



Systemes de Référence Temps-Espace



STABI2 : une source laser stable et compacte pour la recherche et l'industrie



Projet
N° 11 ASTR 001 01



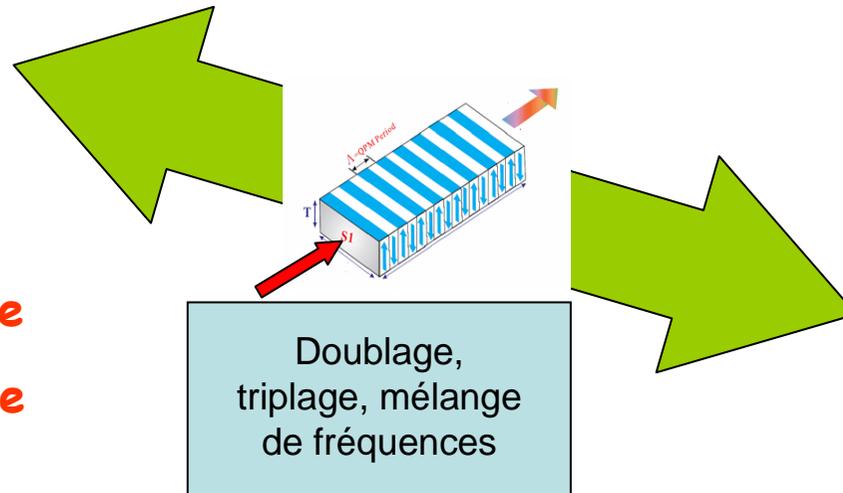
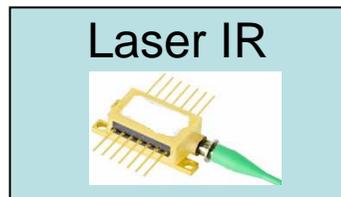
Projet STABI2 :

laser IR ($1,5 \mu\text{m}$) continu triplé en
fréquence et stabilisé sur les
transitions de l'iode moléculaire
détectées en cellule à 515 nm

Motivations

- lasers stables, compacts, puissants \longrightarrow IR
- raies étroites et intenses \longrightarrow visible (iode moléculaire)
- composants d'optique non linéaire (doublage, triplage)

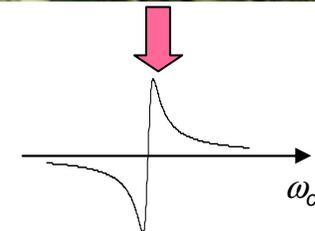
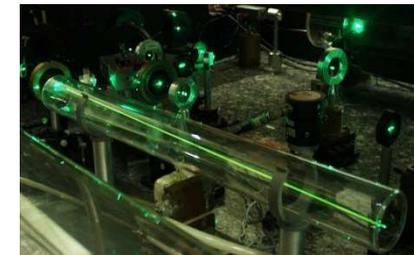
IR \longleftrightarrow visible



Source compacte
puissante, stable

Applications :

- Étalon de fréquence optique transportable
- Refroidissement d'atomes
- Liens optiques longue distance
- Télécoms optiques haut débit
- Liaisons optiques sous marines
- Télémétrie laser
- Détection de polluants
- ...



Détection de
transitions hyperfines
dans I_2

Les sources laser à 1,5 μm

2 types de sources :

Laser à fibre dopée Er (KOHHERAS) :

Puissance de sortie : dizaine de mW
Largeur de raie : ~ 10 kHz
Accordabilité ~ 1 nm
Volume \sim litre
Contrôle fréquence \sim PZT + T°



Diode laser (RIO) :

Puissance de sortie : dizaine de mW
Largeur de raie : ~ 1 kHz
Accordabilité ~ 0.05 nm
Volume ~ 10 cm³
Contrôle fréquence $\sim I + T^\circ$



+ ampli EDFA \longrightarrow > 1 W
(KEOPSYS)

On peut couvrir une large plage de longueurs d'onde (Bandes C, S, L,)

à 1,5 μm : Composants « télécoms » / Fibres optiques

Stabilisation en fréquence sur atome/molécule à 1,5 μm

❖ Raies en coïncidence directe avec les raies d'émission laser à 1,5 μm

$\text{C}_2\text{H}_2, \text{HCN}, \text{CO}$ ($\sigma \sim 10^{-10} - 10^{-11}$)

M. de Labachellerie et al., Optics letters **20**(6) (1995)

F. Hong et al., Optics letters **28**(23) (2003)

J. Hald et al., Optics Express **19**(3) (2011)

❖ Raies d'alcalins en coïncidence avec l'harmonique 2

Rb, K ($\sigma \sim 10^{-11} - 10^{-12}$)

D. Touahri et al., Optics Comm. **133** (1997) 471

M. Poulin et al., Opt. Comm. **207** (2002)

} 2-Photons Rb

S. Masuda et al., Appl. Opt. **46**(21) (2007)

D_2 - Rb

A. Bruner et al., Appl. Opt. **37**(6) (1998)

C. Svelto et al. IEEE Trans. Instr. Meas. **51**(4) (2002)

} D_2 - K

❖ Raies en coïncidence avec l'harmonique 3

I_2 ($\sigma \sim 10^{-13} - 10^{-14}$)

