

# Conception D'un Moniteur Faisceau Basé Sur L'utilisation De Détecteurs Diamants Pour Le Contrôle En Ligne De Faisceaux Pulsés



ML. Gallin-Martel, A. Bes, G. Bosson, J. Bouvier, J. Collot, D. Dauvergne, S. Curtoni, L. Gallin-Martel, A. Ghimouz, Ch. Hoareau, A. Lacoste, S. Marcatili, JF. Muraz, F. Rarbi, O. Rossetto, N. Rosuel, L. Tribouilloy, M. Yamouni : LPSC Grenoble



A. Guertin, F. Haddad, C. Koumeir, F. Poirier, V. Métivier, N. Servagent :  
ARRONAX et Subatech Nantes



J. F. Motte, L. Abbassi : NEEL Grenoble



J. F. Adam : STROBE Grenoble



# Le contexte

## ➤ Développement de nouvelles générations d'accélérateurs d'ions :

- Pour la physique nucléaire et des hautes énergies,
  - les applications médicales : hadronthérapie, radiothérapies X ou par rayonnement synchrotron et flash thérapies
- ⇒ surveillance très précise du faisceau avec un comptage rapide dans un environnement fortement radiatif.

## ➤ Les qualités intrinsèques du diamant : rapidité, faible courant de fuite, excellent SNR, résistance aux radiations

⇒ un excellent candidat pour répondre à de telles exigences de monitoring sur une large gamme dynamique d'une fraction de pA (particule unique) jusqu'au  $\mu\text{A}$ .



**Développement d'un moniteur pour faisceaux pulsés R&T transverse DIAMTECH :  
collaboration LPSC SUBATECH ARRONAX,**

⇒ équiper une ligne faisceau opérant en mode pulsé discontinu

⇒ applications à la radiolyse et exploration des techniques de thérapies « flash » en applications médicales

## **I. Les détecteurs diamants**

- **Performances attendues**
- **Instrumentation détecteur**
- **Performances mesurées en tests en faisceaux : GANIL ARRONAX ESRF**

## **I. Moniteurs faisceaux diamants : contrôle en ligne de faisceaux**

- **Etat de l'art**
- **Focus sur des R&D en cours**

## **III. R&D moniteur faisceau diamant contrôle en ligne de faisceaux pulsés : perspectives à 10 ans**

- **Objectifs 2020-2030**
- **Premières preuves de concept et de faisabilité établies**

## **IV. Conclusion et perspectives**

## I. Les détecteurs diamants

- Performances attendues
- Instrumentation détecteur
- Performances mesurées en tests en faisceaux : **GANIL ARRONAX ESRF**

## I. Moniteurs faisceaux diamants : contrôle en ligne de faisceaux

- Etat de l'art
- Focus sur des R&D en cours

## III. R&D moniteur faisceau diamant contrôle en ligne de faisceaux pulsés : perspectives à dix ans

- Objectifs 2020-2030
- Premières preuves de concept et de faisabilité établies

## IV. Conclusion et perspectives

# Le diamant : semi-conducteur intrinsèque

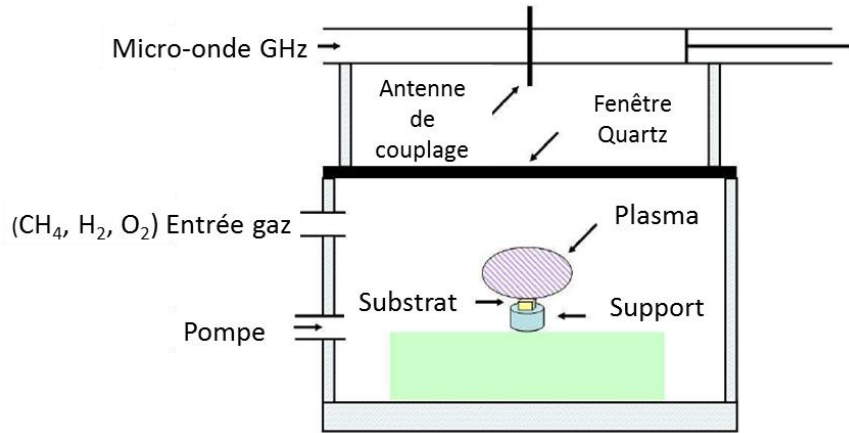
## Caractéristiques à 300 K

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

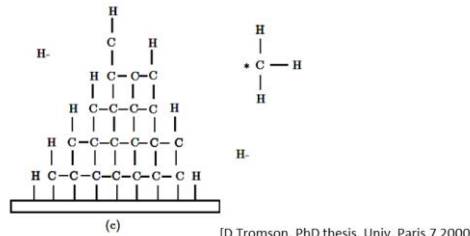
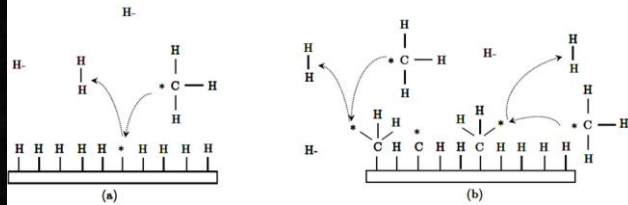
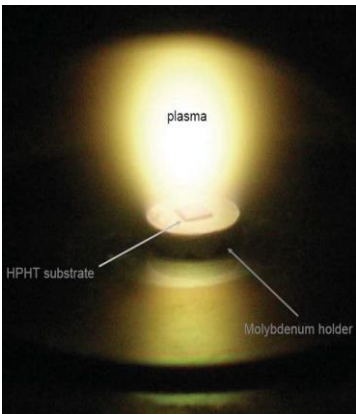


- **Courants de fuite très faibles**
- **Bas bruit**
- **Résistant aux radiations**
- **Très rapide**
- **Opération à température ambiante**

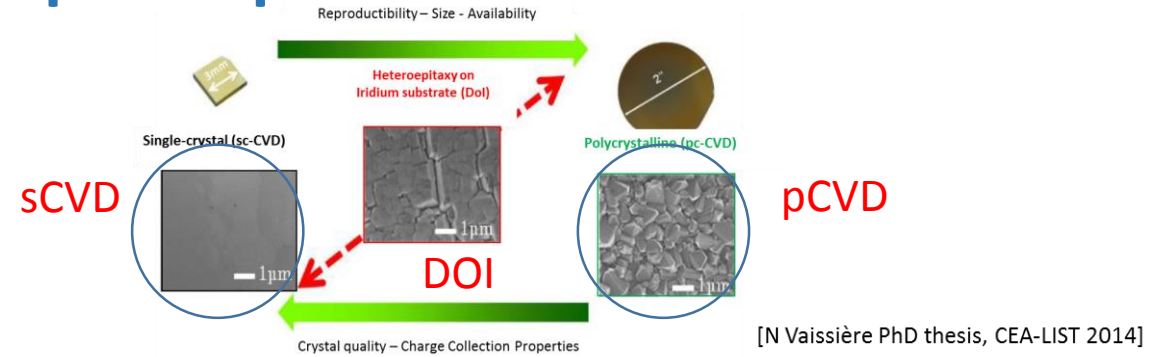
# Croissance par dépôt chimique en phase vapeur CVD



[F Marsolat PhD thesis, CEA-LIST 2013]



[D Tromson, PhD thesis, Univ. Paris 7 2000]



## Situation actuelle :

Achat de diamant CVD auprès de fournisseurs E6, II VI, DDK ....

→ Très grande dépendance avec le marché ! ... peut nuire aux applications et conception de détecteurs

## Prospectives :

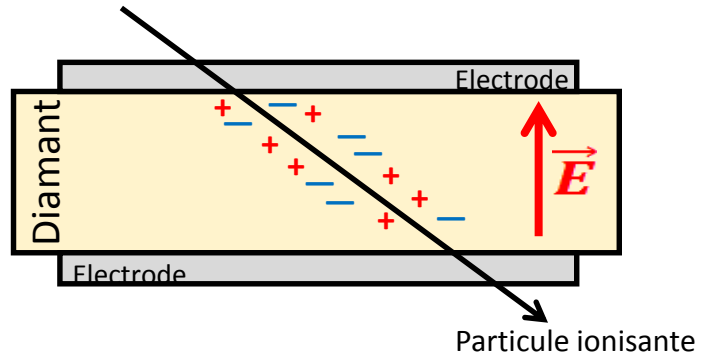
- R&D avec labos du CNRS Villetaneuse ANR AAP2020 antériorité ANR MONIDIAM HE 2012-2017 production / caractérisation diamant sCVD de grande surface
- Croissance couche de diamants épitaxiée (R&T Transverse IN2P3 DIAMTECH collaboration Institut Néel Grenoble et startup DIAMFAB thèse A. Portier LPSC -Néel financement UGA IRS sur projet DIATEL)
- Collaboration Franco-Japonaise programme JSPS-CNRS 2019-2020 LPSC Néel NIMS AIST KEK Université de Tsukuba croissance / caractérisation de diamant sCVD
- Croissance de diamant pCVD de très grande surface PE-CVD A. Lacoste et al au LPSC
- Savoir faire aussi au CEA LIST et à Versailles au GEMAC (CNRS Université de versailles StQuentin en Yveline) + ....

→ Savoir faire pour développer une plateforme !

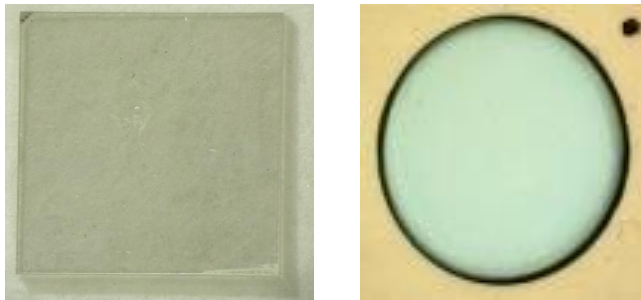
[M Pomorski, PhD thesis, Univ. Frankfurt 2008]

# Le diamant synthétique comme chambre d'ionisation solide

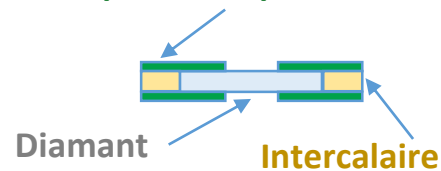
## Chambre d'ionisation solide



## Assemblage de détecteurs



## Circuit imprimé adapté 50Ω



## Electronique de lecture

- Préamplificateur de courant



**Bande passante:** 2 GHz  
**Gain:** 40 dB  
**Impédance:** 50 Ω

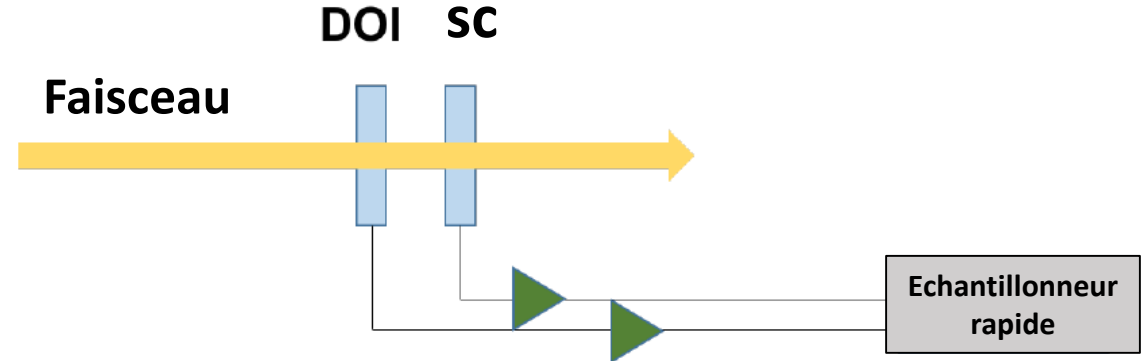
+ selon application :

