

Hadronthérapie

Monitoring faisceau

Détection particules secondaires

Radiothérapies par fractionnement spatial ou temporel de la dose

Micro Beam Radiation Therapy  
(Imagerie portale)

Radiothérapies FLASH/VHEE  
(Monitoring, dosimétrie)

Radiothérapies ciblées

Modélisation

Expériences

Arnaud Yannick  
Dauvergne Denis  
Delorme Rachel  
Gallin-Martel Marie-Laure  
([mlgallin@lpsc.in2p3.fr](mailto:mlgallin@lpsc.in2p3.fr))  
Marcatili Sara

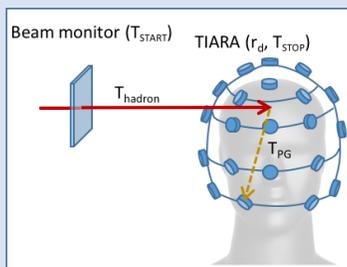
Post Doctorants  
Ansari- Chauveau Saba  
Pedrosa Rivera Maria

Doctorants  
Everaere Pierre  
Jacquet Maxime  
Levrage Victor  
Molle Robin

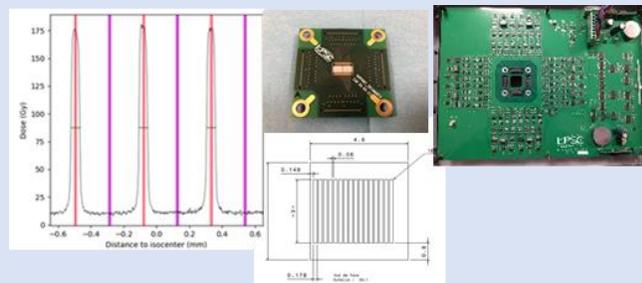


Hodoscope faisceau diamant CLARYS-UFT

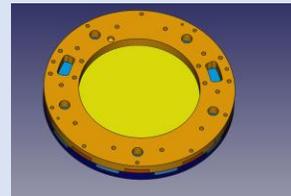
Imagerie Gamma Prompt par mesure exclusive de temps de vol



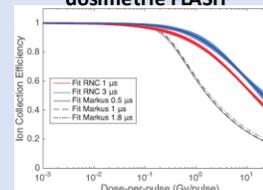
Monitoring MRT ESRF 32 QDC + PCB diamant



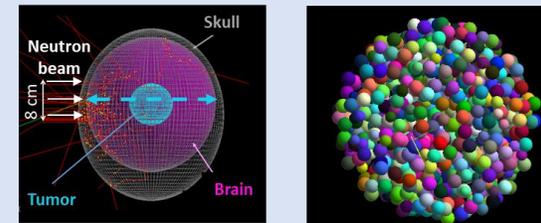
Monitoring Radiothérapie FLASH



Correction recombinaison en dosimétrie FLASH



Simulation de conditions BNCT/RIV macro



Ex: irradiation cérébrale BNCT ; Ex: irradiation tumorale RIV-α



Conception d'un système de détection gamma associé à un moniteur diamant de faisceaux pulsés pour l'hadronthérapie

Pierre Everaere

Encadrants :

Marie-Laure Gallin-Martel (LPSC)

Jean Michel Létang (CREATIS)

Etienne Testa (IP2I)

Denis Dauvergne (LPSC)

# Plan

- Introduction
- Conception d'un moniteur faisceau diamant
- Système de détection gamma
- Conclusion et perspectives

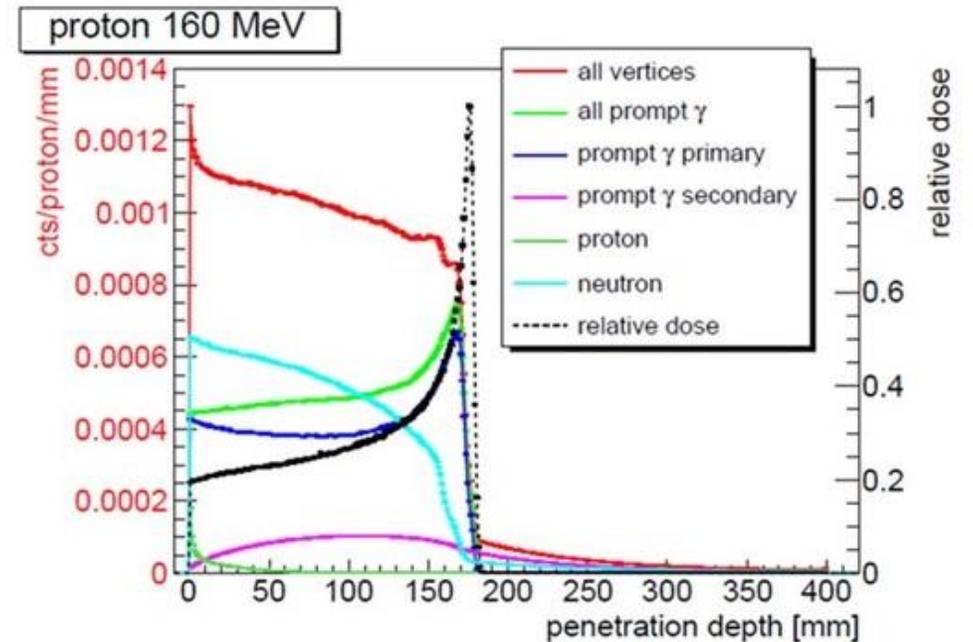
# Plan

- **Introduction**
- Conception d'un moniteur faisceau diamant
- Système de détection gamma
- Conclusion et perspectives

# Introduction: Gamma prompt

- Emission gamma prompt par désexcitation suite à une collision nucléaire proton-neutron / cible
- Caractéristique
  - Quasi - isotrope
  - Temps émission très court ( $\sim 1$  ps)
  - Energie comprise entre 1 et 10 MeV

=> Corrélation spatiale entre le profil d'émission et le parcours des protons

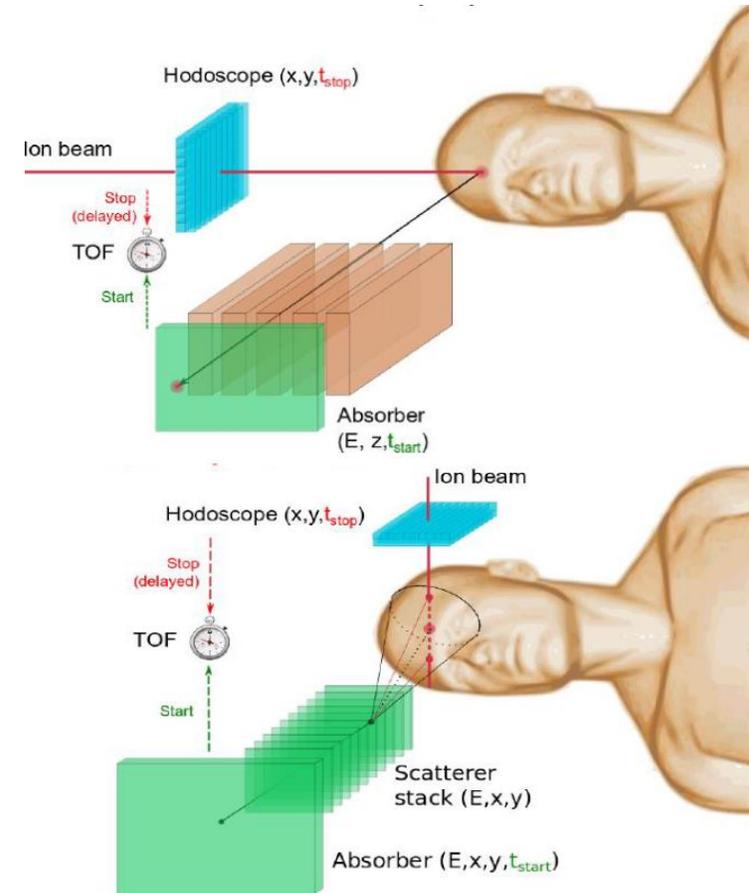


[Krimmer 2017](#)

# Introduction: Systèmes de détection

Collaboration CLaRyS

- Imagerie Gamma Prompt
  - Gamma Camera Collimatée (1D)
  - Caméra Compton (2D ou 3D)
- + Mesure de temps de vol pour réduire le bruit de fond



