



Laser Stabilisé sur l'Iode en Cavité :

Projet LASIC

*C. Zumsteg, O. Turazza, M. Lours, P. Lemonde, D. Holleville, H. Halloin,
A. Clairon, K. Djerroud, N. Chiodo, A. Brillet, F. Du Burck, G. Auger, O. Acef*



Plan de l'exposé

- Présentation du projet de R&D (Démonstrateur de laboratoire)
- Rappel sur les lasers Nd:YAG stabilisés sur des transitions de l'iode @532 nm
- Le concept de l'iode en cavité
- Le développement instrumental & Résultats préliminaires
- Conclusion

Motivations du Projet de R&D LASIC :

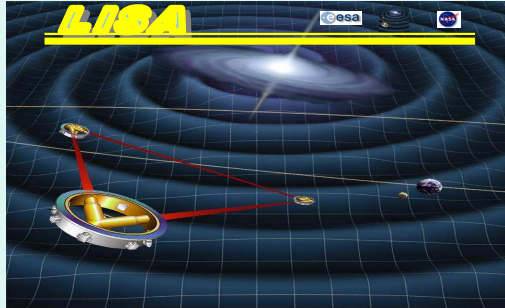
*Satisfaire potentiellement les besoins de la mission LISA
en terme de laser stabilisé embarqué*

- *Projet basé sur l'utilisation d'un laser Nd:YAG @ 1064 nm, stabilisé sur une transition hyperfine de l'iode au voisinage de 532 nm*
- *Dispositif expérimental original qui allie compacité et grande stabilité de fréquence*
- *Stabilité de fréquence visée $\sim 1 \times 10^{-14} \tau^{-1/2}$*

Autres applications potentielles :

- * *Oscillateur optique de grande stabilité de fréquence transportable*
- * *Stabilisation de laser femtoseconde (f & 2f), Génération de signaux μ -ondes de grande stabilité, Compteur optique*
- * *Liens optiques très longues distances,*
- * *...*

Besoin de la mission spatiale LISA

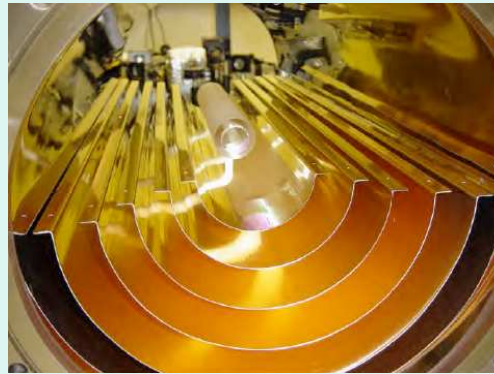


$$L \approx 5 \times 10^6 \text{ km}$$

*LISA-Requirement
for laser stabilization:*

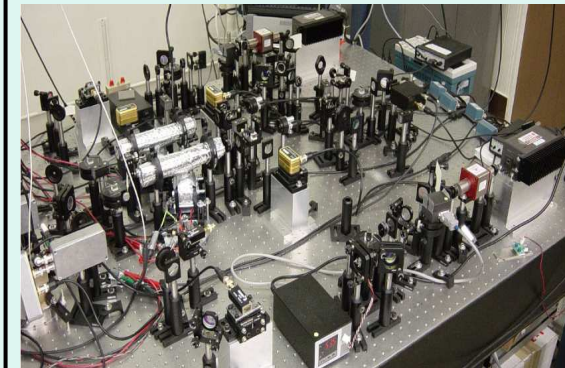
$$\sigma_y(t) \sim 1 \times 10^{-13} \tau^{-1/2} \text{ up } \sim \text{few } 100 \text{ s}$$

*LISA -ASD-TN-5001- Requirement
Breakdown EADS-Astrium 2007*



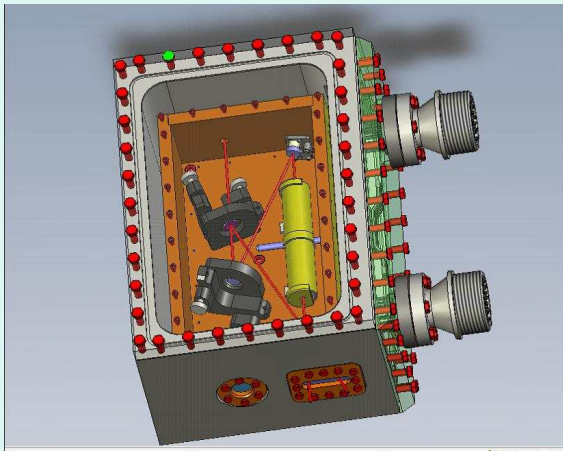
*1st Solution :
Rigid optical cavity Offers
high short-term stability
But need severe control
of thermal and mechanical
environment*

*Albert Einstein Institute (Hanover)
Univ. of Florida, Univ. of Berlin*



*2nd Solution:
Molecular reference @ 532 nm
Iodine hyperfine transition*

Goddard Flight Center (NASA)



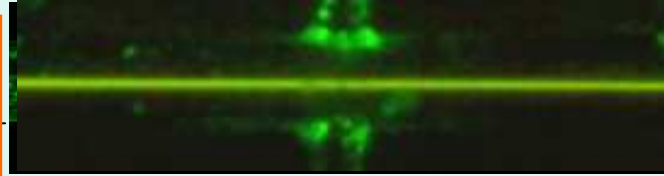
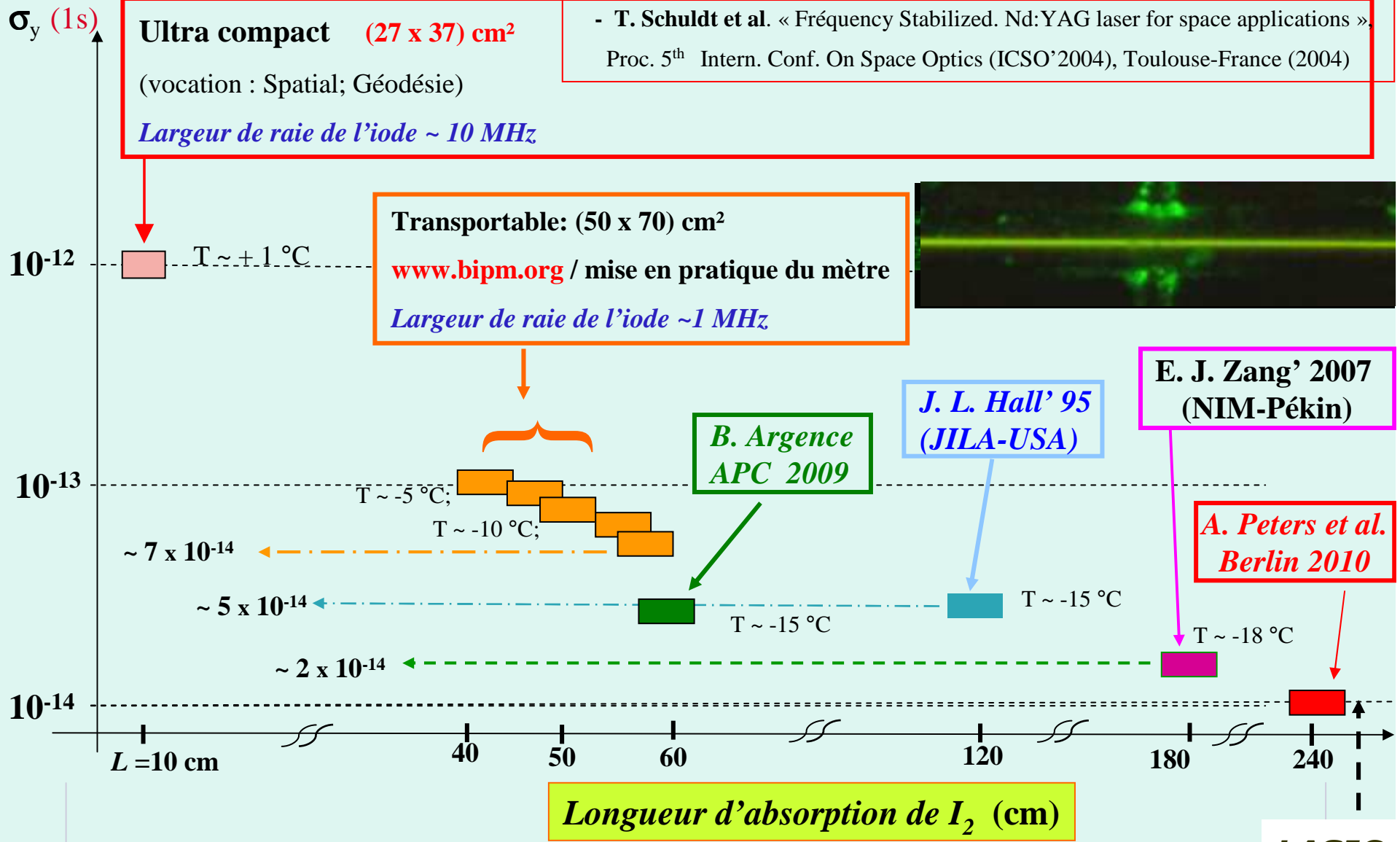
SYRTE Experiment (under development): LASIC Project

