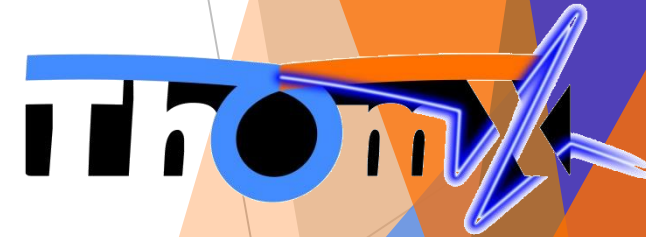


# ThomX

compact X ray source demonstrator

Posipol 2016



Hugues MONARD, Head of project

CNRS/In2p3/LAL



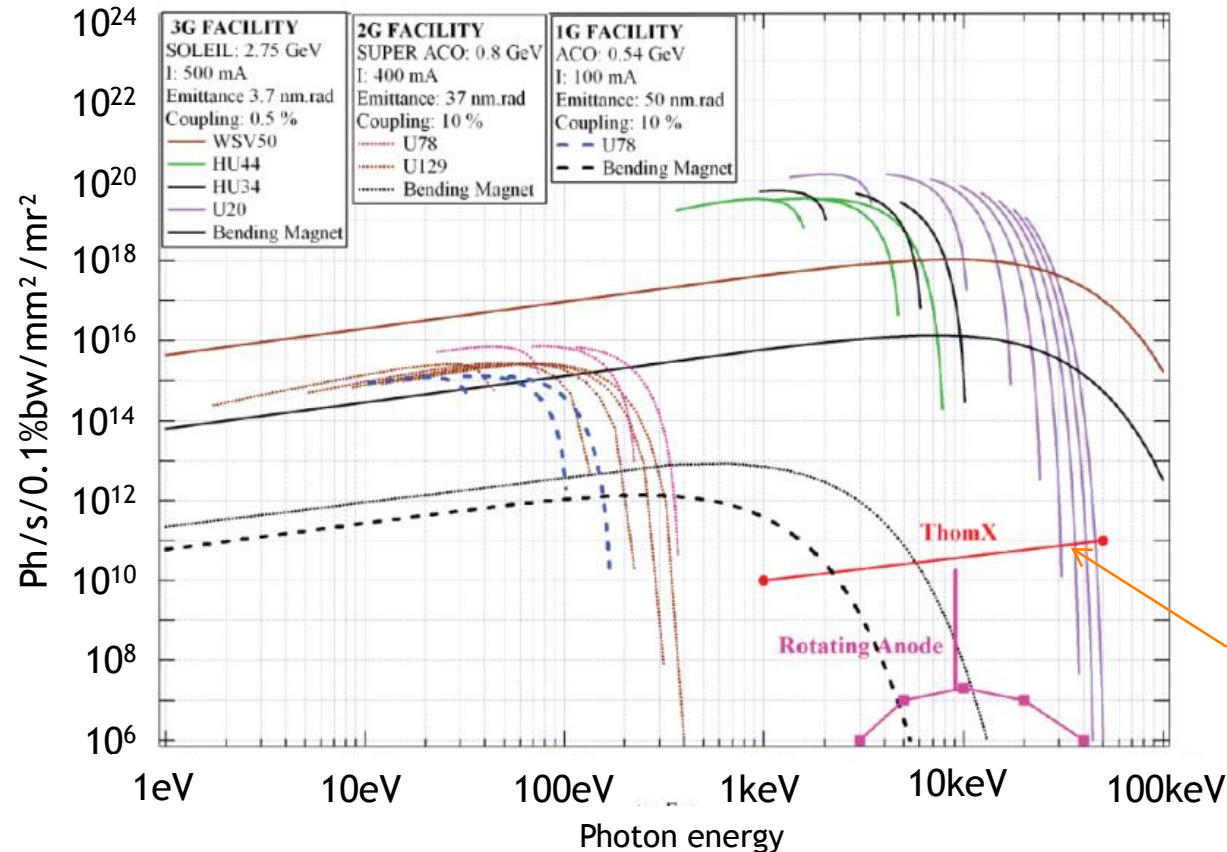
# Plan

**THOMX is a demonstrator for a X ray source using backward Compton interaction**

- ▶ 1) motivation of ThomX
- ▶ 2) Compton interaction
- ▶ 3) source layout
- ▶ 4) project status
- ▶ 5) conclusion

# 1) ThomX Motivation

- ▶ Demonstrator high flux X ray Source, « compact » affordable for museums, hospital complex,...



- ▶ Synchrotron flux > ThomX not so bad  $10^{13}$  ph/s

- ▶ Source size small ~ 50  $\mu\text{m}$
- ▶ « affordable cost » few M€
- ▶ Illumination of large target ~ 5 cm

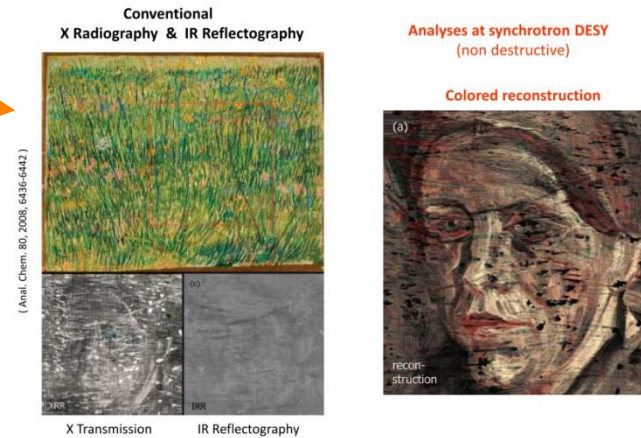
Flux ~  $10^{12} - 10^{13}$  ph/sec

Brightness ~  $10^{11}$  ph/sec/mm<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup>/0.1%bw

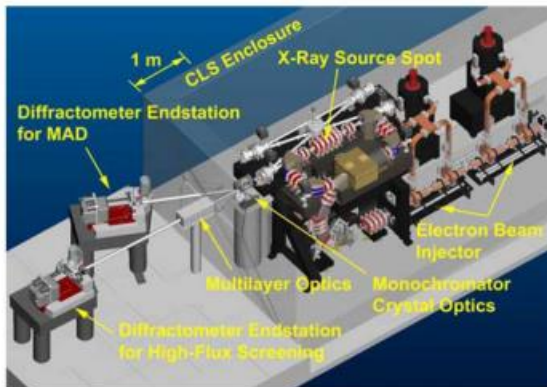
- ▶ users : cultural heritage, bio-medical, cristallography, therapy, X ray imaging

# 1) Example of use

- ▶ Analyse du patrimoine
- ▶ Imagerie bio-médical
- ▶ Science matériaux
- ▶ ...

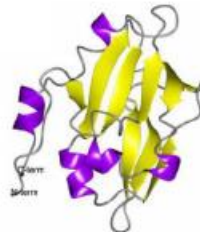


1<sup>st</sup> determination of the 3D structure of a protein  
 CS Lyncean Tech. source



15 KeV, 1.4% bw  
 $5 \cdot 10^6$  ph/sec  
 $\sigma = 120 \mu\text{m}$

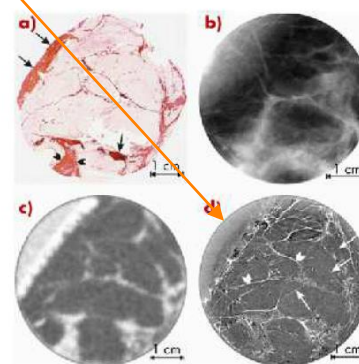
Ribbon representation



[ J. Struct. Funct. Gen. 11, 2010, 91-100 ]

**Proof of principle** (~ Rigaku rotating anode)

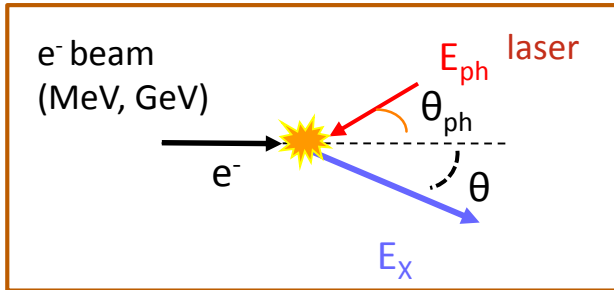
Mapping of a breast tissue sample @ Synchrotron ESRF



( Phys. Med. Biol. 52, 2007, 2197-2211 )

## 2) Compton interaction

### ▶ electron-photon Interaction

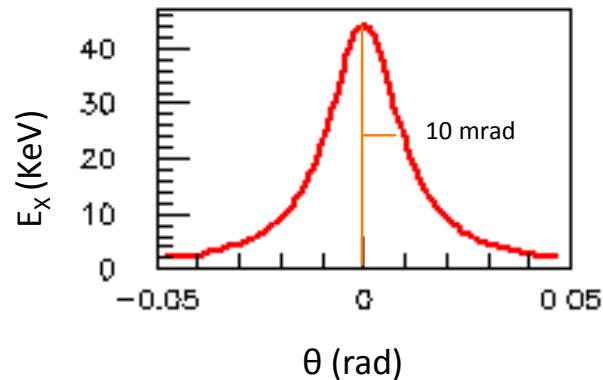


$$\text{Flux} \sim \frac{\sigma_{\text{compt}} N_e N_{ph} f_{\text{rep}}}{2\pi (\sigma_e + \sigma_\gamma)}$$

Weak cross section  $\sim 6.6 \cdot 10^{-25} \text{ cm}^2$

$E_{ph}$  : initial photon energy  
 $E_x$  : scattered photon energy

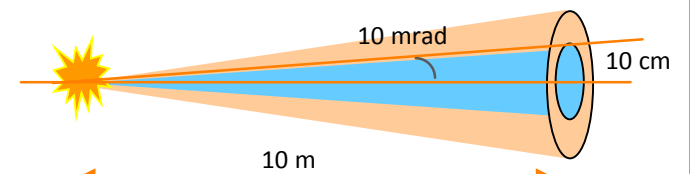
$$E_x \sim \frac{2 \gamma^2 E_{ph} [1 - \cos(\theta_{ph})]}{1 + (\gamma\theta)^2}$$



$E_e = 50 \text{ MeV}$   
 $\gamma = 100$   
 $E_{ph} = 1 \text{ eV}$   
 $\theta_{ph} \ll 1$

