

Développement d'un détecteur diamant pour la radiothérapie par micro-faisceaux synchrotron (MRT)

Rosuel Nicolas^{1,2} Curtoni Sebastien², Gallin-Martel Laurent²,
Gallin-Martel Marie-Laure², Livingstone Jayde², Marcatili Sara²,
Ocadiz Alexandre¹, Tribouilloy Lucas², Dauvergne Denis²,
Adam Jean-François¹

[1]: Rayonnement Synchrotron pour la recherche biomédicale

[2]: Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie

1 Introduction

- Rayonnement synchrotron
- Technique de radiothérapie synchrotron
- Radiothérapie par micro-faisceaux synchrotron
- Contrôle en temps réel à l'hôpital
- Pourquoi le diamant
- Objectif de la thèse

2 Résultats expérimentaux

- Influence du débit de dose sur la réponse du détecteur

3 Simulation Monte-Carlo

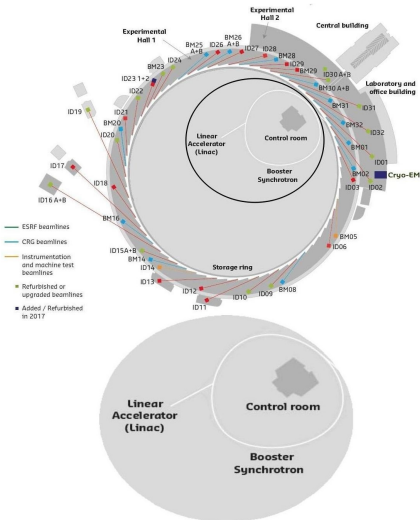
- Setup de la simulation
- Sélection de l'épaisseur du diamant

4 Conclusion et perspectives

- Influence du fantôme sur la réponse du détecteur

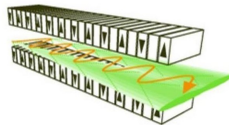
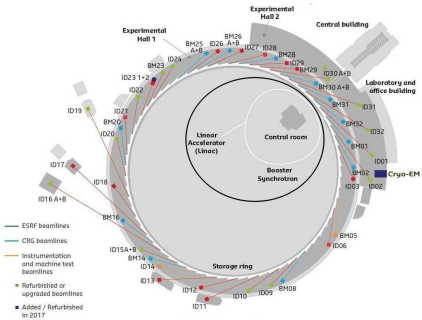
Rayonnement synchrotron à l'ESRF :

- ▶ Accélération d'un faisceau d'électron :
 - Un accélérateur linéaire produit des électrons de 200 MeV
 - Un booster synchrotron les accélère jusqu'à 6 GeV
- ▶ Anneau de stockage



Rayonnement synchrotron à l'ESRF :

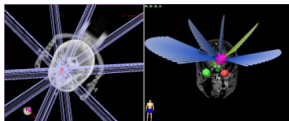
- ▶ Accélération d'un faisceau d'électron :
 - Un accélérateur linéaire produit des électrons de 200 MeV
 - Un booster synchrotron les accélère jusqu'à 6 GeV
- ▶ Anneau de stockage
- ▶ Production d'un faisceau de photons par accélération transverse des électrons :
 - Soit au niveau d'aimants de courbure
 - Soit au niveau d'éléments d'insertion (*wiggler*)



Wiggler schema

Les techniques de radiothérapies par rayonnement synchrotron

Radiothérapie stéréotaxique par rayonnement synchrotron :



- ▶ Augmentation de la dose avec des éléments lourds (iode, fer ..)
- ▶ 1^{er} test clinique synchrotron sur des patients

Radiothérapie par micro-faisceaux synchrotron (MRT) :

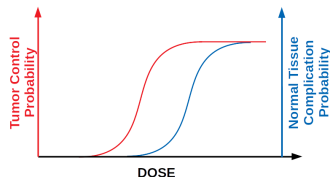


- ▶ Utilisation d'un haut débit de dose
- ▶ utilisation d' une matrice de micro-faisceaux
- ▶ Étude pré-clinique