New concept

- * *Ring cavity around short iodine cell (10 cm)*
- * *Iodine hyperfine linewidth $\sim 500 \text{ kHz}$ ($Q \sim 10^9$)*
- * *Optical cavity finesse ~ 40*
- * *NICE-OHMS Technique*
- * *Total optical volume $\sim 0.1 \text{ m}^3$ (Optical Breadboard)*

Expected frequency instability : $1 \times 10^{-14} t^{-1/2}$

Stabilité à court terme _ vs _ longueur d'interaction dans la vapeur d'iode



LASIC

Intérêt d'une cavité optique autour d'une cellule d'absorption

Cellule de longueur L



$$C_l = \text{contraste de la raie} = (\alpha_0 L S)$$

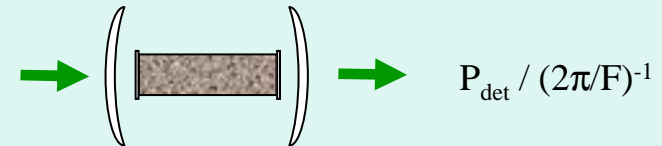
$$(S/B)_{1\text{ Hz}} \sim \frac{(\alpha_0 L S) \times P_{\text{dét}}}{(2 e \eta P_{\text{dét}})^{1/2}}$$

$$(S/B)_{1\text{ Hz}} \sim \frac{C_l \times P_{\text{dét}}}{(2 e \eta P_{\text{dét}})^{1/2}} \sim C_l \times \sqrt{P_{\text{dét}}}$$

Cellule de même longueur L , dans une cavité FP de finesse F

Cellule de longueur $L' = L \times (2F/\pi)$

Puissance intra cavité amplifiée par la finesse



Pour maintenir les mêmes conditions de saturation
Il faut diminuer la puissance incidente de $(2\pi/F)^{-1}$

-Le signal transmis par la cavité FP est réduit d'un
facteur = $(2\pi/F)^{-1}$

-Le contraste C_{FP} de la raie d'absorption dans le cas du FP
est : $C_{\text{FP}} = C_l \times (2F/\pi)$

- Le rapport $(S/B)_{1\text{ Hz}}$ est alors augmenté d'un facteur
 $(2F/\pi) / (2\pi/F)^{1/2} = 2 \times (2F/\pi)^{1/2}$

A. Brillet, P. Cerez, C.N. Man-Pichot, "Recent work on 612 nm He-Ne Stabilized Lasers",

In Precision Measurement and Fundamental Constants, Proceedings of the 2nd International Conference, Ed. by B.N. Taylor and W. D. Philips, June 1981.

-A. Clairon, O. Acef, C. Chardonnet and Ch. J. Borde., "State-of-the-Art for High Accuracy Frequency Standards in the 28 THz Range Using Saturated Absorption Resonances of OsO4 and CO2",

-in Frequency Standards and Metrology, Ed. A. de March; Springer-Verlag, Heidelberg 1989, pp. 212-221.

-L. S. Ma and J. L. Hall, "Optical Heterodyne Spectroscopy Enhanced by an External Optical Cavity: Toward Improved Working Standards", IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 26, N° 11 (Nov. 1990)..

Application à la molécule d'iode

Application à la raie de l'iode R(56)32-0 a10 @ **532.2 nm**

$$\Delta\nu_{\text{nat}} \sim 220 \text{ kHz}$$

À -15 °C, dans une cellule de 10 cm de long

$$\alpha_0 = 1.3 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}/\text{Pa}$$

Finesse de la cavité optimale : $F = \alpha_0 L + \Sigma$ (pertes optiques)

$$F \sim 35$$

Gain du point de vue S/B

$$2 \times (2F/\pi)^{1/2} \approx 10$$

Stabilité à court terme théorique (shot-noise)

$$\sigma_y(\tau) \sim 1 \times 10^{-14} \tau^{-1/2}$$

Largeur de Frange d'une cavité FP de 50 cm de long

$$\sim 17 \text{ MHz}$$

Application à la raie de l'iode P(13) 43-0 @ **515 nm**

$$\Delta\nu_{\text{nat}} \sim 70 \text{ kHz}$$

À -15 °C, dans une cellule de 10 cm de long

$$\alpha_0 = 6 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-1}/\text{Pa}$$

Finesse de la cavité optimale : $F = \alpha_0 L + \Sigma$ (pertes optiques)

$$F \approx 70$$

Gain du point de vue S/B

$$2 \times (2F/\pi)^{1/2} = 15$$

Stabilité à court terme théorique (shot-noise)

$$\sigma_y(\tau) \sim 2 \times 10^{-15} \tau^{-1/2}$$

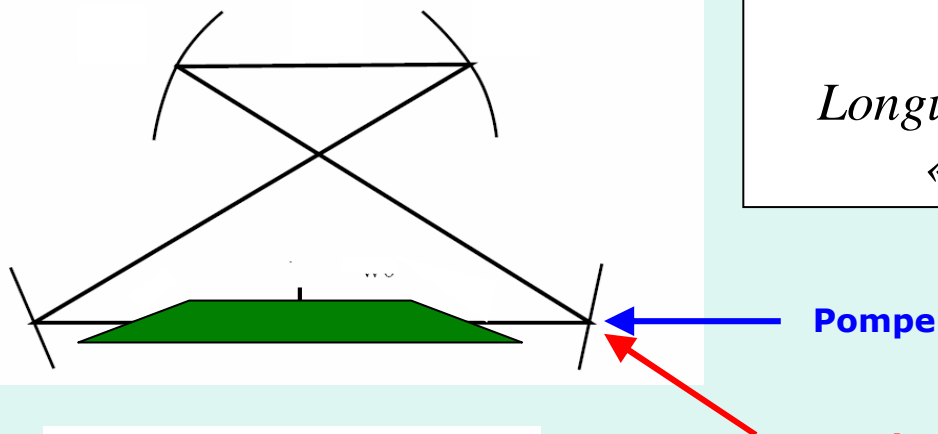
Largeur de Frange d'une cavité FP de 50 cm de long

$$\sim 8 \text{ MHz}$$

- C. Ishibashi, J. Ye and J.L. Hall, "Issues and applications in ultra-sensitive molecular spectroscopy", in *Methods for Ultrasensitive Detection II*, C. W. Wilkerson, Jr., Ed, SPIE Vol. 4634 (2002), pp. 58-69.

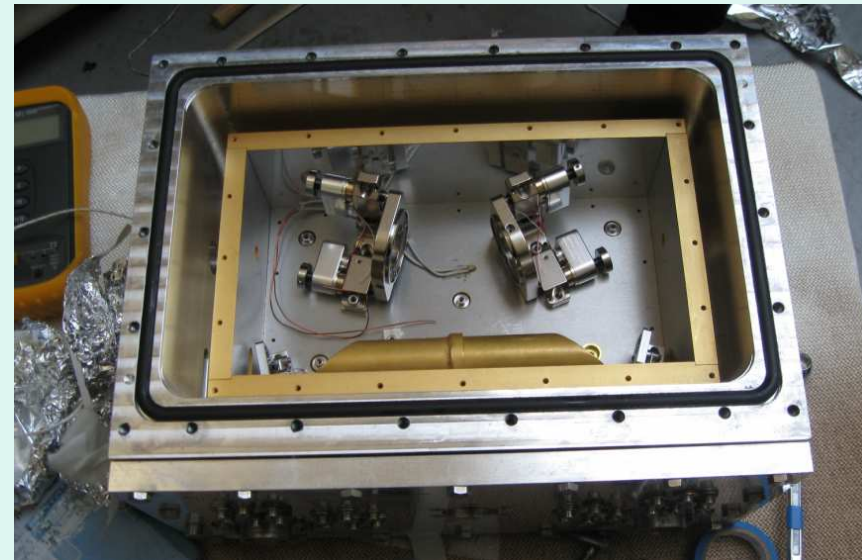
Intérêt d'une cavité optique autour d'une courte cellule d'iode

- ✓ Onde stationnaire interagissant avec l'iode stable et symétrique
- ✓ Superposition « naturelle » des faisceaux pompe et sonde
- ✓ Longueur d'interaction laser / l'iode élevée ($\times 2F/\pi$),
- ✓ Très compact (300 x 200 x 170)mm³
- ✓ Contrôle thermique aisé
- ✓ Confère au laser une stabilité de fréquence à court & à long terme



