

Synthèse et conclusions sur la journée d'études sur les moniteurs faisceaux. Lyon, 1^{er} septembre 2020

Cette journée, co-organisée avec le LabEx PRIMES, a fait suite à la réunion GDR de juin 2017 au cours de laquelle divers développements en cours à l'IN2P3 avaient été présentés, en regard des plateformes d'irradiation potentiellement concernées. Trois ans après, de nouveaux projets ont émergé, y compris hors IN2P3, qui correspondent à de nouveaux besoins associés aux fractionnements spatial (micro et minifaisceaux), à des forts débits de dose instantanés (irradiations flash), ou à la nécessité d'obtenir un étiquetage temporel précis. Le sujet est dynamique, avec de nombreuses thèses en cours.

La journée s'est tenue à l'IP2I, Lyon, en combinant des présentations en présentiel et par visioconférence. Les présentations (avec accord des auteurs) sont disponibles sur le site Indico <https://indico.in2p3.fr/event/21869/timetable/#20200901> .

On distinguera quatre grands types d'enjeux/applications : le monitoring des thérapies FLASH, Le monitoring de faisceaux en hadronthérapie (incluant l'étiquetage temporel des ions), les microdosimètres/dosimètres pour faisceaux fins, et les moniteurs spécifiques à certaines plateformes (Arronax, Aifira).

Monitoring thérapie FLASH :

Ce type d'irradiation est en plein essor. De nouvelles facilités d'irradiation FLASH voient le jour ou sont en cours d'implémentation, pour relever un grand nombre de challenges, que ce soit sur la compréhension des mécanismes biologiques sous-jacents, de la pertinence de la dose physique mise en jeu, ainsi que sur le contrôle en ligne de l'irradiation.

Le débit de dose peut être très élevé (jusqu'à la dizaine de kGy/s en valeur crête) pendant une durée de l'ordre de la ms à quelques centaines de ms selon le mode d'irradiation.

Le défi à relever porte sur la capacité, pour un système de détection, de collecter un nombre élevé de charges électriques générées pendant ce laps de temps. La forte densité d'ionisation dans le milieu sensible peut induire des recombinaisons de charge entraînant une perte de la linéarité du signal en fonction de l'intensité ou du débit de dose. Par ailleurs, bien que la durée d'irradiation mise en jeu soit longue par rapport au temps de dérive d'électrons, de trous et même d'ions sous l'action d'un champ électrique, le taux de répétition peut induire des charges d'espace dans le milieu sensible qui modifieront le champ électrique de polarisation d'un détecteur, ainsi qu'une dérive de ligne de base ou une saturation sur l'électronique de lecture. Notons que la puissance absorbée n'a pas été identifiée comme un problème lié à la tenue du matériau détecteur (temps d'irradiation courts).

Les équipes du GDR ont des approches complémentaires qui permettront de répondre au défi d'une irradiation contrôlée.

1/ Chambres à ionisation

- iDORA (LPSC – Y. Arnoud) : l'idée du projet est de jouer sur différents paramètres pour i) réduire le rendement d'ionisation par un matériau mince (taux de création de charge de l'ordre de 10^{-2} par électron incident), ii) réduire le temps de collection, avec une épaisseur de dérive micrométrique, pour limiter la probabilité de recombinaison et donc la saturation de la réponse. Des études sont menées sur la tenue thermique et sur la sensibilité de l'électronique de lecture. Le projet est soutenu par la SATT locale (brevet).

- Projet LPC-Caen (C. Lahaye – S. Salvador) : l'équipe fait évoluer les chambres à ionisation IC23 et DOSION pour la thérapie FLASH en collaboration avec l'institut Curie. Les développements s'appuient sur une modélisation du transport de charge tenant compte des phénomènes de diffusion, de recombinaison et d'échange de charge. Les mesures effectuées au Kinetron (électrons de 5 MeV), avec une chambre de gap 800 μ m, mettent en évidence une perte de linéarité du signal après 100 ns sur un pulse de 2 μ s à un débit de 6 Gy/ μ s, en raison de la recombinaison de charge. L'équipe participe au projet européen UHDpulse[1].

2/ Détection de rayonnement secondaire

- Rayonnement Cerenkov (Institut Curie – V. Favaudon). L'équipe a vérifié la linéarité du rendement de photons Cerenkov émis par un faisceau d'électrons de 3 à 5 MeV absorbés dans une cible de silice et détectés par un PMT via des fibres optiques. Cette linéarité est observée sur 5 ordres de grandeur, pour un débit maximum de 13 nC en 1 μ s. Cette étude montre la faisabilité pour la dosimétrie FLASH[2].

