

# 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

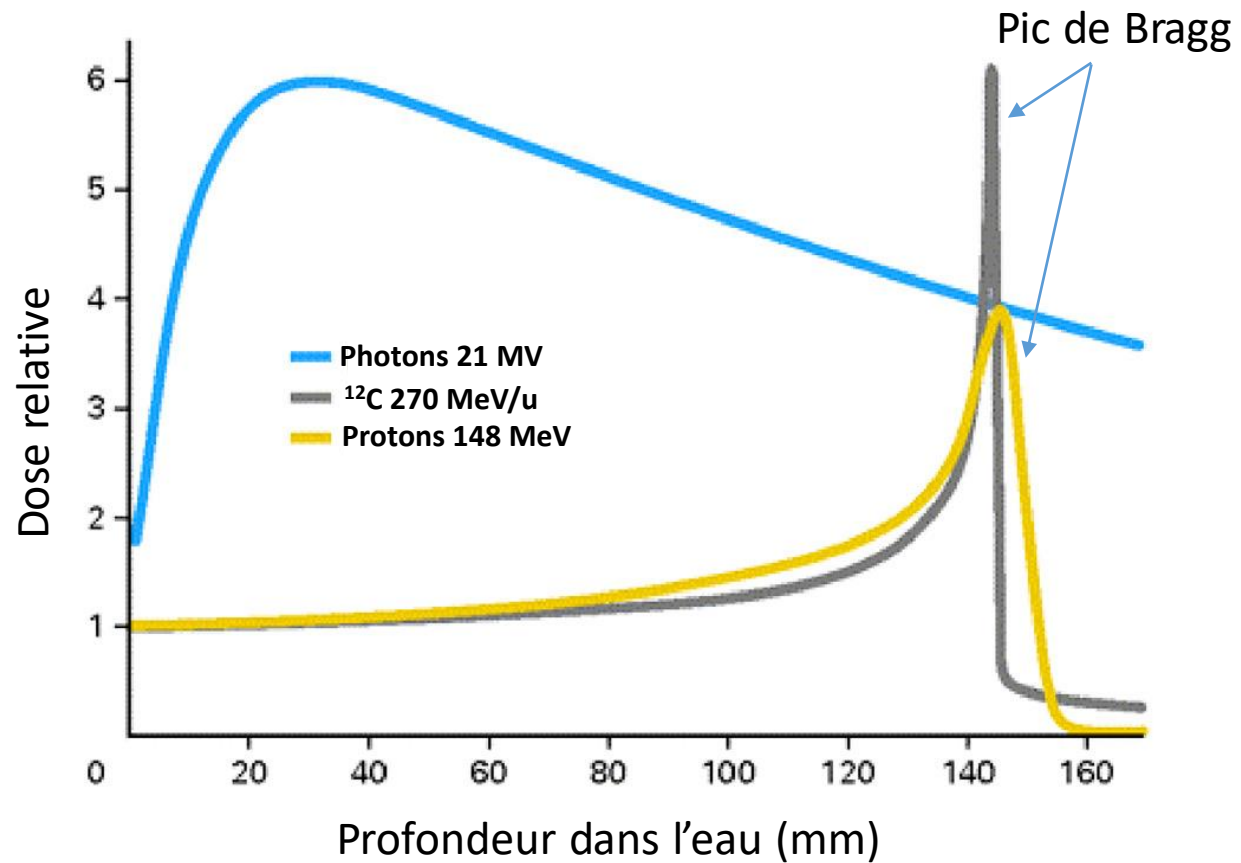
### 3. Hodoscope diamant : résultats

- Efficacité de détection
- Réponse spectroscopique
- Résolution temporelle

### Conclusions et perspectives

## Hadronthérapie

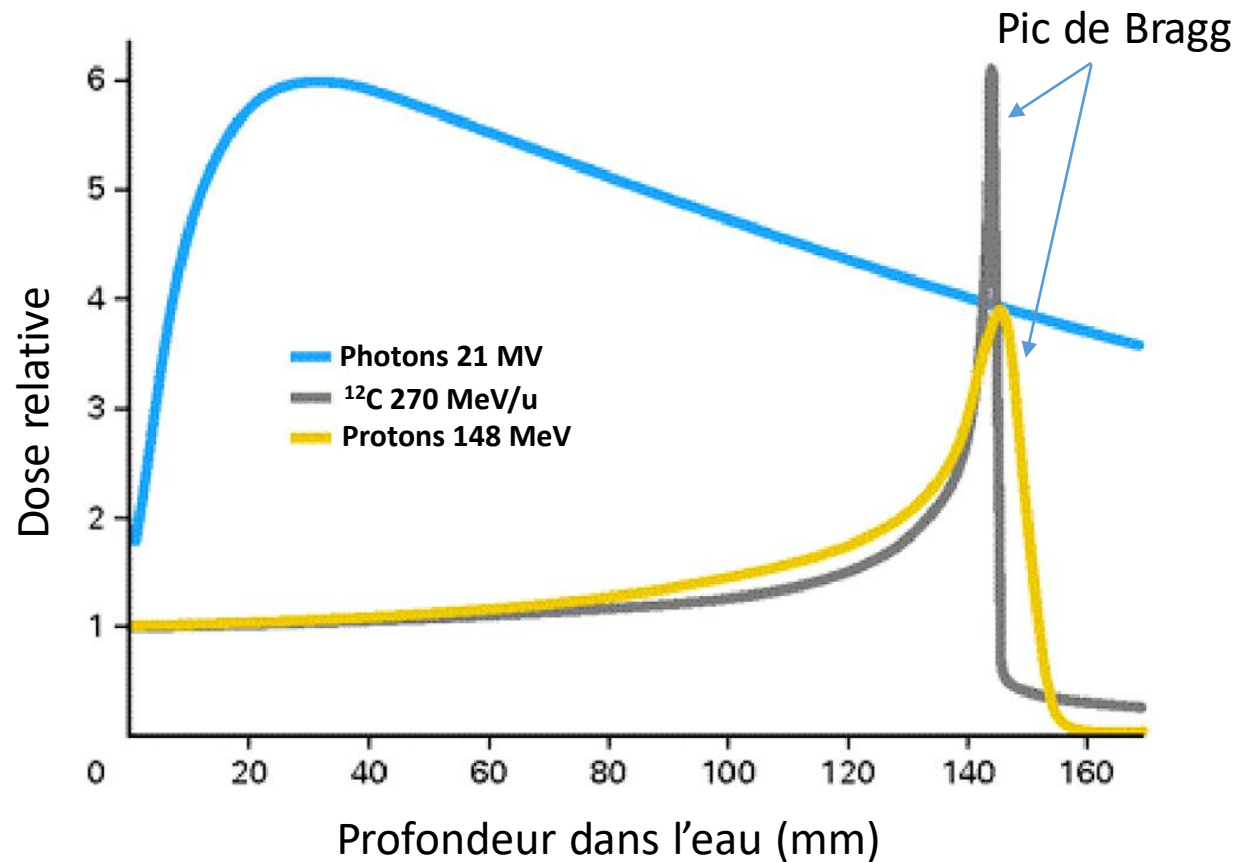
Radiothérapie externe par faisceaux d'ions légers (protons et ions carbone)



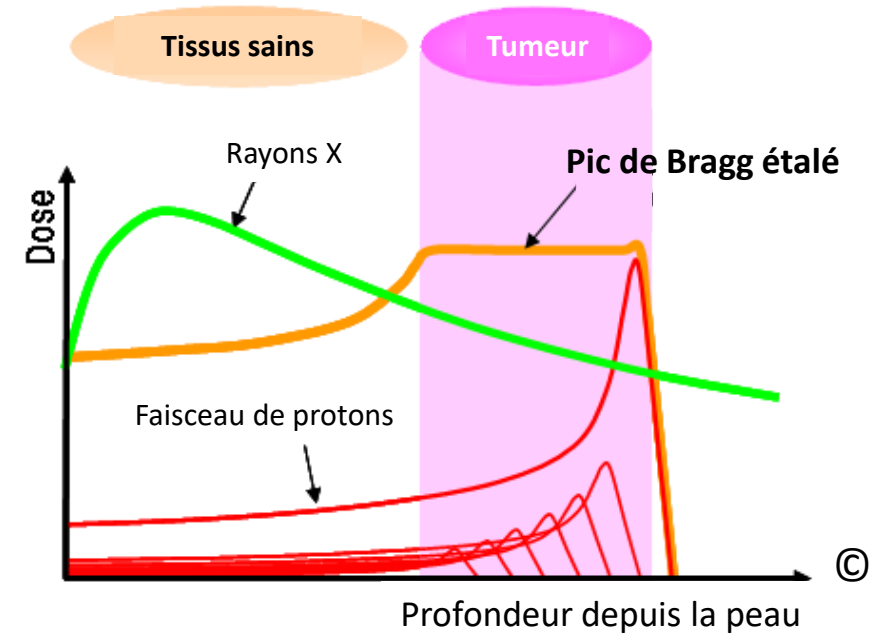
Avraham Dilmanian et al., Front. Oncol. **5** (2015) 269

## Hadronthérapie

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



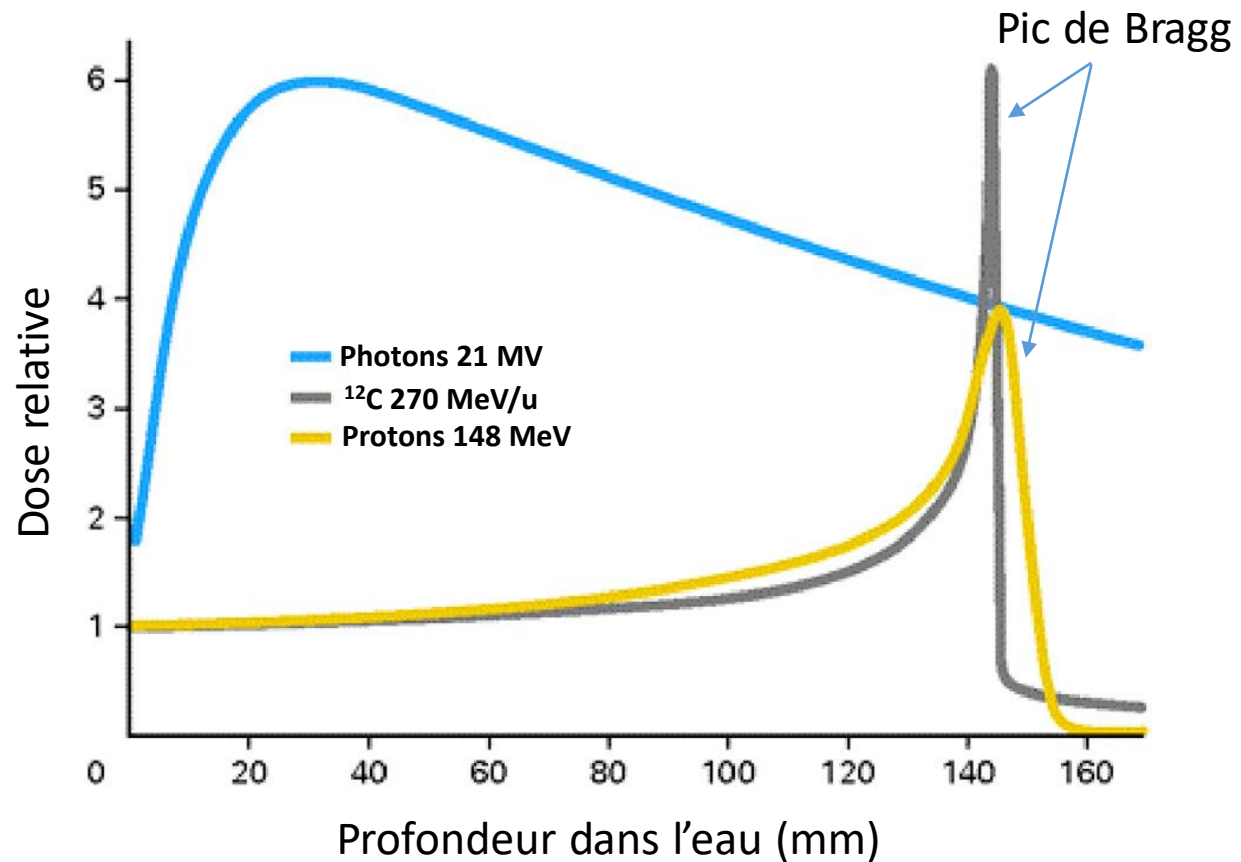
Avraham Dilmanian et al., Front. Oncol. 5 (2015) 269



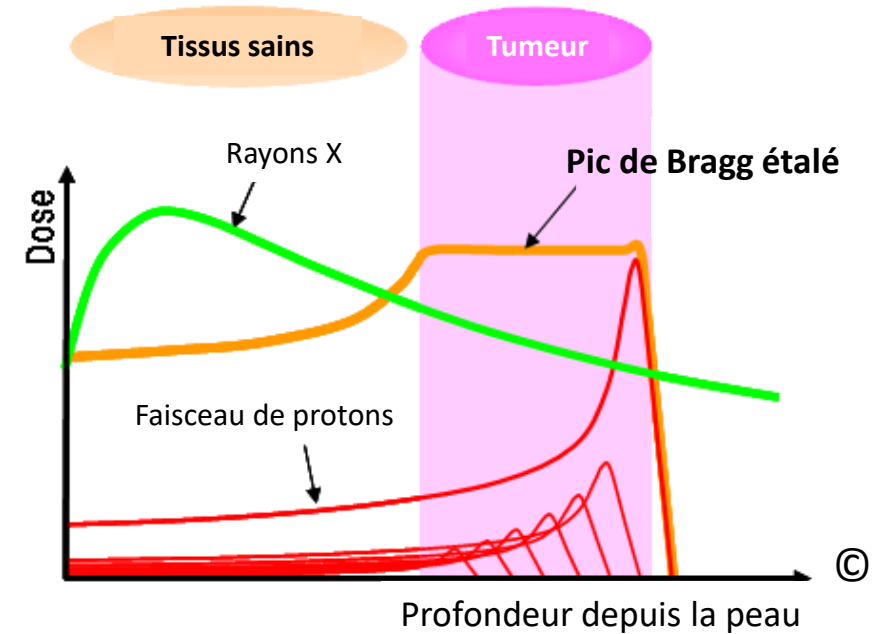
<http://www.shi.co.jp/quantum/eng/product/proton/proton.html>

## Hadronthérapie

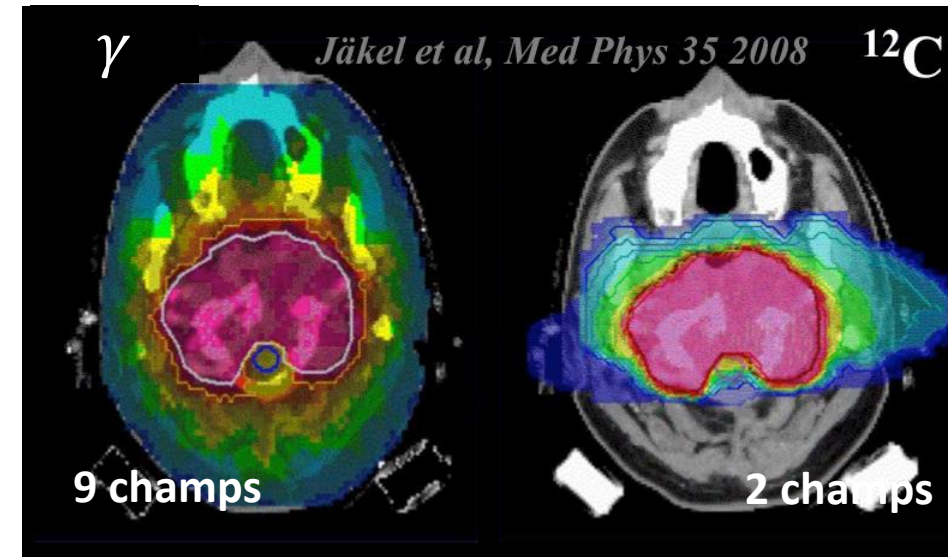
Radiothérapie externe par faisceaux d'ions légers (protons et ions carbone)



