

Journée d'étude GDR MI2B - LabEx PRIMES sur les moniteurs faisceaux et contrôle en ligne des irradiations biomédicales

mardi 1 septembre 2020 - mardi 1 septembre 2020

La Doua IP2I

Recueil des résumés

Contents

Introduction	1
First 2D microdosimetry maps in proton therapy with new silicon 3D-microdetectors	1
Use of Cerenkov light for time-resolved dosimetry of electron beams in ultrahigh dose-rate, FLASH radiotherapy	1
La chambre d'ionisation comme moniteur faisceau pour l'ultra haut débit de dose	2
Assurance Qualité des mini-faisceaux en radiothérapie stéréotaxique avec un détecteur scintillant multicouche et une reconstruction tomographique de champ	3
PEPITES - Développement d'un profileur transparent basé sur l'émission d'électrons secondaires pour les faisceaux de particules chargées.	4
A new microdosimetric system based on scCVD diamond membrane sensor	4
Idora (moniteur Flash radiothérapie)	5
Characterization of a beam-tagging hodoscope for hadrontherapy monitoring	5
Développement de moniteurs faisceaux en technologie diamant pour le monitoring de radiothérapies innovantes : hadronthérapie et thérapies « flash »	7
Développement d'un détecteur diamant pour la radiothérapie par micro-faisceaux synchrotron (MRT)	8
Discussion	8
C. Koumeir - monitoring faisceau Arronax	8
P Barberet - moniteur microfaisceau Diamant AIFIRA	8
Contrôle de dose sur le microfaisceau d'AIFIRA par détecteurs diamants	8
Monitoring faisceau Arronax	9

1

Introduction

Auteur: Denis Dauvergne¹

¹ *Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie de Grenoble, CNRS/IN2P3*

Auteur correspondant denis.dauvergne@lpsc.in2p3.fr

Présentation résumée du LabEx PRIMES et du GDR MI2B
Présentation de la journée et de ses attendus

2

First 2D microdosimetry maps in proton therapy with new silicon 3D-microdetectors

Auteurs: Consuelo Guardiola¹; Diana Bachiller-Perea¹; Ludovic De Marzi²

¹ *IJClab*

² *Institut Curie*

The present work demonstrates the capability of performing microdosimetric characterization 2D-maps in a proton therapy facility by means of a new silicon 3D-microdetector array. The device consists of a matrix of 121 independent silicon-based detectors that have 3D-cylindrical electrodes of 25 μm diameter and 20 μm depth, resulting each one of them in a well-defined micrometric radiation sensitive volume etched inside silicon.

Measurements were performed at different equivalent depths of solid water with proton beams generated in the Orsay Proton Therapy Center (ICPO). The microdosimetry spectra were obtained at different positions of the Bragg curve by using a water-equivalent phantom. They showed the variation of the lineal energy in 2D with depth along the Bragg curve with a distance between them of 200 μm . Results were crosschecked with Monte Carlo simulations.

We present here the first 2D maps of the linear energy transfer ever obtained in situ during irradiation at a clinical facility. The clinical implementation of these measurements would allow for the RBE optimization of proton therapy treatments.

3

Use of Cerenkov light for time-resolved dosimetry of electron beams in ultrahigh dose-rate, FLASH radiotherapy

Auteur: Vincent Favaudon¹

¹ *Institut Curie, University Paris Saclay*

Vincent Favaudon

1Institut Curie, University Paris Saclay, PSL Research University, Inserm U 1021-CNRS UMR 3347, Centre Universitaire, 91405 Orsay Cedex, France.

vincent.favaudon@curie.fr

Our team recently discovered that big pulses of relativistic electrons at ultrahigh dose-rate (FLASH) allow sparing mice from radio-induced lung fibrosis [1]. In contrast FLASH was as efficient as conventional dose-rate irradiation with tumor control as an endpoint [1]. The same advantage has been found in mouse brain [2] and confirmed in large mammals [3]. Therefore, FLASH dramatically increases the differential outcome between normal tissues and tumors, thus evoking a promising potential of the FLASH methodology in anticancer radiotherapy.

