

Systemes de Référence Temps-Espace

SYRTE

Trous brûlés spectraux pour lasers ultrastables

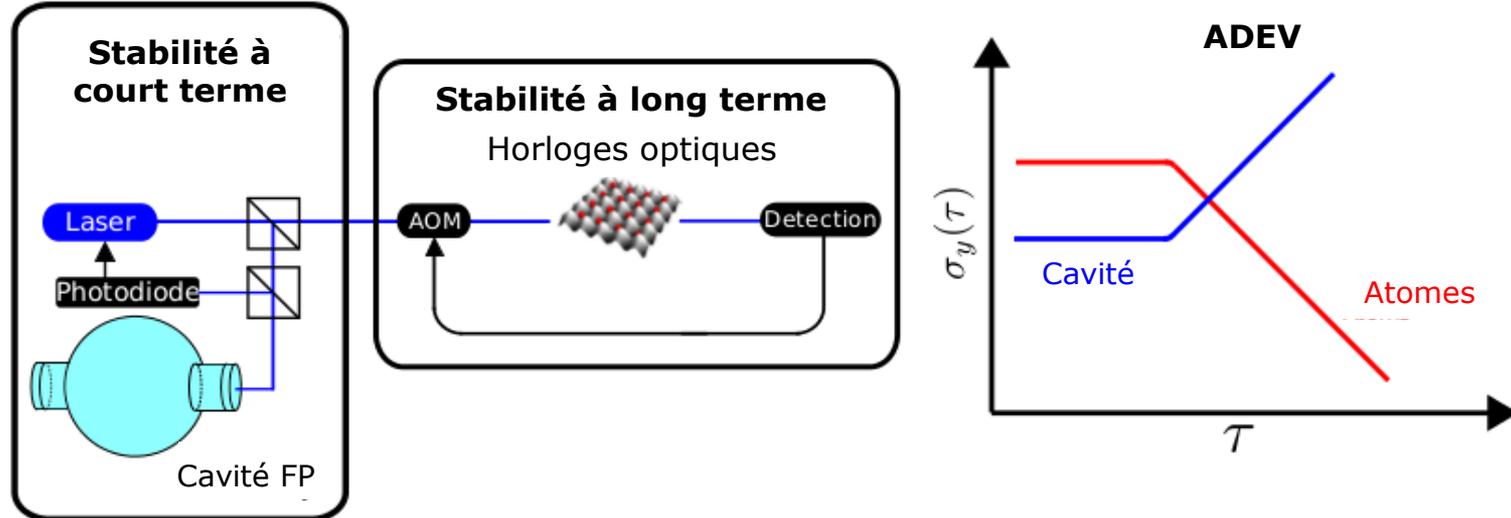
Bess FANG¹, N Galland^{1,2}, N Lucic¹, S Zhang¹, R Le Taragat¹, H Alvarez Martinez, A Ferrier³, P Goldner³, S Seidelin², and Y Le Coq¹

1. LNE-SYRTE, Observatoire de Paris, Université PSL, CNRS, Sorbonne Université
2. Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP and Institut Néel
3. Chimie ParisTech, Université PSL, CNRS, Institut de Recherche de Chimie Paris

- **Motivation**
- **Trous brûlés spectraux dans des cristaux dopés aux ions de terre rare**
- **Asservissement de fréquence de laser**
- **Sensibilité aux champs électrique**
- **Sensibilité aux contraintes mécaniques**
- **Conclusions et perspectives**

Pour la métrologie des fréquences optiques

S Y R T E



L'effet Dick > Bruits de projection quantique > Bruit de détection

□ Bruit de projection quantique dans des horloges optiques

- $< 10^{-17}$ à 1 s pour des horloges à réseaux optiques
- MAIS lasers asservis sur des cavités Fabry-Perot classiques $\sim 10^{-16}$ at 1s
-> l'effet Dick

□ Lasers ultrastables de nouvelle génération

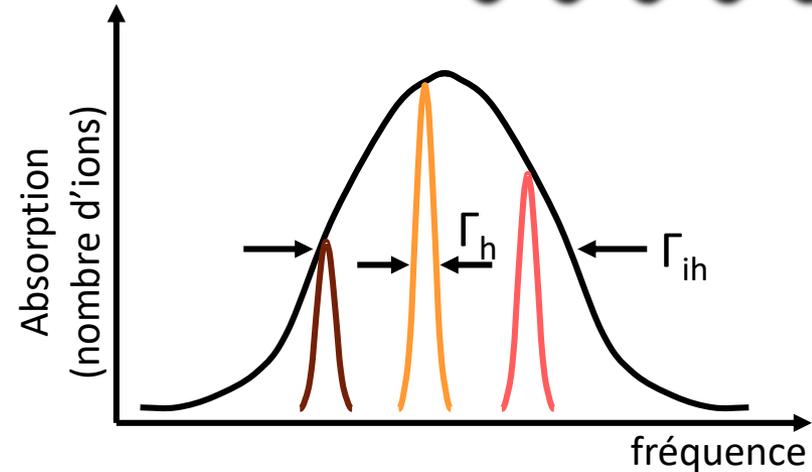
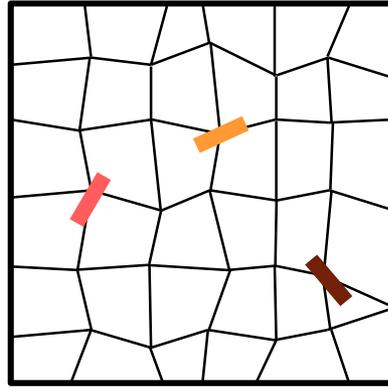
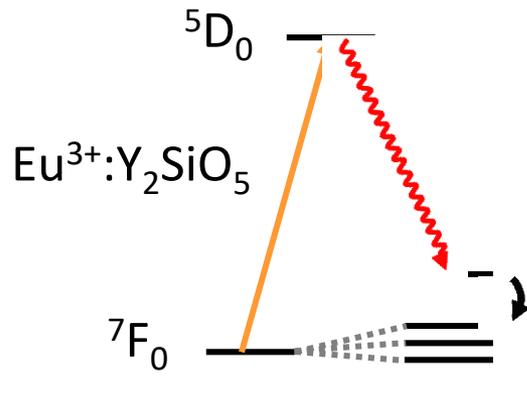
- Améliorer les cavités FP ou changer le techno ?

□ Autres capteurs ?

- Ex : capteur de force et optomécanique

Trous brûlée spectraux dans $\text{Eu}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$

S Y R T E



□ $\text{Eu}^{3+} : [\text{Xe}] 4f^6$

- Blindage par les électrons en 5s and 5p -> faible largeur de raie (terre rare)
- $^7\text{F}_0 \rightarrow ^5\text{D}_0$ à 580 nm, T_2 (optique) = 2.6 ms (1.4 K) -> $\Gamma_h = 122$ Hz attendu