# Introduction: Systèmes de détection

Collaboration CLaRyS

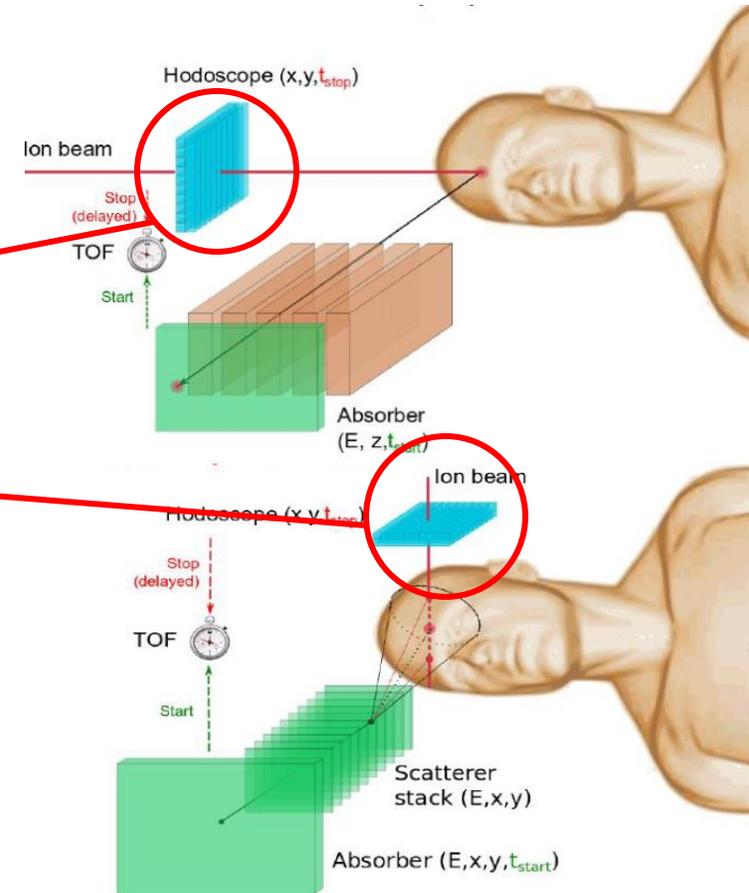
- Imagerie Gamma Prompt
  - Gamma Camera Collimatée (1D)
  - Caméra Compton (2D ou 3D)
- + Mesure de temps de vol pour réduire le bruit de fond

Elaboration d'un hodoscope  
fibre scintillante:  $\sigma_t \sim 1 \text{ ns}$

=> CLaRyS-UFT (hodoscope diamant)

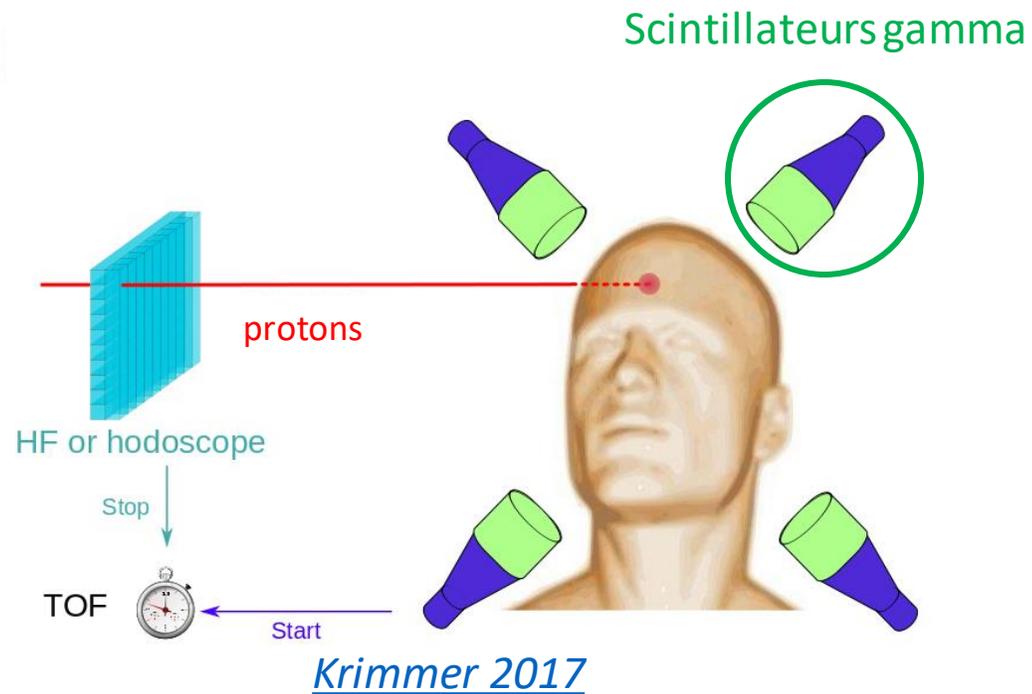
Conception d'un nouvel hodoscope:

- Excellente résolution temporelle ( $\sigma_t \sim 100 \text{ ps}$ )
  - Améliorer reconstruction Compton [Livingstone 2021](#)
  - Localiser point d'émission sans collimation (TIARA)



# Introduction: Prompt Gamma Peak Integral

Schéma de principe

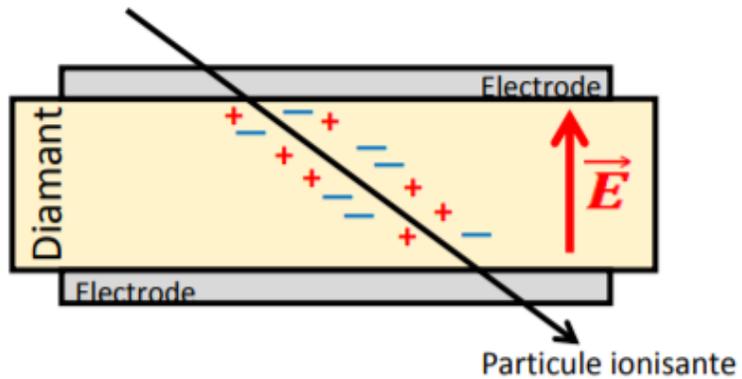


- Vérification de la longueur du parcours et positionnement du faisceau dans le patient
- Méthode statistique
- Système léger et adaptatif
- Gamme étendue d'intensité
  - Particule unique
  - Faisceau pulsé (exemple: type S2C2)
  - Intensité FLASH

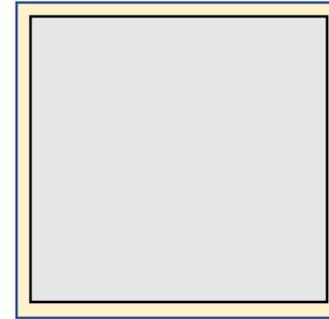
# Plan

- Introduction
- **Conception d'un moniteur faisceau diamant**
- Système de détection gamma
- Conclusion et perspectives

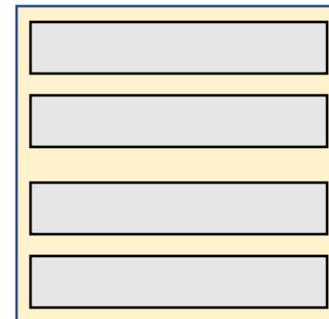
# Utilisation du diamant comme chambre d'ionisation solide



- Création de paires électrons-trous
- Dérive des porteurs de charges
- Collecte aux électrodes

