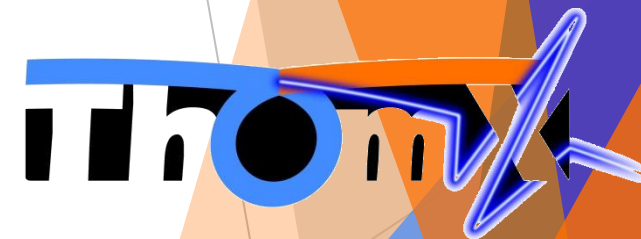


# ThomX : démonstrateur d'une source Compton compacte de rayons X

SFP Strasbourg, aout 2015



Hugues MONARD, Chef de projet

CNRS/In2p3/LAL



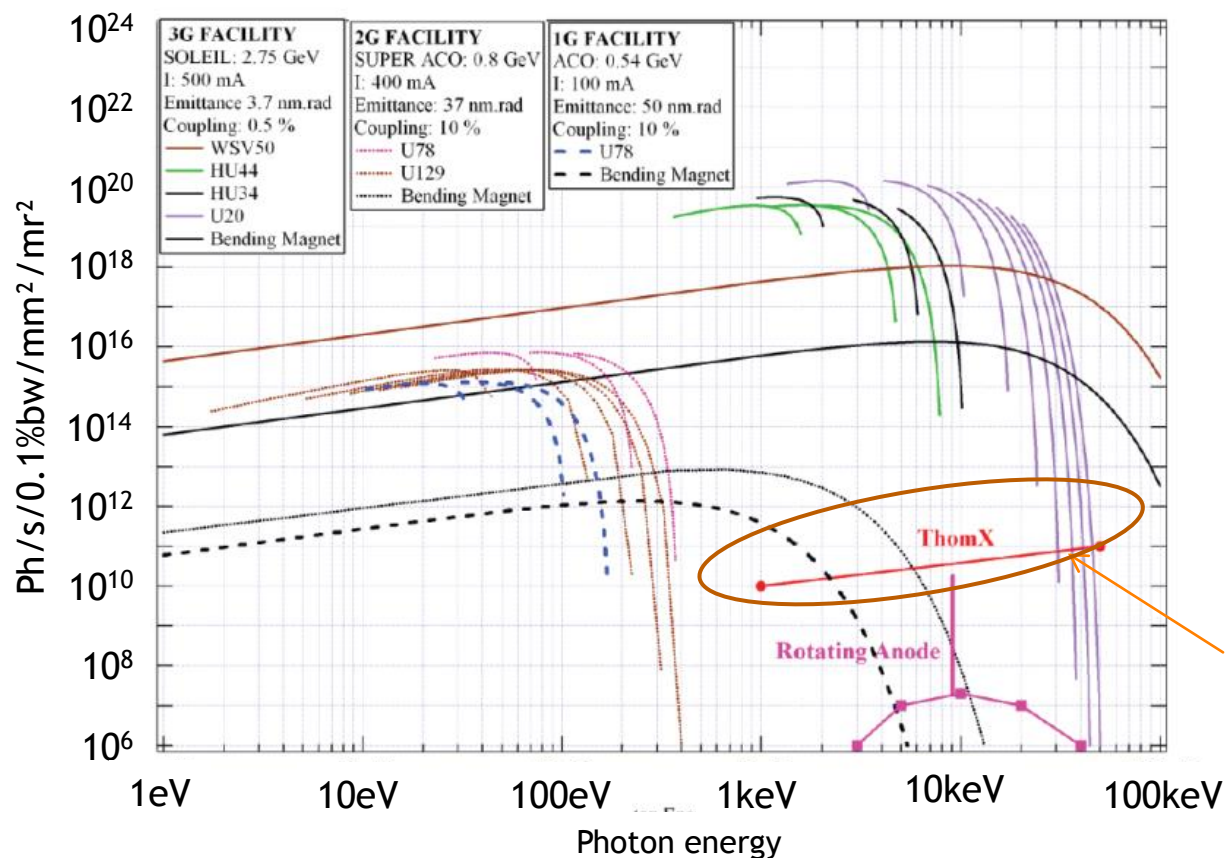
# Plan

**THOMX est le démonstrateur d'une source de RX basée sur l'interaction Compton inverse**

- ▶ 1) Pourquoi ThomX ?
- ▶ 2) Effet rétrodiffusion Compton
- ▶ 3) Architecture de la source
- ▶ 4) Status du projet
- ▶ 5) conclusion

# 1) Motivations pour ThomX

- ▶ Démonstrateur Source de RX à haut flux, « compacte » abordable pour un laboratoire ou un musée



- ▶ Flux inférieur à celui d'un Synchrotron mais reste compétitif

- ▶ Taille machine plus petite
- ▶ Coût « abordable »
- ▶ Faisceau RX plus large :
- ▶ Échantillon analysé sans scan

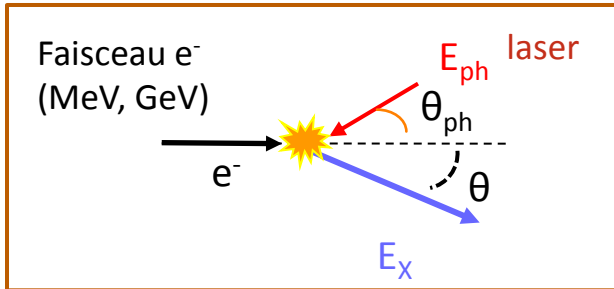
Flux  $\sim 10^{12} - 10^{13}$  ph/sec

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

- ▶ utilisations : analyse patrimoine, médical, cristallographie

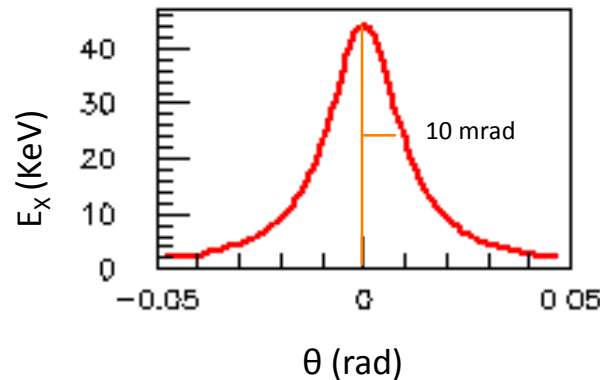
## 2) Rétrodiffusion Compton

### ► Interaction électron-photon



$E_{ph}$  : énergie photon initial  
 $E_x$  : énergie photon diffusé

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



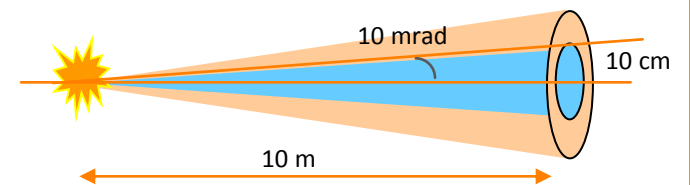
$E_e = 50$  MeV  
 $\gamma = 100$   
 $E_{ph} = 1$  eV  
 $\theta_{ph} =$  faible

