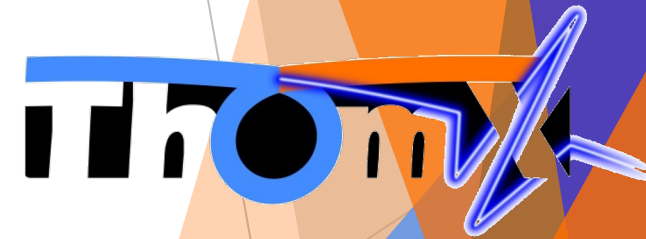


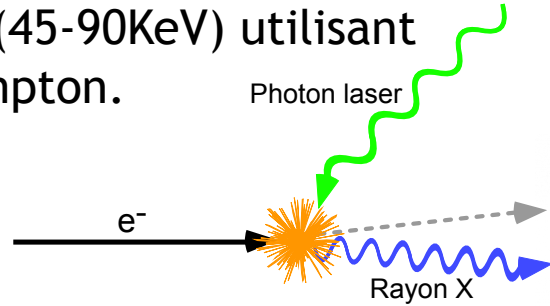
Démarrage de l'accélérateur ThomX

Nicolas Delerue (IJCLab)
au nom de la collaboration ThomX



ThomX: une source de lumière compacte

- ▶ Source de rayons X (45-90KeV) utilisant les interactions Compton.



$$E_{\gamma} \simeq E_L \frac{4\gamma^2}{1 + \gamma^2 \delta^2 + \frac{\phi^2}{4}}$$

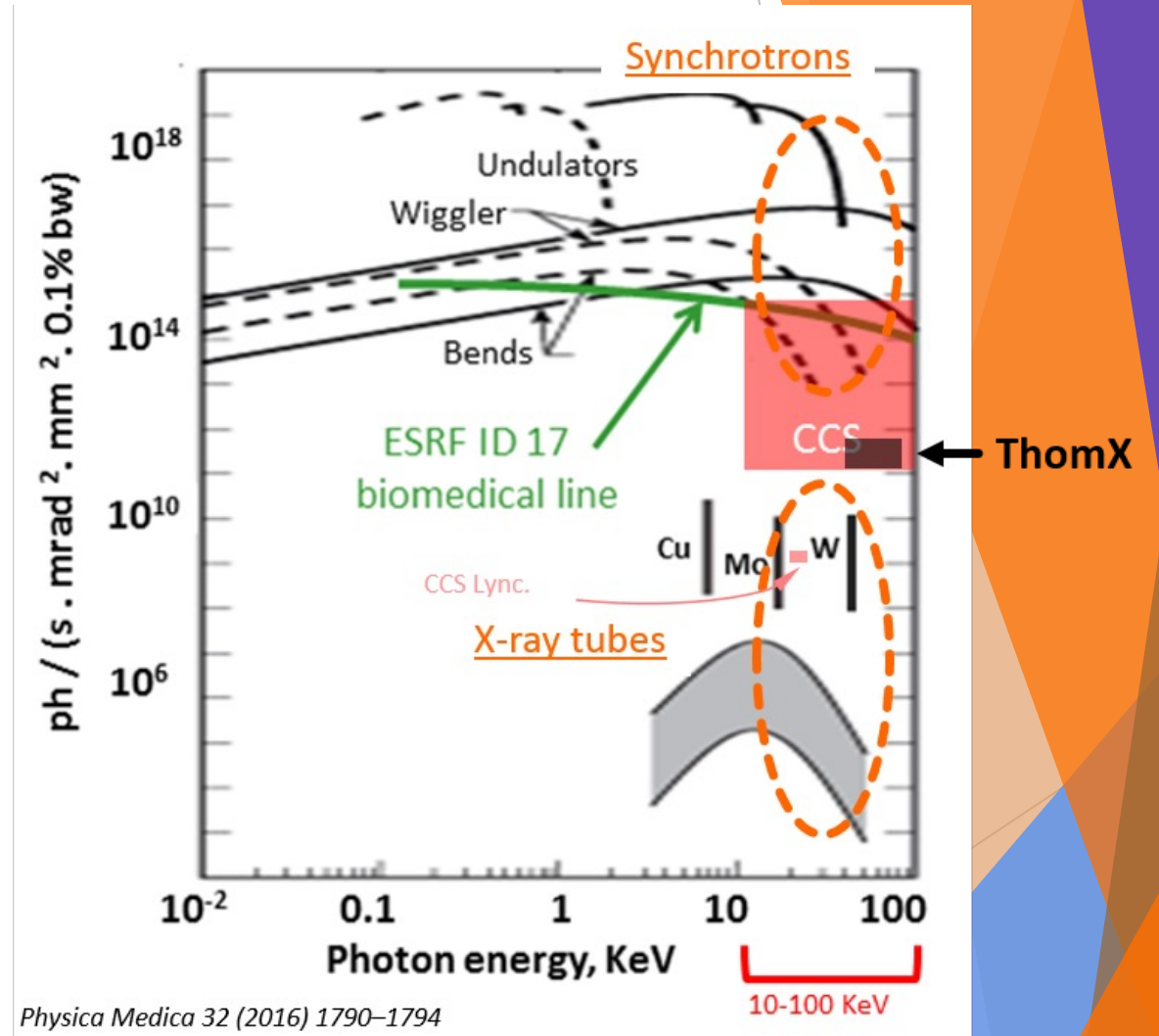
- ▶ Faible section efficace
=> anneau de stockage et empilement des photons laser dans une cavité Fabry-Pérot
- ▶ Compacte: ~200m²



	Autorisé ASN	Nominal	Ultime
Energie e-	50 MeV	50 MeV	70 MeV
Charge	100pC	1nC	1nC
Freq. Rep.	10Hz	50Hz	50Hz
Rayons X	45keV	45keV	90 keV
Puissance laser stockée	100kW	100kW	500kW
Flux attendu	10 ¹¹ ph/s	10 ¹² ph/s	10 ¹³ ph/s

Applications

- ▶ Brillance de rayons X inférieur à celui d'une source de 3^e génération.
- ▶ Cependant la source est beaucoup plus compacte.
- ▶ Peut être installé dans des espaces plus petits: musées, hôpitaux, ...
 - Etude d'œuvre d'art
 - Imagerie (standard, a contraste de phase + tomographies)
 - ...



La machine

- Linac, f_{rep} 10-50 Hz
- $\epsilon_N \sim 5-10$ mm.mrad

LINAC bande-S (3GHz)

Photo-canon RF

Utilisateurs

Ligne X

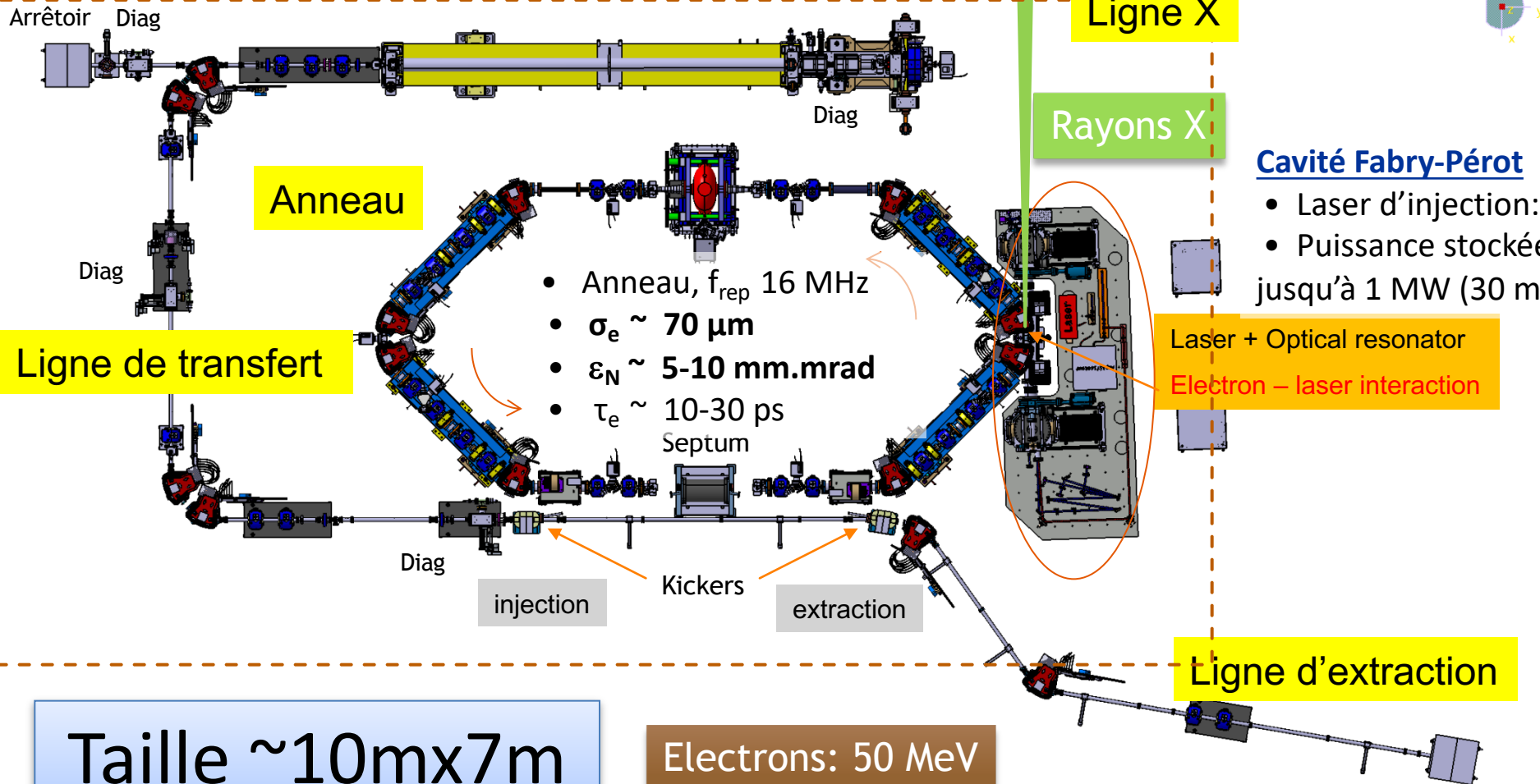
Rayons X

Cavité Fabry-Pérot

- Laser d'injection: 100W
- Puissance stockée ultime: jusqu'à 1 MW (30 mJ/impulsion)

Laser + Optical resonator

Electron – laser interaction



Ligne de transfert

Anneau

- Anneau, f_{rep} 16 MHz
- $\sigma_e \sim 70$ μ m
- $\epsilon_N \sim 5-10$ mm.mrad
- $\tau_e \sim 10-30$ ps

injection Kickers extraction

Ligne d'extraction

Arrêteur

4

0.0357

z

y

x

Taille $\sim 10\text{m} \times 7\text{m}$

Electrons: 50 MeV

Démarrage de ThomX - Octobre 2023 - Roscoff



ThomX: de l'idée aux rayons X

2007 2008 2009 2010 2011 2012 2013 2014 2015 2016 2017 2018 2019 2020 2021 2022 2023 2024



Phase d'opération (ASN)	Energie maximale e- (MeV)	Charge par paquet (nC)	Fréquence de tir (Hz)	Description
I	50	0.1	10	LINAC
II	50	0.1	10	Injecteur +anneau
II(bis)	50	0.1(1)	10 (50)	Injecteur + anneau + X-rays
III	70	1	50	Opérations nominales



