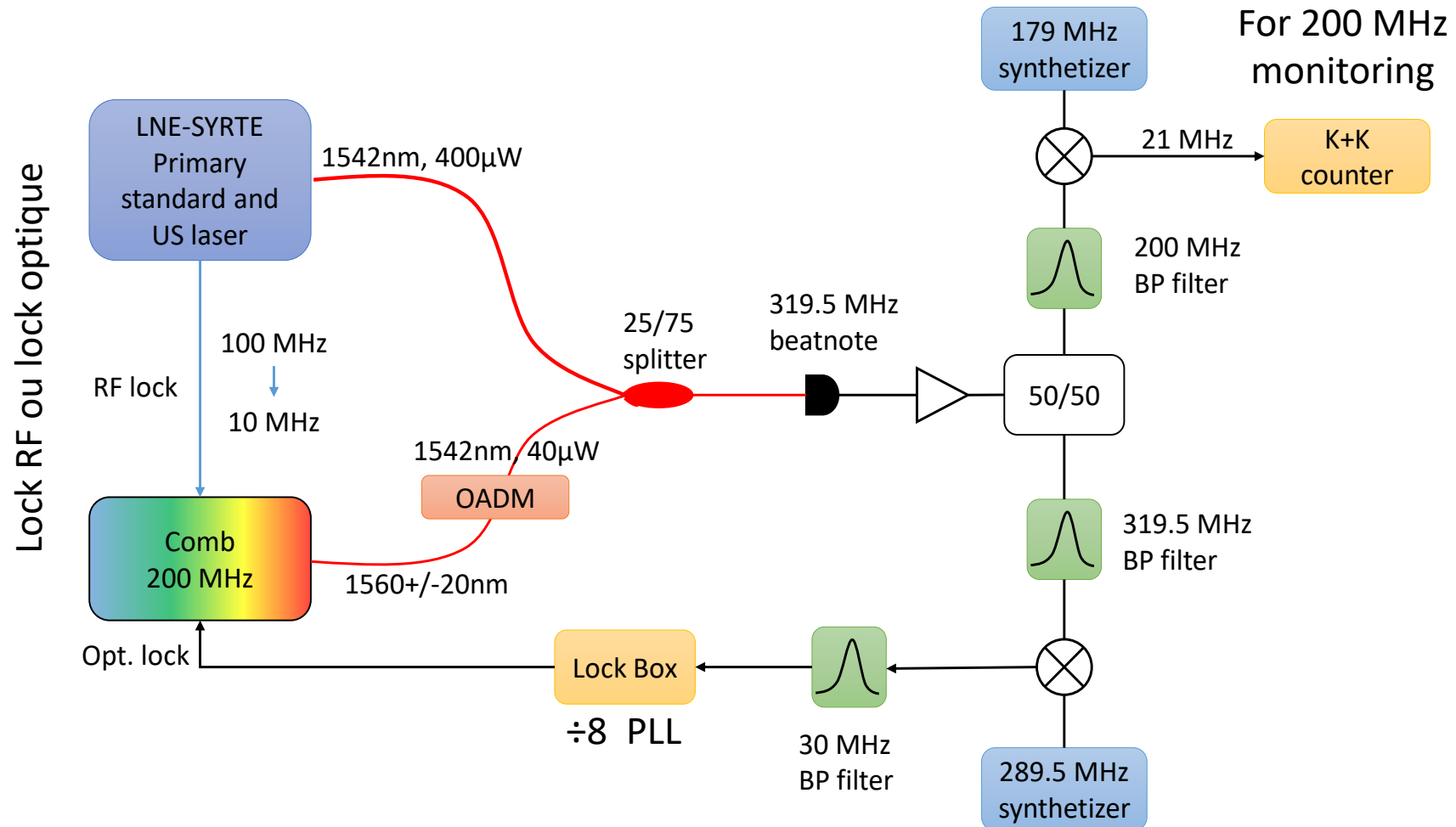


T-REVIMEVE au LKB :