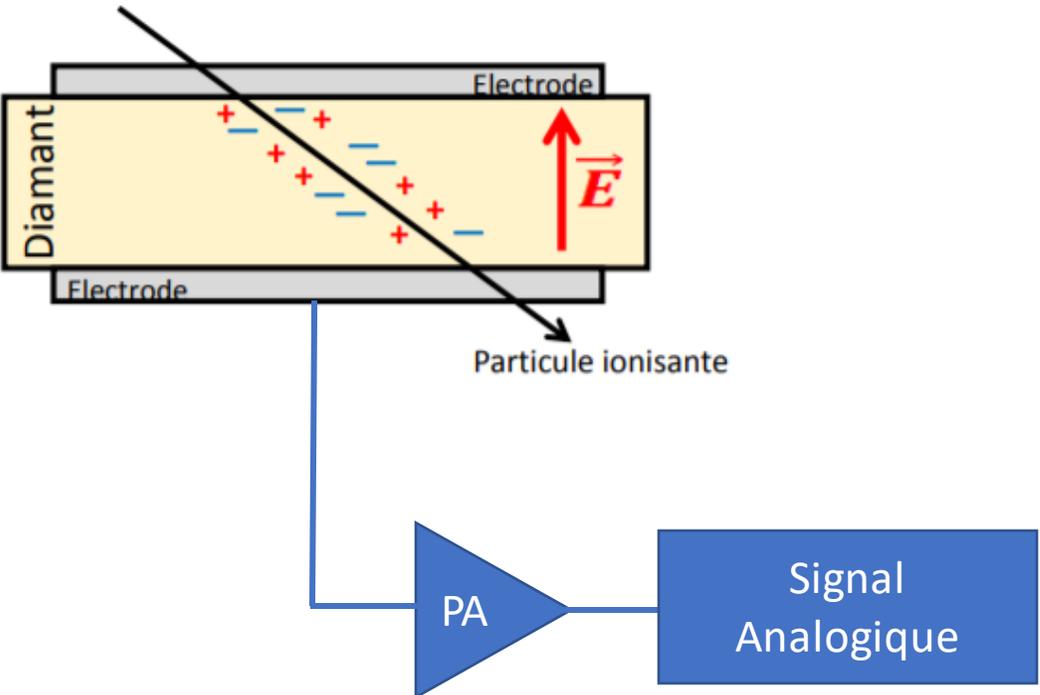


- Métallisation pleine face

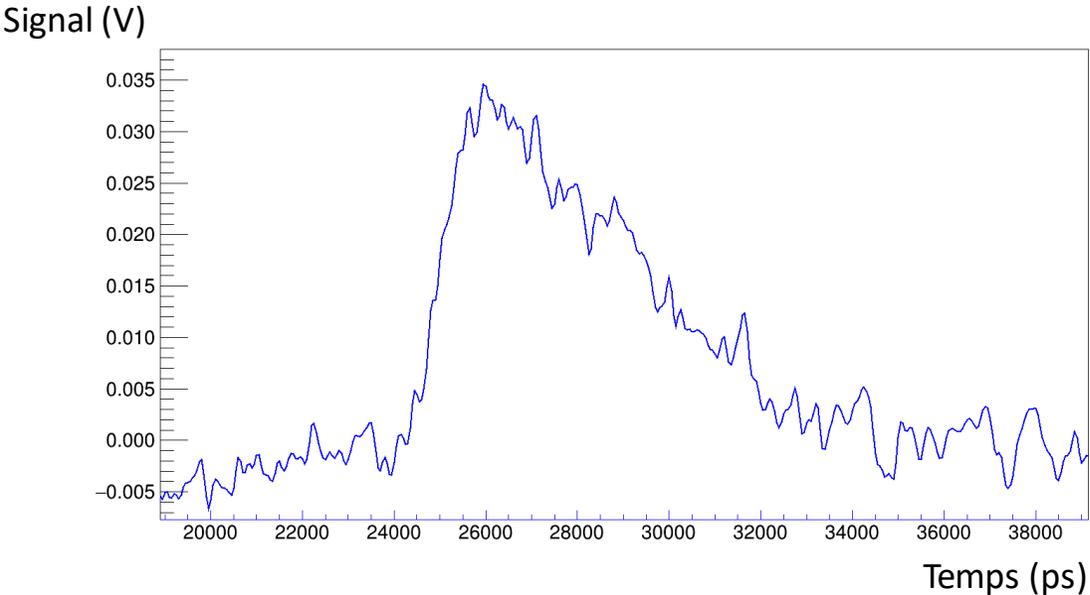


- Métallisation par pistes X/Y  
⇒ permet une localisation spatiale des particules

# Utilisation du diamant comme chambre d'ionisation solide

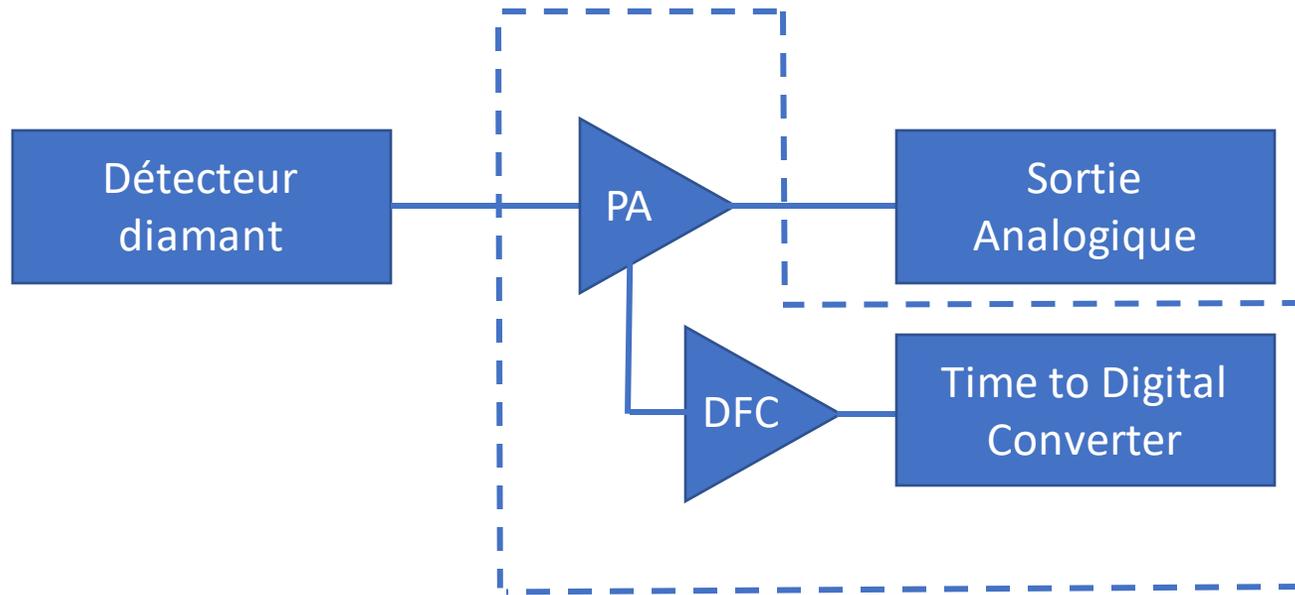


PA : préamplificateurs courant-tension



Exemple d'un signal d'un proton de 70 MeV traversant un diamant de 500  $\mu\text{m}$  polarisé à 1V/ $\mu\text{m}$

# Développement électronique LPSC

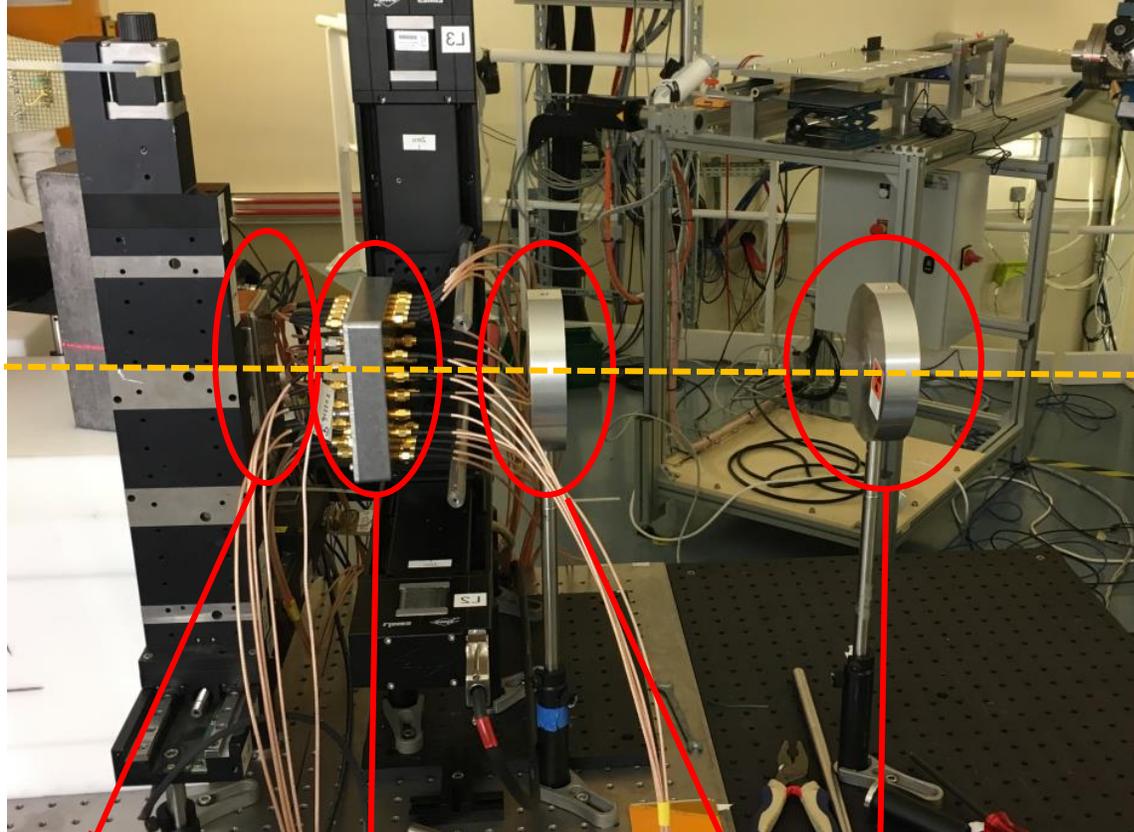


Test des différents composants en laboratoire puis sous faisceau  
PA : préamplificateurs courant-tension  
DFC : Discriminateur à Fraction Constante



