



HAL
open science

Micro-horloges atomiques

Rodolphe Boudot

► **To cite this version:**

Rodolphe Boudot. Micro-horloges atomiques. Assemblée générale FIRST-TF, Nov 2023, Nice, France.
hal-04780388

HAL Id: hal-04780388

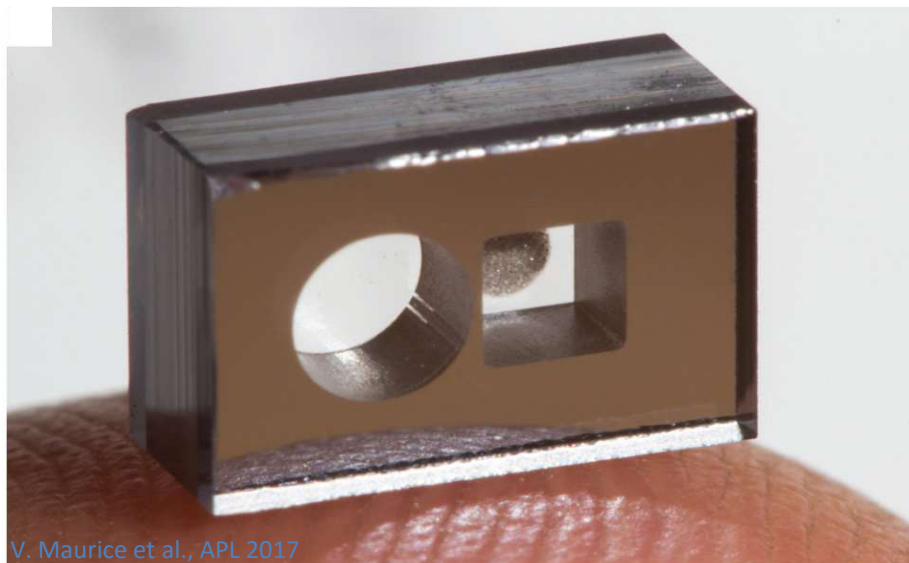
<https://hal.science/hal-04780388v1>

Submitted on 13 Nov 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Micro-horloges atomiques



V. Maurice et al., APL 2017

R. Boudot

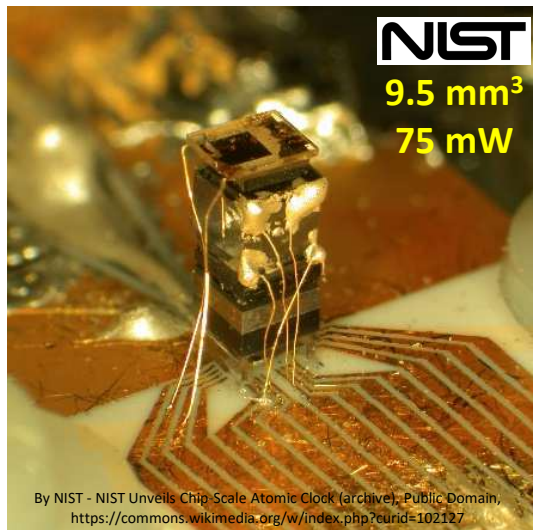
FEMTO-ST, CNRS, Besançon, France

rodolphe.boudot@femto-st.fr

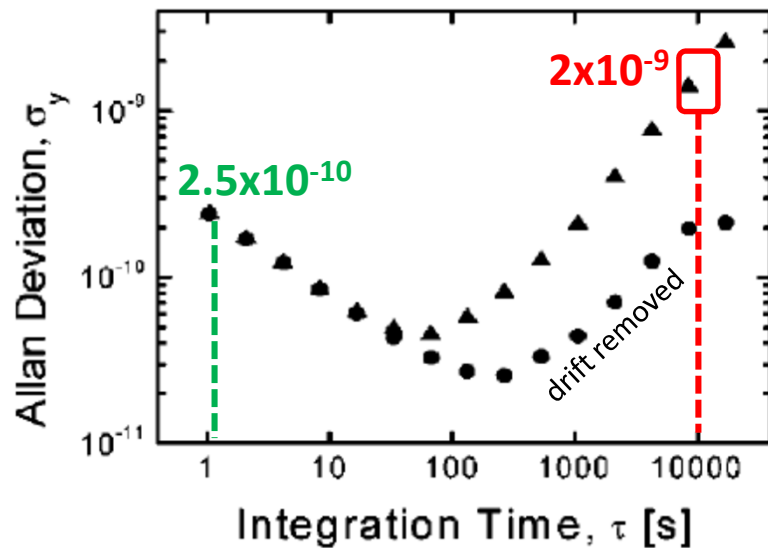
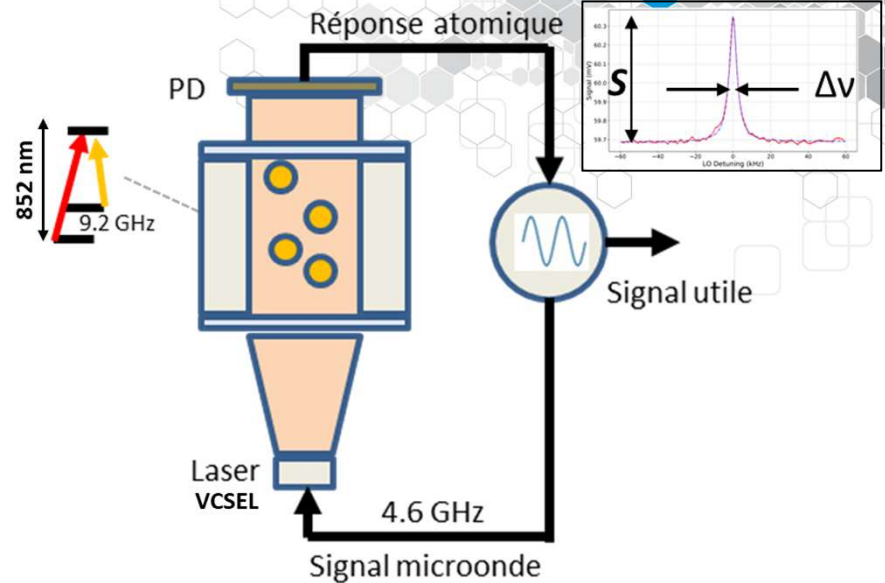
<http://teams.femto-st.fr/equipe-ohms/>

