

Hodoscope diamant pour l'hadronthérapie

CLaRyS Ultra-Fast Timing



S. Curtoni, G. Bosson, J. Bouvier, J. Collot, D. Dauvergne, JY. Hostachy, L. Gallin-Martel, ML. Gallin-Martel, A. Ghimouz, J. Livingstone, S. Marcatili, JF. Muraz, F.E. Rarbi, O. Rossetto, M. Yamouni



F. Haddad, C. Koumeir



V. Métivier, N. Servagent



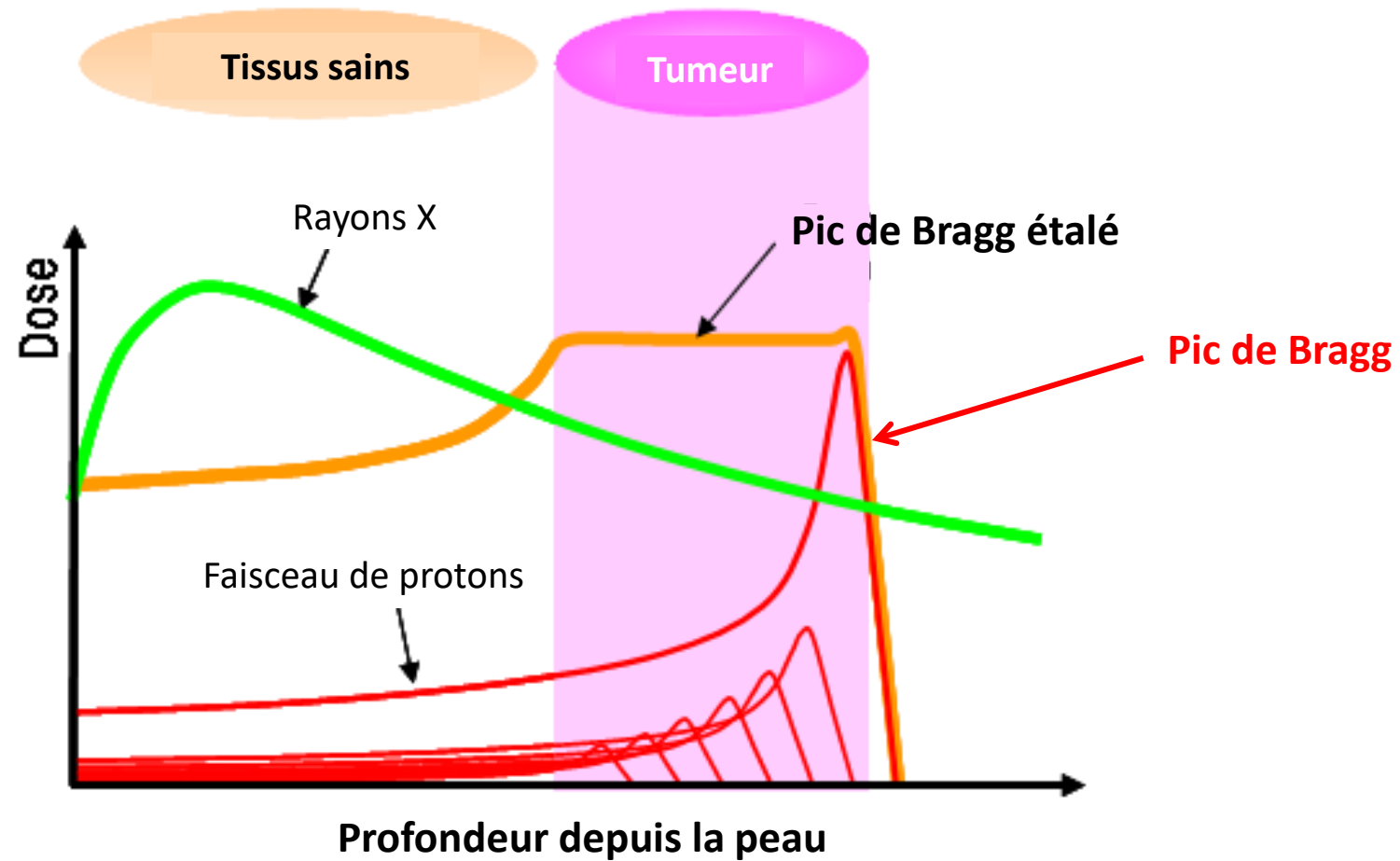
E. Testa



JM. Létang

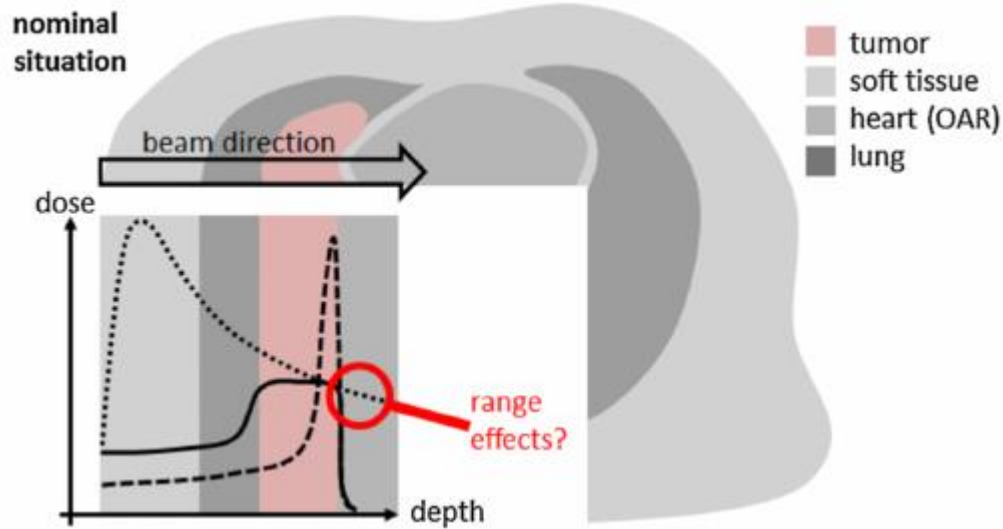
Hadronthérapie

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

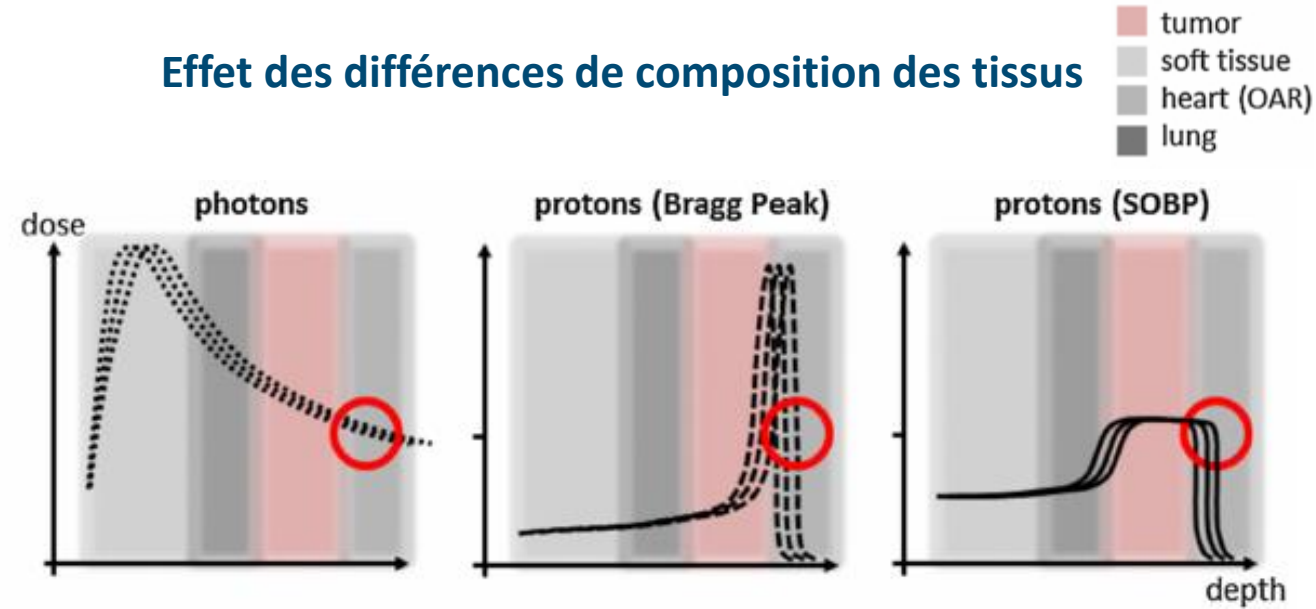


Incertitudes sur le parcours des ions

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

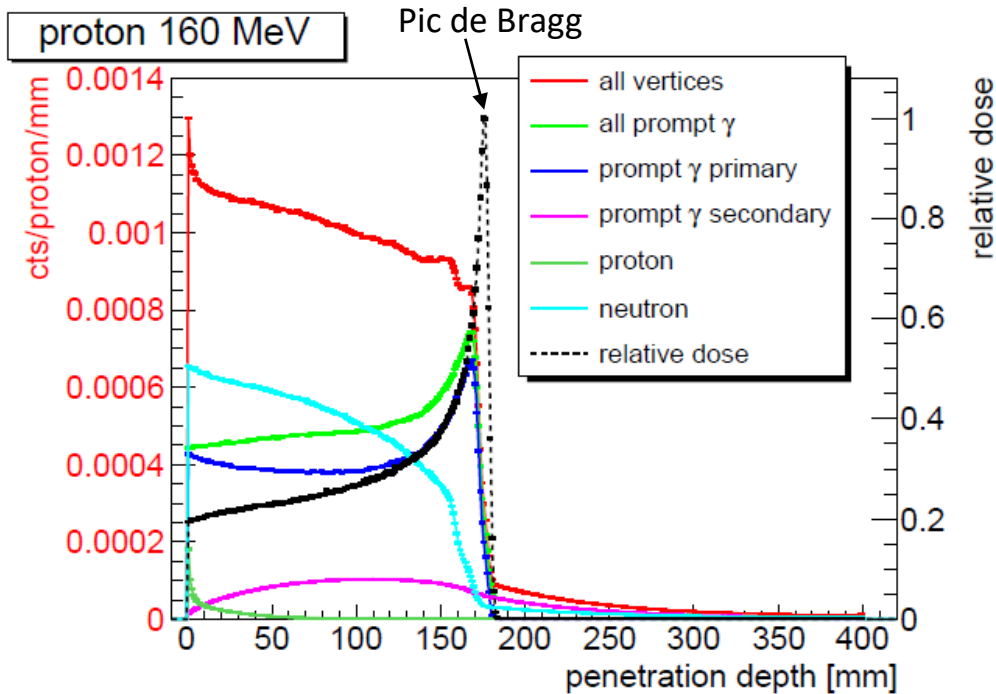


Marges de sécurité cliniques sur parcours effectif
(ex : 1 cm pour parcours 20 cm)



