
Contribution aux exercices de prospective nationale 2020-2030

Accélérateurs et instrumentation associée

CONCEPTION D'UN MONITEUR FAISCEAU BASE SUR L'UTILISATION DE DETECTEURS DIAMANTS POUR LE CONTROLE EN LIGNE DE FAISCEAUX PULSES : APPLICATIONS A LA RADIOLYSE ET AUX RADIOTHERAPIES « FLASH ».

Auteur principal

Nom : Marie-Laure Gallin-Martel

Affiliation : LPSC UMR5821

Email et coordonnées : mlgallin@lpsc.in2p3.fr

Co-auteurs

(liste des noms et affiliations)

Johann Collot, LPSC

Denis Dauvergne, LPSC

Laurent Gallin-Martel, LPSC

Sara Marcatili, LPSC

Arnaud Guertin, SUBATECH

Ferid Hadad, SUBATECH

Charbel Koumeir, SUBATECH

Vincent Métivier, SUBATECH

Noel Servagent, SUBATECH

Freddy Poirier, DR17/CNRS mis en disposition à ARRONAX

Participants possibles hors IN2P3 : GIP-ARRONAX

*Contribution à rédiger en français ou en anglais et à envoyer à PROSP2020-GT07-COPIL-L@IN2P3.FR
avant le **1^{er} novembre 2019***

1. Informations générales

Titre : Conception d'un moniteur faisceau basé sur l'utilisation de détecteurs diamants pour le contrôle en ligne de faisceaux pulsés : application à la radiolyse et aux radiothérapies « flash ».

Acronyme : (optionnel)

DIAMMONI

Résumé (max. 600 caractères espaces compris)

Le développement de nouvelles générations d'accélérateurs d'ions, pour la physique (nucléaire - hautes énergies) ou pour les applications médicales (radiothérapies « flash »), crée la nécessité d'une surveillance très précise du faisceau avec un comptage rapide dans un environnement fortement radiatif. Les qualités intrinsèques du diamant (rapidité, faible courant de fuite, excellent rapport signal sur bruit, résistance aux radiations) en font un excellent candidat pour répondre à de telles exigences en terme de conception de détecteurs innovants pour le contrôle en ligne de faisceaux pulsés

Préciser le domaine de recherche (plusieurs choix possibles)

- Physique des accélérateurs (nouveaux concepts machines, optique et dynamique des faisceaux...)
- Sources de particules (électrons, positrons, muons, protons, ions lourds stables, ions radioactifs...) et cibles associées
- Supraconductivité accélérateur (aimants fort champ, cavités SRF...)
- Accélération plasma (électrons, ions...) et interaction lasers/faisceaux
- Technologies RF innovantes (structures haut gradients, alimentations RF...)
- **Diagnostique faisceau, instrumentation et contrôle intelligent**
- Développement durable de la discipline (infrastructures technologiques, efficacité énergétique, fiabilité...)
- Autre R&D spécifique : (préciser)

Préciser la motivation principale visée par la contribution :

- **Accélérateurs pour la physique nucléaire**
- Accélérateurs pour la physique des particules
- Accélérateurs pour les sources de lumière ou de neutrons
- Accélérateurs pour les applications sociétales (santé, énergie, industrie...)
- **Autre : (préciser) Applications médicales voir projet soumis GT10 par D. Dauvergne «Contrôle en ligne des radiothérapies innovantes »**

2. Description des objectifs scientifiques et techniques

Le développement de nouvelles générations d'accélérateurs d'ions, soit pour la physique (physique nucléaire et des hautes énergies), soit pour les applications médicales (hadronthérapie, radiothérapies X ou par rayonnement synchrotron et flash thérapies), crée la nécessité d'une surveillance très précise du faisceau avec un comptage rapide dans un environnement fortement radiatif. Les qualités intrinsèques du diamant (rapidité, faible courant de fuite, excellent SNR, résistance aux radiations, équivalence tissu humain) en font un excellent candidat pour répondre à de telles exigences de monitoring sur une large gamme dynamique (d'une fraction de pA jusqu'au μA). Le GIP ARRONAX, partenaire de ce projet (avec les laboratoires LPSC et SUBATECH), a exprimé son intérêt pour un tel développement avec comme objectif équiper une ligne faisceau opérant en mode pulsé discontinu (applications à la radiolyse en physique nucléaire et exploration des techniques de thérapies « flash » en applications médicales).

