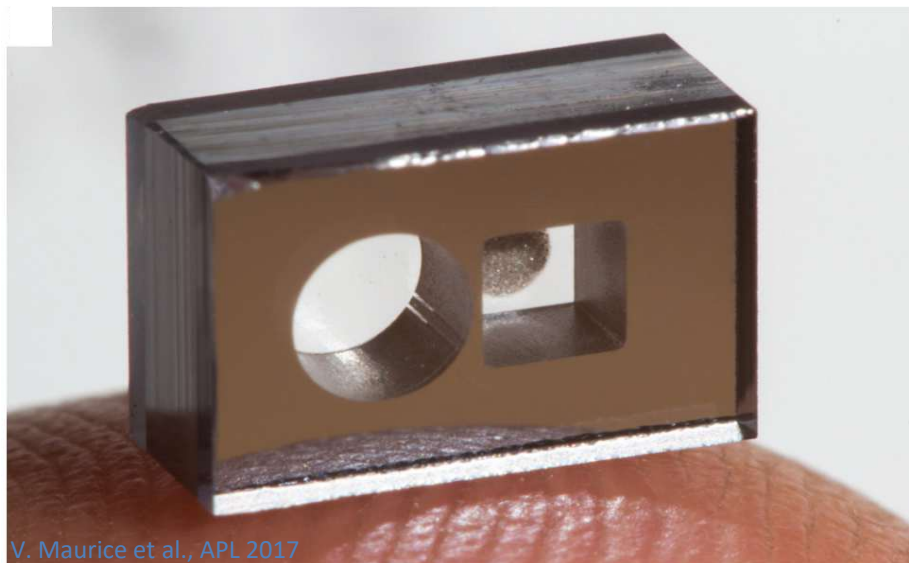


Micro-horloges atomiques



V. Maurice et al., APL 2017

R. Boudot

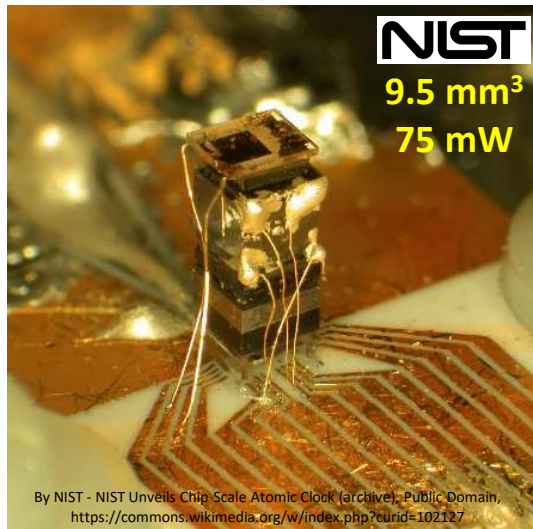
FEMTO-ST, CNRS, Besançon, France

rodolphe.boudot@femto-st.fr

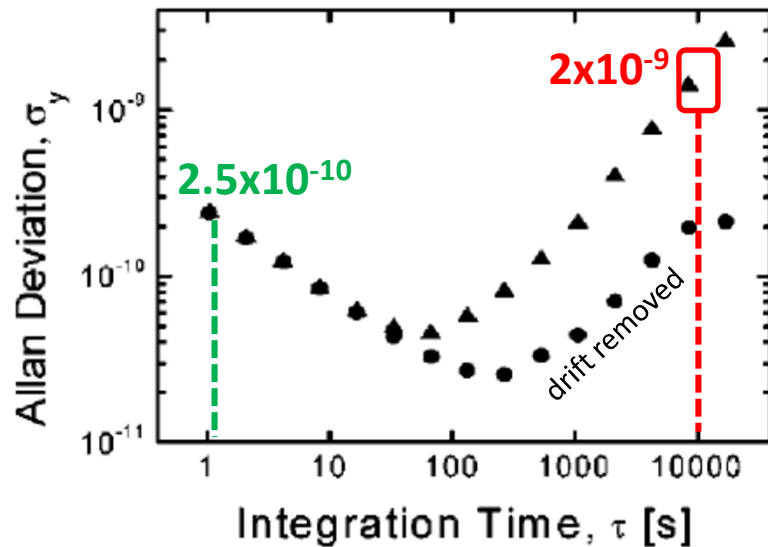
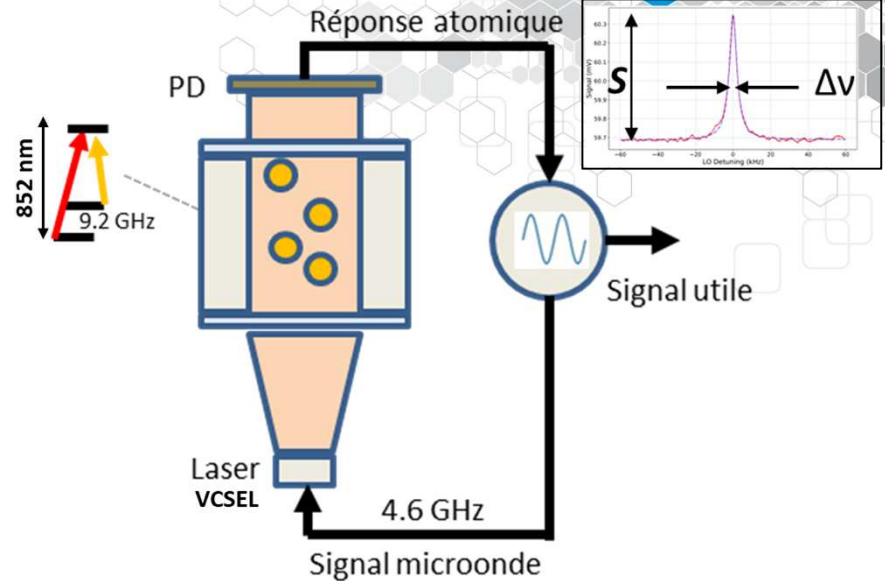
<http://teams.femto-st.fr/equipe-ohms/>