Intérêt d'un contrôle en ligne du parcours des ions

Simulation Geant4

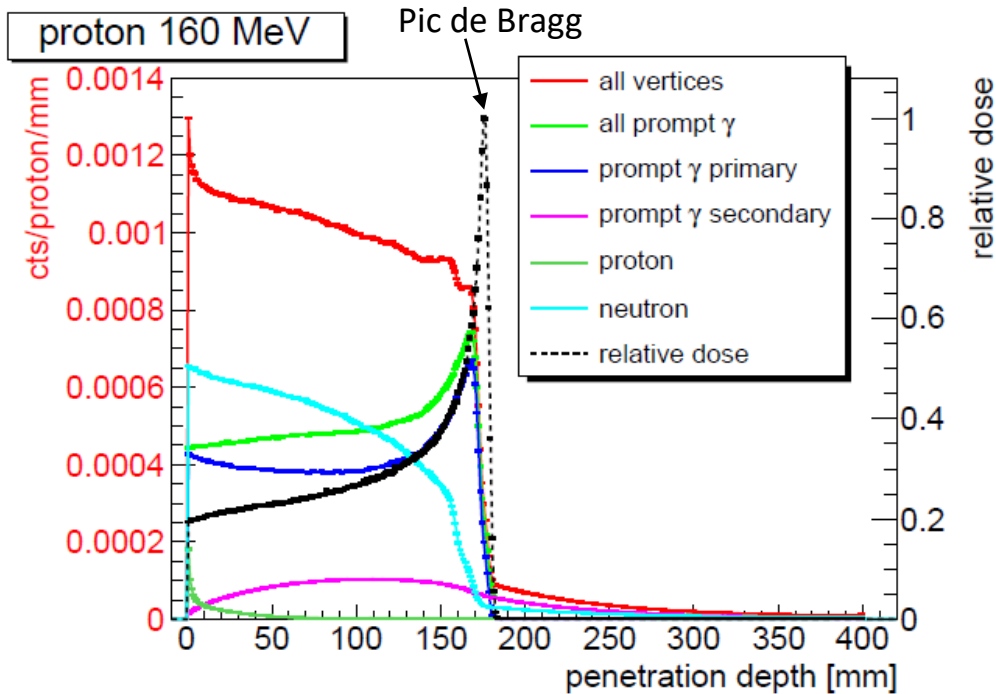


Krimmer et al., Nucl. Instr. Meth. A, **878** (2017) 58-73

Cas des photons gamma-prompt

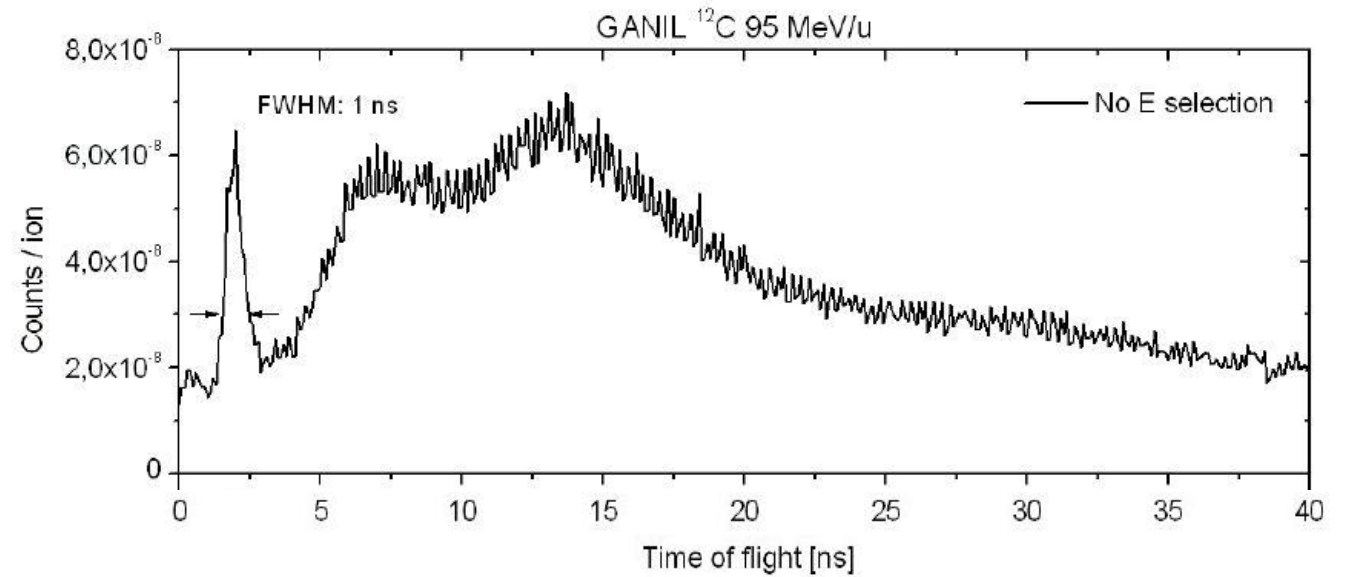
- Issus de collisions inélastiques ions incidents / noyaux cibles
- $\Delta t_{\text{émission}} \sim 10^{-12} \text{ s}$
- Profil d'émission spatialement corrélé au parcours des ions

Simulation Geant4



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

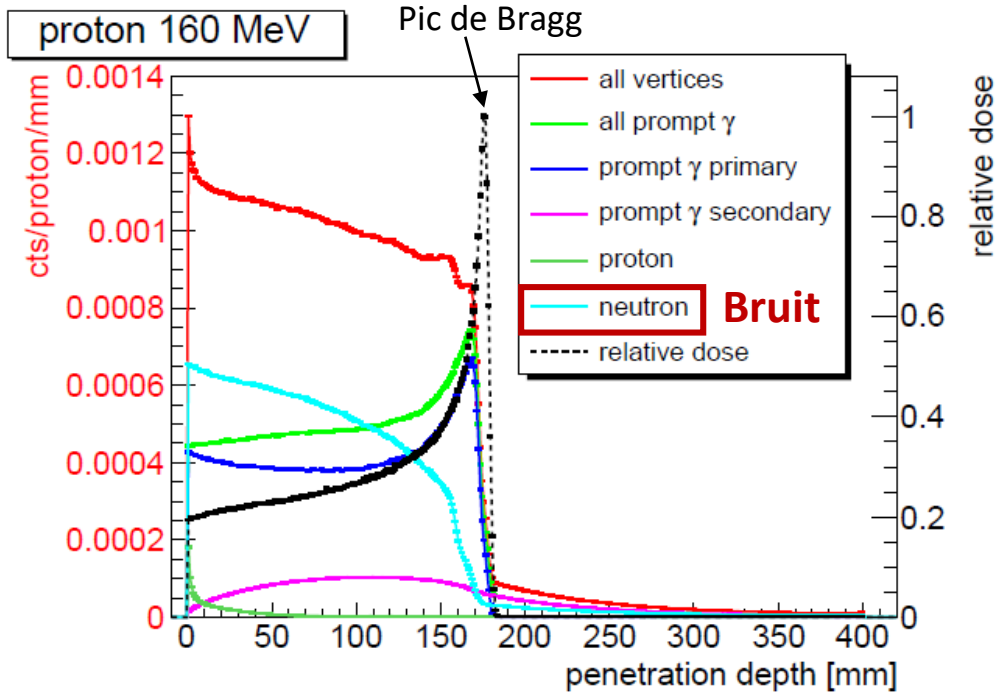
Gamma-prompts : Expérience avec ions ^{12}C @ 95 MeV/u sur cible Plexiglas - Spectre Temps-de-Vol



