

Fiche projet de développement

DIAMANT / Marie-Laure Gallin-Martel



Réf Interne :	Référence interne laboratoire
Réf ATRIUM :	ATRIUM-XXXX
Titre / Title :	DIAMANT
Résumé / Summary:	<p>Les objectifs de ce projet pluridisciplinaire (applications médicales, physique nucléaire et des hautes énergies) sont le développement de détecteurs diamant innovants. La conception de ces derniers est envisagée en 6 étapes clés dans le document : 1) la mise en œuvre de techniques originales de caractérisation d'échantillons du commerce, ou obtenus par 2) croissance/dopage dans les laboratoires membre du consortium ou partenaires, 3) l'instrumentation du matériau en tant que chambre d'ionisation solide, 4) le développement d'une électronique de lecture et d'acquisition dédiée, 5) l'évaluation des performances sous faisceaux, 6) la simulation du transport et de la collecte des charges afin d'optimiser le fonctionnement des détecteurs pour ensuite envisager son portage ou sa valorisation. L'objectif scientifique final du projet étant de faire du diamant un détecteur performant, en rupture avec l'existant, pour la détection de particules.</p>

<p>Nom du porteur du projet Gallin-Martel Marie-Laure Email : mlgallin@lpsc.in2p3.fr</p>	<p>Nom du laboratoire porteur du projet LPSC Site Web Labo : https://lpsc.in2p3.fr/index.php/fr/</p>
<p>Signature numérique apposée sur version finale en PDF </p>	<p>Signature numérique apposée sur version finale en PDF Le Directeur du LPSC </p>

Laurent DEROME

	DIAMANT ML. GALLIN MARTEL	Réf :	ATRIUM-XXXXX
		Version :	1.0
		Date :	10/05/2023
		Page :	2/40

Suivi du document */History*

VERSION	DATE	HISTORY MODIFICATION	PAGES CHAPTERS
1.0	05/04/2023	Mise à jour du document initial	Tous

Acronymes/*Acronyms*

ADC Analog to Digital Converter

ASIC Application Specific Integrated Circuit

BC : Bunch Counting

BE : Back End

CCE : Charge Collection Efficiency

CSI : Comité de Suivi Individuel de thèse / Conseil Scientifique Institut.

CSL : Conseil Scientifique de Laboratoire

CVD Dépôt Chimique en phase Vapeur

DAQ : Data AcQuisition

DFC Discriminateur à Fraction Constante

DRD : Detector R&D

eBIC : electron Beam Induced Current

ECFA : European Committee for Future Accelerator

ETP : Equivalent Temps Plein

FF : Fragment de Fission

FE : Front End

	DIAMANT ML. GALLIN MARTEL	Réf :	ATRIUM-XXXXX
		Version :	1.0
		Date :	10/05/2023
		Page :	3/40

IBIC : Ion Beam Induced Current

Jn : Jalon n

KDP : Key Decision Point

MEB : Microscope Electronique à Balayage

pCVD Polycristalline CVD

PBS : Product Breakdown Structure

QDC Charge to Digital Converter

RT : Radiothérapie

S1 à 2 : Semestre 1 ou 2

sCVD Single Crystal CVD

SRIM : logiciel Stopping and Range of Ions in Matter

T1 à 4 : Trimester 1 à 4

TC : Train Counting

TDC Time to Digital Converter

ToF : Time Of Flight

TRL : Technology Readiness Level

WBS : Work Breakdown Structure

WG : Working Group

WP : Work Package

XBIC : X-rays Beam Induced Current

	DIAMANT ML. GALLIN MARTEL	Réf :	ATRIUM-XXXXX
		Version :	1.0
		Date :	10/05/2023
		Page :	4/40

Sommaire /*Table of contents*

1	Objectifs du projet.....	8
1.1	Cadre scientifique.....	8
1.2	Positionnement du projet	9
1.3	Contexte théorique et phénoménologique.....	12
1.4	Contexte technologique	14
2	Description des tâches - responsabilités - organisation.....	19
2.1	Description de l'arborescence produit - PBS.....	19
2.2	Description des travaux techniques - WBS.....	22
2.3	Responsabilités.....	23
2.4	Organisation	24
2.5	Analyse des risques du projet.....	25
2.6	Plan de développement du projet.....	26
2.7	Plan Qualité / Assurance Produit.....	26
3	Ressources humaines	27
4	Ressources financières	28
5	Ressources de calcul.....	31
5.1	Gestion des données	31
5.2	Demandes au CC-IN2P3.....	32
5.3	Demandes autres plateformes	32
6	Validation des laboratoires participants et visas.....	32
7	Articulation avec les DRDi-j (Detector R&D) CERN : DRD 3 « Solid State Detector ».....	33
7.1	Contexte du DRD	33
7.2	Description des liens avec les DRD.....	34
7.3	Organisation	36
7.4	Ressources Humaines.....	36
7.5	Ressources financières	37
8	Liste des documents accompagnant la fiche projet.....	37

	DIAMANT ML. GALLIN MARTEL	Réf :	ATRIUM-XXXXX
		Version :	1.0
		Date :	10/05/2023
		Page :	5/40

9	Livrables du projet.....	37
10	Evaluation du coût de l'étape suivante	38
11	Calendrier du projet avec jalons principaux – Macro planning.....	40

	DIAMANT ML. GALLIN MARTEL	Réf :	ATRIUM-XXXXX
		Version :	1.0
		Date :	10/05/2023
		Page :	6/40

Tableaux/*Tables*

<i>Tableau 1 Développements technologiques par "tâche" et par "objet"</i>	17
<i>Tableau 2: Risques identifiés pour le projet.....</i>	25
<i>Tableau 3: Chercheurs et enseignant-chercheurs IN2P3 impliqués dans le projet.....</i>	27
<i>Tableau 4: Ingénieurs et techniciens IN2P3 impliqués dans le projet</i>	27
<i>Tableau 5 : Personnels de laboratoires autres qu'IN2P3 impliqués dans le projet</i>	28
Tableau 6 Demande de budget 2023 récapitulatif par poste et par laboratoire	29
<i>Tableau 7: Ressources financières de l'IN2P3.....</i>	30
<i>Tableau 8: Ressources financières autres qu'IN2P3</i>	31
Tableau 9 Correspondance "objectifs / plans de développement" dans DIAMANT et "contributions proposées aux WG 3.6 et WG 3.5" du DRD3 "solid state detector"	35
Tableau 10 RH disponibles contribuant à des activités en cours	36
Tableau 11 RH additionnelles considérées.....	36
Tableau 12 RF disponibles (budget annuel/récurent accordé aux activités existantes).....	37
Tableau 13 RF additionnelles considérées	37

Documents applicables ou de référence

Titre	ATRIUM ID
La gouvernance des projets de recherche à l'IN2P3	ATRIUM-390030
Aide-mémoire pour un projet IN2P3	ATRIUM-282506
Processus d'affectation des RH aux projets	ATRIUM-101283
Modèle de présentation pour les Points d'Avancements Mensuels des Projets	ATRIUM-388418
Organisation des projets de développement à l'IN2P3	A écrire
Aide à la rédaction d'un plan de développement pour un projet	ATRIUM-374153
Aide à la rédaction d'un plan de management pour un projet	ATRIUM-395311
Plan Assurance Produit IN2P3	ATRIUM-9538
Guide à l'élaboration d'un Plan Qualité	ATRIUM-9537
Guide Assurance Produit IN2P3	ATRIUM-116322

	<p style="text-align: center;">DIAMANT</p> <p style="text-align: center;">ML. GALLIN MARTEL</p>	Réf :	ATRIUM-XXXXX
		Version :	1.0
		Date :	10/05/2023
		Page :	7/40

Thématique du projet

Thématique(s) adressée(s) par le projet <i>(au sens des thématiques IN2P3)</i>
<p><input checked="" type="checkbox"/> Particules et Hadronique (PH)</p> <p><input type="checkbox"/> Astroparticules et Cosmologie (AC)</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Accélérateurs et Technologies (AT)</p> <p><input type="checkbox"/> Data & Computing (DC)</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Nucléaires & Applications (NA)</p>

	DIAMANT ML. GALLIN MARTEL	Réf :	ATRIUM-XXXXX
		Version :	1.0
		Date :	10/05/2023
		Page :	8/40

1 Objectifs du projet

1.1 Cadre scientifique

De nouveaux accélérateurs d'ions sont actuellement développés, soit pour les applications médicales (radiothérapie X, hadronthérapie, radiothérapie par rayonnement synchrotron et « FLASH » thérapies), soit pour la physique (expériences de radiolyse en physique nucléaire, détection de particules au minimum d'ionisation MIP en physique des hautes énergies). Ces développements créent 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, équivalence tissu humain) font de ce semi-conducteur un parfait candidat pour répondre aux exigences de monitoring de tels accélérateurs et à la détection de particules.**

Dans le contexte de la radiothérapie (RT), le contrôle en ligne de la dose déposée est une recommandation générale et impérieuse pour une autorisation de pratique en mode clinique. Cette question soulève un nombre important de challenges avec l'avènement de nouvelles RT mettant en jeu une grande précision balistique telles que l'hadronthérapie proton ou carbone qui peuvent offrir une efficacité biologique accrue par rapport aux RT X classiques, avec un plus grand écart entre les effets aux tissus sains et aux tissus tumoraux. Les défis liés au contrôle en ligne sont poussés à leur paroxysme dans le cas de thérapies qui reposent sur un fractionnement spatial (Microbeam Radiation Therapy ou MRT), et/ou temporel du faisceau (FLASH thérapie), qui permet de délivrer des doses de l'ordre du Gy en 1 ms, voire 1 μ s. Dans ce cas, la rapidité avec laquelle la dose est délivrée rend le contrôle en temps réel de l'irradiation plus exigeant sur la réponse du système de détection : adaptation de la capacité de comptage des détecteurs, de l'électronique et de l'acquisition des données.

Par ailleurs, d'autres types de RT innovantes dites « ciblées », qui permettent une irradiation locale des cellules cancéreuses grâce à l'utilisation d'un vecteur chimique spécifique (capture neutronique par le bore ou BNCT et radiothérapie interne vectorisée ou RIV), sont d'un grand enjeu thérapeutique. Dans ce contexte, la production de données de survie cellulaire pour les ions mis en jeu dans les processus physiques (p , α et Li) et les énergies (<10 MeV/u) d'intérêt est utile, afin de paramétrer les modèles biophysiques sous-jacents (NanOx à l'IN2P3) de manière robuste. Ces expériences nécessitent de pouvoir disposer de faisceaux de référence auprès d'accélérateurs dédiés dont la calibration en énergie puisse être garantie par un système de vérification indépendant.

Enfin, dans le cadre de l'ensemble des RT, les activités de radiobiologie sur microfaisceaux s'inscrivent dans l'optique de mesurer les effets physico-chimiques précoces, directs et indirects, associés à l'irradiation des tissus, avec un contrôle balistique à l'échelle du micromètre. Par la possibilité qu'ils offrent de cibler des compartiments cellulaires spécifiques, les microfaisceaux sont des outils essentiels pour sonder les effets non ciblés à l'ADN et les mécanismes sous-jacents. À nouveau dans ce cas précis, le monitoring faisceau est un élément clé nécessitant la réalisation de détecteurs ultra minces très performants en termes de comptage pour permettre d'opérer celui-ci à l'échelle de l'ion unique et interférant avec le faisceau tout en minimisant la dégradation de ces caractéristiques.

Les problématiques évoquées précédemment en termes d'instrumentation faisceau ne sont pas uniquement propres au domaine des RT. En effet, dans le contexte de la physique des hautes énergies, l'augmentation de la luminosité pour les futures prises de données au LHC ou auprès de futurs grands accélérateurs implique le développement de détecteurs adaptés dans des technologies en rupture avec l'existant.

	DIAMANT ML. GALLIN MARTEL	Réf :	ATRIUM-XXXXX
		Version :	1.0
		Date :	10/05/2023
		Page :	9/40

Les objectifs de DIAMANT sont le développement de détecteurs diamant innovants. L'objectif scientifique final est de démontrer que le diamant peut devenir un détecteur performant en rupture avec l'existant pour la détection de particules. **Ces développements initiés dans le cadre du R&T DIAMTECH et de l'ANR DIAMMONI** (LPSC, SUBATECH et GIP ARRONAX) s'effectuent au sein d'un nouveau consortium DIAMANT constitué de plusieurs équipes à l'IN2P3, LPSC (porteur), GIP ARRONAX, IJClab, LP2I Bordeaux, SUBATECH en collaboration avec des équipes à l'INP Institut Néel (équipe SC2G), à l'IRSN (PSE-SANTE/SDOS/LMDN), à l'INSERM (STROBE) et à l'international CERN-RD42, INFN-Milan, IFJ-PAN Cracovie et finalement avec des laboratoires japonais dans le cadre du programme d'échange JSPS - CNRS Diamond Detector CNRS : LPSC, IJClab, SUBATECH et Institut Néel Japon : NIMS, AIST, KEK et Université de Tsukuba.