Prototype hodoscope CLaRyS

# Caractérisation sous faisceaux (protons de 70 MeV)



Montage 2  
diamants

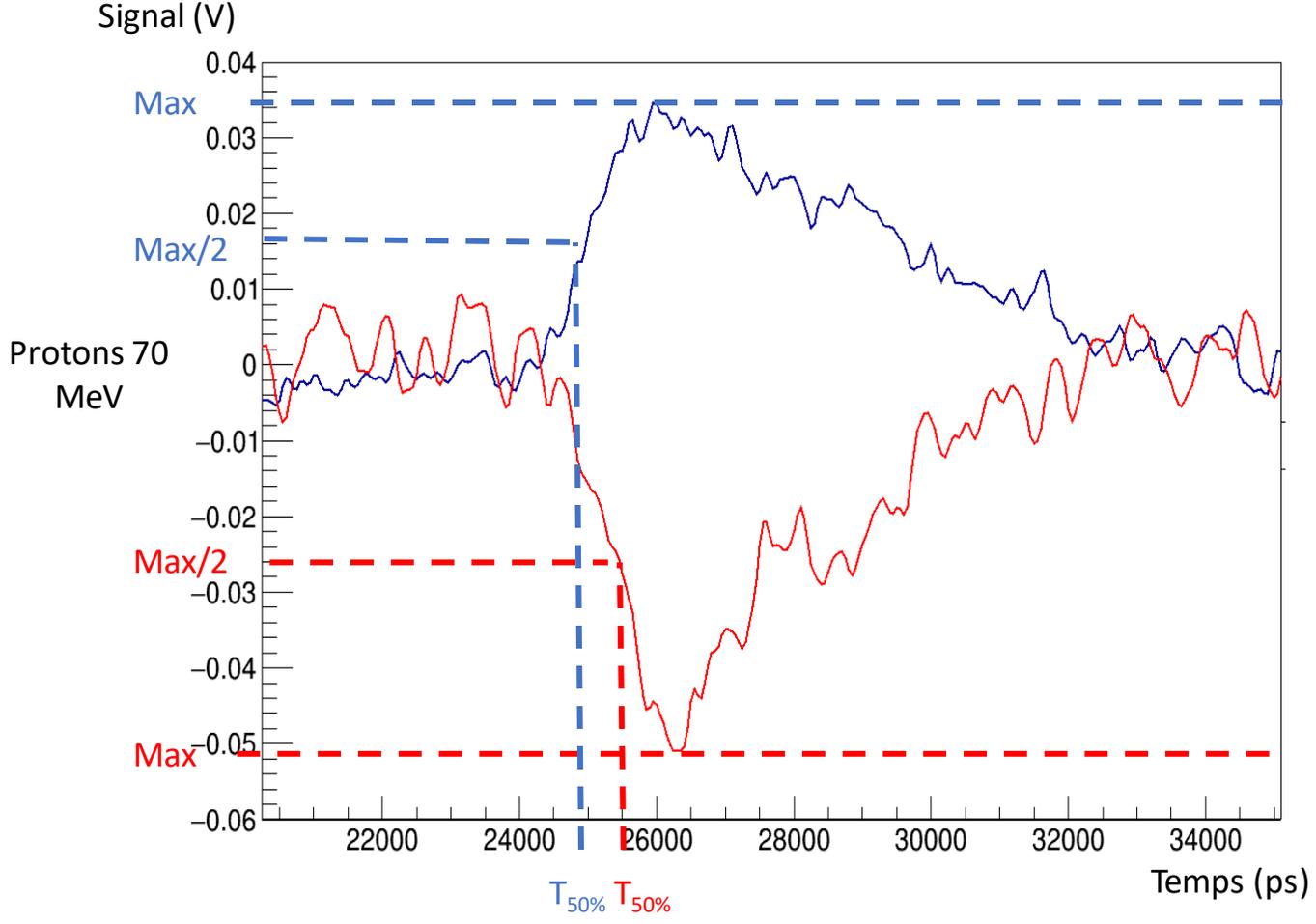
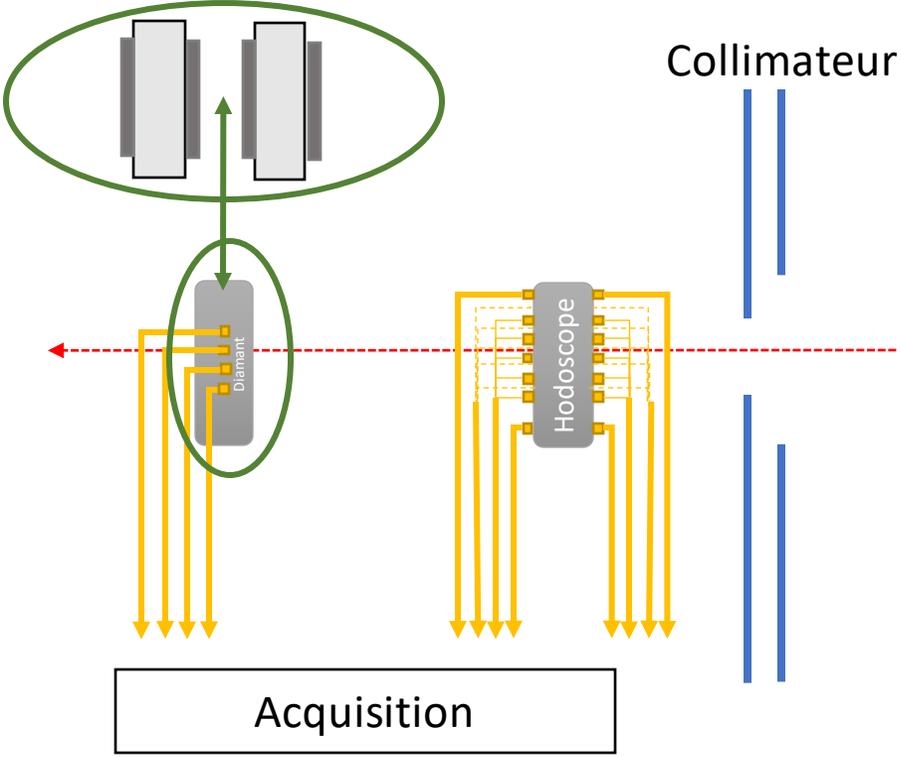
Hodoscope

Collimateur

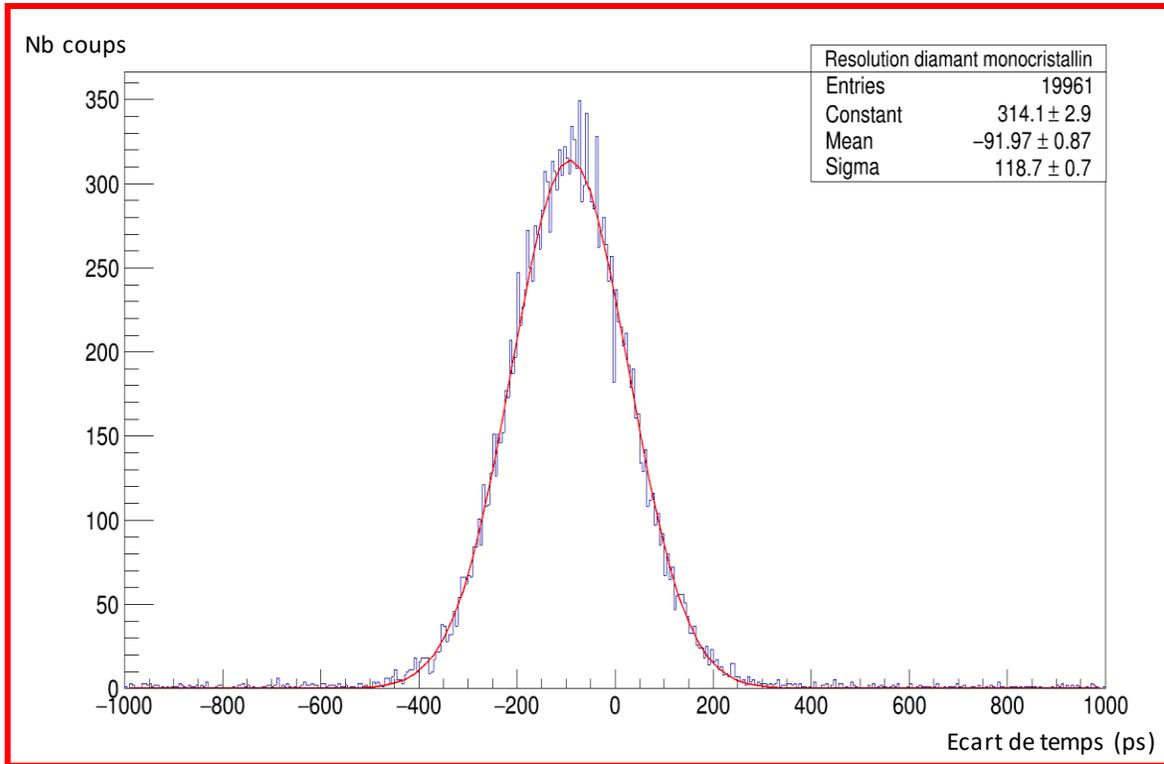
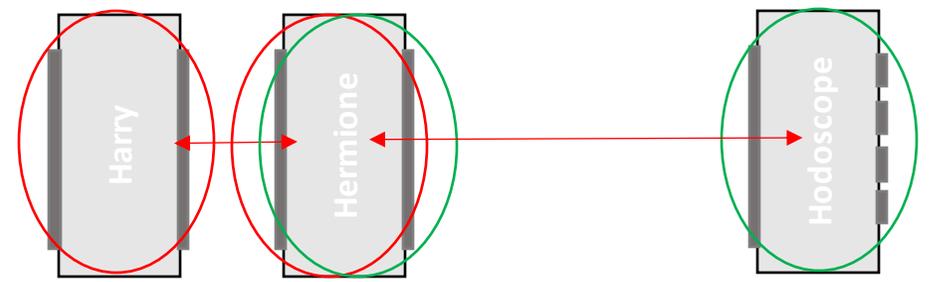
Objectif:

- Calcul résolution temporelle
- Tests des différents modules

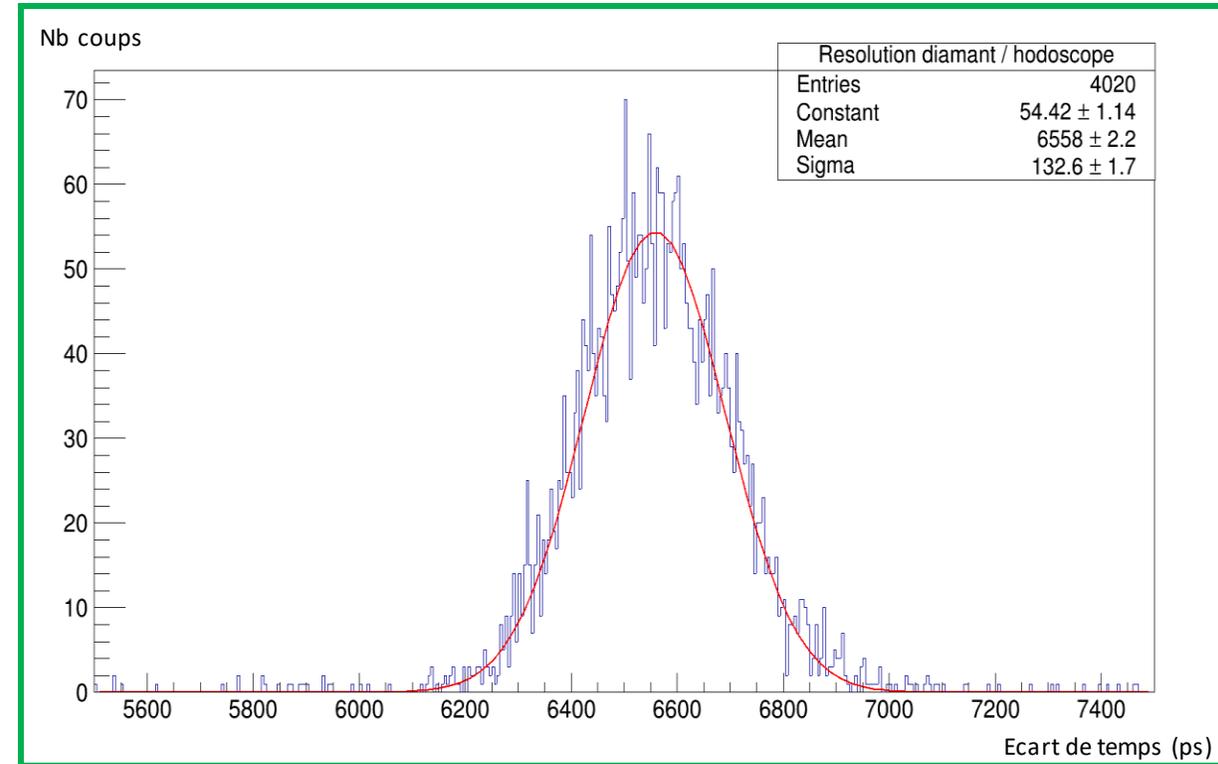
# Caractérisation sous faisceaux (protons de 70 MeV)



# Caractérisation sous faisceaux (protons de 70 MeV)



Résolution temporelle entre les deux diamants monocristallins métallisés pleine face de **119 ps rms**



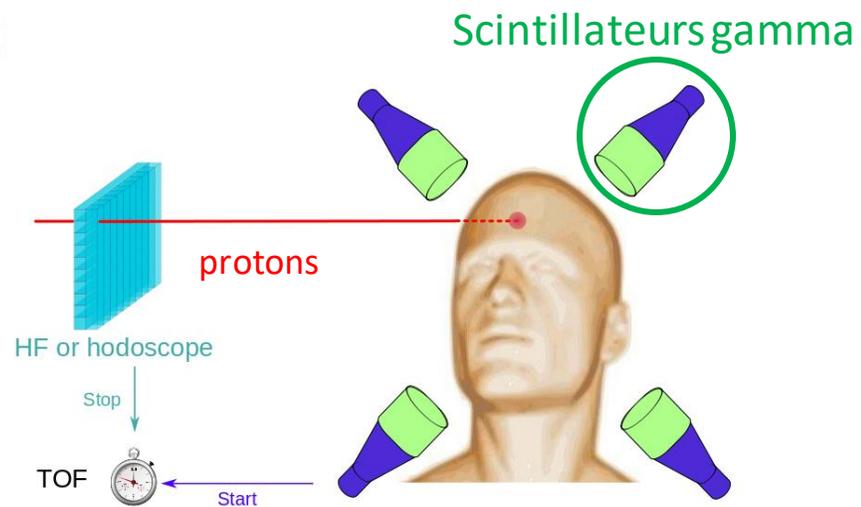
Résolution temporelle entre un diamant métallisé pleine face et une piste sur un diamant de la matrice **133 ps rms**

# Plan

- Introduction
- Conception d'un moniteur faisceau diamant
- **Système de détection gamma**
- Conclusion et perspectives

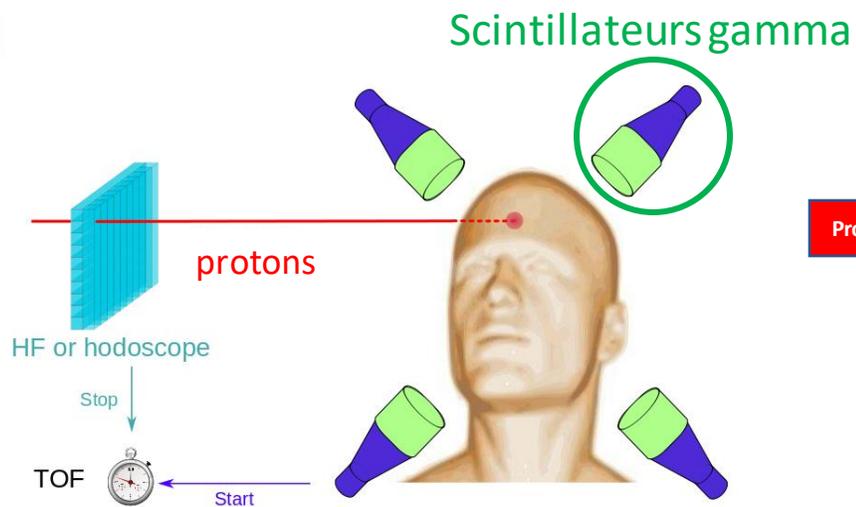
# Prompt Gamma Peak Integral (méthode PGPI)

Schéma de principe

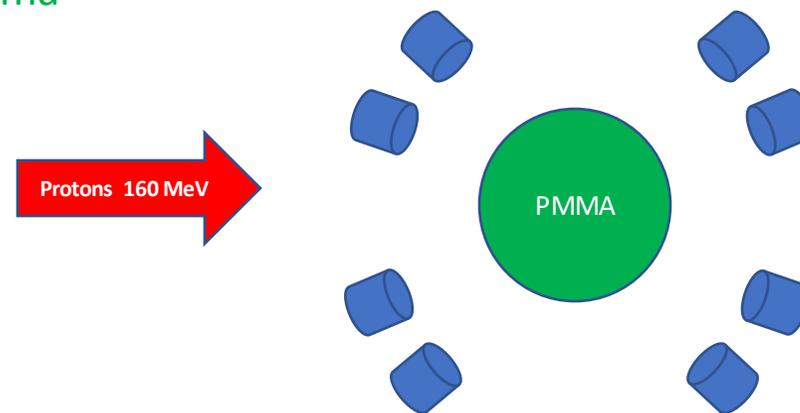


# Prompt Gamma Peak Integral (méthode PGPI)

Schéma de principe



Géométrie simulée sous **GATE 9.0**



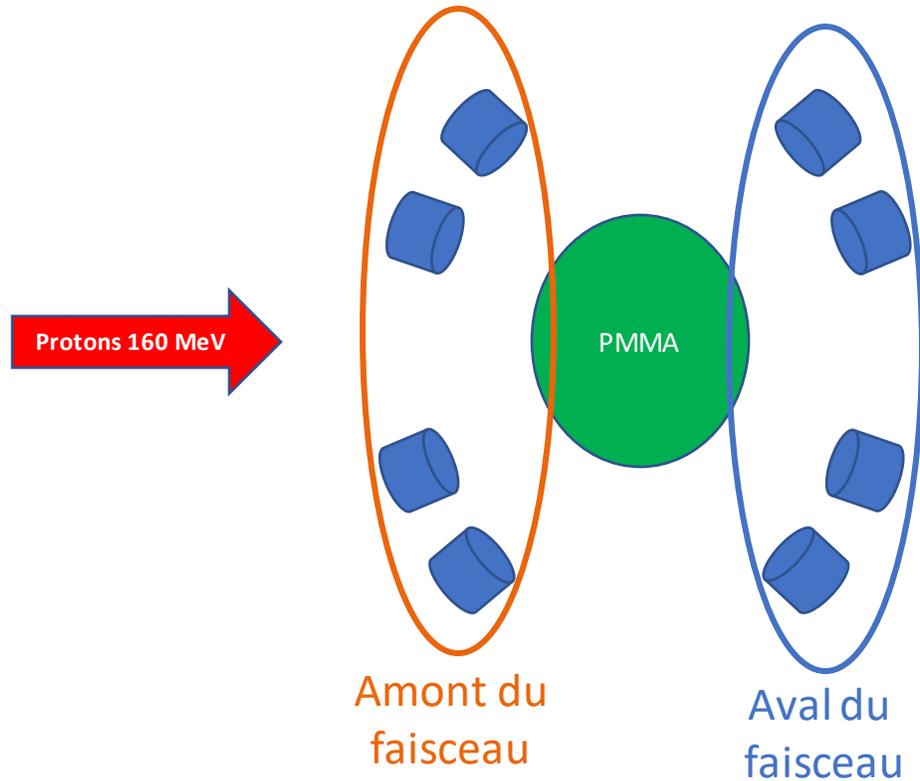
Paramètres des simulations :