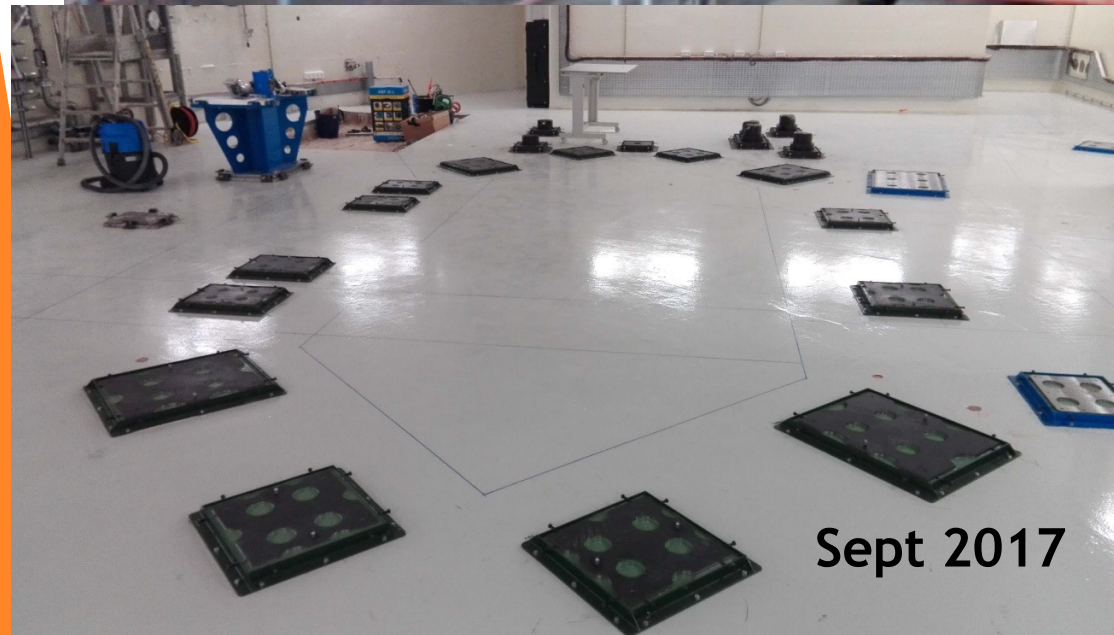
Installation



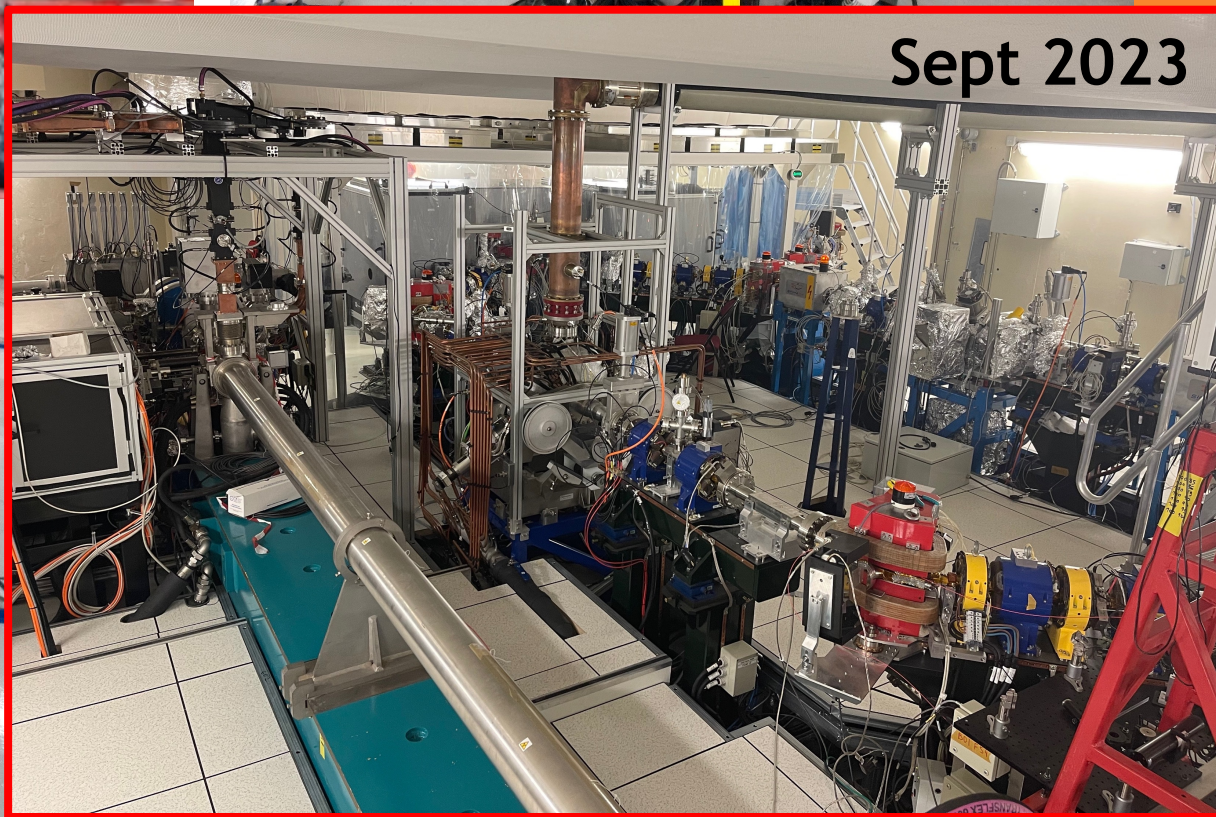
Mai 2016



Fin 2018



Sept 2017

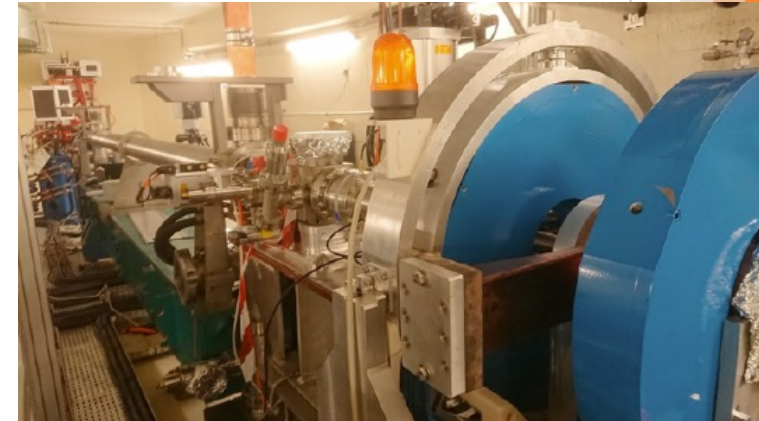
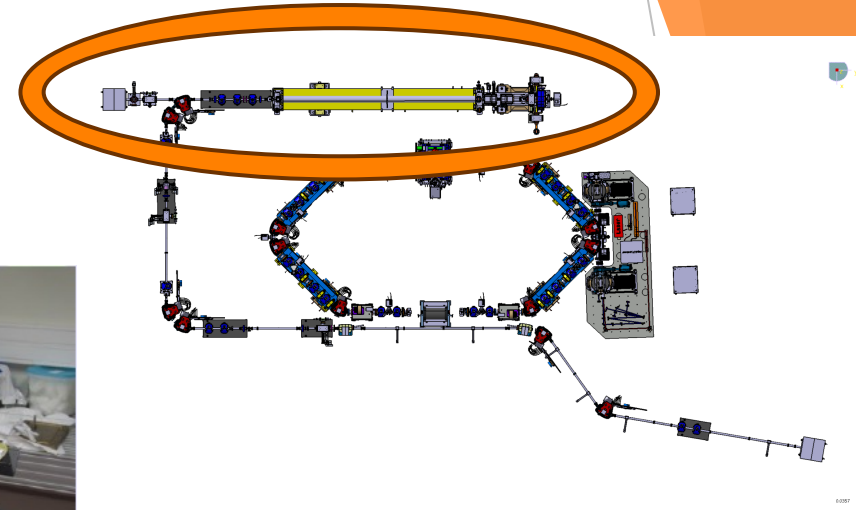
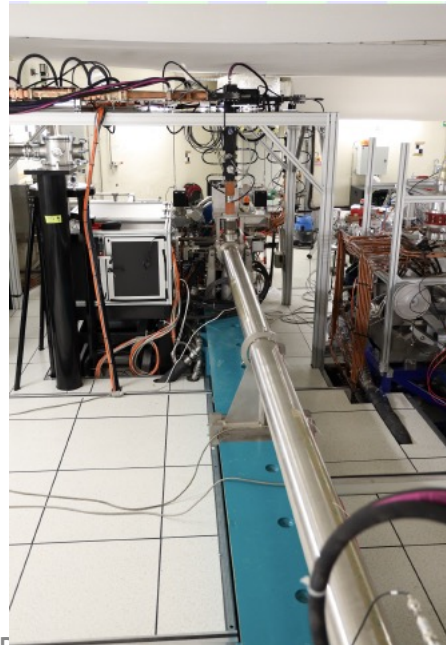


Sept 2023



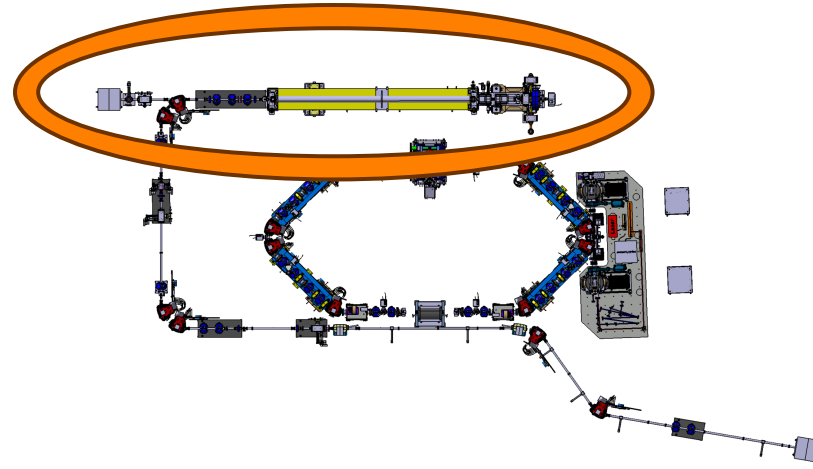
Linac

- ▶ Photo-canon RF (fabrication LAL)
 - 2,5 cellules
 - Gradient: 60MV/m
 - Energie en sortie: 5 MeV
- ▶ Section LIL (prêtée par SOLEIL)
 - Energie en sortie: 50 MeV
- ▶ 50Hz (nominal)
- ▶ Station diagnostic en bout de linac pour caractériser le faisceau.

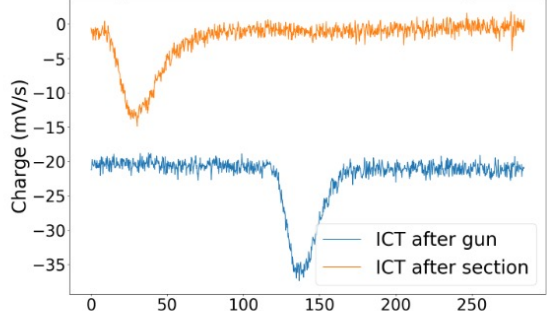


Démarrage linac

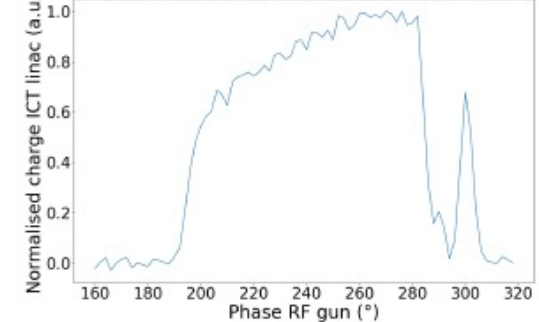
- ▶ Autorisation ASN: Mai 2021
- ▶ Limité au linac (tirs en ligne droite)
- ▶ 10Hz, 100pC, 50 MeV maximum
- ▶ Mai-Septembre 2021: Mise en service des systèmes RF
- ▶ Octobre 2021: 1^{er} faisceaux



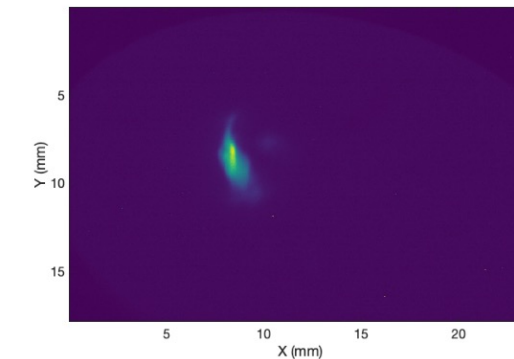
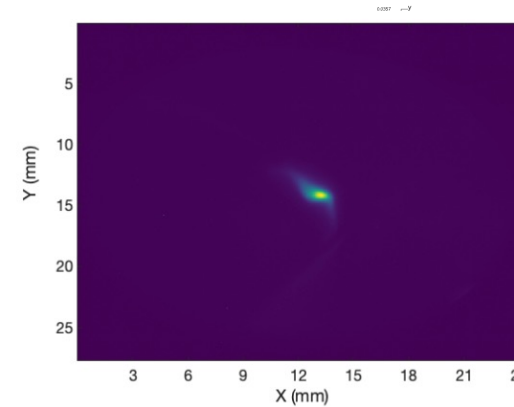
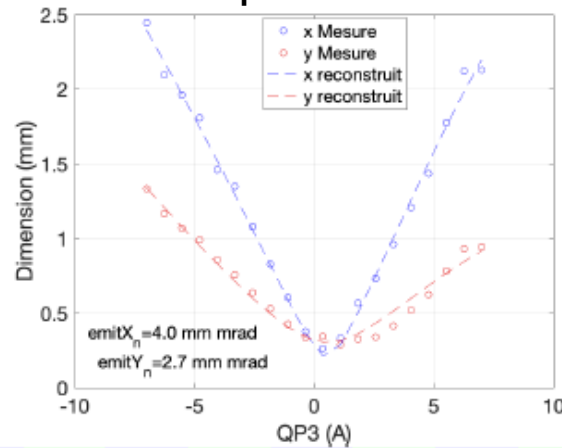
ICT signal before/after the accelerating section