$E_x = 45 \text{ keV}$

RX source geometry



For high flux :

- ➔ large  $N_e$  et  $N_{ph}$  : high charge/pulse + high mean laser energy
- ➔ focusing beam both beams and keep alignment

# Layout of ThomX

▶ Electrons accelerator

Linac

$N_e$

photo-injector + acc. section

Storage ring

$f_{\text{rep}}$

▶ Interaction laser

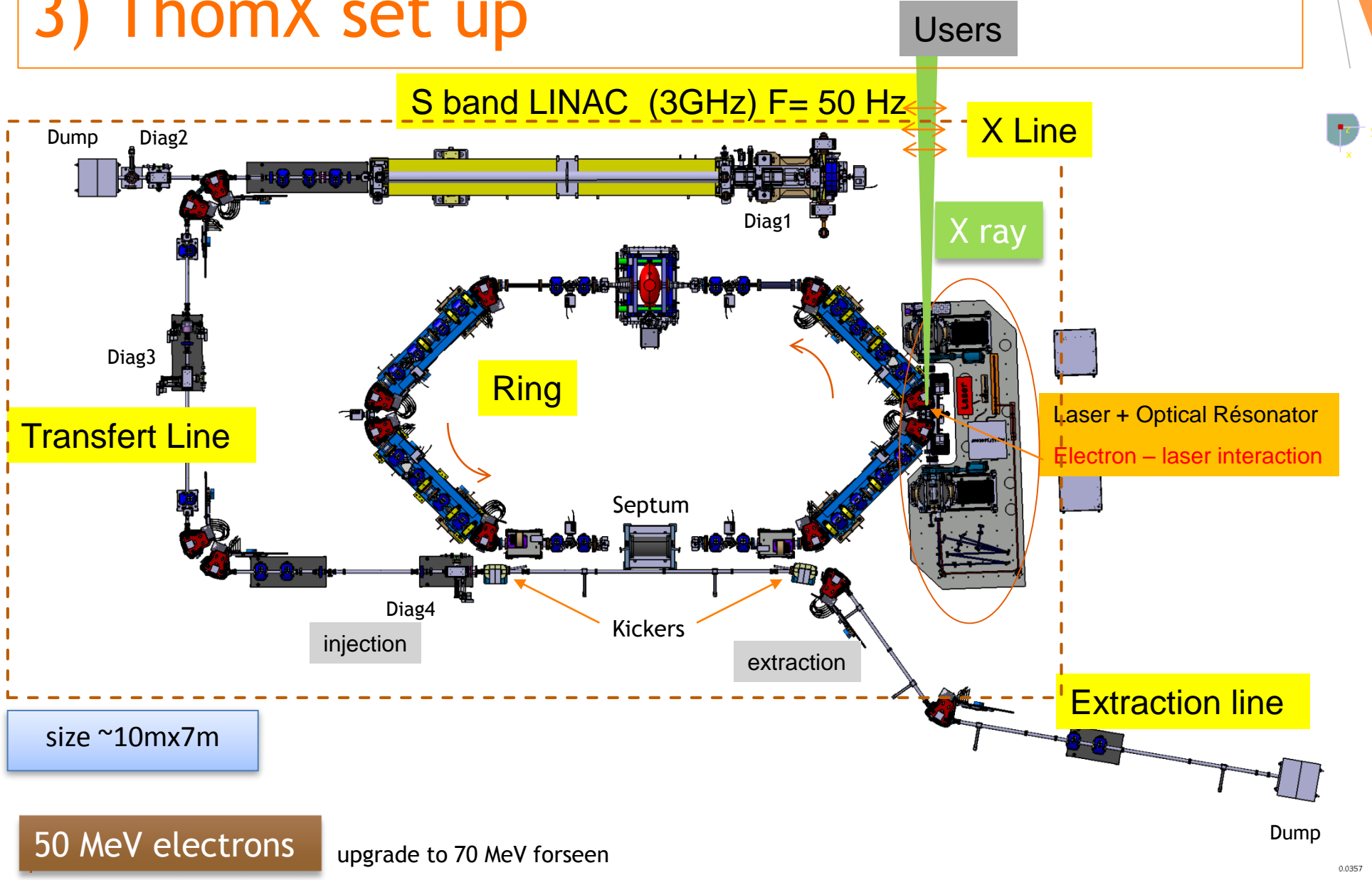
$N_{\text{ph}}$

high power laser + Fabry-Perot resonance cavity

▶ Expérimental user aera

▶ X ray transport line

# 3) ThomX set up



size ~10mx7m

50 MeV electrons

upgrade to 70 MeV foreseen

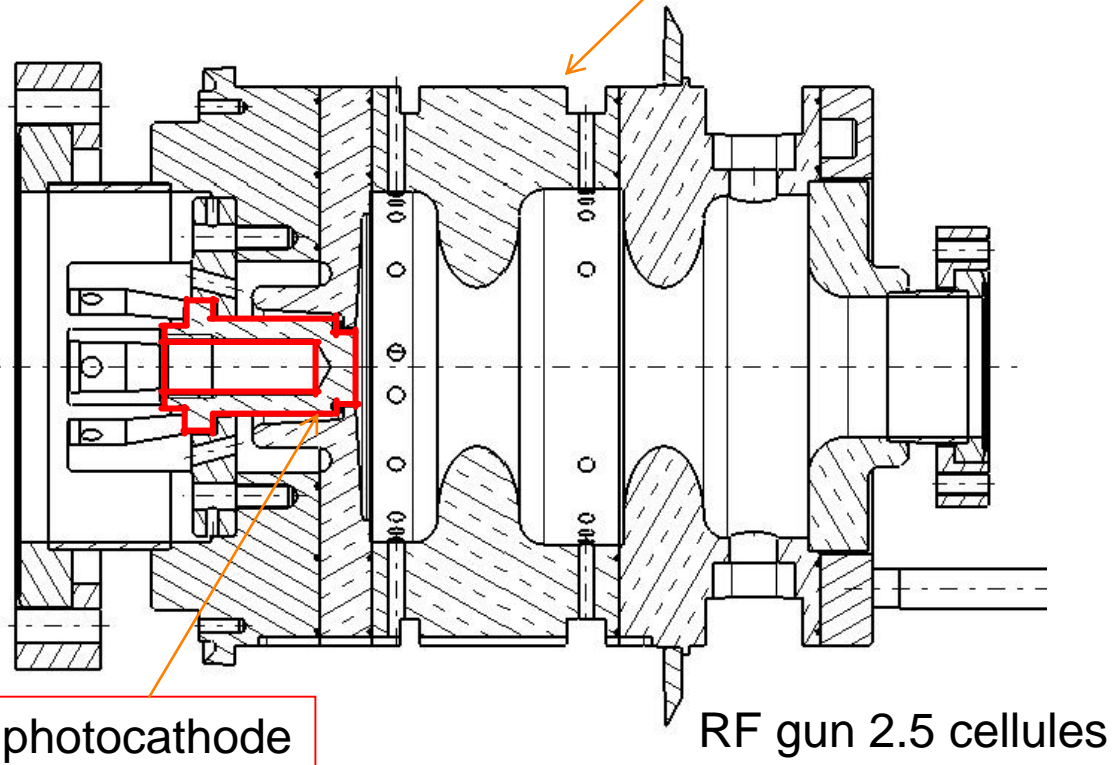


0.0357

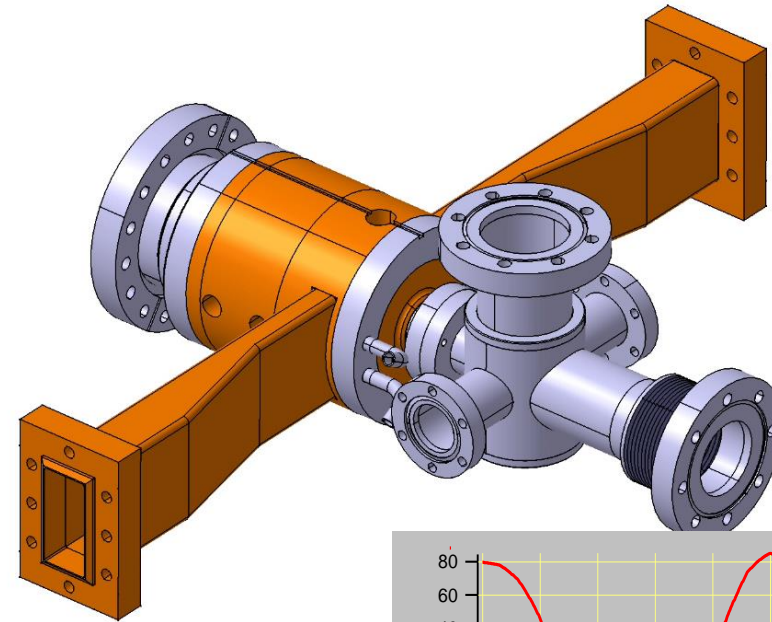
# 3.1 Linac

- photoinjecteur RF gun 3 GHz (5MeV) + acceleration section (50 MeV)
- power source : klystron

