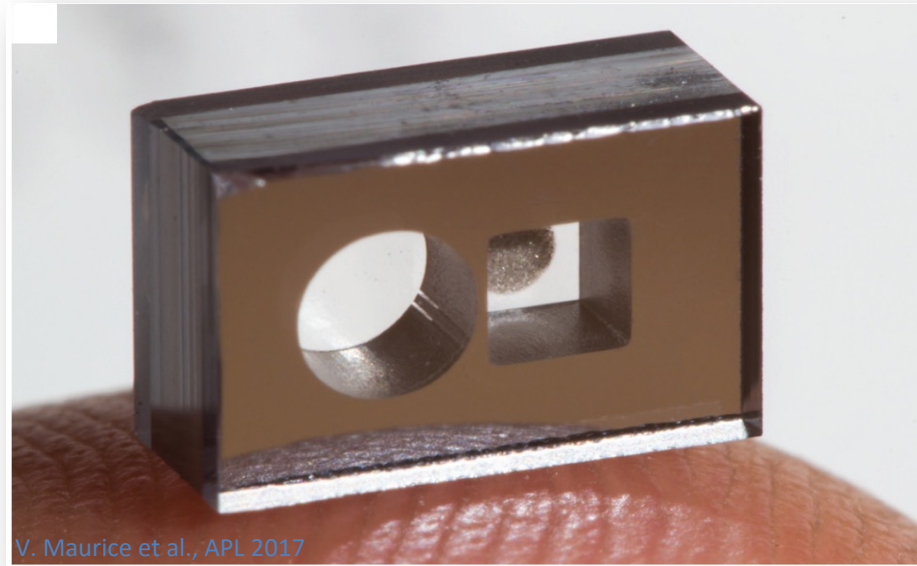


## Micro-horloges atomiques



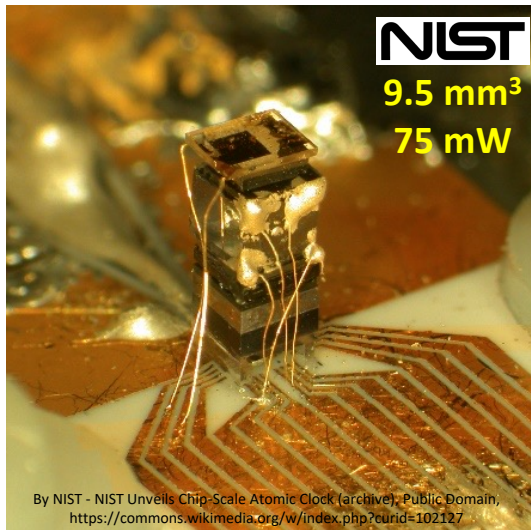
**R. Boudot**

*FEMTO-ST, CNRS, Besançon, France*

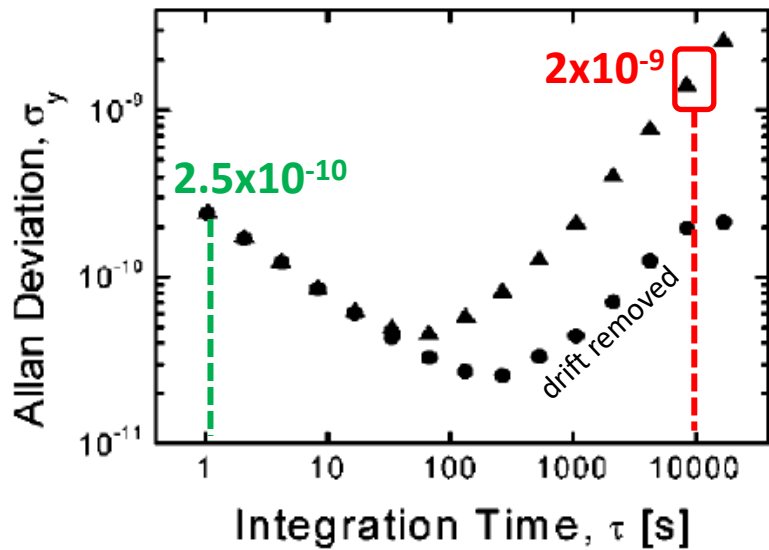
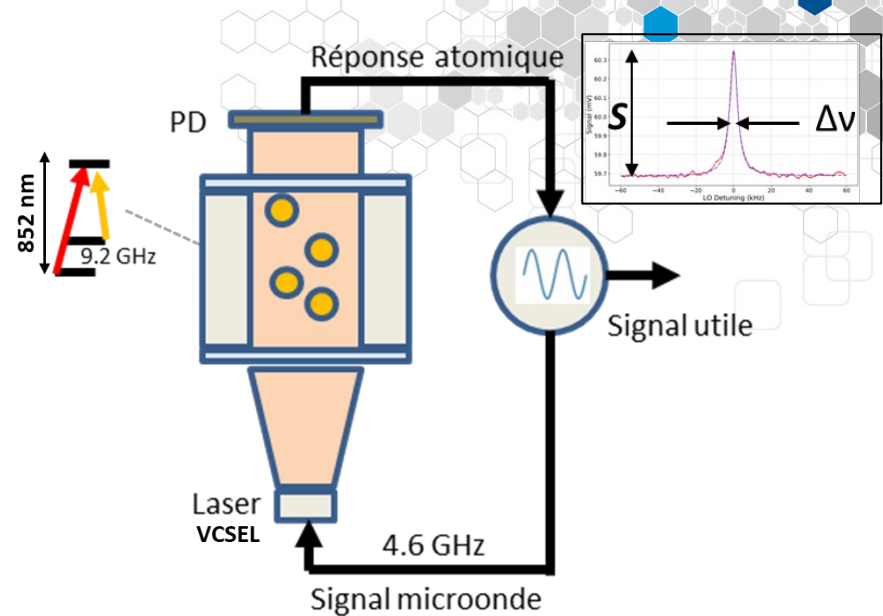
[rodolphe.boudot@femto-st.fr](mailto:rodolphe.boudot@femto-st.fr)

<http://teams.femto-st.fr/equipe-ohms/>

<http://teams.femto-st.fr/MOSAIC/en>



S. Knappe et al., *Appl. Phys. Lett.* 85, 9 (2004)



## Forte contribution internationale



Horloges miniatures  
basse consommation

## Applications

### Navigation

Acquisition + rapide après perte signal GNSS  
Navigation avec moins de 4 satellites  
Véhicules autonomes, Détection d'intrusion

### Sensing

Réseaux de capteurs en fonds océaniques  
Etudes sismiques, exploration de ressources

### Réseaux mobiles / Communications

Synchronisation de stations de base  
Communications sécurisées

### Synchronisation de réseaux

Monitoring reseaux "smart grids"  
Suivi d'événements dans les datacenters



## Spécifications

**Volume < 20 cm<sup>3</sup>**  
Dispositifs embarqués

**Consommation < 150 mW**  
Missions longue-durée sur batterie

**Température d'opération - 40 à 85°C**  
Compatible avec standards industriels

**Stabilité de fréquence 10<sup>-11</sup> à 1 h et 1 jour**  
Erreur temporelle < 1 μs/jour

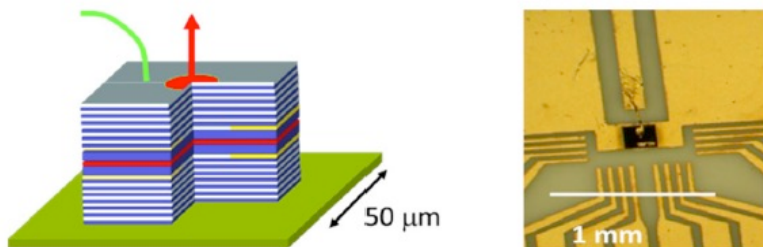
J. Kitching et al., Appl. Phys. Rev. 5, 031202 (2018)

**100 fois + stable à 1 jour qu'un OCXO "standard"**  
**Budget volume-consommation comparable**

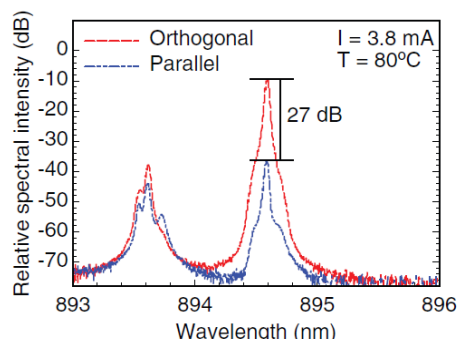
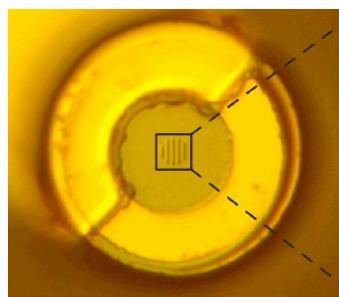
## VCSELs

Raie  $D_1$  des alcalins :  $\lambda$  : 895 nm (Cs) – 795 nm (Rb)

M. Stähler *et al.*, *Opt. Lett.* **27**, 16 (2002)



D. K. Serkland *et al.*, *Proc. SPIE* **6484**, 648406 (2007)



A. Al Samaneh *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **101**, 1711104 (2012)

**Fournisseurs Cs  $D_1$  (895 nm) rares**

E. Kroemer *et al.*, *Appl. Opt.* **55**, 31 (2016)

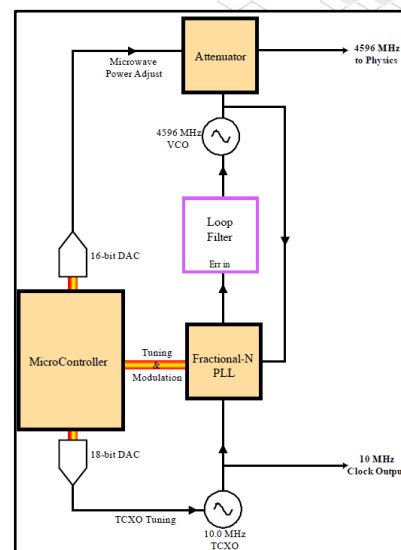
**Le bruit FM de VCSEL limite la stabilité à 1 s**