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

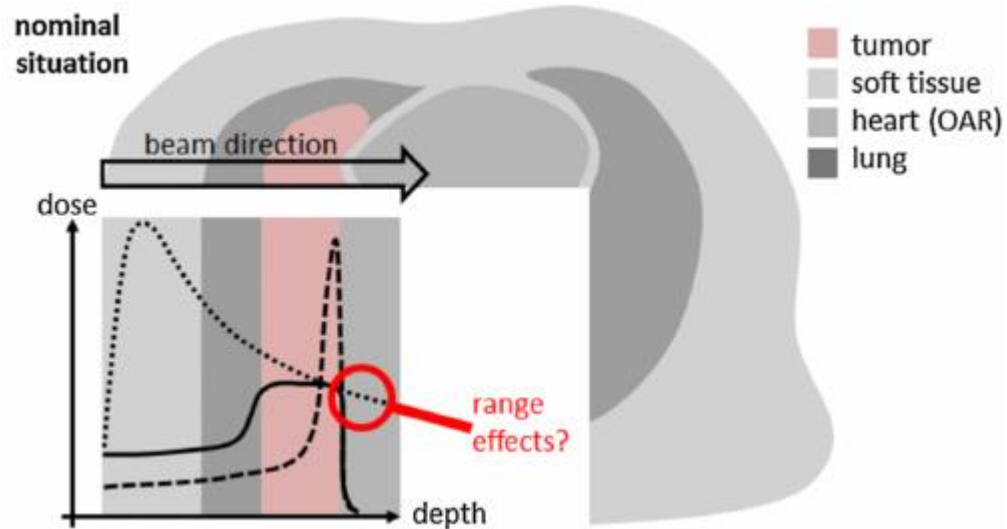


<http://www.shi.co.jp/quantum/eng/product/proton/proton.html>

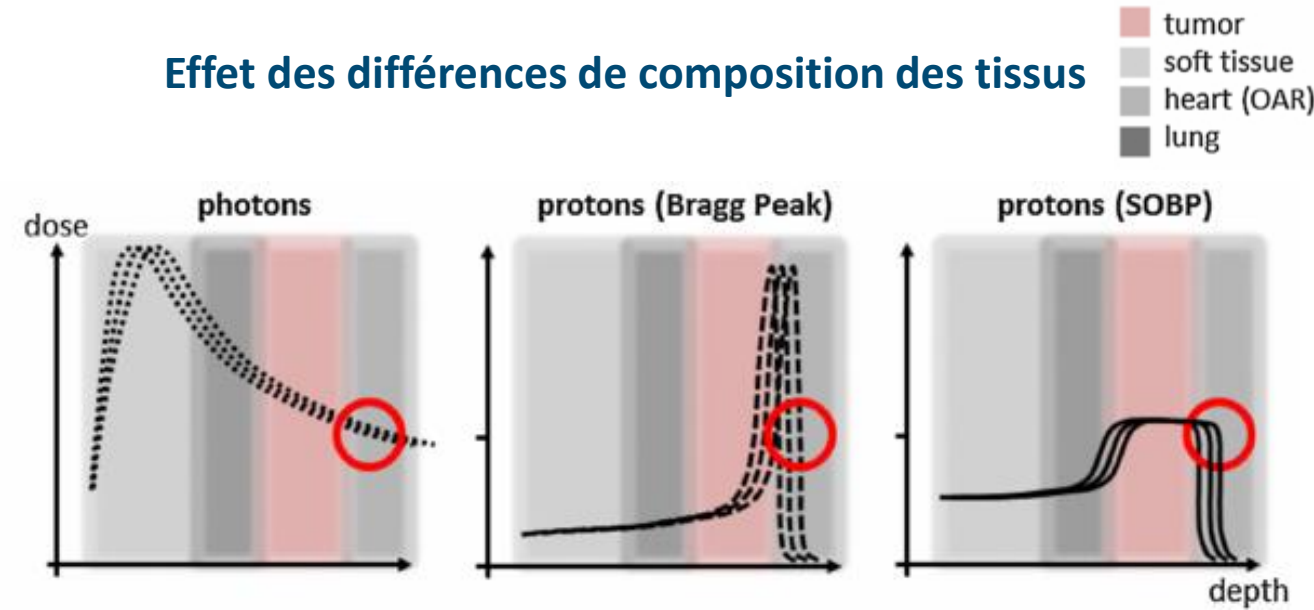


## Incertitudes sur le parcours des ions

### Planification de dose idéale



### Effet des différences de composition des tissus



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

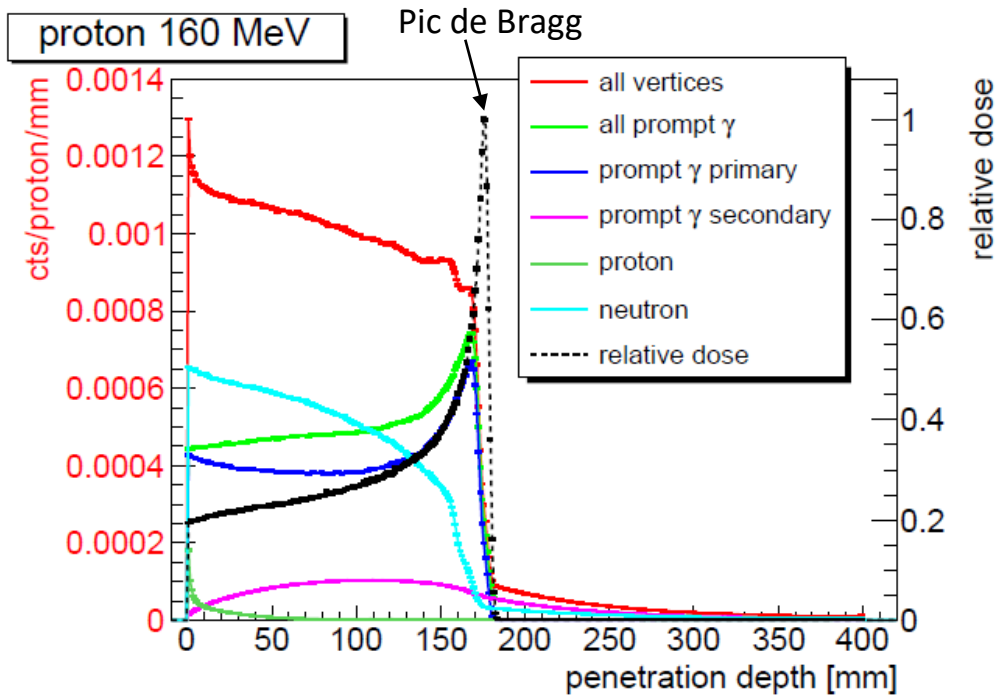
### Sources d'incertitudes

- 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

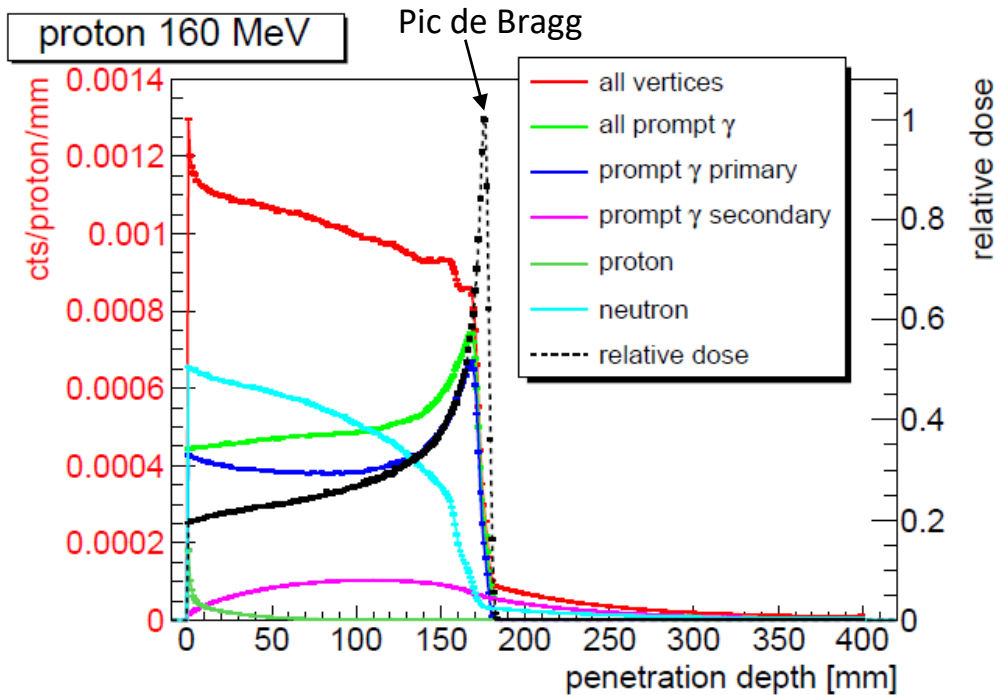
### Cas des photons gamma-prompts

- 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



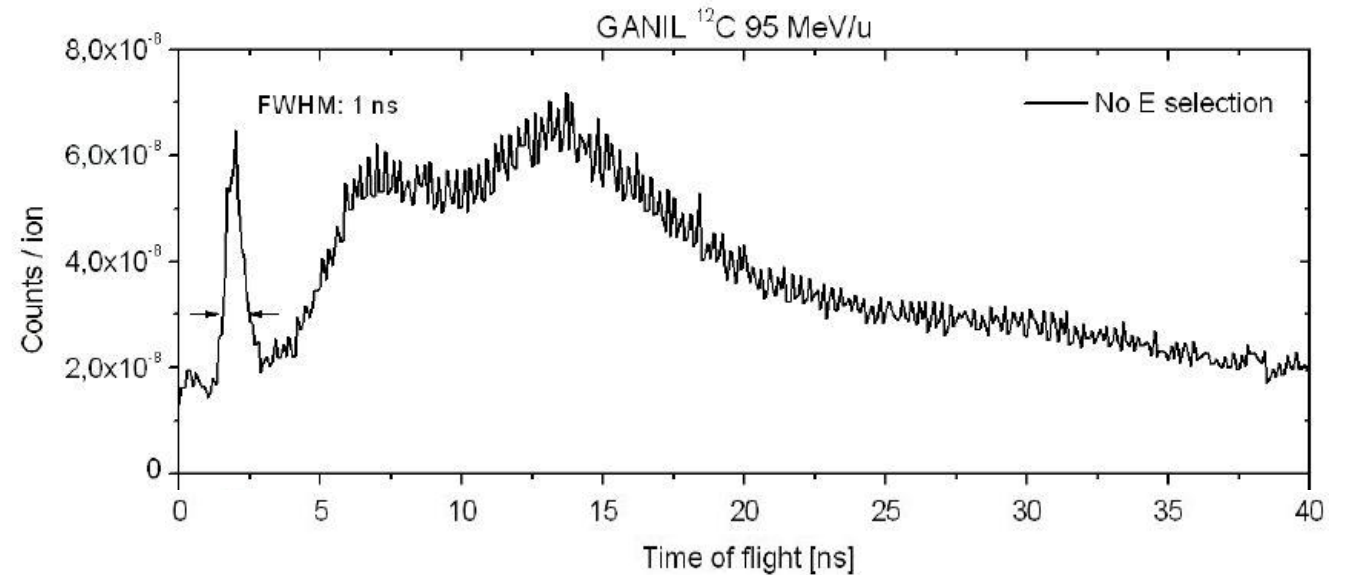
## Production de particules secondaires

### Simulation Geant4



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

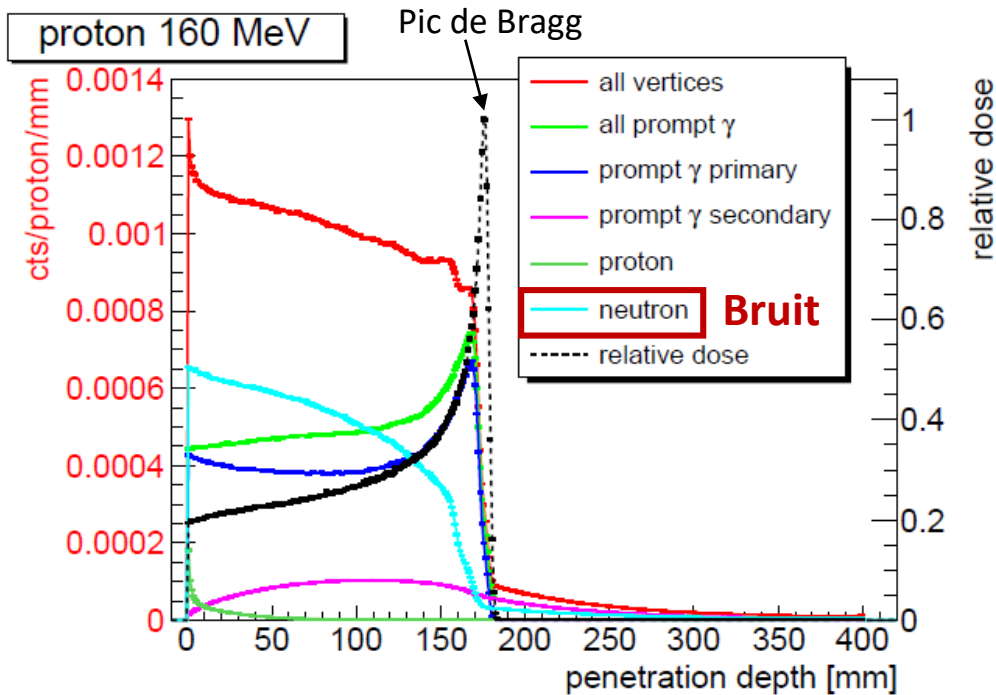
### Gamma-prompts : Expérience avec ions $^{12}\text{C}$ @ 95 MeV/u sur cible Plexiglas - Spectre Temps-de-Vol



Mauro Testa, Thèse, Univ. Lyon, 2010

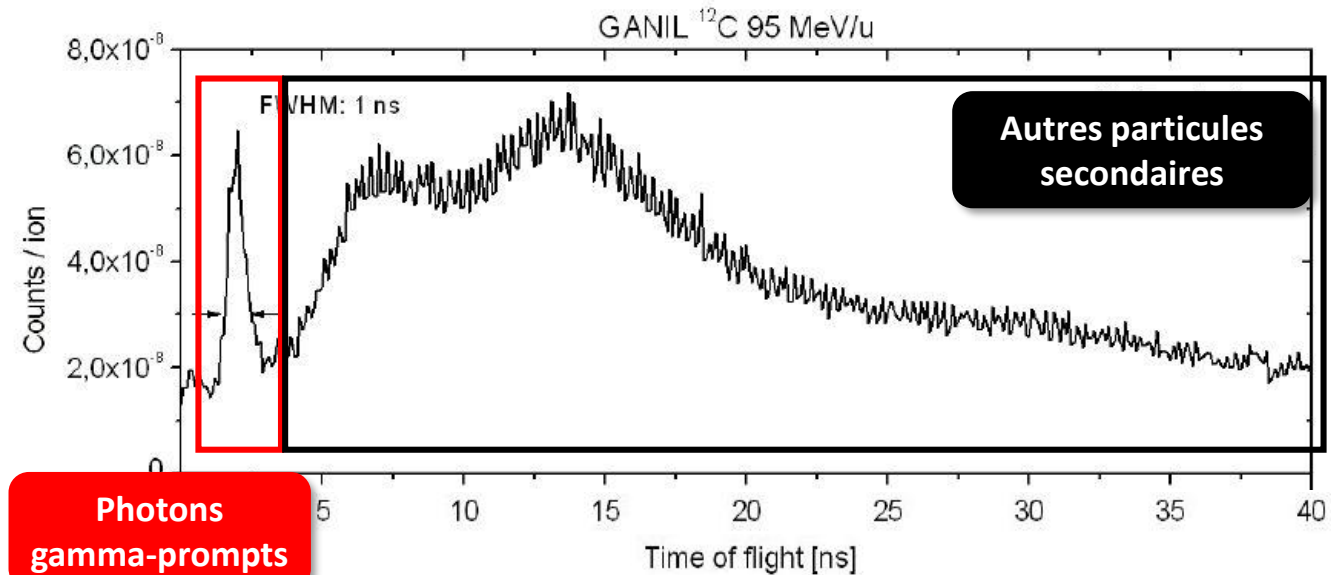
## Production de particules secondaires

### Simulation Geant4



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

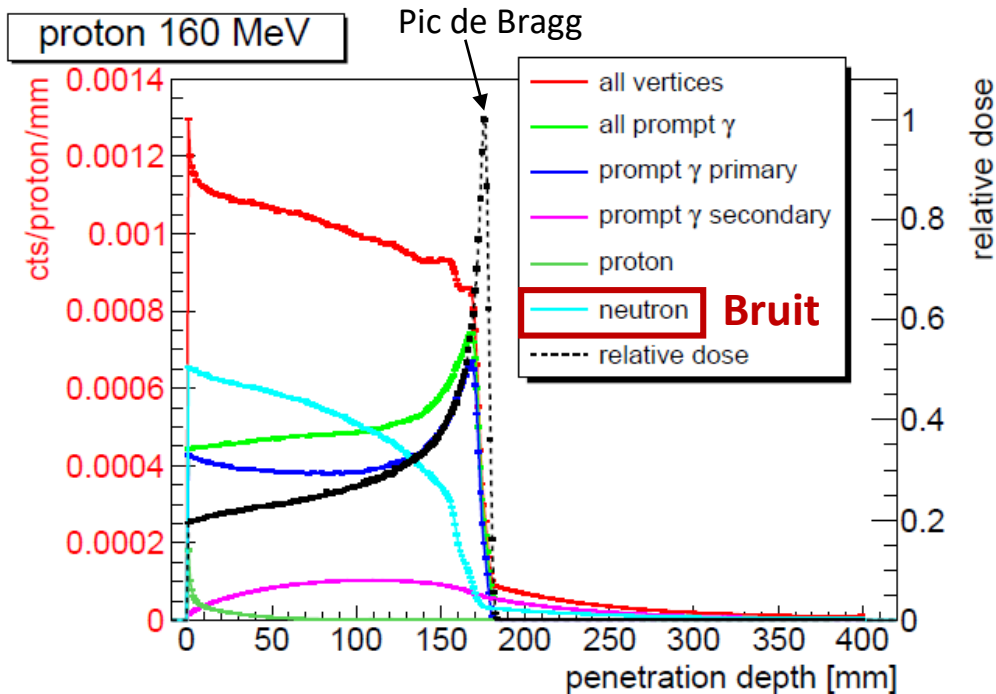
### Gamma-prompts : Expérience avec ions $^{12}\text{C}$ @ 95 MeV/u sur cible Plexiglas - Spectre Temps-de-Vol