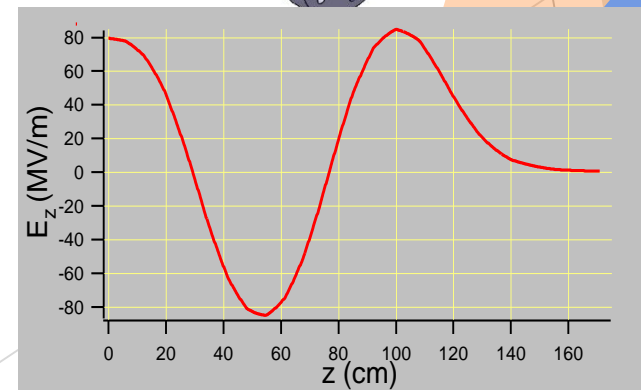
F = 2998.5 MHz



photocathode



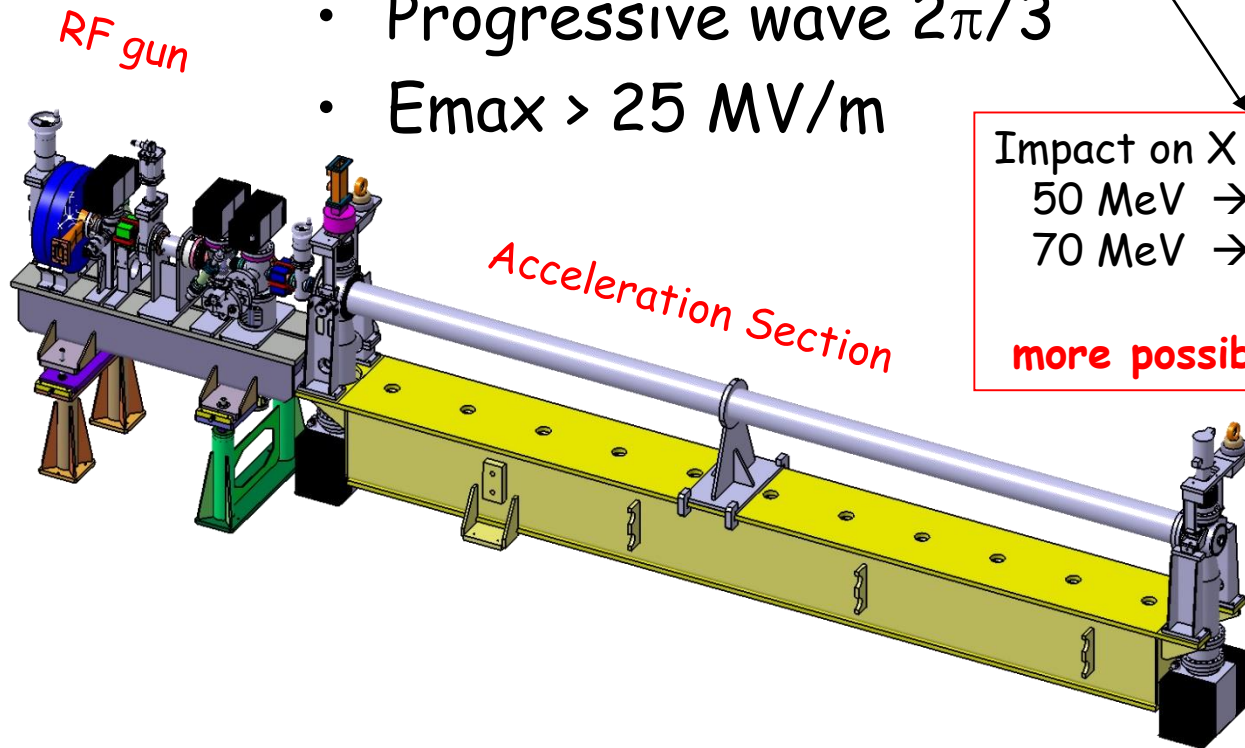
$E_z = 80$  MV/m (P = 6 MW) pour E = 5 MeV





# 3.1 Linac

- LIL type acc. section : 50 MeV
- **PMB - ALCEN : 70 MeV**
- S-Band 2998,55 MHz
- Progressive wave  $2\pi/3$
- $E_{max} > 25 \text{ MV/m}$



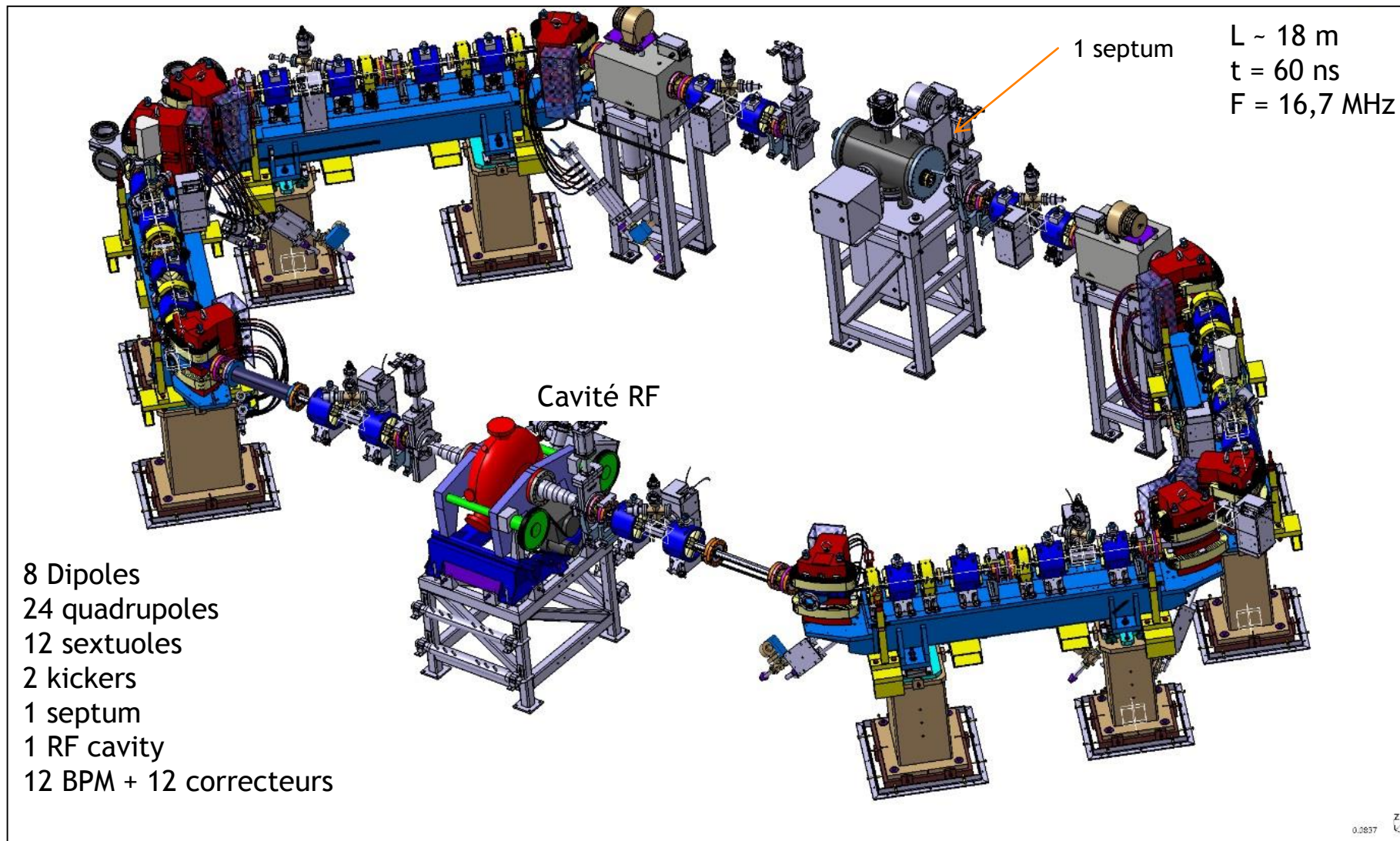
Impact on X ray energy  
50 MeV  $\rightarrow \gamma \sim 48 \text{ keV}$   
70 MeV  $\rightarrow \gamma \sim 93 \text{ keV}$