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

20^{ème} anniversaire de la première micro-horloge atomique



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



Forte contribution internationale



Horloges miniatures
basse consommation

Besoins et spécifications

Applications

Navigation

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

Sensing

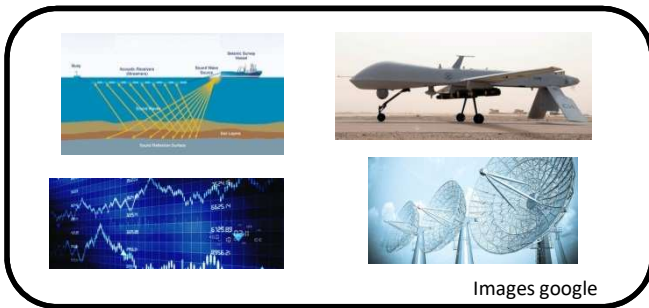
Réseaux de capteurs en fonds océaniques
Etudes sismiques, exploration de ressources

Réseaux mobiles / Communications

Synchronisation de stations de base
Communications sécurisées

Synchronisation de réseaux

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



Spécifications

Volume < 20 cm³
Dispositifs embarqués

Consommation < 150 mW
Missions longue-durée sur batterie

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

Stabilité de fréquence 10⁻¹¹ à 1 h et 1 jour
Erreur temporelle < 1 μs/jour

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

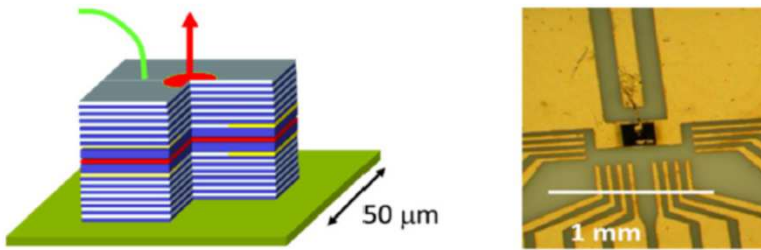
100 fois + stable à 1 jour qu'un OCXO "standard"
Budget volume-consommation comparable

Blocs-clés des micro-horloges atomiques

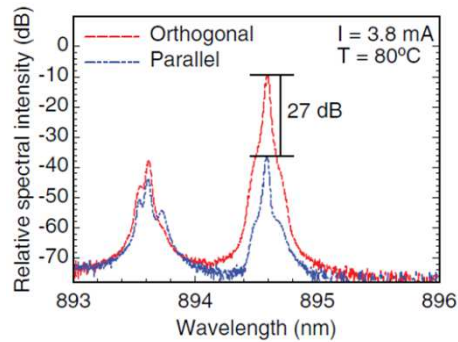
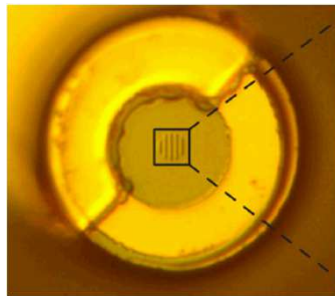
VCSELs

Raie D₁ des alcalins : λ : 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**, 171104 (2012)

Fournisseurs Cs D₁ (895 nm) rares

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

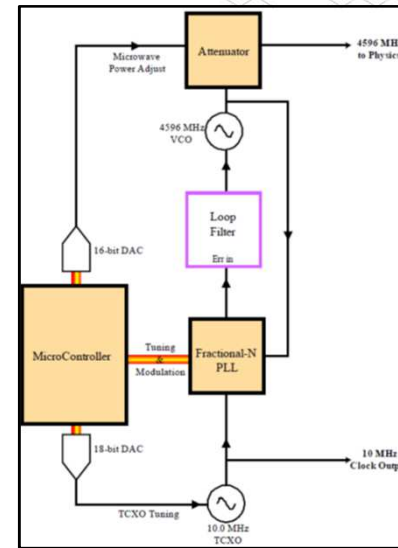
Le bruit FM de VCSEL limite la stabilité à 1 s



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

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

Oscillateur local

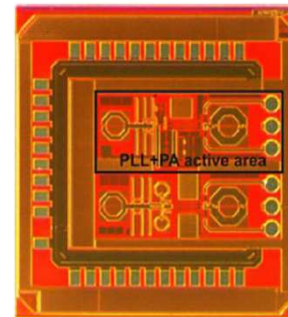


R. Lutwak *et al.*, *IFCS* 2007

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

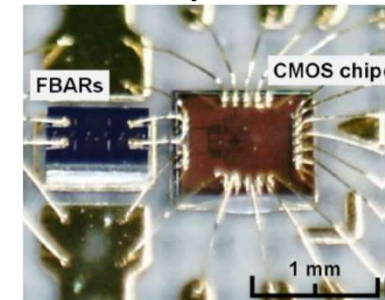


ASICs



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

FBARs / HBARs



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

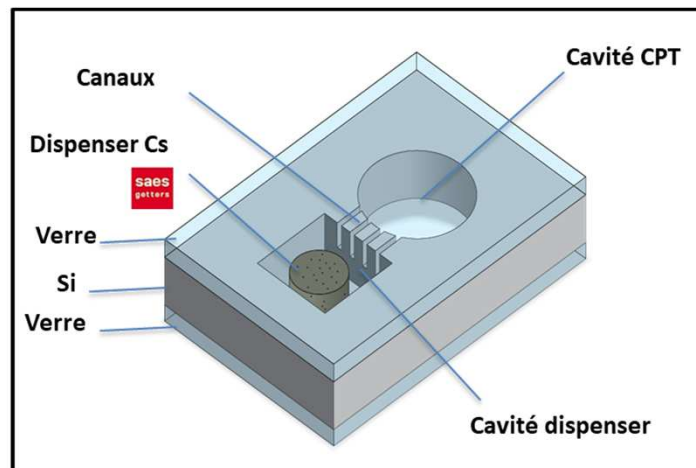
Technologie de microcellule

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

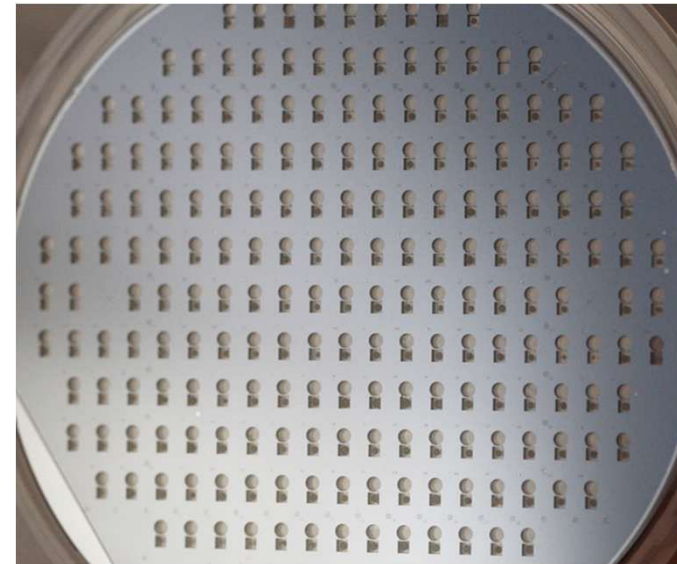
- * Neutralité chimique par rapport au métal alcalin
- * Hermiticité suffisante: éviter fuites de gaz
- * Compatibilité avec les techniques de fabrication collective sur wafer

