

Développement d'un profileur faisceau pour l'hadronthérapie

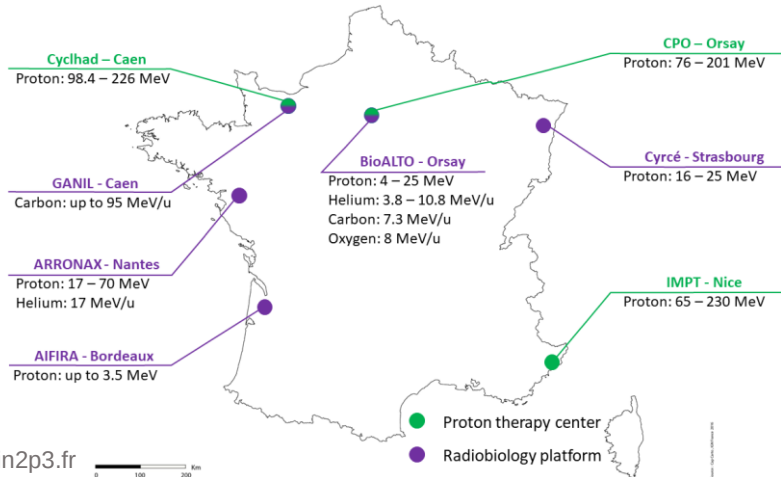
Louis Hardouin supervisé par Quentin Mouchard, Amélia Maia Leite et Philippe Lanièce



Développement d'une ligne d'irradiation à ALTO



L'accélérateur tandem ALTO (Accélérateur Linéaire et Tandem d'Orsay, IJCLab) ⁽¹⁾



25 MeV

1 H	50 MeV																87 MeV																128 MeV																2 He
3 Li	4 Be																			5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne																								
11 Na	12 Mg																			13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar																								
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr																																
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe																																
55 Cs	56 Ba																			72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn															
87 Fr	88 Ra																			104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og															
			57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu																																
			89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr																																

Tableau périodique des éléments disponibles à ALTO (en bleu) ⁽¹⁾

Ions	Énergie (MeV/u)	Parcours (μm)
^1H	25	$6,4 \cdot 10^3$
^2He	10,8	$1,5 \cdot 10^3$
^7Li	7,1	510
^{12}C	7,3	240
^{16}O	8,0	230

Table des ions d'intérêts à ALTO avec leur énergie ainsi que leur parcours dans l'eau