Scan charge ICT linac vs. phase RF gun



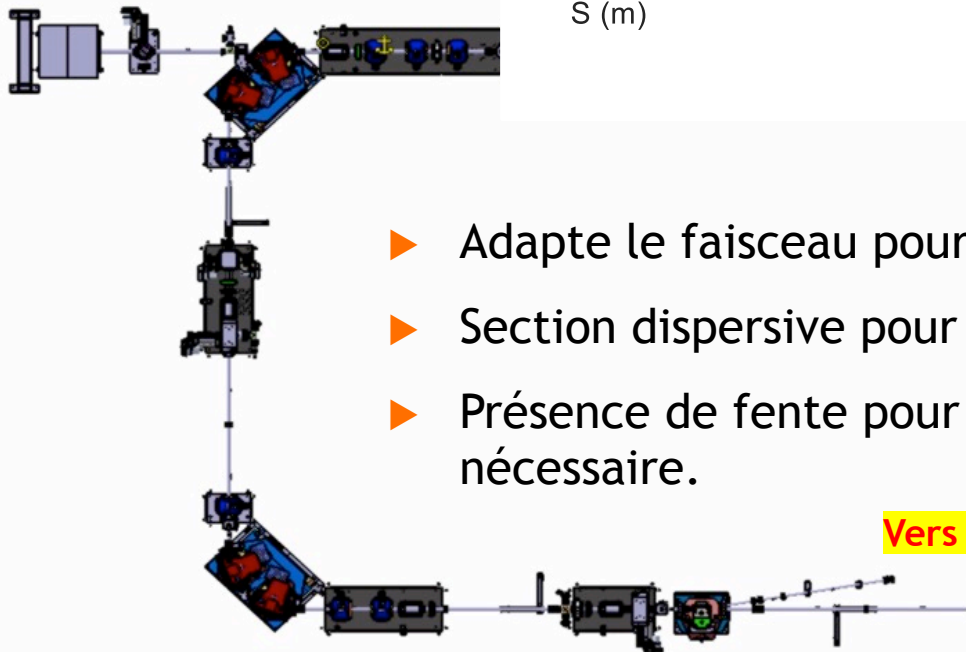
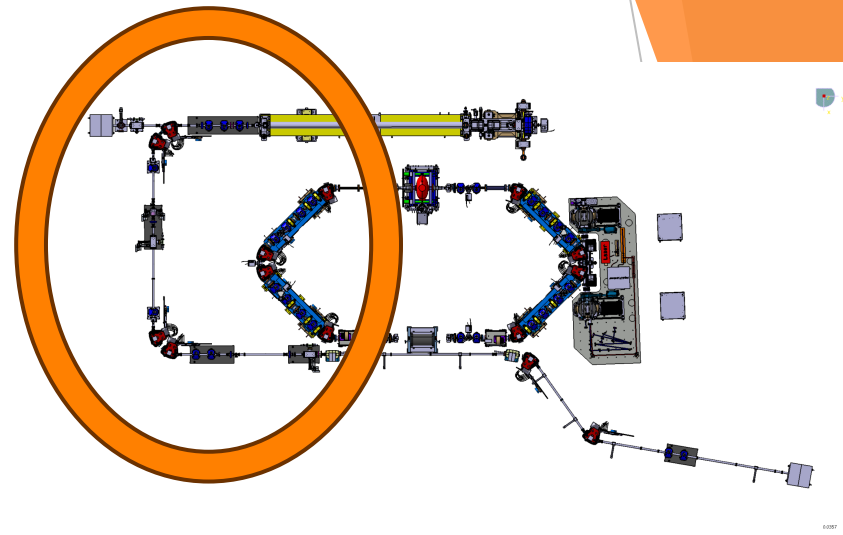
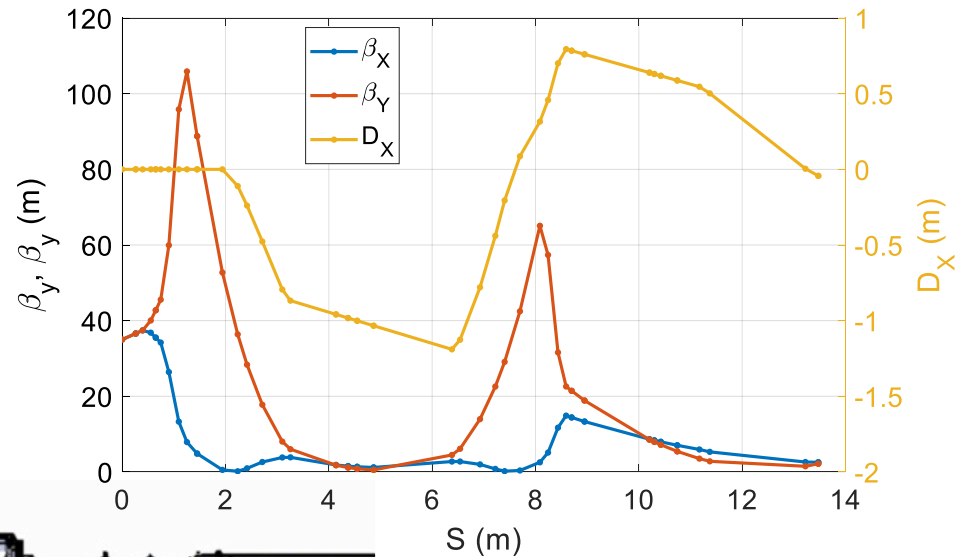
Mesures préliminaires



Démarrage de ThomX - Octobre 2021



Ligne de transfert

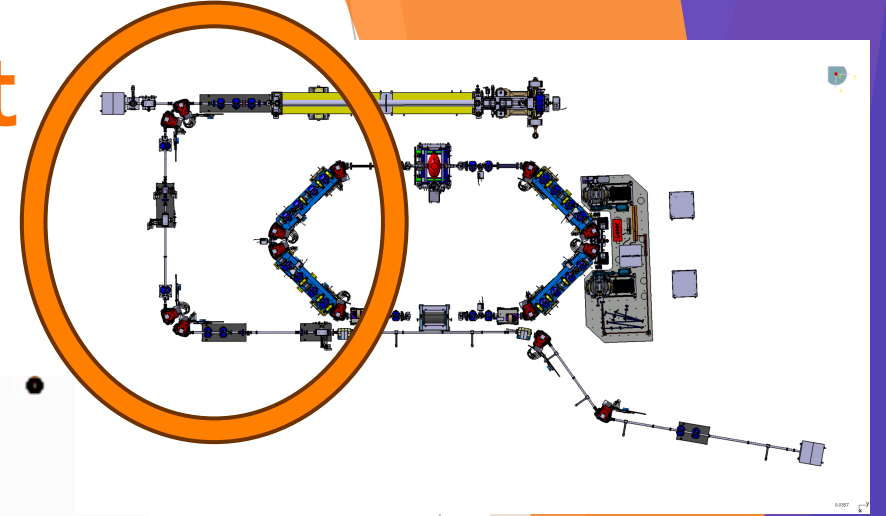


- ▶ Adapte le faisceau pour injection dans l'anneau
- ▶ Section dispersive pour mesure de dispersion.
- ▶ Présence de fente pour réduire la dispersion si nécessaire.

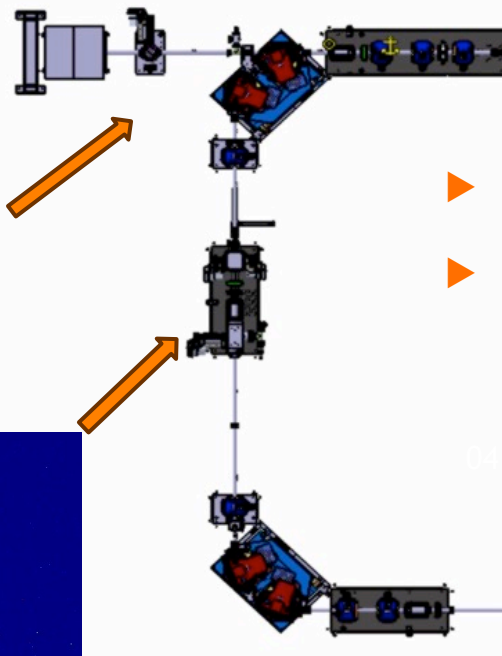
Vers l'anneau

- ▶ 4 Dipoles
- ▶ 7 Quadripoles
- ▶ 2 Dipoles pour inj./extr.
- ▶ 4 Correcteurs
- ▶ 4 BPM
- ▶ 3 Stations diagnostiques
- ▶ 2 ICT
- ▶ 1 Coupelles de Faraday (ligne droite)

Démarrage de la ligne de transfert

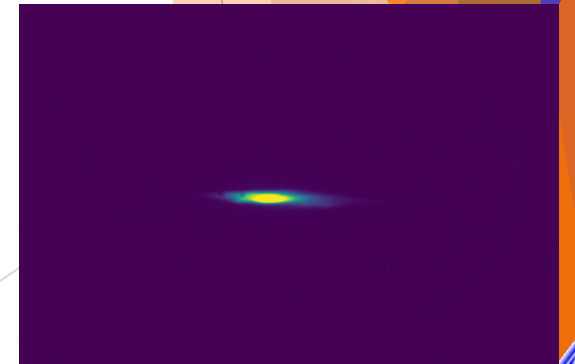
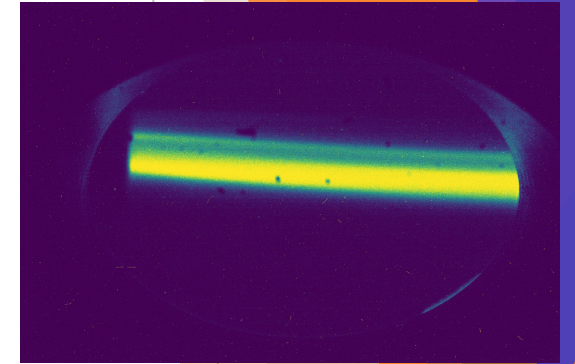


Dump

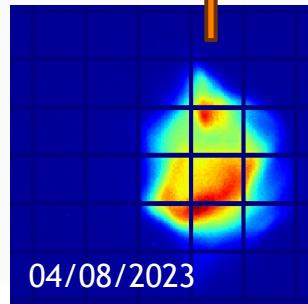
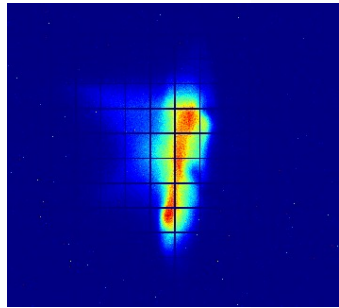
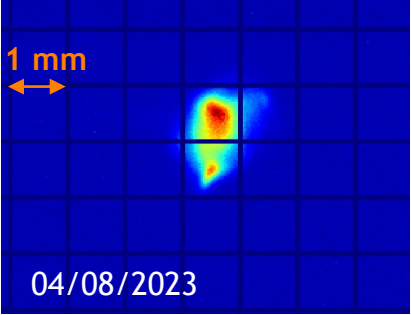


- ▶ Autorisation ASN: Août 2022
- ▶ Transport jusqu'à l'entrée de l'anneau établi assez rapidement après l'autorisation ASN.

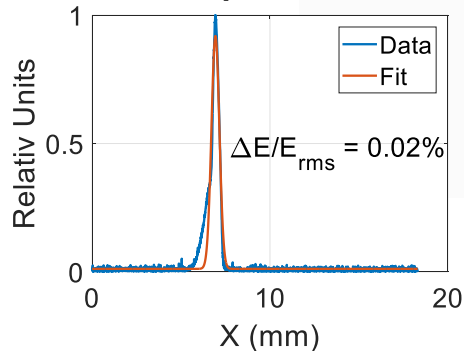
Vers l'anneau



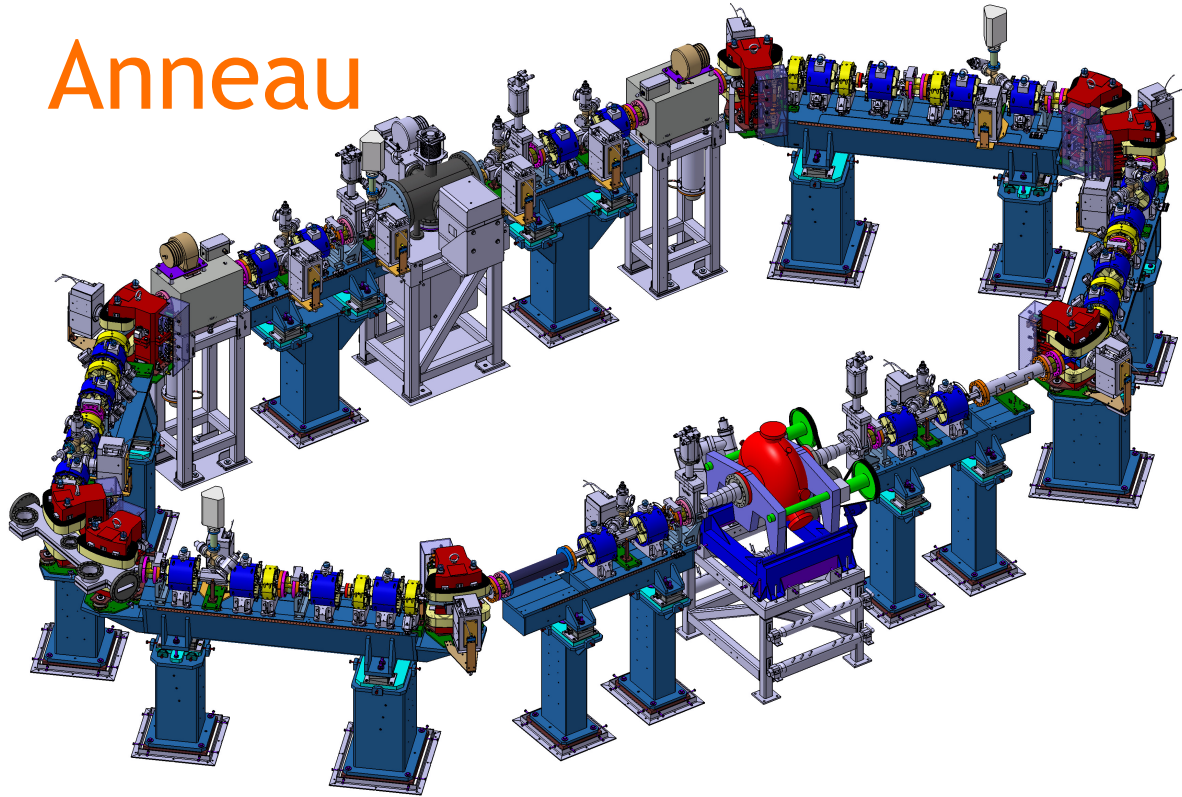
26/08/2022:
Effet de la phase de la section accélératrice sur la dispersion du faisceau.



