

# Des détecteurs de rayonnements en diamant

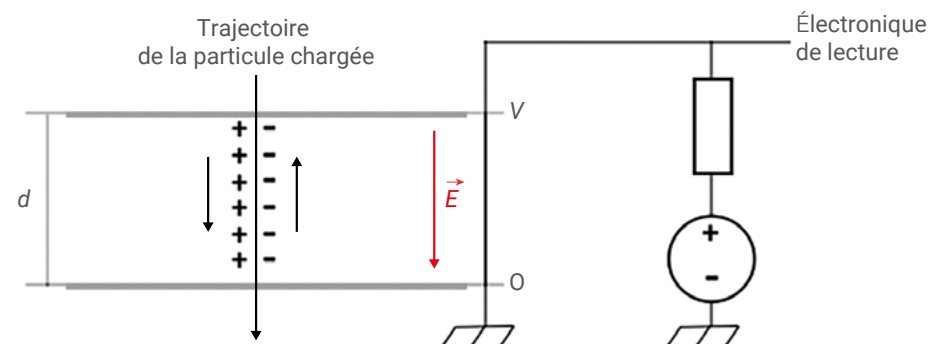
Johann Collot<sup>(1)</sup> (collot@in2p3.fr), Denis Dauvergne<sup>(1)</sup>, Marie-Laure Gallin-Martel<sup>(1)</sup> et Kewin Desjardins<sup>(2)</sup>

(1) Laboratoire de physique subatomique et de cosmologie (LPSC, UMR CNRS et Université Grenoble Alpes)  
53 avenue des Martyrs, 38026 Grenoble cedex

(2) Synchrotron Soleil, L'Orme des Merisiers, Départementale 128, 91190 Saint-Aubin

**En raison de ses remarquables propriétés physicochimiques, le diamant est utilisé depuis une cinquantaine d'années pour la confection de détecteurs de particules subatomiques. Sans prétendre être exhaustif, cet article fait le point sur les différents types de détecteurs existants ou en cours de développement. Il se conclut en évoquant les applications les plus courantes pour le diagnostic de faisceaux et la radiothérapie.**

**S**'il était possible de produire de grands monocristaux de diamant pur sans défaut à un coût économiquement accessible, nul doute que cela ferait de ce semi-conducteur un matériau quasi idéal pour la réalisation de détecteurs de particules à température ambiante (voir le premier article de ce dossier sur les propriétés physiques du diamant). En effet, dans ce semi-conducteur pur, la collecte des charges libérées par le passage d'une particule ionisante est extrêmement rapide (inférieur à la nanoseconde) et le signal est suffisamment intense pour permettre la détection des particules les plus faiblement ionisantes. De plus le diamant résiste aux conditions sévères de fonctionnement, en particulier dans des environnements sujets à de fortes doses de rayonnement. De ce fait, dès les années 1940, son usage à des fins de détection de particules a été exploré [1], avec très peu de succès initialement, en raison de la grande instabilité des signaux obtenus. Ce n'est qu'à partir des années 1970 que les premiers détecteurs de rayonnement suffisamment stables ont pu être construits, en France en particulier [2]. Au début des années 2000, un détecteur en diamant a été développé dans le but d'analyser en ligne très rapidement les propriétés (stabilité, luminosité et profil)



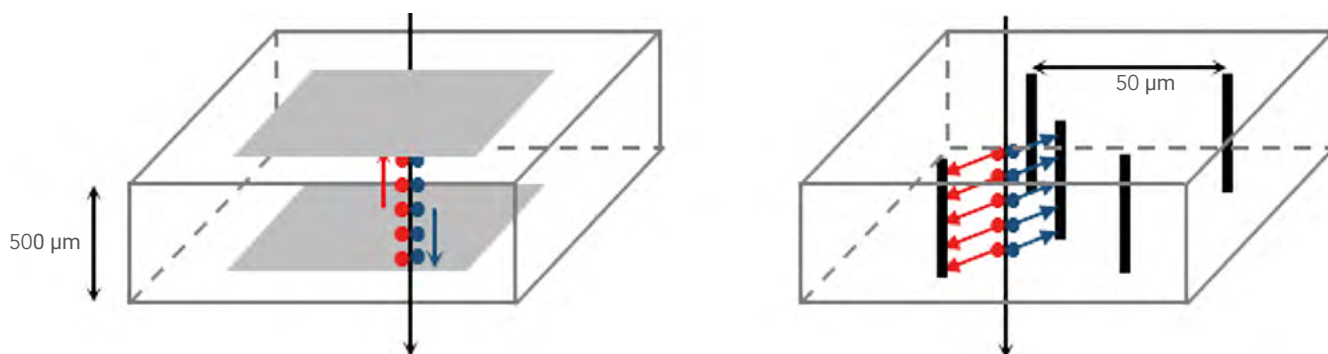
1. Principe de fonctionnement d'un détecteur diamant.