- Préamplificateur de charges
- Electromètre

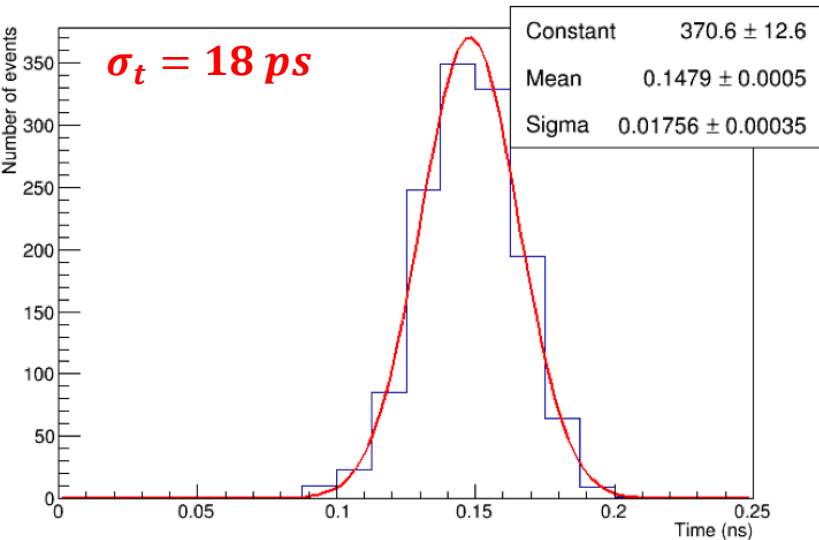
# Le diamant détecteur rapide : mesures de résolutions temporelles sous différents faisceaux

Single crystal  
sc-CVD E6  
 $0.45 \times 0.45 \text{ cm}^2 \times 518 \text{ }\mu\text{m}$

Heteropitaxial DOI  
DOI Augsburg  
 $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2 \times 300 \text{ }\mu\text{m}$

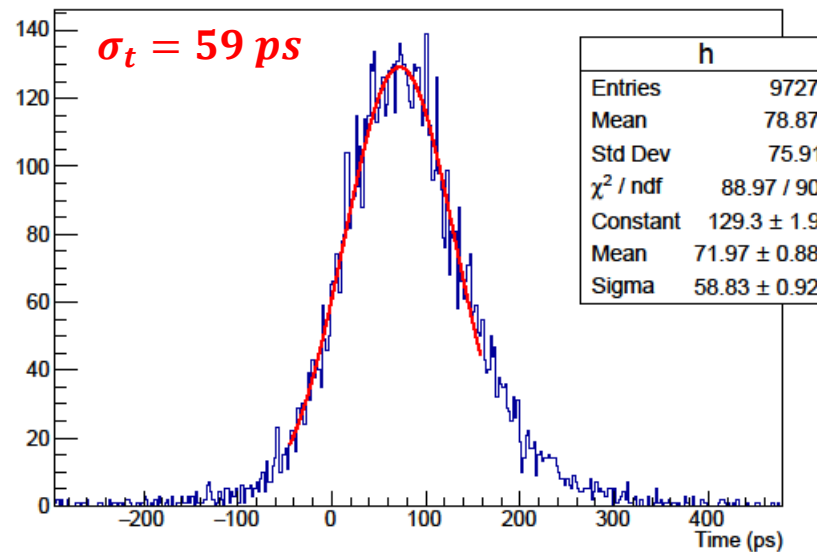


Ions  $^{12}\text{C}$  95 MeV/u @ GANIL



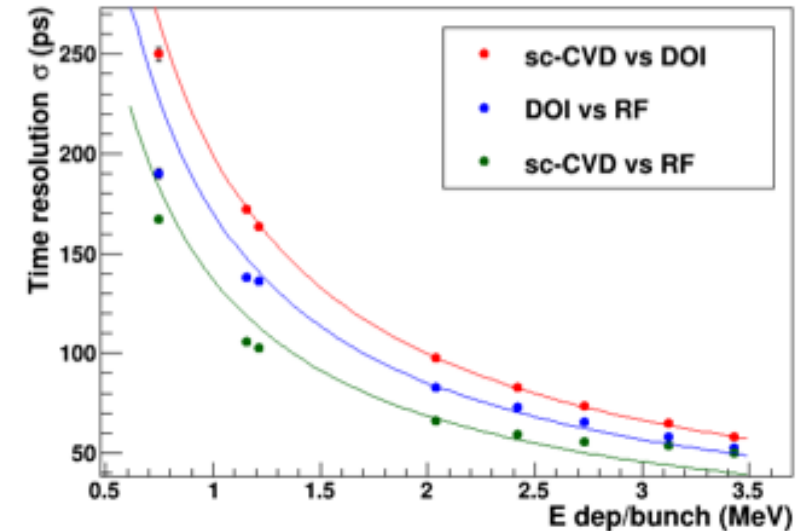
$\Delta E = 25 \text{ MeV}$  (300  $\mu\text{m}$  diamant)

Protons 68 MeV @ ARRONAX



$\Delta E = 2 \text{ MeV}$  (300  $\mu\text{m}$  diamant)

Photons 8.5 keV @ ESRF





## I. Les détecteurs diamants

- Performances attendues
- Instrumentation détecteur
- Performances mesurées en tests en faisceaux : GANIL ARRONAX ESRF

## I. Moniteurs faisceaux diamants : contrôle en ligne de faisceaux

- **Etat de l'art**
- Focus sur des R&D en cours

## III. R&D moniteur faisceau diamant contrôle en ligne de faisceaux pulsés : perspectives à 10 ans

- Objectifs 2020-2030
- Premières preuves de concept et de faisabilité établies

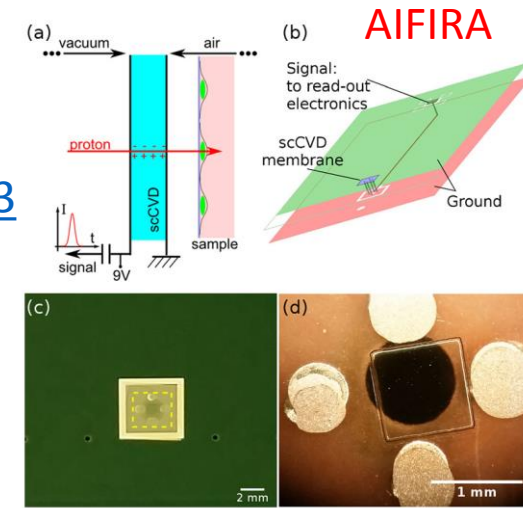
## IV. Conclusion et perspectives

## Moniteur faisceau pour AIFIRA

Ph Barberet (CENBG) et al.,

Appl. Phys. Lett. **111**, 243701 (2017); <https://doi.org/10.1063/1.5009713>

Micro-irradiation avec faisceau de proton  $\sim$ MeV  
 $\Rightarrow$  moniteur faisceau = très fine membrane de diamant

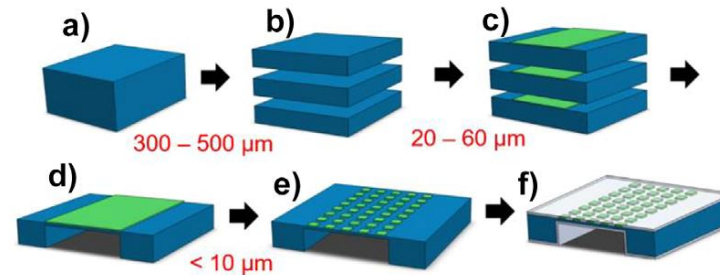
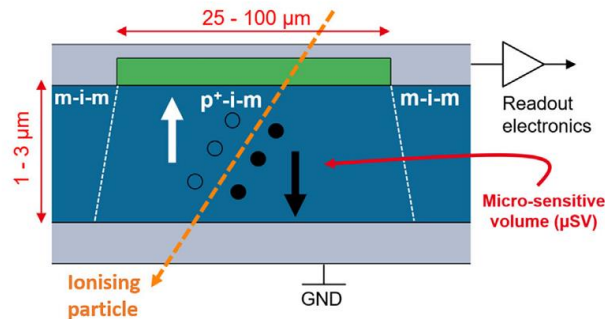


## Matrices de micro-dosimètres pour mini faisceaux à Orsay-Saclay

I. A. Zahradnik (CEA LIST) et al.

Phys. Status Solidi A2018, 1800383 <https://doi.org/10.1002/pssa.201800383>

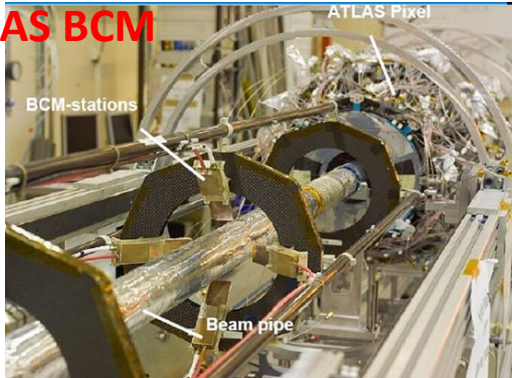
Très fines membranes de diamant



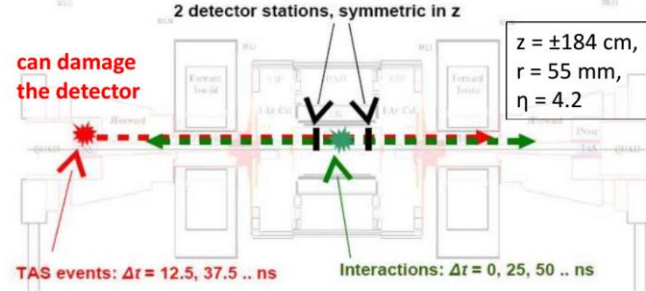
## Moniteurs faisceaux au LHC : ATLAS et CMS

RD42 collaboration CERN

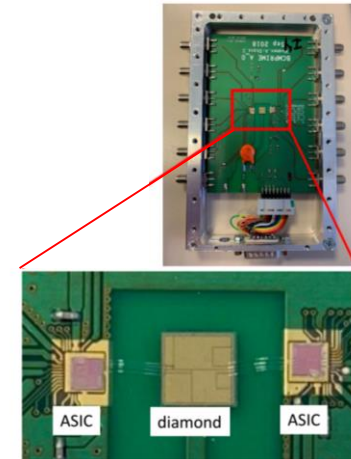
ATLAS BCM



ATLAS BCM' HL-LHC



Robust solution for HL-LHC → BCM' (BCM Prime)