□ Propriétés intéressantes pour trous spectraux

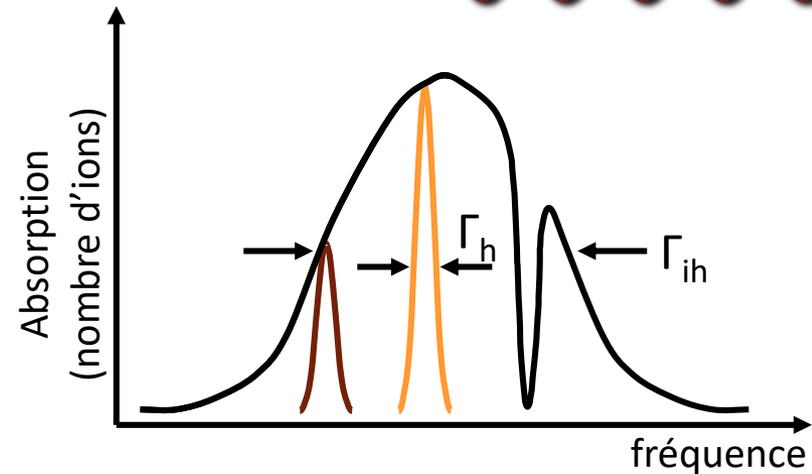
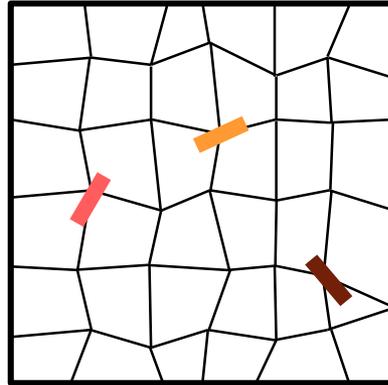
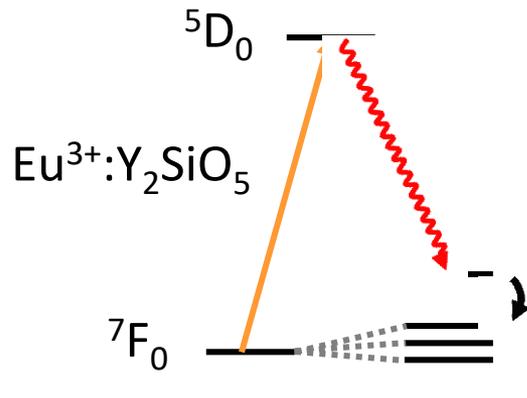
- Durée de vie dans les états metastables ~ 10 h à 4 K -> structures spectraux persistentes (protocol pompe / sonde)
- Grand nombre d'ions -> RSB favorable
- Bas bruit thermique attendu

□ Au-delà de la métrologie des fréquences optiques

- Intrication entre ions ? (actuellement étudié pour les mémoires quantiques, ex. Chimie Paris, Lund, ICFO, KIT, MIT, ...)
- Sensibilité aux contraintes -> capteur de force ?

Trous brûlée spectraux dans $\text{Eu}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$

S Y R T E



□ $\text{Eu}^{3+} : [\text{Xe}] 4f^6$

- Blindage par les électrons en 5s and 5p -> faible largeur de raie (terre rare)
- ${}^7\text{F}_0 \rightarrow {}^5\text{D}_0$ à 580 nm, T_2 (optique) = 2.6 ms (1.4 K) -> $\Gamma_h = 122$ Hz attendu

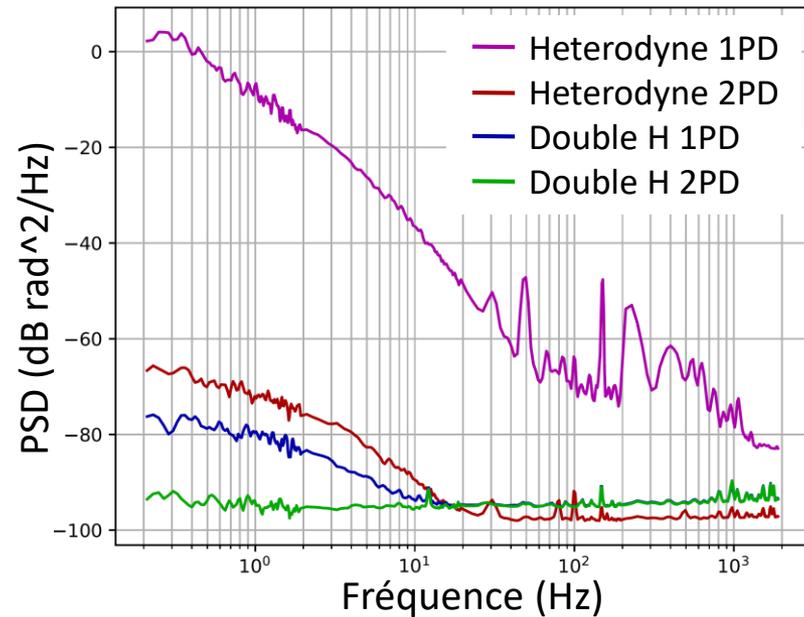
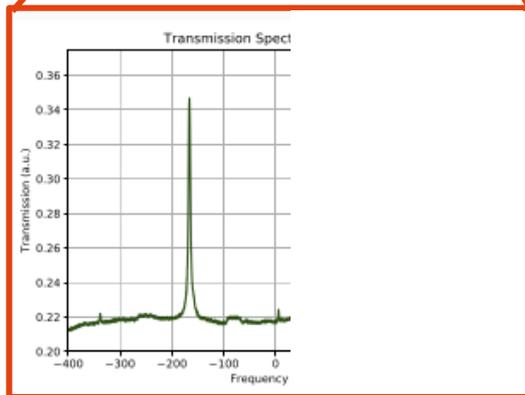
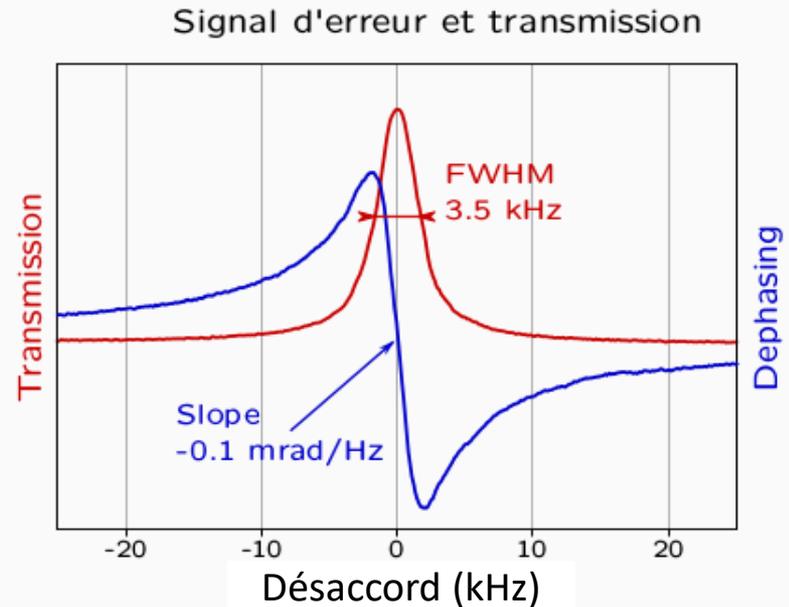
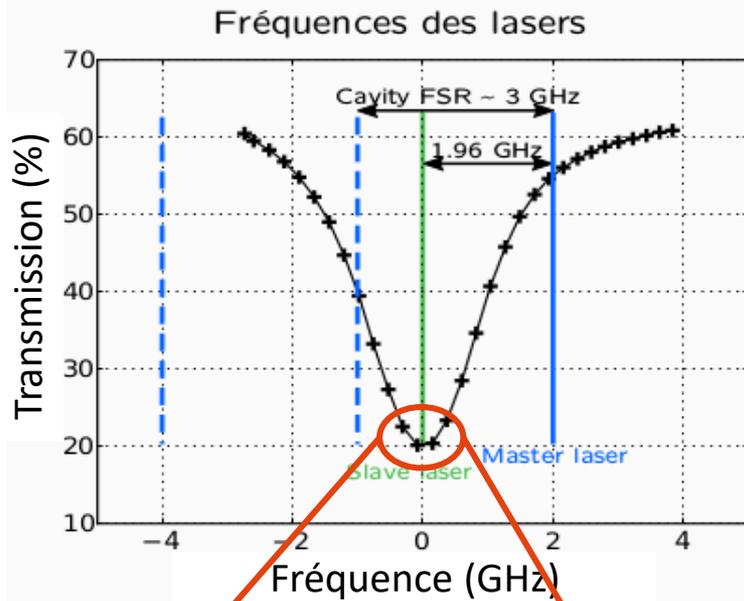
□ Propriétés intéressantes pour trous spectraux