Cellule I₂
l = 100 mm, ϕ = 12 mm

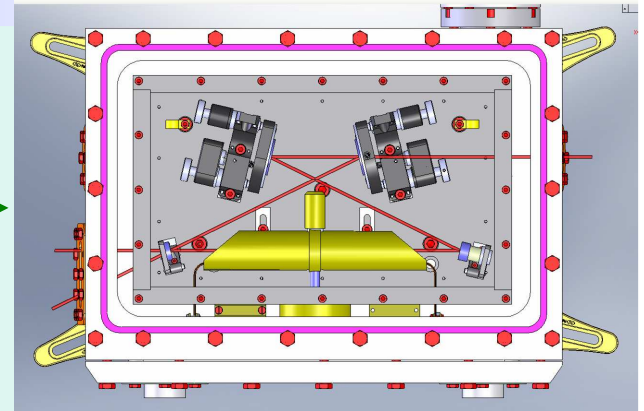
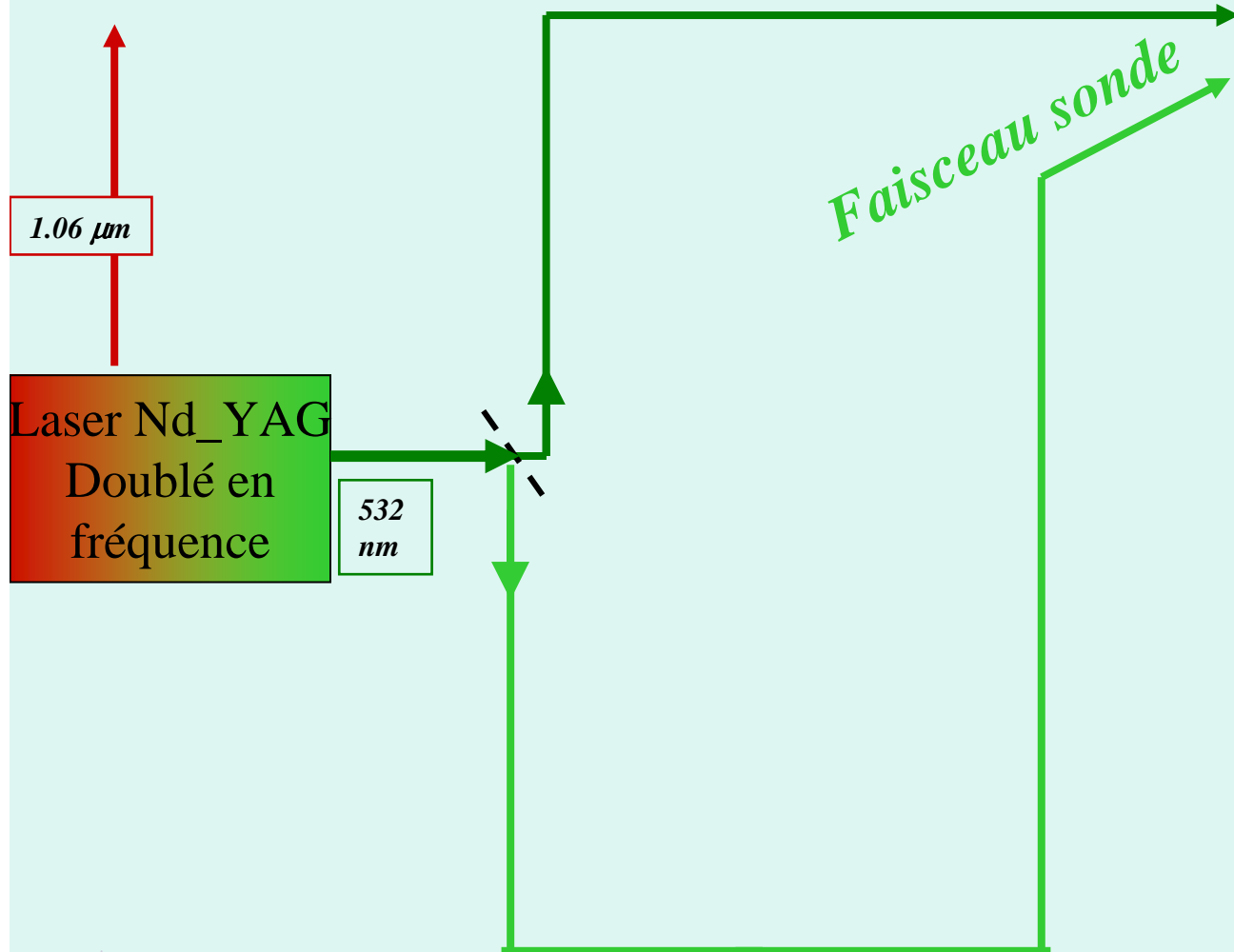
Finesse optimale $F = 40$
Temp. Iode @ -17 °C
Longueur d'interaction équivalente à une
« cellule » de longueur 220 cm



(300 x 200 x 150) mm³

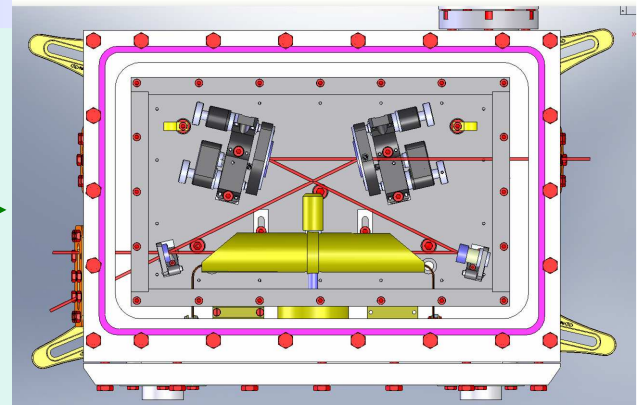
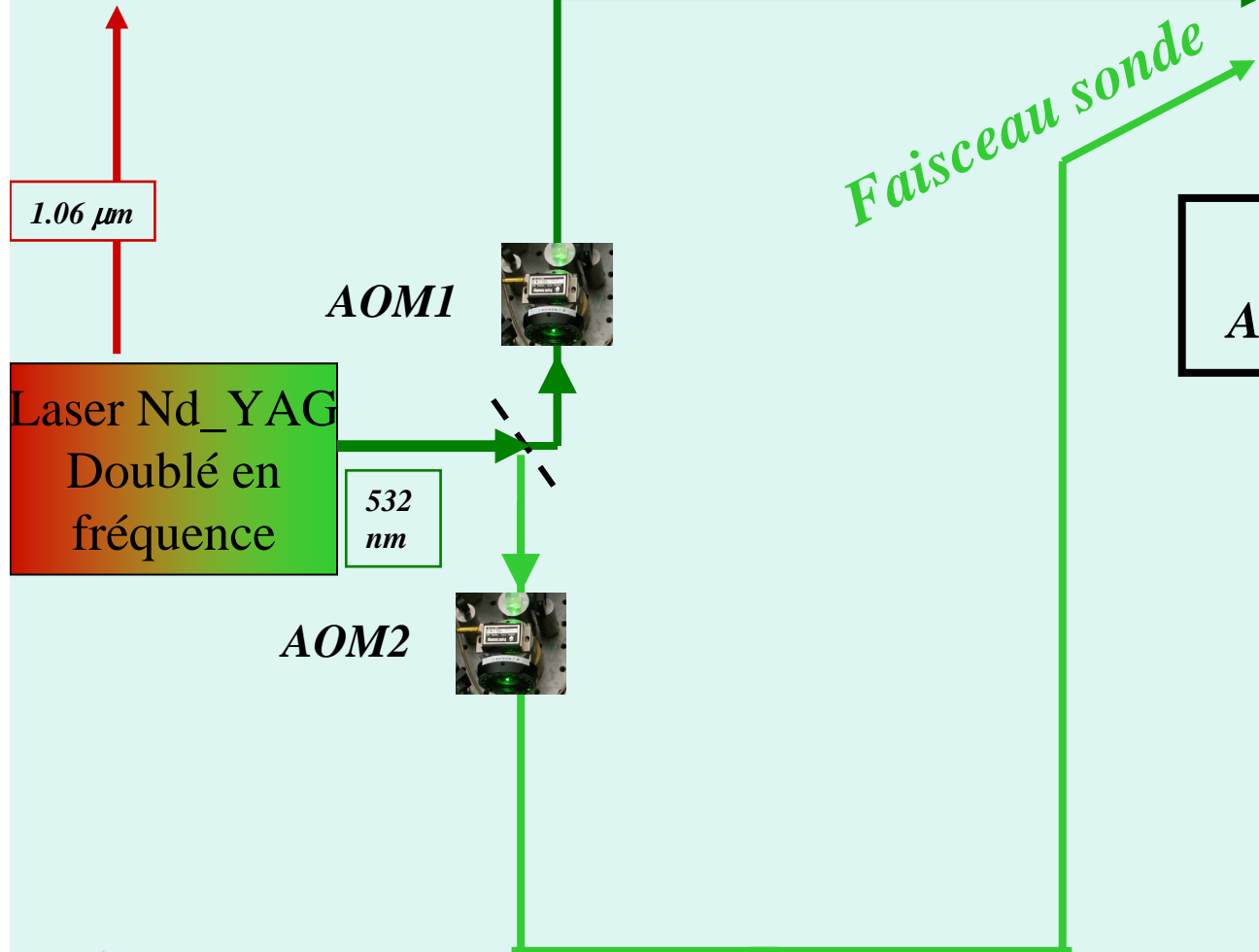
Banc optique du LASIC

