

CARACTÉRISATION DE DÉTECTEURS DIAMANTS POLYCRISTALLINS POUR LA CONCEPTION D'UN HODOSCOPE POUR LE CONTRÔLE EN LIGNE DE L'HADRONTHERAPIE.

Anissa BOUKHEMIRI

LPSC, Physique des Applications Médicales

Encadré par Marie-Laure GALLIN-MARTEL

Février-Août 2016





PLAN

- Introduction
- Problématique et objectifs du stage
- Matériel et Méthodes
- Résultats
- Conclusion
- Perspectives



PLAN

- Introduction
 - Contexte
 - Principe de l'hadronthérapie
- Matériel et Méthodes
- Résultats
- Conclusion
- Perspectives

- **1896** : premier patient traité pour un cancer de l'estomac par Rayon X.
→ Naissance de la **radiothérapie conventionnelle**
- **1994** : construction du premier centre à Chiba au Japon destiné aux traitements des cancers par ions carbone.
→ Naissance de l'**hadronthérapie**

- **Depuis les années 2000 :**

– 30 centres de protonthérapie

– 6 centres de carbone-thérapie

Dans le monde

dont **2 centres de protonthérapie** et **aucun de carbone-thérapie** en France.

PRINCIPE DE L'HADRONTHÉRAPIE DANS LE TRAITEMENT DES CANCERS

- **Approche fondamentale :**
 - Particules accélérées acquièrent de l'énergie
 - Interagissent dans la matière (corps humain) par :
 - collisions inélastiques électroniques,
 - **réactions nucléaires** → **gammas prompts**
 - ralentissement par rayonnement de freinage.

→ Dépôt d'énergie dans le milieu suivant l'équation de Bethe et Block :

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi}{m_e c^2} \cdot \frac{nq^2}{\beta^2} \cdot \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \cdot \left[\ln\left(\frac{2m_e c^2 \beta^2}{I - (1 - \beta^2)}\right) - \beta^2 \right]$$

→ Dépôt d'une grande quantité d'énergie en fin de parcours sur une faible distance : **pic de Bragg**

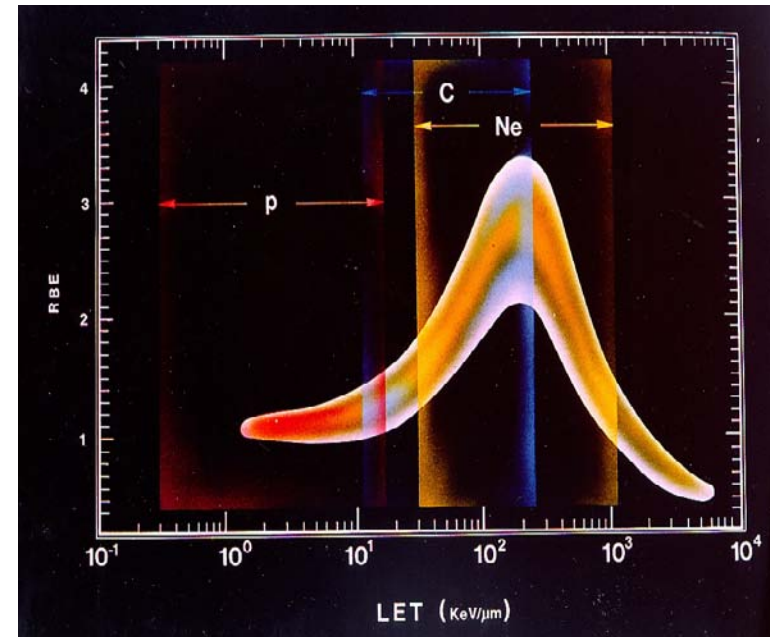
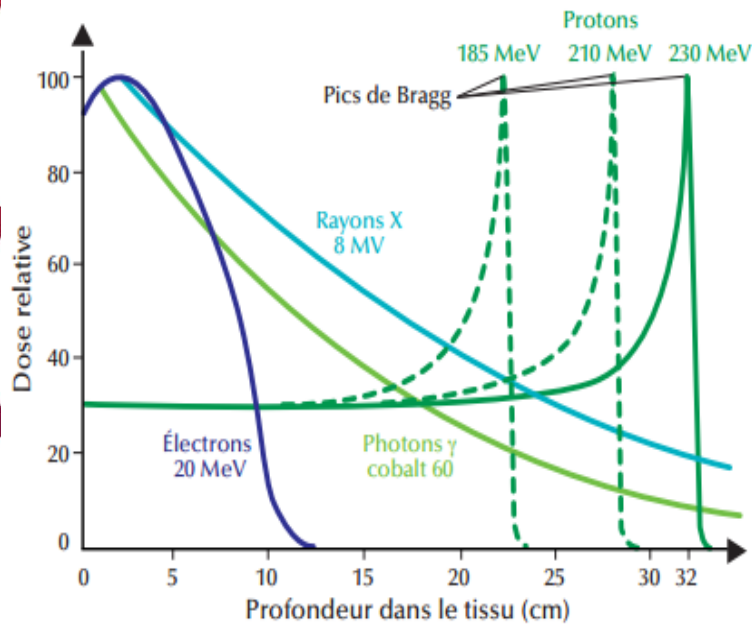
PRINCIPE DE L'HADRONTHÉRAPIE DANS LE TRAITEMENT DES CANCERS