- Faisceau de protons de 160 MeV
- Cible de PMMA de rayon 10 cm
- Déplacement de la cible selon l'axe du faisceau
- 8 scintillateurs LaBr3:Ce de 5 cm (diamètre et épaisseur)

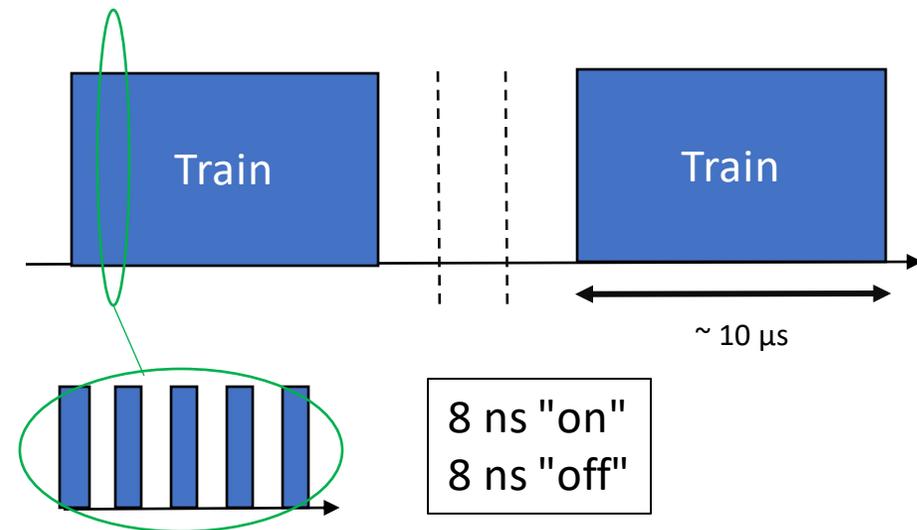
Evaluation du taux de comptage (événement par événement) de gamma prompts et de l'énergie déposée (comptage intégré) selon la position de la cible

# Prompt Gamma Peak Integral (méthode PGPI)

Géométrie simulée



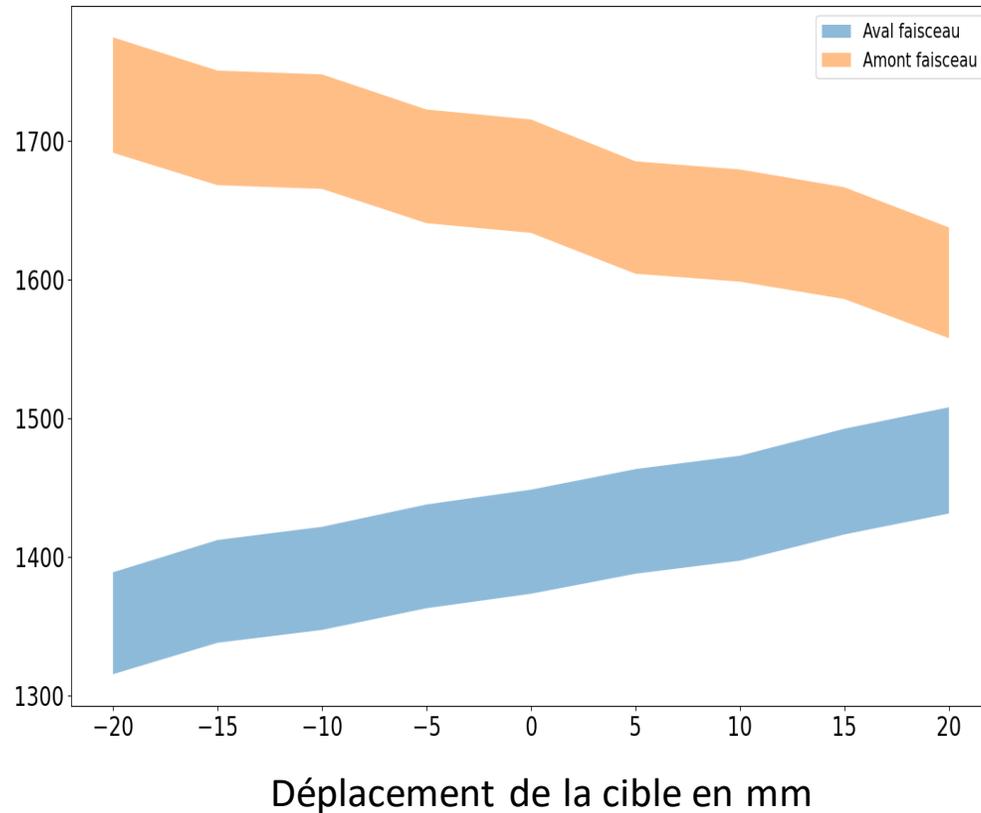
Implémentation de la structure en temps du faisceau en fonction du nombre de protons par paquets / intensité du faisceau



