



Applications : ThomX, source compacte de rayons X

Ronic Chiche

Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire

ronic@lal.in2p3.fr



Journée thématique, Le bruit dans les lasers femtosecondes, 18 janvier 2018

Plan

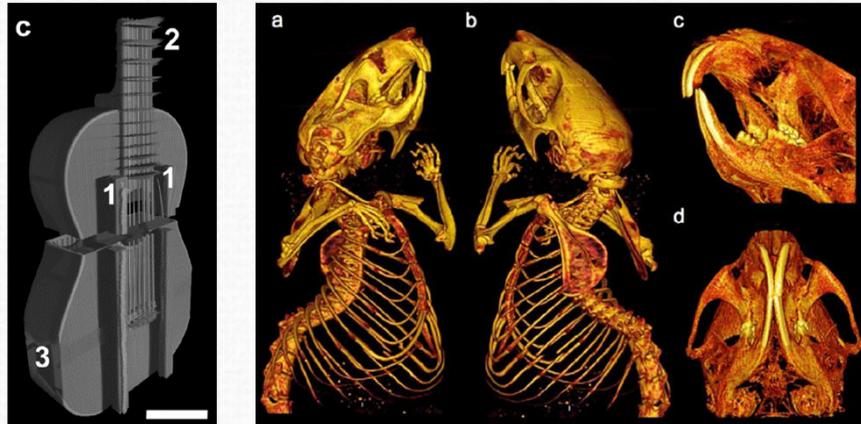
- ThomX : une machine compacte à rayons X
- Principes d'un laser injectant une cavité Fabry-Perot
- Résultats à forte puissance

Plan

- **ThomX : une machine compacte à rayons X**
- Principes d'un laser injectant une cavité Fabry-Perot
- Résultats à forte puissance

Applications à haut flux de rayons X

Imagerie non invasive

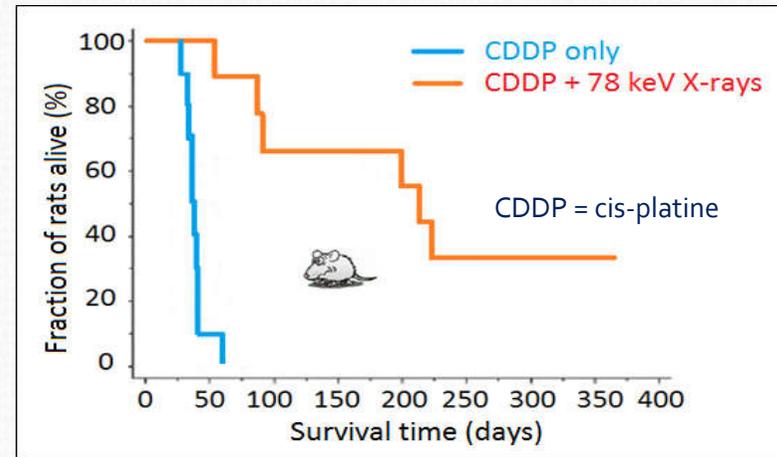


K. Achterhold et al. "Monochromatic computed tomography with a compact laser-driven X-ray source". *Scientific Reports* 3 (Feb. 21, 2013)



J. Dik et al. "Visualization of a Lost Painting by Vincent van Gogh Using Synchrotron Radiation Based X-ray Fluorescence Elemental Mapping". *Analytical Chemistry* 80.16 (2008).

Radiothérapie

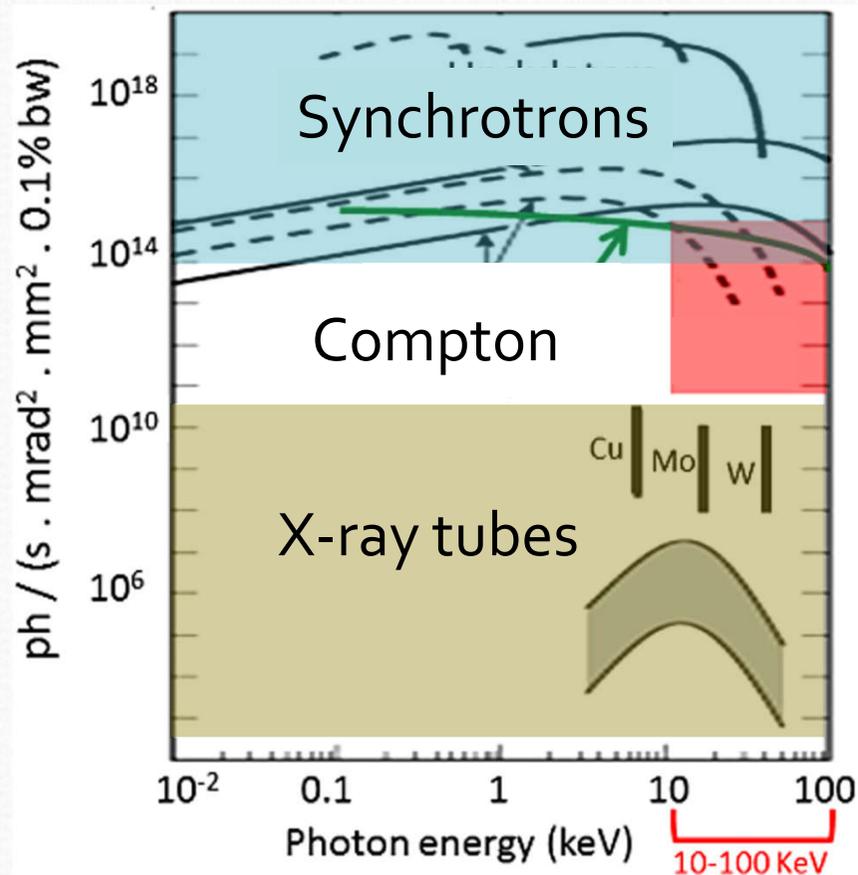


Marie-Claude Biston et al. *Cancer Res* 2004;64:2317-2323

- Fort flux $\sim 10^{11-13}$ X/s
- Energie élevée $\sim 35-90$ keV
- Faisceau monochromatique

Brillance des sources de rayons X

$$\text{Brillance} = \frac{\Delta N_X}{(2\pi)^{5/2} \Delta t_X \sigma_X^2 \theta_X^2}$$