Mauro Testa, Thèse, Univ. Lyon, 2010

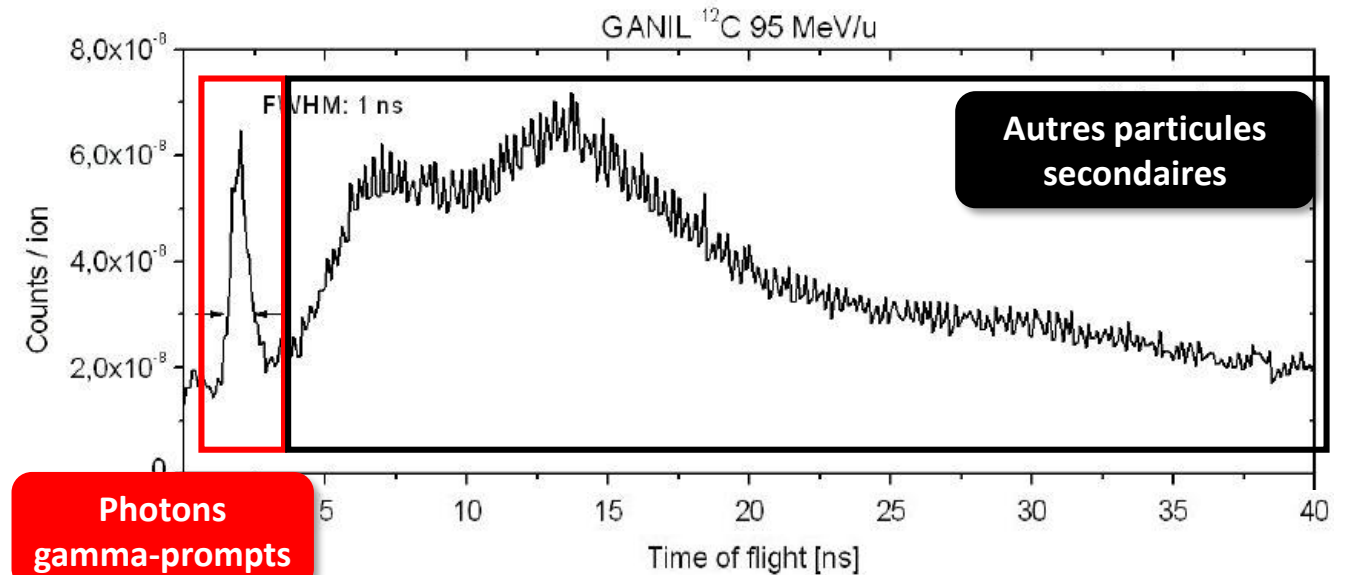
## Production de particules secondaires

### Simulation Geant4



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

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



Mauro Testa, Thèse, Univ. Lyon, 2010

### Collaboration CLaRyS

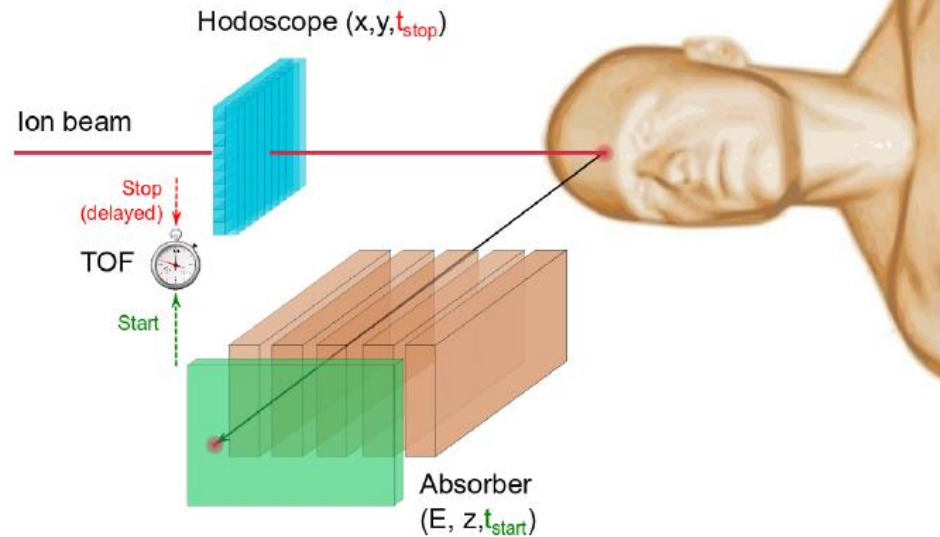
CLaRyS: Contrôle en Ligne de l'hadronthérapie par détection de Rayonnements Secondaires

4 laboratoires: LPSC, IPNL, CPPM, CREATIS Lyon

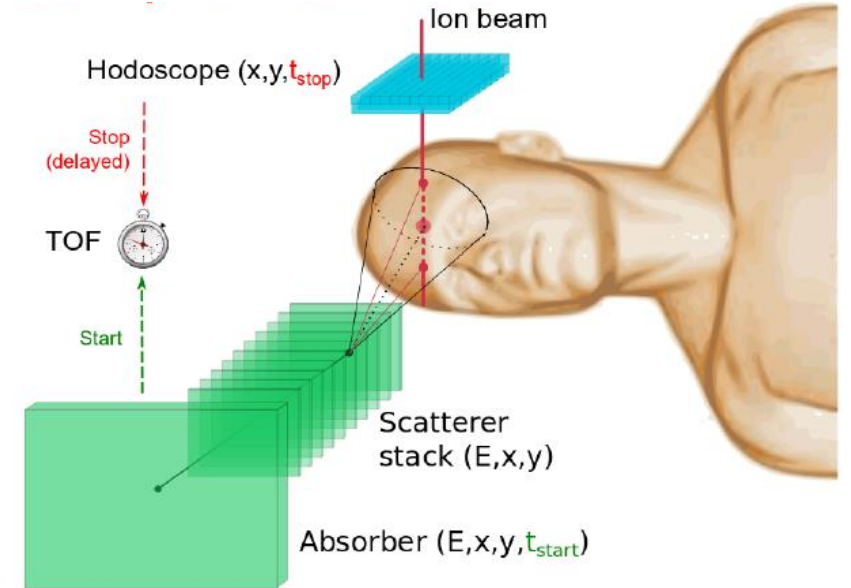
## Détection de Photons Gamma Prompts

### Imagerie Gamma Prompt par Temps-de-Vol

#### Caméra multi-collimatée (1D)



#### Caméra Compton (2D ou 3D)

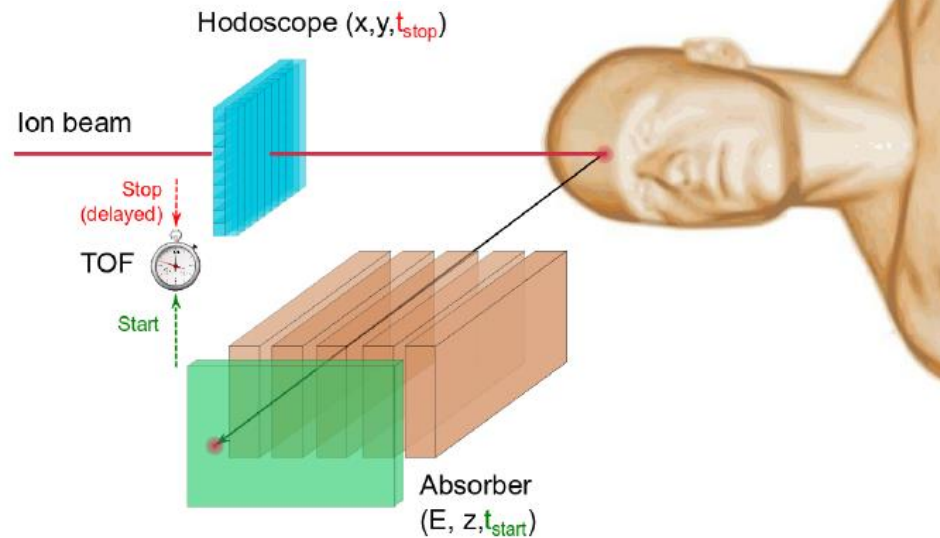


Hodoscope : réduction bruit de fond & position transverse

## Détection de Photons Gamma Prompts

### Imagerie Gamma Prompt par Temps-de-Vol

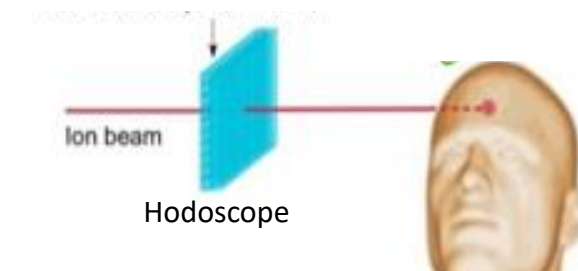
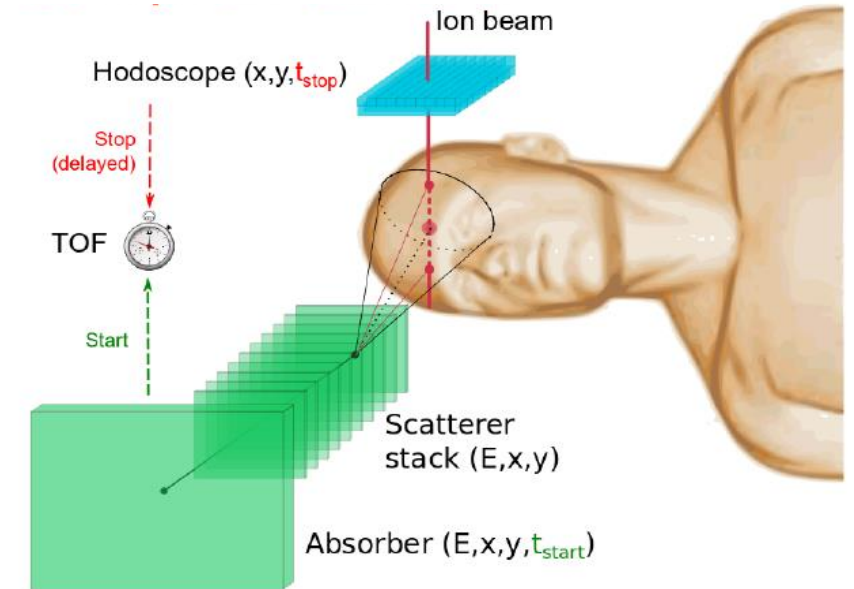
#### Caméra multi-collimatée (1D)



Hodoscope : réduction bruit de fond & position transverse

Objectif CLaRyS-Ultra-Fast Timing : Résolution 100 ps

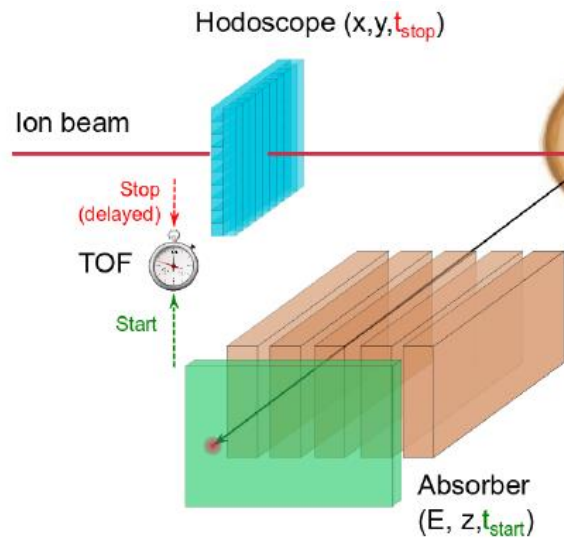
#### Caméra Compton (2D ou 3D)



## Détection de Photons Gamma Prompts

### Imagerie Gamma Prompt par Temps-de-Vol

#### Caméra multi-collimatée (1D)

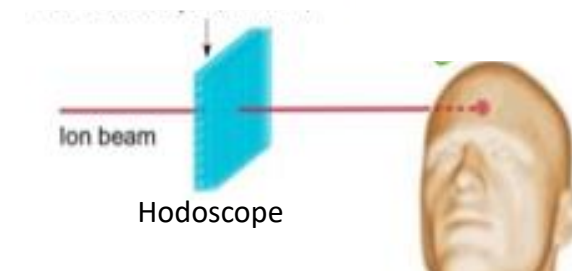
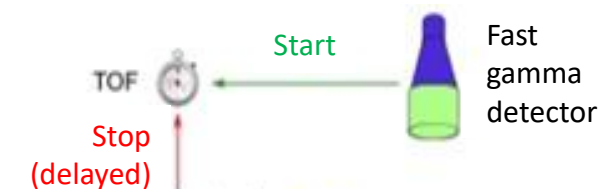
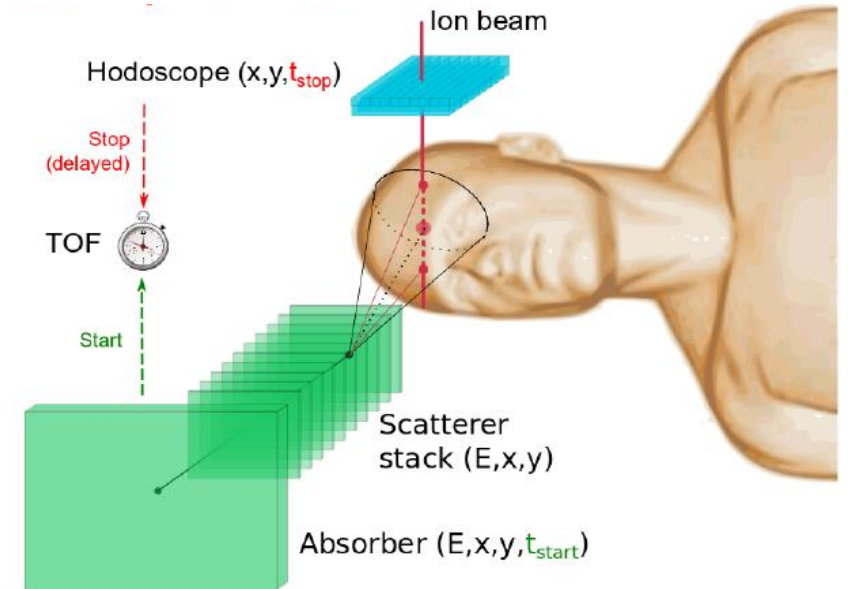