<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

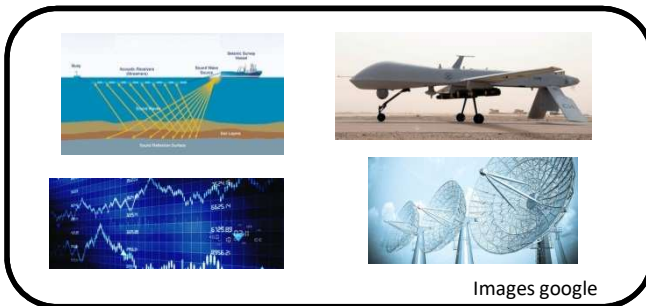
Réseaux de capteurs en fonds océaniques
Etudes sismiques, exploration de ressources

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)

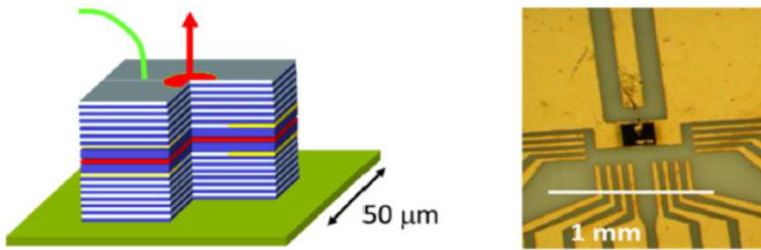
100 fois + stable à 1 jour qu'un OCXO "standard"
Budget volume-consommation comparable

Blocs-clés des micro-horloges atomiques

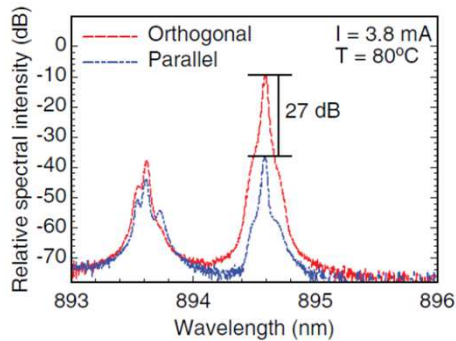
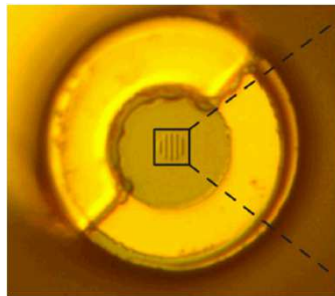
VCSELs

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)

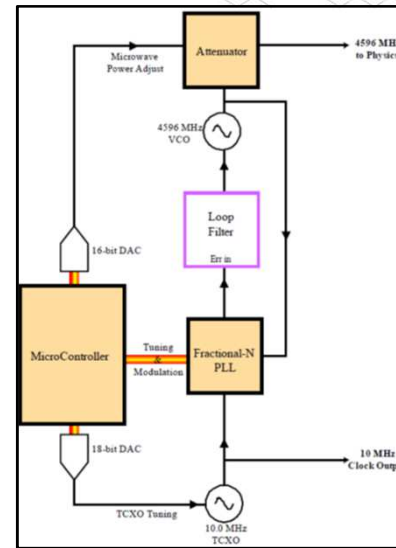
Le bruit FM de VCSEL limite la stabilité à 1 s



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

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

Oscillateur local

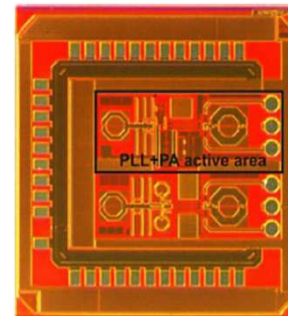


R. Lutwak *et al.*, *IFCS* 2007

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

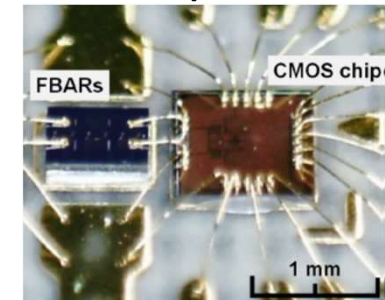


ASICs



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

FBARs / HBARs



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

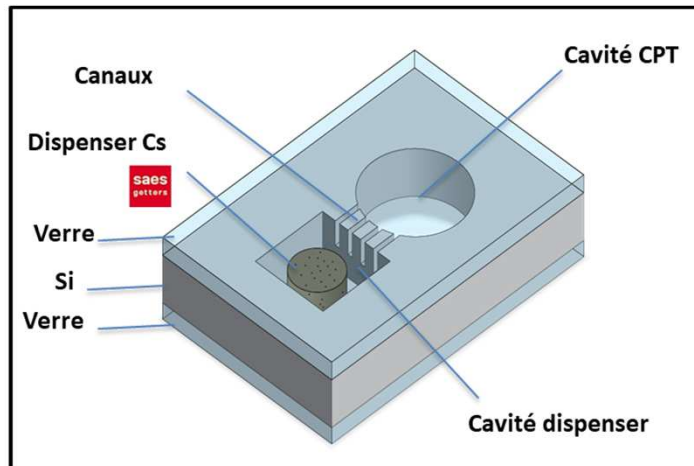
Technologie de microcellule

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

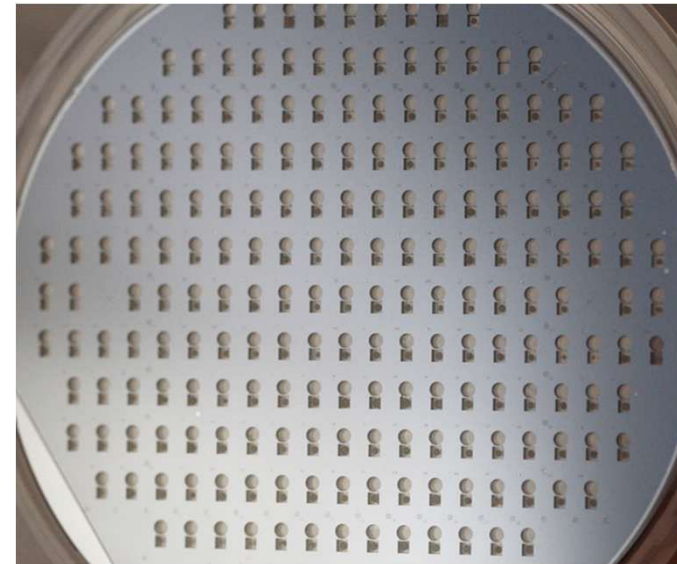
- * Neutralité chimique par rapport au métal alcalin
- * Hermiticité suffisante: éviter fuites de gaz
- * Compatibilité avec les techniques de fabrication collective sur wafer