Le moniteur faisceau diamant DIAMMONI serait équipé des plus grands capteurs possibles ($> 1 \text{ cm}^2$) afin de garantir un temps de dérive rapide des porteurs de charge et de limiter le courant détecteur (impulsions de faisceau très intenses). L'épaisseur des diamants serait également optimisée. La lecture se ferait par pistes métalliques double face (directions X et Y) avec deux objectifs : atteindre une bonne résolution spatiale et diminuer la capacité du détecteur. Les diamants seraient ensuite assemblés en mosaïque pour couvrir la zone de détection requise (4 diamants de 1 cm^2). Enfin, la spécificité de l'ensemble du projet est le développement d'une électronique de lecture intégrée (comptage rapide, intégration de charge QDC) et d'un système d'acquisition de données (USB/Ethernet). La partie intégration de charge (QDC) devra aussi répondre à la structure temporelle du faisceau et assurer une réponse linéaire avec la variation de l'intensité du faisceau sur toute la plage dynamique ciblée.

L'intérêt pour les profileurs de faisceau trouve essentiellement sa source en physique médicale. La société IBA [1] (Ion Beam Application) qui équipe la plupart des centres de hadronthérapie en Europe fonctionne avec une chambre d'ionisation à basse pression, où le gaz est maintenu par deux membranes minces en polyamide. En effet, en protonthérapie (faisceau de protons de 70 à 250 MeV), la position et le profil du faisceau doivent être surveillés en permanence. Cependant ce système en fonctionnement est fragile et doit être remplacé régulièrement (problème de maintenance, coût, arrêt faisceau). Le projet PEPITES [2] à l'IN2P3 est une solution alternative actuellement en cours de test et de développement. Il consiste à utiliser l'émission d'électrons secondaires et est construit à l'aide de techniques de film mince (brevet). Les profils ont été déterminés avec succès pour une large gamme de courants de faisceaux de protons et pour plusieurs énergies de faisceaux mais la résistance aux radiations pour une utilisation prolongée sur accélérateur reste à démontrer [3]. En revanche, un microdosimètre constitué d'une membrane de diamant (mode détection particule unique) a déjà été utilisé avec succès dans des micro-faisceaux d'ions [4]. **DIAMMONI se distingue de ces moniteurs faisceaux.** En plus de fournir l'information « **profil faisceau** » (**donnée par la métallisation par pistes sur chaque face du diamant**), il vise à faire un **comptage rapide des particules (conception d'un préamplificateur courant rapide)** dans chaque nano-impulsion de chaque micro-train d'impulsions (voir Figure 2). De plus, il vise à opérer une **surveillance continue de l'intensité du faisceau (conception d'un codeur de charge QDC) sur toute une dynamique (fraction de pA à μA)**. DIAMMONI se propose donc d'être un outil innovant pour effectuer un diagnostic faisceau avec des résolutions en temps de l'ordre de $\sim 100 \text{ ps}$ [5], ce qui permet également un étiquetage temporel pour le contrôle en ligne par rayonnement secondaire (hadronthérapie).

Des mesures préliminaires ont été effectuées à ARRONAX, avec un faisceau de protons de 68 MeV en mode pulsé continu de période 33 ns (longueur de paquet de protons 4 ns). L'intensité du faisceau a été fixée à environ 50 fA (moins de 1 proton par paquet). Trois diamants CVD polycristallins (croissance par Dépôt Chimique en phase Vapeur) de $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 300 \mu\text{m}$ ont été testés. Ils proviennent respectivement de Element 6 [6], II-VI [7] et DDK [8]. L'électronique de lecture est opérée par des préamplificateurs rapides du commerce et l'acquisition de données

par un échantillonneur numérique. Sur la Figure 1, l'**efficacité de détection du diamant** en fonction d'un balayage en seuil du signal en sortie des préamplificateurs (les coïncidences aléatoires sont supprimées) montre qu'on peut atteindre la valeur de **96%** démontrant l'excellente capacité de détection du dispositif même à faible flux.

