



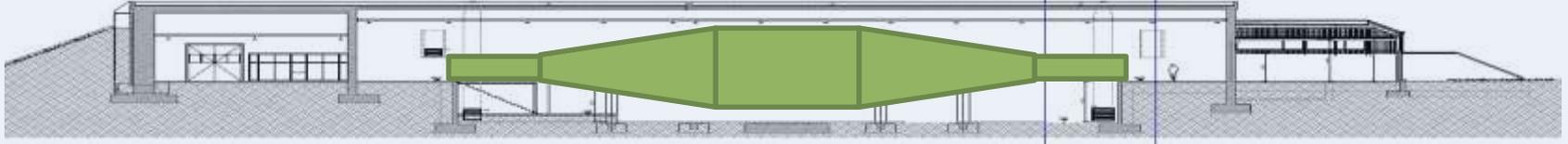
Les lignes d'irradiation PRECy au sein de la plateforme Cyrcé

Journées Accélérateurs 2021 de la SFP
13 au 15 octobre 2021

Emil Traykov et Michel Pellicioli

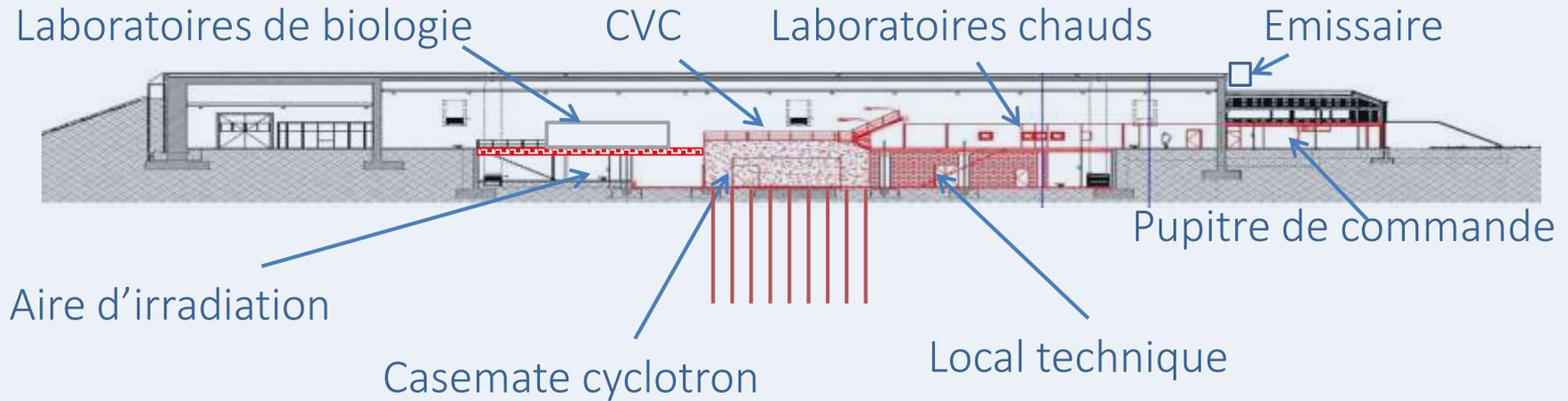
Le projet Cyrcé à l'IPHC : Historique

Jusqu'en 2003



- 2003 : Arrêt du Vivitron, accélérateur électrostatique pour la physique nucléaire
- 2005 : Démantèlement
- 2009 : obtention d'un CPER pour l'installation d'un cyclotron médical

Le projet Cyrcé à l'IPHC : Historique

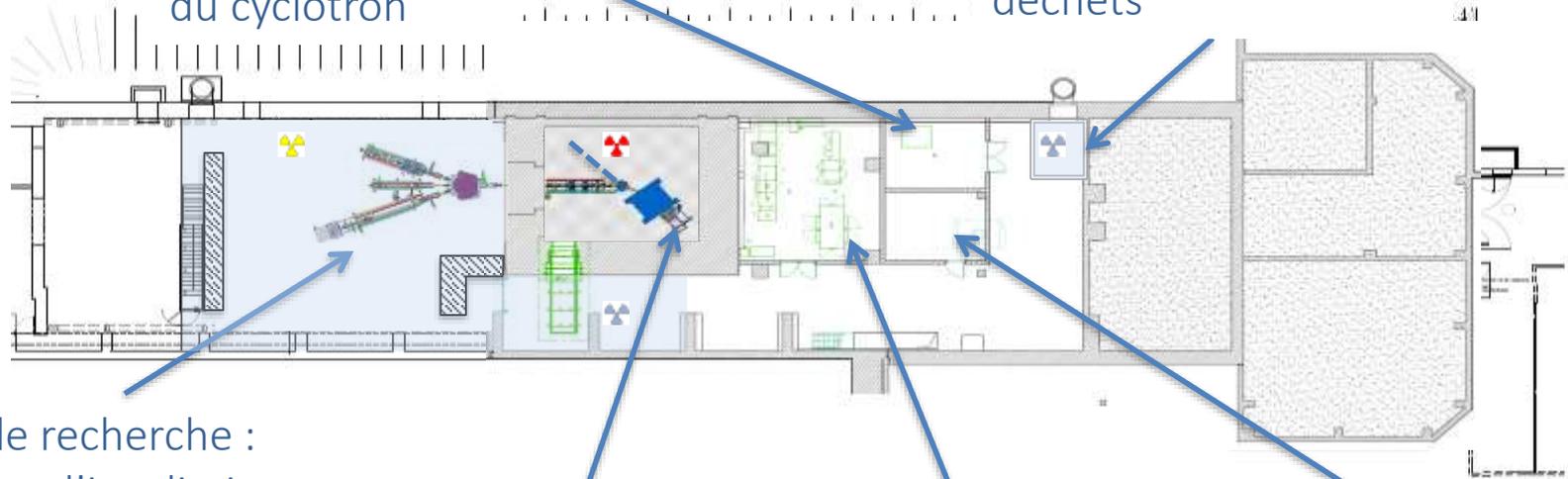


- 2012 : Premiers faisceaux (protons de 16 à 25MeV)
- Production d'isotopes pour l'imagerie TEP (F-18, Cu-64, Zr-89)
- 2016 : Premier programme de radiobiologie avec l'irradiation de tumeurs sous cutanée chez la souris
- 2018 : Second CPER pour la construction d'une aire d'irradiation

Vue du sous-sol

Groupe de
refroidissement
du cyclotron

Zone de stockage de
déchets



Aire de recherche :
2 lignes d'irradiation,
pour la physique
et la radiobiologie
Projet Precy

Ciblerie

Aire technique :
Alimentation
cyclotron

Atelier

Cyclotron : TR24 (ACSI)

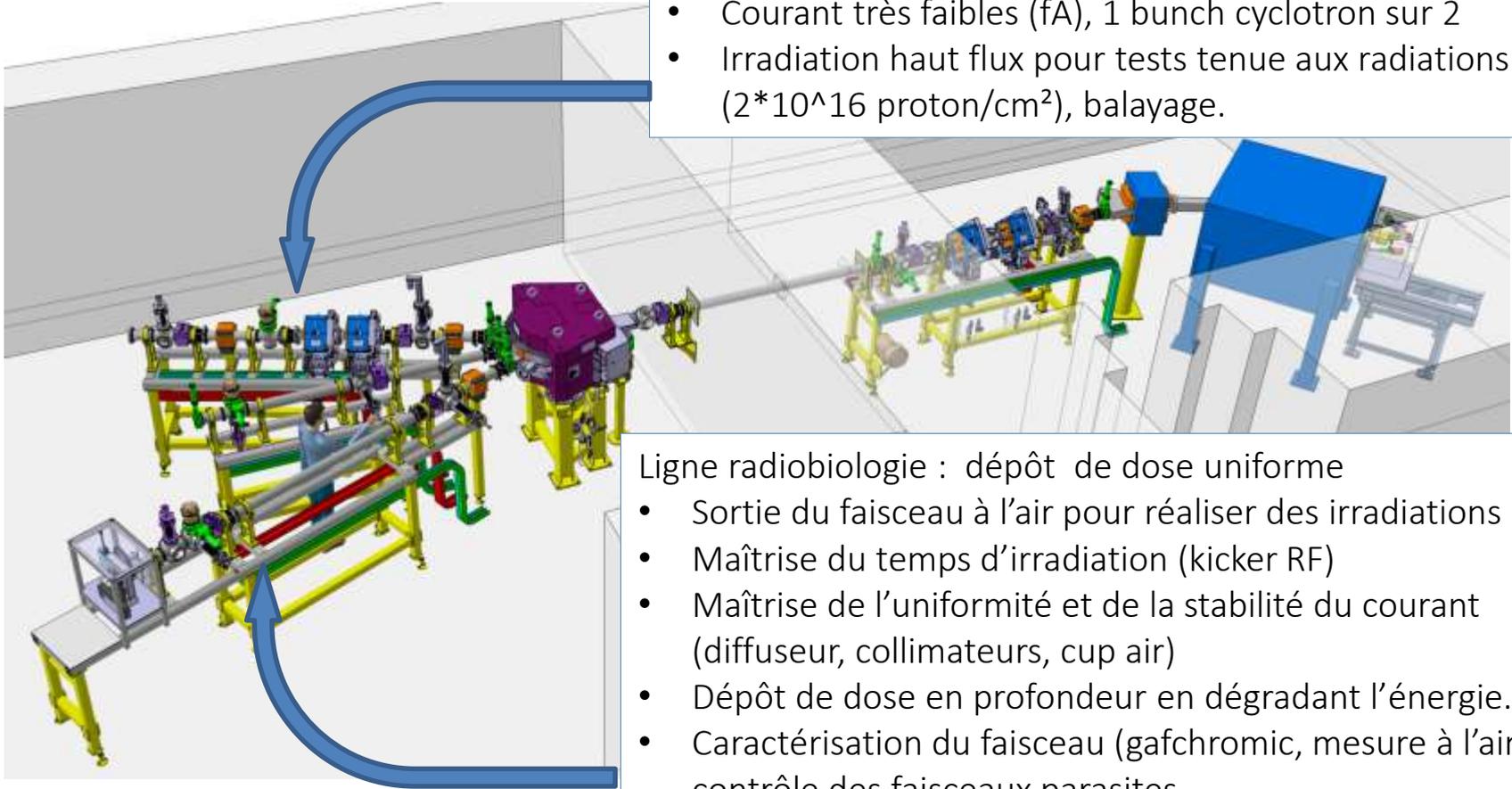
- Protons d'énergie comprise entre 16 MeV et 25 MeV
- Courant max $300\mu\text{A}$, $100\mu\text{A}$ autorisé sur cible, 100nA dans aire de recherche
- 2 ports d'extraction, 4 gaps accélérateurs (50kV, 85 MHz)
- Source externe, extraction par feuille de stripper



Vue 3D de l'installation

Ligne CMS : Mise au point de capteurs

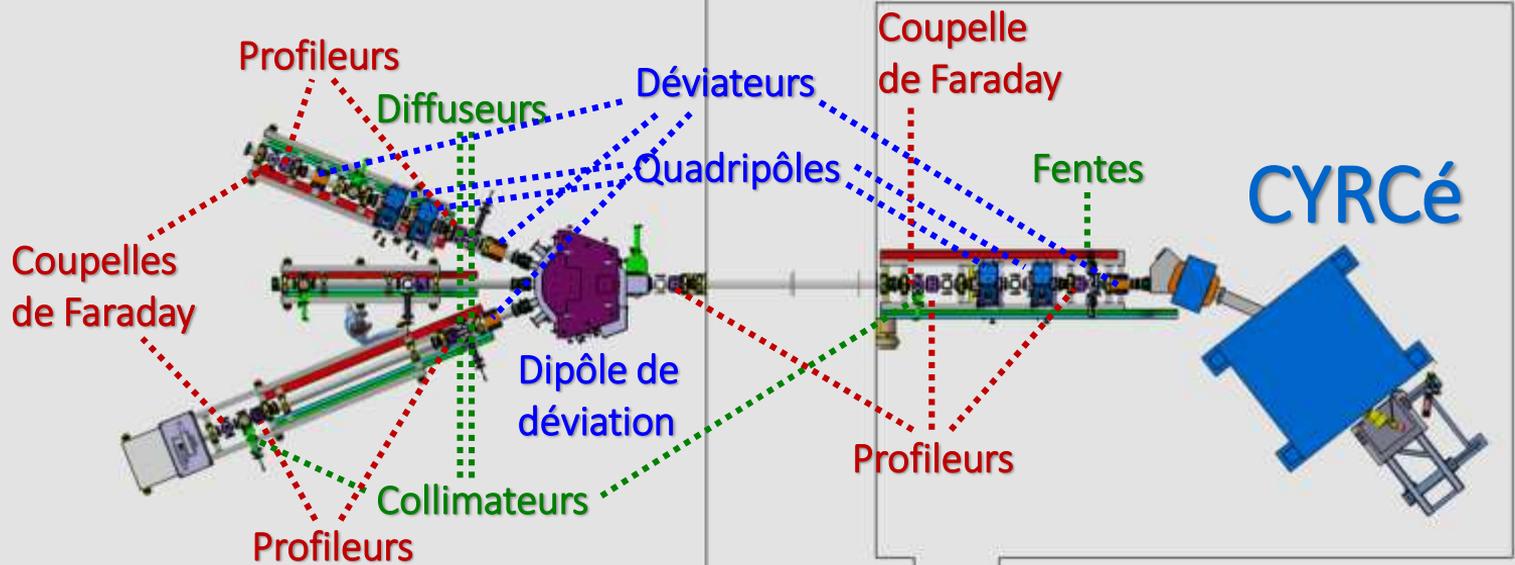
- Courant très faibles (fA), 1 bunch cyclotron sur 2
- Irradiation haut flux pour tests tenue aux radiations ($2 \cdot 10^{16}$ proton/cm²), balayage.