Approche Générale:

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



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



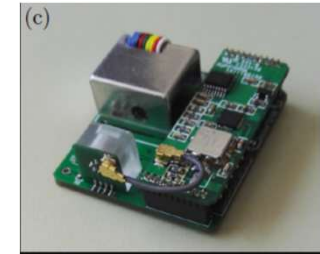
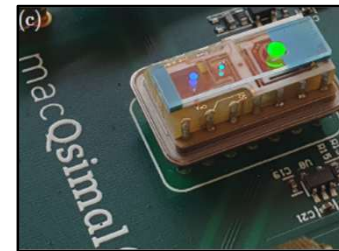
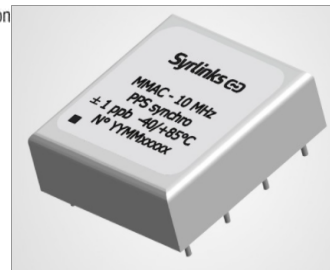
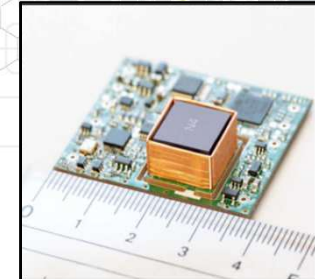
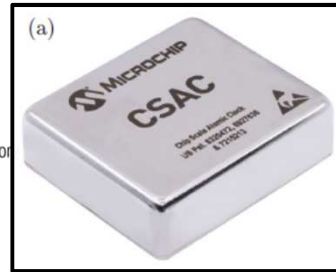
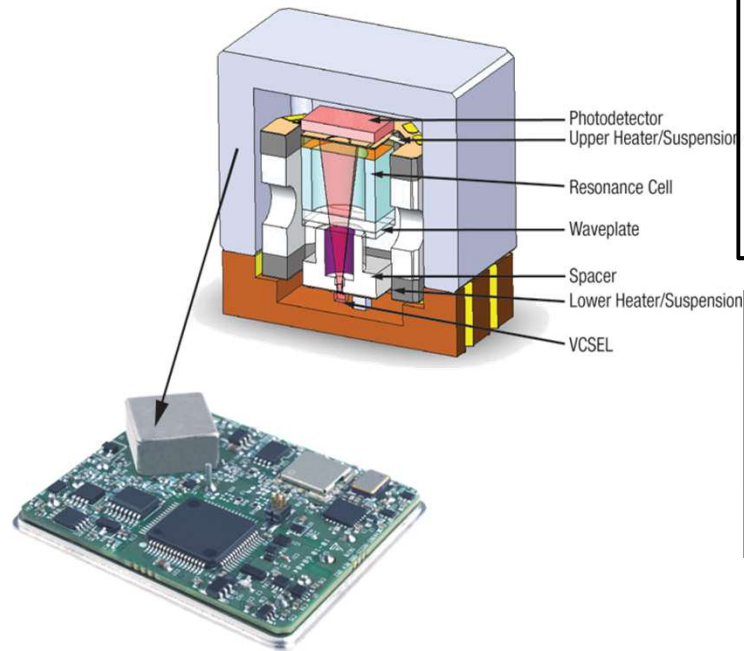
Transférée industriellement

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)

Micro-horloges CPT



(> 200 000 CSACs vendues)

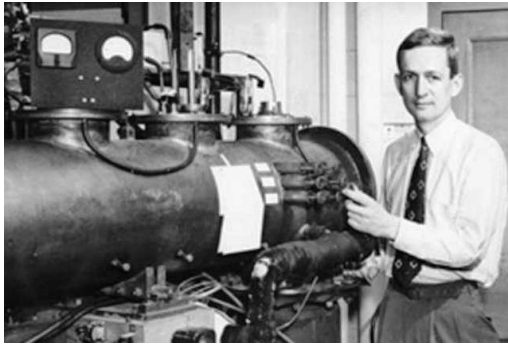
Limitations des micro-horloges CPT

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)