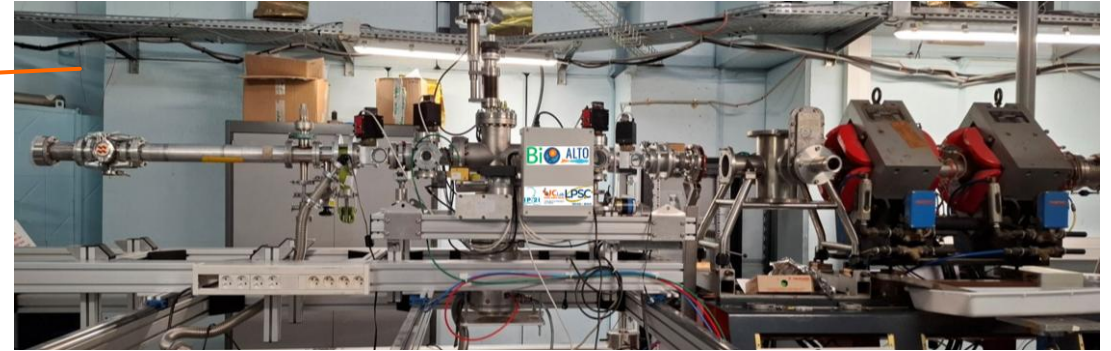


Développement d'une ligne d'irradiation à ALTO

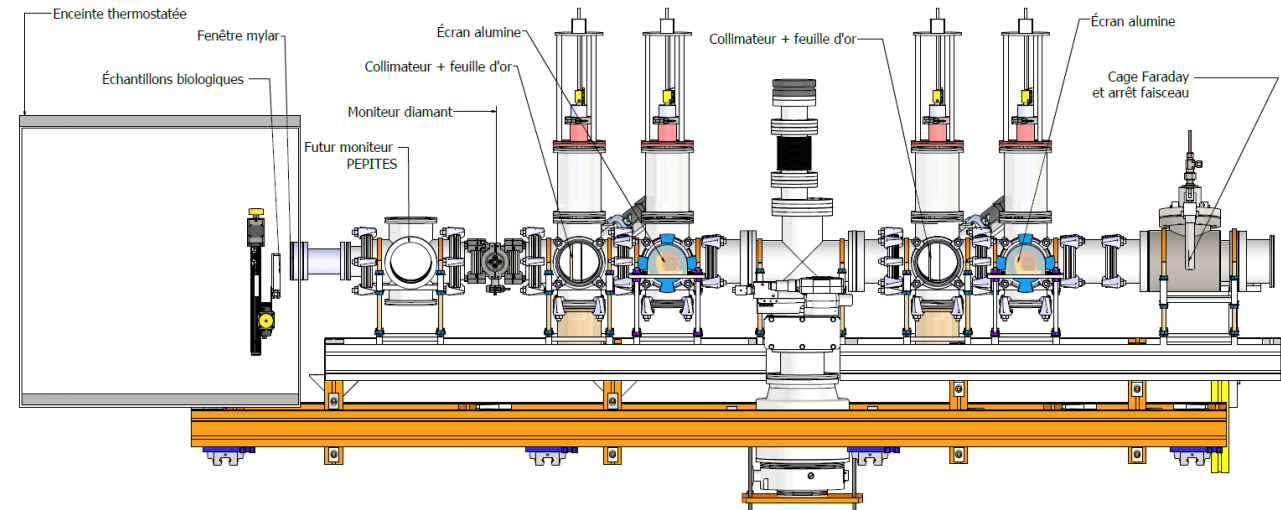
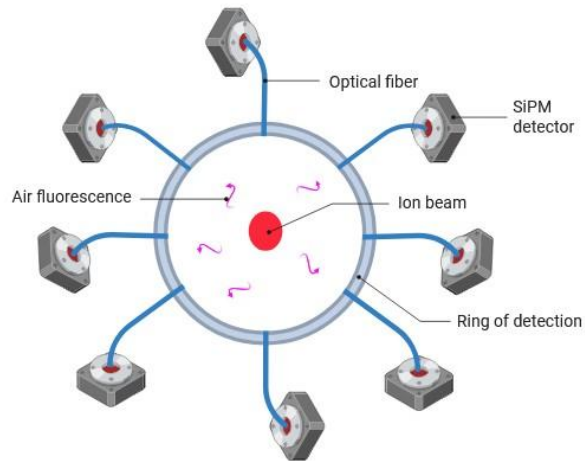
BiO ALTO



Salle de radiobiologie



Sens faisceau



Ligne d'irradiation BioALTO

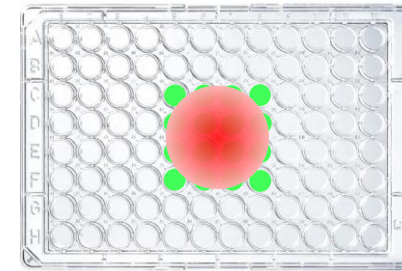


Contraintes radiobiologiques

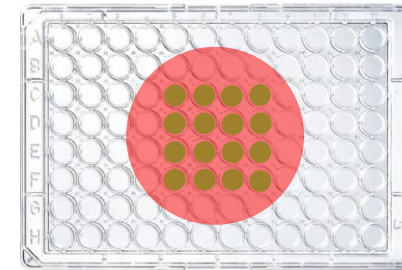
Faisceau en sortie de ligne BioALTO :

- inhomogénéité $< 2 \%$
- sur un disque de 2 cm de diamètre
- débit de dose de $\dot{D} = 2 \text{ Gy/min}$

But : Développer un moniteur faisceau non perturbatif capable de mesurer en temps réel les caractéristiques géométriques du faisceau.



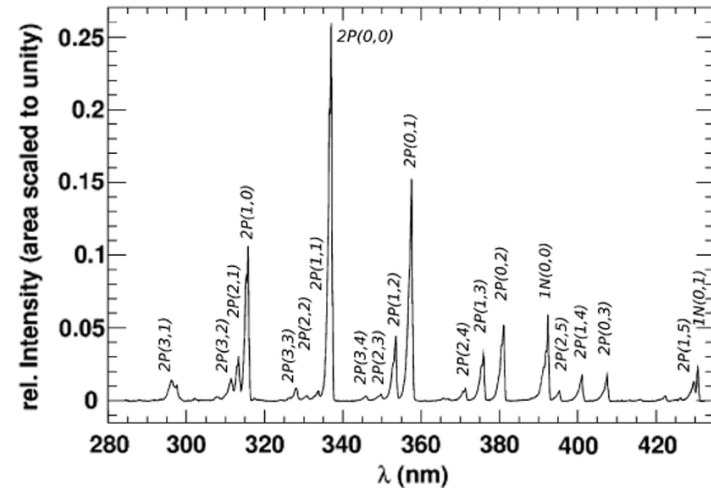
✗ Irradiation non homogène



✓ Irradiation homogène



Monitrage faisceau par fluorescence de l'air



Spectre de fluorescence du diazote⁽¹⁾

- Fluorescence de l'air induite par le faisceau (UV : 290 – 420 nm)
- Détection des photons par un photomultiplicateur (PM)
- Monitrage de l'intensité faisceau