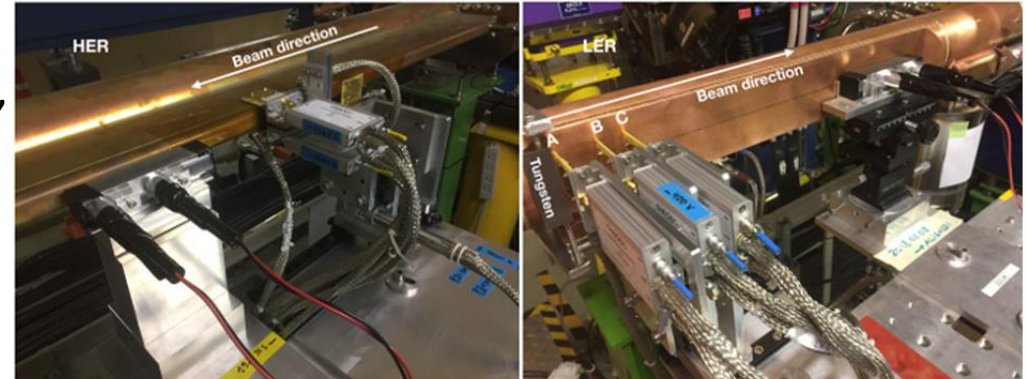
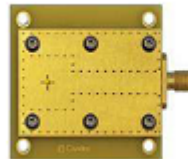


ATLAS BCM' HL-LHC

## Moniteurs faisceaux à SUPERKEK B

Ph. Bambade (ORSAY) et al., 62th ICFA ABDW on High Luminosity Circular e+e- Colliders eeFACT2018, Hong Kong, <https://doi.org/10.18429/JACoW-eeFACT2018-TUPBB06>

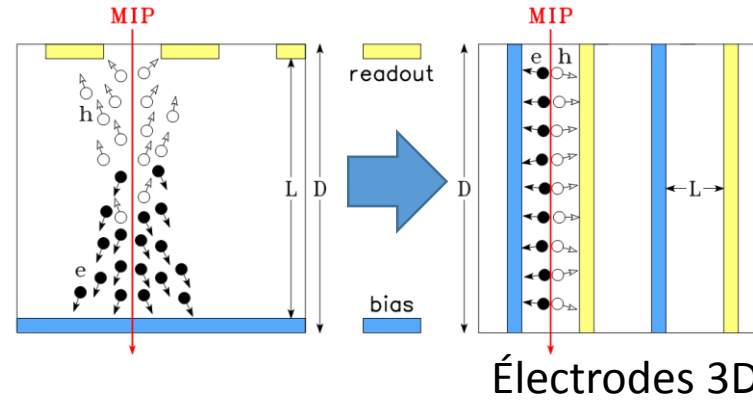
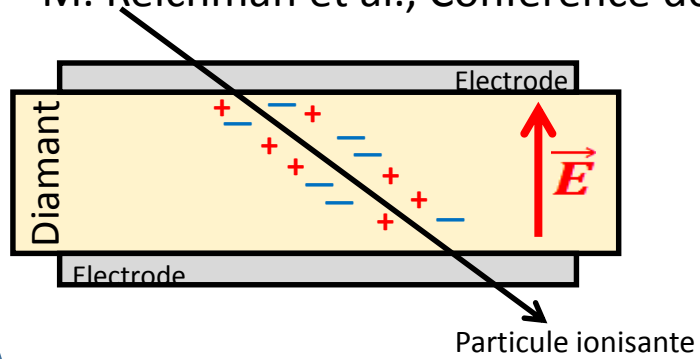
Détecteurs diamant



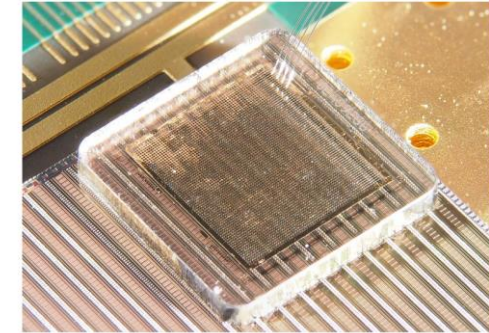
## ATLAS

RD42 collaboration CERN

M. Reichman et al., Conférence de Vienne en instrumentation 2019



## 3D Pixel detector



et de nombreux autres développements ...

## I. Les détecteurs diamants

- Performances attendues
- Instrumentation détecteur
- Performances mesurées en tests en faisceaux : GANIL ARRONAX ESRF

## I. Moniteurs faisceaux diamants : contrôle en ligne de faisceaux

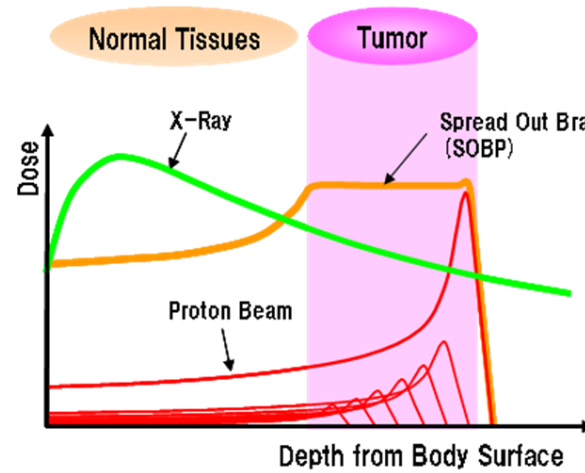
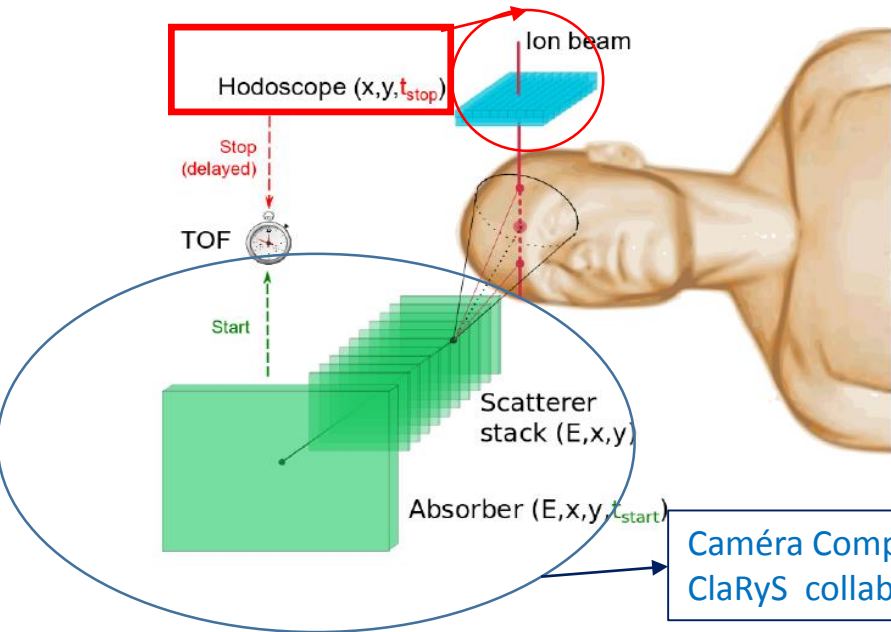
- Etat de l'art
- **Focus sur des R&D en cours**

## III. R&D moniteur faisceau diamant contrôle en ligne de faisceaux pulsés : perspectives à dix ans

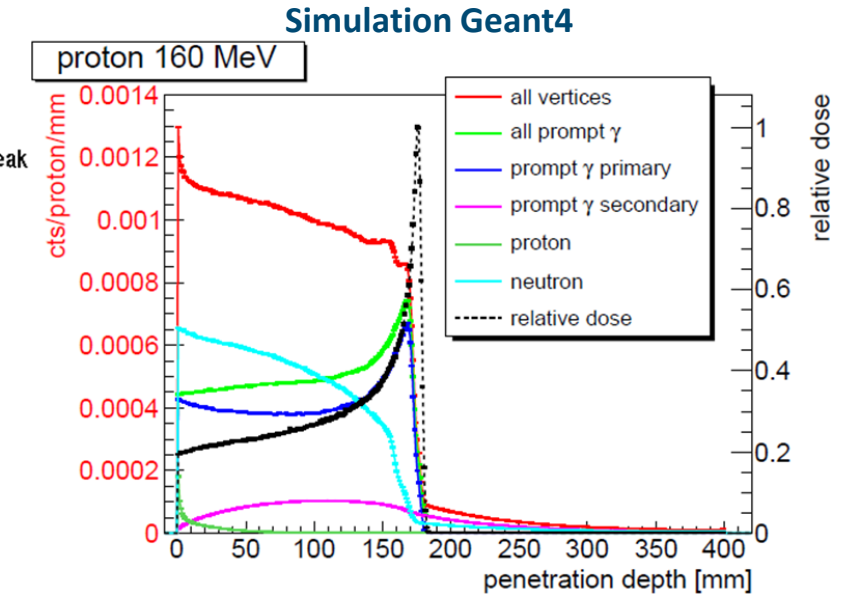
- Objectifs 2020-2030
- Premières preuves de concept et de faisabilité établies

## IV. Conclusion et perspectives

# R&D Monitorage de l'hadronthérapie détection de protons et d'ions légers



Caméra Compton : détection de Gamma-prompts  
 ClaRyS collaboration IP2I CPPM LPSC CREATIS

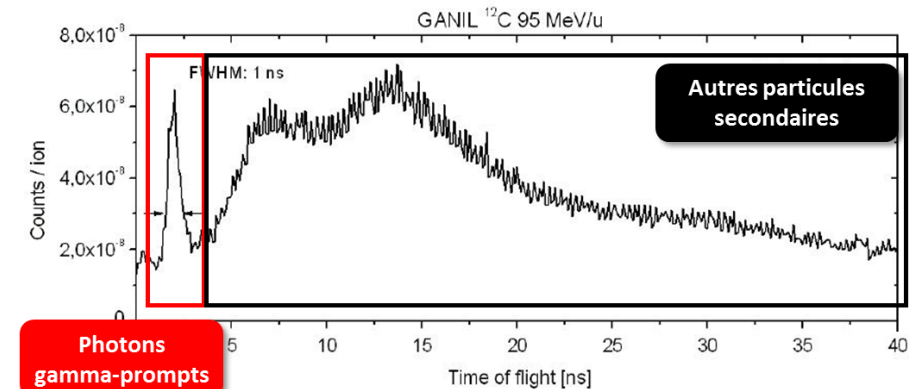


Krimmer et al., Nucl. Instr. Meth. A, 878 (2017) 58-73

## Hodoscope : Détection de protons et d'ions légers

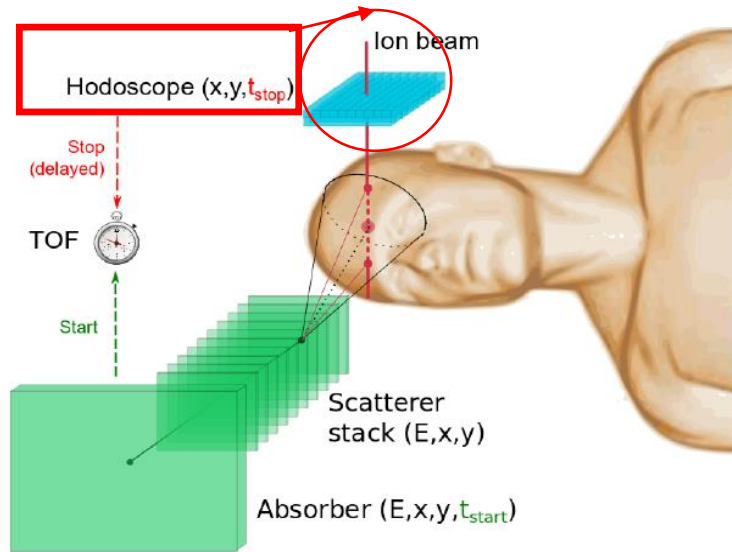
- Position transverse avec résolution millimétrique
- Etiquetage des ions avec une résolution de 100 ps
- Grande dynamique (ion unique jusqu'aux intensités cliniques)
- Grands taux de comptage (jusqu'à 100 MHz)