- 1.542 μm
- 194 400 319 500 000 +/- 2Hz
- Stabilité < 10^{-14} @ 1s

Asservissement du Peigne sur T-REFIMEVE

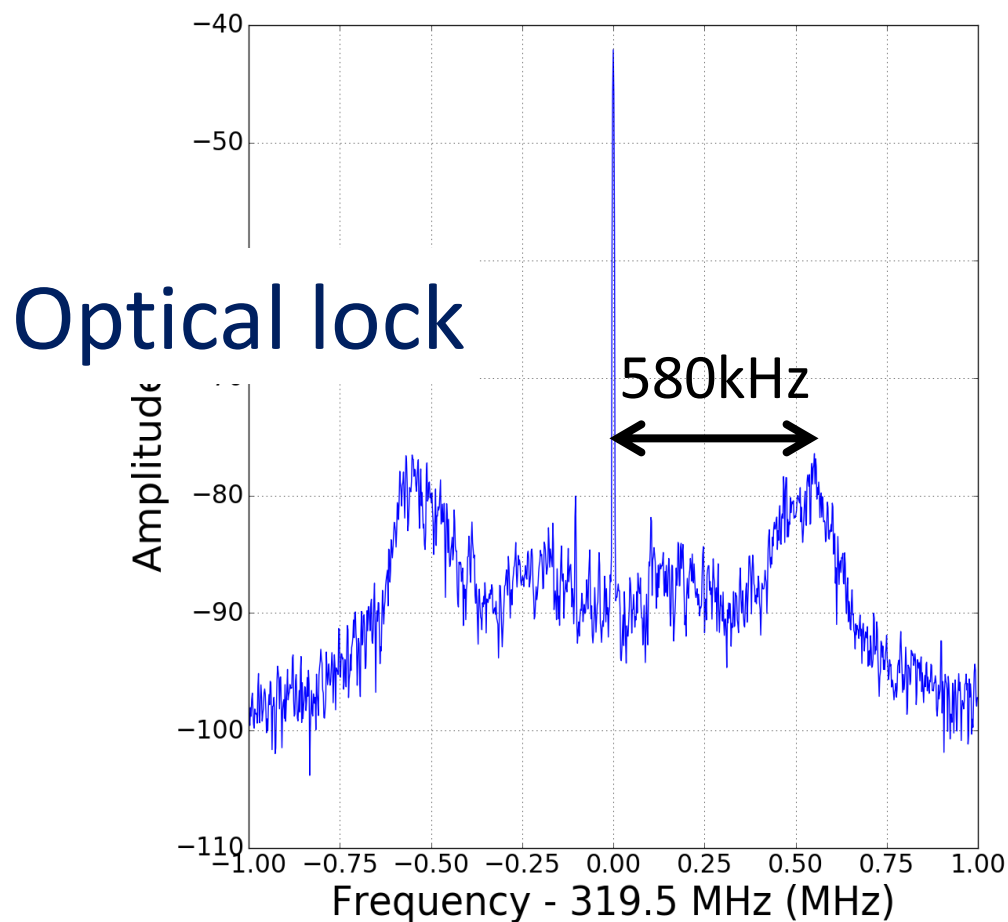
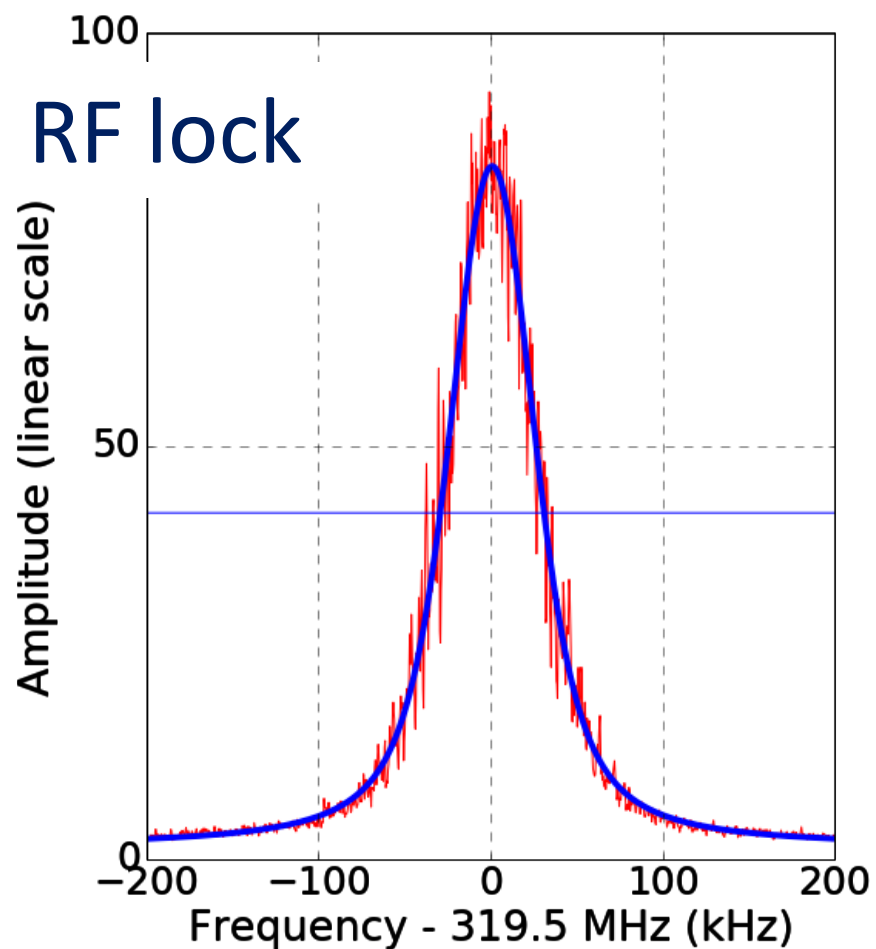
REFIMEVE @Jussieu : $972\,000 \times 200 + 119.5 \text{ MHz} = 971\,999 \times 200 + \mathbf{319,5 \text{ MHz}}$



Asservissement du Peigne sur T-REFIMEVE :