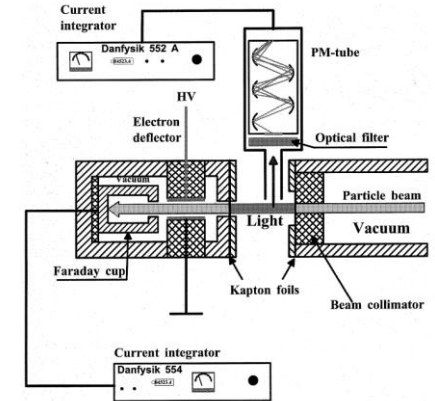
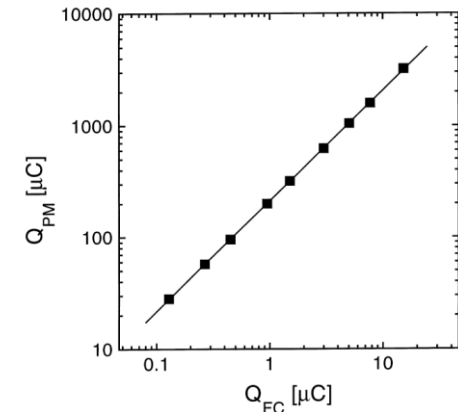


Schéma de l'installation expérimentale pour le monitrage du courant faisceau⁽²⁾



Charge intégrée du PM en fonction de la charge intégrée de la cage de Faraday (FC)⁽²⁾

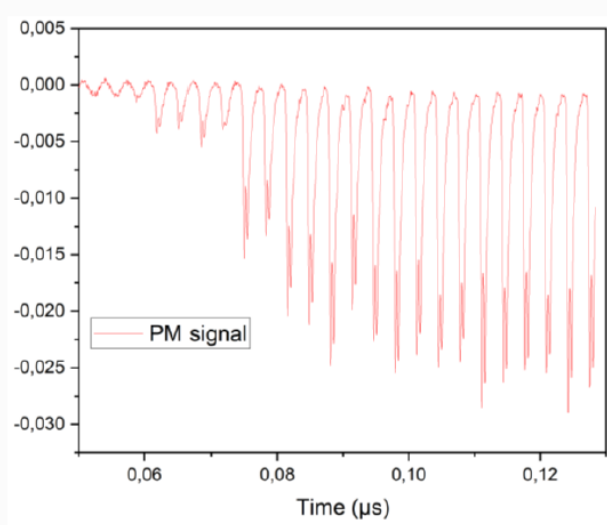
(1) R.W.B. Pearse & A.G. Gaydon, Wiley, 1950

(2) J.O. Lill, NIM 150, 114-117, 1999

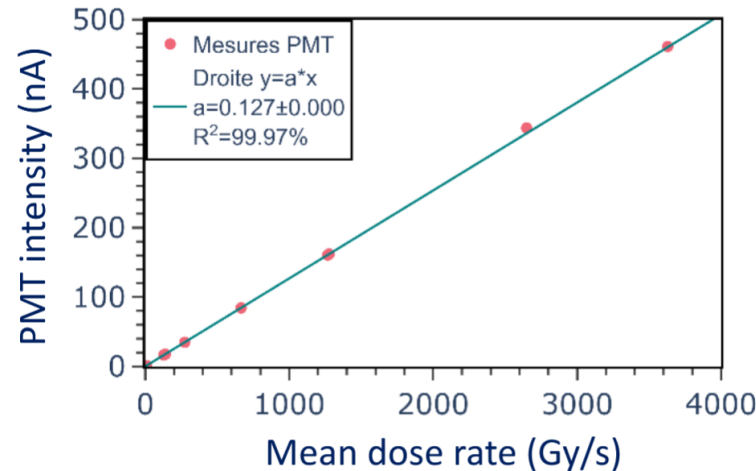


Mesures aux cyclotron ARRONAX

Faisceau : H^+ , 68 MeV



Signal du PMT (ARRONAX, Nantes) ⁽¹⁾



Intensité du PMT en fonction du débit de dose
(ARRONAX, Nantes) ⁽²⁾

- Le PM peut voir chaque bunch
- Linéarité entre le signal de fluorescence et le débit de dose

(1) C. Koumeir et al, FRPT 2021 FLASH Radiotherapy and Particle therapy, Vienna, 2021.

(2) M. Evin et al., 16th International Workshop, Cancéropôle Grand-Ouest, 2023. (hal-04249398)



Monitrage faisceau par fluorescence de l'air



SiPM C13366-3050GA

	SiPM C13366-3050GA
Taille (mmxmm)	$3,0 \times 3,0$
Tension de fonctionnement (V)	5
Plage spectrale (nm)	270 – 900
Pic de sensibilité (λ_p) (nm)	450
Efficacité de détection ($\lambda = \lambda_p$) (%)	40
Efficacité de détection ($\lambda = 337 \text{ nm}$) (%)	27
Gain	$3,0 \times 10^6$



PMT R928P

	PMT R928P
Taille (mmxmmxmm)	$32,2 \times 32,2 \times 94$
Tension de fonctionnement (V)	1000
Plage spectrale	185 – 900
Pic de sensibilité (λ_p) (nm)	400
Efficacité quantique ($\lambda = \lambda_p$) (%)	25,4
Efficacité quantique($\lambda = 337 \text{ nm}$) (%)	22
Gain	$1,0 \times 10^7$



Test du détecteur SiPM au cyclotron ARRONAX, Nantes

Buts :

- Détecter la fluorescence du diazote.
- Résoudre la structure temporelle du faisceau.
- Vérifier la linéarité du signal avec l'intensité du faisceau.
- Comparer les signaux avec ceux du PMT.