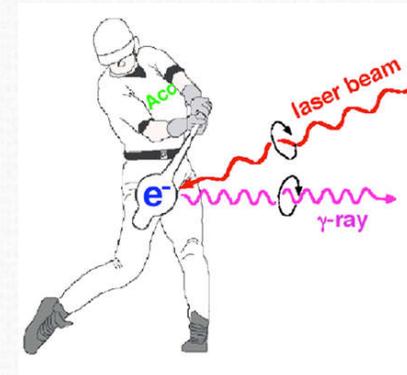
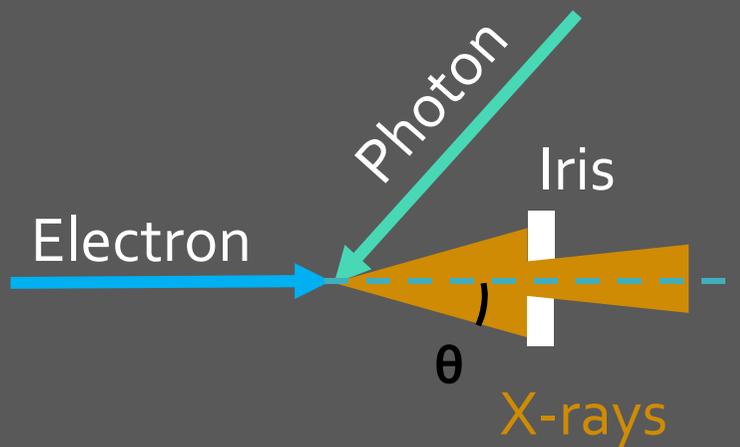


- Fort flux/brillance
- Nombreuses lignes
- Large gamme d'énergie
- Grande infrastructure
- Coût de construction et de maintenance élevée

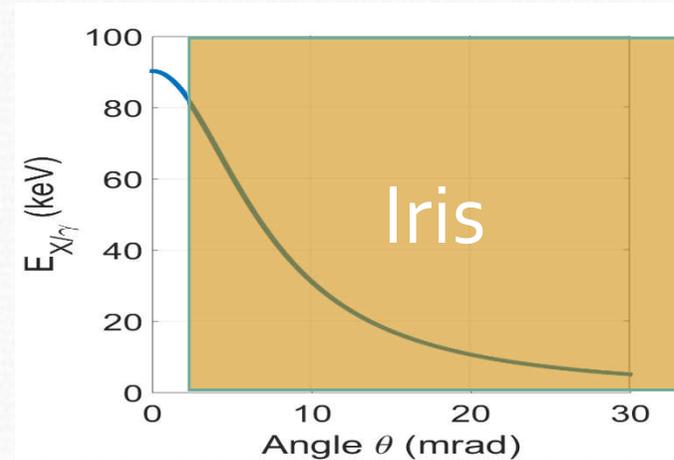
- Peu couteux
- Compact
- Faible flux/brillance
- Gamme d'énergie limitée à 60 keV

La diffusion Compton

$$E_X \simeq \frac{4\gamma^2 h\nu}{1 + \gamma^2 \theta^2}$$



Photons de 90 keV produits par des électrons de 70 MeV



Flux de photons X

$$\frac{dn_X}{dt} \propto \sigma_T \frac{f_{col} Q_e}{\sigma_x \sigma_y} S(\phi, \sigma_s) \mathcal{E}_{laser}$$

- Section efficace Compton, très faible : $\sigma_T \sim 0,66 \times 10^{-28} \text{ m}^2$ ☹
=> Limite fortement le flux maximum atteignable
- La technologie accélérateurs est a sa limite :
 - Compacte : Périmètre anneau = 18m
 - Charge injectée : 1nC
 - Quasi « head-on »
 - Petit waist (70 μm) et petite longueur (6 mm) de faisceau=> Pas d'amélioration significative possible avec une technologie standard
- L'énergie laser est le paramètre qui reste à maximiser

ThomX : Système Laser

Les applications médicales demandent 10^{13} X/s

Avec ThomX : $N_X = 6 \cdot 10^{-12} N_{IR} \Leftrightarrow \langle P \rangle = 330 \text{ kW} @ 1 \mu\text{m} / f_{\text{REP}} = 16,67 \text{ MHz} (L=18 \text{ m})$

- Oscillateur + amplificateur :

Etat de l'art :

$91,3 \mu\text{J} @ 10 \text{ MHz} \Rightarrow \langle P \rangle = 913 \text{ W}$

H. Carstens, et al. "Megawatt-scale average-power ultrashort pulses in an enhancement cavity," Opt. Lett. 39, 2595-2598 (2014)