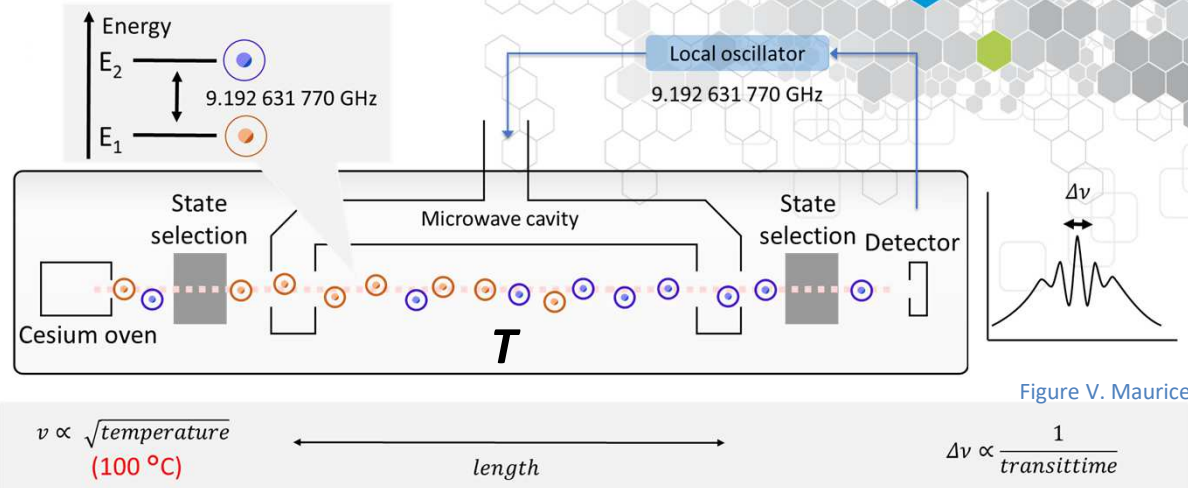


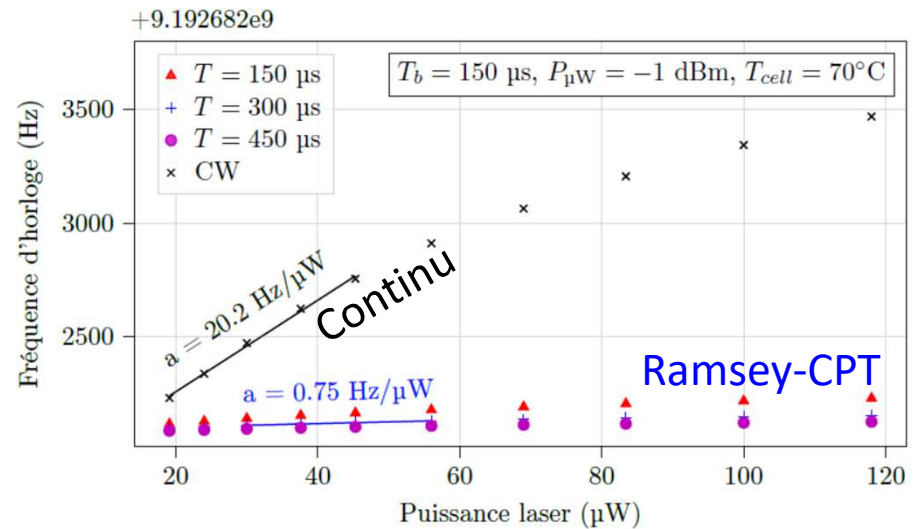
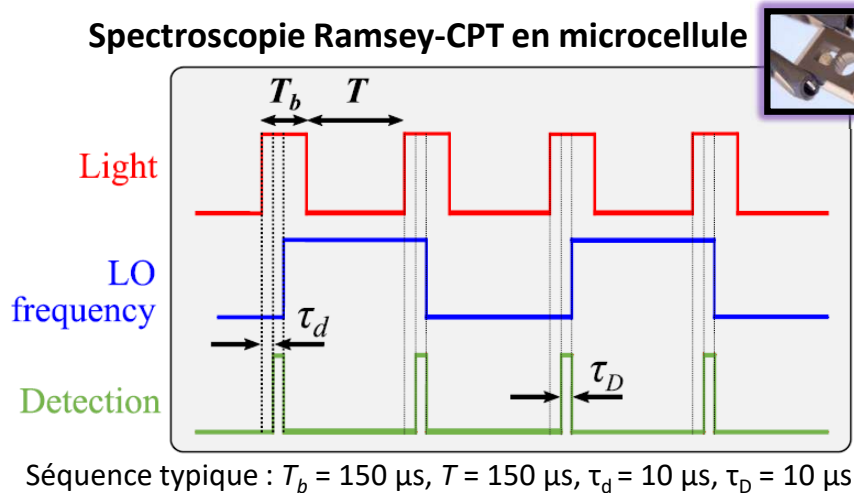
Figure V. Maurice

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)

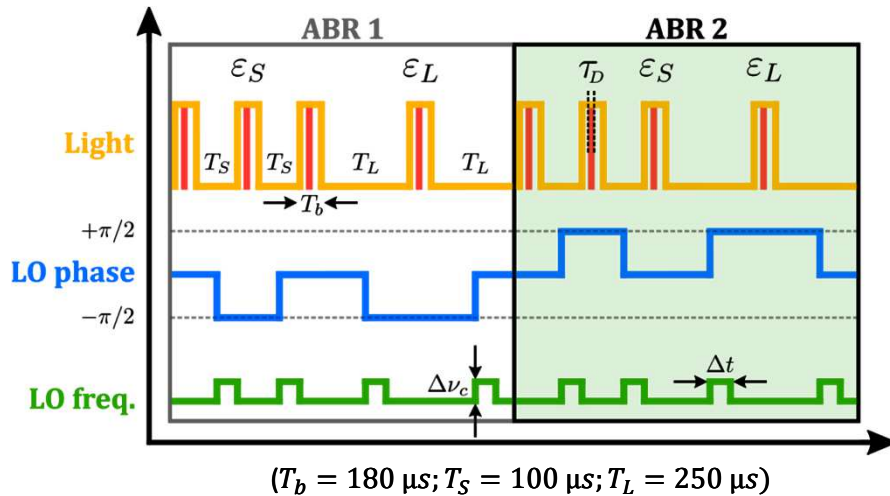
Spectroscopie Ramsey-CPT en microcellule



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

Réduction des déplacements lumineux: SABR

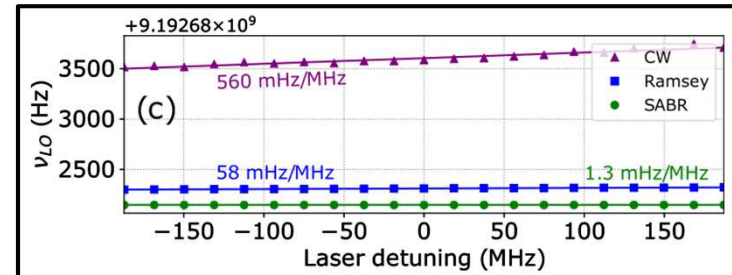
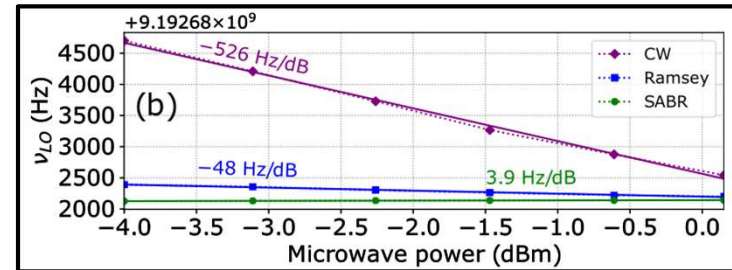
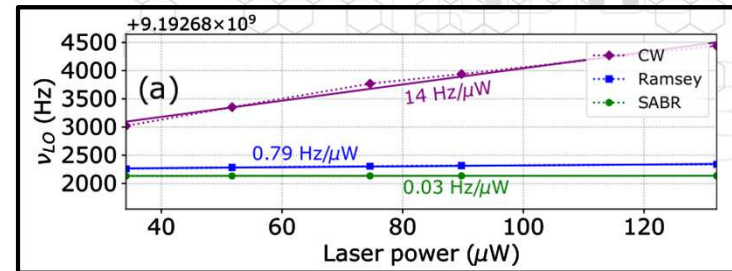
“Symmetric Auto-Balanced Ramsey” (SABR)