du faisceau de l'expérience BaBar du SLAC aux États-Unis [3]. Dès lors, toutes les grandes expériences installées sur collisionneur de particules (LHC, Tevatron...) ont eu recours au diamant pour contrôler en ligne la qualité de leurs faisceaux et réaliser ainsi une protection ultrarapide et à haute fiabilité de leurs équipements fragiles.

À la base, un détecteur de particules en diamant est simplement une chambre d'ionisation solide plane. Une description

très simplifiée en est montrée sur la figure 1. Un champ électrique externe appliqué au diamant permet de réaliser la collecte des charges (électrons et trous) libérées sur le passage d'une particule chargée. De ce signal, on peut tirer une mesure de temps précise ( $< 1$  ns), de position très fine ( $< 10$   $\mu$ m) et d'énergie partielle ou totale, bref de toutes les observables classiques d'un détecteur de particules.

>>>



**2. Comparaison entre un détecteur standard et un détecteur 3D.** À gauche, le détecteur standard où les électrodes sont des pixels planaires (quelques 100  $\mu\text{m}$  de côté typiquement) et à droite, le détecteur 3D où les électrodes sont des tiges traversantes (quelques  $\mu\text{m}$  de diamètre typiquement). Les points rouges et bleus montrent les trajectoires des électrons et des trous avant capture par les électrodes. À gauche, le signal est créé après 500 microns de traversée, à droite après 50 microns seulement. Le détecteur 3D est donc plus rapide, et la position, qui est celle de l'électrode, déterminée plus précisément.

>>>

## Les différentes familles de détecteurs en diamant

Toutes les topologies classiques de détecteurs à semi-conducteur ont déjà été explorées à l'aide de diamant. On distinguera ici les détecteurs obtenus par dépôt chimique en phase vapeur (CVD, pour *Carbon Vapor Deposition*) utilisant des cristaux monocristallins (sCVD) ou polycristallins (pCVD) et les détecteurs constitués de diamant hétéroépitaxié sur iridium (Dol pour *Diamond on Iridium*) [4]. Le capteur et sa granularité de lecture sont adaptés au type d'application visé : électrodes non segmentées, micropistes (*strips*), pixels. D'une manière générale, si l'on souhaite obtenir un détecteur précis, mesurant l'énergie avec des performances homogènes, on choisira un capteur sCVD, mais alors sa taille restera limitée ( $< 1 \text{ cm}^2$ ), alors que si l'on recherche un signal temporel extrêmement rapide ( $< 1 \text{ ns}$ ) sur une surface plus importante ( $\sim 10 \times 10 \text{ cm}^2$ ) on pourra utiliser un capteur pCVD, voire en Dol. Les capteurs peuvent être minces ( $\sim 1 \mu\text{m}$ ) pour la détection de noyaux de basse énergie ou plus épais ( $> 100 \mu\text{m}$ ) pour des particules de haute énergie, proches de leur pouvoir minimal d'ionisation. Si aucune information spatiale n'est exigée, on pourra simplement utiliser des électrodes non segmentées couvrant la totalité des capteurs. En revanche si, comme cela est souvent le cas, la position de particules doit être mesurée, cette position sera connue par la lecture des charges déposées sur des micropistes (une dimension) et, encore mieux, avec des pixels (deux dimensions), la troisième dimension étant fournie par l'empilement des capteurs.

Par ailleurs, le développement de détecteurs constitués de diodes en diamant (dopé) progresse rapidement, et suit l'évolution des composants électroniques de ce type [5]. Le dopage permet un fonctionnement du détecteur sans appliquer de champ électrique de polarisation externe, grâce au champ intrinsèque induit par les jonctions entre volumes différemment dopés. Ces champs peuvent être augmentés pour atteindre des régimes d'avalanche (une charge créée est alors multipliée dans le volume du détecteur sous l'action de ce champ). Néanmoins, cette technologie rencontre des difficultés de réalisation du dopage de type n à l'aide d'atomes de phosphore, nettement plus gros que les atomes de carbone.

