

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

2 Simulation Monte-Carlo

- Setup de la simulation
- Choix de l'épaisseur du diamant
- Influence du fantôme sur la réponse du détecteur

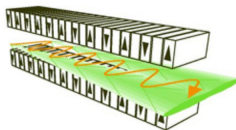
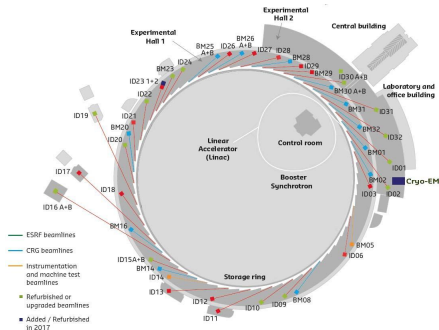
3 Résultats expérimentaux

- Tests préliminaires sous tube à rayons-X
- Influence du débit de dose sur la réponse du détecteur

4 Conclusion et perspectives

Création du rayonnement synchrotron :

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

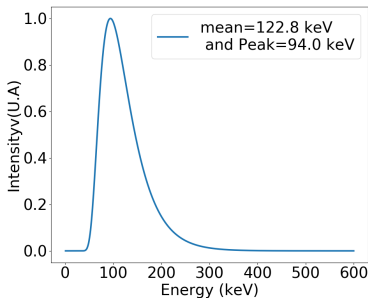


Wiggler schema

Caractéristiques du faisceaux sur ID17 :

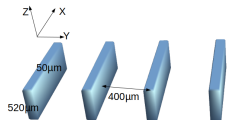
Caractéristiques du faisceau Synchrotron sur ID17 :

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



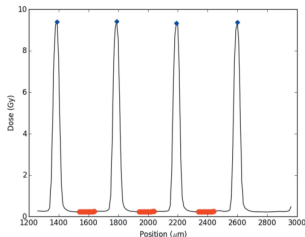
Spectre en énergie utilisé en radiothérapie
Micro-faisceaux

Radiothérapie par micro-faisceaux synchrotron :



Représentation de micro faisceaux utilisé en MRT

- ▶ Dimensions typiques d'un micro-faisceau :
 - Largeur : $50\mu\text{m}$
 - Hauteur : $520\mu\text{m}$
 - Pas de matrice : $400\mu\text{m}$
- ▶ Faisceau de photons d'énergie moyenne de 123 keV



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

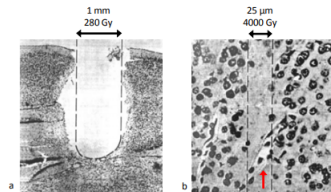
Concept de la MRT

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]

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 ($2 \times 2 \text{ cm}^2$)
- Variabilité de la réponse (présence de joints de grains)

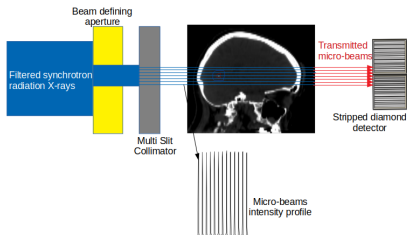
► Mono-cristallin :

- Croissance sur un substrat en diamant
- Réponse stable
- Diamant de petite taille ($0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$)

⇒ 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

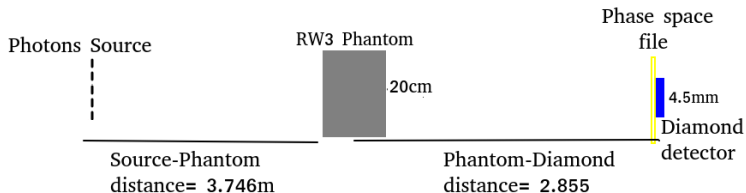


Setup détecteur diamant pour le contrôle en ligne de la MRT

Caractéristiques souhaitées du détecteur :