$E_x = 45$  keV

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

Section efficace est faible  $\sim 6.6 \cdot 10^{-25} \text{ cm}^2$

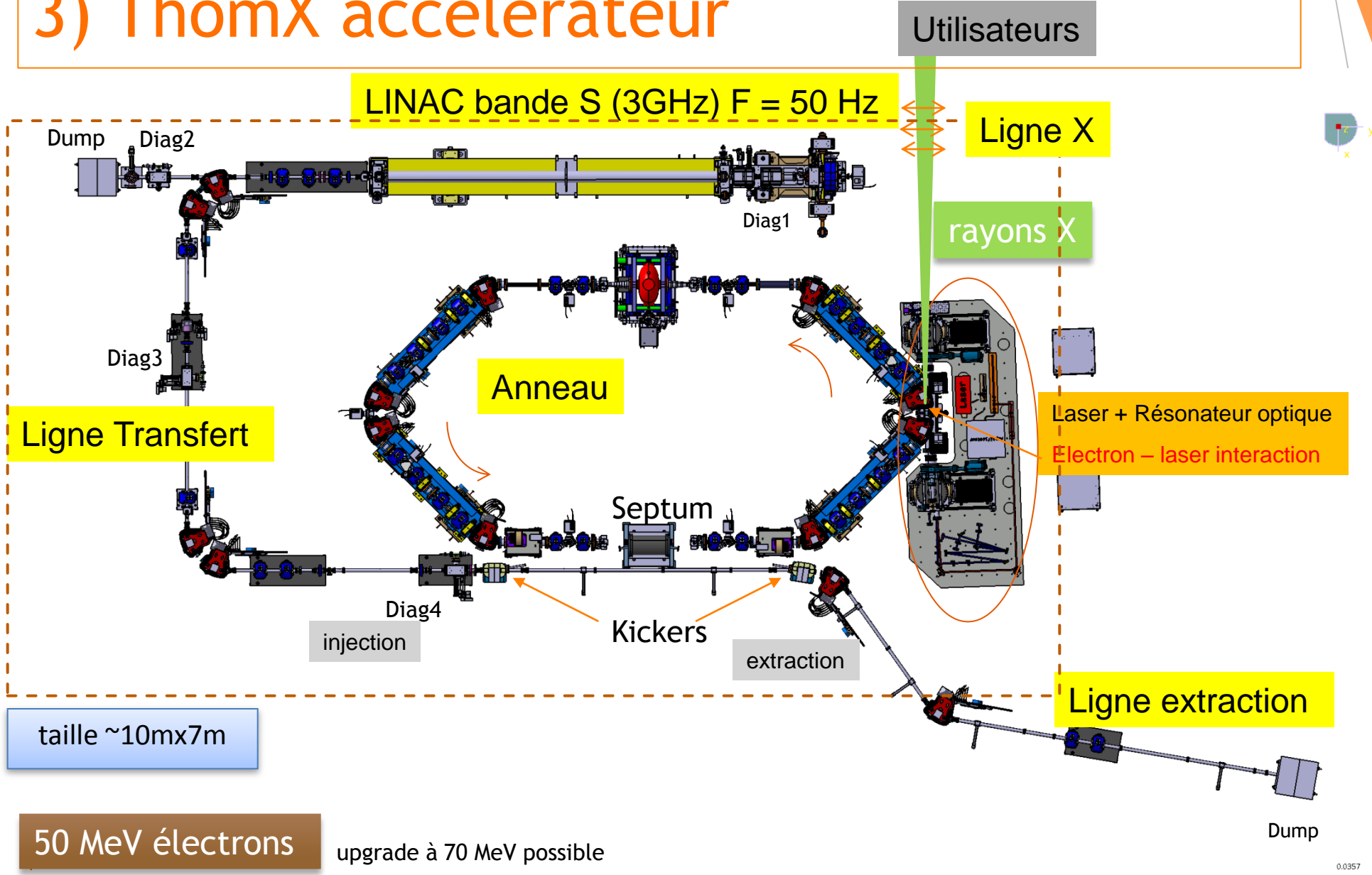
### Géométrie de la source de RX



Pour obtenir un haut flux :

- ➔ il faut maximiser  $N_e$  et  $N_{ph}$  : forte charge/pulse + forte énergie laser moyenne
- ➔ il faut aussi focaliser et aligner les deux faisceaux

# 3) ThomX accélérateur



taille ~10mx7m

50 MeV électrons

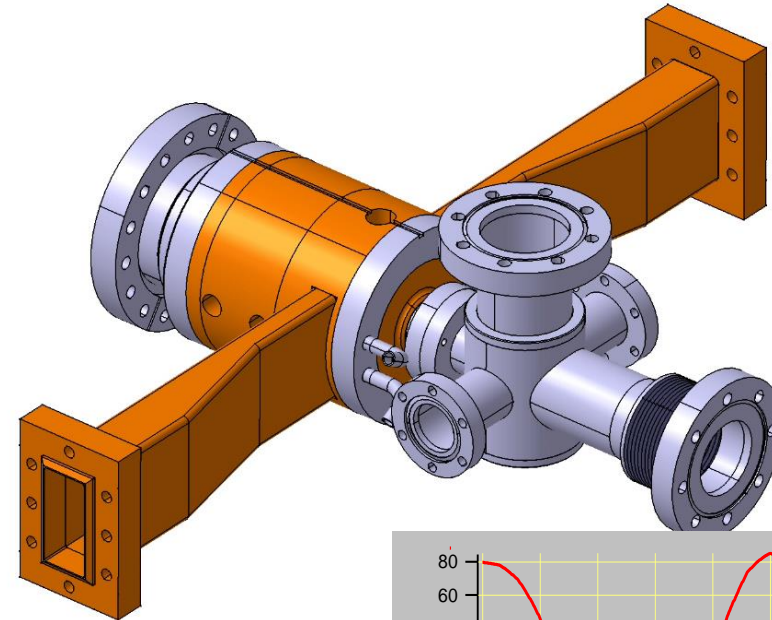
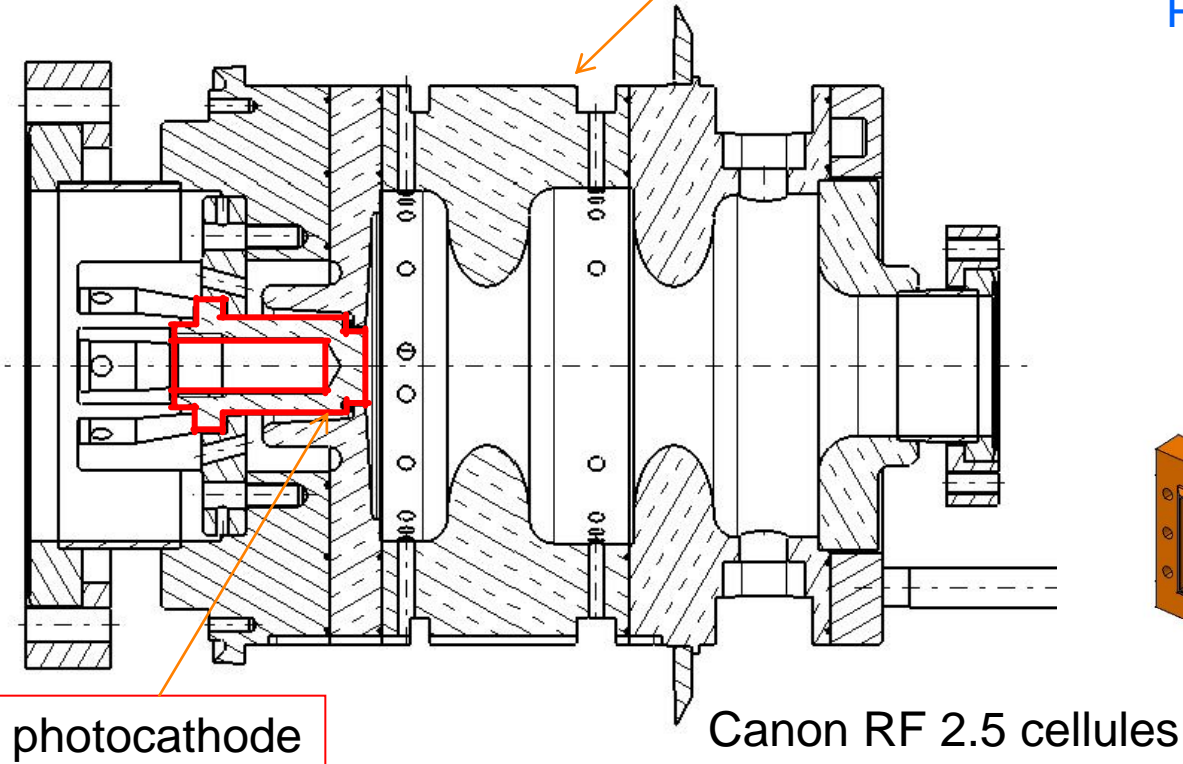
upgrade à 70 MeV possible



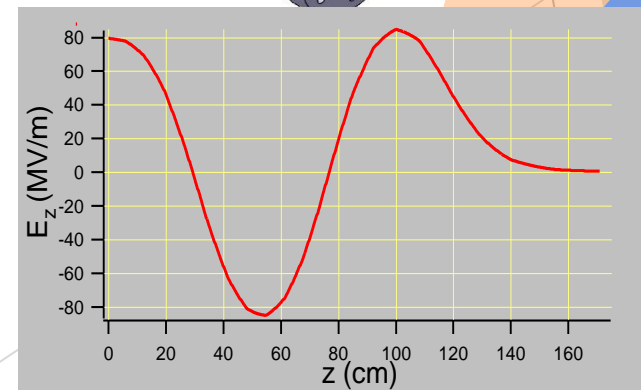
# 3.1 Linac

- Basé sur photoinjecteur canon RF 3 GHz (5MeV) + section accélératrice (50 MeV)
- alimentés par klystron  $F_{max} = 50 \text{ Hz}$  (20 ms)