Concept de la MRT

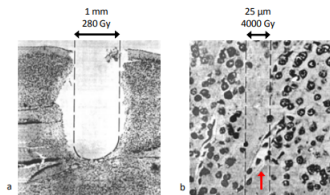
Effet dose volume :

- ▶ Diminution des dégâts sur les tissus sains avec un faisceau fin en comparaison à ceux d'un faisceau large



Haut débit de dose :

- ▶ Faible temps d'irradiation (préservation des micro-faisceaux en évitant les mouvements du patient)
- ▶ Permet d'exploiter l'effet flash ($> 50 \text{ Gy/s}$) [Favaudon et al, 2014, Science Translational Medicine]

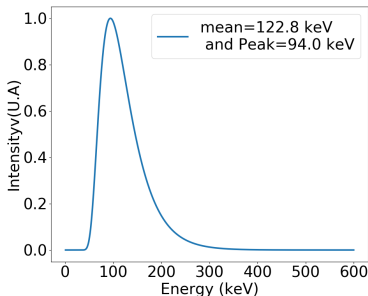


Images de cortex de souris après une irradiation avec (a) : un faisceau de 1mm et 280 Gy et (b) un faisceau de $25\mu\text{m}$ et 4000 Gy selon [Zeman W et al. 1961]

Caractéristiques du faisceaux synchrotron pour la MRT :

Caractéristiques du faisceau Synchrotron sur ID17 :

- ▶ Haut flux de photons
($\simeq 10^{16}$ photons $s^{-1}cm^{-2}$)
- ▶ Faisceau de photons d'énergie 50-600 keV
- ▶ Faisceau de faible divergence :
 - $\simeq 1$ mrad horizontale
 - $\simeq 1$ μ rad verticale



Spectre en énergie utilisé en radiothérapie
Micro-faisceaux

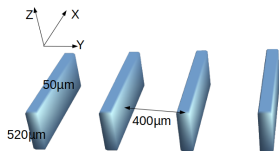
Caractéristiques du faisceaux synchrotron pour la MRT :

Caractéristiques du faisceau Synchrotron sur ID17 :

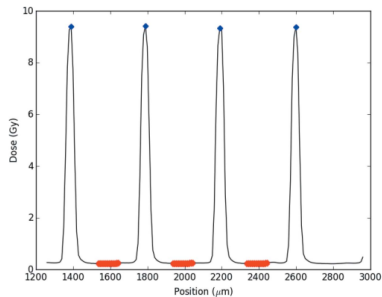
- ▶ Haut flux de photons ($\simeq 10^{16}$ photons $s^{-1}cm^{-2}$)
- ▶ Faisceau de photons d'énergie 50-600 keV
- ▶ Faisceau de faible divergence :
 - $\simeq 1$ mrad horizontale
 - $\simeq 1$ μ rad verticale

Production de micro-faisceaux :

- ▶ Dimensions typiques d'un micro-faisceau :
 - Largeur : 50 μm
 - Hauteur : 520 μm
 - Pas de matrice : 400 μm



Représentation de micro-faisceaux utilisés en MRT



Scan d'une matrice de micro-faisceaux via un micro diamant PTW d'après [Livingstone J et al. 2017, Journal of synchrotron radiation]

Contrôle du traitement à l'hôpital :

Dosimétrie in-vivo : Mesure de la dose en temps réel pendant la radiothérapie pour s'assurer du respect du traitement préalablement prescrit

Contrôle du traitement à l'hôpital :

Dosimétrie in-vivo : Mesure de la dose en temps réel pendant la radiothérapie pour s'assurer du respect du traitement préalablement prescrit

Caractéristiques importantes du détecteur dosimètre :