1.2 Positionnement du projet

Description générale de DIAMANT

DIAMANT se propose d'étudier l'utilisation d'un matériau semi-conducteur à grand gap, le diamant, pour la détection de particules en se basant sur le concept de chambre d'ionisation solide. L'enjeu est de faire du diamant, matériau aux propriétés exceptionnelles, un détecteur ultra performant en rupture avec l'existant. Dans DIAMANT les objectifs sont d'aller au-delà du R&T DIAMTECH dans nos connaissances sur le matériau et son adéquation avec les problématiques de détection dans nos applications à l'IN2P3, sur la base du socle de connaissances que le R&T DIAMTECH nous a permis d'acquérir. La finalité du R&T DIAMTECH était de concevoir 4 détecteurs en technologie diamant, celle de DIAMANT est de mettre en place une stratégie d'approche expérimentale en 6 étapes clés («tâches» paragraphe 2.2). **L'objectif scientifique est de hisser cette technologie au rang de celles qui peuvent être utilisées là où aucune autre ne peut l'être, c'est-à-dire dans les conditions les plus extrêmes en termes de résolution temporelle, de résolution en énergie, de tenue aux radiations, de linéarité de la réponse en fonction du flux de particules incidentes sur une large gamme dynamique.**

L'expertise antérieure sur la technologie et le rayonnement académique

Ce travail sur l'utilisation du diamant comme médium de détection pour **l'identification de particules** ou le **monitorage faisceau** a été initié en 2012 dans le cadre de l'ANR MONODIAM (2012-2017 IPHC porteur – LPSC, ICube et LSPM Villetaneuse). Il a été proposé de réaliser des prototypes de détecteurs de particules sur substrat de diamant monocristallin de grandes dimensions, en vue de l'augmentation de luminosité sur le LHC. Ce programme de recherche générique avait pour objectif d'évaluer les potentialités de tels détecteurs dans les futurs programmes de physique. Le LPSC fait partie depuis lors de la collaboration **RD42 du CERN**. Des bancs de tests (source alpha et beta) ont été développés au LPSC pour caractériser de manière systématique les performances du matériau.

À l'ANR MONODIAM ont succédé tout d'abord **1) MoniDiam**, (2014-2016) porté par le LPSC, financé par le Canceropôle CLARA pour les premières études de détecteurs diamant polycristallin pour l'hadronthérapie, **2) CLARYS-UFT** (2017-2021 LPSC porteur – CPPM, IP2I Lyon et CREATIS financé par l'INCA) dont un des objectifs était d'utiliser les performances du diamant pour concevoir un hodoscope faisceau en amont de la caméra Compton de CLARYS (monitorage hadronthérapie) afin d'atteindre une résolution temporelle à 100 ps permettant une réduction notable des bruits de fond et donc une performance accrue de l'ensemble de détection **3) l'ANR-DIAMMONI** (2020-2024 LPSC porteur – SUBATECH et GIP ARRONAX) pour le développement d'un moniteur de faisceaux pulsés pour des haut flux de protons (68 MeV) ou d'alpha (70 MeV) pour équiper la ligne recherche du cyclotron du GIP ARRONAX et mener des recherches pré-cliniques

	DIAMANT ML. GALLIN MARTEL	Réf :	ATRIUM-XXXXX
		Version :	1.0
		Date :	10/05/2023
		Page :	10/40

en thérapie FLASH **4) PAIR TUMC** (2022-2025 STROBE-INSERM porteur – LPSC, IPNL, cliniques vétérinaires, CHU et ESRF financé par l'INCA) pour le développement d'un détecteur en transmission pour l'imagerie portale en radiothérapie par rayonnement synchrotron **5) DéFI DiaMs** (2022 – 2025 LPSC porteur - Institut Néel, LP2I Bordeaux et IRSN Cadarache financé par la MITI) pour un moniteur de microfaisceaux ultra mince obtenu par des procédés de gravure innovants et permettre un comptage ion par ion pour des activités de radiobiologie sur des lignées cellulaires.

Par ailleurs à l'international, outre notre participation à la collaboration **RD42 du CERN** nous avons obtenu un **JSPS-CNRS** (LPSC, IJClab, SUBATECH et GIP ARRONAX) avec des laboratoires japonais (MRS, AIST, KEK et Université de Tsukuba) sur l'utilisation de jonctions pn pour la détection de particules.

Nous disposons donc de plus d'une **dizaine d'années d'expérience** au travers de nombreux projets soutenus par l'ANR, l'INCA, la MITI et à l'IN2P3 avec le **R&T DIAMTECH** (voir détail en 1.4). Nous pouvons revendiquer détenir une expertise reconnue dans le milieu des détecteurs semi-conducteurs en technologie diamant. En effet, sur le plan académique, trois thèses ont été soutenues depuis 2020 (S. Curtoni en 2020, N. Rosuel en 2021 et A. Portier en 2023), trois sont en cours P. Everaere (soutenance T4 2023), R. Molle (ANR DIAMMONI soutenance prévue en 2024) et C. Léonhart (DéFI DiaMs en 1^{ère} année de thèse). Nous sommes **signataires de 11 publications** dont 5 parues, 1 en revue actuellement avec un petit nombre de signataires et 5 dans le cadre de la collaboration RD42. Nous avons effectué des présentations dans **30 conférences internationales, dont 9 en tant que conférencier invité**. Alexandre Portier a reçu un **prix (silver award) à l'International Conference on New Diamond and Nano Carbons en Juin 2021** pour sa présentation «Time of Flight Measurement Using Electron Beam Induced Current on a Single Crystal Diamond Detector».

Les étapes clés déjà validées dans la conception de détecteurs diamant

Le R&T DIAMTECH s'articulait autour de 4 WP. La finalité de chacun était la conception d'un détecteur en technologie diamant. Les études menées dans chaque WP (paragraphe 1.4) nous ont permis de franchir des étapes clés. Grâce au R&T DIAMTECH nous disposons donc désormais :

- 1) de bancs de tests permettant la caractérisation systématique de la collecte de charges dans le volume actif** utilisant, des sources (alpha et beta), des faisceaux d'électrons (eBIC et ToF eBIC – thèse A. Portier voir paragraphe 1.3), d'ions (IBIC) ou de rayons X (XBIC) pour mesurer la CCE (Charge Collection Efficiency). L'utilisation systématique de ces méthodes va permettre d'optimiser les techniques de croissance que nous comptons mettre en œuvre dans DIAMANT.
- 2) de techniques d'instrumentation élaborées** (voir document « Description du WBS »),
- 3) de circuits électroniques frontaux (FE) développés dans nos laboratoires** (voir document « Description du WBS »),
- 4) de dispositifs (firmware et software) d'acquisition et de traitement de données permettant d'étudier en ligne et hors ligne les performances de prototypes avec des faisceaux d'ions, d'électrons ou de rayons X** (voir document « Description du WBS »).

Les nouveaux enjeux liés à DIAMANT et les retombées attendues

DIAMANT va permettre, grâce à cette connaissance scientifique et ces savoir-faire technologiques et expérimentaux précédemment acquis, de rajouter **2 nouveaux axes de recherche** :

- 1) la croissance de volumes actifs** avec pour objectif d'obtenir :
 - a) des diamants de grande surface monocristallin (sCVD) de l'ordre du cm², **gain d'un facteur 4 en surface par rapport à ce qui est disponible actuellement « sur les étagères »**,

	DIAMANT ML. GALLIN MARTEL	Réf :	ATRIUM-XXXXX
		Version :	1.0
		Date :	10/05/2023
		Page :	11/40

- b) des empilements de couches avec des dopages p comme dans le cas du $\Delta E-E$ de DIAMTECH ou n comme dans les cas des jonction pn japonaises (JSPS-CNRS) pour proposer des détecteurs ultra compacts **ne nécessitant qu'une très faible polarisation**,
- c) des diamants polycristallins (pCVD) dont on pourrait maîtriser l'épaisseur à la différence de ceux qui sont disponibles commercialement mais aussi la densité en joints de grains qui font du diamant polycristallin un diamant « segmenté » structuré en « colonnes » ce qui peut présenter **un intérêt pour les très hauts flux pour lesquels les propriétés du diamant pCVD peuvent se révéler avantageuses par rapport à celles du sCVD**, notamment par des impulsions plus brèves (durées de vie limitées des porteurs de charges).

Ces trois aspects seront investigués grâce aux laboratoires membres (LPSC équipe plasma) ou partenaires externes (Institut Néel, LSPM Villetaneuse et Université de Tsukuba) actuels dans nos projets qui ont une expertise avérée et mondialement reconnue.

2) l'élaboration d'outils de simulation du fonctionnement de la chambre d'ionisation solide : l'évaluation des performances sous faisceaux des détecteurs mis en œuvre dans DIAMTECH a soulevé un certain nombre de questions comme par exemple : la forme des signaux, le transport ou la collecte de charges. Dans DIAMANT, nous nous proposons de développer un logiciel de simulation basé sur la résolution des équations de dérive-diffusion prenant en compte des paramètres comme le piégeage et la recombinaison de charges pour aider à la compréhension des interprétations physiques et proposer des géométries de détecteurs optimisées.

Enfin, en ce qui concerne la **lecture des signaux, l'activité de R&D en électronique va se poursuivre dans DIAMANT**. Des « briques » (préamplificateur de courant, QDC, DFC, TDC, ...) ont été déjà développées dans le R&T DIAMTECH majoritairement en électronique discrète (sauf ASIC QDC et TDC dans le R&T DIAMASIC). **Poursuivre nos recherches pour concevoir une électronique intégrée** permettant 1) la pré amplification de courant ou 2) des conversions « analogique numérique » rapides (ADC rapides 8 bits 500 MHz), **nous permettrait d'envisager un plus grand nombre de voies de lecture et donc une plus grande surface active couverte avec un détecteur compact pour répondre aux exigences du monitoring faisceau**.

DIAMANT : des détecteurs en rupture avec l'existant.

Toutes ces étapes clés que nous proposons de développer dans DIAMANT (volume actif, caractérisation, instrumentation, électronique, simulation et tests en faisceaux) nous permettraient de maîtriser, de manière générique, dans nos applications présentes et futures, tous les aspects liés à la conception de détecteurs DIAMANT. L'objectif est de disposer de détecteurs **avec des performances extrêmes : de résolution en temps** (20 ps pour la détection de fragments de fission - mesuré à l'ILL, et 100 ps pour des protons de 68 MeV à ARRONAX), **de comptage** (ion par ion - mesuré en microfaisceaux à AIFIRA et dans des trains de plusieurs milliers de protons - mesuré à ARRONAX ou sur le faisceau ALTO à IJCLab), pouvant opérer dans **des environnements hautement radiatifs, sans perte de linéarité, sur une large gamme dynamique** (de 1Gy/s à 10^4 Gy/s - mesuré en X à l'ESRF) en jouant sur 1) la dimension (longitudinale à l'axe des faisceaux) du volume actif 2) sa nature (sCVD vs pCVD) 3) une collecte de charges optimisée (segmentation des électrodes guidée par les travaux en simulation) et 4) les performances des électroniques frontales (FE) et contrôle commande et acquisition de données (BE).

Echéance décisionnelle souhaitée pour le projet

On considère que, à l'IN2P3, le **R&T DIAMTECH était KDP0** (Key Decision Point). L'expérience que nous avons acquise dans de nombreux projets, la démonstration de faisabilité que nous avons effectuée dans DIAMTECH avec le développement à l'échelle 1 d'un imageur portal IDSYNCHRO de 153 voies constitué de 9 diamants métallisés par pistes, montés en barrette avec une électronique de lecture intégrée et un système de traitement des données (voir paragraphe 1.4) nous conduit à proposer que **DIAMANT soit KDP1**.

1.3 Contexte théorique et phénoménologique

Les travaux menés au cours du **R&T DIAMTECH** dans le cadre du WP portant sur la conception d'un **télescope monolithique diamant** se sont accompagnés d'une **étude en physique fondamentale relevant du domaine de l'étude de la matière condensée**. Celle-ci avait pour cadre la thèse d'A. Portier¹, soutenue en 2023 et le projet **DIATEL** (porteur D. Dauvergne LPSC) financé par l'IRS à l'UGA. Au cours de la thèse nous avons développé un banc de tests en utilisant un MEB (Microscope Electronique à Balayage) pourvu d'un beam blanker (Figure 1) permettant de dévier le faisceau d'électrons. En conséquence, cela a permis d'induire un courant dans un échantillon diamant à l'aide d'un faisceau d'électrons pulsé. **L'objectif était non seulement de mimer l'impact d'une particule faiblement pénétrante pour nos développements détecteurs mais aussi d'étudier la mobilité des porteurs de charges μ** en mesurant, sur le signal de sortie, « le temps de vol », noté t_{drift} sur la Figure 1 considérant que $v_{drift} =$

$\frac{d}{t_{drift}}$ et $v_{drift}(E) = \mu E$ où d est l'épaisseur du diamant, v_{drift} la vitesse de dérive des porteurs et E la valeur du champ électrique externe appliqué pour faire dériver les charges dans le volume.

Pour une chambre d'ionisation solide le signal mesuré va correspondre à la superposition des signaux induits par la collecte des deux types de porteur sur chacune des électrodes. La forme « carrée » des signaux observée, dans le cas d'une particule faiblement pénétrante, est expliquée par le théorème de Ramo. Pour une particule qui s'implante proche de la surface, la distance parcourue par l'un des porteurs (électrons Figure 1) est très petite devant celle parcouru par l'autre (trous Figure 1). Expérimentalement le signal correspondant au petit déplacement ne sera pas observable. Il sera filtré par l'électronique FE et il en résultera que le signal mesuré va correspondre à la collecte du porteur qui aura traversé la plus grande distance dans l'échantillon. En inversant la polarité du champ appliqué, il va donc être possible d'étudier séparément les mobilités des deux types de porteurs.