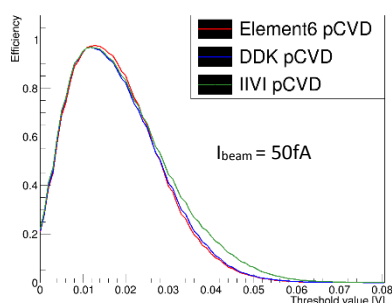


Figure 1: Efficacité de détection en fonction du seuil appliqué au signal diamant sur 3 échantillons à très faible intensité (moins d'un proton par paquet).

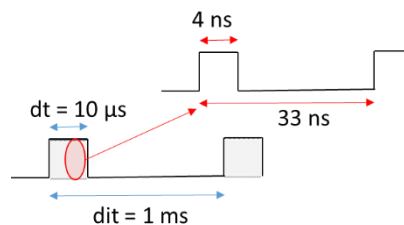


Figure 2: Exemple de mode pulse utilisé à ARRONAX.

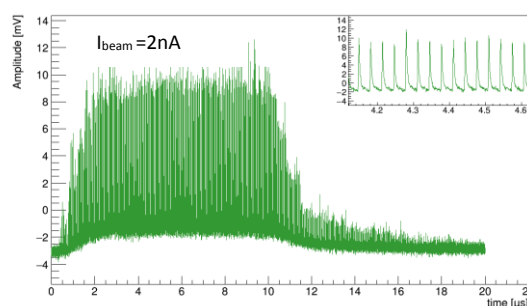
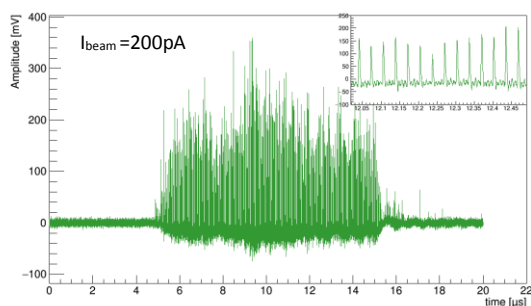


Figure 3: Réponse du détecteur diamant DDK en mode pulsé pour 2 intensités faisceau 200 pA (gauche signal diamant amplifié) et 2nA (droite signal diamant non amplifié).

Dans une seconde expérience, on utilise le mode pulsé à ARRONAX (voir Figure 2). L'intensité moyenne du faisceau a été fixée tout d'abord à 200 pA (Figure 3. à gauche signal de diamant préamplifié). Ensuite, l'intensité du faisceau a été augmentée à 2nA (Figure 3 à droite). Les préamplificateurs rapides ont été supprimés (tension limitée à ± 1 V). Dans ce dernier cas, cela représente une intensité de faisceau instantanée de 2 μ A pendant une impulsion de 10 μ s soit environ 10^6 protons dans un seul paquet toutes les 33 ns. **Le marquage en temps attendu « début » et « fin » de paquet est bien opéré.** Un zoom sur le signal diamant (figure 3 coins supérieurs droits) prouve que la pulsation des signaux correspond à la période attendue de 33 ns et **que le comptage de particules peut être effectué sur une telle dynamique.** En conclusion, le présent cahier des charges induit par l'accélérateur pour un diagnostic faisceau en mode pulsé est particulièrement adapté au domaine d'application du diamant.