$100 \text{ J} @ 10 \text{ Hz} \Rightarrow \langle P \rangle = 1000 \text{ W}$

Dipole 100 - SFTC Rutherford Appleton Lab - 01/2017

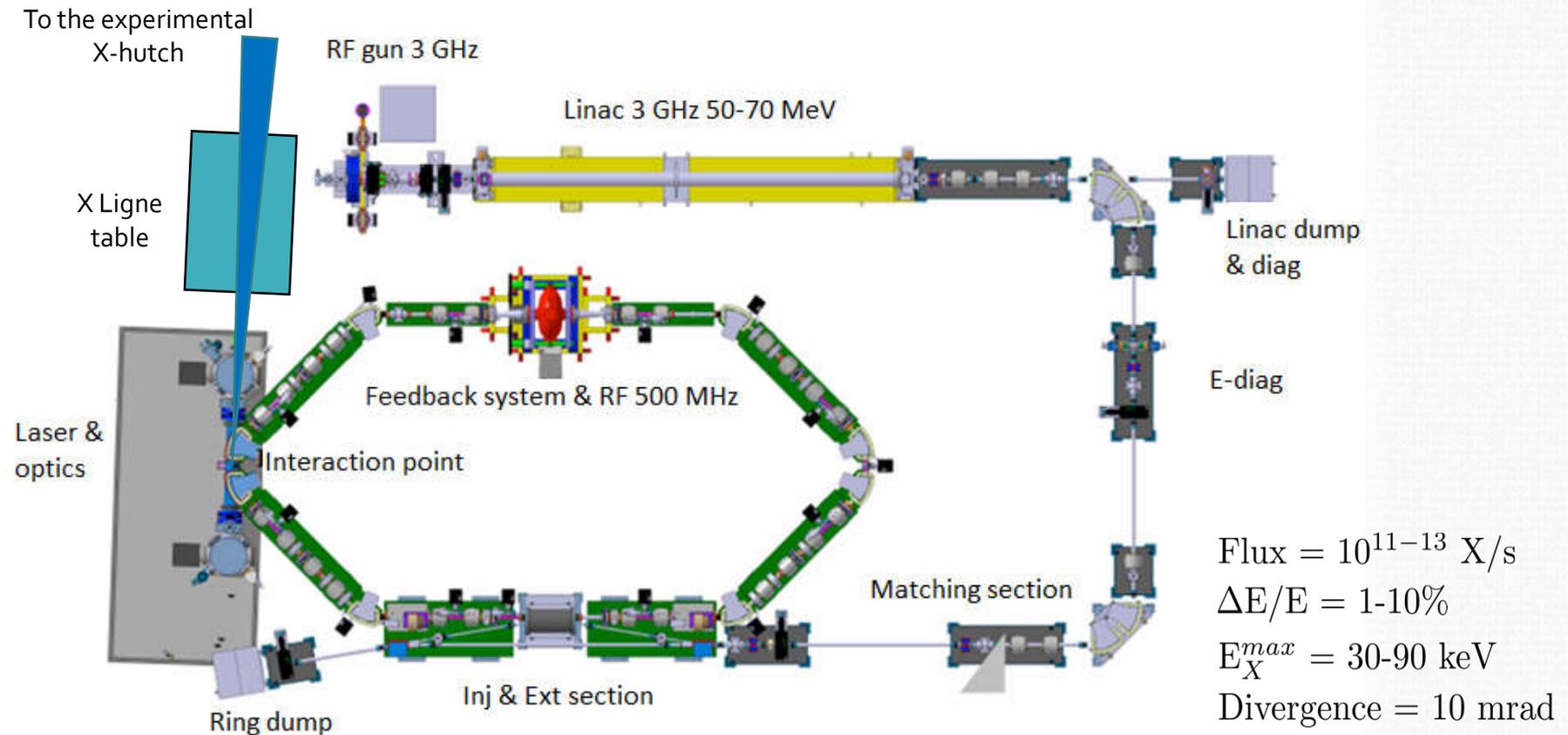
- 2 – 3 ordres de grandeur manquant

\Rightarrow On accumule des pulses laser dans une cavité Fabry-Perot de 9m (et pas 18m)

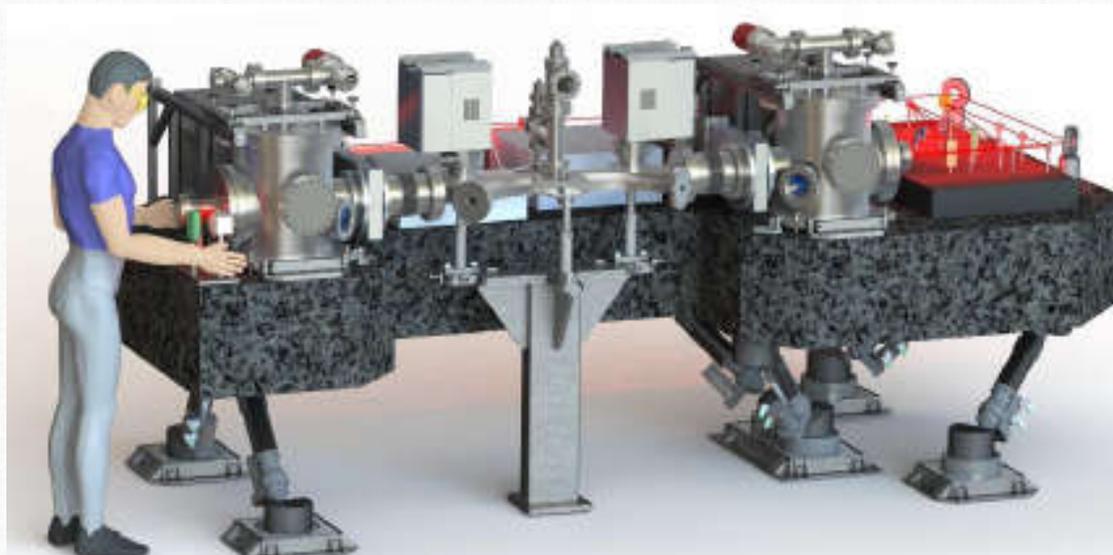
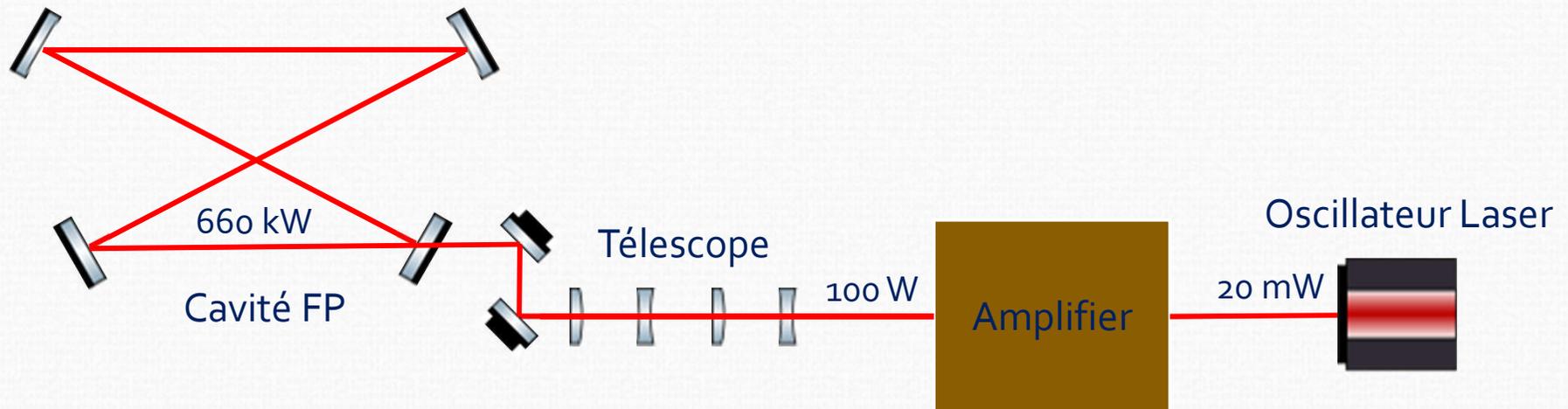
\Rightarrow 1 pulse sur 2 n'interagit pas avec les électrons

$\Rightarrow \langle P \rangle = 660 \text{ kW} @ 1 \mu\text{m} / f_{\text{REP}} = 33,33 \text{ MHz}$