N. Chiodo et al., Optics letters **39**(10) 2936 (2014)

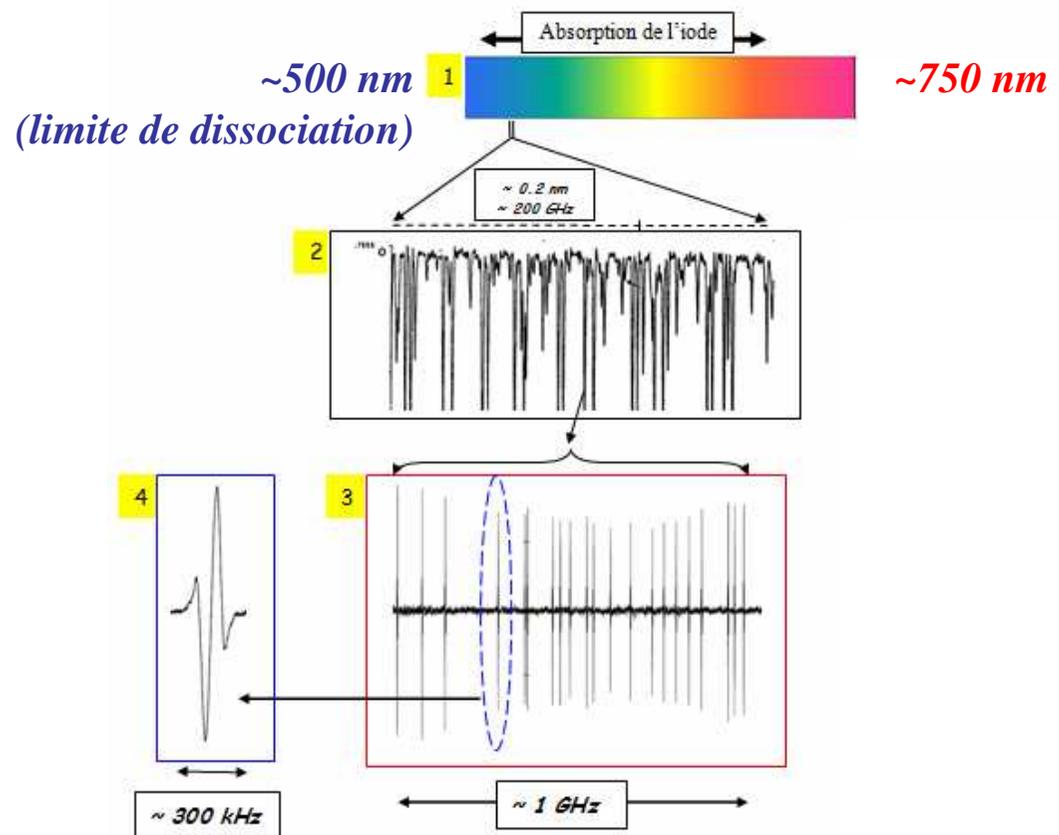
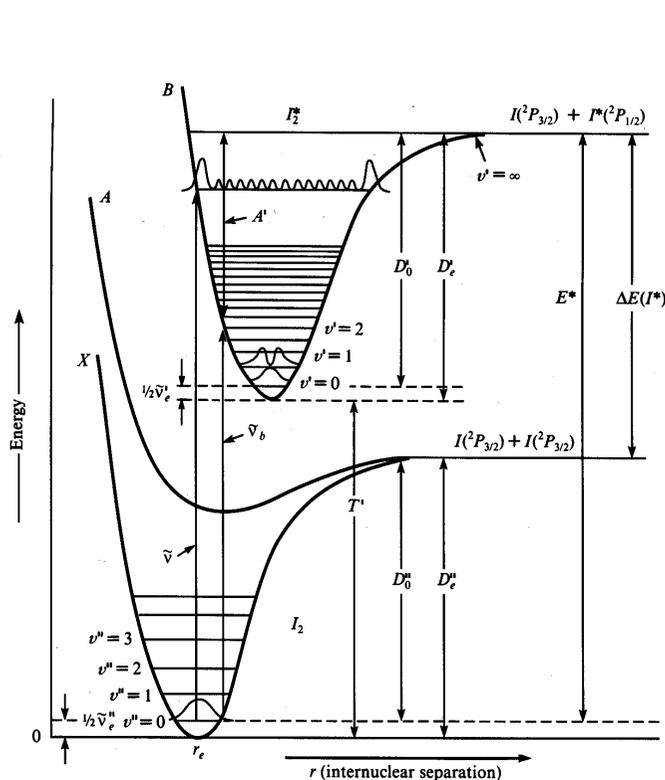
Iode moléculaire : - spectre d'absorption dans le visible
 - raies étroites et intenses



Absorption de la molécule d'iode entre 500 nm et 750 nm :

- Transitions rovibrationnelles entre X ($^3\Sigma_{0+g}$) et B ($^3\Pi_{0+u}$)
- Scindées en 15 ou 21 composantes hyperfines (selon la parité de J)

➔ Plus de 10^6 raies hyperfines

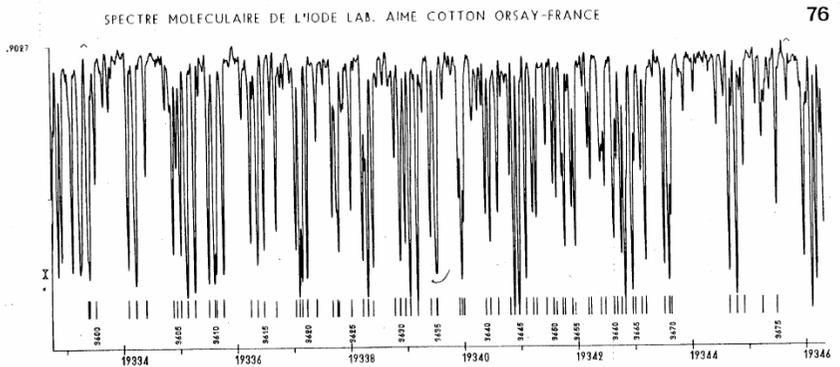


La largeur des raies hyperfines de l'iode diminue lorsqu'on se rapproche de la limite de dissociation (500 nm)

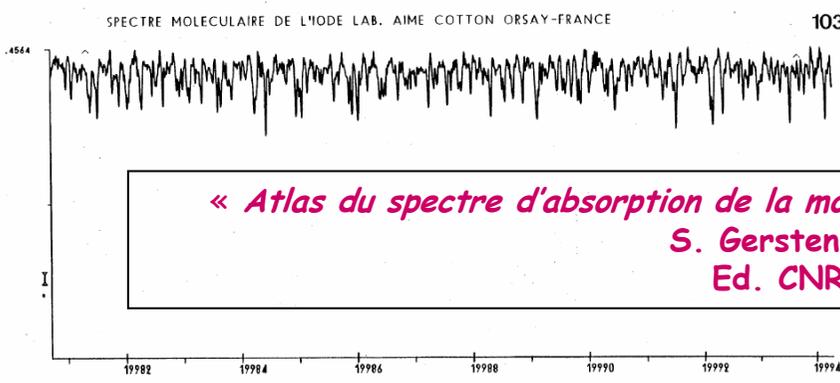
Largeur naturelle :

$\Delta\nu \sim 10 \text{ MHz}$ @ 750 nm
 $\Delta\nu \sim 250 \text{ kHz}$ @ 532 nm
 $\Delta\nu \sim 100 \text{ kHz}$ @ 515 nm
 $\Delta\nu \sim 1 \text{ kHz}$ @ 500 nm

Au voisinage de 515 nm



Au voisinage de 500 nm



« Atlas du spectre d'absorption de la molécule d'iode »
 S. Gerstenkorn et P. Luc
 Ed. CNRS, Paris 1985

Mais, les raies sont moins intenses à 500 nm

à 515 nm



$\Delta\nu \sim 300 \text{ kHz}$
 $Q = \nu/\Delta\nu \sim 2 \times 10^9$

meilleur compromis Q vs SNR

Triplage de la fréquence de la source CW @ 1,5 μm

Principe : doublage ($\omega + \omega \Rightarrow 2\omega$) + somme ($\omega + 2\omega \Rightarrow 3\omega$)

Peu de réalisations à 1,5 μm :

- Réalisation des deux processus (SHG + SFG) dans un même cristal PPLN (comme en impulsionnel) ➔ QPM d'ordre supérieur