**more possible users**



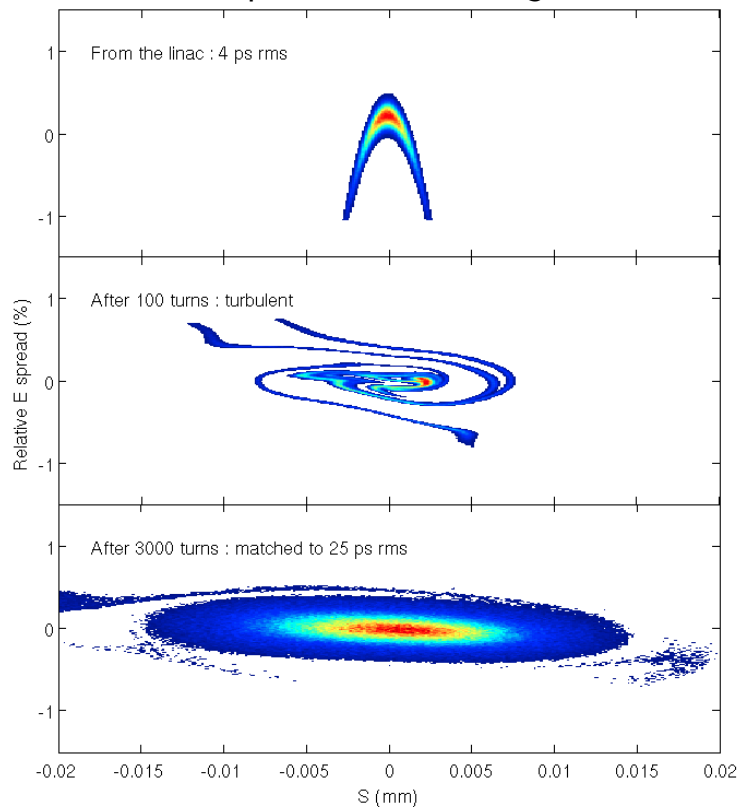
Section ACC. Type LIL

## 3.2 Ring

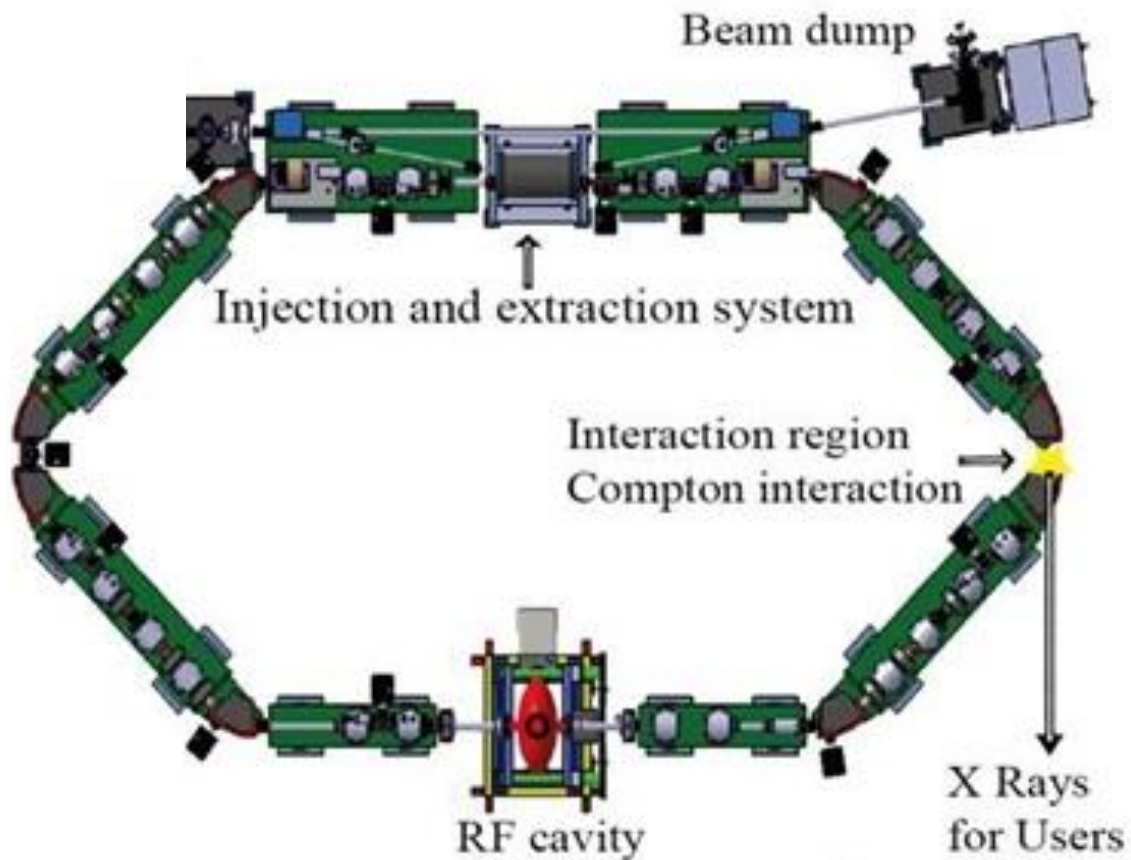


# 3.2 ring

Phase space duration/energie



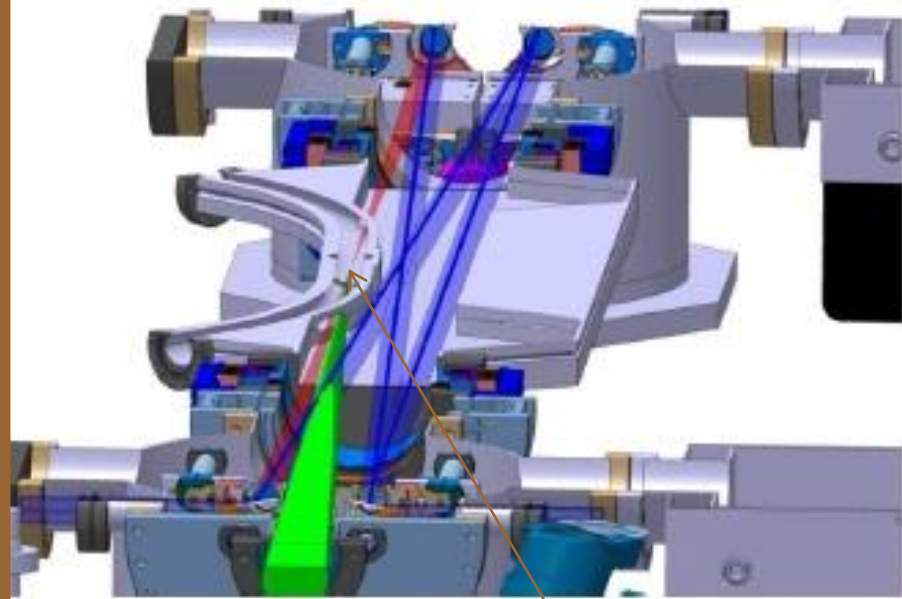
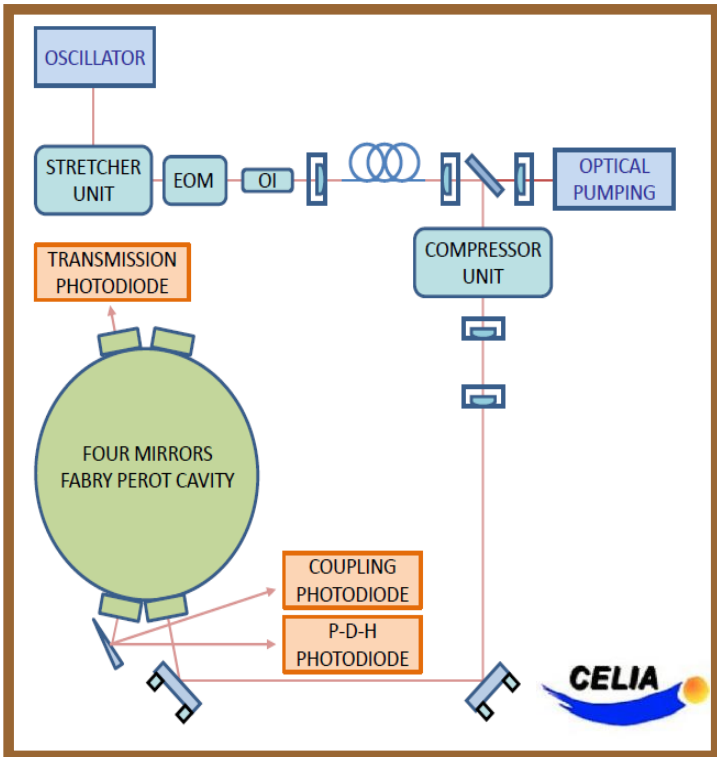
Energie Dispersion x1.5  
Pulse duration x2  
Emittance x4



Beam quality degradation  
→ Réduction of RX flux

# 3.3 interaction Laser + FP cavity

Fiber Oscillateur: ~ 10mW, 33.3MHz  
Amplificator Fiber CPA: ~150W, ~10ps pulse duration



Fabry-Perot cavity Gain ~10000  
Power at PI: > 100kW  
cavity length: ~9m → mecanical stability important

Interaction point beam size  
e- ~ 50µm laser ~ 70 µm



## 3.4 Main Parameters

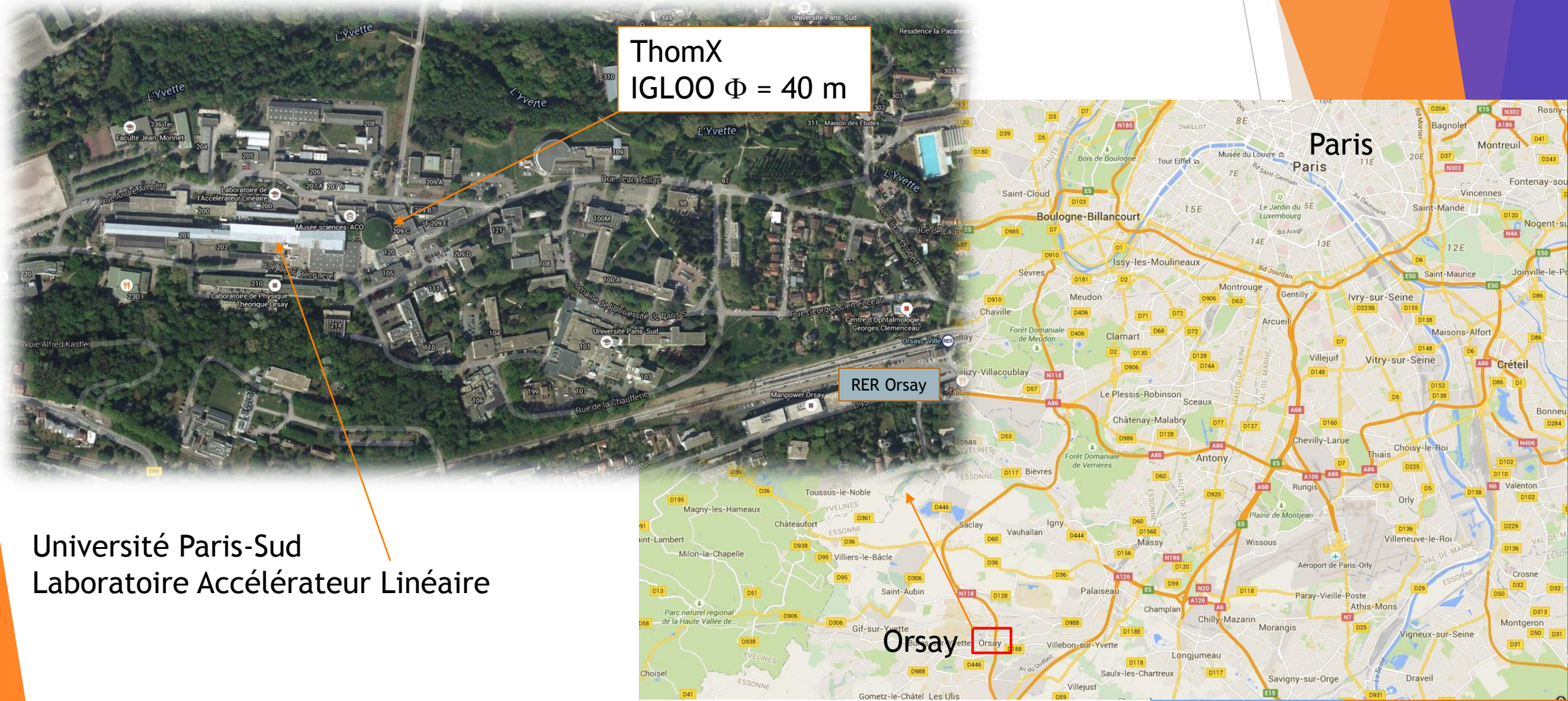
Injector		Ring	
Charge	1 nC	Energy	50 MeV (70 MeV possible)
Laser wavelength and pulse power	266 nm, 100 $\mu$ J	Circumference	16.8 m
Gun Q and Rs	14400, 49 MW/m	Crossing-Angle (full)	2 degrees
Gun accelerating gradient	100 MV/m @ 9.4 MW	$B_{x,y}$ @ IP	0.2 m
Normalized r.m.s emittance	8 $\pi$ mm mrad	Emittance x,y (without IBS and Compton)	3 $10^{-8}$ m
Energy spread	0.36%	Bunch length (@ 20 ms)	30 ps
Bunch length	3.7 ps	Beam current	17.84 mA
Laser and FP cavity		RF frequency	500 MHz
Laser wavelength	1030 nm	Transverse / longitudinal damping time	1 s / 0.5 s
Laser and FP cavity Freq	36 MHz	RF Voltage	300 kV
Laser Power	50 - 100 W	Revolution frequency	17.8 MHz
FP cavity finesse / gain	30000 / 10000	$\sigma_x$ @ IP (injection)	78 mm
FP waist	70 $\mu$ m	Tune x / y	3.4 / 1.74
Source		Momentum compaction factor $\alpha_c$	0.013
Photon energy cut off	46 keV (@50 MeV), 90 keV (@ 70 MeV)	Final Energy spread	0.6 %
Total Flux	$10^{11}$ - $10^{13}$ ph/sec		
Bandwidth	1 % - 10%		
Divergence	$1/\gamma \sim 10$ mrad without diaphragm @ 50 MeV		