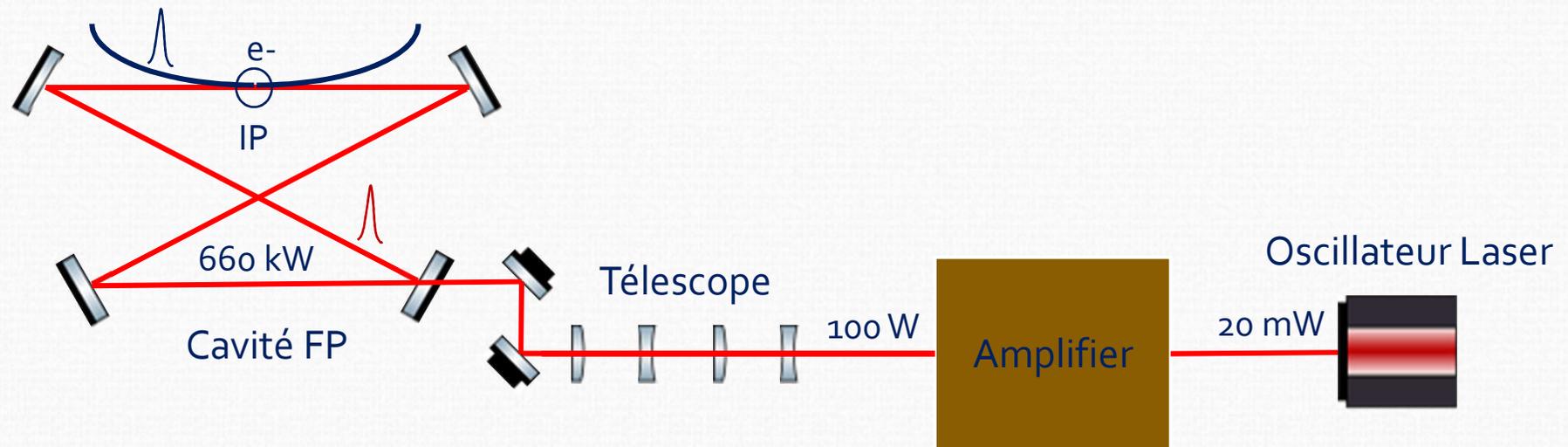
ThomX : Setup



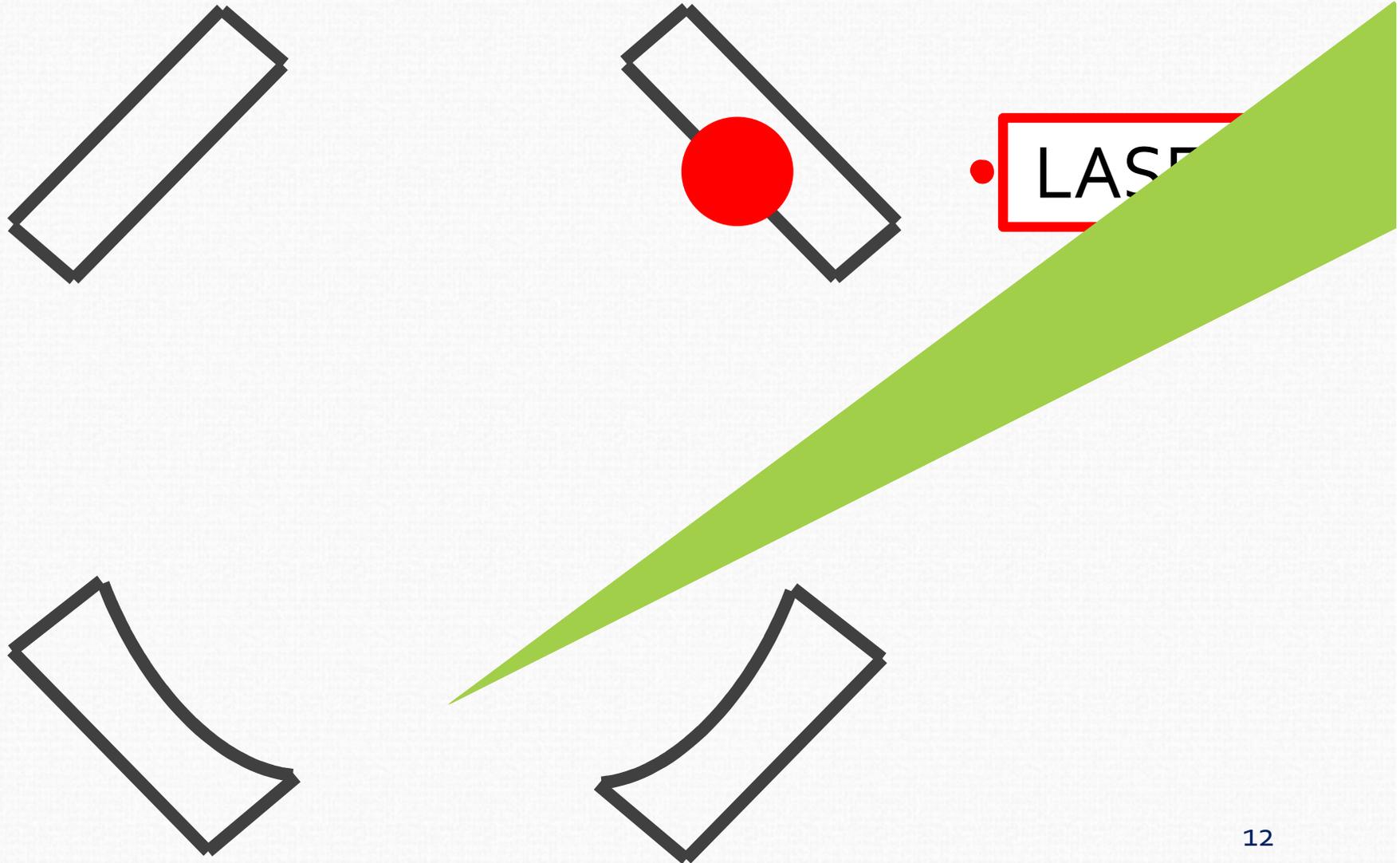
ThomX : Schéma optique simplifié



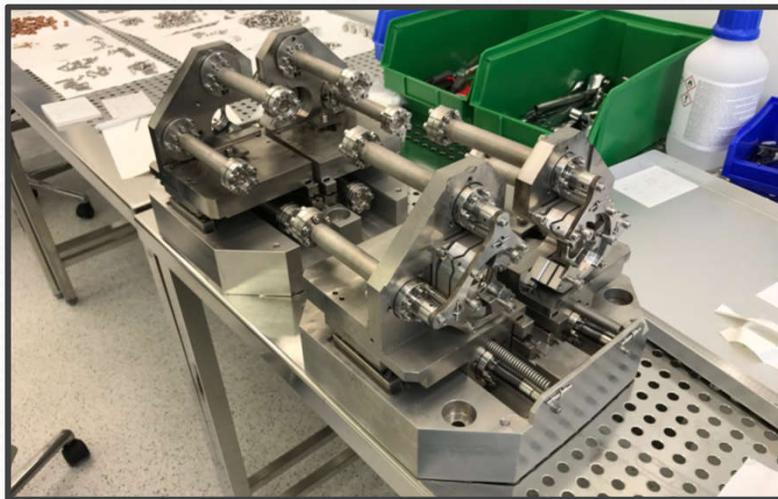
ThomX : Synchronisation



ThomX : Production de rayons X



ThomX : Installation



18/01/2018

R. Chiche - LAL, Orsay - Journée thématique
: Le bruit dans les lasers femtosecondes

13

Plan

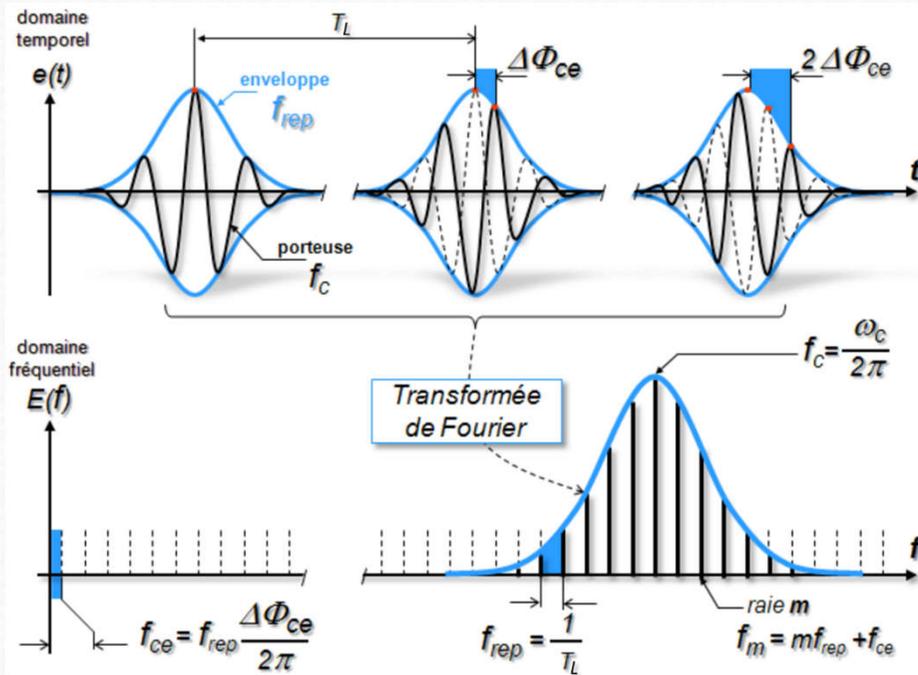
- ThomX : une machine compacte à rayons X