La réalisation de détecteurs en diamant utilisant une géométrie de collecte de charges à trois dimensions (3D) constitue l'évolution technologique la plus avancée de ces dix dernières années [6]. La figure 2 présente le concept 3D comparé à la topologie planaire. Grâce à un faisceau laser, des électrodes traversantes en graphite sont réalisées dans le cristal, avec un espacement de l'ordre de quelques dizaines de micromètres. Un champ électrique externe est appliqué sur ces électrodes avec alternance de polarité entre colonnes voisines. La distance de dérive des charges est alors beaucoup plus petite, ce qui réduit d'autant le nombre de défauts et de centres de piégeage rencontrés. Ce sont ces défauts, créés lors de la réalisation des détecteurs ou par irradiation, qui limitent la valeur du signal collecté et la résistance des détecteurs aux fortes intensités. Les détecteurs de ce type sont donc plus rapides

et plus robustes au rayonnement intense. En revanche leur réalisation est infiniment plus complexe. Des résultats de tests en faisceaux ont montré que la résolution en temps de ces détecteurs varie selon leur configuration de 100 à 50 ps pour des particules faiblement ionisantes. On peut noter que pour des particules très ionisantes - engendrant donc de grands signaux - telles que les fragments de fission, des détecteurs en diamant standard (non 3D) peuvent atteindre des résolutions temporelles de l'ordre de 20 ps [7].

D'une manière générale, la fabrication massive de détecteurs en diamant de grande surface se heurte aux difficultés déjà présentées de croissance des cristaux, à leur coût encore élevé pour disposer de diamants sans défaut (d'où un manque d'intérêt économique comparativement au diamant de joaillerie où cette exigence est moindre) et à l'inhomogénéité spatiale des performances obtenues (en particulier lorsqu'il s'agit de diamant polycristallin). Les efforts fournis au cours de ces dix dernières années ont permis de faire quelques avancées, mais, si on compare avec le silicium, le chemin est encore long.

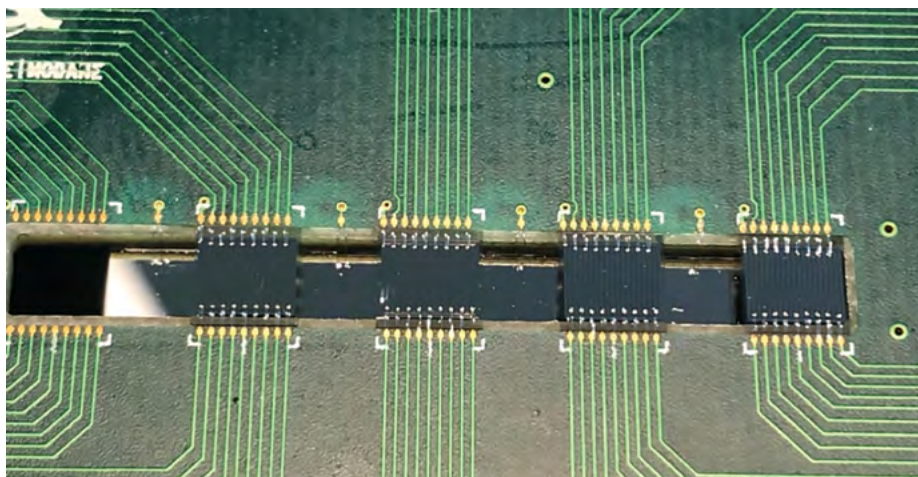
## Applications

Il serait vain et assurément ennuyeux de tenter de les citer toutes. L'histoire des détecteurs en diamant est riche et par conséquent presque tous les usages habituels de la détection de particules, qu'il s'agisse de recherche fondamentale ou d'applications industrielles, ont déjà été explorés [8]. Pour les raisons évoquées précédemment, les applications les plus

courantes correspondent à des situations ne nécessitant pas de détecteurs trop larges ( $> 100 \text{ cm}^2$ ), lorsqu'une réponse rapide est exigée ( $\sim \text{ns}$ ) et que les conditions d'exploitation requièrent un capteur robuste. C'est donc le plus souvent dans les systèmes de diagnostic de faisceaux sur les accélérateurs de particules [9] ou les sources de rayonnement synchrotron [10] que l'on rencontre les détecteurs en diamant. C'est aussi lorsque les mesures se font à proximité d'un faisceau de particules aux tout petits angles de diffusion [11].