De nombreuses techniques ont été utilisées pour caractériser les propriétés de transport des porteurs de charges dans le diamant (Figure 2 CWCR pour Continuous Wave Cyclotron Resonance, TRCR pour Time Resolved Cyclotron Resonance et ToF pour temps de vol). En ce qui concerne les mesures par temps de vol, généralement, elles reposent sur des particules alpha (issues de sources) qui déposent leur énergie près de la surface du diamant. Récemment, des expériences basées sur un laser pulsé ont permis de mesurer la

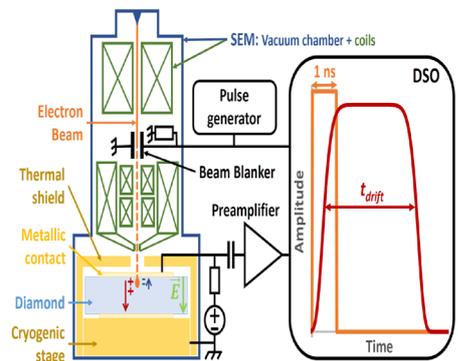


Figure 1 Gauche, représentation schématique du système ToF eBIC dérivé d'un MEB. Droite, en orange signal pulsé d'électrons induit sur échantillon, rouge signal résultant sur le diamant. t_{drift} mesure le temps de dérive des charges, ici des trous qui traversent toute l'épaisseur du diamant pour être collectés.

¹ co-direction ML Gallin-Martel pour PNAM (Physique Nucléaire et Applications Médicales) au LPSC et J. Pernot, professeur à l'UGA, responsable de l'équipe SC2G (Semi-Conducteurs à Grand Gap) à l'Institut Néel.

Réf :	ATRIUM-XXXXX
Version :	1.0
Date :	10/05/2023
Page :	13/40

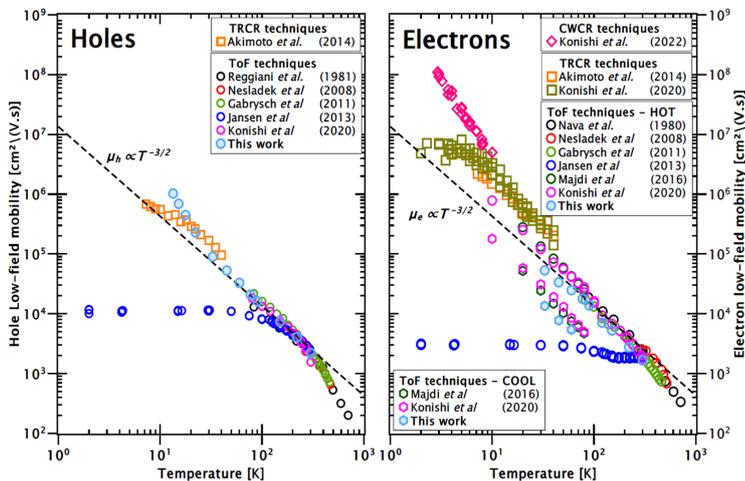


Figure 2 Mesure de la mobilité des porteurs de charges en fonction de la température, comparaison avec l'état de l'art.

mobilité des porteurs de charge en fonction de la température. Dans ce cadre, des résultats **jusqu'à 77 K ont été publiés**. Avec la technique que nous avons développée et nommée **ToF – eBIC** (ToF pour Time of Flight et eBIC pour electron Beam Induced Current) nous avons pu caractériser les propriétés de transport de charges de 13 à 300K. En effet il était possible de faire circuler, de manière contrôlée (Figure 1) au niveau de l'échantillon de l'hélium pour monitorer la température de ce dernier. Les résultats obtenus (Figure 2) sont à l'état de l'art. Nous avons obtenu une mesure de la mobilité à faible champs des trous de $(1.03 \pm 0.04) \times 10^6 \text{ cm}^2/(\text{V.s})$ à **13K** soit trois ordres de grandeur au-dessus de celle

mesurée à température ambiante. D'un point de vue **1) théorique, on a pu constater qu'on s'éloignait du modèle en $T^{-3/2}$** qui ne prend pas en compte la diffusion inélastique des trous sur les phonons acoustiques et **2) applicatif, ces résultats ouvrent la voie à de futures applications liées notamment au transport d'informations quantiques**. En effet, une approche technologique prometteuse étudiée actuellement pour l'informatique quantique est la réalisation de qubits basés sur ce que l'on appelle les centres de lacunes d'azote (NV) dans le réseau cristallin du diamant. Les valeurs de mobilité que nous avons obtenues permettent d'envisager des parcours libres de plus de dix micromètres pour la réalisation de dispositifs quantiques nécessitant un transport cohérent et donc balistique entre des qubits.

Ces travaux seront poursuivis dans le cadre de DIAMANT en collaboration avec l'Institut Néel mais aussi avec des équipes japonaise (Konishi et al) et suédoise (Majdi et al) auteurs des résultats présentés sur la Figure 2. En effet au-delà des applications quantiques précitées, la mobilité est une propriété importante pour les applications de détection rapides et à haut débit. Sa mesure est un enjeu clé dans le domaine des développements de détecteurs pour des applications nucléaires, de physique des particules ou médicales. Dans ce contexte, le ToF-eBIC est une toute nouvelle façon d'étudier avec précision la dérive et la collecte des porteurs de charge en fonction de la température aussi basse que 13 K².

² Une publication A. Portier, F. Donatini, D. Dauvergne, ML Gallin-Martel et J. Pernot, « Carrier mobility up to $10^6 \text{ cm}^2/(\text{V.s})$ measured in a single-crystal diamond by the time of flight electron-beam induced current technique » vient d'être acceptée (juin 2023) dans la revue Applied Physics Letters).

	DIAMANT ML. GALLIN MARTEL	Réf :	ATRIUM-XXXXX
		Version :	1.0
		Date :	10/05/2023
		Page :	14/40

1.4 Contexte technologique

Cette partie est complétée par un TRL plan qui accompagne ce document

[Développements en cours avec TRL et poursuite dans le cadre du master DIAMANT](#)

Objet N°1 : volumes actifs

En cours (divers projets)	Détecteur	$\Delta E - E$ Télescope monolithique diamant									Croissance Membrane pCVD pour moniteur faisceau								
	Projet	R& T DIAMTECH (2020 2022)									ProExtenD (SATT) (2017-2019)								
		DIATEL (IRS UGA) partenaire Institut Néel (INP) 2020 - 2022																	
	Cahier des charges	Système de d'identification compact de particules à faible parcours (alpha qq MeV et fragments de fission expérience LOHENGRIN à l'ILL)									Développement d'une technologie plasma pour procédé industriel de synthèse de diamant polycristallin (pCVD)								
	TRL	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9
DIAMANT	Technologies critiques	Croissance épitaxiée de couches diamants fortement dopées au bore p++ de très faible épaisseur (électrode intermédiaire de contact) entre étage E (substrat commercial) et ΔE Reprise épitaxie sur couche dopées p++ pour étage ΔE Nécessité d'amélioration de la qualité de croissance cristalline pour réduire la densité d'hilllocks avec partenaire DIAMFAB startup Institut Néel									Croissance de couches diamant pCVD contrôlées en termes d'épaisseur, de densité des joints de grains, de surface utile et de vitesse de croissance. Caractérisation de la collecte de charges et tests fonctionnels en tant que détecteur intégré (monitorage faisceaux).								
	TRL	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9

1 nécessitant de soit de continuer l'activité de R&D soit de concevoir de nouveaux développements

Légende code couleur cellules : nouveau, en cours, validé, terminé

Les TRL plans détaillés sont dans un document séparé attaché à la fiche projet.



DIAMANT

ML. GALLIN MARTEL

Réf :	ATRIUM-XXXXX
Version :	1.0
Date :	10/05/2023
Page :	15/40

Objet N°2 : moniteurs faisceaux

EN COURS (divers projets)	Moniteur	Hodoscope	Imageur portal	Faisceaux pulsés grande dynamique	μ faisceaux	Bio-ALTO
	Projet	CLARYS – UFT 2017 - 2021	R&T DIAMTECH (2020 2022)		CNRS MITI DéFi-DiaMs 2023 - 2025	PICTURE 2021 - 2025
			PAIR TUMC 2022 – 2025 IRGA UGA 2023-2026	ANR DIAMMON 2020 - 2024		
	Faisceau	Hadronthérapie Proton 65 MeV / 150MeV Carbone 400 MeV/n Particule unique	Rayons X 50 à 200 keV Segmentation spatiale μ faisceaux Haut débit 10 ⁵ Gy/s	ARRONAX Alpha 70 MeV Protons 68 MeV Grande dynamique : Particule unique Intensité FLASH	AIFIRA Proton 1à 3 MeV Alpha 1.5 à 3 MeV MIRCOM Proton 1 à 4 MeV Alpha 1 à 6 MeV B, C, O, ... jusqu'à 8 à 10 MeV	ALTO Protons 3 à 25 MeV Alpha et ⁷ Li 2 à ~40 MeV
	Cahier des charges	Localisation XY ~mm Résol. en temps ~100 ps	Localisation 1D μfaisceaux Intégration de charges Linéarité de 1 Gy/s à 10 ⁵ Gy/s	Bunch counting (BC) : Intégration de charges dans le bunch (4ns) en régime continu jusqu'à qq dizaines de particules par bunch Train Counting (TC) : Intégration dans un train de bunchs de durée et d'intervalles variables (typiquement 100 ms – 1 μs) linéarité de 1Gy/s à 10 ⁵ Gy/s	Membrane diamant de taille < 1μm pour être traversante aux μfaisceaux d'ions et servir de fenêtre d'extraction Comptage ion par ion	Comptage des ions en intégration, non interceptif faisceau primaire (mesure dans halo), mesure de leur énergie, mesure de dérive du faisceau grâce à 4 positions de diamants opposés
TRL	3 4 5 6 7	3 4 5 6 7	3 4 5 6 7	3 4 5 6 7	3 4 5 6 7	
DIAMANT	Technologies critiques ¹	Taille réduite sCVD) disponibles commercialement Développement électronique intégrée (nb voies de lecture)	Néant Duplication moniteur aval (= portal) en détecteur amont	Performances sCVD vs pCVD à très hauts flux (besoin «membranes») Développement électronique intégrée (nb voies de lecture) en mode BC	Mise en œuvre de techniques de gravure profonde sur diamant sCVD Montage sur PCB 3D	Amincissement diamant sCVD par découpe laser (sous traitance) Conception PCB 3D
	TRL visé	3 4 5 6 7	3 4 5 6 7	3 4 5 6 7	3 4 5 6 7	3 4 5 6 7

¹ nécessitant de soit de continuer l'activité de R&D soit de concevoir de nouveaux développements

Légende code couleur cellules : nouveau, en cours, validé, terminé

	DIAMANT ML. GALLIN MARTEL	Réf :	ATRIUM-XXXXX
		Version :	1.0
		Date :	10/05/2023
		Page :	16/40

Les TRL plans détaillés se trouvent dans un document séparé attaché au projet.

NB : pour l'hodoscope le TRL5 concerne les protons (volume actif sCVD) et le TRL7 les ions carbone (volume actif pCVD). Pour le TRL7 une surface totale de 16 cm² est visée avec une électronique FE intégrée.

Objet N°3 : PyDiam logiciel de simulation de la collecte de charge dans matériau diamant

En cours	Système	PyDiam Logiciel de simulation du transport de charges								
	Projet	ANR-DIAMMONI 2020 - 2024								
	Cahier des charges	Créer un logiciel utilisable par tout utilisateur travaillant sur la technologie diamant pour les applications détecteurs Objectif scientifique : répondre aux besoins de compréhension des physiques mises en jeux dans la chambre d'ionisation solide y compris pour très hauts flux Modèle 1D								
	TRL	1	2	3	4	5	6	7	8	9
DIAMANT	Technologies critiques¹	Interfaçage avec SRIM (Stopping and Range of Ions in Matter) Modèle 1D basé sur densité de porteurs avec programmation en Python des différentes fonctions Filtrage induit par l'électronique FE Interface Utilisateur basée sur Tkinter								
	TRL	1	2	3	4	5	6	7	8	9

¹ nécessitant de soit de continuer l'activité de R&D soit de concevoir de nouveaux développements

Légende code couleur cellules : nouveau, en cours, validé, terminé

Le TRL plan détaillé de PyDiam se trouve dans un document séparé attaché au projet.

	DIAMANT ML. GALLIN MARTEL	Réf :	ATRIUM-XXXXX
		Version :	1.0
		Date :	10/05/2023
		Page :	17/40

Synthèse des «briques technologiques» développées dans les différents projets avec mention de l'état d'avancement pour poursuite dans DIAMANT

Développements Technologiques	R&T DIAMTECH / R&T DIAMASIC / Autres projet hors IN2P3			Master projet DIAMANT					
	Validé		En cours	Poursuite	Nouveau				
Objet N°1	Volume actif								
Croissance				Couches épitaxiées Dopage p- / p+ / n	oui	sCVD grande surface	pCVD membrane		
Gravure				Profonde sur sCVD => production membrane	oui				
Instrumentation	Porte échantillon	Connexion ≤ 9 électrodes			oui				
Electronique	Préamplificateurs	Courant/tension (voir objet N°2)			oui				
Objet N°2	Moniteurs faisceaux								
Volume actif	Diamants commerciaux			Membrane obtenue par gravure	oui	sCVD grande surface	pCVD membrane		
Instrumentation	Métallisations		Pleine Pixels Pistes				oui		
	Assemblage		Collage sur PCB Sandwich entre 2 PCB						
	Arrangement		Mosaïque par 4 Barrette par 9						
	Connexion		Contact Collage conducteur Wire bonding						
Electronique FE et BE	Préamp. RF	Discret	Gain 40 dB < 55 dB Bande 5 GHz Jitter < 50 ps	Préamp courant + comparateur	ASIC 130 nm	8 voies	oui	Préamp Discret	Charge + Courant Ex C6 CIVIDEC
	QDC	Discret	Dynamique 10 ⁶ Intégration 1 à 100 ms	Preamp + ADC	ASIC 65 nm	1 voie 8 bits 500 MHz	oui	Preamp + ADC ASIC 65 nm	4 voies 8 bits 500 MHz
		ASIC CMOS 130 nm	8 voies Dynamique 10 ⁶ Intégration 1 à 100 ms						
	TDC	Discret	40 TDC sur FPGA Cyclone 10 STD 25 ps	DFC	Discret	4 voies / carte	oui		
ASIC CMOS 130 nm		STD 12 ps							

Tableau 1 Développements technologiques par "tâche" et par "objet"

Développements technologiques en parallèle : fin R&T DIAMTECH WP4– vers des activités de valorisation ?