- **Principes d'un laser injectant une cavité Fabry-Perot**
- Résultats à forte puissance

Modes de cavité FP : Représentation fréquentielle

- Cavité FP <--> filtre spatio-temporel résonant

Forme transverse du faisceau
Fréquences optiques

Conditions de résonnances



Représentation fréquentielle

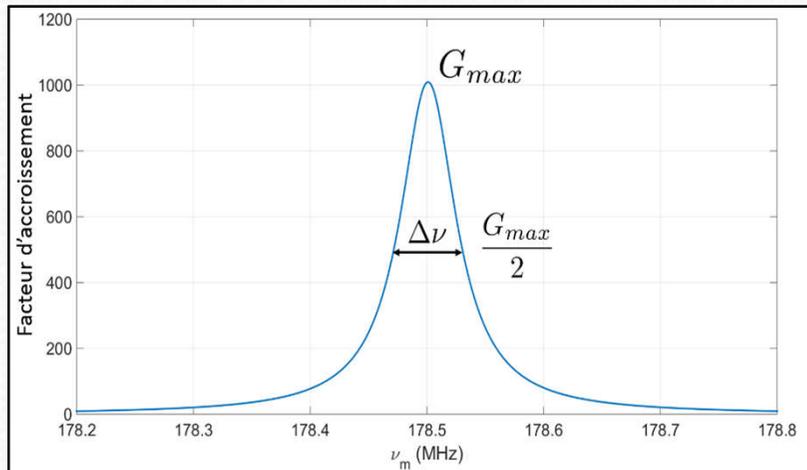
Cavité : $f_k = k F_{cav}$

Laser : $f_n = \left(n + \frac{\Delta\phi_{ce}}{2\pi} \right) F_{rep}$
 pulsé

Optimum :