Were FLASH to be used in the clinic routine, it would involve major changes in the dosimetric techniques medical physicists are accustomed to. Actually, due to ion recombination, space charge and ion drift effects, ionisation chambers may not provide a proportional response with high radiation doses per pulse, typically 5-20 nC in a single microsecond pulse.

We investigated the feasibility and linearity of radiation dosimetry in a small field using Cerenkov light emission within a home-made detector made of a fused silica cylinder calculated for all incident electrons to be stopped within the target. The Cerenkov light was collected using an optical fiber bundle and sent to a photomultiplier optimized for the detection of nanosecond transients. The signal was recorded at a digital oscilloscope and compared with that received from a Faraday cup. The risetime of the whole mounting was ca. 15 ns. The system was investigated by varying (i) the energy of the electron beam between 3.9 and 5.0 MeV; (ii) the pulse width between 0.01 and 2.20 μ s; (iii) the number of pulses and the repeat frequency; (iv) the dose between 8 10^{-4} and 13 nC in 1 μ s. In the low dose range an ionisation chamber was used to measure the charge received at the level of the probe.

The results [4] show that the integral of the Cerenkov signal collected at the silica probe is strictly proportional to the absorbed charge throughout the dynamic range explored, estimated at ≈ 5 orders of magnitude. The system allowed time-resolved analysis of the electron beam under any conditions, including in the lower range of dose-rate explored. Cerenkov light thus appears ideally suited to dosimetry of electrons though a wide range of dose and dose-rate, in particular in small fields, mini- and micro-beams. The technique is appealing in the prospect of future machines for FLASH radiotherapy in the clinic. Interestingly, the Cerenkov light has recently been considered for the dosimetry of X-ray, electron and proton beams [5-7] and used as a variable-delay probe beam with picosecond time resolution [8].

References

1. Favaudon V, Caplier L, Monceau V, Pouzoulet F, Sayarath M, Fouillade C, Poupon MF, Brito I, Hupé P, Bourhis J, Hall J, Fontaine JJ, Vozenin MC (2014). Ultrahigh dose-rate FLASH irradiation increases the differential response between normal and tumor tissue in mice. *Science translational medicine* 6, 245ra293.
2. Montay-Gruel P, Petersson K, Jaccard M, Boivin G, Germond JF, Petit B, Doenlen R, Favaudon V, Bochud F, Bailat C, Bourhis J, Vozenin MC (2017). Irradiation in a FLASH: unique sparing of memory in mice after whole brain irradiation with dose rates above 100Gy/s. *Radiotherapy & Oncology* 124, 365-369.
3. Vozenin MC, de Fornel P, Petersson K, Favaudon V, Jaccard M, Germond JF, Petit B, Burki M, Ferrand G, Patin D, Bouchaab H, Ozsahin M, Bochud F, Bailat C, Devauchelle P, Bourhis J (2019). The advantage of Flash radiotherapy confirmed in mini-pig and cat-cancer patients. *Clinical Cancer Research* 25, 35-42.
4. Favaudon V, Lentz J-M, Heinrich S, Patriarca A, de Marzi L, Fouillade C, Dutreix M (2019). Time-resolved dosimetry of pulsed electron beams in very high dose-rate, FLASH irradiation for preclinical studies. *Nucl Instrum Meth Phys Res A* 944, 162537.
5. Teymurazian A, Pang G (2012). Megavoltage X-ray imaging based on Cerenkov effect: a new application of optical fibres to radiation therapy. In *International Journal of Optics*, Volume 2012.
6. Glaser AK, Andreozzi JM, Davis SC, Zhang R, Pogue BW, Fox CJ, Gladstone DJ (2014). Video-rate optical dosimetry and dynamic visualization of IMRT and VMAT treatment plans in water using Cerenkov radiation. *Medical Physics* 41, <https://doi.org/10.1118/1.1111.4875704>.
7. Zlateva Y, El Naqa I (2015). Cerenkov emission dosimetry for electron beam radiotherapy: a Monte Carlo feasibility study of absolute dose prediction. In *World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering*, Volume 51, Jaffray DA, ed. (Toronto: IFMBE Proceedings), pp. DOI: 10.1007/1978-1003-1319-19387-19388_19203.
8. Grigoryants VM, Lozovoy VV, Chernousov YD, Shebolaev IV, Arutyunov VA, Anisimov OA, Molin YN (1989). Pulse radiolysis system with picosecond time resolution referred to Cerenkov radiation. *Radiat Phys Chem* 34, 349-352.