Approche Générale:

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



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



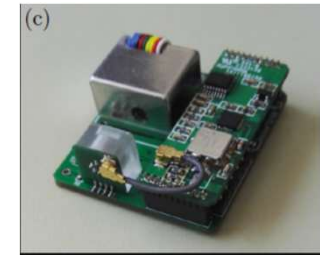
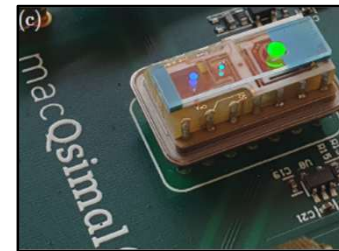
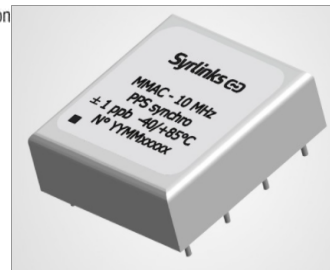
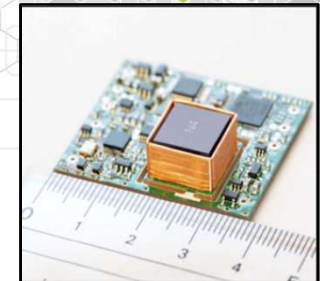
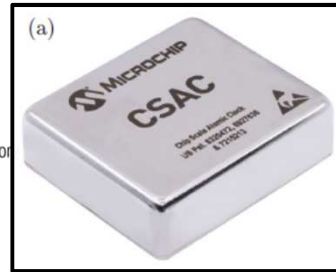
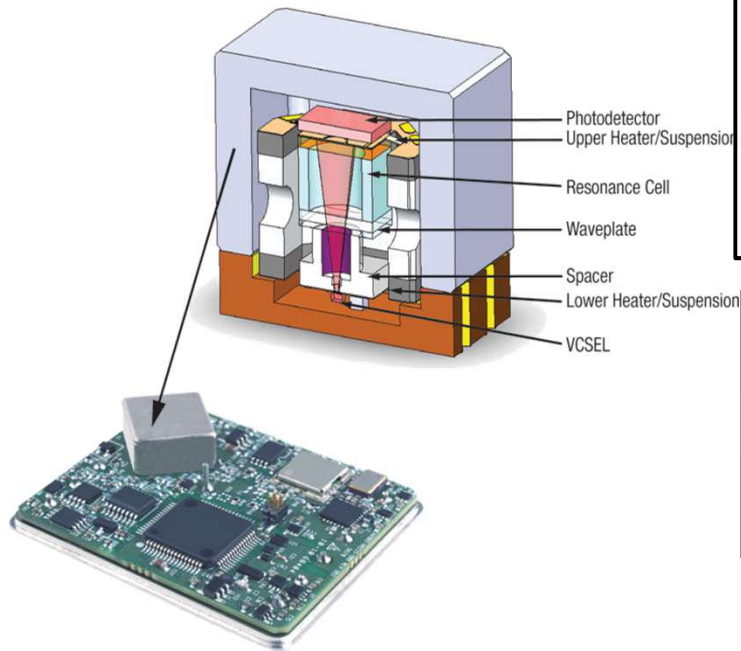
Transférée industriellement

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)

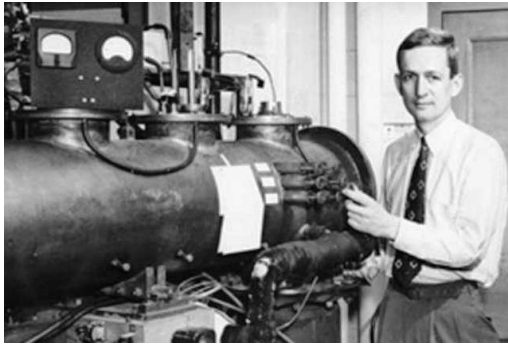
Limitations des micro-horloges CPT

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)