- Durée de vie dans les états métastables ~ 10 h à 4 K -> structures spectraux persistentes (protocol pompe / sonde)
- Grand nombre d'ions -> RSB favorable
- Bas bruit thermique attendu

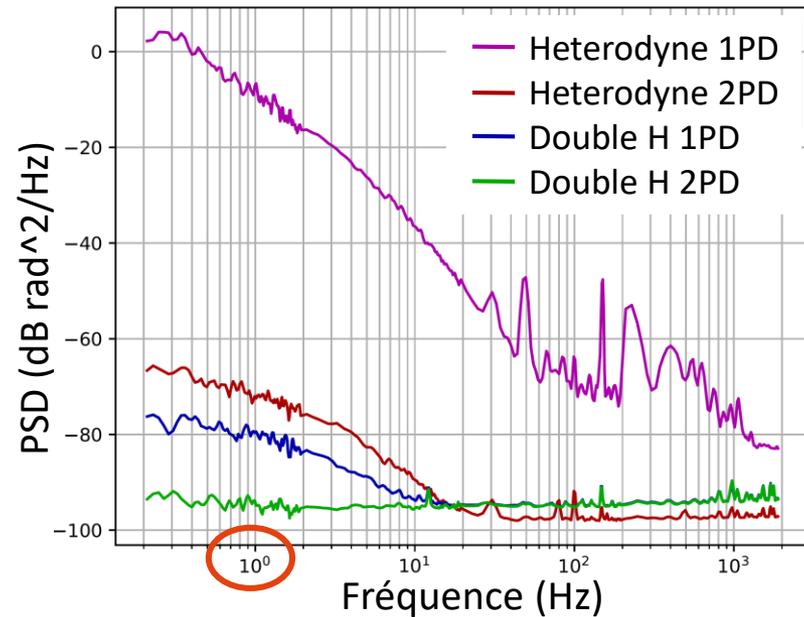
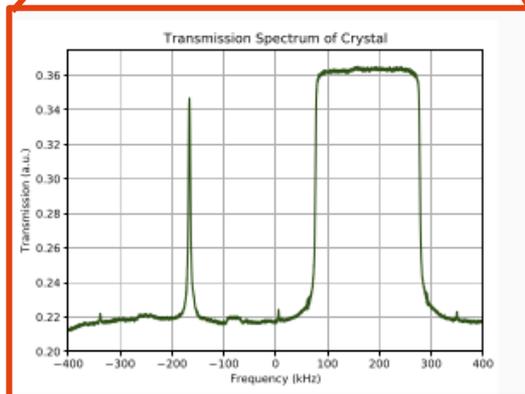
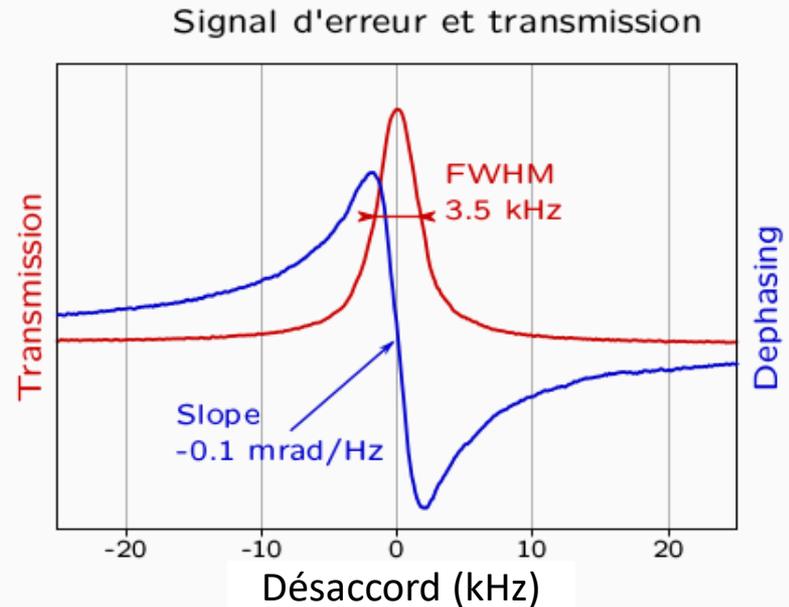
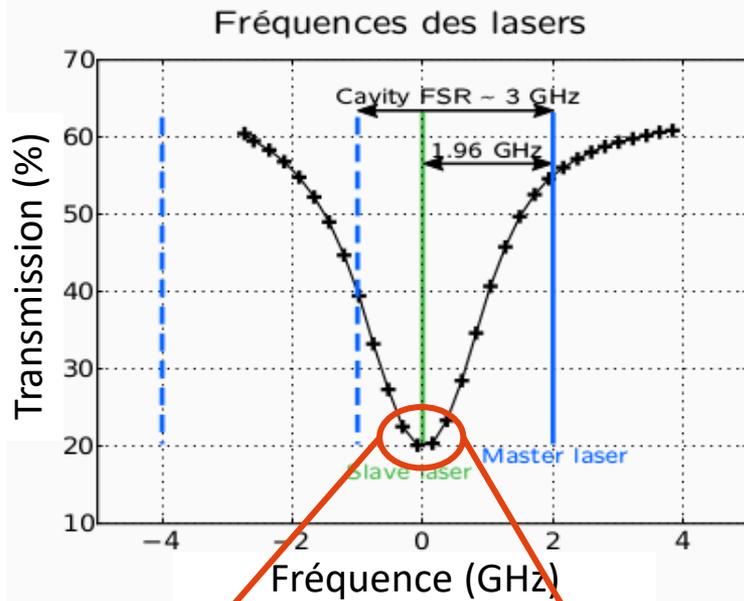
□ Au-delà de la métrologie des fréquences optiques

- Intrication entre ions ? (actuellement étudié pour les mémoires quantiques, ex. Chimie Paris, Lund, ICFO, KIT, MIT, ...)
- Sensibilité aux contraintes -> capteur de force ?