SiPM C13366-3050GA Hamamatsu



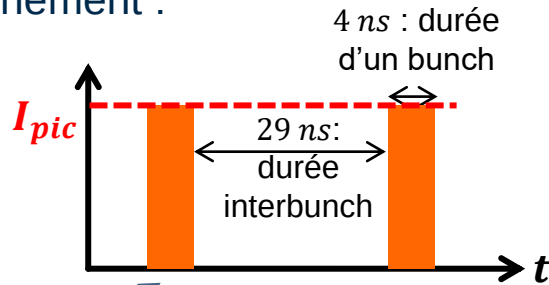
Cyclotron ARRONAX à Nantes



Test du détecteur SiPM au cyclotron ARRONAX, Nantes

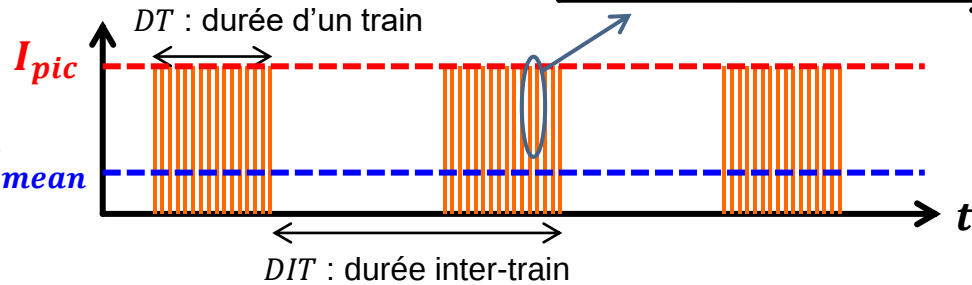
Deux modes de fonctionnement :

➤ Mode pulsé

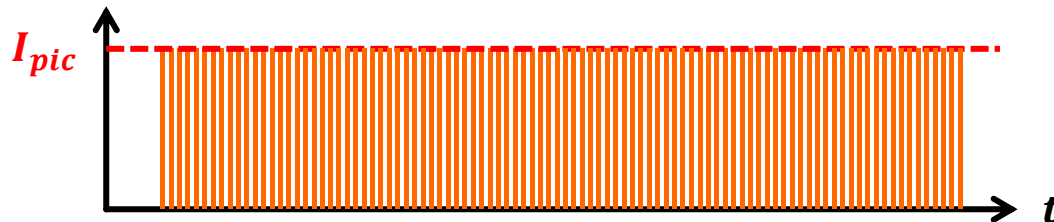


Bunch pulsé dû au champ RF accélérateur :
 $f_{RF} = 30,45 \text{ MHz} \Rightarrow T_{RF} = 32,85 \text{ ns}^{(1)}$

Faisceau : He^{2+} , 68 MeV



➤ Mode quasi-continu



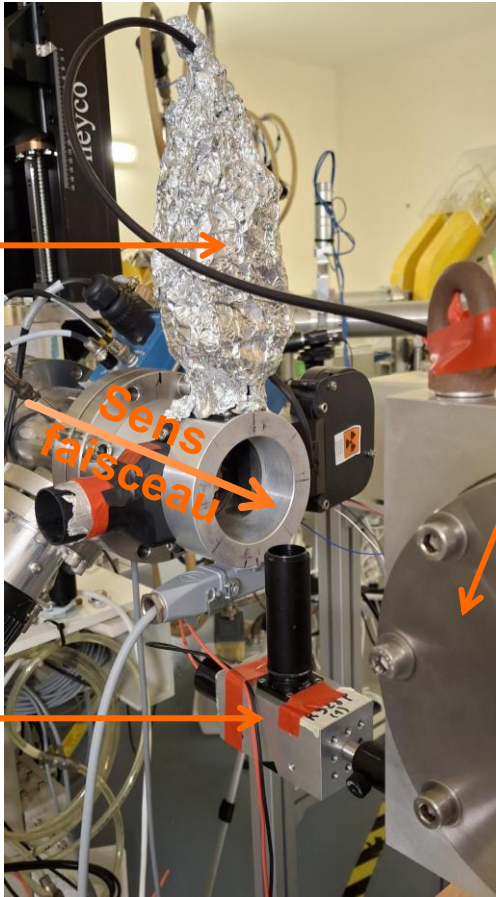
Ligne d'irradiation AX3 à ARRONAX

(1) F. Poirier et al., IPAC 2011, San Sebastian, Spain



Monitoring beam by fluorescence of air

Module SiPM



PMT

Lecture du signal



Oscilloscope
LeCroy HDO4054
en mode pulsé



Électromètre PTW
MULTIDOS (12 voies)
en mode continu



Module MPPC HAMAMATSU C13366-3050GA ⁽¹⁾

Tests préliminaires avec le module MPPC (SiPM)
C13366-3050GA de chez Hamamatsu.