## Gamma-prompts : Expérience avec ions $^{12}\text{C}$ @ 95 MeV/u sur cible Plexiglas - Spectre Temps-de-Vol





# R&D Monitorage de l'hadronthérapie détection de protons et d'ions légers



## Projet MoniDiam (LPSC) : Hodoscope diamant

Cahier des charges:

- $\sigma_t \sim 100 \text{ ps}$
- Comptage  $\sim 10 \text{ MHz/voie}$
- Résolution spatiale  $\sim 1 \text{ mm}$
- Résistant aux radiations

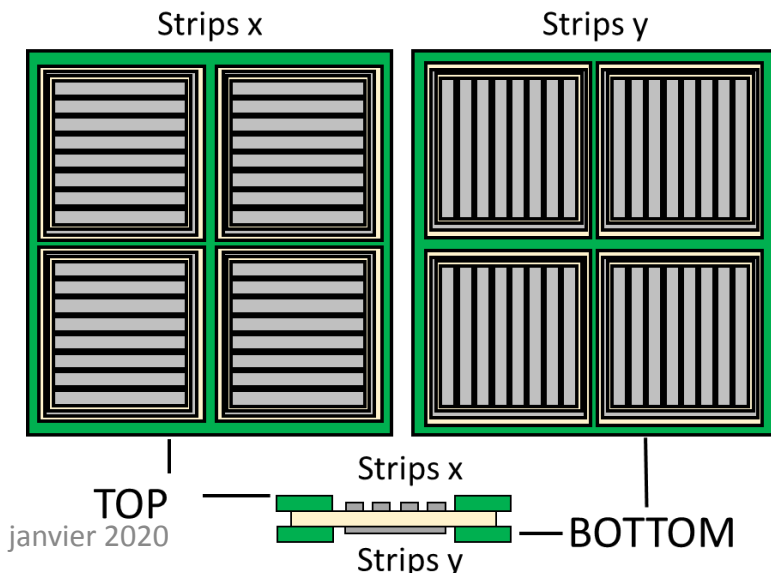
**Thèse S. Curtoni LPSC 2017-2020**

## Hodoscope : Détection de protons et d'ions légers

- Position transverse avec résolution millimétrique
- Etiquetage des ions avec une résolution de 100 ps
- Grande dynamique (ion unique jusqu'aux intensités cliniques)
- Grands taux de comptage (jusqu'à 100 MHz)

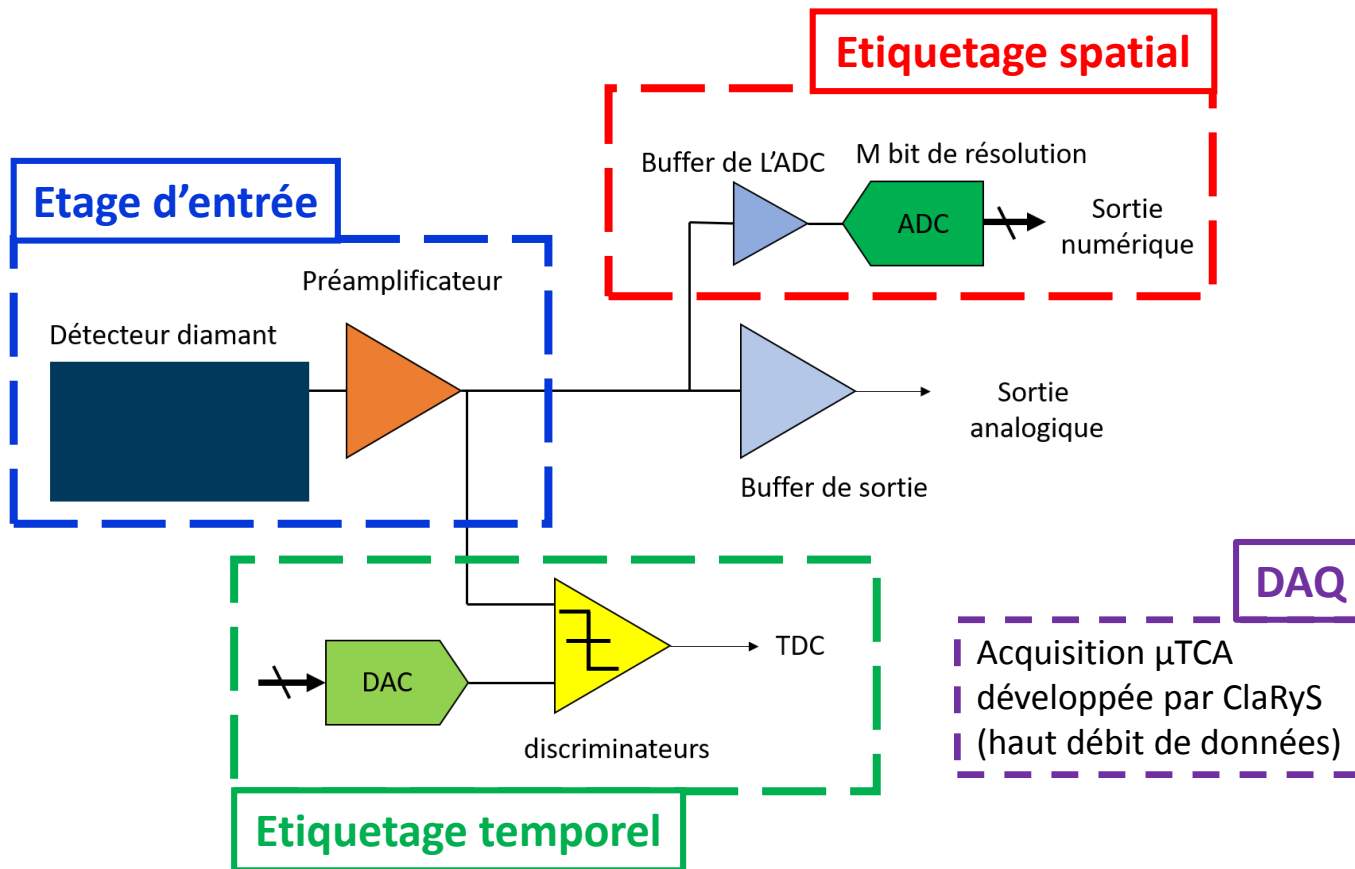
21/01/2020

ML Gallin-Martel, Perspectives IN2P3-GT07 20-21 janvier 2020



# R&D Monitorage de l'hadronthérapie détection de protons et d'ions légers

## Développements en électronique

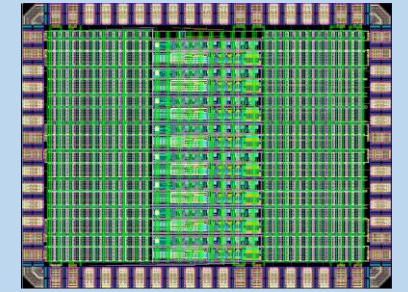
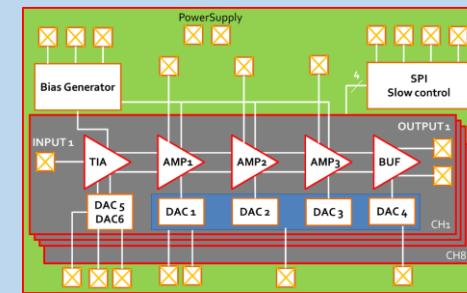


## Projet R&T transverse IN2P3 DIAMASIC

LPSC - LPC Caen

ASIC 8 voies

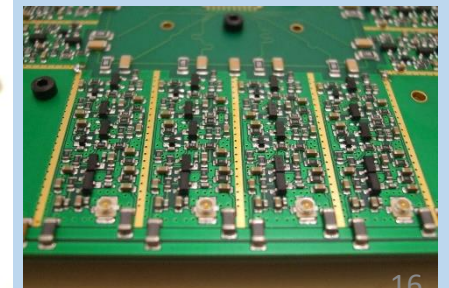
- Technologie CMOS 130 nm (CERN)
- Résistant aux radiations



LPSC

## Préamplificateurs courant discrets

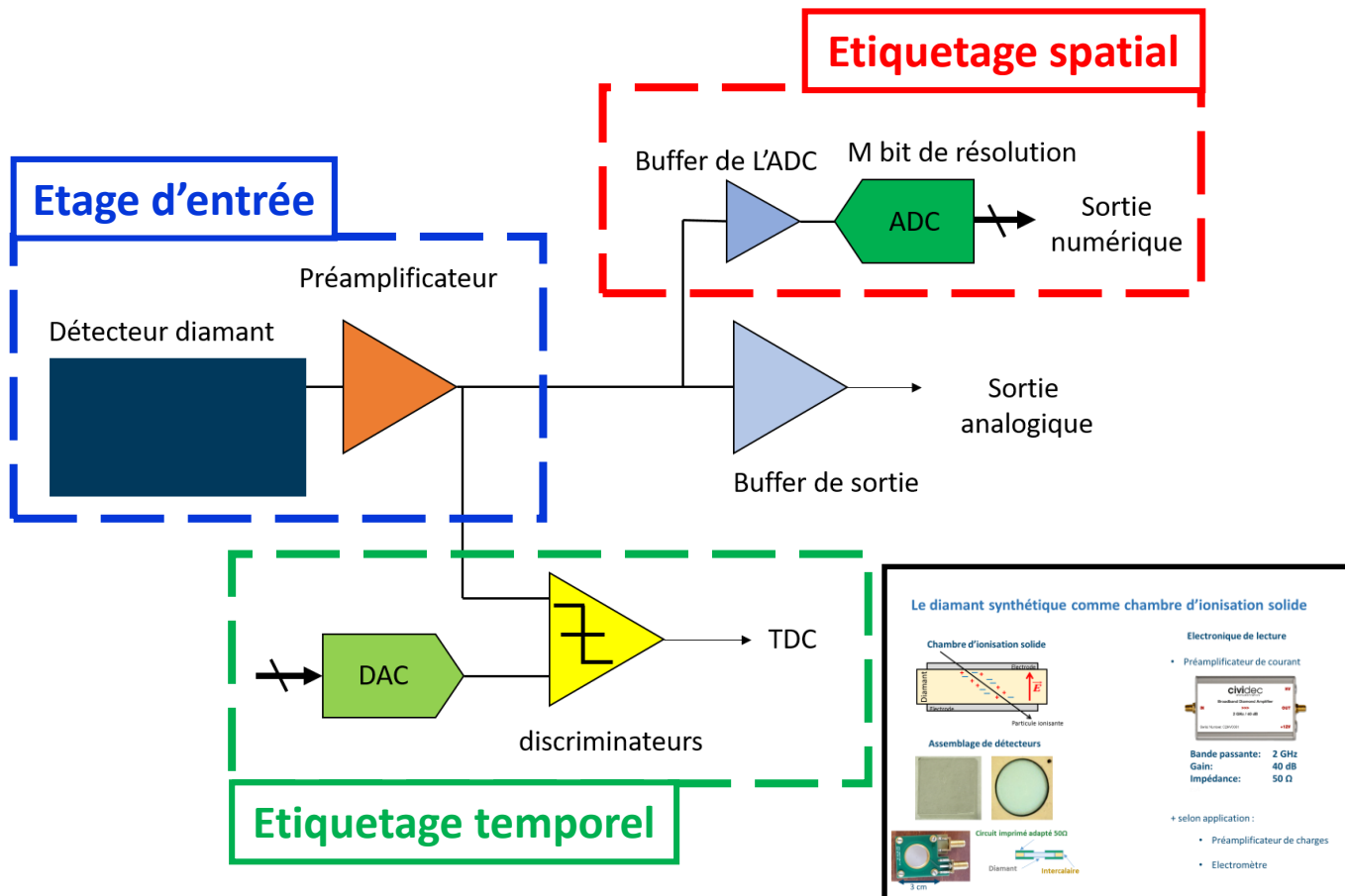
- En boîtier ou monté sur carte
- Solution alternative