Hodoscope : réduction bruit de fond & position transverse

Objectif CLaRyS-Ultra-Fast Timing : Résolution 100 ps

→ Imagerie par Temps-de-Vol uniquement

#### Caméra Compton (2D ou 3D)

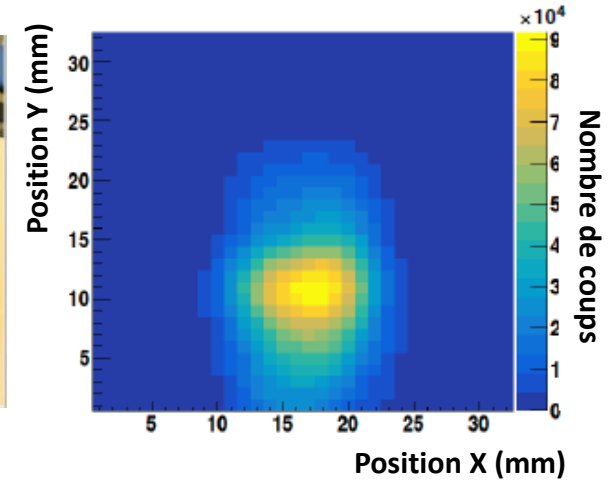




## Développement d'un hodoscope faisceau

### 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)

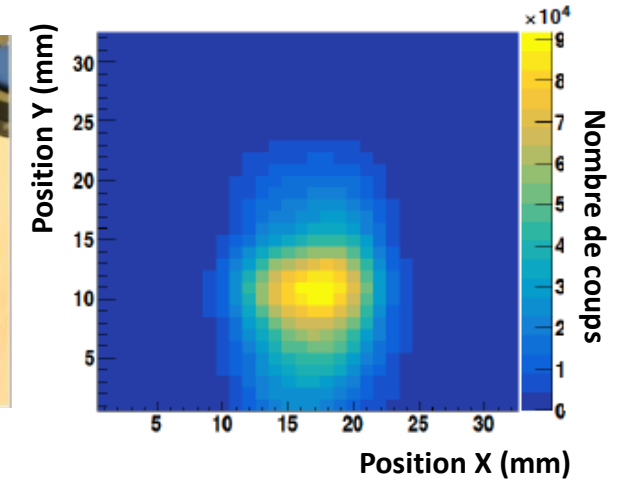


Mattia Fontana, Thèse, Univ. Lyon (2018)

## Développement d'un hodoscope faisceau

### IPNL : Hodoscope à fibres scintillantes

- $\sigma_t \sim 1 \text{ ns}$  → 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 :

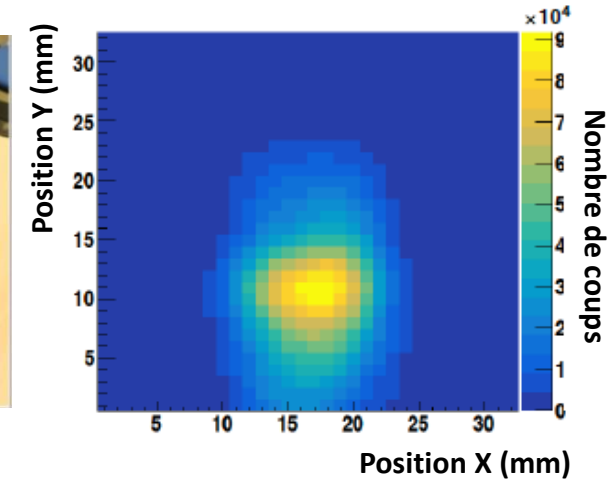
- Excellente résolution temporelle  
→ Possibilité de reconstruction uniquement basée sur Temps-de-Vol
- Résistance aux radiations
- Capacité de comptage très élevée



## Développement d'un hodoscope faisceau

### IPNL : Hodoscope à fibres scintillantes

- $\sigma_t \sim 1 \text{ ns}$  → 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

## Le diamant : semi-conducteur intrinsèque

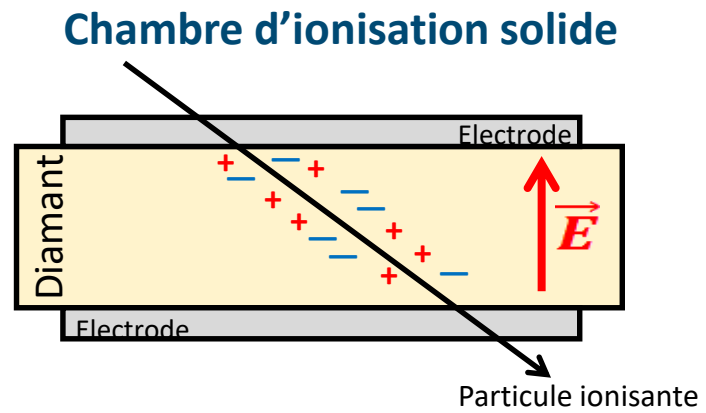
### Caractéristiques à 300 K

	Diamant	Silicium
Résistivité ( $\Omega.m$ )	$> 10^{13}$	$2.3 \cdot 10^7$
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 ( $cm^2.V^{-1}.s^{-1}$ )	$> 2000$	800 – 1400
Conductivité thermique ( $W.cm^{-1}.K^{-1}$ )	18	2



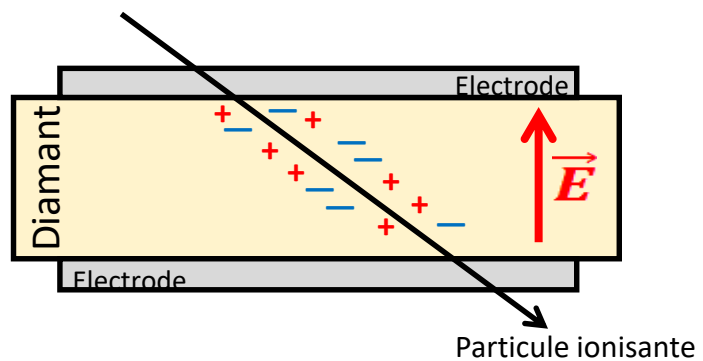
- Courants de fuite très faibles
- Bas bruit
- Résistant aux radiations
- Très rapide
- Opération à température ambiante

## Le diamant synthétique comme détecteur

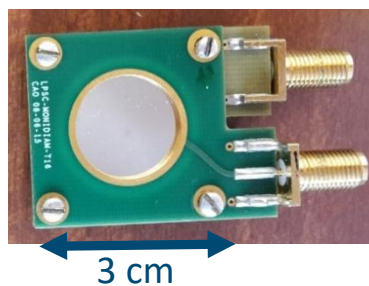
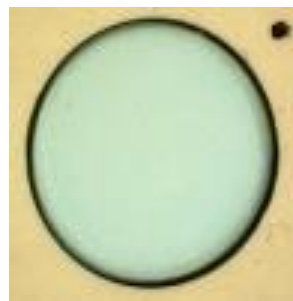
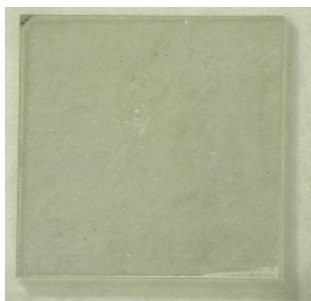


## Le diamant synthétique comme détecteur

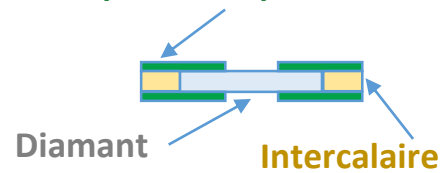
### Chambre d'ionisation solide



### Assemblage de détecteurs

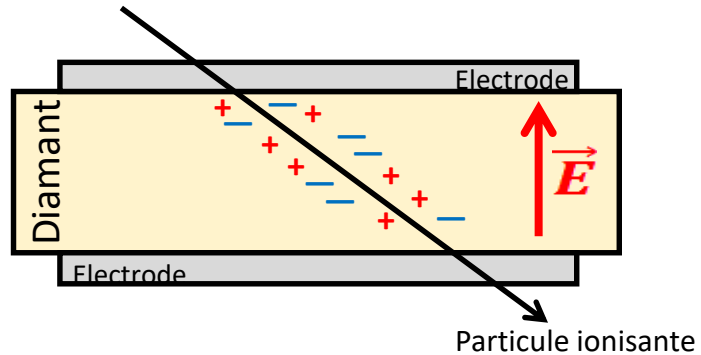


### Circuit imprimé adapté 50Ω

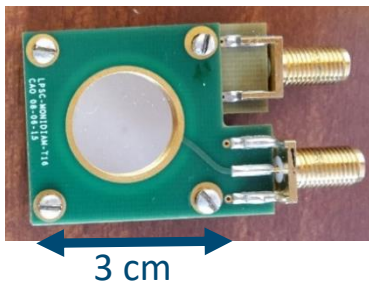


## Le diamant synthétique comme détecteur

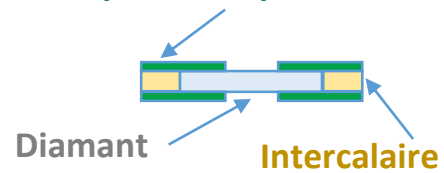
### Chambre d'ionisation solide



### Assemblage de détecteurs



Circuit imprimé adapté 50Ω



### Electronique de lecture

- Préamplificateur de courant



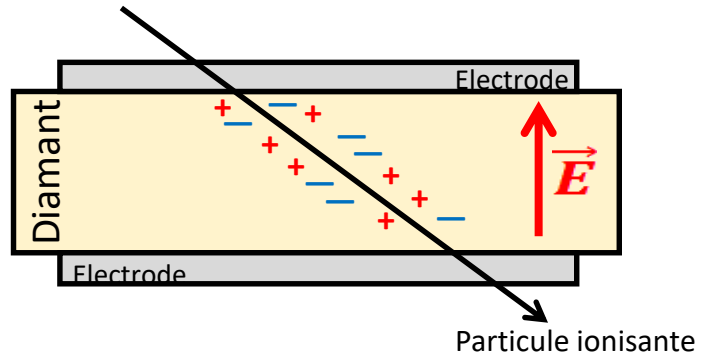
**Bande passante:** 2 GHz  
**Gain:** 40 dB  
**Impédance:** 50 Ω

+ selon application :

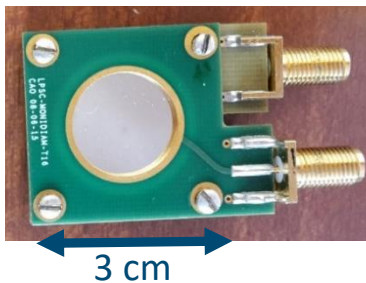
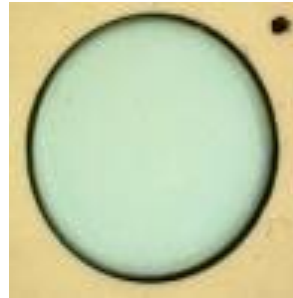
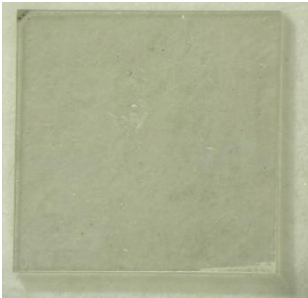
- Préamplificateur de charges
- Electromètre

## Le diamant synthétique comme détecteur

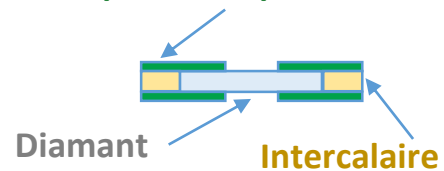
### Chambre d'ionisation solide



### Assemblage de détecteurs



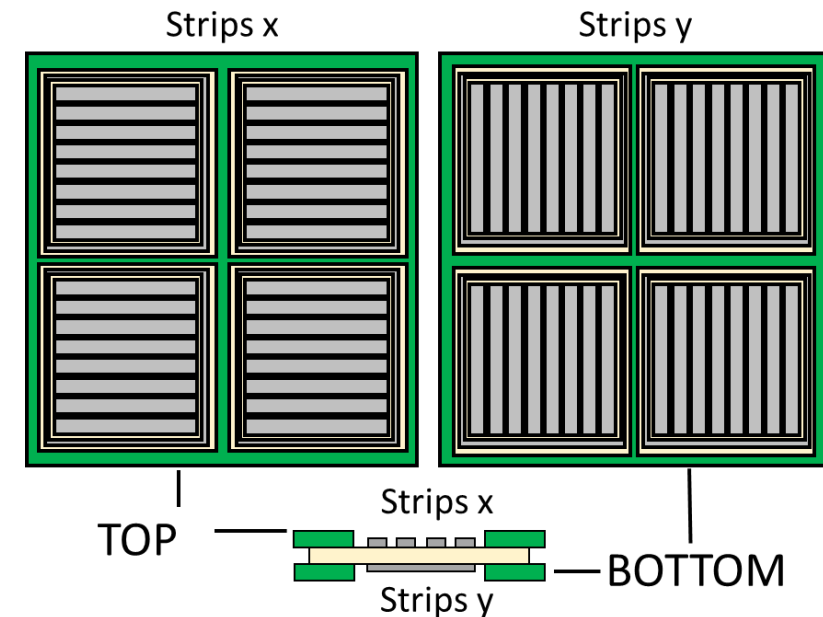
### Circuit imprimé adapté 50Ω



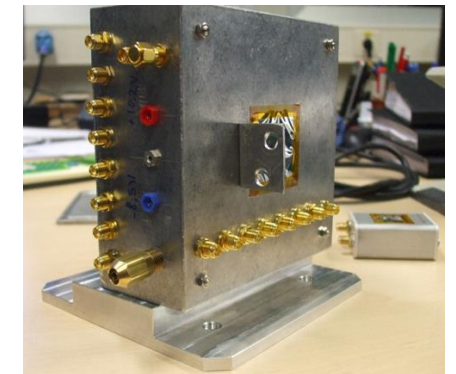
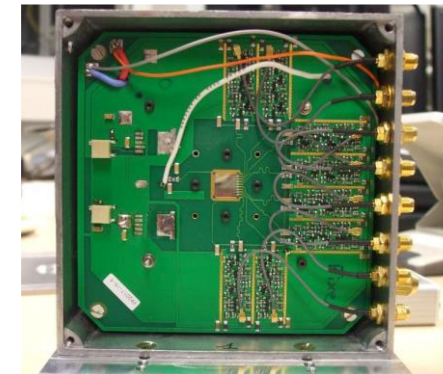
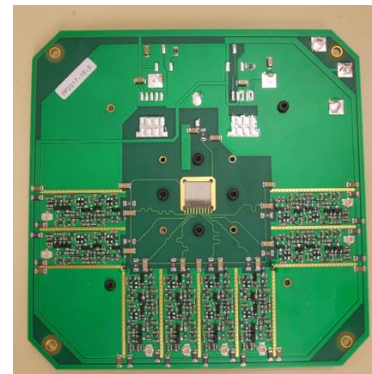
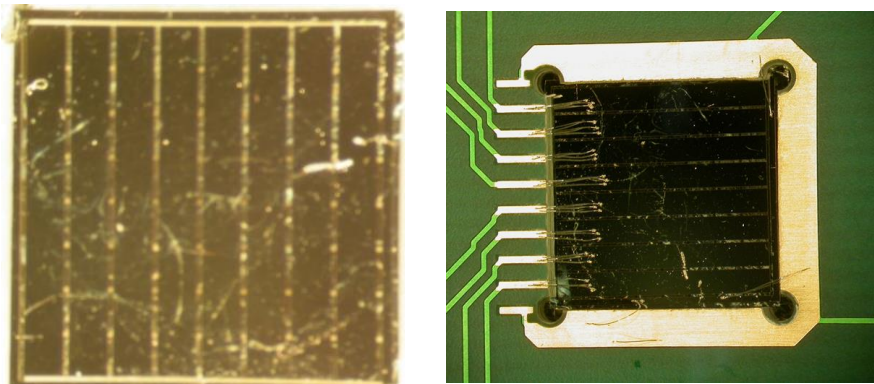
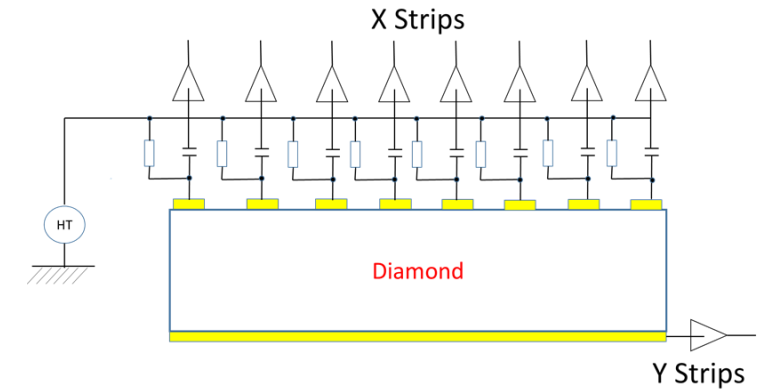
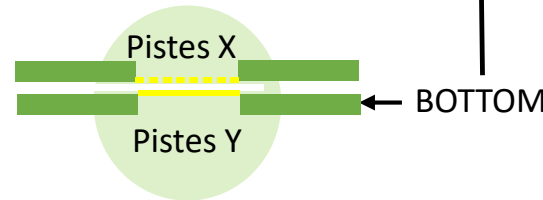
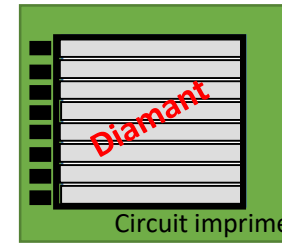
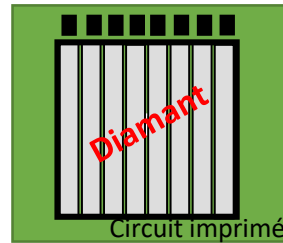
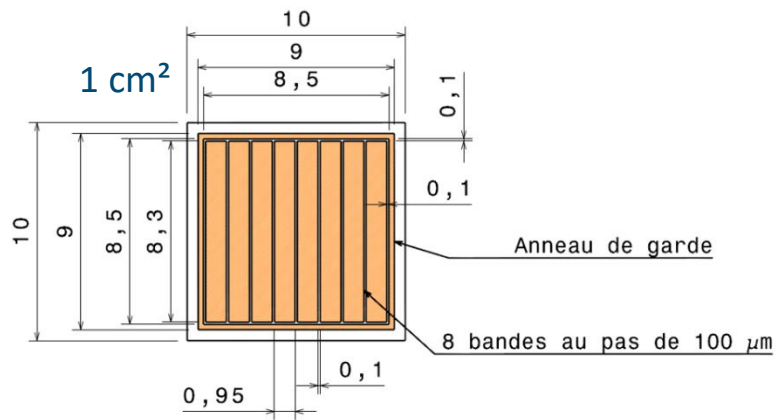
## Projet MoniDiam (LPSC) : Hodoscope diamant