La chambre d'ionisation comme moniteur faisceau pour l'ultra haut débit de dose

Auteur: Chloé Lahaye¹

¹ {UNIV CAEN NORMANDIE}UMR6534

Auteur correspondant lahaye@lpccaen.in2p3.fr

La radiothérapie par faisceau d'électrons à ultra haut débit de dose (FLASH) consiste à traiter les tumeurs en délivrant une dose supérieure à 1 Gy dans une impulsion de 1 μ s. Bien que les chambres d'ionisation soient des détecteurs de référence pour le contrôle de dose en radiothérapie conventionnelle (moniteurs DOSION ou IC2/3), il n'existe aucun moniteur faisceau en temps réel basé sur des chambres d'ionisation pour de tels débits de dose.

Dans cette étude, nous présentons la réponse d'une chambre d'ionisation à des débits de dose ultra élevés. Des simulations ont été réalisées pour calculer le courant mesuré par une chambre à l'aide d'un modèle de transport 1D. Les équations de transport comprennent la recombinaison, la capture d'électrons et la variation du champ électrique due à la charge d'espace. Les simulations ont été comparées aux mesures effectuées à l'aide d'une chambre d'ionisation de surface active 1 cm², avec une largeur de 800 μ m et une haute tension variant de 400 V/mm à 1200 V/mm. La chambre était irradiée par des impulsions faisceau d'électrons de 5 MeV atteignant des débits de dose de 4 Gy/ μ s.

Malgré des taux de recombinaison élevés, le signal produit par les électrons se déplaçant dans la chambre est proportionnel au débit de dose pendant les 100 premières ns d'irradiation. Les résultats préliminaires suggèrent qu'une mesure de la dose en temps réel peut être effectuée en ne considérant que le signal induit par le mouvement des électrons. Cela ouvre la voie au développement d'un moniteur faisceau à ultra haut débit de dose en temps réel basé sur des chambres d'ionisation.

5

Assurance Qualité des mini-faisceaux en radiothérapie stéréotaxique avec un détecteur scintillant multicouche et une reconstruction tomographique de champ

Auteurs: Patrick Pittet¹; Josué Esteves¹; Julien Ribouton²; Patrice Jalade³; Jean-Marc Galvan¹; Frédéric Blanc⁴; Guido Haefeli⁴; Odran Pivot⁵; Laurent Desbat⁶; Simon Rit⁷; Guo-Neng Lu^{None}

¹ INL

² CHLS-HCL

³ HCL

⁴ LPHE-EPFL

⁵ TIMC-IMAG

⁶ UJF-Grenoble 1 / CNRS / TIMC-IMAG UMR 5525,

⁷ CREATIS

Auteurs correspondants: simon.rit@creatis.insa-lyon.fr, laurent.desbat@imag.fr, patrick.pittet@univ-lyon1.fr

Introduction : Le développement de protocoles d'assurance qualité pour les mini-faisceaux utilisés en radiothérapie reste délicat et requiert des détecteurs dosimétriques 2D présentant (i) une résolution spatiale submillimétrique pour réaliser des mesures y compris dans les zones à fort gradient de dose et (ii) une bonne équivalence « tissu » pour ne pas être pénalisé par la perte d'équilibre électronique latérale et pour pouvoir ainsi déterminer les facteurs d'ouverture du collimateur (FOC).

Nous développons une approche pour l'Assurance Qualité (AQ) des mini-faisceaux basée sur un détecteur 2D scintillant multicouche et sur une reconstruction tomographique de la distribution spatiale de dose.