$F = 2998.5 \text{ MHz}$



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





# 3.1 Linac

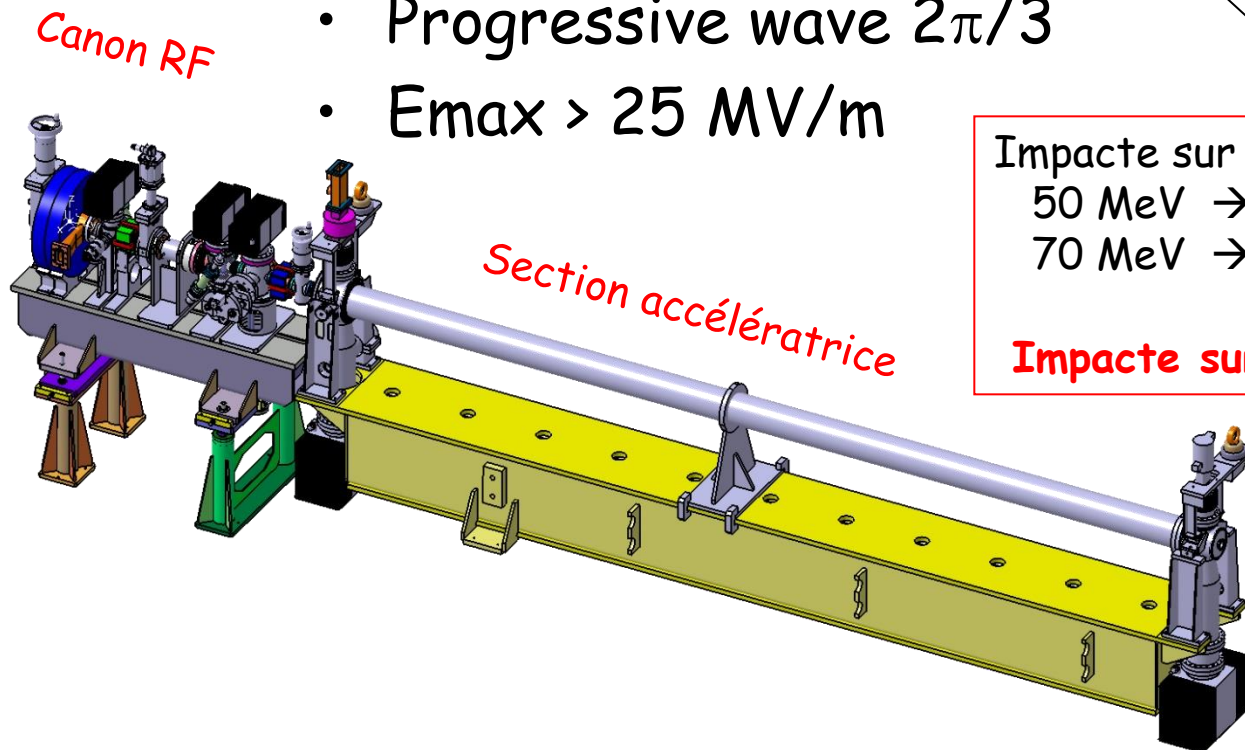
- Section type LIL : 50 MeV
- **PMB - ALCEN** : 70 MeV
- S-Band 2998,55 MHz
- Progressive wave  $2\pi/3$
- $E_{max} > 25 \text{ MV/m}$



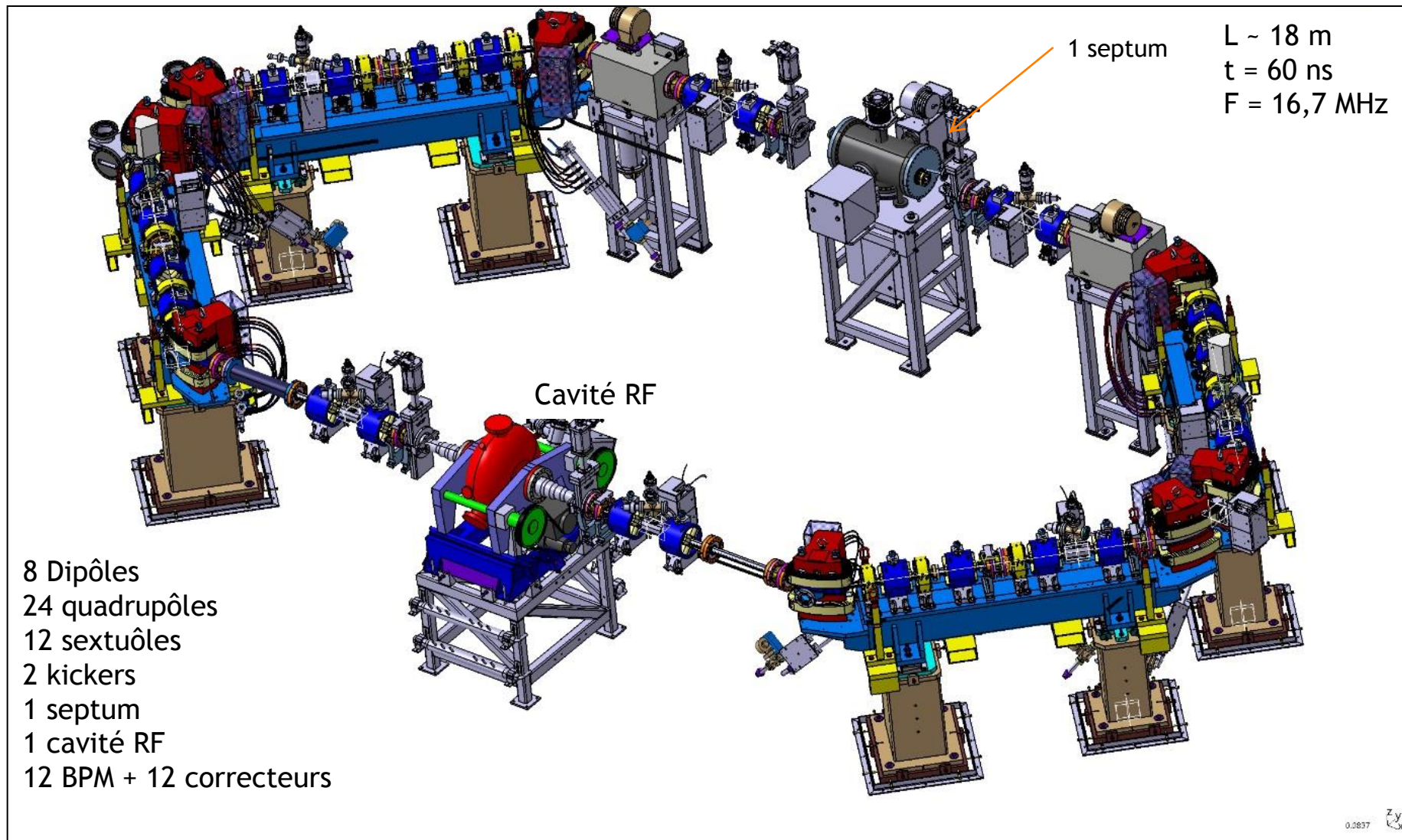
Section ACC. Type LIL

Impacte sur énergie RX  
50 MeV  $\rightarrow \gamma \sim 48 \text{ keV}$   
70 MeV  $\rightarrow \gamma \sim 93 \text{ keV}$

**Impacte sur utilisateurs possibles**



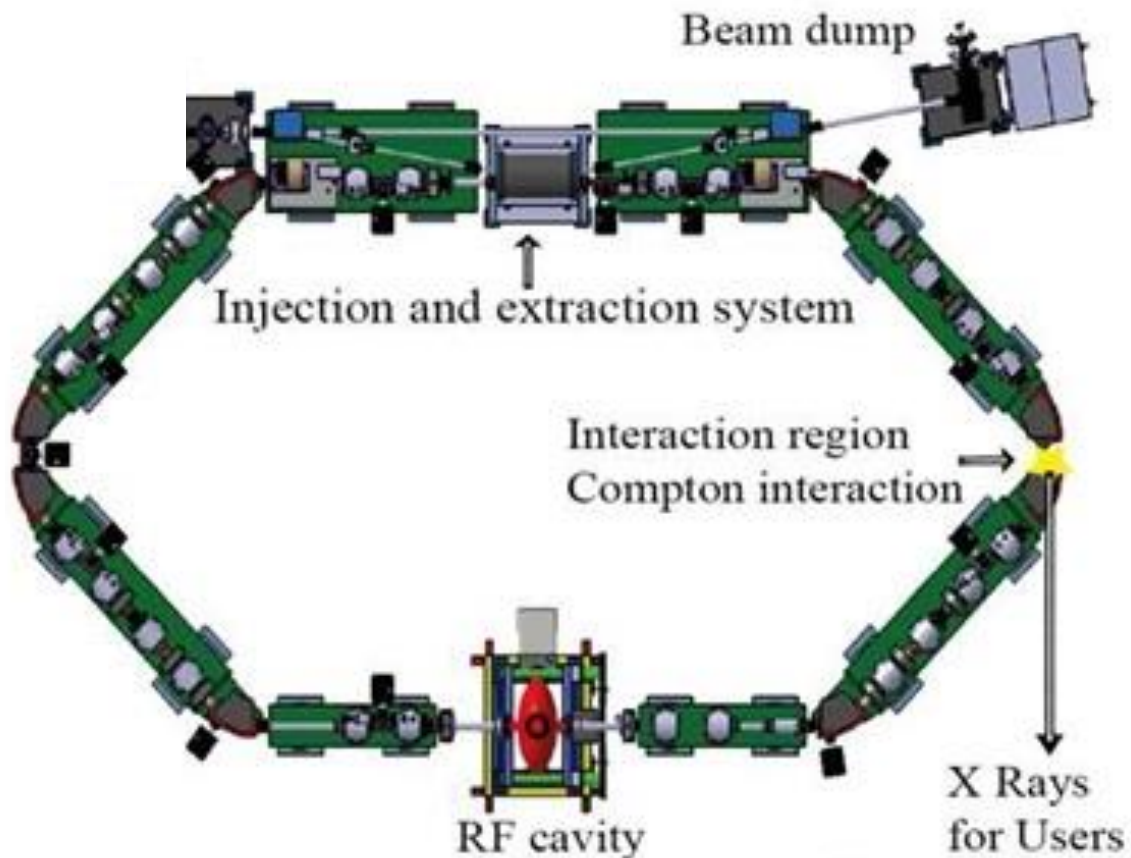
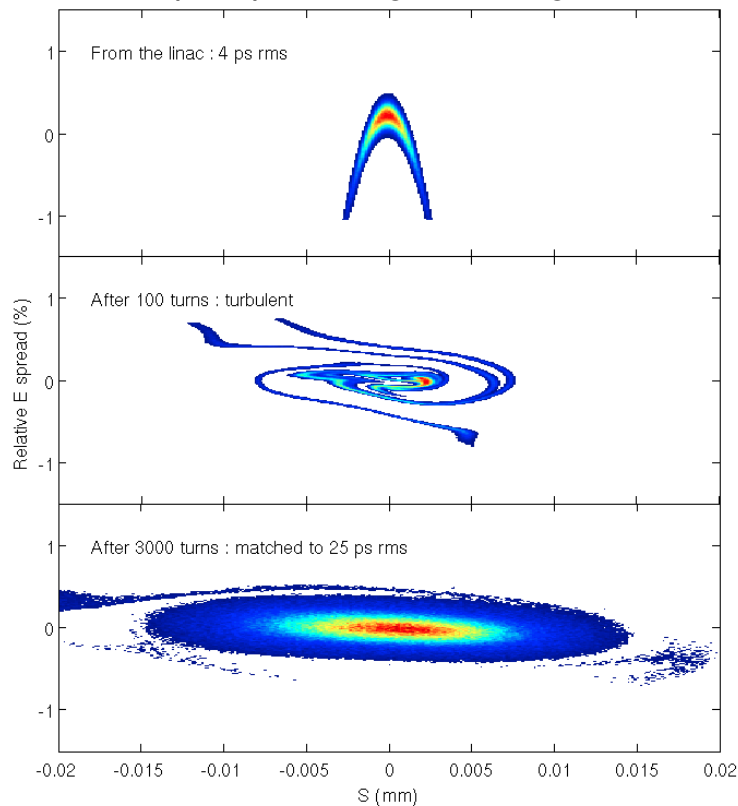
## 3.2 Anneau