**Nouvelles VCSELs ( $\Delta\nu \sim 1$  MHz)**

M. Huang *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **121**, 114002 (2022)

## Oscillateur local

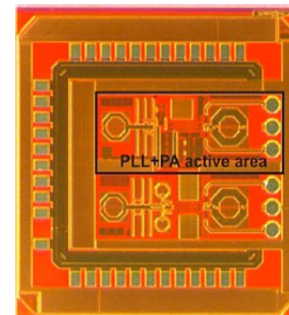


R. Lutwak *et al.*, *IFCS* 2007

**Electronique:  
> 70 % consommation  
micro-horloge**

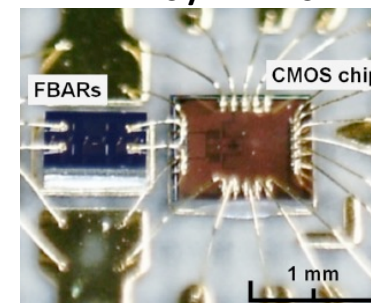


## ASICs



Y. Z. Zhao *et al.*, *IEEE TIM* **64**, 263 (2012)

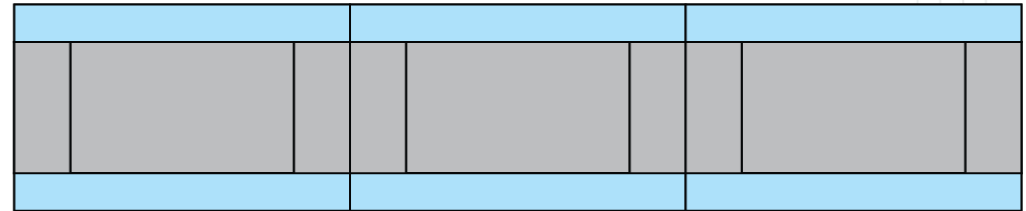
## FBARs / HBARs



M. Hara *et al.*, *Rev. Sci. Instr.* **89**, 105002 (2018)

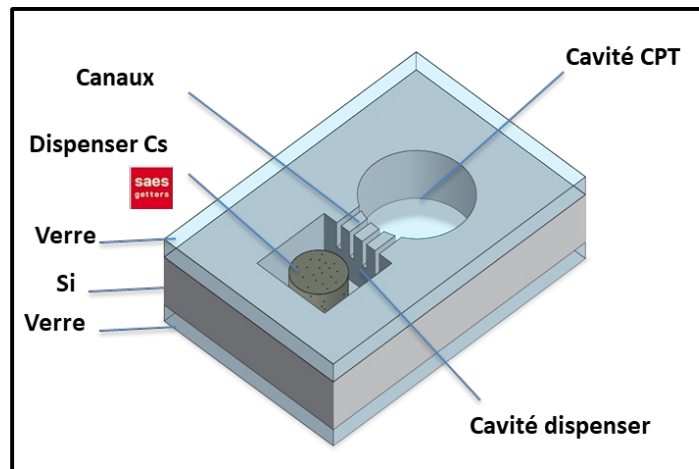
## Fournir une atmosphère pure et stable de vapeur alcaline et gaz tampon

- \* Neutralité chimique par rapport au métal alcalin
- \* Hermiticité suffisante: éviter fuites de gaz
- \* Compatibilité avec les techniques de fabrication collective sur wafer

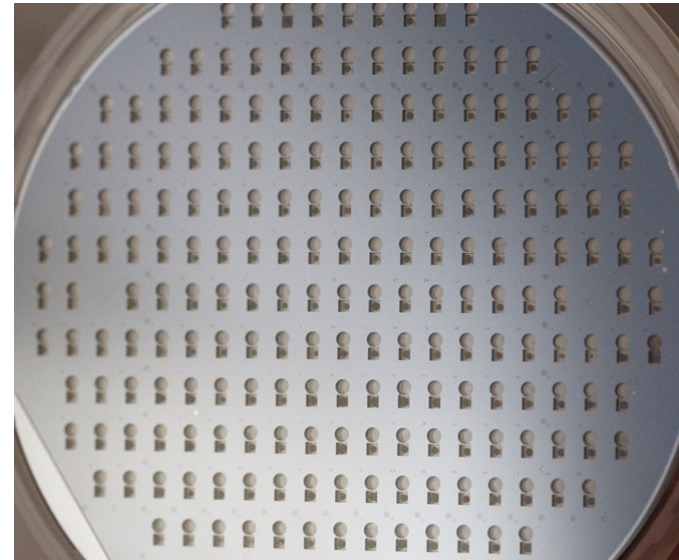


### Approche Générale:

- \* Matériaux: Silicium + verre
- \* Gravure DRIE + Soudure anodique



A. Douahi *et al.*, *Elec. Lett.* **43**, 33–34 (2007).

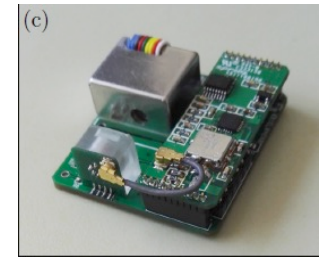
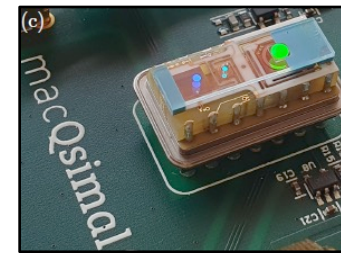
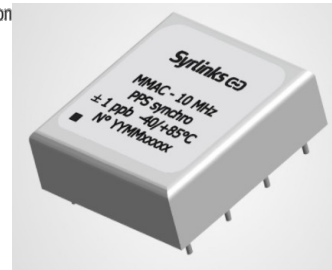
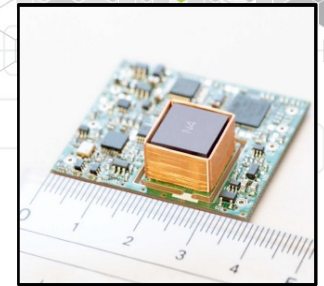
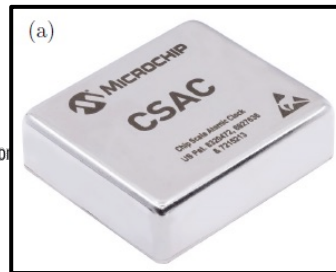
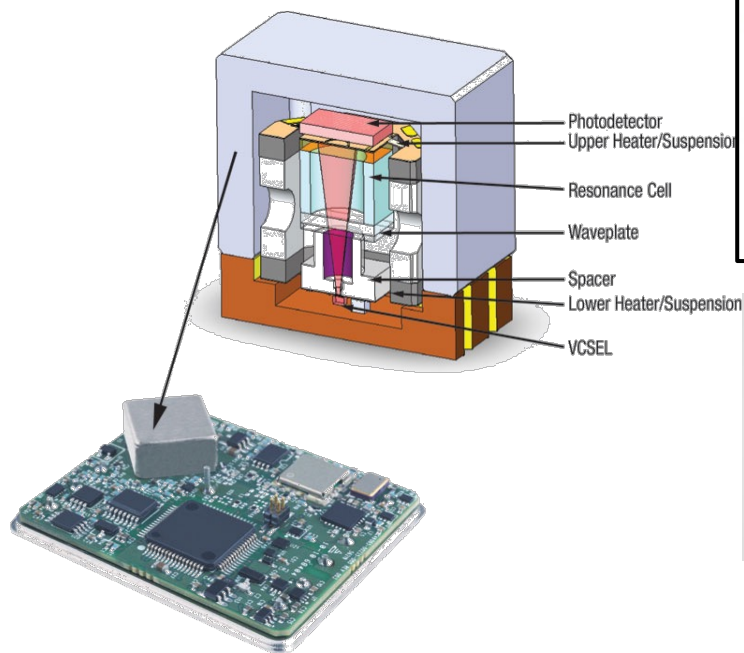


**Transférée industriellement**

tronics   
microsystems

R. Vicarini *et al.*, *Sensors Actuators* **280**, 99 (2018).

- S. Knappe *et al.*, *Opt. Lett.* **30**, 2351–2353 (2005).
- S. Woetzel *et al.*, *Rev. Sci. Instr.* **82**, 033111 (2011).
- D. G. Bopp *et al.*, *J. Phys.: Photonics* **3**, 015002 (2020)
- S. Dyer *et al.*, *J. Appl. Phys.* **132**, 134401 (2022)
- S. Dyer *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **123**, 074001 (2023)
- J. M. Pate *et al.*, *Opt. Lett.* **48**, 2 (2023)



(> 200 000 CSACs vendues)

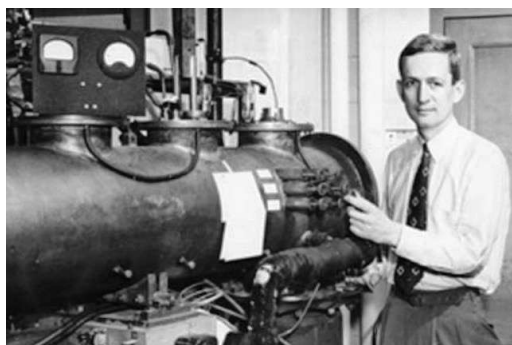
## Limitations des micro-horloges CPT

Stabilité moyen-long terme

\*Déplacements lumineux

\*Evolution de l'atmosphère interne de la cellule

# Réduction des déplacements lumineux: interrogation type-Ramsey



N. F. Ramsey, Phys. Rev. **78**, 695 (1950)

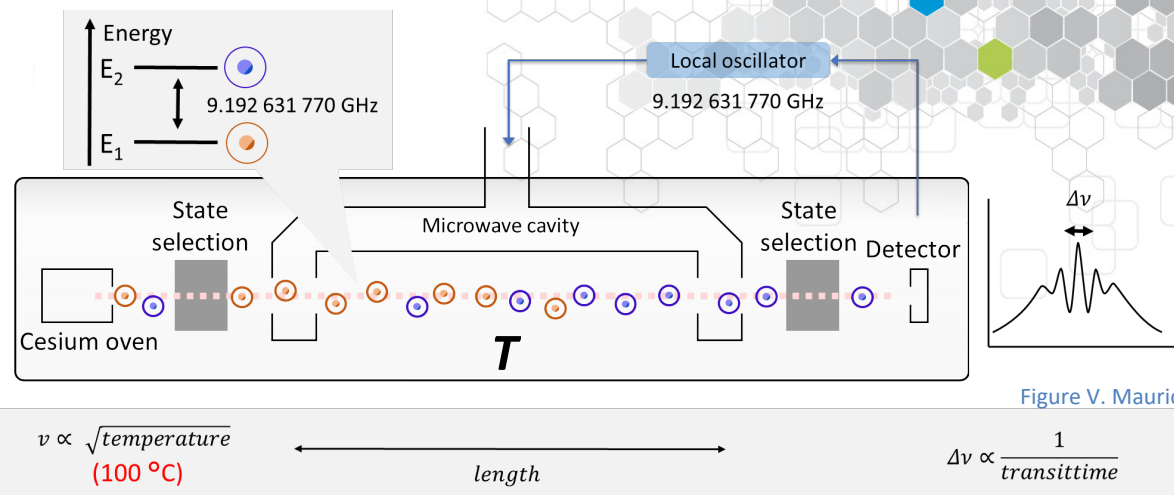


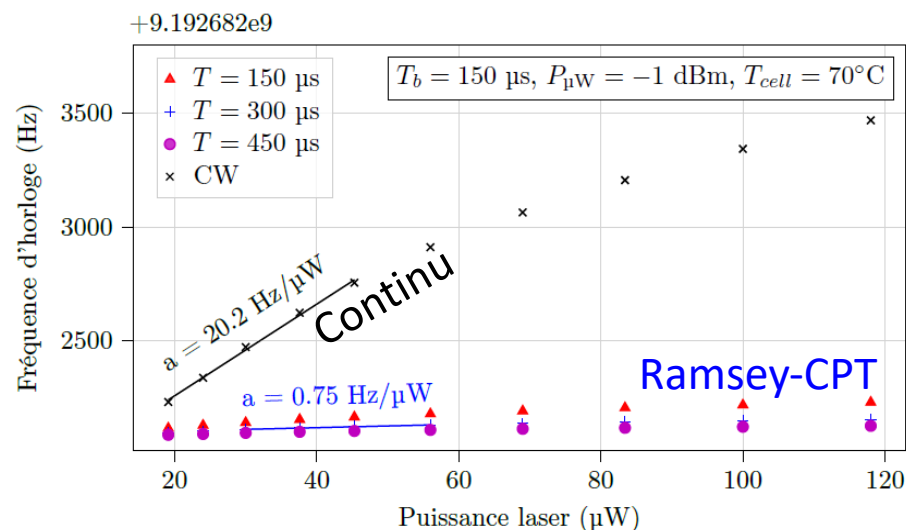
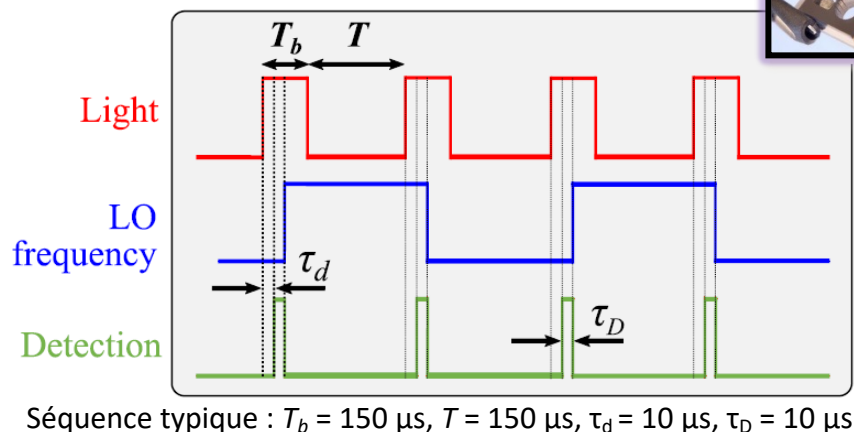
Figure V. Maurice