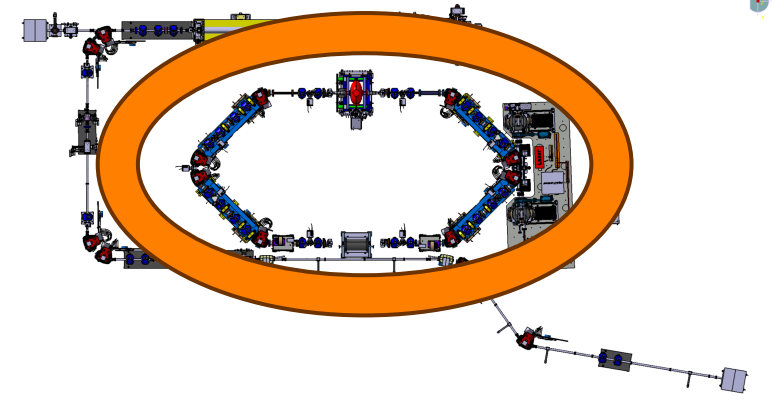
Mesures préliminaires



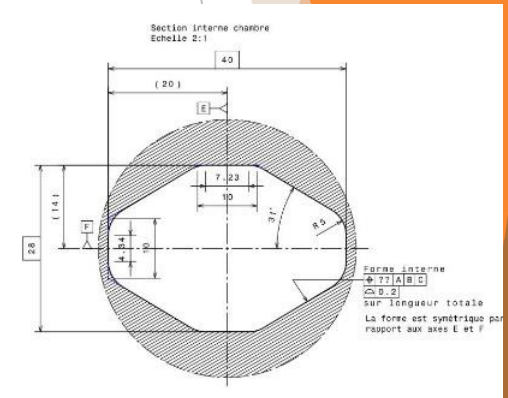
Anneau



- ▶ 1 tour = 60ns / Freq= 16,7MHz / L=18m
- ▶ Temps de stockage des particules: 20-100ms
- ▶ Temps d'atténuation (transverse/long.): 1,2s/ 0,6s
 - Faisceau non atténué
- ▶ Forts effets collectifs
- ▶ RF: 500MHz (30e harmonique)
- ▶ Courant (@1nC): 16,7mA

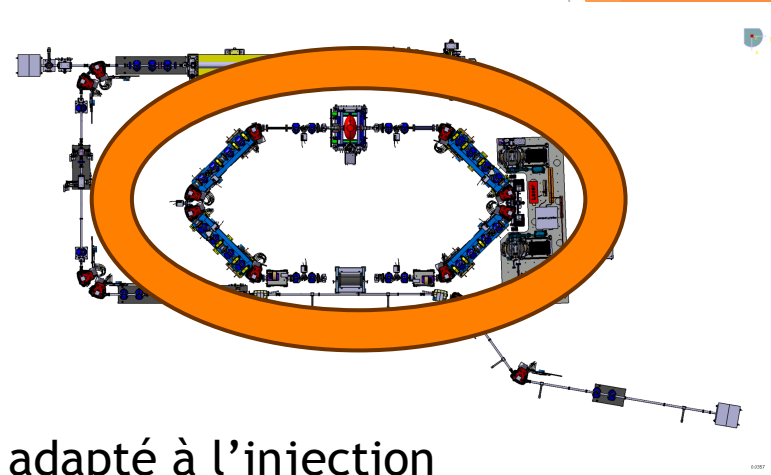
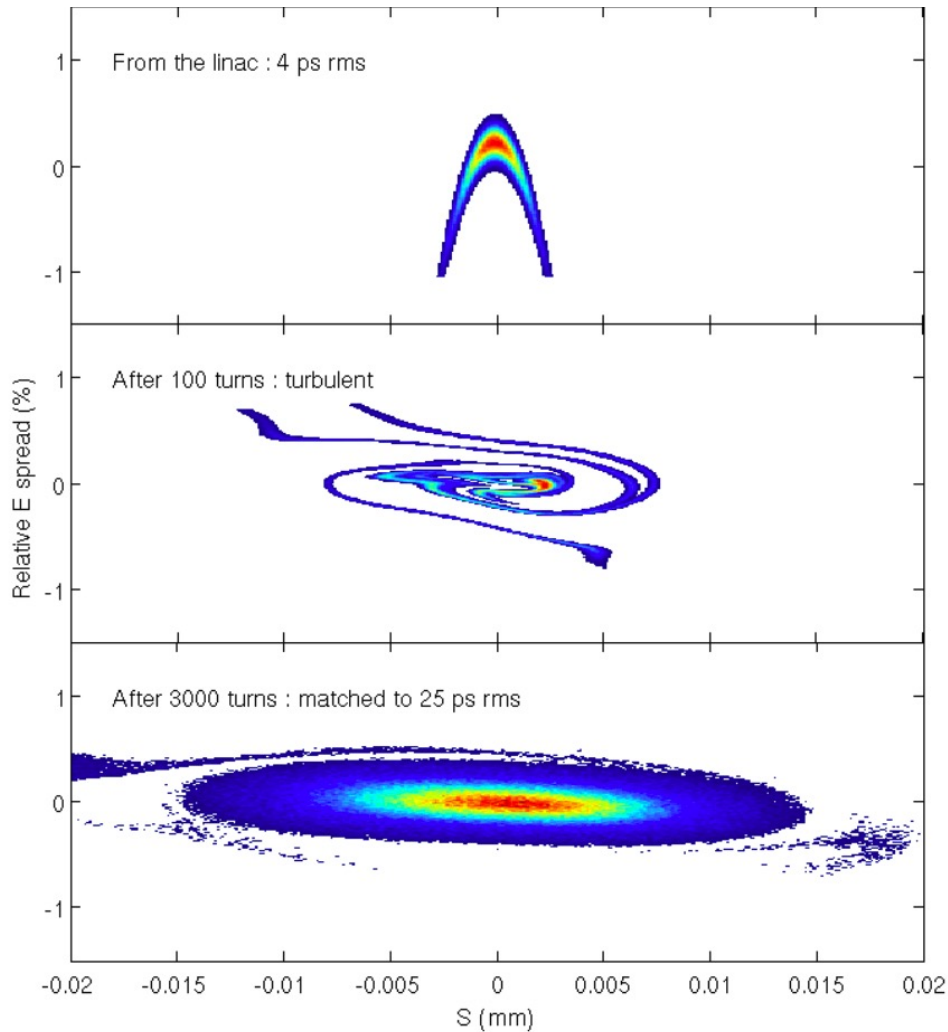


- ▶ 8 Dipoles
- ▶ 24 Quadripoles
- ▶ 12 Sextupoles
- ▶ 2 Kickers
- ▶ 1 Septum
- ▶ 1 RF cavity
- ▶ 12 BPM
- ▶ 12 Correcteurs
- ▶ Assemblage mécanique très serré



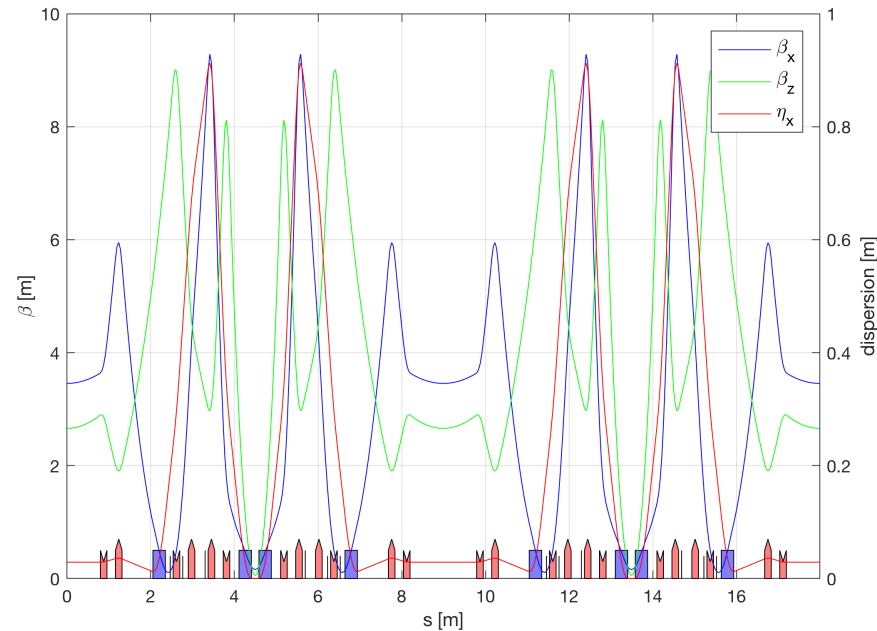
28x40 mm

Dynamique de l'anneau



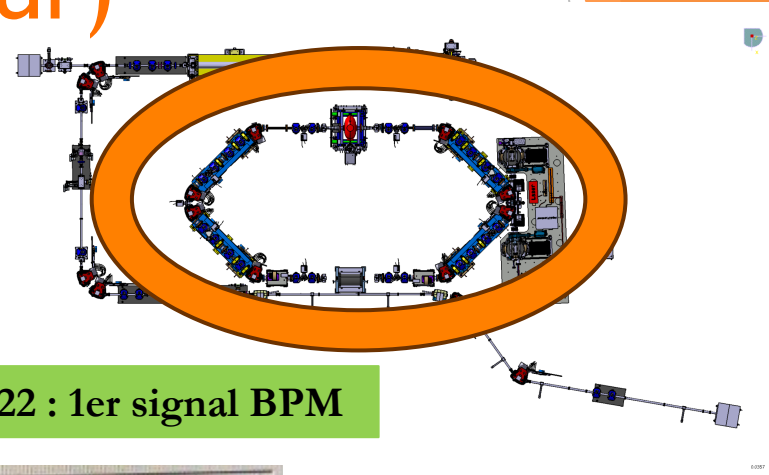
► Faisceau non adapté à l'injection

$\nu_x = 3.170$ $\delta p/p = 0.000$
 $\nu_z = 1.640$ 1 period, C= 17.987

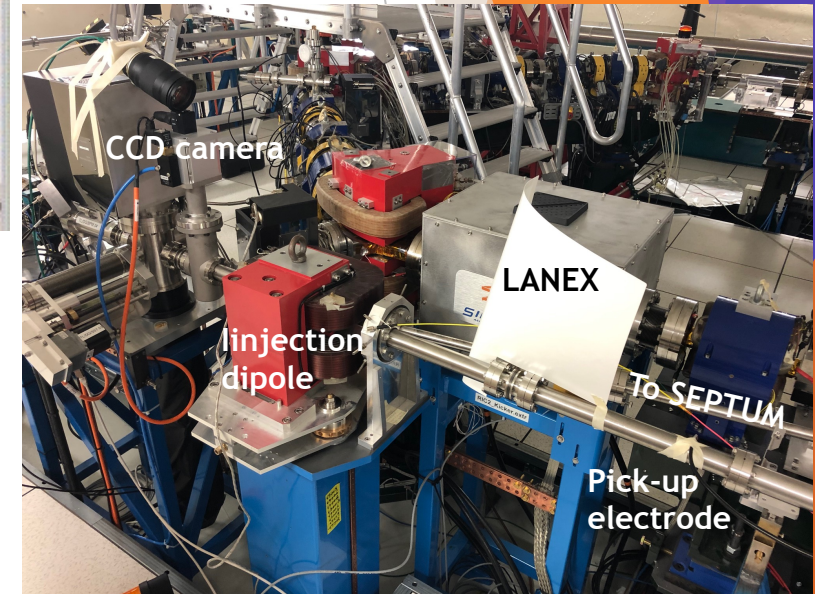
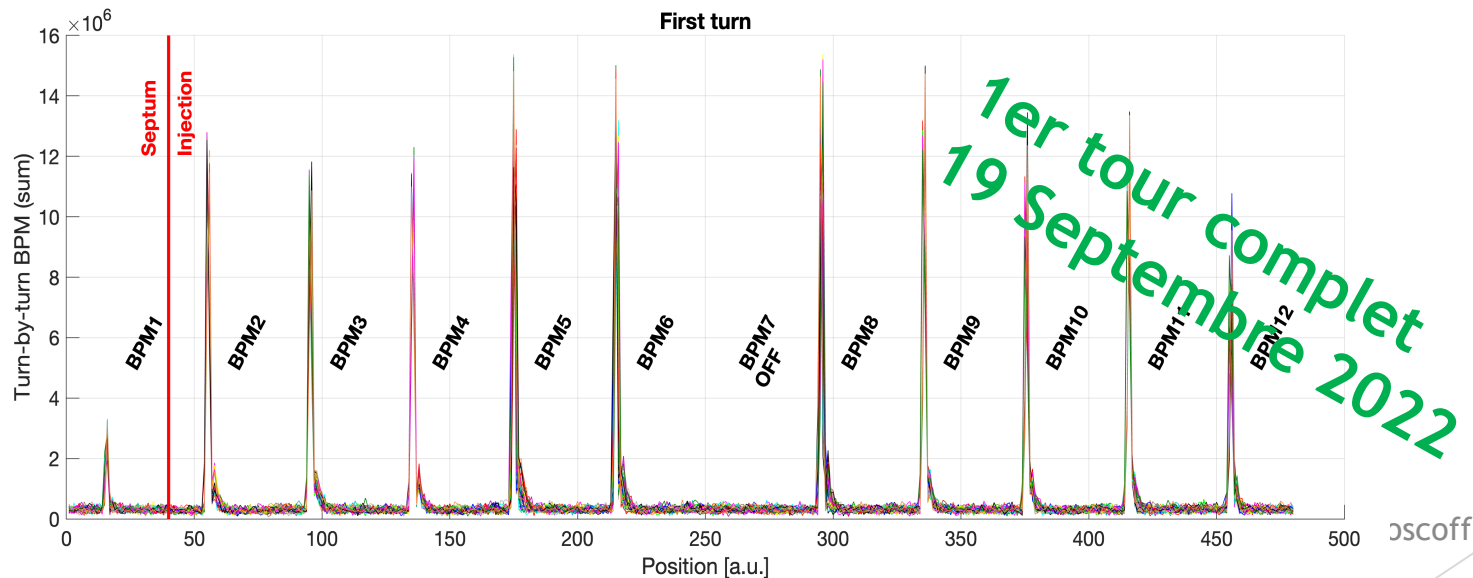
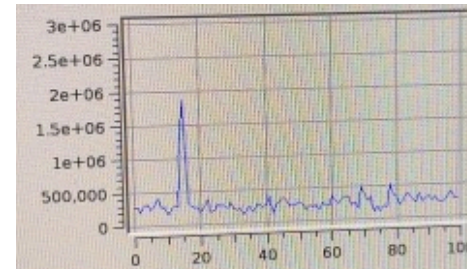