*Caractérisation
Stabilité de Fréquence*



Banc optique du LASIC

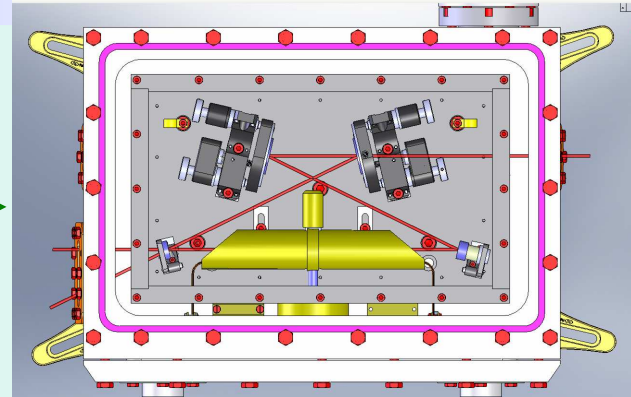
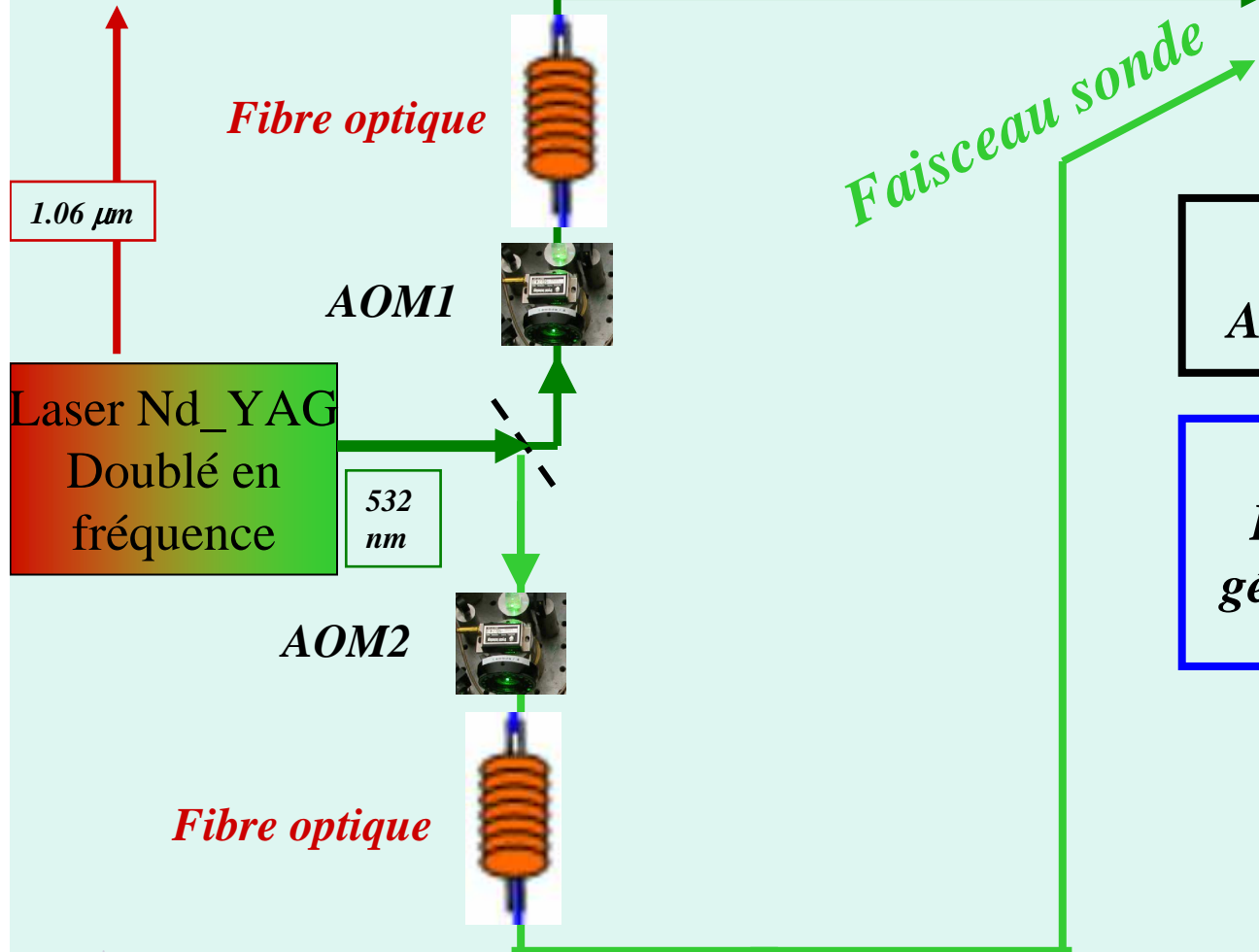
*Caractérisation
Stabilité de Fréquence*