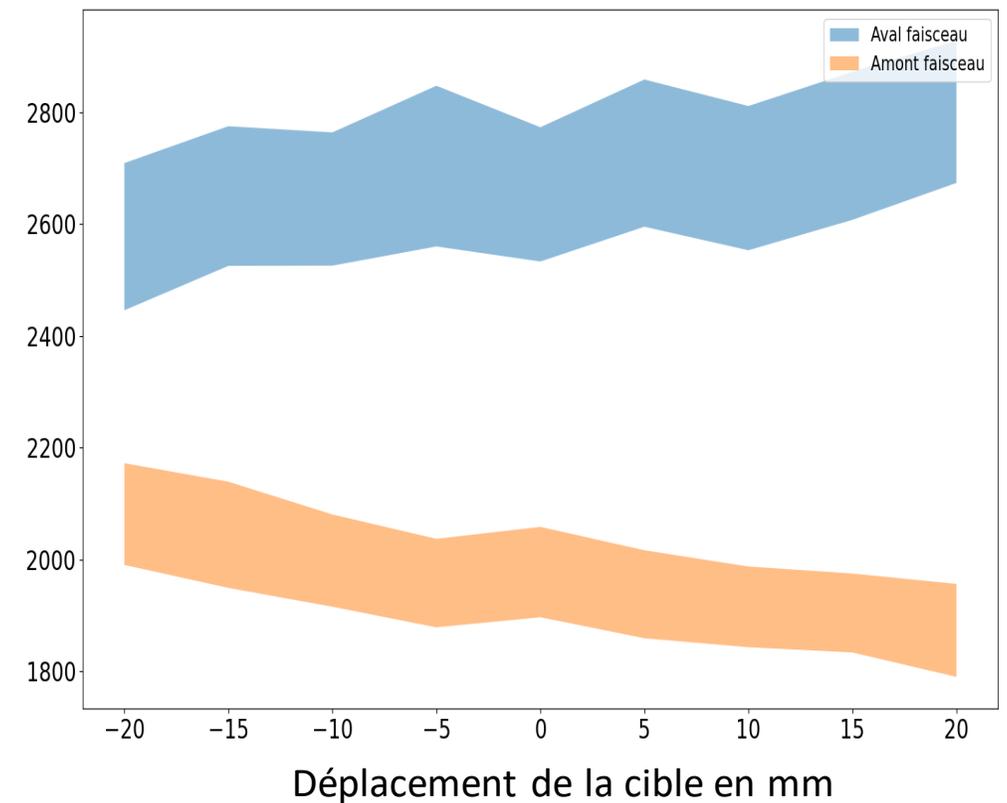
# Etude des observables sur un train

Totalité du train =  $1.5 \times 10^7$  protons  
= 1 spot clinique

Moyenne du nombre de  
particules

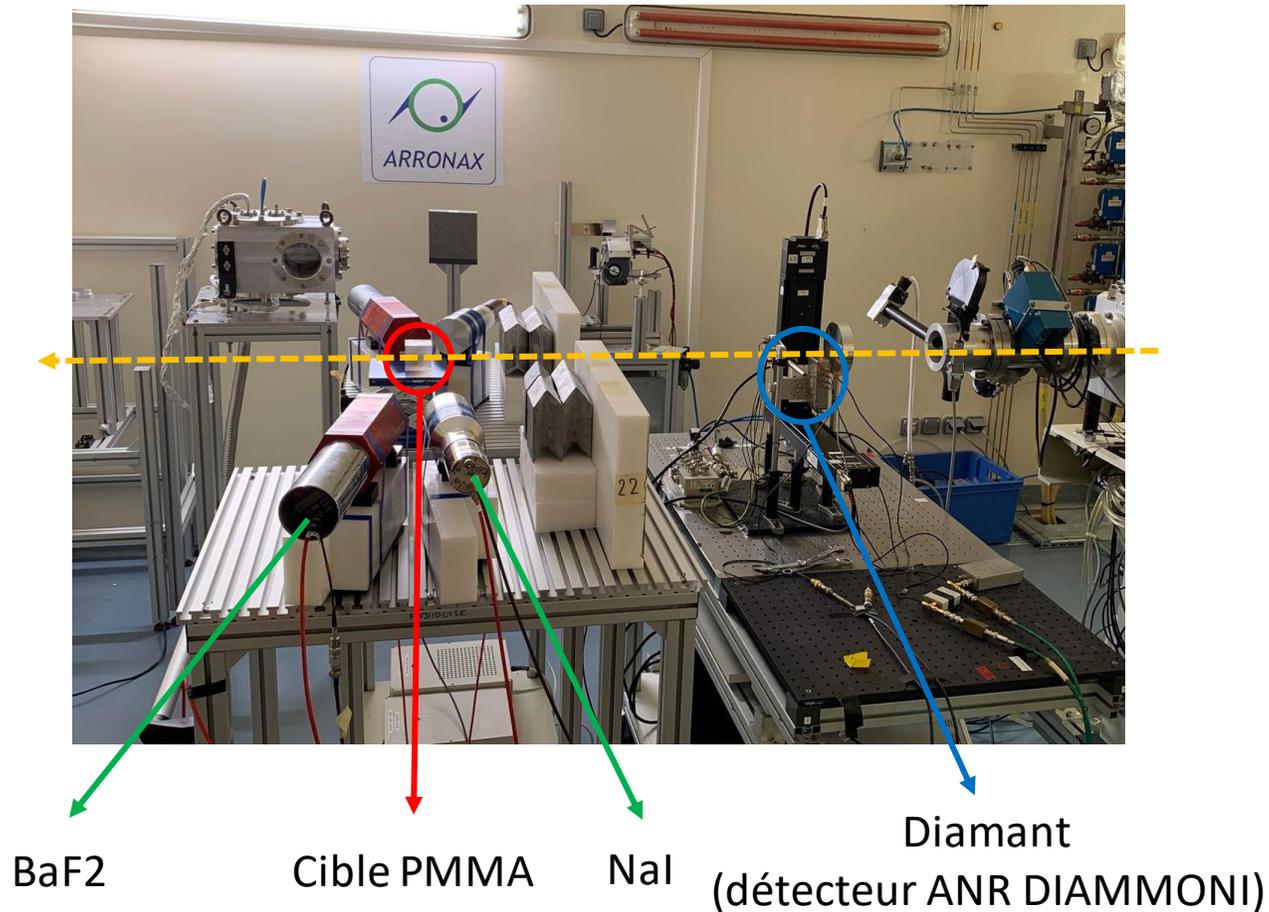


Moyenne de l'intégrale de  
l'énergie en MeV



Besoin d'augmenter la statistique : taille des détecteurs / distance cible

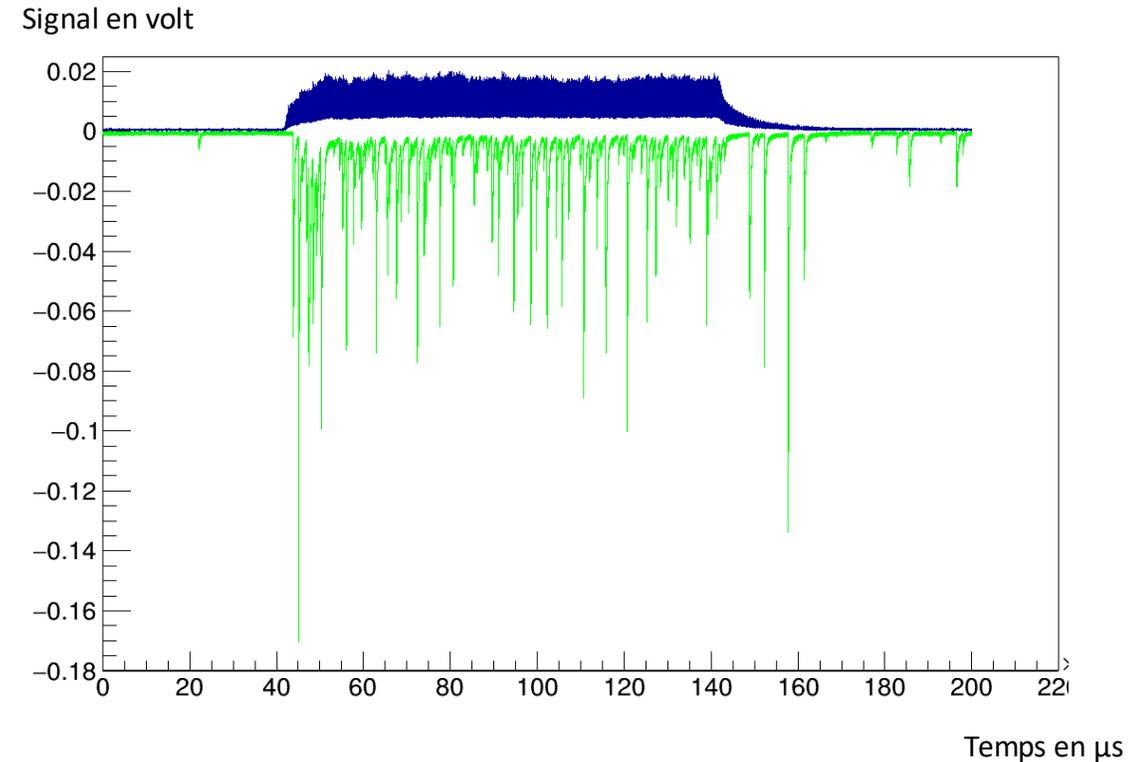
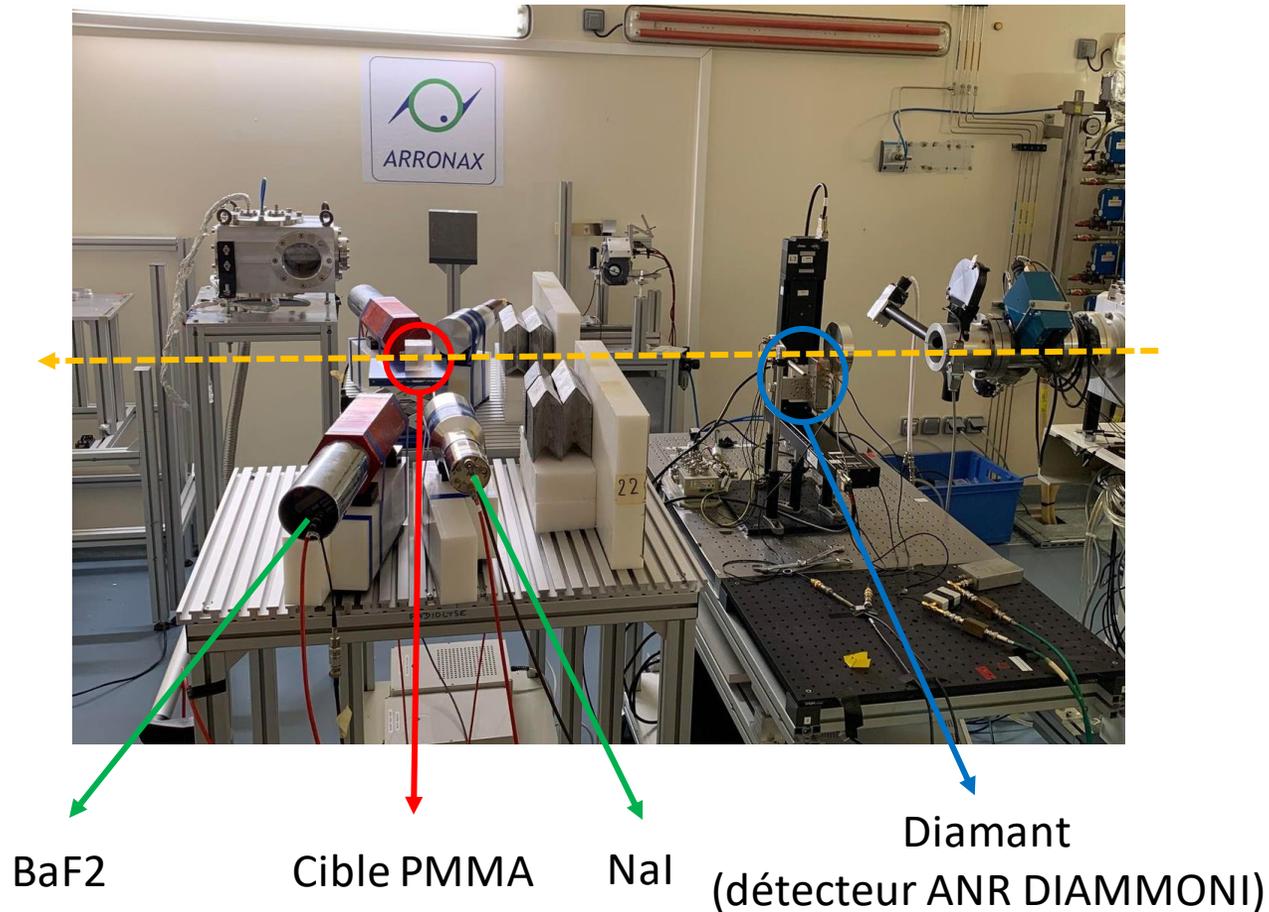
# Tests de scintillateurs sous faisceaux (protons de 70 MeV)



