

Développement d'un démonstrateur d'hodoscope faisceau basé sur des détecteurs diamant de grande surface

Sébastien CURTONI

Directrice de thèse : Marie-Laure GALLIN-MARTEL

Groupe : Physique Nucléaire et Applications Médicales

1. Motivations : Hadronthérapie

- Caractéristiques
- Incertitudes sur le parcours des ions
- Contrôle en ligne : La collaboration CLaRyS

2. Hodoscope diamant : matériel et méthodes

- Le diamant synthétique comme matériau de détection
- Instrumentation des détecteurs
- Méthodes de caractérisation

3. Hodoscope diamant : résultats

- Efficacité de détection
- Réponse spectroscopique
- Résolution temporelle

Conclusions et perspectives

1. Motivations : Hadronthérapie

- Caractéristiques
- Incertitudes sur le parcours des ions
- Contrôle en ligne : La collaboration CLaRyS

2. Hodoscope diamant : matériel et méthodes

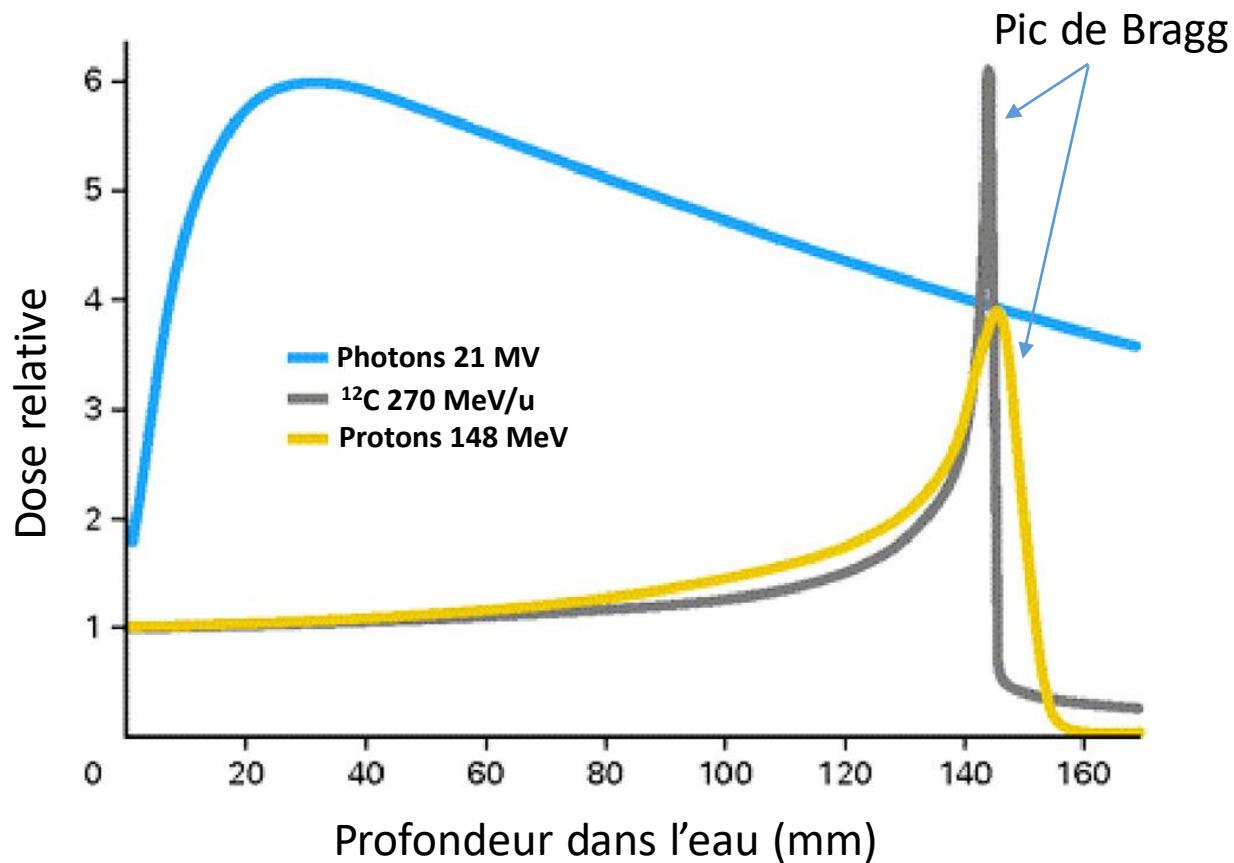
- Le diamant synthétique comme matériau de détection
- Instrumentation des détecteurs
- Méthodes de caractérisation

3. Hodoscope diamant : résultats

- Efficacité de détection
- Réponse spectroscopique
- Résolution temporelle

Conclusions et perspectives

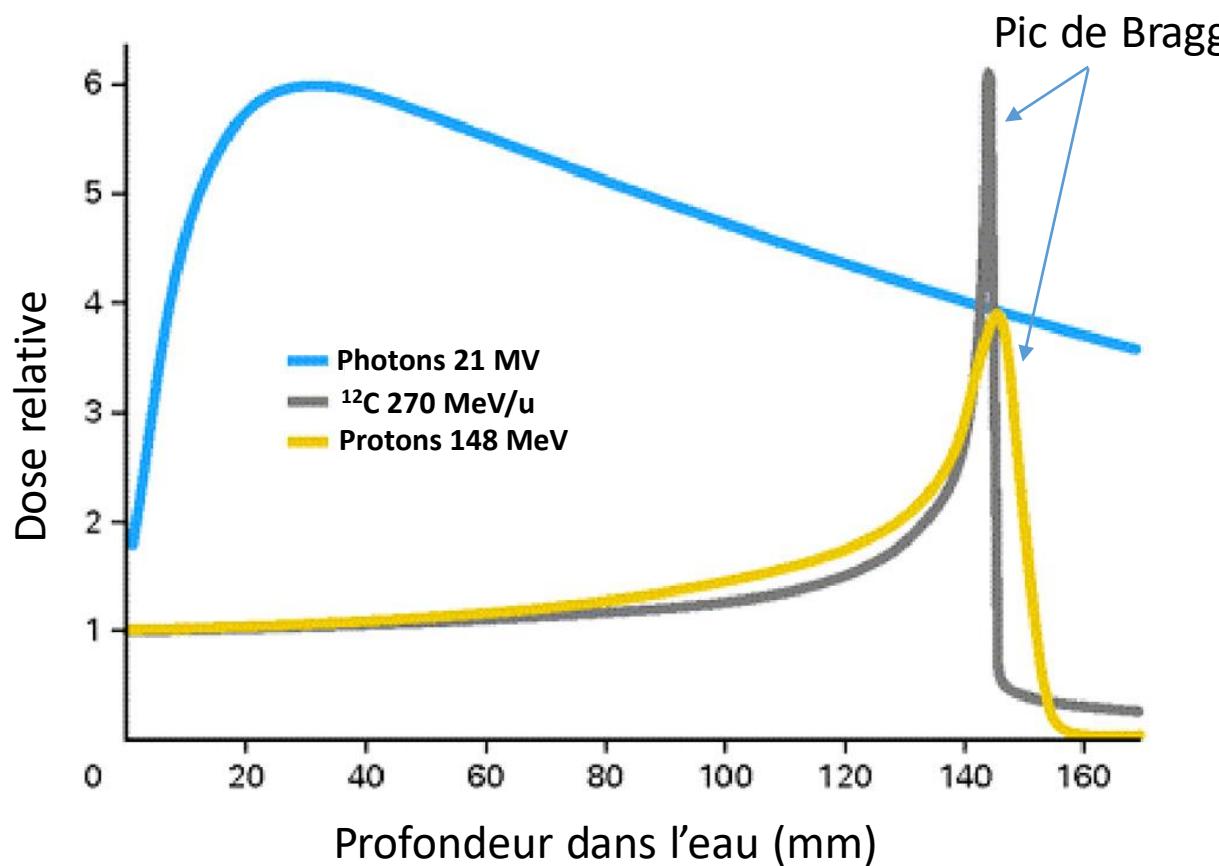
Radiothérapie externe par faisceaux d'ions légers (protons et ions carbone)



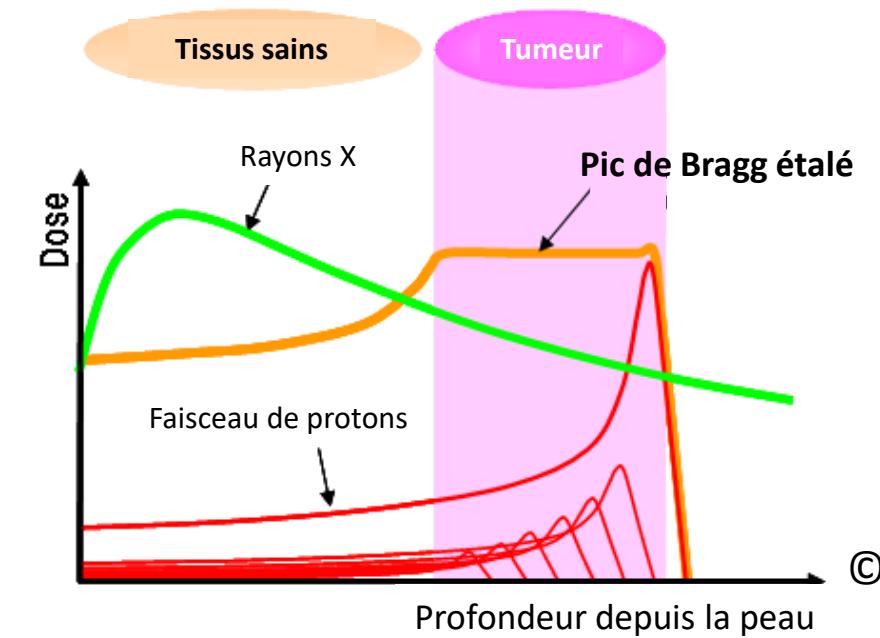
Avraham Dilmanian et al., Front. Oncol. 5 (2015) 269

Hadronthérapie

Radiothérapie externe par faisceaux d'ions légers (protons et ions carbone)



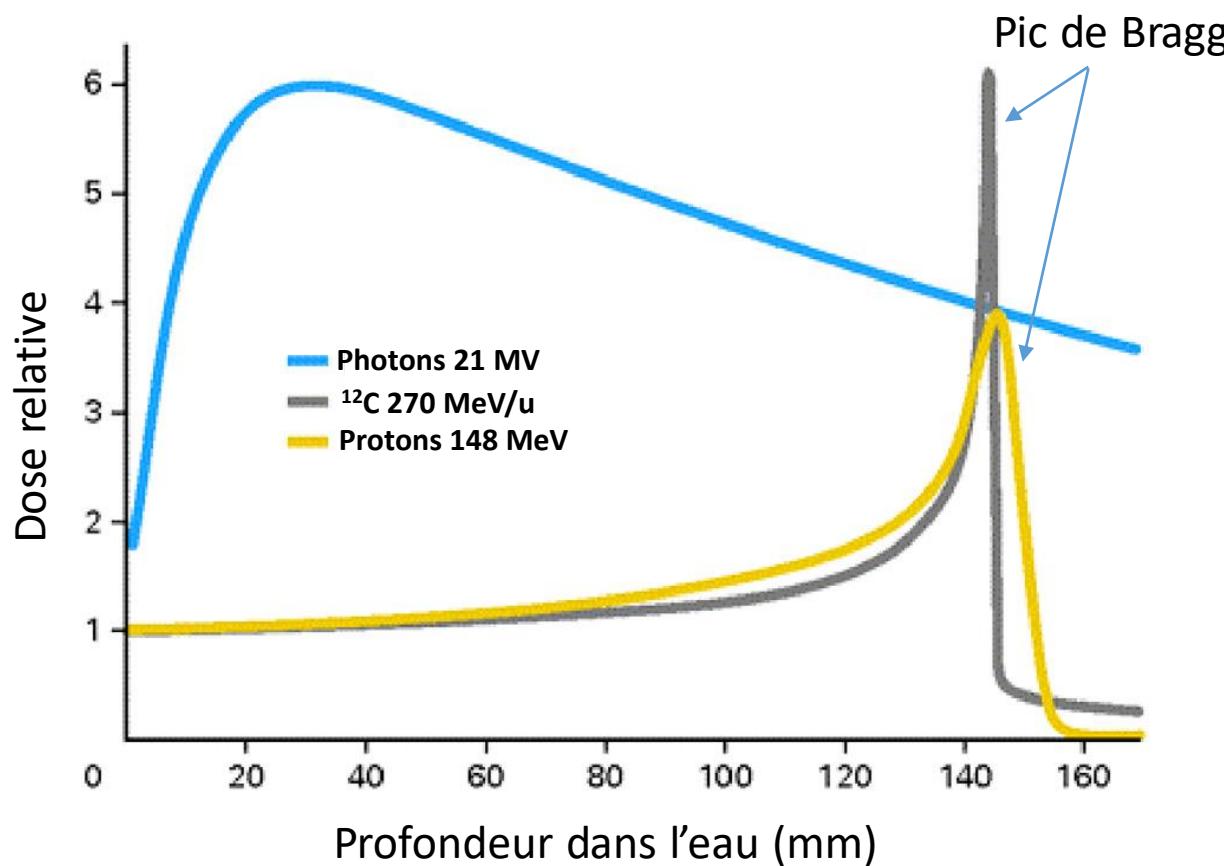
Avraham Dilmanian et al., Front. Oncol. 5 (2015) 269



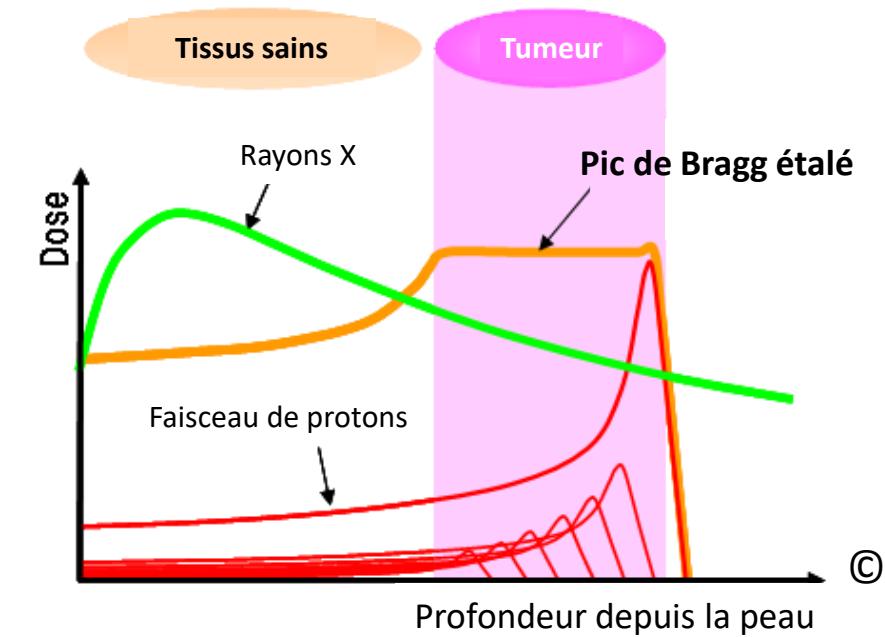
<http://www.shi.co.jp/quantum/eng/product/proton/proton.html>

Hadronthérapie

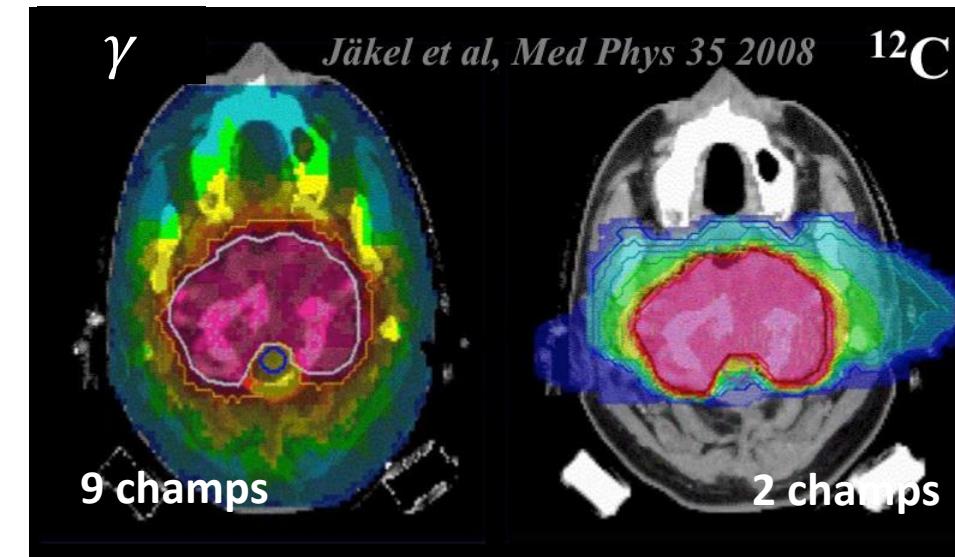
Radiothérapie externe par faisceaux d'ions légers (protons et ions carbone)