- Electrons secondaires (PEPITES – C. Thiebaut, voir section suivante). La réponse de PEPITES aux intensités FLASH sera étudiée, mais ne devrait pas poser de problème de recombinaison ou de densité de charge (seuls des électrons sont extraits). Les premiers tests thermiques ont été réalisés à Strasbourg début 2021.

- Détection de photons optiques en faisceau pulsé (ARRONAX - C. Koumeir) : la lumière émise par le passage du faisceau dans l'air (rayonnement UV de l'azote) permet une mesure du flux si l'intensité moyenne dans un pulse est de l'ordre du μ A (1 photon détecté pour 2×10^5 protons dans un paquet). La linéarité du signal a été vérifiée jusqu'à une intensité de 20 μ A.

3/ Détecteurs diamant

- Les détecteurs diamant sont envisagés pour le monitoring d'irradiations FLASH à ARRONAX (LPSC - ML Gallin-Martel, projet ANR Diammoni), et pour la radiothérapie synchrotron par micro-faisceaux MRT (LPSC/STROBE – N. Rosuel) dans laquelle les débits de dose dans les pics sont équivalents à ceux de la thérapie FLASH. Grâce à la forte mobilité des porteurs de charge, une linéarité de la réponse en courant est observée jusqu'à des débits de l'ordre de 10 kGy/s. Un moniteur portal est en cours d'assemblage et de test à l'ESRF.

Monitoring faisceau et étiquetage temporel en hadronthérapie

1/ Monitoring par détection d'électrons secondaires : Le détecteur PEPITES (LLR – C. Thiebaut) est basé sur l'émission d'électrons secondaires par une fine couche métallique (50 nm d'or) déposée sur un film mince isolant. Ce détecteur présente l'avantage d'un très faible budget matière interposé dans le faisceau, ainsi que d'une dynamique importante (les tests ont permis une opération jusqu'à 10 nA, cad au-delà des intensités cliniques en protonthérapie), et d'une bonne résistance aux radiations ($> 10^9$ Gy).

2/ Etiquetage spatial et temporel des faisceaux en hadronthérapie :

- Hodoscope à fibres scintillante (IP2I – O. Allegrini, collaboration CLaRyS) : cet hodoscope constitué de deux plans de fibres scintillantes carrées jointives lues par des PMTs matriciels doit permettre une mesure de temps de vol projectile par projectile (ou paquet par paquet) pour la détection de gammas prompts. Le détecteur couplé à son acquisition micro-TCA a été testé au CAL-Nice. Les résultats montrent une efficacité en proton unique de 90% en mode OU des deux plans, et 75% en

mode ET. À partir de 10 MHz de taux de comptage sur un PMT 64 voies, des problèmes d'oscillations dans les ASICs 32 voies provoquent des redéclenchements[3].

- Hodoscope Diamant (LPSC - ML-Gallin-Martel, collaboration CLaRyS) une version diamant de l'hodoscope est en cours de développement pour des mesures de ToF à haute résolution temporelle : matrice de 4 diamants monocristallins à pistes double face, et diamant polycristallin à pistes double face, avec leur électronique de lecture associée (discrète et ASIC). Une résolution temporelle de 100 ps rms a été atteinte sur la mesure de ToF gamma prompts induits par des protons entre un détecteur diamant (détection faisceau) et un scintillateur (détection gamma) [4].

Microdosimètres et dosimètres faisceaux fins:

La variabilité du dépôt d'énergie (TEL) et de l'efficacité radiobiologique (RBE) en fonction de l'énergie en protonthérapie, et dans une plus forte mesure en hadronthérapie avec des ions légers, rendent nécessaire une dosimétrie de précision à l'échelle micrométrique. De plus, cette variabilité est accentuée latéralement par l'utilisation de mini- et micro-faisceaux, d'ions ou de photons.

- Les développements de microdosimètres qui ont été présentés reposent sur des solutions technologiques mises au point en dehors des laboratoires du GDR : microdosimètres silicium 3D (IJCLab – C. Guardiola[5]) et membranes à volumes micrométriques de diamants monocristallins (CEA-LIST – M. Pomorski)[6]. Les équipes impliquées du GDR travaillent sur la caractérisation auprès de faisceaux cliniques ou recherche.

- Projet QASys (INL – P. Pittet) : Il s'agit d'un projet Physique Cancer jusqu'en 2022, portant sur la dosimétrie tomographique par scintillateurs multicouches (plans de fibres scintillantes) pour les faisceaux de photons de petite taille, incluant un développement instrumental [7] et la reconstruction tomographique[8]. Le système présente des perspectives de fonctionnement sur IRM-LINAC en déportant l'électronique de lecture.