# R&D Monitorage de l'hadronthérapie détection de protons et d'ions légers

## Développements en électronique



**Le diamant synthétique comme chambre d'ionisation solide**

**Chambre d'ionisation solide**

- Diamant
- Electrodes
- Particule ionisante

**Assemblage de détecteurs**

- Circuit imprimé adapté 500
- Diamant
- Intercalaire

**Electronique de lecture**

- Préamplificateur de courant
- Bande passante: 2 GHz
- Gain: 40 dB
- Impédance: 50 Ω

+ selon application :

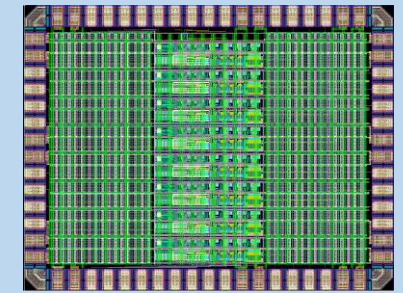
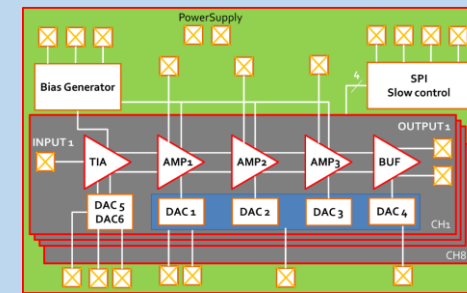
- Préamplificateur de charges
- Electromètre

## Projet R&T transverse IN2P3 DIAMASIC

### LPSC - LPC Caen

### ASIC 8 voies

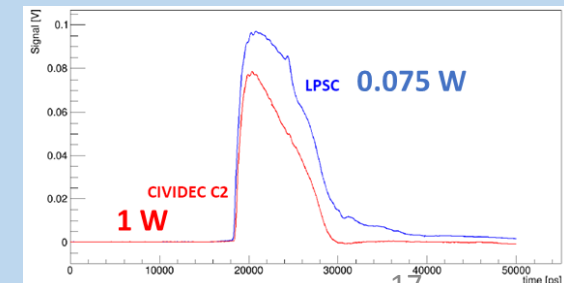
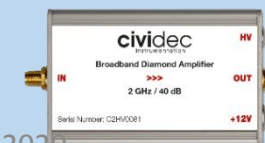
- Technologie CMOS 130 nm (CERN)
- Résistant aux radiations



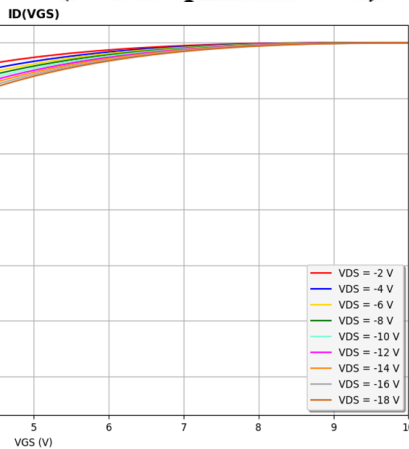
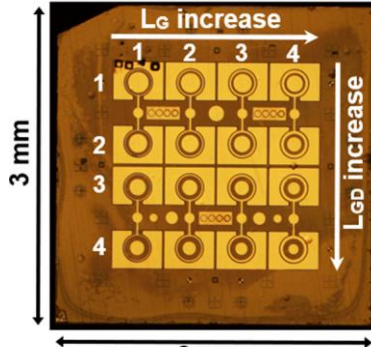
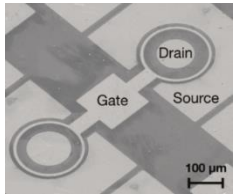
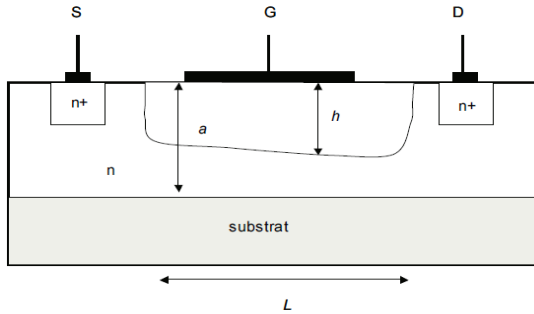
## LPSC

### Préamplificateurs courant discrets

- En boîtier ou monté sur carte
- Solution alternative



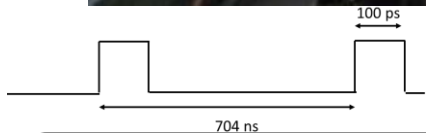
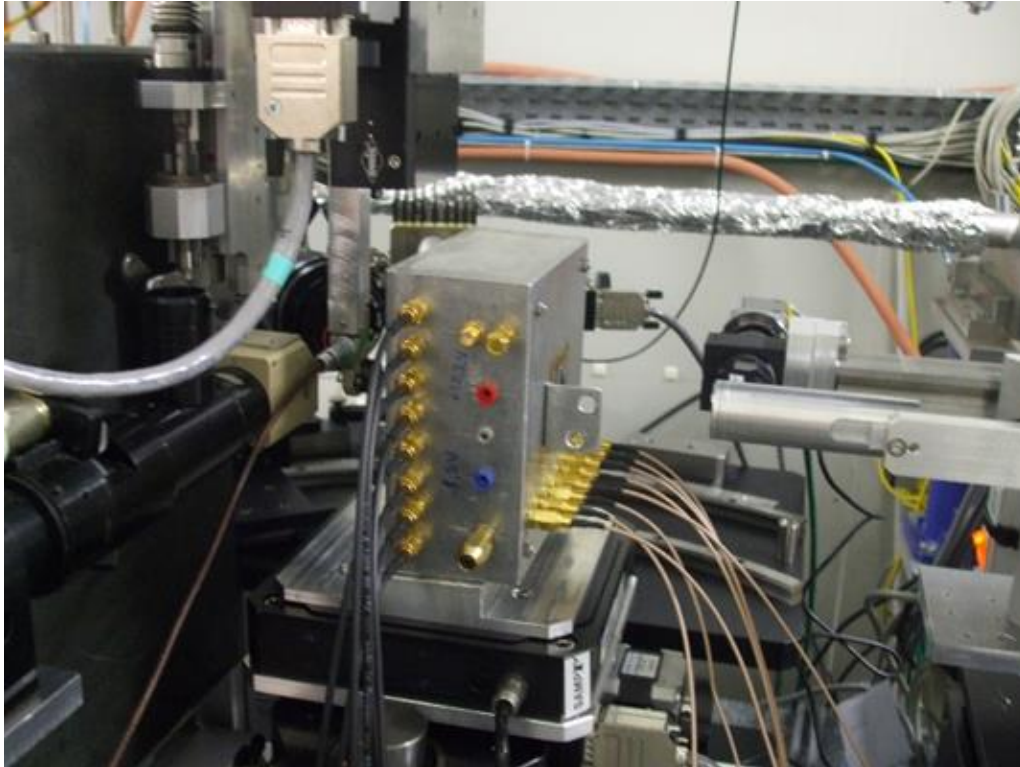
# Prospectives en R&D électronique diamant



- Analyser les caractéristiques électriques de transistors MESFET (MEtal Semiconductor Field Effect Transistor) diamant, afin de vérifier la faisabilité d'un montage amplificateur
- Collaboration LPSC, Institut Néel, Startup DIAMFAB, Université de Tsukuba (Japon)
- Stage master 1, F. Huc au LPSC en 2019, thèse en 2020 ?
- Intérêt : résistance aux radiations pour très grande intensité faisceau futures R&D moniteurs

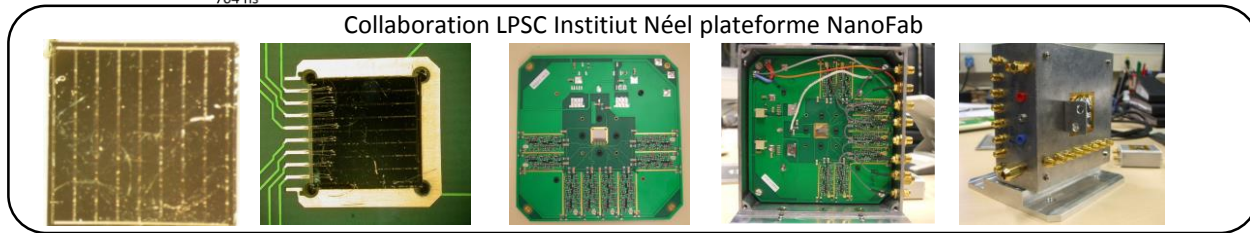
# R&D Monitorage de l'hadronthérapie détection de protons et d'ions légers