Démarrage de l'anneau (1^{er} tour)

- ▶ Autorisation ASN: Août 2022
- ▶ 10Hz, 100pC, 50 MeV maximum
- ▶ Recherche du signal dans l'anneau par balayage des correcteurs de la LT insuffisant
 - Ajout de diagnostics temporaires
- ▶ Sans quadripoles, transport dans un demi-anneau seulement
- ▶ Optimisation de l'injection par algorithme

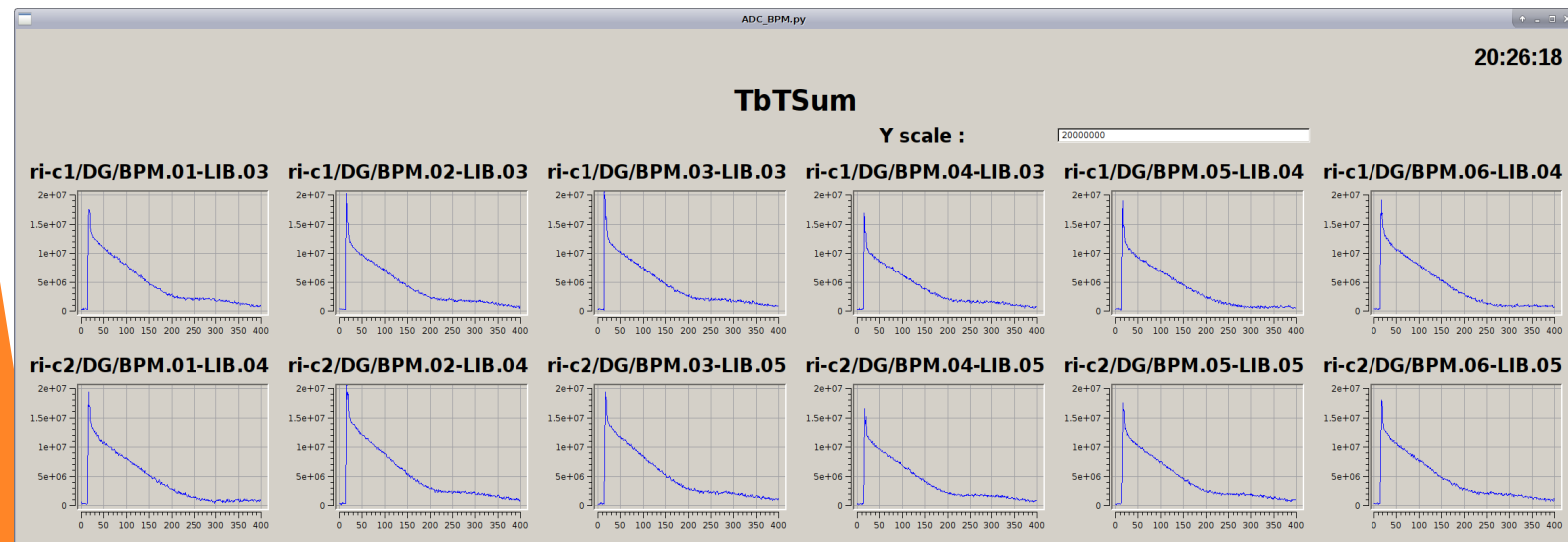
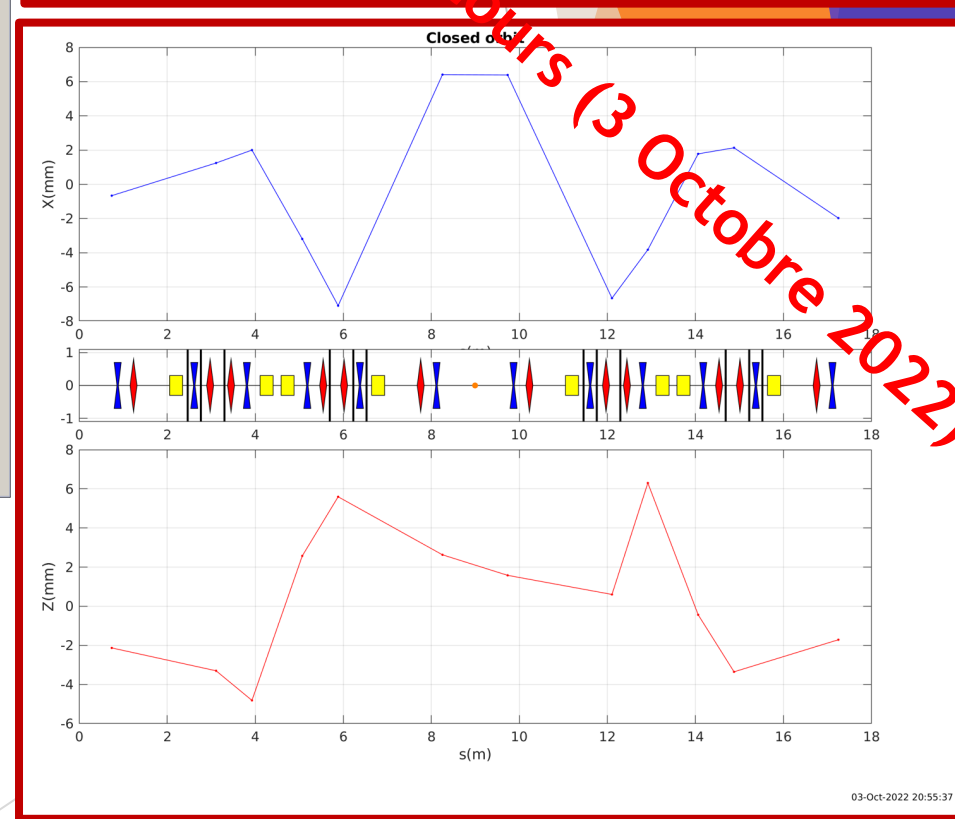
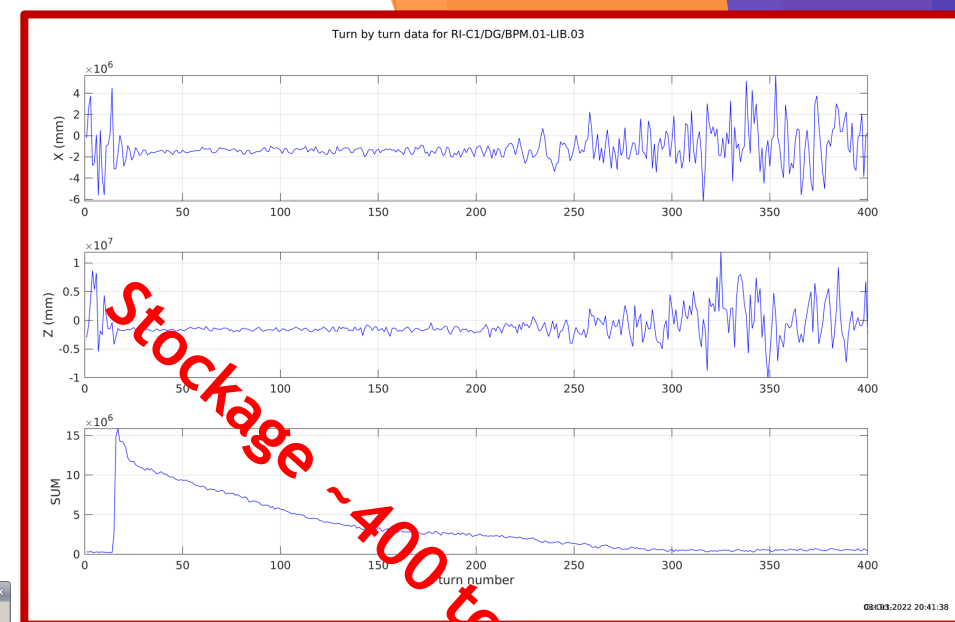


9 Sept 2022 : 1er signal BPM



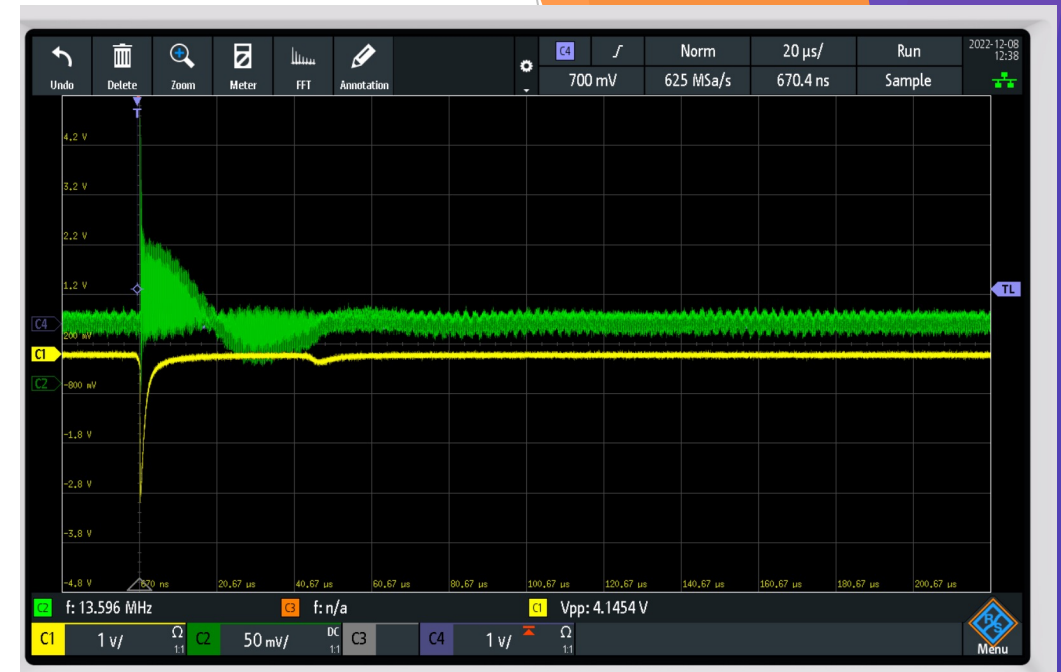
Démarrage de l'anneau (stockage)

- ▶ Malgré une optimisation de l'injection et des corrections de l'orbite, impossible de continuer au-delà du 1^{er} tour.
- ▶ La polarité d'un quadripôle était inversée.
- ▶ Après correction, stockage pendant ~400 tours (sans RF).



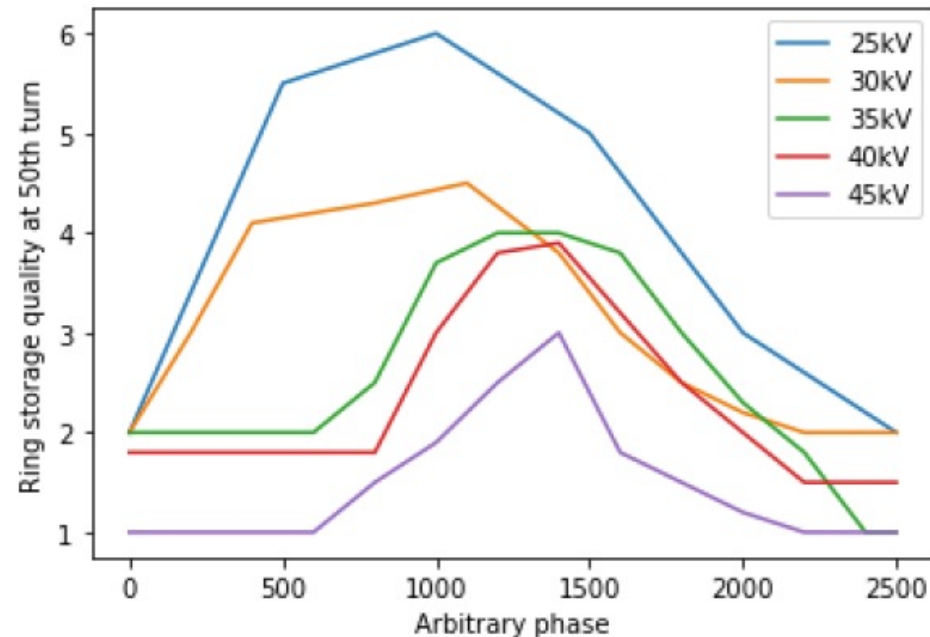
Démarrage de l'anneau (Allumage RF)

- ▶ Allumage de la RF à 500.02MHz (nominal)
 - Pas de stockage
- ▶ Mélange du signal BPM avec 500MHz RF => battements
- ▶ Ajustement de la fréquence jusqu'à 500.41MHz pour minimiser les battements.
- ▶ Stockage >1s: 8 décembre 2022



Démarrage de l'anneau (Recherche de la fréquence)

- ▶ Nombreuses tentatives de stocker à des fréquences plus basses.
- ▶ Stockage possible jusqu'à ~500.27MHz mais pas en dessous.
- ▶ Conclusion: l'anneau est trop court!
 - Explications dans la présentation et le poster de Lisa Soubirou...