Ce développement se situe donc au point de convergence de deux équipes à l'IN2P3 (LPSC et SUBATECH) et du GIP ARRONAX. Il y a également une connexion avec la collaboration nationale **CLARYS-UFT** (LPSC IP2I CPPM -monitorage hadronthérapie) et du projet R&D transverse micro-électronique **DIAMASIC** [9] (LPSC-LPC Caen). Ils présentent aussi un intérêt à l'international : RD42 et Université de Tsukuba. En effet, le LPSC étant membre de la collaboration RD42 [10-11] du CERN (LPSC team leader ML Gallin-Martel), les travaux actuels sur les détecteurs diamants amènent le LPSC à participer à la caractérisation du **BCM' d'ATLAS** au LHC (participation : tests en faisceaux, expertise en électronique : validation conception ASIC de lecture). Enfin, dans le cadre du **projet JSPS** [12] (collaboration CNRS - Japan Society for the Promotion of Science 2019-2020 porteur ML Gallin-Martel) des échanges de compétences s'opèrent entre la croissance du diamant et le dopage (NEEL Université de Tsukuba) et leur application à la détection de particules (LPSC KEK). Le projet **DIAMMONI** renforcera donc la visibilité de notre collaboration nationale au sein de la communauté internationale dans laquelle nous sommes déjà impliqués.

3. Développements associés, calendrier et budget indicatifs

La durée totale du projet est estimée à 40 mois.

M1-M12 Les substrats diamants sont achetés auprès de fournisseurs (Element 6 [6], II-VI [7], DDK [8]). Les différents laboratoires collaborent ensuite pour leur caractérisation : tests avec sources alpha, beta au LPSC, en faisceau de protons (68 MeV) et alpha (70 MeV) à ARRONAX. Un QDC sera développé au LPSC par le service électronique. L'électronique FE rapide (mesure en temps - comptage des particules) est celle développée dans le cadre du projet R&D transverse **DIAMASIC** [9] pour **MONIDIAM** [5]. L'acquisition nécessitera le développement d'une lecture Ethernet.

M13-M20 Le moniteur faisceau sera équipé des plus grands capteurs possibles ($> 1 \text{ cm}^2$). Les détecteurs diamant pourront être soit uniformément métallisés (détecteurs de petite taille) ou segmentés (si plus grande taille) et assemblés en mosaïque ($4 \times 1 \text{ cm}^2$ au LPSC) avec une lecture par pistes métalliques double face (directions X et Y – sous-traitance NANOFAB institut Néel) comme dans le cas du projet **MONIDIAM** [5]. Afin de garantir des temps de dérive courts et de limiter le courant du détecteur (obligatoire pour les impulsions de faisceau très intenses), l'épaisseur des diamants sera optimisée (amincissement sous-traité).

M20-M40 Pour la validation des différents prototypes, le cyclotron ARRONAX (collaboration LPSC ARRONAX SUBATECH) permettra notamment d'étudier trois modes différents: i) physique des accélérateurs: caractérisation du faisceau par marquage de paquets en mode pulsé « continu » (période de 33ns, durée des pulses 4ns) tandis que l'intensité du faisceau augmente de 100 fA à quelques dizaines de nA; ii) application à la radiolyse: marquage précis «début de paquet» et «arrêt» pour permettre une étude cinématique de la production de radicaux en mode pulsé discontinu (trains de pulses de quelques μs); iii) protonthérapie «comptage flash» avec une structure temporelle variable, et une intensité crête au μA .

Le budget estimé pour le développement de ce projet est présenté dans le tableau ci-après en k€ :

Type budget	Année N	Année N+1	Année N+2	Total sur 3 ans
Equipement	30 k€ + 17 k€			47 k€
Fonctionnement	7 k€	7 k€	7 k€	21 k€
Missions	10 k€	10 k€	10 k€	30 k€
RH	3 k€	3 k€	3 k€	9 k€

- **Descriptif ligne équipement** : Achat oscilloscope d'acquisition large bande (4 GHz) pour SUBATECH – PRISMA (30 k€), de modules électroniques discrets (4 préamplis large bande à 1,5 k€ pièce, module CFD et alimentation haute tension 4 k€) et 2 sources (7k€) une de ^{60}Co at une ^{90}Sr pour le LPSC
- **Descriptif ligne fonctionnement** : Achat de substrats diamant (consommable) et de composants électroniques et mécanique, sous-traitance des opérations de traitement de surface, contribution aux frais de fonctionnement du réacteur plasma-CVD en phase production de wafers. : 7000 k€/an
- **Descriptif ligne missions** : une à deux campagnes de mesures à ARRONAX par an (2 k€ euros par an), participation à une conférence internationale par partenaire et un workshop par an (7 k€/an), réunions de collaboration (1 k€ par an)
- **Descriptif ligne RH** : financement d'un stage M2 au LPSC ou à SUBATECH/ARRONAX par an