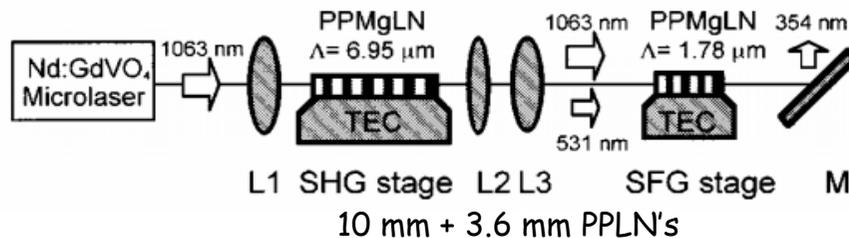
R. Klein et al., Appl. Phys. **B75** (2002) 79

1 seul cristal BULK / PPLN ($l \sim 1$ cm; $\Lambda \sim 14.5$ μm)
8 nW à 518 nm à partir de 40 mW à 1554 nm (**2 mW** à 777 nm)

M. Marangoni et al., Opt. Lett. **31**(18) (2006) 2707

1 seul cristal WG / PPLN ($l \sim 18$ mm, $\Lambda \sim 18$ μm)
30 nW à 523 nm à partir de 16 mW à 1570 nm (**170 μW** à 785 nm)

- Deux processus (SHG + SFG) cascades
- dans l'UV :

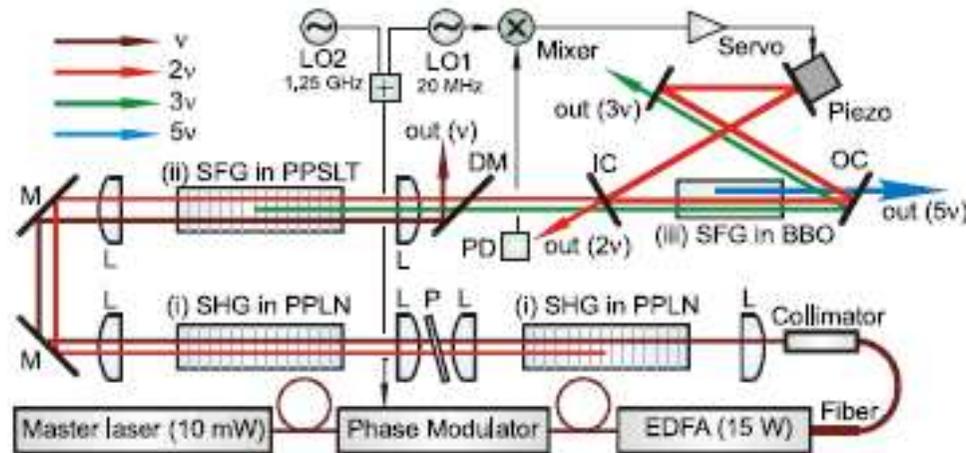


47 mW à 3ω (354 nm) en partant de **7.3 W** à 1064 nm

Mizuuchi et al., Appl. Phys. Lett. **85**(18) (2004) 3959

• dans le vert :

Vasilyev et al., Appl. Phys. B. 103(1) (2011) 27



- 1565 nm \Rightarrow
- 2 cristaux PPLN pour le SHG \Rightarrow 782,5 nm
 - 1 cristal PPLN pour le SFG \Rightarrow 521,6 nm
 - 1 cristal BBO bulk en cavité pour le SFG \Rightarrow 313 nm
- 1,2 W à 3ω (521,6 nm) en partant de 14,5 W à 1565 nm

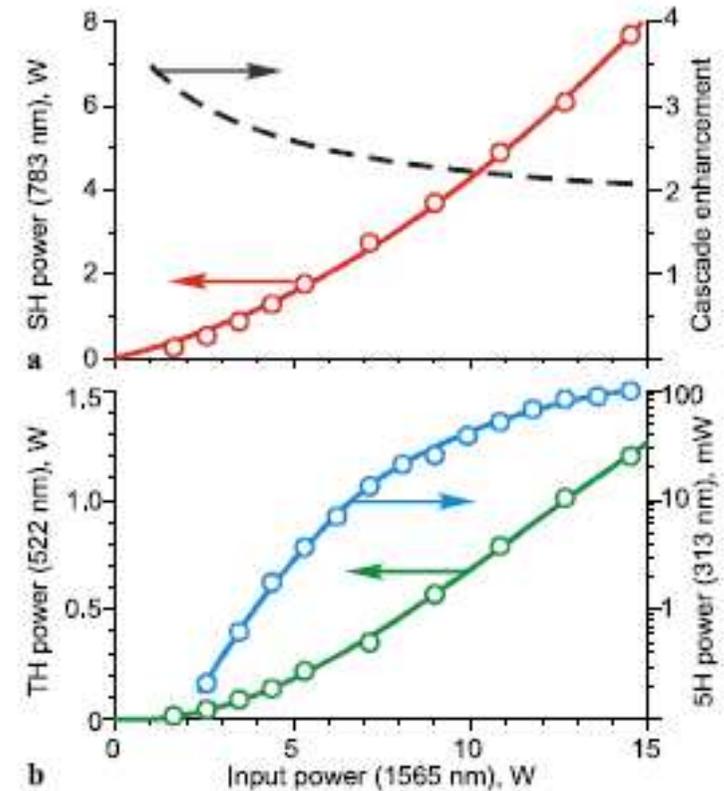
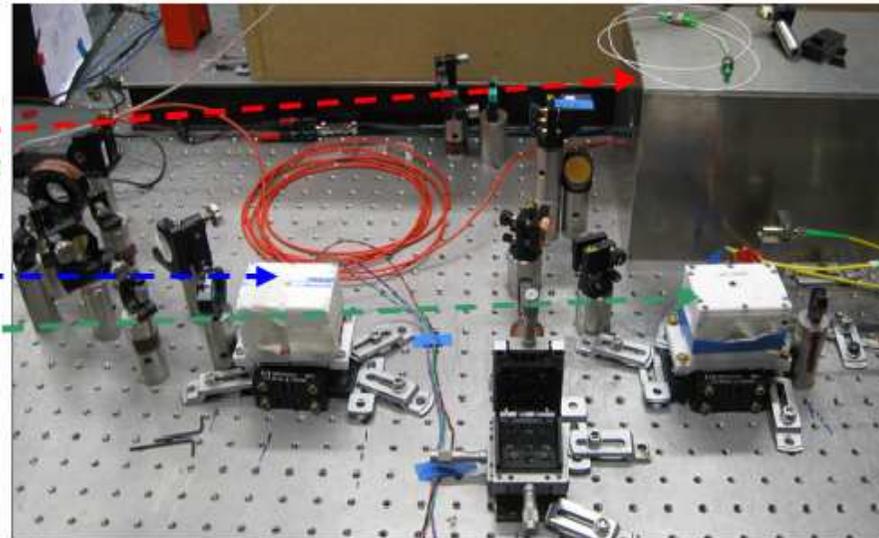
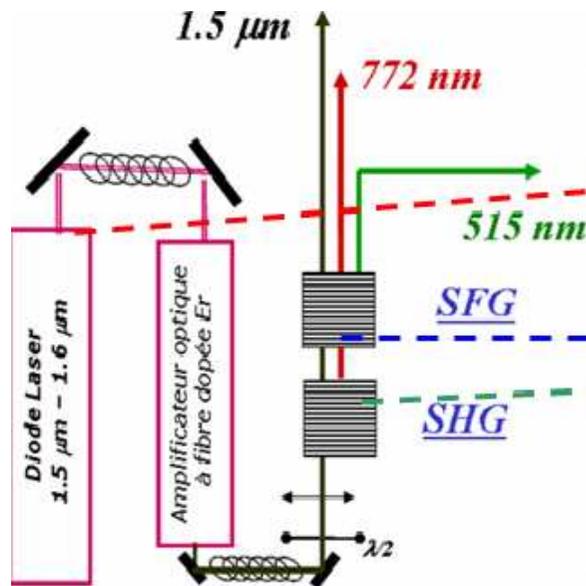