Méthodes : Chaque détecteur scintillant (technologie SciFi initialement développée par le CERN pour le LHCb) est constitué d'un matelas dense de fibres scintillantes de 250µm de cœur. Les fibres scintillantes utilisées sont équivalentes tissu. Le signal en sortie du détecteur est collecté soit par une caméra sCMOS, soit par des barrettes de photodiodes et représente en temps réel une vue projetée du champ dosimétrique selon l'axe des fibres. Nous avons développé un système d'AQ qui comprend un empilement de détecteurs avec 6 orientations différentes dans le champ et qui permet de reconstruire la cartographie dosimétrique 2D avec une approche tomographique. Le détecteur SciFi a été caractérisé sur un système Novalis TRUBEAM STX (Varian Medical Systems, Inc) équipé de collimateurs coniques de stéréotaxie BrainLab de 4mm à 15mm.

Résultats: Les résultats de mesure sous faisceau confirment que le système prototype permet de mesurer en temps réel les profils projetés du champ d'irradiation avec une résolution submillimétrique et un bon rapport signal à bruit. En utilisant des algorithmes de reconstruction algébriques, nous avons montré qu'il est possible de reconstruire la géométrie de champs simples définis par des collimateurs coniques de petite taille ou par le microMLC. De plus, les profils mesurés sont très cohérents avec ceux obtenus avec des films gafchromiques y compris pour les champs de 4 mm. Par ailleurs, contrairement aux autres détecteurs actifs, ce système d'AQ est équivalent tissu et permet la mesure directe du FOC sans facteurs correctifs.

Conclusions : Les résultats préliminaires obtenus montrent l'intérêt de l'approche proposée, qui pourra à terme constituer une solution alternative en temps réel à l'utilisation de films gafchromiques pour l'AQ des mini-faisceaux.

6

PEPITES - Développement d'un profileur transparent basé sur l'émission d'électrons secondaires pour les faisceaux de particules chargées.

Auteur: Christophe Thiebaux¹

¹ LLR Ecole polytechnique

Auteur correspondant thiebaux@llr.in2p3.fr

Le projet PEPITES vise à réaliser un prototype opérationnel d'un profileur ultra-mince, résistant aux radiations, capable de fonctionner en permanence sur des accélérateurs de particules chargées de moyenne énergie (O(100 MeV)).

PEPITES utilise l'émission d'électrons secondaires (SEE) pour le signal car ce phénomène ne nécessite qu'une épaisseur minimale de matériau (10 nm), est très linéaire et offre une très grande dynamique. Le profil latéral du faisceau est échantillonné à l'aide d'électrodes segmentées, construites par des méthodes de couches minces. Des pistes d'or, aussi minces que la conductivité électrique le permet (~ 50 nm), sont déposées sur un substrat isolant aussi mince que possible. Lors de la traversée de l'or, le faisceau éjecte les électrons par SEE et le courant ainsi formé dans chaque piste permet l'échantillonnage.

La technique a été validée à ARRONAX avec des faisceaux de protons de 68 MeV pour des intensités de 100 fA à 10 nA. Le SEE est caractérisé jusqu'à 100 nA à ARRONAX et les énergies médicales au CPO. Les électrodes ont été soumises à des doses allant jusqu'à 10⁹ Gy sans montrer la dégradation significative. Un démonstrateur comprenant une électronique dédiée (CEA) sera installé à ARRONAX et utilisé régulièrement. Les performances du système et son comportement au fil du temps seront ainsi caractérisés.*