# 3.2 Anneau

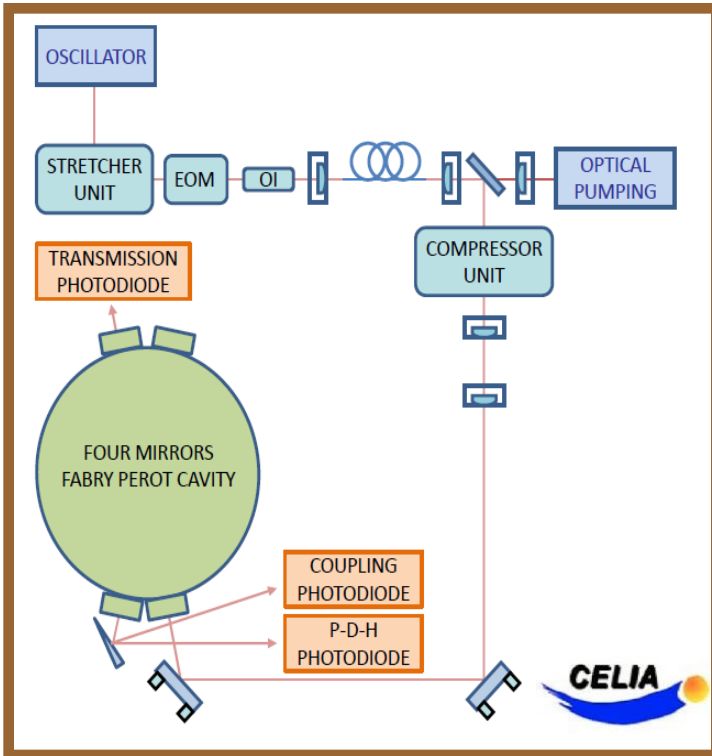
Espace phase longueur/énergie



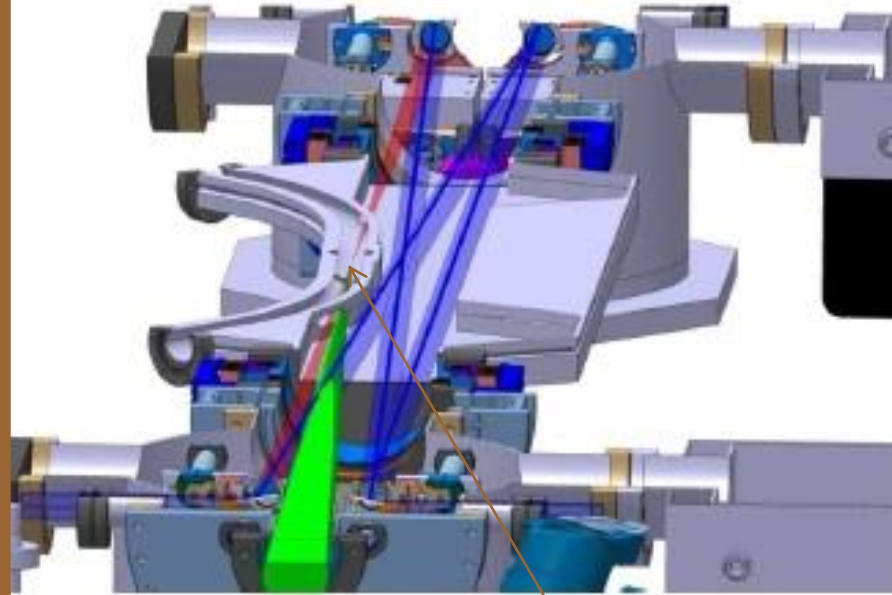
Dispersion énergie x1.5  
Durée paquet x2  
Emittance x4

dégradation qualité du faisceau  
→ Réduction du flux des RX

# 3.3 Laser interaction + Cavité FP



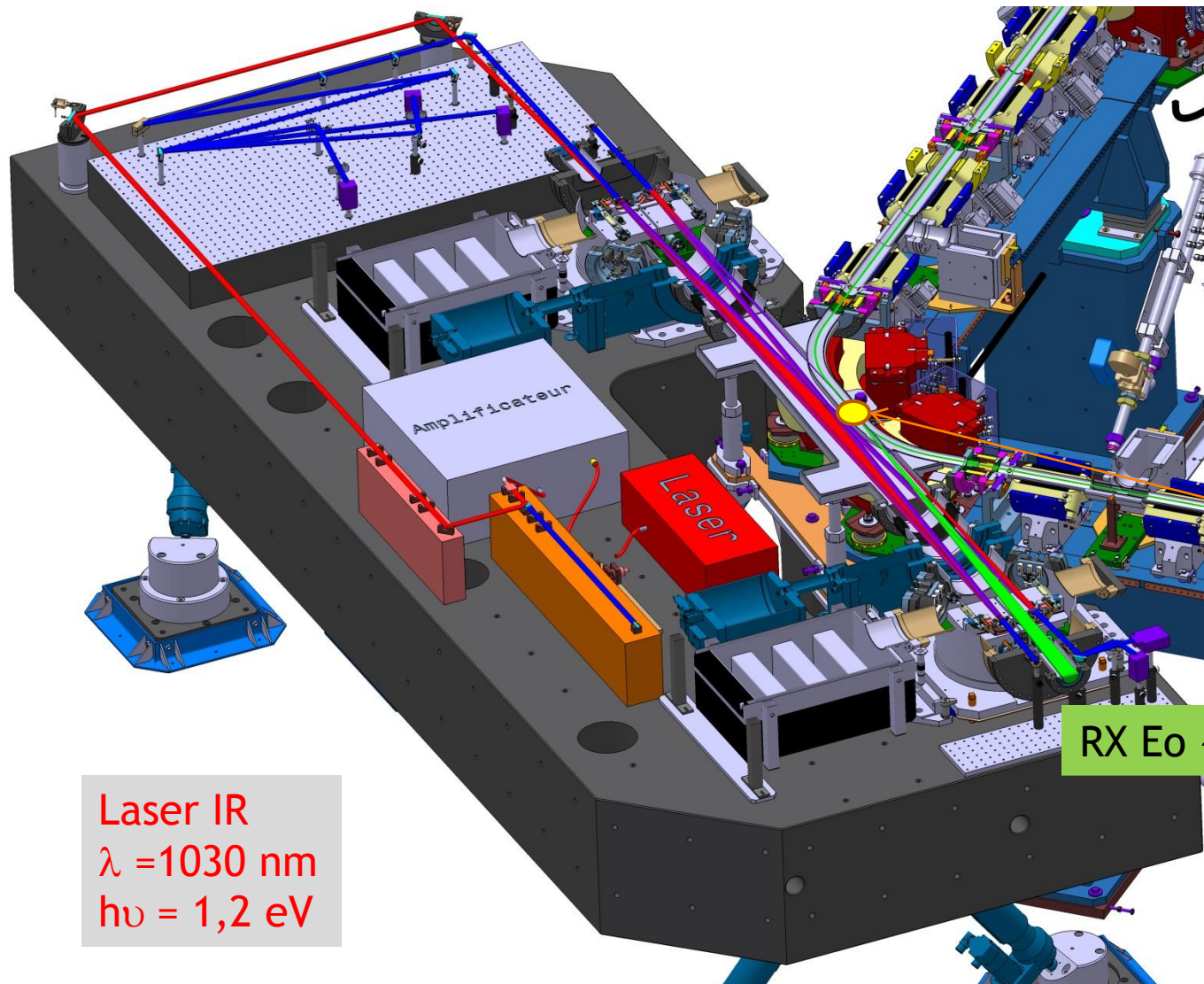
Oscillateur: ~ 10mW, 33.3MHz  
Amplificateur Fibre CPA: ~100W, ~10ps pulse duration



Cavité optique Fabry-Perot Gain ~10000  
Puissance au PI: > 100kW  
Longueur cavité: ~9m → efforts sur stabilité mécanique