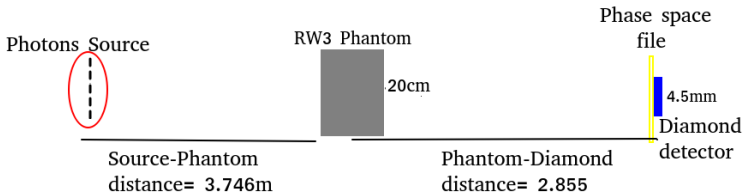
- ▶ Résolution spatiale pour mesurer chaque micro-faisceau indépendamment
- ▶ Grande Dynamique
- ▶ Résistant aux radiations

Setup de simulation Monte Carlo :



- ▶ Logiciel : Gate/Geant4
- ▶ Physics list : *Livermore polar* avec une polarisation horizontale
- ▶ Taille des Pixels : $0.236 \times 4.5 \text{mm}^2$ sur le détecteur
- ▶ Limites en dessous desquelles les particules ne sont plus suivies dans le diamant :
 - Photons : 250eV (limite basse de la physics list)
 - Électrons : 2keV (parcours de $1 \mu\text{m}$)
- ▶ 4.8×10^8 particules primaires simulées

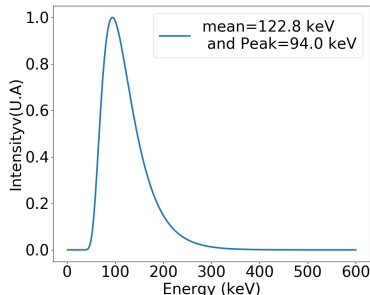
Setup de simulation Monte Carlo :



Spectre en énergie de la source :

Dimensions de la source

- ▶ 11 sources rectangulaires
 - Dimensions d'un rectangle : $50 \times 520 \mu\text{m}^2$
 - Pas de $400 \mu\text{m}$
- ▶ Création des sources à partir d'un point source 40.667m avant

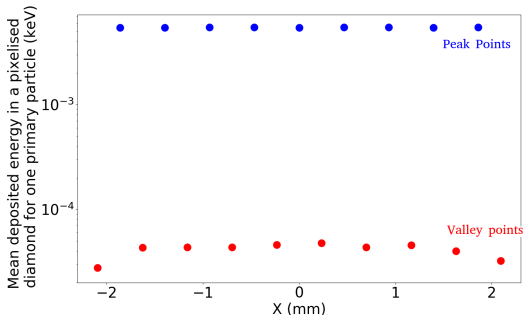


Sélection de l'épaisseur du diamant

Caractéristiques particulières de la simulation :

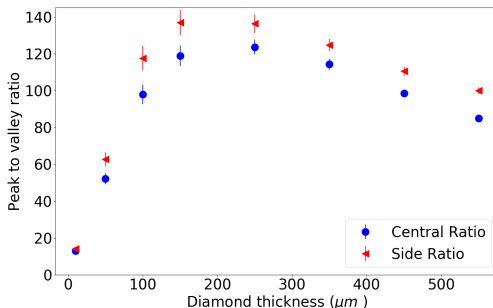
- ▶ Épaisseur du fantôme de RW3 de 5cm
- ▶ Variation de l'épaisseur du diamant de 10 à 550 μm

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 :



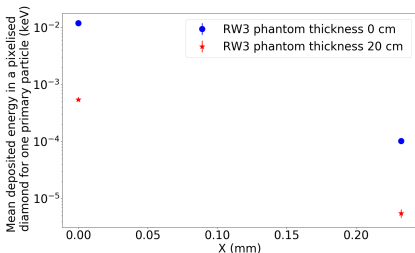
- ▶ Optimisation du rapport pic/vallée pour une épaisseur de diamant entre 150 et 250 μm
 - Choix d'une épaisseur de diamant pour la suite de 150 μm

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 20cm
- ▶ 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

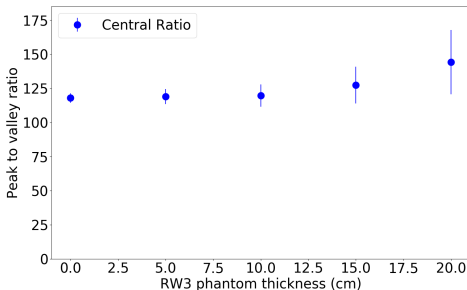


▶ Rapport :