Deux interactions atome-champ séparées par un temps d'évolution libre  $T$

➔ Ramsey-CPT:

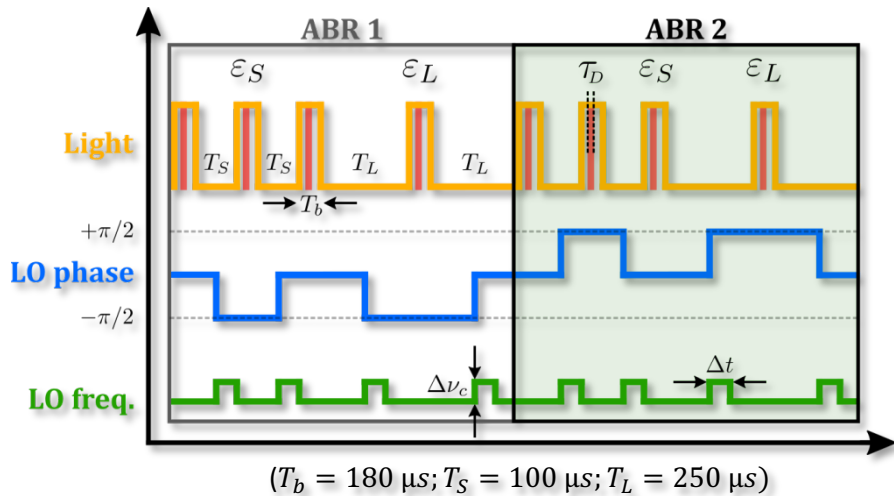
J. E. Thomas *et al.*, Phys. Rev. Lett. **48**, 867 (1982)  
 T. Zanon *et al.*, Phys. Rev. Lett. **94**, 193002 (2004)

## Spectroscopie Ramsey-CPT en microcellule



C. Carlé *et al.*, IEEE UFFC **68**, 10 (2021)

## “Symmetric Auto-Balanced Ramsey” (SABR)

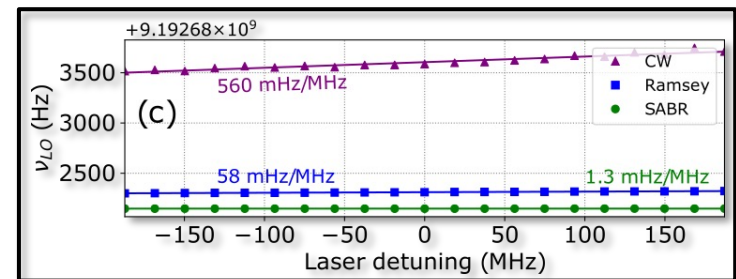
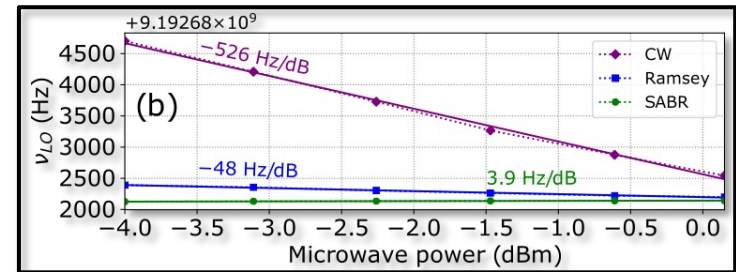
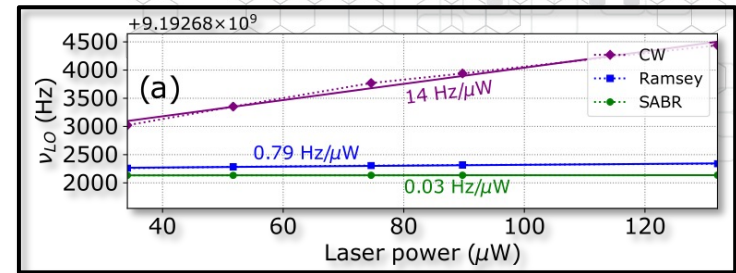


Signaux d'erreur  $\varepsilon_S$  et  $\varepsilon_L$  extraits de cycles Ramsey de temps noir différents  $T_S$  and  $T_L$ .

1 signal d'erreur pour corriger freq. LO

1 signal d'erreur pour compenser déplacement lumineux

## Réduction des déplacements lumineux



La sensibilité de la fréquence d'horloge aux paramètres du champ lumineux est **réduite** par un facteur **> 100**



Fuite de gaz tampon à travers le verre de la cellule par perméation ( $N_e: 7.5 \times 10^{-8} / \text{Torr}$ )



Perméation de différents verres (BSG, ASG, et dépôts  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) à l'hélium ("traceur de gaz")

Déplacement collisionnel

$$\Delta v_{bg} = P[\beta + \delta(T - T_0) + \gamma(T - T_0)^2],$$

Perméation

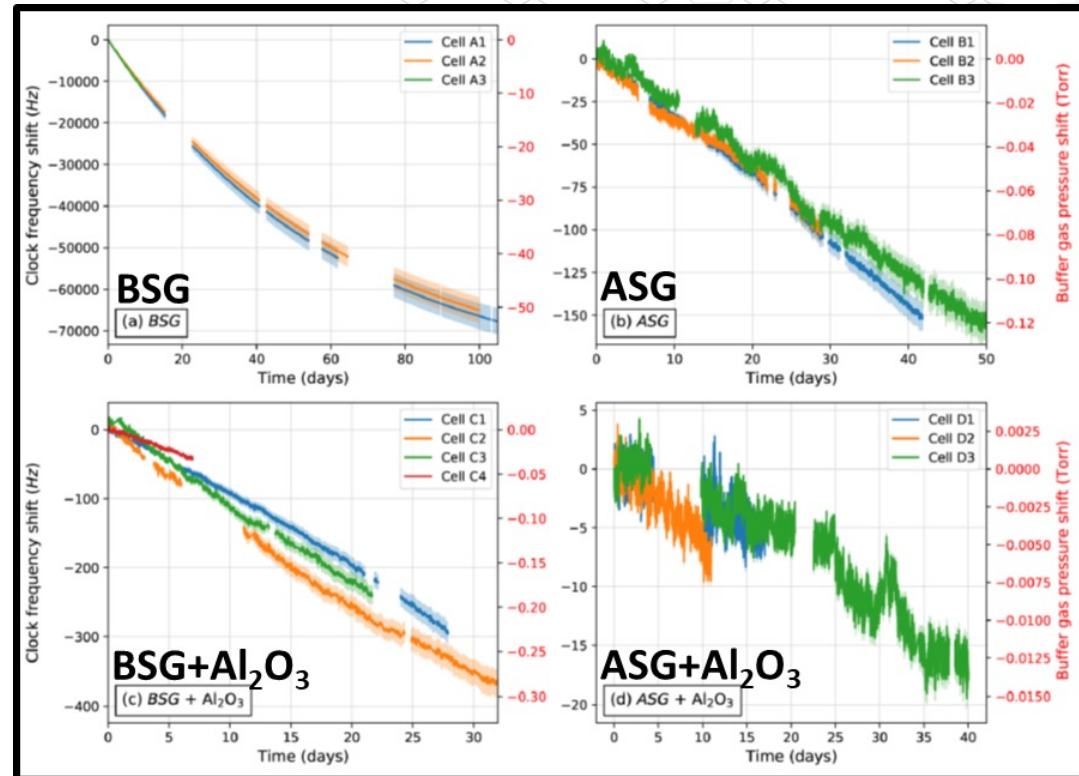
$$P(t) = P_{ext} - (P_{ext} - P_{in})e^{-t/\tau},$$

$$\tau = \frac{Vd}{KAP_{ref}},$$

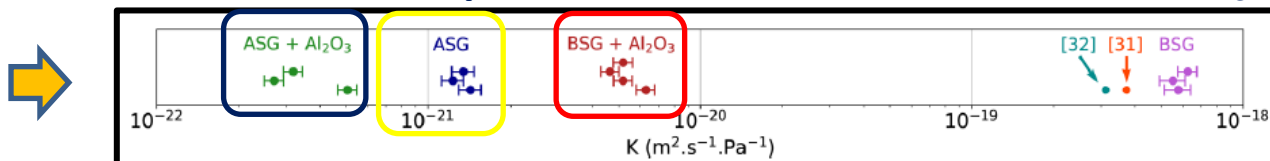
V. O. Altemose, J. Appl. Phys. **32**, 1309 (1961)

S. Abdullah *et al.*, Appl. Phys. Lett. **106**, 163505 (2015)

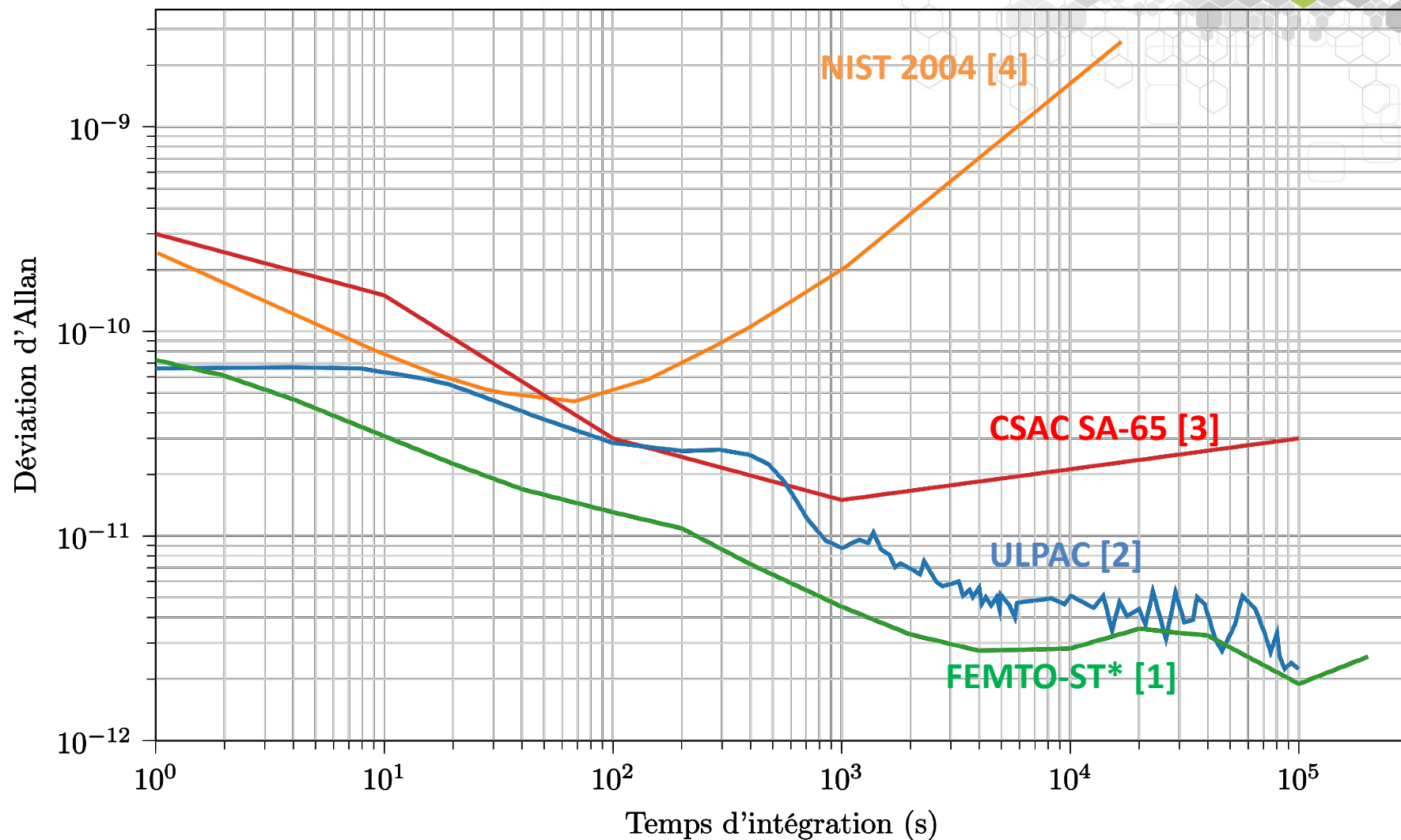
A. G. Dellis *et al.*, Opt. Lett. **41**, 2775 (2016)