Mauro Testa, Thèse, Univ. Lyon, 2010

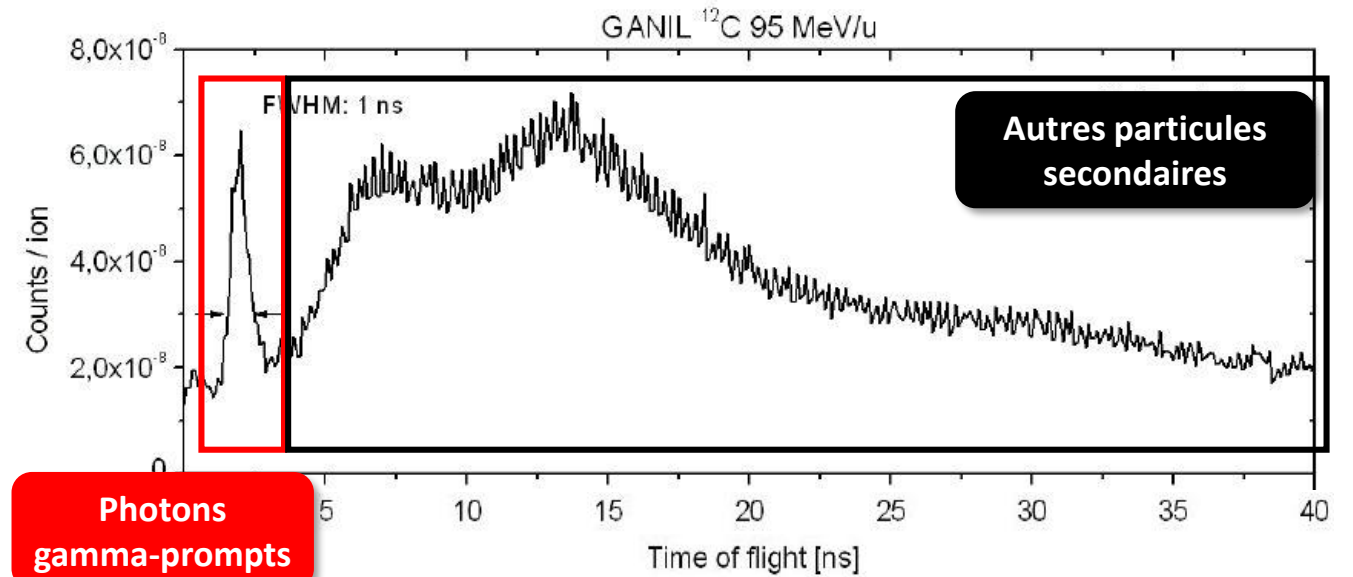
Production de particules secondaires

Simulation Geant4



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

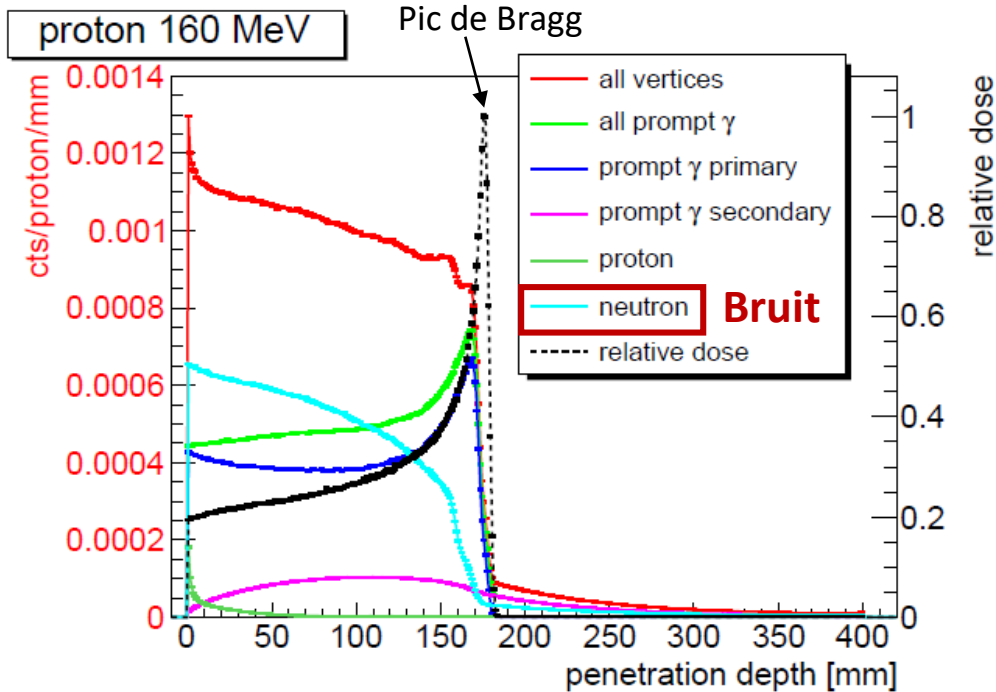
Gamma-prompts : Expérience avec ions ^{12}C @ 95 MeV/u sur cible Plexiglas - Spectre Temps-de-Vol



Mauro Testa, Thèse, Univ. Lyon, 2010

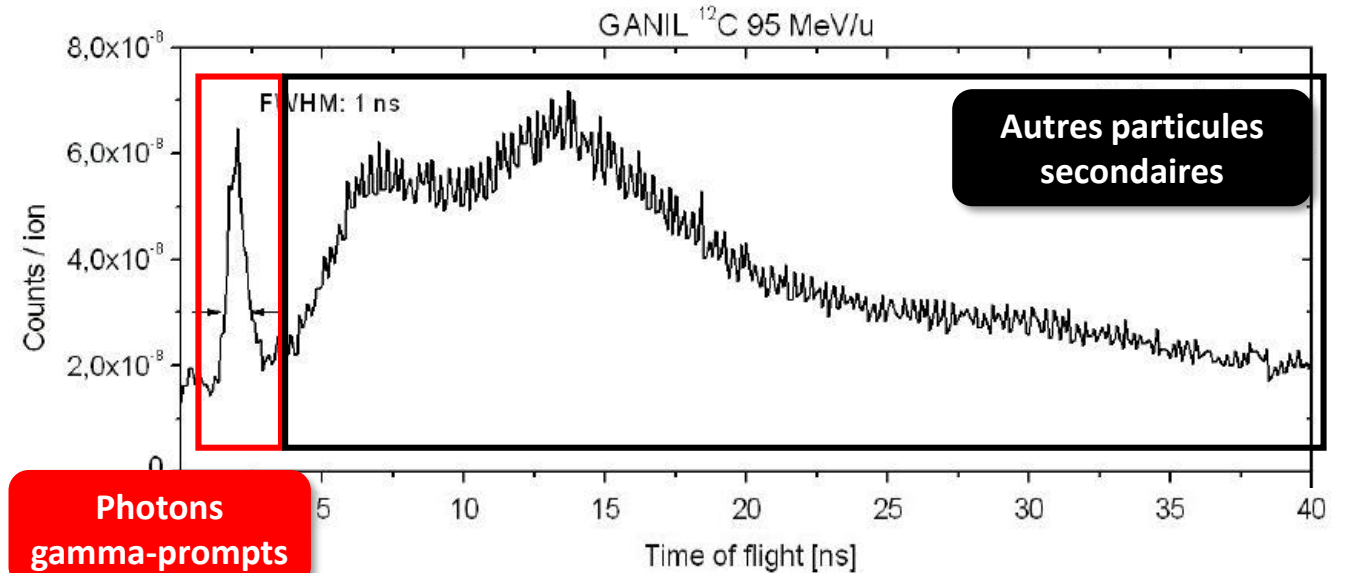
Production de particules secondaires

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

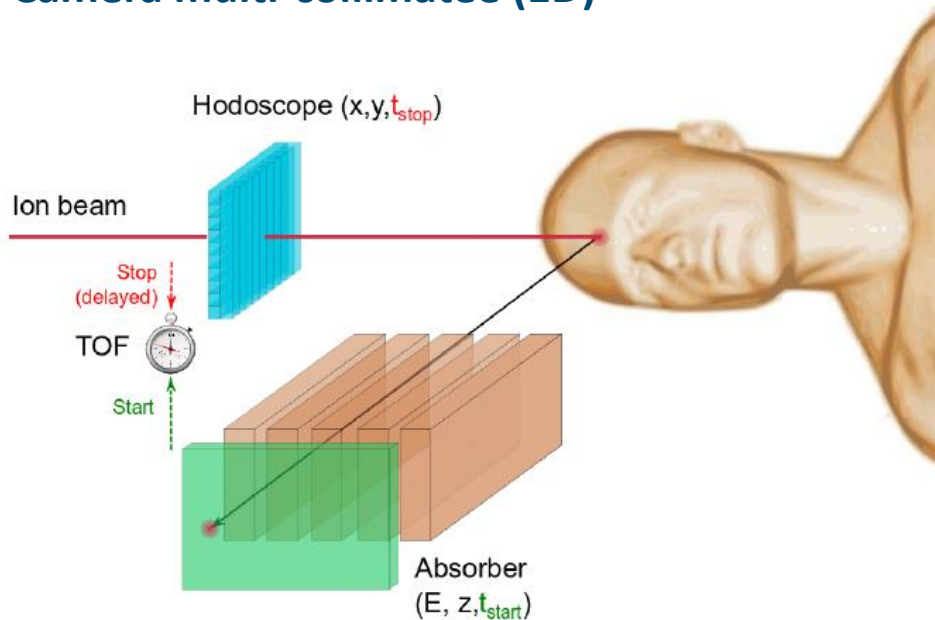
CLaRyS: Contrôle en Ligne de l'hadronthérapie par détection de Rayonnements Secondaires

4 laboratoires: LPSC, IPNL, CPPM, CREATIS Lyon

Détection de Photons Gamma Prompts

Imagerie Gamma Prompt par Temps-de-Vol

Caméra multi-collimatée (1D)

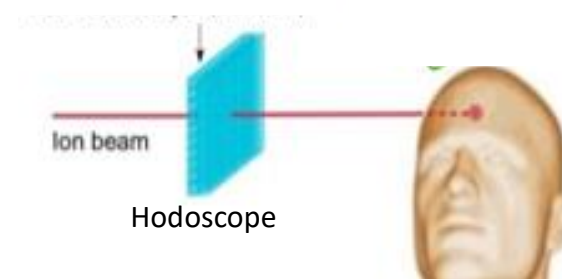
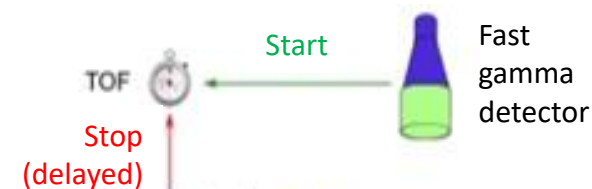
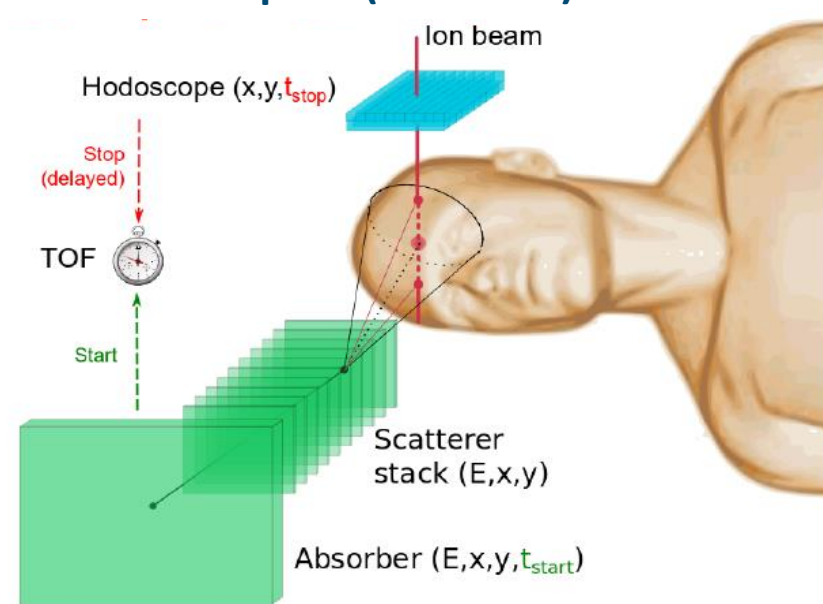


Hodoscope : réduction bruit de fond & position transverse

Objectif CLaRyS-Ultra-Fast Timing : Résolution 100 ps

→ Imagerie par Temps-de-Vol uniquement (cf Poster Sara Marcatili)

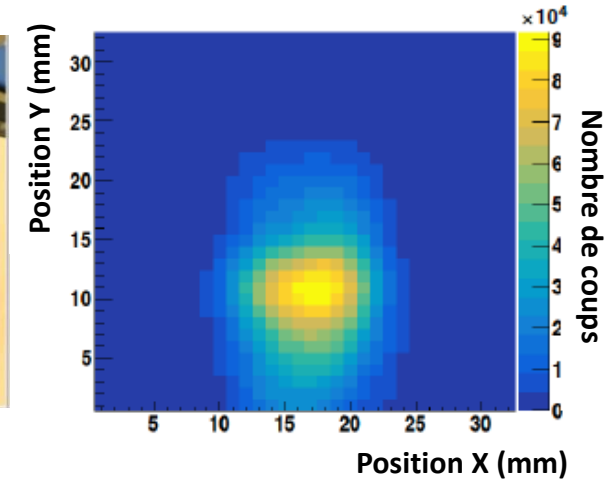
Caméra Compton (2D ou 3D)