- CEP = 0
- $F_{rep} = F_{cav}$

Les briques : Oscillateur laser

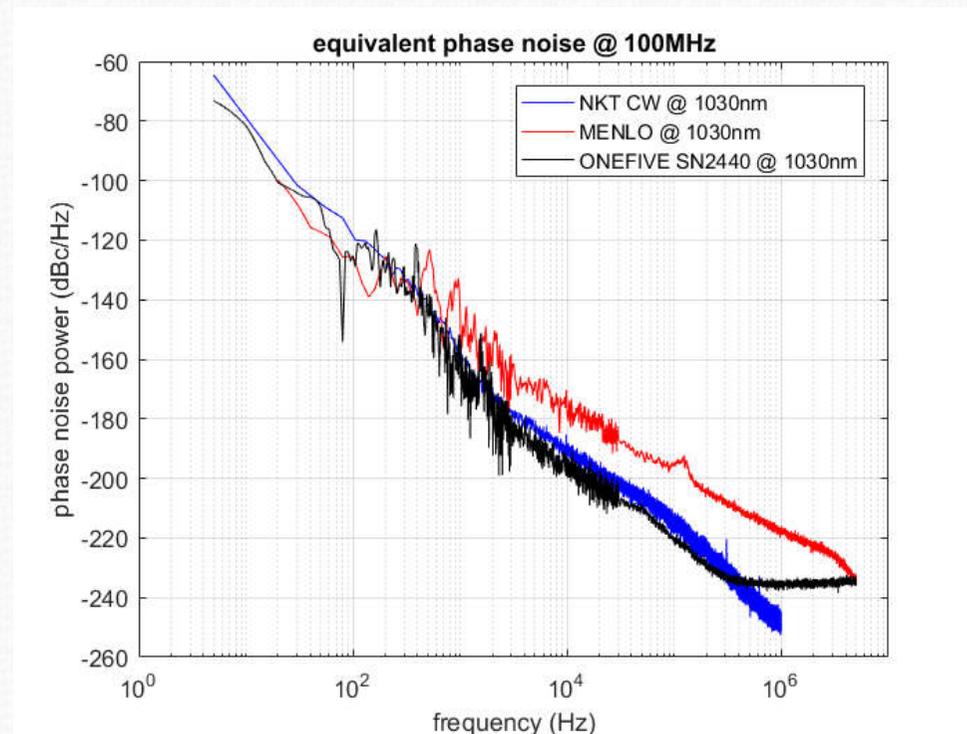


Pic d'Airy de la cavité FP

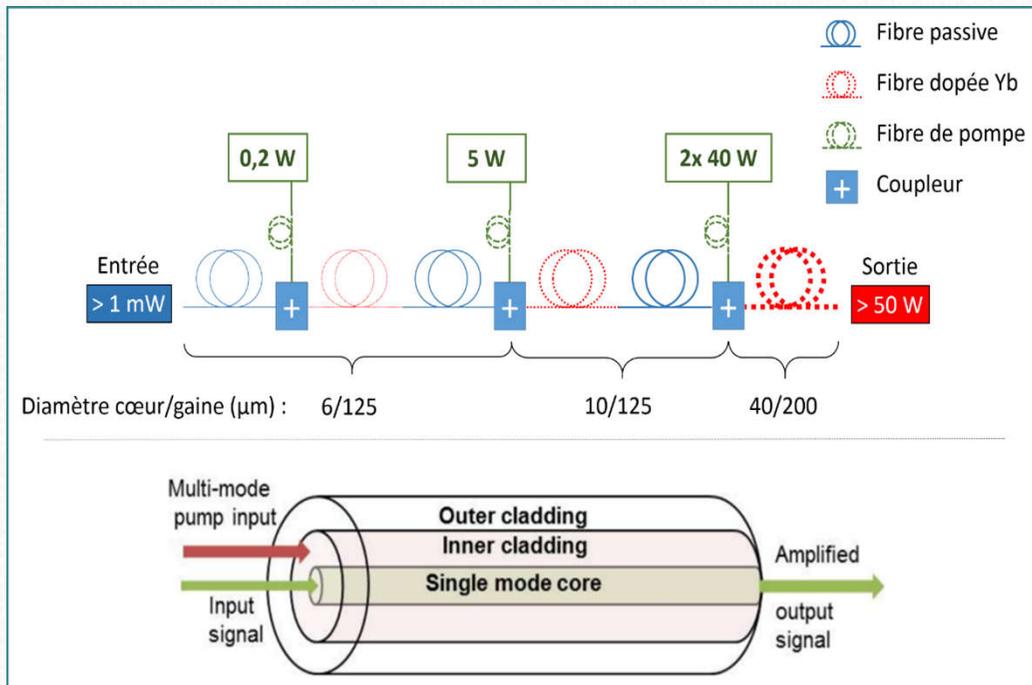
Oscillateur laser Ultra-stable @ 1030 nm

- OneFive Origami
- Mesure par battement optique
- Meilleur qu'un laser de référence CW

$$\left. \begin{array}{l} \Delta\nu = 800 \text{ Hz} \\ \nu = 300 \text{ THz} \end{array} \right\} \frac{\Delta\nu}{\nu} \propto 10^{-12}$$



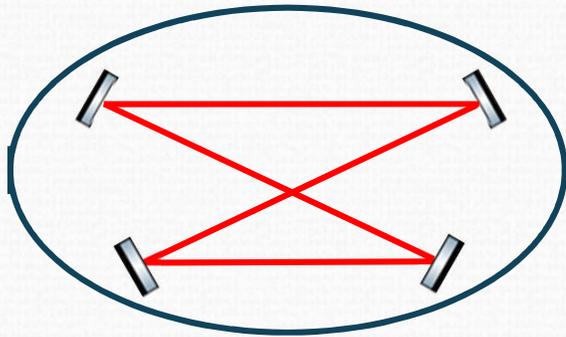
Les briques : Amplificateur fibré



- Gestion de la puissance moyenne dans les fibres
=> Fibras gros cœur
- Non linéarités qui introduisent du bruit de phase (intégrale B)
=> Etireur / compresseur

Ampli 100W @ 33,33MHz
Développé au CELIA

Les briques : Miroirs de la cavité FP



Cavité 4 Miroirs :

- 2 sphériques
- 2 plans

Coatings déposés par le LMA en salle blanche classe 1

- Absorption < 1 ppm / miroir !
⇒ Permet d'avoir très peu de puissance absorbée par les coatings et transférée au substrat du miroir

- Transmission ~ 1 ppm et diffusion < 6 ppm / miroir !
⇒ Permet d'obtenir une Finesse très élevée et donc un gain très élevé dans la cavité.

En théorie $F=42k$ / $G=22k$ (si pas de poussières)

- Choix d'une cavité désadaptée
Pertes $M_1 \neq$ Somme des pertes sur M_2-M_4
⇒ Permet d'obtenir un meilleur ratio gain / Finesse

Plan

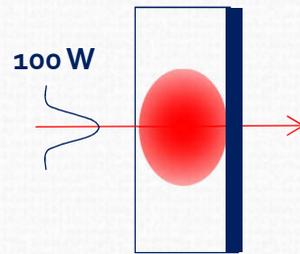
- ThomX : une machine compacte à rayons X
- Principes d'un laser injectant une cavité Fabry-Perot
- **Résultats à forte puissance**

Déformation thermoélastique

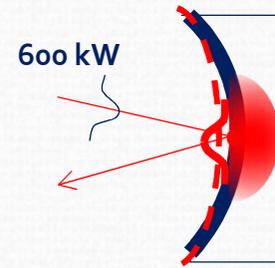
Lentille thermique

$$\delta s \approx \frac{\partial n}{\partial T} \frac{1}{4\pi\kappa} P_a$$

- Choix du saphir
- Faible effet
- Pas d'ULE car absorption linéique trop importante



Miroir d'entrée
Variation d'indice dans le substrat



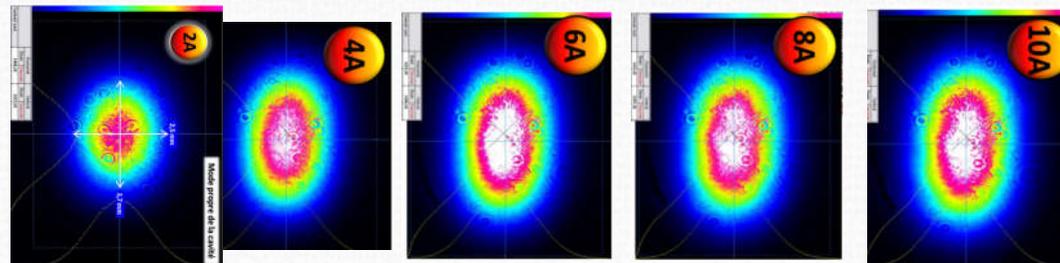
Miroirs cavité
Augmentation du rayon de courbure

Dilatation thermique

$$\delta s \approx \frac{\alpha}{4\pi\kappa} P_a$$

- Choix de l'ULE
- Déformation 55x moins que la Silice fondue
- Fort effet

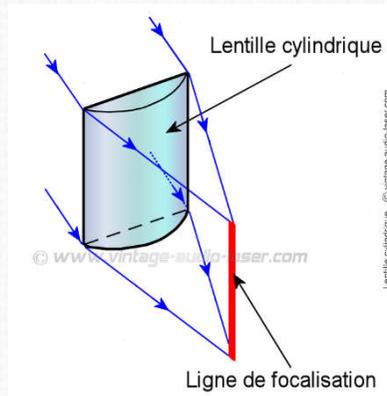
Faisceau intra-cavité



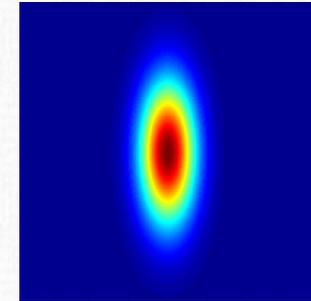
Exemple avec miroirs en silice fondue
60 kW max
Taille x2 - x3