Interaction point  
70-100µm beam size

## 3.3 Détails point d'interaction



Électrons 50 MeV

Point d'interaction  
 $\sigma_L \sim 40 \mu\text{m}$   
 $\sigma_e \sim 70 \mu\text{m}$

RX  $E_0 \sim 45 \text{ keV}$

Laser IR  
 $\lambda = 1030 \text{ nm}$   
 $h\nu = 1,2 \text{ eV}$

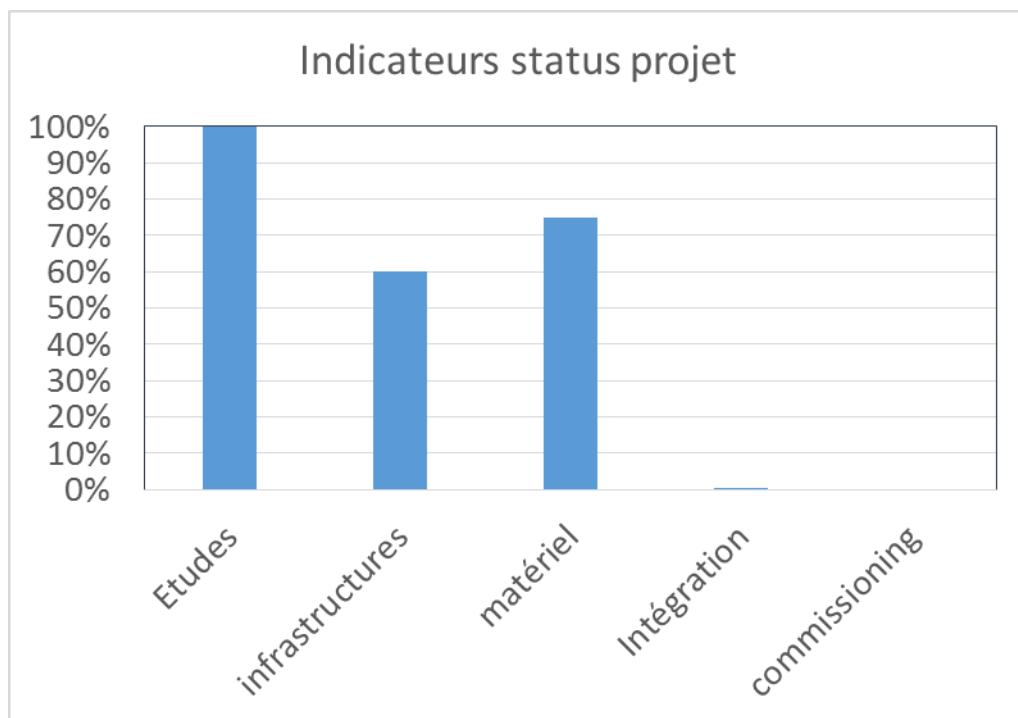


# 3.4 Parametres Principaux

Injector		Ring	
Charge	1 nC	Energy	50 MeV (70 MeV possible)
Laser wavelength and pulse power	266 nm, 100 μJ	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 π mm mrad	Emittance x,y (without IBS and Compton)	3 10 <sup>-8</sup> 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 Frep	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 μm	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 <sup>11</sup> -10 <sup>13</sup> ph/sec		
Bandwidth	1 % - 10%		
Divergence	1/γ ~ 10 mrad without diaphragm @ 50 MeV		



## 4. Status du Projet



Etudes : TDR publié fin 2014  
95% des CCTP sont finalisés

Infra : MOE choisi, DCE terminé,  
réhabilitation bâtiment = CPER  
démarrage travaux fin 2015

Matériel : 90% des marchés sont passés

Intégration sur site : démarre en octobre 2016

Commissioning : 6 à 9 mois, fin en 2017

Exploitation ligne X : 2017- 2018-2019

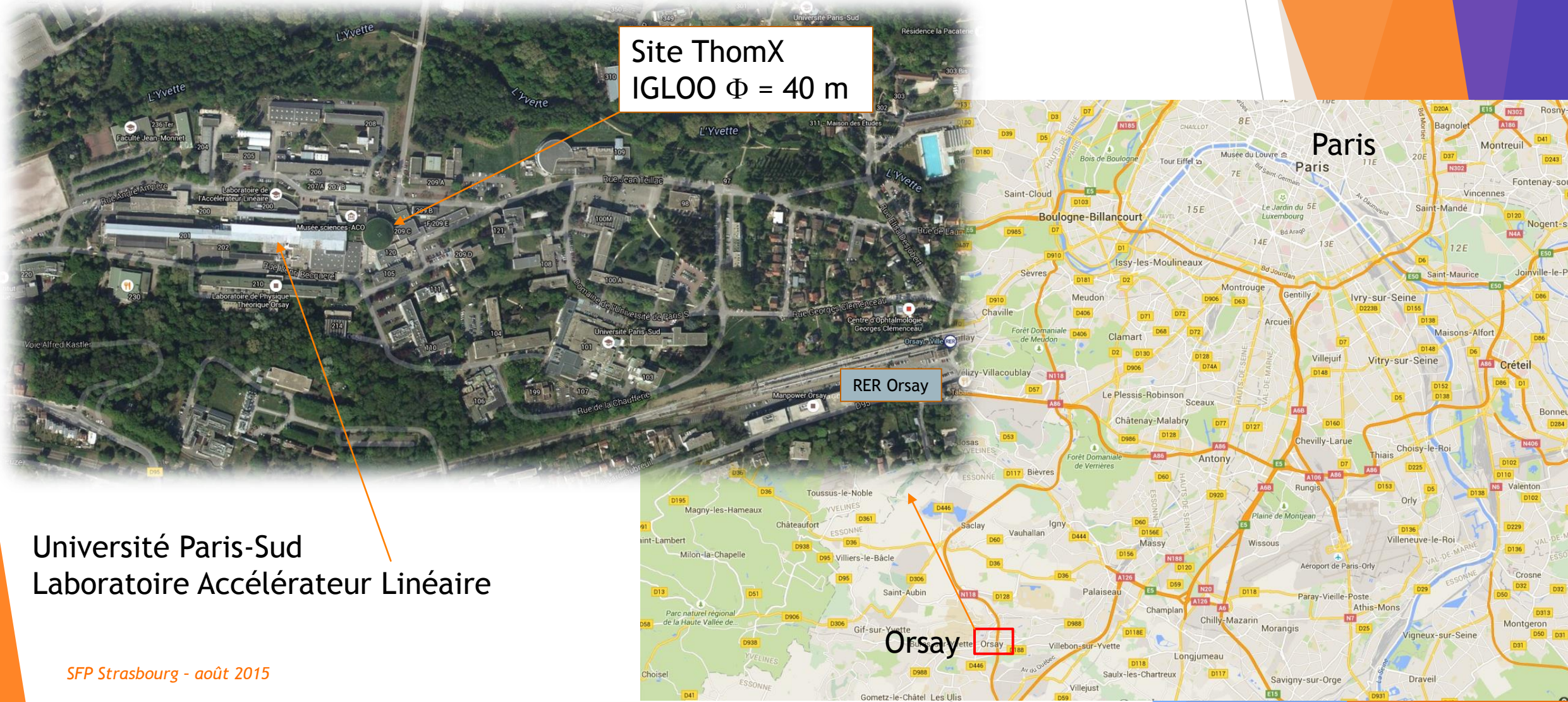
## 4.1 ThomX budget et partenaires

- ▶ Finance obtenues en 2010 : programme Equipex de l'ANR : 12 M€
- ▶ Complément avec SESAME (Région) 0.5 M€ + UPS (0.2 M€)
- ▶ CPER pour réhabilitation bâtiment obtenu en 2015 (2,5 M€)
- ▶ 8 Partenaires dans le projet :

Nom	contribution
Thales TED (Vélizy)	Industrialisation
Synchrotron SOLEIL (Gif)	anneau, aimants, source RF, ...
Institut NEEL (Grenoble)	ligne X (design, installation)
ESRF (Grenoble)	Ligne X (design, utilisation médicale)
LAMS (Paris)	Ligne X utilisation (analyse patrimoine)
GIN(Grenoble Institut Neuroscience)	Ligne X (utilisation médicale)
CELIA (Talence)	Laser interaction
LAL (Orsay)	Management, linac, intégration, bâtiment, ...