Fig. 2 Output power of the source at second, third and fifth-harmonic wavelength (SH, TH, 5H, respectively) vs. input power at fundamental wavelength. Part (a): left axis—SH power, right axis—enhancement factor of the two-crystal cascade (see text). Part (b): left axis—TH power, right axis—5H power (1 minute average) in logarithmic scale

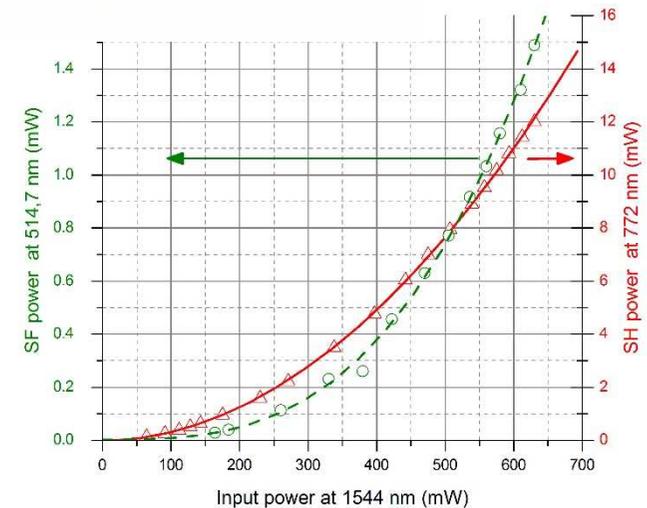
Une solution de ce type est retenue pour la première version de STABI2

Expérience initiale (2010/2011) réalisée entièrement en espace libre



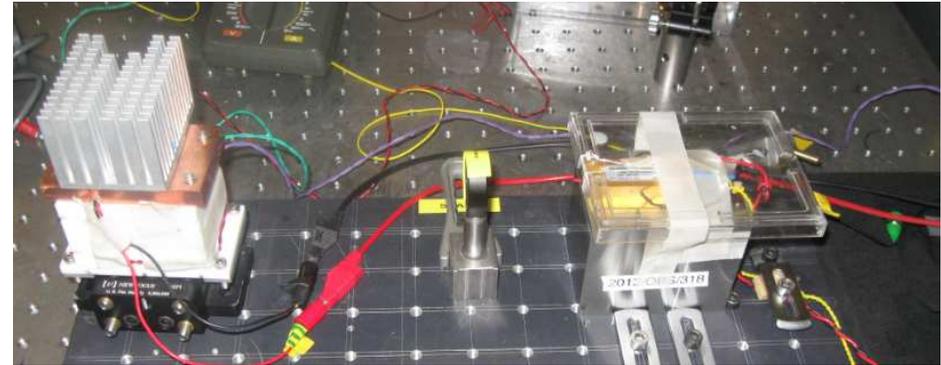
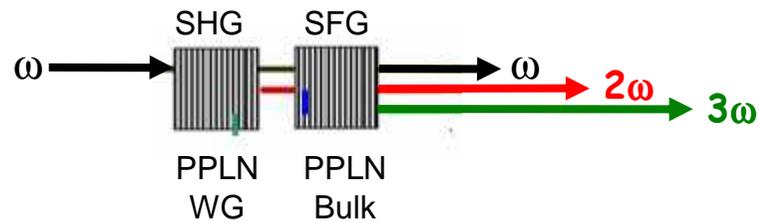
SHG: Bulk PPLN ($l = 50 \text{ mm}$, $\Lambda \sim 18,8 \mu\text{m}$)
 600 mW à 1544 nm \Rightarrow **12 mW** @ 772 nm (+ 100 nW à 3ω !)
 $T \sim 45^\circ\text{C}$
 $\Delta T \sim 5^\circ\text{C}$; $\Delta\lambda \sim 1 \text{ nm}$
 $\eta \sim 0,6\% \text{ W}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$

SFG: Bulk PPLN ($l = 50 \text{ mm}$, $\Lambda \sim 6,9 \mu\text{m}$)
1.5 mW @ 514 nm
 $T \sim 19^\circ\text{C}$
 $\Delta T \sim 1,5^\circ\text{C}$; $\Delta\lambda \sim 0,1 \text{ nm}$
 $\eta \sim 6,8\% \text{ W}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$



La puissance optique $P(3\omega)$ @ 515 nm est limitée par celle obtenue en amont à 772 nm ($P(2\omega) = 12 \text{ mW}$) par le processus de doublage 1544 nm \rightarrow 772 nm
 Le premier maillon du processus de triplage de fréquence doit être optimisé.

Nouveau cristal doubleur de fréquence 1544 nm vers 772 nm (NTT Electronics)

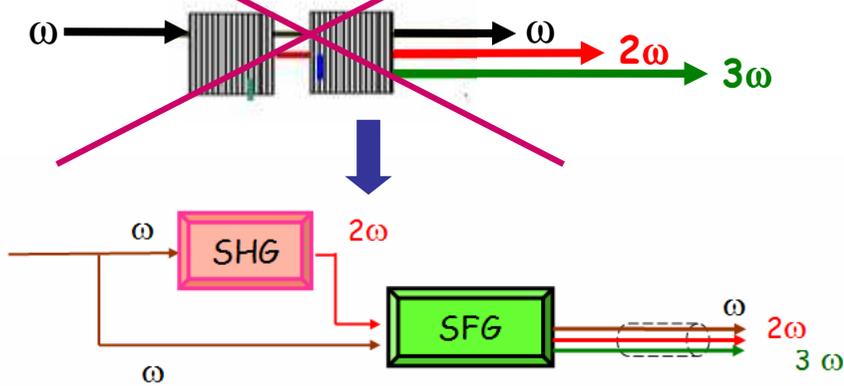


➤ Pour une Puissance pompe $P(\omega) \sim 500$ mW à 1544 nm :