Compte tenu de notre expérience sur l'instrumentation diamant, l'ILL a fait appel à nous pour la conception d'un trigger pour l'expérience FIPPS. Il n'y a pas d'équipes de physique impliquées au LPSC sur cette

	DIAMANT ML. GALLIN MARTEL	Réf :	ATRIUM-XXXXX
		Version :	1.0
		Date :	10/05/2023
		Page :	18/40

expérience, il s'agit uniquement d'un développement technologique qui repose sur la valorisation de notre expertise. Ce type de développement, tout comme le $\Delta E-E$, peuvent néanmoins intéresser le GANIL³ à l'IN2P3.

Trigger pour la fission expérience FIPPS ILL

En cours	Détecteur	Trigger / véto pour la fission (ILL)								
	Projet	R&T DIAMTECH ¹ 2020 - 2022								
	Cahier des charges	Obtenir une signature temporelle d'un événement de fission induit par les neutrons thermiques délivrés par le réacteur ILL Grenoble								
	TRL	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Technologies critiques	Diamant de grande surface (sCVD ou pCVD) pour permettre le dépôt d'uranium								

¹ COVID 2020 – 2021 accès ILL impossible, 2022 ILL shut down =>le projet se poursuit en 2023 développement LPSC financement ILL

Légende code couleur cellules : nouveau, en cours, validé, terminé

R&T DIAMTECH 2020-2023

Un trigger pour la fission pour l'expérience FIPPS (TRL3),

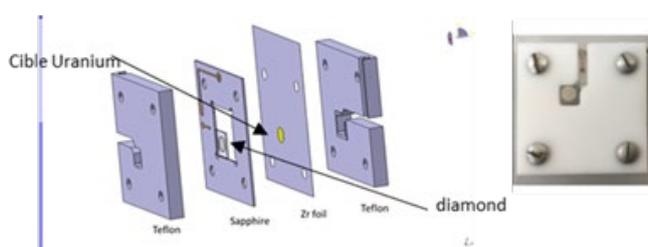


Figure 3 Gauche principe de conception du détecteur. Droite détecteur trigger veto en test sur FIPPS à l'ILL.

- Conception d'un support en saphir permettant de diminuer la contamination du signal par du bruit de fond résultant de l'interaction des neutrons avec le support.
- Contacts électriques opérationnels (collaboration LPSC Service Détecteurs et Instrumentation - Institut Néel Grenoble plateforme)
- Observation signaux fragments de fission et particules alpha en opération sur FIPPS à ILL avant shutdown S2 2020.

Une reprise de nos activités post ILL shutdown (et COVID) est en cours en 2023, des tests sont programmés en T2.

Une configuration finale du trigger est envisagée. Le diamant devient « la cible ». En effet, le dépôt d'uranium se fera sur sa surface et non plus sur une lamelle de zirconium placée au contact. La surface minimale requise est de 1 cm² afin de pouvoir pratiquer un tel dépôt ce qui impliquerait l'utilisation de diamant pCVD qui sont

³ Conférencier invité septembre 2023 dans le cadre du colloque GANIL 2023 <https://indico.in2p3.fr/event/28102/> présentations développements DIAMANT

	DIAMANT ML. GALLIN MARTEL	Réf :	ATRIUM-XXXXX
		Version :	1.0
		Date :	10/05/2023
		Page :	19/40

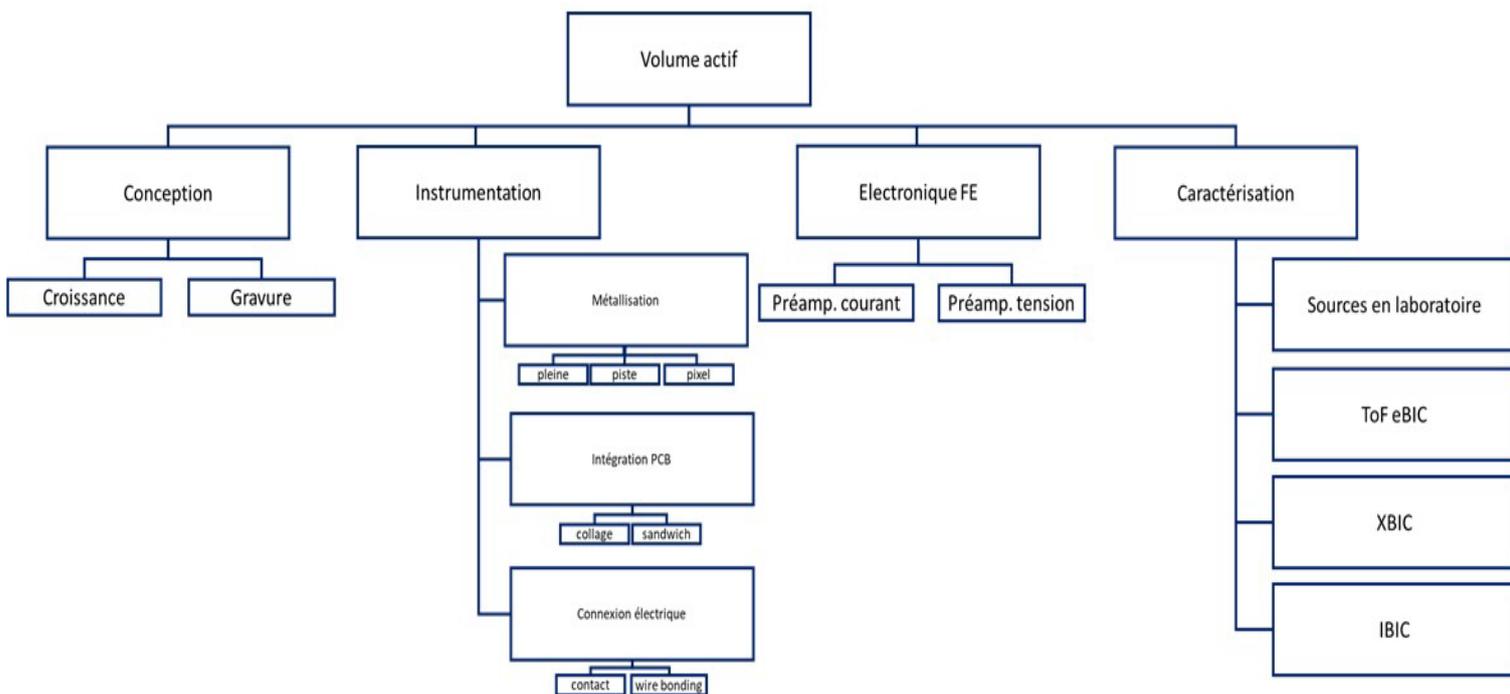
produits d'ores et déjà avec de plus grandes surfaces mais dont les performances in-situ (expérience FIPPS) restent à quantifier. Des études préliminaires menées sur LOHENGRIN ont démontré que la résolution temporelle pour des fragments de fission (FF) est à l'échelle de 10 ps RMS pour des sCVD et 30 ps RMS pour des pCVD ce qui laisse augurer un résultat positif. L'objectif final est l'intégration du trigger diamant dans l'expérience FIPPS en 2024

2 Description des tâches - responsabilités - organisation

2.1 Description de l'arborescence produit - PBS

Dans le cadre du projet **DIAMANT** quatre types « d'objets diamant » seront produits

Objet N°1 : volume actif diamant



Ces substrats qui serviront de volume actif **soit pour la détection de particules à faible parcours**, comme dans le cas du ΔE -E du R&T DIAMTECH, **soit pour le monitoring faisceau**, comme dans le cas de DÉFI DiAMs. sont non disponibles commercialement et impliquent d'être :

1) conçus au LPSC ou avec le concours de nos partenaires externes (LSPM, Institut Néel, Japon) experts en physique de la matière condensée

a. par croissance :

- i. Diamant sCVD de grandes surfaces $\sim 1 \text{ cm}^2$ en collaboration avec partenaires ANR MONODIAM : le LSPM
- ii. Couches diamant épitaxiées dopage p ou n avec partenaires Institut Néel et laboratoires japonais pour conception détecteur ΔE -E et jonction pn
- iii. Diamant pCVD grande surface au LPSC par l'équipe PLASMA

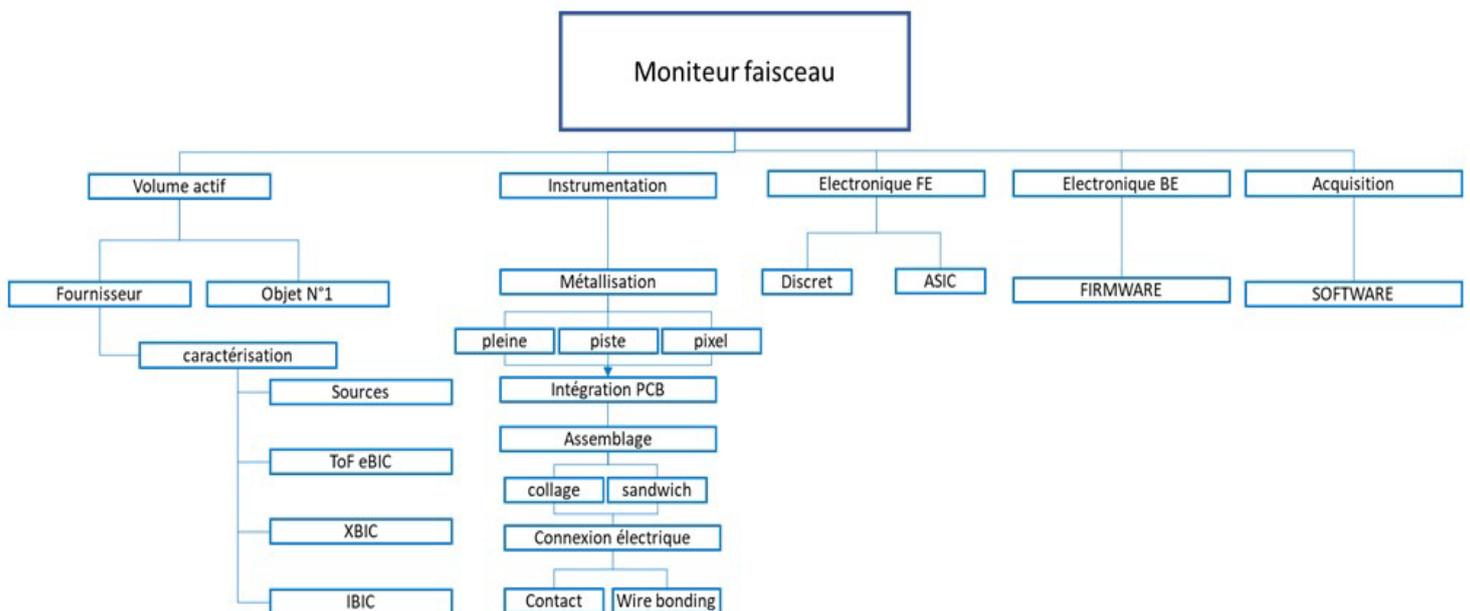


DIAMANT
ML. GALLIN MARTEL

Réf :	ATRIUM-XXXXX
Version :	1.0
Date :	10/05/2023
Page :	20/40

- b. **par gravure** : membranes diamant d'épaisseur $\leq 1 \mu\text{m}$ pour surface active destinée au monitoring de microfaisceaux d'ions en collaboration avec l'Institut Néel
- instrumentés** en tant que détecteur **sur des porte échantillon dits « génériques » qui sont déjà disponibles en laboratoire** avec des étapes de métallisation, intégration PCB par différentes techniques et connexions électriques **vers électronique standard commerciale** type préamplificateur de courant ou préamplificateur de charges
 - connectés à une électronique FE discrète type préamplificateurs de courant ou de tension disponibles au laboratoire** soit de type « commercial » (ex : CIVIDEC) soit déjà développés par le service électronique dans le cadre de DIAMTECH ou de projets antérieurs
 - caractérisés** avec des sources (laboratoires partenaires), ou des faisceaux avec les systèmes ToF eBIC (Institut Néel), XBIC (ESRF) et IBIC (AIFIRA) **avec une granularité à l'échelle du micromètre pour établir des cartographies 2D de la collecte de charges afin de rendre compte d'éventuelles inhomogénéités traduisant des défauts induits par les protocoles de croissance ou de gravure dans le but de les améliorer pour que le produit issu de la chaîne corresponde au cahier des charges fixé pour l'application retenue (ΔE -E, jonction pn, moniteur faisceaux, ...)**

Objet N°2 Moniteurs faisceaux diamant



La liste des développements de détecteurs concernés est donnée au paragraphe 1.4.