# 4.2 ThomX implantation



Université Paris-Sud  
Laboratoire Accélérateur Linéaire

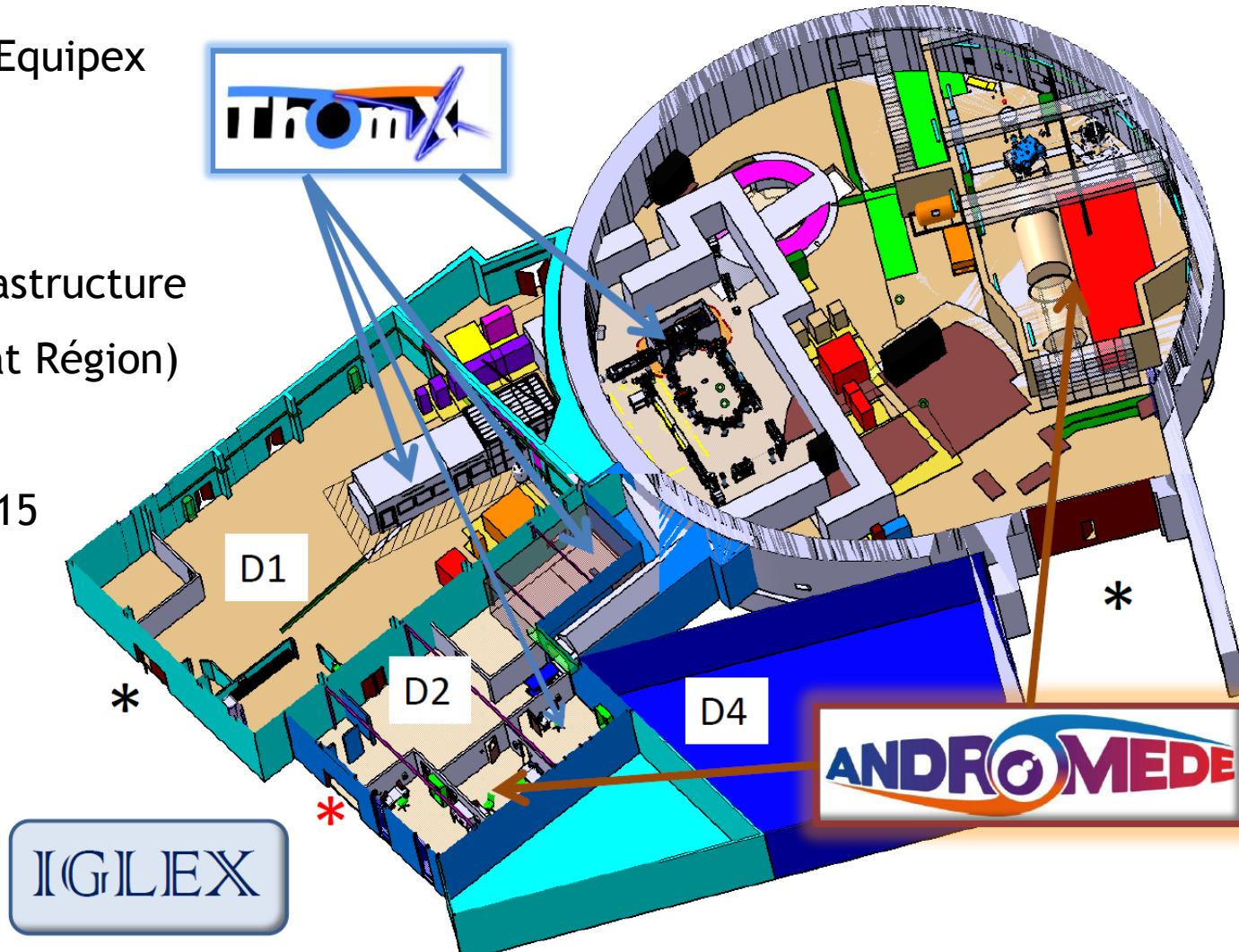


## 4.2 ThomX implantation

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

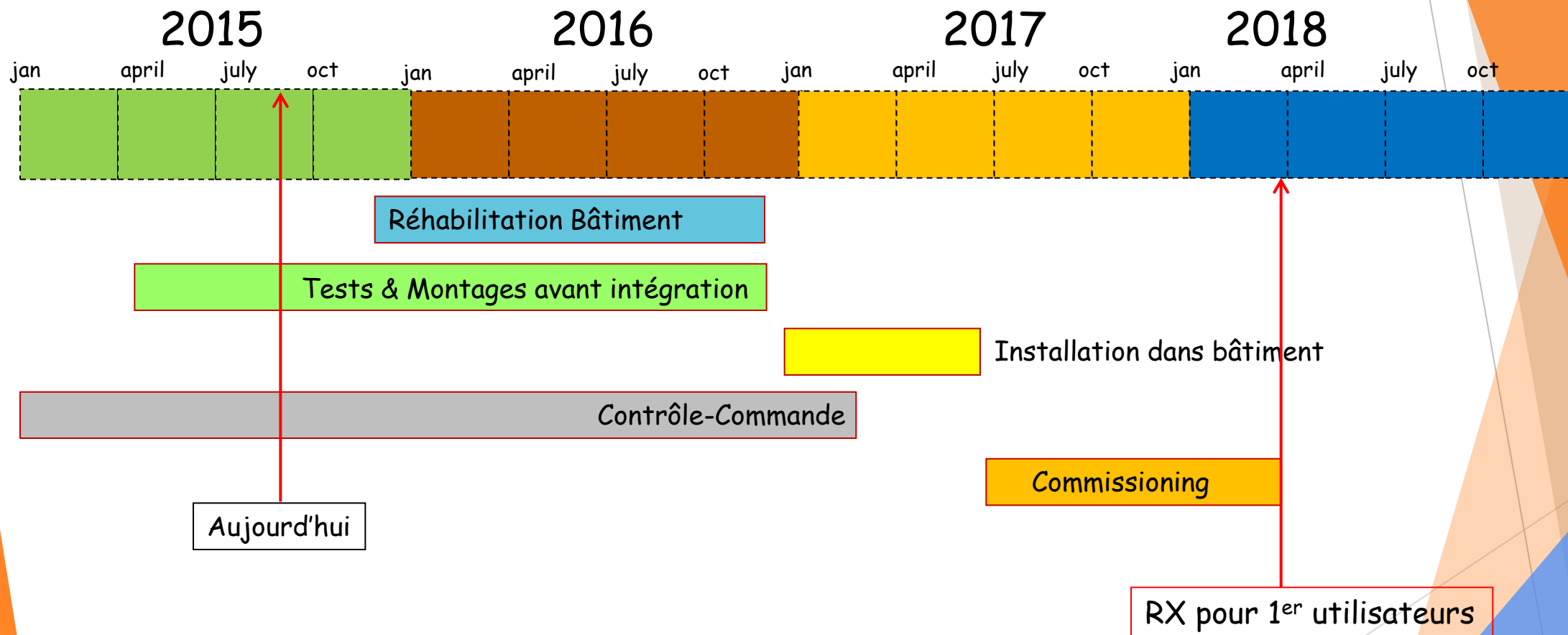
Début travaux : fin 2015

Fin travaux : fin 2016





## 4.3 Planning

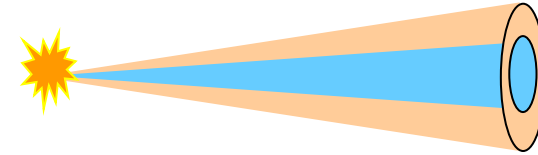


montages : linac, poutres LT, poutres anneau, ligne X, cavité & laser interaction

# 5. Conclusions : particularités de ThomX

- ▶ Source RX(40 - 90 keV) basée sur **rétrodiffusion Compton**
- ▶ Flux visé  $10^{12}$  ph/s
- ▶ Géométrie de la source de RX : **cône**
  - Énergie RX modifiable suivant énergie électrons (50 à 70 MeV)
  - Taille maximale de la source dans la cabane X ~ 10 cm
  - Possibilité monochromateur, transfocateur sur ligne X
- ▶ Défis technologiques :
  - laser de forte puissance moyenne : 100 W
  - Finesse cavité Fabry-Pérot : 30000 avec laser ps, stabilité
  - Alignement au point d'interaction
  - Fonctionnement des kickers
  - Fonctionnement anneau à faible énergie (50 MeV)

Géométrie de la source de RX



Merci à tous les partenaires et les collaborateurs  
de ce projet innovant et motivant !

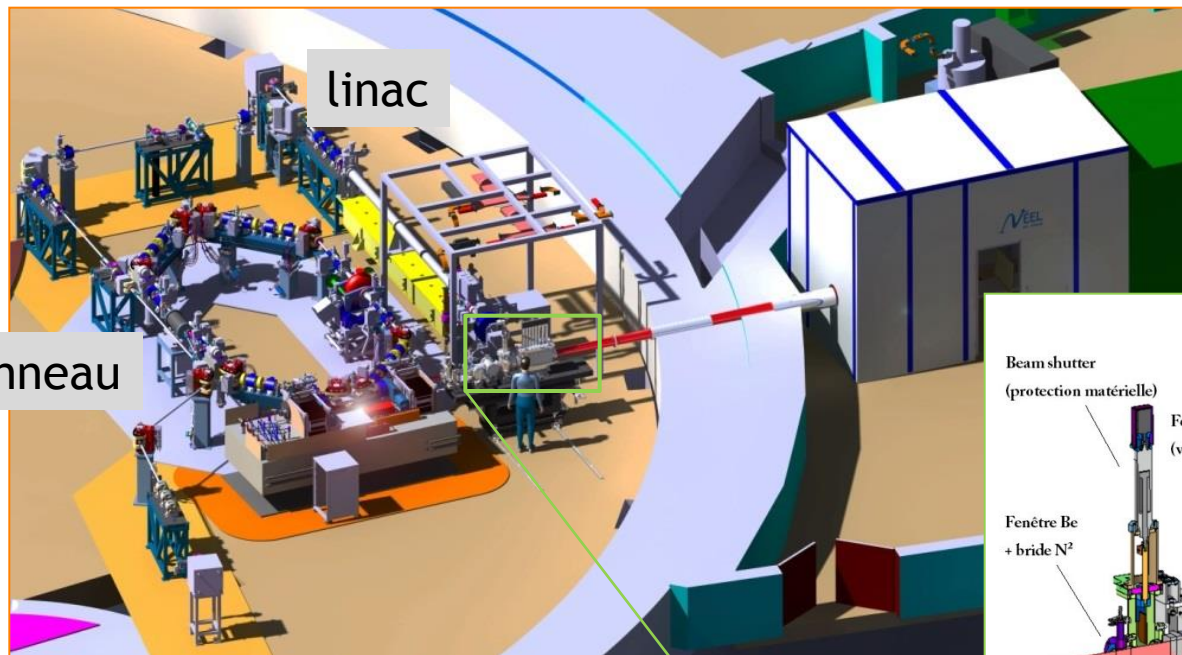
Environs 90 Ingénieurs, chercheurs, techniciens  
+ administration