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

Le diamant : semi-conducteur intrinsèque

Caractéristiques à 300 K

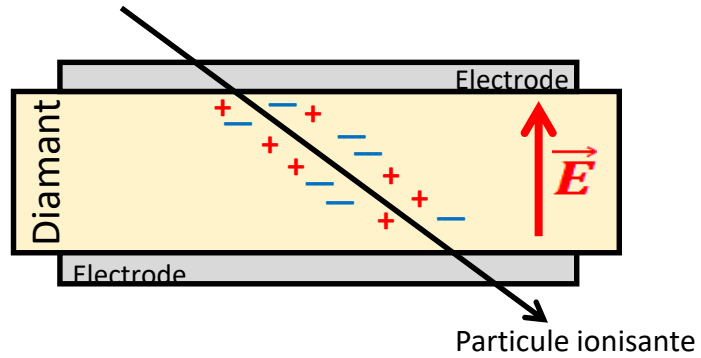
	Diamant	Silicium
Résistivité ($\Omega.m$)	$> 10^{13}$	$2.3 \cdot 10^7$
Gap (eV)	5.5	1.1
Energie création paire e^-/h (eV)	13.1	3.6
Energie de déplacement (eV)	43	25
Mobilité des porteurs ($cm^2.V^{-1}.s^{-1}$)	> 2000	800 – 1400
Conductivité thermique ($W.cm^{-1}.K^{-1}$)	18	2



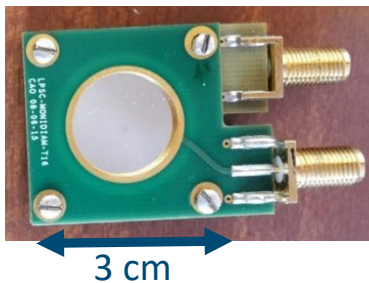
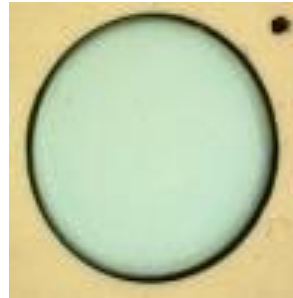
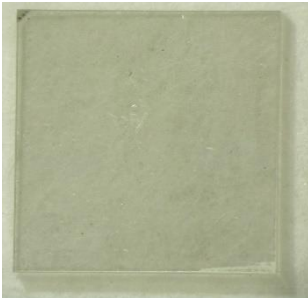
- Courants de fuite très faibles
- Bas bruit
- Résistant aux radiations
- Très rapide
- Opération à température ambiante

Le diamant synthétique comme détecteur

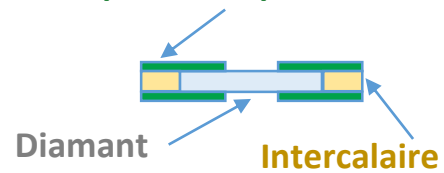
Chambre d'ionisation solide



Assemblage de détecteurs



Circuit imprimé adapté 50Ω



Electronique de lecture

- Préamplificateur de courant



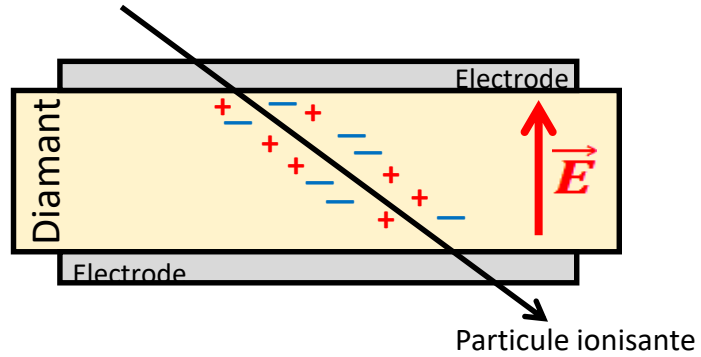
Bande passante: 2 GHz
Gain: 40 dB
Impédance: 50 Ω

+ selon application :

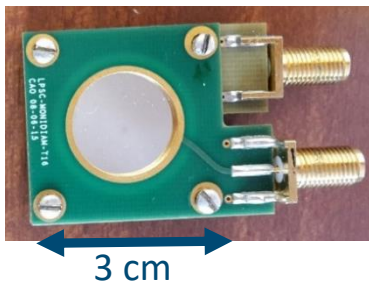
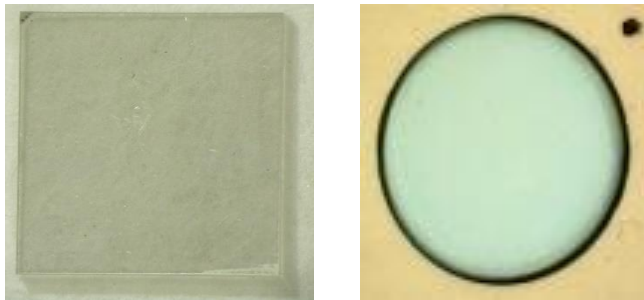
- Préamplificateur de charges
- Electromètre

Le diamant synthétique comme détecteur

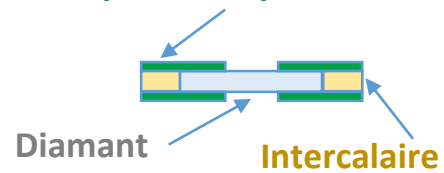
Chambre d'ionisation solide



Assemblage de détecteurs



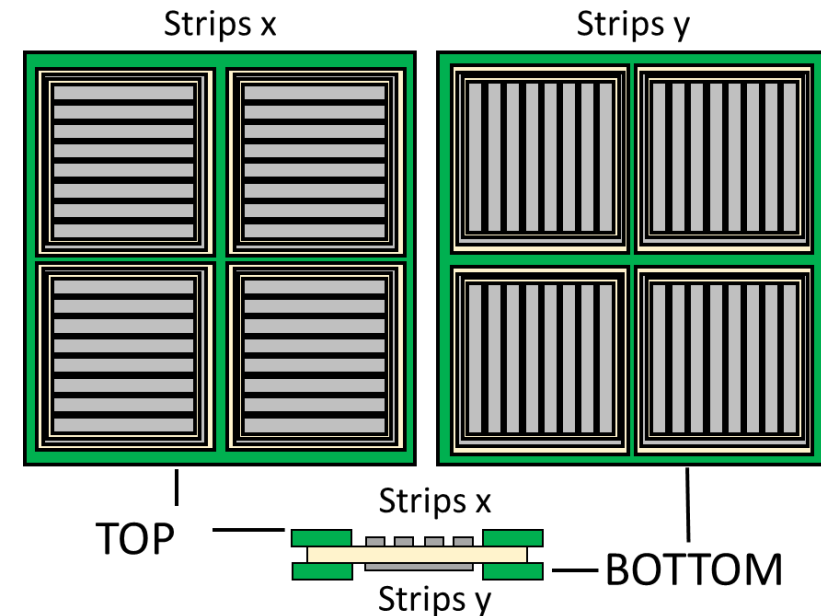
Circuit imprimé adapté 50Ω



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



Différents type de diamants

2 procédés de croissance:

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

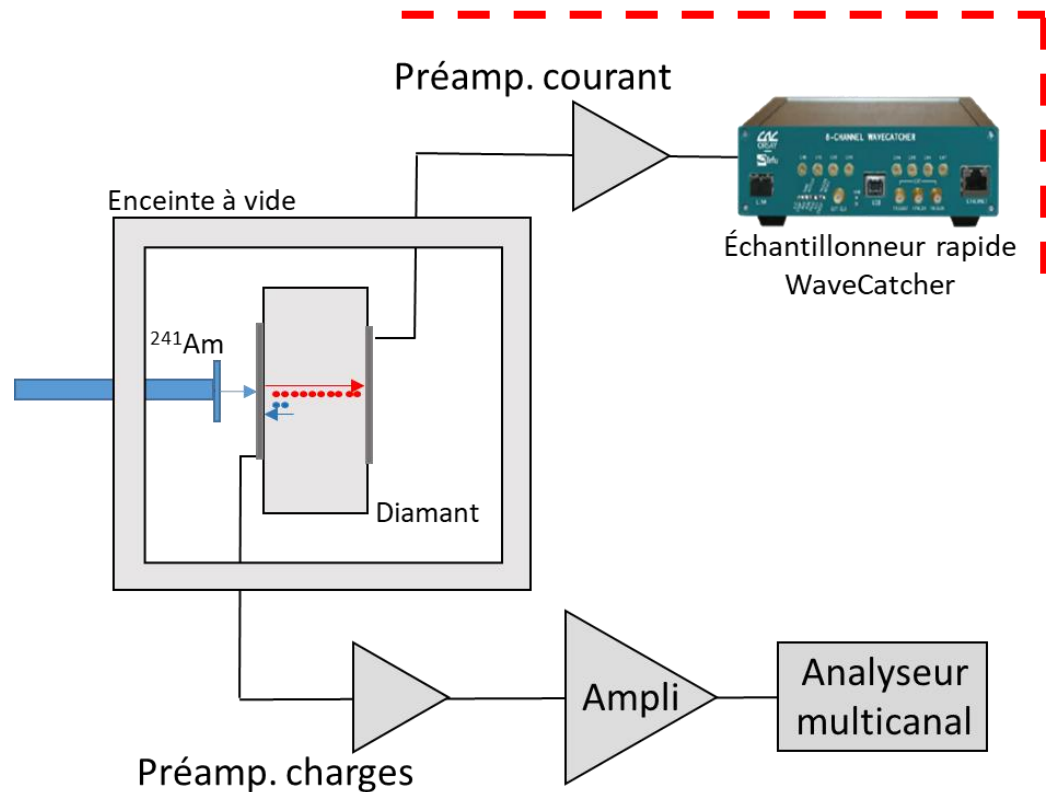
	Monocristallin (mono)	Polycristallin (poly)	Hétéroépitaxie sur Iridium (DOI)
Taille max dispo.	4.5 x 4.5 mm ²	20 x 20 mm ²	10 x 10 mm ²
Rapidité	+++	++	++
Sensibilité	++	+	?
Homogénéité	++	?	?
Disponibilité			
Prix	€€€	€	€€

Caractérisation en laboratoire

Source $\alpha = {}^{241}\text{Am}$ (~ 5.5 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