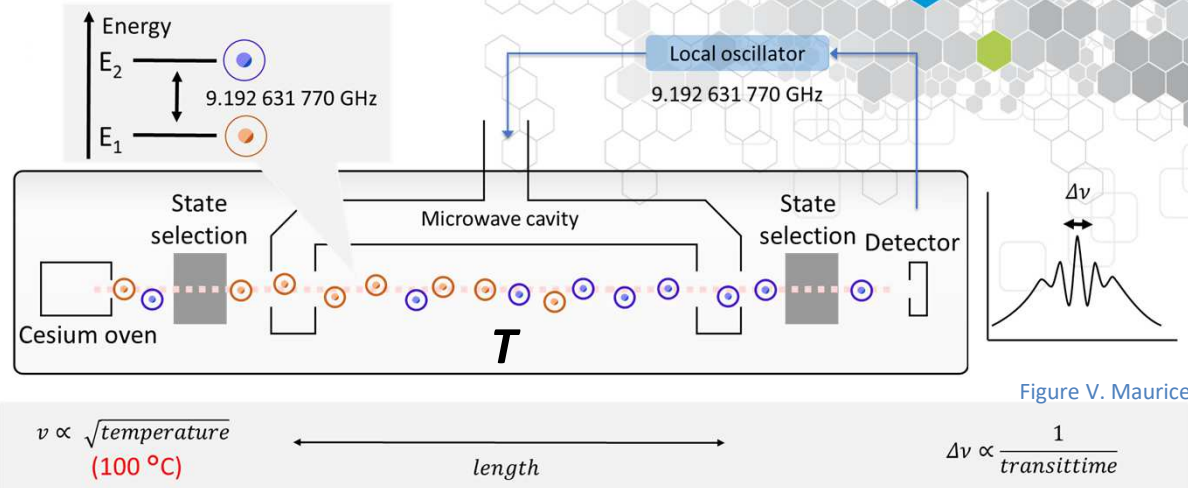


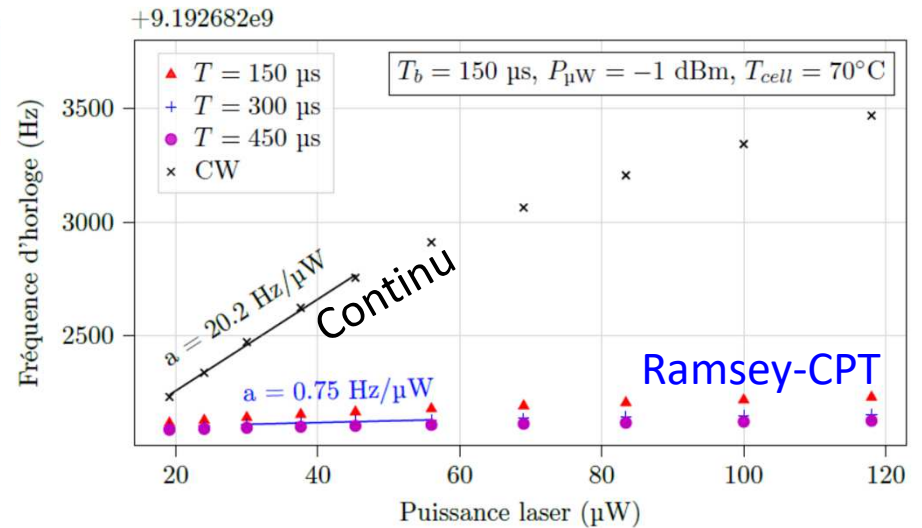
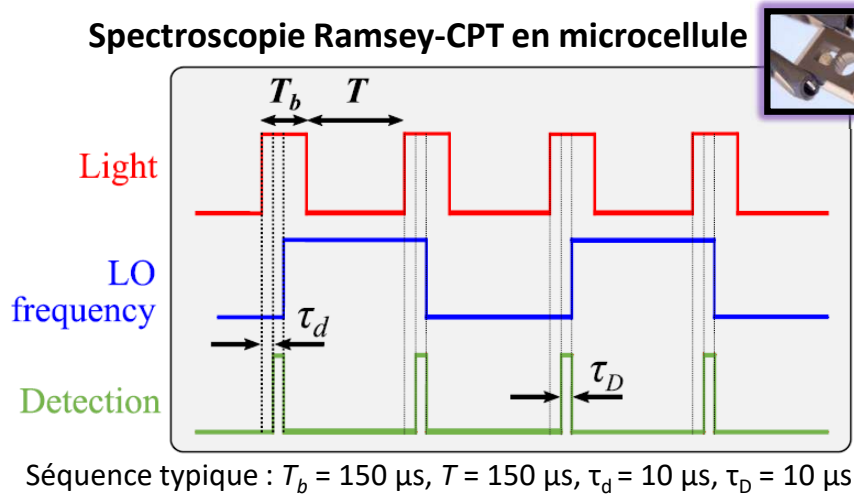
Figure V. Maurice

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)

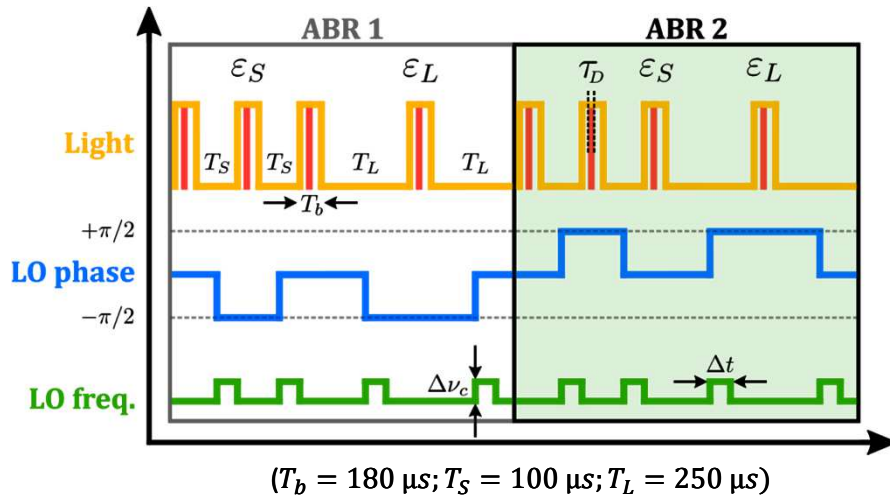
Spectroscopie Ramsey-CPT en microcellule



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

Réduction des déplacements lumineux: SABR

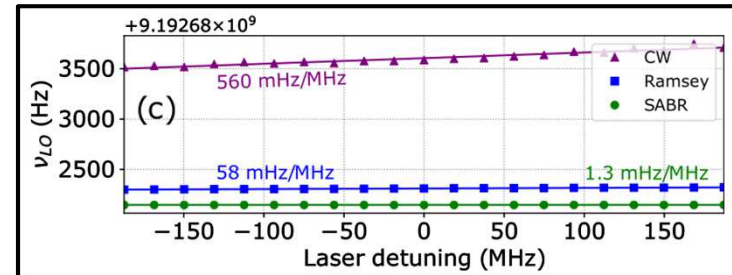
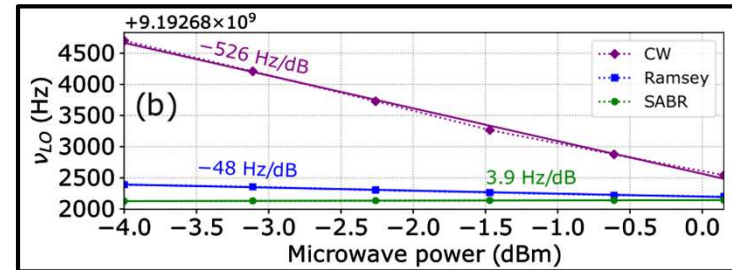
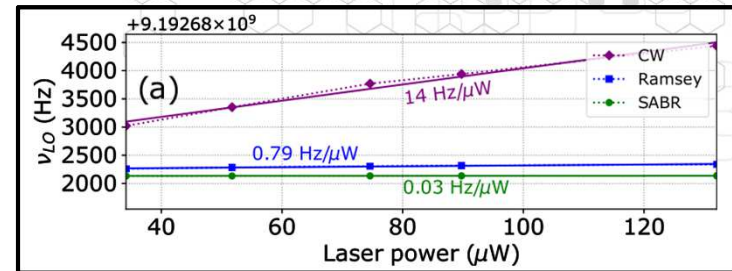
“Symmetric Auto-Balanced Ramsey” (SABR)