Les moniteurs faisceaux sont constitués :

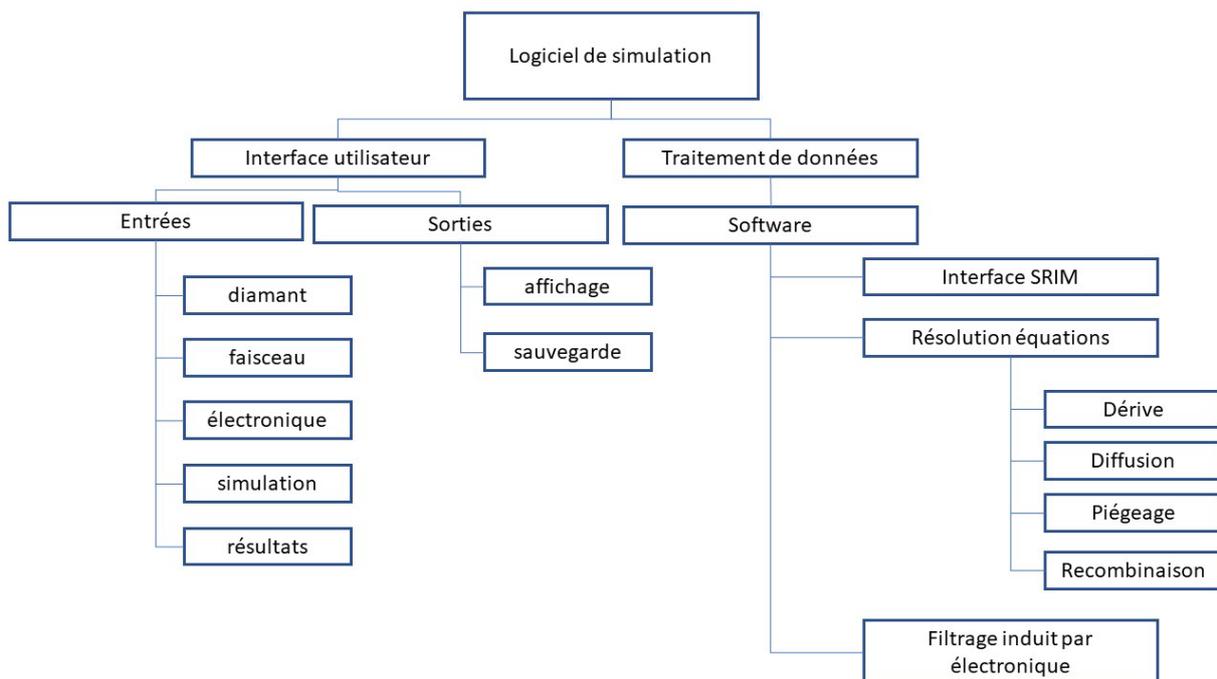
- d'un volume actif diamant** avec différents types de métallisations possibles (pistes, pixels, pleines plaques) suivant le type d'application visée,
- d'une instrumentation de la surface active sur un PCB** par collage sur PCB unique, ou en « sandwich » entre 2 PCB, ou avec des connexions par contact (anneau de cuivre), fils de bondings

	DIAMANT ML. GALLIN MARTEL	Réf :	ATRIUM-XXXXX
		Version :	1.0
		Date :	10/05/2023
		Page :	21/40

- 3) d'une électronique Front-End (FE) type préamplificateur courant tension, intégrateur de charges par pulse ou dans un train de pulse, discriminateurs à fraction constante
- 4) d'une électronique Back-End (BE) dont le firmware assure certains traitements type marquage temporel TDC, charges QDC numérique ainsi que le contrôle commande et l'acquisition de données
- 5) d'un software permettant le dialogue entre l'électronique BE et un PC.

La validation du fonctionnement et l'évaluation des performances du moniteur se fera sous faisceaux.

Objet N°3 : PyDiam : logiciel de simulation du transport de charges dans le substrat diamant



Ce logiciel sera constitué

- 1) d'une interface utilisateur paramétrée Tkinter sous forme d'onglets afin de permettre une modification des paramètres d'intérêts de manière simple et intuitive. Des schémas de la simulation en cours seront présents. Les onglets sont :
 - a. paramètre diamant : propriétés intrinsèques nécessaires à la résolution des équations
 - b. paramètre faisceau et type de particules (nature de l'ion et énergie) :
 - i. mode particule pour étudier le passage de particules à très bas flux
 - ii. mode bunch qui permet d'étudier à plus haut flux la réponse du diamant à l'échelle de la microstructure des faisceaux (échelle nanoseconde)
 - iii. mode train pour s'intéresser à la macrostructure des faisceaux (échelle microseconde)
 - c. paramètres liés à l'électronique : influence des préamplificateurs de courant et des câbles dans le filtrage, l'atténuation et l'amplification du signal (diagramme de Bode)
 - d. paramètre simulation : gestion des pas d'espace et de temps, des différentes contributions (dérive, diffusion, piégeage, recombinaison) et sauvegarde des résultats

	DIAMANT ML. GALLIN MARTEL	Réf :	ATRIUM-XXXXX
		Version :	1.0
		Date :	10/05/2023
		Page :	22/40

e. **résultats** : paramétrage des résultats de sortie du logiciel

- 2) **de programmes basés sur la résolution des équations de transports de charge en 1D** dans les semi-conducteurs, **interfacés avec SRIM (ions) / Casino (électrons)**, codés en Python 3
- 3) **d'un système d'affichage et de sauvegarde des résultats intuitif**, permettant à n'importe quel utilisateur d'effectuer la simulation désirée sans avoir à modifier le code source. Les résultats pourront être présentés sous forme d'animation (.gif), d'images (.png), voire être sauvegardés sous différents formats (.txt ou autre).

2.2 Description des travaux techniques - WBS

Liste des tâches et description technique succincte

Les « tâches » envisagées dans le projet pour obtenir les quatre types d'objets dont la conception est visée sont listées ci-après. **Le détail complet avec les photos des réalisations techniques existantes est fourni dans un document séparé intitulé «Description du WBS et fiches de tâches associées »).**

Tâche 1 Volume actif

Faire du « sur mesure » dans cas complexes pour la détection de particules (sinon diamant commerciaux)

Tâche 2 Caractérisation

Validation (diamant commerciaux) et optimisation / validation des techniques de conception du volume actif (homogénéité de la réponse, densité de défauts)

Tâche 3 Instrumentation

Intégration du substrat et « fonctionnalisation » pour une utilisation en tant que détecteur avec développements spécifiques pour intégration sur ligne de faisceaux dans le cas des moniteurs.

Tâche 4 Electronique FE et BE

Lecture des signaux liés à la détection de particules et traitement des données

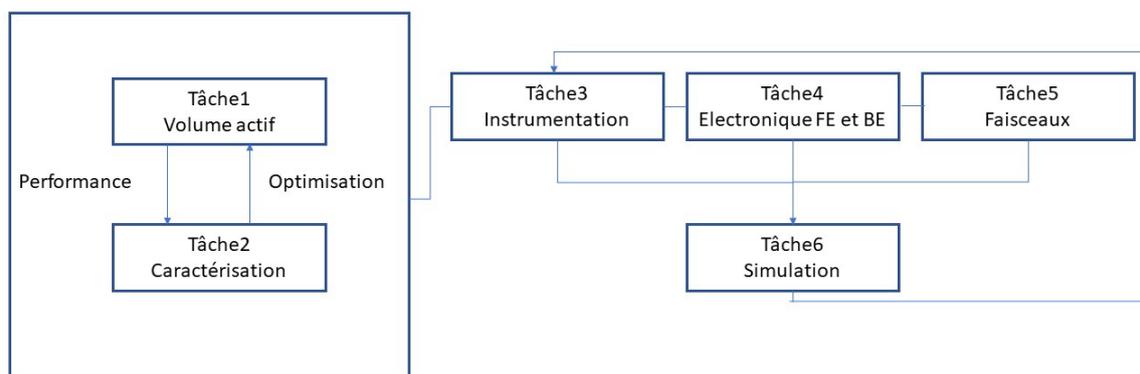
Tâche 5 Faisceaux

Évaluation des performances des différents objets avec des particules à faible parcours (ILL), des faisceaux d'ions (ARRONAX, ALTO) ou microfaisceaux d'ions (AIFIRA) ou de rayons X (ESRF)

Tâche 6 Simulation

Optimisation de la conception du design en instrumentation et en électronique

Articulations et interfaces entre tâches



	DIAMANT ML. GALLIN MARTEL	Réf :	ATRIUM-XXXXX
		Version :	1.0
		Date :	10/05/2023
		Page :	23/40

Le volume actif, tâche 1, qu'il soit d'origine commerciale ou conçu dans nos laboratoires ou dans les laboratoires partenaires sera caractérisé en tâche 2 avec pour objectif l'étude des performances et l'optimisation des processus de croissance ou de gravure si existants.

Le volume actif « validé » sera ensuite instrumenté, tâche 3, équipé de l'électronique FE et BE, tâche 4, puis testé sous faisceaux, tâche 5, dans les conditions réelles de son utilisation future.

En parallèle, les caractéristiques du détecteur (géométrie, nature sCVD pCVD, ...), de l'électronique et du faisceau seront entrées en simulation, tâche 6, afin de permettre une comparaison avec les résultats expérimentaux et une optimisation principalement de la géométrie du détecteur en fonction des résultats obtenus en tâche 6.

2.3 Responsabilités

Laboratoire	Tâche 1 volume actif	Tâche 2 caractérisation	Tâche 3 instrumentation	Tâche 4 électronique	Tâche 5 faisceau	Tâche 6 simulation
LPSC						
IJClab						
LP2I Bordeaux						
SUBATECH GIP ARRONAX						

Le projet sera piloté par le LPSC qui a une expertise de dix années dans le domaine de la technologie diamant pour la conception de détecteurs (voir paragraphe 1.2) et pilotait notamment à l'IN2P3 le R&T DIAMTECH en collaboration avec SUBATECH et GIP ARRONAX.

Le LPSC sera impliqué au niveau de la **Tâche 1)** pour la croissance diamant de par sa propre expertise avec l'équipe PLASMA dirigée par A. Lacoste mais aussi de par ses collaborations avec l'Institut Néel et les équipes japonaises de l'Université de Tsukuba, du NIMs et de l'AIST. **Tâche 2)** la caractérisation des substrats par les bancs de tests mis en œuvre dans MONODIAM (MIP) mais aussi avec l'ESRF et l'Institut Néel ; **Tâche 3)** l'intégration détecteurs (diamant sur support et support sur lignes de faisceaux pour les moniteurs) et **Tâche 4)** les développements en électronique de par l'expertise acquise dans R&T DIAMTECH et les briques élémentaires qu'il a pu déjà concevoir R&T DIAMTECH et R&T DIAMASIC ; **Tâche 5)** l'analyse de données pour l'évaluation des performances sous faisceaux au travers des thèses en co-direction avec les partenaires IN2P3 ; **Tâche 6)** la simulation avec le travail mis en œuvre également dans le cadre d'une thèse en co-encadrement avec SUBATECH et le GIP ARRONAX pour l'ANR DIAMMONI.

L'IJClab sera impliqué dans la **Tâche 3)** pour l'intégration du détecteur sur la ligne de faisceau Bio ALTO et la **Tâche 5)** avec l'analyse de données pour l'évaluation des performances sous faisceaux.

Le LP2I Bordeaux sera impliqué dans la **Tâche 2)** pour la caractérisation des substrats en IBIC avec AIFIRA, dans la **Tâche 3)** pour l'intégration du détecteur sur la ligne de faisceau, dans la **Tâche 5)** l'analyse de données pour l'évaluation des performances sous faisceaux au travers des thèses en co-direction avec les partenaires IN2P3 et dans la **Tâche 6)** la simulation notamment comme membre du CSI de R. Molle thèse co-encadrée par le LPSC, SUBATECH et le GIP ARRONAX.

SUBATECH – GIP ARRONAX sera impliqué dans la **Tâche 3)** pour l'intégration du détecteur sur la ligne de faisceau, dans la **Tâche 5)** l'analyse de données pour l'évaluation des performances sous faisceaux au travers

	DIAMANT ML. GALLIN MARTEL	Réf :	ATRIUM-XXXXX
		Version :	1.0
		Date :	10/05/2023
		Page :	24/40

des thèses en co-direction avec les partenaires IN2P3 et dans la **Tâche 6**) la simulation avec le travail mis en œuvre également dans le cadre de la thèse de R. Molle en co-encadrement avec LPSC.

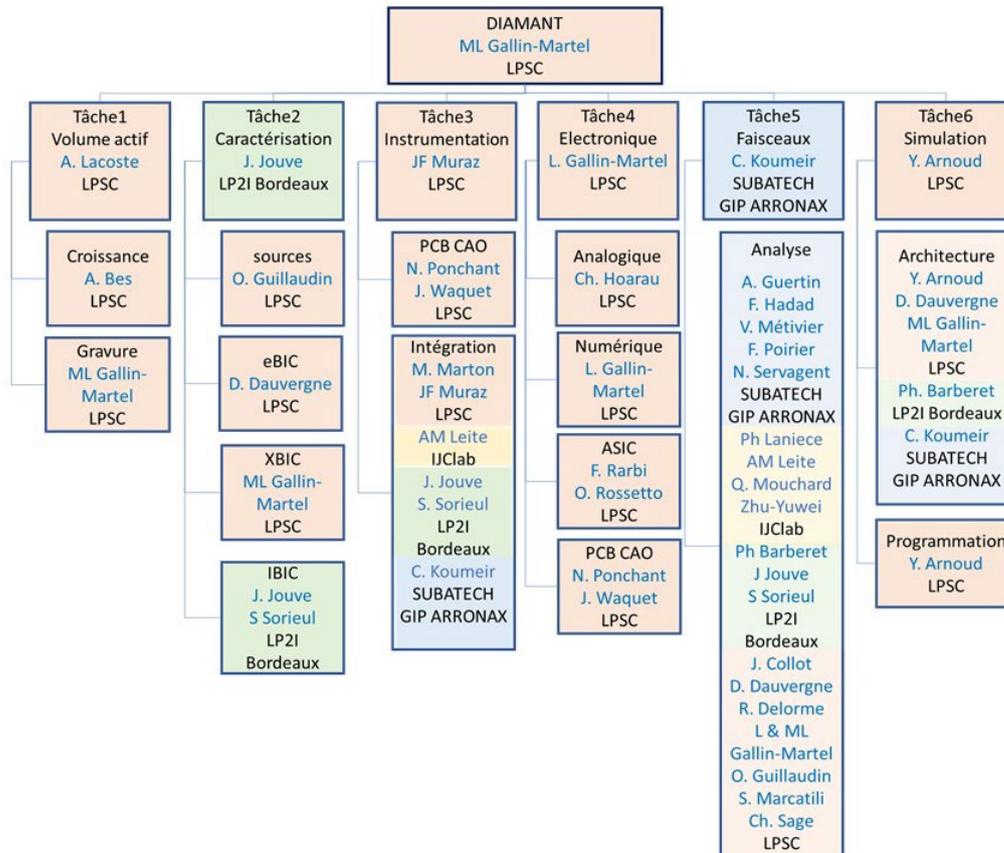
2.4 Organisation

Dans **DIAMANT**, tout comme dans le cas du R&T DIAMTECH, **des réunions bilans « projet » sont prévues chaque trimestre (T)** sur la durée de la totalité du projet (**au moins une en présentiel par an dans un des laboratoires**) entre l'ensemble des membres du consortium. Elles feront l'objet de la rédaction d'un **compte rendu qui sera déposé sur ATRIUM** afin qu'il puisse être consultable par tous.