- ▶ Indépendance en fonction de l'énergie du faisceau incident
- ▶ Linéaire avec la dose reçue
- ▶ Stable en fonction du débit de dose

Solution actuelle non adaptée pour la MRT à cause des particularités de la technique (Haut Débit, fractionnement spatial, besoin de mesurer l'entièreté du champ)



Dosimétrie in-vivo (IRSN)

Le matériau diamant :

► Caractéristiques importantes du matériau diamant :

	Diamant	Silicium	propriété
Résistivité ($\Omega.m$)	$>10^{13}$	2.3×10^7	Faible courant de fuite
Énergie de création de paires (eV)	13.1	3.6	Bon rapport signal sur bruit
Énergie de déplacement (eV)	43	25	Résistant aux radiations
Mobilité des porteurs ($cm^2.V^{-1}.s^{-1}$)	>2000	800-1400	Temps de réponse rapide

2 types de diamant synthétique :

► Poly-cristallin :

- Croissance sur un substrat en silicium
- Diamant de grande taille ($2 \times 2 cm^2$)
- Joints de grains \Rightarrow piégeage de charges

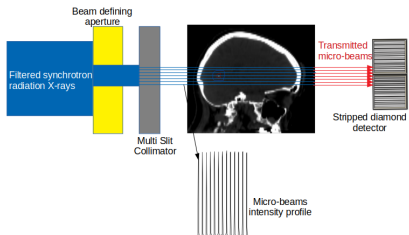
► Mono-cristallin :

- Croissance sur un substrat en diamant
- Bonne efficacité de collection de charge
- Diamant de petite taille ($0.5 \times 0.5 cm^2$)

\Rightarrow Choix d'une matrice de diamants de type mono-cristallin pour couvrir tout le faisceau

Objectif de la thèse

Mise en place d'un détecteur en diamant pour le monitoring du rayonnement synchrotron dans le cadre de la MRT



Setup détecteur diamant pour le contrôle en ligne de la MRT

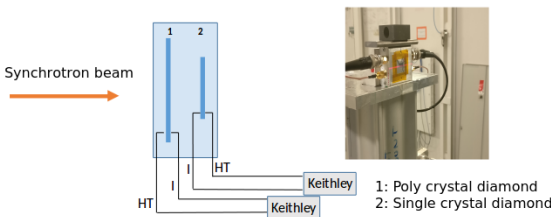
Caractéristiques souhaitées du détecteur :

- ▶ Résolution spatiale pour mesurer chaque micro-faisceau indépendamment
- ▶ Grande dynamique
- ▶ Résistant aux radiations

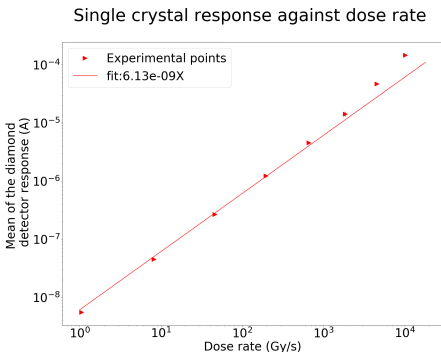
Variation du débit de dose : Setup

Expérience sous rayonnement synchrotron sur la ligne médicale (ID17) de l'ESRF

- ▶ Utilisation d'un faisceau polychromatique
- ▶ Variation du débit de dose entre 1 et 10000 Gy/s
- ▶ Variation du débit par variation du gap du wiggler
- ▶ Taille du faisceau : $50 \times 520 \mu\text{m}^2$
- ▶ épaisseur du diamant 500 μm
- ▶ Objectif : Observer la variation de la réponse en fonction du débit



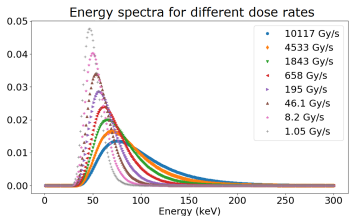
Résultat de la réponse du détecteur en fonction du débit :