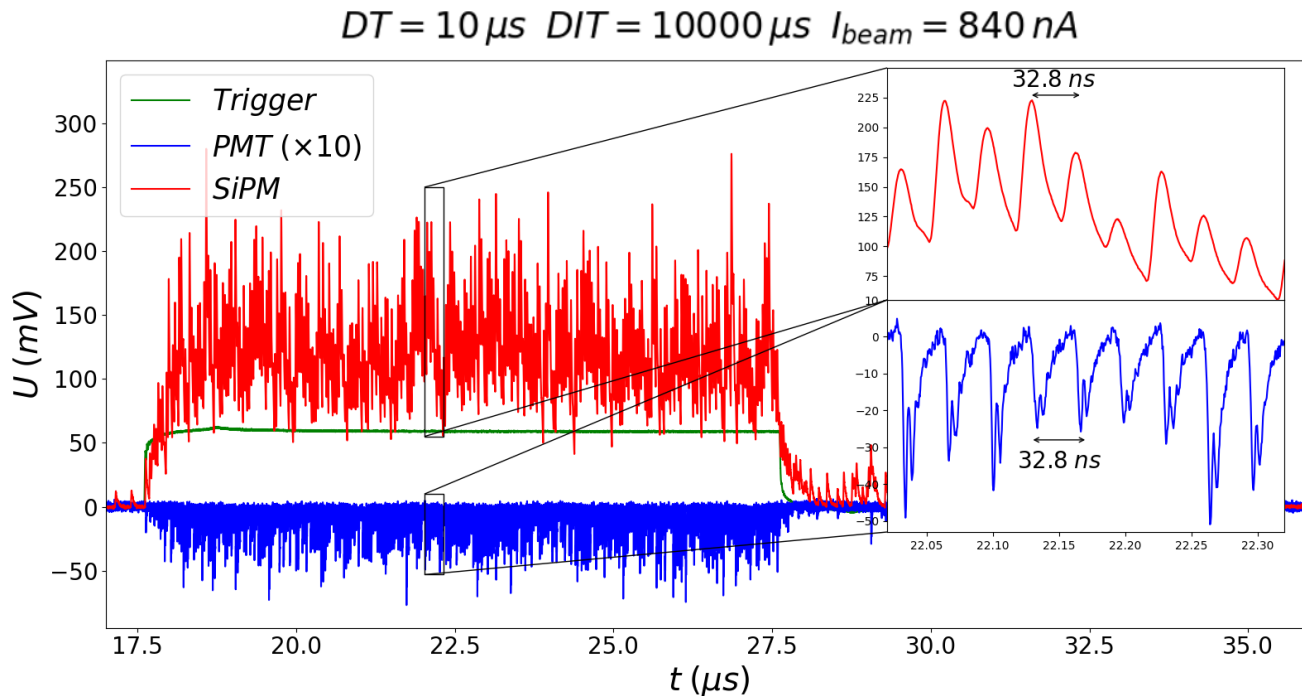
- Régulé en température
- Électronique intégrée
- Sortie analogique

Set-up expérimental sur la ligne AX3

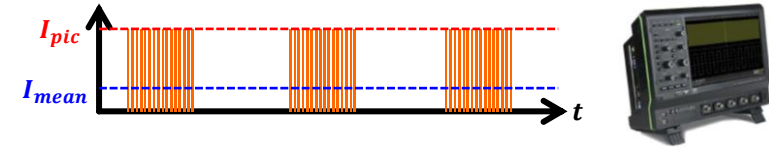
(1) Datasheet Hamamatsu, MPPC modules, C13366 GA



Structure temporelle des signaux



Structure temporelle des signaux de fluorescence



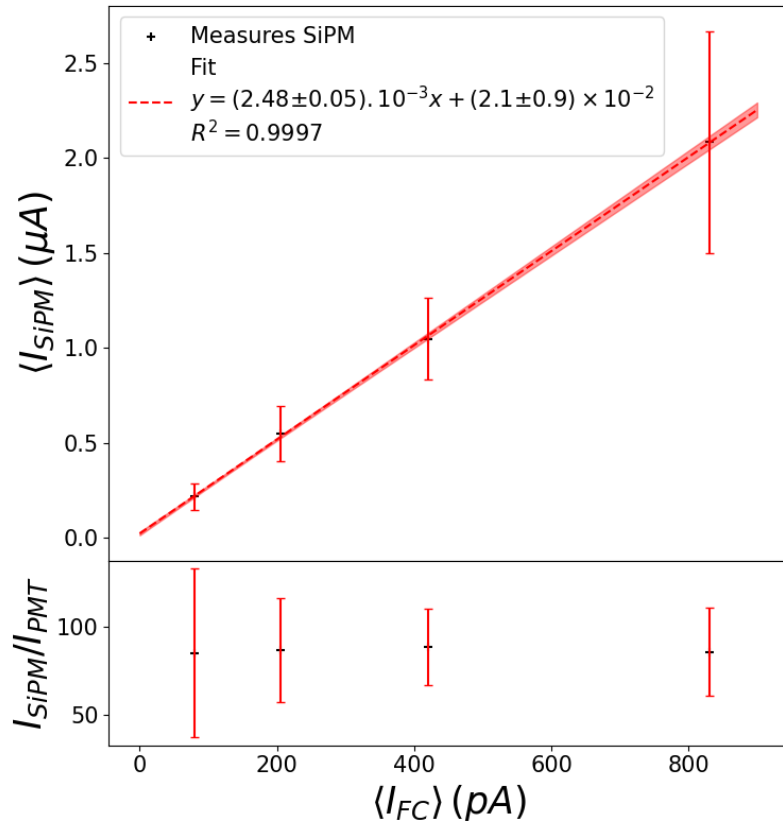
Les signaux sont :