TBS pour lasers ultrastables

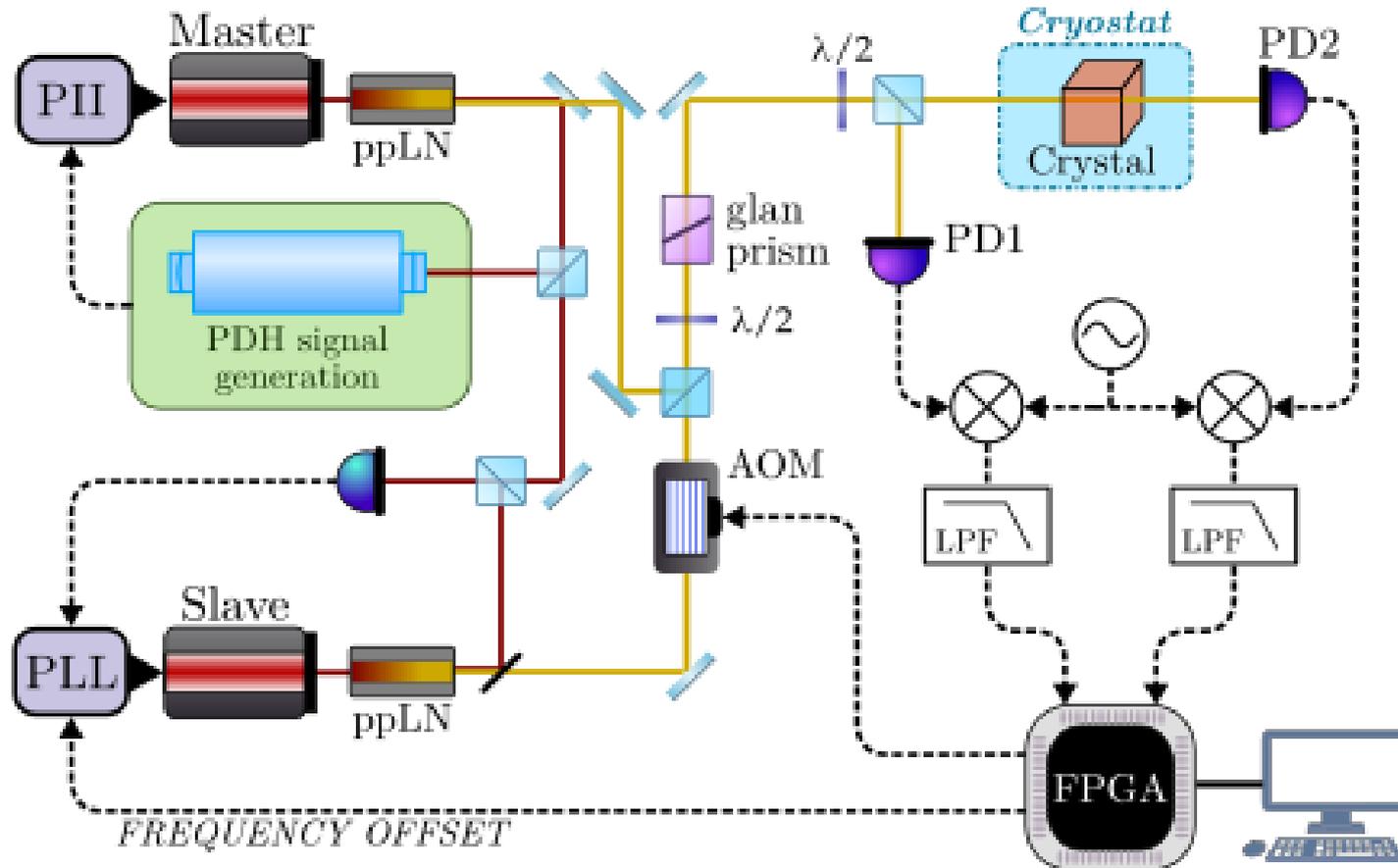


TBS pour lasers ultrastables



Système lasers

S Y R T E



- Maître : référence de phase (hors resonance des ions)
 Esclave : sonder les trous spectraux
 Contrôle : FPGA+DAC1+AOM : génération du spectre arbitraire de l'esclave
 FPGA+DAC2+offset PLL : servo ou scan de l'esclave
 Mesure: FPGA+ADC1&2 : déphasage de l'esclave = spectroscopie

Manipulation de fréquence

Ettus research + GnuRadio SDR (radio logiciel)



2 ADC 200MSPS 14 bits

2 DAC 800MSPS 16 bits

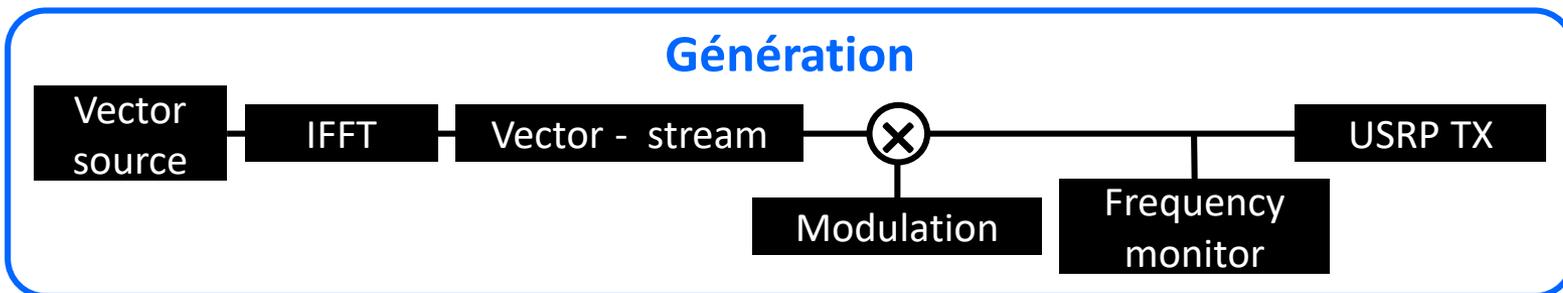
Xilinx Kintex 7 FPGA 2 DUC et 2 DDC

→ stream avec le PC (10Gb ethernet)