Avraham Dilmanian et al., Front. Oncol. 5 (2015) 269

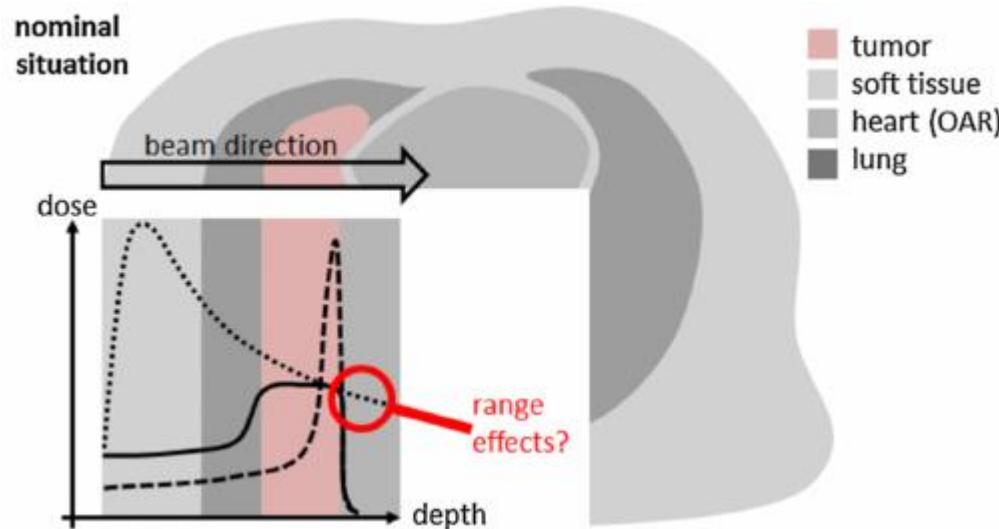


<http://www.shi.co.jp/quantum/eng/product/proton/proton.html>

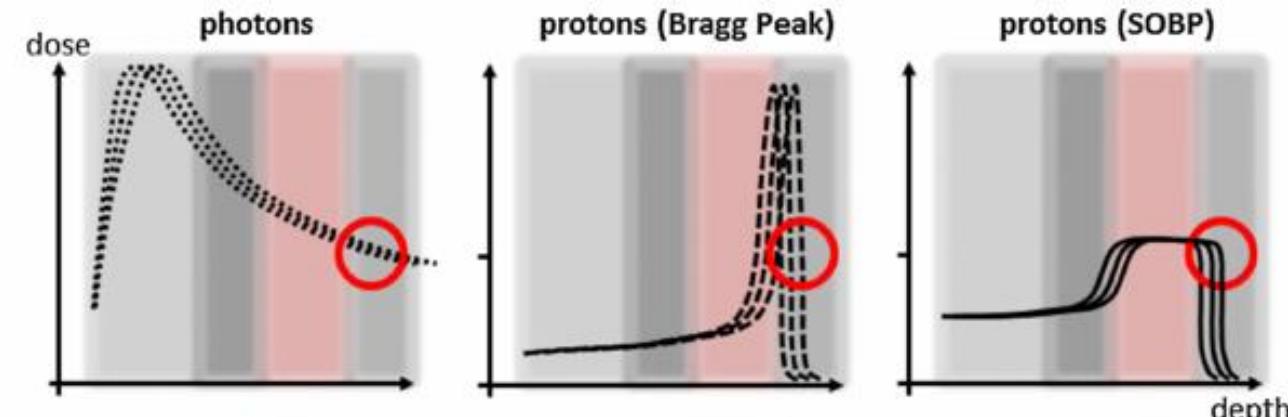


Incertitudes sur le parcours des ions

Planification de dose idéale



Effet des différences de composition des tissus



Knopf and Lomax, Phys. Med. Biol. **58** (2013) R131–R160

Sources d'incertitudes

- Planification du traitement
- Positionnement du patient
- Mouvement des organes
- Evolution morphologique du volume tumoral

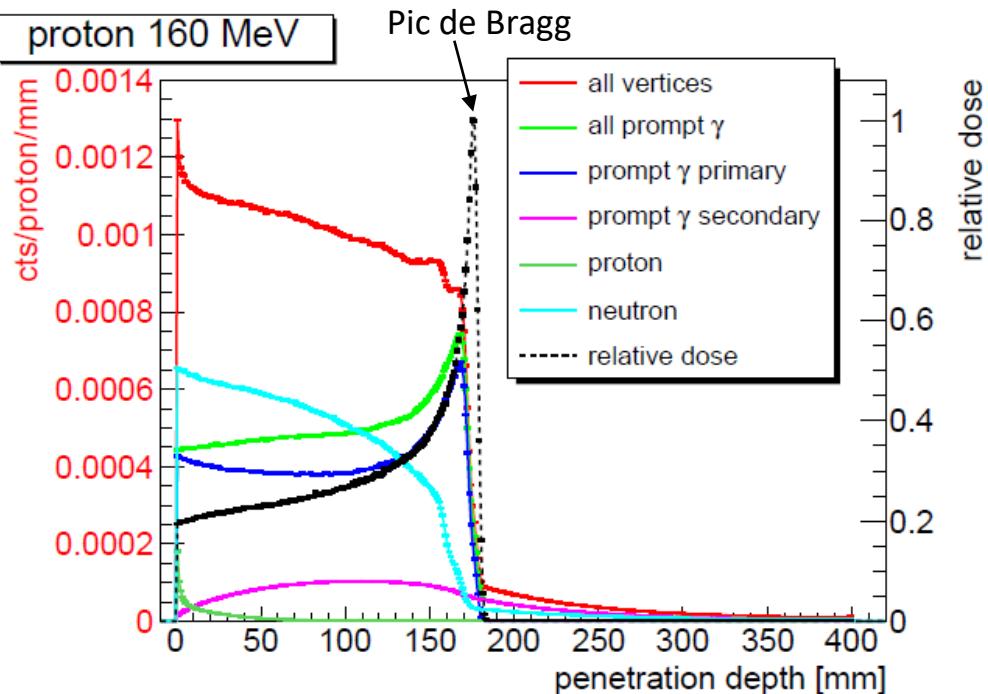


Marges de sécurité cliniques sur parcours effectif
(ex : 1 cm pour parcours 20 cm)



Intérêt d'un contrôle en ligne du parcours des ions

Simulation Geant4



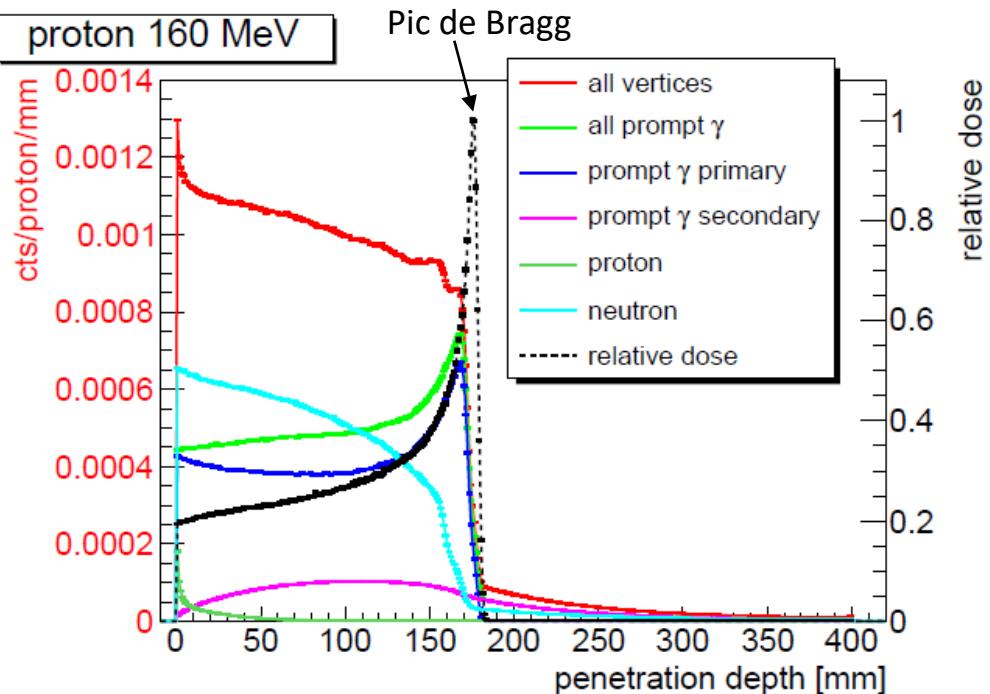
Krimmer et al., Nucl. Instr. Meth. A, **878** (2017) 58-73

Cas des photons gamma-prompts

- Issus de collisions inélastiques ions incidents / noyaux cibles
- $\Delta t_{\text{émission}} \sim 10^{-12} \text{ s}$
- Profil d'émission spatialement corrélé au parcours des ions

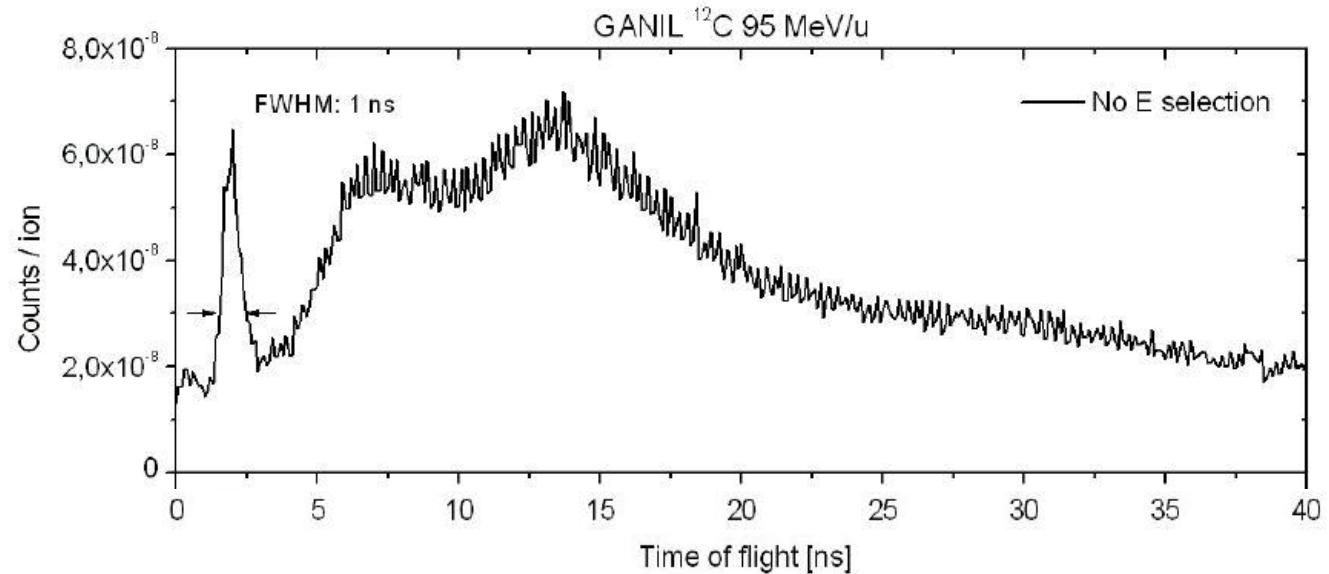
Production de particules secondaires

Simulation Geant4



Krimmer et al., Nucl. Instr. Meth. A, **878** (2017) 58-73

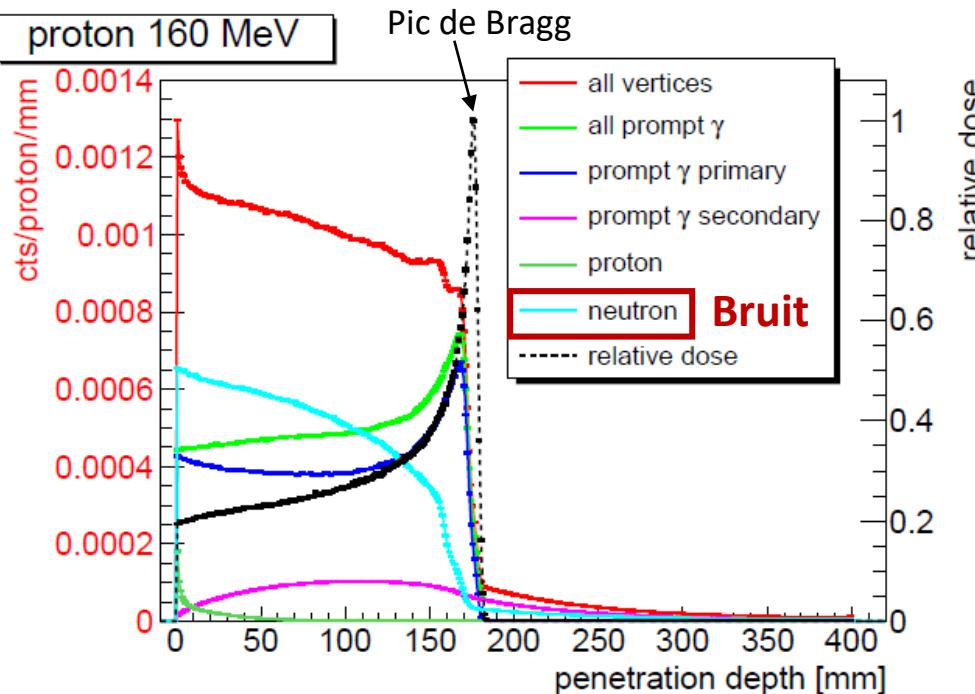
Gamma-prompts : Expérience avec ions ^{12}C @ 95 MeV/u sur cible Plexiglas - Spectre Temps-de-Vol



Mauro Testa, Thèse, Univ. Lyon, 2010

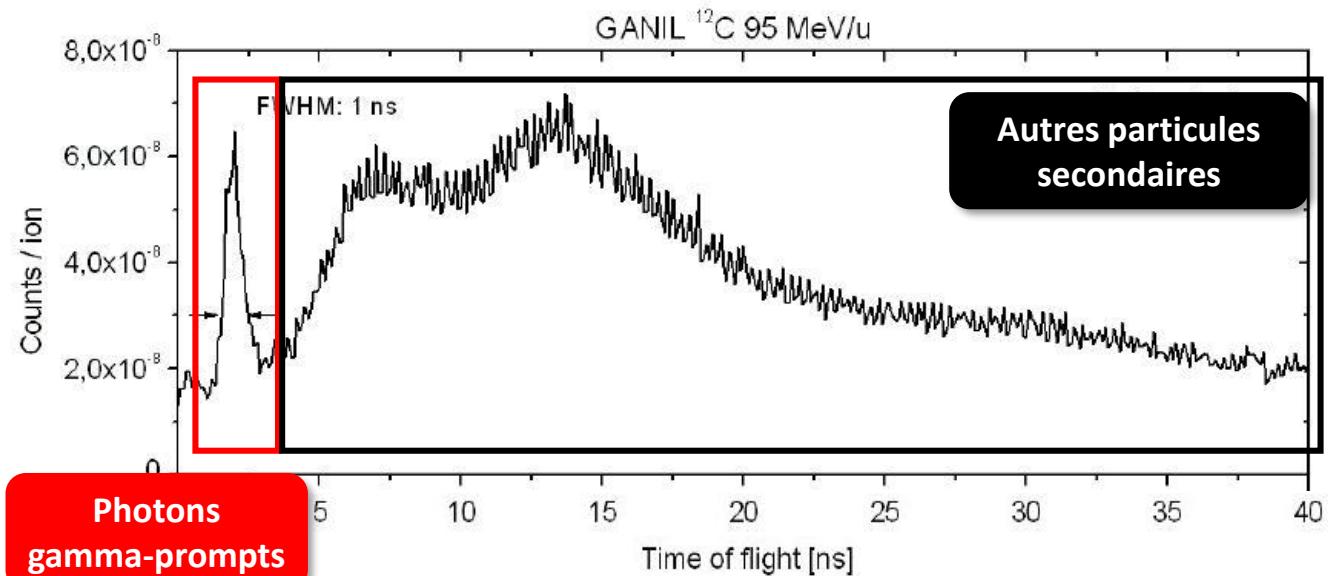
Production de particules secondaires

Simulation Geant4



Krimmer et al., Nucl. Instr. Meth. A, **878** (2017) 58-73

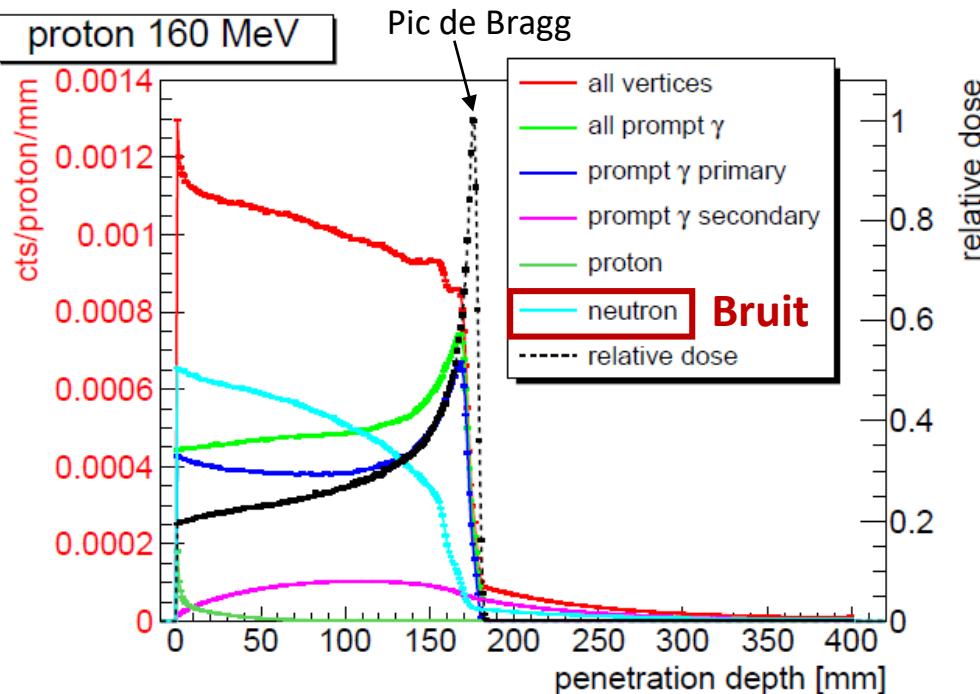
Gamma-prompts : Expérience avec ions ^{12}C @ 95 MeV/u sur cible Plexiglas - Spectre Temps-de-Vol