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

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

Évolution du rapport entre la valeur dans la zone pic et la valeur dans la zone vallée pour différentes épaisseurs de RW3 :



- ▶ Peu d'influence de l'épaisseur de RW3 sur le rapport pic/vallée
 - Peu d'influence du diffusé fantôme

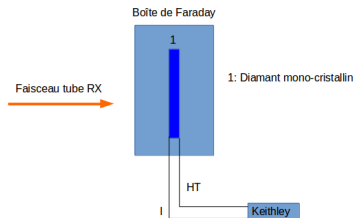
Conclusion de la partie simulation :

- ▶ Choix de l'épaisseur du diamant : $150\mu\text{m}$
 - ▶ Besoin d'une dynamique de 10^4 sur la gamme d'acquisition pour pouvoir mesurer pics et vallées dans chaque condition
 - ▶ Rapport pic/vallée ne semble dépendre que du flux de photons primaires
 - Peu d'influence du diffusé fantôme
- Besoin de mesurer la fluence dans les vallées ?
- ▶ Pour la caractérisation du faisceau
 - ▶ Peut être pas utile en condition clinique

Expérience sous rayonnement X à l'ESRF :

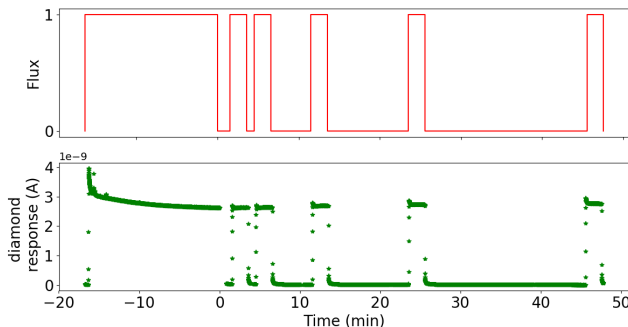
Tube à rayons-X : Caractéristiques

- ▶ Tension appliquée : 160kVp
- ▶ Courant appliqué : 18mA
- ▶ Débit : <math><1\text{Gy}/\text{min}</math>
- ▶ Faisceau poly-énergétique
- ▶ Épaisseur du diamant : $500\mu\text{m}$
- ▶ Objectif : Étudier les effets transitoires du détecteur



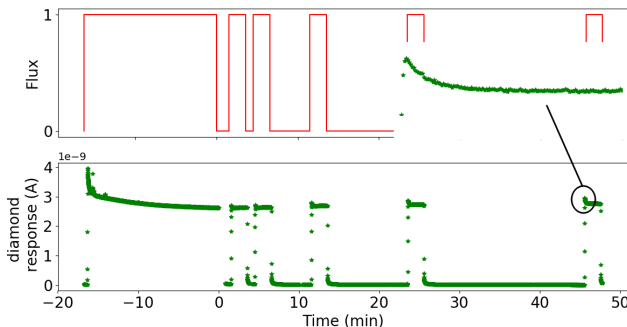
Influence du temps de repos sur le diamant : Chronogramme tube à rayons-X

- ▶ Irradiation de 2min avec un temps de repos de 1.5, 4.5, 11.5, 23.5, 45.5min après la pré-irradiation
- ▶ Tension de polarisation de +330V
- ▶ Expérience réalisée après une nuit de repos

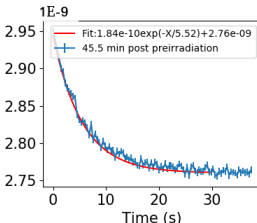
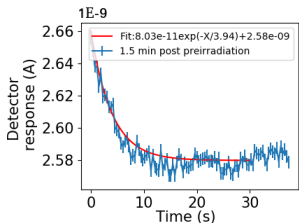


Influence du temps de repos sur le diamant : Chronogramme tube à rayons-X

- ▶ Irradiation de 2min avec un temps de repos de 1.5, 4.5, 11.5, 23.5, 45.5min après la pré-irradiation
- ▶ Tension de polarisation de +330V
- ▶ Expérience réalisée après une nuit de repos