Suivant les différents calendriers, propres à chaque projet, **des réunions techniques (croissance, gravure, caractérisation, intégration détecteur, R&D électronique, tests faisceaux, simulation) sont prévues chaque mois (M)**. Elles feront l'objet de la rédaction d'un **compte rendu qui sera déposé sur ATRIUM** afin qu'il puisse être consultable par tous.

Le suivi des doctorants sur les tâches confiées implique un point mensuel entre les laboratoires concernés, Le suivi des doctorants en interne sera géré par les encadrants dans chaque laboratoire, ces réunions **« point thèse » sont typiquement des réunions hebdomadaires**.

L'organisation globale du projet et la répartition des tâches par laboratoire est résumée dans l'organigramme



Des workshops annuels (présentations orales, posters, ... sur deux ½ journées) sont prévus avec les membres du consortium et les différents partenaires extérieurs à l'IN2P3 : Néel, ESRF, ILL et notamment avec nos collègues japonais.

	DIAMANT ML. GALLIN MARTEL	Réf :	ATRIUM-XXXXX
		Version :	1.0
		Date :	10/05/2023
		Page :	25/40

Les résultats obtenus donneront lieu à des publications d'articles et à des présentations dans des conférences nationales à l'IN2P3 (ex : GDR MI2B et DI2I) et hors IN2P3 (ex : RADIOTRANSNET) mais aussi à l'internationale (Hasselt, E-MRS, NDNC, ICDCM pour le diamant et HIAT, VHEE, PTCOG, NSS-MICqui couvrent les applications médicales, nucléaires ou accélérateurs)

2.5 Analyse des risques du projet

Risques	Actions	Responsables actions	Criticité	Tendance
Croissance : Délai de fabrication (brasure alumine métal, porte échantillon planétaire chauffant)	<ul style="list-style-type: none"> • Anticipation de la sélection des fournisseurs en fonction des délais. • Porte échantillon statique opérationnel 	A. Bes A. Lacoste	●	→
Croissance : Manque de Ressource Humaine	<ul style="list-style-type: none"> • Demande contrat doctoral, • CDD PostDoc AàP 	A. Bes A. Lacoste	●	→
Approvisionnement substrat diamant de différentes épaisseurs	<ul style="list-style-type: none"> • sCVD de dimension standard 4.6 x 4.6x 0.5 mm³ en stock chez Element 6 • Amincissement 500 µm vers 150 µm ou 50 µm sous traitées chez ALMAX EASY Lab 	ML Gallin-Martel	●	→
Caractérisation substrat : accès aux plateformes	<ul style="list-style-type: none"> • Les plateformes ESRF et eBIC sont hors consortium mais font l'objet de partenariat dans projet IRT NanoElec pour ESRF et DéFI-DiaMs pour eBIC à l'Institut Néel avec accord de collaborations 	ML Gallin-Martel J. Jouve	●	→
Conception ASIC fin R&T BB130	<ul style="list-style-type: none"> • Soumission conjointe projet R&T FASTIME. • Difficulté de soumettre en 130nm (surface min de 25mm²) • Changement de technologie CMOS 65 nm pour R&D en cours dans ANR DIAMMONI 	F. Rarbi	●	→
Problème général d'approvisionnement en composants électroniques	<ul style="list-style-type: none"> • La disponibilité des composants est anticipée sur leur choix pour répondre au cahier des charges et gouverne la conception / fabrication des cartes électroniques • Amélioration des approvisionnements constatée en 2023 => stockage de certains composant en vue de leur utilisation future 	ML Gallin-Martel	●	↗
Manque de RH pour développement ASIC	<ul style="list-style-type: none"> • Demande contrat doctoral (ADC 500 MHz 10 bits sujet de thèse) • Obtention CDD dans AàP 	F. Rarbi O. Rossetto	●	→

Tableau 2: Risques identifiés pour le projet

	DIAMANT ML. GALLIN MARTEL	Réf :	ATRIUM-XXXXX
		Version :	1.0
		Date :	10/05/2023
		Page :	26/40

2.6 Plan de développement du projet

Un plan détaillé du développement du projet a été rédigé il se trouve dans un document séparé attaché au projet et intitulé «Plan de développement du projet ».

Un tableau a été dressé par tâche par les auteurs de DIAMANT sur le modèle suivant :

Tâche	Nom
<i>Responsable / partenaires</i>	
Mme / M XXXX	Institut YYYY (IN2P3 ou externe ex : INP)
<i>Plan de développement</i>	
1	Méthode suivant tâche avec liste des principaux jalons qui apparaissent en section 11.6 dans les calendriers détaillés par livrable
<i>Deliverables</i>	
1	Définition et calendrier T0 (prototype 1.1) et T0+15M (prototype 1.2)
<i>Contribution des partenaires</i>	
1	
<i>Méthode</i>	
1	
<i>Analyse de risques et solutions de remplacement</i>	
1	

2.7 Plan Qualité / Assurance Produit

A ce stade du projet, un plan qualité a commencé à être rédigé. La gestion actuelle de qualité, dont le **détail complet figure dans un document séparé attaché au projet qui s'intitule « Plan détaillé qualité »**, est basée sur :

- 1) la maîtrise de la documentation par la mise en place d'une gestion documentaire
 - **Base documentaire commune sur Ipsc-summer** (documents courants, plans, photos ...)
 - **Dépôt de documents de référence sur ATRIUM** (articles, publications, posters ...) en cours

- 2) le suivi et la traçabilité des composants et des tests
 - Identification de chaque diamant par un nom propre (Ex : Obélix, Frodon ...)
 - Mise en place d'un fichier en ligne de suivi de vie de chaque diamant
 - Suivi des tests **voir paragraphe 5.1 « Gestion des données »**

Les plateformes partenaires opèrent leurs propres systèmes de gestion de la qualité tels que définis au sein de leur structure interne



DIAMANT
ML. GALLIN MARTEL

Réf :	ATRIUM-XXXXX
Version :	1.0
Date :	10/05/2023
Page :	27/40

3 Ressources humaines

Nom des personnes	Statut	2023	2024	2025	2026	Total (FTE)
LPSC		450%	390%	255%	185%	12,80
Y. Arnoud	MCF	10%	10%	10%	10%	
J. Collot	PR	5%	5%	5%	5%	
D. Dauvergne	DR	20%	20%	20%	20%	
R. Delorme	CR	10%	10%	10%	10%	
F. Di Franco	Post doctorante	25%	25%	0%	0%	
ML Gallin-Martel	DR	50%	50%	50%	50%	
A. Lacoste	PR	25%	25%	25%	25%	
O. Rossetto	MCF	10%	10%	10%	10%	
Ch. Sage	MCF	5%	5%	5%	5%	
A. André	Doctorant	30%	30%	20%	0%	
C. Léonhart	Doctorant	100%	100%	50%	0%	
P. Everaere	Doctorant	50%	0%	0%	0%	
R. Molle	Doctorant	100%	50%	0%	0%	
X. Y (thèse IRGA UGA MRT)	Doctorant	10%	50%	50%	50%	
SUBATECH - GIP ARRONAX		40%	40%	40%	40%	1,60
F. Haddad	PR	10%	10%	10%	10%	
A. Guertin	CRCN	10%	10%	10%	10%	
V. Métivier	PR	10%	10%	10%	10%	
N. Servagent	MCF	10%	10%	10%	10%	
LP2I Bordeaux		10%	10%	10%	10%	0,40
Ph Barberet	PR	10%	10%	10%	10%	
IJClab		25%	25%	15%	15%	0,80
Ph. Laniece	DR	5%	5%	5%	5%	
Q. Mouchard	MCF	10%	10%	10%	10%	
Zhu-Yuwei	Post doctorante	10%	10%	0%	0%	
TOTAL (FTE)		5,25	4,65	3,20	2,50	15,60

Tableau 3: Chercheurs et enseignant-chercheurs IN2P3 impliqués dans le projet

Nom des personnes	Statut	2023	2024	2025	2026	Total (FTE)
LPSC		248%	228%	228%	228%	9,32
A. Bes	IR	35%	35%	35%	35%	
L. Bonny	TCS (70%)	18%	18%	18%	18%	
L. Gallin-Martel	IR	75%	75%	75%	75%	
O. Guillaudin	IR	5%	5%	5%	5%	
CH. Hoarau	IR	35%	35%	35%	35%	
S. Marcatili	IR	10%	10%	10%	10%	
M. Marton	AI	5%	5%	5%	5%	
JF. Muraz	IR	5%	5%	5%	5%	
N. Ponchant	AI	5%	5%	5%	5%	
F. Rarbi	IR	50%	30%	30%	30%	
J. Waquet	T	5%	5%	5%	5%	
SUBATECH - GIP ARRONAX		20%	20%	20%	20%	0,80
C. Koumeir	IR	10%	10%	10%	10%	
F. Poirier	IR	10%	10%	10%	10%	
LP2I Bordeaux		10%	10%	10%	10%	0,40
J. Jouve	IE	5%	5%	5%	5%	
S. Sorieul	IR	5%	5%	5%	5%	
IJClab		5%	5%	5%	5%	0,20
AM. Leite	IR	5%	5%	5%	5%	
TOTAL (FTE)		2,83	2,63	2,63	2,63	10,72

Tableau 4: Ingénieurs et techniciens IN2P3 impliqués dans le projet



DIAMANT
ML. GALLIN MARTEL

Réf :	ATRIUM-XXXXX
Version :	1.0
Date :	10/05/2023
Page :	28/40

Nom des personnes	Statut	2023	2024	2025	2026	Total (FTE)
Institut Néel		40%	40%	35%	30%	1,45
L. Abbassi	AI NanoFab	5%	5%	5%	5%	
F. Donatini	IR	5%	5%	5%	5%	
T. Crozes	IR NanoFab	5%	5%	5%	5%	
E. Gheeraert	Pr	10%	10%	5%	5%	
J. Letellier (Start up DIAMFAB)	Ingénieur DIAMFAB	5%	5%	5%	0%	
JF Motte	IR NanoFab	5%	5%	5%	5%	
J Pernot	Pr	5%	5%	5%	5%	
LSPM		10%	10%	10%	10%	0,40
J. Achard	PR	5%	5%	5%	5%	
R. Issaoui	MCF	5%	5%	5%	5%	
CAL		15%	15%	15%	15%	0,60
J. Herault	Physicien Médical	5%	5%	5%	5%	
P. Hofverberg	Ingénieur	5%	5%	5%	5%	
D. Maneval	Physicien Médical	5%	5%	5%	5%	
IRSN		5%	5%	5%	5%	0,20
F. Vianna Legros	Ingénieur	5%	5%	5%	5%	
TOTAL (FTE)		0,70	0,70	0,65	0,60	2,65

Tableau 5 : Personnels de laboratoires autres qu'IN2P3 impliqués dans le projet

4 Ressources financières

Demande Année 2023

La liste des demandes ci-après concerne les développements non financés par projet en 2023 soit

- la production de **membranes pCVD** (TRL plan et calendrier détaillé joints dans 2 documents séparés)
- le télescope **ΔE-E** (TRL plan et calendrier détaillé joint dans 2 documents séparés)
- l'**hodoscope faisceau** pour l'hadronthérapie (TRL plan et calendrier détaillé joint dans 2 documents séparés)
- le **moniteur faisceau Bio-ALTO** (TRL plan et calendrier détaillé joint dans 2 documents séparés), non prévu dans projet PICTURE, qui ne couvrira également qu'une partie des missions d'expériences d'irradiation, mais pas celle des ITA hors projet PICTURE, JF Muraz (LPSC) et AM Leite (IJCLab), qui vont procéder à la coordination technique et à l'intégration sur la ligne.