# Planches supplémentaires



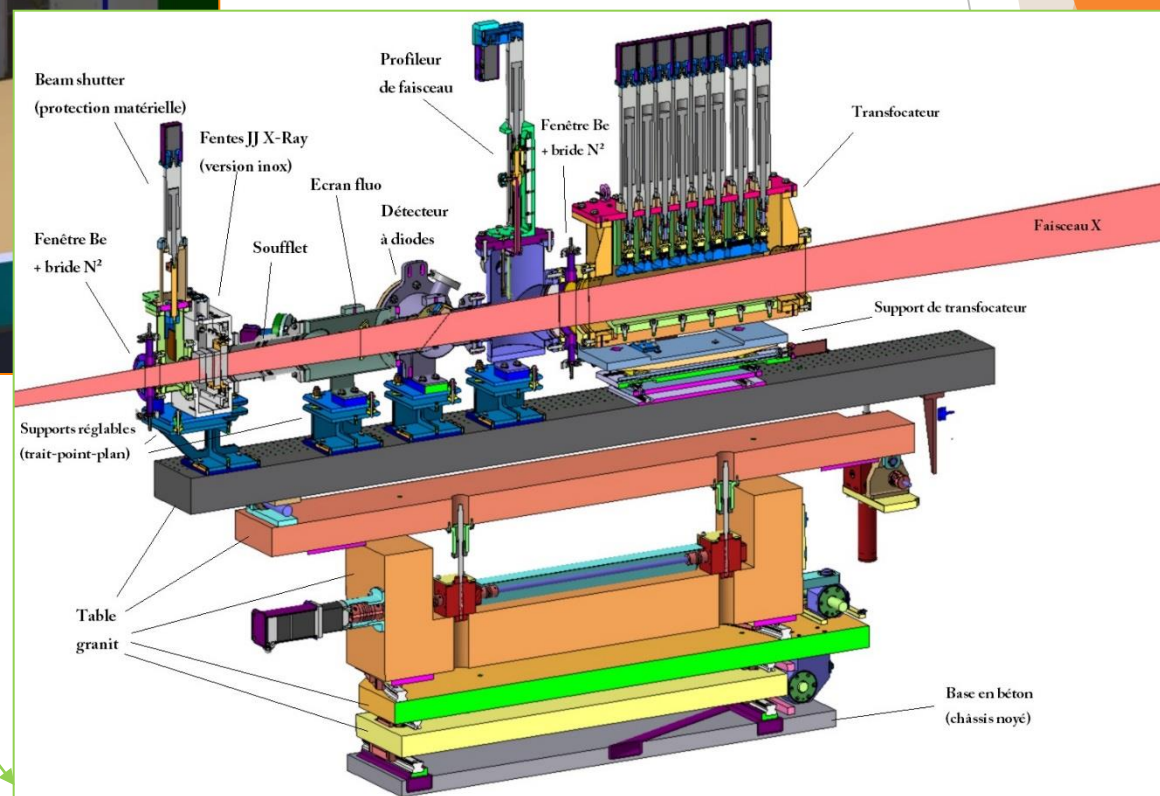


# Ligne transport RX



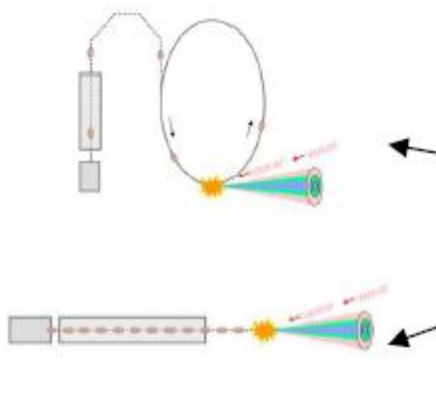
anneau

linac

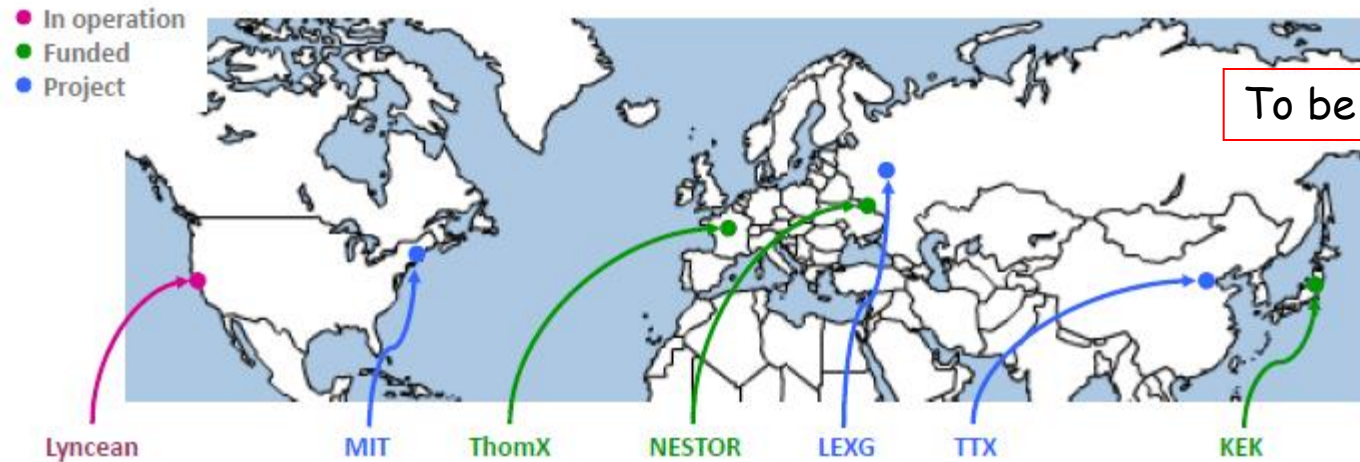


# Projets source Compton RX dans le monde

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	$\sim 10^{15}$



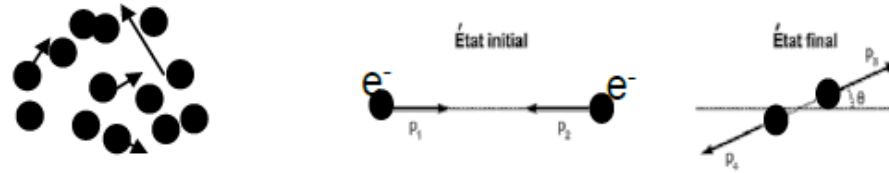
To be updated



# CBS+IBS

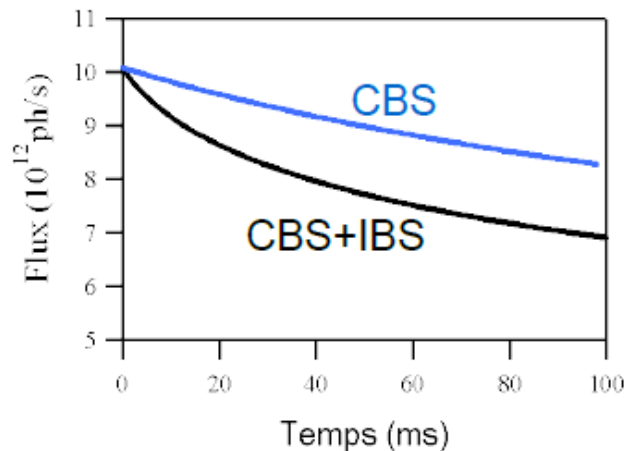
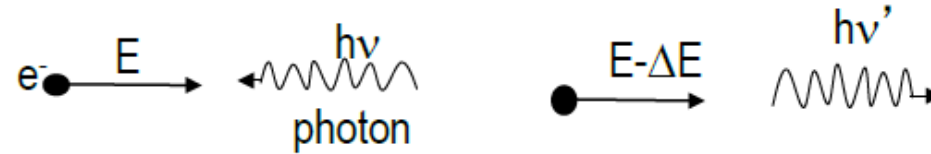
- **IBS** : coulomb scattering inside the bunch