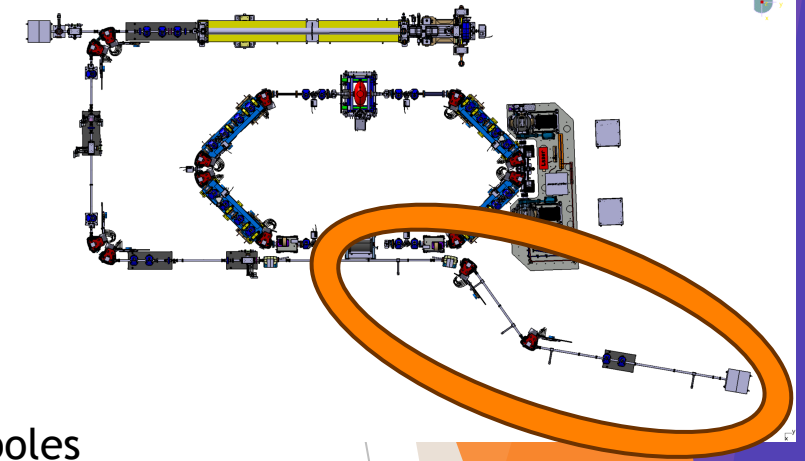


Démarrage ligne d'extraction

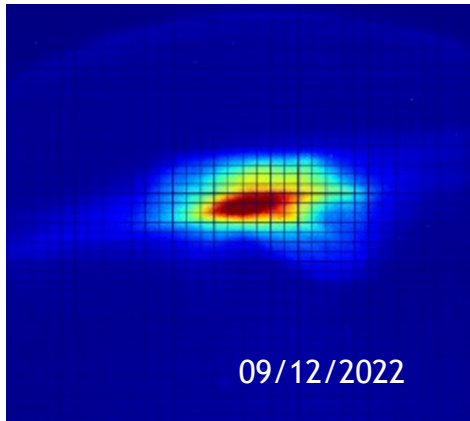


- ▶ Amène le faisceau à l'arrêt
- ▶ Permet de mesurer le faisceau après son passage dans l'anneau.

- ▶ 2 Dipoles
- ▶ 7 Quadrupoles
- ▶ 4 Correcteurs



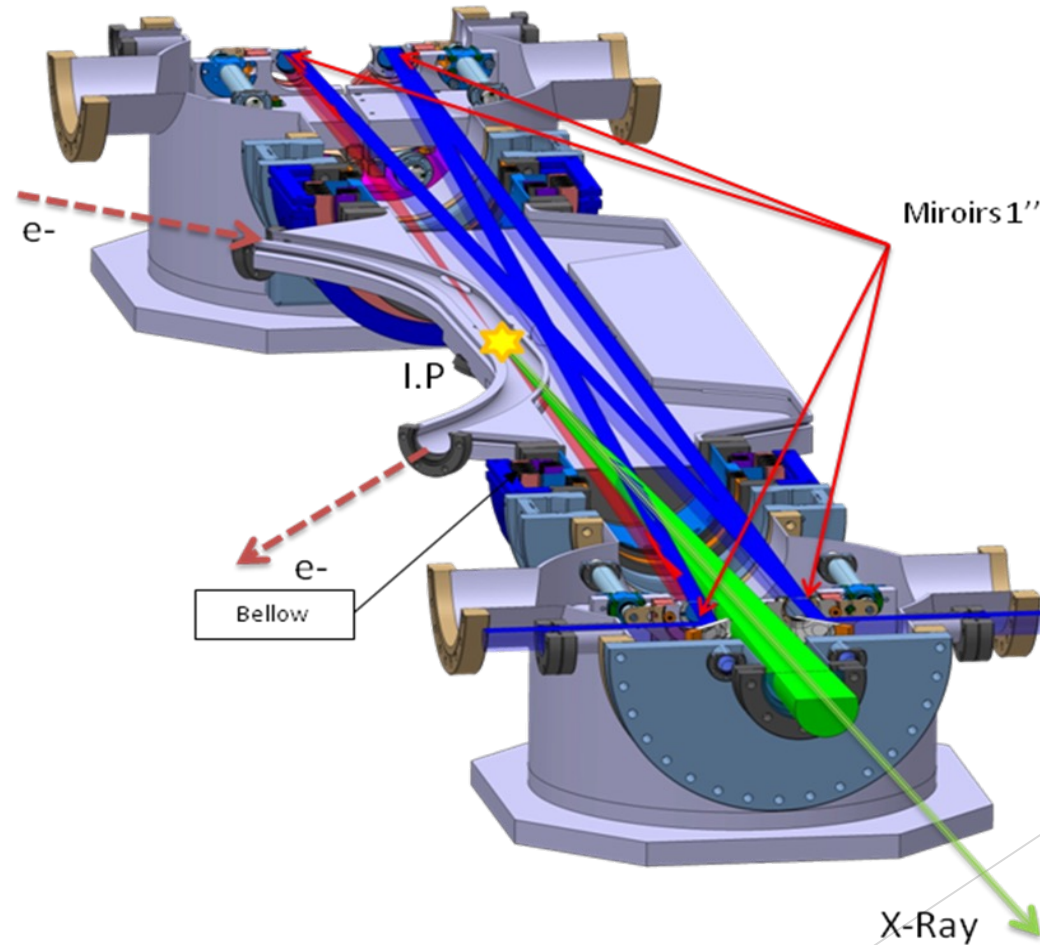
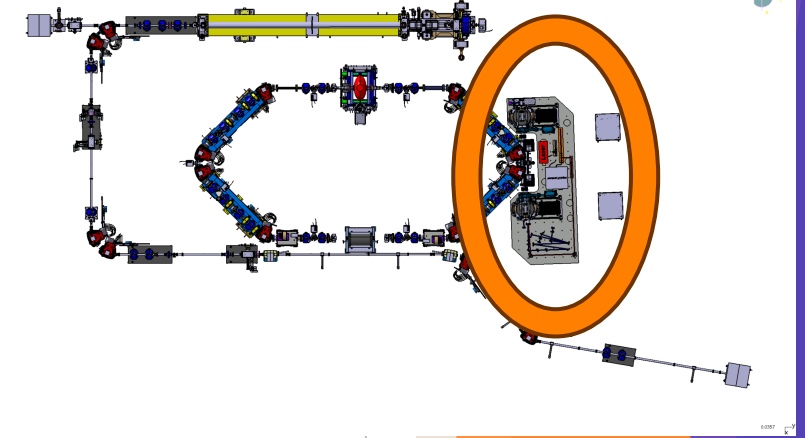
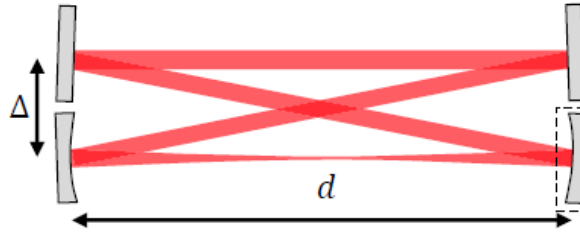
- ▶ 1 BPM
- ▶ 1 Diagnostic stations
- ▶ 1 Coupelle de Faraday



- ▶ Autorisation ASN: Août 2022
- ▶ 1^{er} faisceau (sans anneau): décembre 2022.
- ▶ 1^{er} faisceau (avec anneau): juin 2023.

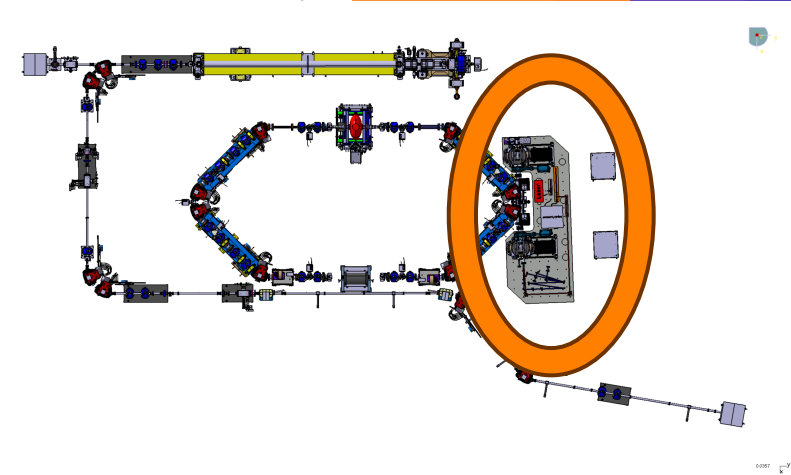
Cavité Fabry-Pérot

- ▶ Accumulation d'impulsions laser entre 4 miroirs.
- ▶ Fréquence de répétition: 33,3MHz (2x anneau)
=> Longueur = 8,994m
- ▶ Longueur d'onde: 1031nm
- ▶ Finesse: 40000
- ▶ Puissance injectée: 100W
- ▶ Puissance stockée (nominal): 1MW
- ▶ Interférence constructive => rétroaction active pour contrôler la longueur de la cavité (position des miroirs).



Mise en service de la cavité Fabry-Pérot

- ▶ Dans la casemate de ThomX:
 - 1^{er} verrouillage dans la casemate: juin 2023
 - Gain mesuré: 9500
 - Puissance stockée: 30kW
- ▶ En salle optique:
 - Puissance stockée: 80kW
- ▶ Sur prototype:
 - Puissance stockée (instable): 400kW
 - Puissance stockée (stable): 200kW
- ▶ Difficultés avec les hautes puissances: déformation thermoélastique des miroirs.



Ligne rayons-X

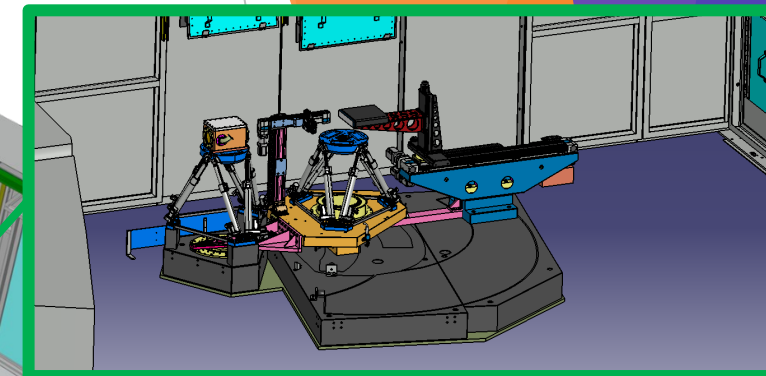
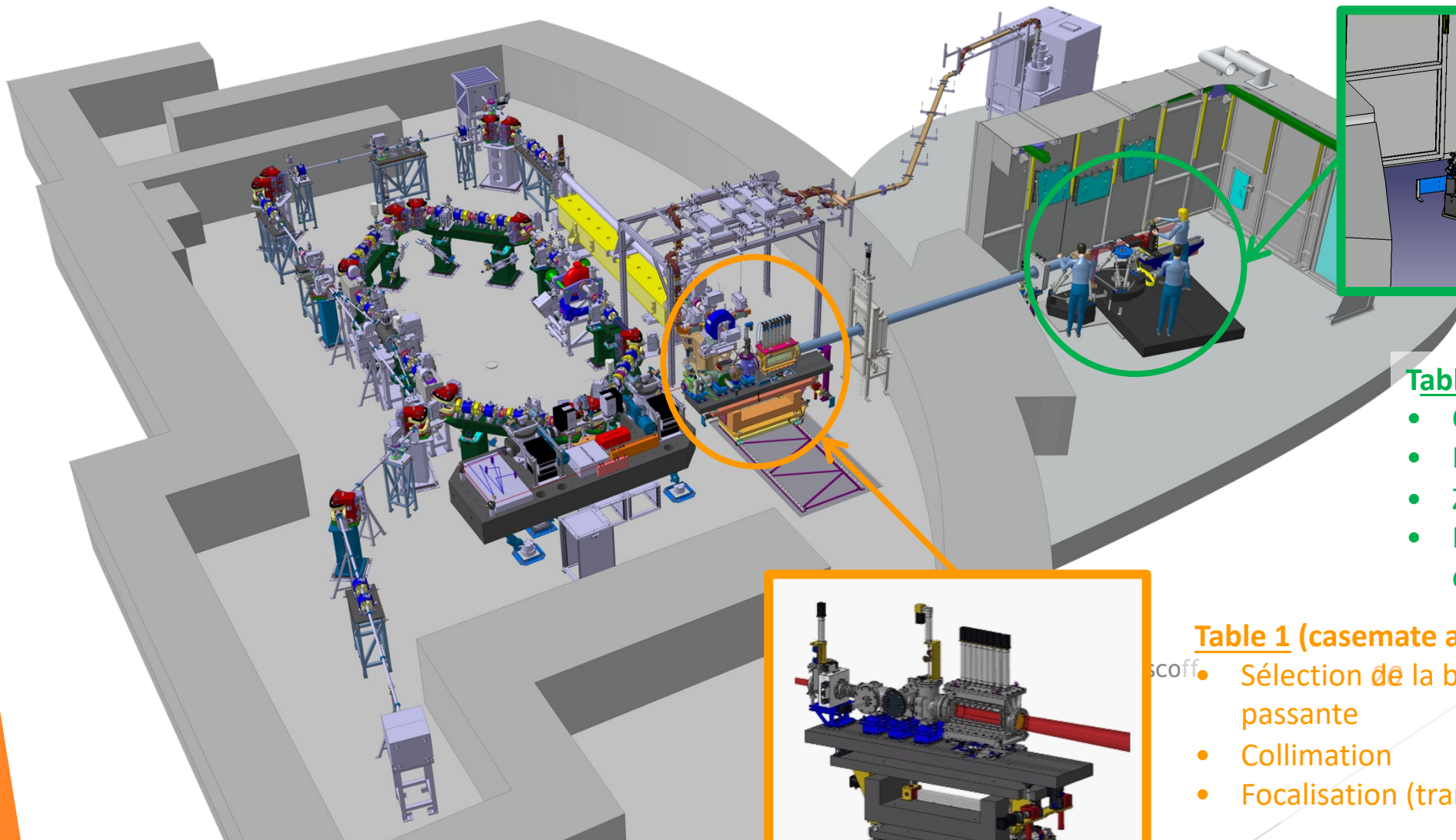


Table 2 (casemate dédié rayons-X)

- Caracterisation des rayons-X
- Monochromateur
- Zone expérimentale
- Detecteus (spectrometres, cameras à rayons-X, etc.)