DIAMANT
ML. GALLIN MARTEL

Réf :	ATRIUM-XXXXX
Version :	1.0
Date :	10/05/2023
Page :	29/40

2023	LPSC	IJClab	LP2I Bordeaux	SUBATECH GIP ARRONAX
Equipement				
Membranes pCVD :	Prototypes DN40 (+ 6 sources) Mécanique Flasque supérieure : Porte Substrat planétaire chauffant	6 k€ 7.5 k€ 25 k€		
Hodoscope				4diamants pCVD 4cm ² 12 k€
Bio-ALTO	Diamant sCVD 4.5 mm ²	2.5 k€	Alimentation HT 6 k€	
	41 k€	6 k€		12 k€
Fonctionnement				
Membranes pCVD :	Gaz (consommation + location) Wafer Si, Si3N4, Seeding diamant, Caractérisation	1.5 k€ 2.5 k€		
Hodoscope	Mécaniques (boîtiers, supports...) Cartes support diamants : Connectiques & cables (SMA, UFL...) Composants électroniques PCB élec FE et BE	0.8 k€ 1.2 k€ 0.5 k€ 1.5 k€ 1.5 k€		
Bio-ALTO	Amincissement / découpe Métallisation/wirebonding Mécanique Composants électroniques PCB élec FE	1.5 k€ 3.0 k€ 1 k€ 1 k€ 1 k€		
	17 k€			
Mission				
ΔE-E	AIFIRA - Bordeaux	0.75 k€		
Membranes pCVD	SUBBARO	0.5 k€		
Hodoscope	CAL -Nice	0.75 k€		CAL -Nice 0.75k€
Bio ALTO	Orsay	0.38 k€	Grenoble 0.38k€	
	2.38 k€	0.38 k€		0.75 k€
Total	60.38 k€	6.38 k€		12.75 k€
		79.5 k€		

Tableau 6 Demande de budget 2023 récapitulatif par poste et par laboratoire

Les diamants nécessaires à la mise en œuvre des détecteurs seront achetés en début de projet compte tenu des délais d'approvisionnements afin de ne pas prendre de retard sur les calendriers prévisionnels



DIAMANT
ML. GALLIN MARTEL

Réf :	ATRIUM-XXXXX
Version :	1.0
Date :	10/05/2023
Page :	30/40

	2023	2024	2025	2026	Total
Equipements	59 000 €	59 000 €	25 000 €	- €	143 000 €
Prototypes DN40 (+ 6 sources)	6 000 €	12 000 €			
Mécanique Flasque supérieure	7 500 €				
Porte Substrat planétaire chauffant	25 000 €				
Générateur 915 MHz - 600 w x6		25 000 €	25 000 €		
Alimentation haute tension	6 000 €				
Diamants (SUBARRO)		20 000 €			
Diamants (Element6))	14 500 €	2 000 €			
Fonctionnement	17 000 €	14 000 €	9 500 €	8 000 €	48 500 €
Gaz (consommation + location)	1 500 €	1 500 €	1 500 €	1 500 €	
Wafer Si, Si ₃ N ₄ , Seeding diamant, Caractérisation	2 500 €	2 500 €	2 500 €	2 500 €	
Amincissement / découpe diamant	1 500 €	1 500 €			
Métallisation / wire bonding	3 000 €	3 000 €			
Mécaniques (boîtiers, supports...)	1 800 €	800 €	800 €	800 €	
Cartes support diamants	1 200 €	1 200 €	1 200 €	1 200 €	
Connectiques & câbles(SMA, UFL...)	500 €	500 €	500 €	500 €	
Composants électronique	2 500 €	1 500 €	1 500 €	1 500 €	
PCB élec FE et BE	2 500 €	1 500 €	1 500 €	1 500 €	
Missions	3 500 €	3 500 €	3 500 €	3 500 €	14 000 €
AIFIRA	750 €	750 €	750 €	750 €	
Bio ALTO	750 €	750 €	750 €	750 €	
CAL	1 500 €	1 500 €	1 500 €	1 500 €	
SUBARRO	500 €	500 €	500 €	500 €	
Personnels	- €				
			- €	- €	
TOTAL	79 500 €	76 500 €	38 000 €	11 500 €	205 500 €

Tableau 7: Ressources financières de l'IN2P3

	DIAMANT ML. GALLIN MARTEL	Réf :	ATRIUM-XXXXX
		Version :	1.0
		Date :	10/05/2023
		Page :	31/40

	Financements	2023	2024	2025	2026	Total
Equipements		71 500 €	7 500 €	- €	- €	79 000 €
Achat substrats	ANR DIAMMONI	2 500 €	- €	- €	- €	
	DéFi DiaMs	4 000 €	- €	- €	- €	
	PAIR TUMC	6 000 €	- €	- €	- €	
	UGA IRGA	4 000 €	- €	- €	- €	
Oscilloscope large bande	ANR DIAMMONI	30 000 €	- €	- €	- €	
Chambre d'ionisation	ANR DIAMMONI	4 000 €	- €	- €	- €	
Blindage pour banc de test	ANR DIAMMONI	3 000 €	- €	- €	- €	
PCB production	ANR DIAMMONI	1 500 €				
	UGA IRGA	- €	5 000 €	- €	- €	
Composants électronique	ANR DIAMMONI	2 500 €	- €	- €	- €	
	UGA IRGA	- €	2 500 €			
RUNASIC	ANR DIAMMONI	5 000 €	- €			
	UGA IRGA	5 000 €				
Divers	DéFi DiaMs	4 000 €	- €	- €	- €	
Fonctionnement		9 000 €	- €	- €	- €	9 000 €
Sous traitance	ANR DIAMMONI	1 000 €	- €	- €	- €	
Sous traitance	DéFi DiaMs	5 000 €	- €			
Sous traitance	UGA IRGA	3 000 €	- €			
Missions		8 000 €	6 000 €	1 000 €	- €	15 000 €
Tests GIP-ARRONAX	ANR DIAMMONI	1 000 €	1 000 €	- €	- €	
Test AIFIRA / MIRCOM	DéFi DiaMs	2 000 €	- €			
Tests ALTO	PICTURE	1 000 €	1 000 €	1 000 €		
Tests Melbourne	Labex PRIMES	4 000 €	4 000 €	- €		
Personnels		209 000 €	173 000 €	100 000 €	30 000 €	512 000 €
Post doctorat (F. Di Franco)	Labex PRIMES	46 000 €	23 000 €			
Thèse (P. Everaere)	Labex PRIMES	30 000 €	- €	- €	- €	
Thèse (A. André)	ED UGA	40 000 €	40 000 €	30 000 €	- €	
Thèse (R. Molle)	ANR DIAMMONI	40 000 €	30 000 €	- €	- €	
Thèse (C. Léonhart)	DéFi DiaMs	40 000 €	40 000 €	30 000 €	- €	
Thèse (X. Y)	UGA IRGA	10 000 €	40 000 €	40 000 €	30 000 €	
Stages (O. El Moujahed)	ANR DIAMMONI	3 000 €				
TOTAL		297 500 €	186 500 €	101 000 €	30 000 €	615 000 €

Tableau 8: Ressources financières autres qu'IN2P3

5 Ressources de calcul

5.1 Gestion des données

Un plan de gestion des données est en préparation, le détail de ce plan est présenté dans un document séparé attaché au projet, il liste les points suivants :

- documentation et qualité des données
- stockage et sauvegarde pendant le processus de recherche
- partage des données et conservation à long terme

	DIAMANT ML. GALLIN MARTEL	Réf :	ATRIUM-XXXXX
		Version :	1.0
		Date :	10/05/2023
		Page :	32/40

Responsabilités et ressources en matière de gestion des données :

Marie-Laure Gallin-Martel sera responsable pour le LPSC de la gestion des données

Amélia Leite sera responsable pour l'IJClab de la gestion de données

Stéphanie Sorieul sera responsable pour LP2I Bordeaux de la gestion des données

Arnaud Guertin sera responsable pour SUBATECH - GIP ARRONAX de la gestion des données

Les personnes travaillant sur le projet devront dédier une partie de leur temps de travail à assurer que les données soient correctement archivées suivant le format établi par le consortium.

5.2 Demandes au CC-IN2P3

Néant à T0, sera ré-évalué en cours de projet en fonction de l'avancement du logiciel PyDiam, en particulier pour le passage à la version 2D qui sera plus gourmande en temps de calcul

5.3 Demandes autres plateformes

Néant

6 Validation des laboratoires participants et visas

Le projet a-t-il été évalué par un ou plusieurs Conseils Scientifiques de Laboratoire ?	OUI/NON
<p>Si OUI mettre les principales conclusions de ces CSL en quelques lignes</p> <p>Oui LPSC juin 2022</p> <p>Recherche et développement transverse sur les détecteurs diamants</p> <p>La R&D détecteur diamant est un axe transverse aux différents projets, permettant d'être un point d'ancrage au niveau régional, voire national. Ces développements ne peuvent être réalisés que par un soutien fort des services techniques du laboratoire.</p> <p>Conclusions du CS</p> <p>Les positionnements clés de l'équipe dans le développement très positif autour des détecteurs diamant doivent être maintenus, et les possibilités d'augmenter cette visibilité au niveau national, par exemple avec la mise en place d'un plateau technique, devraient être poursuivies.</p>	

	DIAMANT ML. GALLIN MARTEL	Réf :	ATRIUM-XXXXX
		Version :	1.0
		Date :	10/05/2023
		Page :	33/40

Nom du Laboratoire	Nom du Directeur	Visa
LPSC	L. Derome	Le Directeur du LPSC  Laurent DEROME
IJClab	A. Stocchi	 <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: auto;"> Achille Stocchi Directeur d'IJClab </div>
LP2I Bordeaux	F. Piquemal	 LP2I Bordeaux Directeur Fabrice PIQUEMAL
SUBATECH	G. Martinez	P.O.  <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: auto; transform: rotate(-5deg);"> Pol-Bernard GOSSIAUX Directeur Adjoint </div>

7 Articulation avec les DRDi-j (Detector R&D) CERN : DRD 3 « Solid State Detector ».

7.1 Contexte du DRD

Ce projet s'inscrit dans les thématiques du DRD3 « Solid State Detector ». Le LPSC est déjà impliqué avec le **CERN** au travers de son appartenance à la **collaboration RD42** (équipes **PNAM, ATLAS et PLASMA** membres de DIAMANT). En **physique des hautes énergies**, la collaboration **ATLAS** (J. Collot ATLAS/DIAMANT), dans le cadre de la collaboration RD42 du CERN, a développé le Beam Condition Monitor (BCM) en technologie diamant. Ce moniteur a été conçu pour surveiller les pertes du faisceau et fournir des signaux rapides susceptibles d'interrompre le faisceau en toute sécurité. Il fournit également des mesures de luminosité essentielles à la prise de données exploitables pour les analyses physiques. Avec l'augmentation de la luminosité, des solutions nouvelles pour les détecteurs au plus près du point d'interaction (vertex), résistants aux radiations, avec des temps de réponse rapides (trigger) sont aussi étudiés au sein de RD42 toujours en technologie diamant. Avec les accélérateurs du futur, type projet Grand Collisionneur du CERN, nous ne sommes actuellement qu'aux prémices de tels développements. La tendance ne peut que s'accroître et la nécessité de construire de tels détecteurs, dans cette technologie, devenir incontournable. **ML Gallin-Martel est « deputy » pour le LPSC dans la collaboration RD42. La contribution du LPSC porte sur la détection des MIP (Minimum Ionising Particle avec mise en place banc source β dans la salle d'expérience de l'équipe PNAM), le monitoring faisceau et l'innovation technologique autour du matériau (membranes pCVD et télescope monolithique $\Delta E-E$).**

	DIAMANT ML. GALLIN MARTEL	Réf :	ATRIUM-XXXXX
		Version :	1.0
		Date :	10/05/2023
		Page :	34/40

7.2 Description des liens avec les DRD

Dans le cadre du DRD3 nos activités peuvent s'inscrire dans 2 WG (working group) :

- **WG3.6 «Wide bandgap and innovative sensor materials»** car nos recherches portent sur le développement de détecteurs diamant qui est un matériau innovant à grand gap,
- **W3.5 « Measurement and characterization techniques »** car nous avons mis au point des techniques de caractérisation qui utilisent
 - des sources en laboratoires : développements de bancs de tests β (MIP)
 - des faisceaux d'électrons (eBIC), de rayons X (XBIC) et d'ions (IBIC) afin de cartographier de manière systématique, à des échelles nano- (eBIC) et micro-métriques (XBIC et IBIC) la réponse des volumes actifs des détecteurs que nous développons.

Ces installations et les techniques inhérentes que nous avons mises au point peuvent également être utilisées pour d'autres détecteurs dans le cadre du DRD3.