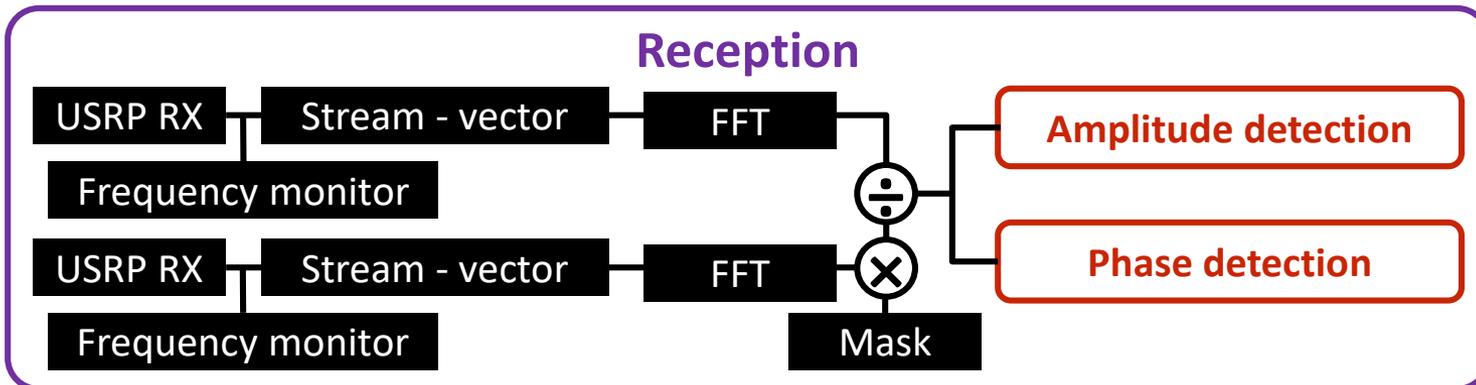


Traitement des données sur PC, Python and C++

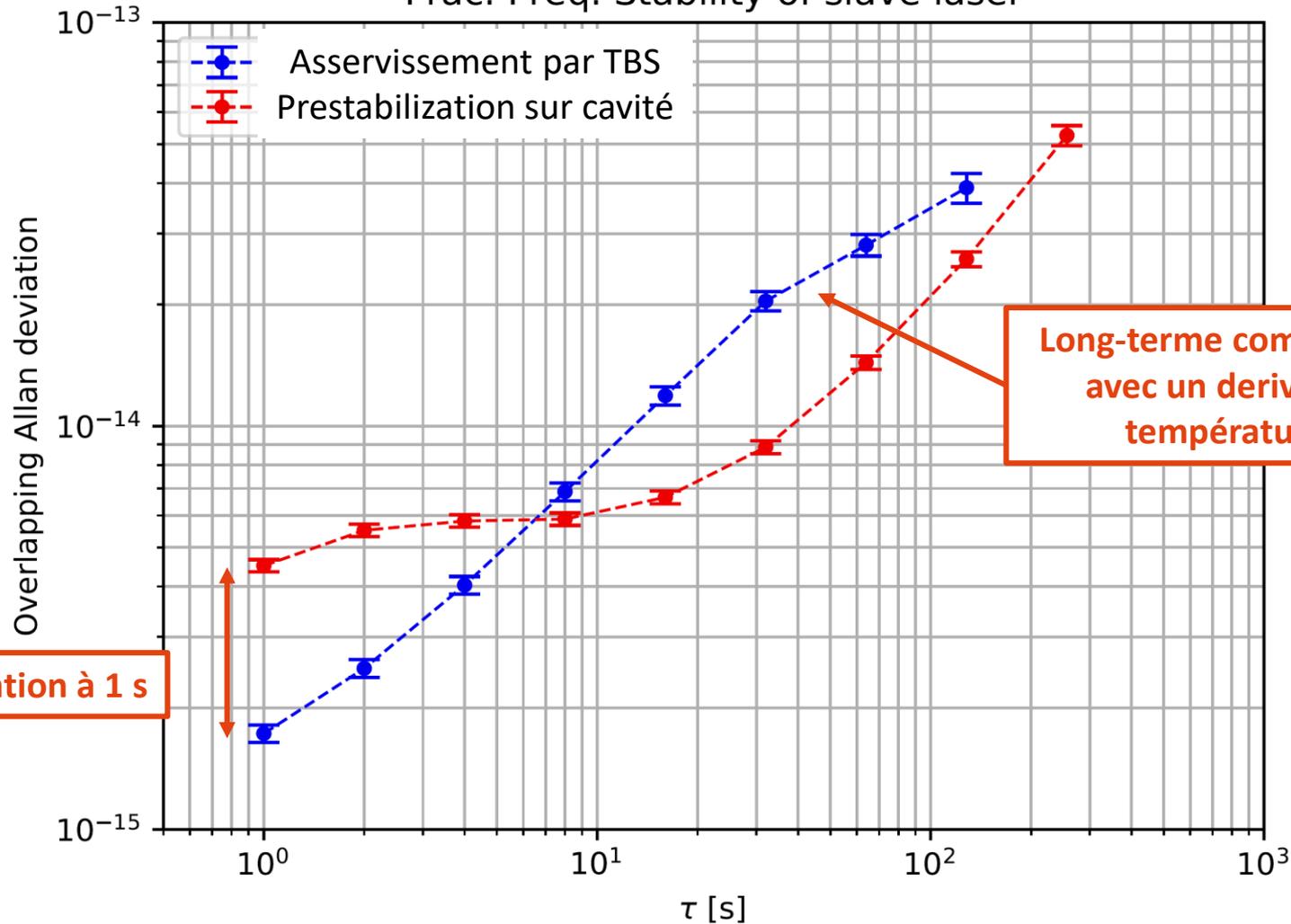
TX chain:



RX chain:



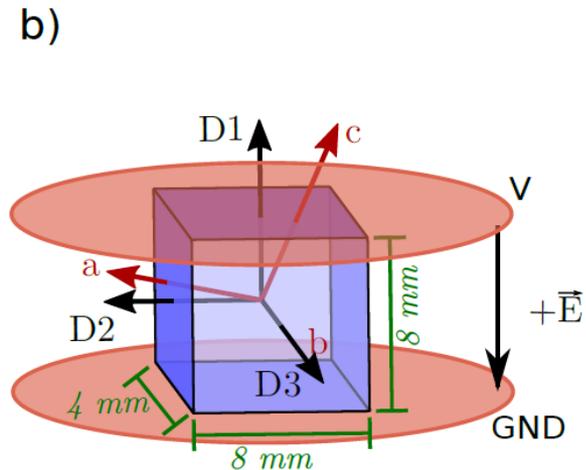
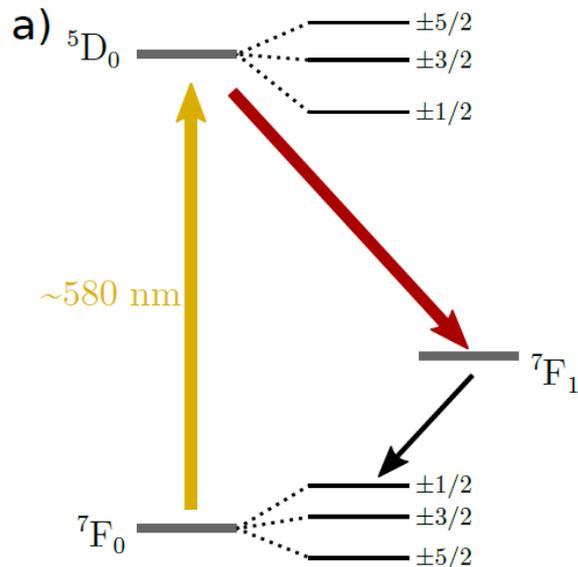
Frac. Freq. Stability of slave laser



Sensibilité aux champs électrique

Motivations:

- Manipulation of spectral hole frequency using Stark effect
- Max tolerable E-field noise for laser frequency stabilization



Procedure:

- Brûlage des trous spectraux
- Variation du champ E
- Scan du spectre

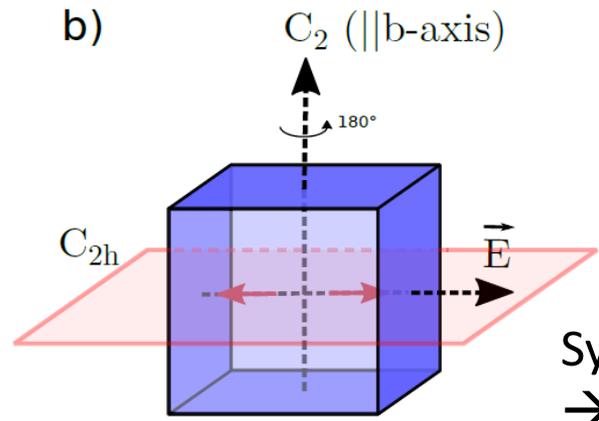
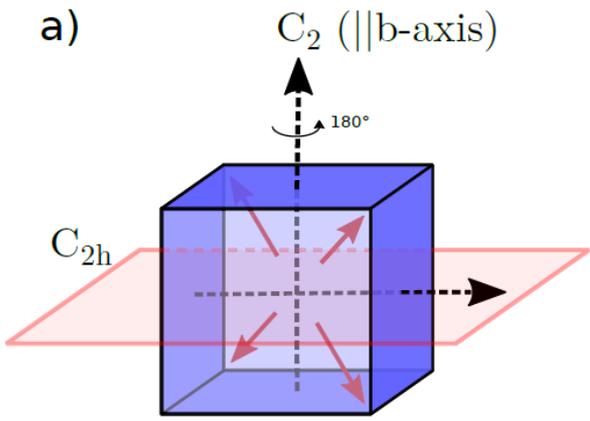
Conditions:

T = 3.15 K

Electrodes lacqués sur
le cristal

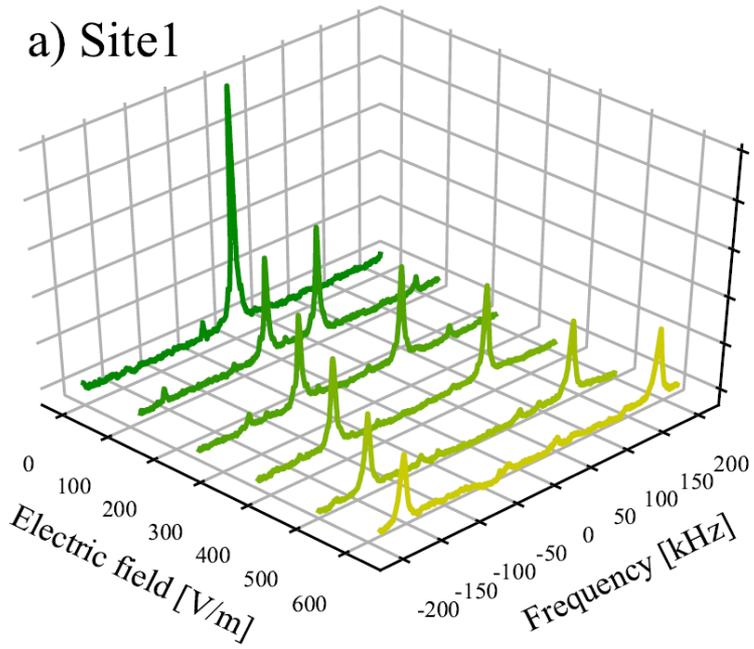
N.B.: Fréquence absolue mesuré contre
les étalons primaires via un peigne de
fréquence → dérive de la cavité éliminé