Ligne radiobiologie : dépôt de dose uniforme

- Sortie du faisceau à l'air pour réaliser des irradiations
- Maîtrise du temps d'irradiation (kicker RF)
- Maîtrise de l'uniformité et de la stabilité du courant (diffuseur, collimateurs, cup air)
- Dépôt de dose en profondeur en dégradant l'énergie.
- Caractérisation du faisceau (gafchromic, mesure à l'air), contrôle des faisceaux parasites.

Etudes de conception des lignes de faisceau



Éléments magnétiques

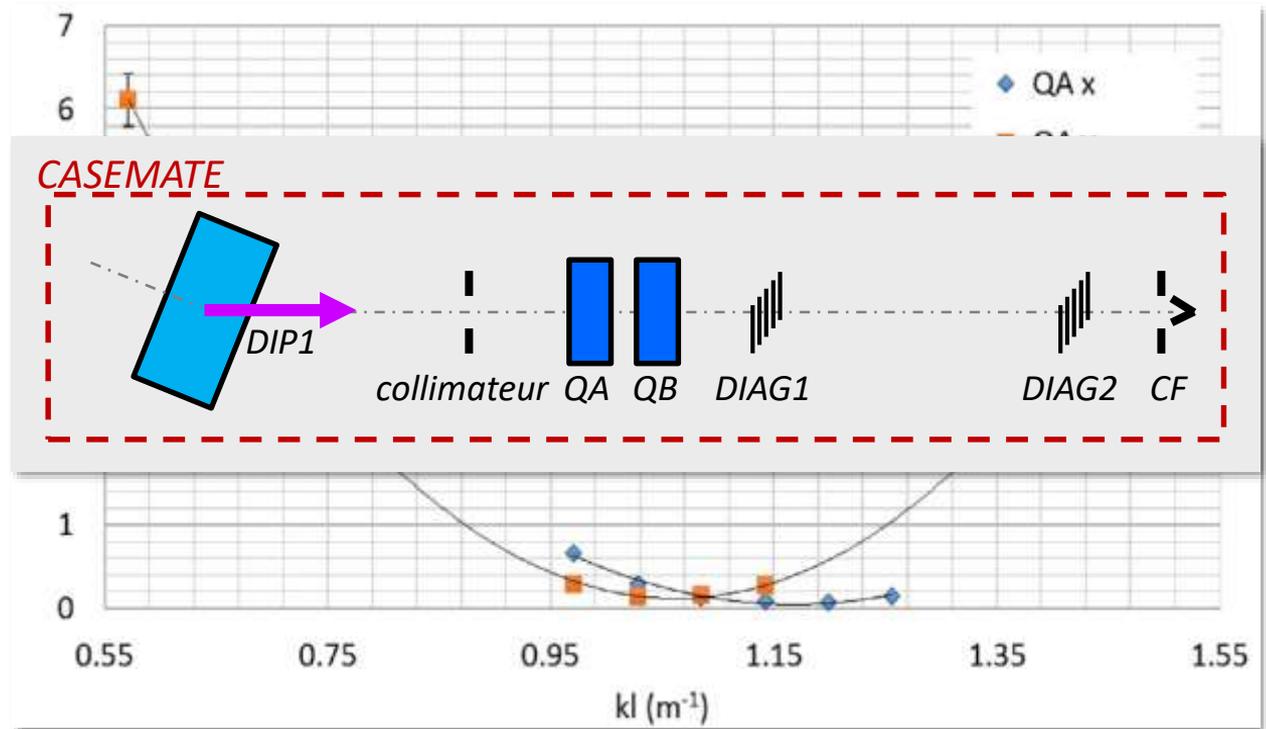
Limites sur les émittances de faisceau
pour définir les dimensions radiales

Diagnostic faisceau



Techniques utilisées

- Quad scan
- Fente / profileur
- Multi-profileurs



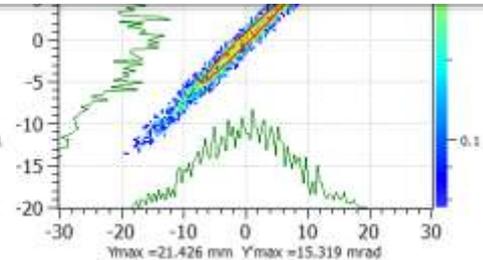
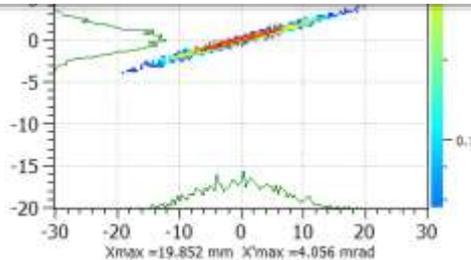
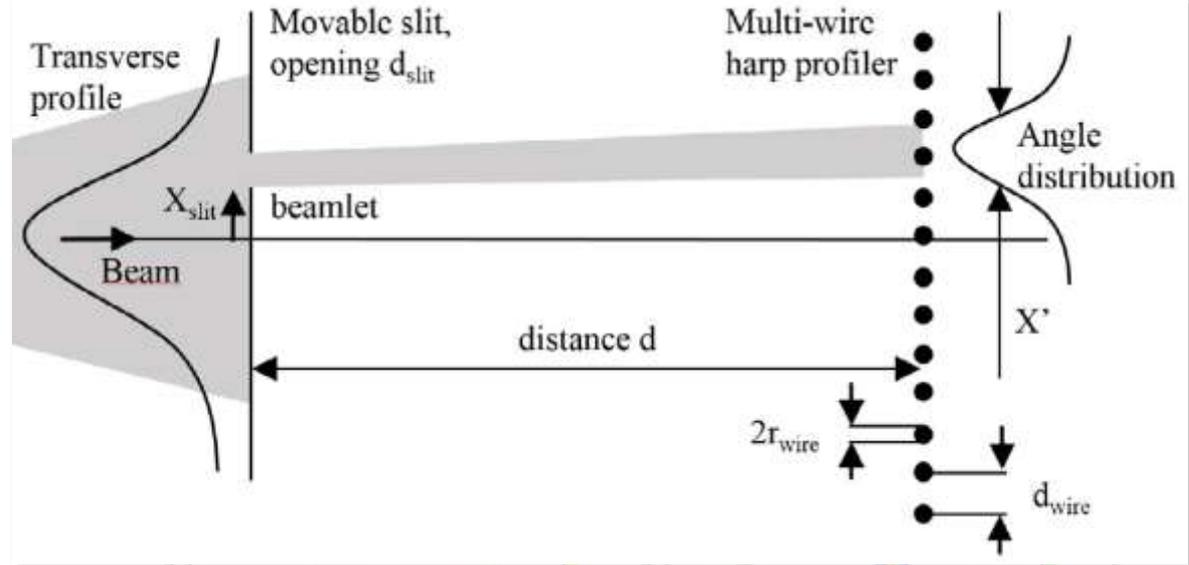
Beam size values vs strength of quadrupole QA