Signaux d'erreur ε_S et ε_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**

C. Sanner *et al.*, Phys. Rev. Lett. **120**, 053602 (2018)
M. Abdel Hafiz *et al.*, Appl. Phys. Lett. **112**, 244102 (2018)

M. Abdel Hafiz *et al.*, Appl. Phys. Lett. **120**, 064101 (2022)

Perméation de gaz

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 Al_2O_3) à l'hélium ("traceur de gaz")

Déplacement collisionnel

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

Perméation

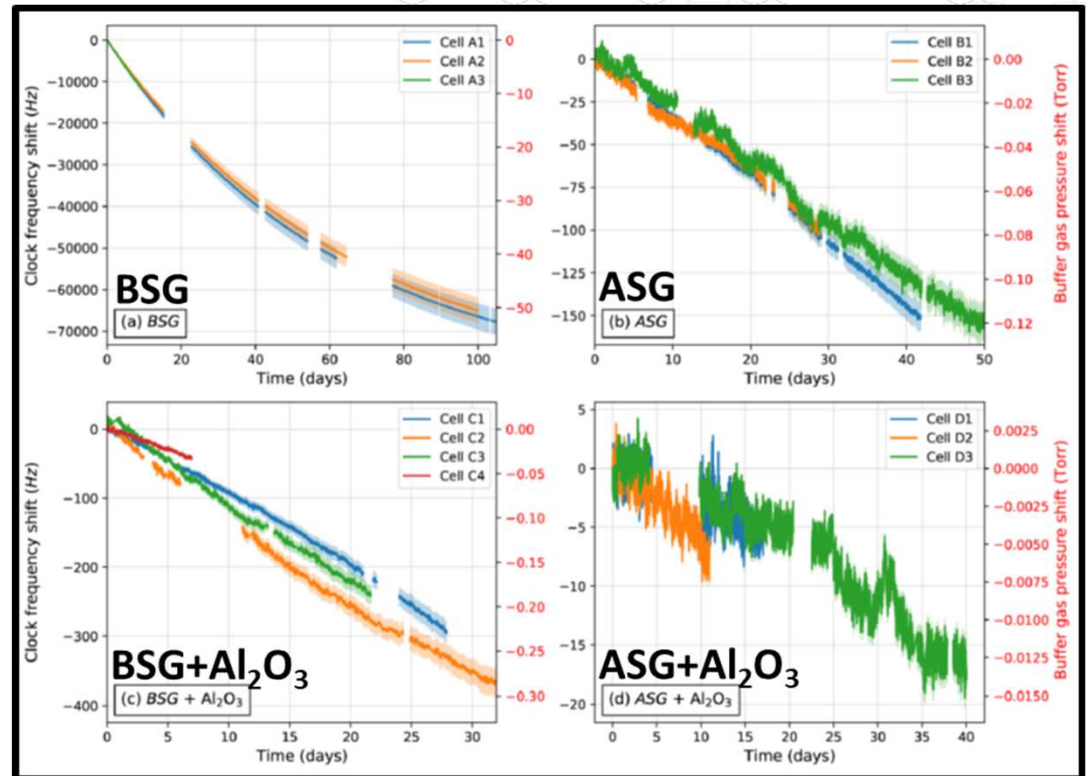
$$P(t) = P_{ext} - (P_{ext} - P_{in})e^{-t/\tau},$$

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

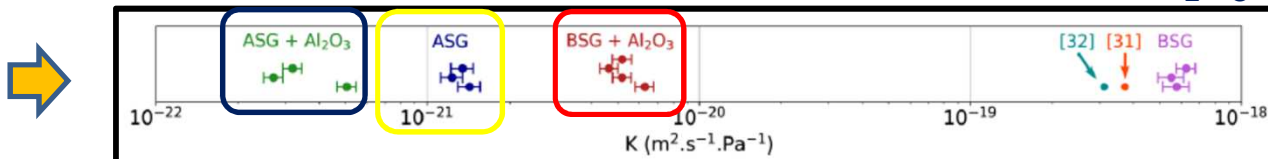
V. O. Altemose, J. Appl. Phys. **32**, 1309 (1961)