Sensibilité aux champs électrique

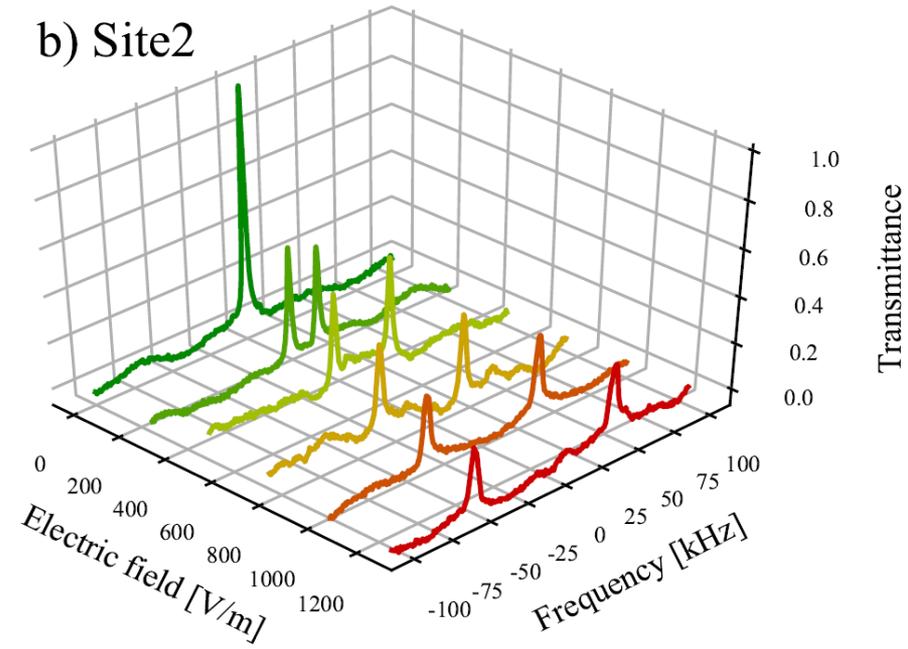


Symmétrie du cristal
→ Séparation en 2 pics

a) Site1



b) Site2



Sensibilité aux champs électrique

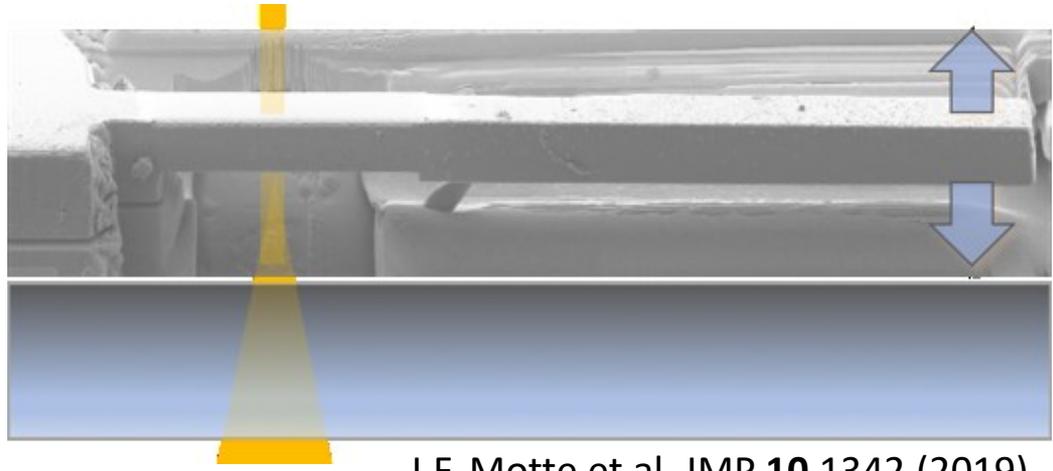
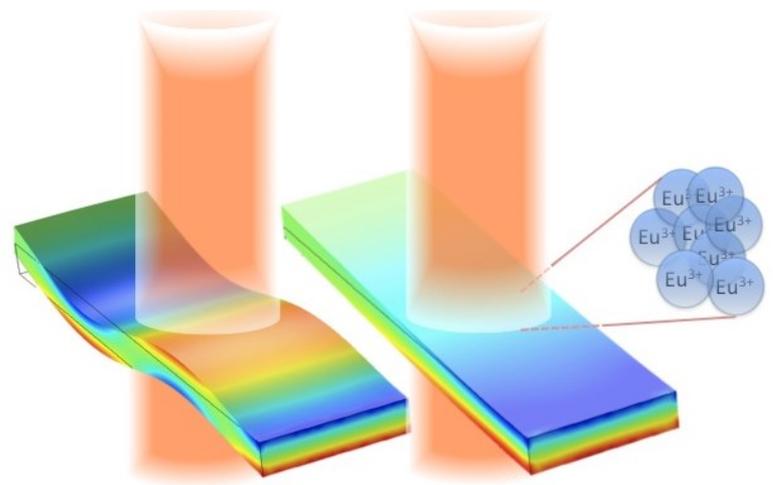
L'effet Stark linéaire (coefficients, err stat., err. Syst. en $V\ m\ Hz^{-1}$)

	E//D1	E//D2
Site 1	$271.8 \pm 0.5 \pm 1.6$	$186.1 \pm 0.4 -/+ 2.4$
Site 2	$37.3 \pm 0.5 \pm 1.2$	$143.2 \pm 0.5 -/+ 0.3$

L'effet Stark quadratique (non-linéarité)

- Deux situations considérées : symétrique (élargissement) vs asymétrique (décalage) réponse par rapport à la fréquence centrale
- Effets de polarisation dans le cristal
- Compatible avec zéro, limite supérieur (conservative) dans l'ordre de $mHz\ m^2\ V^{-2}$
- L'effet asymétrique $< 1\ mHz\ m^2\ V^{-2}$ -> stabilité de champs E à $2.3\ Vm^{-1}$ pour stabilité de laser à 10^{-17}

Sensibilité aux contraintes uniaxiaux



K. Mølmer et al, PRA **94** 053804 (2016)

J.F. Motte et al, JMP **10** 1342 (2019)

□ Optomécanique avec Eu:YSO ?