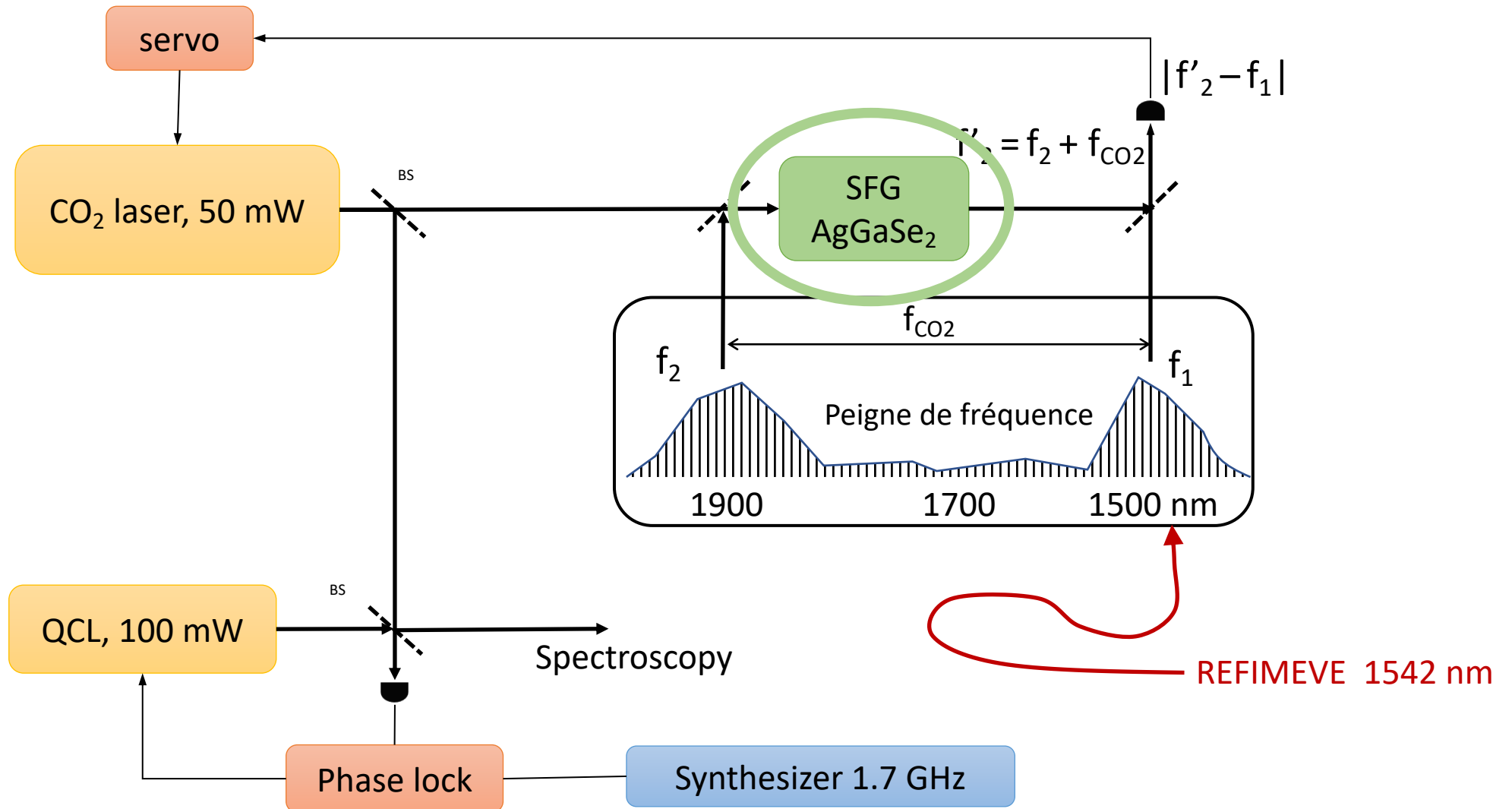
Gauss FWHM = 28.8 kHz
Lorentz FWHM = 38.1 kHz
Voigt FWHM = 61 kHz

SNR \approx 50 dB (3 kHz RBW, 300 Hz VBW)
35 dB (100 kHz RBW)
Locking BW = 580 kHz



Synthèse de fréquence à 32.7 THz

Mélange non-linéaire dans AgGaSe_2 : $\frac{1}{1.9} + \frac{1}{9.17} = \frac{1}{1.56\mu\text{m}}$



Synthèse de fréquence à 32.7 THz

SFG dans AgGaSe_2 :

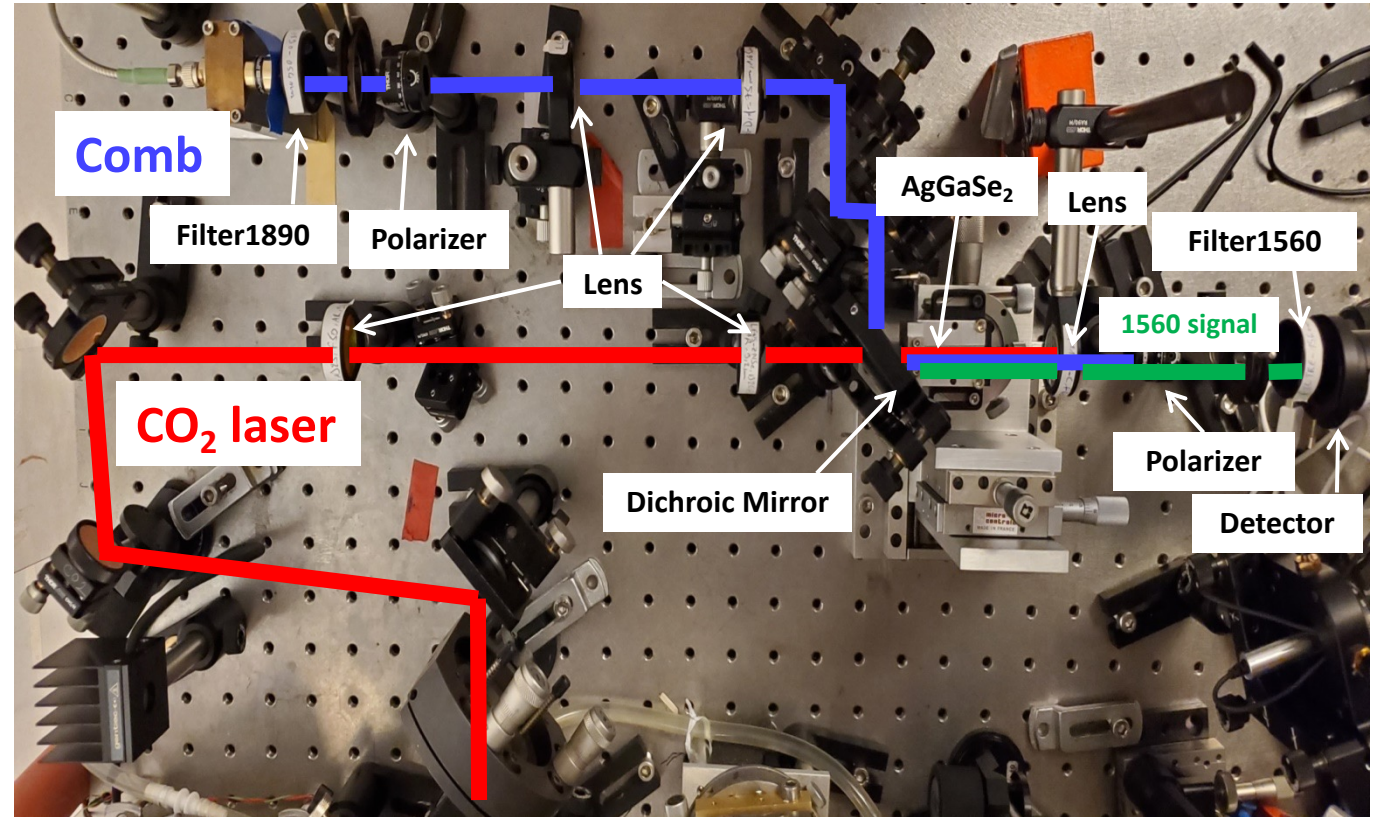
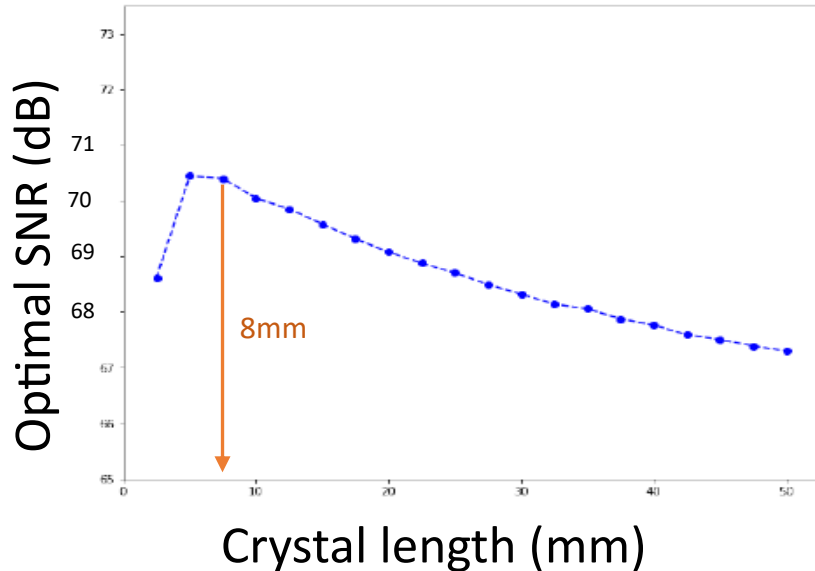
Simulation numérique de la SFG : J.J.Zondy