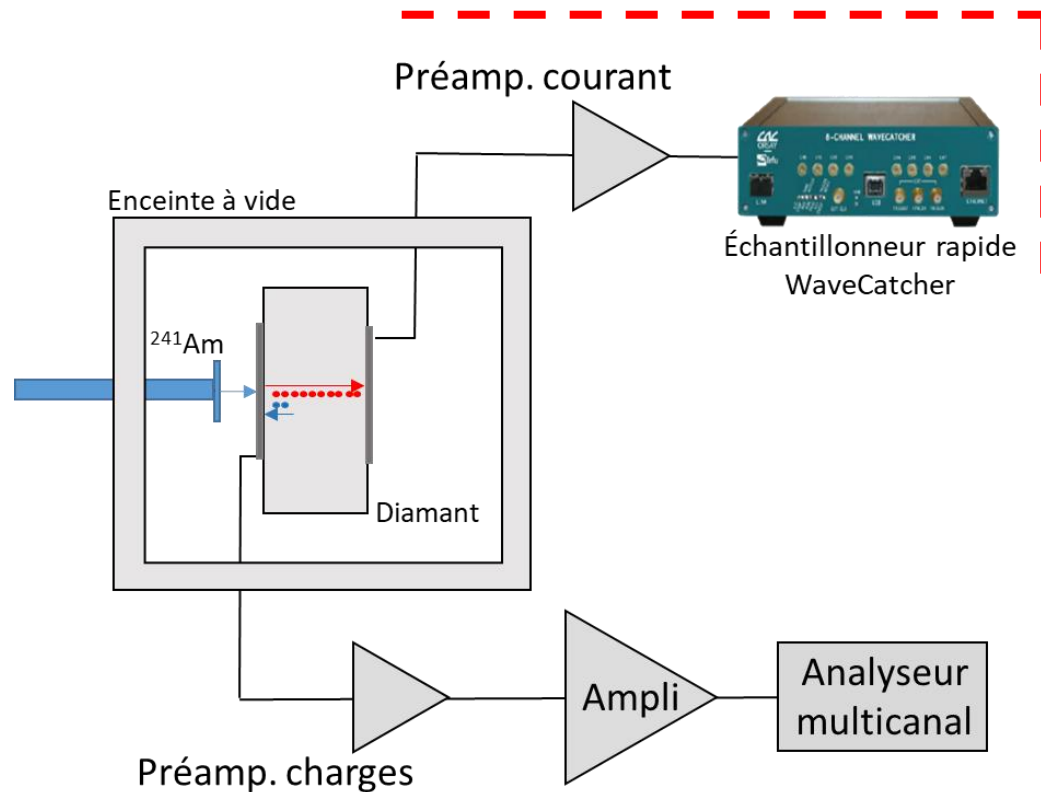
- Analyse de forme \rightarrow qualité de l'échantillon
- Propriétés porteurs de charges (vitesses de dérive, mobilités, temps de vie effectif...)

Caractérisation en laboratoire

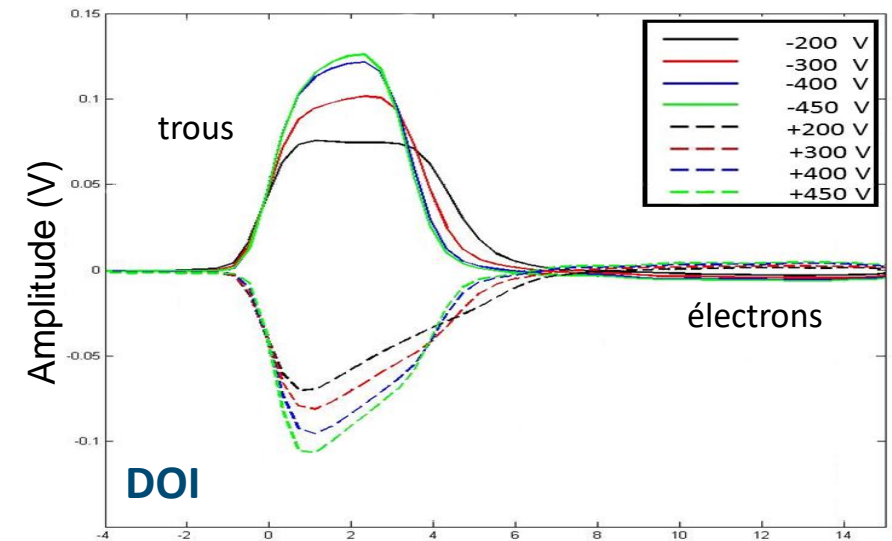
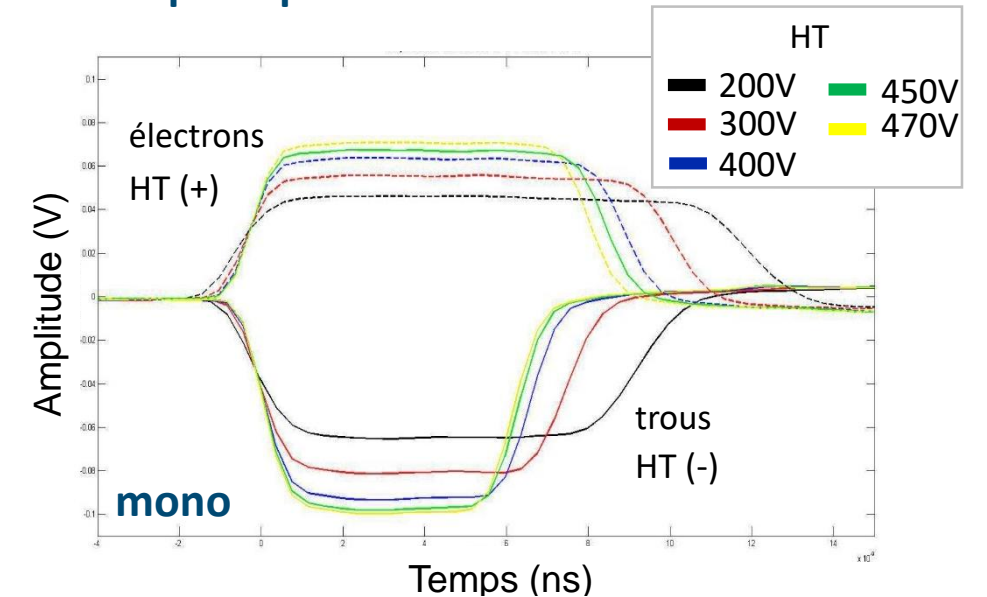
Source $\alpha = {}^{241}\text{Am}$ (~ 5.5 MeV, 6.38 kBq)