### 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)

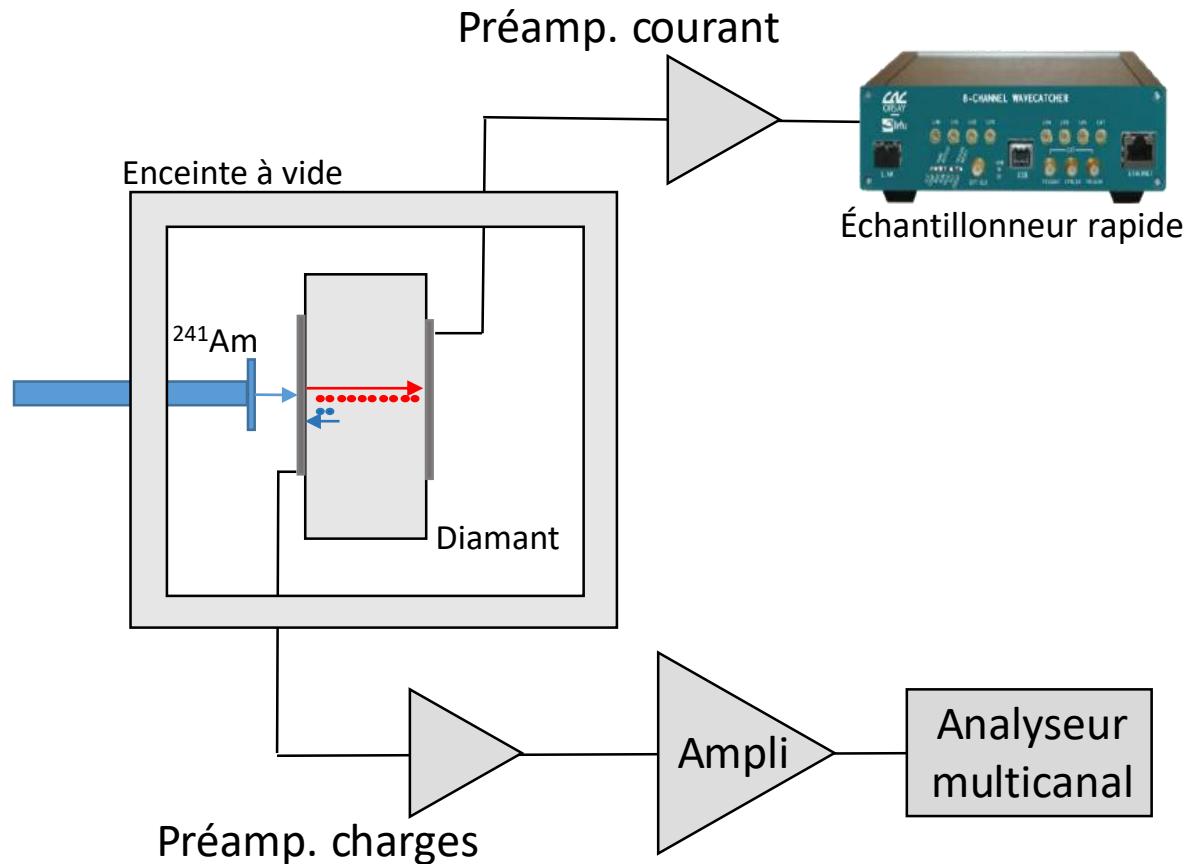
	Monocristallin (sc)	Polycristallin (pc)	Hétéroépitaxie sur Iridium (DOI)
Taille max dispo.	5 x 5 mm <sup>2</sup>	20 x 20 mm <sup>2</sup>	10 x 10 mm <sup>2</sup>
Rapidité	+++	++	++
Sensibilité	++	+	?
Homogénéité	++	?	?
Disponibilité			
Prix	€€€	€	€€

## Caractérisation en laboratoire

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

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

➔ Polarisation sélectionne le porteur de charges étudié

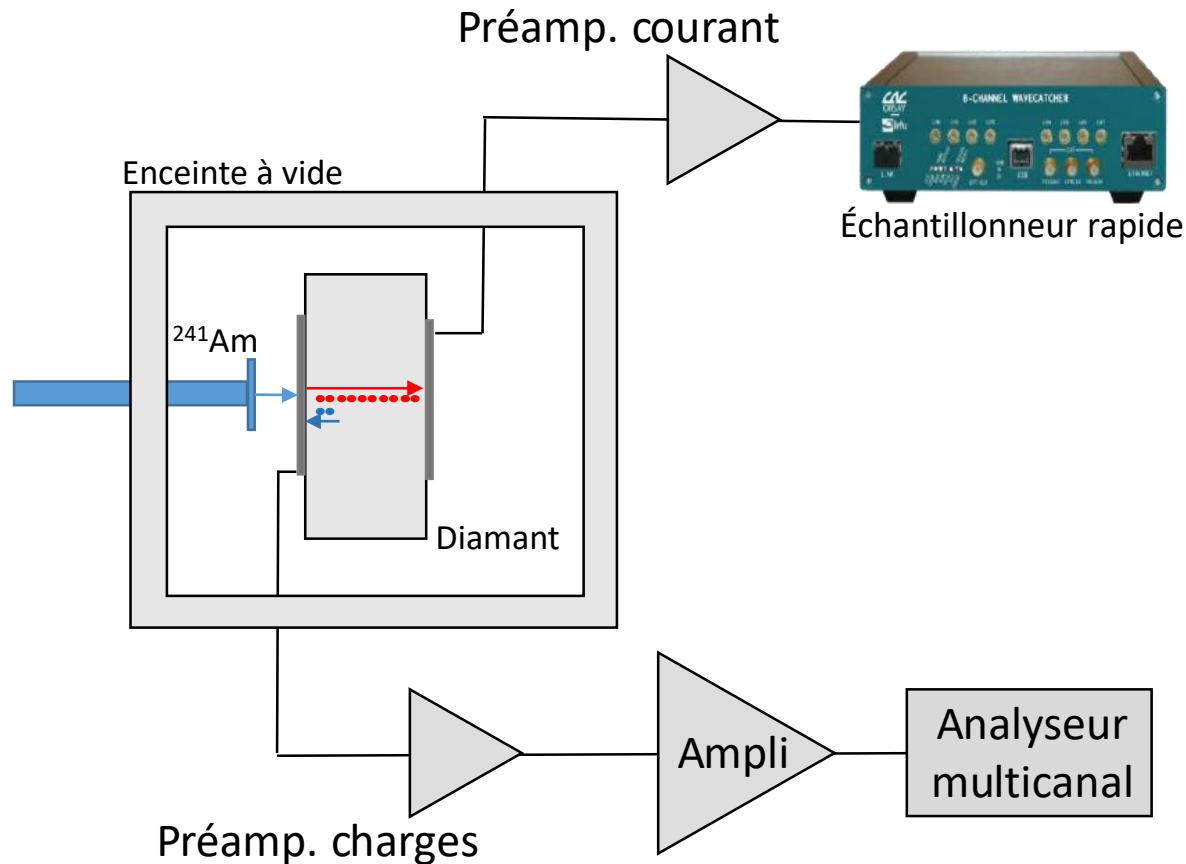


## Caractérisation en laboratoire

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

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

➔ Polarisation sélectionne le porteur de charges étudié



## Electronique rapide

Conserve la forme originelle du signal généré dans le diamant

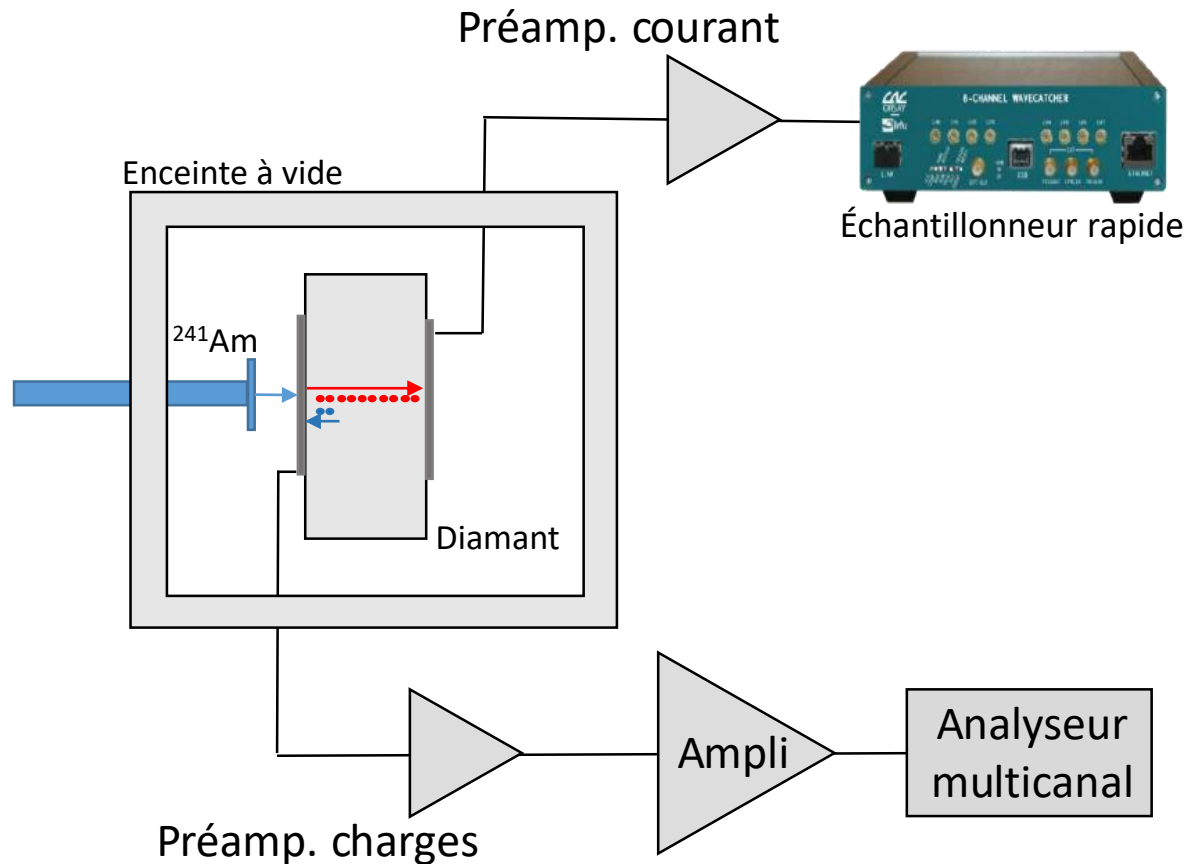
- Analyse de forme  $\rightarrow$  qualité de l'échantillon
- Propriétés porteurs de charges (vitesses de dérive, mobilités, temps de vie effectif...)

## Caractérisation en laboratoire

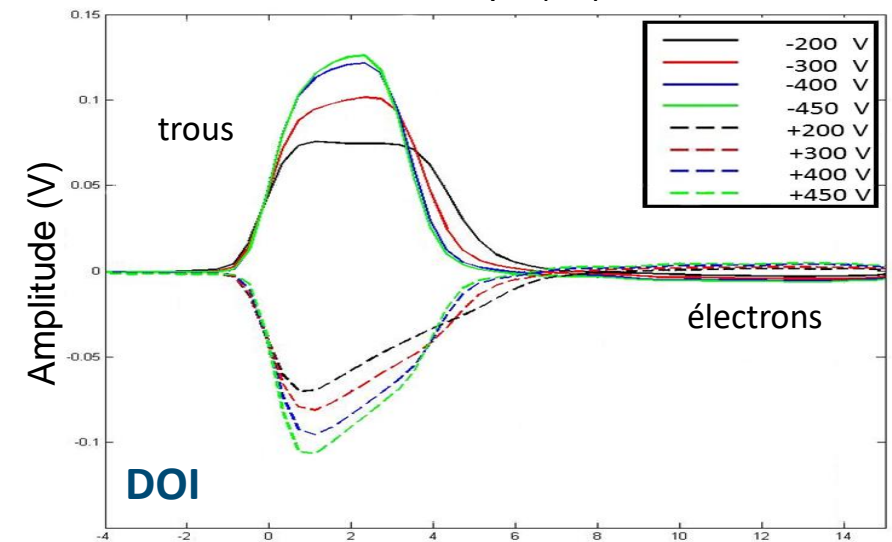
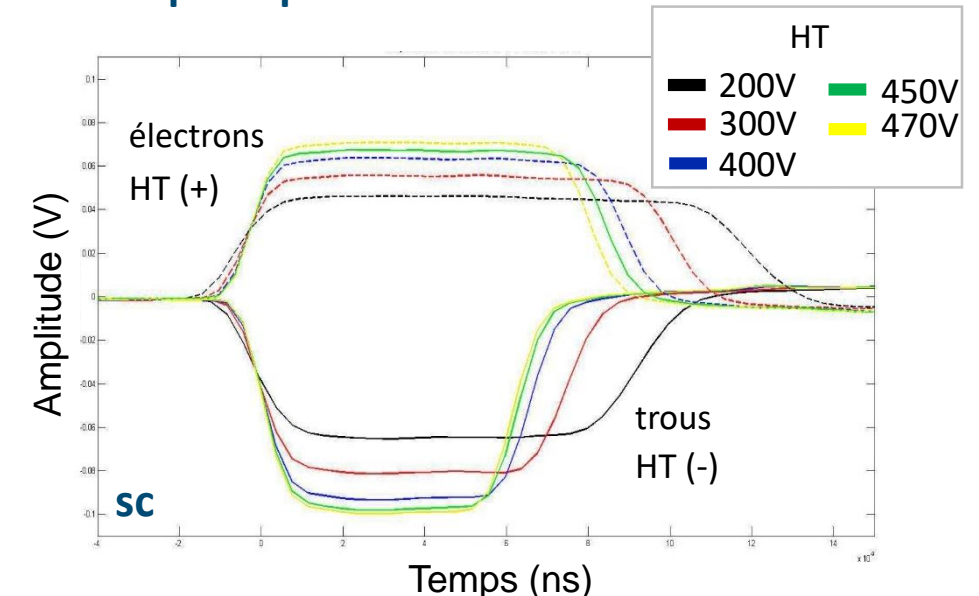
Source  $\alpha = {}^{241}\text{Am}$  ( $\sim 5.5$  MeV, 6.38 kBq)