Cas monochromatique :

Efficacité de conversion optimale $\sim 2.5 \text{ mW/W}^2$:

- $(\omega_{\text{CO}_2}, \omega_{1.9}) \sim (50 \mu\text{m}, 40 \mu\text{m})$

Longueur optimale du cristal pour la SFG



Résultats :

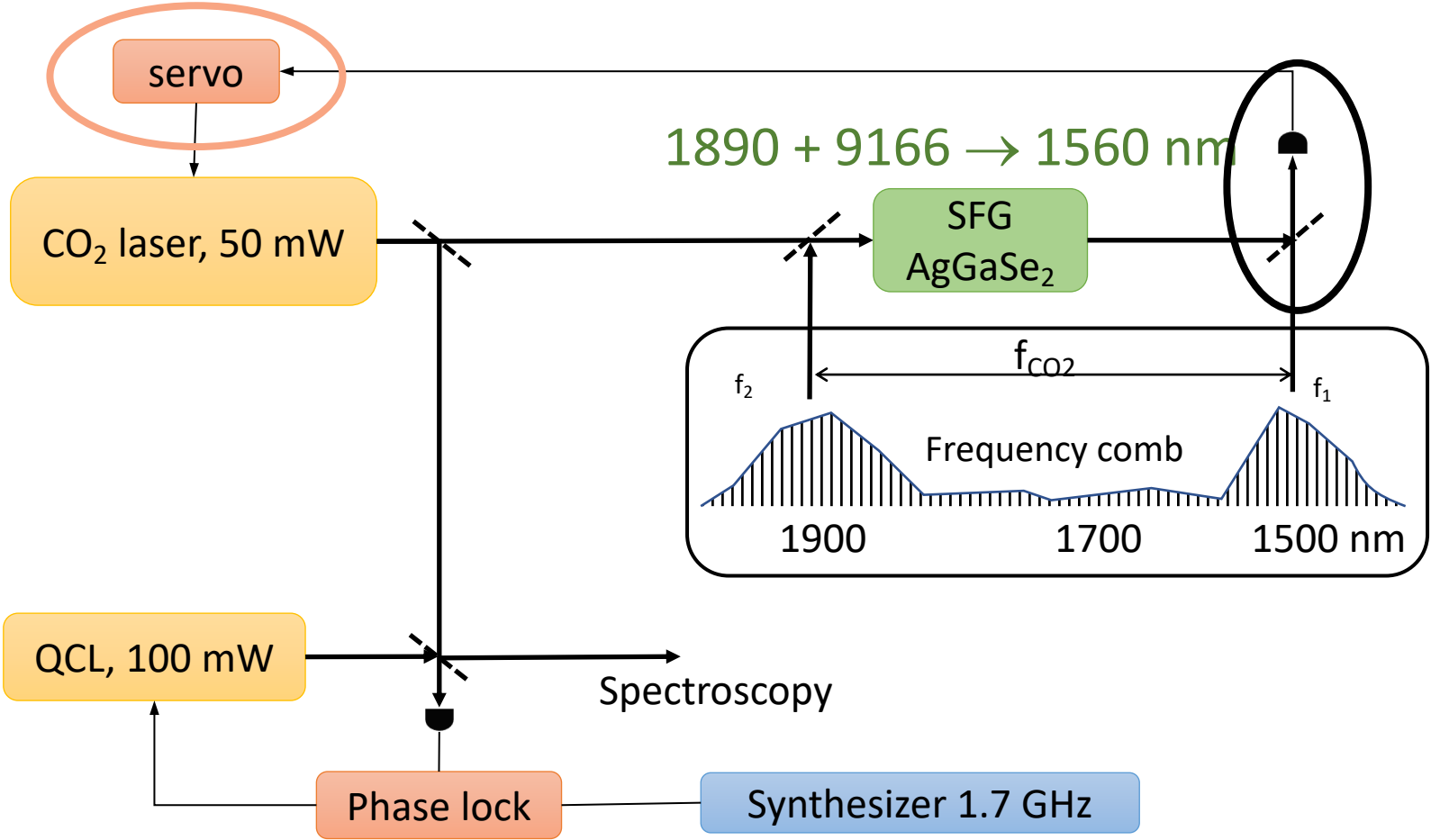
$18 \text{ mW comb @ } 1.89 \mu\text{m} + 87 \text{ mW @ } 9.17 \mu\text{m} \Rightarrow 1.1 \mu\text{W @ } 1.55 \mu\text{m}$