Mesures d'émittances des faisceaux CYRCé

Techniques utilisées

- Quad scan
- Fente / profileur
- Multi-profileurs

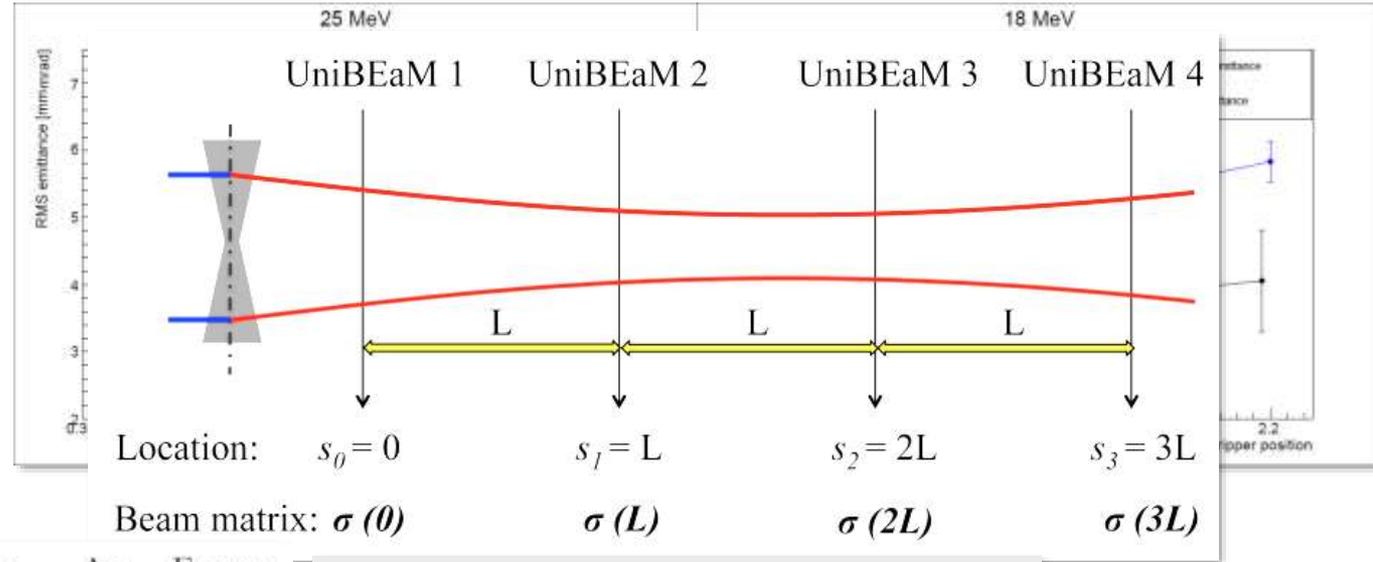
Slit/Profileur measurements 01-2017



Mesures d'émittances des faisceaux CYRCé

Techniques utilisées

- Quad scan
- Fente / profileur
- Multi-profileurs



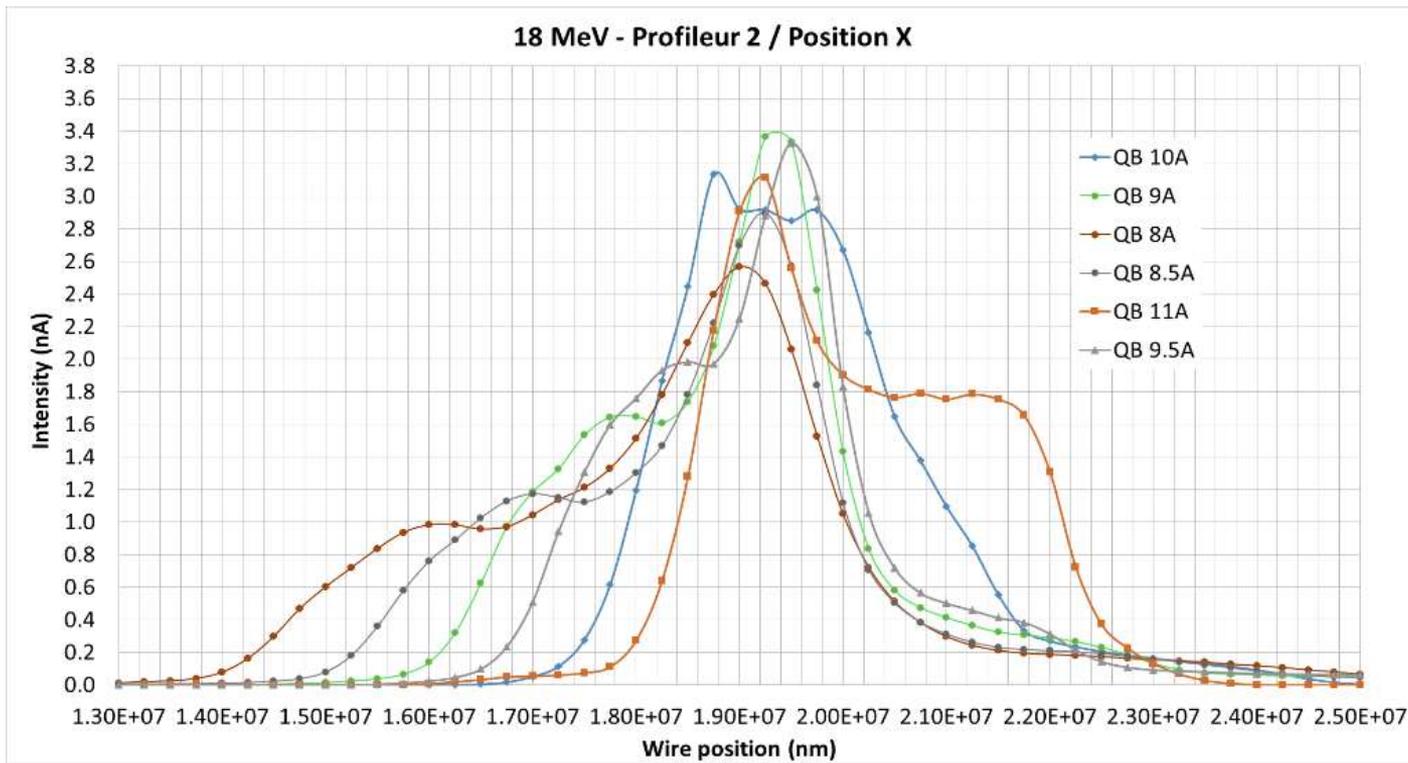
Method	ϵ_x	$\Delta\epsilon_x$	ϵ_y	$\Delta\epsilon_y$	Energy
Quad scan	1.90	1.30	3.70	1.40	25
Slit and grid	1.40	0.20	5.40	0.20	25
Multiple profilers	3.03	0.22	5.96	0.16	25
Multiple profilers	5.81	0.48	6.94	0.19	18

$\leq 6 \pi$ mm.mrad at 25 MeV

Transverse beam emittance studies of the CYRCé TR24 cyclotron.
E.Bouquerel, *et al.*, NIM A, Volume 931, 1 July 2019, page 151-157

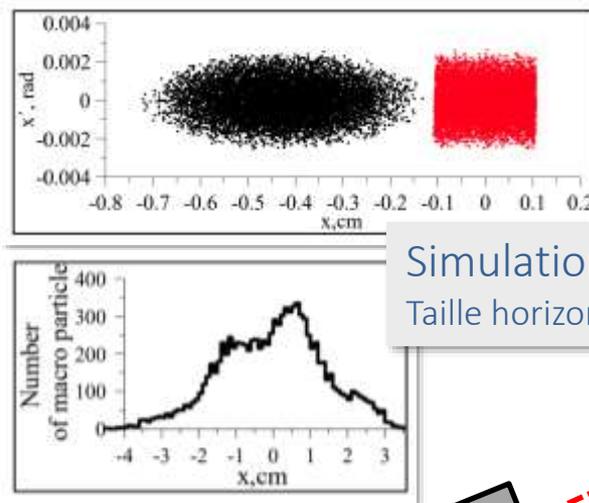
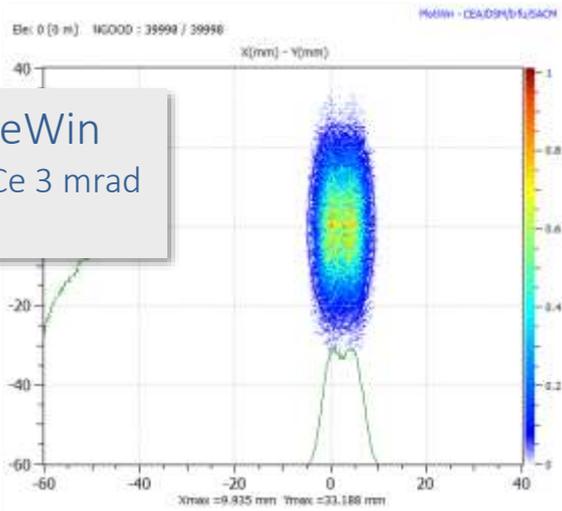
Structures horizontales de faisceau

Mesures d'émittances

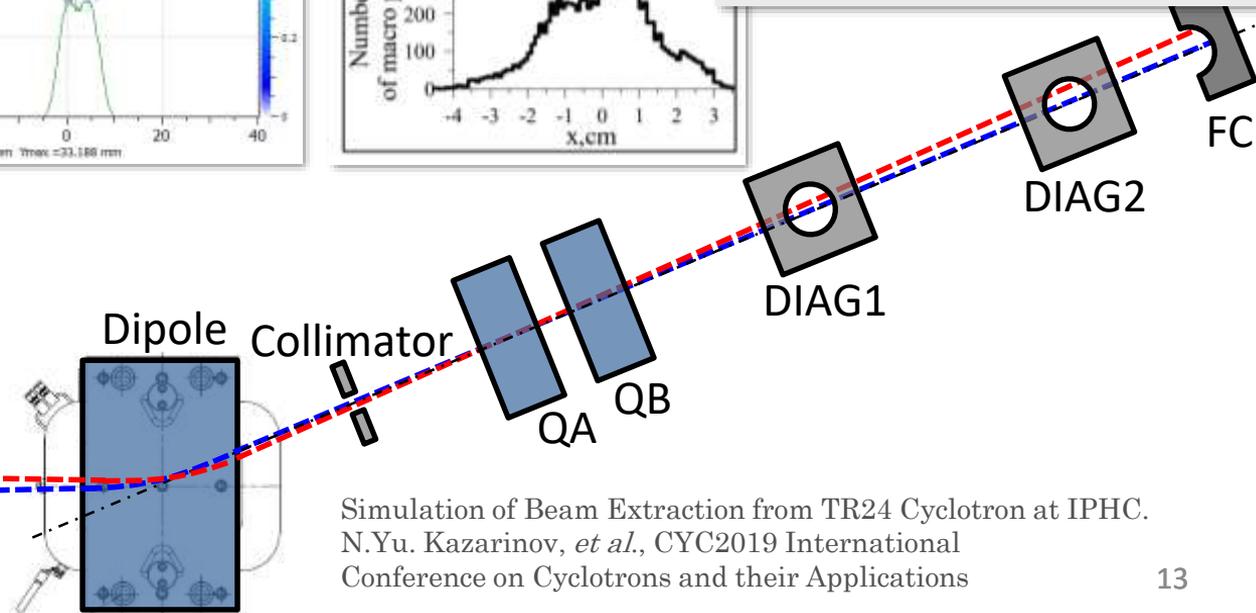
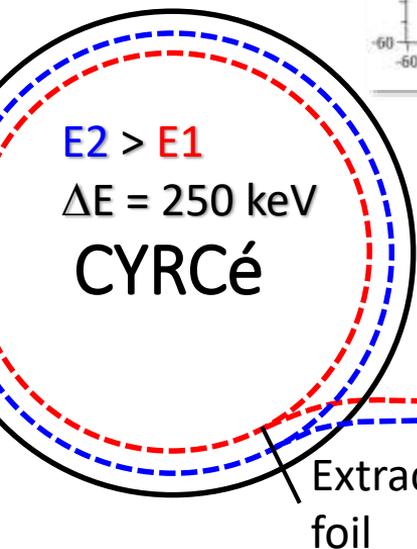


Structures horizontales de faisceau

Simulations TraceWin
Déviation sortie CYRCe 3 mrad
 $dE = 250$ keV



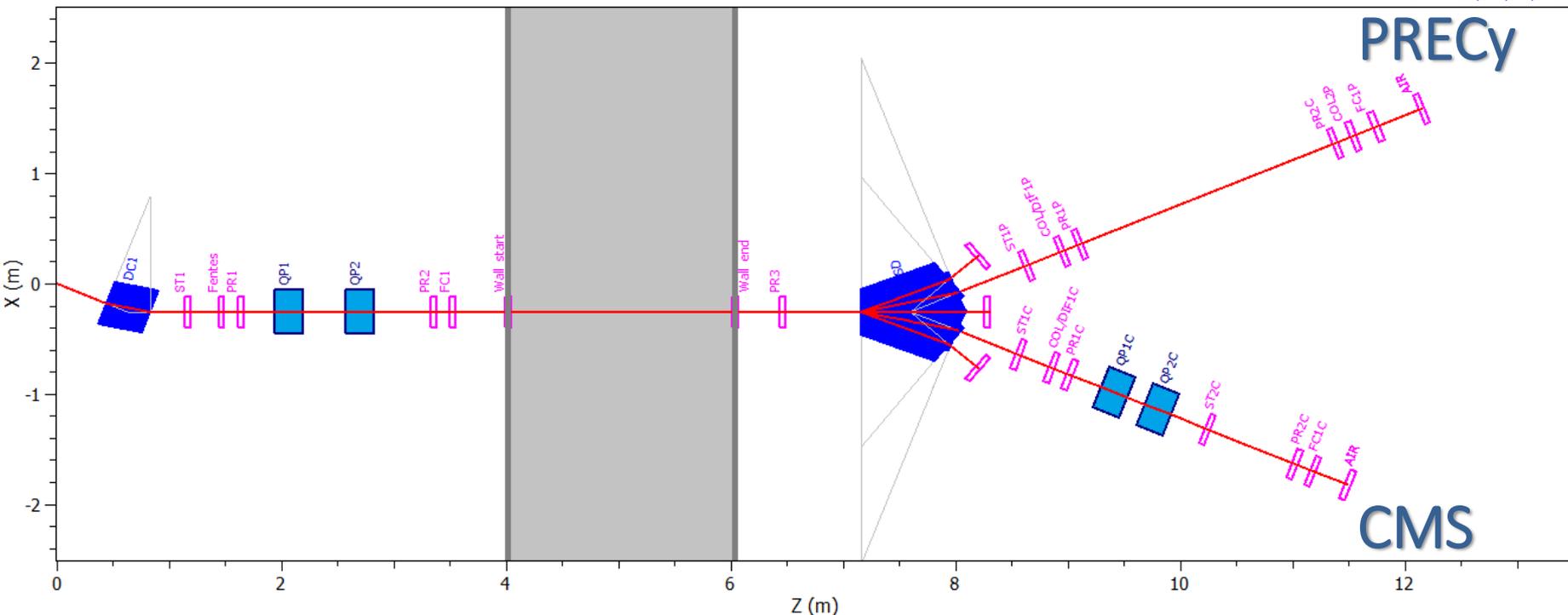
Simulations FLNR/JINR
Taille horizontale > pas de l'orbite



Simulation of Beam Extraction from TR24 Cyclotron at IPHC.
N.Yu. Kazarinov, *et al.*, CYC2019 International
Conference on Cyclotrons and their Applications