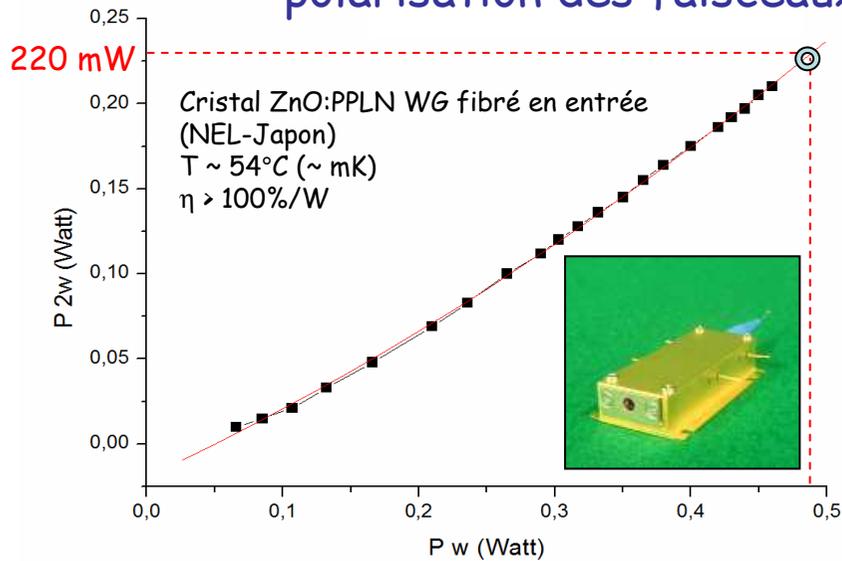
- ✓ $P(2\omega) = 220$ mW à 772 nm (20 fois plus que dans l'expérience précédente) 😊
- ✓ $P(\omega)$ résidu en sortie du cristal doubleur = 120 mW seulement 😞
- ✓ $P(3\omega) \sim 4$ mW à 515 nm 😞

- Des pertes à $1,5 \mu\text{m}$
- Mauvais recouvrement spatial entre les faisceaux à 1544 nm et 772 nm

Nouvelle architecture (2012)



Contrôle indépendant de la géométrie et de la polarisation des faisceaux



500 mW } → 30 mW
500 mW → 220 mW

En sortie du générateur :

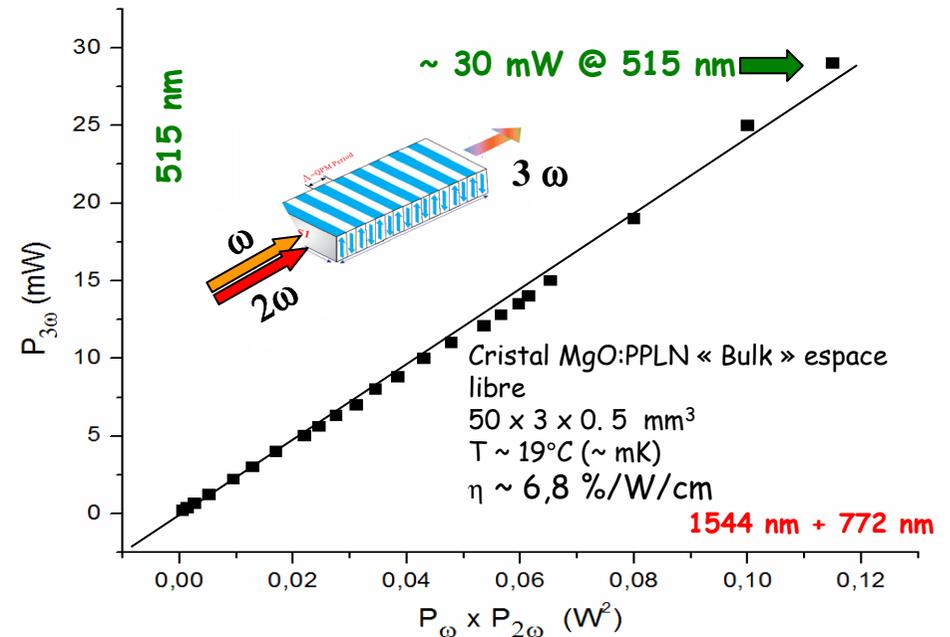
$P_w = 150 \text{ mW}$

$P_{2\omega} = 150 \text{ mW}$

$P_{3\omega} = 30 \text{ mW}$



Faisceaux laser gaussiens



Interrogation de l'iode à 515 nm

➔ Stabilisation de la source à 1,5 μm

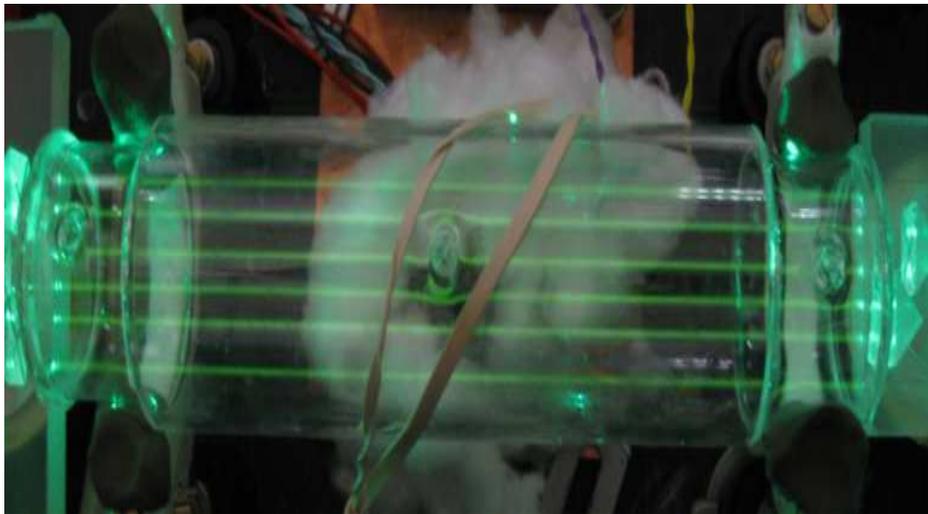
➔ Stabilisation des trois longueurs d'onde
1,5 μm , 772 nm, 515 nm