En raison du faible nombre atomique du carbone, le diamant possède des propriétés dosimétriques proches de celles des tissus vivants. En conséquence, son utilisation dans les applications médicales a été largement explorée et continue de l'être. Des microdosimètres basés sur des diamants de taille submillimétrique sont actuellement commercialisés [12]. À titre d'exemple, le projet français DIAMANT impliquant plusieurs laboratoires du CNRS (voir une illustration en figure 3), vise entre autres la construction de moniteurs de faisceaux médicaux :

- un hodoscope de faisceaux de proton-thérapie (mesure de la position et du temps) très rapide ( $\sim 0,1 \text{ ns}$ ) permettant de mieux contrôler en ligne la valeur et la topologie du dépôt de doses lors des traitements [13] ;
- un moniteur à haute dynamique pour la *flash* protonthérapie pour laquelle toute la dose (la quantité d'énergie déposée par



3. **Projet DIAMANT.** Détecteur diamant constitué d'une barrette de huit diamants (2 x 4 carrés noirs superposés) et dont chaque micropiste (de largeur  $180 \mu\text{m}$ ) est connectée à une électronique de lecture intégrée.

unité de masse irradiée) nécessaire pour détruire une tumeur est délivrée en une fraction de seconde (effet *flash*) ; et

- un imageur dit *portal* (qui permet une dosimétrie en temps réel) pour le contrôle en ligne de la radiothérapie par micro-faisceaux X de rayonnement synchrotron. Cette thérapie utilise également l'effet *flash* avec des faisceaux très intenses.

## Conclusion

Au cours des dix dernières années, des avancées technologiques substantielles ont été apportées à la réalisation de détecteurs en diamant, concernant le type et la qualité du cristal, les topologies des capteurs et leur électronique de lecture. La confection d'un

détecteur de grande surface ( $\sim 1 \text{ m}^2$ ) se heurte toujours à la disponibilité de cristaux de taille adéquate à un coût accessible, mais des recherches se poursuivent en laboratoire afin de pallier cette difficulté. En plus de ses applications déjà très nombreuses pour le diagnostic de faisceaux auprès d'accélérateurs de particules, le diamant pourrait prochainement faire son entrée dans le domaine de la radiothérapie pour le contrôle en ligne du débit de dose. Bien que les détecteurs en diamant aient de nombreux atouts (rapides, précis, résistants aux radiations, et de surcroît peu bruyants et bons conducteurs thermiques), leur utilisation reste à ce jour hors du champ industriel en raison de la difficulté à produire avec la qualité requise le diamant lui-même. ■



1• P.J. Van Heerden, "The crystal counter", Thesis (1945) Utrecht ; R. Hofstadter, "Remarks on Diamond Crystal Counters", *Physical Review* **73** (1948) 631.

2• S.F. Koslov *et al.*, "Diamond nuclear radiation detectors", *Nuclear Instruments and Methods* **117** (1974) 277.

3• M. Bruinsma *et al.*, "CVD Diamonds in the BaBar Radiation Monitoring System", *Nuclear Physics B* **150** (2006) 164.

4• M. Schreck *et al.*, "Large-area high-quality single crystal diamond", *Materials Research Society Bulletin* **39** (2014) 504–510.

5• N. Donato *et al.*, "Diamond power devices: state of the art, modelling, figures of merit and future perspective", *Journal of Physics D* **53** (2019) 093001 ; T. Shimaoka *et al.*, "Ultrahigh conversion efficiency of betavoltaic cell using diamond pn junction", *Applied Physics Letters* **117** (2020) 103902.

6• F. Bachmair *et al.*, "A 3D diamond detector for particle tracking", *Nuclear Instruments and Methods A* **786** (2015) 97–104.

7• M.L. Gallin-Martel *et al.*, "Characterization of Diamond and Silicon Carbide Detectors with Fission Fragments", *Frontiers in Physics* **9** (2021) 732730.

8• C. Manfredotti, "CVD diamond detectors for nuclear and dosimetric applications", *Diamond and Related Materials* **14** (2005) 531.

9• A. Oh, "Diamond particle detectors systems in high energy physics", *Journal of Instrumentation* **10** (2015) C04038 ; J. Bol *et al.*, "Radiation hardness of diamond and silicon sensors compared", *Physica Status Solidi a* **204** (2007) 3004.

10• K. Desjardins *et al.*, "X-ray position-sensitive duo-lateral diamond detectors at SOLEIL", *J. of Synchrotron radiation* **25** (2018) 399.

11• G. Antchev *et al.*, "Diamond detectors for the TOTEM timing upgrade", *Journal of Instrumentation* **12** (2017) P03007.

12• [www.ptwdosimetry.com/en/products/microdiamond](http://www.ptwdosimetry.com/en/products/microdiamond)

13• S. Curtoni *et al.*, "Performance of CVD diamond detectors for single ion beam-tagging applications in hadrontherapy monitoring", *Nuclear Instruments and Methods A* **1015** (2021) 165757.