- Approche biologique

- ❖ Une **balistique** plus précise

- ❖ Une **efficacité biologique relative** (EBR)

$$EBR = D_{ref} / D_{test}$$



$$EBR_{proton} = 1.1$$

$$EBR_{ion} = 3 - 4$$

PRINCIPE DE L'HADRONTHERAPIE DANS LE TRAITEMENT DES CANCERS

- **Approche thérapeutique :**

- la chirurgie
- la chimiothérapie (médicaments)
- rayonnements ionisants :
 - la radiothérapie

- **l'hadronthérapie : traitement de tumeurs profondes**

→ Avantage de l'hadronthérapie :

Dépôt de dose localisé → cellules saines ou organes à risques préservés

- **Protonthérapie** : tumeurs ophtalmiques (64MeV), cerveau (260MeV)
- **Carbone-thérapie** : tumeurs inopérables ou radiorésistantes proches de tissus radiosensibles.



PLAN

- Introduction
- **Problématique et objectifs du stage**
- Matériel et Méthodes
- Résultats
- Perspectives

PROJET CLARYS

→ Contrôle qualité de la dose déposée en ligne via des particules secondaires : les gamma prompts

Collaboration de laboratoires du quart sud-est :

Objectifs du LPSC :

Mettre au point un **démonstrateur de moniteur faisceau d'ions** de grande surface constitué de plusieurs diamants poly-cristallins.



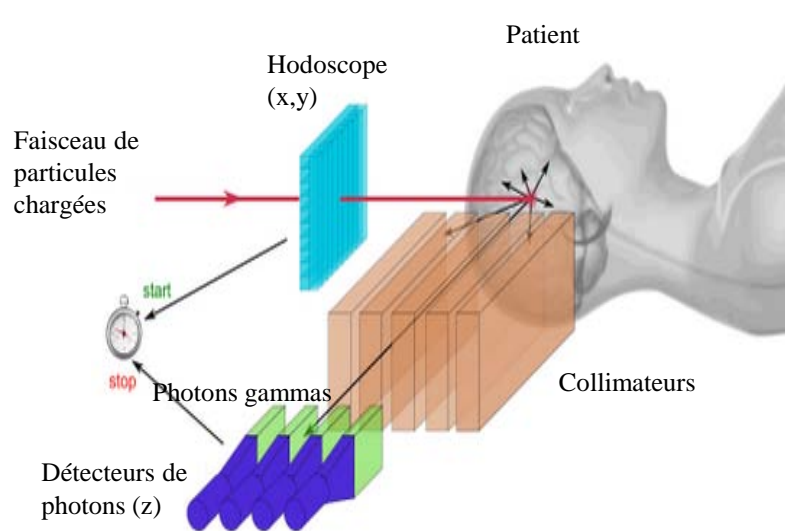
• **IN2P3** (Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules) :

- **CPPM** (Centre de Physique des Particules de Marseille)
- **IPNL** (Institut de Physique Nucléaire de Lyon)
- **LPC** (Laboratoire de Physique Corpusculaire de Clermont-Ferrand)
- **LPSC** (Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie de Grenoble)