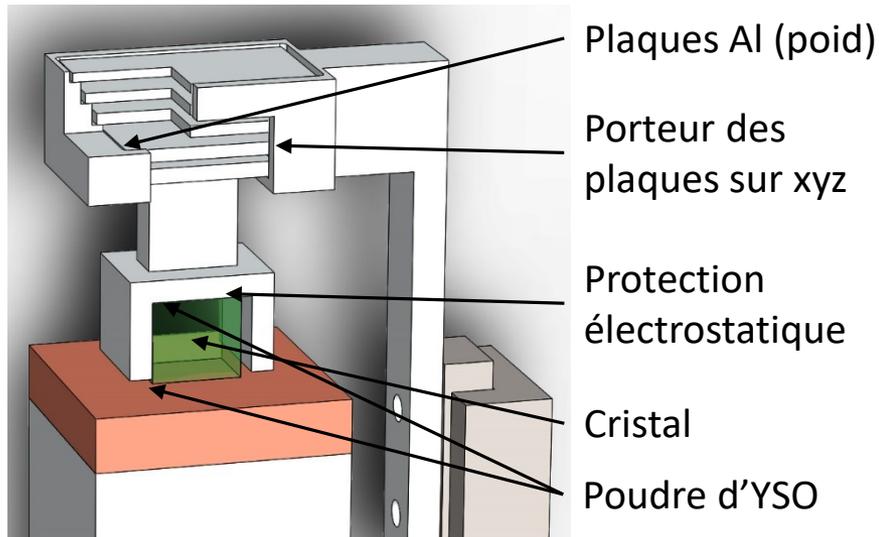
- Sensibilité au pression isotrope connue -> couplage optoméca
- Résonateur mécanique : micropoutre avec FIB
- Détection bas bruit -> potentiellement très sensible

□ Mesures de sensibilité aux contraintes uniaxiaux : défis exp.

- Quantitatif -> application d'une force calibrée
- (In)homogénéité de contrainte appliquée
- Facteur technique / historique : absence de bain de gaz froid

Mesure de la sensibilité aux contraintes

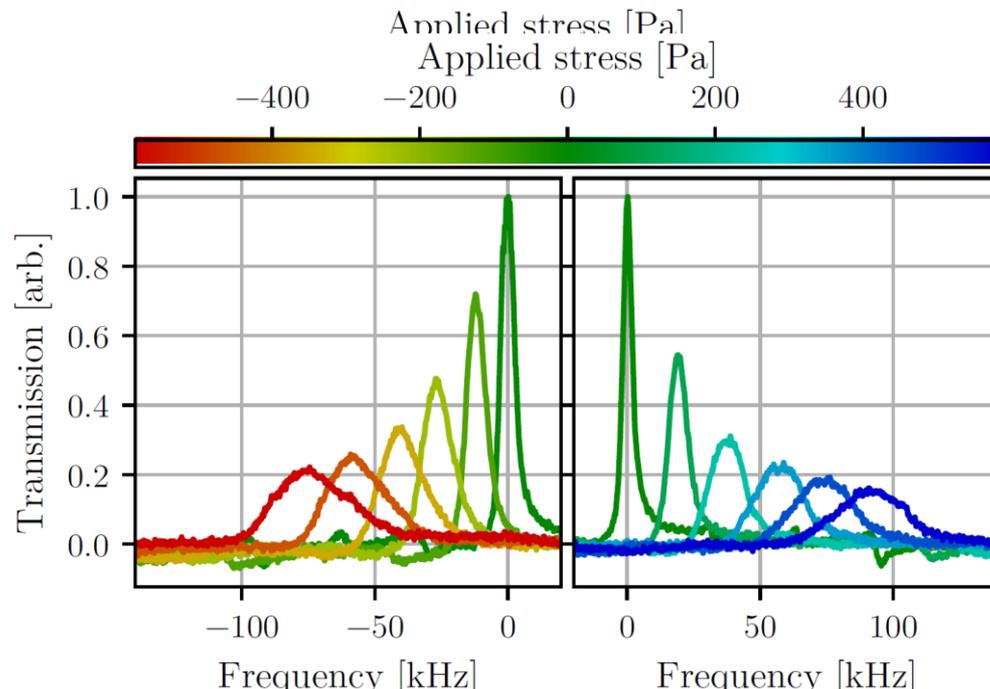
S Y R T E



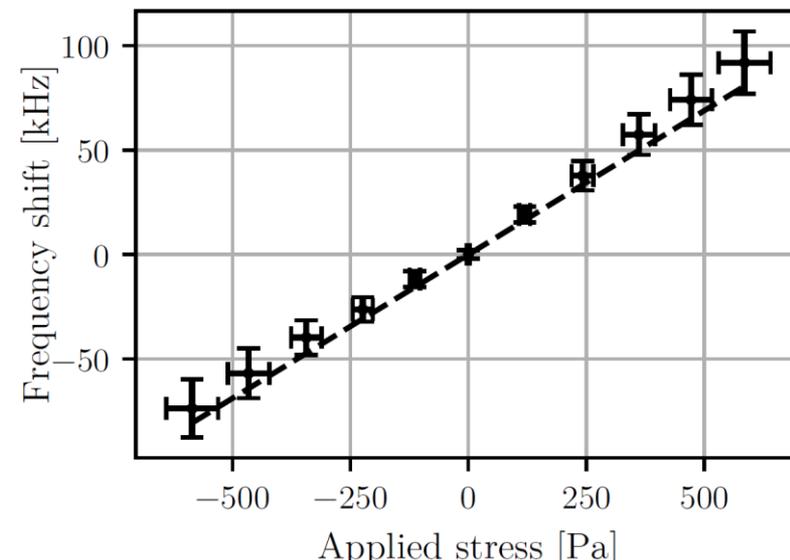
□ Procédure de mesures

Pour chaque site, chaque direction :

- Sans plaque, brûlage d'un trou spectral, scan
- Dépôt d'un plaque, scan, en itération
- Avec 5 plaques, brûlage d'un trou spectral, scan
- Enlèvement d'un plaque, scan, en itération