*LLR, ARRONAX cyclotron et CEA*Orsay Protontherapy Center (Institut Curie)*

7

A new microdosimetric system based on scCVD diamond membrane sensor

Auteur: Michal Pomorski¹

¹ CEA-LIST, Diamond Sensors Laboratory

Auteur correspondant michal.pomorski@cea.fr

Hadron therapy is an innovative and promising mode of radiotherapy for cancer treatment. Its advantages are of both physical as well as biological nature. Alongside the physical advantages as precise dose delivery due to the nature of the ions stopping power, ion beams additionally show an increased relative biological effectiveness (RBE), which is defined as the ratio of the irradiated dose of ions to that of a reference photon energy that would be required to result in the same biological effect for both. For treatment planning, a reliable estimation of RBE of such ion beams to irradiated tissue is required. This type of access to experimentally measured quantities is essential but there is a lack of practical experimental tool to characterize this quantity, which could fulfil all severe requirements for radiation quality assurance in the hadron therapy. To address this issue, DIADEM collaboration is developing a new microdosimetric system based on scCVD diamond membrane sensor. Three generations of scCVD diamond membranes based sensors were designed and fabricated including: (i) p+ sensor where active micro-sensitive volumes (microSVs) are created by the local semiconductor junction formation, (ii) Guard-ring (GR) sensor, where microSVs are formed by a guard-ring electrode limiting the active area (iii) fully 3D sensor, where completely isolated microSVs made of scCVD diamond are embedded into non-electrically active resins. The charge transport properties of fabricated sensors were studied with the IBIC technique at three microbeam facilities including: CENBG Bordeaux, RBI Zagreb, and ANSTO Sydney, giving an insight into the performances of the sensors in well-controlled conditions as well as its response to the various projectiles with large span of the LET. Finally, sensors were integrated onto a specially designed pcb with dedicated electronics to perform clinical proton and carbon beam characterization, along with simultaneous measurement of macroscopic dose and lineal energy transfer required for the RBE calculations.

8

Idora (moniteur Flash radiothérapie)

Auteur: Yannick Arnoud¹

Co-auteur: Ludovic Léau Mercier¹

¹ LPSC

L'augmentation de la puissance des Linacs pour la thérapie dite "flash" (jusqu'à 100 Gy/s) conduit à la saturation des chambres moniteurs nécessaires au contrôle de la puissance des impulsions du faisceau. Il en est de même pour les chambres d'ionisations usuelles. Nous développons une nouvelle chambre moniteur qui permet théoriquement de réduire d'un facteur 500 le nombre de particules chargées générées dans le volume sensible de la chambre. Les matériaux ont été optimisés pour la tenue thermique et la géométrie de la chambre permet de réduire notablement la durée de dérive des charges vers les électrodes. La fabrication du capteur est en cours et il sera couplé à son électronique dédiée pour une vague de test chez un industriel. Ce développement co-financé par la SATT est réalisé sous accord de non divulgation.

9

Characterization of a beam-tagging hodoscope for hadrontherapy monitoring

Auteur: Oreste Allegrini¹

Co-auteurs: J.-P. Cachemiche ²; C.P.C. Caplan ²; B. Carlus ¹; X. Chen ¹; S. Curtoni ³; D. Dauvergne ³; R. Della Negra ¹; M.-L. Gallin-Martel ³; J. Hérault ⁴; J. M. Létang ⁵; C. Morel ²; E. Testa ¹; Y. Zoccarato ¹

¹ IP2I

² CPPM

³ LPSC

⁴ CAL

⁵ CREATIS

1 Introduction

In a context where ion beam therapy faces uncertainties concerning ion range verification, solutions for real-time monitoring are investigated. Among them, some exploit the prompt-gammas (PG) emissions [?]. A Compton and a collimated camera coupled to a beam-tagging hodoscope, made of two scintillating fibres planes, are under development within the CLaRyS collaboration. The beam-tagging hodoscope is designed to provide the time-of-arrival of the ions, which is useful to reduce the background, mainly induced by neutrons. The specifications of the detector are a detection efficiency over 90% for coincidence events in the two planes, with a time resolution below 2 ns FWHM, at counting rates up to 100 MHz. The performance of the beam-tagging hodoscope has been assessed in terms of detection efficiency, time resolution, multiplicity and radiation hardness during experiments at GANIL (Caen) and the Mediterranean Protontherapy Institute (Nice).

2 Material and methods

The final version of the beam-tagging hodoscope is composed of two parallel planes of 1 mm² square-section polystyrene scintillating fibres, oriented perpendicular one to the other, and transverse to the beam direction.

Each plane contains 128 fibres, which gives an active area of 128 x 128 mm². Fibres are readout on both sides by 8 Hamamatsu multi-anode photomultiplier tubes (PMTs) H8500C. Each PMT is linked to a front-end (FE) card via a 64-channel connector. The main components of this card are two 32-channel readout ASICs, a signal-processing FPGA, a single-channel optical transceiver and an RJ45 connector. The data are then sent from the FPGA to the back-end card (AMC40) of a μ TCA acquisition system [2], with a specific protocol [?, 3, 4].