Amélioration de la
stabilité à court terme



Allongement de la longueur
d'interaction entre la vapeur d'iode
et les faisceaux

➤ Cellule d'iode multipassage



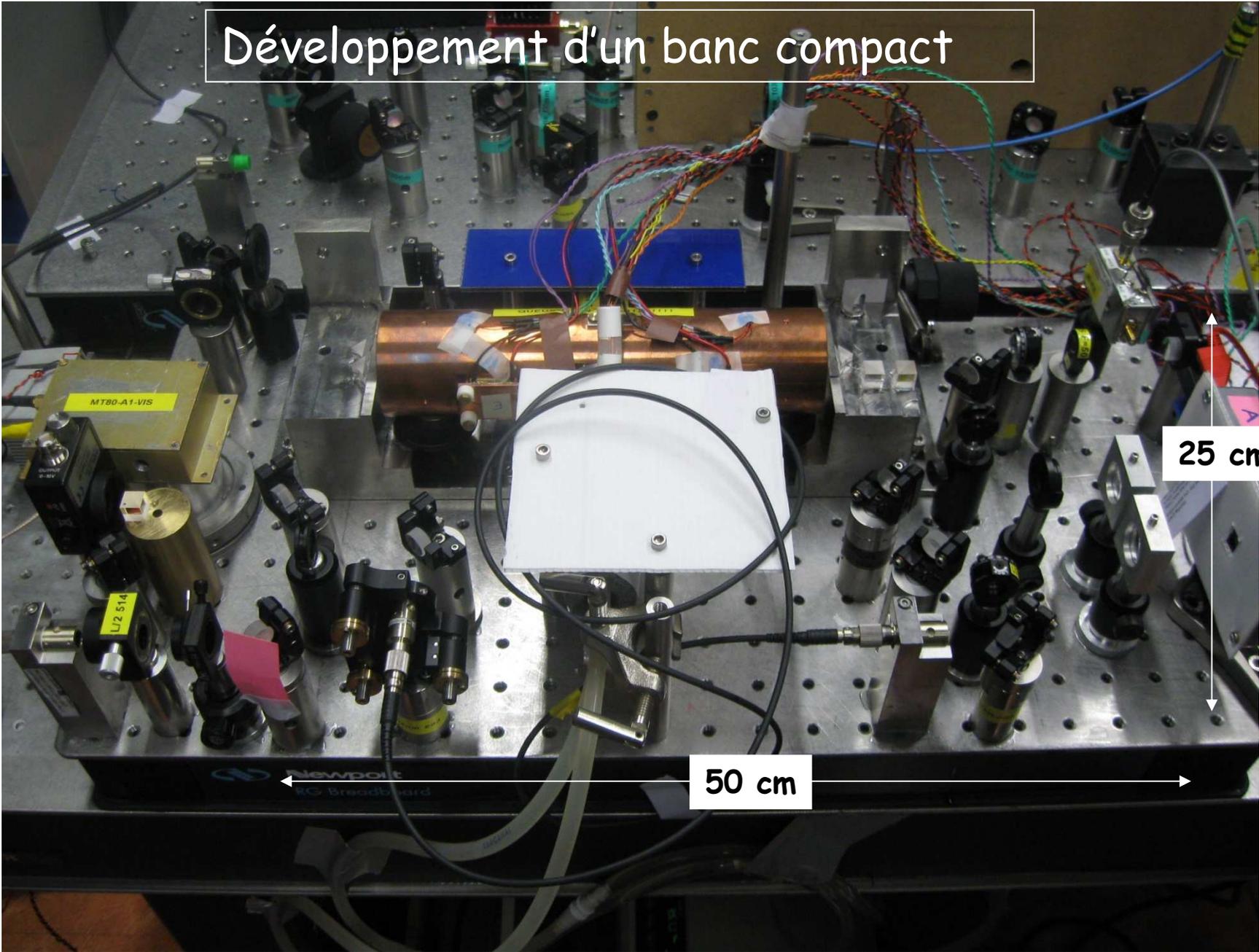
Traitement anti-reflet sur les
deux faces des fenêtres
optiques

Collaboration avec l'Institute of Scientific
Instruments, Brno, République Tchèque

(Jan Hrabina)

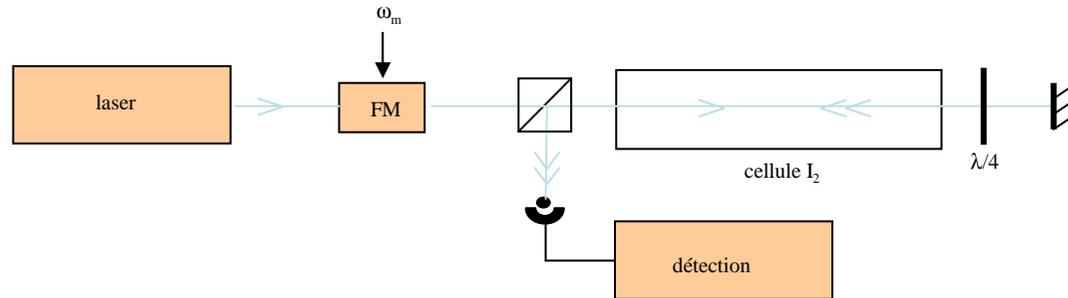
➤ Cellule d'iode en cavité ?

Développement d'un banc compact



25 cm

50 cm



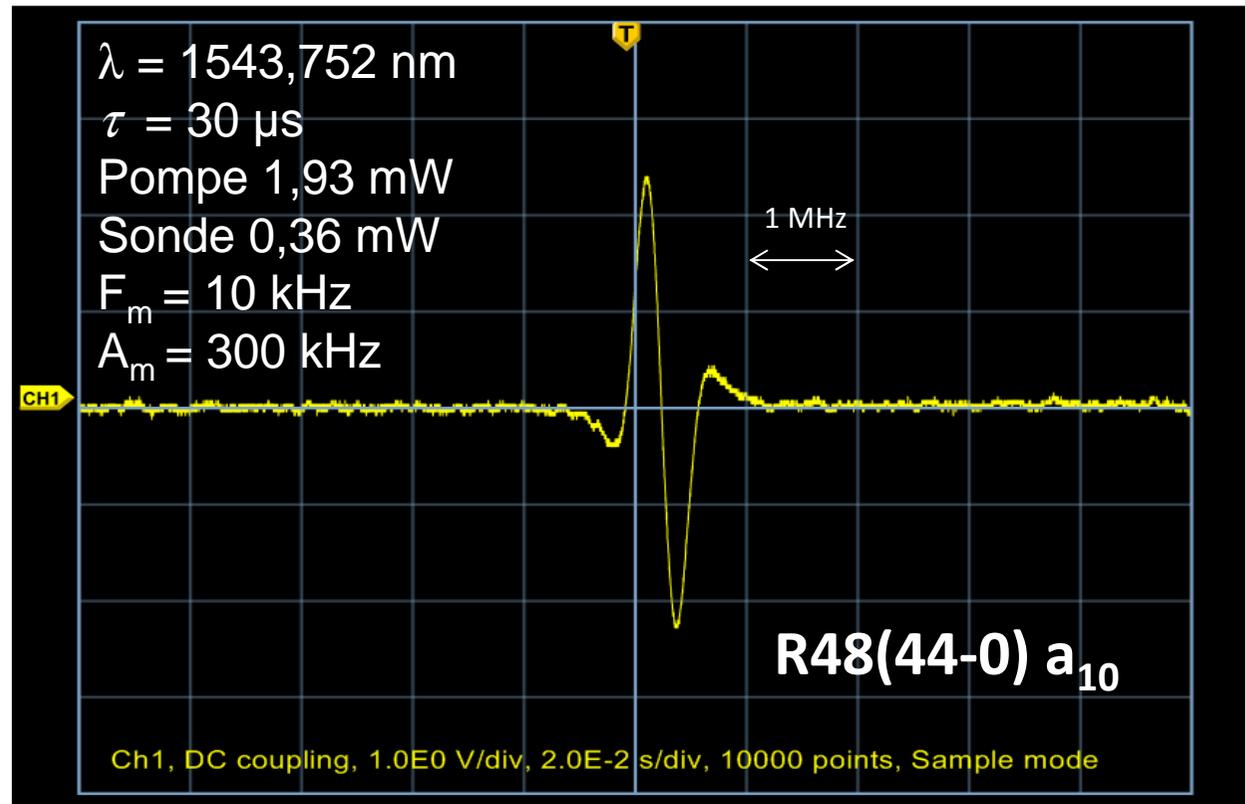
Détection du troisième harmonique

Exploration de dizaines de transitions entre :