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

➔ Polarisation sélectionne le porteur de charges étudié



## Electronique rapide

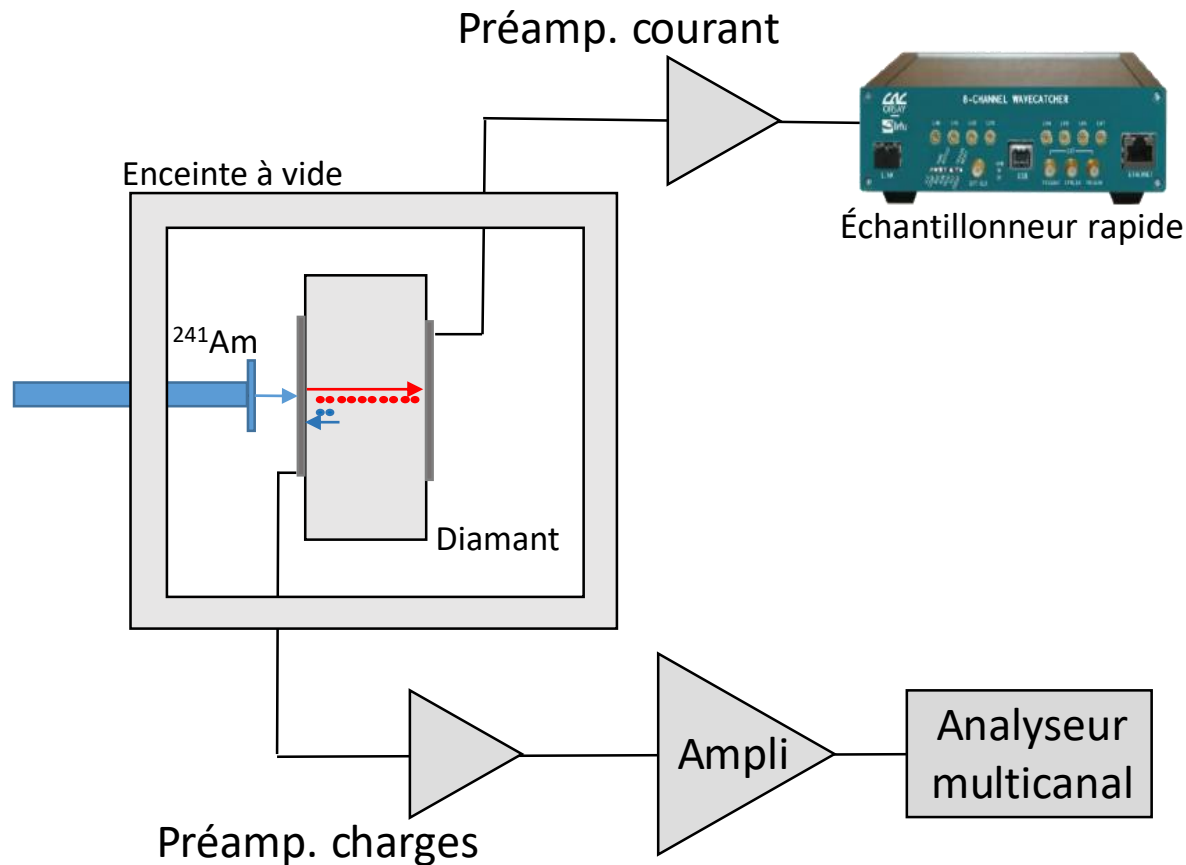


## Caractérisation en laboratoire

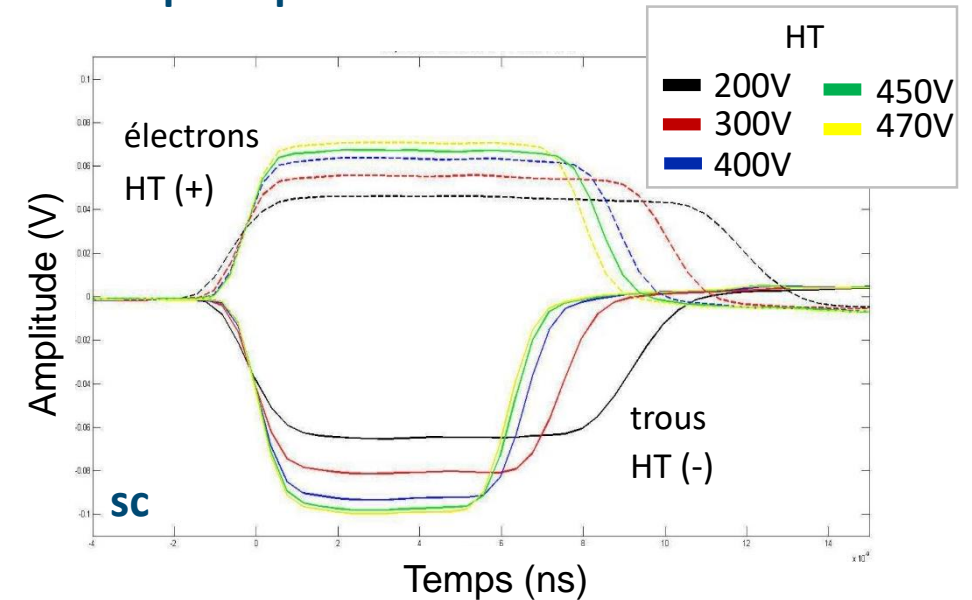
Source  $\alpha = {}^{241}\text{Am}$  ( $\sim 5.5$  MeV, 6.38 kBq)

$\leftrightarrow 14\text{ }\mu\text{m}$  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)

$$CCE = Q_{collectée} / Q_{générée}$$

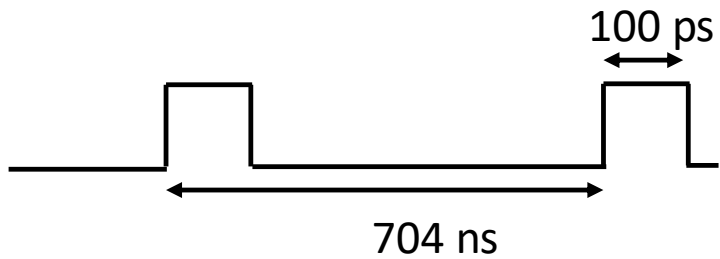
## Caractérisation sous microfaisceau X



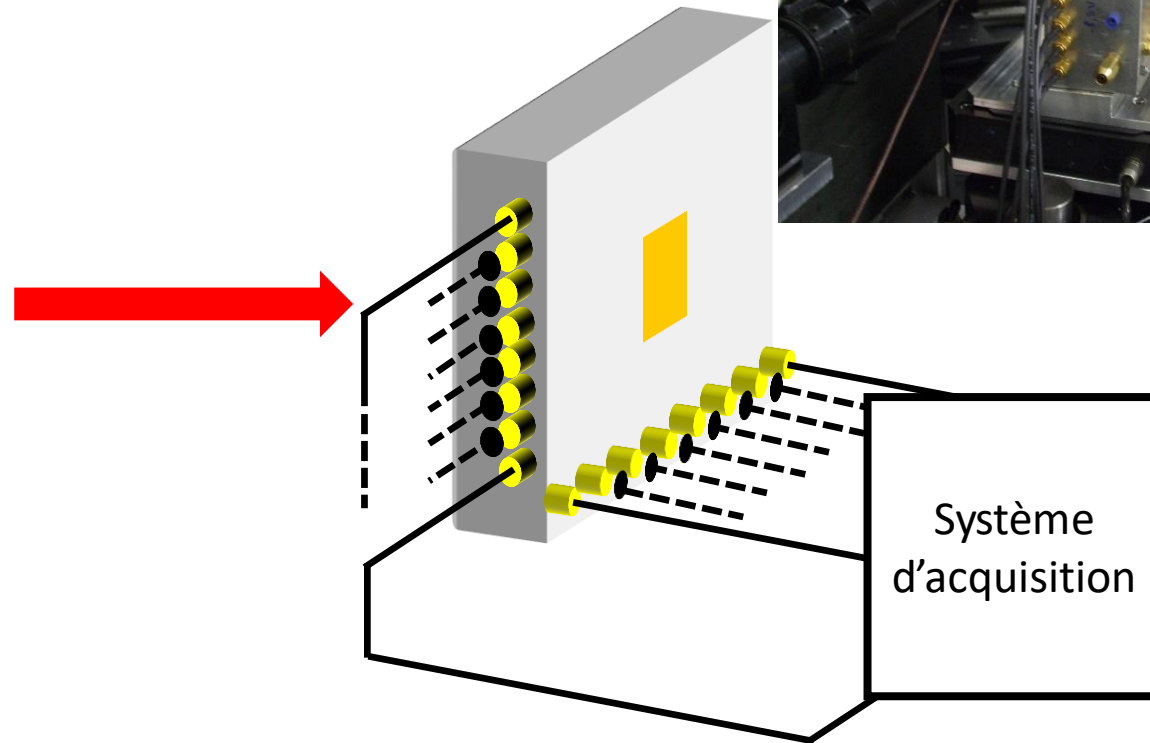
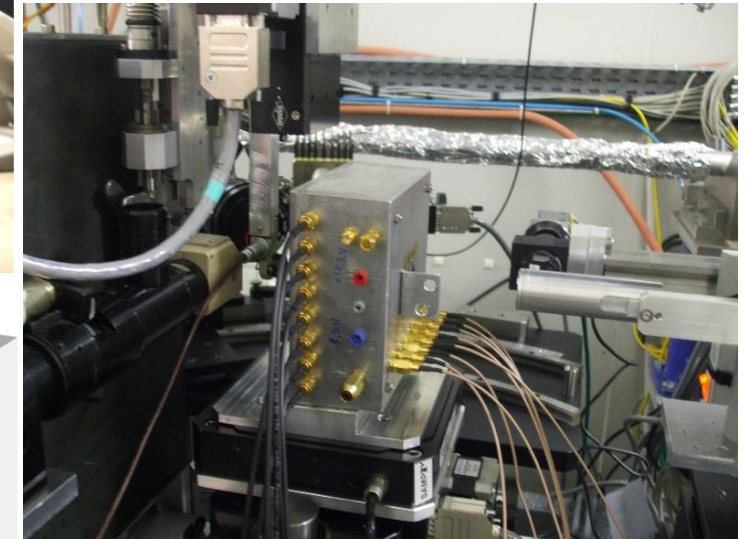
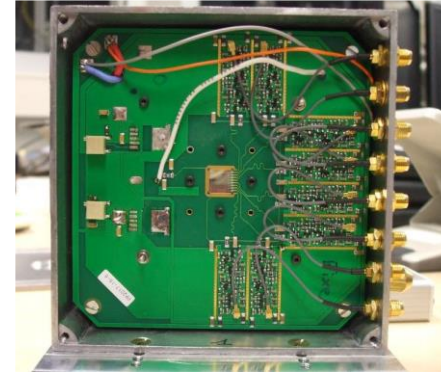
Microfaisceau pulsé Rayons X (8.5 keV)

~1500 photons / pulse

Ø spot : 1 µm

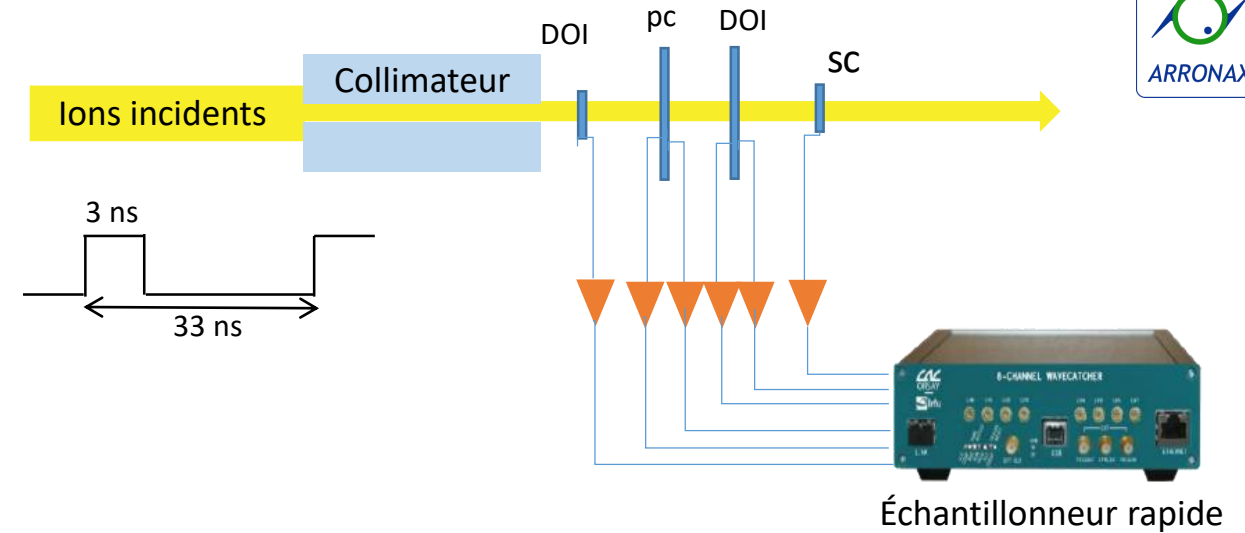


- Mode courant : Balayage de la surface
- Mode impulsion : Performance détecteurs à pistes



## Evaluation de la résolution temporelle

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

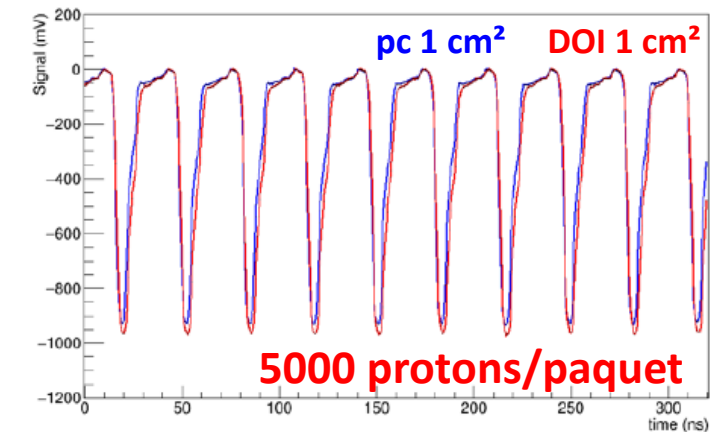
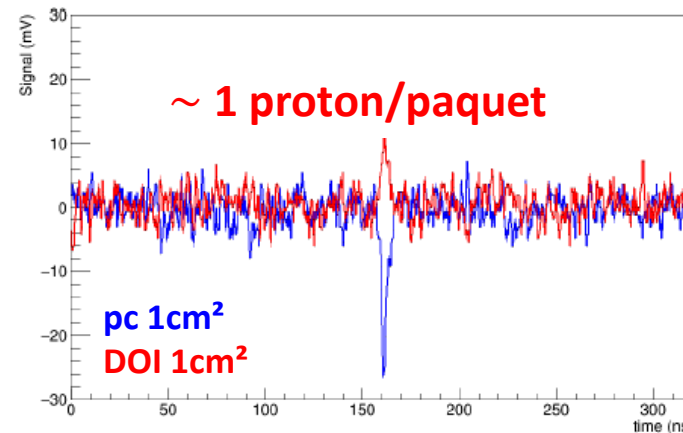


## Efficacité de détection de particule unique

- Balayage en fonction de la valeur de seuil appliquée

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

## Stabilité en intensité



## 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

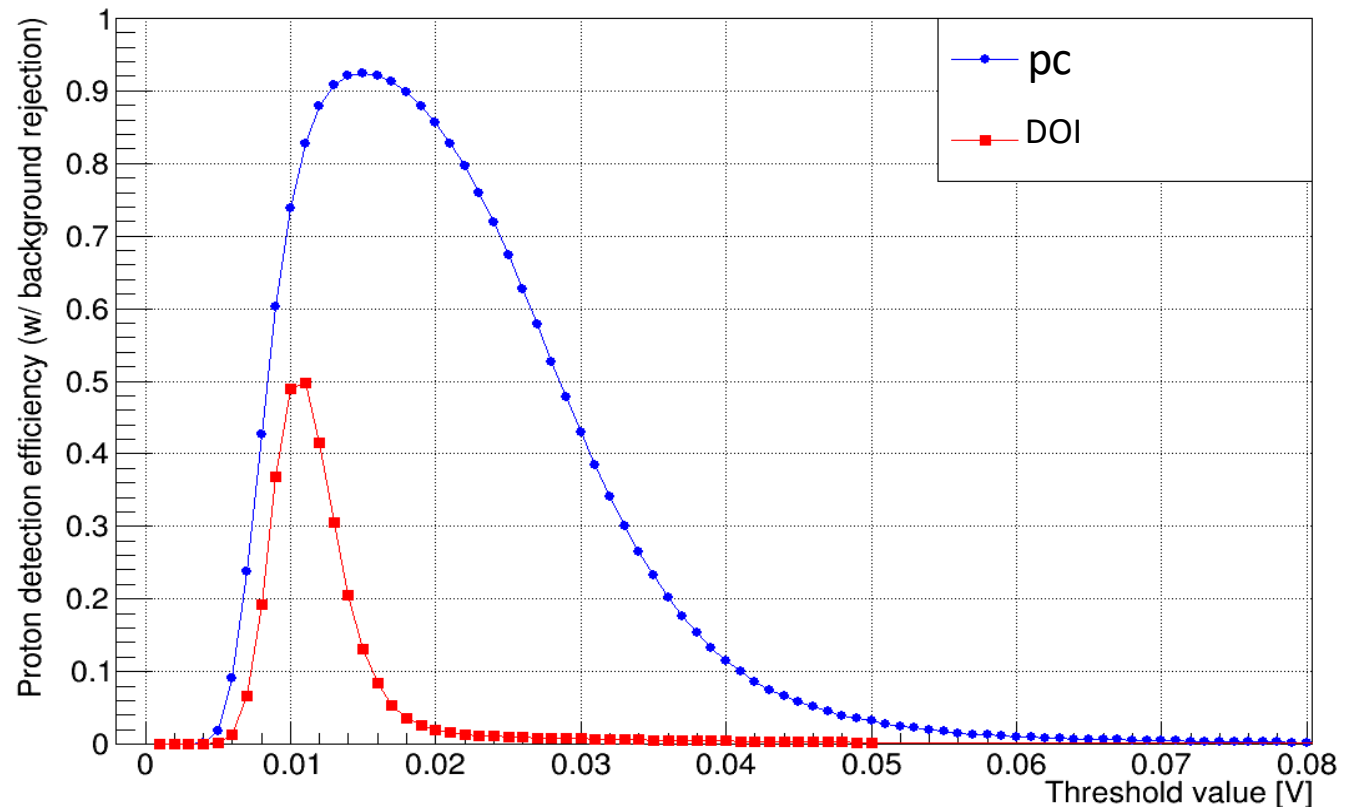
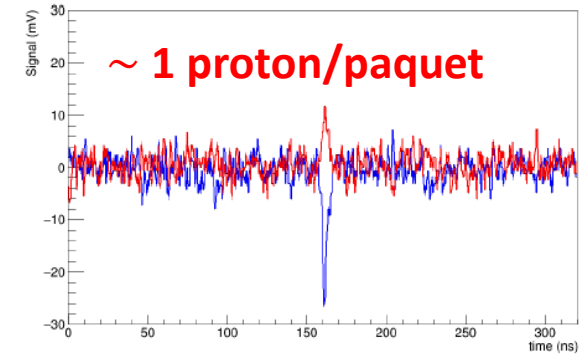
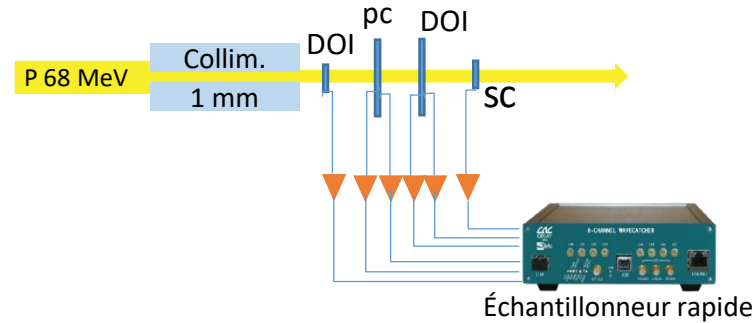


