



Thèse 2023-2026

LPSC Grenoble, IP2I Lyon, CREATIS Lyon, France

Thématique : Physique nucléaire appliquée à l'imagerie médicale

Sujet de thèse : Contrôle en ligne de la protonthérapie par une mesure intégrale de rayons gamma prompts en conditions cliniques en mode faisceau pulsé, dans le cas particulier de l'irradiateur Proteus-One du CAL

Directeur de thèse : Denis Dauvergne

Téléphone : +33 4 76 28 40 62

Email : dauvergne@lpsc.in2p3.fr

Adresse : LPSC Grenoble

53 Avenue des Martyrs, 38000 Grenoble, FRANCE

Co-directeur de thèse : Etienne Testa

Téléphone : +33 4 72 44 81 47

Email : e.testa@ip2i.in2p3.fr

Adresse : IP2I Lyon, bureau V14, bâtiment Van de Graaff

4 rue Enrico Fermi, 69622 Villeurbanne

La mesure des rayonnements "gamma-prompts" consécutifs aux réactions nucléaires a été proposée pour effectuer un contrôle en ligne et in vivo des traitements par protonthérapie. En effet, les lieux d'émission de ces rayonnements secondaires sont corrélés au parcours des protons primaires. Diverses techniques d'imagerie, de spectroscopie, de mesure par timing, ou plus simplement de comptage intégral ont été proposées [1]. Cependant, chacune de ces techniques présente des contraintes particulières en fonction de chaque modalité de délivrance du faisceau. En particulier, les faisceaux délivrés par le synchro-cyclotron Proteus-One d'IBA au CAL (centre de protonthérapie de Nice) ont une structure avec des impulsions de quelques microsecondes toutes les millisecondes, avec un cycle utile très faible, de l'ordre de 10^{-3} , et donc une intensité crête très élevée, de l'ordre de 1-3 μA pendant les impulsions.

Nous proposons d'adapter la méthode dite de Prompt Gamma Peak Integral [2] qui avait été développée dans un projet commun entre les partenaires et le CAL. Cette méthode est basée sur un comptage des photons par un faible nombre de détecteurs positionnés autour du patient, de telle façon que la comparaison des taux de détection de chaque détecteur renseigne à la fois sur la position du parcours du faisceau dans le patient, et la longueur de celui-ci. Une information – indirecte – sur la dose peut donc être extraite.

La détection des rayons gamma prompts, et l'extraction d'une information quantitative pour le contrôle en temps réel d'un traitement, posent un certain nombre de défis :

- le système de détection doit être capable d'accumuler une information suffisamment précise statistiquement à l'échelle d'une ou de quelques impulsions faisceau,
- cette information ne doit pas être soumise à des pertes de comptage liées à une variation de temps mort pendant les impulsions faisceau,
- in fine, une comparaison avec une prédiction basée sur une simulation de plan de traitement doit être réalisée, afin de détecter une éventuelle déviation de la délivrance de dose par rapport au plan de traitement.

Les moyens mis en oeuvre pour répondre à ces défis sont les suivants :

- **Simulations** : l'outil Geant4/Gate sera utilisé pour simuler l'émission et la détection des rayonnements gamma prompts, en allant d'une description simplifiée (par ex : faisceau monoénergétique de taille nulle, cible homogène, efficacité de détection parfaite...) jusqu'à une description réaliste, tenant compte de la modélisation de la ligne faisceau et de l'environnement de la salle de traitement, prise en compte d'une irradiation sur modèle de fantôme anthropomorphe, voire de patient. Le module d'accélération de simulation gamma-prompts par réduction de variance sera employé (module vpgTLE développé par le partenaire CREATIS). Les simulations permettront dans un premier temps de définir les caractéristiques des détecteurs (angle solide et taux de comptage) et la précision statistique attendue des signaux obtenus (sensibilité à une déviation par rapport à la planification).
- **Instrumentation** : l'acquisition d'un nombre suffisant de photons pour atteindre une précision statistique souhaitée nécessitera d'empiler les signaux en sortie de chaque détecteur si l'on exige un nombre de voies de lecture limité. L'instrumentation devra donc être optimisée pour conserver la linéarité des signaux de sortie avec l'énergie reçue dans chaque détecteur. L'acquisition des données sera réalisée selon des dispositifs existants développés dans le cadre d'autres projets (collaboration LPSC-IP2I).
- **Prises de données sous faisceau** : de nombreuses prises de données seront nécessaires dans la salle de traitement du CAL afin, dans un premier temps, de qualifier la réponse des détecteurs, et, dans un second temps, d'obtenir un ensemble de données permettant une comparaison entre les mesures et les simulations. Ces prises de données, ainsi que les simulations basées sur des plans de traitement,

seront réalisées sous la responsabilité de l'équipe de physique médicale du CAL, en collaboration avec les autres partenaires.

Équipe d'encadrement : Denis Dauvergne (denis.dauvergne@lpsc.in2p3.fr), Marie-Laure Gallin-Martel (mlgallin@lpsc.in2p3.fr), Étienne Testa (e.testa@ip2i.in2p3.fr), Jean Michel Létang (jean.letang@insa-lyon.fr).

[1] J. Krimmer, D. Dauvergne, J. M. Létang, et É. Testa, « Prompt-gamma monitoring in hadrontherapy: A review », *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. Accel. Spectrometers Detect. Assoc. Equip.*, vol. 878, p. 58-73, janv. 2018, doi: 10.1016/j.nima.2017.07.063.

[2] J. Krimmer *et al.*, « A cost-effective monitoring technique in particle therapy via uncollimated prompt gamma peak integration », *Appl. Phys. Lett.*, vol. 110, n° 15, p. 154102, avr. 2017, doi: 10.1063/1.4980103.