Réduction de la perméation He > 1000 avec ASG +  $\text{Al}_2\text{O}_3$



C. Carlé *et al.*, J. Appl. Phys. **133**, 214501 (2023)



[1] C. Carlé *et al.*, *Opt. Exp.* **31**, 5, 8160 (2023)

[2] H. Zhang *et al.*, *IEEE J. Solid state* (2019)

[3] Microchip CSAC SA65

[4] S. Knappe *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **85**, 9 (2004).

\*proto. labo (non intégré)

## Sonder des résonances étroites

Renforcer la pureté de la cellule

$$\sigma_y(\tau) = \frac{\Delta\nu}{\nu_0} \frac{1}{S/N} \tau^{-1/2}$$

CPT CSACs

$\Delta\nu = 1$  kHz

$\nu_0 = 10$  GHz

$S/N = 2 \times 10^3$

**Augmenter la fréquence  $\nu_0$**

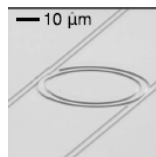
Montée vers l'optique ( $\nu_0 = 300$  THz)

**Augmenter le SNR**

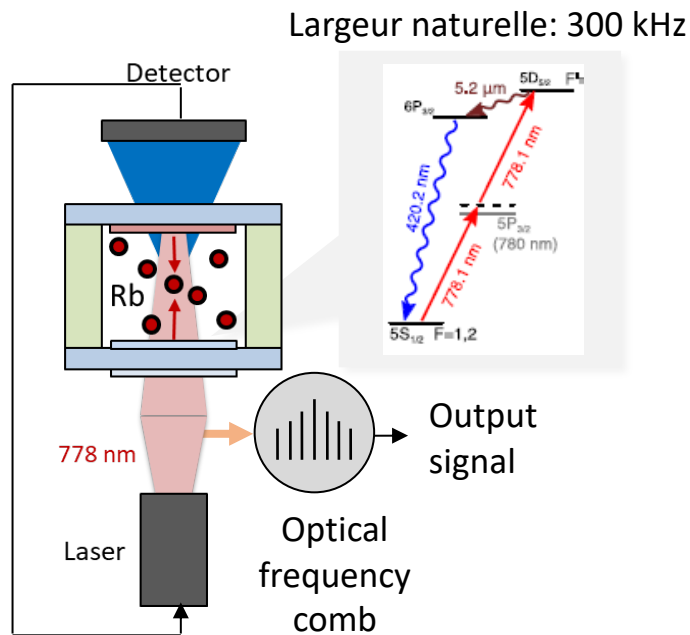
Lasers faible bruit

Besoin: Micro-résonateurs optiques  
pour optique -> microonde

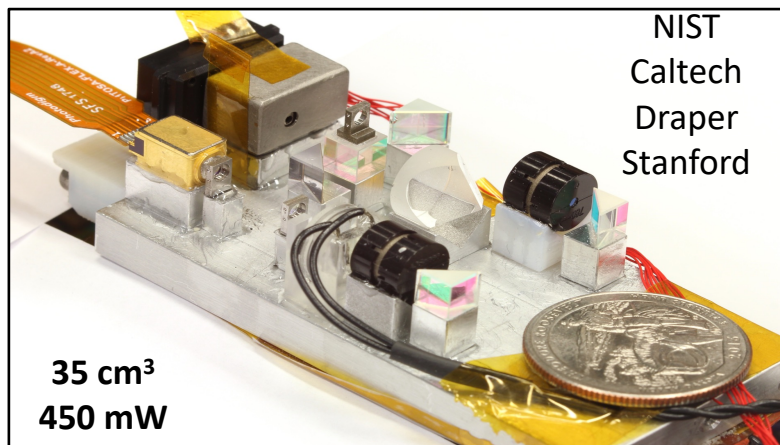
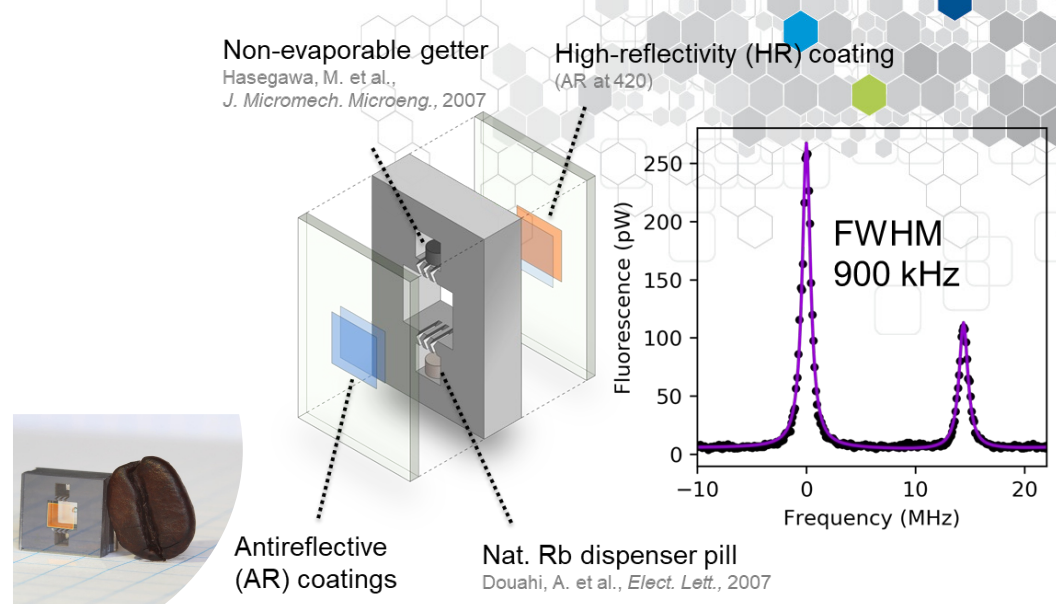
Z. Newman *et al.*, *Optica* 6, 5 (2018)



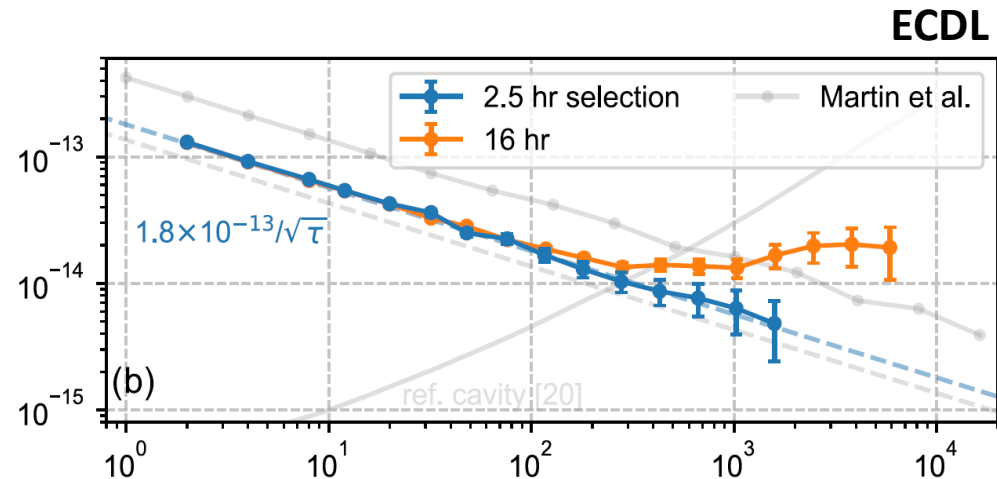
# Référence optique: transition 2-photons (Rb 778 nm)