Mauro Testa, Thèse, Univ. Lyon, 2010

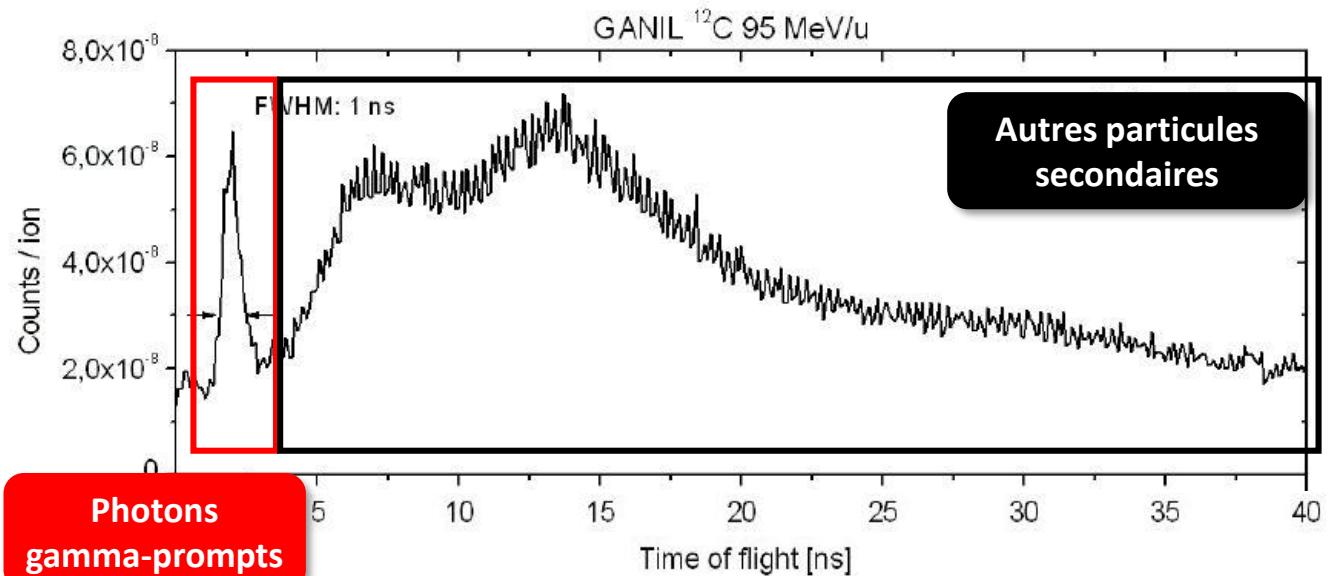
Production de particules secondaires

Simulation Geant4



Krimmer et al., Nucl. Instr. Meth. A, **878** (2017) 58-73

Gamma-prompts : Expérience avec ions ^{12}C @ 95 MeV/u sur cible Plexiglas - Spectre Temps-de-Vol



Mauro Testa, Thèse, Univ. Lyon, 2010

Collaboration CLaRyS

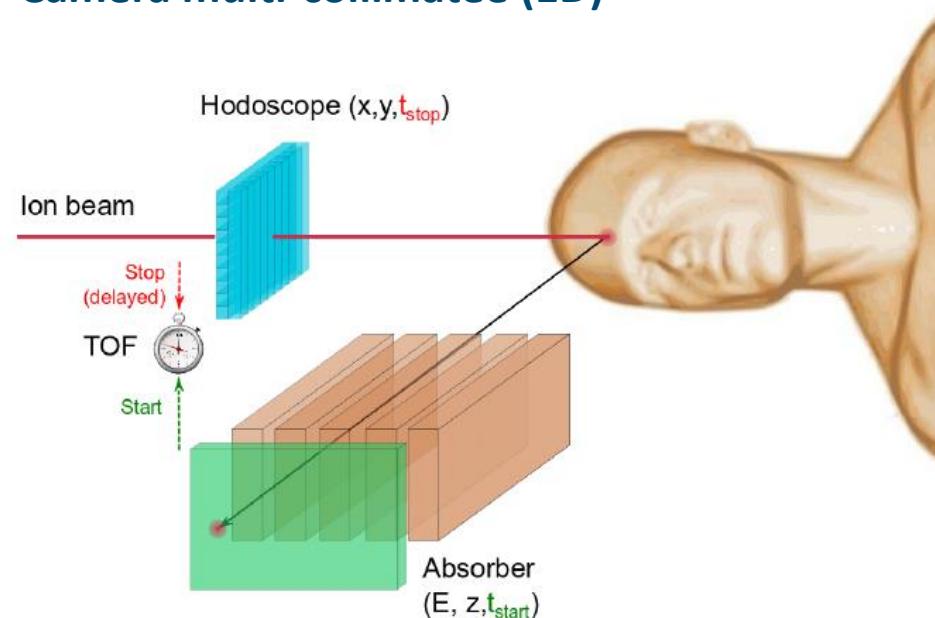
CLaRyS: Contrôle en Ligne de l'hadronthérapie par détection de Rayonnements Secondaires

4 laboratoires: LPSC, IPNL, CPPM, CREATIS Lyon

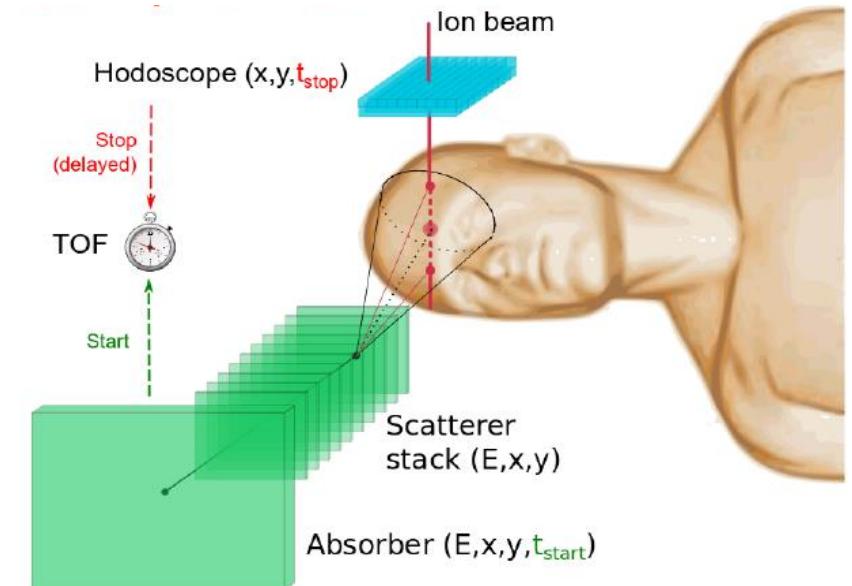
Détection de Photons Gamma Prompts

Imagerie Gamma Prompt par Temps-de-Vol

Caméra multi-collimatée (1D)



Caméra Compton (2D ou 3D)

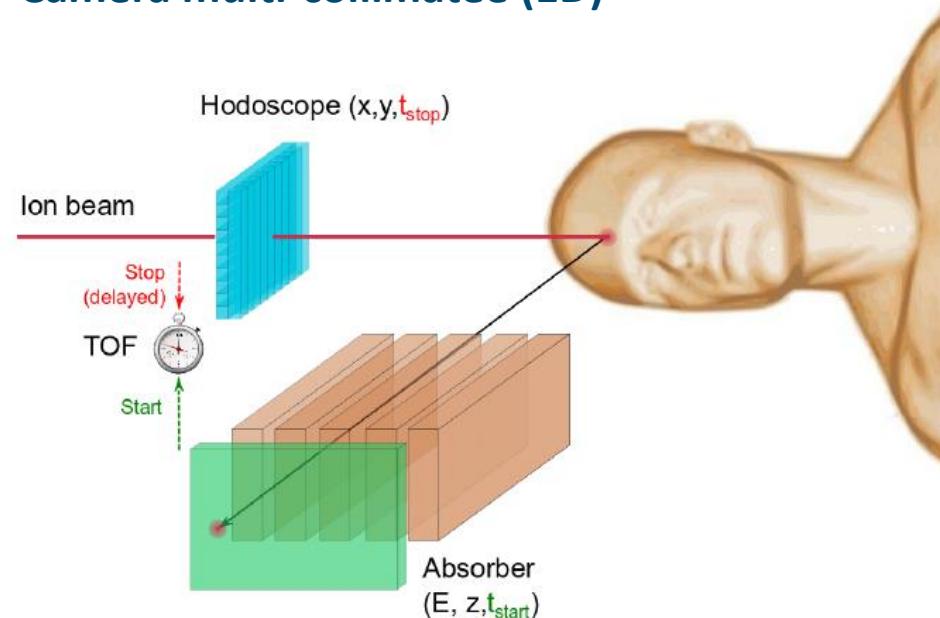


Hodoscope : réduction bruit de fond & position transverse

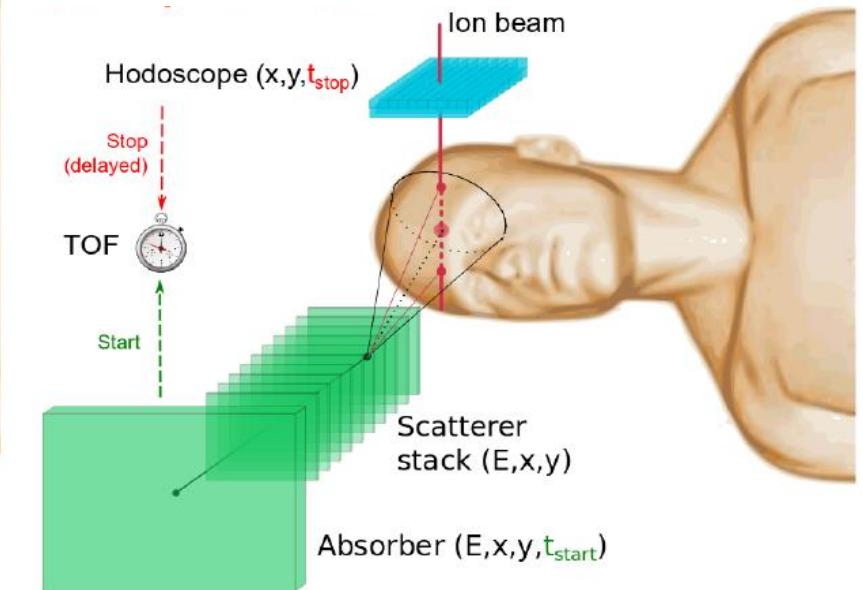
Détection de Photons Gamma Prompts

Imagerie Gamma Prompt par Temps-de-Vol

Caméra multi-collimatée (1D)

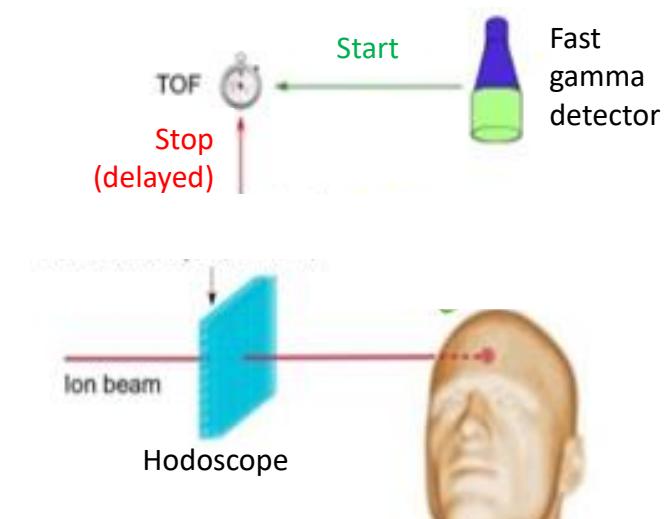


Caméra Compton (2D ou 3D)



Hodoscope : réduction bruit de fond & position transverse

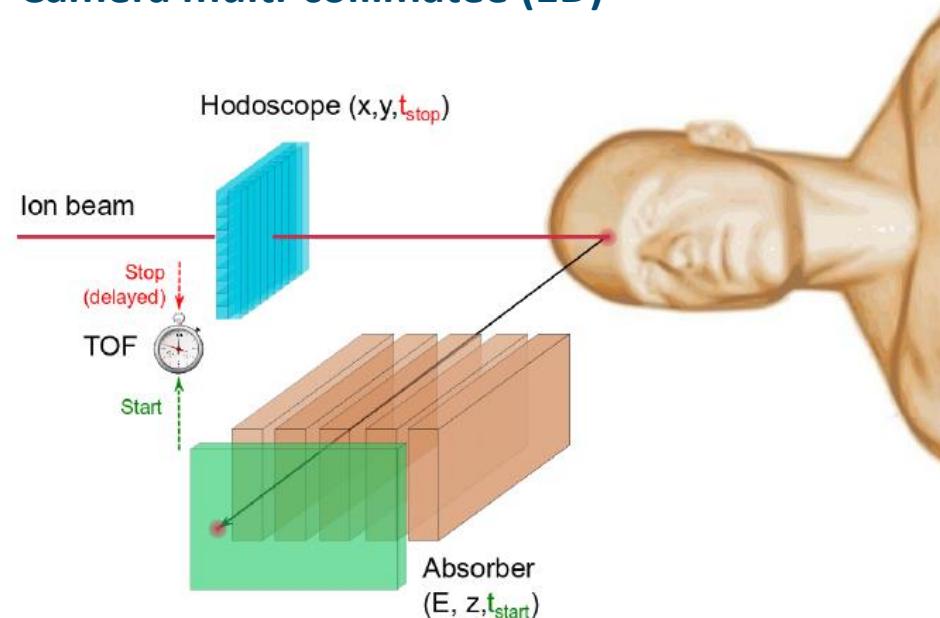
Objectif CLaRyS-Ultra-Fast Timing : Résolution 100 ps



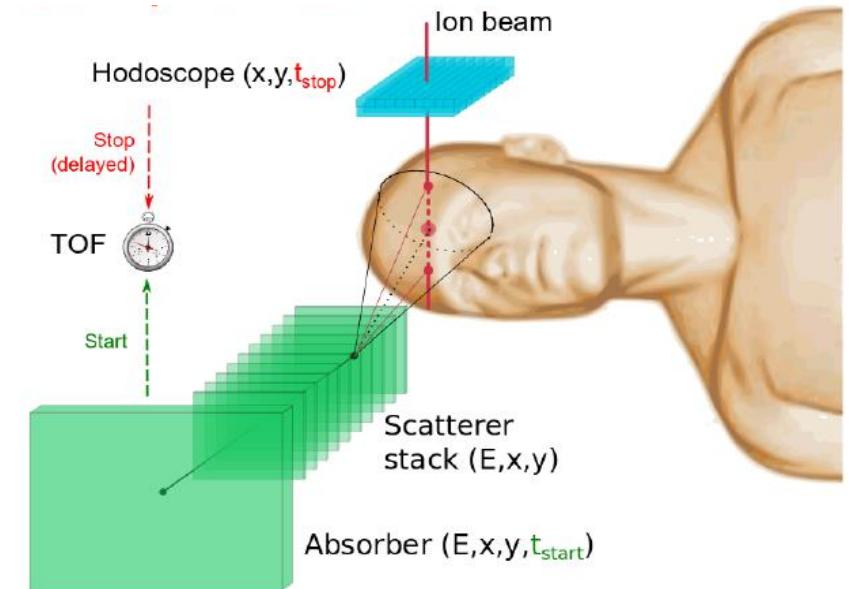
Détection de Photons Gamma Prompts

Imagerie Gamma Prompt par Temps-de-Vol

Caméra multi-collimatée (1D)



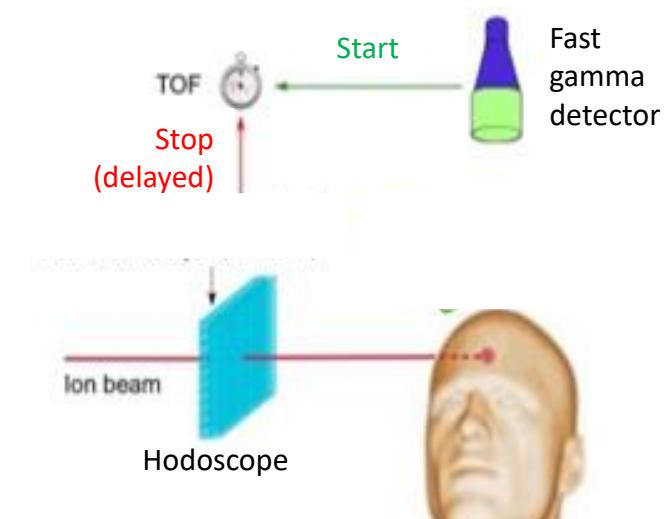
Caméra Compton (2D ou 3D)