For the performance tests a smaller hodoscope with 32 fibres per plane has also been developed in order to use a single acquisition board to collect all the data of the two planes. Each fibre plane is readout by a single ASIC.

The setup used during the experiments consists in inserting the beam-tagging hodoscope between two plastic scintillators (PSs) located about 5 cm upstream and downstream. The external trigger is provided by the coincidence signal generated from the PSs when a proton impinges the hodoscope. The analog to logic signal

conversion is performed in a NIM module. When the PSs counting rate limit is reached, a PS placed out of the beam and calibrated at low beam intensity was used to monitor the beam intensity.

3 Results

This hodoscope successfully provided 2D images of proton beams with a detection efficiency larger than 98% with logical OR condition between the two fibre planes. The detection efficiency with a coincidence between the two planes is close to 75% for beam intensities up to ~ 1 MHz. Moreover, the timing resolution is around 1.5 ns FWHM. Radiation damage was studied with 95 MeV/u carbon ions at GANIL, where fluences up to 1013 ions/cm² were shown to (temporarily) decrease the detection efficiency by 10%. Overall, the performance show that such a technology is viable for beam monitoring during hadrontherapy. Further improvements of the ASIC developed for the front-end electronics boards are foreseen to reach the counting rate capabilities of the specifications (100 MHz).

References

- [1] J. Krimmer, D. Dauvergne, J.M. Létang, and E. Testa, Prompt-gamma monitoring in hadrontherapy: A review., Nucl. Instrum. Meth. A, 878 (2018) pg. 58-73
- [2] J.-P. Cachemiche, P.-Y. Duval, F. Hachon, R. Le Gac, and F. Marin, Study for the LHCb upgrade read-out board., J. Instrum., 5 (2010) pg. C12036
- [3] X. Chen, B. Carlus, C. Caplan, L. Caponetto, J.-P. Cachemiche, D. Dauvergne, R. Della-Negra, M. Fontana, L. Gallin-Martel, D. Lambert, G.-N. Lu, M. Magne, H. Mathez, C. Morel, G. Montarou, M. Rodo, E. Testa, and Y. Zoccarato, A data acquisition system for a beam-tagging hodoscope used in hadrontherapy moni-

toring., in IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), Atlanta, GA, USA, pg. 1-4, Oct 2017.

[4] C. Caplan, O. Allegrini, J. . Cachemiche, B. Carlus, X. Chen, D. Dauvergne, R. Della-Negra, M. Fontana, L. Gallin-Martel, M. . Gallin-Martel, J. Hérault, D. Lambert, G. . Lu, M. Magne, H. Mathez, G. Montarou, C. Morel, M. Rodo Bordera, E. Testa, and Y. Zoccarato, A μ TCA back-end firmware for data acquisition and slow control of the CLaRyS Compton camera., in IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC) Manchester, United Kingdom, pg. 1-4, Oct 2019.

[5] X. Chen, O. Allegrini, B. Carlus, C. Caplan, L. Caponetto, J. P. Cachemiche, S. Curtoni, D. Dauvergne, R. Della Negra, M. Fontana, L. Gallin-Martel, M.-L. Gallin-Martel, J. Hérault, D. Lambert, G.-N. Lu, M. Magne, S. Marcatili, H. Mathez, C. Morel, G. Montarou, E. Testa, and Y. Zoccarato, A Time-of-Flight gamma camera data acquisition system for hadrontherapy monitoring., in IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), Manchester, United Kingdom, pg. 1-4 Oct 2019.