600 nW après le polariseur ($T = 85\%$) et le filtre ($T = 67\%$)

Efficacité de conversion = 0.7 mW/W^2

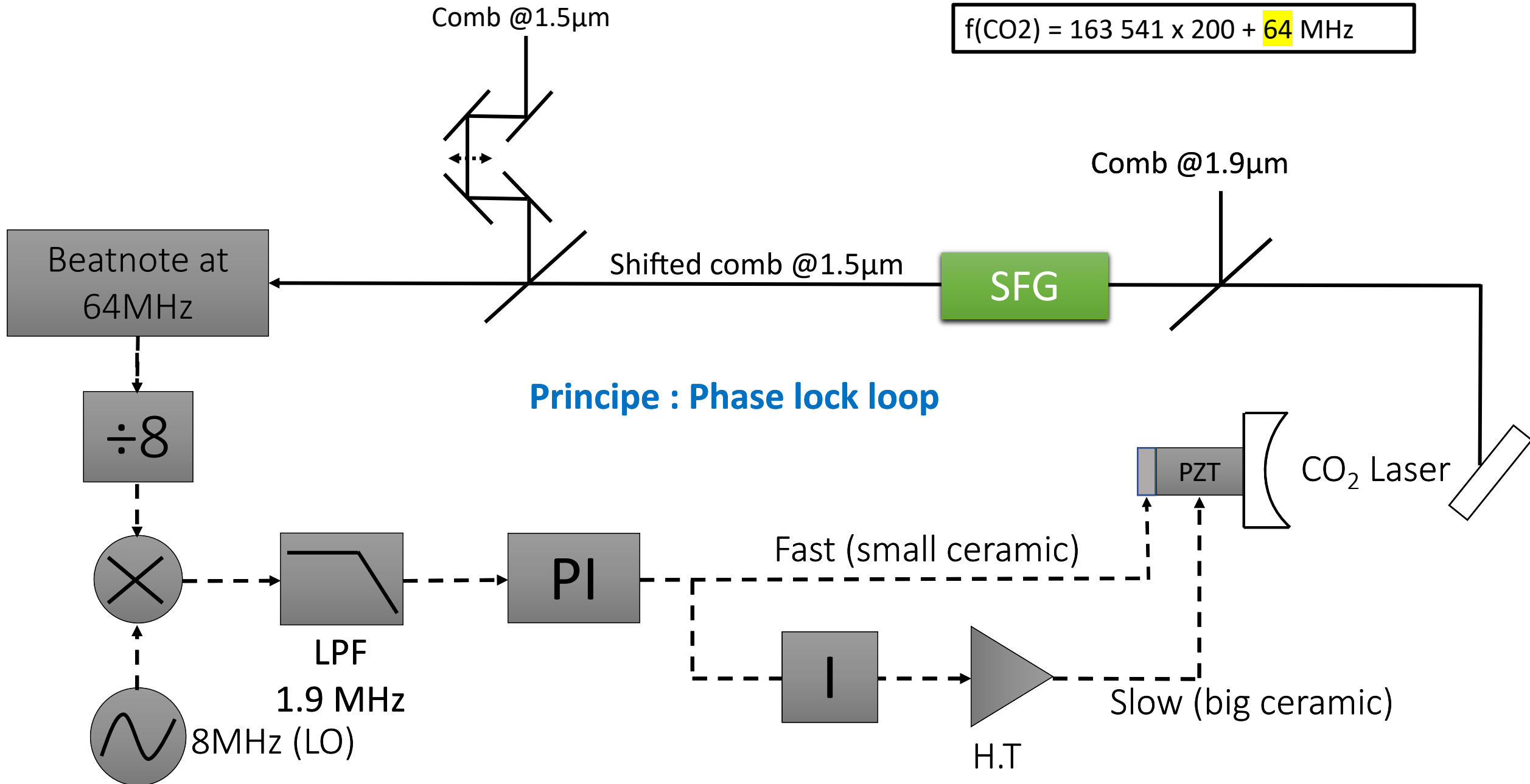
A comparer avec l'efficacité théorique 1.6 mW/W^2