Observer la réponse des scintillateurs

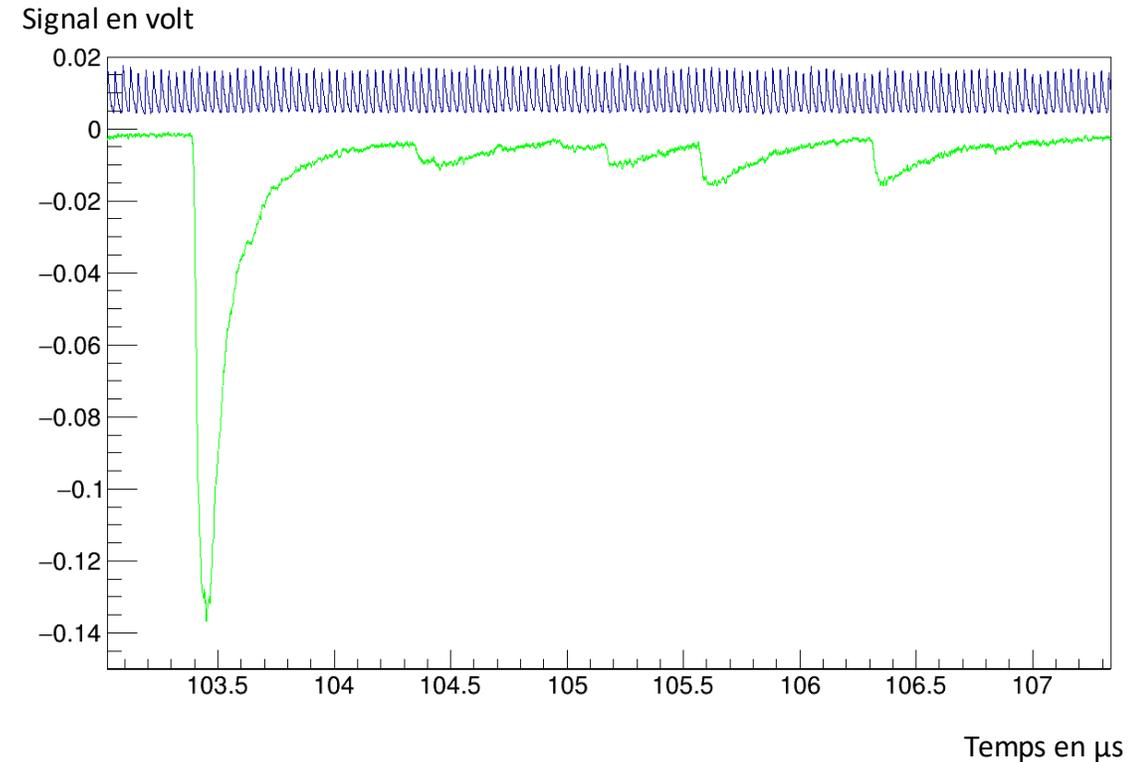
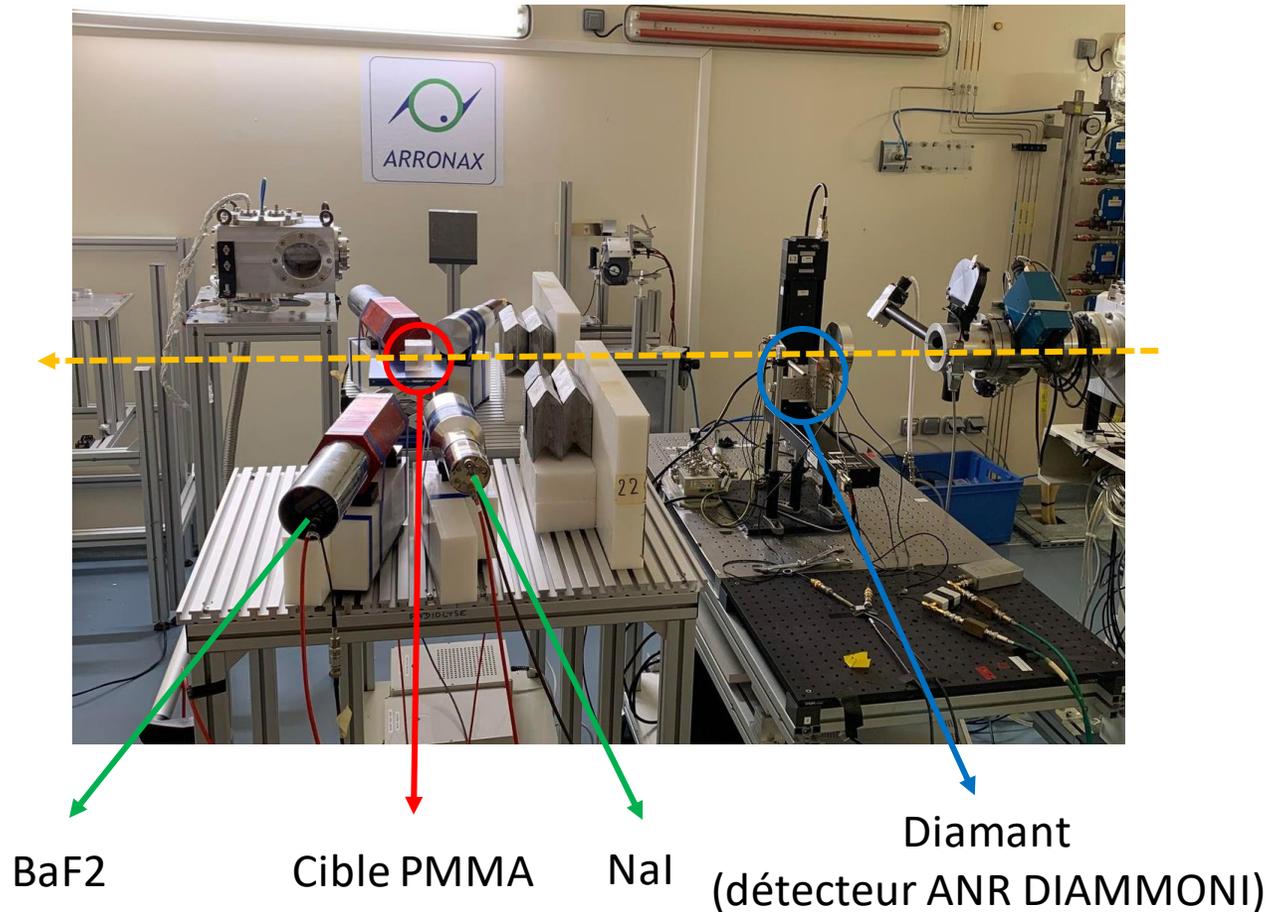
- NaI / BaF2
- Distance à la cible
- Intensité faisceau

# Tests de scintillateurs sous faisceaux (protons de 70 MeV)



- Intensité de 3 nA (614 protons / bunch)
- Signal du **diamant**
- Signal **NaI (polarisation nominale)**

# Tests de scintillateurs sous faisceaux (protons de 70 MeV)



- Intensité de 3 nA (614 protons / bunch)
- Signal du **diamant**
- Signal **NaI (polarisation nominale)**

# Conclusion et perspectives

## Hodoscope diamant

- Tests et élaboration d'un prototype de moniteur faisceau
  - Validation des deux surfaces actives mono et polycristallin
  - Validation des préamplificateurs
- Perspectives
  - Tests sous faisceaux carbone (Centre de hadronthérapie CNAO à Pavie) (Fin 2022 - début 2023)
  - Test deuxième étage de l'électronique (DFC + TDC)
    - Résolution temporelle
    - Efficacité et taux de comptage

# Conclusion et perspectives

## Systeme de detection gamma

- Simulation PGPI
  - Mise en évidence d'une évolution du taux de comptage et de l'énergie déposée en fonction du déplacement de la cible
- Perspectives
  - Optimisation d'un système de détection gamma adapté pour une situation clinique
  - R&D détecteurs et système de lecture
  - Poursuite de l'étude à haute intensité faisceau

# Références

- ***Kibler 2006*** : Maurice R. Kibler, Jean-Claude Poizat : La Physique pour la Santé : du diagnostic à la thérapie, [https://www.researchgate.net/publication/28612296\\_La\\_Physique\\_pour\\_la\\_Sante\\_du\\_diagnostic\\_a\\_la\\_therapie](https://www.researchgate.net/publication/28612296_La_Physique_pour_la_Sante_du_diagnostic_a_la_therapie)
- ***Krimmer 2017*** : J. Krimmer, J.M. Létang et al. : Prompt-gamma monitoring in hadrontherapy : a review, In : Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Volume 878, pages 58-73, (English), 2017.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2017.07.063>
- ***Livingstone 2021*** : J. Livingstone et al : Influence of sub-nanosecond time of flight resolution for online range verification in proton therapy using the line-cone reconstruction in Compton imaging, In : Physics in Medicine & Biology, Volume 66, Number 12 <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6560/ac03cb>
- ***Vaissière 2014*** : N.Vaissière, Synthèse de films de diamant de haute qualité cristalline pour la réalisation de dosimètres pour la radiothérapie, <http://www.theses.fr/2014DENS0008>