## Efficacité de détection

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

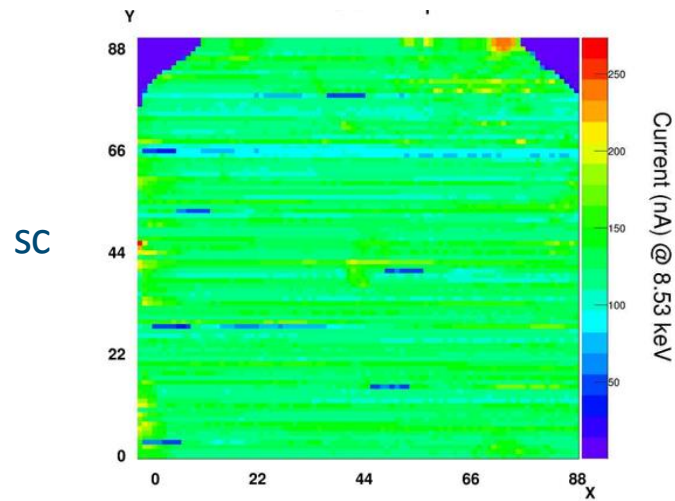
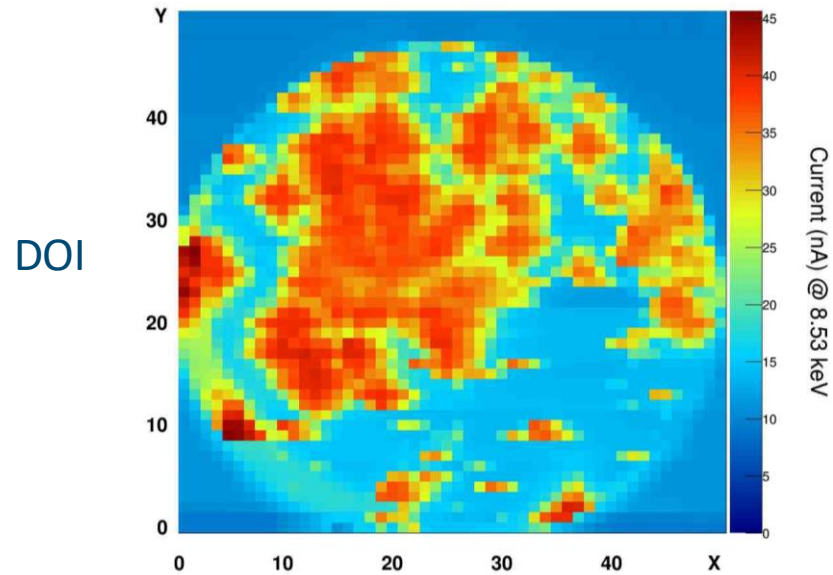
- Filtration événements (amplitude et temps de Vol)
- Sommation signaux faces opposées:  
 $\rightarrow \text{Rapport Signal/Bruit} \times \sqrt{2}$
- Balayage en fonction de la valeur de seuil appliquée

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

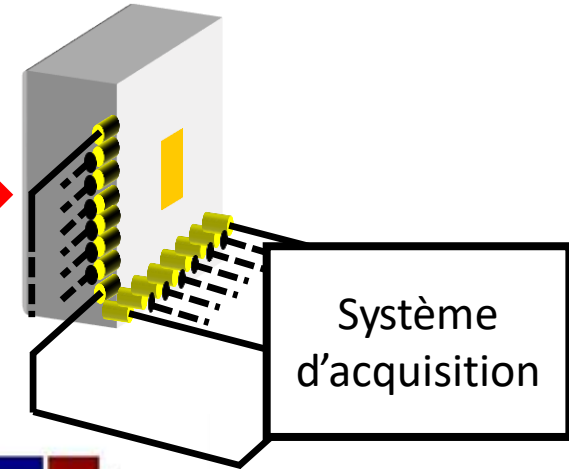


## Réponse en courant

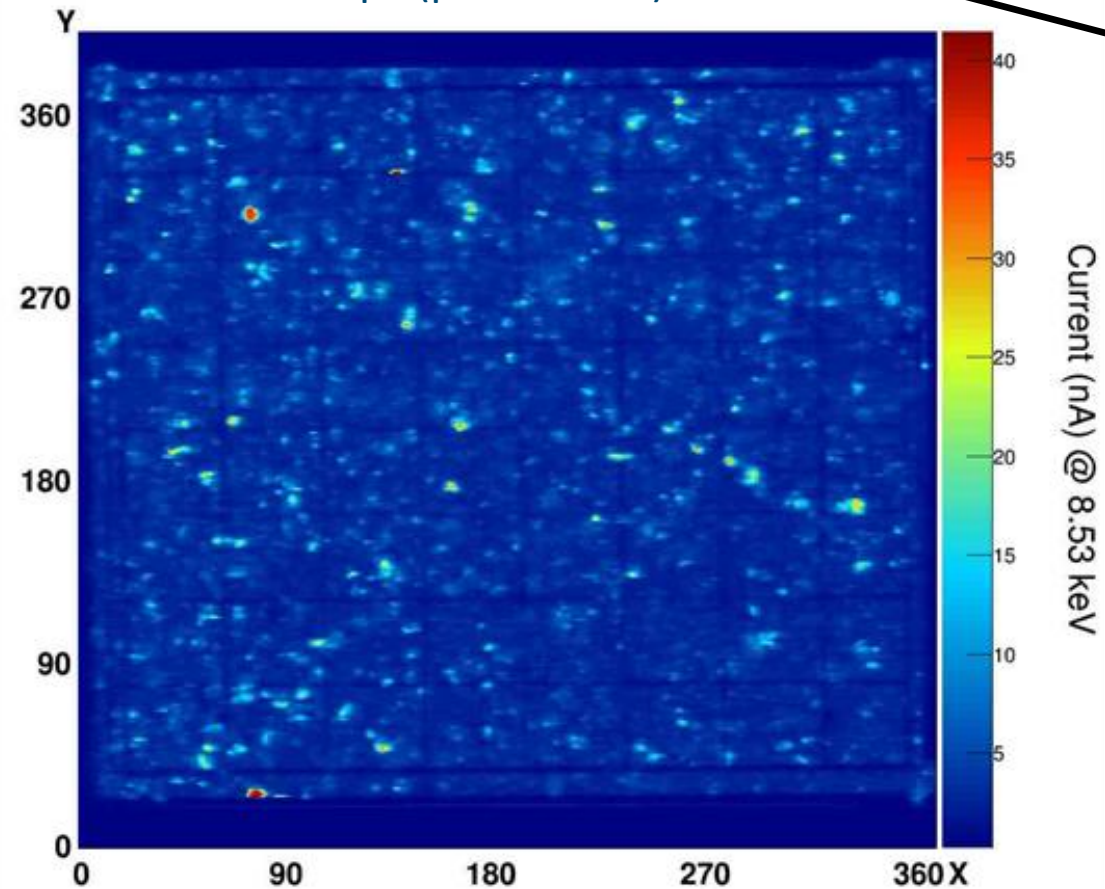
Cartographie du courant induit par le microfaisceau



Rayons X 8.5 keV

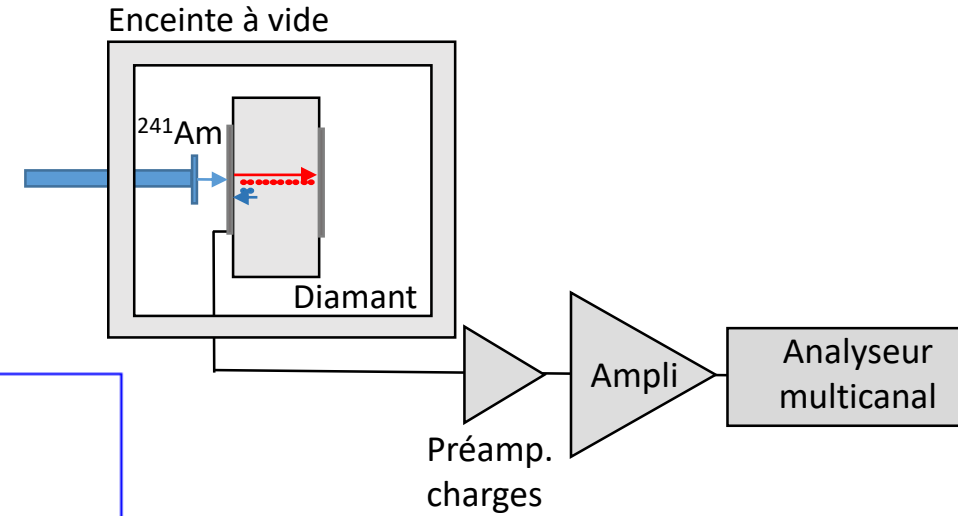
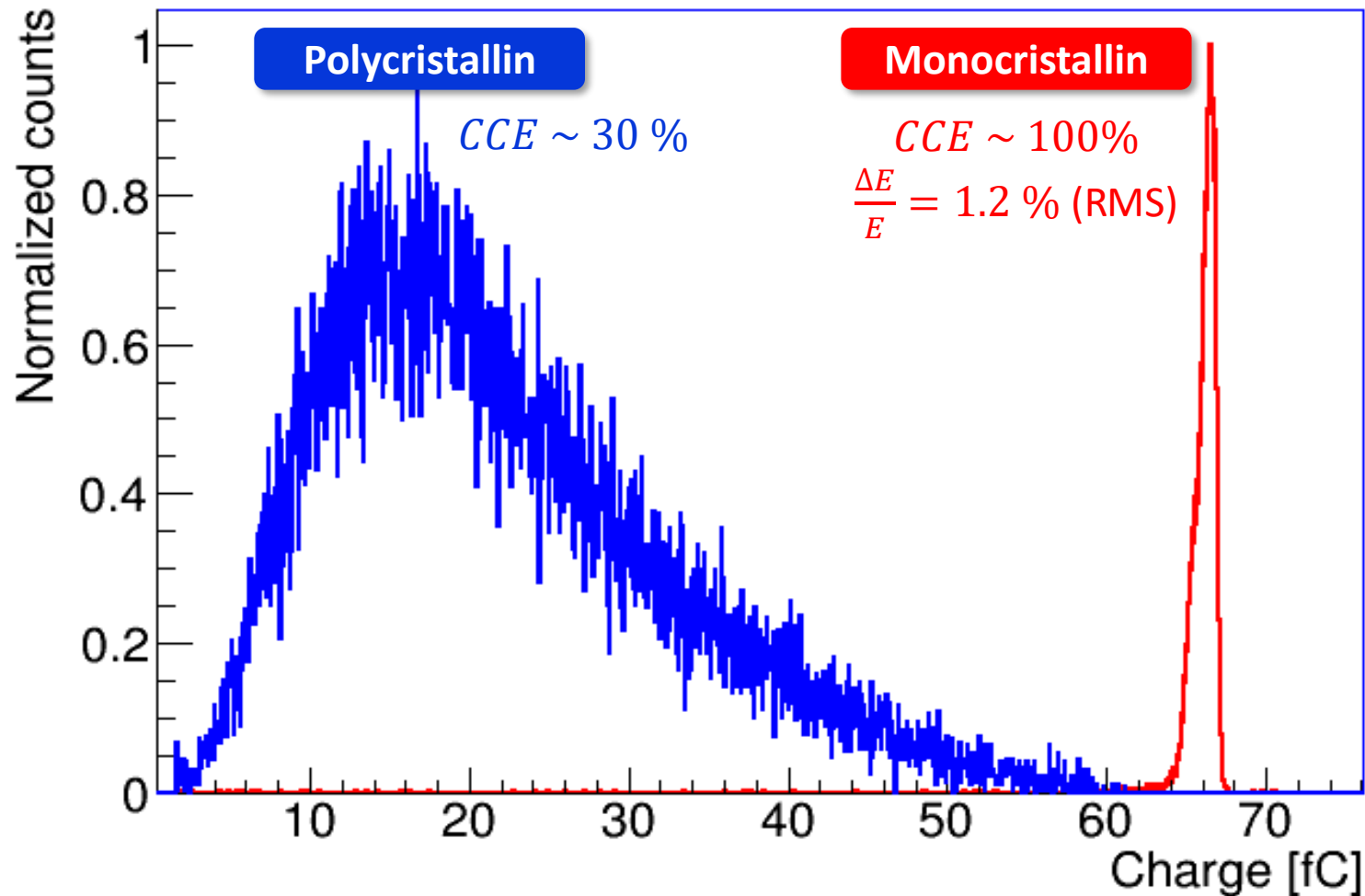


pc (pistes 1cm<sup>2</sup>)

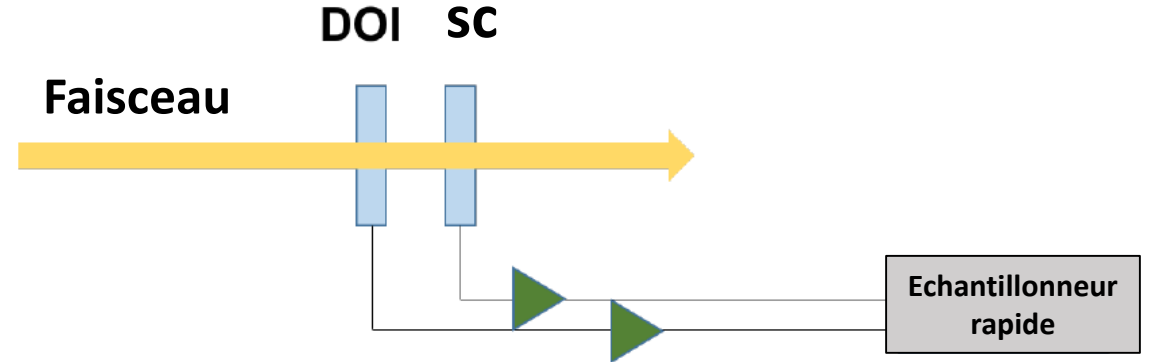


## Réponse spectroscopique

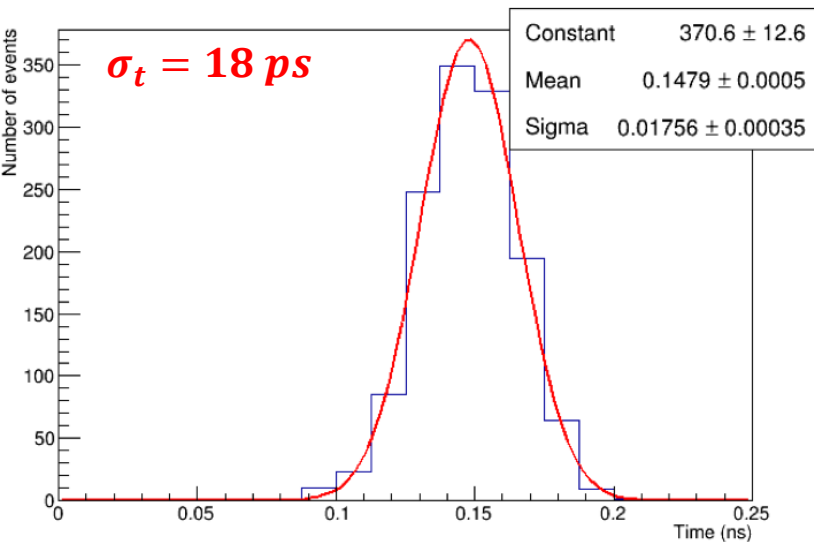
$^{241}\text{Am}$  :  $\alpha \sim 5.5 \text{ MeV} \leftrightarrow 67 \text{ fC}$  généré dans diamant