Mode de la cavité Fabry-Perot en fonction de la puissance Intra-cavité
 ⇒ Changement du rayon de courbure des miroirs
 ⇒ Mode elliptique

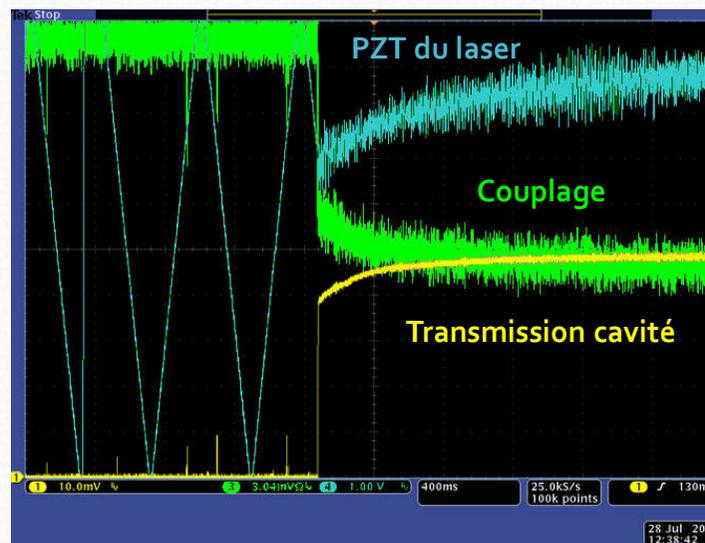
Lentilles cylindriques



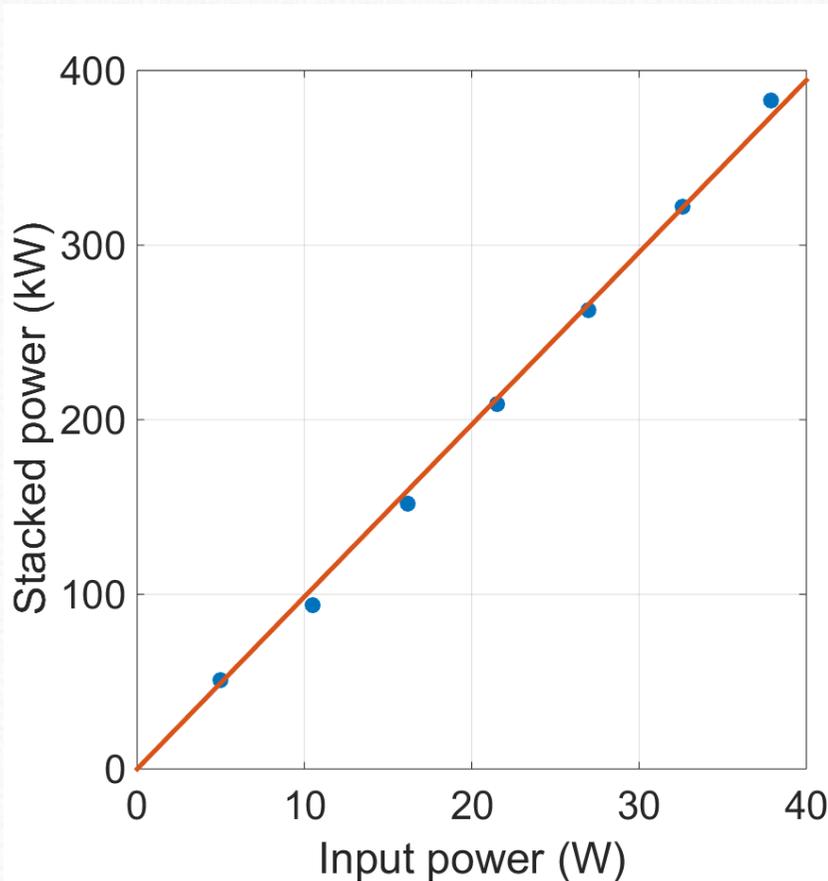
- Permet une focalisation sur 1 axe
- Indispensable pour les faisceaux elliptiques
- On utilise un jeu de 4 lentilles cylindriques
- Le télescope est réglé sur la cavité chaude