10

Développement de moniteurs faisceaux en technologie diamant pour le monitoring de radiothérapies innovantes : hadronthérapie et thérapies « flash »

Auteur: Marie-Laure Gallin-Martel¹

Co-auteurs: L. Abbassi²; A. Bes¹; G. Bosson¹; J. Collot¹; T. Crozes²; S. Curtoni¹; D. Dauvergne¹; P. Everaere¹; L. Gallin-Martel¹; A. Ghimouz¹; F. Haddad³; J.-Y. Hostachy¹; C. Koumeir³; A. Lacoste¹; S. Marcatili¹; V. Métivier⁴; J.-F. Motte²; J.-F. Muraz¹; F. Poirier⁵; N. Servagent⁴; F. Rarbi¹; O. Rossetto¹; M. Yamouni¹

¹ LPSC

² Institut Néel

³ SUBATECH/ARRONAX

⁴ SUBATECH

⁵ ARRONAX

Au cours d'une séance d'irradiation en hadronthérapie, une partie des ions incidents va subir des réactions de fragmentations nucléaires qui ont pour effet de délocaliser le dépôt de dose dans le patient. C'est donc une source d'incertitude qui peut nuire à une délivrance optimale des traitements. La collaboration Clarys (IP2I CPPM LPSC CREATIS) met au point un système de contrôle en ligne basé sur la détection de gamma prompts émis le long du parcours des ions. Afin de réaliser une mesure de temps de vol absolue (ion + gamma prompt), CLaRys inclut dans son projet le développement d'un hodoscope de marquage de faisceau installé en amont du patient. Il est destiné à fournir une information temporelle et spatiale des ions entrants. Ces informations peuvent être utilisées pour le processus de reconstruction d'image et dans la réduction des bruits de fond.

Un premier hodoscope basé sur un maillage de fibres scintillantes lues par des photo-multiplicateurs (PM) a été développé. En raison des limitations du taux de comptage des PM, l'efficacité de détection de l'hodoscope à fibres diminue pour les courants de faisceau élevés. Ces limitations ont conduit au développement d'un hodoscope à base de diamant synthétiques (croissance par dépôt chimique en phase vapeur ou CVD).

Les qualités intrinsèques du diamant (rapidité, faible courant de fuite, excellent rapport signal sur bruit, résistance aux radiations, équivalence tissu humain) font de ce semi-conducteur un parfait candidat pour répondre aux exigences de monitoring. L'hodoscope diamant devrait permettre d'atteindre des résolutions temporelles de 100 ps qui vont au-delà des performances de l'hodoscope à fibres et permettrait de faire de l'Ultra Fast Timing cela constitue le projet CLaRys-UFT.

Par ailleurs, la radiothérapie innovante «flash» qui permet de délivrer des faisceaux pendant un temps ultracourt (quelques millièmes de secondes au lieu de plusieurs minutes pour la radiothérapie conventionnelle) requiert un monitoring spécifique de faisceaux en mode pulsé. La rapidité des détecteurs diamants constitue là un atout essentiel pour un tel développement avec une capacité de marquage en temps « début » et « fin » des paquets des trains d'impulsions ainsi que de comptage des particules dans le train à haute intensité faisceau. Cela a conduit au développement du moniteur faisceau diamant DIAMMONI dans le cadre du projet R&T IN2P3 DIAMTECH (collaboration LPSC SUBATECH ARRONAX).

11

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

Auteur: Nicolas Rosuel¹

Co-auteurs: Sébastien Curtoni²; Laurent Gallin-Martel²; Jayde Livingstone²; Sara Marcatili²; Alexandre Ocadiz³; Lucas Tribouilloy²; Denis Dauvergne²; Jean-François Adam³

¹ *LPSC/ STROBE*

² *LPSC*

³ *STROBE*

En marge de la radiothérapie X conventionnelle, le rayonnement synchrotron présente des particularités telles qu'un important flux de photons ou encore un faisceau ayant une faible divergence. D'un côté la faible divergence du faisceau nous permet d'utiliser des champs micrométriques et ainsi d'exploiter l'effet dose-volume (toxicité réduite des tissus sains face à un faisceau fractionné spatialement par rapport à un faisceau large). De l'autre côté, le fort flux de photons permet de prendre avantage de l'effet flash (toxicité réduite à hauts flux de photons sur les tissus sains). La combinaison des deux effets mène à la production de matrice de micro-faisceaux de très haut débit et permet un élargissement de la fenêtre thérapeutique (amélioration de l'effet de l'irradiation sur la tumeur tout en conservant un effet réduit sur les tissus sains).

Cette méthode requiert cependant encore des développements pour envisager un transfert vers le stade clinique. L'un d'eux est le développement d'une méthode permettant un contrôle en ligne du traitement .