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

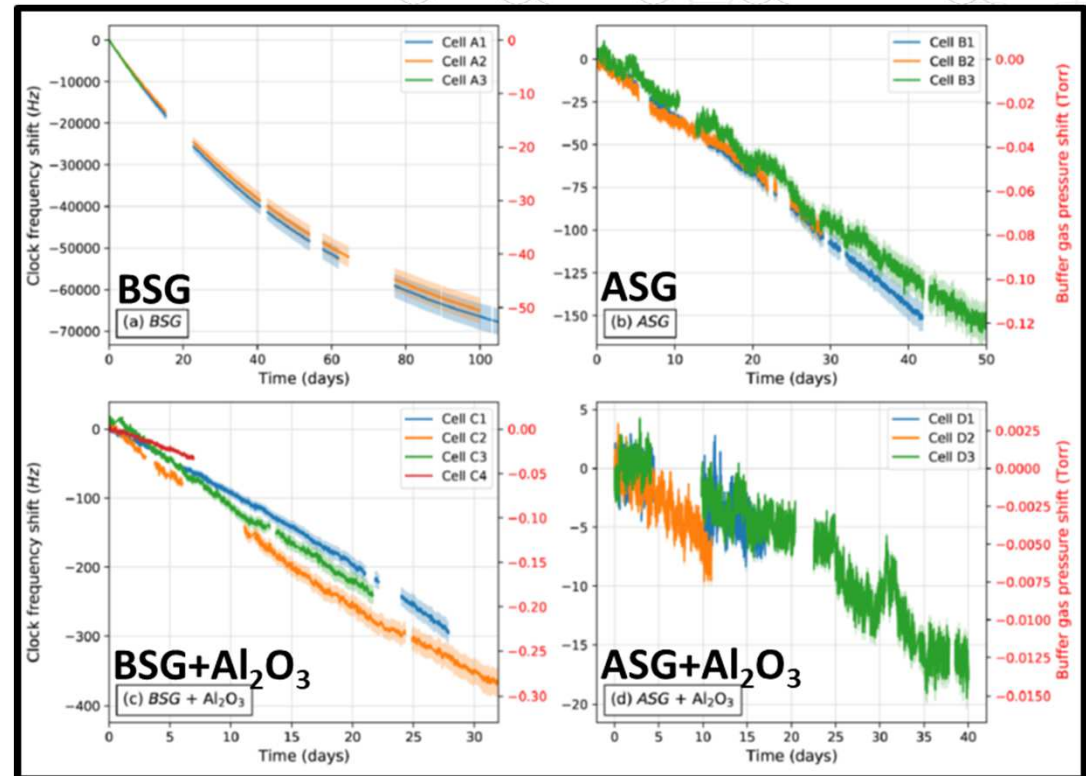
$$\Delta\nu_{bg} = P[\beta + \delta(T - T_0) + \gamma(T - T_0)^2],$$

Perméation

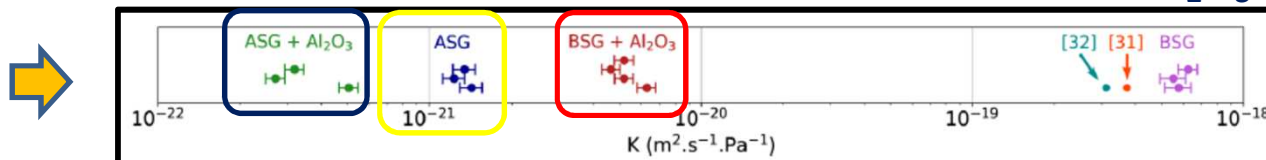
$$P(t) = P_{ext} - (P_{ext} - P_{in})e^{-t/\tau},$$

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

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)