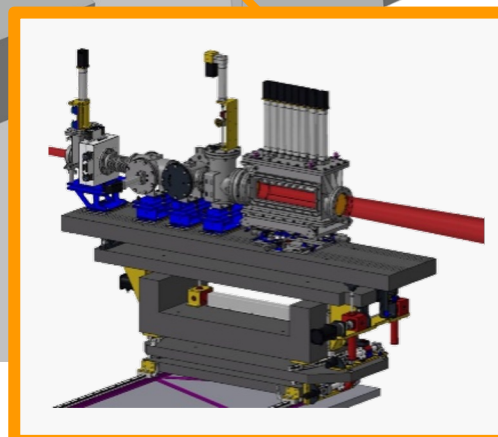


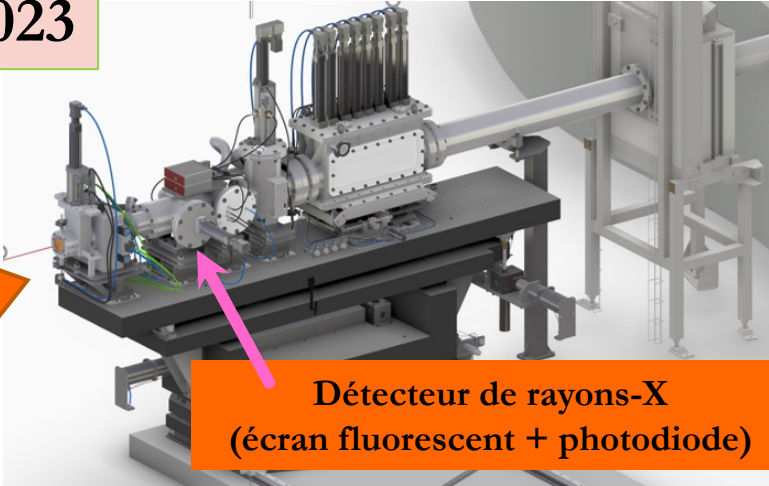
Table 1 (casemate accélérateur)

- Sélection de la bande passante
- Collimation
- Focalisation (transfocateur)

Premiers rayons X

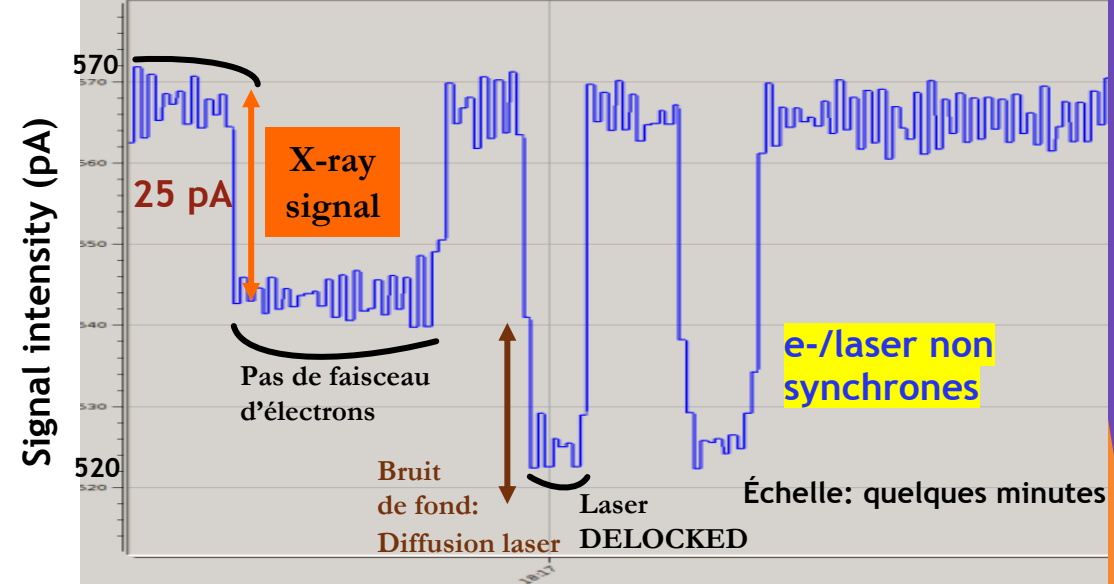
23 Juin 2023

Rayons X



Laser LOCKED (~25-30 kW stored)

Signal photodiode



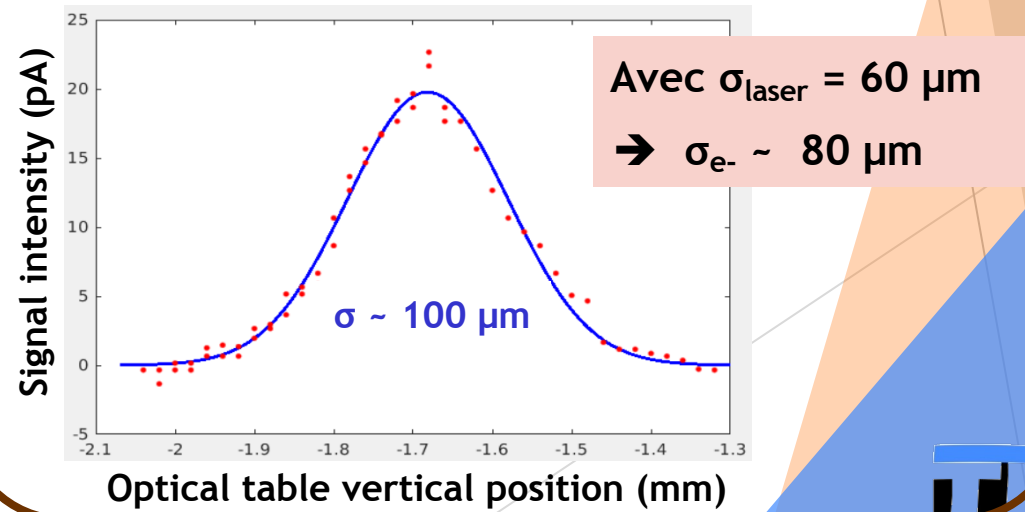
Flux mesuré

Flux mesuré = $\sim 6 \cdot 10^6$ ph/s
Attendu $\sim (4 - 10) \cdot 10^6$ ph/s

(Incertitude sur la charge du faisceau stocké)

Cavité Fabry-Pérot non synchrones avec les électrons.

Convolution des faisceaux



Premier spectre dans la casemate dédiée

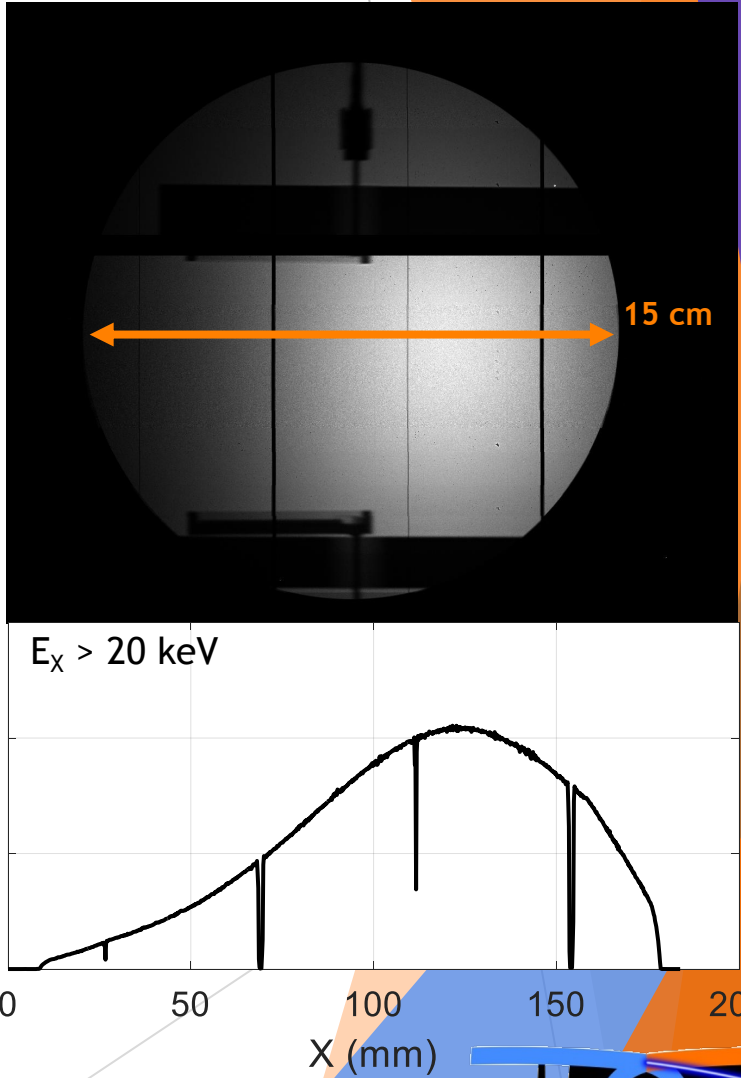
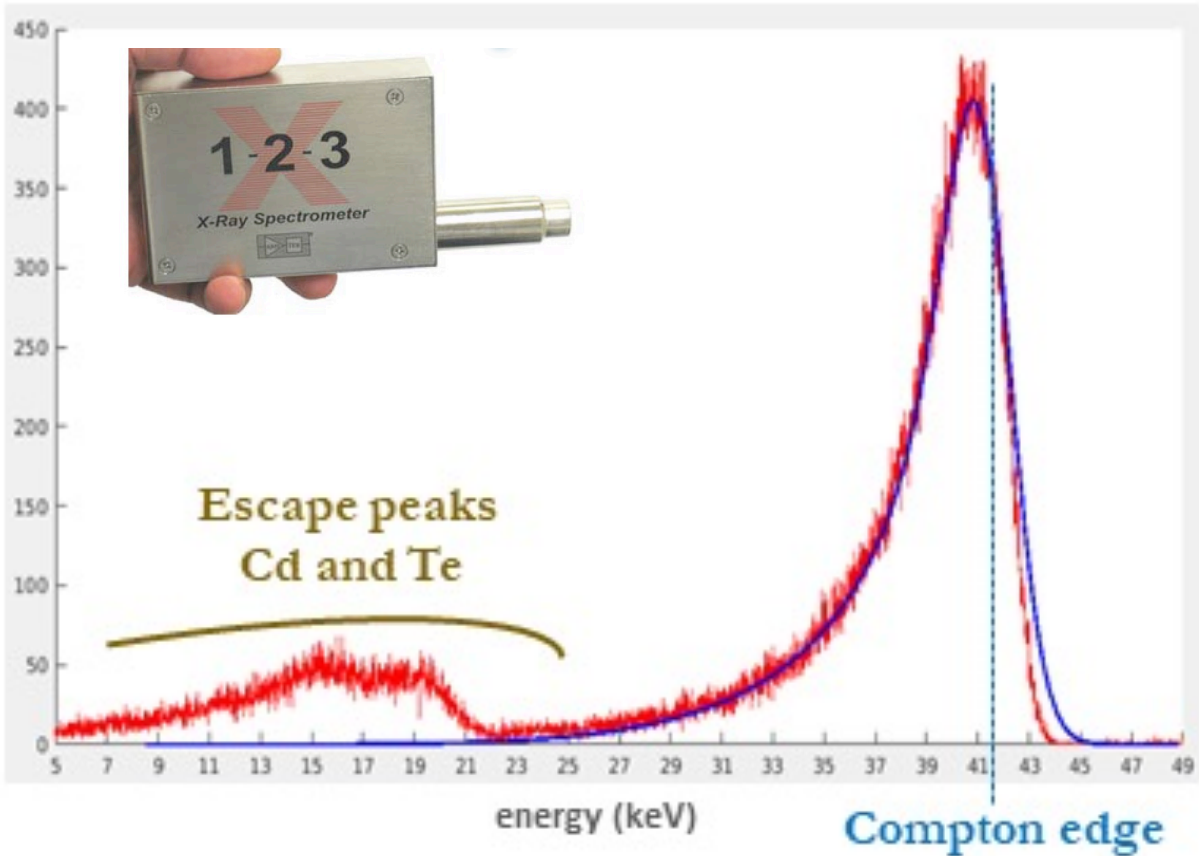
26 Juillet 2023

- ▶ Fin juillet 2023: autorisation ASN d'envoyer des rayons X dans la casemate dédiée.