Hodoscope : réduction bruit de fond & position transverse

Objectif CLaRyS-Ultra-Fast Timing : Résolution 100 ps

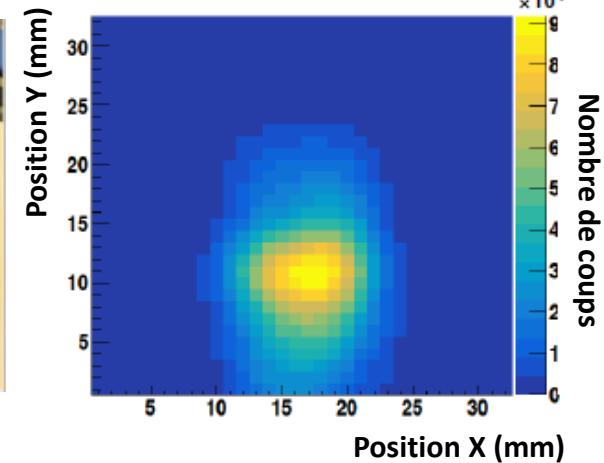
→ Imagerie par Temps-de-Vol uniquement



Développement d'un hodoscope faisceau

IPNL : Hodoscope à fibres scintillantes

- $\sigma_t \sim 1 \text{ ns} \rightarrow$ filtration bruit de fond
- Photomultiplicateurs (512 voies)
- Surface sensible : $12.8 \times 12.8 \text{ cm}^2$
- En cours de test au Centre Antoine Lacassagne (Nice)

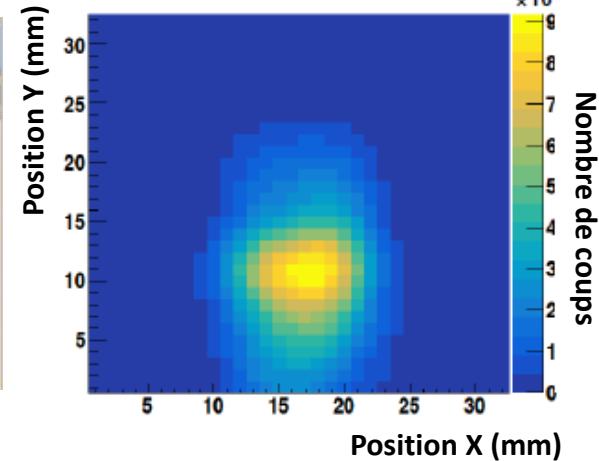


Mattia Fontana, Thèse, Univ. Lyon (2018)

Développement d'un hodoscope faisceau

IPNL : Hodoscope à fibres scintillantes

- $\sigma_t \sim 1 \text{ ns} \rightarrow$ filtration bruit de fond
- Photomultiplicateurs (512 voies)
- Surface sensible : $12.8 \times 12.8 \text{ cm}^2$
- En cours de test au Centre Antoine Lacassagne (Nice)



Mattia Fontana, Thèse, Univ. Lyon (2018)

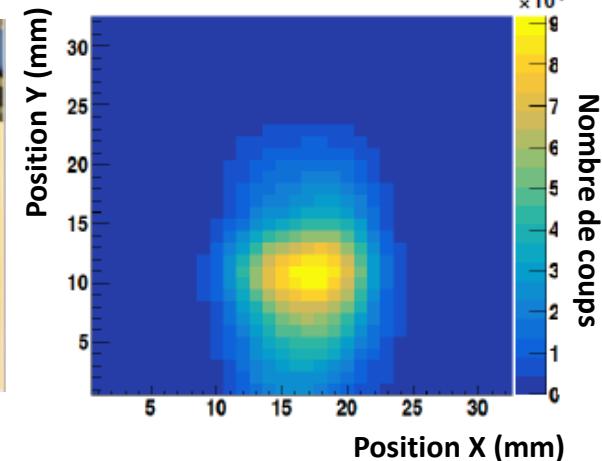
Intérêt de concevoir un nouvel hodoscope avec :

- Excellente résolution temporelle
→ Possibilité de reconstruction uniquement basée sur Temps-de-Vol
- Résistance aux radiations
- Capacité de comptage très élevée

Développement d'un hodoscope faisceau

IPNL : Hodoscope à fibres scintillantes

- $\sigma_t \sim 1 \text{ ns} \rightarrow$ filtration bruit de fond
- Photomultiplicateurs (512 voies)
- Surface sensible : $12.8 \times 12.8 \text{ cm}^2$
- En cours de test au Centre Antoine Lacassagne (Nice)



Mattia Fontana, Thèse, Univ. Lyon (2018)

Intérêt de concevoir un nouvel hodoscope avec :

- Excellente résolution temporelle
→ Possibilité de reconstruction uniquement basée sur Temps-de-Vol
- Résistance aux radiations
- Capacité de comptage très élevée



Diamant synthétique

1. Motivations : Hadronthérapie

- Caractéristiques
- Incertitudes sur le parcours des ions
- Contrôle en ligne : La collaboration CLaRyS

2. Hodoscope diamant : matériel et méthodes

- Le diamant synthétique comme matériau de détection
- Instrumentation des détecteurs
- Méthodes de caractérisation

3. Hodoscope diamant : résultats

- Efficacité de détection
- Réponse spectroscopique
- Résolution temporelle

Conclusions et perspectives

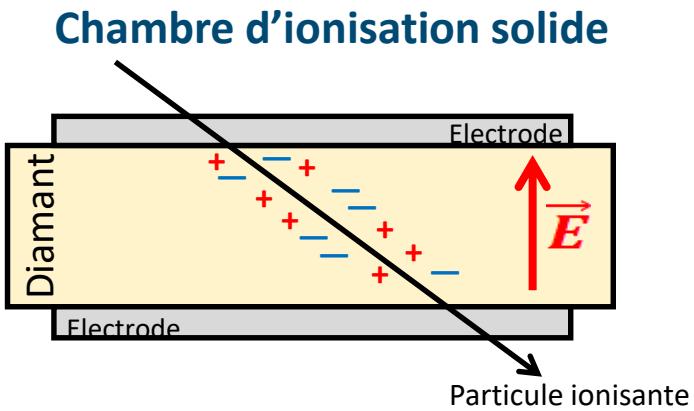
Caractéristiques à 300 K

	Diamant	Silicium
Résistivité ($\Omega \cdot m$)	$> 10^{13}$	$2.3 \cdot 10^7$
Gap (eV)	5.5	1.1
Energie création paire e^-/h (eV)	13.1	3.6
Energie de déplacement (eV)	43	25
Mobilité des porteurs ($cm^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$)	> 2000	800 – 1400
Conductivité thermique ($W \cdot cm^{-1} \cdot K^{-1}$)	18	2



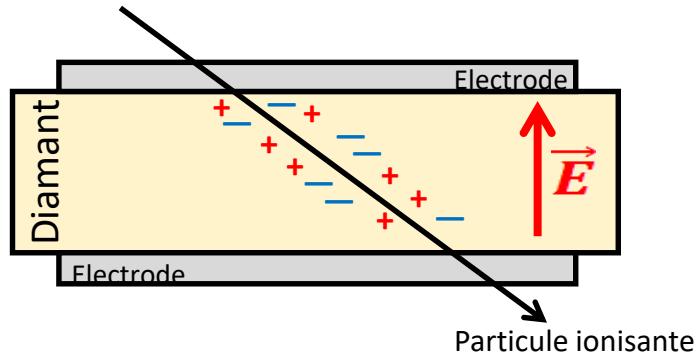
- Courants de fuite très faibles
- Bas bruit
- Résistant aux radiations
- Très rapide
- Opération à température ambiante

Le diamant synthétique comme détecteur

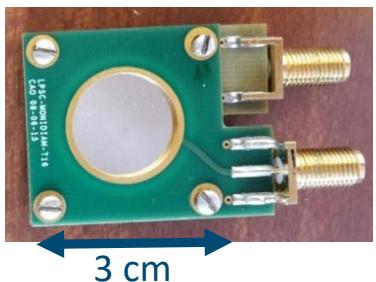
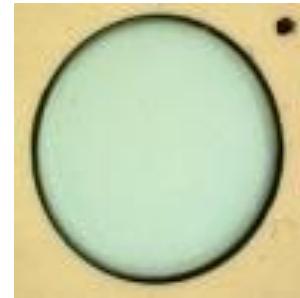


Le diamant synthétique comme détecteur

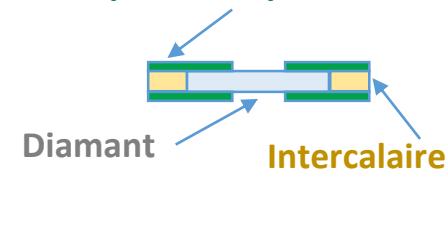
Chambre d'ionisation solide



Assemblage de détecteurs

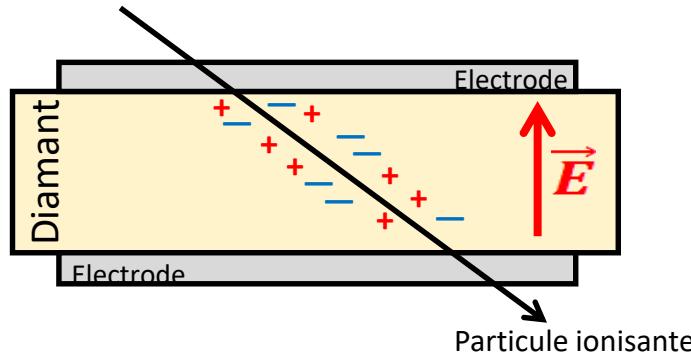


Circuit imprimé adapté 50Ω

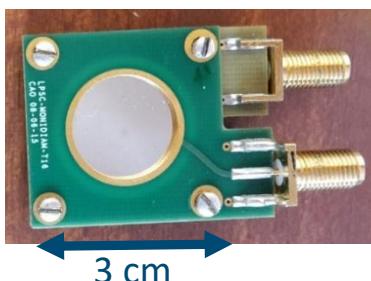
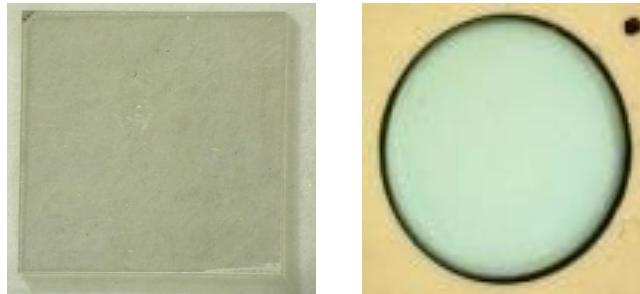


Le diamant synthétique comme détecteur

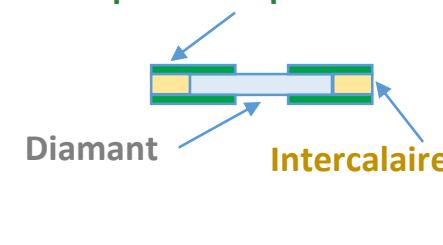
Chambre d'ionisation solide



Assemblage de détecteurs



Circuit imprimé adapté 50Ω



Électronique de lecture

- Préamplificateur de courant



Bande passante: 2 GHz

Gain: 40 dB

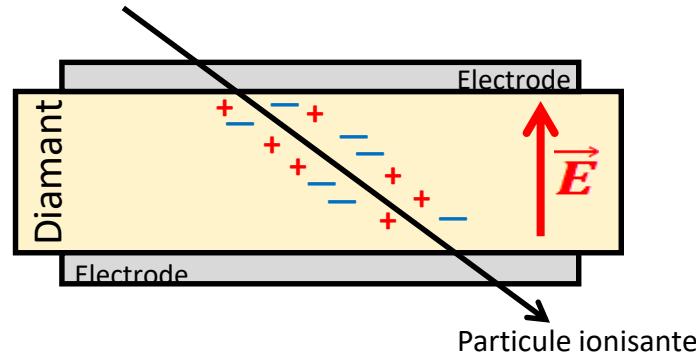
Impédance: 50 Ω

+ selon application :

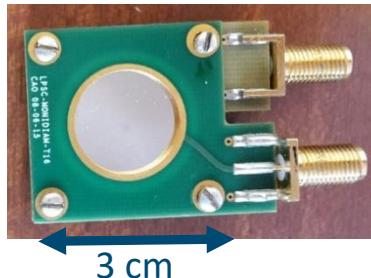
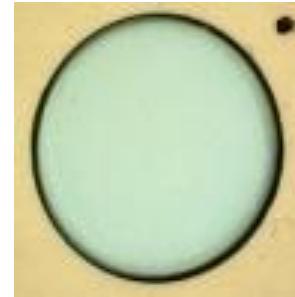
- Préamplificateur de charges
- Electromètre