AOM 1 & 2
Asservissements de puissance

Banc optique du LASIC

*Caractérisation
Stabilité de Fréquence*

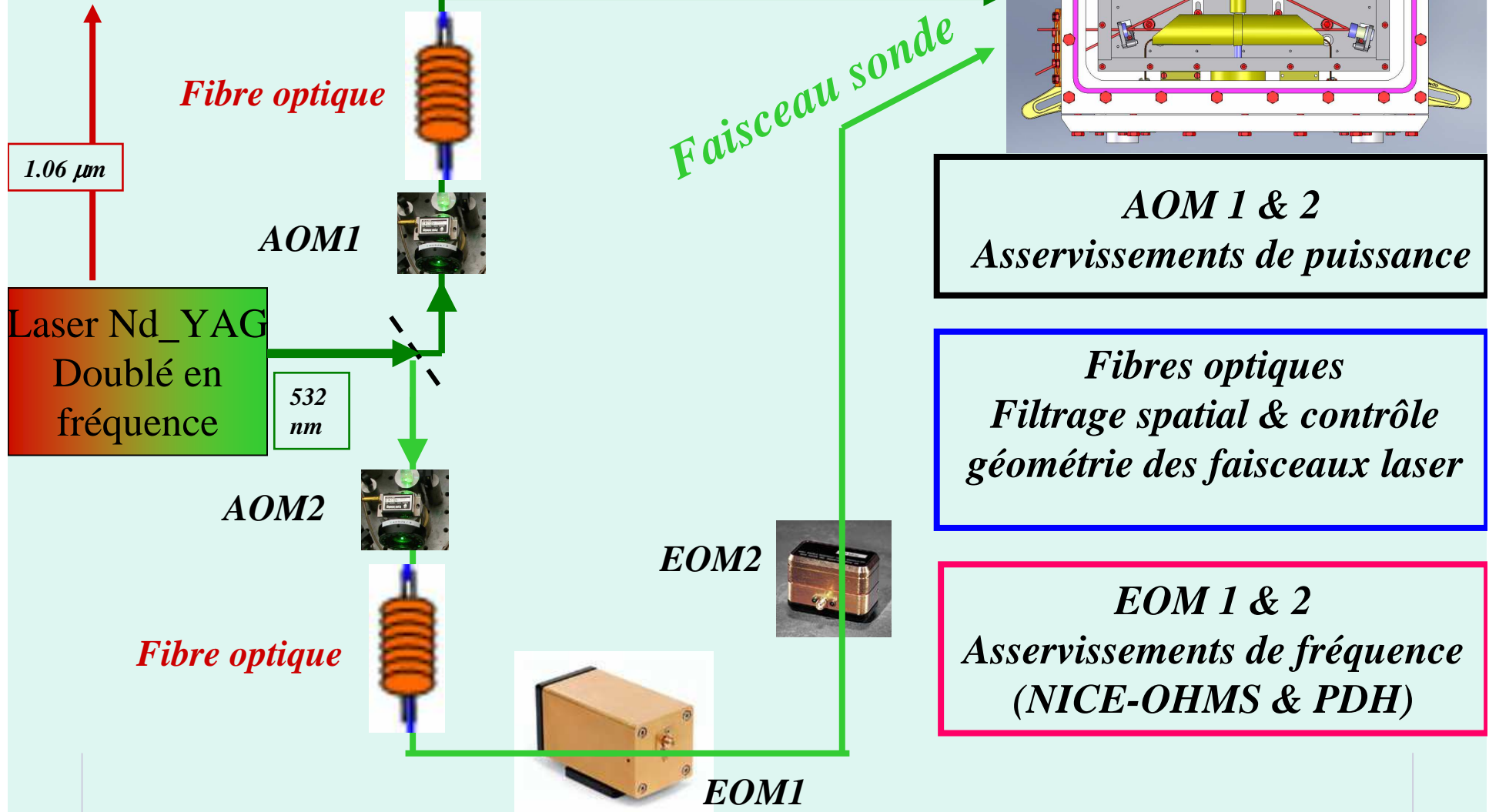


AOM 1 & 2
Asservissements de puissance

Fibres optiques
Filtrage spatial & contrôle géométrie des faisceaux laser

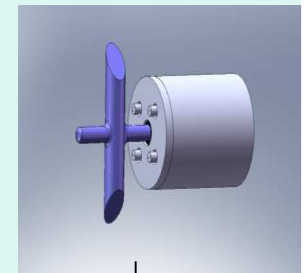
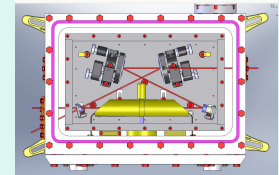
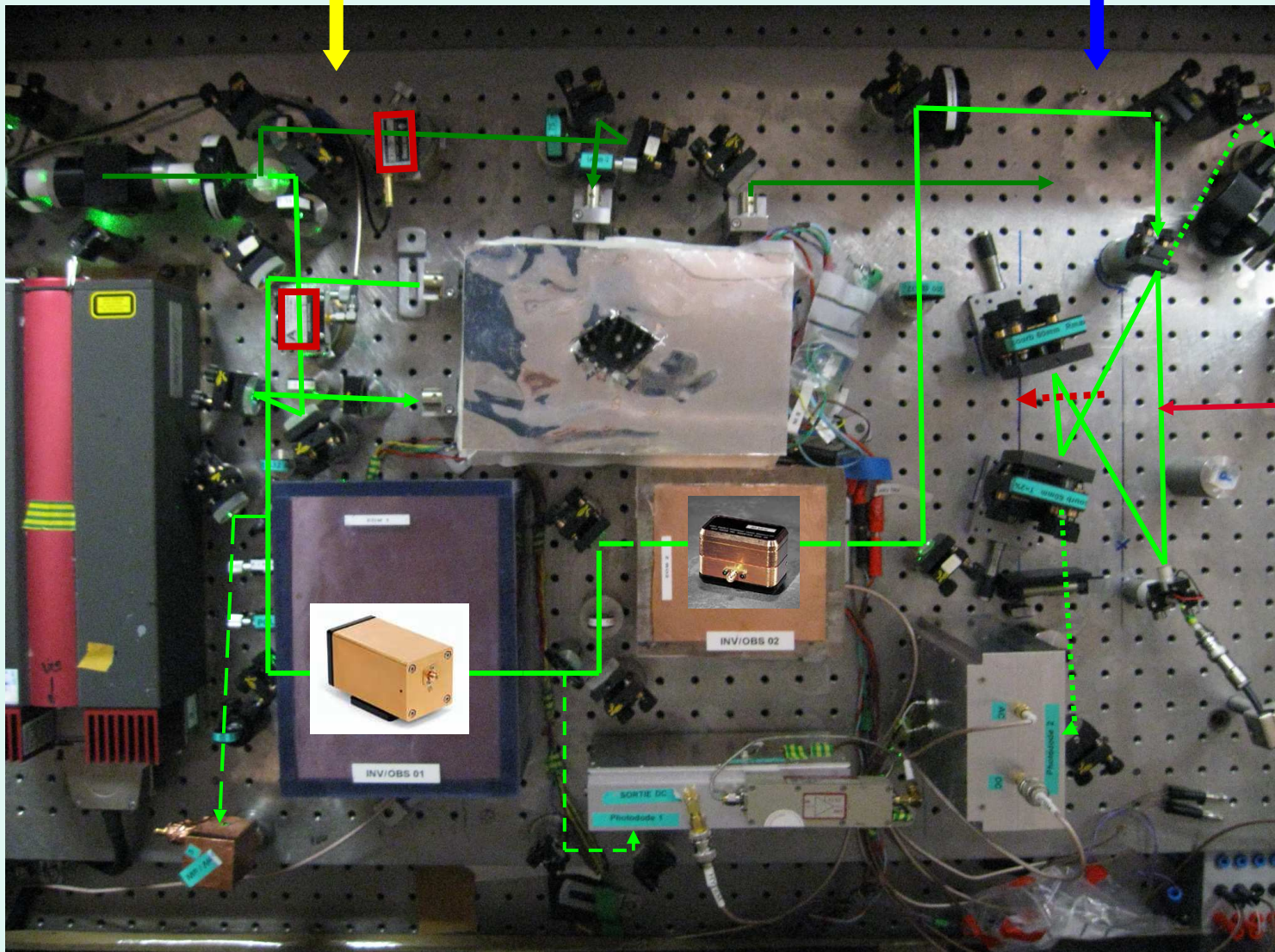
Banc optique du LASIC

*Caractérisation
Stabilité de Fréquence*



Banc optique développé en 2009

Cavité optique « préliminaire » 2010



$T \sim -17\text{ °C}$

Dimensions du banc optique 60 x 90 cm²

Stabilité de fréquence à court terme dépend de :

- Finesse de la cavité
- Technique de modulation
- Signaux de saturation (pureté de l'iode, ...)

Stabilité de fréquence à long terme dépend de :

- Stabilité de puissance laser (Light shift)
- Stabilité de la pression de l'iode (Pressure shift)
- Stabilité de la géométrie des faisceaux laser (cavité optique)
- Stabilité de la phase des signaux optiques
- Résidu de modulation d'amplitude (liée modulation de fréquence)
- Stabilité du champ magnétique environnant (effet Zeeman)
- Effet de lentille gazeuse
- etc.....

Stabilité de fréquence à long terme

Si on veut une contribution aux instabilités de fréquence à long terme du laser asservi au niveau de $\sim 1 \times 10^{-15}$?

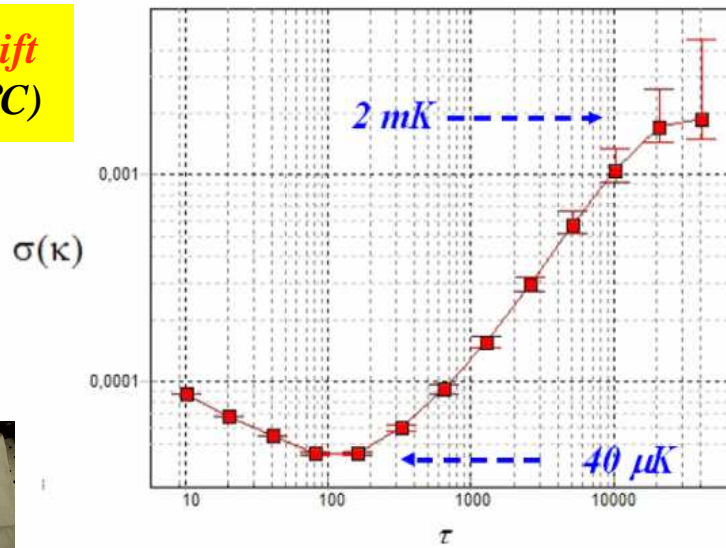
www.bipm.org

- Asservir la température (pression) de l'iode au niveau du queusot ***1mK***
- Asservir le corps de la cellule d'iode (blindage thermique) ***1 mK***
- Asservir la température de la cavité optique qui entoure la cellule) ***1 mK***
- Asservir les puissances laser dans la cellule d'iode ***10⁻³***
- Effet Zeeman (Blindage magnétique autour de la cellule diode) ***1 mG***
- Asservir la température des modulateurs EOM ***RAM < 70 dB***
- Contrôle soigné de la géométrie des faisceaux laser dans tout le banc optique (Fibres optiques, collimateurs etc ...)