## Premier prototype



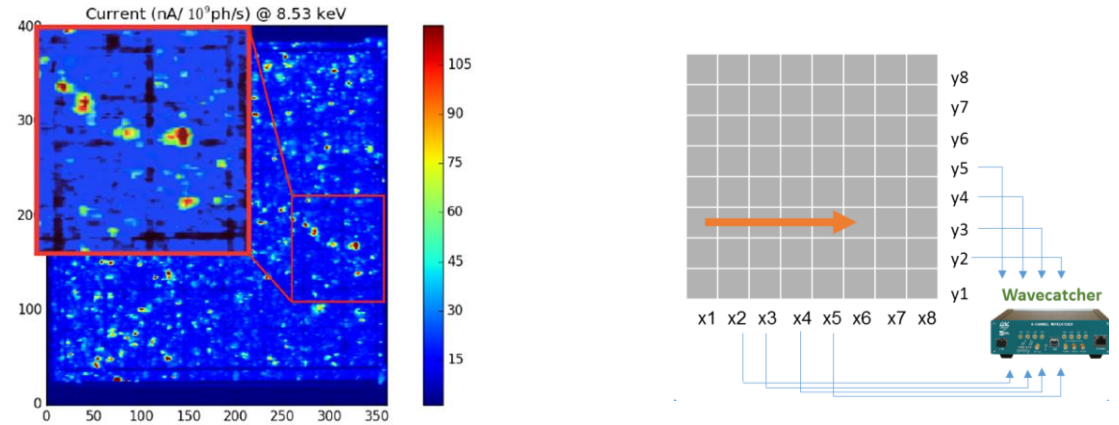
8.5 keV ESRF ID21 X-ray Microscopy beamline

Collaboration LPSC Institut Néel plateforme NanoFab



21/01/2020

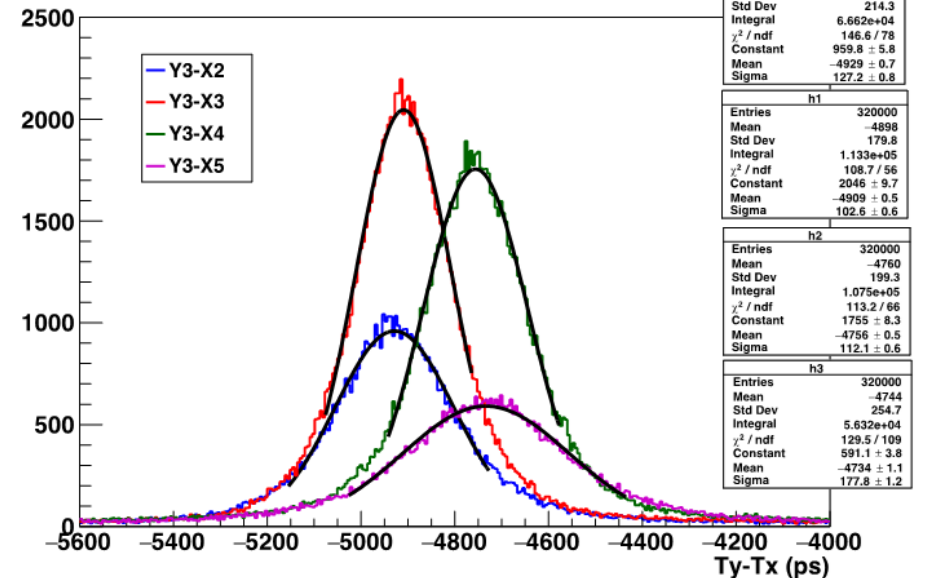
ML Gallin-Martel, Perspectives IN2P3-GT07 20-21 janvier 2020



$1 \times 1 \text{ cm}^2 \times 300 \mu\text{m}$   
pc-CVD from Element 6

## Mesures de résolution en temps

Time difference between Y3 and X signals: CF at 50%



Meilleur résultat  $\sigma_t = 103 \text{ ps}$



# Monitorage de la radiothérapie par rayonnement synchrotron

Radiothérapies innovantes faisceaux de photons segmentés spatialement énergie 50-200 keV compensée par très haut débit de dose  $10^4$  Gy/s

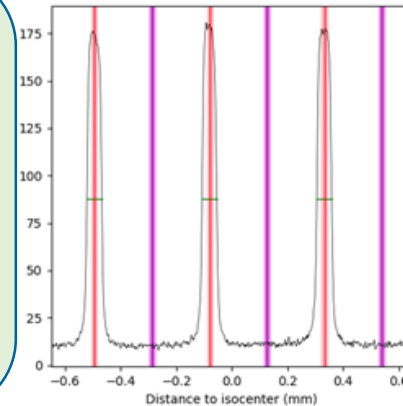
## R&T transverse IN2P3 DIAMTECH

Mesure de la fluence en thérapie par micro faisceaux

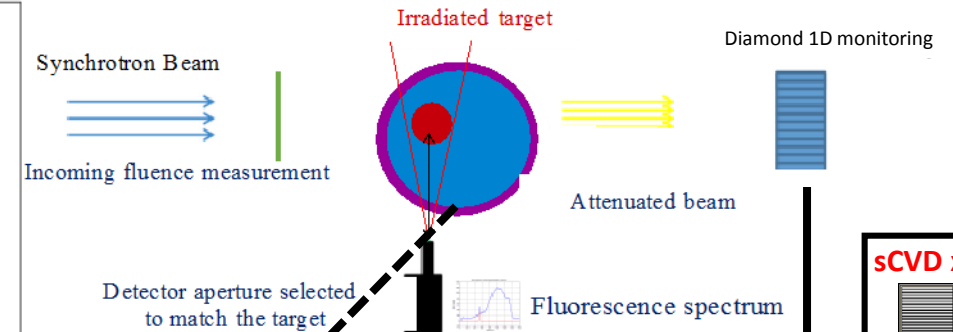
MRT = Micro-beam Radiation Therapy

Collaborations :

- LPSC (IN2P3), STROBE (Université Grenoble Alpes)
- ESRF ligne médicale



MRT: 50  $\mu$ m  
micro faisceaux

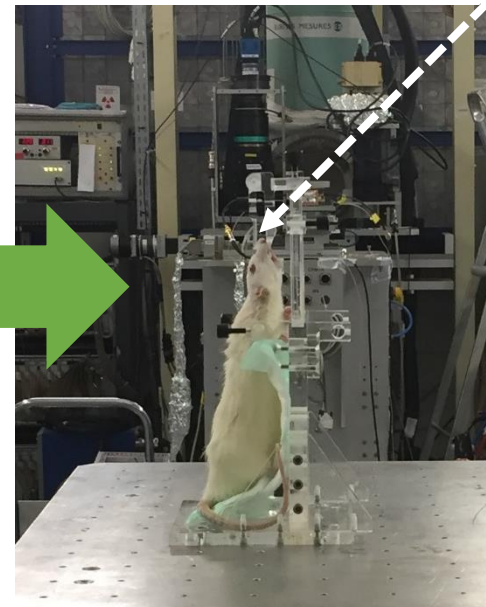


Détecteur = barrette de 8 diamants sCVD ( $4.5 \times 4.5$  mm<sup>2</sup>) métallisés par pistes + QDC ASIC

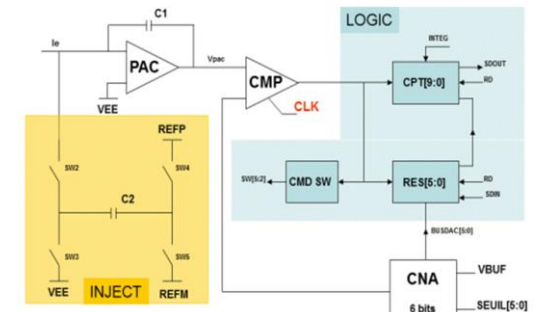
sCVD x 8

## Monitorage de la radiothérapie par rayonnement synchrotron

- ➔ Détection de rayon X
- ➔ Résolution spatiale (micro faisceaux)
- ➔ Grande dynamique (Haut débit de dose)



## QDC ASIC LPSC



Gallin-Martel, IEEE NSS-MIC 2016  
Détecteur TraDeRa monitoring de la radiothérapie X conventionnelle Y. Arnoud et al. LPSC

Thèse N. Rosuel LPSC STROBE 2018-2021

Tests en faisceau ESRF Grenoble + Synchrotron Melbourne en 2020

## I. Les détecteurs diamants

- Performances attendues
- Instrumentation détecteur
- Performances mesurées en tests en faisceaux : GANIL ARRONAX ESRF

## I. Moniteurs faisceaux diamants : contrôle en ligne de faisceaux

- Etat de l'art
- Focus sur des R&D en cours

## III. R&D moniteur faisceau diamant contrôle en ligne de faisceaux pulsés : prospectives à 10 ans

- **Objectifs 2020-2030**
- Premières preuves de concept et de faisabilité établies

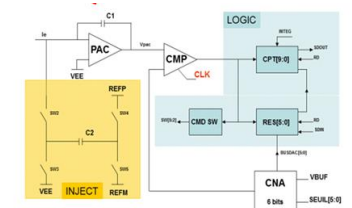
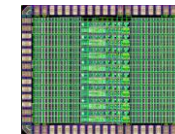
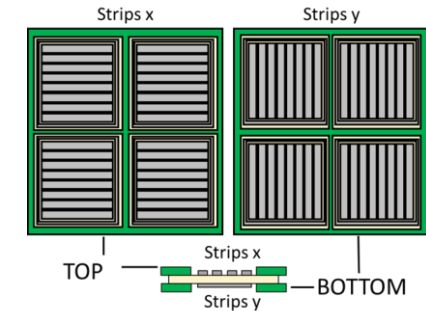
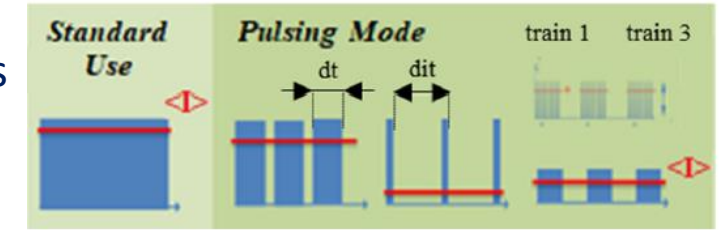
## IV. Conclusion et perspectives

## Le moniteur faisceau diamant

- équipé des plus grands capteurs possibles ( $> 1 \text{ cm}^2$ )  $\Rightarrow$  temps de dérive rapide des porteurs de charge + limiter le courant détecteur (impulsions très intenses).
- épaisseur des diamants optimisée + lecture par pistes métalliques double face :
  - $\Rightarrow$  atteindre une bonne résolution spatiale
  - $\Rightarrow$  diminuer la capacité du détecteur.
- diamants assemblés en mosaïque pour couvrir la zone de détection requise (4 diamants de  $1 \text{ cm}^2$ ).
- développement d'une électronique de lecture intégrée (comptage rapide, intégration de charge QDC) + un système d'acquisition de données (USB/Ethernet).