Dans l'objectif de pouvoir contrôler le faisceau dans son intégralité (être capable de mesurer chaque micro-faisceau indépendamment), une nouvelle approche basée sur une matrice de détecteur diamant 1D , placé derrière le patient , est en cours d'étude.

Lors de cette présentation, des résultats préliminaires effectués sous rayonnement synchrotron dans le but d'observer la linéarité de la réponse du détecteur en fonction du débit seront présentés. Des résultats de simulation Monte-Carlo ayant pour objectif d'optimiser les paramètres du détecteur et notamment l'épaisseur du diamant seront également montrés.

12

Discussion

13

C. Koumeir - monitoring faisceau Arronax

14

P Barberet - moniteur microfaisceau Diamant AIFIRA

15

Contrôle de dose sur le microfaisceau d'AIFIRA par détecteurs diamants

Auteur: Philippe Barberet¹

Co-auteur: Michal Pomorski²

¹ CENBG

² CEA-LIST

La plateforme AIFIRA du CENBG est équipée d'un microfaisceau d'ions légers (protons, hélium) de 3 MeV. Cette ligne de faisceau permet de cibler des cellules individuelles avec la précision du micromètre dans le but d'étudier les mécanismes moléculaires mis en jeu suite à des irradiations avec un nombre de particules parfaitement contrôlé. Le faible parcours des particules délivrées par AIFIRA nous a poussé à mettre au point des détecteurs ultraminces que l'on peut positionner en amont des monocouches cellulaires et qui délivrent une impulsion mesurable au passage de chaque particule. Deux détecteurs, d'épaisseur comprise entre 0.2 μm et 3 μm et adaptés à chaque type de particule disponible sur AIFIRA ont été mis au point et validés ces dernières années en collaboration avec le laboratoire capteurs diamants du CEA-LIST^{1,2}. Ils sont dorénavant utilisés en routine pour l'irradiation biologique en dose contrôlée. Les solutions techniques développées, le design et les performances de ces détecteurs seront présentés.

1. Muggioli, G. et al. Single alpha-particle irradiation permits real-time visualization of RNF8 accumulation at DNA damaged sites. *Scientific Reports* 7, 41764 (2017).
2. Barberet, P. et al. Cell micro-irradiation with MeV protons counted by an ultra-thin diamond membrane. *Applied Physics Letters* 111, 243701 (2017).

16

Monitoring faisceau Arronax

Auteur: Charbel Koumeir¹

Co-auteurs: A. Guertin²; F Haddad¹; V Métivier²; Q Mouchard²; F Poirier³; F Ralite²; N Servagent²

¹ SUBATECH/ARRONAX

² SUBATECH

³ ARRONAX

Les caractéristiques du faisceau délivré par le cyclotron Arronax sont multiparticules (protons, alpha, deuteron), paquet de particules tous les 33ns, à haute énergie (jusqu'au 70MeV) et avec une large plage d'intensité (de femto-Ampère jusqu'au quelques centaines de micro-Ampères). Récemment, un système de pulsation a été adapté dans l'injection du cyclotron pour pouvoir envoyer des trains de paquets pendant une durée de quelques dizaines de μs . Grâce à ce système, une dose de quelques Gy peut être délivré par train (1MGy/sec en débit de dose instantané).

Des irradiations de radiobiologie se font à Arronax dans le cadre de la radiothérapie interne (alpha radio-immunothérapie) et l'hadronthérapie externe (alpha et proton). Des méthodes de mesure de l'intensité de faisceau, adaptées pour un débit de dose conventionnel ($\sim\text{Gy}/\text{min}$), ont été mises en place. Elles sont basées sur la détection des rayons X émis d'une feuille mince ou du milieu irradié (signal bremsstrahlung). Pour des irradiations à des forts débits de dose (Flash $>40\text{Gy}/\text{sec}$), une méthode non invasive et ultra rapide a été développée en collaboration avec le laboratoire Subatech. Le principe est basé sur la détection, avec un système de photomultiplicateur couplé à un système optique, les photons UV de l'air émis sur le trajet du faisceau.

Les performances de ces méthodes seront présentées.