## 4) Project Status

- ▶ Granted in 2010 : programme Equipex de l'ANR : **12 M€**
- ▶ SESAME (Région IDF) 0.5 M€ + UPS (0.2 M€)
- ▶ CPER for building rehabilitation obtained in 2015 (2,5 M€)
- ▶ 8 Partners dans le projet :

Nom	contribution
Thales TED (Vélizy)	Industrialisation
Synchrotron SOLEIL (Gif)	ring, magnets, RF for ring cavity, FBT,...
Institut NEEL (Grenoble)	ligne X (design, installation)
ESRF (Grenoble)	Ligne X (design, medicale use)
LAMS (Paris)	Ligne X : cultural heritage analysis
GIN(Grenoble Institut Neuroscience)	Ligne X (medical)
CELIA (Talence)	Interaction Laser
LAL (Orsay)	Management, linac, RF gun, integration, building, ...

# 4.1 ThomX on campus



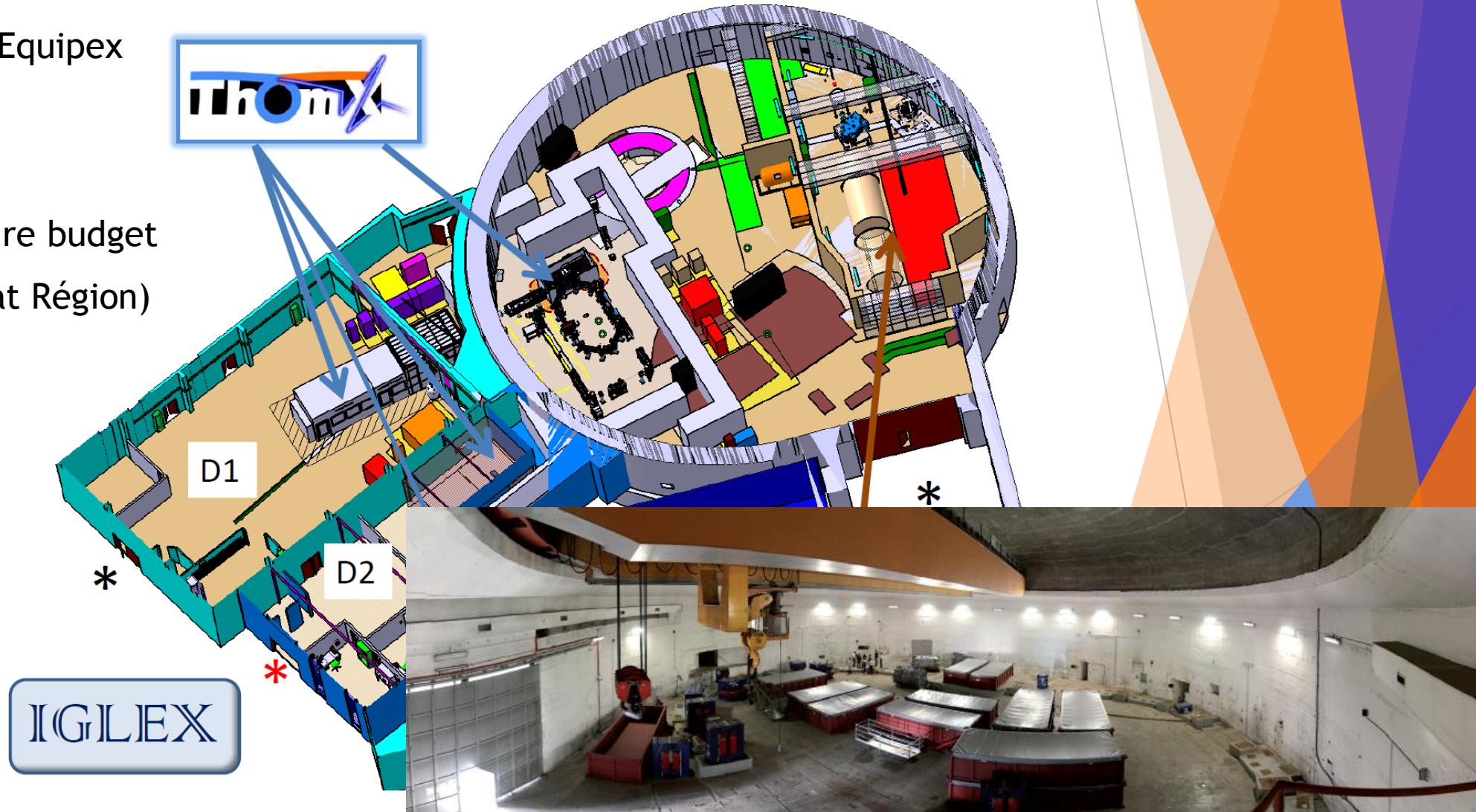
Université Paris-Sud  
Laboratoire Accélérateur Linéaire

# 4.1 ThomX installation

- ▶ IGLEX creation : 2 Equipex
- Andromède (IPN)
- ThomX (LAL)
- CPER : infrastructure budget  
(Contrat Plan Etat Région)