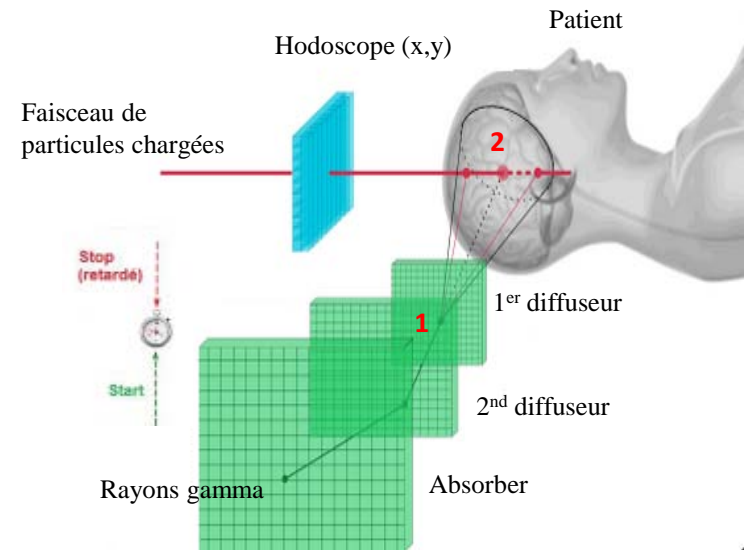
- **CREATIS** (Centre de Recherche et d'Application en Traitement de l'Image et du Signal de Lyon)
- **LIRIS** (Laboratoire d'Informatique en Image et Systèmes d'information de Lyon)
- **CAL** (Centre Antoine Lacassagne de Nice)

PROBLÉMATIQUE

- Contrôle en ligne via une **caméra Compton** ou une **gamma caméra** couplées chacune à un **hodoscope**. (CLaRyS).
→ Détection des **gammas prompts** et des **ions incidents**



Caméra gamma : surveiller en temps réel le parcours des photons gammas



Caméra Compton : contrôle 3D et en temps réel la position du pic de Bragg via les rayons gammas

PROBLÉMATIQUE

Hodoscope à fibres scintillantes :

- localise les particules chargées incidentes, **temporellement** et **spatialement**.
- Inconvénients de l'actuel hodoscope :
 - **Taux de comptage** (10^7 p/s par voie)
 - **Résistance aux irradiations**

Diamants :

- Poly-cristallins
- Mono-cristallins



Propriété	Diamant	Silicium
Densité [g.cm ³]	3,52	2,33
Gap [eV]	5,48	1,12
Energie de création e-t [eV]	13,1	3,62
Signal moyen MIP [MIP]	36 e-/μm	89 e-/μm
Résistivité [Ω.cm]	10 ¹³ - 10 ¹⁶	10 ⁵ - 10 ⁶
Conductivité thermique [W.cm ⁻¹ .K ⁻¹]	>1800	1.48
Energie de déplacement [eV]	43	25
Mobilité des électrons [cm ² .V ⁻¹ .s ⁻¹]	1900	1450
Mobilité des trous [cm ² .V ⁻¹ .s ⁻¹]	2300	505
Tension de saturation [V.cm ⁻¹]	10 ⁷	3.10 ⁵

Cahier des charges

Faisceaux :

Protonthérapie (Cyclotron IBA/C230):

- durée du bunch : 1 à 2 ns
- durée entre les bunchs : 10 ns
- 200 protons/bunch en routine clinique

Carbone-thérapie (HIT/CNAO):

- durée du bunch : 20-40 ns
- durée entre les bunchs: 200 ns
- 10 ions/bunch en routine clinique

Hodoscope :

un taux de comptage de l'ordre de :

- 100 MHz pour l'ensemble du détecteur
- ~10 MHz par voie

une résolution temporelle : inférieure à la centaine de ps

une résolution spatiale de l'ordre de : 1mm

une résistance aux radiations : d'environ 10^{11} protons/cm²/traitement, si on estime que le nombre de séances par jour est de l'ordre de 20 cela conduit à 10^{14} protons/cm²/an.