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

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

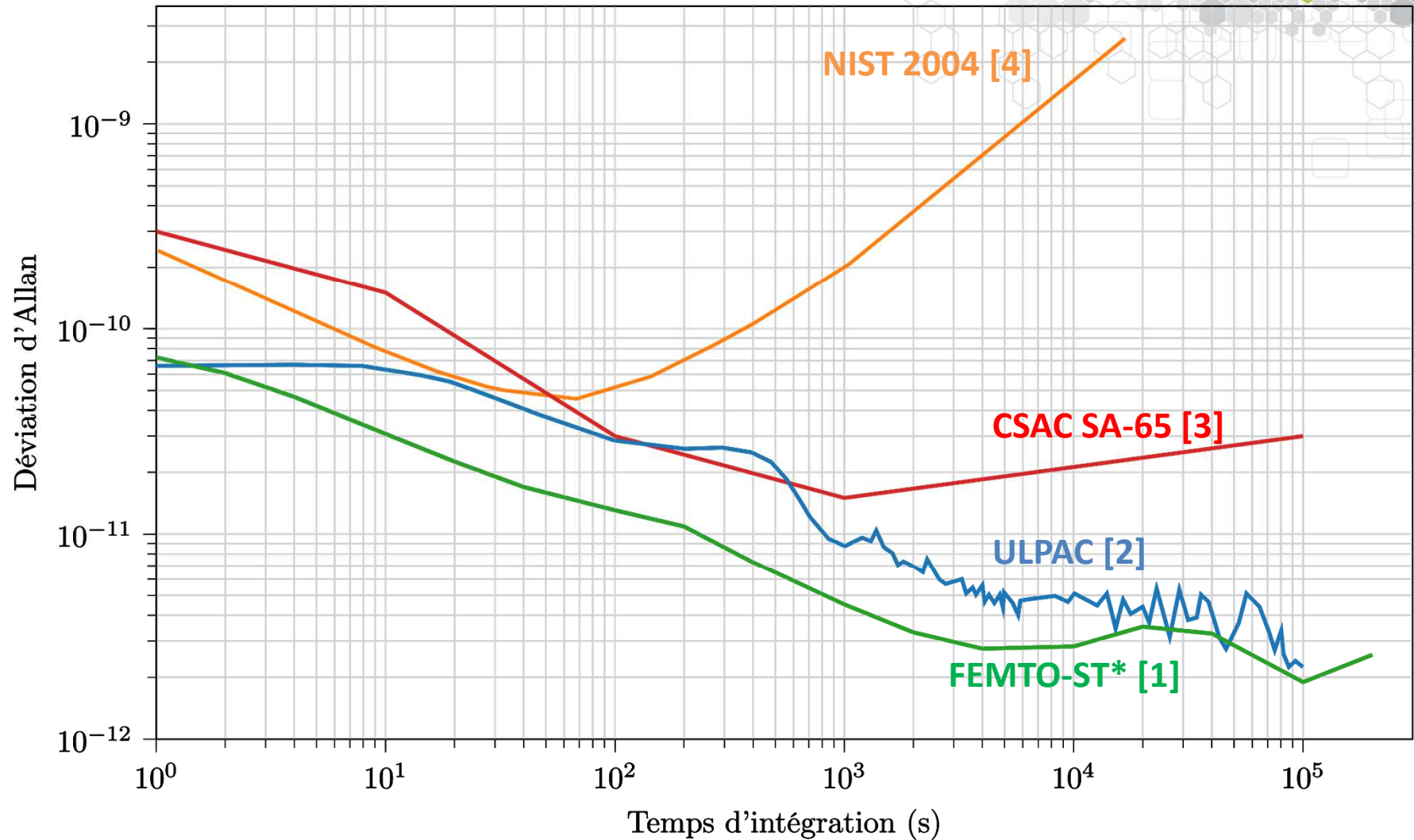


Réduction de la perméation He > 1000 avec ASG + Al_2O_3



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

Stabilité d'horloges à microcellule CPT



- [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)

Horloges atomiques miniatures de nouvelle génération

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

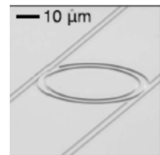
$S/N = 2 \times 10^3$

Augmenter la fréquence ν_0

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

Besoin: Micro-résonateurs optiques
pour optique -> microonde

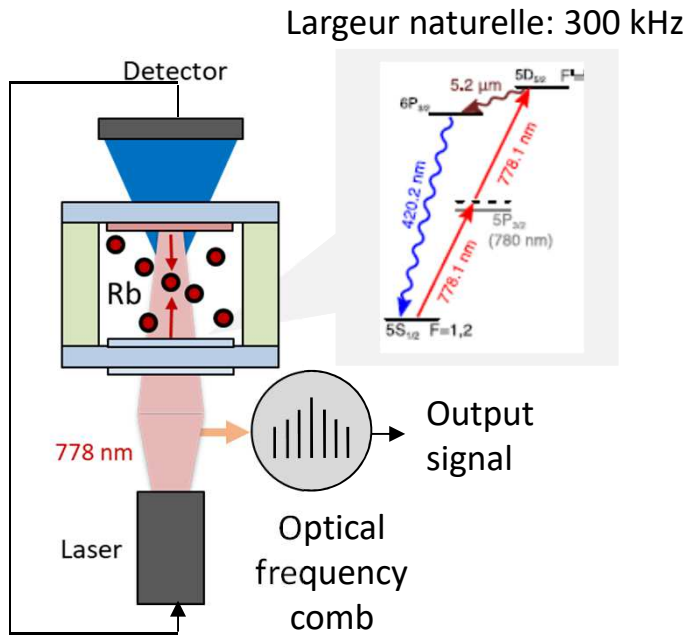
Z. Newman *et al.*, *Optica* 6, 5 (2018)



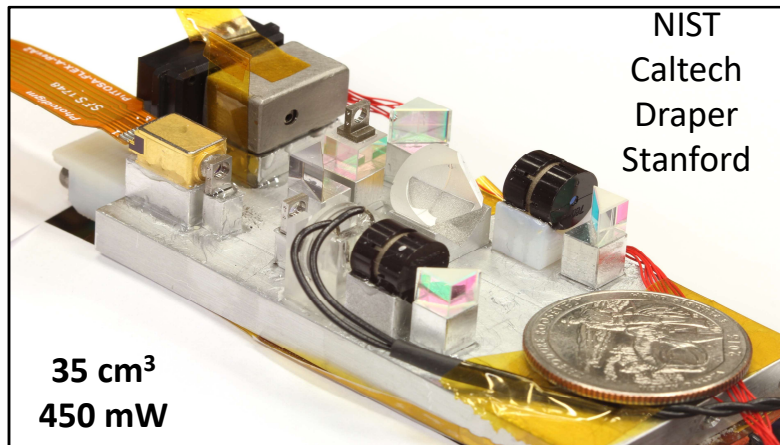
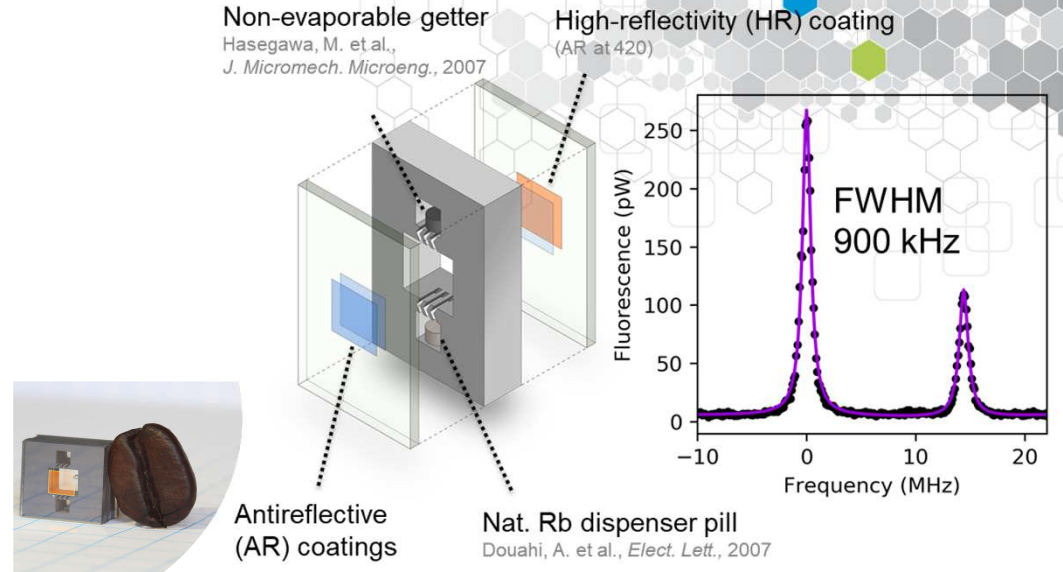
Augmenter le SNR