- Bien définis temporellement ($DT = 10 \mu s$).
- Sous-structure : pic toutes les 32,8 ns correspondant à la période RF du champ accélérateur d'ARRONAX ($f_{RF} = 30,45 MHz \Rightarrow T_{RF} = 32,85 ns$).

Le SiPM est capable de résoudre la structure temporelle du faisceau.

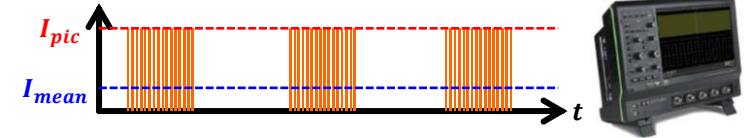


Linéarité du signal



Courant moyen du SiPM en fonction du courant moyen du faisceau

$$\langle I \rangle = I_{pic} \times \frac{DT}{DIT} = \frac{Q}{DIT}$$



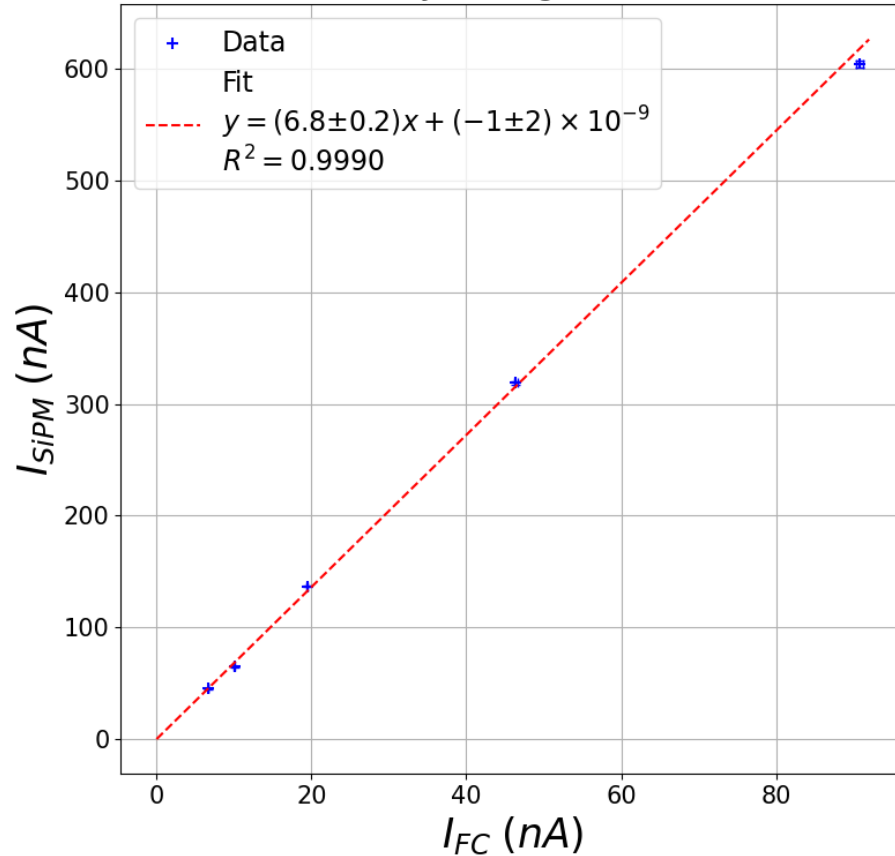
$DT = 10 \mu s$; $DIT = 10\,000 \mu s$

- Forte corrélation linéaire entre le courant débité par le SiPM et le courant du faisceau ($R^2 = 99,97 \%$).
- Ratio I_{SiPM}/I_{PMT} constant.
 - Monitoring intensité possible.
- Améliorer le ratio signal/bruit.



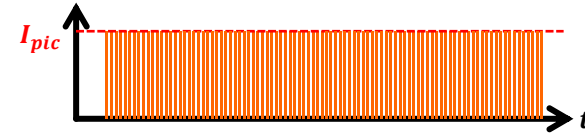
Linéarité du signal

Courant moyen intégré sur $\Delta t = 30\text{ s}$



Courant du SiPM en fonction du courant faisceau

$$I = \frac{Q}{\Delta t}$$



Intégration du courant SiPM et FC durant $\Delta t = 30\text{ s}$ à l'aide de l'électromètre *PTW Multidos Type 10004*.