Le diamant synthétique comme détecteur

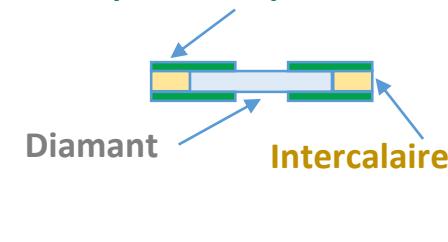
Chambre d'ionisation solide



Assemblage de détecteurs



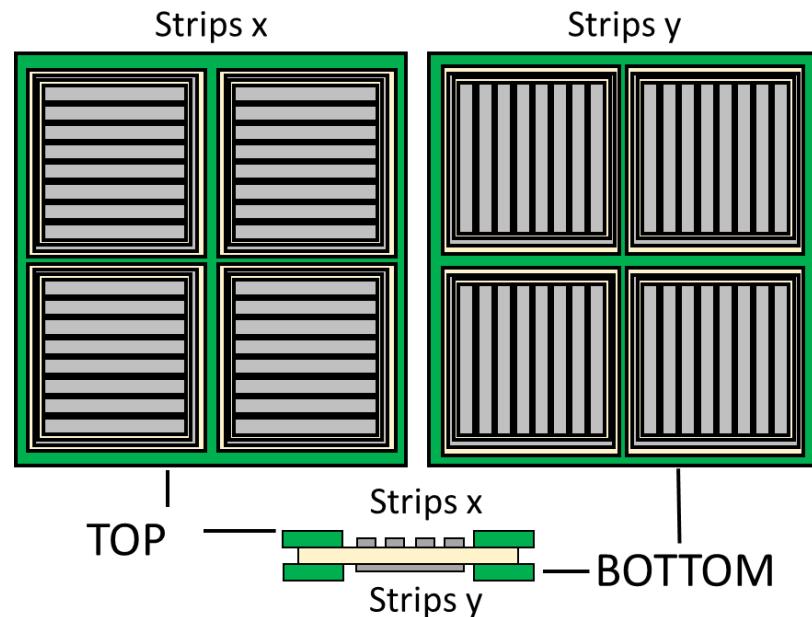
Circuit imprimé adapté 50Ω



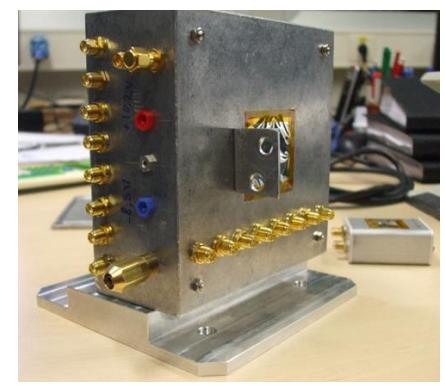
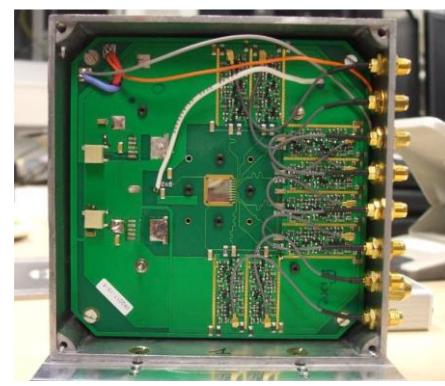
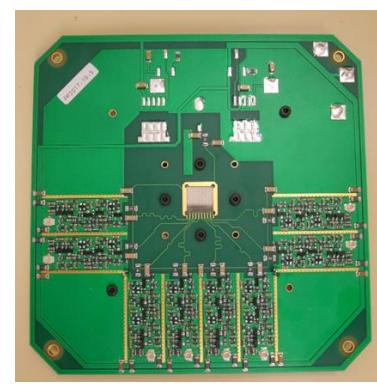
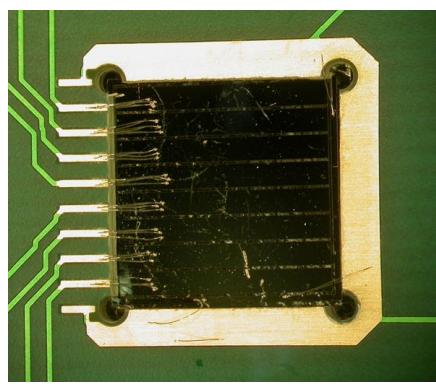
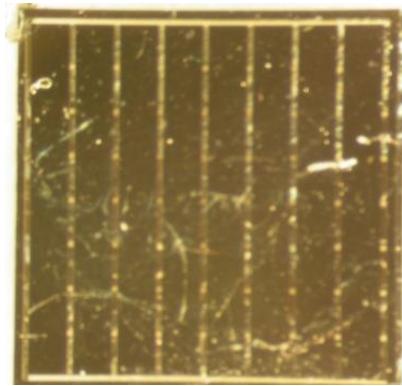
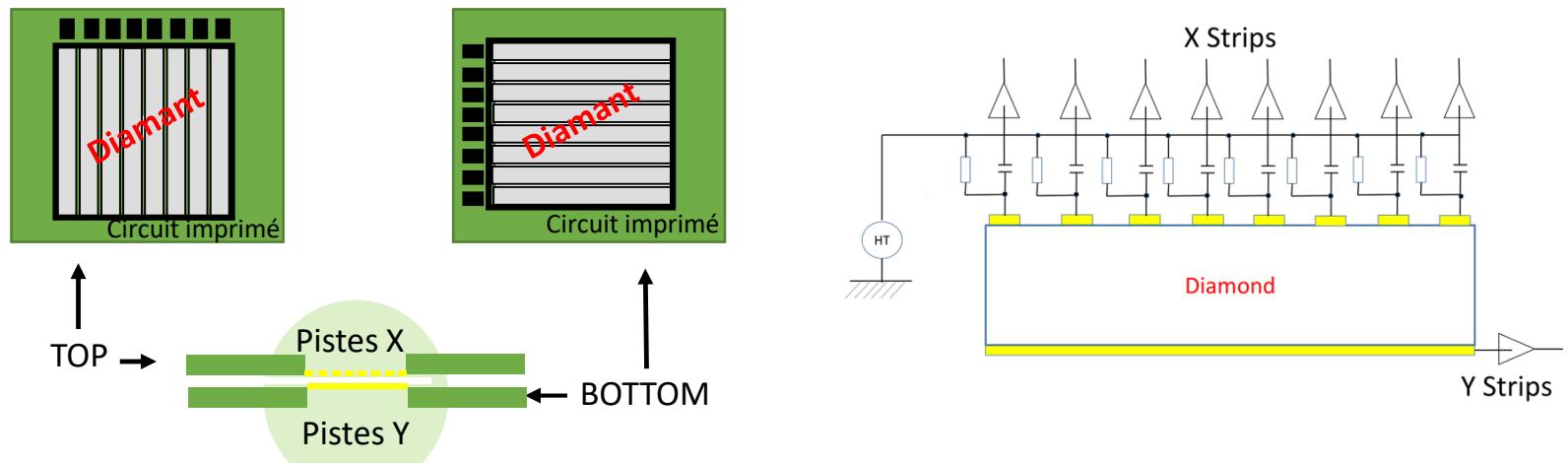
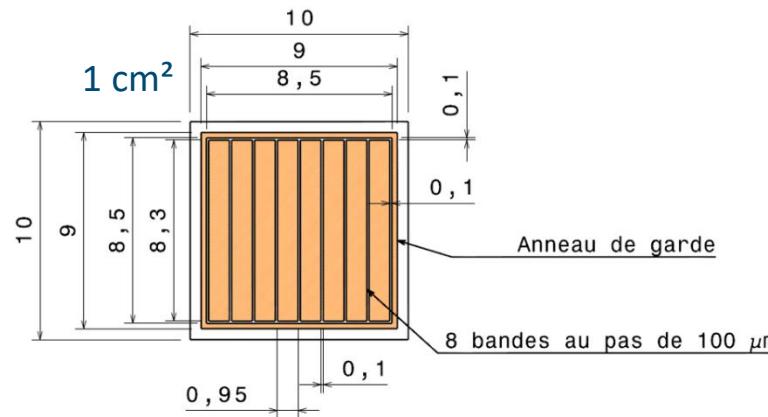
Projet MoniDiam (LPSC) : Hodoscope diamant

Cahier des charges:

- $\sigma_t \sim 100 \text{ ps}$
- Comptage $\sim 10 \text{ MHz/voie}$
- Résolution spatiale $\sim 1 \text{ mm}$
- Résistant aux radiations



DéTECTEURS à pistes



Plateforme NANOFAB @ Institut Néel

- Dépôt pistes par lithographie UV
- Fils de liaison piste/circuit

LPSC Grenoble

- Circuits imprimés
- Préamplificateurs de courant
- Montage et assemblage

Différents type de diamants

2 procédés de croissance:

- Haute Pression-Haute Température (contamination azote et bore)
- Dépôt Chimique en phase Vapeur (CVD)

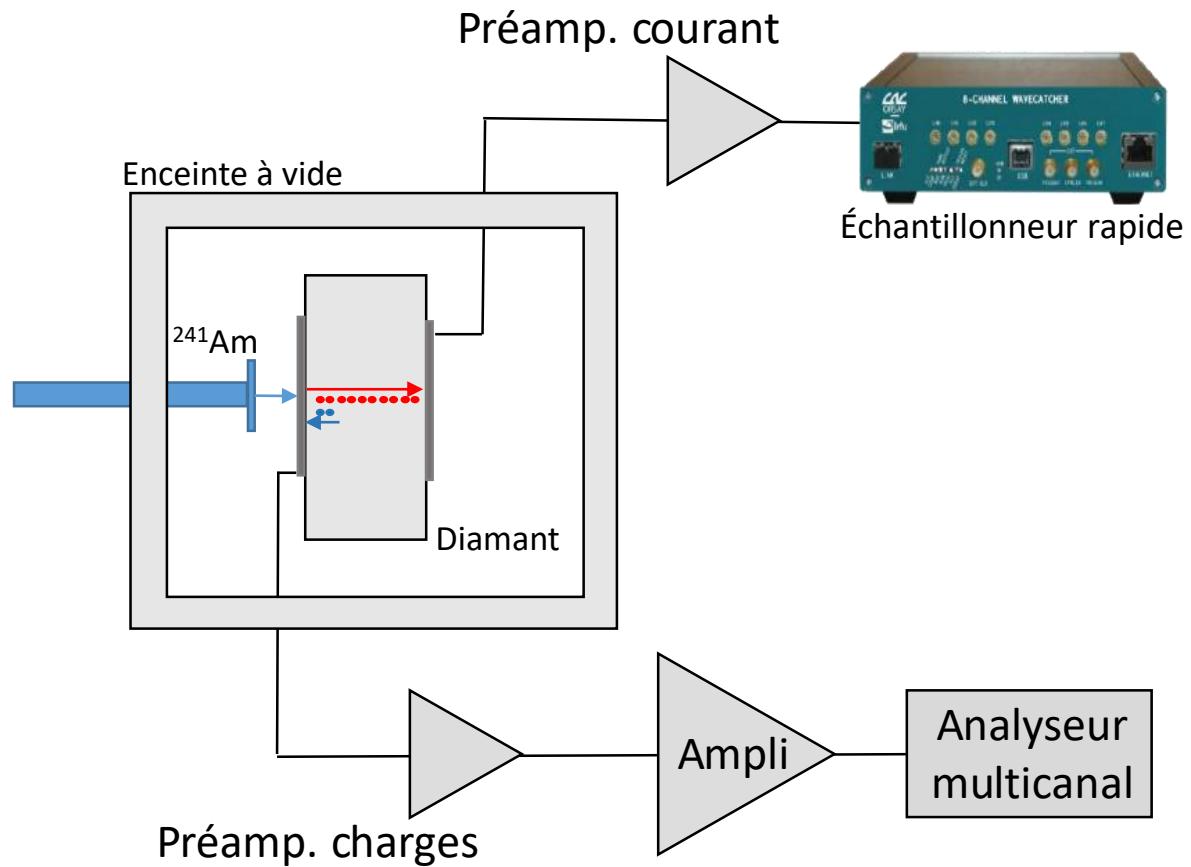
	Monocristallin (sc)	Polycristallin (pc)	Hétéroépitaxie sur Iridium (DOI)
Taille max dispo.	5 x 5 mm ²	20 x 20 mm ²	10 x 10 mm ²
Rapidité	+++	++	++
Sensibilité	++	+	?
Homogénéité	++	?	?
Disponibilité			
Prix	€€€	€	€€

Caractérisation en laboratoire

Source $\alpha = {}^{241}\text{Am}$ ($\sim 5.5 \text{ MeV}$, 6.38 kBq)

$\leftrightarrow 14 \mu\text{m}$ dans diamant (\ll épaisseur)

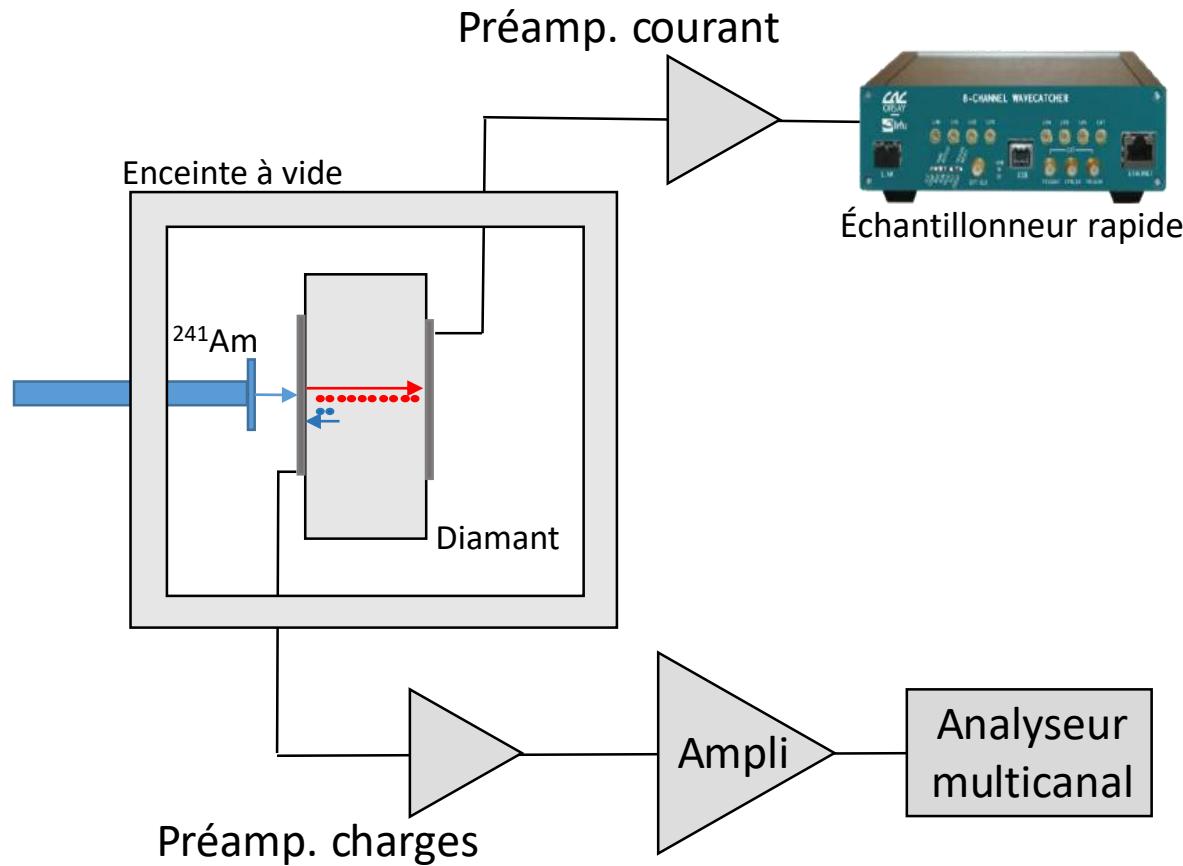
→ Polarisation sélectionne le porteur de charges étudié



Caractérisation en laboratoire

Source $\alpha = {}^{241}\text{Am}$ ($\sim 5.5 \text{ MeV}$, 6.38 kBq)
 $\leftrightarrow 14 \mu\text{m}$ dans diamant (\ll épaisseur)

→ Polarisation sélectionne le porteur de charges étudié



Electronique rapide

Conserve la forme originelle du signal généré dans le diamant

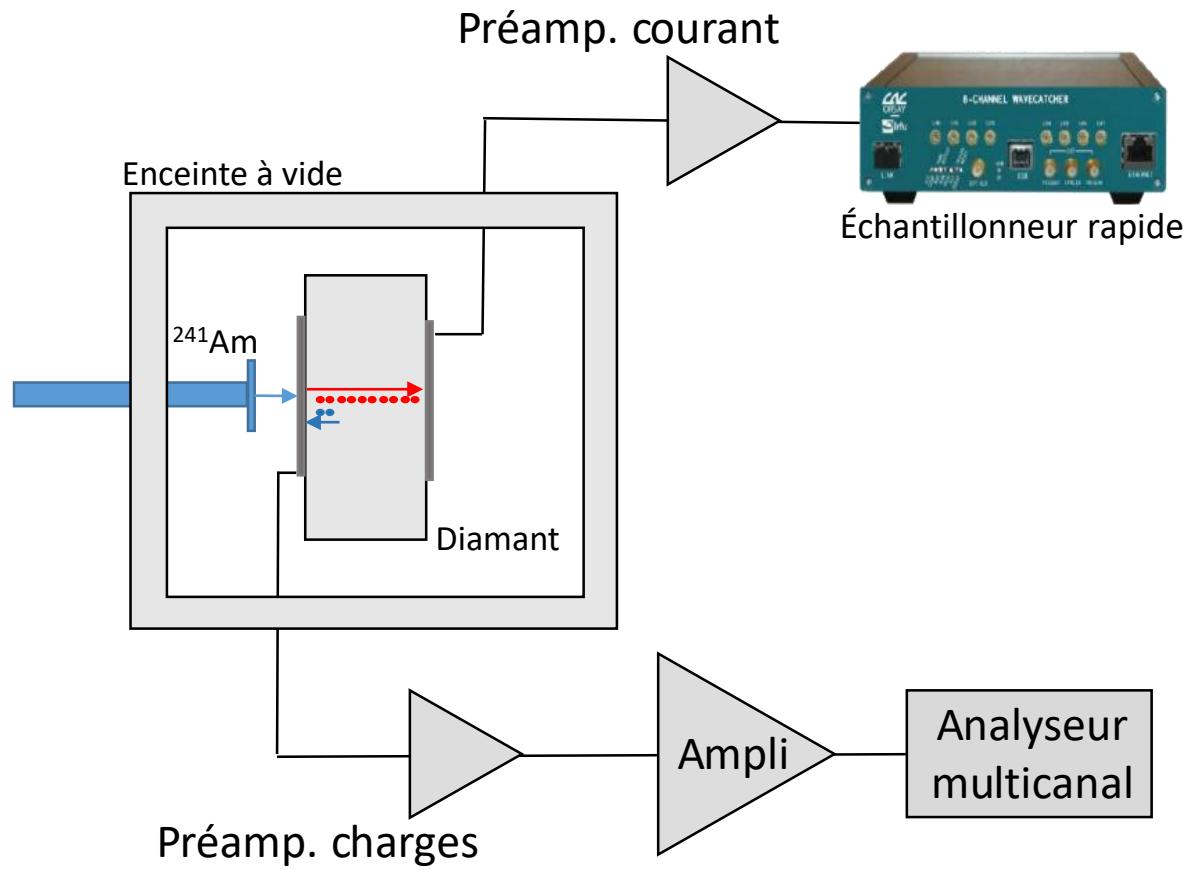
- Analyse de forme → qualité de l'échantillon
- Propriétés porteurs de charges (vitesses de dérive, mobilités, temps de vie effectif...)