F. Nez *et al.*, *Opt. Comm.* **102**, 432 (1993)  
 Z. Newman *et al.*, *Optica* **6**, 5 (2018)

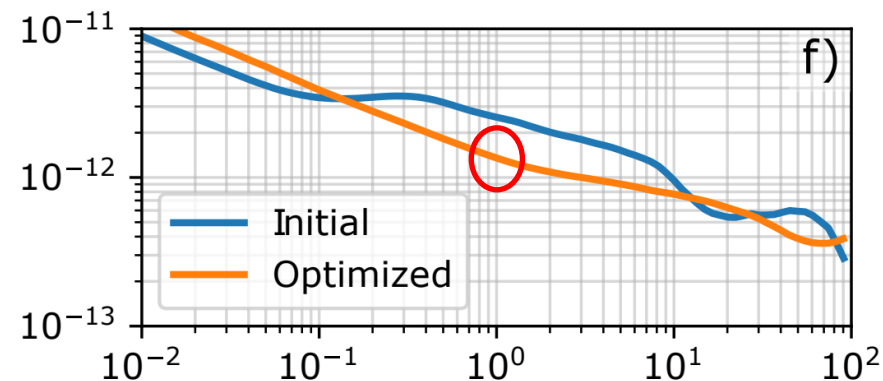
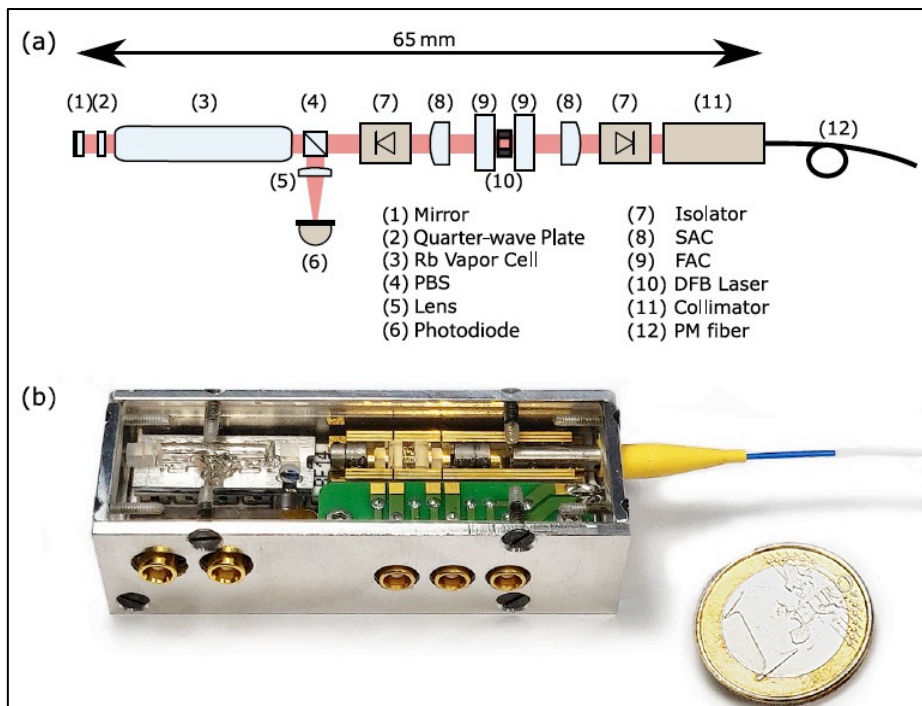
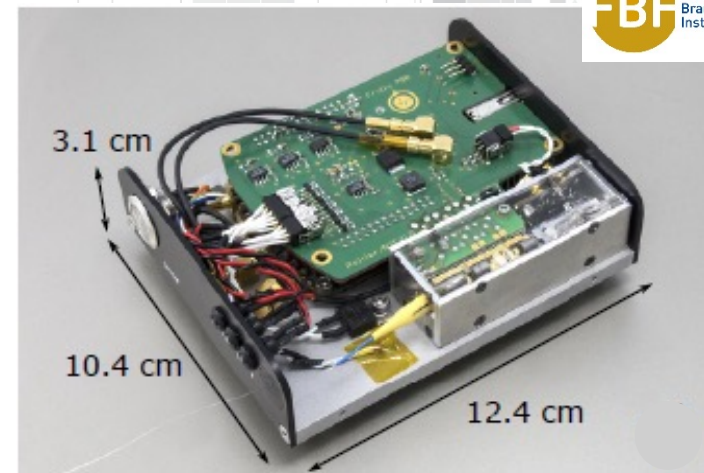


V. Maurice *et al.*, *Opt. Exp.* **28**, 17 (2020)



Z. Newman *et al.*, *Opt. Lett.* **46**, 18 (2021)

# Référence optique par absorption saturée (Rb 780 nm)



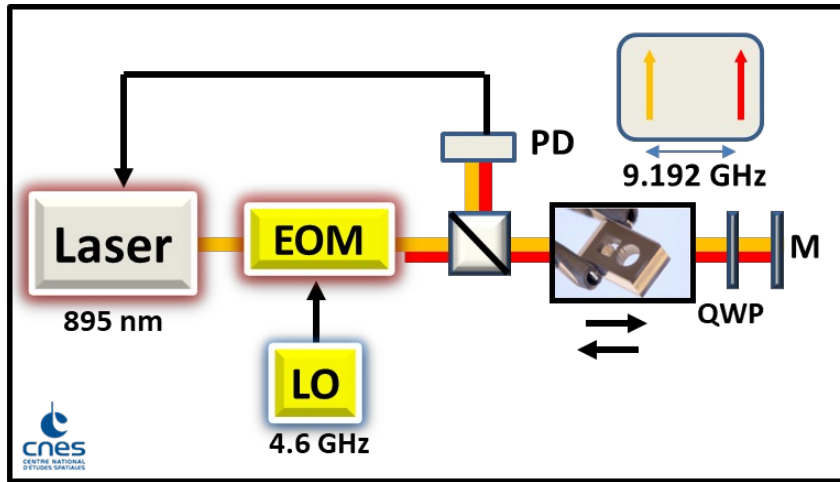
A. Strangfeld et al. Opt. Exp. 30, 7, 12039 (2022)

**Stabilité:  $1.7 \times 10^{-12}$  @ 1 s**

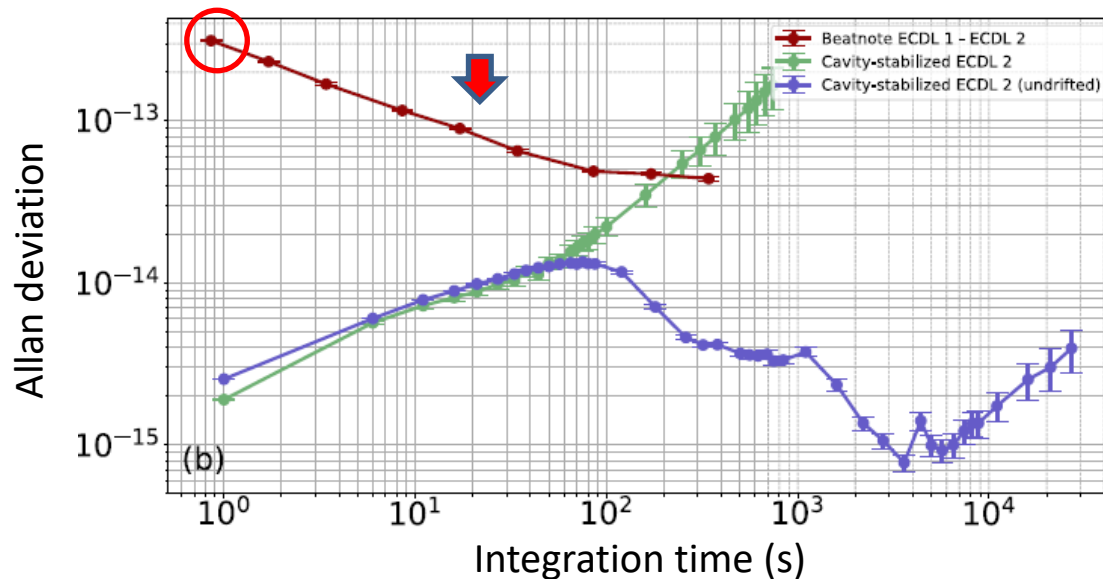
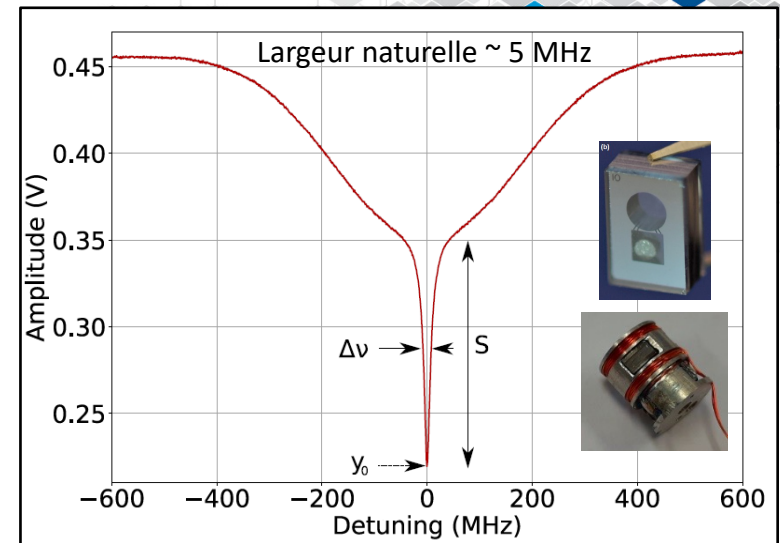
Largeur naturelle  $\sim 5$  MHz

Module optique: 35 cm<sup>3</sup>, 73 g, 780 mW

# Référence optique sub-Doppler bi-fréquence (Cs 895 nm)



M. Abdel Hafiz *et al.*, *Opt. Lett.* **41**, 13, 2982 (2016)  
 D. Brazhnikov *et al.*, *Phys. Rev. A* **99**, 062508 (2019)



A. Gusching *et al.*, *Opt. Lett.* **48**, 6, 1526 (2023).

**$2.9 \times 10^{-13}$  at 1 s**  
 $< 5 \times 10^{-14}$  at 100 s

Etat de l'art:  $1.8 \times 10^{-13}$  à 1 s, plateau approchant  $10^{-14}$

## Court terme:

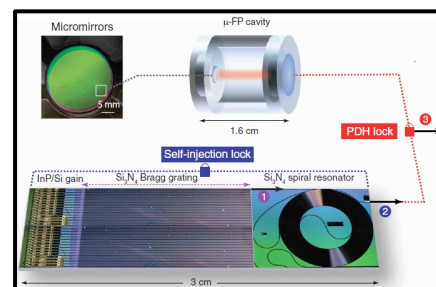
Court-terme: déjà 100 à 1000 fois meilleures que micro-horloges CPT commerciales

## Moyen terme:

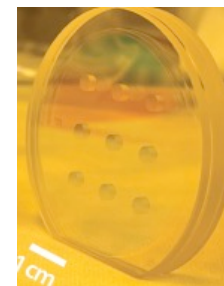
Déplacements lumineux / Superposition des faisceaux contre-propagants

- ➔ **Stabilité court-terme limitée par le laser**  
Développement de lasers intégrés ultra-bas bruit

*C. Audoin et al., IEEE TIM 40, 121 (1991)*

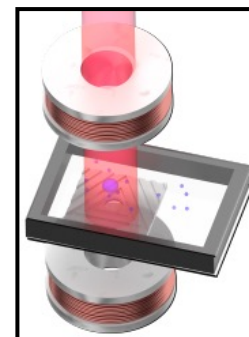


*C. A. McLemore et al., PRAp 18, 054054 (2022)*  
*J. Guo et al., Sci. Adv. 8, eabp9006 (2022)*



- ➔ **Sonder des transitions optiques ultra-étroites**  
Cellules MEMS autonomes ultra-pures

- ➔ **Nouveaux régimes de confinement / d'interrogation**  
Rydberg ? Atomes froids ?



*C. C. Nshii et al., Nature Nano 8, 321 (2013)*  
*JP McGilligan et al., APL 117, 054001 (2020)*  
*R. Boudot et al., Sci. Rep. 10, 16590 (2020)*

- ➔ **Avancées bénéfiques pour autres capteurs quantiques intégrés**

# Remerciements

## FEMTO-ST

Nicolas Passilly  
Clément Carlé  
Moustafa Abdel Hafiz  
Philippe Abbé  
Andrei Mursa  
Jacques Millo  
Martin Callejo  
Anthony Gusching  
Rémy Vicarini  
Ivan Ryger (*now at JILA*)  
Shervin Keshavarzi (*now at NG*)  
Enrico Rubiola  
Christophe Gorecki (*retired*)  
Vincent Giordano  
*etc.....!*

## SYRTE

Emeric de Clercq  
Stéphane Guérandel  
Pierre Bonnay  
Philippe Laurent

## IEMN/Centrale Lille

Vincent Maurice  
Ravinder Chutani

## INRIM

Claudio Calosso

## SYRLINKS

Jean-Marie Danet, etc.

## TRONICS

Vincent Gaff, etc.