### R&T transverse IN2P3 DIAMTECH

F. Poirier et al., IMAC 2019



### Objectifs 2020-2030

- équiper une ligne faisceau opérant en mode pulsé discontinu = diagnostic faisceau
- moniteur pour la radiothérapie « flash » qui est une des thérapies innovantes (100 Gy en 0.1 ms)

## I. Les détecteurs diamants

- Performances attendues
- Instrumentation détecteur
- Performances mesurées en tests en faisceaux : GANIL ARRONAX ESRF

## I. Moniteurs faisceaux diamants : contrôle en ligne de faisceaux

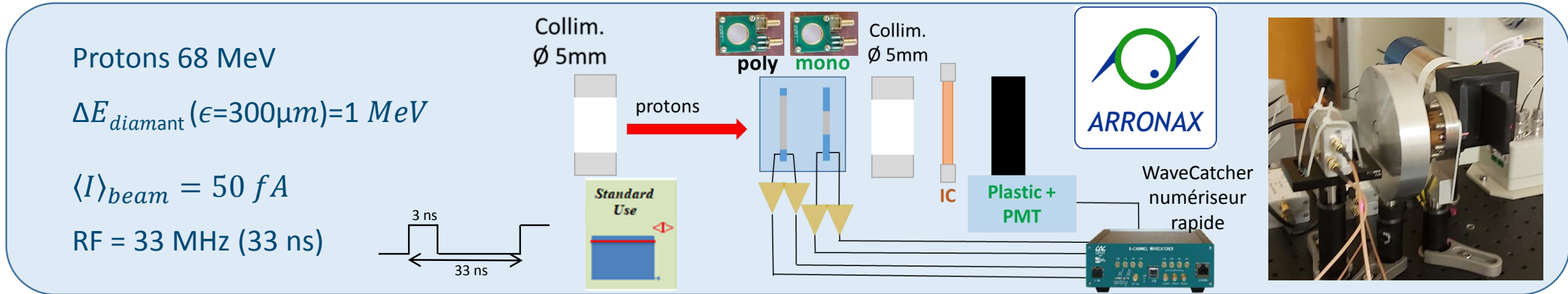
- Etat de l'art
- Focus sur des R&D en cours

## III. R&D moniteur faisceau diamant contrôle en ligne de faisceaux pulsés : perspectives à 10 ans

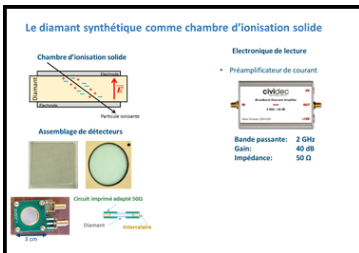
- Objectifs 2020-2030
- **Premières preuves de concept et de faisabilité établies**

## IV. Conclusion et perspectives

# Mesure Efficacité de détection en faisceaux de protons de 68 MeV à ARRONAX



## Mesure de l'efficacité de détection de 3 diamants polycristallins par post-analyse des données

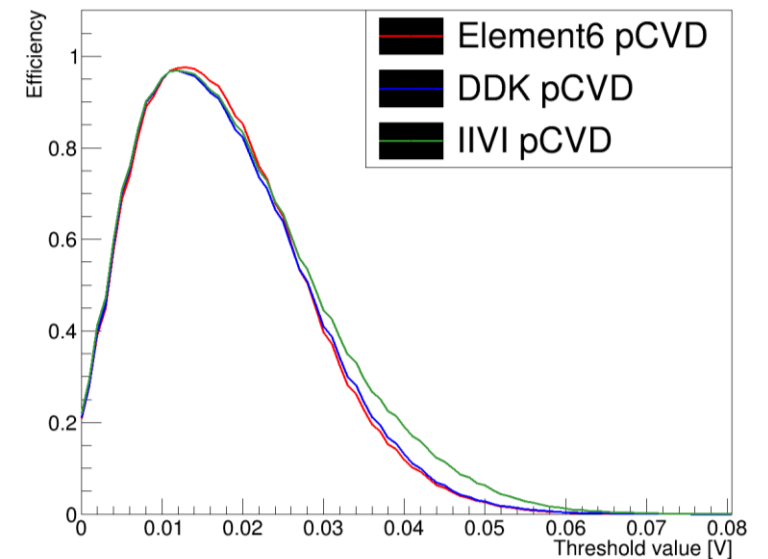


- Sélection des événements 1 proton (**mono & plastique**)
- Somme des signaux des faces opposées:  $\text{SNR} \rightarrow \text{SNR} \times \sqrt{2}$
- Distribution de la mesure en efficacité en fonction du seuil appliqué au signal diamant

$$\epsilon = \frac{N_{\text{triple}}}{N_{\text{double}}} \left( 1 - \frac{N_{\text{random}}}{N_{\text{double}}} \right)$$

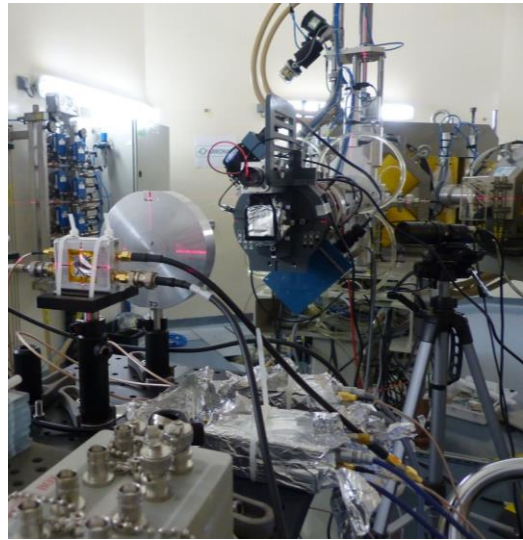
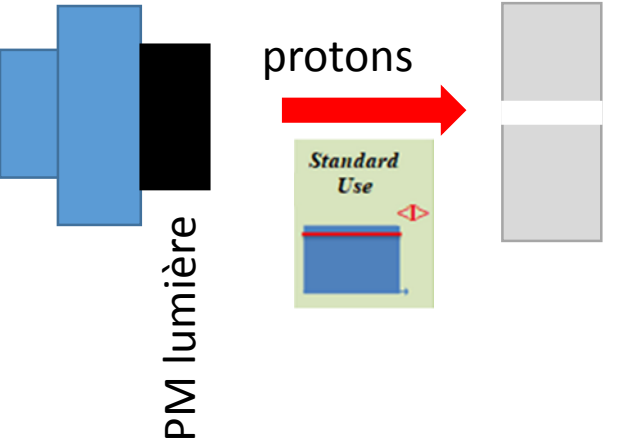
(1.5 ns de fenêtre de coïncidence)

**Efficacité > 95 % avec diamants polycristallins CVD**

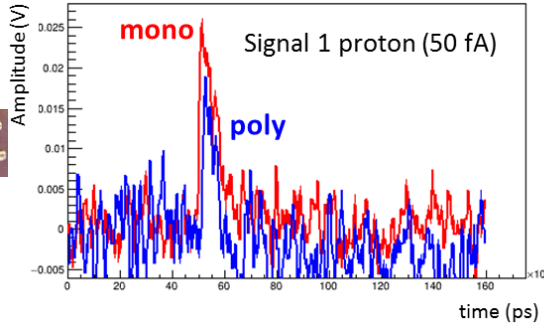
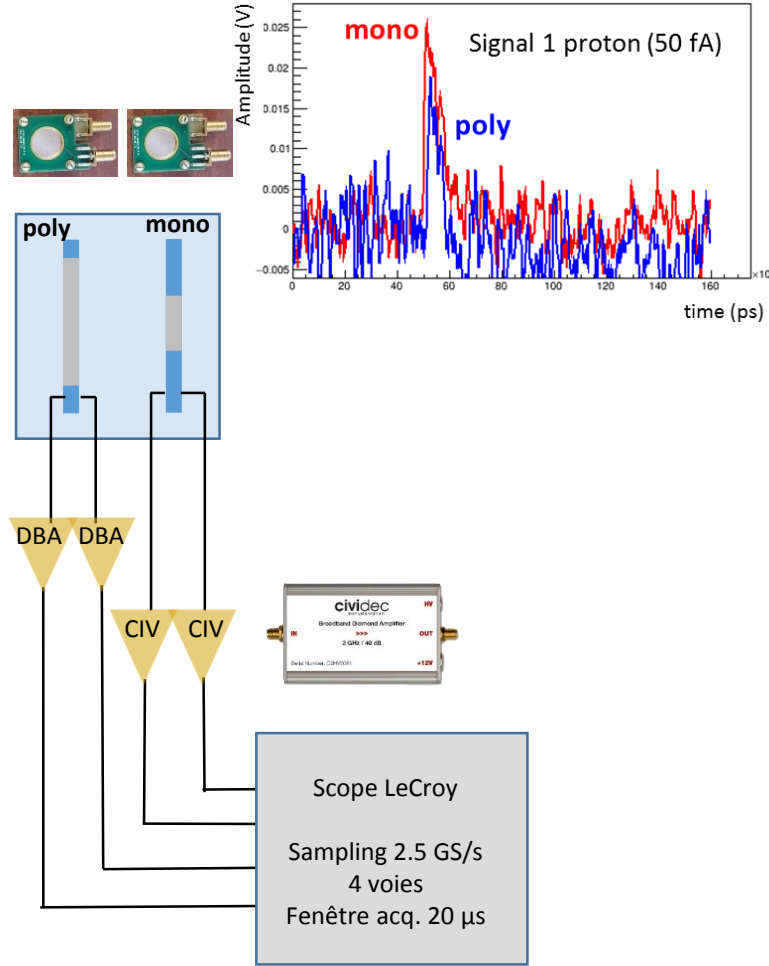




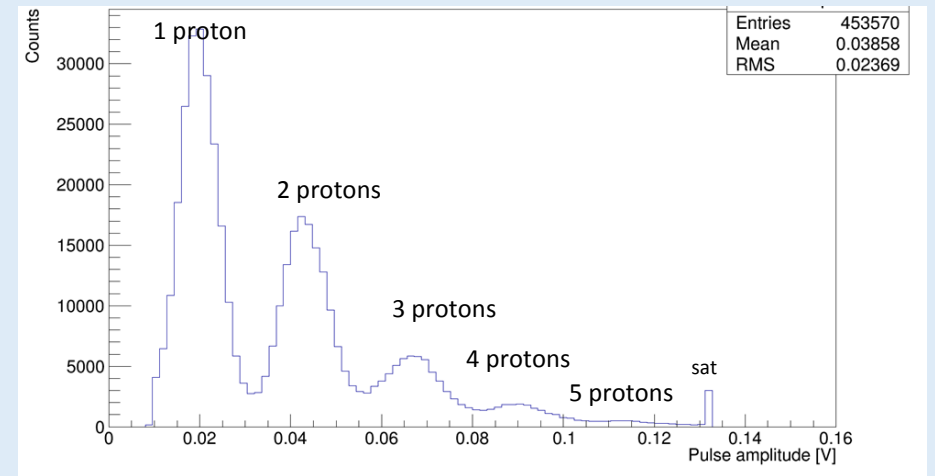
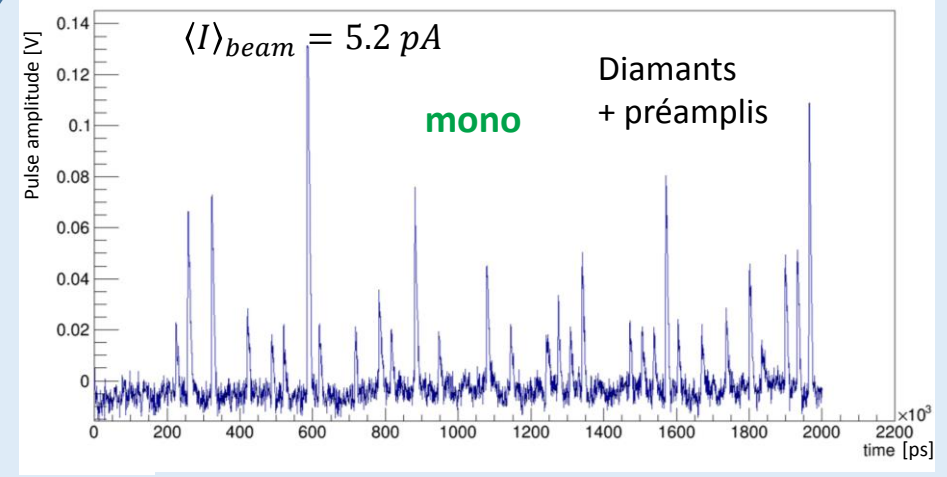
# Performance des détecteurs diamant sous faisceau continu