Pixel Camera CdTe

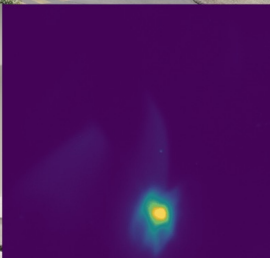
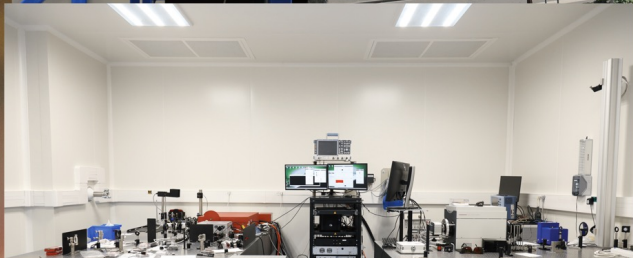
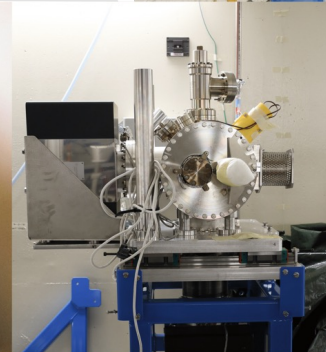
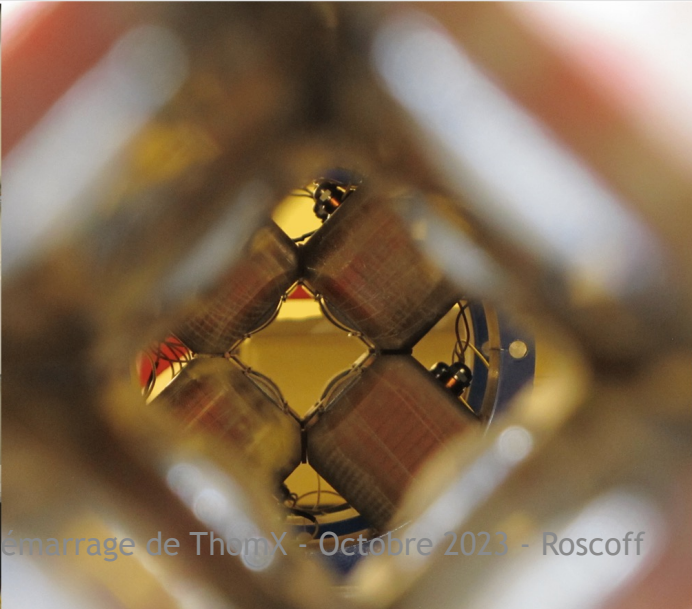
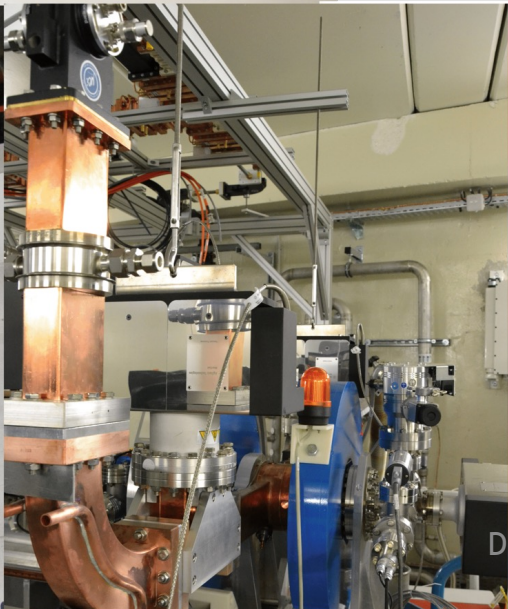
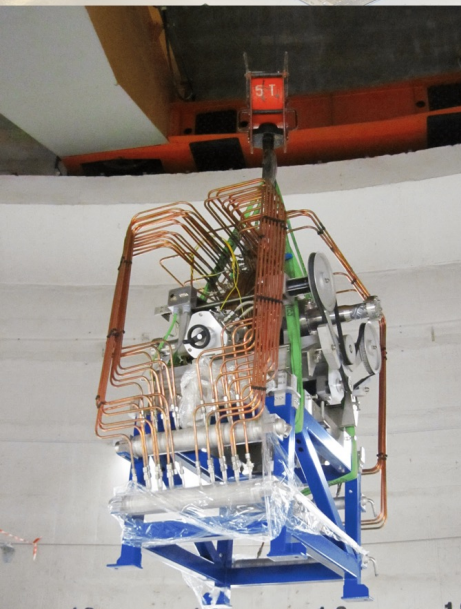
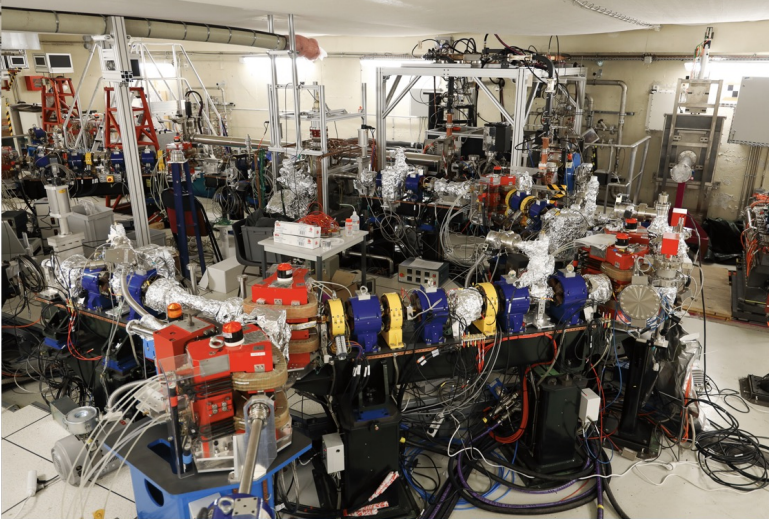
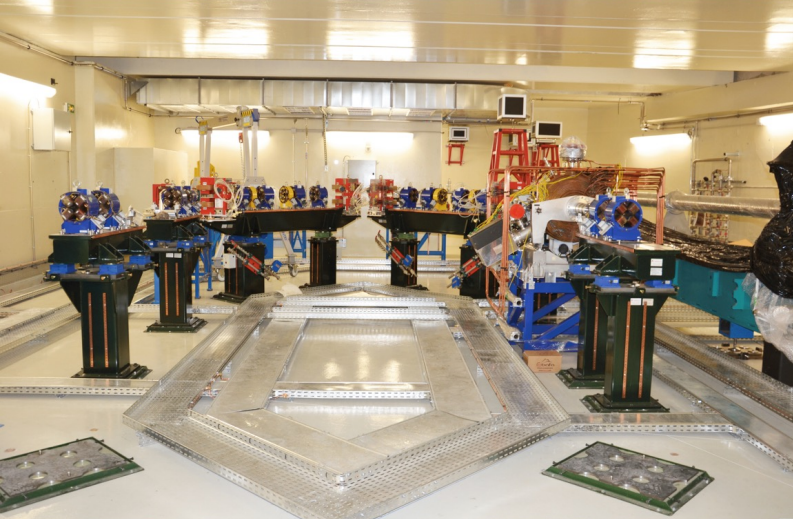
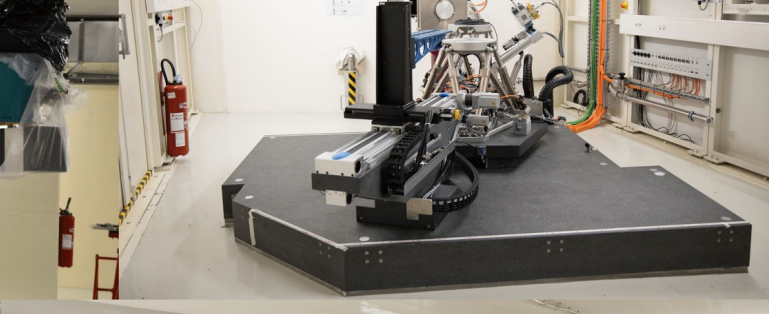
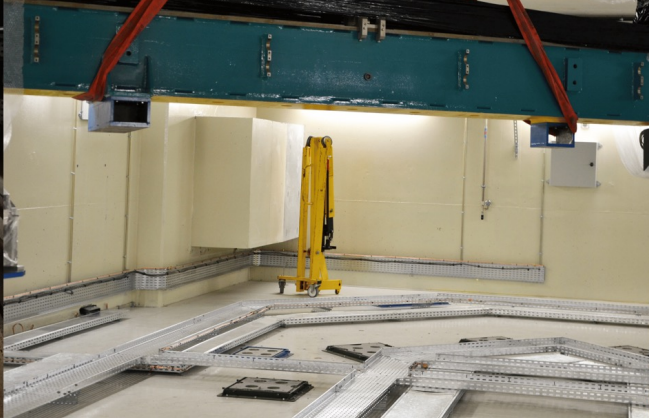


Spectromètre CdTe



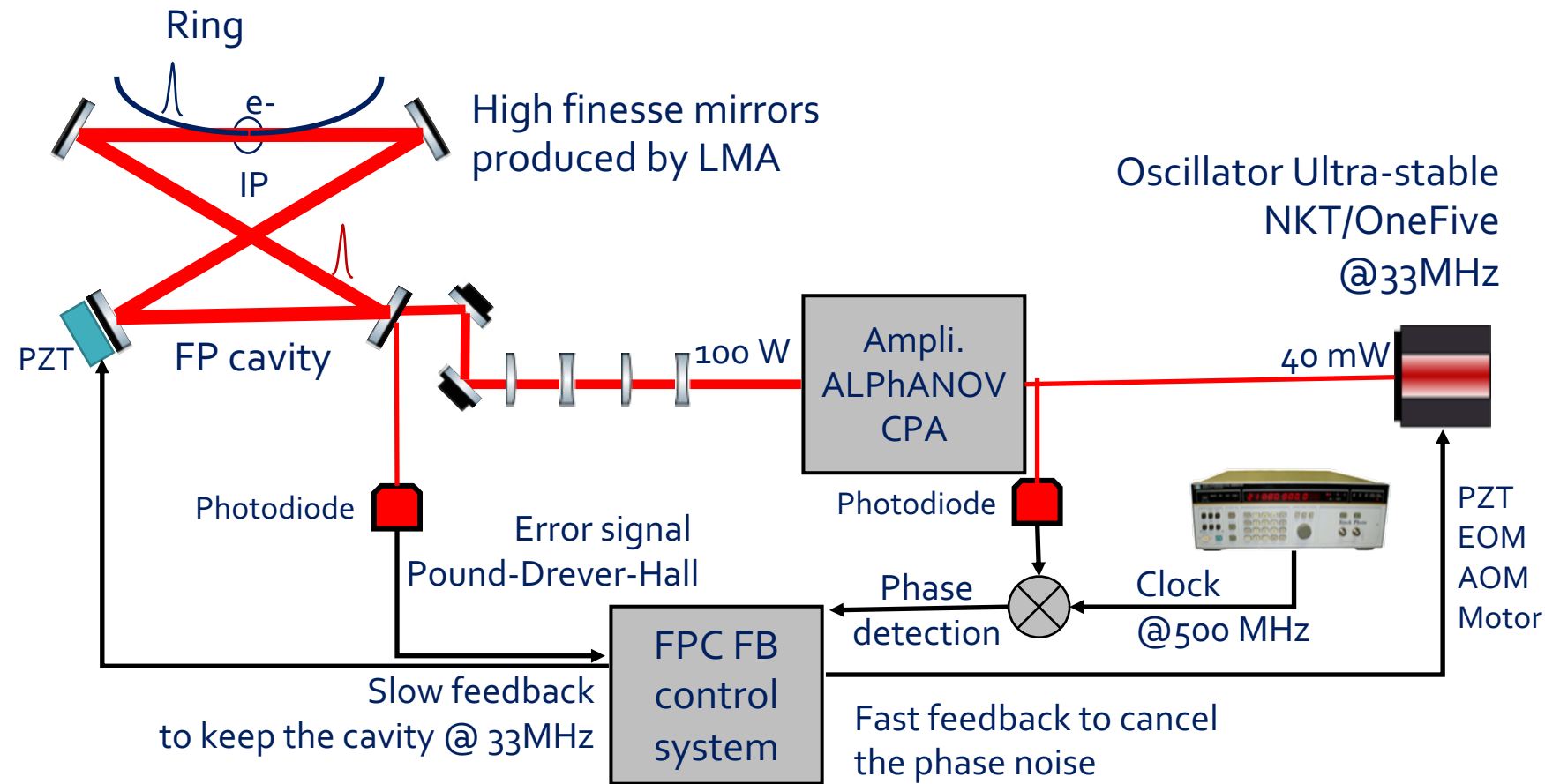
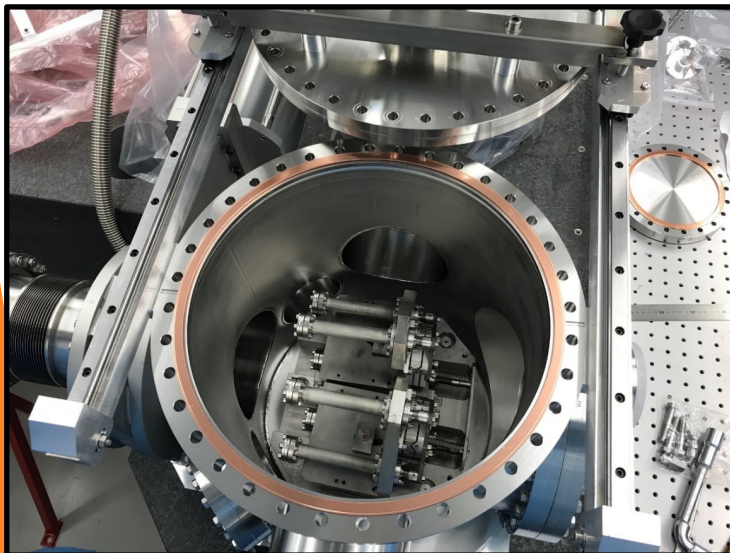
Perspectives

- ▶ ThomX est une source de rayons X tenant dans 200m².
- ▶ Le démarrage de ThomX avance bien.
- ▶ Les premiers rayons X ont été observés et mesurés.
- ▶ La cadence est fortement dictée par l'ASN!
- ▶ ThomX est une machine prototype avec des surprises.
- ▶ Équipe en charge du démarrage de petite taille mais aide importante de nos partenaires (en particulier SOLEIL).
- ▶ Prochaines étapes:
 - Amélioration de la machine
 - Production de rayons X synchrones
 - Expériences pour caractériser le faisceau et qualifier nos systèmes pour différentes techniques d'analyse
 - Installation d'une nouvelle section accélératrice => 70MeV
 - Passage à 1nC



Démarrage de ThomX - Octobre 2023 - Roscoff

Optical system of the Fabry-Perot cavity



vacuum : 10^{-9} mbar
Cleanliness specification : ISO5