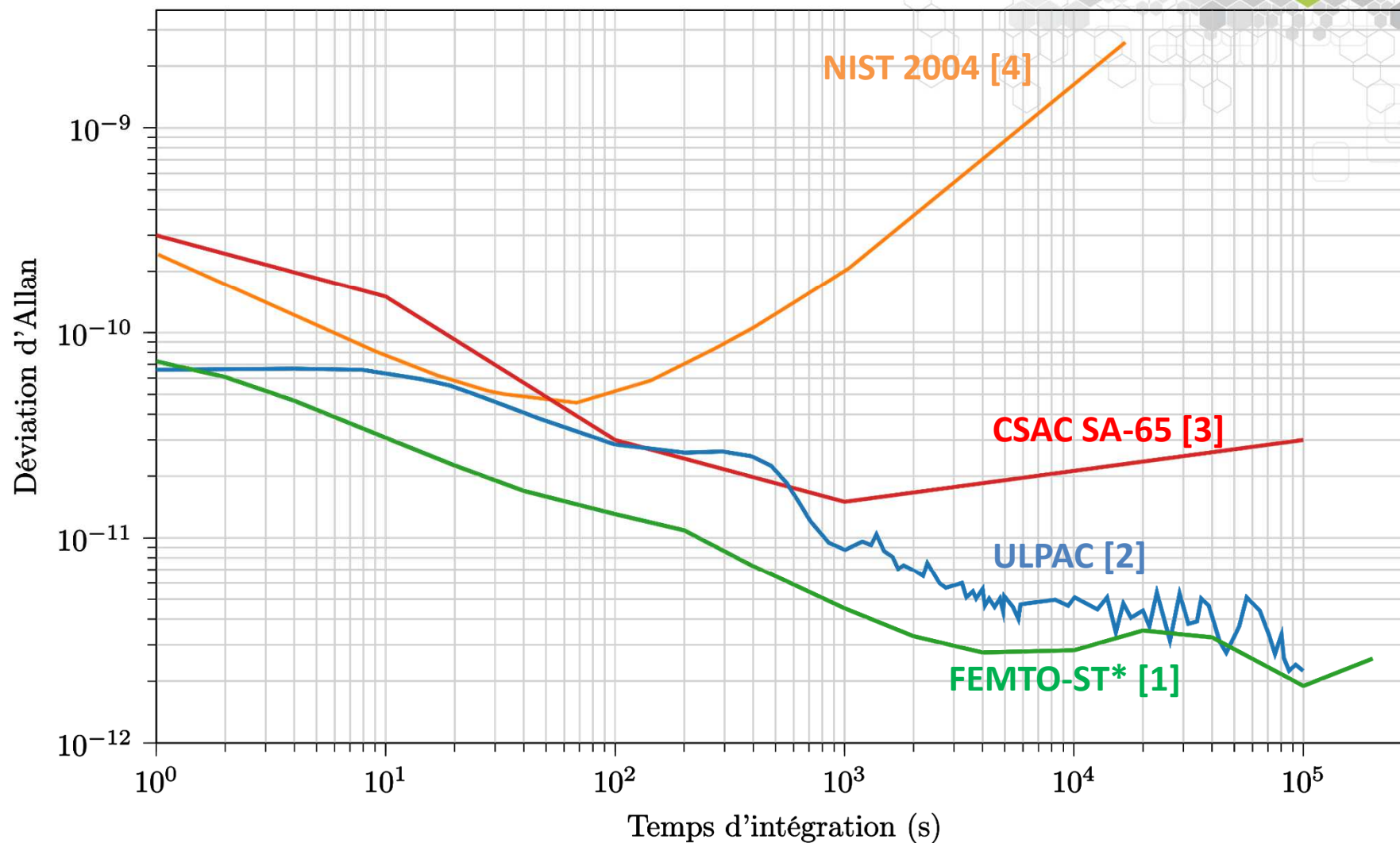


Réduction de la perméation He > 1000 avec ASG + Al₂O₃



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

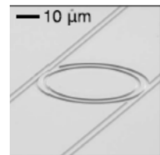
$S/N = 2 \times 10^3$

Augmenter la fréquence ν_0

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

Besoin: Micro-résonateurs optiques
pour optique -> microonde

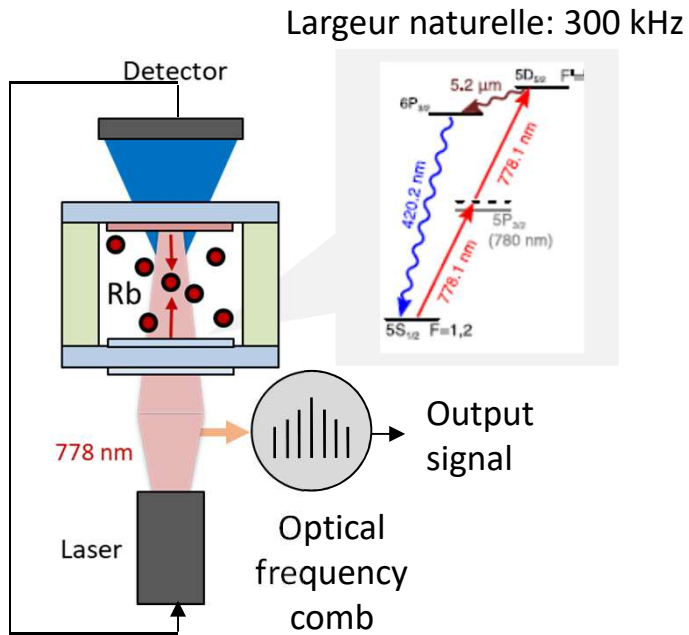
Z. Newman *et al.*, *Optica* 6, 5 (2018)



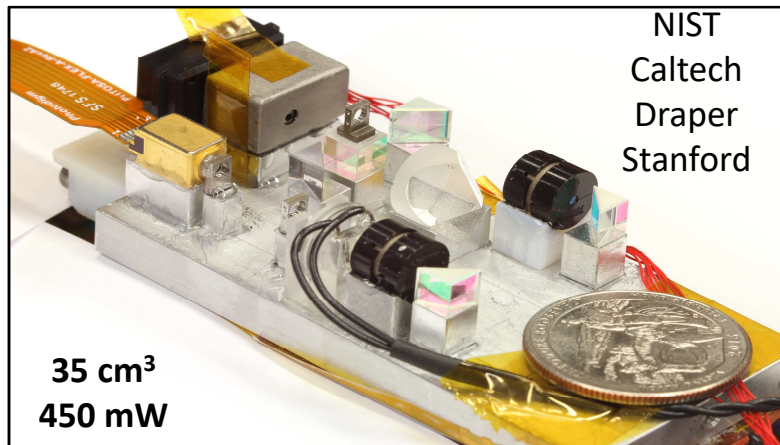
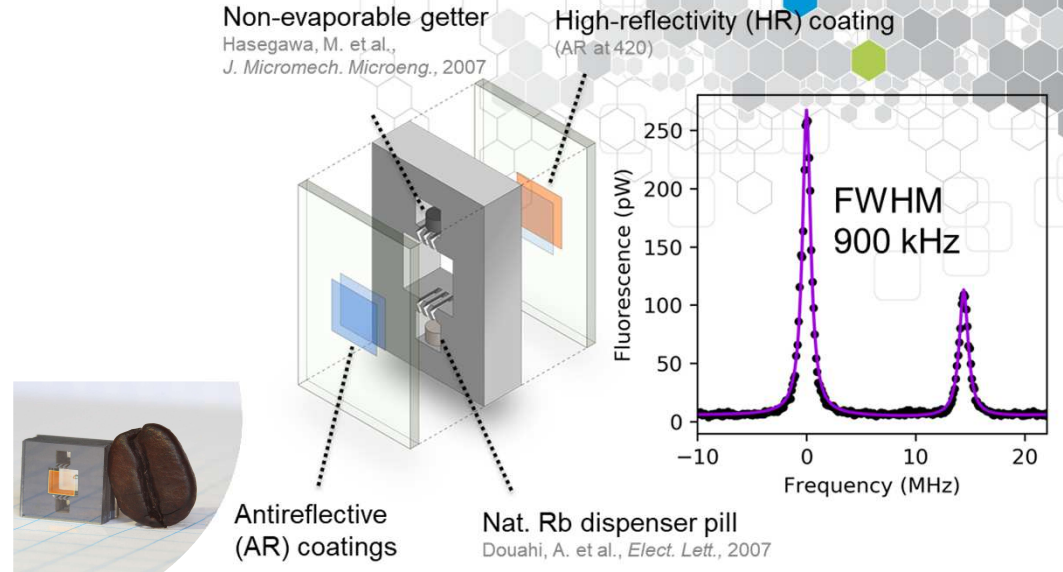
Augmenter le SNR