21/01/2020

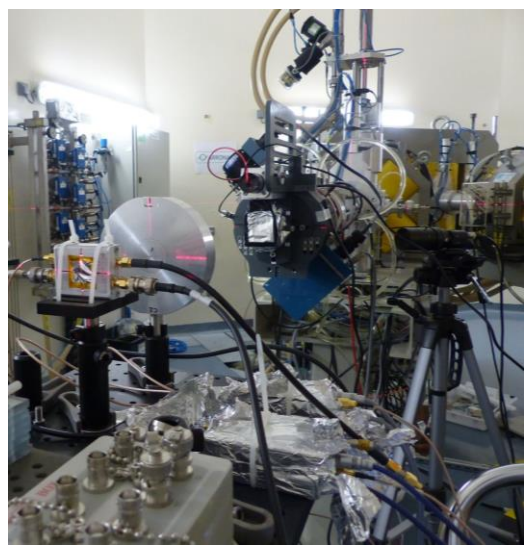
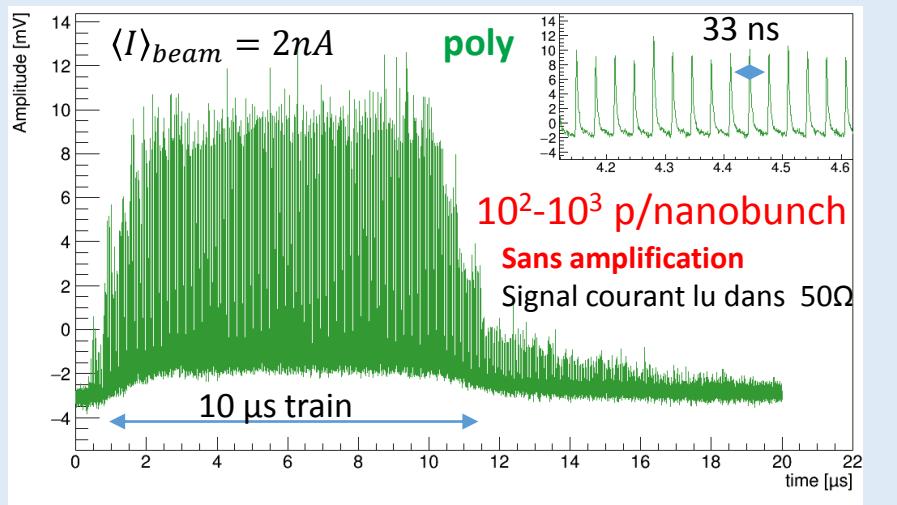
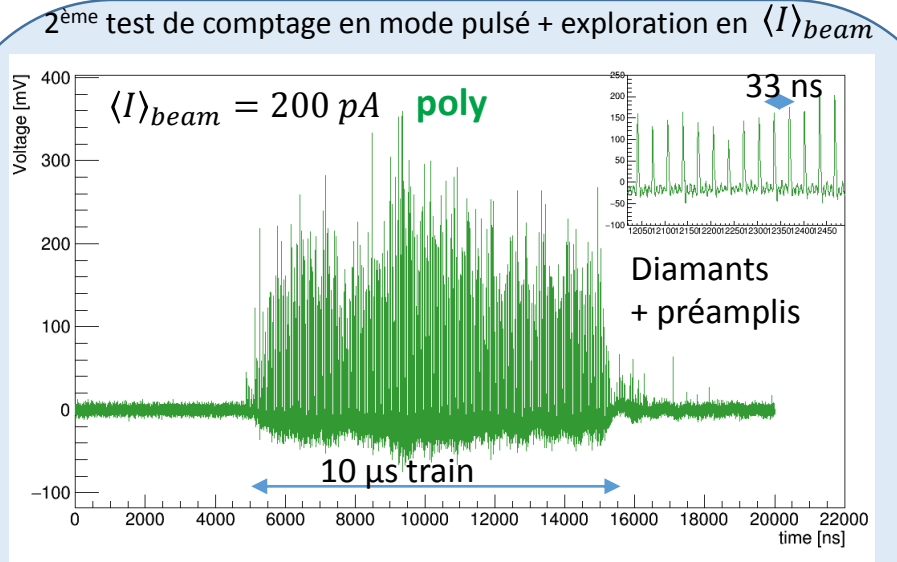
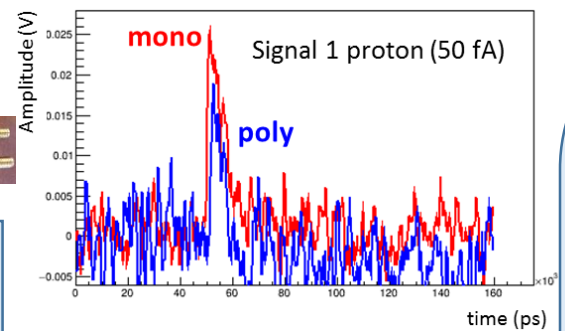
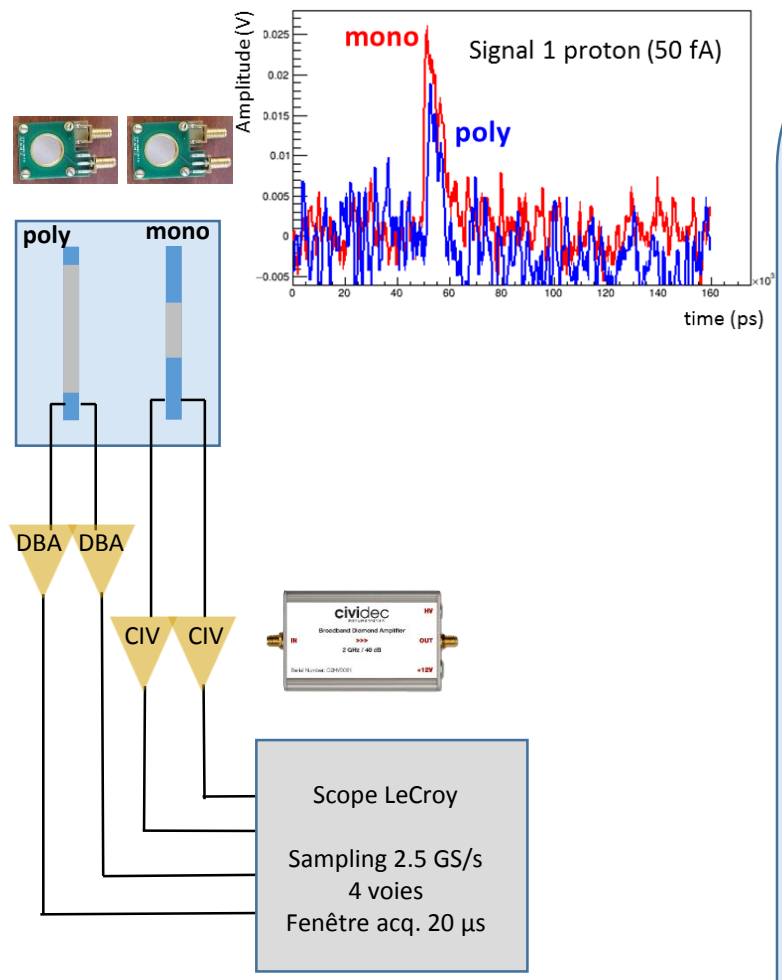
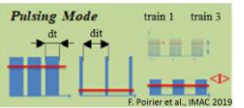
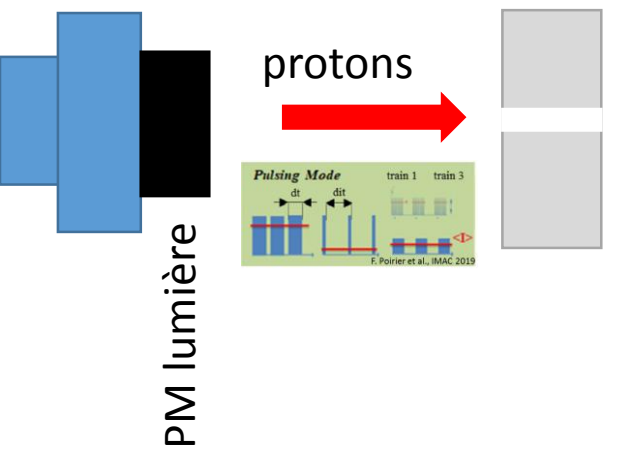


1<sup>er</sup> test de comptage en mode continu  $\langle I \rangle_{beam} = 5.2 \text{ pA}$



Comptage des protons dans les pulses

# Performance des détecteurs diamant sous faisceau pulsé



Comptage des protons dans les pulses  
+ étiquetage « start » et « stop » des trains de pulses

# Conclusion

Ces développements se situent

- **au point de convergence de plusieurs équipes à l'IN2P3 en instrumentation**
- **en connexion avec des collaborations établies en physique des hautes énergies, nucléaire ou applications médicales**
  - nationales au sein de l'IN2P3
  - internationales : RD42 (BCM' ATLAS) , ADAMAS (GSI), Japon ...
- **dans un contexte de recherche interdisciplinaire au CNRS (IN2P3, INP, INC) : des échanges de compétences s'opèrent entre**
  - la croissance du diamant : risque identifié fluctuations (approvisionnement, qualité, reproductibilité ....) liées au marché
  - ➔ **Création d'une plateforme nationale possible les compétences existent !**
  - la caractérisation : sources (labos) + faisceaux accélérateurs @ IN2P3(IP2I GENESIS GANIL ...), GIP – ARRONAX, ESRF + ...
  - Instrumentation (labos IN2P3, CEA ...)
- ➔ **Objectifs 2020-2030=> Conception moniteurs pour diagnostique faisceau**



## JSPS-CNRS Diamond Detector Workshop 2020

<https://indico.in2p3.fr/event/20117/>

30 juin 2020 à 3 juillet 2020

Fuseau horaire Europe/Paris

Accueil

Inscription

Liste des participants

Agenda

Edition 2019

Diamond is a material with exceptional properties.

Nowadays, diamond applications are more and more considered in fields as different as power electronics (wide-bandgap semiconductor for high power/high voltage electronics applications) or particle detectors. For the latter, a major challenge is the realization of outperforming radiation detectors for high-energy physics, nuclear physics, medical and environmental applications. In particular, the radiation tolerance of diamond makes this material suitable for robust radiation detectors in harsh environment.

The present workshop aims at initiating a collaboration between laboratories in order to exchange skills and experience, and promote the development of innovative diamond detectors. Various topics will be discussed: growth, characterization, readout electronics and experimental tests of multipurpose prototypes.