Caractérisation en laboratoire

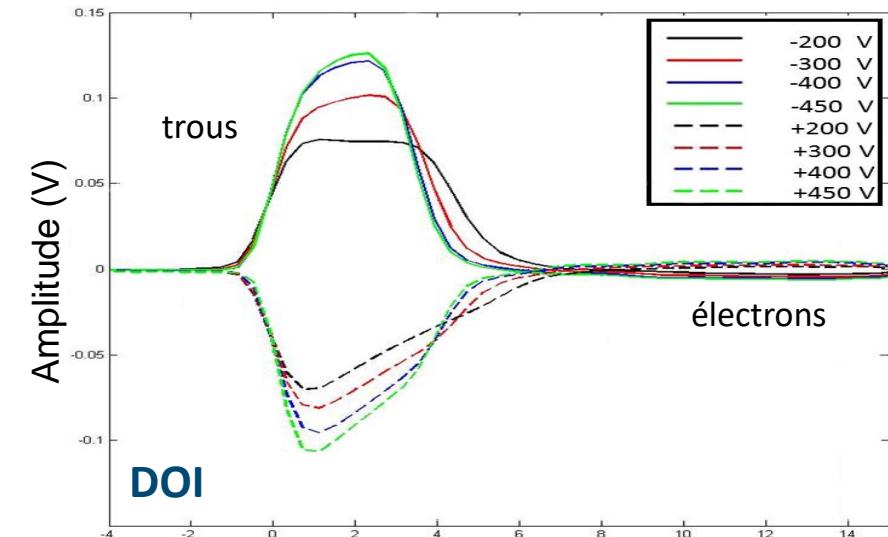
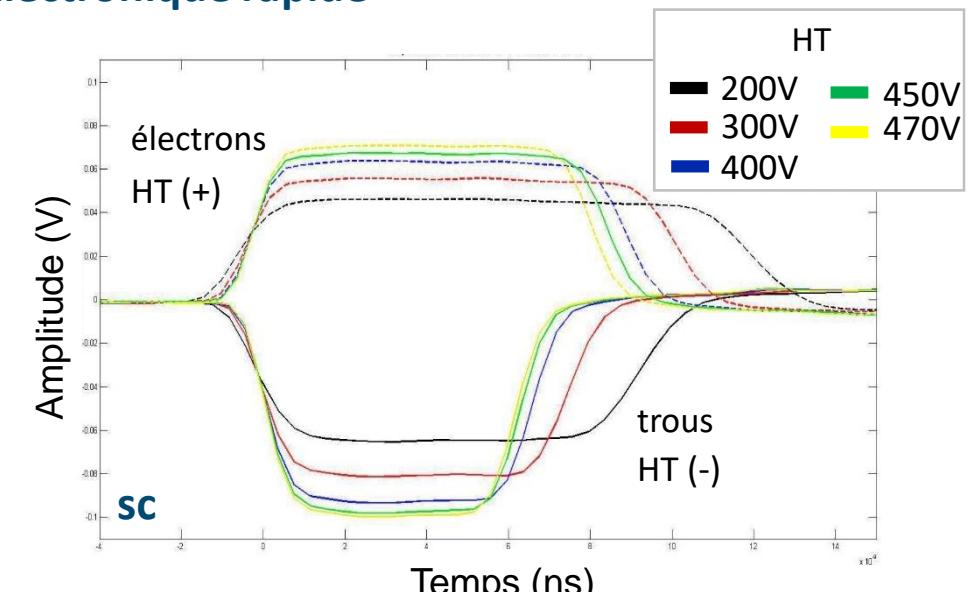
Source $\alpha = {}^{241}\text{Am}$ ($\sim 5.5 \text{ MeV}$, 6.38 kBq)

$\leftrightarrow 14 \mu\text{m}$ dans diamant (\ll épaisseur)

→ Polarisation sélectionne le porteur de charges étudié



Electronique rapide

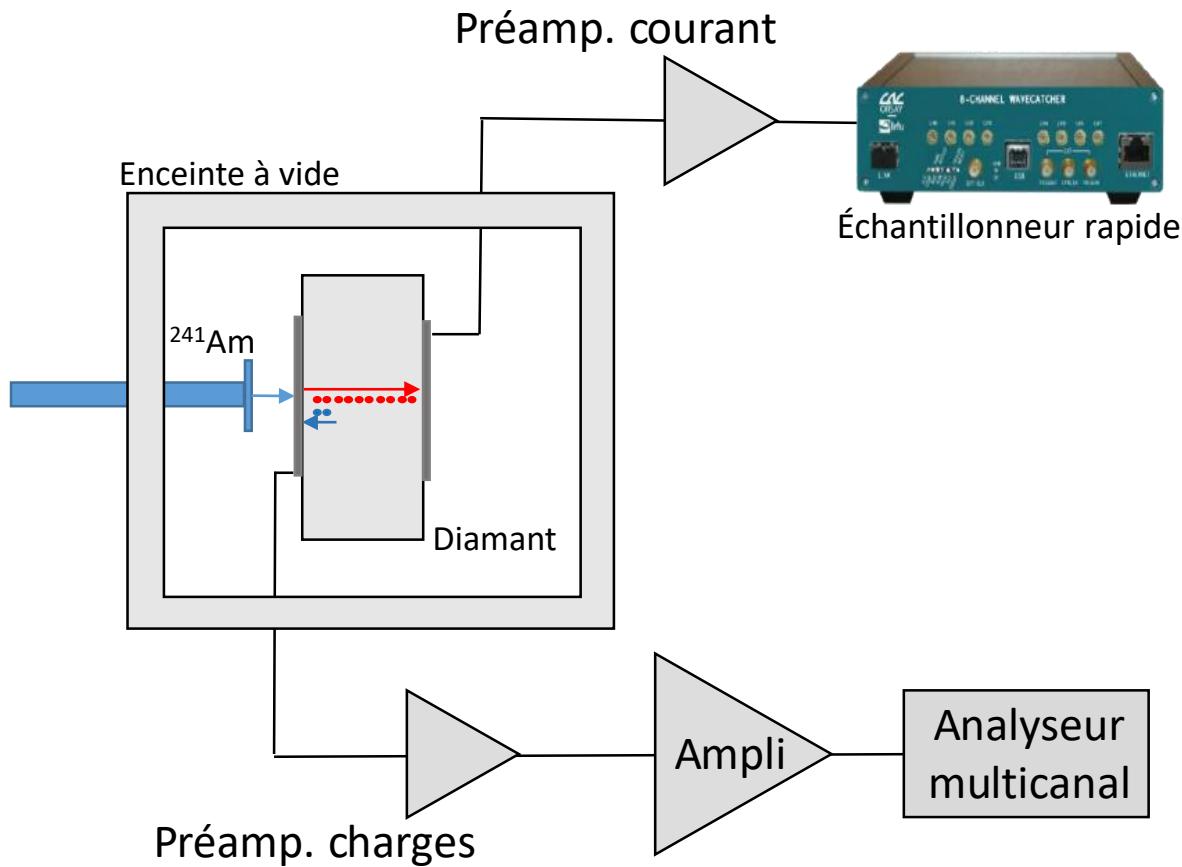


Caractérisation en laboratoire

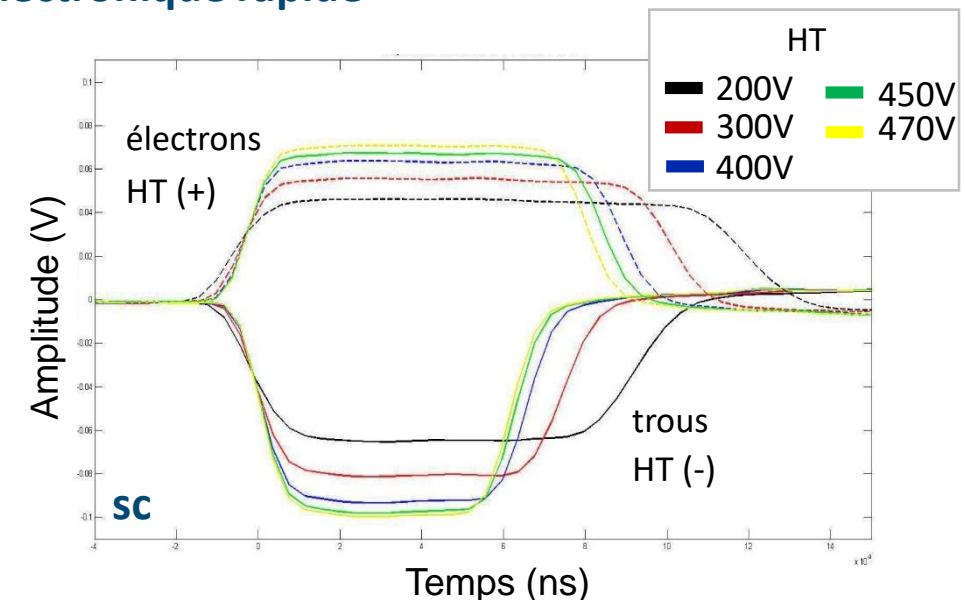
Source $\alpha = {}^{241}\text{Am}$ ($\sim 5.5 \text{ MeV}$, 6.38 kBq)

$\leftrightarrow 14 \mu\text{m}$ dans diamant (\ll épaisseur)

→ Polarisation sélectionne le porteur de charges étudié



Electronique rapide



Electronique de spectroscopie

Intègre/filtre le signal

→ Augmente le rapport Signal/Bruit

- Résolution en énergie
- Efficacité de Collection de Charges (CCE)

$$CCE = Q_{\text{collectée}} / Q_{\text{générée}}$$

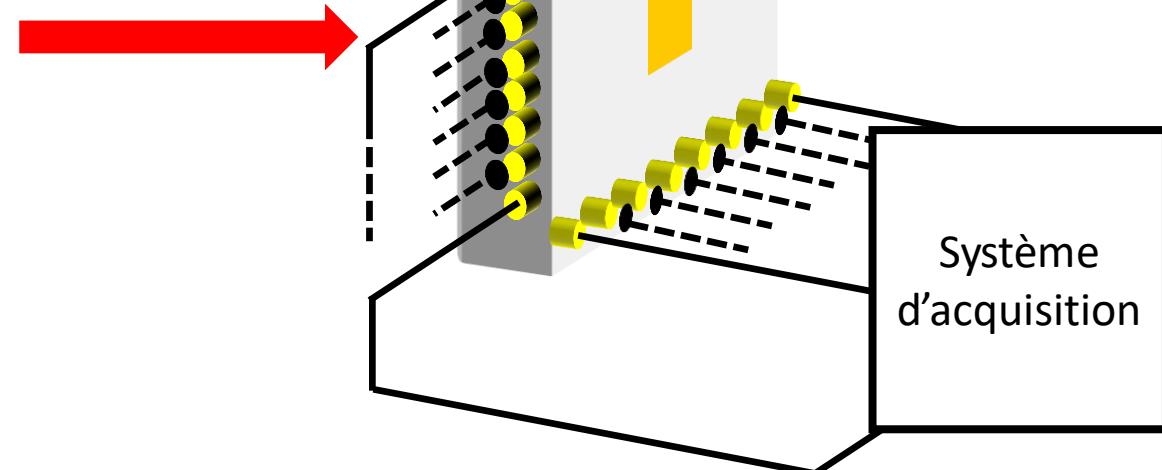
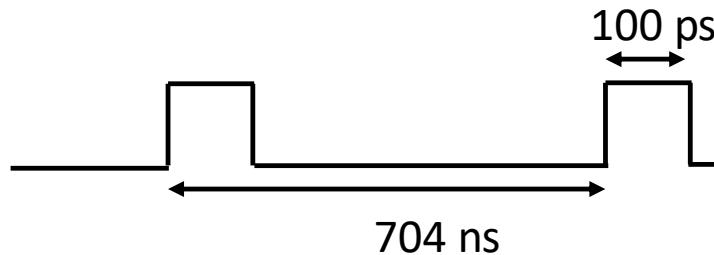
Caractérisation sous microfaisceau X



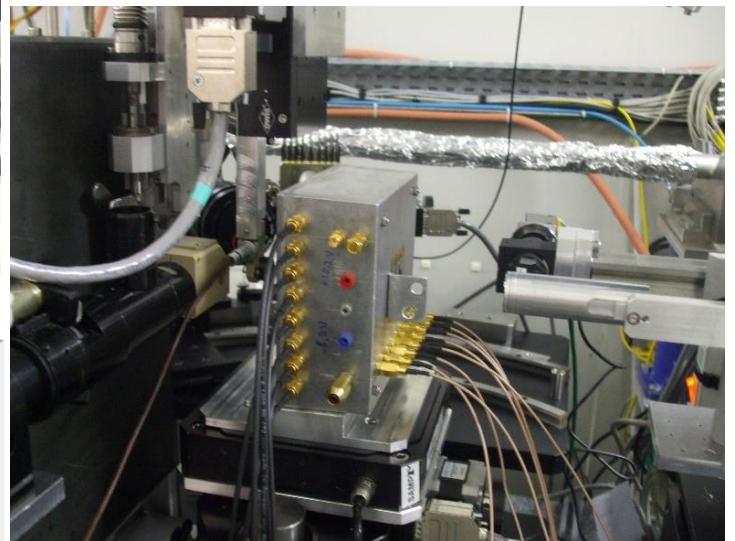
Microfaisceau pulsé Rayons X (8.5 keV)

~1500 photons / pulse

Ø spot : 1 µm

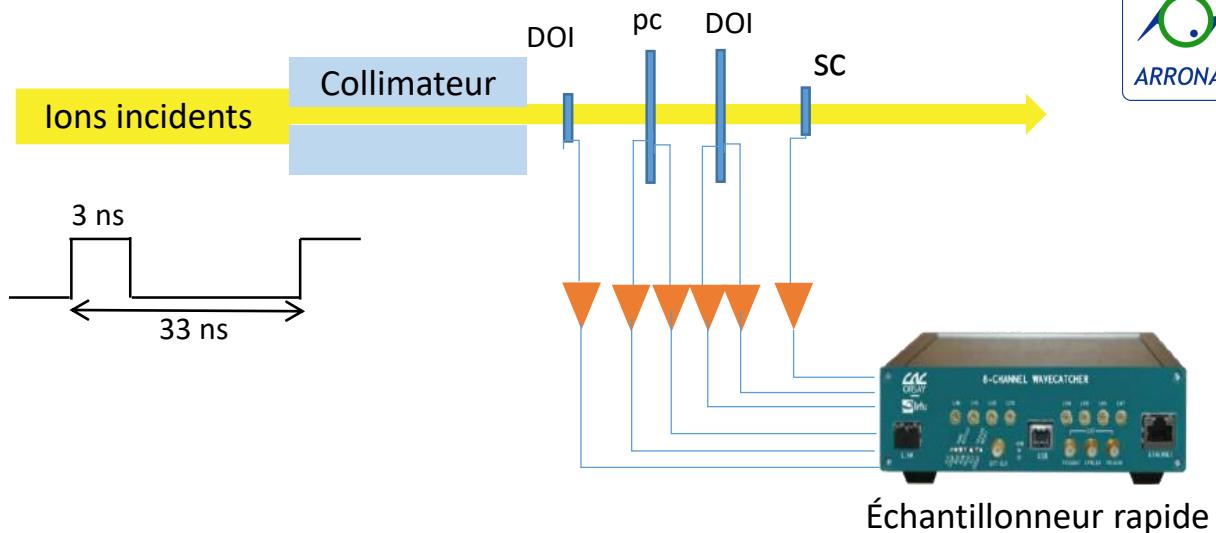


- Mode courant : Balayage de la surface
- Mode impulsion : Performance détecteurs à pistes



Evaluation de la résolution temporelle

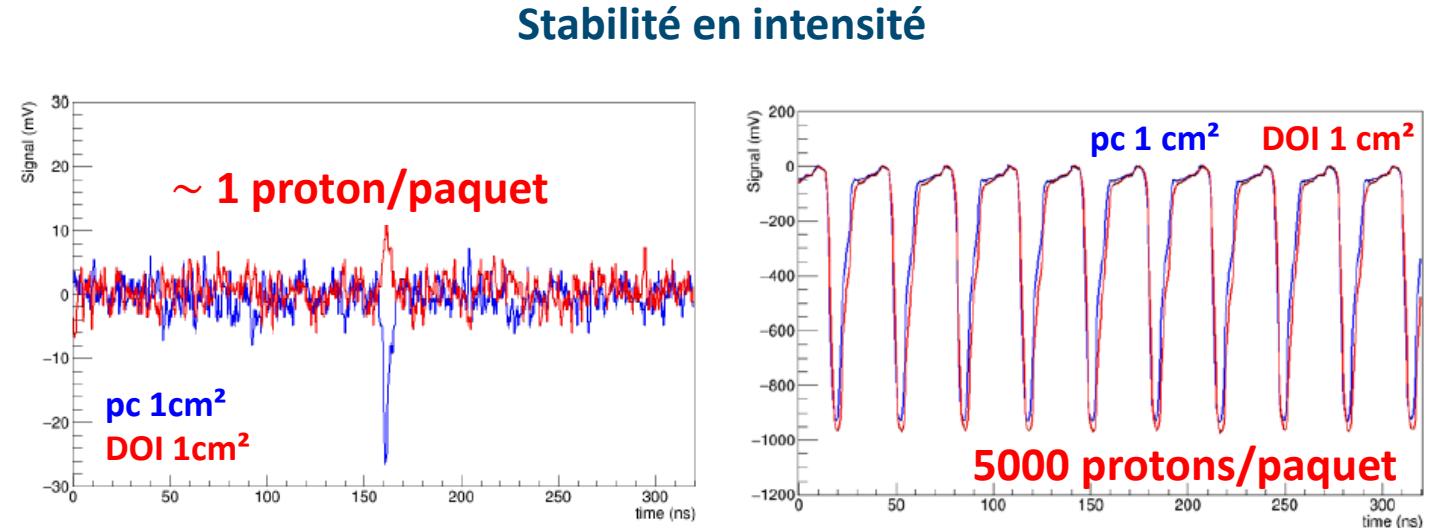
- Numérisation des signaux
- Discrimination à Fraction Constante numérique
- Distribution en temps + ajustement



Efficacité de détection de particule unique

- Balayage en fonction de la valeur de seuil appliquée

$$\varepsilon = \frac{N_{\text{triple}}}{N_{\text{double}}} \left(1 - \frac{N_{\text{fortuites}}}{N_{\text{double}}} \right)$$



1. Motivations : Hadronthérapie

- Caractéristiques
- Incertitudes sur le parcours des ions
- Contrôle en ligne : La collaboration CLaRyS

2. Hodoscope diamant : matériel et méthodes

- Le diamant synthétique comme matériau de détection
- Instrumentation des détecteurs
- Méthodes de caractérisation