Dynamique faisceau pour les lignes CYRCé

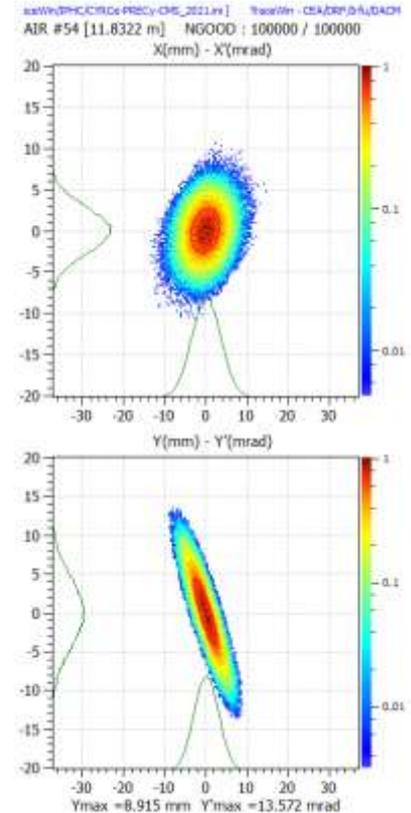
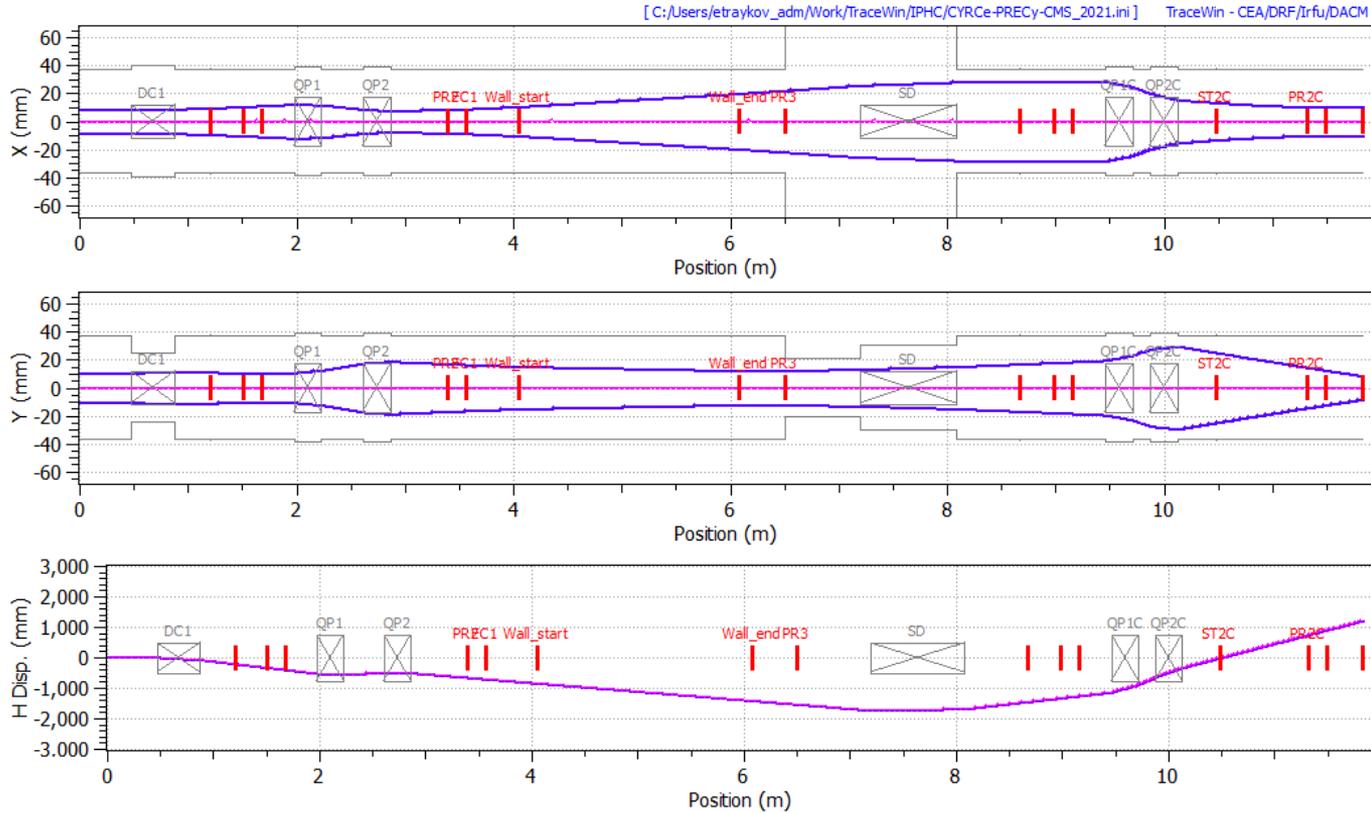
TraceWin - CEA/DRF/Irfu/DACM



Design of a Beamline From a TR24 Cyclotron for Biological Tissues Irradiation.

E. Bouquerel, *et al.*, IPAC2017 Proceedings, <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2017-MOPIK030>

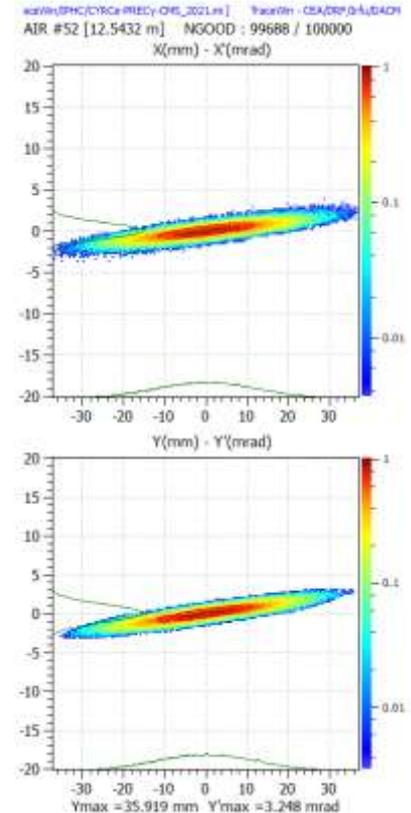
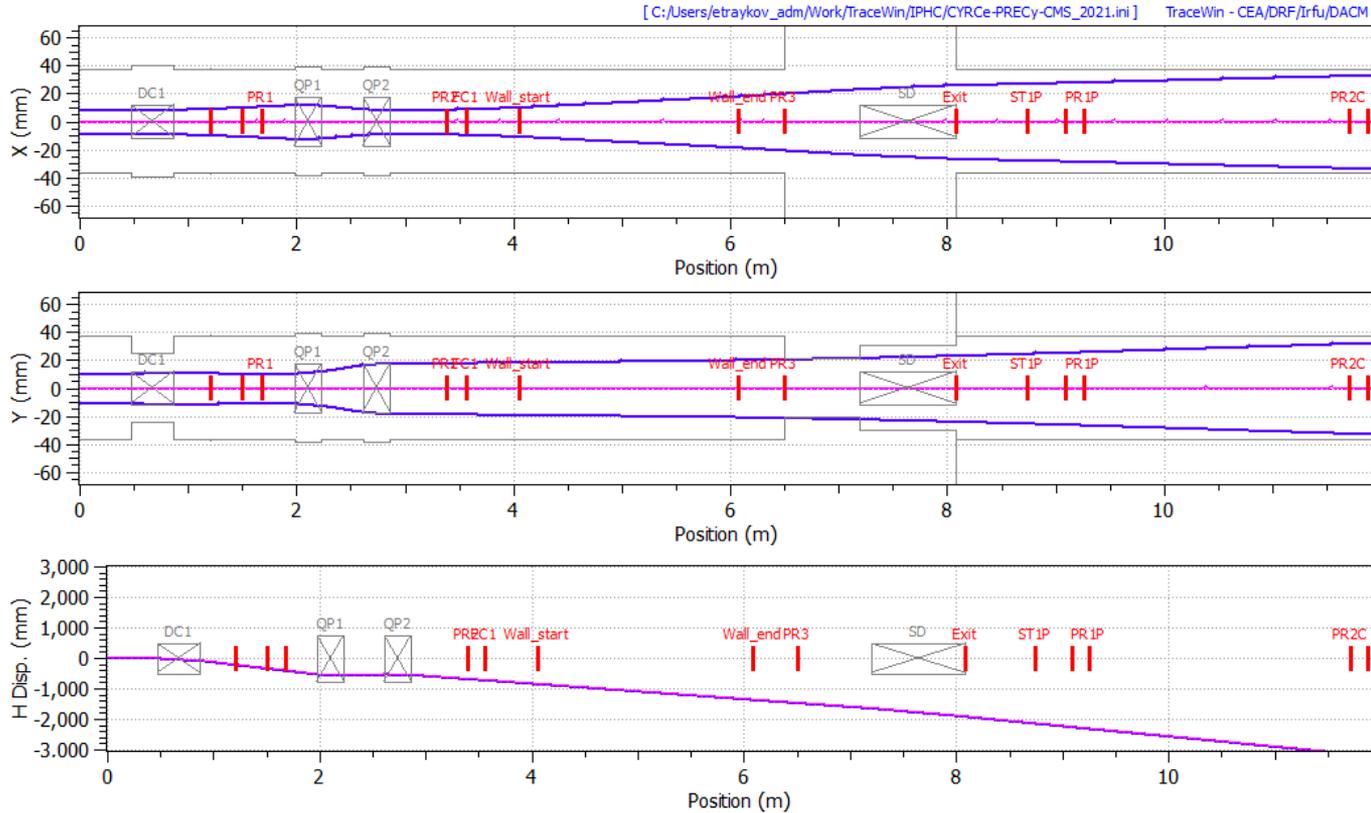
Transport vers la ligne CMS



Design of a Beamline From a TR24 Cyclotron for Biological Tissues Irradiation.

E. Bouquerel, *et al.*, IPAC2017 Proceedings, <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2017-MOPIK030>

Transport vers la ligne PRECy

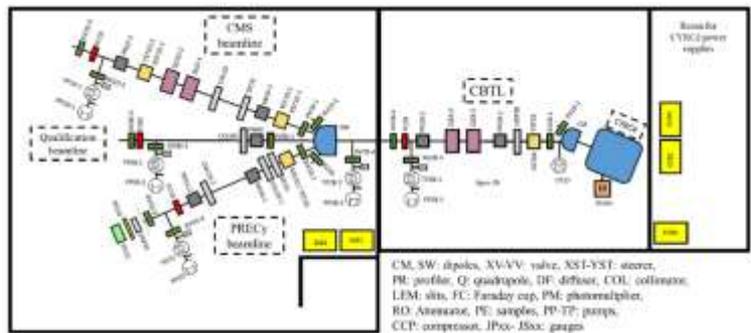


Design of a Beamline From a TR24 Cyclotron for Biological Tissues Irradiation.