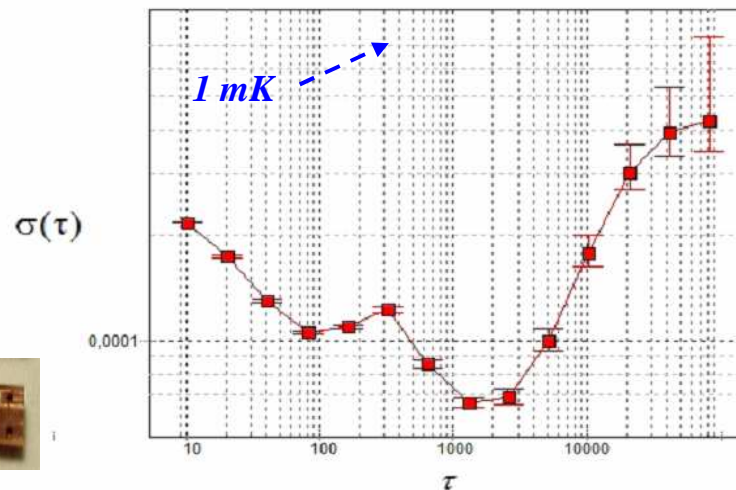
Tous ces objectifs sont atteints, pour des temps d'intégration $\sim 10^4$ s

Asservissement de la température de l'iode sous vide ($p \sim 10^{-6}$ mbar)

Pressure shift
($5 \times 10^{-13} / ^\circ\text{C}$)



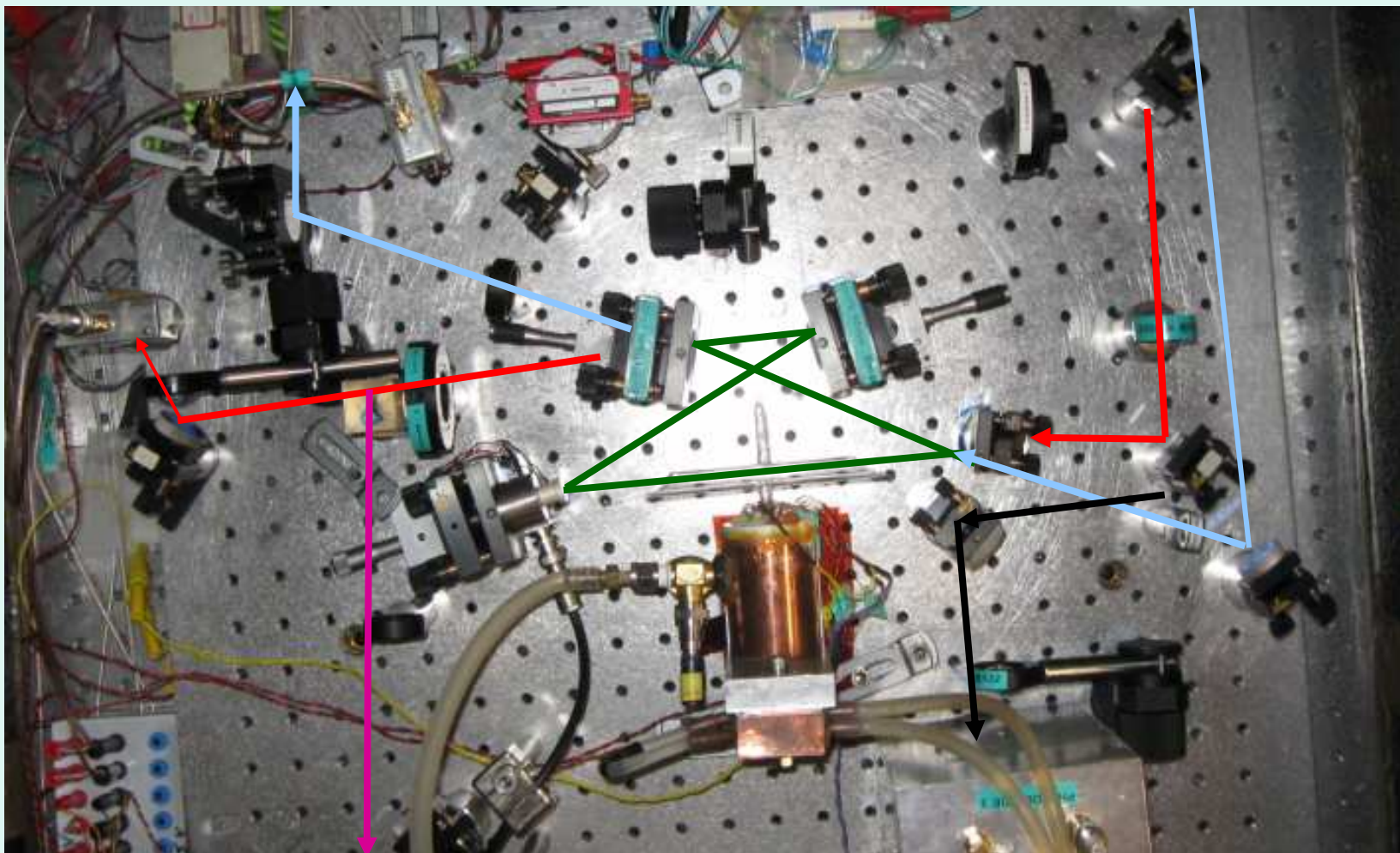
Ecart type temperature Blindage ($^\circ\text{C}$)



Contribution des fluctuations de pression d'iode (température) à l'instabilité de fréquence du laser asservi $< 10^{-15}$

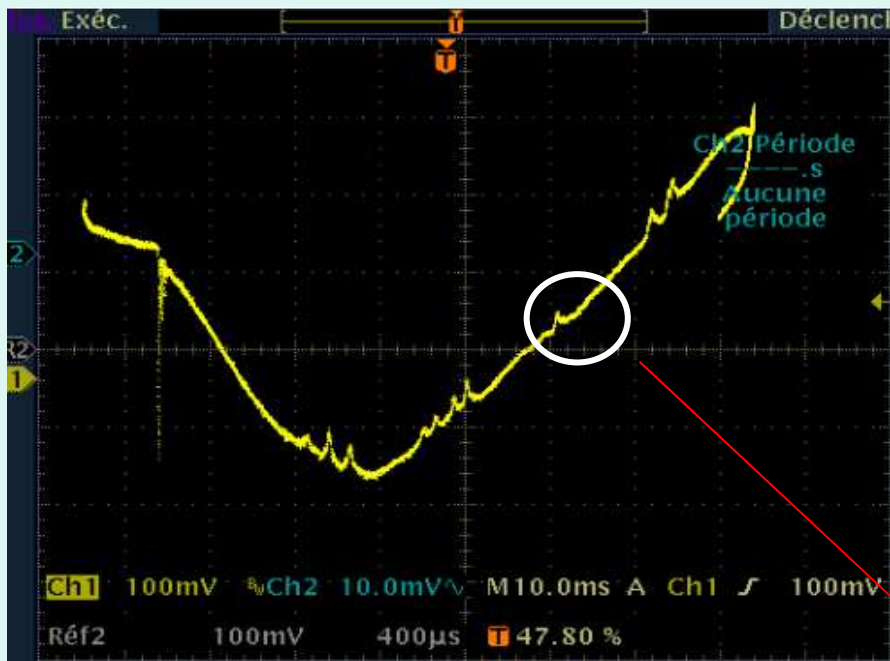
Stabilité de fréquence à court terme

Développement préliminaire : Cavité en anneau à l'air libre utilisée en 2010



NICE-OHMS détection

PDH Détection



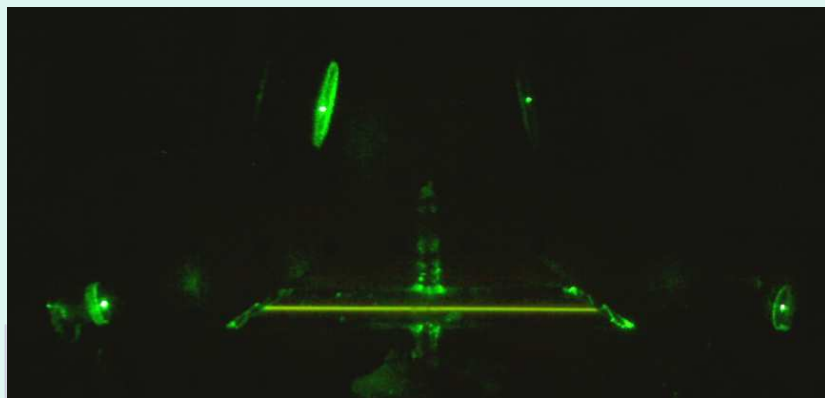
Amas hyperfin :