Synthèse de fréquence à 32.7 THz



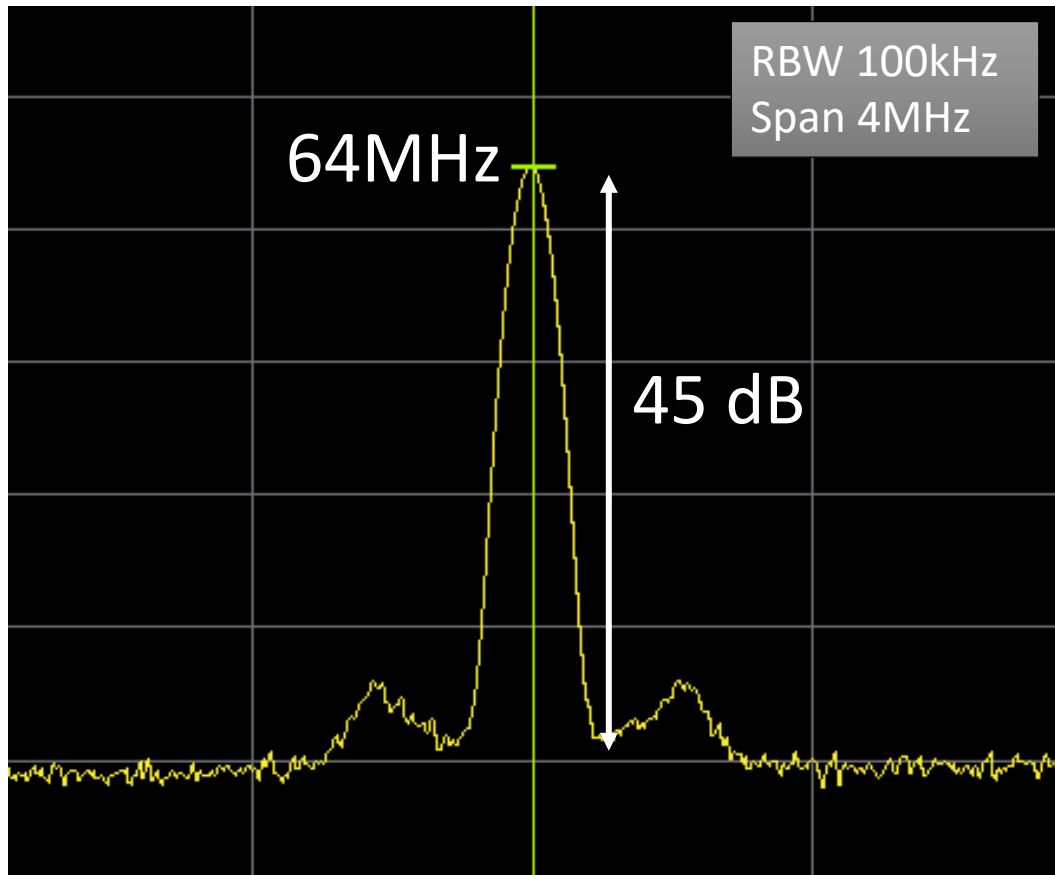
Synthèse de fréquence à 32.7 THz

$$f(\text{CO}_2) = 163\,541 \times 200 + 64 \text{ MHz}$$

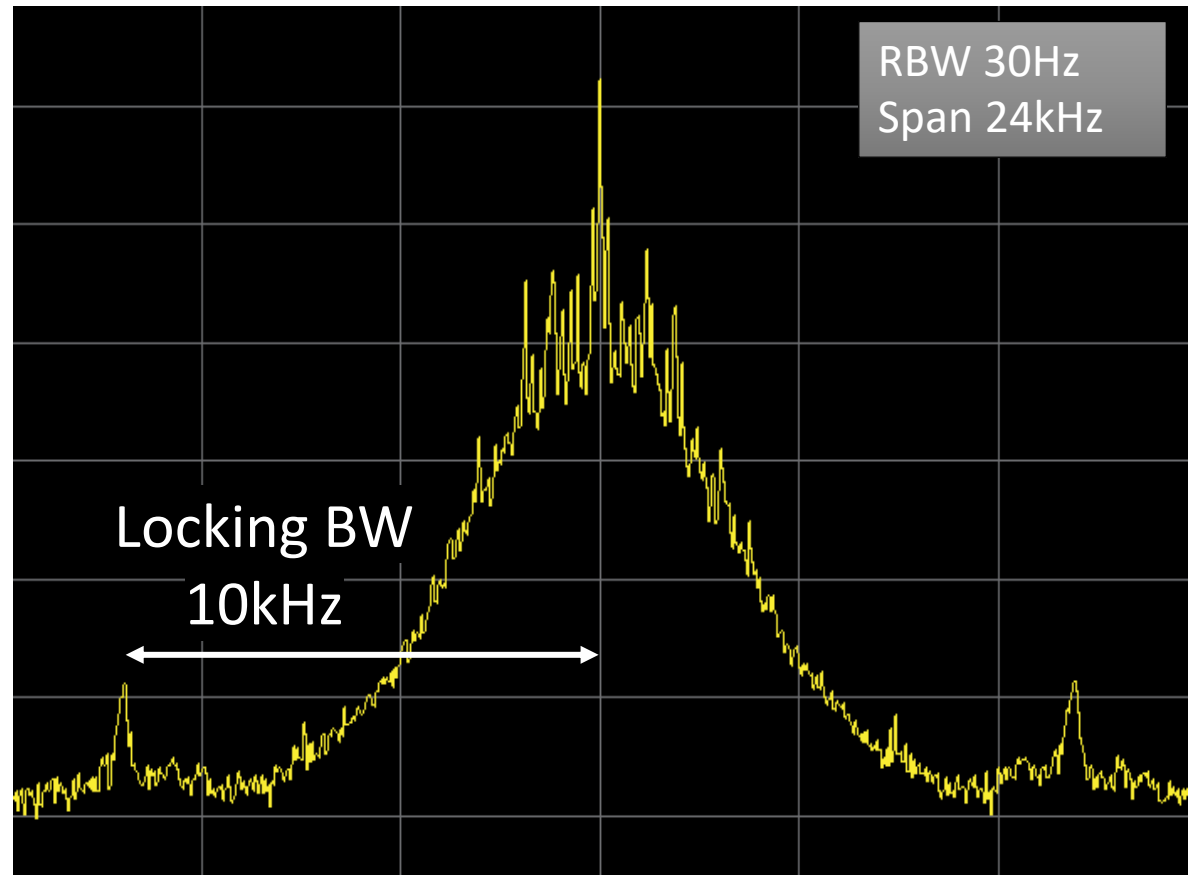


Synthèse de fréquence à 32.7 THz

Battement CO2/peigne : 45 dB (dans 100kHz RBW)