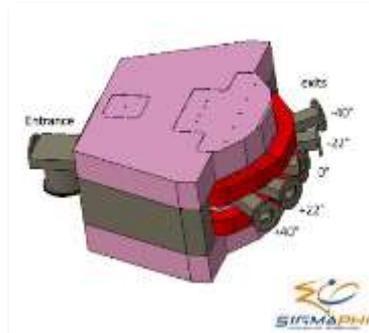
E. Bouquerel, *et al.*, IPAC2017 Proceedings, <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2017-MOPIK030>

Mise en service des lignes - Janvier 2020

Contrôle-commande



Aimants



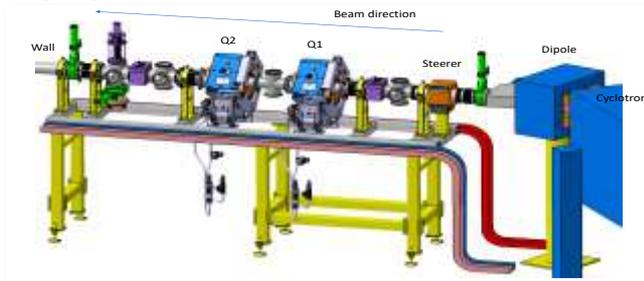
Lignes faisceau utilisateurs



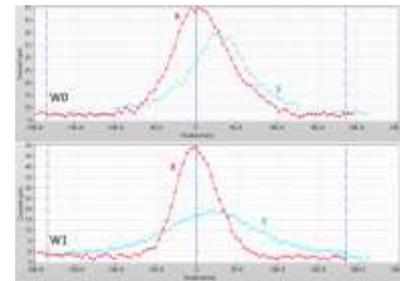
Diagnostic de faisceau



Ligne faisceau commun



Réglage



Tout est fait en interne à l'IPHC sauf les aimants (Sigmaphi)
Hadronthérapie, Plateforme CYRCé, Service Mécanique, Instrumentation des Accélérateurs,
Systèmes de Mesure et d'Acquisition, Service de Radioprotection et Service Informatique

Design and commissioning of the first two CYRCé extension beamlines.
E. Bouquerel, *et al.*, to be submitted to Nuclear Instruments and Methods

Focus sur 3 dispositifs développés à l'IPHC Pour la ligne de radiobiologie

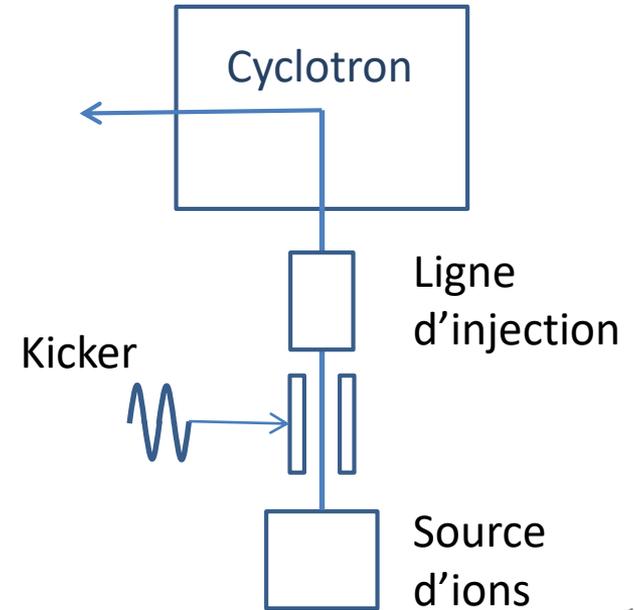
Kicker de faisceau RF

Cup Air

Protection contre les protons diffusés parasites

Kicker de faisceau RF

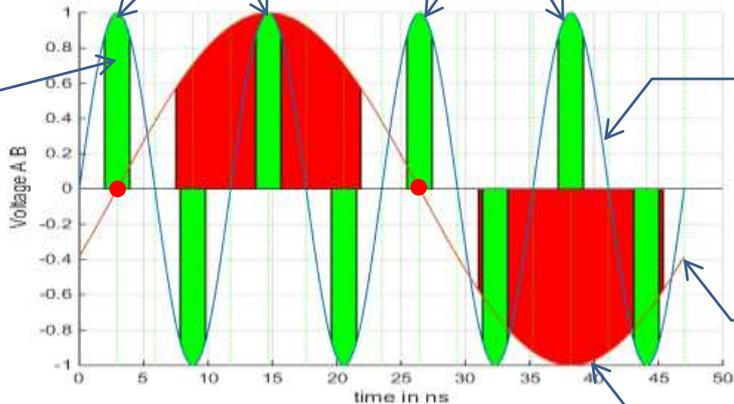
- But double :
 - Maitriser les dépôts de dose donc les temps d'irradiation. Besoin de couper le faisceau en quelques μs .
 - Couper 1 bunch sur 2 pour avoir une fréquence de répétition proche de celle du CERN (40MHz) pour le test des capteurs CMS.
- Moyen d'y parvenir
 - Tension RF au quart de la fréquence cyclotron appliquée sur un déflecteur dans la ligne d'injection du cyclotron pour peupler ou dépeupler l'acceptance en phase du cyclotron.



Kicker de faisceau RF : mode 1 sur 2

Bunchs rejetés

Bunchs conservés



Onde RF cyclotron
(champ accélérateur)

Onde RF kicker

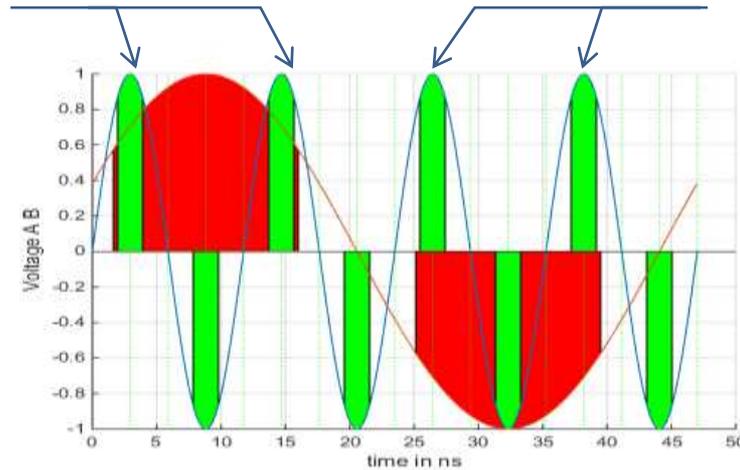
En vert :
Plages d'acceptance en
phase du cyclotron

En rouge :
Plage de déviation du
faisceau par le déflecteur

➤ Mode 'CMS' : Suppression d'un paquet sur deux
(fréquence de répétition des bunchs à 42.5MHz au lieu de 85)

Kicker de faisceau RF : Suppression de tous les bunchs

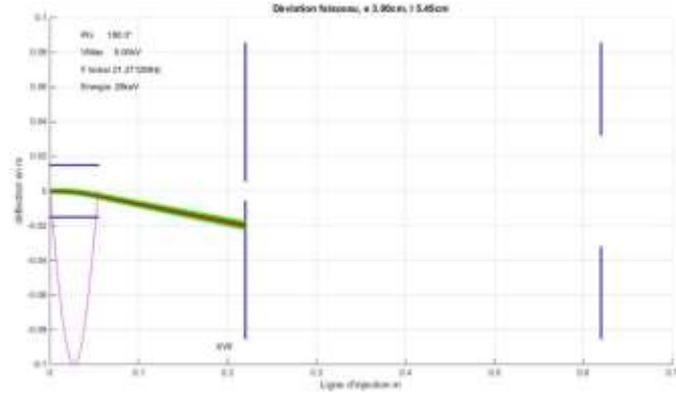
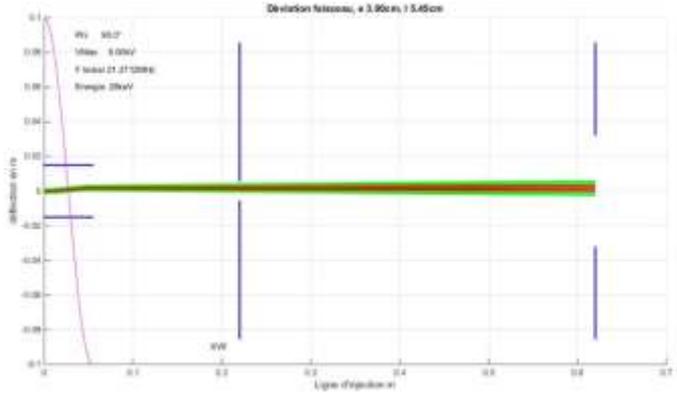
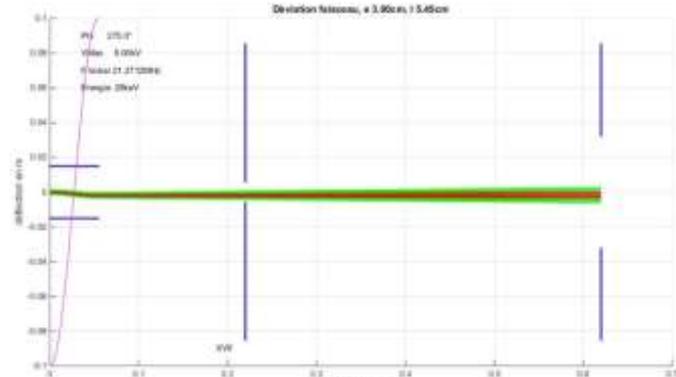
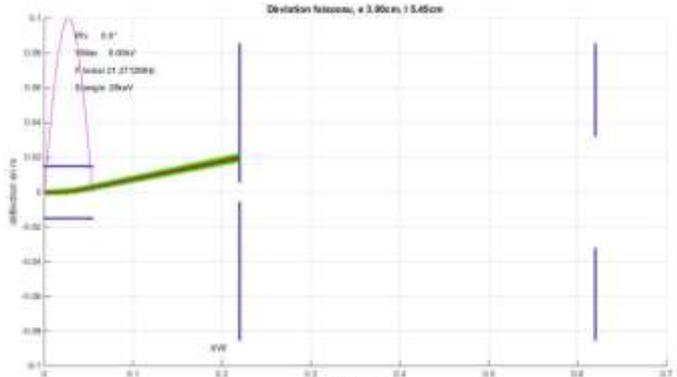
Bunchs rejetés



Bunchs rejetés

- *Mode 'Precy' : Suppression d'un de tous les paquets sur les 'flancs' de l'onde RF (coupure du faisceau)*
- *Entre les 2 modes : Déphasage de 45° de la tension du kicker
Moyen de couper ou remettre le faisceau*

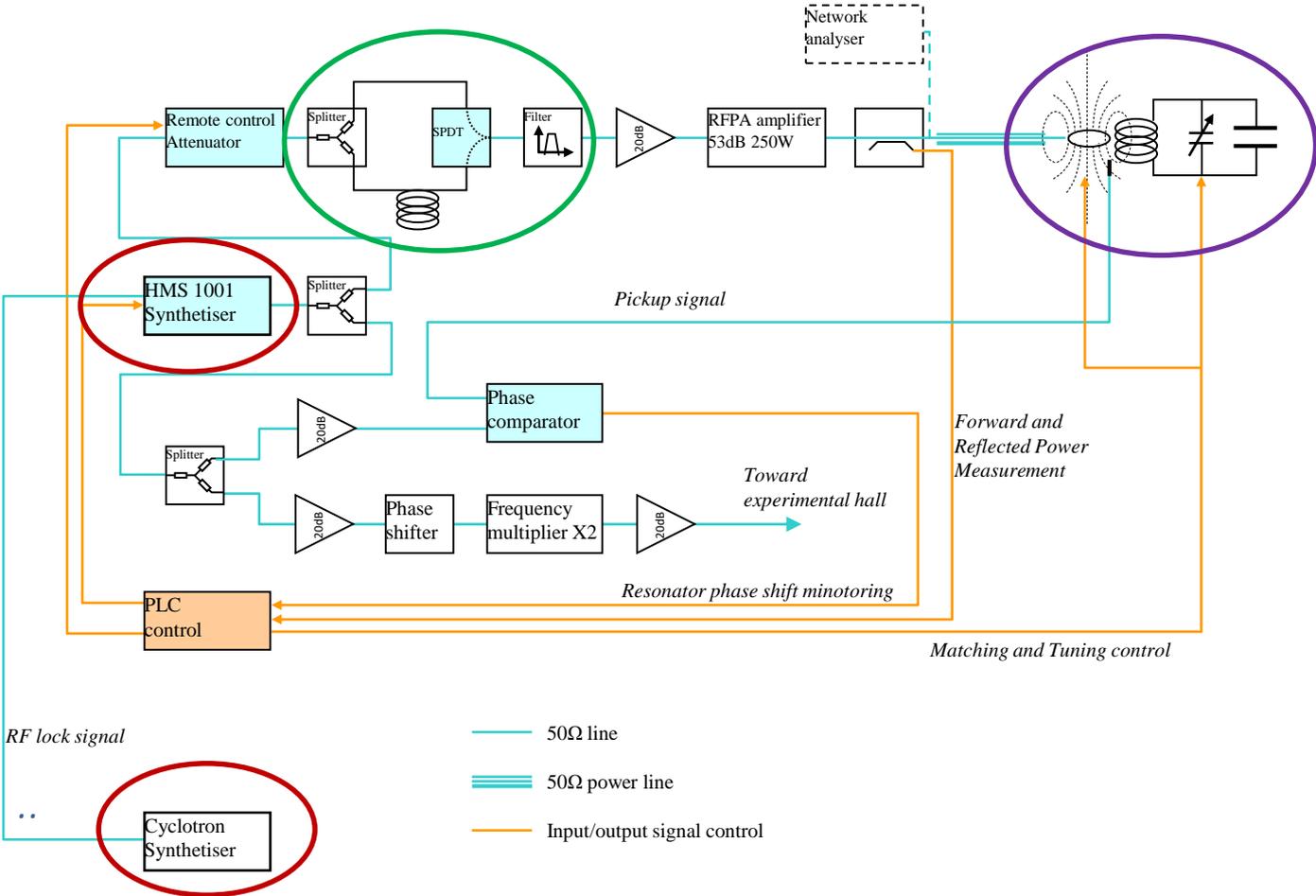
Kicker de faisceau RF : calcul de la déviation