start : jan. 2015

end : dec. 2016



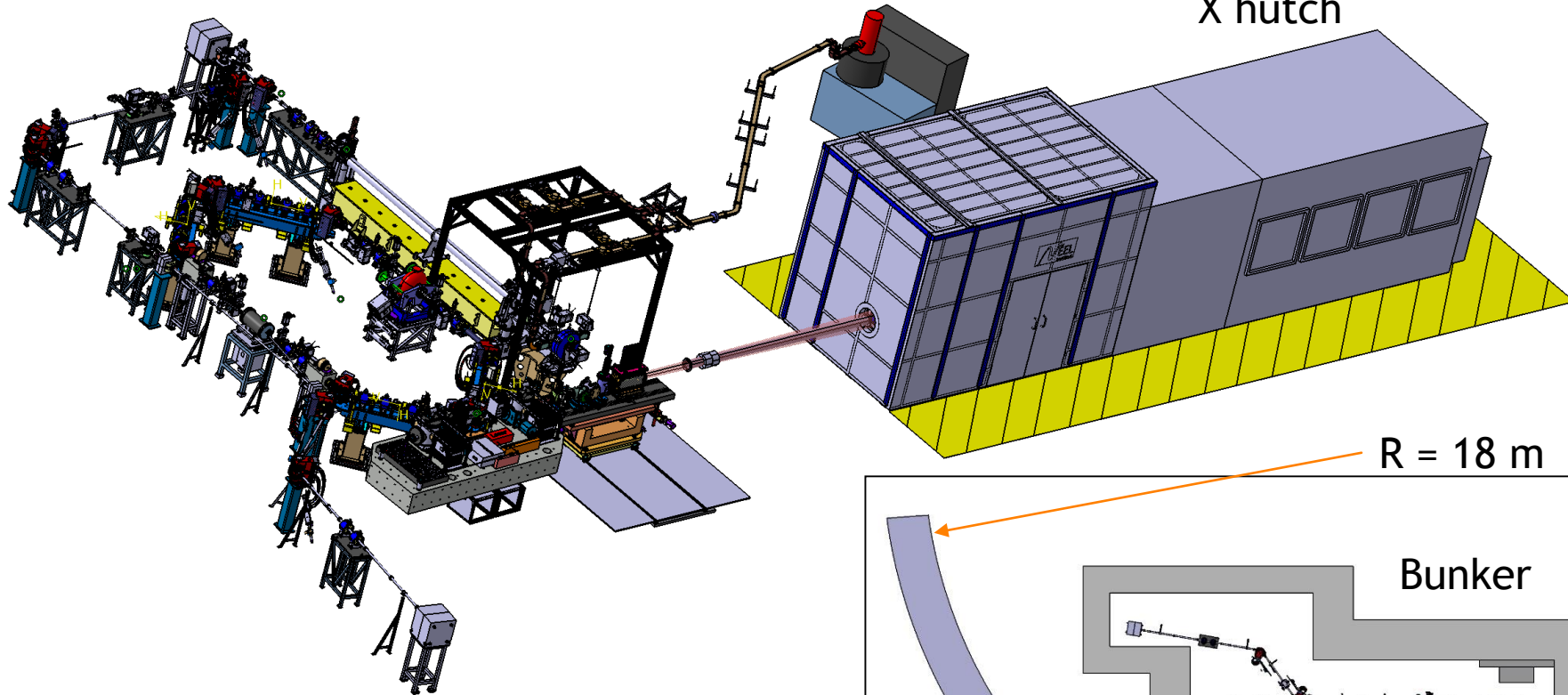


## Avancement du chantier

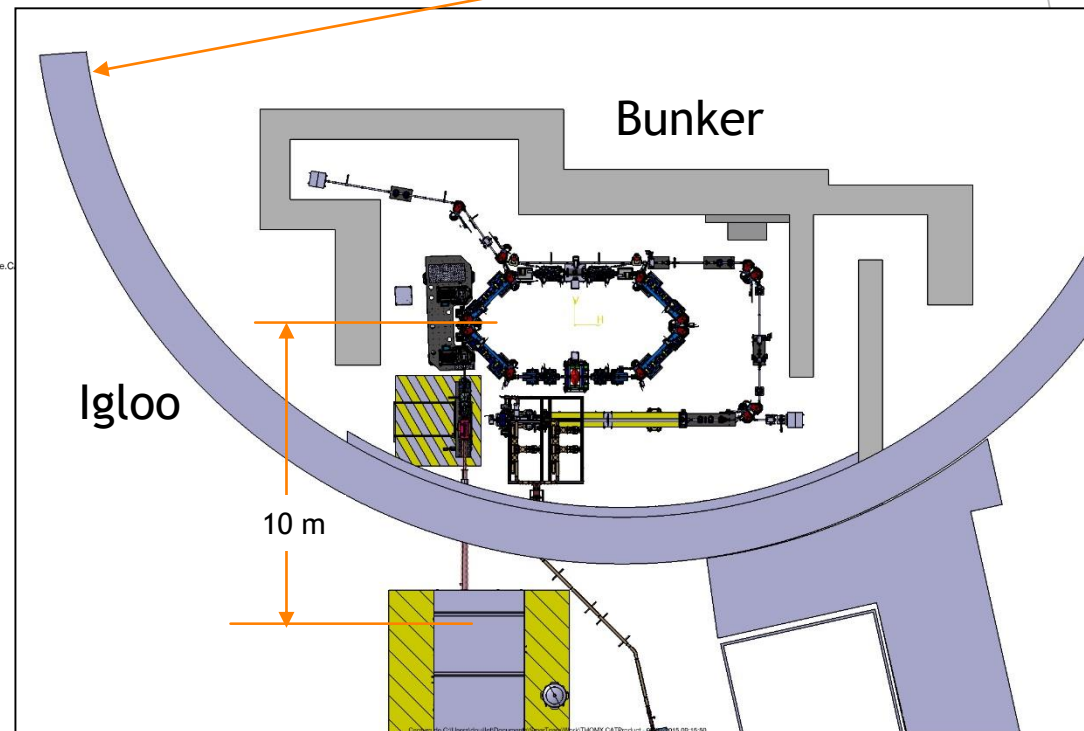


Linac RF source

X hutch



R = 18 m



Capture de C:\Users\douillet\Documents\SmartTeam\Work\ThomX Machines.C

# Magnets

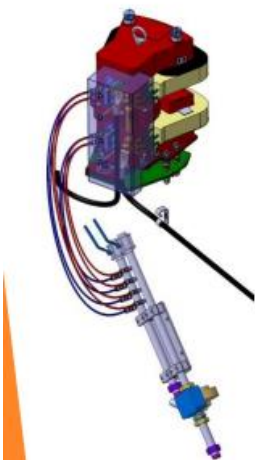
ThomX Magnets

Conception totale de la mécanique : pôles, bobinages, interface poutres, alignement



**15 Dipôles :**

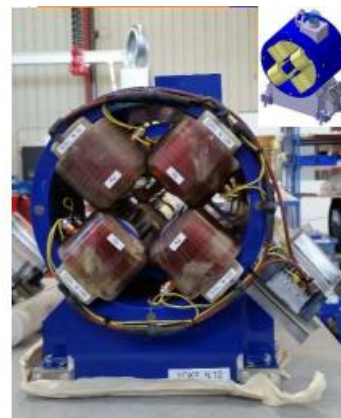
➤ 21/12 Pour validation des contrôles et réception



**13 Sextupôles**



• Mesures prévues à partir de Janvier 2016



**34 Quadrupôles**



Calculus/simulations/supervision :  
→ Soleil + LAL  
Fabrication  
→ SigmaPhi

Quad+Dipôle : measured at ALBA

Sextupôles  
Measurement at LAL

# ring : beams

Courses des réglages:

Déplacements:

X=  $\pm 20$ mm

Y=  $\pm 20$ mm

Z=  $\pm 20$ mm

Rotations:

X=  $\pm 3^\circ$

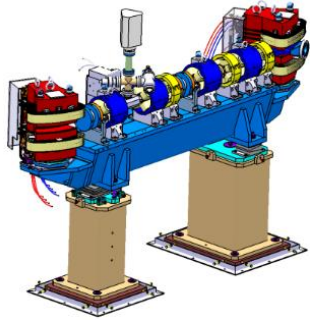
Y=  $\pm 0,38^\circ$

Z=  $\pm 1,9^\circ$

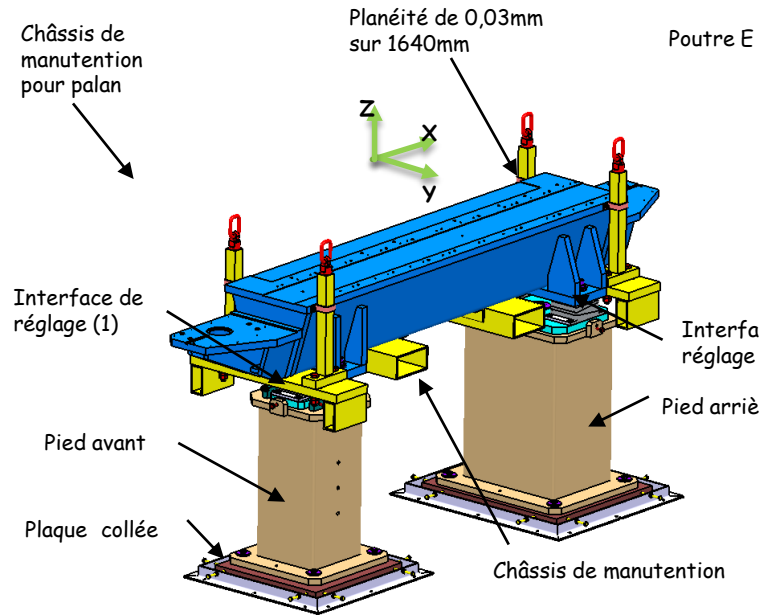
L'ensemble est soumis:

Un poids d'environ 1,5 tonnes

Une fréquence de résonance >40HZ



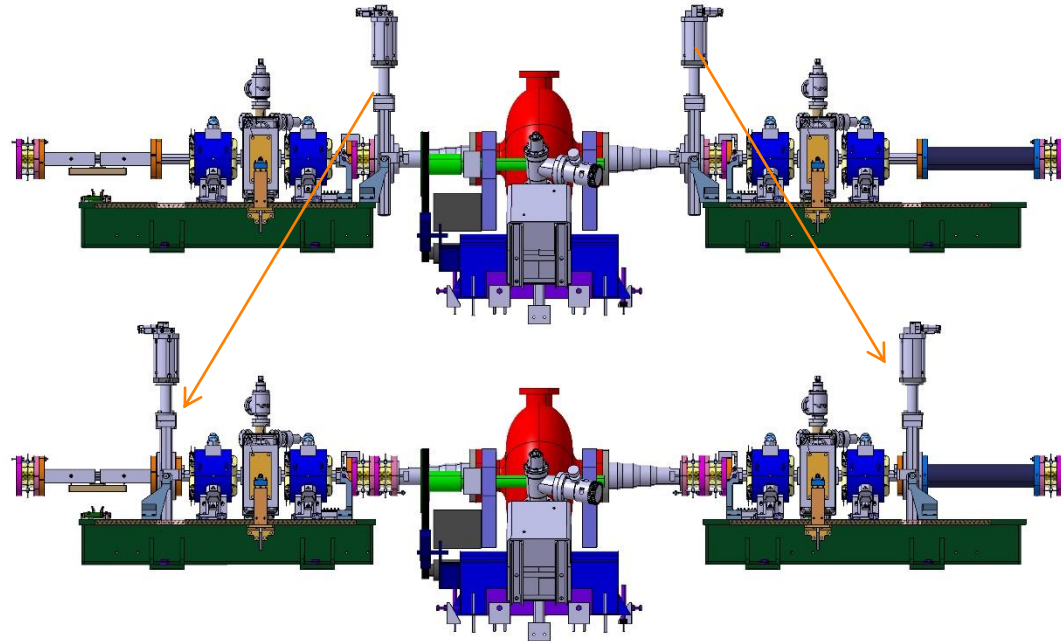
- ✓ Planéité 0,03mm sur 1,6m pour alignement mécanique à 50 $\mu$ m des chambres et 100 $\mu$ m entre poutres
- ✓ Précision des usinages, localisation des trous  $\varnothing 8H7 40\mu$ m