Battement asservi

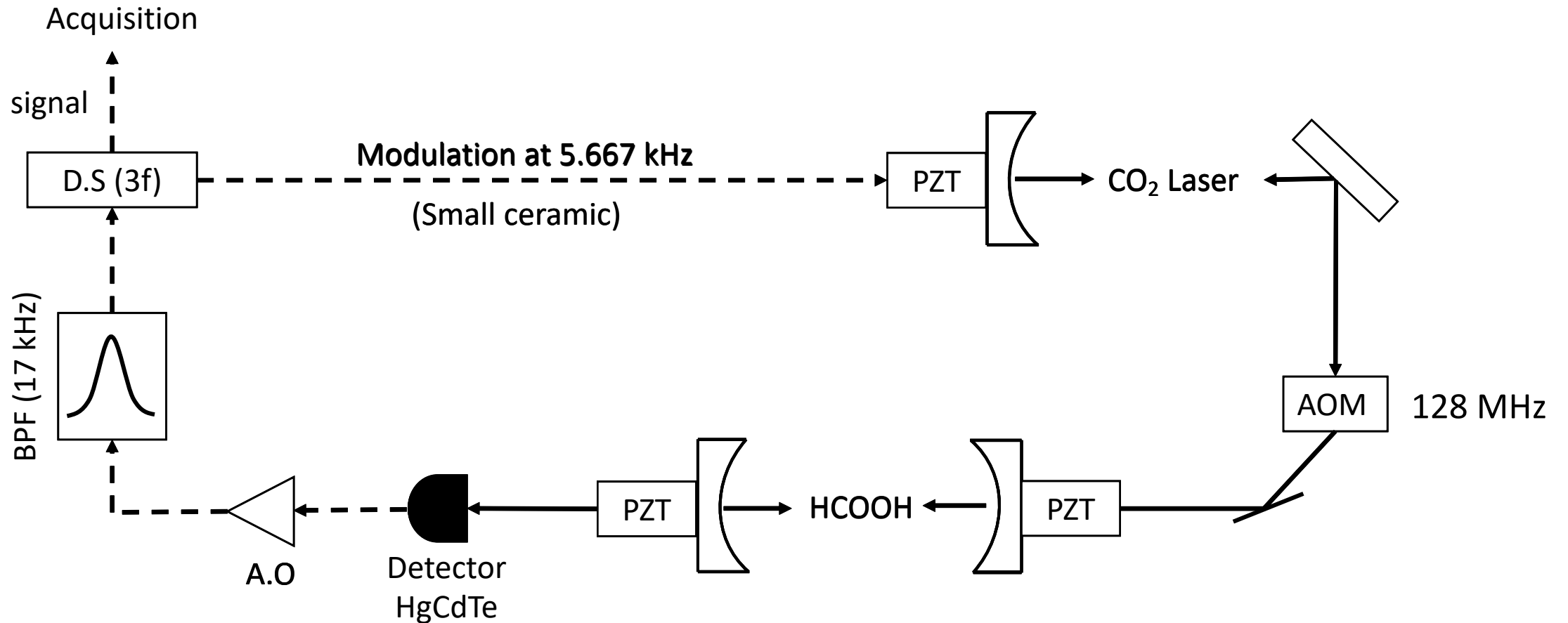


x 250

Application : Spectroscopie de l'acide formique

Principe : l'absorption saturée

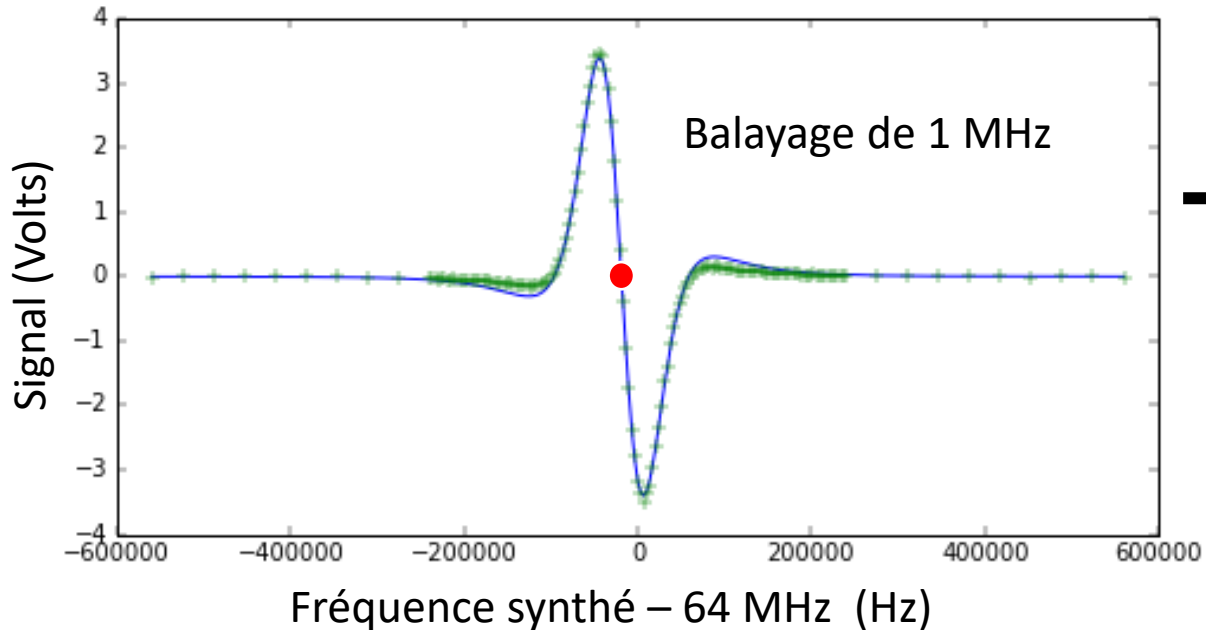
- $f(\text{HCOOH}) - f(\text{CO}_2 : 9\text{R}(42)) = 128 \text{ MHz}$