Lasers faible bruit

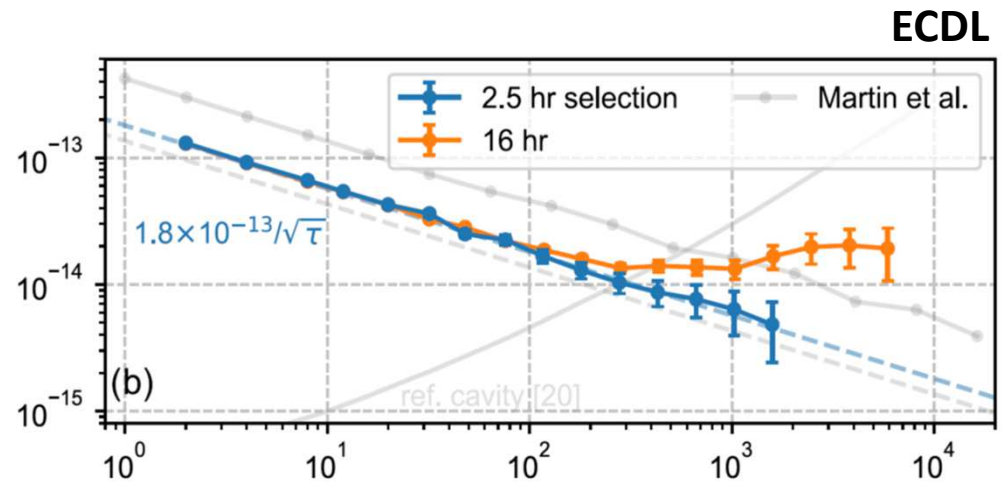
Référence optique: transition 2-photons (Rb 778 nm)



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

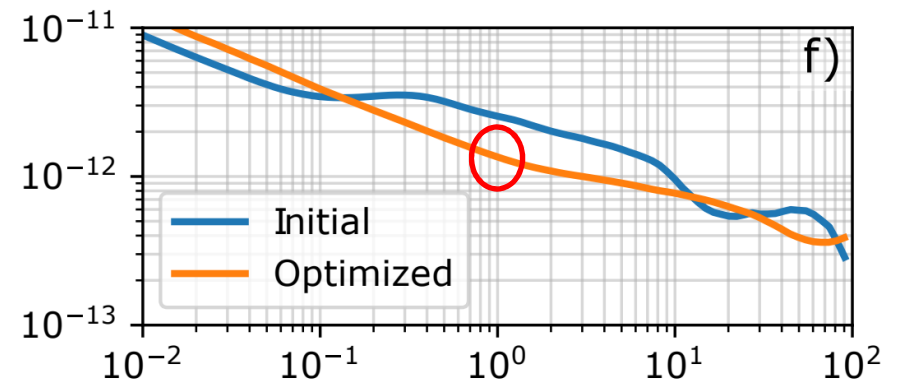
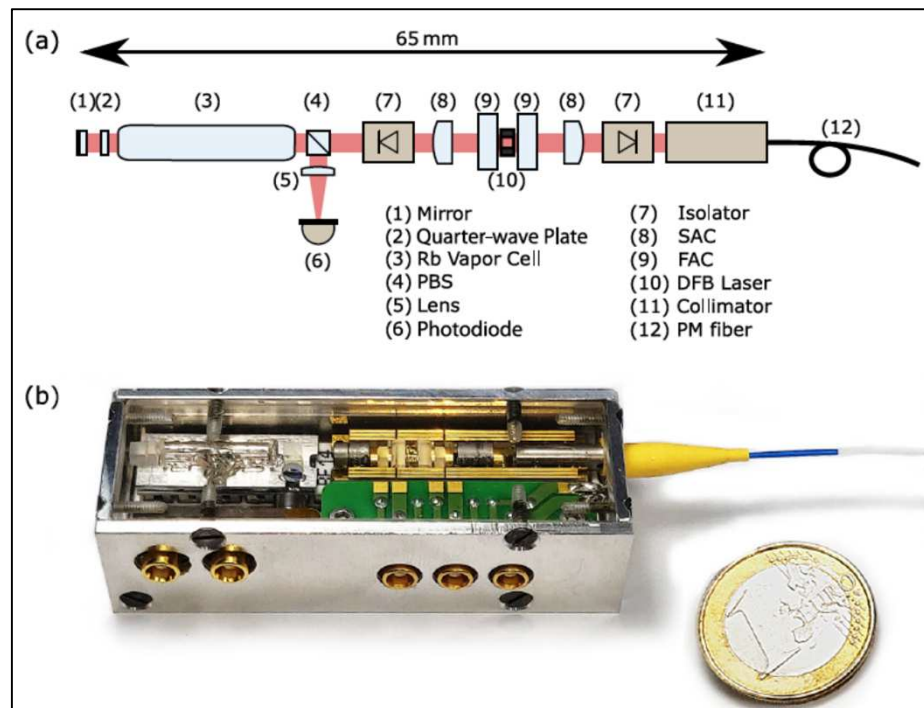
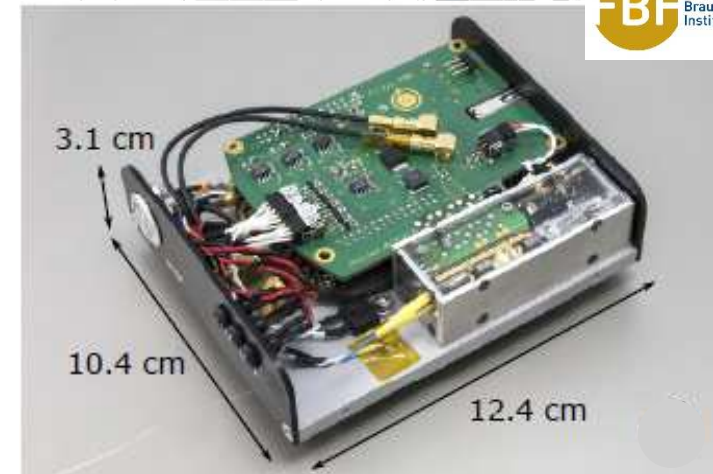