Échantillonnage toutes les 500 ms.

- Bonne corrélation linéaire entre le courant débité par le SiPM et le courant faisceau ($R^2 = 99,90\%$).
- Améliorer le ratio signal/bruit.



Estimation du rendement de fluorescence Y

Y : # photons/ions incidents/m d'air traversé

$$Y \propto \frac{dE}{dx} \rho \frac{A}{1 + \rho B \sqrt{T}} \quad (1)$$

A, B : constantes
 ρ : masse volumique de l'air
 T : température de l'air

Calcul du rendement de fluorescence :

$$N_{\gamma,d} = N_{ion} Y \Delta L \varepsilon_{SiPM} \varepsilon_{geo} \quad (2)$$

- $N_{\gamma,d}$: nombre de photons détectés
- N_{ion} : nombre d'ions incidents
- Y : rendement de fluorescence (par ion et par mètre)
- ΔL : portion du faisceau vue par le détecteur
- ε_{SiPM} : efficacité du SiPM
- ε_{geo} : efficacité géométrique

	Littérature (Lefevre 2006)	SiPM seul	SiPM + fibre + collimateur
$Y \text{ (m}^{-1}\text{)}$	255 ± 13	399 ± 84	341 ± 73

Valeurs théorique et expérimentales du rendement de fluorescence de l'air pour des particules α de 68 MeV

Même ordre de grandeur entre
valeur théorique et expérimentales

(1) F. Kakimoto et al, Nucl. Inst. And Meth. A372, 527-533, 1996

(2) G. Lefevre, Thèse de Doctorat, 2006



Conclusions :

Les tests effectués auprès du cyclotron ARRONAX ont montré que le SiPM :

- Est capable de détecter les photons de fluorescence
- Permet de résoudre la structure temporelle du faisceau avec la même résolution que le PMT
- Permet de monitorer l'intensité faisceau $I_{SiPM} \propto I_{beam}$:
 - 80 nA à 1 μ A en mode pulsé
 - 6 nA à 100 nA en mode continu

Perspectives :

- Améliorer le ratio signal/bruit afin de monitorer des courants plus faibles.
- Évaluation du rendement de fluorescence pour différentes énergies (qq MeV à qq 10aine de MeV) et des particules (proton, alpha, lithium, carbone, oxygène) : simulations collecte photons de fluorescence
- Développement du profileur faisceau : monitoring de la structure géométrique du faisceau

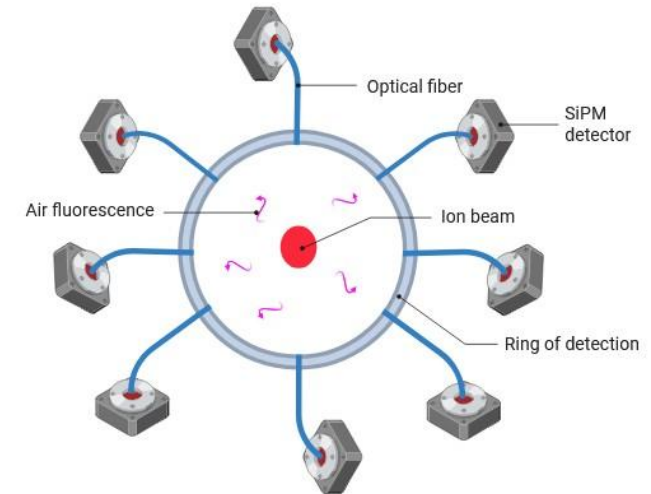


Schéma de principe du moniteur faisceau non perturbatif



Collaborations



Noël Servagent
Rania Jbara
Guillaume Blain
Arnaud Guertin
Manon Evin
Vincent Métivier



Sophie Chiavassa
Grégory Delpon
Vincent Fiegel



Charbel Koumeir
François Bulteau-Harel
Emeline Craff
Teddy Durand
Ferid Haddad
Freddy Poirier



Merci pour votre attention !



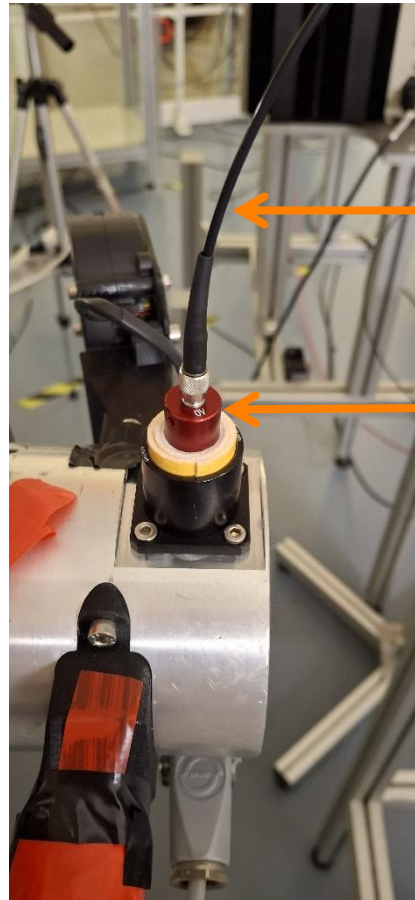
Louis Hardouin
Quentin Mouchard
Denis Douillet
Thierry Hourat
Nabil Karkour
Philippe Lanièce
Amélia Maia Leite
Laurent Ménard
Christian Olivetto
Marc-Antoine Verdier