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

➔ Polarisation sélectionne le porteur de charges étudié



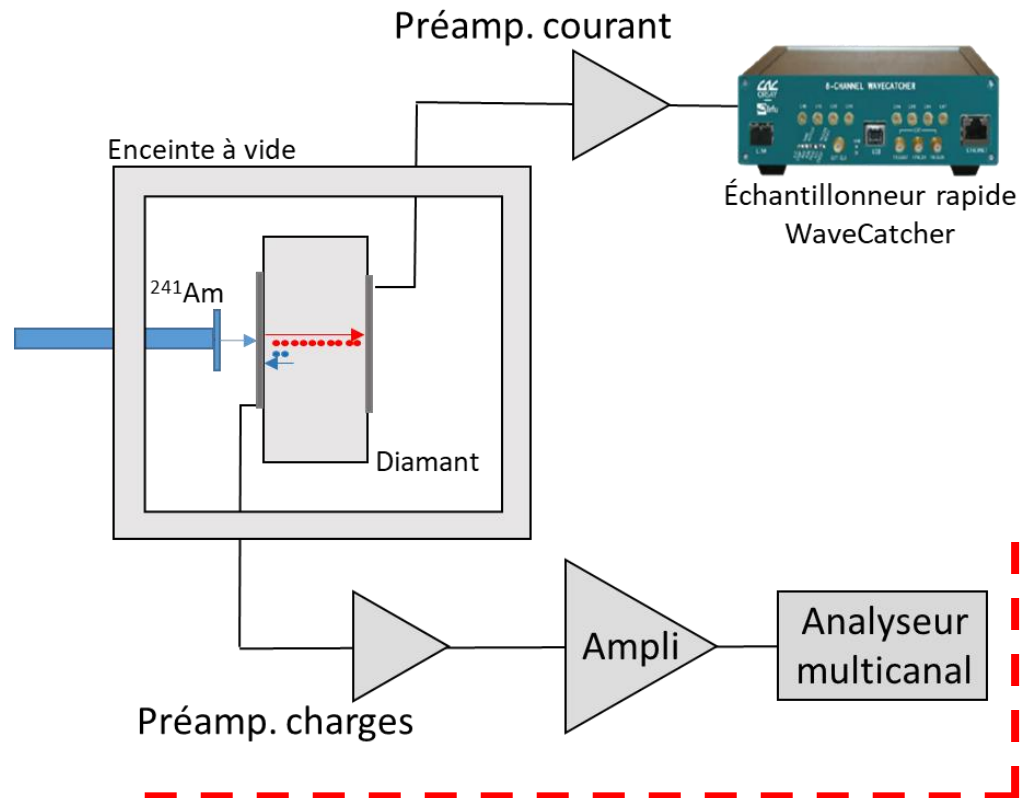
Electronique rapide



Caractérisation en laboratoire

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

➔ Polarisation sélectionne le porteur de charges étudié



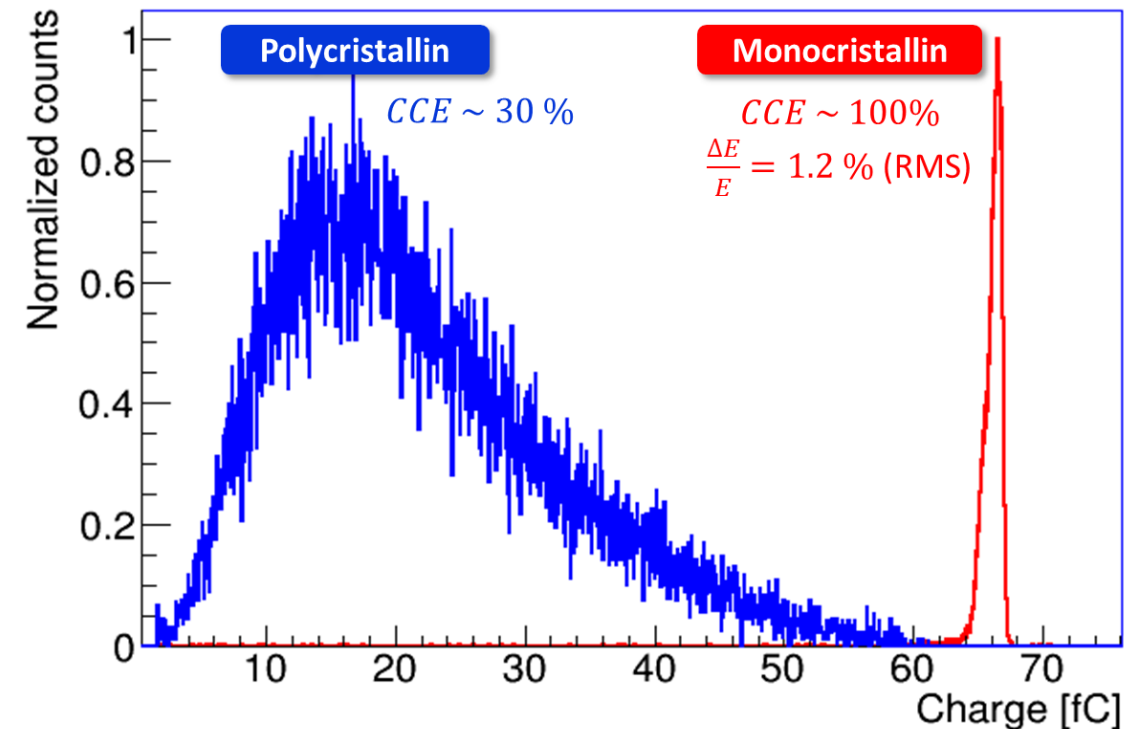
Electronique de spectroscopie

Intègre/filtre le signal

→ Augmente le rapport Signal/Bruit

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

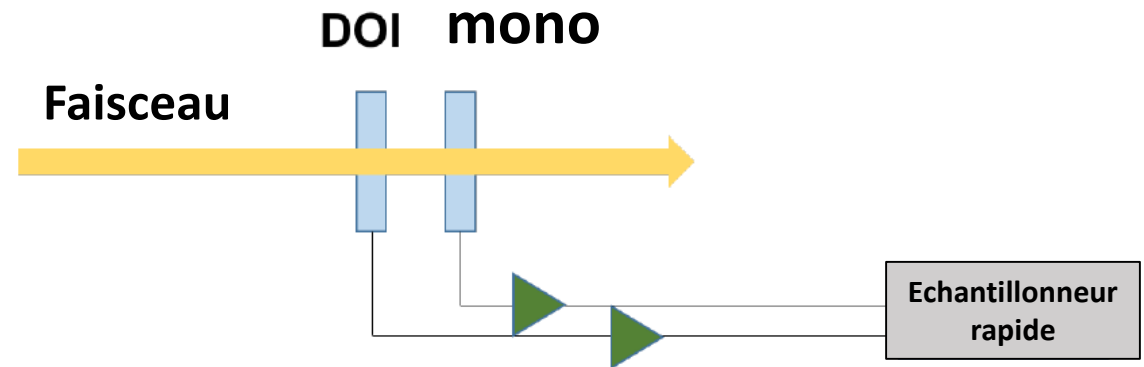
$$CCE = Q_{collectée} / Q_{générée}$$



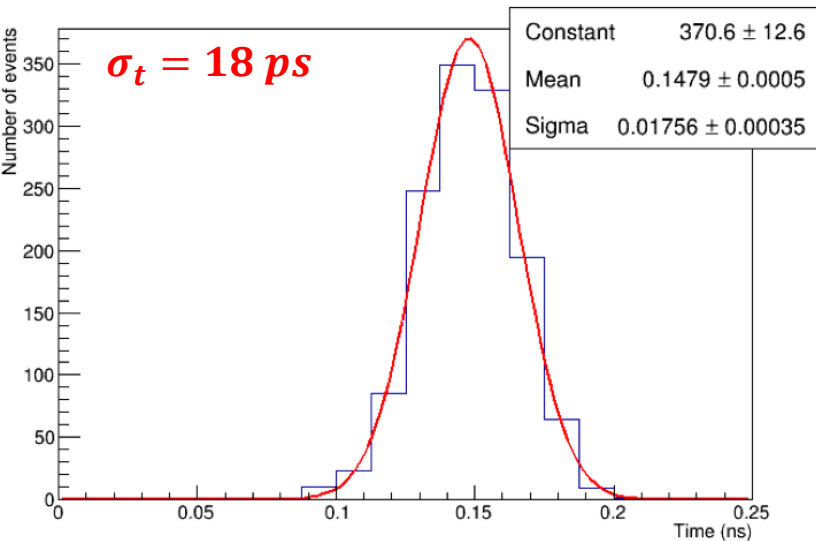
Résolution temporelle

Evaluation de la résolution temporelle

- Numérisation des signaux
- Discrimination à seuil normalisé
- Ajustement

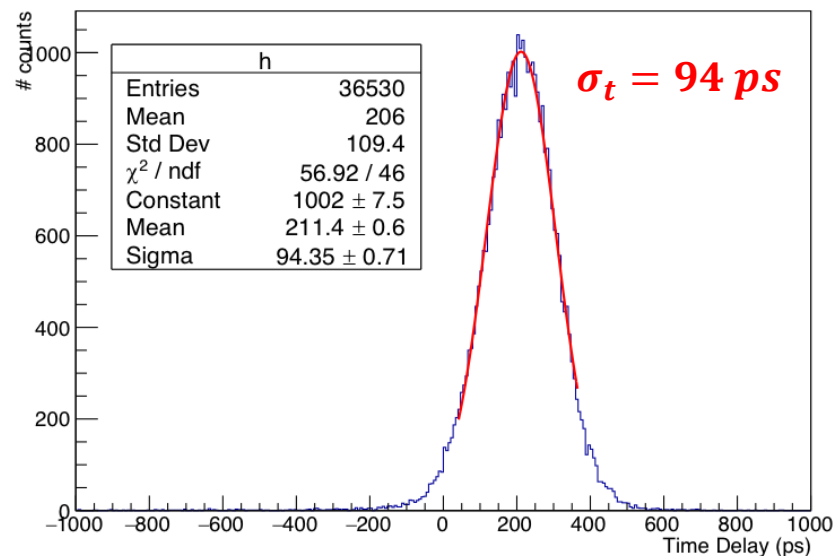


Ions ^{12}C 95 MeV/u @ GANIL



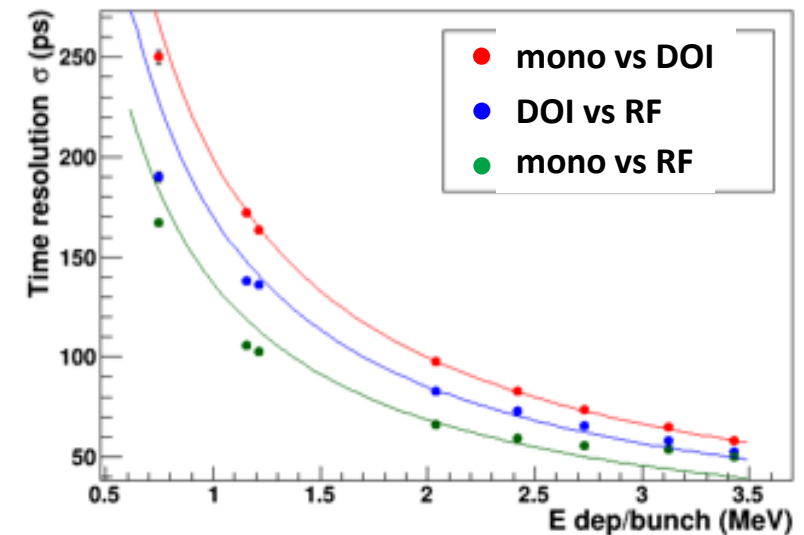
$\Delta E = 25 \text{ MeV}$ (300 μm diamant)

Protons 68 MeV @ ARRONAX



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

Photons 8.5 keV @ ESRF

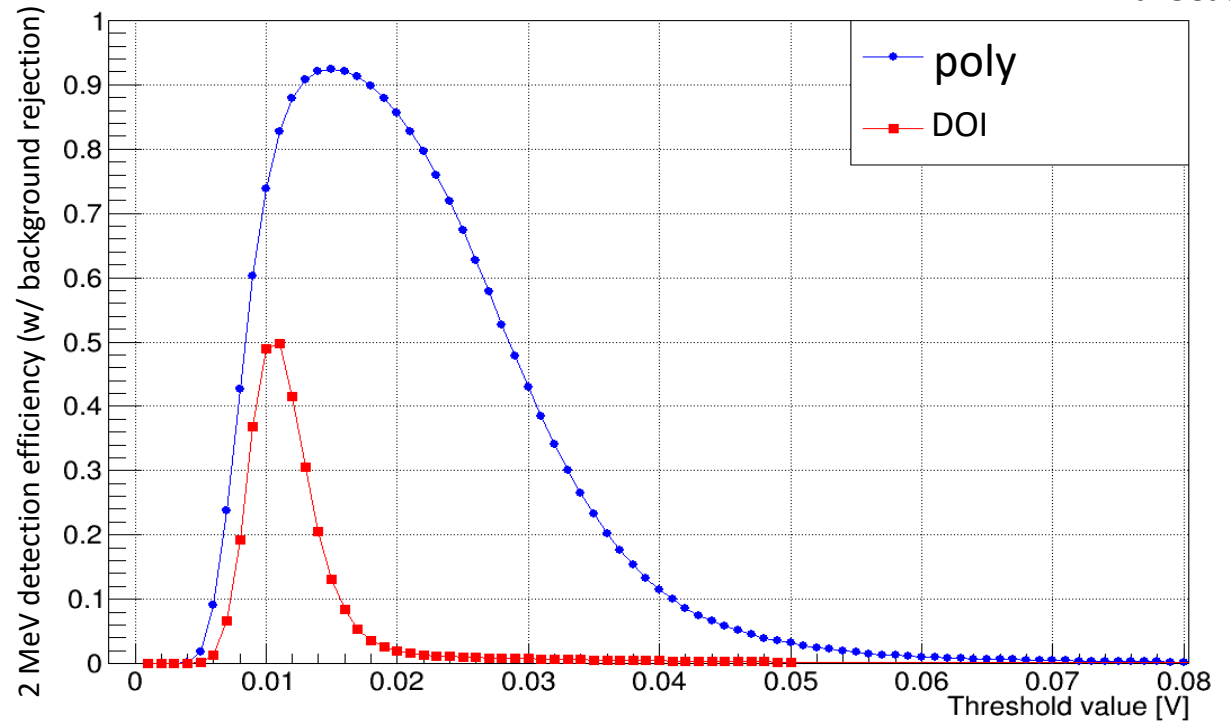
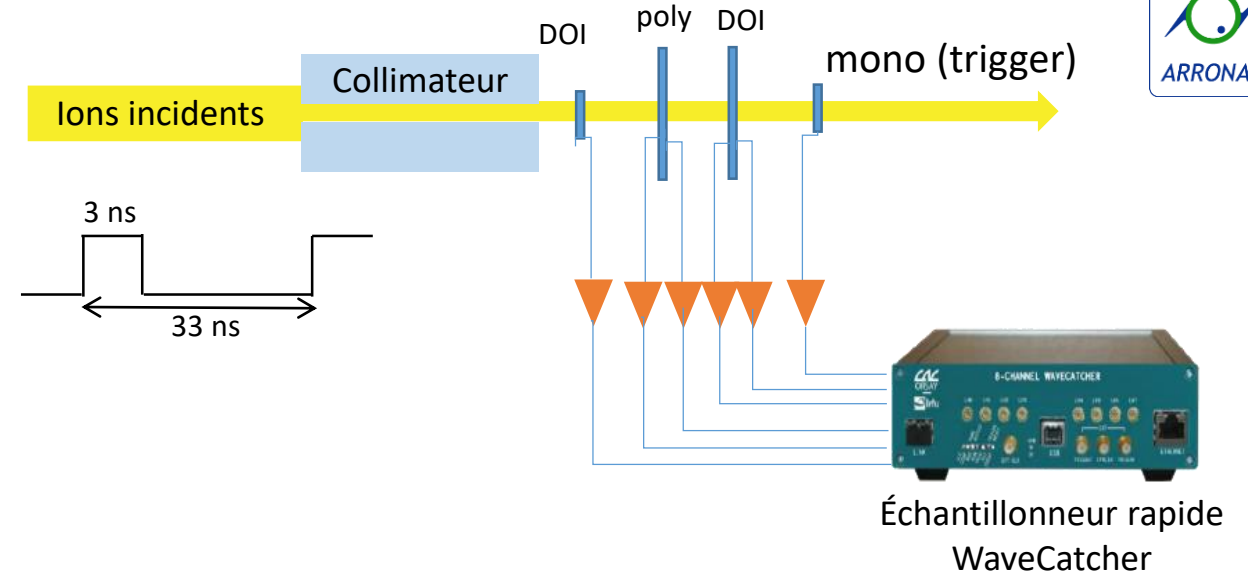