La puissance intra-cavité augmente avec les effets thermiques

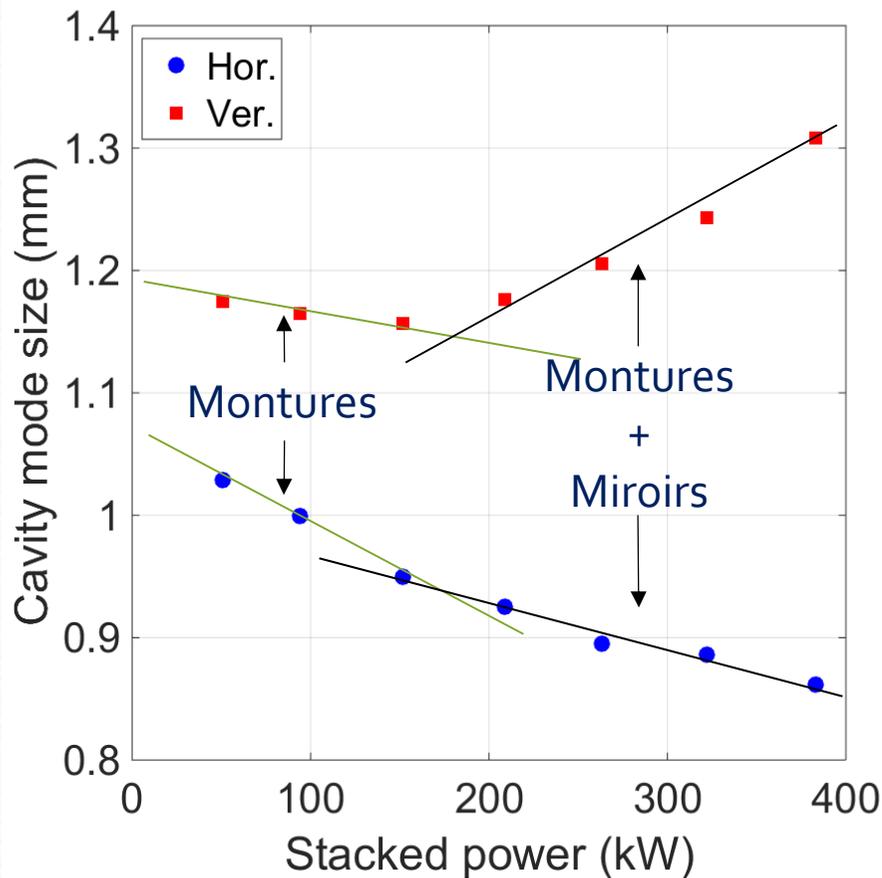


Puissance stockée intra-cavité



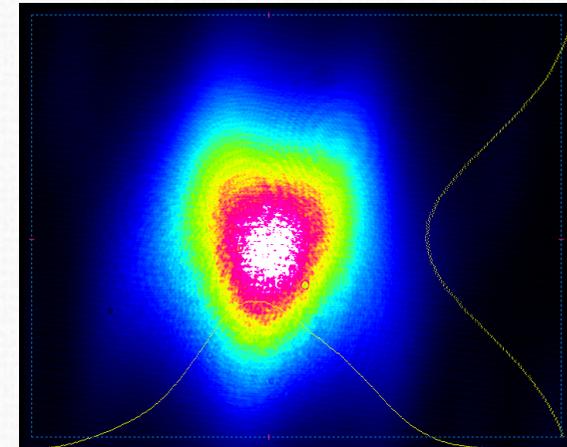
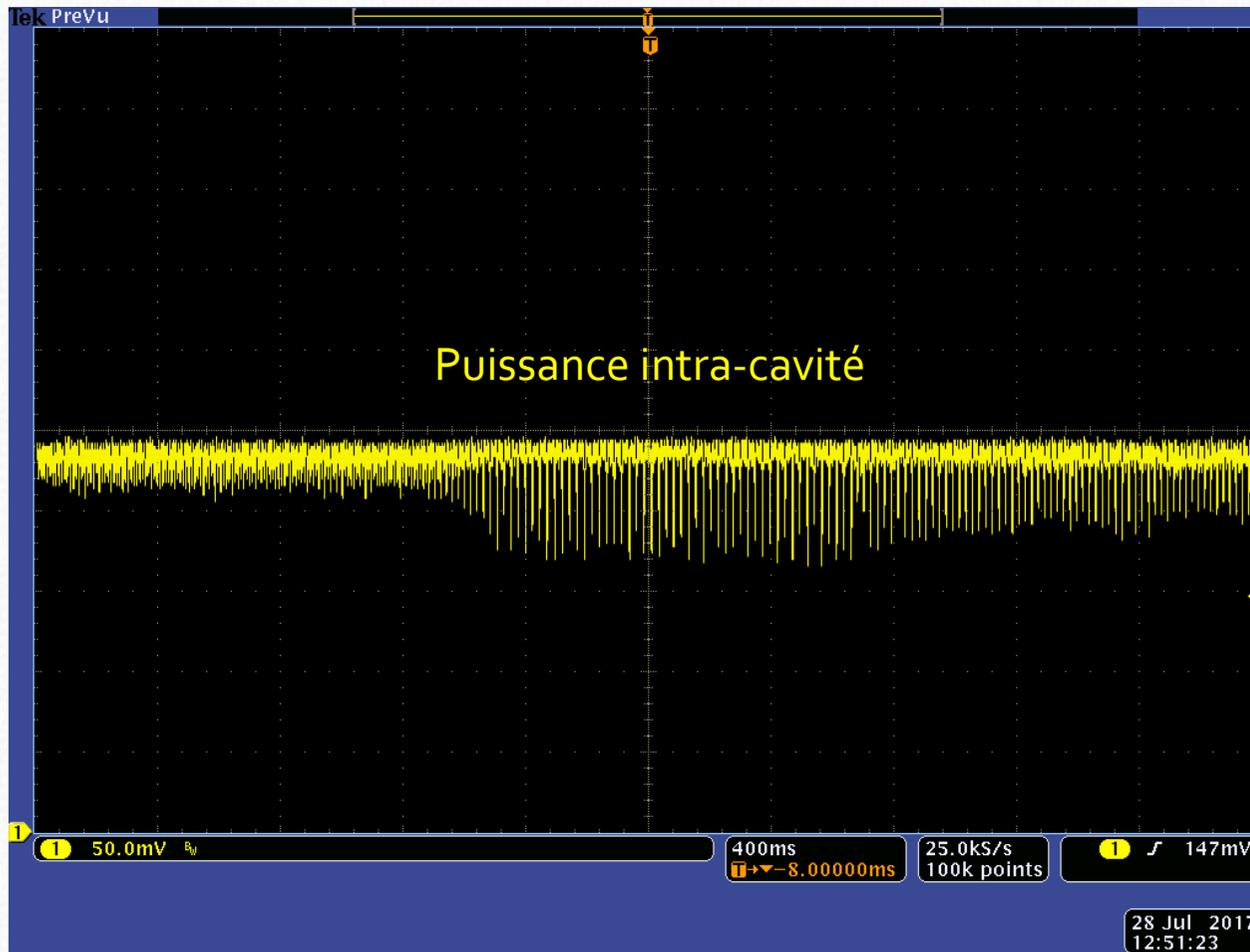
- Puissance stockée maximale ~ **390 kW**
 - Gain ~ **10 000**
 - Couplage spatial ~ **90 %**
 - MAIS réalignement nécessaire à chaque changement de puissance d'entrée
- ⇒ Limité par des effets thermiques dans les montures
- ⇒ Limité par des effets d'instabilité encore mal compris

Evolution de la taille du faisceau



- Puissance < 150 kW
 - ⇒ Les montures chauffent et les miroirs sphériques s'écartent
 - ⇒ Taille faisceau diminue
- Puissance > 150 kW
 - Taille verticale du faisceau augmente
 - Taille horizontale du faisceau diminue moins vite
 - ⇒ Rayon de courbure des miroirs augmente
 - ⇒ Effet combiné de l'échauffement des montures et des miroirs

Instabilité du mode transverse



- ⇒ Diminue la puissance stockée
- ⇒ Modes non orthogonaux ?
- ⇒ Instabilité du feedback ?
- ⇒ Désalignements ?
- ⇒ Polarisation ?

Résumé

- Le projet ThomX est dédié à l'imagerie non invasive ou médicale qui demande de forts flux de rayons X
 - ⇒ Faisceau laser de très forte puissance moyenne (100kW – 1MW)
 - ⇒ Nécessité d'utiliser une cavité Fabry-Perot optimisée
- Fort gain dans la cavité FP
 - ⇒ Laser ultra-stable
 - ⇒ Ampli forte puissance sans bruit de phase
 - ⇒ Miroirs très réfléchissants et très peu absorbants
 - ⇒ Miroirs ULE / Saphir pour gérer les effets thermiques
 - ⇒ Un couplage spatial optimisé pour la cavité chaude
- Les effets thermiques ne sont pas encore bien maîtrisés