- Emittance and energy spread degradation



- **CBS** : random energy excitation

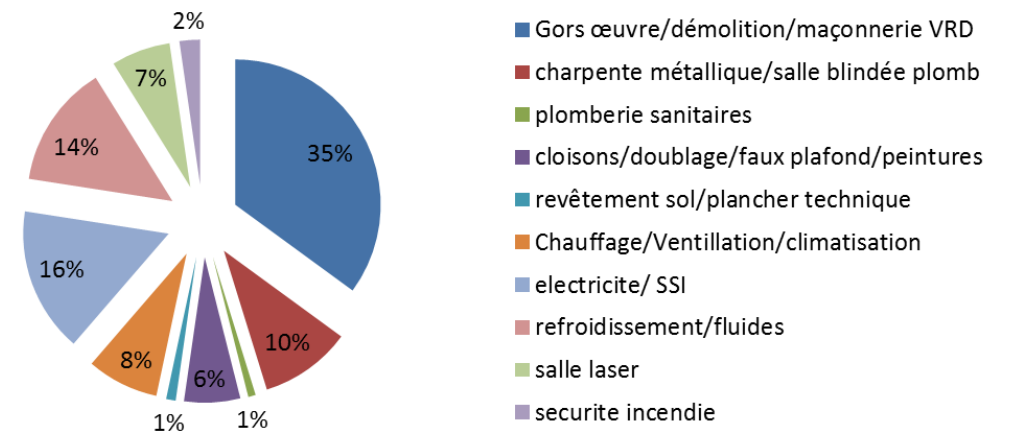
- Energy spread degradation



- 30% reduction on the X ray flux

# ThomX civil engineering

IGLOO Rehabilitation lots :



LOT N°01	GROS ŒUVRE / DEMOLITION / MACONNERIE / VRD	603 169,00 €
LOT N°02	CHARPENTE METALLIQUE - SALLE BLINDEE AU PLOMB	175 000,00 €
LOT N°03	PLOMBERIE SANITAIRES	14 255,00 €
LOT N°04	CLOISONS / DOUBLAGE / FAUX PLAFONDS / PEINTURE / MENUISERIES INT / SERRURERIE	107 273,00 €
LOT N°05	CARRELAGE / FAIENCE / REVETEMENTS SOLS / PLANCHER TECHNIQUE	18 266,00 €
LOT N°06	CVC	137 550,00 €
LOT N°07	ELECTRICITE (COURANTS FORTS / COURANTS FAIBLES) / SSI	277 368,00 €
LOT N°08	REFROIDISSEMENT / FLUIDES	235 500,00 €
LOT N°09	SALLE LASER	113 000,00 €
LOT N°10	SECURITE INCENDIE	39 425,00 €
<b>TOTAL GÉNÉRAL H.T</b>		<b>1 720 806,00 €</b>
<b>TOTAL GÉNÉRAL H.T + TRANCHES CONDITIONNELLES &amp; OPTIONNELLES</b>		<b>1 810 726,00 €</b>

Planning :

- 20/03 publication annonce
- 20/05 date limite réponse
- 08/06 premier rapport choix et négociations
- 22/06 fin négociations
- 30/06 choix final début recours
- 15/07 fin recours notification

Overheads max ~ 10% → +170 k€



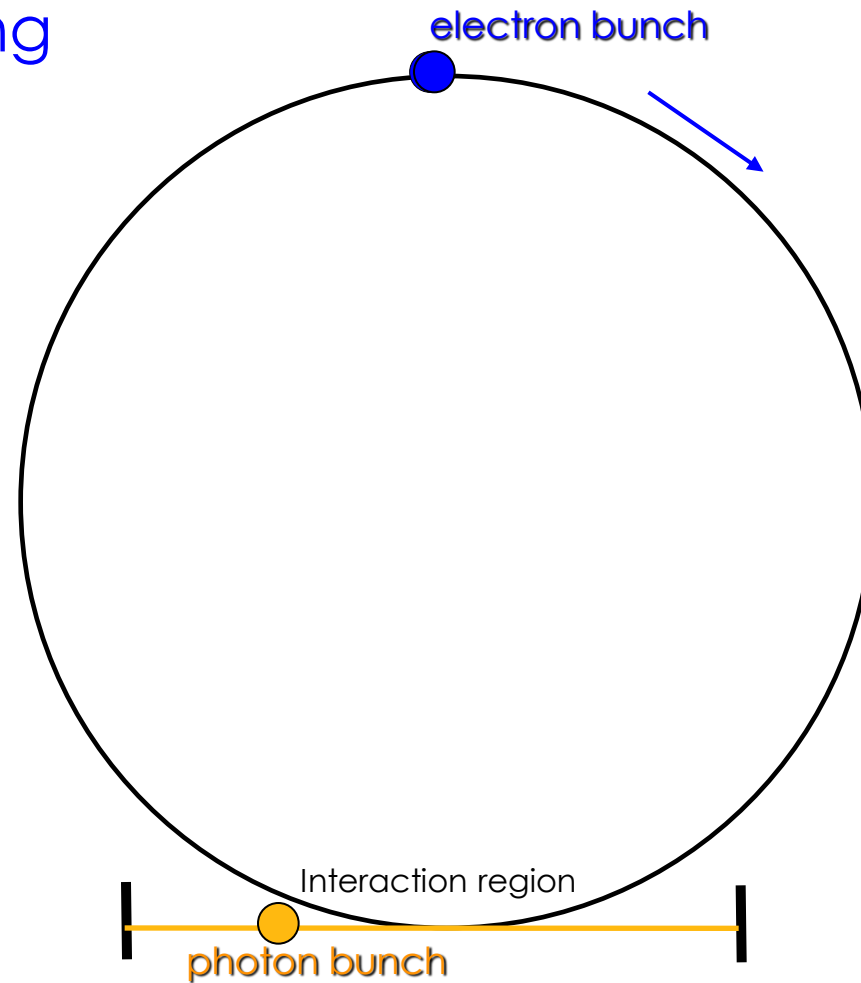
# Acquisition status

	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 + IGLX - marché</i>
	SFP Strasbourg, août 2015 TOTAL CDES À ENGAGER	<b>5515</b>	<b>4648,3</b>				



# Principe de fonctionnement

## Compton back-scattering



Goal :  $10^{11} - 10^{13}$   
X-rays/second  
 $E = 46 - 90$  keV

# 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



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

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

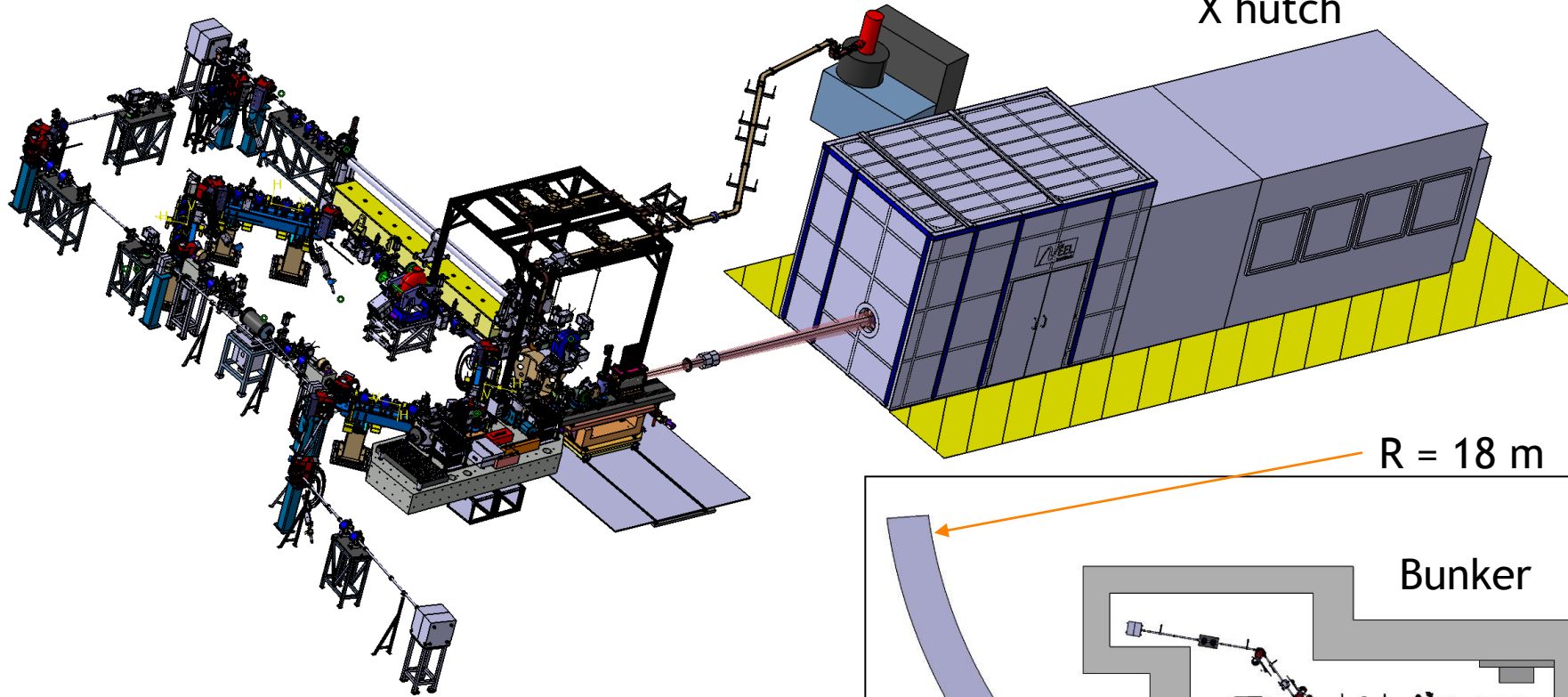
**Haut flux**  $\rightarrow$  bcq photons  
bcq electrons  
petites taille faisceau  
grande  $f_{\text{rep}}$

- faisceau haute qualité
  - coherence Transverse
  - Haute brillance



Linac RF source

X hutch



R = 18 m