Efficacité de détection spécifique

Faisceau pulsé - protons 68 MeV
 $\Delta E = 2 \text{ MeV}$ (2 protons dans 300 μm diamant)

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

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



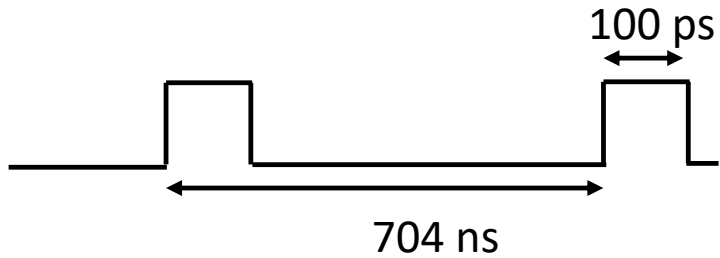
Caractérisation sous microfaisceau X



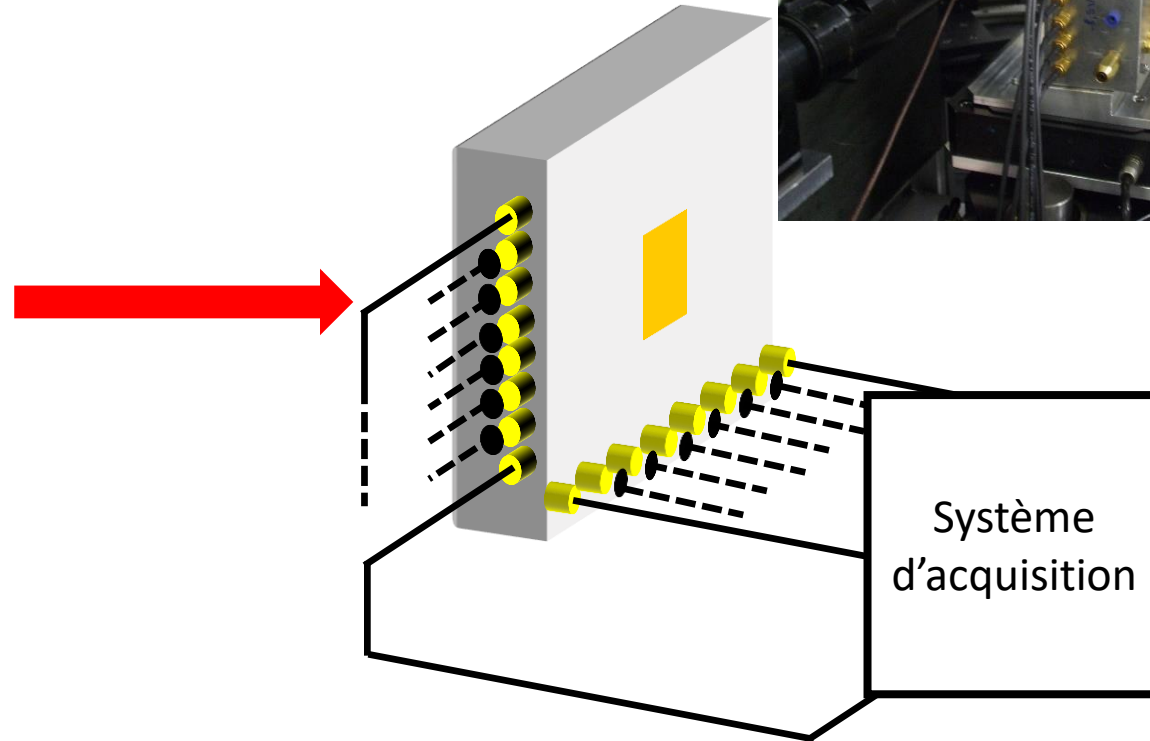
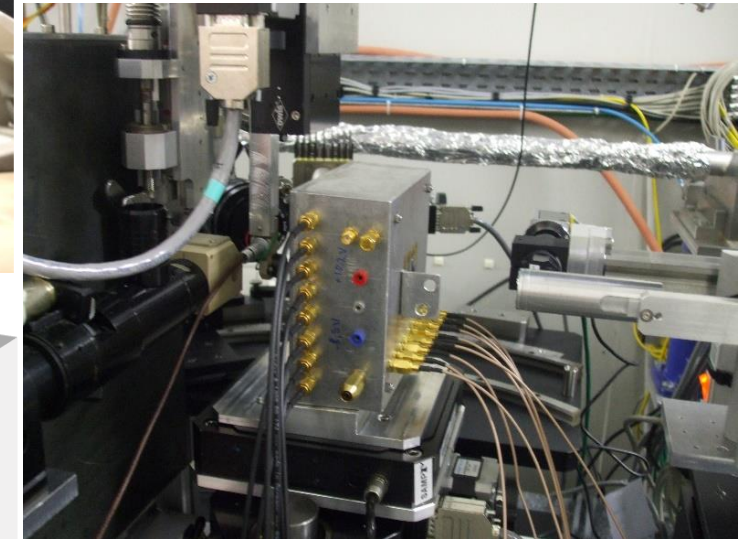
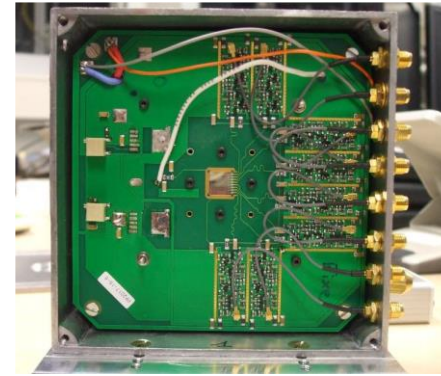
Microfaisceau pulsé Rayons X (8.5 keV)

~1500 photons / pulse

\varnothing spot : 1 μm

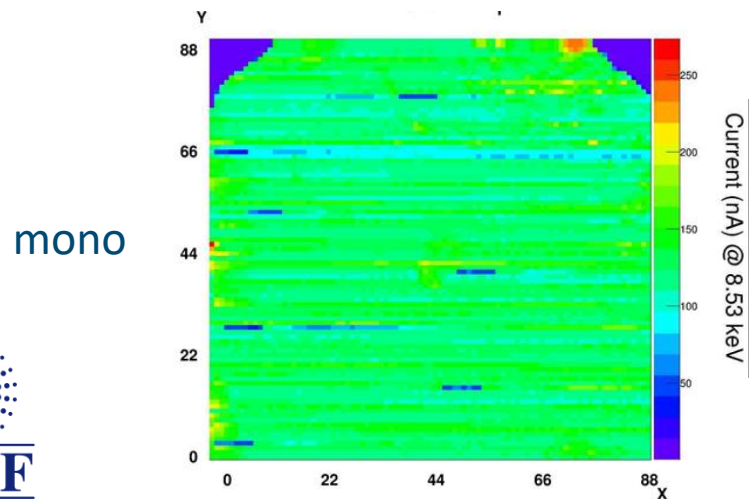
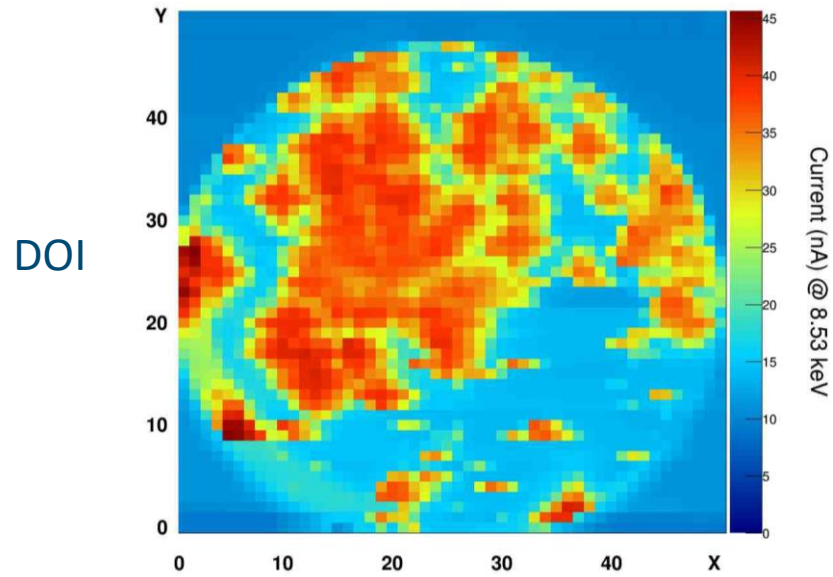


- Mode courant : Balayage de la surface
- Mode impulsion : Performance détecteurs à pistes