Fit de l'overshoot pour différents temps post pré-irradiation : Tableau récapitulatif



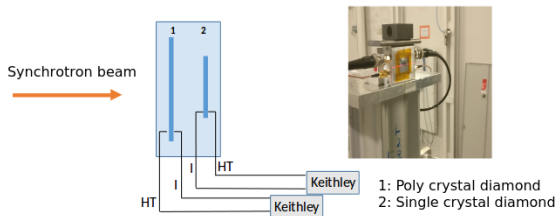
$$A \cdot \exp(-t/B) + C$$

- ▶ Augmentation de la sur-réponse d'un facteur >2
 - ▶ Augmentation de la constante de temps de décroissance de 15%
 - ▶ Augmentation de la réponse moyenne du détecteur de 10%
- Sur-réponse observée pour des diamants présentant des pièges (Guerrero et al, 2005, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A)

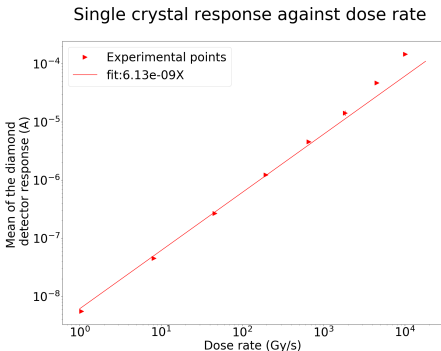
Variation du débit de dose : Setup

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 $500 \mu\text{m}$
- ▶ Objectif : Observer la variation de la réponse en fonction du débit



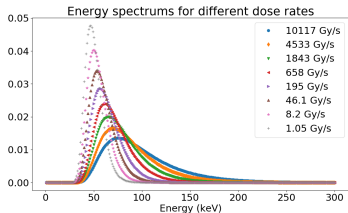
Résultat de la réponse du détecteur en fonction du débit :



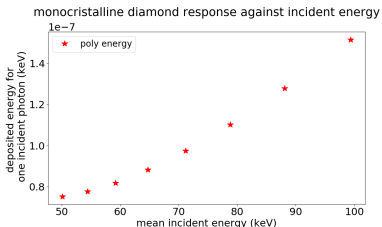
- ▶ Perte de la linéarité de la réponse en fonction du débit de dose ($R^2 = 0.59$)
- ▶ Besoin de tenir compte de la variation du spectre en énergie

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

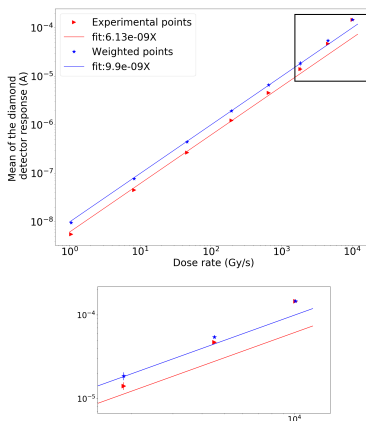


Augmentation de l'énergie moyenne du spectre en énergie et de l'énergie déposée pour un photon incident avec le débit de dose

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 ?

Conclusion :

Simulation Monte-Carlo

- ▶ Sélection d'une épaisseur de $150 \mu\text{m}$ pour maximiser le rapport pic/vallée
- ▶ Pas d'influence du diffusé fantôme et sur la réponse du détecteur
- ▶ Besoin d'une dynamique de 10^4

Expérience préliminaire avec tube à rayon X :

- ▶ Présence d'un régime transitoire nécessitant un cyclage de la tension de polarisation et une pré-irradiation

Expérience en fonction du débit de dose :

- ▶ Méthode utilisée nécessite une pondération par l'énergie
- ▶ Perte de linéarité pour les plus hauts débits

Perspectives :

- ▶ Refaire les expériences préliminaires avec un tube à rayon X pour s'assurer de l'amélioration de la réponse avec un diamant "neuf" aminci
- ▶ Expérience en rayonnement synchrotron pour tester la stabilité de la réponse à haut débit
- ▶ Carte électronique avec la dynamique suffisante en développement au service électronique (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 pixélisé mi-2021



Merci de votre écoute