4. Impact

Les diamants, détecteurs innovants, peuvent devenir des détecteurs standards pour la détection de particules, lorsqu'ils seront disponibles commercialement avec de grandes surfaces, et à un coût reflétant leur valeur technologique réelle. Cela implique que des ensembles de détecteurs soient proposés, avec un système de lecture et d'acquisition adapté à tout type d'application (comptage rapide, positionnement et mesure du flux, suivi des particules, détection en environnement de rayonnement intense). Le projet **DIAMMONI** présenté aborde l'ensemble de ces aspects. Le moniteur faisceau équipé des plus grands capteurs possibles permettant tout d'abord de faire du marquage en temps de « nano bunchs » dans des « macro bunchs » (faisceaux pulsés en mode discontinu) avec un comptage des particules à l'intérieur de chaque nano bunch (électronique FE rapide), de mesurer l'intensité du faisceau (développement QDC) sur une large dynamique (quelques fA jusqu'à quelques μ A). De plus, la mesure du profil du faisceau pourra également être obtenue avec la version proposée de segmentation par pistes des diamants sur le principe de **MONIDIAM** [5]. Ce détecteur pourra être utilisé pour faire du diagnostic faisceau auprès de différents accélérateurs à l'IN2P3 et servir de moniteur pour la radiothérapie « flash » qui est une des thérapies innovantes qui pourrait « révolutionner » la radiothérapie. En effet, son principal intérêt est de délivrer des faisceaux pendant un temps ultracourt (quelques millièmes de secondes au lieu de plusieurs minutes pour la radiothérapie conventionnelle). Cette brièveté fait toute la différence car cela va avoir pour conséquence d'épargner davantage les tissus sains, mais non les tumeurs.

Références

- [1] <https://www.iba-radiopharmasolutions.com/products/cyclotrons>
- [2] M. Verderi et al., PEPITES -ANR-17-CE31-0015 <https://anr.fr/Projet-ANR-17-CE31-0015>
- [3] B. Boyer et al., Nucl. Inst. and Meth. in Phys. Res. A 936 (2019) 29
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.09.134>
- [4] A. Zahradnik et al, Physica status solidi A, Vol. 215, issue 22, November 21, 2018
<https://doi.org/10.1002/pssa.201800383>
- [5] M.L. Gallin-Martel et al., invited talk, ANIMMA 2017, Liège, Belgium, published in IEEE,
<https://doi.org/10.1051/epiconf/201817009005> / thèse S. Curtoni 2018-2020 Université Grenoble Alpes / MONIDIAM référencé dans master projet CONDORH
- [6] <https://www.e6.com/>
- [7] <https://www.ii-vi.com/>
- [8] <http://www.ddk.com/>
- [9] F. Rarbi et al., R&D transverse DIAMASIC, collaboration LPSC Grenoble LPC Caen
https://indico.in2p3.fr/event/18911/contributions/71393/attachments/54181/70806/JTRSC_IN2P3-IRFU_LPSC_RARBI_2019.pptx.
- [10] <http://rd42.web.cern.ch/rd42/>
- [11] L. Bani et al. (RD42 collaboration), Journal of Instrumentation 13(01):C01029-C01029,
<https://doi.org/10.1088/1748-0221/13/01/C01029>
- [12] Tsukuba/Grenoble collaboration
<https://www.jsps.go.jp/english/e-bilat/index.html>
<https://lpsc-indico.in2p3.fr/Indico/event/1937/overview>
https://www.nims.go.jp/Diamond_detector_workshop/

<https://lpsc-indico.in2p3.fr/Indico/event/1937/overview>
https://www.nims.go.jp/Diamond_detector_workshop/