# Résolution temporelle

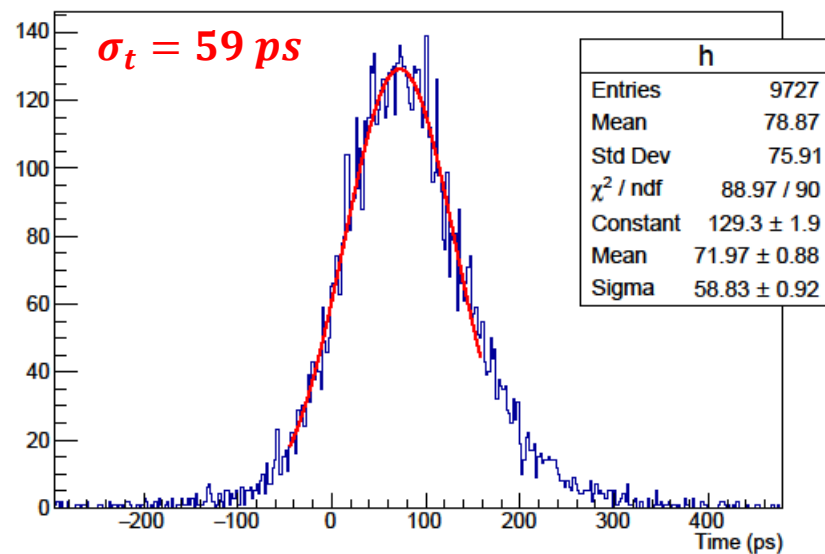


Ions  $^{12}\text{C}$  95 MeV/u @ GANIL



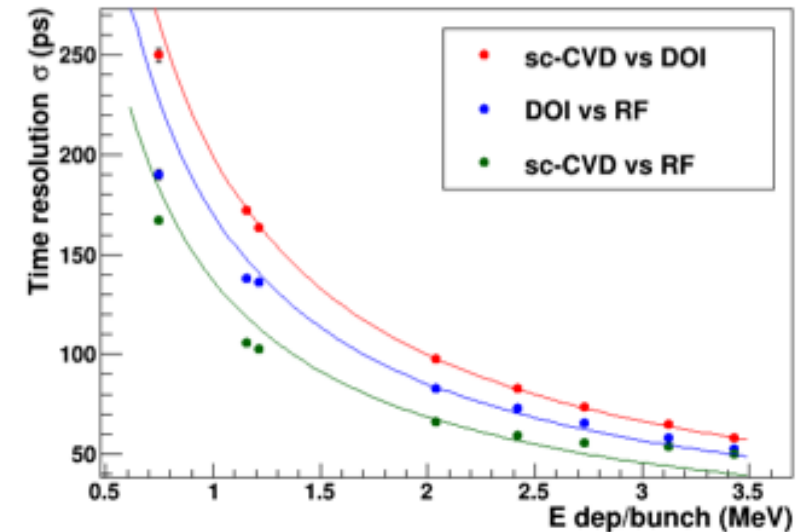
$\Delta E = 25 \text{ MeV}$  (300  $\mu\text{m}$  diamant)

Protons 68 MeV @ ARRONAX

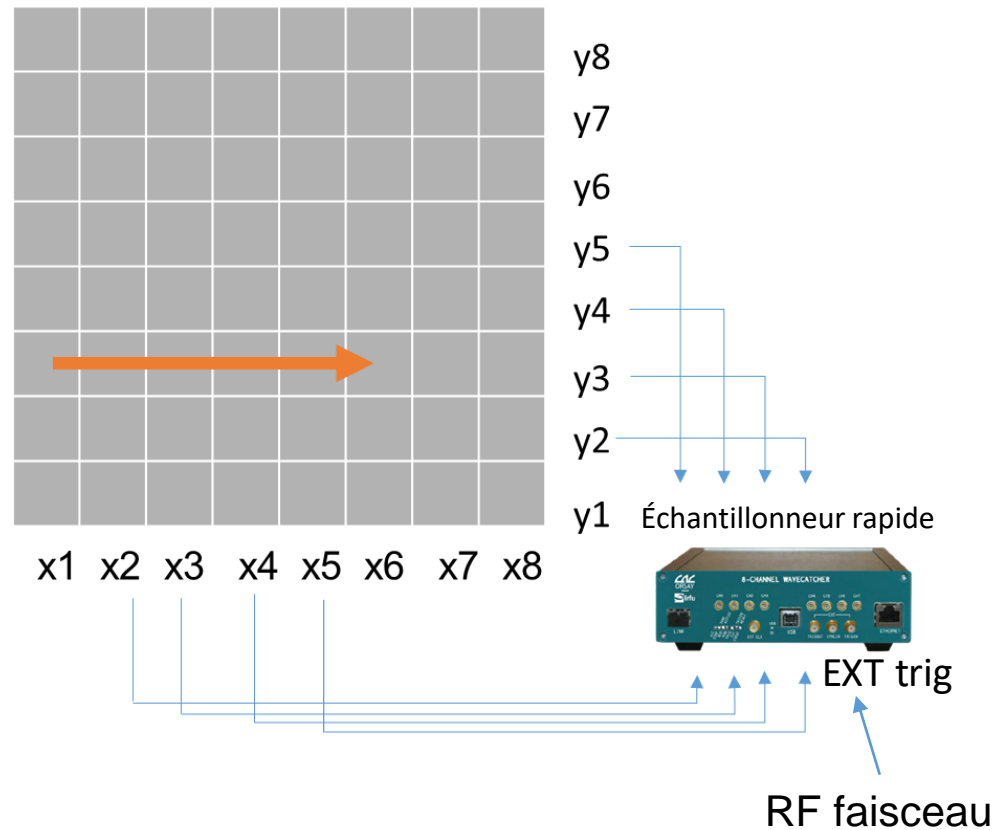


$\Delta E = 1 \text{ MeV}$  (300  $\mu\text{m}$  diamant)

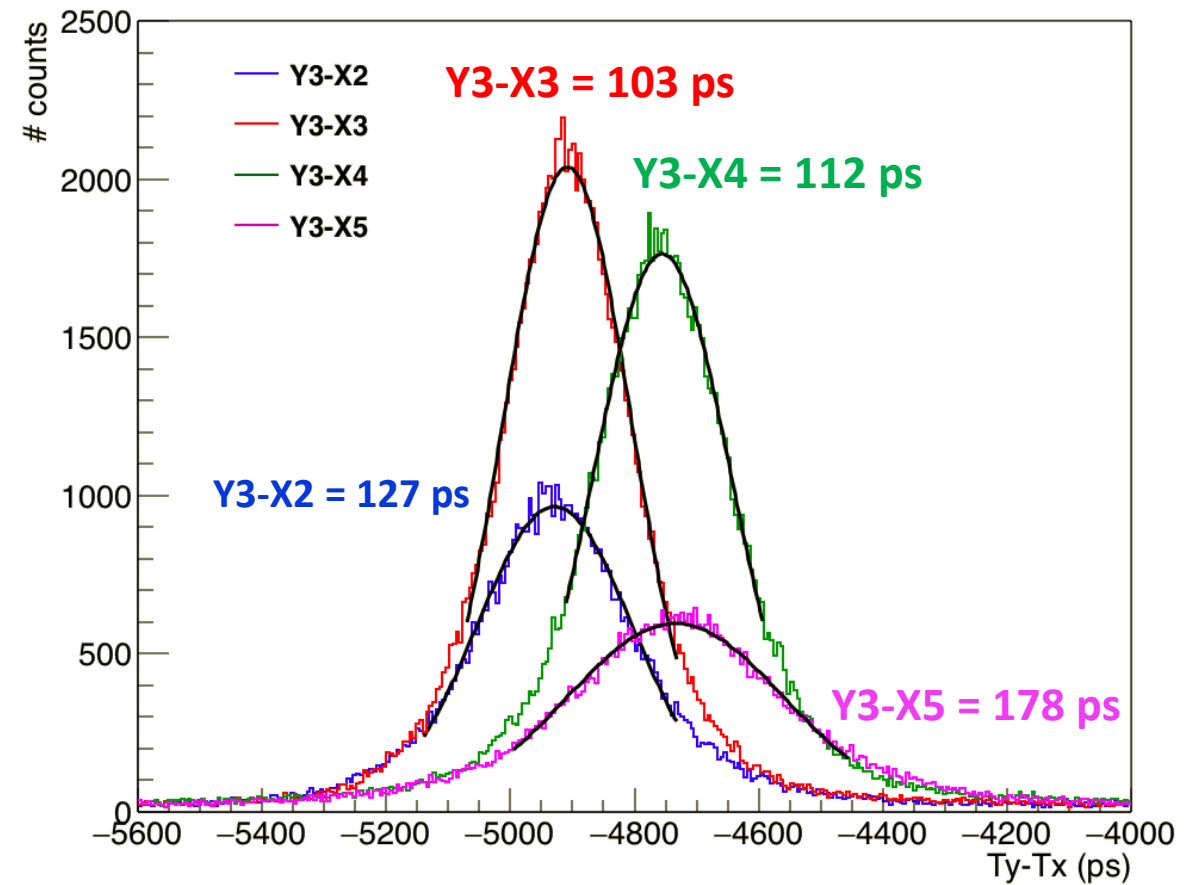
Photons 8.5 keV @ ESRF



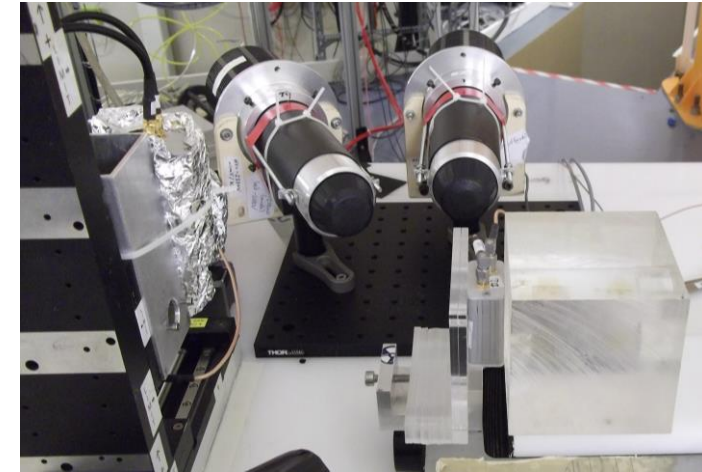
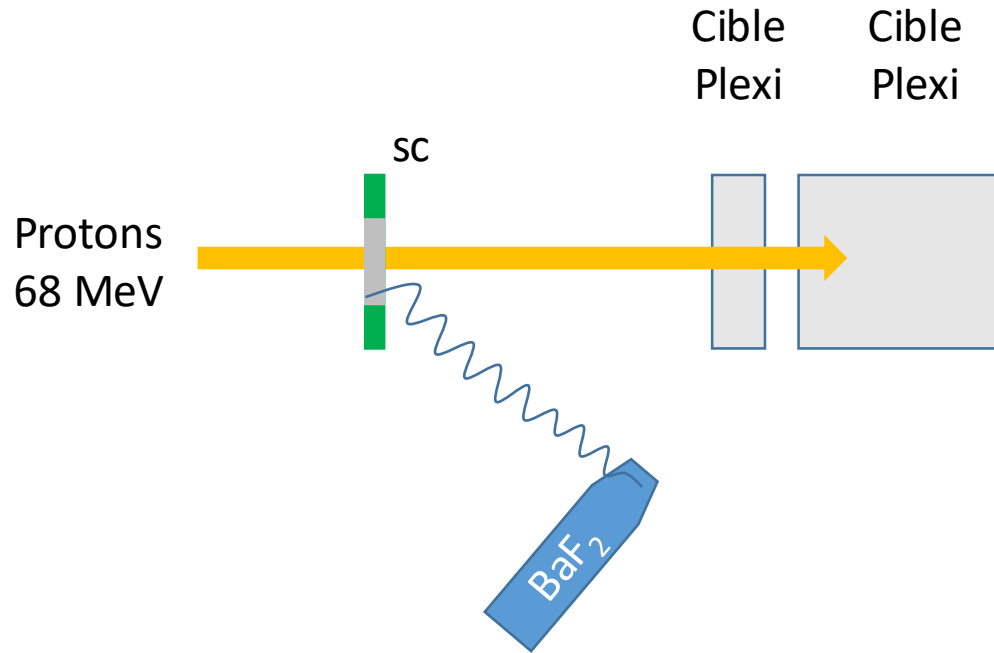
## Résolution temporelle des détecteurs à pistes



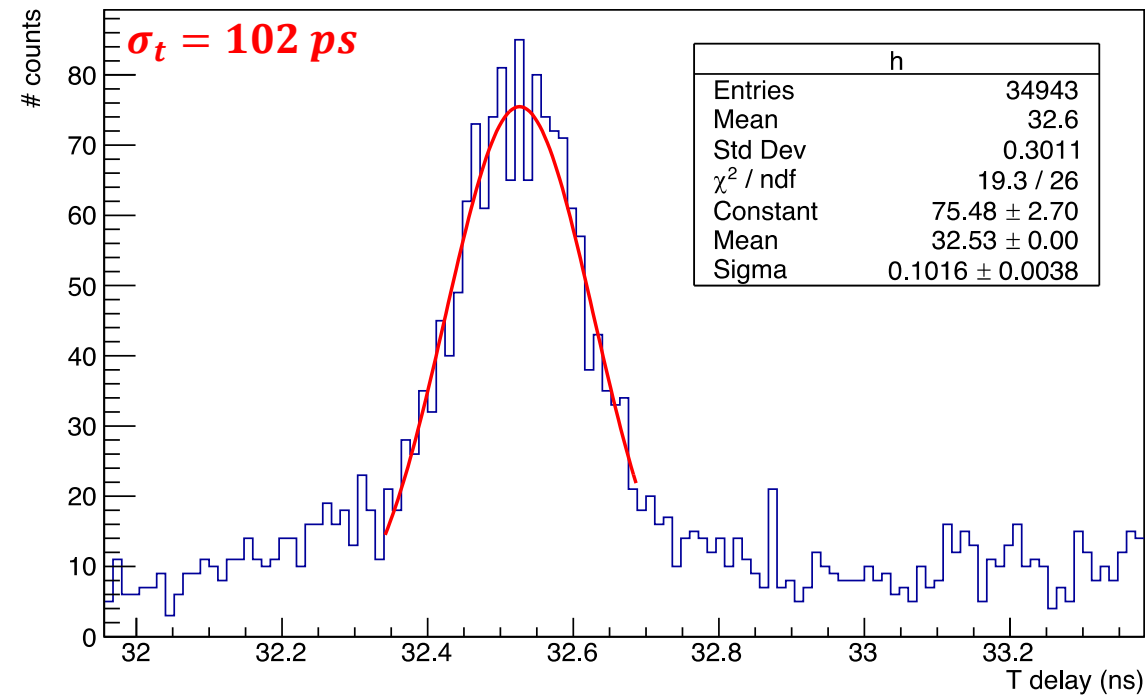
## Résolution temporelle (rms)



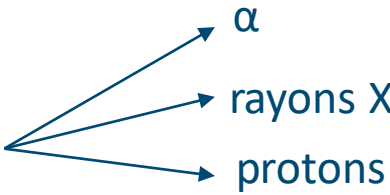
## Prompt Gamma Timing @ ARRONAX



Résolution Diamant SC vs Scintillateur BaF<sub>2</sub>



## Conclusions

- Outils de caractérisation ont été développés 
  - α
  - rayons X
  - protons
- 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