3. Hodoscope diamant : résultats

- Efficacité de détection
- Réponse spectroscopique
- Résolution temporelle

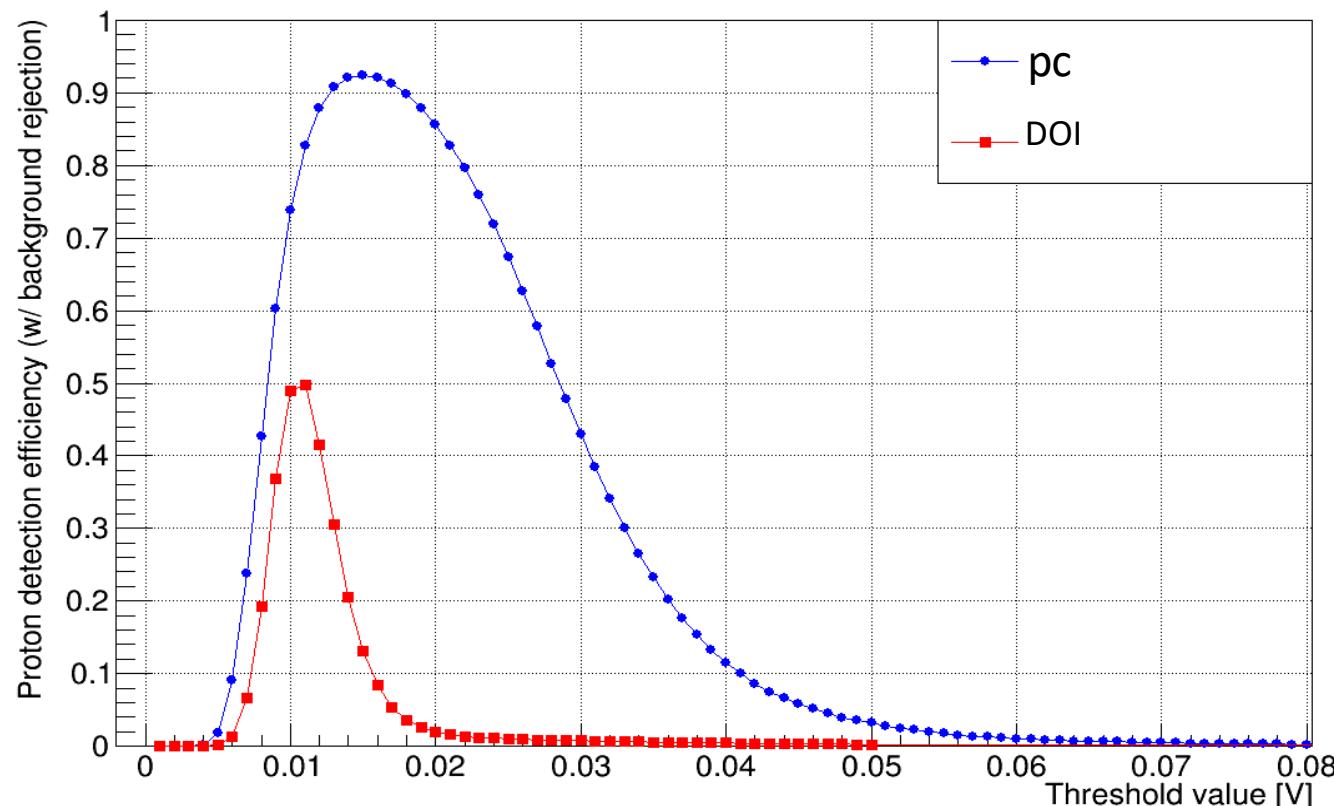
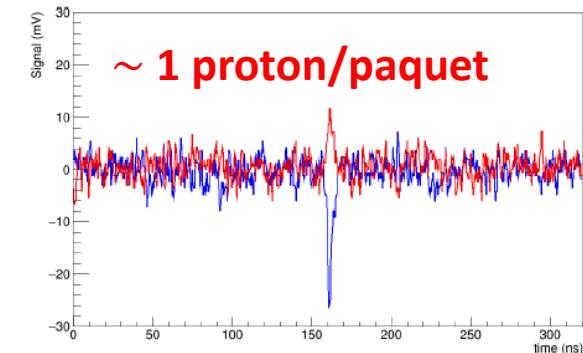
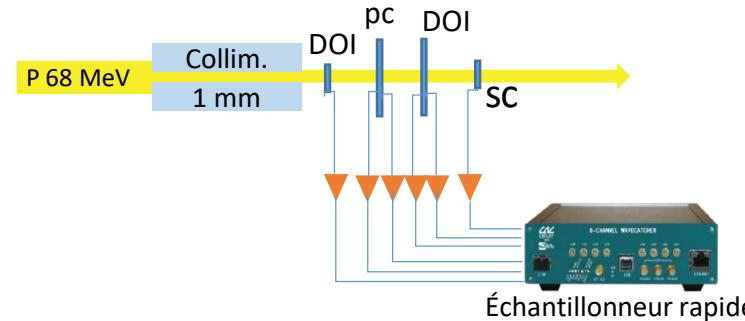
Conclusions et perspectives

Efficacité de détection

Faisceau pulsé - protons 68 MeV
 $\Delta E = 1 \text{ MeV}$ (300 μm diamant)

- Filtration événements (amplitude et temps de Vol)
- Sommation signaux faces opposées:
 $\rightarrow \text{Rapport Signal/Bruit} \times \sqrt{2}$
- Balayage en fonction de la valeur de seuil appliquée

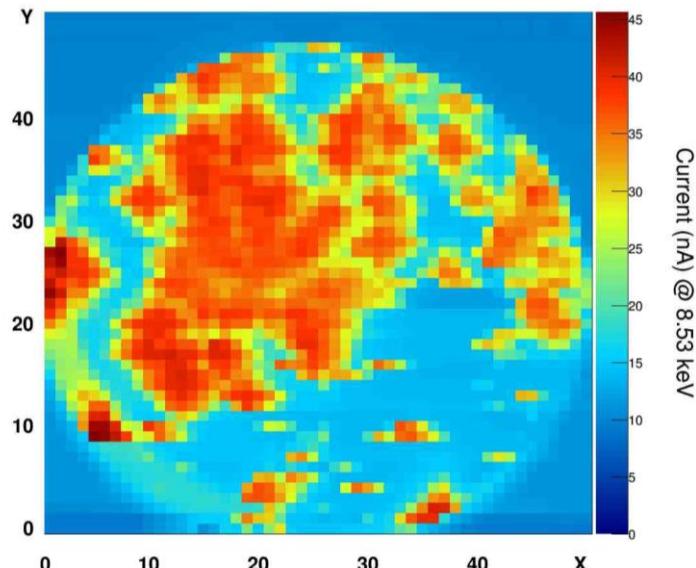
$$\varepsilon = \frac{N_{\text{triple}}}{N_{\text{double}}} \left(1 - \frac{N_{\text{fortuites}}}{N_{\text{double}}} \right)$$



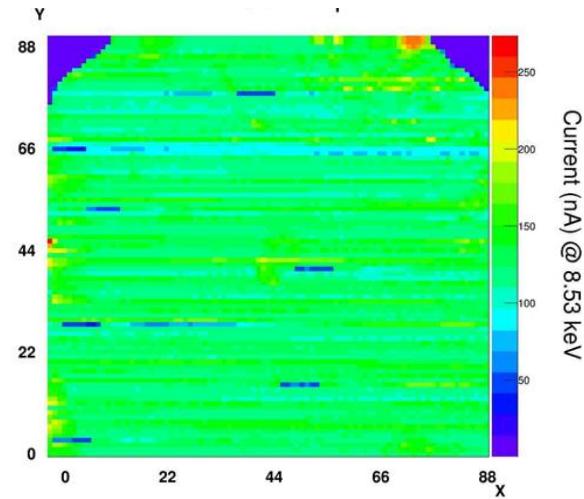
Réponse en courant

Cartographie du courant induit par le microfaisceau

DOI

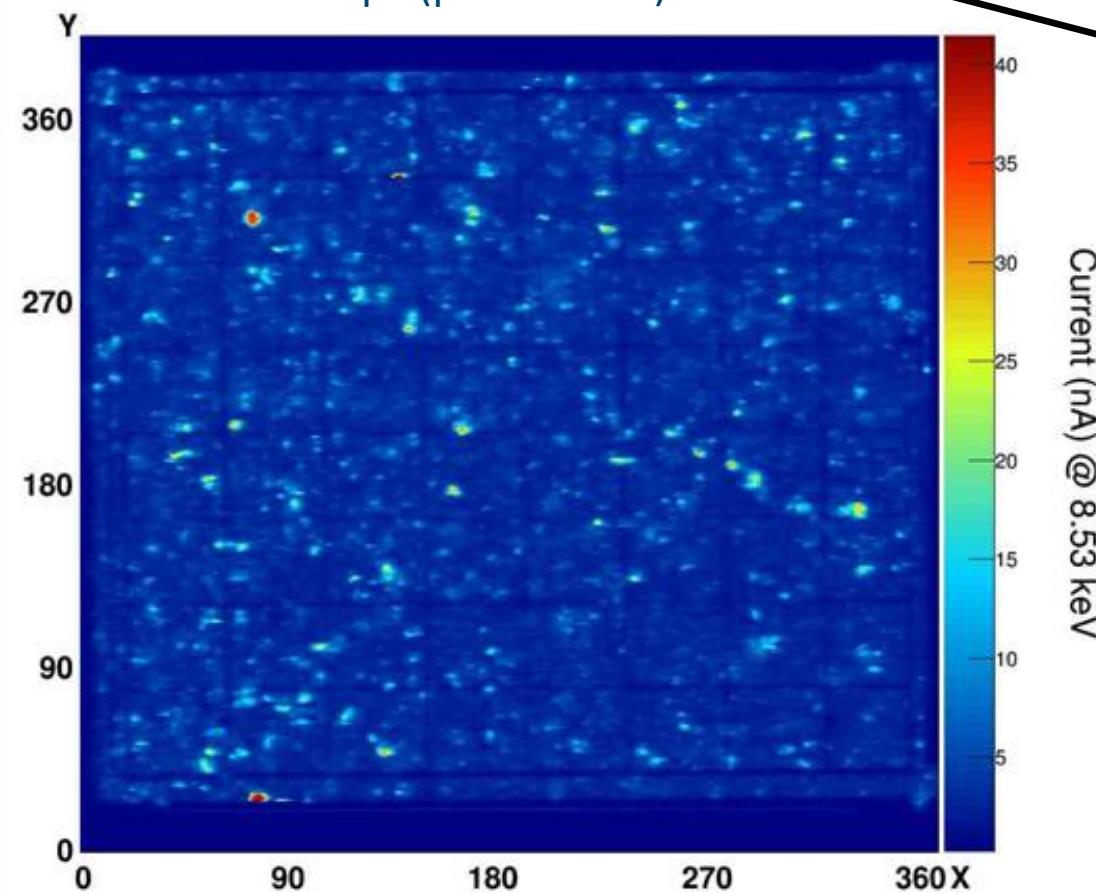
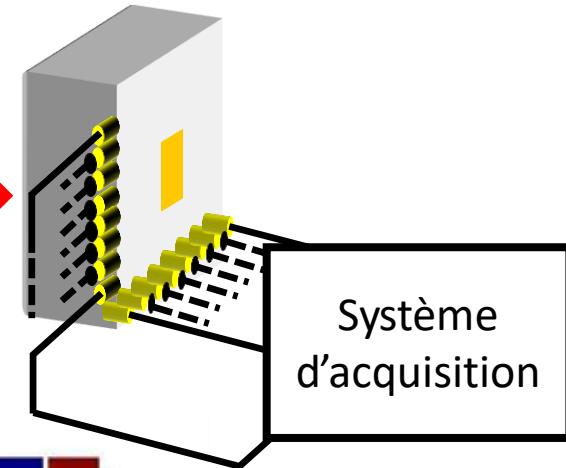


SC



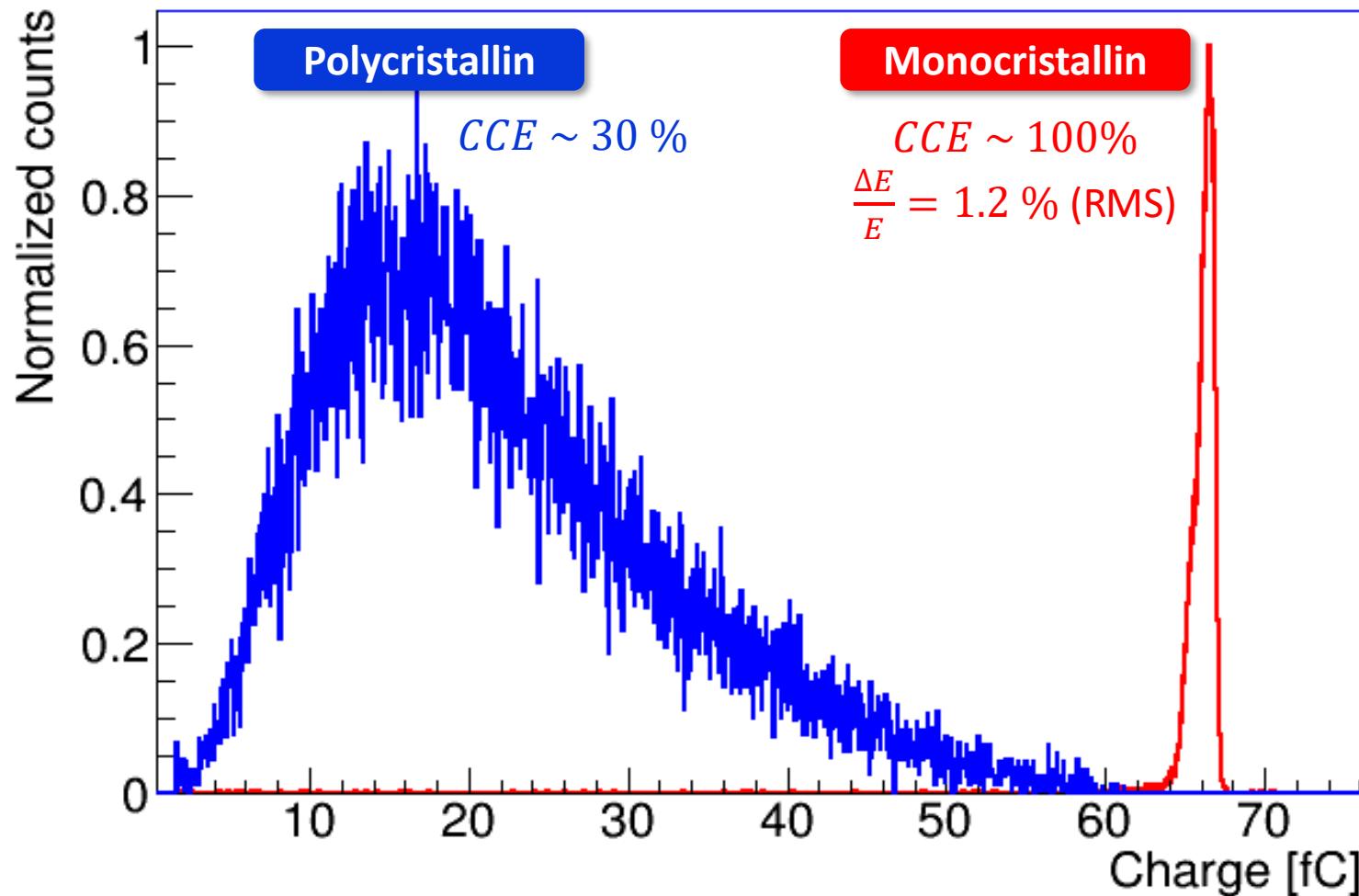
Rayons X 8.5 keV

pc (pistes 1cm²)

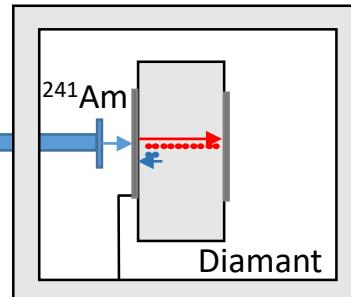


Réponse spectroscopique

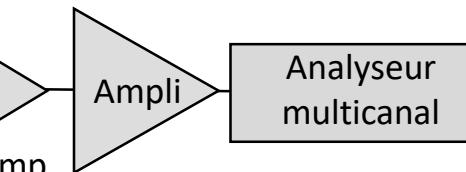
^{241}Am : $\alpha \sim 5.5 \text{ MeV} \leftrightarrow 67 \text{ fC}$ généré dans diamant