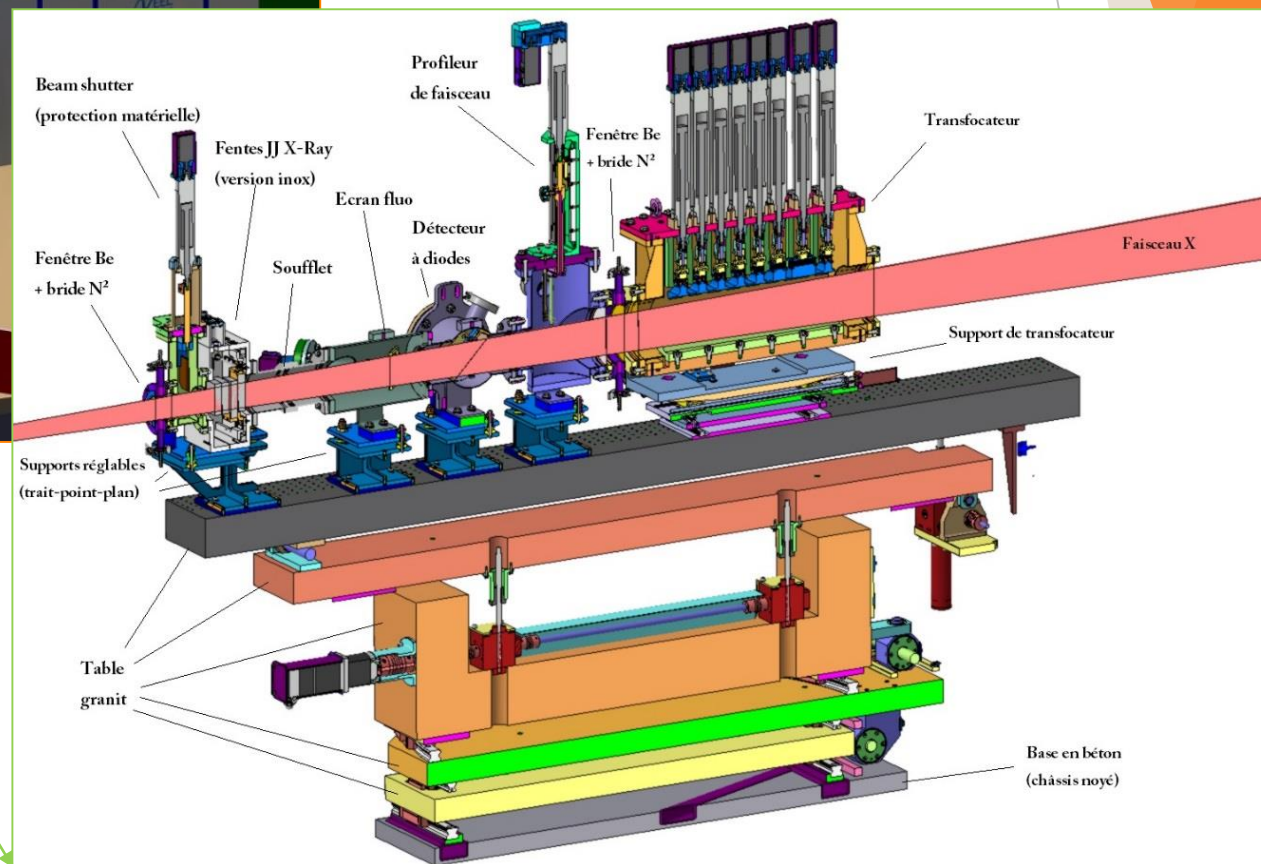
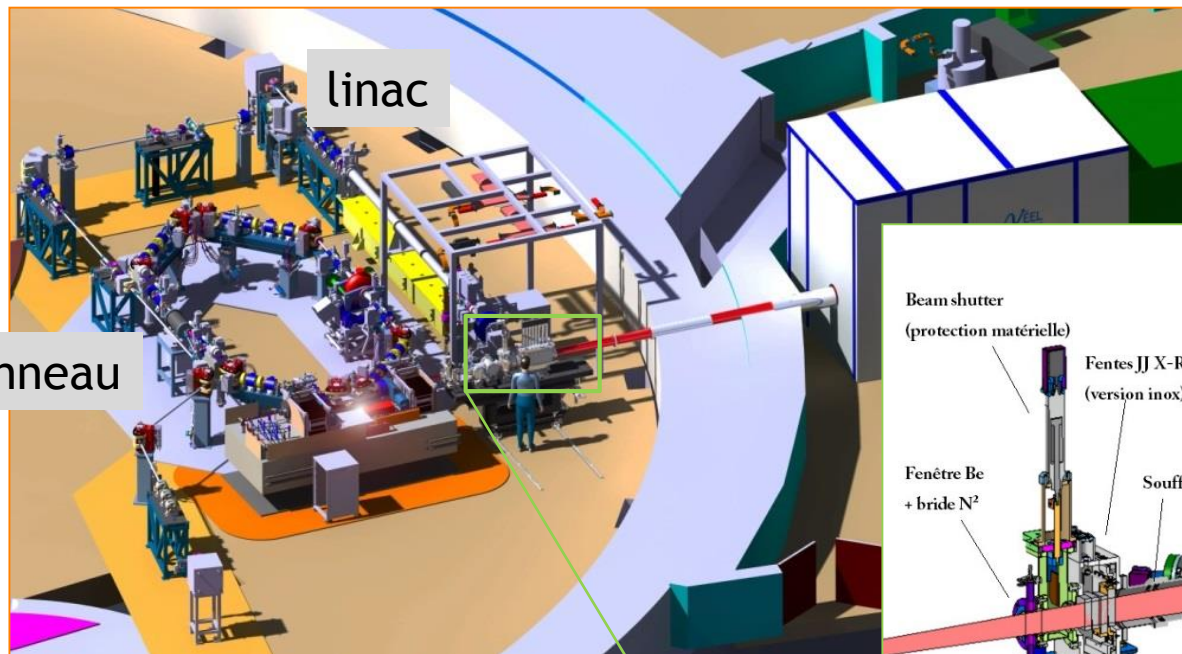
## Storage ring cavity

- ✓ Etude, Fabrication électro - érosion à fil Cu, nettoyage élimination Zinc résiduel et Installation sur la cavité des nouveaux tapers à forme évolutive

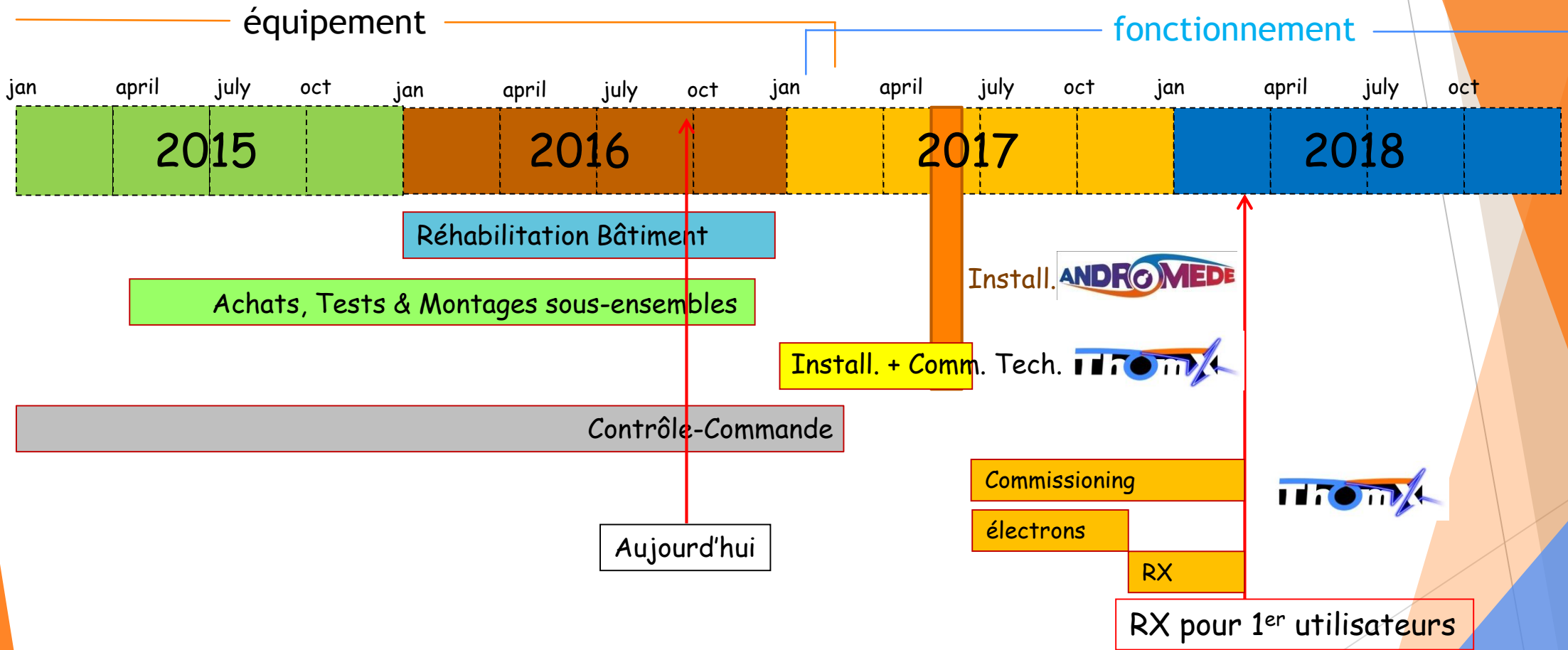
- Mise en place du circuit RF
- Déplacement de la vanne pour poids entraîné par le moteur du tuner
- Des résultats des calculs groupe Vide pour ajout d'une autre pompe
- Définition d'un nouveau châssis
- Refroidissement cavité : modèle type ESRF



# Ligne transport RX



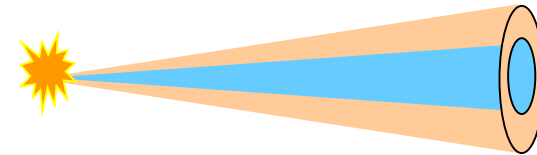
# Planning ThomX



# 5. Conclusions : ThomX singularity

- ▶ X ray Source **Compton interaction**
- ▶ Flux  $10^{13}$  ph/s
- ▶ Source Geometry : **cône**
  - energy distribution Lorentzienne : 45 keV@50 MeV
  - X ray energy adujstement with electron beam energy
  - Source size in user area ~ 10 cm
  - monochromator, X ray focussing
- ▶ Technical challenges :
  - High mean power laser : 100 W
  - Fabry-Pérot cavity finesse : 30000 - gain = 10000
  - Keep alignment at interaction point < 50  $\mu\text{m}$

X Ray source geometry





# Planches supplémentaires

# Projets source Compton RX dans le monde

Compact Compton projects (X-ray flux >  $10^{12}$  ph/sec)

Project	type	$E_x$ (KeV)	Flux	$\sigma_s$ ( $\mu\text{m}$ )	Brightness
Lyncean	SR	10-20	$10^{11}$	50	
TTX	SR	20-80	$10^{12}$	50	
LEXG	SR	33	$10^{13}$	20	
NESTOR	SR	30-500	$10^{13}$	70	
ThomX	SR	20-90	$10^{13}$	70	$\sim 10^{11}$
KEK QB	Linac	35	$10^{13}$	10	
KEK ERL	Linac	67	$10^{13}$	30	
MIT	Linac	3-30	$10^{14}$	2	$\sim 10^{15}$