$^{127}\text{I}_2$ R(56) 32-0 @ 532 nm

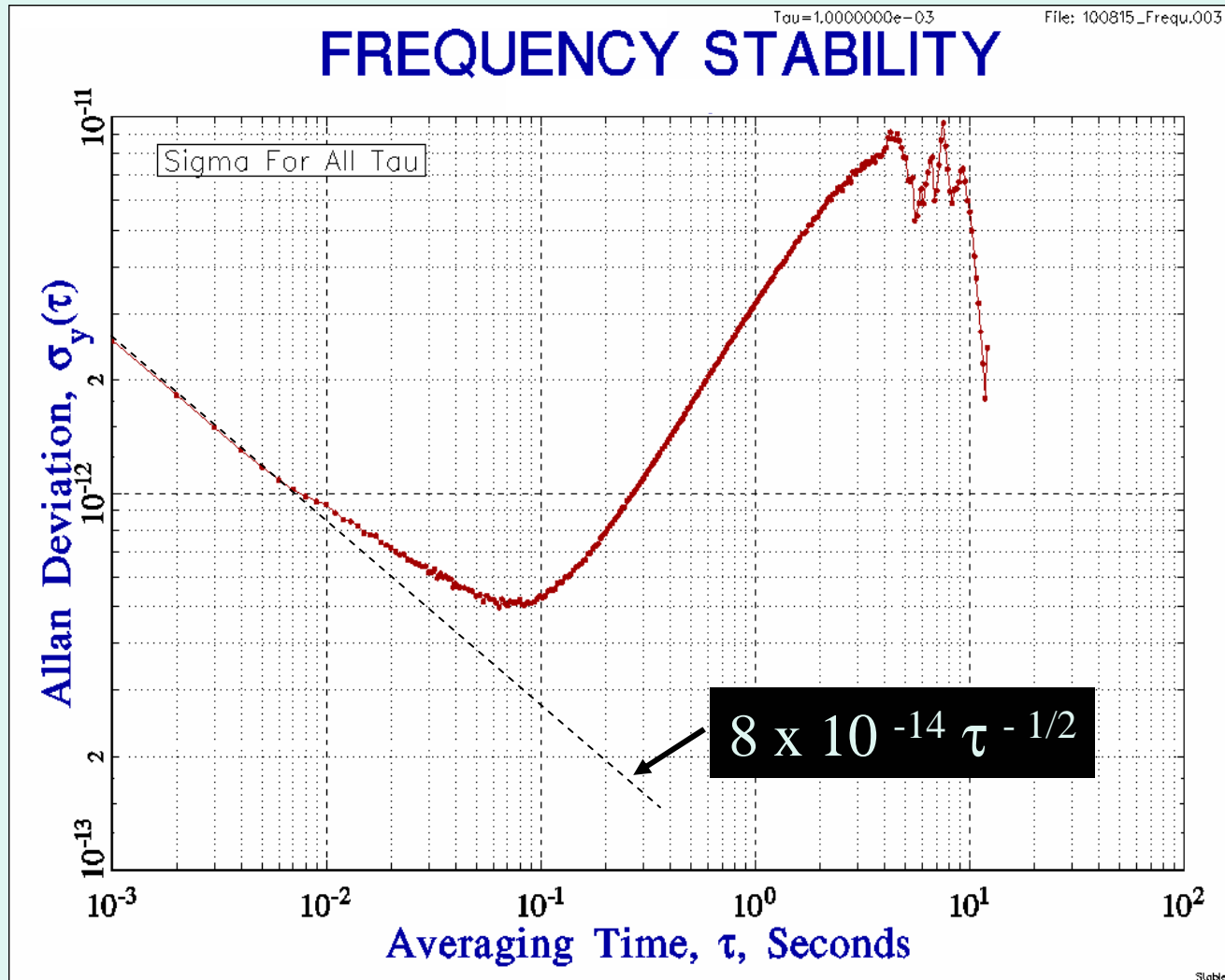
Contraste ~ 5 à 10 %
de l'absorption linéaire
Selon les composantes hyperfines



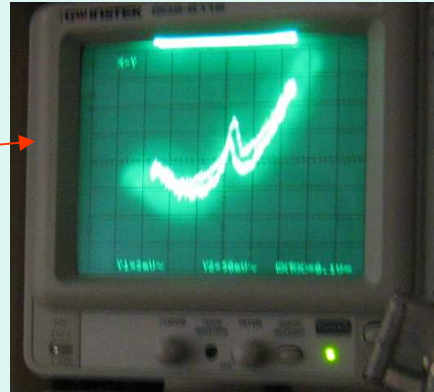
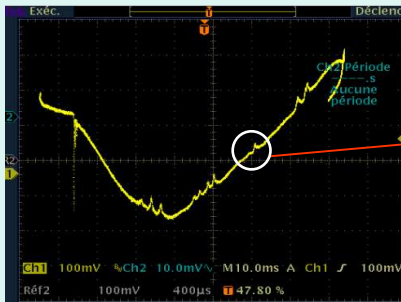
Stabilité @ 1 s ~ 10^{-14}
Projection dans le régime
Shot-noise



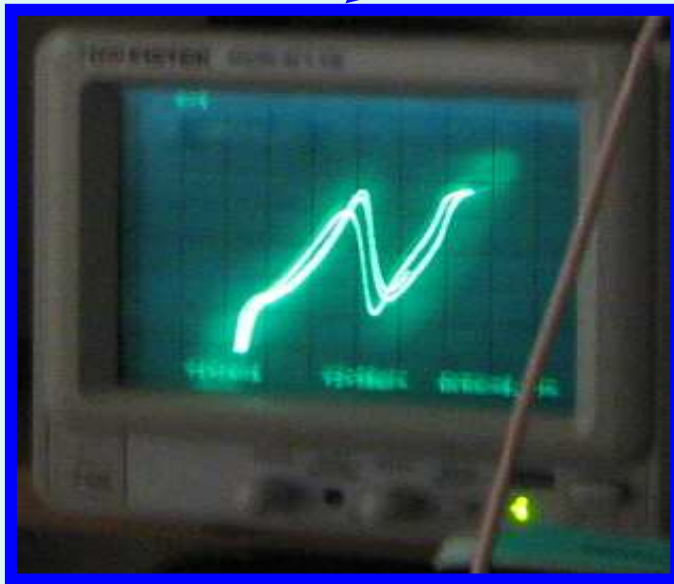
*Évaluation préliminaire du dispositif LASIC
Par rapport au laser stabilisé sur fibre de « mini-DOLL »*



Détection des signaux de saturation et élaboration du signal d'erreur



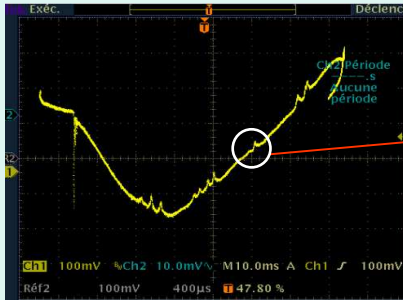
Dérivée 1^{ère}



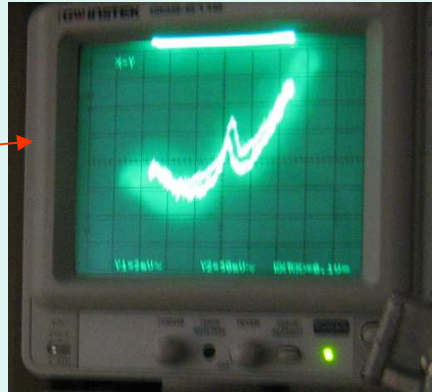
Démodulation « NICE-OHMS »