514,466 nm
(19437,630 cm⁻¹)

et

514,800 nm
(19425,020 cm⁻¹)



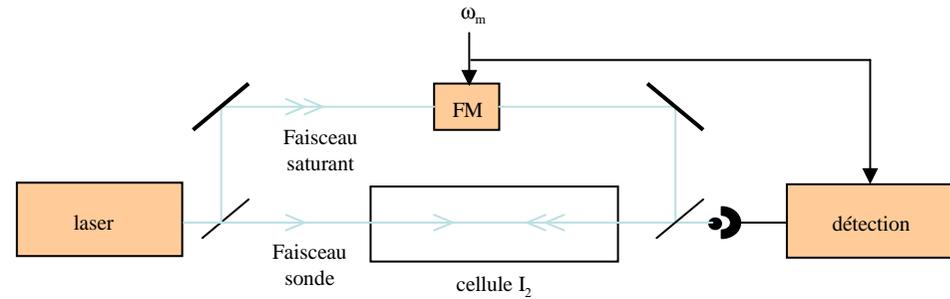
Largeur expérimentale ~ 300 kHz

Identification de raies intenses et isolées intéressantes pour la stabilisation

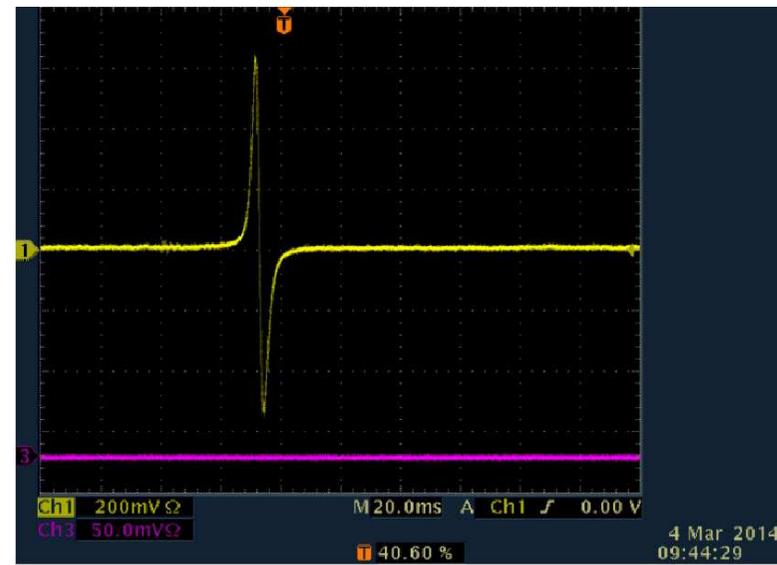
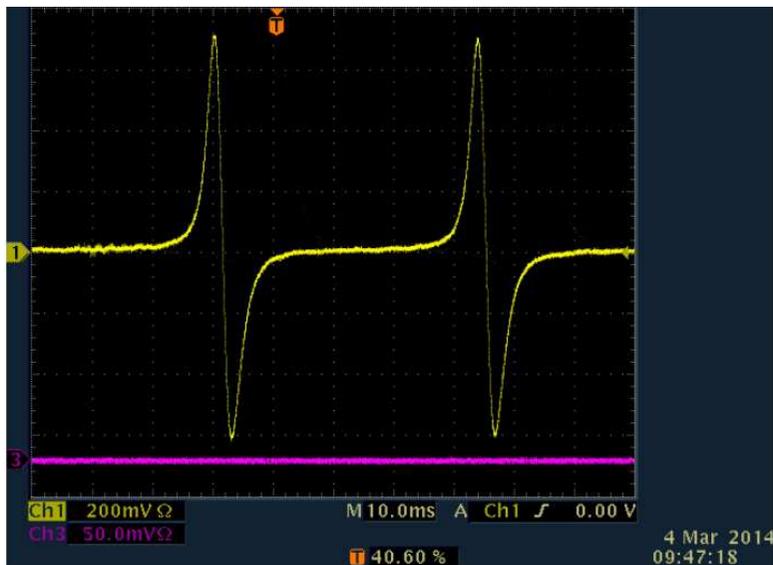
Nouveau banc optique : Technique de transfert de modulation de fréquence