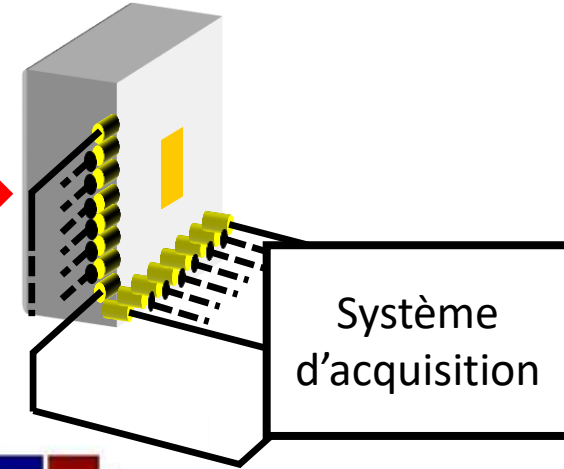


Réponse en courant

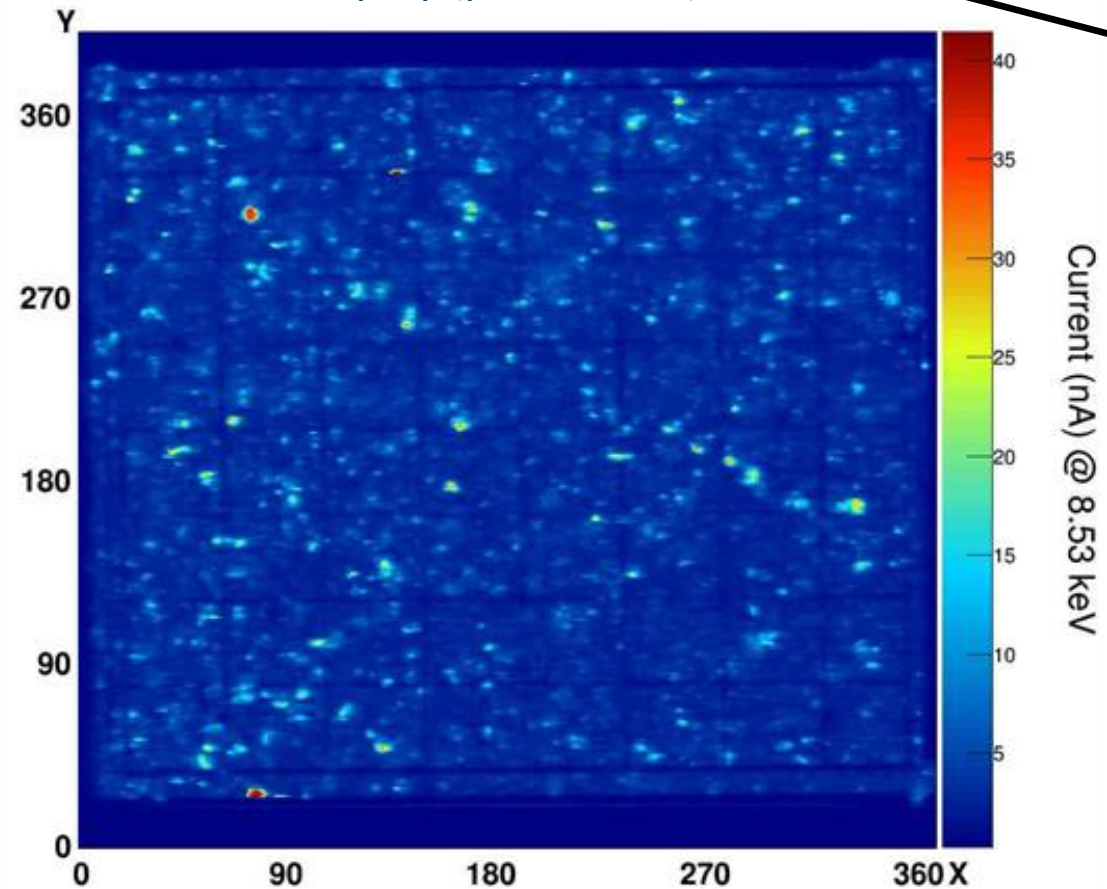
Cartographie du courant induit par le microfaisceau



Rayons X 8.5 keV

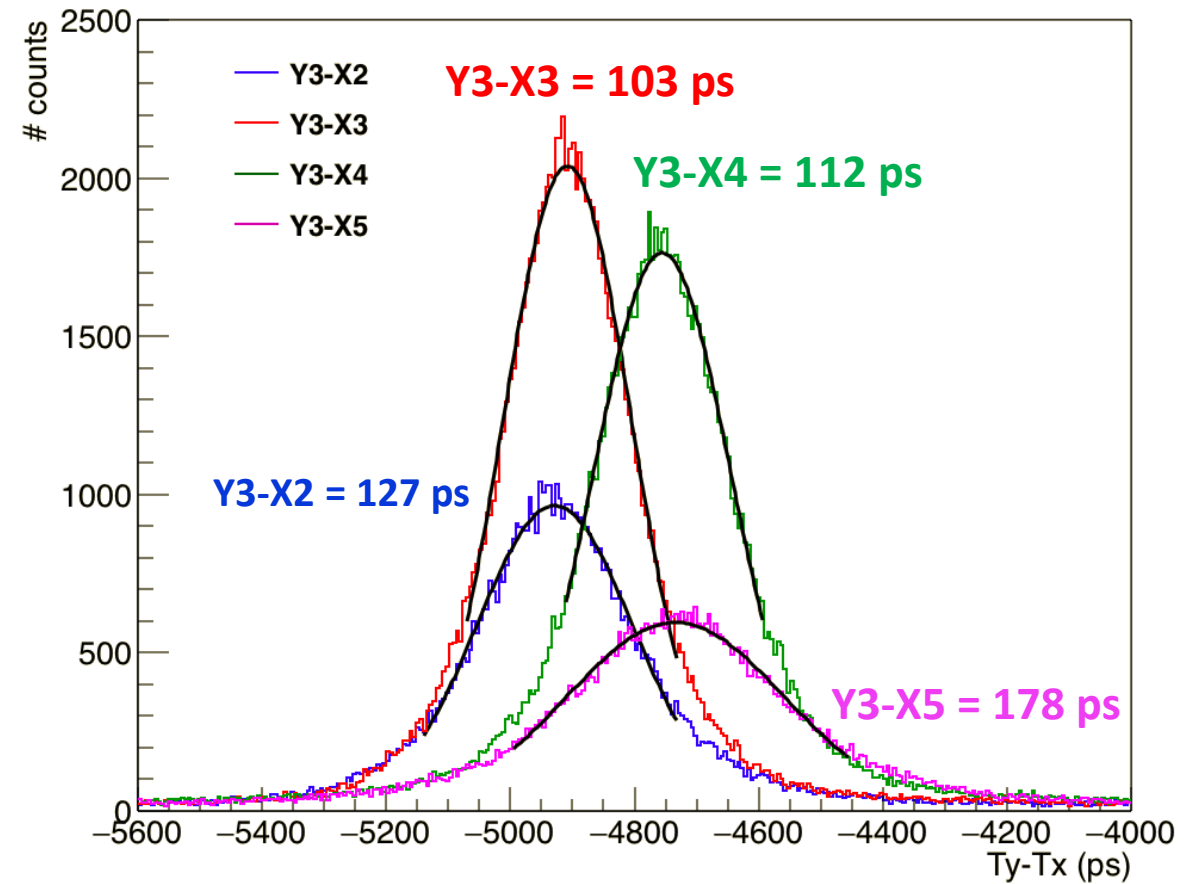
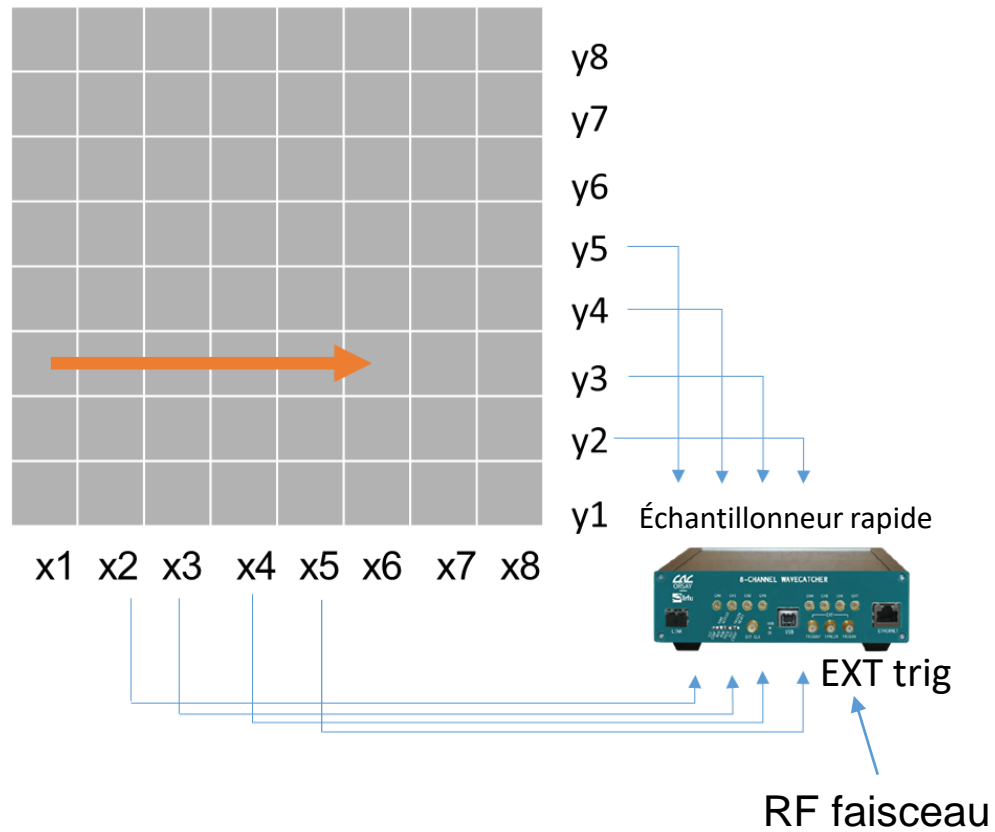


poly (pistes 1cm²)

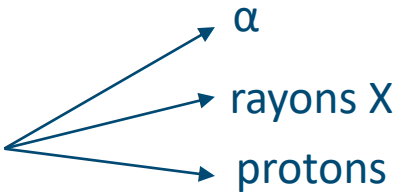


Résolution temporelle des détecteurs à pistes

Résolution temporelle (rms)



Conclusions

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

Perspectives

- Efficacité proton unique en cours d'analyse
- Montage démonstrateur avec 4 diamants
- Tests et caractérisation électronique dédiée (cf présentation F.E. Rarbi) 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

Ce travail a bénéficié du support des institutions suivantes:

