

DIAMTECH



M.-L. Gallin-Martel*, A. Bes, G. Bosson, J.-L. Bouly, J. Bouvier, J. Collot, S. Curtoni, D. Dauvergne, P. Everaere, L. Gallin-Martel, A. Ghimouz, Ch. Hoarau, O Jaafoura, A. Lacoste, S. Marcatili, R. Molle, J-F. Muraz, N. Ponchant, A. Portier, M. Ramdhane, F. Rarbi, N. Rosuel, O. Rossetto, Ch. Sage, L. Tribouilloy, M. Yamouni



A. Guertin, F. Haddad, C. Koumeir,
V. Métivier, R. Molle, F. Poirier, N. Servagent



国立研究開発法人 物質・材料研究機構
National Institute for Materials Science



Inter-University Research Institute Corporation
High Energy Accelerator Research Organization



JOURNÉES RECHERCHE & TECHNOLOGIE - IP2I - LYON



Journées R&T 2022

Lyon, 19 octobre 2022

*mlgallin@lpsc.in2p3.fr

Activité DIAMANT

Les objectifs suivant les thématiques – les complémentarités dans les collaborations :

Physique des particules

- **Monitoring faisceau (LHC, KEK, J-PARC)**
 - **Inner tracking detectors**
 - Très hautes fluences
 - Opérationnels sur longue durée
 - Grande sensibilité: détection de Minimum Ionising Particle (MIP)
- ANR MONODIAM (2012-2017) JM Brom IPHC
Collaboration RD42 CERN



Physique Médicale

- **Monitoring faisceau en radiothérapies**
 - Position
 - Etiquetage temporel
 - Comptage

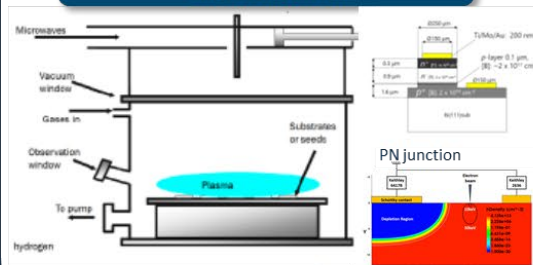
Physique nucléaire

- **Particules alpha, neutron, particules à faible parcours**
- Grands dépôts d'énergie sur faible distance
~ qq μm
Identification avec
- la charge,
 - la masse,
 - l'énergie cinétique

Développement de détecteurs diamants innovants :

Croissance diamant + implantation d'ions + développements en électronique (fast preamplifier, QDC, TDC, ASIC et discrète) + assemblage détecteurs + accès aux facilités d'irradiation

Croissance diamant CVD, dopage, caractérisation



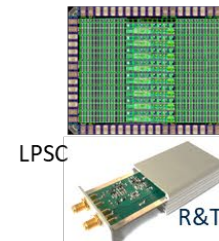
NIMS -AIST- Institut Néel – LSPM-DiamFab

Métallisation diamant, assemblage de détecteurs



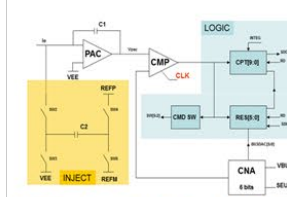
Développements en électronique

Preamplificateurs rapides et TDC



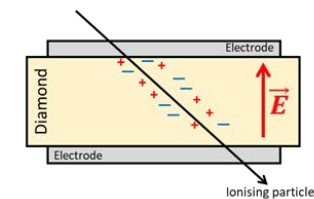
R&T DIAMASIC voir talk F. Rarbi LPSC – LPC Caen
Electronique FE (discrète & ASIC CMOS 130 nm) + système ACQ

QDC



Evaluation des performances des détecteurs sous faisceaux

Utilisation comme chambre d'ionisation solide



LPSC-SUBATECH ARRANAX

Collaborations nationales au sein de l'IN2P3 mais aussi entre Instituts du CNRS et avec l'INSERM
Collaborations internationales européens + Japon (Tsukuba JSPS-CNRS +LIA France Japon)

Hadronthérapie

**Monitoring
faisceau**

Radiothérapies par
fractionnement spatial
ou temporel de la dose

Micro Beam Radiation
Therapy
(*Imagerie portale*)

Radiothérapies FLASH
(*monitorage*)

Radiothérapies ciblées

**Monitoring
 μ -faisceaux**

DIAMANT

Hadronthérapie

**Monitoring
faisceau**

Radiothérapies par
fractionnement spatial
ou temporel de la dose

Micro Beam Radiation
Therapy
(*Imagerie portale*)

Radiothérapies FLASH
(*VHEE, dosimétrie,
monitorage*)

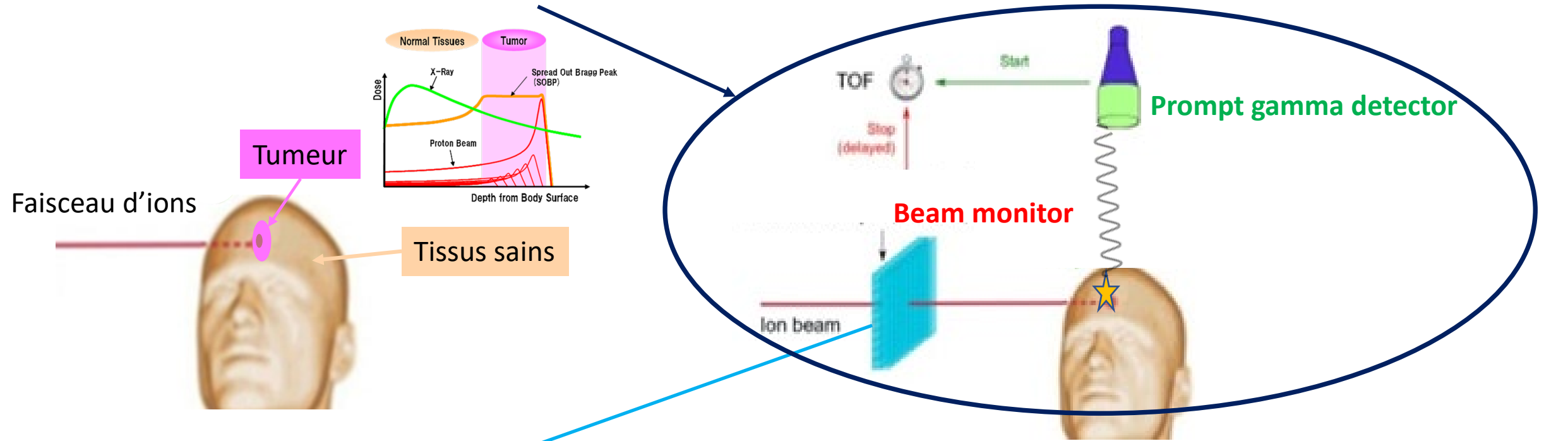
Radiothérapies ciblées

Monitoring
 μ -faisceaux

DIAMANT

Hadronthérapie : principe de contrôle en ligne du dépôt de dose dans le patient

gamma detector vs beam monitor => secondary particle detection = prompt gamma selection



Moniteur faisceau :

- Réduction du bruit de fond
- Marquage en temps et en position du faisceau incident

Projets : CLaRyS (Master Projet IN2P3)
CLaRyS-UFT (INCA 2017-2021)
Peak Integral (thèse P. Everaere Labex PRIMES 2020-2023)
TIARA (IRS UGA 2020 – 2021 + INCA 2020-2023+ ERC 2022-2027)

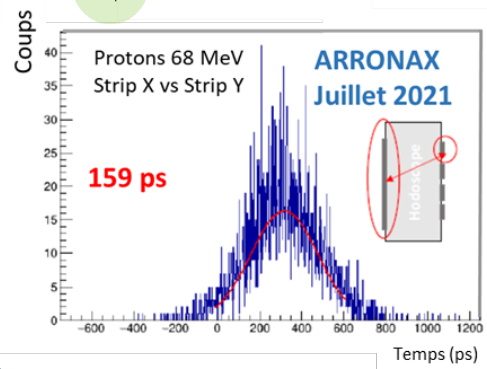
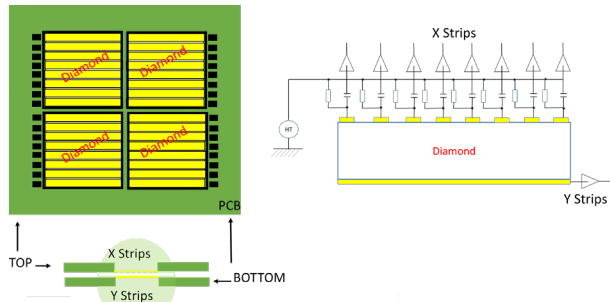
Objectif : résolution en temps ~100 ps pour précision millimétrique sur dépôt de dose

Monitorage faisceau diamant en hadronthérapie

42 channels



4 sCVD = 1cm²



Coll. Clarys - UFT

Hodoscope diamant

	Diamant	Silicium
Résistivité ($\Omega \cdot m$)	$> 10^{13}$	$2.3 \cdot 10^7$
Gap (eV)	5.5	1.1
Energie création paire e ⁻ /h (eV)	13.1	3.6
Energie de déplacement (eV)	43	25
Mobilité des porteurs ($cm^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$)	> 2000	800 – 1400
Conductivité thermique ($W \cdot cm^{-1} \cdot K^{-1}$)	18	2

→ Courants de fuite très faibles

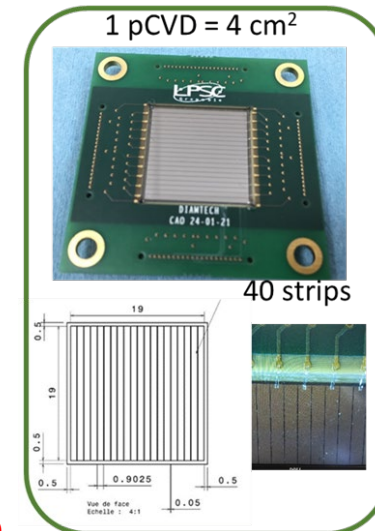
→ Bas bruit

→ Résistant aux radiations

→ Très rapide

→ Opération à température ambiante

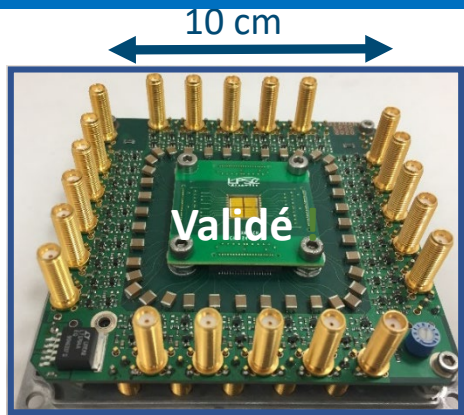
- $\sigma_t \sim 100 ps$ RMS → filtrage bruit de fond
- 1^{er} proto 40 voies
- Surface sensible : 1 cm² (sCVD) à 4 cm² (pCVD)



pCVD : Application carbone thérapie CNAO / ARCADE

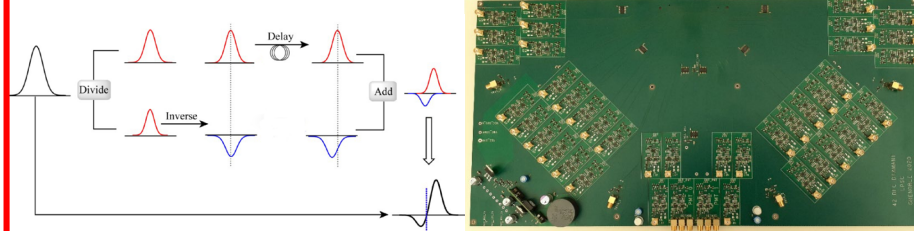
Objectif 100 ps atteint avec la surface active + fast préamp.

Monitorage faisceau diamant en hadronthérapie



42 channels

En cours ! Tests au CAL de Nice Novembre 2022



CFD => time stamp independant of diamond signal amplitude

CFD = Constant Fraction Discriminator

Validé

FPGA
2020
LPSC Grenoble
25 ps RMS

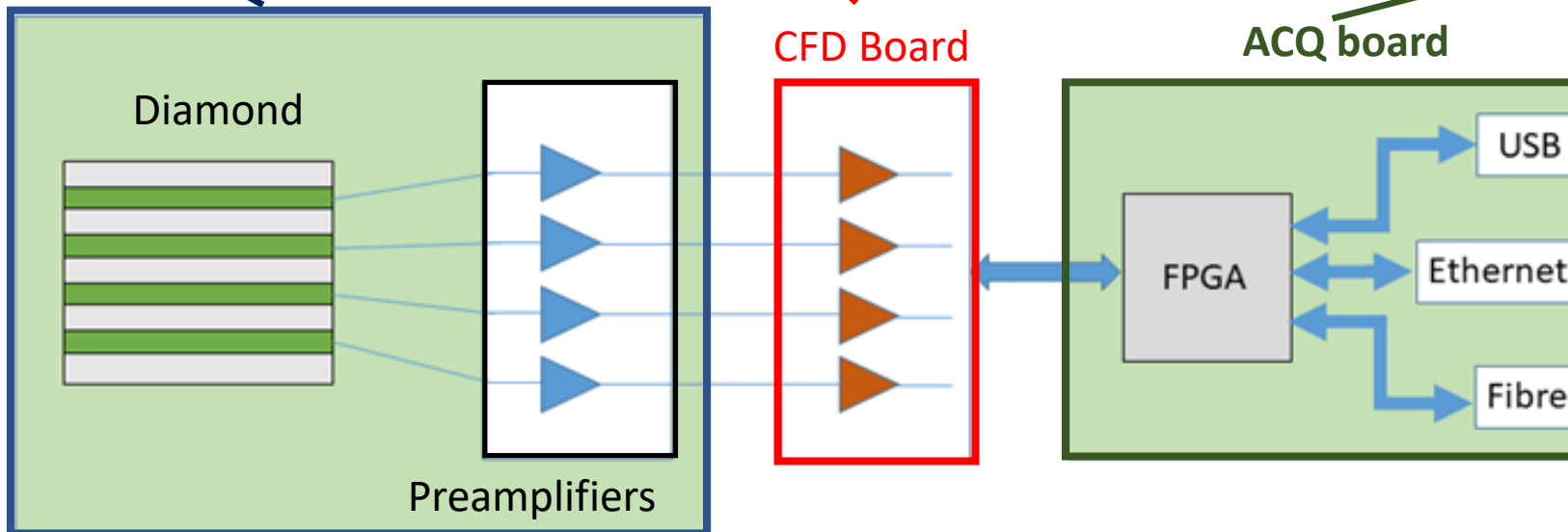
2021 CMOS 130 nm
12,5 ps RMS

TDC = Time Digital Converter

Beam Monitor

CFD Board

ACQ board



- Localisation XY < 1 mm, **marquage temporel < 100 ps OK !**
- Préamplificateurs LPSC rapides pour marquage temporel (C. Hoarau *et al* 2021 *JINST* **16** T04005)
- **DFC LPSC en cours de mise au point**
- **40 TDC LPSC embarqués dans le FPGA de la carte ACQ (STD < 25 ps) OK !**
- Version intégrée => DIAMASIC : TDC (LPC Caen) => OK (STD ~12 ps), préamplificateur et QDC en cours de validation

Hadronthérapie

Monitoring
faisceau

Radiothérapies par
fractionnement spatial
ou temporel de la dose

Micro Beam Radiation
Therapy
(*Imagerie portale*)

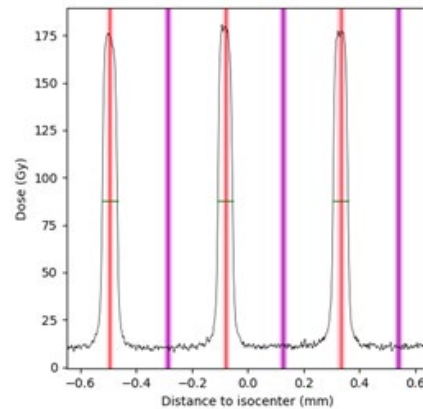
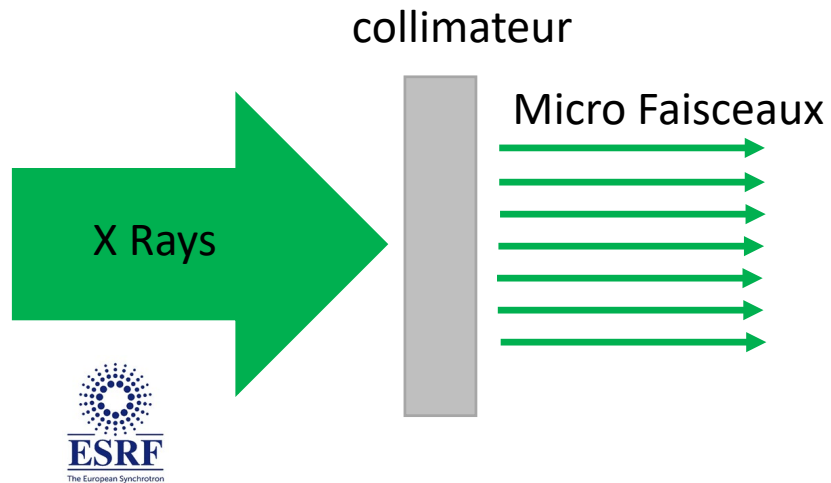
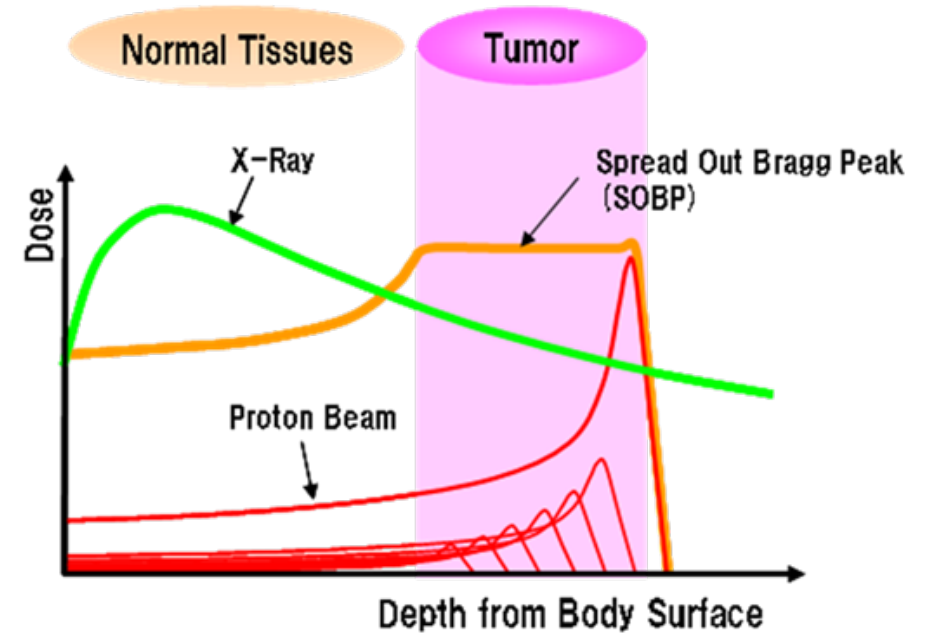
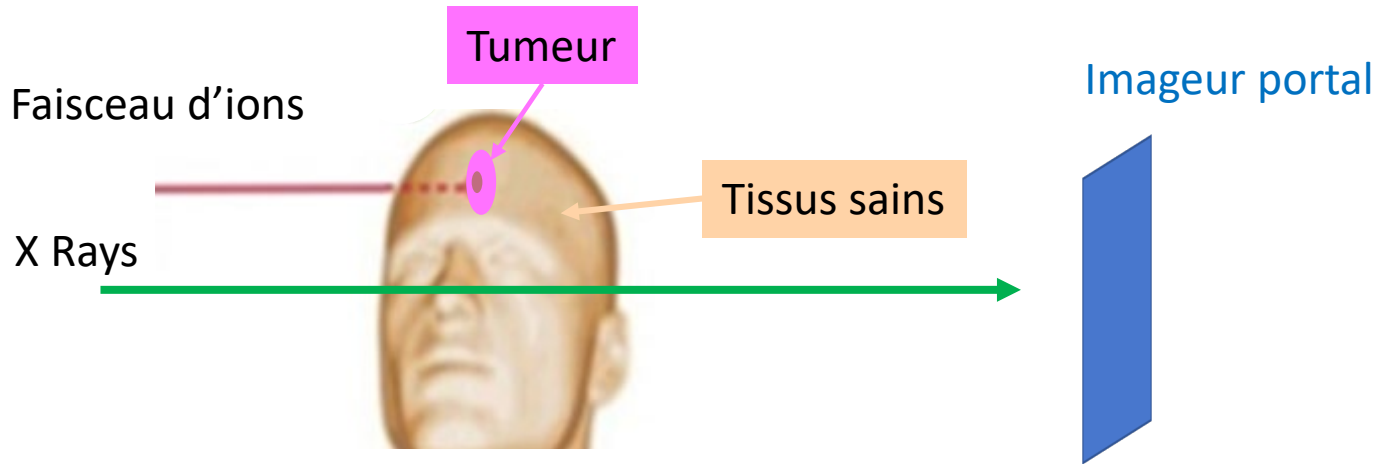
Radiothérapies FLASH
(*monitorage*)

Radiothérapies ciblées

Monitoring
 μ -faisceaux



Fractionnement spatial de la dose - Micro Beam Radiation Therapy (MRT)



MRT: 50 μm
Micro Beam Radiation Therapy

Thérapie par micro faisceaux de rayons X

- Thérapie innovante **faisceaux de photons segmentés spatialement**
- **Energie 50-200 keV@ ESRF compensée par très haut débit de dose 10^4 Gy/s**



Fractionnement spatial de la dose

MRT@ESRF = R&T DIAMTECH (IN2P3) - IDSYNCHRO (UGA – IRS) - PAIR TUMC (INCA)

Monitoring of radiotherapy by synchrotron radiation

- Detection of X-rays
- Spatial resolution (micro beams)
- Large dynamics (High dose rate)

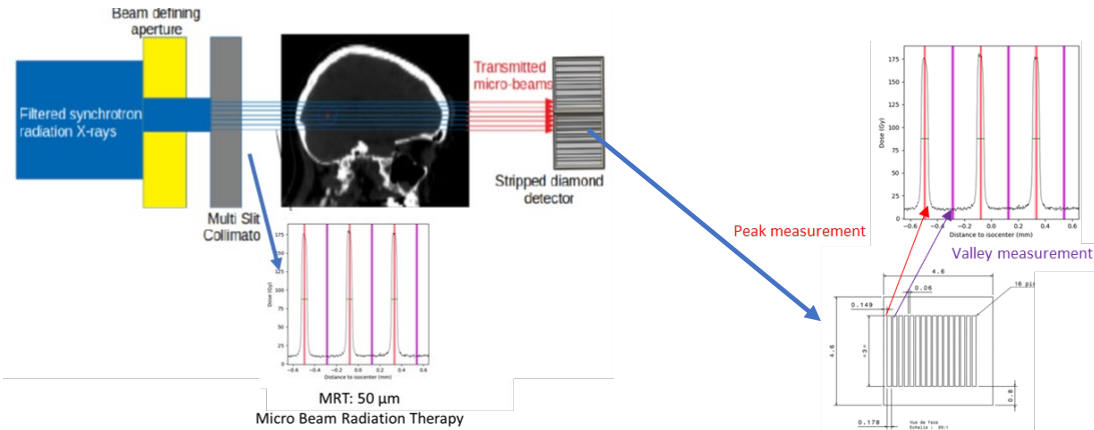
Diamond detector in transmission for portal imaging in radiotherapy by synchrotron radiation

Collaboration LPSC - INSERM UA07 STROBE (JF Adam) – ESRF (ligne médicale ID17)

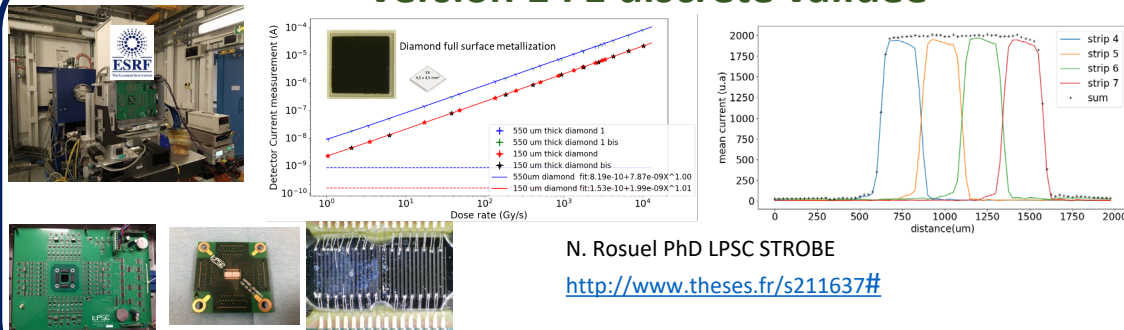
Thèse N. Rosuel (D. Dauvergne LPSC J-F Adam STROBE) 2018-14/12/2021 – financement LABEX PRIMES

Apprentissage école ingénieur PHELMA L. Tribouilloy (L. Gallin-Martel LPSC) 2018-2021 service électronique)

DIAMTECH IN2P3 + INCA PAIR TUMC (tumeurs cérébrales) porteur STROBE-INSERM



Version 1 FE discrète validée

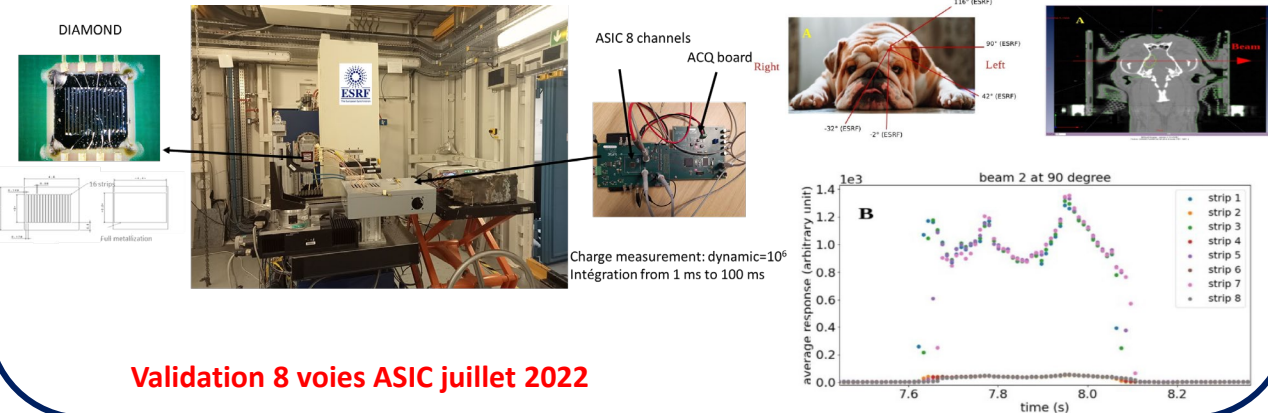


Validation 32 voies en élec discrète en janvier 2022

Métallisation NanoFab, Institut Néel

Version 2 FE ASIC validée

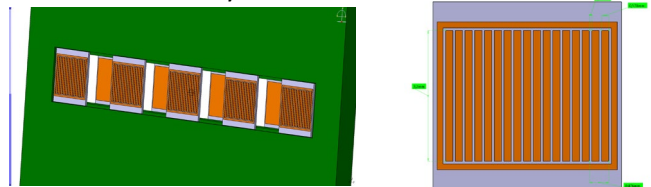
1^{ers} patients vétérinaires



Version finale en cours !

153 voies pour janvier 2023
9 diamants avec 17 pistes
20 ASIC 8 voies

JF Muraz JL Bouly LPSC



Hadronthérapie

Monitoring
faisceau

Radiothérapies par
fractionnement spatial
ou temporel de la dose

Micro Beam Radiation
Therapy
(*Imagerie portale*)

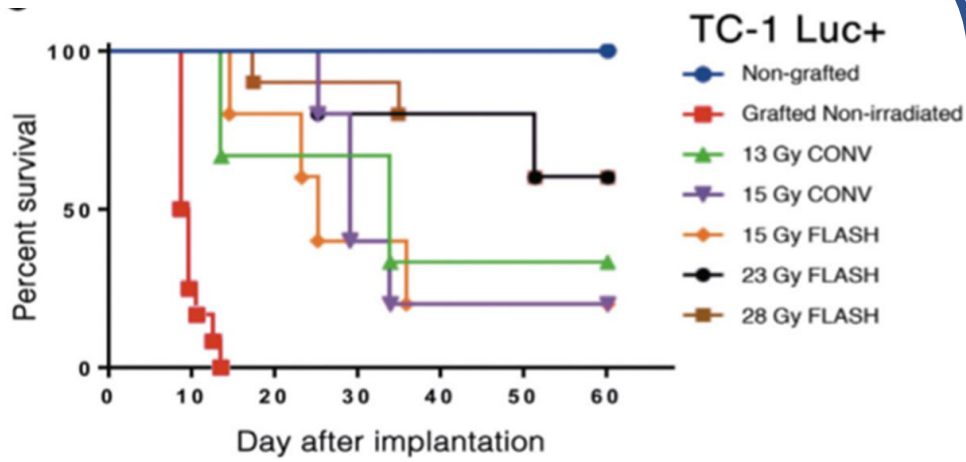
Radiothérapies FLASH
(*monitorage*)

Radiothérapies ciblées

Monitoring
 μ -faisceaux



Fractionnement temporel de la dose – Thérapies FLASH Ultra Haut Débit de Dose



Favaudon *et al* (2015)
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1278321815001201?via%3Dihub>

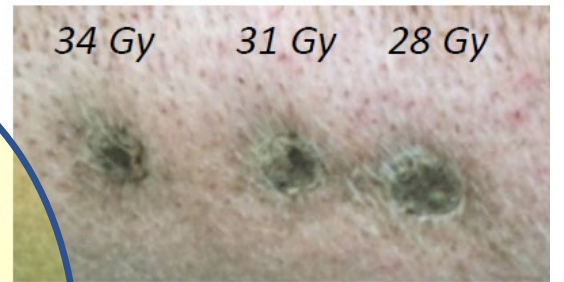


1 Gy = 1 J/kg

Conventional
(5 Gy/min)

FLASH
(300 Gy/s)
3 Gy/pulse

36 weeks post-RT

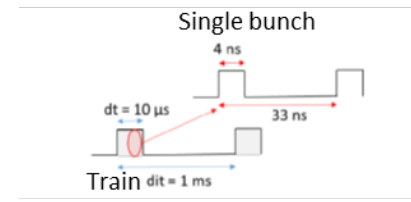
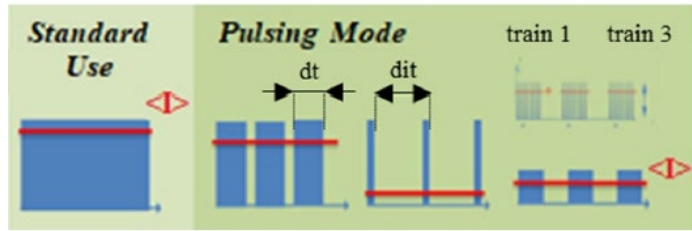


Vozenin *et al.*, Clin Cancer Res 25 (2019) 35
<http://dx.doi.org/10.1158/1078-0432.CCR-17-3375>

Flash therapie vs conventionnelle = très hauts débits de dose sur des temps très courts

Fragmentation temporelle de la dose

F. Poirier et al., IMAC 2019



Physique Médicale

- **Monitoring faisceau en radiothérapies** (position/étiquetage temporel/comptage)
 - Grande surface ($>1\text{cm}^2$)
 - Fort taux de comptage (100 MHz)
 - Bonne sensibilité et grande dynamique (détection de particules uniques dans des bunchs jusqu'à 10^{10} particules dans des trains pour les thérapies Flash)

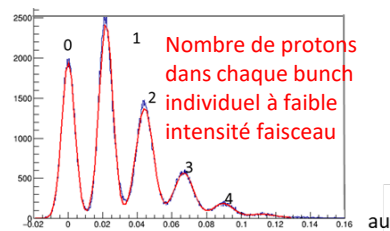
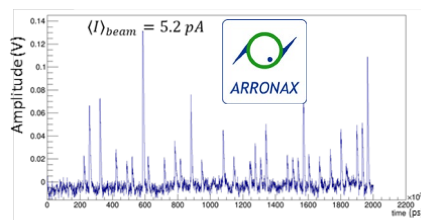
Moniteur faisceau diamant à forte dynamique applicable en radiolyse pulsée (protons, alphas) et en irradiation « flash »

⇒ ANR DIAMMONI (2020-2024)

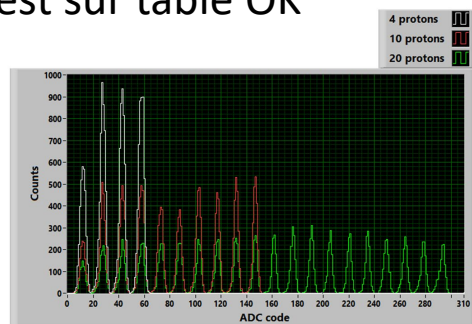
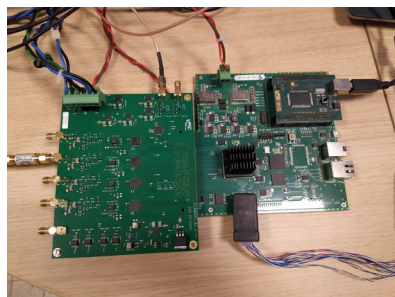
Collaboration LPSC SUBATECH équipe PRISMA et GIP-ARRONAX

Thèse R. Molle (ML Gallin-Martel LPSC C. Koumeir SUBATECH-ARRONAX) 2021-2024 financement ANR

Bunch Counting Mode

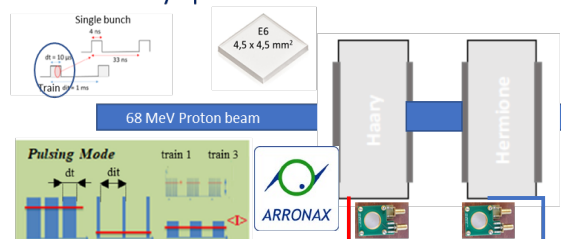


Dév élec en cours => test sur table OK



Train Counting Mode

Beam intensity up to 300 nA measured on diamond



$I = 10\text{nA}$, $dt = 10\mu\text{s}$, $dit = 1\text{s}$

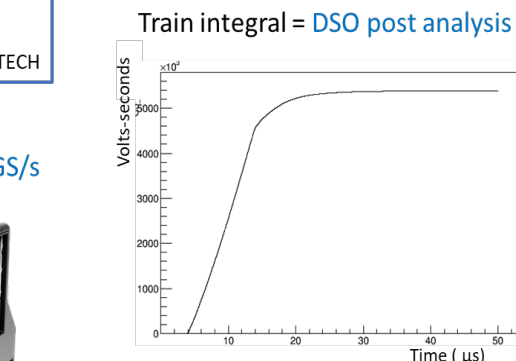
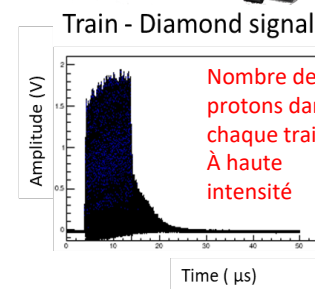
QDC board developed @ LPSC

DAQ developed @ LPSC

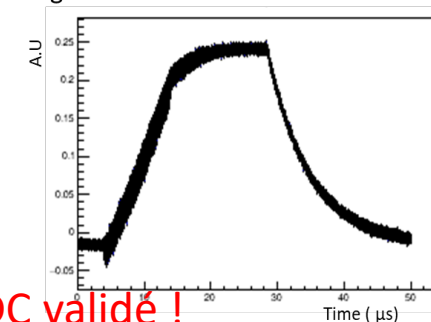


R. Molle
PhD Thesis
LPSC ARRONAX SUBATECH

DSO Lecroy
2 GHz; 10 or 20 GS/s



Train integral = on line measurement with LPSC QDC



QDC validé !

Train Counting validé ! Bunch Counting en cours (tests faisceaux Nov 2022)

Hadronthérapie

Monitoring
faisceau

Radiothérapies par
fractionnement spatial
ou temporel de la dose

Micro Beam Radiation
Therapy
(*Imagerie portale*)

Radiothérapies FLASH
(*VHEE, dosimétrie,
monitorage*)

Radiothérapies ciblées

Monitoring
 μ -faisceaux

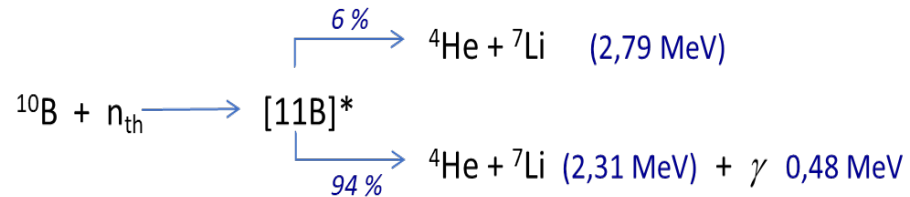
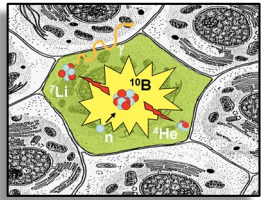
DIAMANT



BNCT et Radiothérapies internes vectorisées (RIV)

Objectif : Amélioration des prédictions de dose et effets biologiques pour les radiothérapies ciblées :

Capture neutronique par le Bore (BNCT)

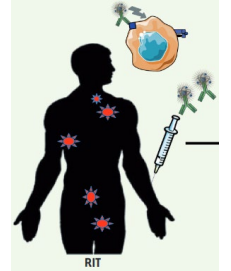


Parcours : 5 – 9 μm (< 1 cellule)
Très hauts TEL : ≥ 200 keV/ μm

Radiothérapie Interne Vectorisée alpha (RIV- α)

Anticorps + radionucléide

Ciblage métabolique des sites
cancéreux non-localisés



Radionucléides α : ^{223}Ra , ^{225}Ac , $^{212/213}\text{Bi}$, ^{211}At ...

Energies α : 5 – 9 MeV ; **Parcours** = 40 – 100 μm (qqs cellules)

Hauts TEL = 60 – 100 keV/ μm (TEL $\beta \sim 0,3$ keV/ μm)

Problématiques communes pour la modélisation de la dose « biologique »

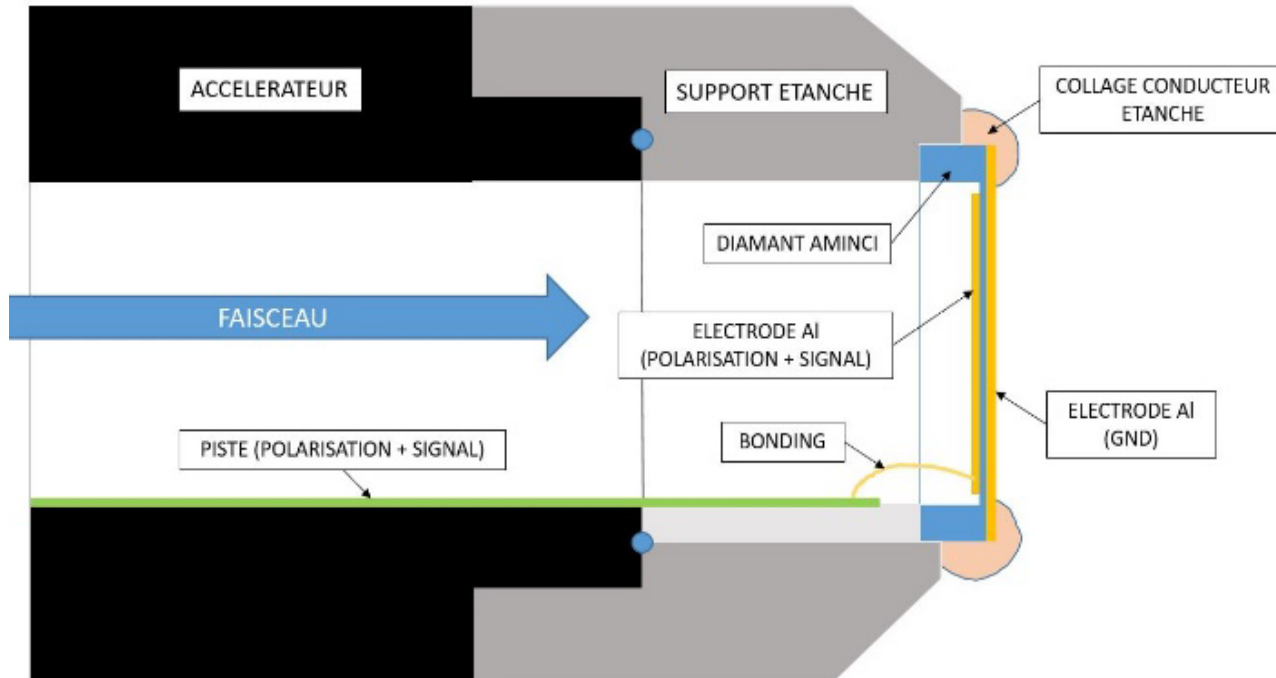
Intérêt pour tests sur cellules avec micro-faisceaux AIFIRA (LP2I Bordeaux) et MIRCOM (IRSN Cadarache)



Monitoring faisceau avec membrane diamant

DéFI DiaMs

PRIME 80



Monitorage **micro faisceaux** (LP2I Bordeaux/AIFIRA -IRSN/ MIRCOM)

Coll. LPSC Institut Néel-Grenoble LP2I-Bordeaux IRSN

- Amincissement diamant par procédés de gravure (Institut Néel – Tsukuba)
- Intégration sur ligne micro faisceau = fenêtre d'extraction par LPSC
- Applications tests sur cellules pour développements RIV et BNCT

Nouveau projet démarrage T2 2022 – thèse T4 2022

Conclusion

JOURNÉES RECHERCHE & TECHNOLOGIE- IP2I - LYON



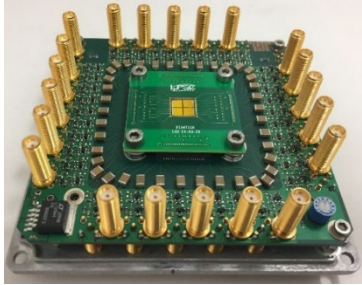
CNRS IN2P3
UNIVERSITÉ CLAUDE BERNARD
IP2I
UNIVERSITÉ CLAUDE BERNARD
LYON 1

Du 17 au 19 octobre 2022
Campus LyonTech – La Doua
4, rue Enrico Fermi
69622 Villeurbanne Cedex

Journées R&T 2022

Activité DIAMANT – Applications médicales

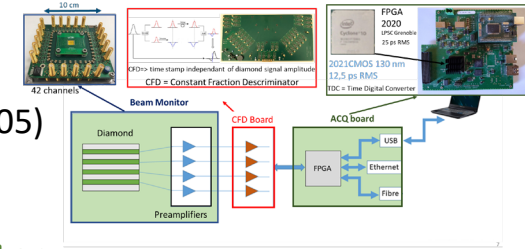
40 préampli LPSC + PCB diamant



Monitorage faisceaux en hadronthérapie (ARRONAX, CAL)

Coll. Clarys UFT / Coll. TIARA / Coll. ClaryS - LaBeX PRIMES (thèse P. Everaere)

- Localisation XY < 1 mm, **marquage temporel < 100 ps validé !**
- Préamplificateurs LPSC rapides pour marquage temporel (C. Hoarau *et al* 2021 *JINST* 16 T04005)
- **DFC LPSC en cours de mise au point**
- 40 TDC LPSC embarqués dans le FPGA de la carte ACQ (STD < 25 ps)
- **Version intégrée => DIAMASIC : TDC (LPC Caen) => OK (STD ~12 ps), préamplificateur et QDC en cours de validation**

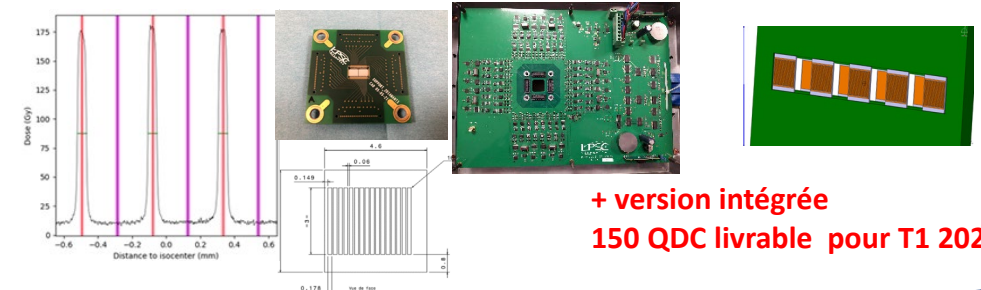


Monitorage faisceaux en Microbeam Radiation Therapy (ESRF)

R&T DIAMTECH / IDSYNCHRO / PAIR TUMC - Coll. LPSC – STROBE (INSERM)

- Mesure de charge (dynamique=10⁶), intégration de 1 ms à 100 ms
- **Proto LPSC 32 voies discrètes validé à ESRF en T1 2022**
- **Version intégrée => QDC de DIAMASIC testé ESRF validée T2 2022**
- **Détecteur final développement en cours pour T1 2023**

Monitorage MRT ESRF : 32 QDC + PCB diamant



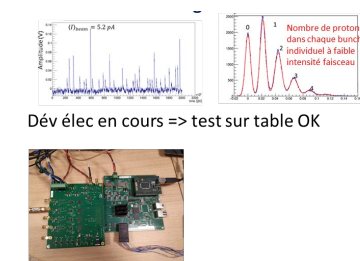
**+ version intégrée
150 QDC livrable pour T1 2023**

Monitorage faisceaux en Flash thérapie (ARRONAX)

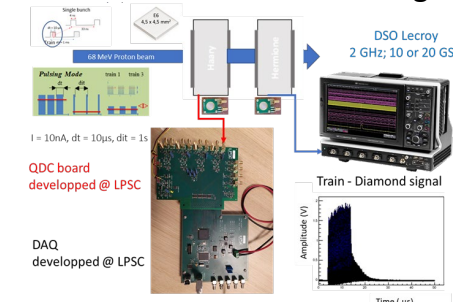
R&T DIAMTECH / ANR – DIAMMONI Coll. LPSC SUBATECH ARRONAX

- Mesure de charge (dynamique=10⁵), marquage temporel trains < 33 ns / bunches < 1 ns
- Intégration par train => **proto 4 voies validé à ARRONAX en T4 2021**
- **Intégration par bunch => en cours de tests (préamplificateurs rapides LPSC + ADC)**
- Version intégrée => DIAMASIC : préamplificateur et évolution du QDC
=> Développement ADC 8 bits 500 MHz en cours au LPSC

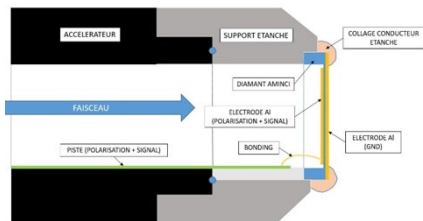
DIAMMONI Bunch Counting



DIAMMONI Train Counting



DÉFI DiaMs



Monitorage micro faisceaux (LP2I Bordeaux/AIFIRA -IRSN/ MIRCOM)

Coll. LPSC Institut Néel-Grenoble LP2I-Bordeaux IRSN

- Amincissement diamant par procédés de gravure (Institut Néel – Tsukuba)
- Intégration sur ligne micro faisceau = fenêtre d'extraction par LPSC
- Applications tests sur cellules pour développements RIV et BNCT



Mission pour les Initiatives Transverses et Interdisciplinaires

PRIME 80

Nouveau projet démarrage T2 2022 – thèse T4 2022

Activité DIAMANT – développement détecteur Phys. Nucléaire

Télescope diamant monolithique ΔE- E (Néel)

R&T DIAMTECH / DIATEL

Coll. LPSC, Institut Néel, DIAMFAB

- Croissance ΔE @Néel - principe : mesure de charges étages ΔE vs E
- Conception PCB et préamplificateur de charge ACQ MCA LPSC
- Tests en laboratoire en cours (LPSC et Néel) – Test sur AIFIRA T1 2022 en protons E<3 MeV – analyse en cours – Pb cross talk entre les 2 étages => 2nd proto ? Fin thèse A. Portier T4 2022

ToF eBIC (electron Beam Induced Current) @ Néel + ToF X BIC @ ESRF

R&T DIAMTECH / DIATEL

- Système innovant de caractérisation 2D des diamants
- eBIC (Coll. LPSC Institut Néel) => caractérisation des transport de charges en fonction du type de porteur, étude des mobilités en fonction de la température et du champ de polarisation
- XBIC (Coll. IRT NanoElec) installation sur BM05 (nouveau projet démarrage T2 2022) embauche CDD 18 mois caractérisation 2D cartographie en courant + réponse impulsionnelle

Trigger véto pour la fission – spectromètre de masse FIPPS@ ILL

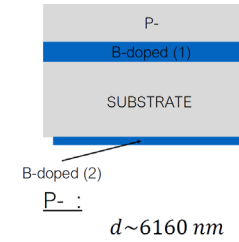
R&T DIAMTECH

Coll. LPSC ILL INFN Milan IFJ Pan Cracovie

- Conception support 1 diamant avec cible d'uranium déposée sur la feuille de zirconium (Coll. LPSC – Néel)

Défis technologiques validés :

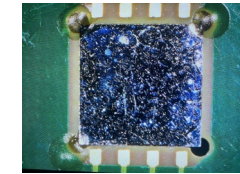
- conception support dans des matériaux permettant de diminuer la contamination du signal par du bruit de fond résultant de l'interaction des neutrons avec le support
- rendre les contacts électriques opérationnels (collaboration LPSC service détecteur et instrumentation - Institut Néel Grenoble plateforme NanoFab)



B-doped (1) :
 $d \sim 845 \text{ nm}$
 $\rho \sim 1,8 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}$
 $p \sim 9 \pm 2 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$

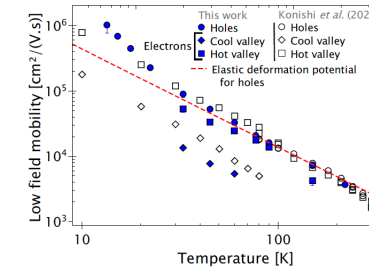
B-doped (2) :
 $d \sim 76 \text{ nm}$
 $\rho \sim 3 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}$
 $p \sim 4 \pm 1 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$

PCB diamant face ΔE



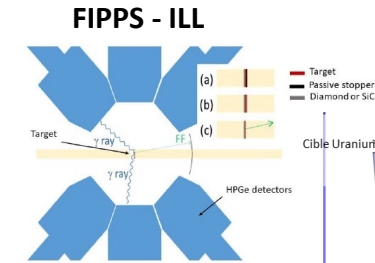
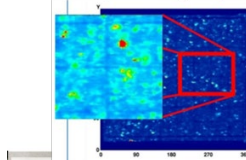
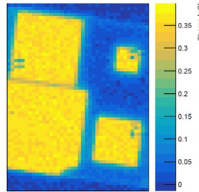
Thèse A. Portier 2023

ToF eBIC Néel

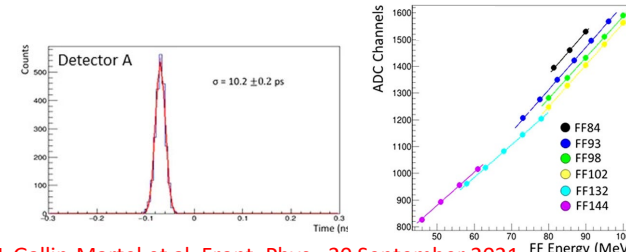


ToF XBIC ESRF

Article va être soumis à **Nature electronics**
 Plus grande mobilité en trou jamais mesurée à basse température et bas champ sur matériau semi-conducteur



LOHENGRIN - ILL



ML Gallin-Martel et al, *Front. Phys.*, 20 September 2021
[| https://doi.org/10.3389/fphy.2021.732730](https://doi.org/10.3389/fphy.2021.732730)

Projet dépôt ANR
AAP2023

Collaborations nationales et internationales



Y. H. Kim, G. Colombi, U. Köster, C. Michelagnoli



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

C. Boiano, S. Brambilla, G. Colombi, Ł. W. Iskra



Ł. W. Iskra, M. Jastrzab, T. Nowak, M. Rydygier



L. Abbassi, T. Crozes, F. Donatini, E. Gheraert, J. F. Motte, J. Pernot, A. Portier



L. Ottaviani, W. Rahajandraibe, A. Tchoualack,



C. Destouches, A. Lyoussi



Ph. Barberet



INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

F. Vianna Legros



JF Adam, R. Serduc



P. Pelicioli, H. Requardt
ID17 beam line



F. Lafont, T-N Tran-Thi
BM05 beam line, IRT Nanoelec.



JOURNÉES RECHERCHE & TECHNOLOGIE- IP2I - LYON



Journées R&T 2022

Du 17 au 19 octobre 2022
Campus LyonTech - La Doua
4, rue Enrico Fermi
69622 Villeurbanne Cedex

Merci pour votre attention

Back up slides

JOURNÉES RECHERCHE & TECHNOLOGIE- IP2I - LYON

CNRS IN2P3 **IP2i**
LES 2 INFANS
LYON

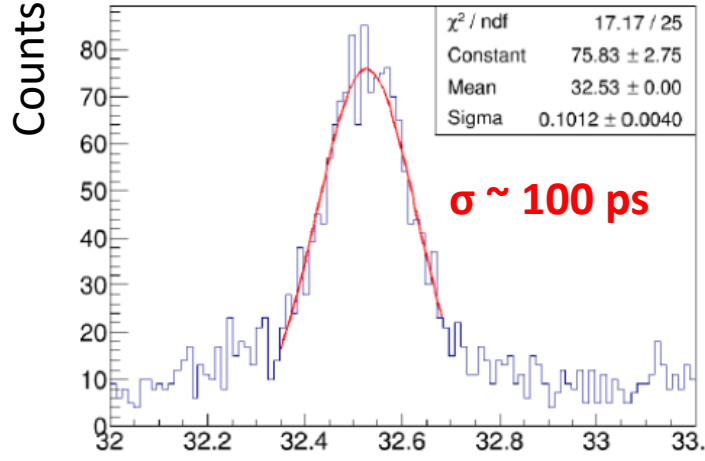
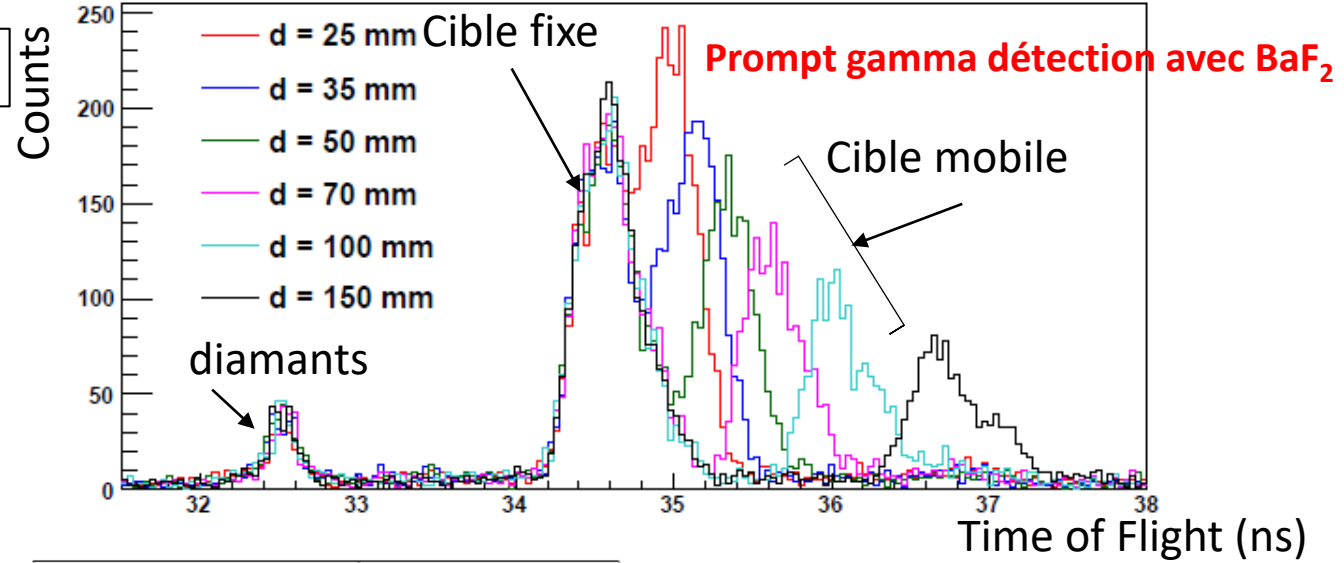
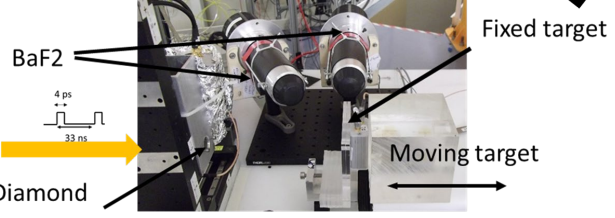
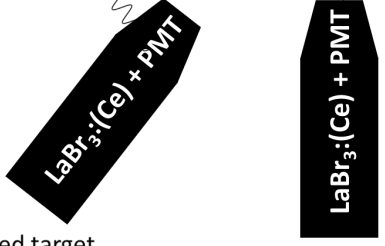
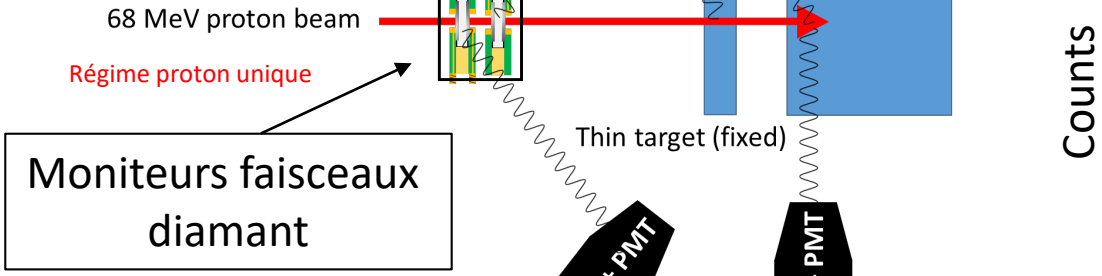
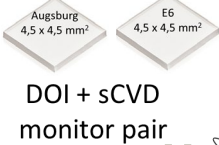
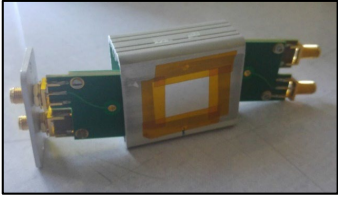
UNIVERSITÉ CLAUDE BERNARD **UCLB** LYON 1

Du 17 au 19 octobre 2022
Campus LyonTech – La Doua
4, rue Enrico Fermi
69622 Villeurbanne Cedex



Journées R&T 2022

Hadronthérapie : monitoring diamant – performances mesures temps de vol = preuve de concept



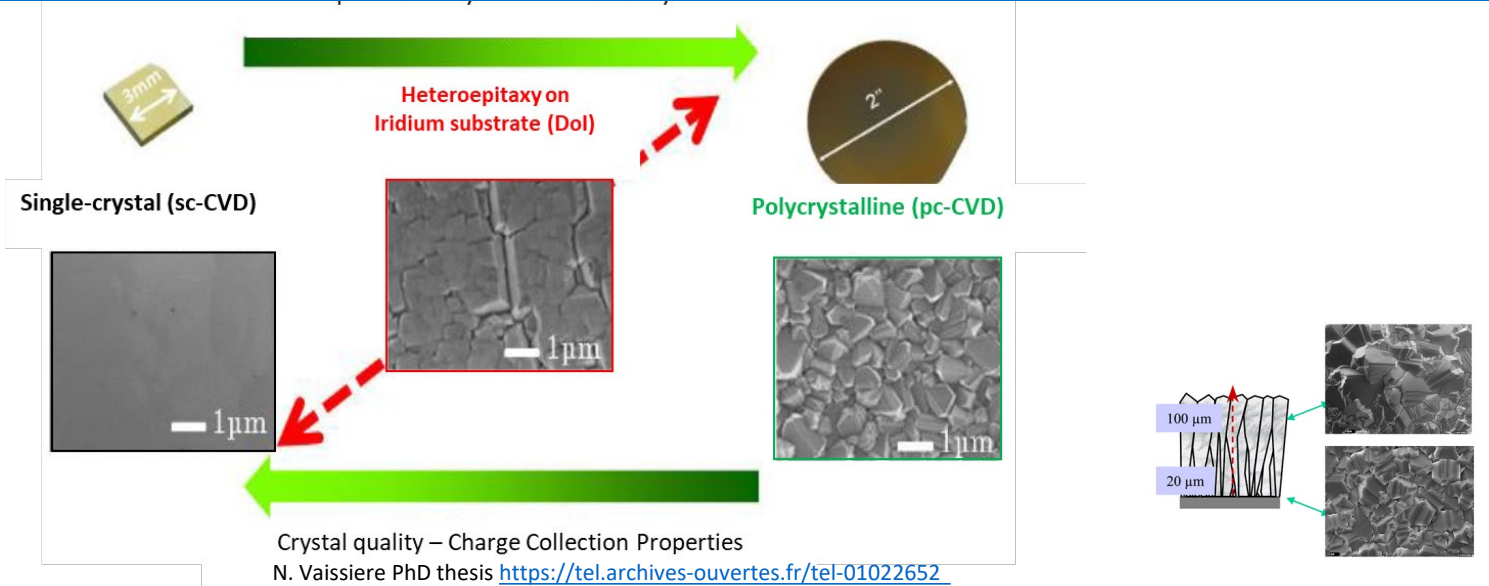
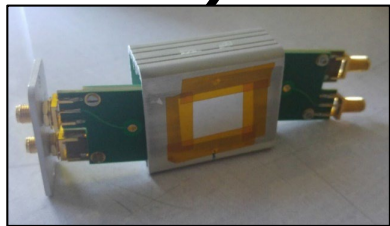
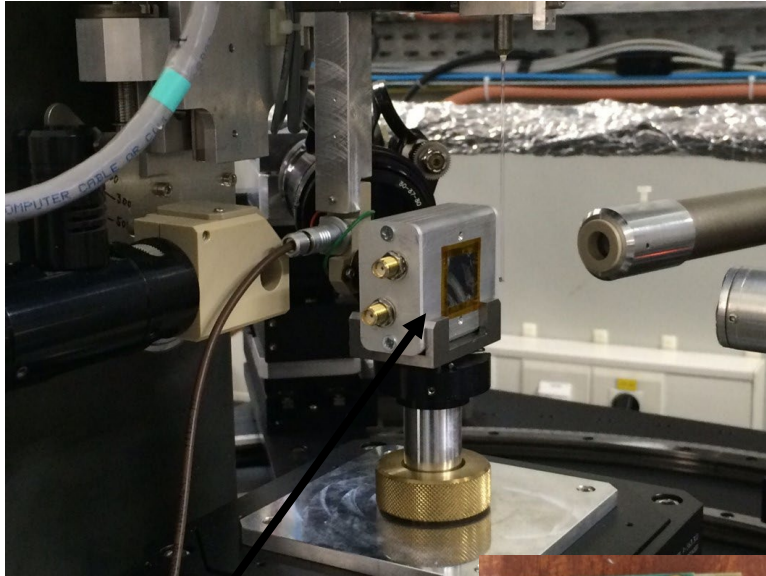
Résolution en temps
Diamant versus Scintillateur

100 ps résolution en temps démontrée
235 ps FWHM en régime proton unique

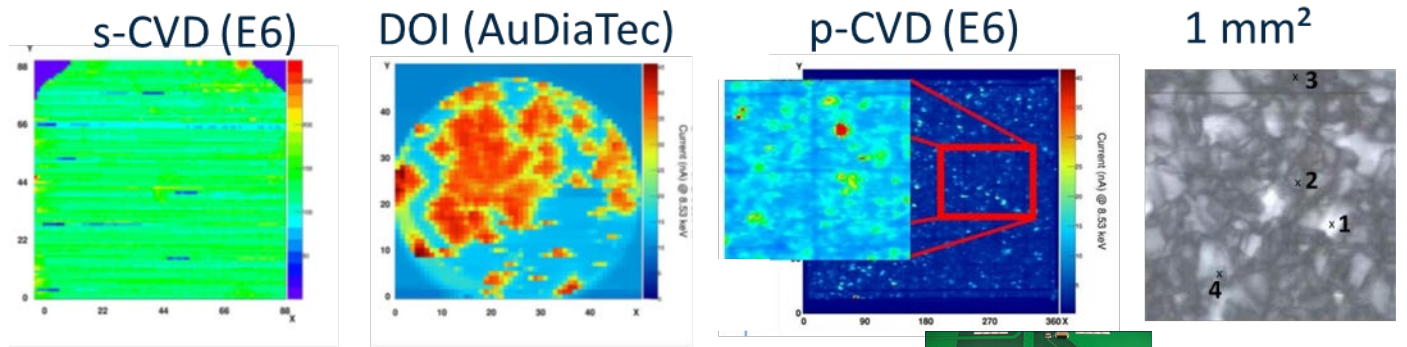
Résolution en temps sCVD – BaF₂ (ns)

(S. Marcatili et al, PMB 2020 – Thèse S. Curtoni 2020)

Monitorage faisceau diamant en hadronthérapie



XBIC = X rays Beam Induced Current
@ ESRF (France) : Photons 8.5 keV => 2D « current maps » with CVD diamonds



ML Gallin-Martel Diamond and related materials 112 (2021) 108236

<https://doi.org/10.1016/j.diamond.2020.108236>