Parmi les détecteurs développés ceux qui sont concernés par une implication dans les DRD sont :

- la croissance de membranes pCVD par l'équipe PLASMA du LPSC,
- le télescope $\Delta E-E$ pour la détection et l'identification de particules avec un détecteur ultra compact,
- les moniteurs faisceaux, dans ce cas là il faut entendre le concept au sens large. Il ne s'agit pas d'un moniteur faisceau en particulier parmi les 5 qui sont inclus dans le projet DIAMANT mais plus la **technologie** que nous maîtrisons (instrumentation, électronique FE et BE). L'adaptation des détecteurs que nous concevons aux **1) très hauts flux de particules (kGy/s)** et **2) très grandes fluences (10^{15} Gy)**, ainsi que leurs **3) grandes capacités de résolutions temporelles (100 ps)** ou de **4) taux de comptage** sont autant d'**atouts majeurs pour de futurs développements en lien avec le DRD3 et la feuille de route ECFA (European Committee for Future Accelerator).**

Le tableau ci-après résume la correspondance entre les objectifs et plan de développements exposés dans DIAMANT et ceux des WG correspondants dans le DRD3

	DIAMANT ML. GALLIN MARTEL	Réf :	ATRIUM-XXXXX
		Version :	1.0
		Date :	10/05/2023
		Page :	35/40

	DIAMANT		WG DRD3
	Objectifs	Plans de développement	
Livrables			WG3.6 « Wide bandgap and innovative sensor materials »
Membranes pCVD	<ul style="list-style-type: none"> • Production de grandes surfaces • Epaisseur du volume actif « ad hoc » 	<ul style="list-style-type: none"> • Amélioration de la qualité du matériau (réduction des défauts) pour permettre la détection de particules 	<ul style="list-style-type: none"> • « Détecteurs diamant 3D, chambre d'ionisation solide • Fabrication de détecteurs SiC et GaN de grande surface, amélioration de la qualité des matériaux et réduction des niveaux de défauts
ΔE-E	<ul style="list-style-type: none"> • Détection & identification de particules • Grande compacité 	<ul style="list-style-type: none"> • Télescope monolithique • Croissance de couches épitaxiées avec dopage p • Réduction des défauts 	<ul style="list-style-type: none"> • Améliorer les capacités de suivi des matériaux WBG
Moniteurs faisceaux	<ul style="list-style-type: none"> • Différents types de rayonnements : X / ions • Grande surface • Résistance aux radiations (fluence 1.4 10¹⁵ alpha/cm²) • Grande résolution temporelle (100 ps en particule unique ns au-delà) • Grande capacité de comptage (particule unique - kGy/s) 	<ul style="list-style-type: none"> • Croissance de matériaux de grande surface (sCVD et pCVD) avec réduction de défauts • Instrumentation de volumes actifs pour l'instrumentation détecteur • Electronique FE et BE pour lecture et traitement du signal • Simulation (PyDiam) collecte de charges pour comprendre la formation du signal et l'impact des défauts 	<ul style="list-style-type: none"> • Utiliser du graphène et/ou d'autres matériaux 2D dans les détecteurs de rayonnement, comprendre la formation du signal »
Techniques de caractérisation et mesures			WG3.5 « Measurement and characterization techniques »
	<ul style="list-style-type: none"> • Imagerie <ul style="list-style-type: none"> ○ Cartographie 2 D des défauts (Raman Néel, topographie X ESRF) • Propriétés des transports de charges <ul style="list-style-type: none"> ○ Cartographie de la collecte de charges à l'échelle nano- (eBIC) ou micrométrique (X et I BIC) ○ Cartographie de la résolution temporelle (ToF eBIC et ToF XBIC) 	<ul style="list-style-type: none"> • Bancs de tests déjà disponibles <ul style="list-style-type: none"> ○ Sources (LPSC) ○ eBIC et ToF eBIC (faisceau MEB Institut Néel) ○ ToF XBIC et XBIC (faisceaux ESRF BM05) ○ IBIC (faisceaux AIFIRA⁴) 	<ul style="list-style-type: none"> • « Le développement de nouvelles techniques de caractérisation des semi-conducteurs est une priorité pour les développements futurs des détecteurs • Ces techniques devraient permettre l'imagerie haute résolution et la spectroscopie des défauts des matériaux semi-conducteurs, ainsi qu'une caractérisation avancée des propriétés de transport de charge»

Tableau 9 Correspondance "objectifs / plans de développement" dans DIAMANT et "contributions proposées aux WG 3.6 et WG 3.5" du DRD3 "solid state detector".

⁴ Les caractérisations en IBIC sur AIFIRA impliquent également l'équipe DIAMANT du LP2I Bordeaux externes à RD42 en 2023.

	DIAMANT ML. GALLIN MARTEL	Réf :	ATRIUM-XXXXX
		Version :	1.0
		Date :	10/05/2023
		Page :	36/40

7.3 Organisation

Le LPSC est membre de la collaboration RD42 du CERN au travers de 3 équipes PNAM, ATLAS et PLASMA. Les membres des services Détecteur et Instrumentation et électronique du laboratoires impliqués dans DIAMANT sont également membres de cette collaboration.

7.4 Ressources Humaines

Le Tableau 10 rend compte des membres du LPSC impliqués dans RD42. Le Tableau 11 reste vierge pour 2023. Il pourra être complété en 2024 en fonction des recrutements obtenus. **Les FTE présentées ici ont été calculées sur la base du taux actuel de notre participation dans RD42.**

FTE	Ch/IT/CDD/PhD	2024 (%)	2025 (%)	2026 (%)
WP3.6 & 3.5	J. Collot (P)	5	5	5
	D. Dauvergne (DR)	5	5	5
	ML Gallin-Martel (DR)	5	5	5
	A. Lacoste (P)	5	5	5
	O. Rossetto (MCF HDR)	5	5	5
	A. Bes (IR)	5	5	5
	L Gallin-Martel (IR)	5	5	5
	O. Guillaudin (IR)	5	5	5
	Ch. Hoarau (IR)	5	5	5
	S. Marcatili (IR)	5	5	5
	M. Marton (AI)	5	5	5
	JF Muraz (IR)	5	5	5
	N. Ponchant (AI)	5	5	5
	F. Rarbi (IR)	5	5	5
	J. Waquet (T)	5	5	5
	A. André (doctorante)	5	5	0
	C. Léonhart (doctorante)	5	5	0
	R. Molle (doctorant)	5	0	0
X. Y (doctorant.e thèse IRGA T4 2023)	5	5	5	
Total		0.95	0.90	0.80

Tableau 10 RH disponibles contribuant à des activités en cours

FTE	Ch/IT/CDD/PhD	2024	2025	2026
WP3.6 & W3.5				
Total				

Tableau 11 RH additionnelles considérées

	DIAMANT ML. GALLIN MARTEL	Réf :	ATRIUM-XXXXX
		Version :	1.0
		Date :	10/05/2023
		Page :	37/40

7.5 Ressources financières

Notre participation actuelle (**collaboration RD42**) n'est accompagnée d'**aucun financement** si ce n'est nos missions pour les réunions de collaboration qui sont prises sur le **soutien de base des équipes PNAM et PLASMA**.

Les financements envisagés seront mis à jour en fonction des dotations attribuées par l'IN2P3 pour DIAMANT.

Sont reportés dans le tableau ci-après **les demandes répertoriées dans le Tableau 7 de la présente fiche projet pour le LPSC et principalement pour la R&D « membranes diamant pCVD ».**

Le Tableau 13 sera complété ultérieurement en fonction de l'attribution de ressources financières additionnelles liées à la réussite aux AàP.

k€	2024	2025	2026
WP3.6 & 3.5	49 k€	52 k€	30 k€
Total	49 k€	52 k€	30 k€

Tableau 12 RF disponibles (budget annuel/récurrent accordé aux activités existantes)

k€	2024	2025	2026
WP3.6 & 3.5			
Total			

Tableau 13 RF additionnelles considérées

8 Liste des documents accompagnant la fiche projet

- **Technology Readiness Level (TRL) plan**
- **Description du WBS et fiches de tâches associées**
- **Plan détaillé de développement du projet**
- **Plan détaillé de qualité et/ou Plan Assurance Produit**
- **Plan détaillé de gestion des données**
- **Calendriers détaillés des livrables du projet** suivant liste donnée en section 8

9 Livrables du projet

- **Les membranes pCVD produites au LPSC** qui sont destinées à équiper les futurs moniteurs faisceaux pour les très hauts flux
- **Le télescope diamant $\Delta E - E$** pour la détection de particules à faibles parcours qui intéresse la communauté de physique nucléaire (LOHENGRIN – ILL) pour **1**) la détection directe de fragments de

	DIAMANT ML. GALLIN MARTEL	Réf :	ATRIUM-XXXXX
		Version :	1.0
		Date :	10/05/2023
		Page :	38/40

fission ou **2**) si on surmonte le détecteur d'une couche de bore il sera possible de détecter les neutrons (production alpha et lithium) et ainsi être utile à la communauté de physique médicale pour le suivi patient ou le nucléaire civil pour la surveillance d sites « chauds ». **Pendant la durée du projet on prévoit 2 prototypes dans le but d'améliorer les croissances des couches épitaxiées grâce aux travaux de caractérisations et tests en faisceaux.**

- **Les 5 moniteurs faisceaux avec leur électronique** qui sont des développements dédiés pour un type d'accélérateur (ESRF, GIP ARRONAX, MIRCOM, AIFIRA, Bio-ALTO). De plus, l'hodoscope CLARYS-UFT pourra équiper les lignes médicales du CAL, du CNAO et d'ARCHADE en hadronthérapie. De la même façon DIAMMONI, dédié à la FLASH thérapie, est aussi destiné à équiper la ligne MEDICYC du CAL dans le contexte d'un upgrade de cette ligne pour des applications FLASH cliniques. Un upgrade du moniteur (adaptation de l'électronique essentiellement) pour s'adapter aux débits FLASH est également prévu en 2025/2026 sur BioALTO. Enfin les détecteurs amont / aval développés dans le cadre de la MRT pourront aussi être testés au synchrotron de Melbourne pendant la période de shutdown de la ligne médical ID17 à l'ESRF.
- **Le logiciel PyDiam** pour mise à disposition de toute la communauté détecteur DIAMANT dans tous les domaines : physique des hautes énergies, physique nucléaire ou applications médicales. **Pendant la durée du projet on prévoit 5 versions avec des évolutions (voir document « Plan de développement » joint à la présente fiche projet)**

10 Evaluation du coût de l'étape suivante

Cette étape concerne principalement nos développements de moniteurs faisceaux.

Dans le cadre du master DIAMANT nous développons des détecteurs qui seront ensuite utilisés 1) comme une « instrumentation faisceaux » pour des accélérateurs à l'IN2P3 (AIFIRA, Bio-ALTO) ou à l'IRSN (MIRCOM), 2) pour du **monitorage en ligne sur des installations cliniques** (ex : hodoscope et DIAMMONI portage visé vers CAL, ARCHADE et CNAO), 3) pour de la **mesure de dose afin de développer des thérapies innovantes** comme la MRT sur la ligne médicale ID17 de l'ESRF où notre premier prototype 8 voies ASIC a permis en 2023 de faire de la routine clinique auprès de patients vétérinaires (chiens).

Pour 2) et 3) DIAMANT va permettre le prototypage de détecteurs, le coût de l'étape suivante est celui de la production pour installation sur sites cliniques, par exemple dans l'ANR JCJC du CAL, dont on aura le résultat en juillet 2022, nous apparaissions déjà comme **experts extérieurs** pour la fourniture de DIAMMONI sur la base de nos résultats actuels.

Les coûts de production, suivant le type de détecteurs, peuvent être estimés de la façon suivante :

- **hodoscope faisceau basse intensité (modèle hodoscope CLARYS – UFT) (~15 k€ + 1.5k€/voie)**, l'objectif de l'étape suivante est un « portage » vers des centres cliniques : CAL, CNAO, ARCHADE
Pour une surface active de 4 diamants sCVD couvrant 1 cm² il faudra
 - assembler 4 diamant de 4.5 mm² avec métallisation par pistes X Y (**10 k€**)
 - associer une électronique
 - soit en électronique discrète
 - TDC : actuellement 40 voies dans 1 FPGA (**0.7k€**)
 - QDC **0.7 k€/voie**
 - Préampli RF **20€/voie**
 - DFC **100€/voies environs (PCB+câblage)**

	DIAMANT ML. GALLIN MARTEL	Réf :	ATRIUM-XXXXX
		Version :	1.0
		Date :	10/05/2023
		Page :	39/40

- soit intégrée (**3.6 k€ par mm² en CMOS 130 nm**)
- instrumenter sur PCBs + divers composants + câblage + mise en boîtier et petit matériel (**5 k€**)
- **moniteur faisceau pour la FLASH thérapie type DIAMMONI (~20 k€)**, pour un « portage par exemple vers le CAL ligne MEDICYC il faudra
 - assembler 4 diamants sCVD sous forme de mosaïque surface totale 1 cm² + amincissement de 500µm à 150 µm + métallisation (**15 k€**)
 - dupliquer l'électronique existante (discrète mode Train Counting) + ACQ (**3 k€**)
 - instrumenter diamant sur PCB avec mise en boîtier et petit matériel (**2k€**)
- **détecteur amont/aval pour la MRT**, développés les deux sur le même principe (**~20 k€/détecteur**) pour des tests cliniques sur patients humains
 - assemblage 9 diamants sCVD + amincissement de 500 µm à 150 µm + métallisation par µ pistes (**15 k€**)
 - dupliquer l'électronique existante 1 détecteur = 20 ASIC, coût du RUN au moins **5 k€**
 - instrumenter diamant et électronique sur PCB + divers composants + câblage + mise en boîtier et petit matériel (**5 k€**)

En termes de RH, cela impliquerait au moins 1 chercheur, des ingénieurs des services d'électronique et SDI (**a minima** 2IR et 2AI).

La durée totale sans tenir compte de l'approvisionnement en diamant (1 à 6 mois suivant les stocks chez Element 6) pour la réplification d'un détecteur est d'au moins 6 mois qui peuvent être étendus raisonnablement à 9 mois compte tenu de la charge qui repose sur les services pour les développements d'autres détecteurs en dehors de DIAMANT. Se rajoutent les tests sous faisceaux in situ et les mise au point au moment de l'intégration sur la ligne (3 mois). **Durée totale 13 à 19 mois pour 1 détecteur production et mise en service in situ.**

	DIAMANT ML. GALLIN MARTEL	Réf :	ATRIUM-XXXXX
		Version :	1.0
		Date :	10/05/2023
		Page :	40/40

11 Calendrier du projet avec jalons principaux – Macro planning

Voir document « Calendriers détaillés » pour plus d'information sur chaque livrable et sur les jalons

DIAMANT																				
Année	2023				2024				2025				2026				2027			
Trimestre	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
Membranes pCVD						J01	J02		J03			J04					J05 & J06			
Télescope ΔE-E						Proto 1					Proto 2									
Moniteurs faisceaux																				
Hodoscope						Proto 1cm ²						Proto 16cm ²								Proto 16 cm ² ASIC
μ faisceaux d'X			Aval		Amont															
Faisceaux ions pulsés							Proto1 BC +TC													Proto2 BC -ASIC
μ faisceaux d'ions				Proto1		Proto2				Intégration ligne										
Bio-ALTO				Moniteur											FLASH					
PyDiam				Pydiam 2.0		Pydiam 2.1		Pydiam 2.2							Pydiam 3.0					Pydiam 3.1