Application : Spectroscopie de l'acide formique

- Pression de HCOOH : $2 \cdot 10^{-3}$ mbar
- Puissance intra-cavité : $400 \mu\text{W}$

Résultats préliminaires



→ Ajustement avec la dérivée 3^{ème} d'une lorentzienne

- $f_{\text{HCOOH}} = (p \times f_{\text{rep}}) + 128\text{MHz} + [8\text{MHz} + (-2,33\text{kHz})] \times 8$

$$f_{\text{HCOOH}} = 32\,708\,391\,981\,352 \pm 250 \text{ Hz}$$

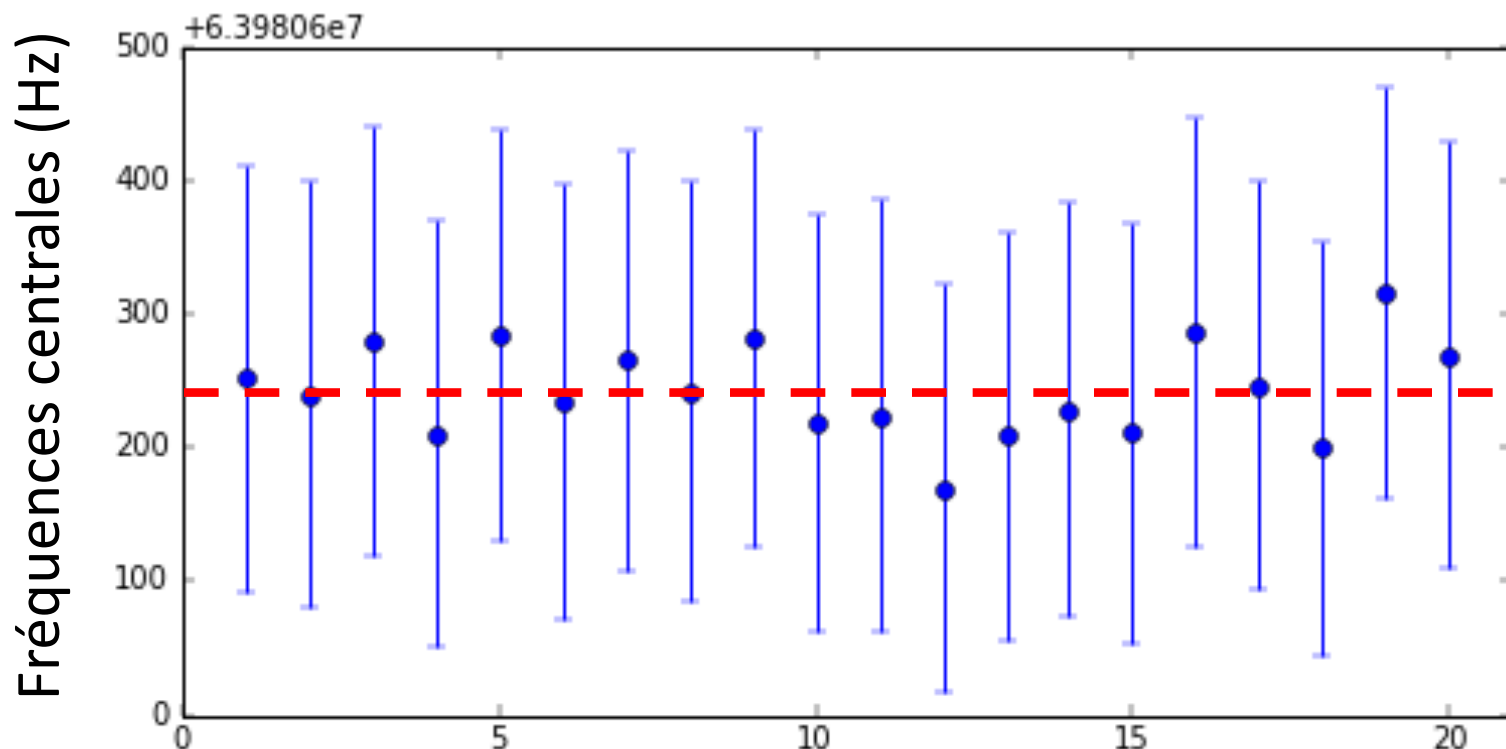
- FWHM = 161 kHz

Application : Spectroscopie de l'acide formique

- Pression de HCOOH : 0.2 μ bar
- Puissance intra-cavité : 130 μ W
- Modulation depth : 30 kHz

Résultats préliminaires

32 708 391 980,844 kHz



37 Hz
Répétabilité du pointé de raie

Conclusion

- Ions piégés et refroidis
- Changement de la méthode d'asservissement du laser de spectroscopie
Utilisation d'un peigne de fréquence référencé au SI
- Application sur la spectroscopie de l'acide formique
- Spectroscopie de l'ion moléculaire H_2^+