Lasers faible bruit

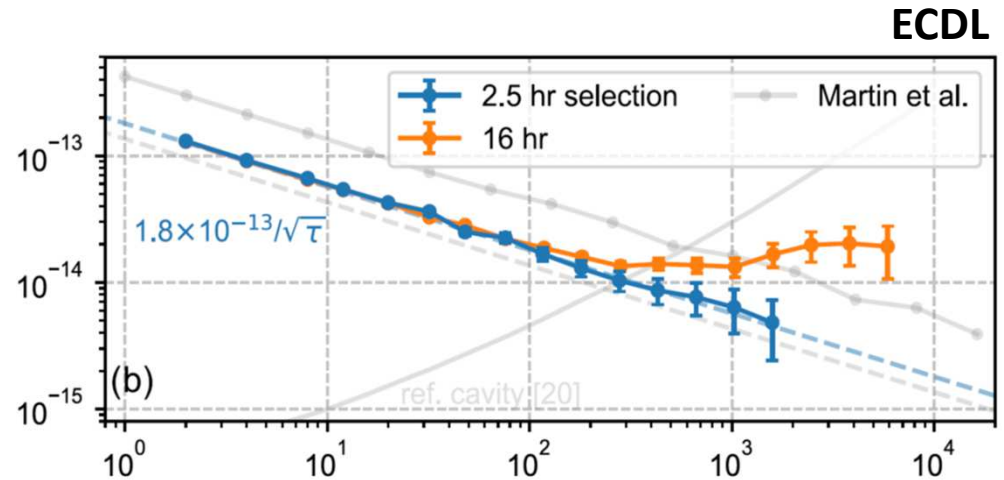
Référence optique: transition 2-photons (Rb 778 nm)



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

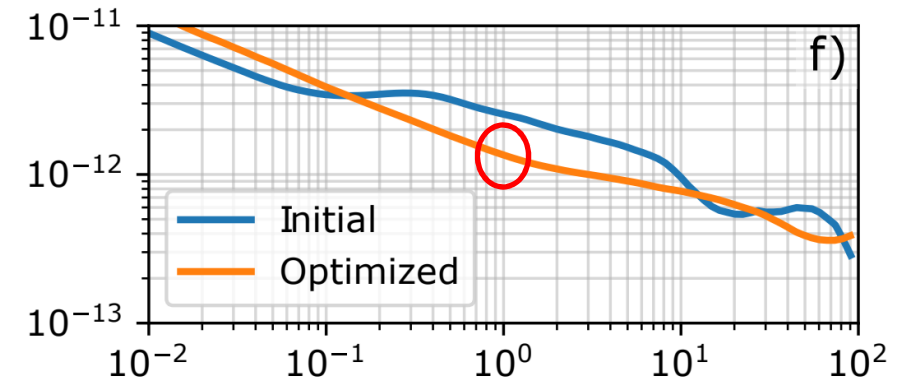
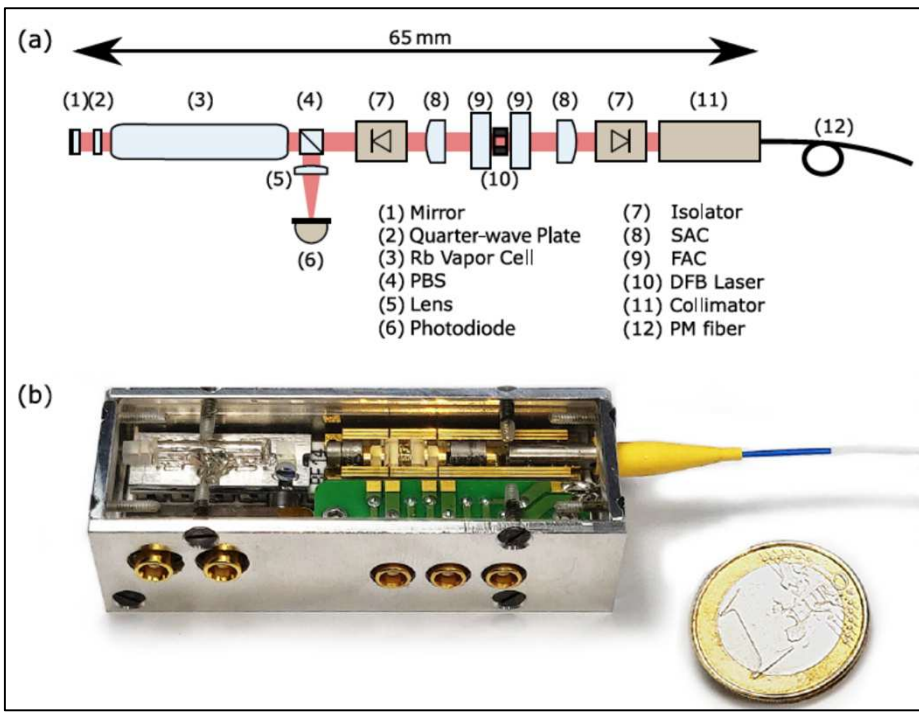
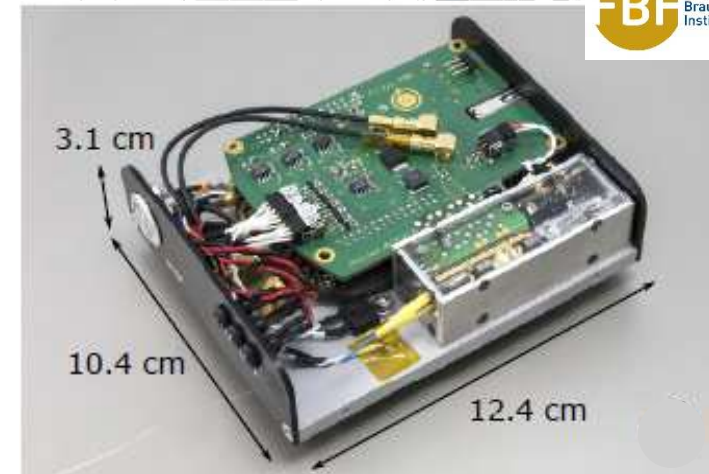


V. Maurice *et al.*, *Opt. Exp.* **28**, 17 (2020)



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

Référence optique par absorption saturée (Rb 780 nm)