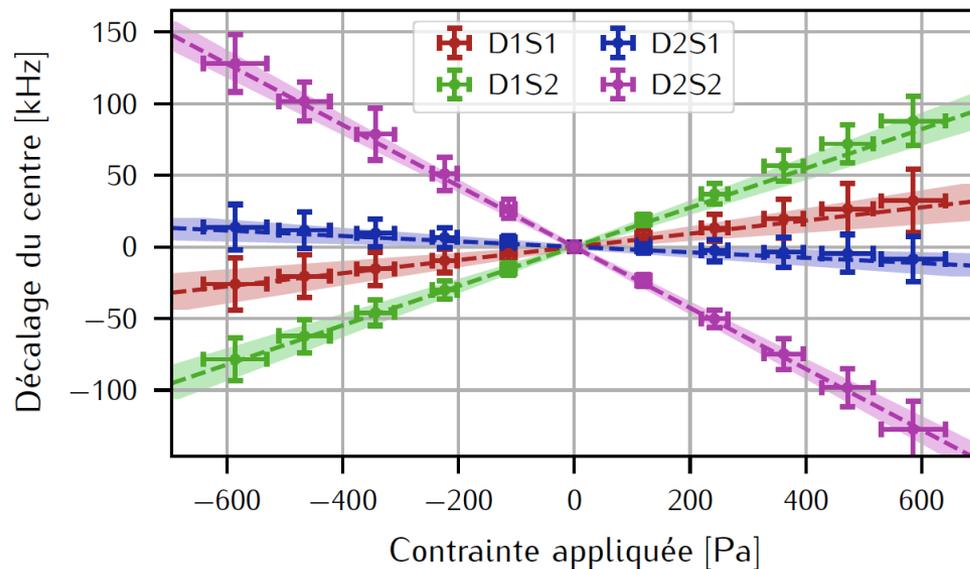


Center frequency shift for each spectrum



Quantitativement

S Y R T E



Module de Young

- YSO : 135 GPa ; diamant : 1220 GPa

Centre NV

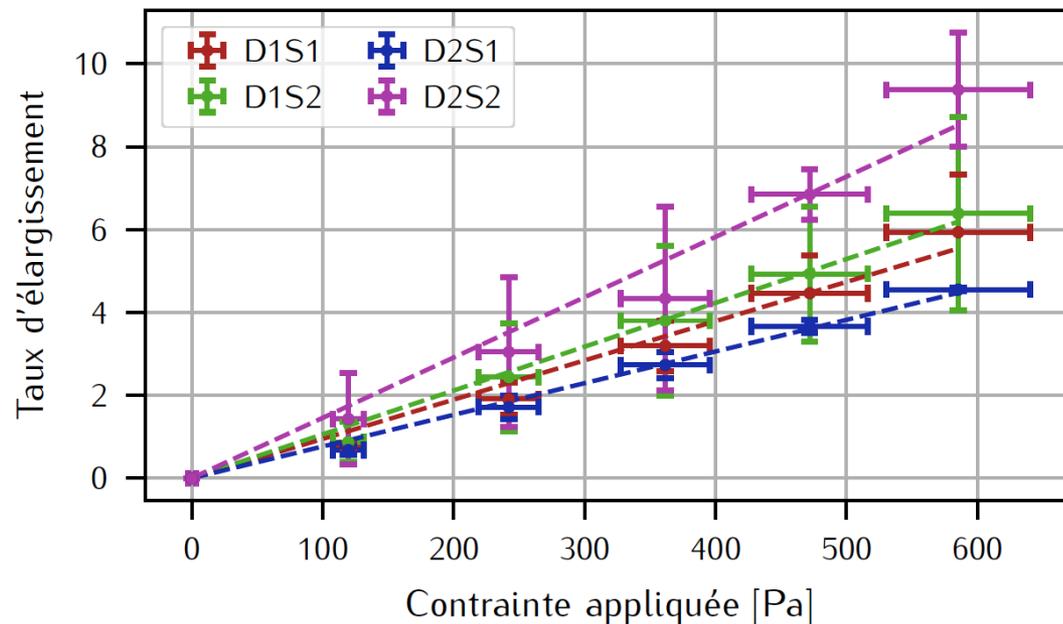
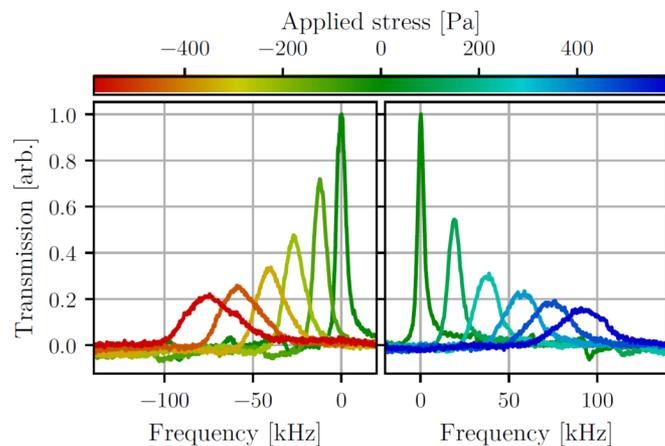
- 1000 Hz Pa⁻¹ → 1200 THz Strain⁻¹

Largeur de raie / strain

- Eu:YSO : 10¹¹ ; NV : 10⁸

Axis	Site	Hz Pa ⁻¹	THz Strain ⁻¹
D1	1	46 ± 17	6.2 ± 2.3
D1	2	137 ± 16	18 ± 2.2
D2	1	-19 ± 10	-2.6 ± 1.4
D2	2	-212 ± 13	-29 ± 1.8

Blindage par les orbitaux 5s et 5p : efficace pour la cohérence mais pas pour les effets de contraintes ?



- Comportement similaire pour les 2 sites et les 2 directions de contraintes
-> peu de variation par rapport aux variations de sensibilité
- Inhomogénéité microscopique ?

Conclusions and prospective



- **Spectroscopie de terres rares pour la métrologie de fréquences optiques**
 - **Asservissement avec la détection double heterodyne** : 1.7×10^{-15} à 1 s
 - En cours : double hétérodyne avec APD, stabilité de température, vibration résiduelle, ...
 - En suite : dilution, multiple hétérodyne, ressources quantiques ? Limites fondamentaux ?

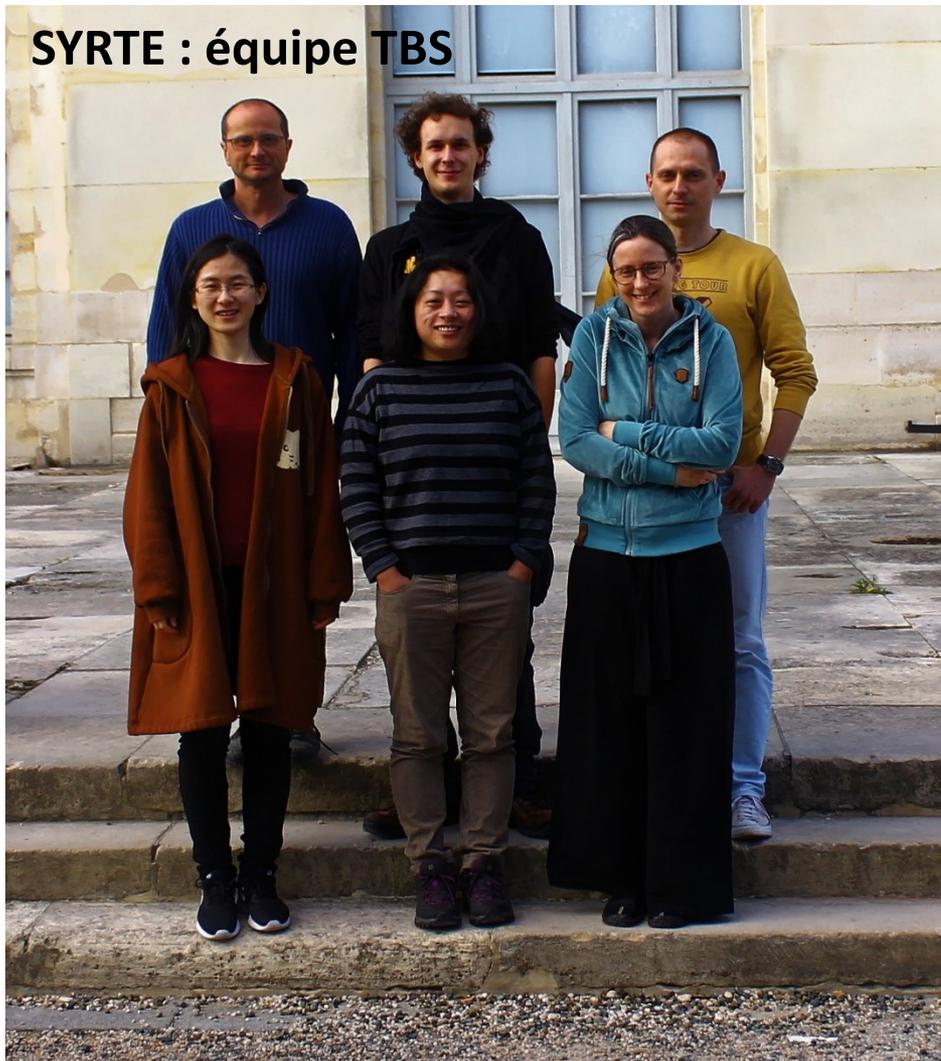
- **Sensibilité aux champs électrique**
 - **Effets linéaires / quadratiques**

- **Vers l'optomécanique avec cristaux de terres rares**
 - **Sensibilité aux contraintes uniaxiaux** mesurée
 - En cours : premier signal TBS dans un micro-résonateur
 - A explorer : detection de mouvement, refroidissement de l'état de mouvement, ...

Remerciement

SYRTE

SYRTE : équipe TBS



En collaboration avec

Institut Néel : S. Seidelin, J.F. Motte

Chimie Paris : P. Goldner, A. Ferrier

Aahus University : K. Mølmer



Institut de Recherche de Chimie Paris



Soutiens financiers