V. Maurice *et al.*, *Opt. Exp.* **28**, 17 (2020)



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

Référence optique par absorption saturée (Rb 780 nm)



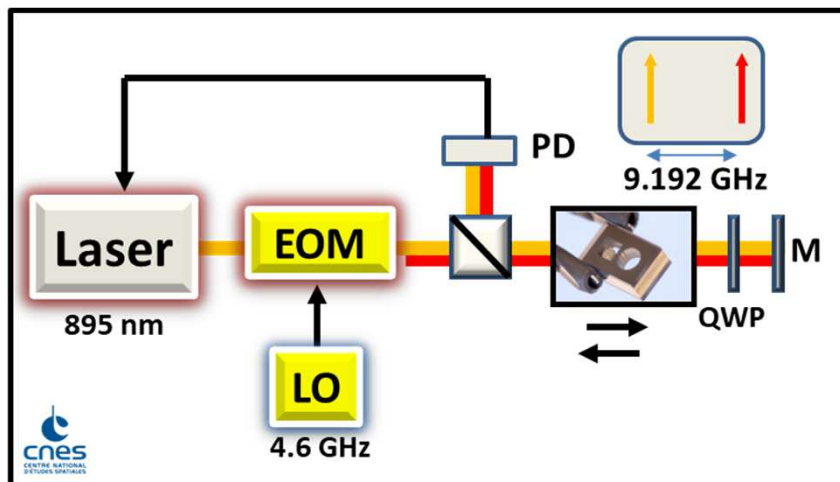
A. Strangfeld et al. Opt. Exp. 30, 7, 12039 (2022)

Stabilité: 1.7×10^{-12} @ 1 s

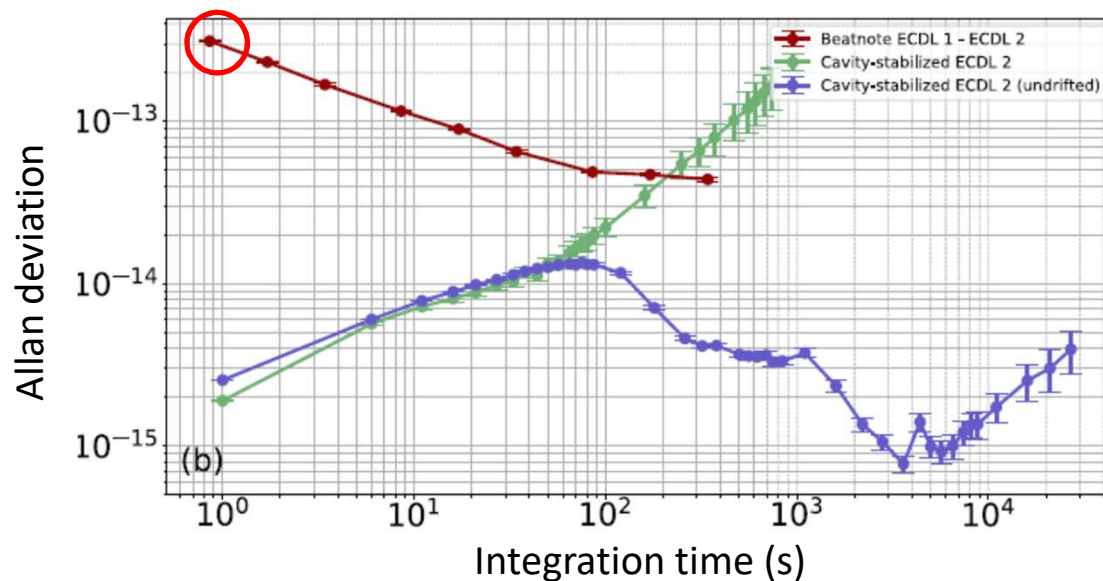
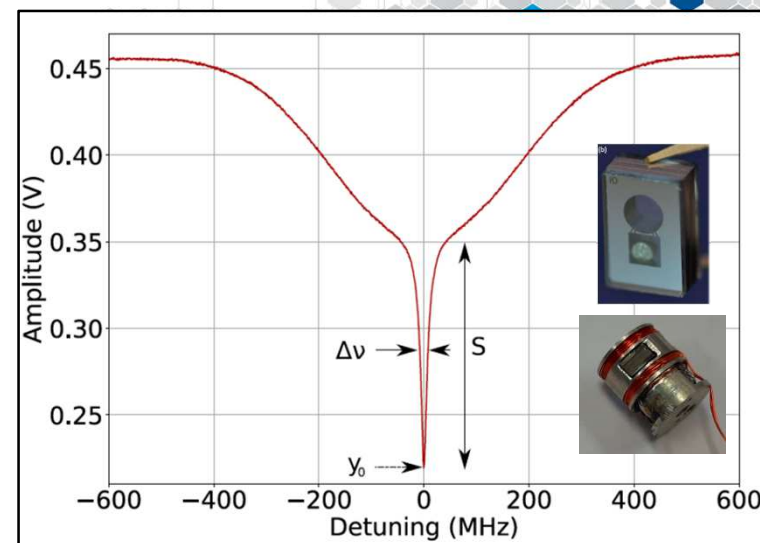
Largeur naturelle ~ 5 MHz

Module optique: 35 cm³, 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)



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

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

Conclusions et perspectives

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

Court terme:

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

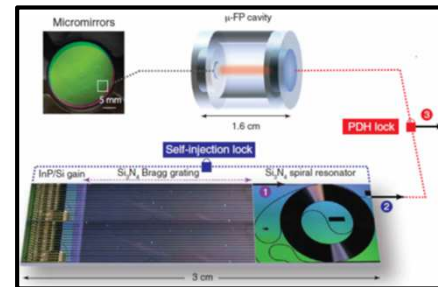
Moyen terme:

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)

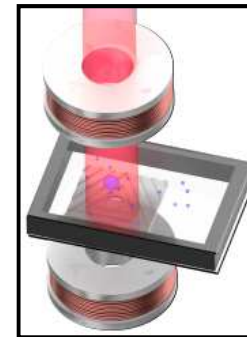
Entrer la gamme des 10^{-14} est réaliste



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

University Strathclyde

James McGilligan
Erling Riis