Enceinte à vide



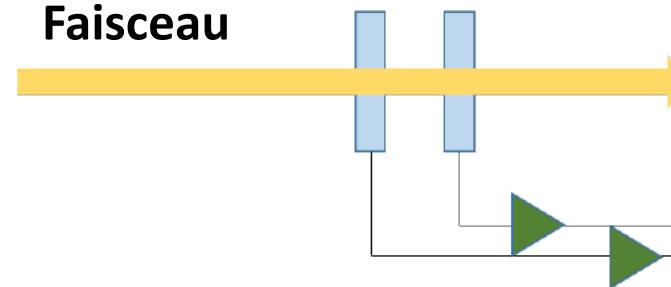
Préamp.
charges



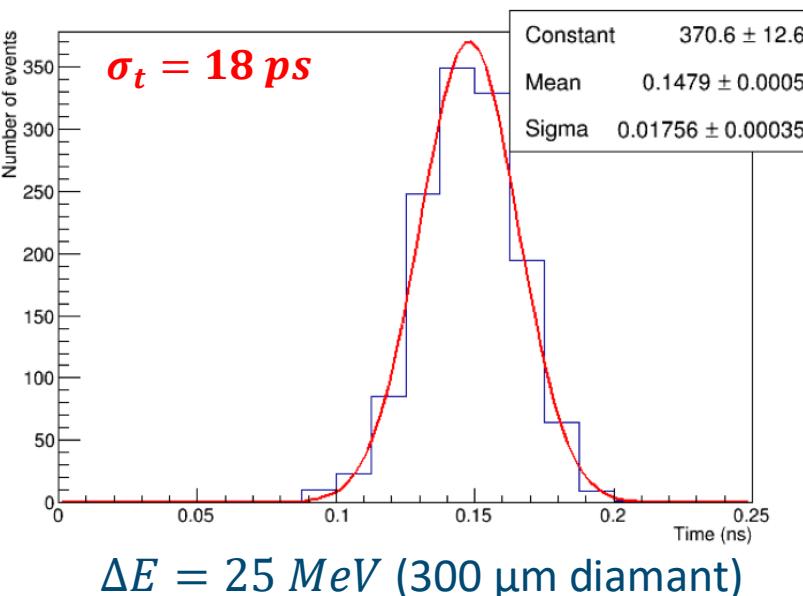
Résolution temporelle

DOI SC

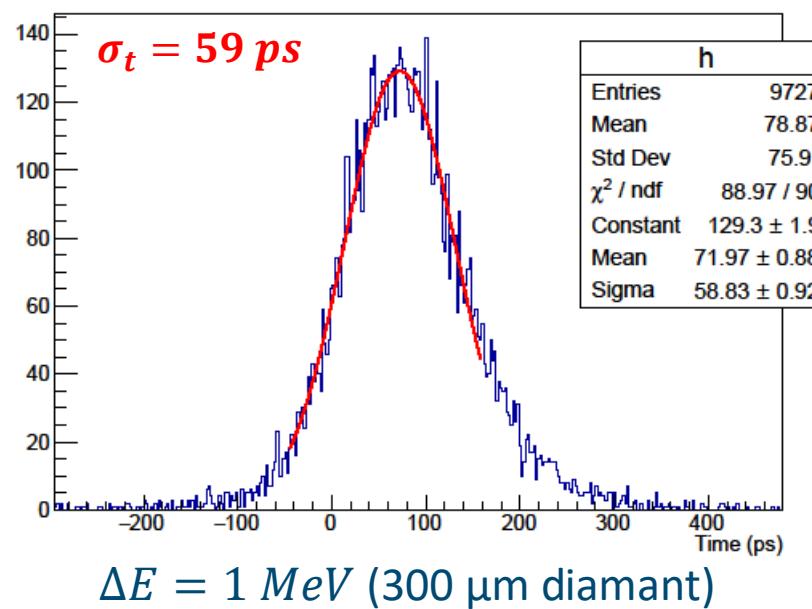
Faisceau



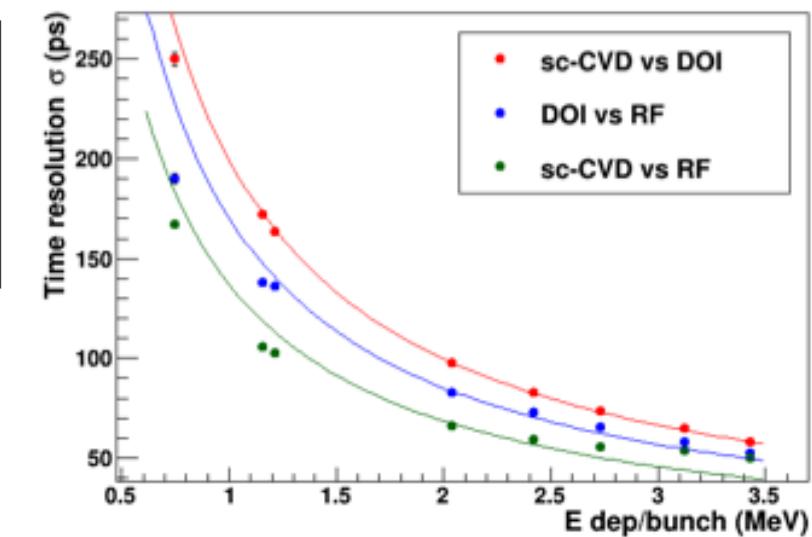
Ions ^{12}C 95 MeV/u @ GANIL



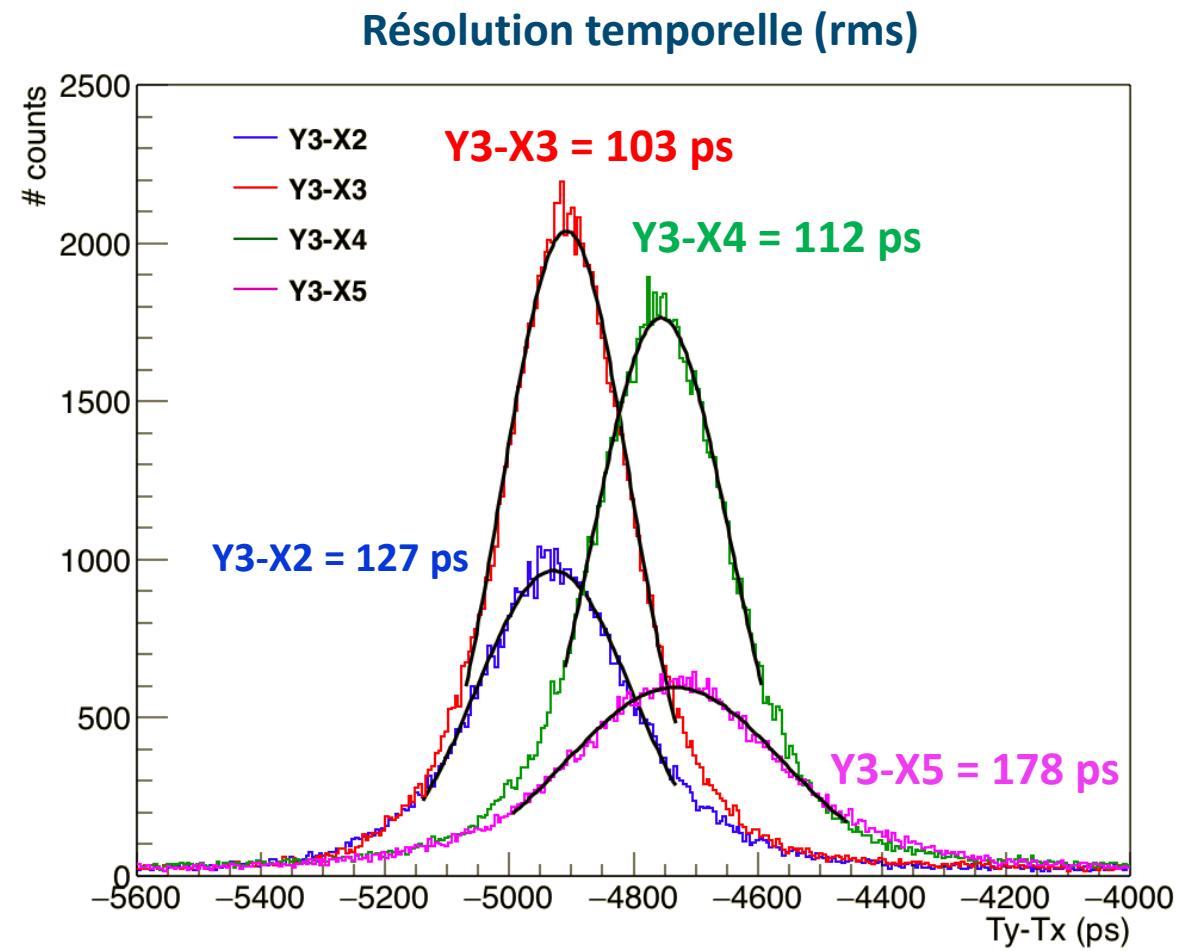
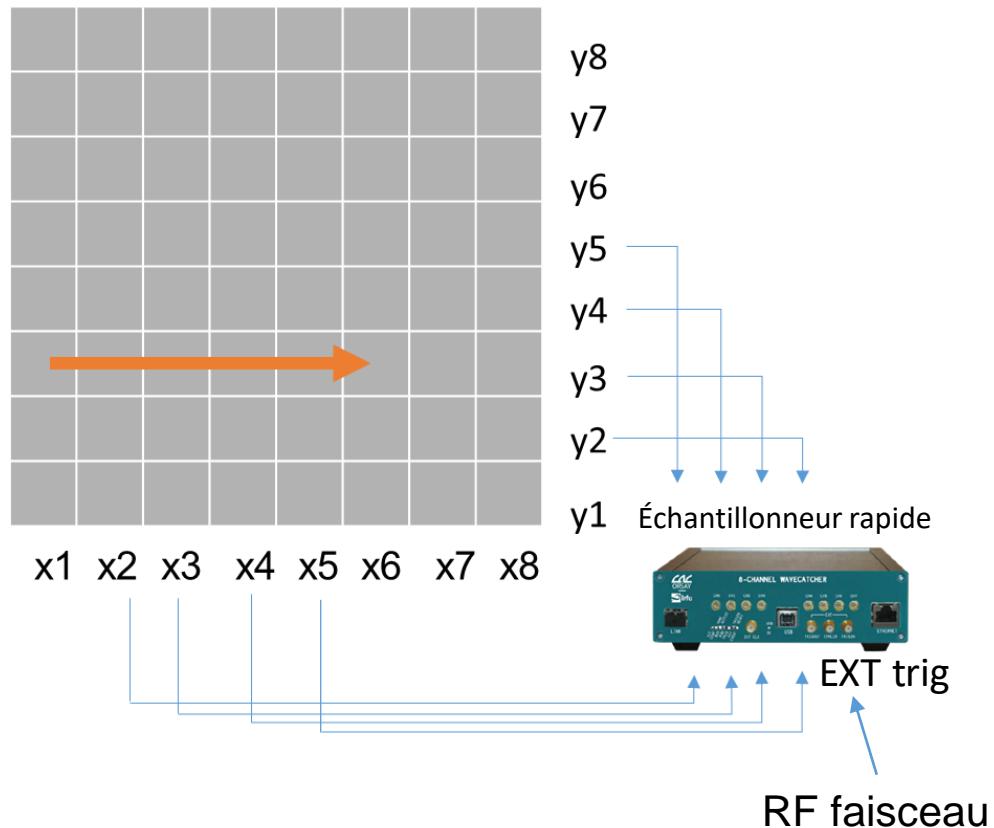
Protons 68 MeV @ ARRONAX



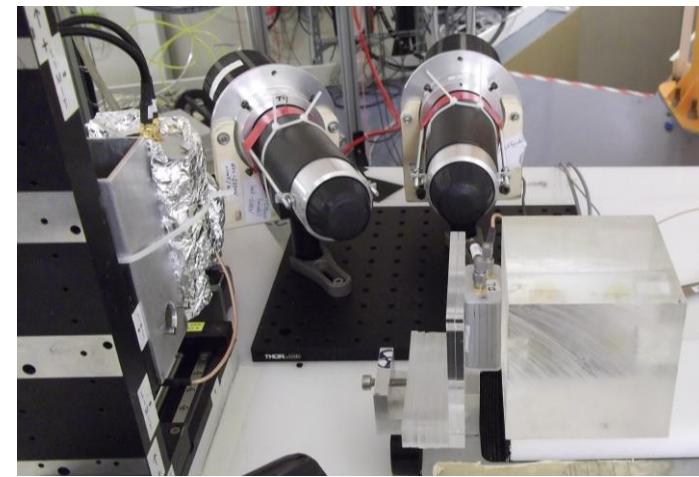
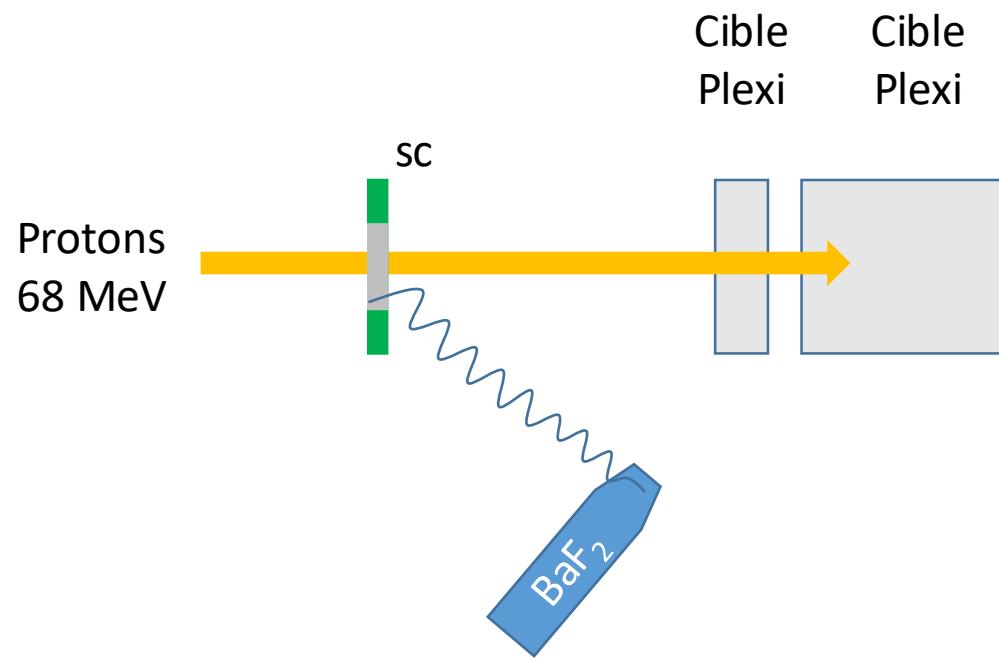
Photons 8.5 keV @ ESRF



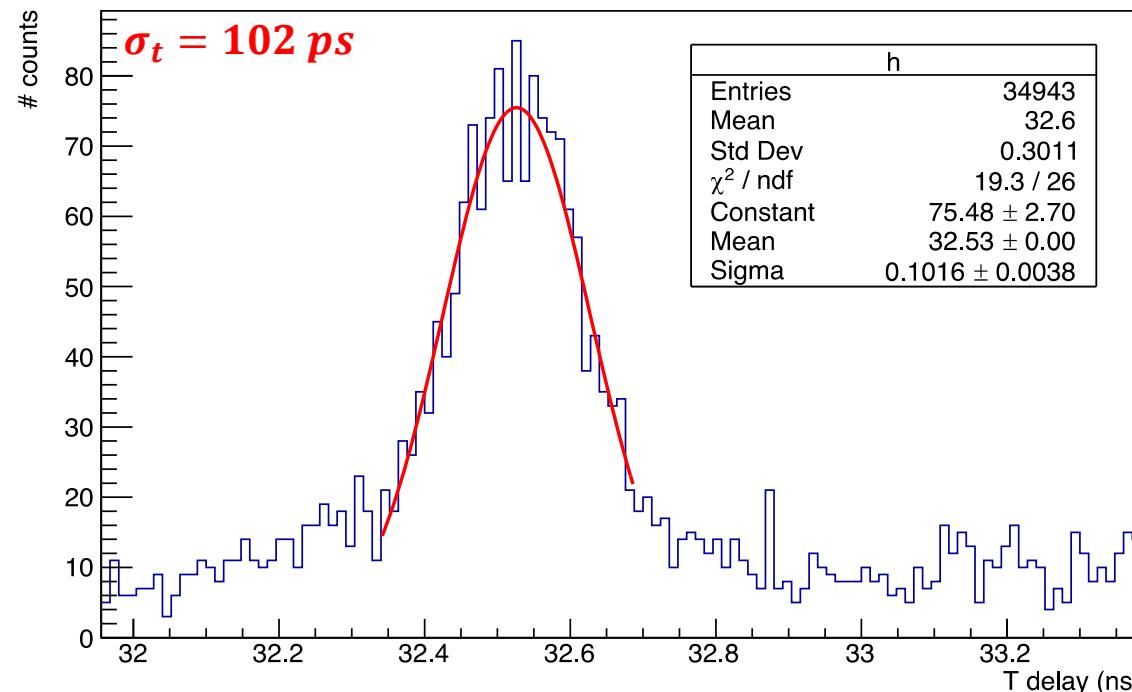
Résolution temporelle des détecteurs à pistes



Prompt Gamma Timing @ ARRONAX

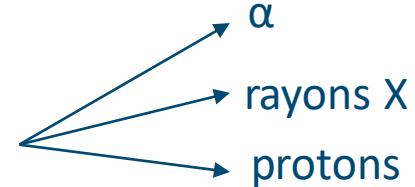


Résolution Diamant SC vs Scintillateur BaF₂



Conclusions

- Outils de caractérisation ont été développés
- Comparaison des performances pour différentes qualités de cristaux (sc, pc et DOI)
- Bonne efficacité de détection en protons
- Résolution temporelle en accord avec les attentes du projet
- Premiers détecteurs à pistes donnent des résultats satisfaisants



Perspectives

- Montage démonstrateur avec 4 diamants
- Test et caractérisation électronique dédiée (cf présentation A. Ghimouz) puis intégration sur détecteur
- Evaluation performances sous faisceaux d'ions (protons et carbone)
- Intégration au système d'acquisition de la collaboration CLaRyS

Merci à tous pour votre attention

Mes remerciements tous particuliers à:

Alexandre BES

Germain BOSSON

Jean-Luc BOULY

Joël BOUVIER

Johann COLLOT

Denis DAUVERGNE

Laurent GALLIN-MARTEL

Marie-Laure GALLIN-MARTEL

Abderrahmane GHIMOUZ

Christophe HOARAU

Jean-Yves HOSTACHY

Ana LACOSTE

Jayde LIVINGSTONE

Sara MARCATILI

Jean-François MURAZ

Fatah RARBI

Olivier ROSSETTO

Nicolas ROSUEL

Lucas TRIBOUILLOY

Mahfoud YAMOUNI