OBJECTIFS DU STAGE

- **Caractérisation de détecteur diamants poly-cristallins**
 - Développement de banc de tests
 - Caractérisation avec une source radioactive
 - LPSC (Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie)
 - Caractérisation sous faisceaux
 - ESRF (European Synchrotron Radiation Facility) de Grenoble
 - GANIL (Grand Accélérateur National d'Ions Lourds) de Caen
 - Analyse de données

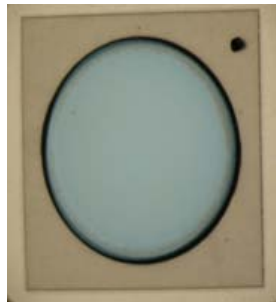


PLAN

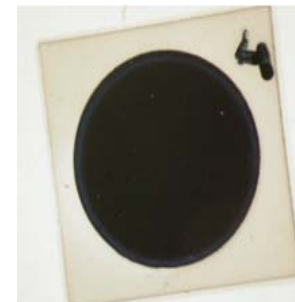
- Introduction
- Problématique et objectifs du stage
- **Matériel et Méthodes**
- Résultats
- Conclusion
- Perspectives

PROJET MONIDIAM

- Début 2015
- Phase de test des diamants poly-cristallins.
 - Etape 1 : métallisation des diamants poly-cristallins



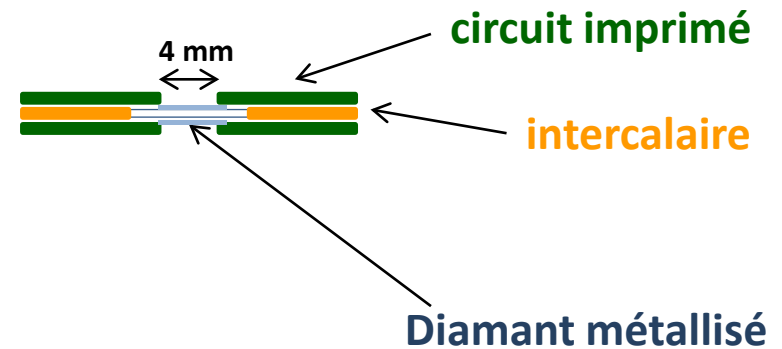
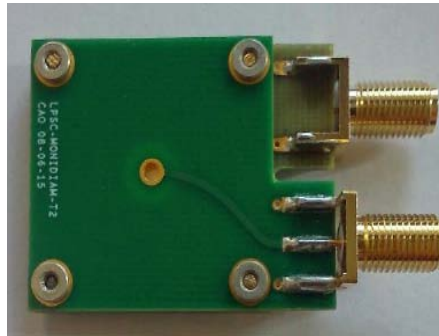
1 x 1 cm² x 300 μm



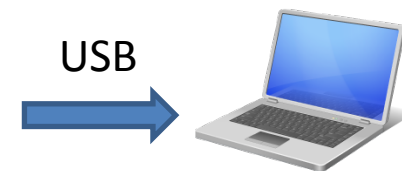
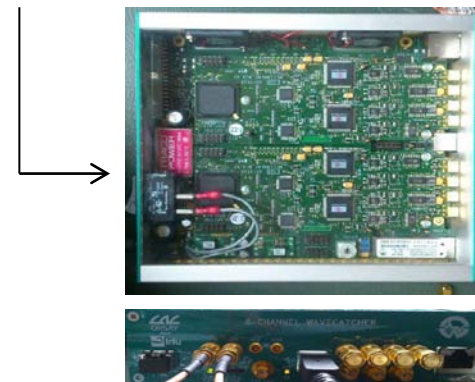
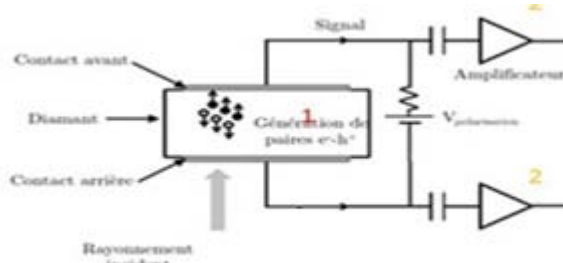
1 x 1 cm² x 500 μm

PROJET MONIDIAM

- Etape 2 : positionner le diamant dans le porte échantillon.