## NIST - Atomic Devices & Instr.

John Kitching  
Elizabeth Donley  
Kaitlin Moore

## University Strathclyde

James McGilligan  
Erling Riis

## FOTON

Stéphane Trébaol



AGENCE  
INNOVATION  
DÉFENSE



RÉGION  
BOURGOGNE  
FRANCHE  
COMTE



INMAQS

bpi**france**



anr<sup>®</sup>  
agence nationale  
de la recherche



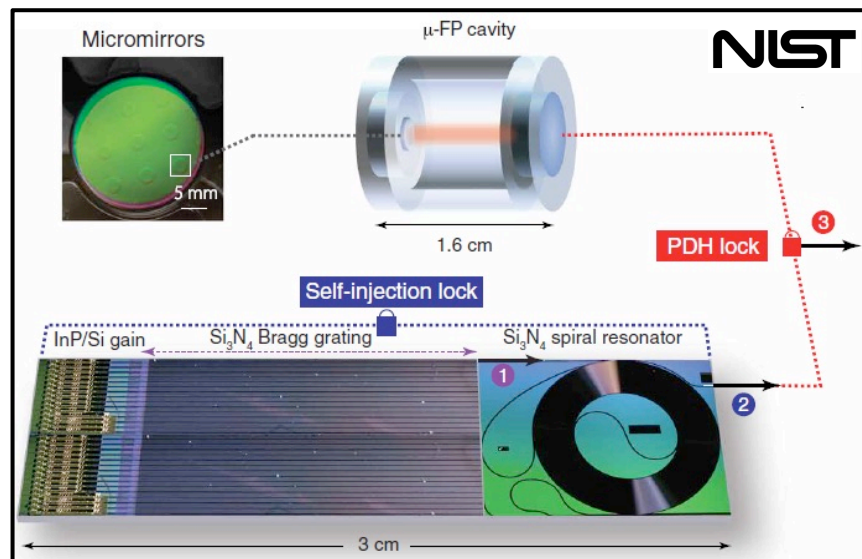
ANR-17-EURE-0002



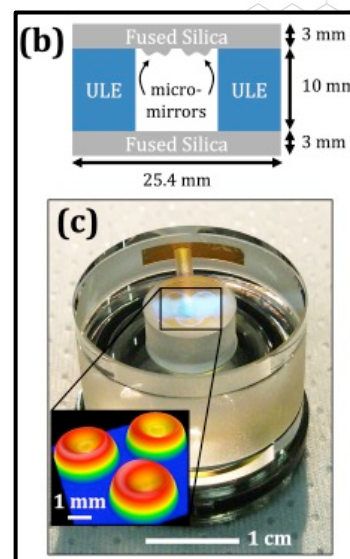
FEMTO-ST  
MIMENTO  
Technology Center



# Laser ultra-stable intégré sur puce $\text{Si}_3\text{N}_4$



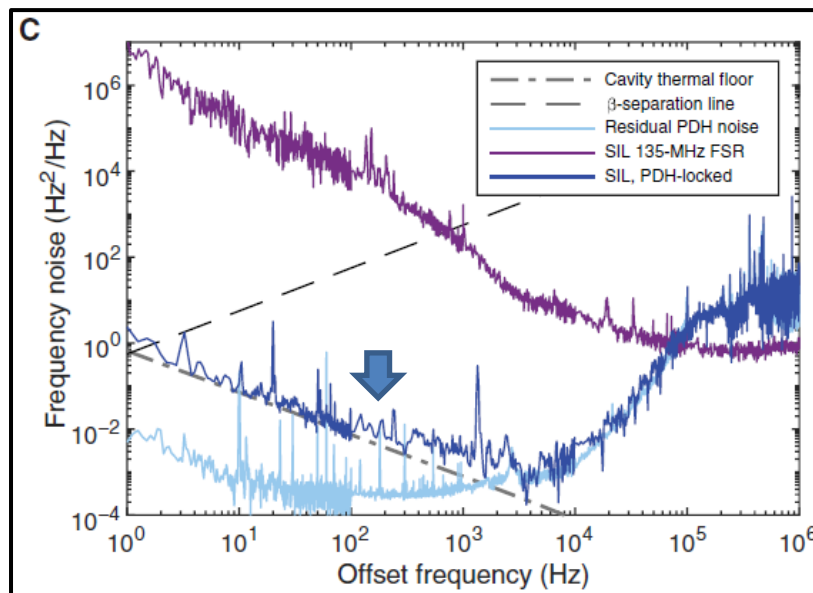
J. Guo et al., *Sci. Adv.* 8, eabp9006 (2022)



C. A. McLemore et al., *Phys. Rev. A*, 18, 054054 (2022)

Laser III-V/ $\text{Si}/\text{Si}_3\text{N}_4$   
 Grating  $\text{Si}_3\text{N}_4$  DB ultra-sélectif  
 Résonateur spiral  $\text{Si}_3\text{N}_4$  sur puce  
 Fonderie 200 mm CMOS  
 [Q=126x10<sup>6</sup>, FSR: 135 MHz]

Micro-cavité FP 8 mL  
 Spacer ULE (D=2.54 cm, L=1 cm)  
 Micro-miroirs (ep: 3mm)  
 \*contactés optiquement sur spacer  
 \*définis par photolitho.  
 \*gravés par RIE dans substrat SF  
 Finesse: 10<sup>6</sup>  
 Pompage sous vide passif

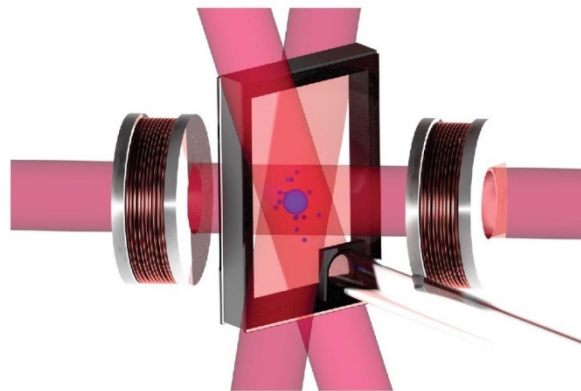


$$S_{\Delta\nu} = 1 \text{ Hz}^2/\text{Hz} @ 1 \text{ Hz}$$

$$\sigma_y (1\text{s}) = 1.5 \times 10^{-14} \text{ à } 1 \text{ s}$$



**Contribution effet intermodulation**  
 **$3 \times 10^{-15}$  à 1 s**



Volume 117, Issue 5, 3 Aug. 2020

## Laser cooling in a chip-scale platform

Appl. Phys. Lett. 117, 054001 (2020); doi: 10.1063/5.0014658

J. P. McGilligan, K. R. Moore, A. Dellis, G. D. Martinez, E. de Clercq, P. F. Griffin, A. S. Arnold, E. Riis, R. Boudot, and J. Kitching

AIP  
Publishing



*Nuage d'atomes froids en cellule MEMS*  
Piège magnéto-optique (MOT)



*Pompage passif*

SCIENTIFIC  
REPORTS

Enhanced observation time  
of magneto-optical traps using  
micro-machined non-evaporable  
getter pumps

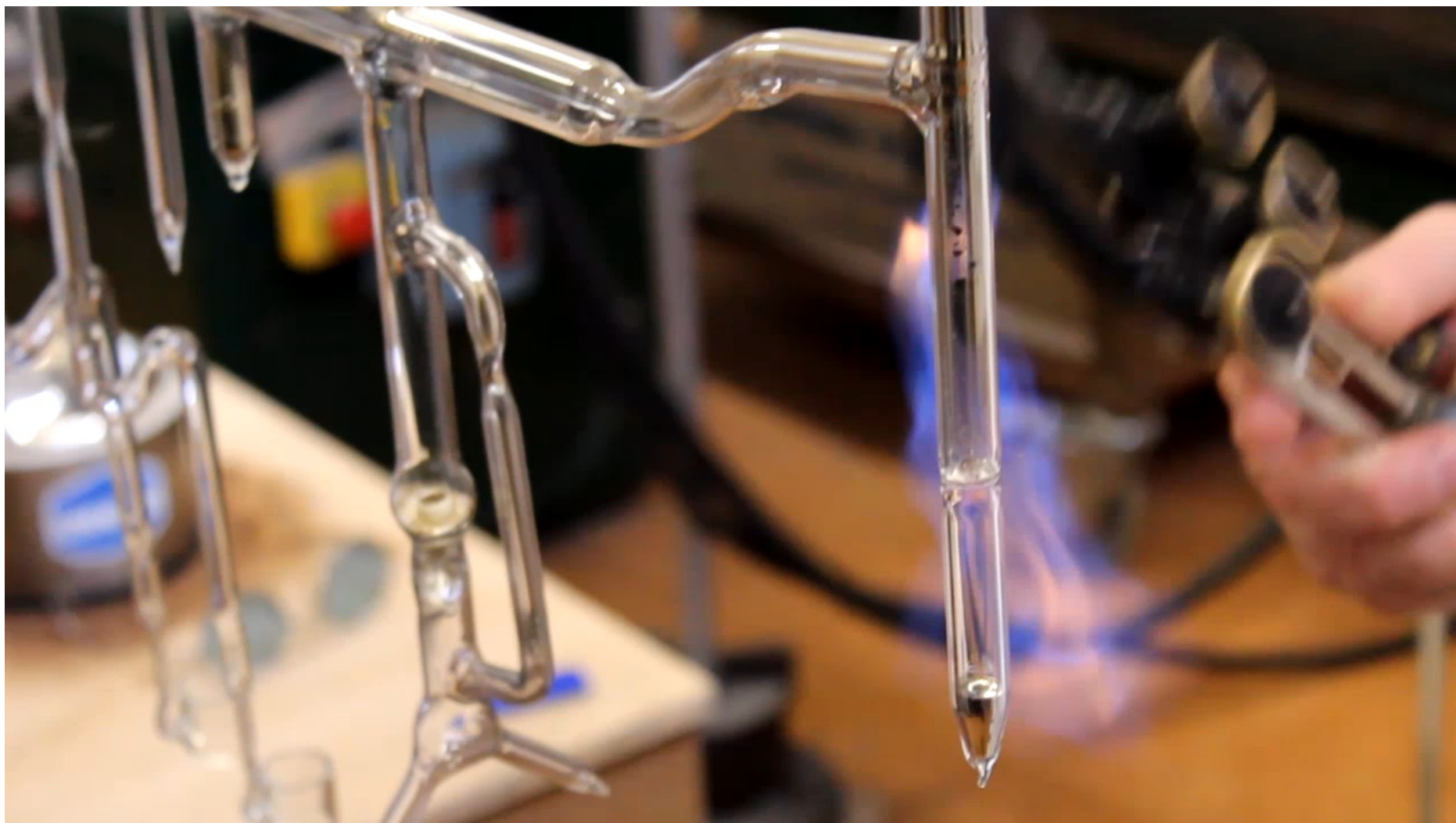
Rodolphe Boudot<sup>1,2</sup>, James P. McGilligan<sup>1,3</sup>, Kaitlin R. Moore<sup>1</sup>, Vincent Maurice<sup>1,3</sup>,  
Gabriela D. Martinez<sup>1,3</sup>, Azure Hansen<sup>1</sup>, Emeric de Clercq<sup>4</sup> & John Kitching<sup>1</sup>