Kicker de faisceau RF : calcul de la déviation

- *A 28 keV, la vitesse du faisceau est seulement de $2.3 \cdot 10^6$ m/s ... et on ne peut pas jouer sur la longueur des plaques pour augmenter la déviation :
longueur optimale des plaques : 54,5mm*
- *Lorsque le faisceau n'est pas dévié, il subit un offset en position d'environ 2 mm (dans les conditions de la simulation), ce qui n'est trop pas gênant dans notre cas*
- *Deux collimateurs en amont et en aval des plaques sont insérés pour tailler dans le faisceau et couper le halo de faisceau venant de la source.*

Kicker de faisceau RF : Principe et électronique de contrôle

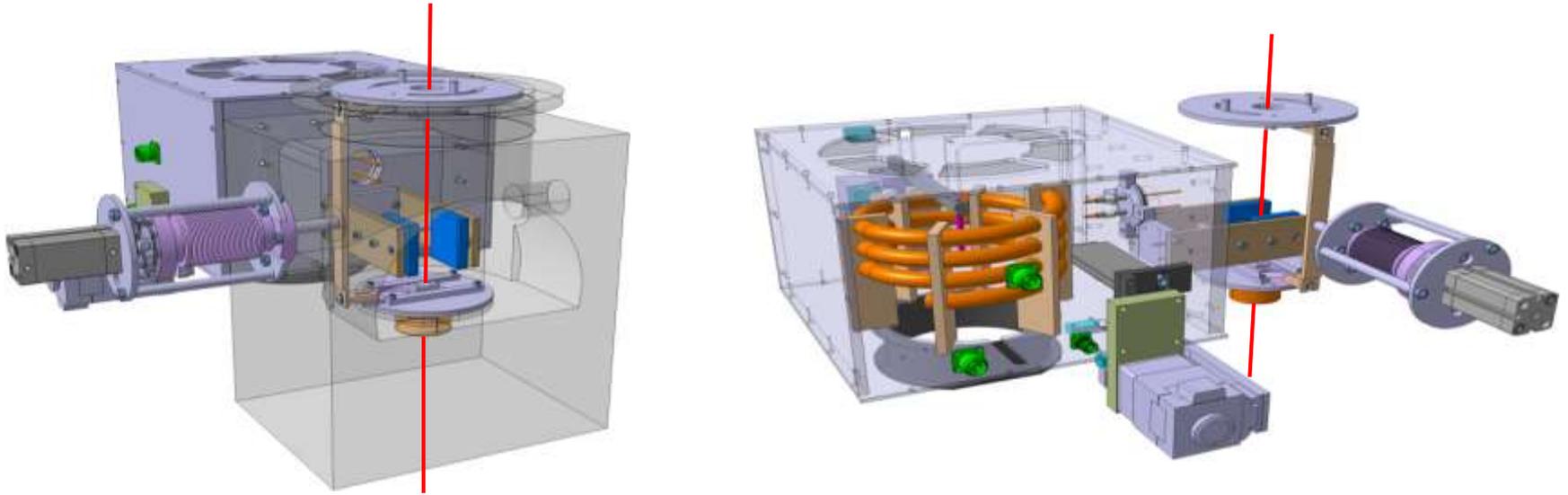


Circuit résonnant et plaques de déviation

Synthétiseurs kicker et cyclo interlockés

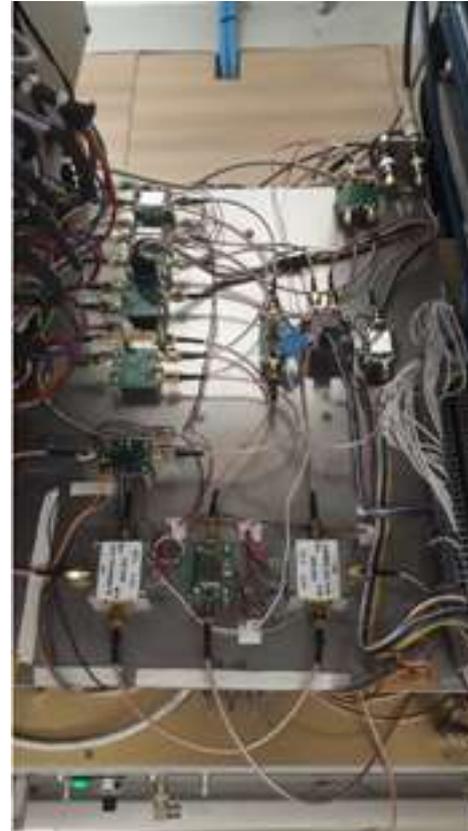
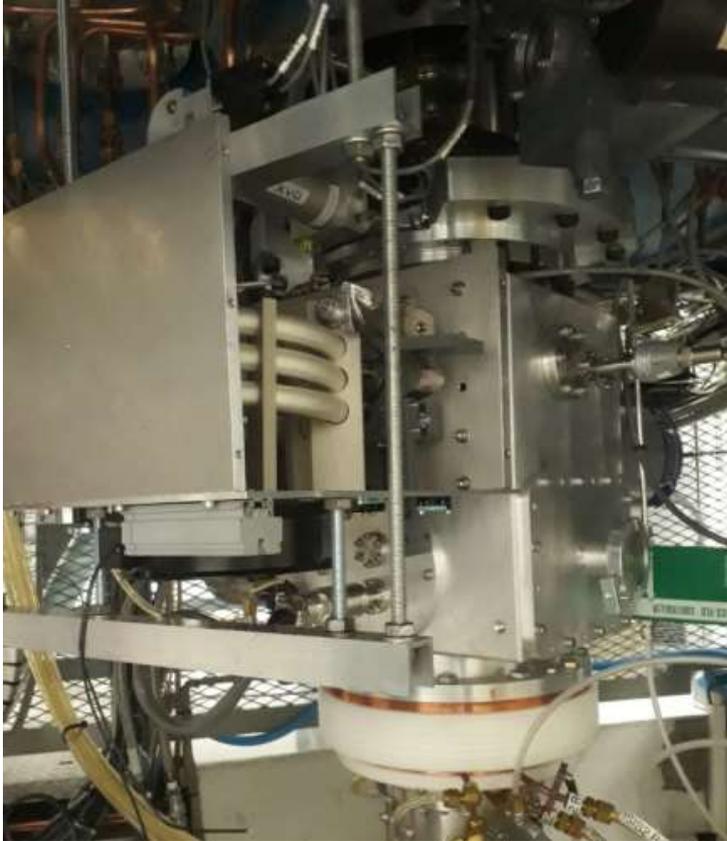
Déphaseur pour changer de mode

Kicker de faisceau RF : Réalisation



Kicker de faisceau RF : Réalisation

Kicker de faisceau RF : Réalisation



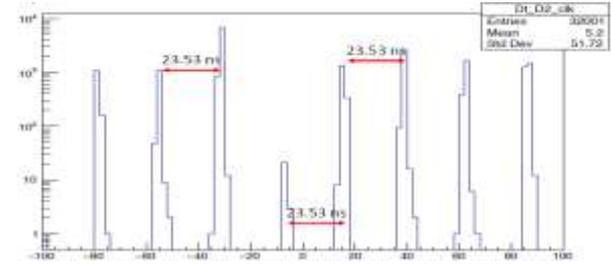
Kicker de faisceau RF : Résultats

○ Mode 1 sur 2

Réjection des bunchs à mieux que 10^4
(Pas de bunchs présents entre des bunchs comportant 10^4 particules)

○ Mode suppression des bunchs

- Réjection du faisceau : 50 000 au mieux (Ratio entre faisceau mesuré en mode $\frac{1}{2}$ et mode suppression totale).
- Passage d'un mode à l'autre en moins d'une $1\mu\text{s}$