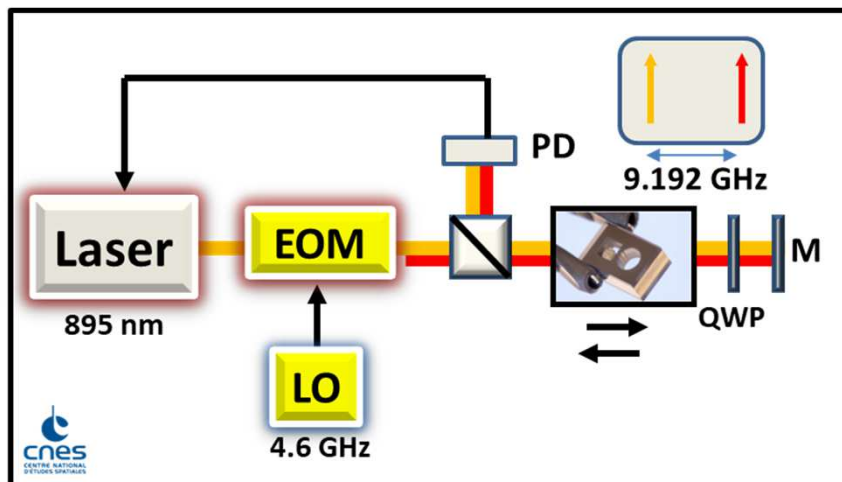


A. Strangfeld et al. Opt. Exp. 30, 7, 12039 (2022)

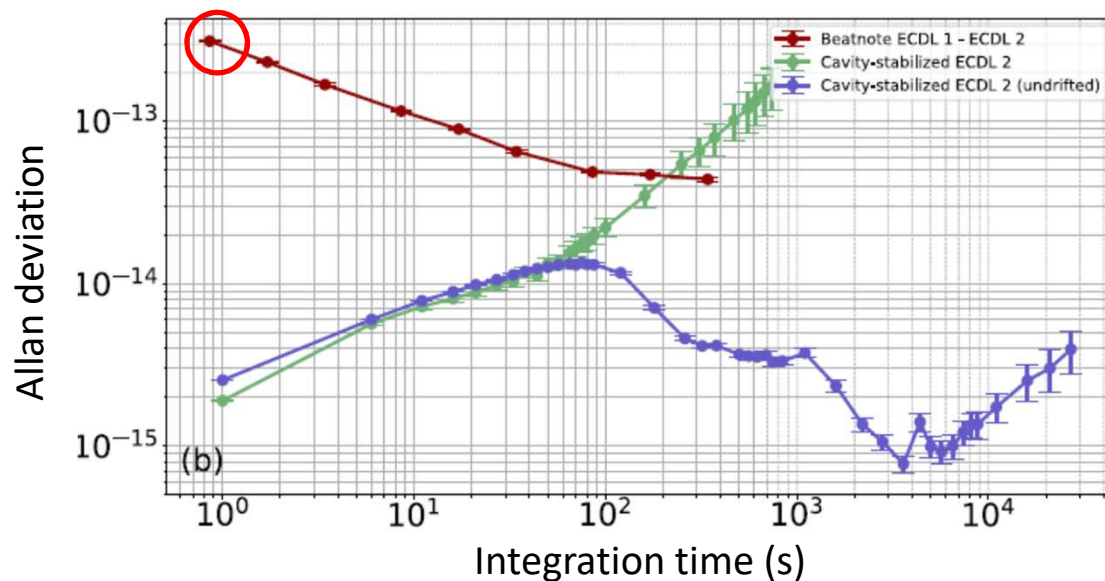
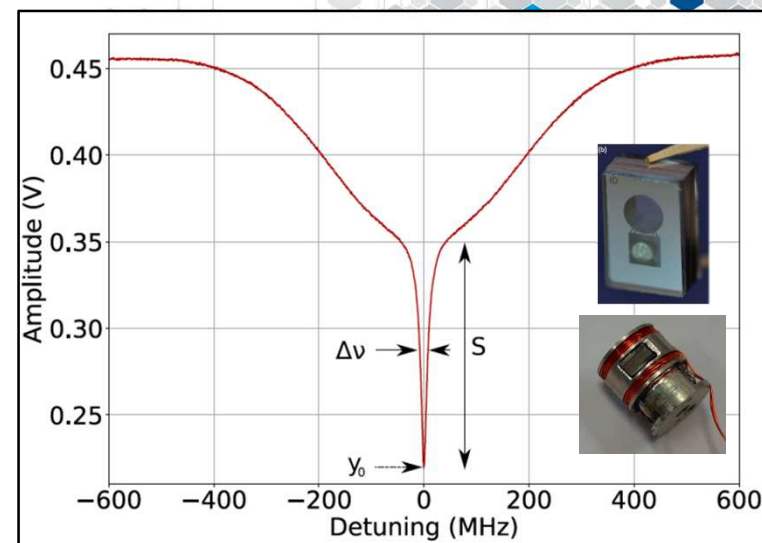
Largueur naturelle ~ 5 MHz
Module optique: 35 cm³, 73 g, 780 mW

Stabilité: 1.7×10^{-12} @ 1 s

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

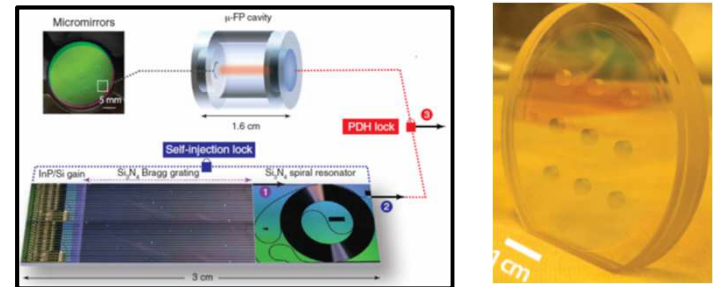
Moyen terme:

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)

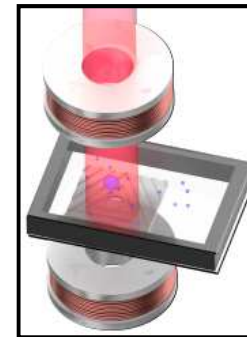
Entrer la gamme des 10^{-14} est réaliste



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