Sylvain Deffet
Rudi Labarbe
Stéphane Lucas
Séverine Rossomme

This work has been in part supported by a grant from the French National Agency for Research called "Investissements d'Avenir", Equipex ArronaxPlus (ANR-11-EQPX-0004), ISITE NEXt (ANR-16-IDEX-0007), by the Walloon Region of Belgium through technology innovation partnership no. 8341 (EPT-1 – Emerging Proton Therapies Phase 1) co-led by MecaTech and BioWin clusters and with financial support from Inserm Cancer.

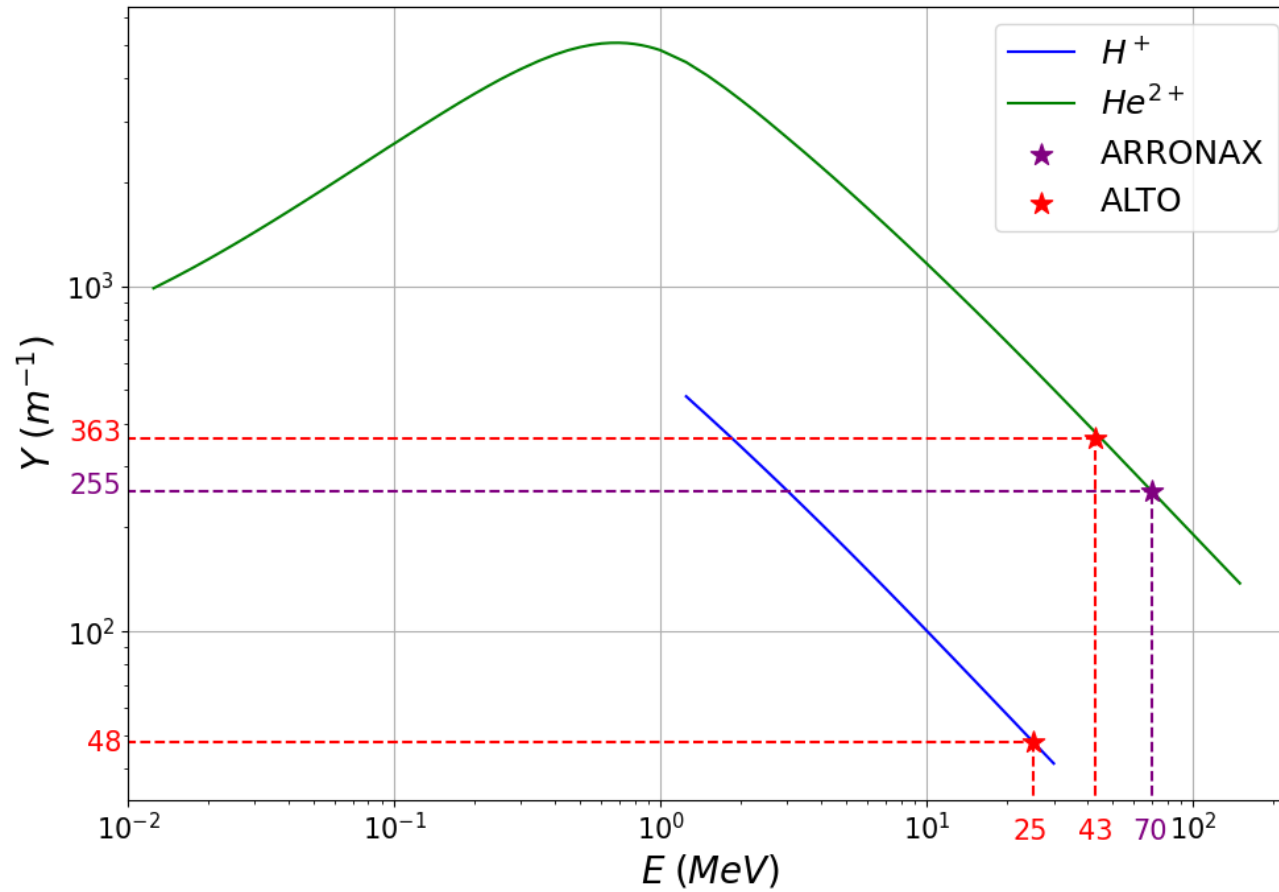
This work has been in part supported by a grant from the Région Ile-de-France called "SESAME BioALTO 2025", by the Université Paris Saclay and the Université Paris Cité



Fibre optique

Collimateur

Set-up expérimental : collimateur + fibre optique + SiPM



Évolution du rendement de fluorescence de l'air en fonction de l'énergie