Survie d'un MOT pendant 4 jours  
sans pompe externe

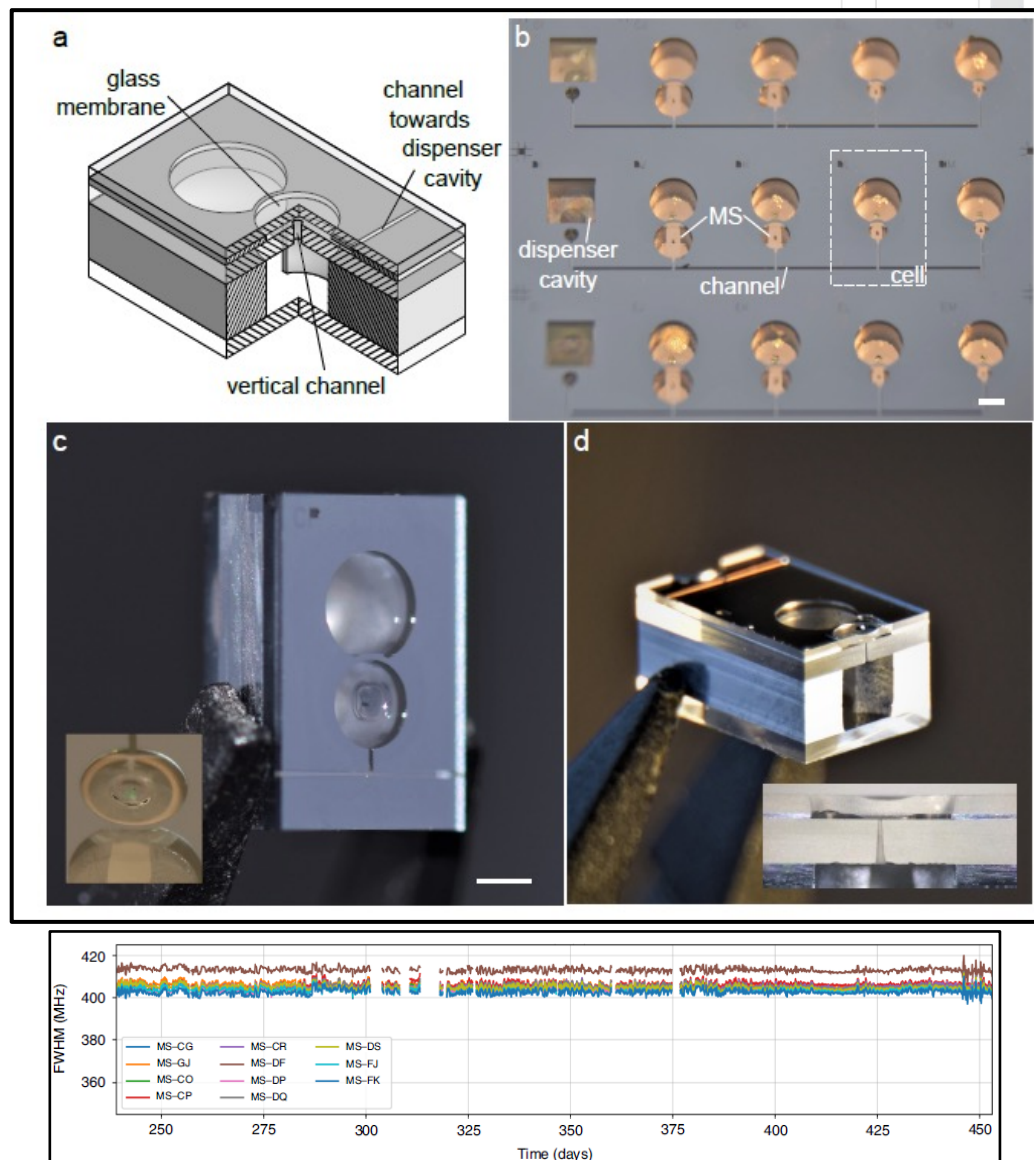
Vers des instruments intégrés à atomes froids ?

# Microfabricated cells with break- and make-seals

Glass-blowing techniques adapted to MEMS technologies for wafer-level vapor cells



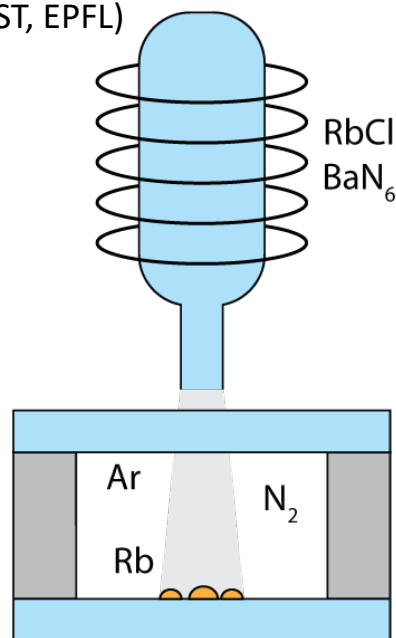
Thanks to P. Bonnay



## Banc de remplissage traditionnel adapté aux technologies MEMS

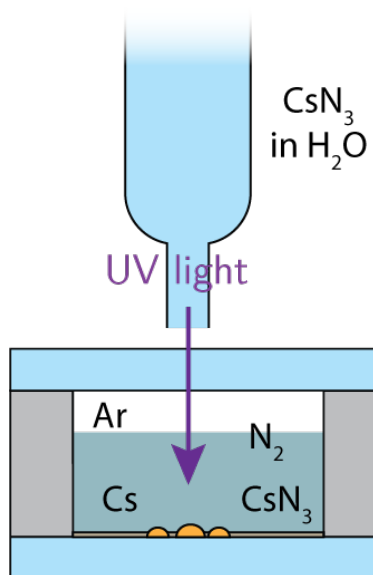
V. Maurice et al., Nature Microsystems and Nanoengineering 8, 129 (2022).

A (NIST, EPFL)



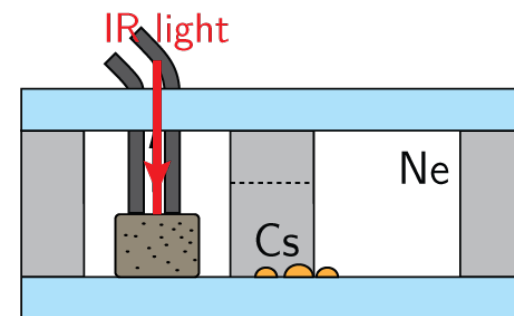
S. Knappe *et al.* *Opt. Lett.* **30**, 2351–2353 (2005).

B (NIST, IPHT-Jena, CSEM)



S. Woetzel *et al.* *Rev. Sci. Instr.* **82**, 033111 (2011).

C (FEMTO-ST, UT Wrocław)



A. Douahi *et al.* *Elec. Lett.* **43**, 33–34 (2007).  
M. Hasegawa *et al.* *Sens. Act. Phys. A* **167**, 594 (2011).

- + Stabilité démontrée
- Difficult to parallelize
- Complex setup

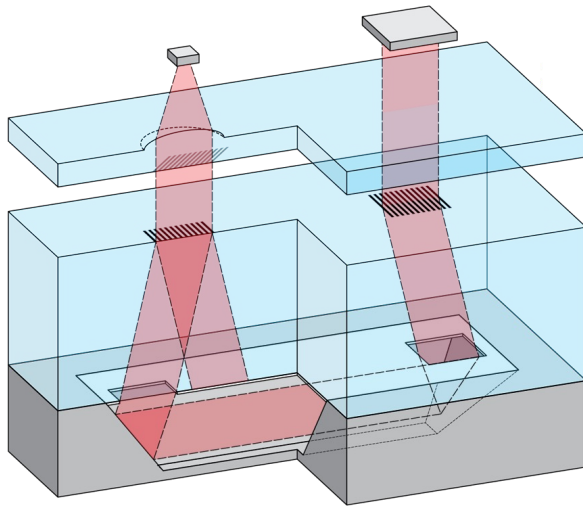
- + Equipement simple
- Quantités Cs et N<sub>2</sub> liées
- Quantité Cs trop faible

- + Equipement simple
- + Stabilité démontrée
- N<sub>2</sub> non compatible
- Volume, coûteuse

See also:

- D. G. Bopp *et al.*, *J. Phys.: Photonics* **3**, 015002 (2020)
- S. Dyer *et al.*, *J. Appl. Phys.* **132**, 134401 (2022)
- S. Dyer *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **123**, 074001 (2023)
- J. M. Pate *et al.*, *Opt. Lett.* **48**, 2 (2023)

# Wafer-level integration



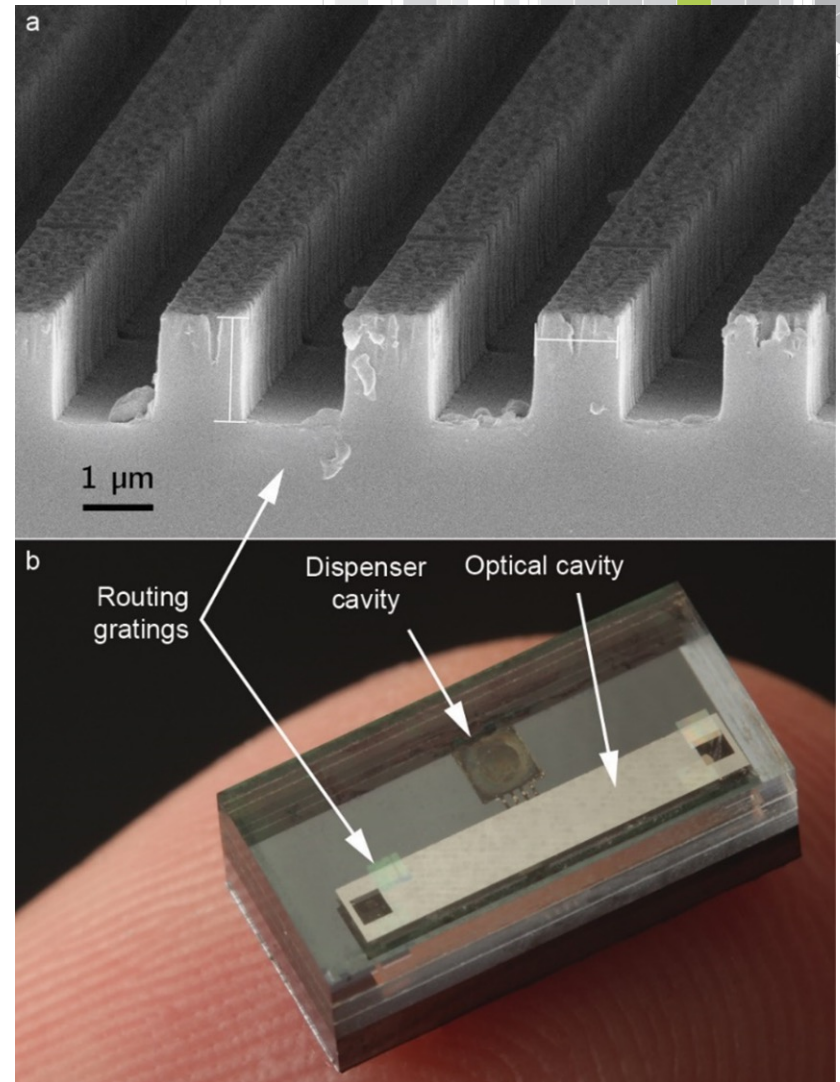
## Objectives:

Cavity oriented along the wafer plane  
→ extend at will the cavity length

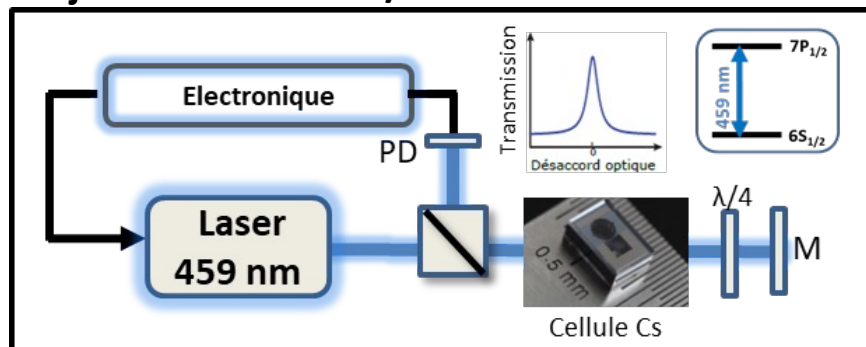
Wafer-level integration  
→ VCSEL and photodiode on the same plane