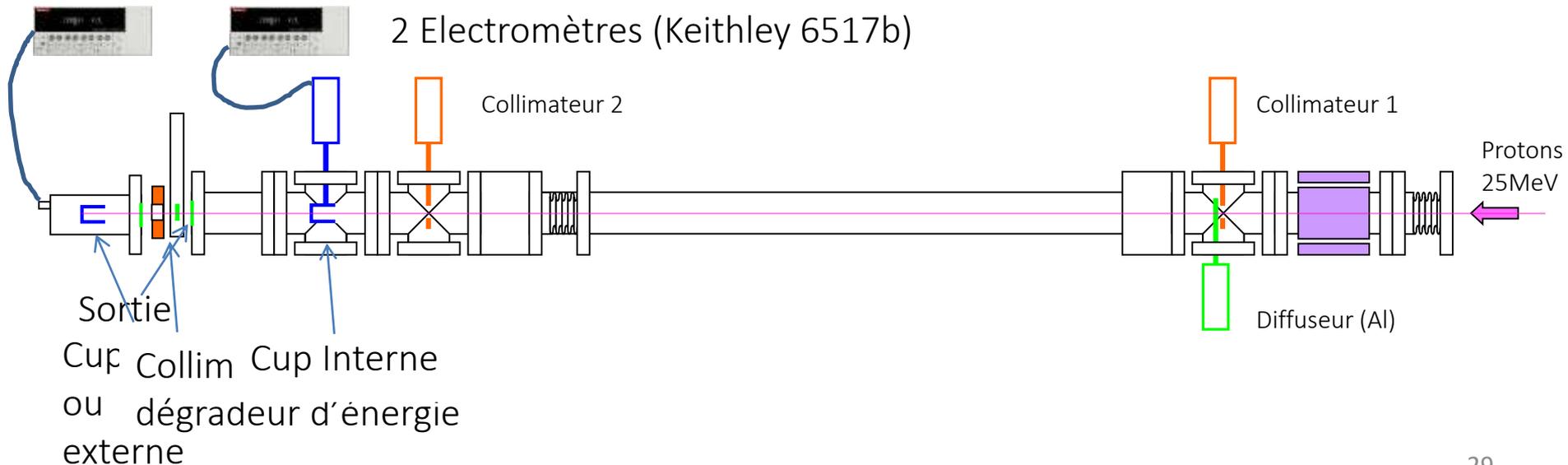


Kicker de faisceau RF : Discussions

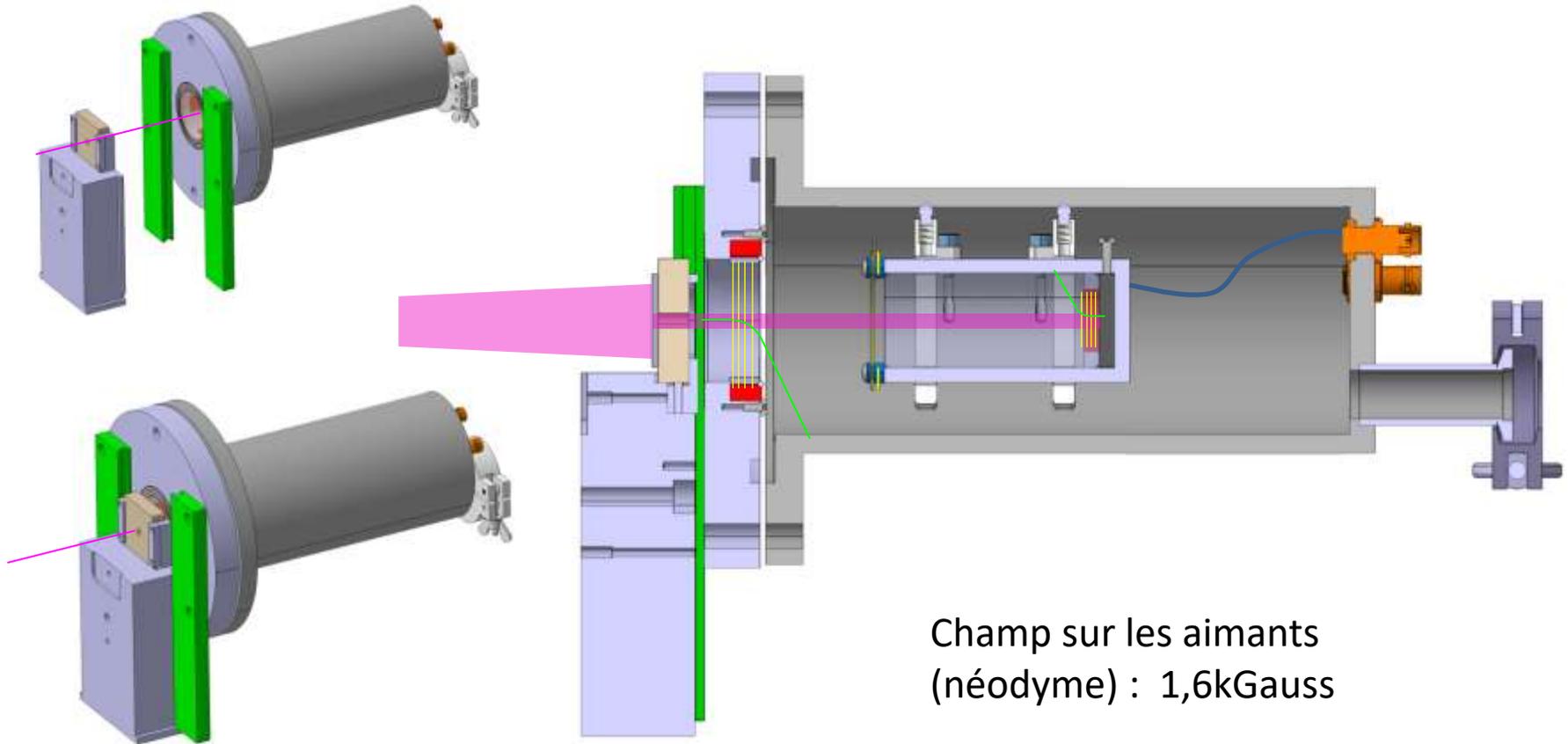
- *Le faisceau diffusé par les bords des collimateurs influence beaucoup les performances en terme de pouvoir de coupure du faisceau (piste d'amélioration à chercher à cet endroit)*
- *Kicker totalement passif pouvant être laissé à demeure sur la ligne (contrairement au kicker embarquant des switchs haute tension)*
- *Puissance RF sur les plaques $< 100W$ et tension max de quelques kV*

Cup Air de la ligne de radiobiologie

- But
 - Mesurer le courant de faisceau à l'endroit des objets à irradier
 - En déduire une calibration entre une mesure dans le pipe et une mesure après la sortie air

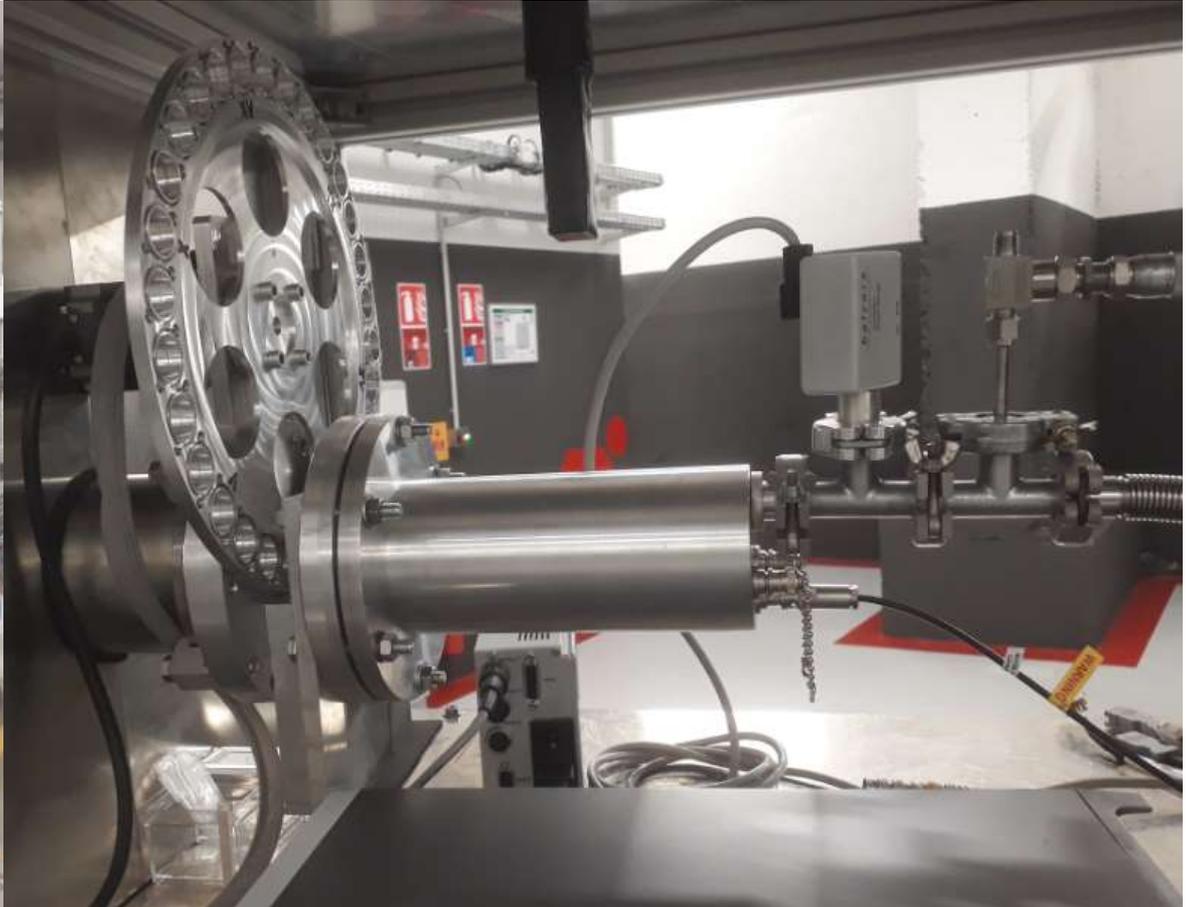


Cup Air : Conception



Champ sur les aimants
(néodyme) : 1,6kGauss

Cup Air : Conception



Cup Air : Mesures internes et externes

- On veut évaluer
 - La linéarité entre les 2 mesures, la stabilité et la reproductibilité des mesures
 - L'impact du vide dans la cup air
 - L'impact des aimants (sortie air et fond de cup)
 - L'impact de la position de la cup dans son tube à vide
- Principe de la mesure

Dans une configuration de ligne donnée, on mesure les courants interne et externe dans une plage de quelques pA à plusieurs centaines de pA (moyenne glissante sur 20 points et calcul de l'écart type)
Le zéro des appareils est contrôlé avant chaque mesure.
- Les résultats sont comparés avec une mesure externe par plastic scintillant et PM (plage de quelques fA à 2pA)

Cup Air : Résultats

- o Mesure de référence (collimateurs 10mm 10mm 10mm, diffuseur 100μm)

$$I_{\text{plastic+PM}} = 0,6506 I_{\text{cupinterne}} + 0,003 \text{ pA (gamme 10fA – 2pA)}$$

$$I_{\text{cupexterne}} = 0,6512 I_{\text{cupinterne}} + 0,105 \text{ pA (gamme 2 – 300pA)}$$

vide mbar	aimant bride	aimant cup	position cup	A	B	
3,90E-03	avec	avec	34	0,6512	0,105	Mesure de référence



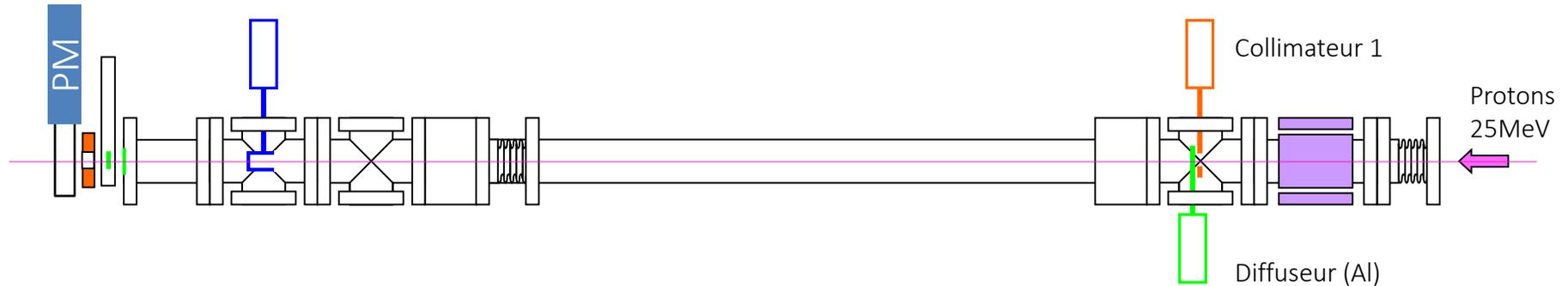
Limite
de vide

Protons diffusés parasites

o Constat

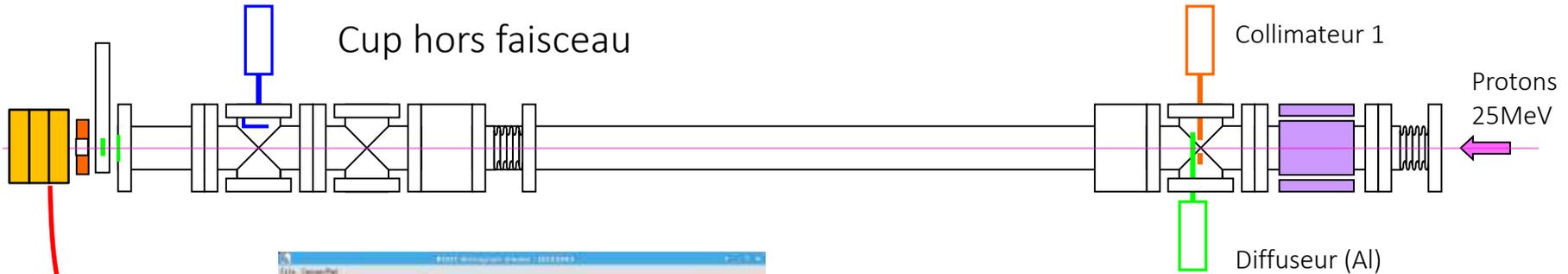
En présence du collimateur 1, avec la cup interne dans le faisceau, on mesure un courant sur le plastic après la sortie air (de l'ordre de 10^{-4} par rapport à la cup interne). Ce courant parasite augmente quand on diffuse le faisceau (jusqu'à 10^{-2}).

➤ Rayonnements parasites ? Protons ?