Composante hyperfine
R(56) 32-0- a_{10}
De l'iode @ ~532.245 nm

Détection des signaux de saturation et élaboration du signal d'erreur

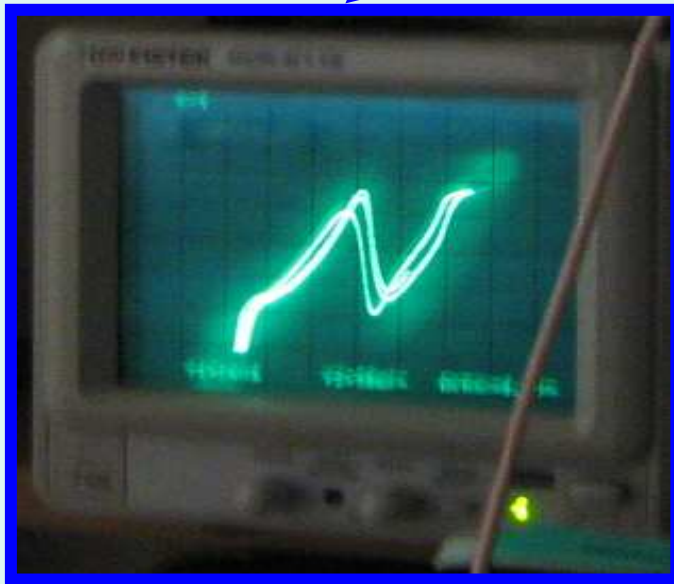


Dérivée 1^{ère}

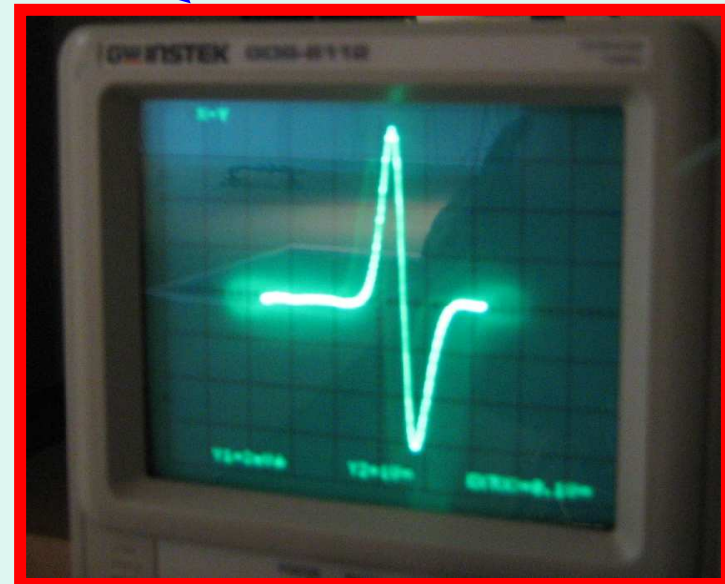


Composante hyperfine
R(56) 32-0- a₁₀
De l'iode @ ~532.245 nm

Dérivée 3^{ème}



Démodulation « NICE-OHMS »



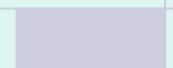
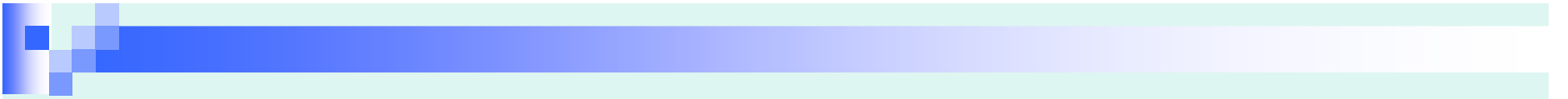
Ibid + modulation basse fréquence

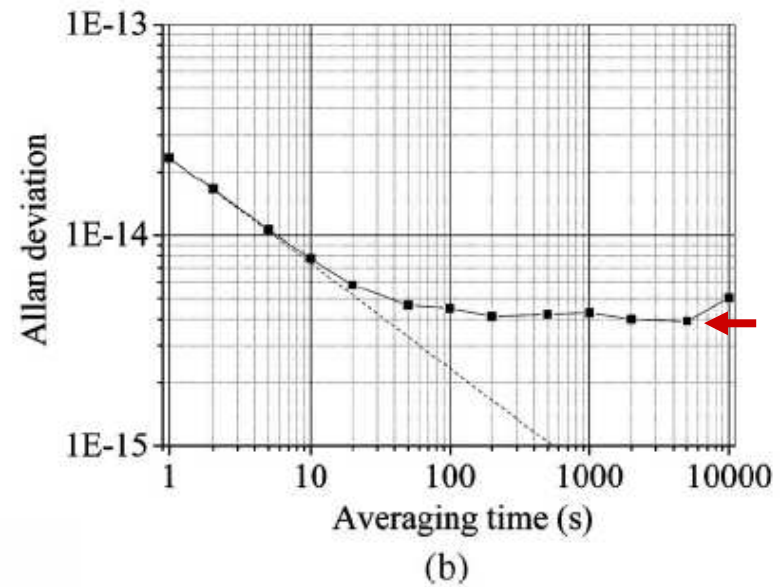
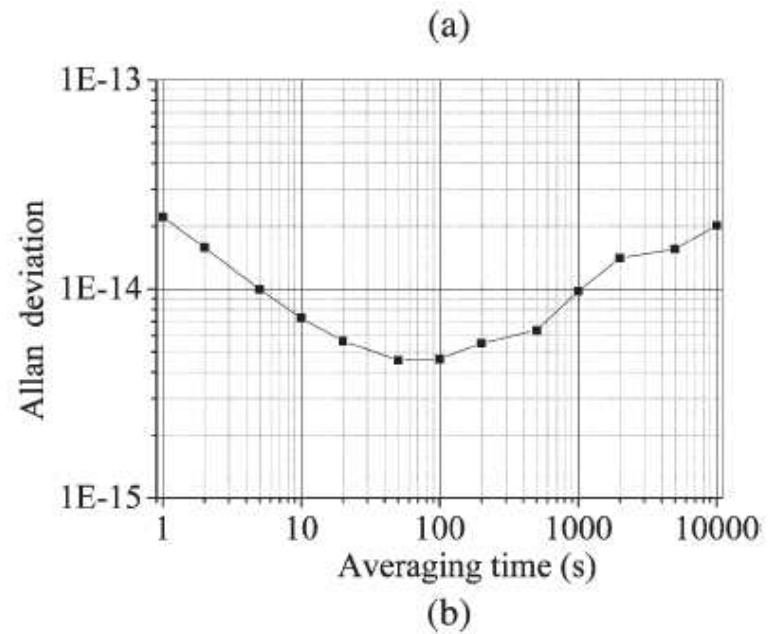
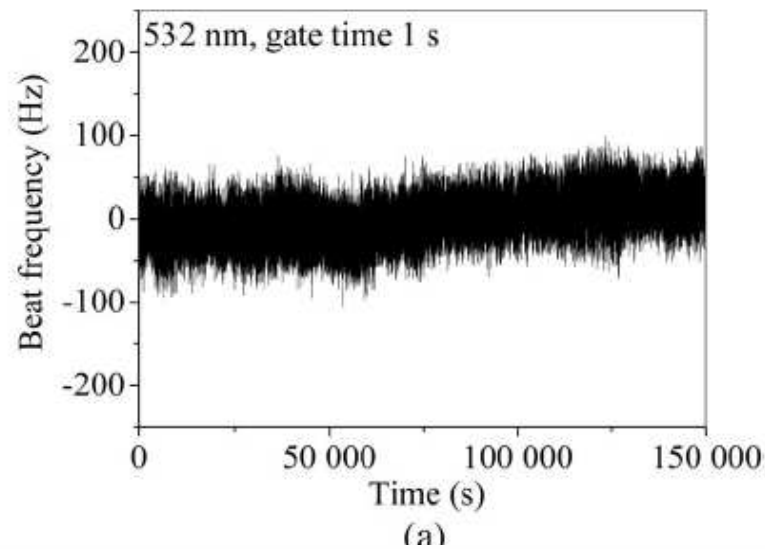
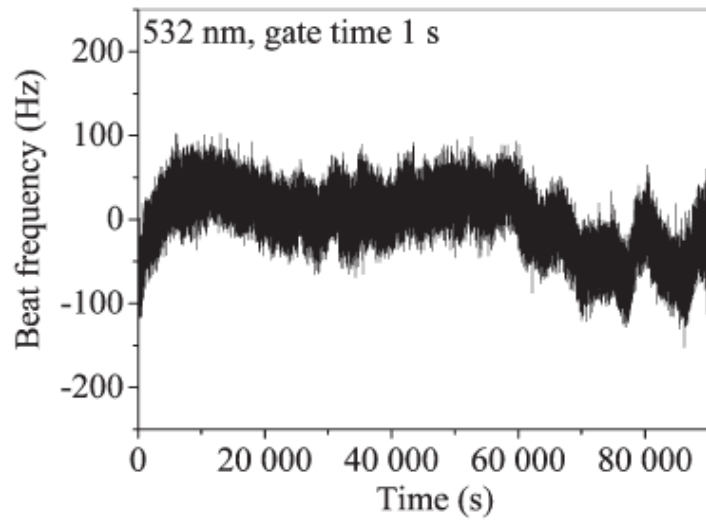
Conclusion

- *Premier résultat prometteur pour la stabilité de fréquence : $8 \times 10^{-14} t^{-1/2}$*
- * *Intégration prochaine du dispositif sous vide*
&
* *Utilisation de l'harmonique trois des raies de saturation de l'iode*
- *Référence de fréquence optique compacte et simple de mise en œuvre*
- *Susceptible de répondre aux besoins de projets spatiaux (LISA,) et terrestres*
- * *Possibilité d'extension du même dispositif à 1030 nm / 515 nm avec un gain potentiel de près d'un ordre de grandeur en terme de stabilité de fréquence*



Merci





IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, VOL. 56, NO. 2, APRIL 2007

Realization of Four-Pass I_2 Absorption Cell in 532-nm Optical Frequency Standard

Er Jun Zang, Jian Ping Cao, Ye Li, Cheng Yang Li, Yong Kai Deng, and Chun Qing Gao