Monitoring spécifique plateforme :

- ARRONAX : développement de modalités multiples couvrant un domaine élargi d'intensités faisceau (pA au μ A) pour des protons et alphas de 30-70 MeV : fluorescence X de l'argon de l'air ou d'une cible métallique mince, bremsstrahlung émis par une cible de PMMA [9], détection de photons UV de l'air. Ces modalités sont combinées à des mesures par chambre à ionisation, DOSION, cage de Faraday.

- AIFIRA : Membrane diamant mince à émission d'électrons secondaires pour microfaisceaux alphas de 3 MeV. Pour les microfaisceaux H+, membranes actives de diamant monocristallin (3-4 μ m)[10].

Conclusions et perspectives :

Une part importante des développements présentés repose sur l'électronique de lecture des détecteurs. La participation à une telle journée des ingénieurs impliqués aurait été bénéfique.

Une prochaine journée permettant de faire un nouveau point d'étape sera nécessaire d'ici deux ans. D'ici là il est nécessaire que les équipes puissent interagir (journées du GDR, du réseau des plateformes ResPlanDir, ou des réseaux IN2P3 tels que Instrumentation faisceaux).

- [1] Andreas Schüller et al., The European Joint Research Project UHDPulse – Metrology for advanced radiotherapy using particle beams with ultra-high pulse dose rates, *Physica Medica* 80 (2020) 134-150, <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2020.09.020>.
- [2] V. Favaudon, J.-M. Lentz, S. Heinrich, A. Patriarca, L. de Marzi, C. Fouillade, M. Dutreix, Time-resolved dosimetry of pulsed electron beams in very high dose-rate, FLASH irradiation for radiotherapy preclinical studies, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*. 944 (2019) 162537. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.162537>.
- [3] O. Allegrini, J.-P. Cachemiche, C.P.C. Caplan, B. Carlus, X. Chen, S. Curtoni, D. Dauvergne, R.D. Negra, M.-L. Gallin-Martel, J. Hérault, J.M. Létang, C. Morel, É. Testa, Y. Zoccarato, Characterization of a beam-tagging hodoscope for hadrontherapy monitoring, *J. Inst.* 16 (2021) P02028–P02028. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/16/02/P02028>.
- [4] S. Marcatili, J. Collot, S. Curtoni, D. Dauvergne, J.-Y. Hostachy, C. Koumeir, J.-M. Létang, J. Livingstone, V. Metivier, L. Gallin-Martel, M.-L. Gallin-Martel, J.-F. Muraz, N. Servagent, E. Testa, M. Yamouni, Ultra-fast prompt gamma detection in single proton counting regime for range monitoring in particle therapy, *Phys. Med. Biol.* (2020). <https://doi.org/10.1088/1361-6560/ab7a6c>. [5] C. Guardiola et al, Microdosimetry in low energy proton beam at therapeutic-equivalent fluence rate with silicon 3D-cylindrical microdetectors, 2021 *Phys. Med. Biol.* 66 114001 <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6560/abf811>.
- [6] I.A. Zahradnik, P. Barberet, D. Tromson, L. De Marzi, M.T. Pomorski, A diamond guard ring microdosimeter for ion beam therapy, *Rev Sci Instrum.* 91 (2020) 054102. <https://doi.org/10.1063/5.0002403>.
- [7] SciFi detector and associated method for real-time determination of profile and output factor for small fields in stereotactic radiotherapy - Pittet - 2020 - Medical Physics - Wiley Online Library, (n.d.). <https://aapm-onlinelibrary-wiley-com.in2p3.bib.cnrs.fr/doi/full/10.1002/mp.14019> (accessed April 28, 2021).
- [8] L. Desbat, S. Rit, R. Clackdoyle, P. Jalade, J. Ribouton, P. Pittet, Geometric tomography for measuring rectangular radiotherapy fields from six projections, in: 2019 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), IEEE, Manchester, United Kingdom, 2019: pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/NSS/MIC42101.2019.9059657>.
- [9] F. Ralite, C. Koumeir, A. Guertin, F. Faddad, Q. Mouchard, N. Servagent, V. Métivier, Bremsstrahlung X-rays as a non-invasive tool for ion beam monitoring, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. 500-501 (2021) 76. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2021.05.013>.
- [10] P. Barberet, M. Pomorski, G. Muggioli, E. Torfeh, G. Claverie, C. Huss, S. Saada, G. Devès, M. Simon, H. Seznec, Cell micro-irradiation with MeV protons counted by an ultra-thin diamond membrane, *Appl. Phys. Lett.* 111 (2017) 243701. <https://doi.org/10.1063/1.5009713>.