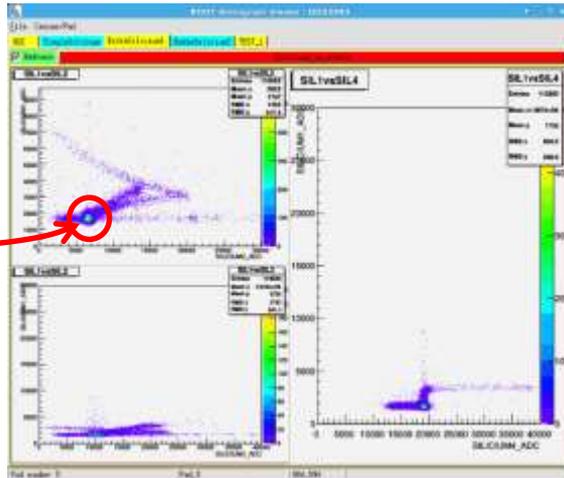


Protons diffusés parasites

- o Identification par mesures $E, \Delta E$ avec un stack de 3 détecteurs silicium



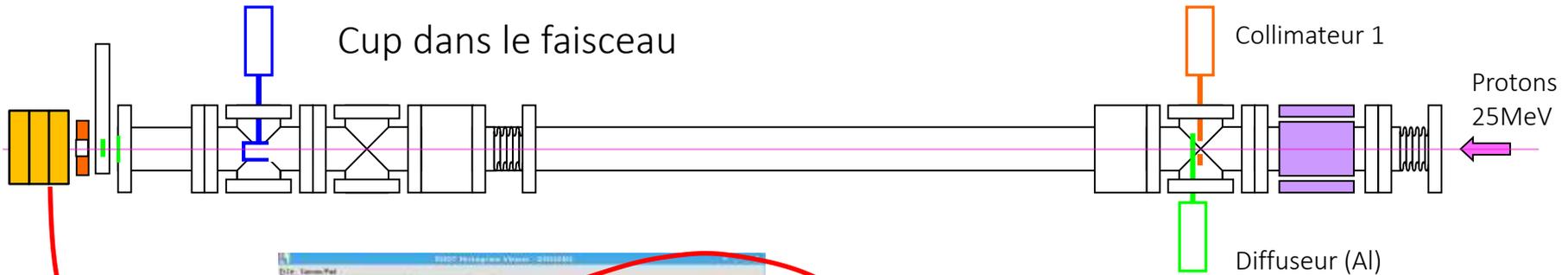
Spot =
Protons de
25MeV



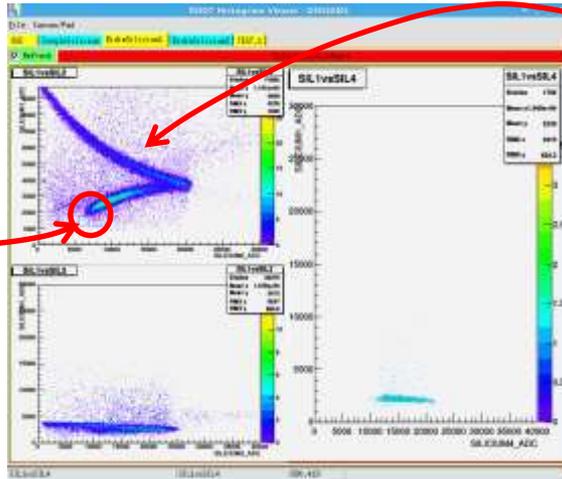
Conditions collimateurs 5,15,12 mm diffuseur 200 μ m

Protons diffusés parasites

- o Identification par mesures $E, \Delta E$ avec un stack de 3 détecteurs silicium



Plus de protons à 25 MeV



Protons allant de 0 à < 25MeV !

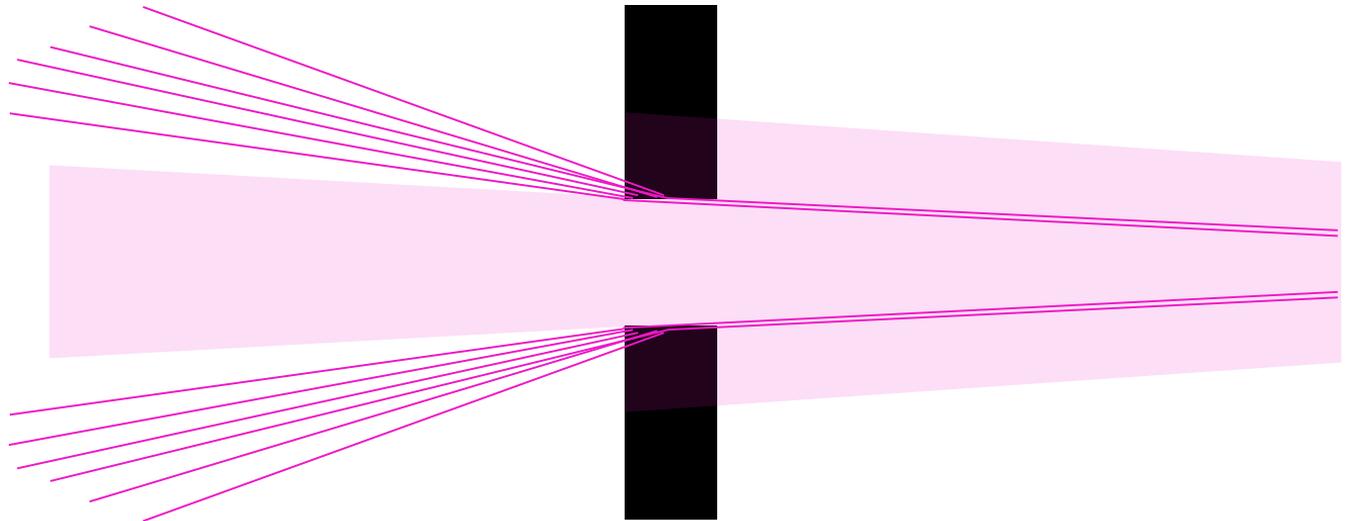
Conditions collimateurs 5,15,12 mm diffuseur 200 μ m

Protons diffusés parasites

- Provenance :
 - protons traversant les bords intérieurs du collimateur en début de ligne (graphite 5mm d'épaisseur)

Protons à toutes les énergies (<25MeV)

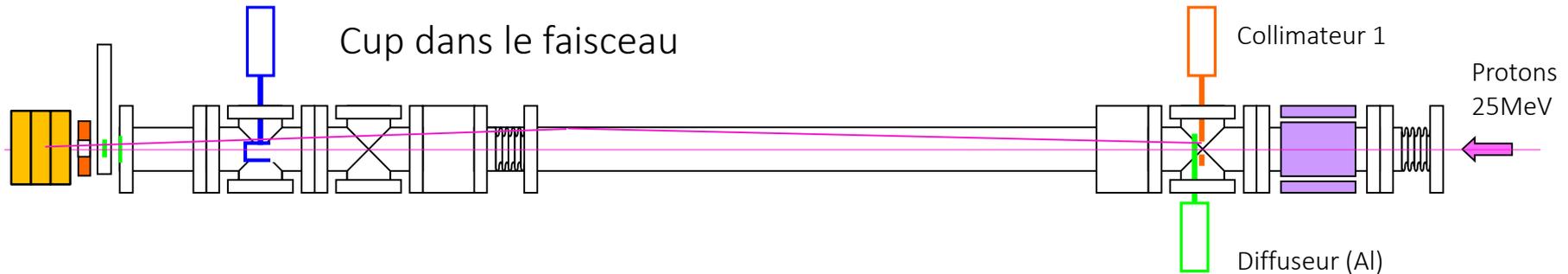
Cœur du faisceau
25MeV



Protons diffusés parasites

○ Provenance :

- protons traversant les bords intérieurs du collimateur en début de ligne (graphite 5mm d'épaisseur)
- et qui contournent la cup en étant diffusés par le pipe

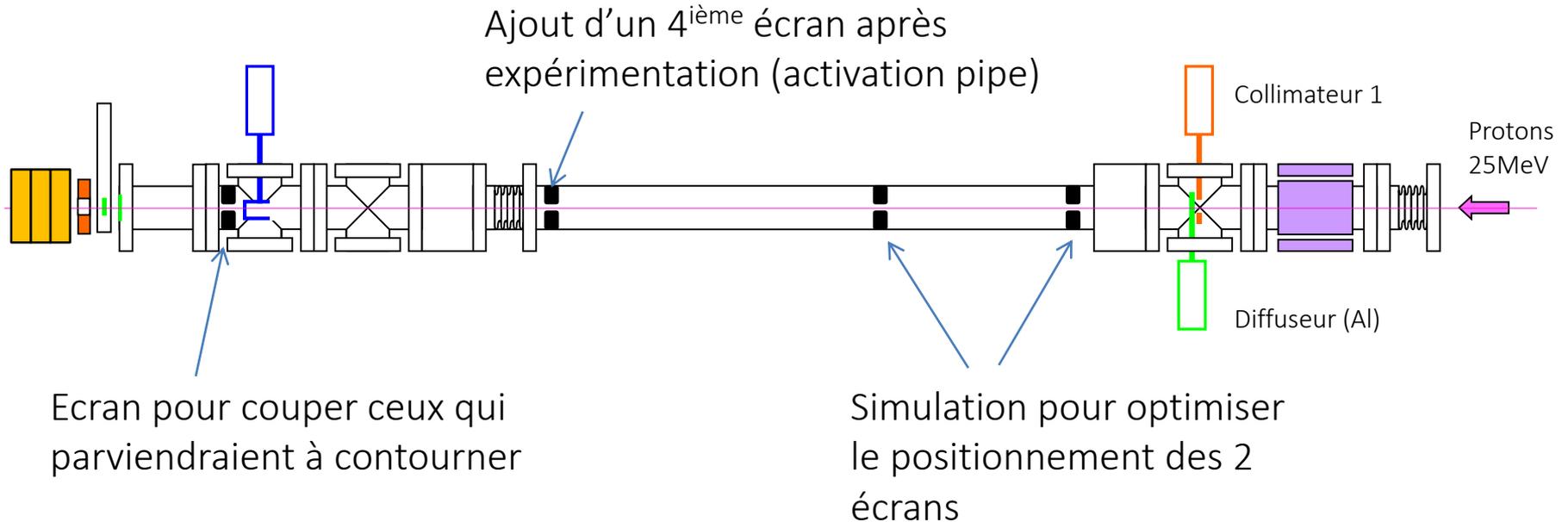


○ Preuve :

ces protons disparaissent quand on ôte le collimateur !

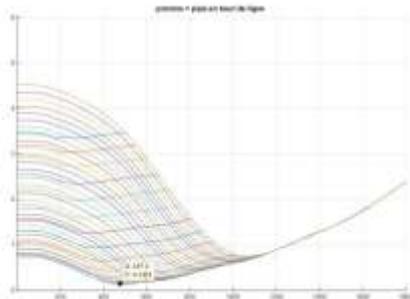
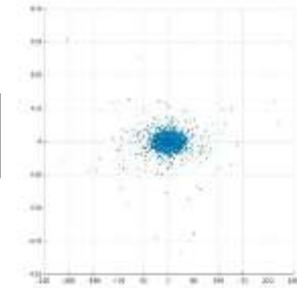
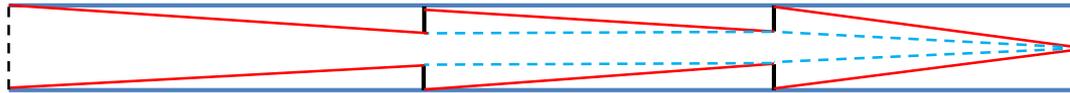
Protons diffusés parasites

- Remède :
Insertion de 4 écrans en graphites (collimateurs de diamètre 40) le long de la ligne



Protons diffusés parasites

- Principe de la simulation (optimisation de la position des 2 écrans)
 - Simulation d'un faisceau diffusé (SRIM)
 - Pour chaque position des écrans le long du pipe, comptage des protons d'élongation supérieure au pipe avant les écrans et en bout de pipe. Recherche des positions qui minimisent la somme de ces comptages.



Position optimale des deux 1^{er} écrans
le long du pipe

Protons diffusés parasites

- Résultats (cup interne dans le faisceau)

Aucun proton détecté après la sortie air (mesure avec plastic et PM) même avec des faisceaux 'intenses' (dizaine voire centaine de nA, soit de l'ordre de 10^{12} protons /s) avec ou sans diffusion du faisceau et quel que soit le collimateur en début de ligne.

Autre bénéfice : plus d'activation du pipe lorsque le faisceau est diffusé.

Références

- XXX

Merci pour votre
attention