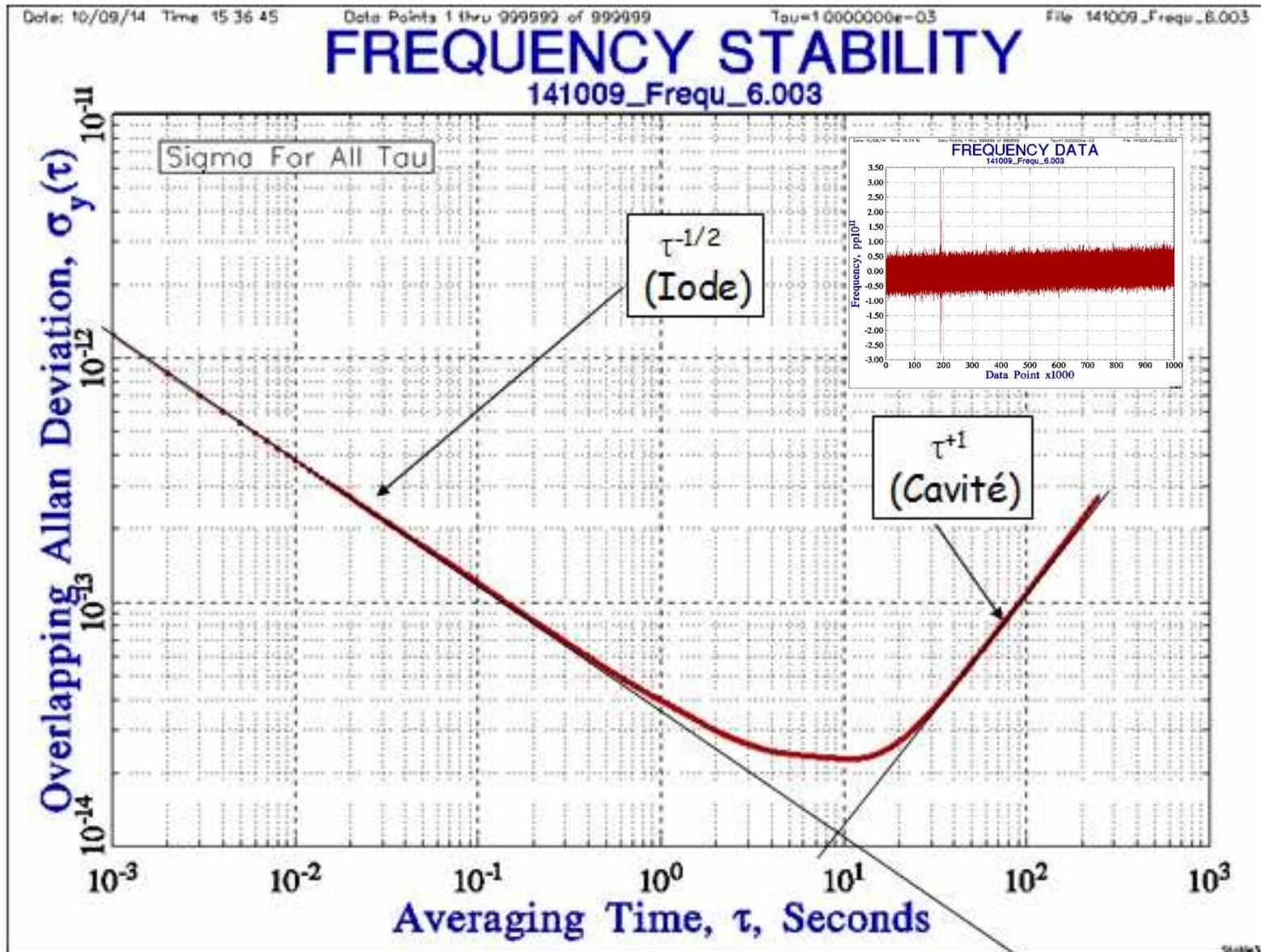
350 mm x 350 mm

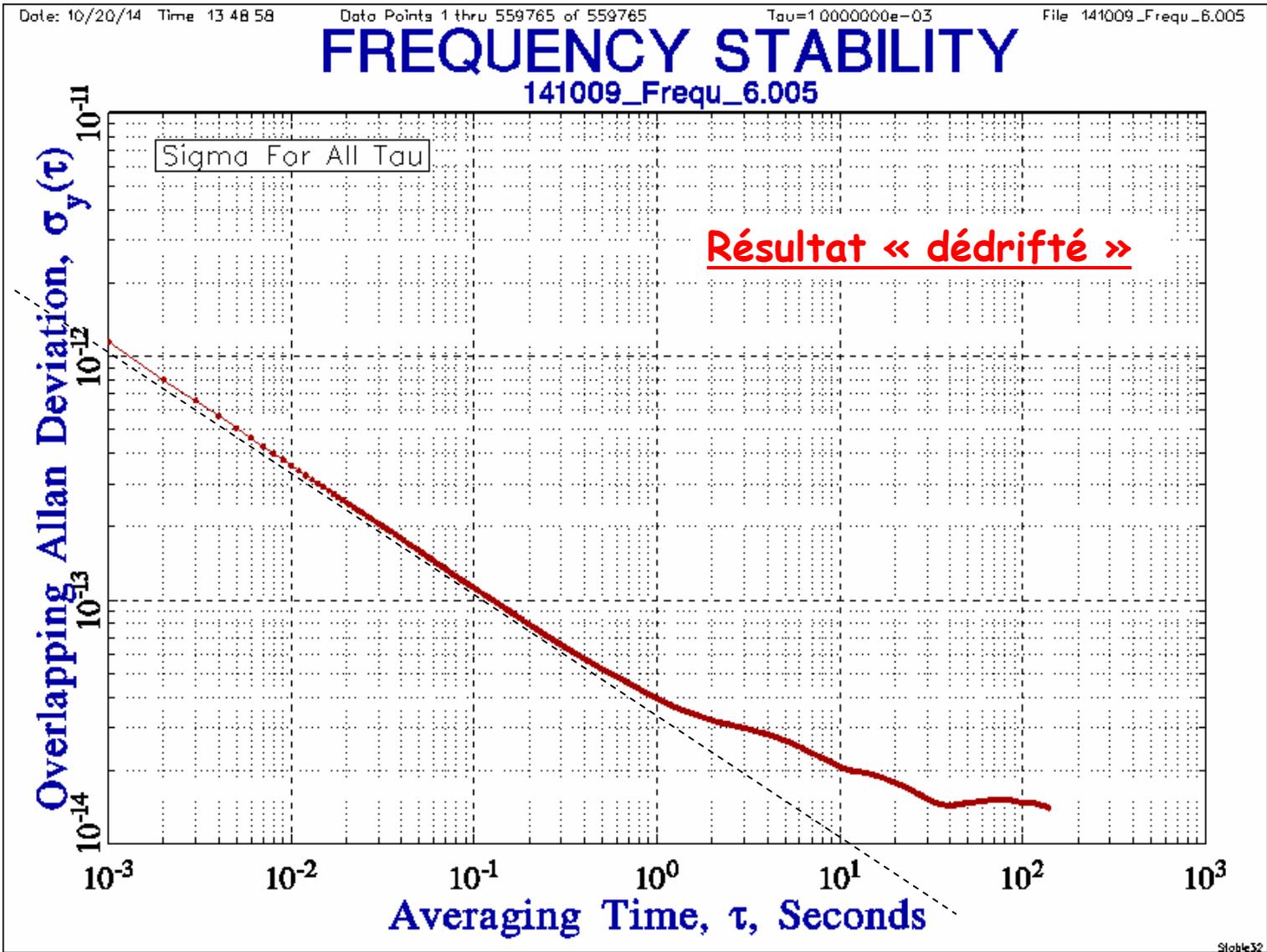


Détection du premier harmonique
Largeur expérimentale ~ 300 kHz



Mesures de la stabilité de fréquence : battement avec un laser asservi sur cavité





Maturation technologique : Projet TRIDENT

□ Brevet

Générations de faisceaux optiques IR et visibles, puissants, cohérents en phase et ultrastables en fréquence, Brevet n°3004820, Bulletin Officiel de la Propriété Industrielle n°43 du 24 octobre 2014.



□ Janvier 2014 : Financement SATT LUTECH pour développer un démonstrateur tout fibré émettant 100 mW à 515 nm



□ Financement du Labex FIRST-TF pour l'acquisition de cristaux SFG fibrés



Erick Chea
Charles Philippe
Jérémy Courtois
Frédéric Du Burck
Ouali Acef

David Holleville
Michel Lours

*Conception mécanique
Électronique*

Rodolphe Le Targat
Daniele Nicolodi
Yann Lecoq
Paul-Eric Pottié

Mesures de fréquences / laser femtoseconde