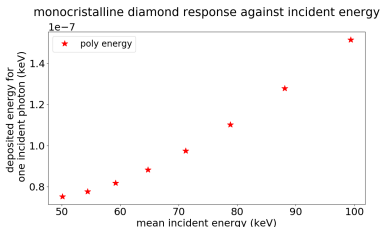
- ▶ Perte de la linéarité de la réponse en fonction du débit de dose ($R^2 = 0.59$)
- ▶ Besoin de tenir compte de la variation du spectre en énergie

Simulation Monte-Carlo : Influence de la variation du débit de dose

Différents spectres en énergie des faisceaux pour les différents débits de dose déterminés avec le logiciel Oasys



Simulation Monte-Carlo de l'énergie déposée dans un diamant mono-cristallin pour les spectres en énergie précédents

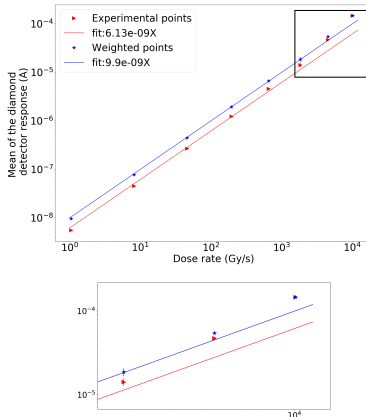


Augmentation de l'énergie moyenne du spectre et de l'énergie déposée pour un photon incident avec le débit de dose

Variation du débit de dose : résultat

- ▶ Pondération par l'énergie du faisceau entraîne une amélioration de la linéarité de la réponse en fonction du débit (passage de $R^2 = 0.59$ à $R^2 = 0.88$)

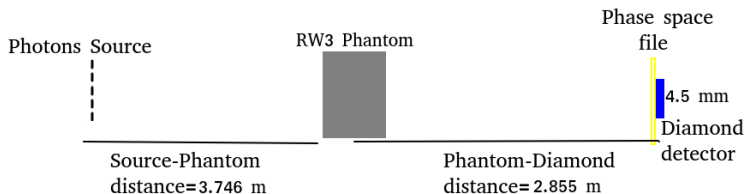
Single crystal response against dose rate



→ Présence d'une perte de linéarité pour les plus hauts débits

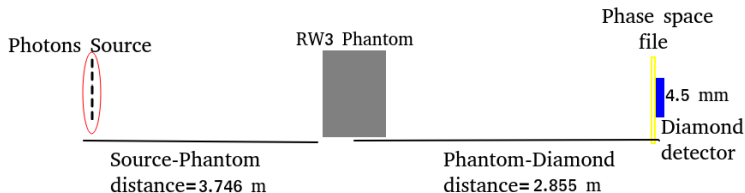
- ▶ Limitation avec un diamant plus mince ?

Setup de simulation Monte Carlo :



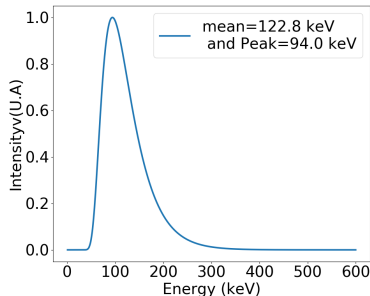
- ▶ Logiciel : Gate/Geant4
- ▶ Physics list : *Livermore polar* avec une polarisation horizontale
- ▶ Taille des pixels : $0.2 \times 4.5 \text{ mm}^2$ sur le détecteur
- ▶ Limites en dessous desquelles les particules ne sont plus suivies dans le diamant :
 - Photons : 250 eV (limite basse de la physics list)
 - Électrons : 2 keV (parcours de $1 \mu\text{m}$)

Setup de simulation Monte Carlo :



Dimensions de la source

- ▶ 11 sources rectangulaires
 - Dimensions d'une source : $50 \times 520 \mu\text{m}^2$
 - Pas de $400 \mu\text{m}$
- ▶ Créées à partir d'un point source 40 m en amont