Small laser beam ( $650 \mu\text{m}$ )  
→ use microfabricated optical elements

Correct for the  $54.7^\circ$  silicon plane angle  
→ diffraction gratings  
→ order selection mask



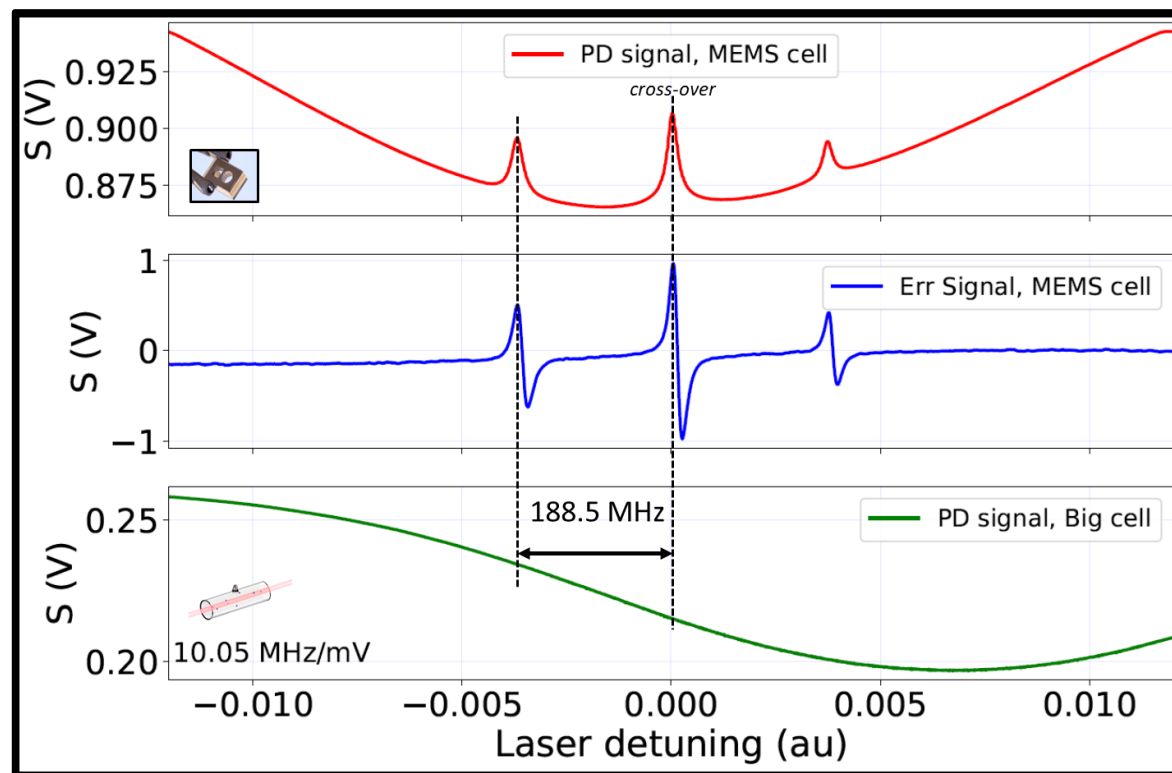
Projet LEILA FIRST-TF / Thèse C. Rivera



Spectroscopie "sub-Doppler"  
Transition Cs 6S<sub>1/2</sub> – 7P<sub>1/2</sub>

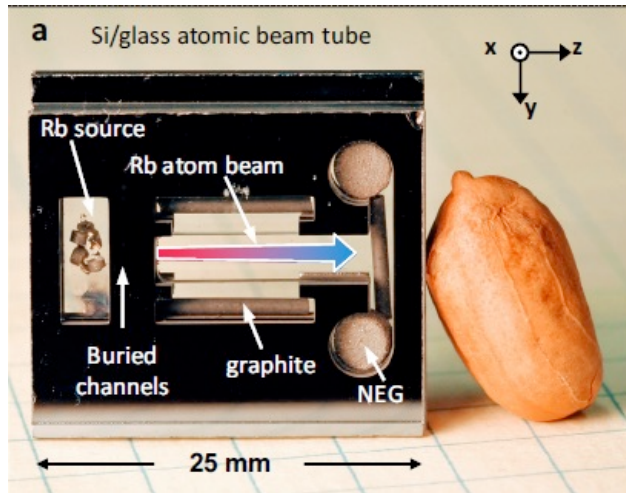
Fréquence ~ 600 THz  
Largeur naturelle ~ 1 MHz

Stabilité visée < 10<sup>-13</sup> @ 1 s

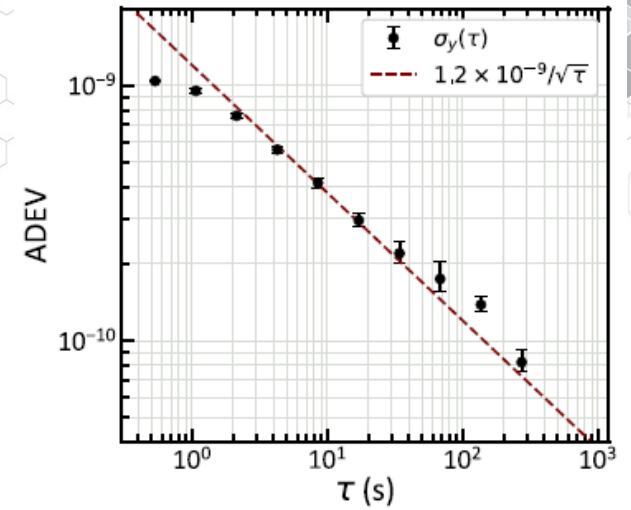
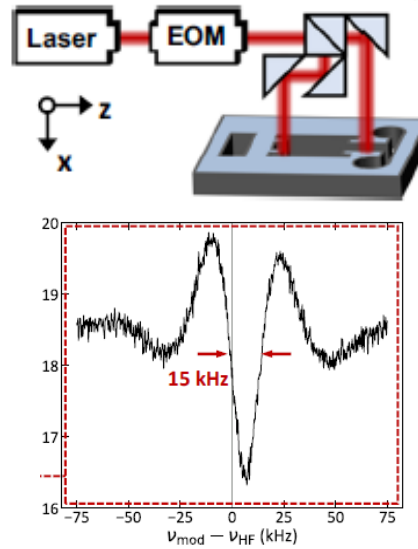


Ajouter photo  
Laser bleu

# A chip-scale Rb beam clock



Use of graphite-based dispensers



G. D. Martinez et al., *Nature Comm.* 14, 3501 (2023).



## Micro-horloges CPT industrielles

15 cm<sup>3</sup>, 150 mW, 1μs/jour

Communications, Navigation, Synchronisation, etc.

Etat de l'art en laboratoire:  $1.5 \times 10^{-12}$  à 1 jour

(Cellules, méthodes d'interrogation avancées, etc.)

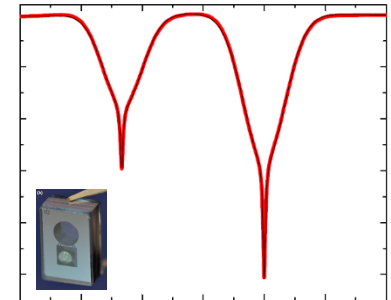


## Références optiques à microcellule

Spectroscopie sub-Doppler (ni UHV, ni atomes froids)

Gamme basse des  $10^{-13}$  à 1 s : limitées par le bruit FM du laser

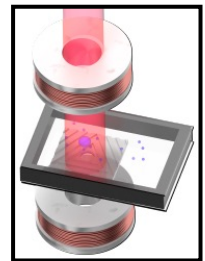
Atteindre la gamme des  $10^{-15}$  à 1 s est un objectif réaliste.



➔ Lasers intégrés “on-chip” ultra-bas bruit + cellules MEMS ultra-pures

## Nouveaux régimes de confinement / d'interrogation

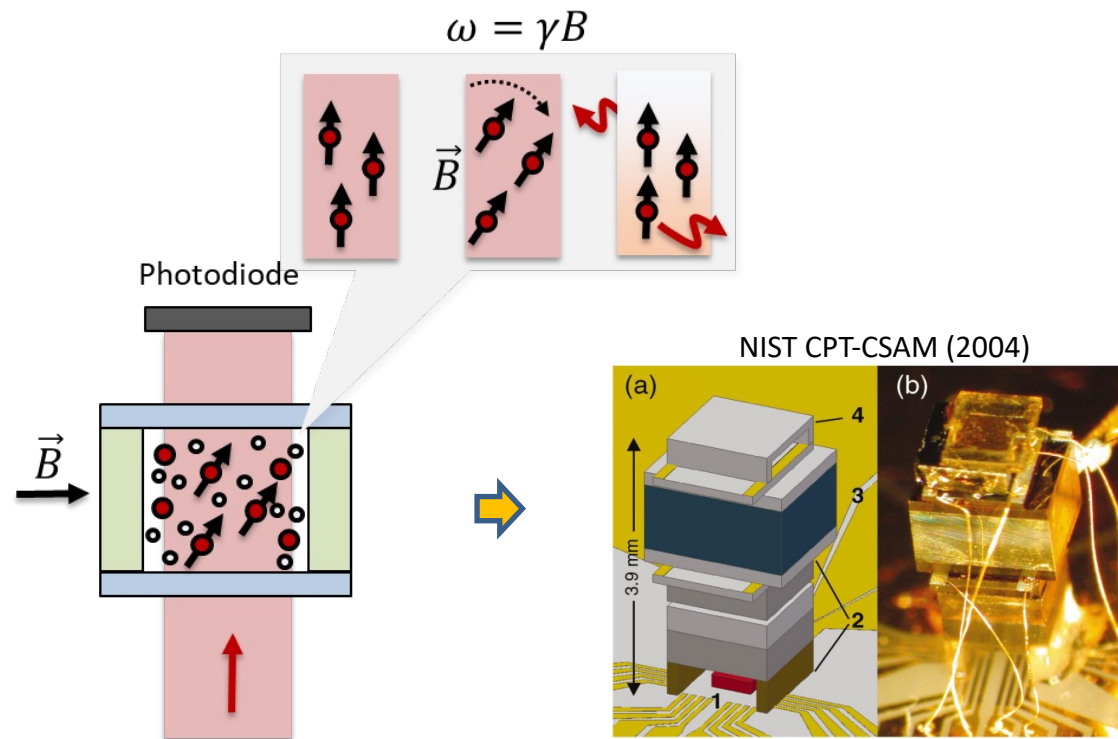
Rydberg ? Atomes froids ?



C. C. Nshii et al.,  
Nature Nano 8, 321 (2013)

Progrès bénéfiques pour autres capteurs quantiques intégrés

# Integrated quantum sensors



Optically-pumped magnetometers  
Now reaching sensitivities comparable to SQUIDs  
(few 10 fT/ )

- P. D. D. Schwindt *et al. Appl. Phys. Lett.* **85**, 6409 (2004).  
 E. Boto *et al. Nature* (2018)  
<https://www.cercamagnetics.com/>  
<https://fieldlineinc.com/>  
 E. J. Pratt *et al. Optical and Quantum Sensing and Precision Metrology* 1170032 (SPIE, 2021).  
<https://www.kernel.com/flux>

Compact, room temperature sensors  
for magnetoencephalography



FieldLine