- In operation
- Funded
- Project



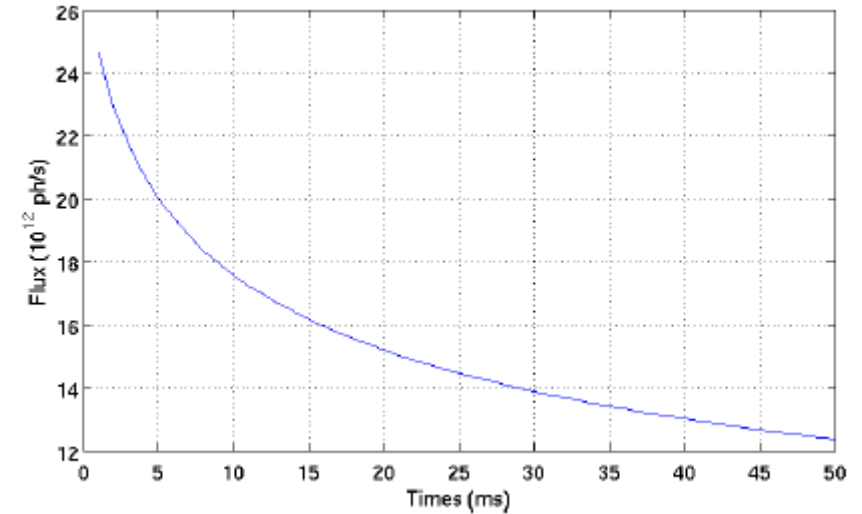
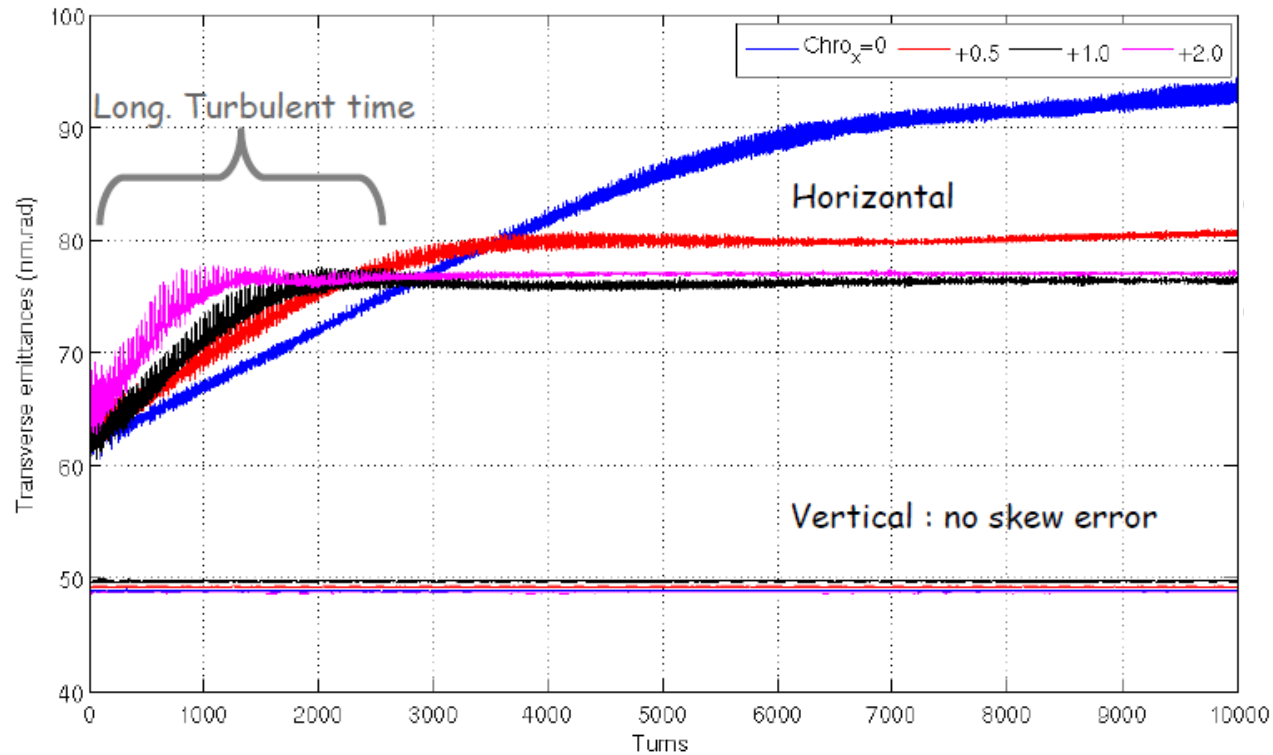
To be updated



# Dégradation émittance

Transverse emittance in the first turns versus chromaticities  
6D tracking : symplectic mapping + long. Collective effects at 50 MeV, 1 nC

10.000 turns = 0.5 ms  
Over 20 ms storage

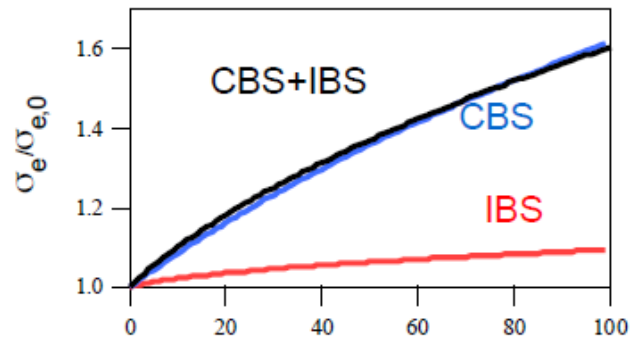


Flux /2 after 50 ms

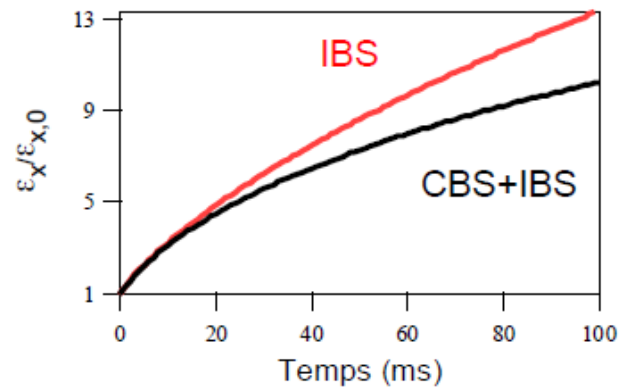
# Effet CBS+IBS

## Effet combiné du CBS et de l'IBS

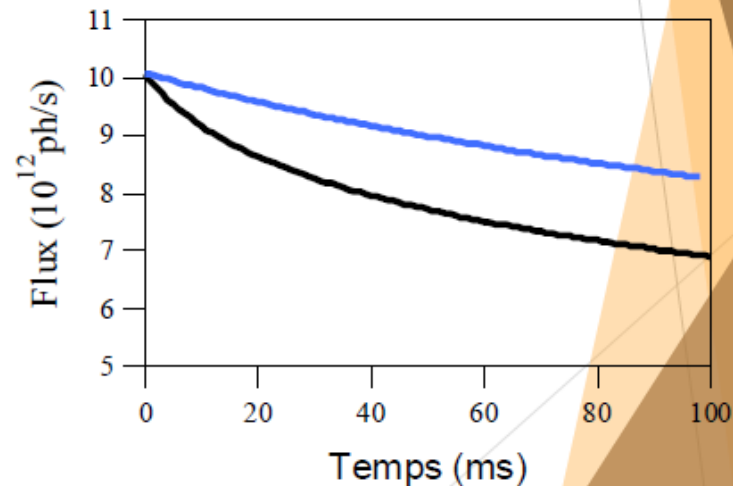
### ► Dispersion en énergie



### ► Emittance transverse



- Dégradation d'émittance due à l'IBS minimisée par le CBS
- Réduction du flux de 30 % en 50 ms



CBS : Compton Beam Scattering  
IBS : Intra Beam Scattering

# Remarques sur la source de RX

- énergie RX ajustable

$$E_x \sim E_e^2 E_{ph} \rightarrow E_x \text{ modulée en fonction de l'énergie des électrons}$$

- la polarisation peut être contrôlée

La polarisation du faisceau RX dépend de celle du laser.

- haut flux

$$\text{flux} \sim 10^{12} - 10^{14} \text{ ph / sec}$$

$$\text{Flux} \sim \frac{\sigma_{\text{compt}} N_e N_\gamma f_{\text{rep}}}{2\pi (\sigma_e^2 + \sigma_\gamma^2)} \quad (= \text{nb ph/sec})$$

**Haut flux** → bcq photons  
bcq electrons  
petites taille faisceau  
grande  $f_{\text{rep}}$

- faisceau haute qualité
  - coherence Transverse
  - Haute brillance



# Acquisition status

	OBJET	prévu	réel	CCTP	ACTEUR	Resp. technique	COMMENTAIRES ACTUALISÉS JANVIER 2015
1	RF Linac Circulateur & Atténuateurs Dephaseur	90	68,6	octobre 2013	PUMA LAL	SOLEIL	PUMA n° 44811 publiée, marché avec sté Tech-Inter
2	RF Linac Network > réseau guide d'ondes	100	84,6	octobre 2013	PUMA LAL	SOLEIL	Marché notifié avec TECH-INTER
3	RF Source (Modulateurs + 2 klystrons)	1010	1000	avril 2015	DDAI	SOLEIL	<b>candidat choisi, pas encore notifié à ce jour.</b>
4	RF Cavité (Gratuit) + Cooling rack	400	50	2015	PUMA LAL	SOLEIL	solution type ESRF
5	Aimants	600	411	2014	DDAI	SOLEIL	Marché notifié avec sté SIGMAPHI
6	Alims	300	377,5	2014	DR	SOLEIL	Marché notifié avec sté SIGMAPHI
7	Kicker & Septum	565	565	Fin 2014	DR	SOLEIL	marché négocié (avec Sigmaphi, sans mise en concurrence) en cours à la DR
8	Laser (s)	450	450	2015	DR	LAL	2 RECAS à faire, en attente CCTP
9	BPM (Beam Positionnt Monitor)	300	223,3	Fin 2013	DR	SOLEIL	Marché notifié avec sté Instrumentation technologies
10	Chambres à vide droites	70	70	fin avril 2015	PUMA LAL	LAL	Puma prévue début 2015
11	Systèmes RF avec soufflets	80	80	fin juin 2015	PUMA LAL	LAL	Puma prévue début 2015
12	Matériels vide (plusieurs lots + PUMA)	600	550	fin mars 2015	DR	LAL	Faire un AO pour les lots 1-3-4-6-7 et des PUMAS pour les autres lots : 2-5-8-9 (en le précisant dans l'AO)
13	Poutres mécano-soudées en alu	100	90	fin mars 2015	DR	LAL	
14	Table motorisée	300	128,5	2014	DR	LAL	<i>Marché notifié avec sté Symétrie</i>
15	PMB	200	200	2014	DR	LAL	<i>Marché négocié signé (Sté PMB)</i>
16	câbles	150	150	fin mars 2016	DR	LAL	<i>marché</i>
17	TCR ThomX	200	150	oct 2015	DR	LAL	<i>IRSD + IGLEX - marché</i>
	<b>Rescoff 2015 TOTAL CDES A ENGAGER</b>	<b>5515</b>	<b>4648,3</b>				