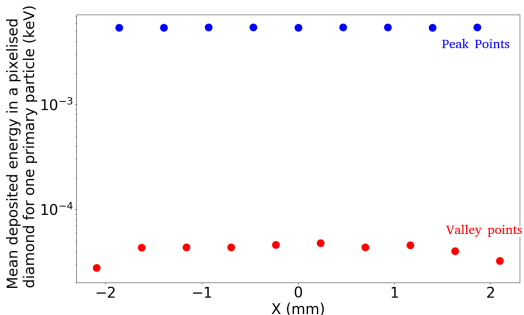


Sélection de l'épaisseur du diamant

Caractéristiques particulières de la simulation :

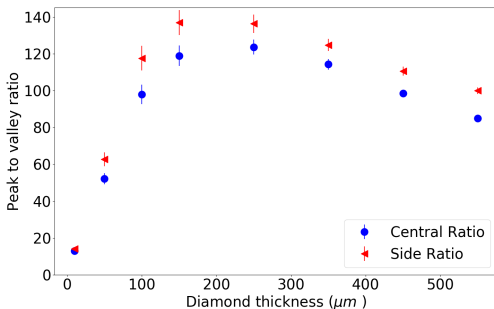
- ▶ Épaisseur du fantôme de RW3 de 5 cm
- ▶ Variation de l'épaisseur du diamant de 10 à 550 μm

Énergie moyenne déposée par photon incident dans chaque pixel sur le détecteur pour différentes épaisseurs du diamant



Sélection de l'épaisseur du diamant : Résultats

Évolution du rapport entre la valeur dans la zone pic et la valeur dans la zone vallée pour différentes épaisseurs du diamant :



- ▶ Optimisation du rapport pic/vallée pour une épaisseur de diamant entre 150 et 250 μm
 - Choix d'une épaisseur de diamant pour la suite de 150 μm

Conclusion et perspectives :

Conclusion :

- ▶ Simulation Monte-Carlo :
 - Sélection d'une épaisseur de $150 \mu\text{m}$ pour maximiser le rapport pic/vallée
- ▶ Expériences sous rayonnement synchrotron :
 - Méthode utilisée nécessite une pondération par l'énergie
 - Perte de linéarité pour les plus hauts débits

Perspectives :

- ▶ Caractérisation des nouveaux diamants de $150 \mu\text{m}$ sous rayonnement synchrotron (stabilité face au débit de dose, répétabilité...)
- ▶ Carte électronique avec une large dynamique ($\simeq 10 \text{ nA} \rightarrow \simeq 150 \mu\text{A}$) en développement au service électronique du LPSC (L Tribouilloy et L Gallin Martel) :
 - QDC discret pour le prototype (40 voies)
 - QDC ASIC pour le setup final (post thèse)
- ▶ Développement d'un algorithme pour le contrôle de la fluence en temps réel
- ▶ Tests finaux avec un prototype à piste mi-2021



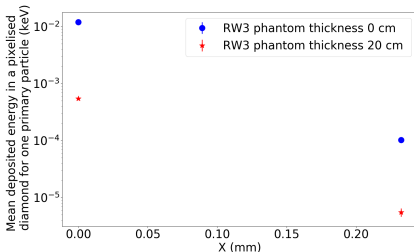
Merci de votre écoute

Influence de l'épaisseur du fantôme de RW3 sur la réponse du détecteur :

Caractéristiques particulières de la simulation :

- ▶ Épaisseur du fantôme de RW3 entre 0 et 20 cm
- ▶ Épaisseur du diamant de 150 μm

Énergie moyenne déposée par photon incident dans chaque pixel sur le détecteur pour différentes épaisseurs du fantôme de RW3



▶ Rapport :

$$\frac{Pi_{0cmRW3}}{Valley_{20cmRW3}} = 4000$$