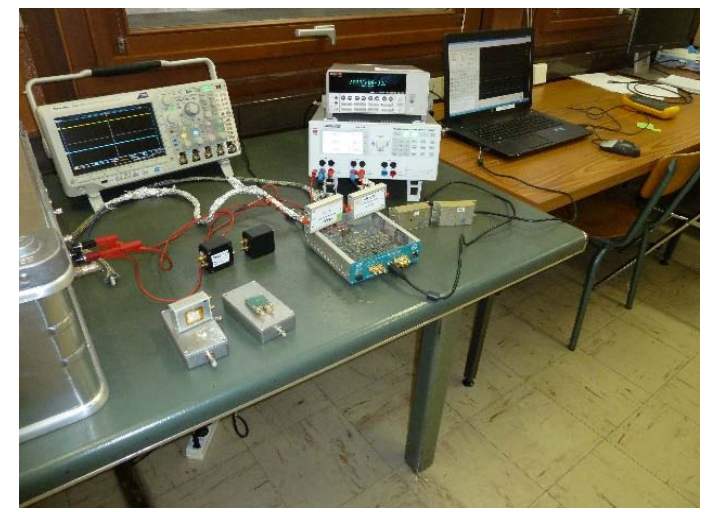
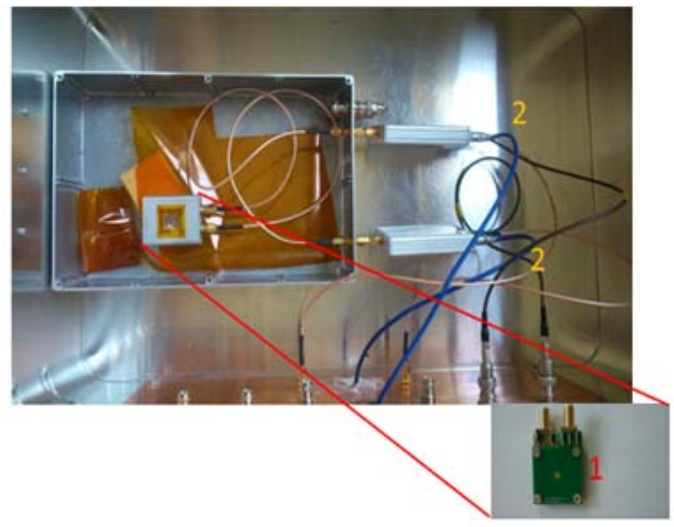
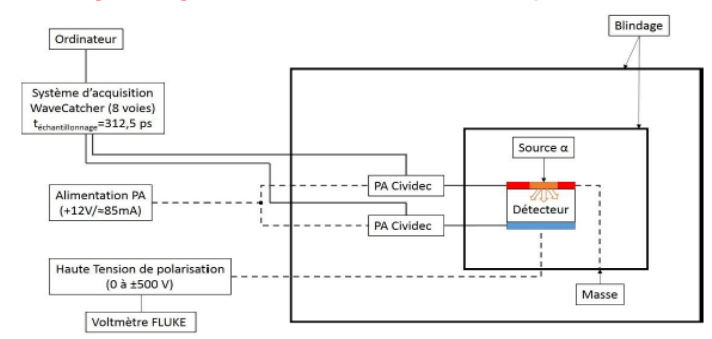
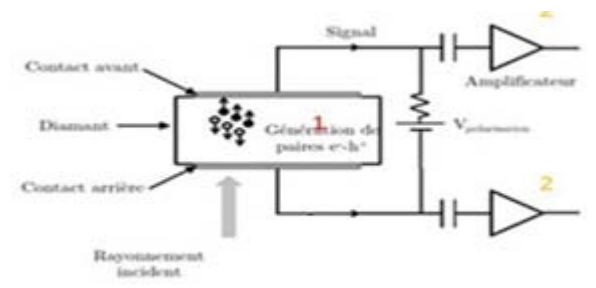
- Etape 3 : Relier les détecteurs à des préamplificateurs puis au système d'acquisition WaveCatcher (LAL-CNRS/IRFU-CEA).



PROJET MONIDIAM LPSC

- **Banc de test alpha :**

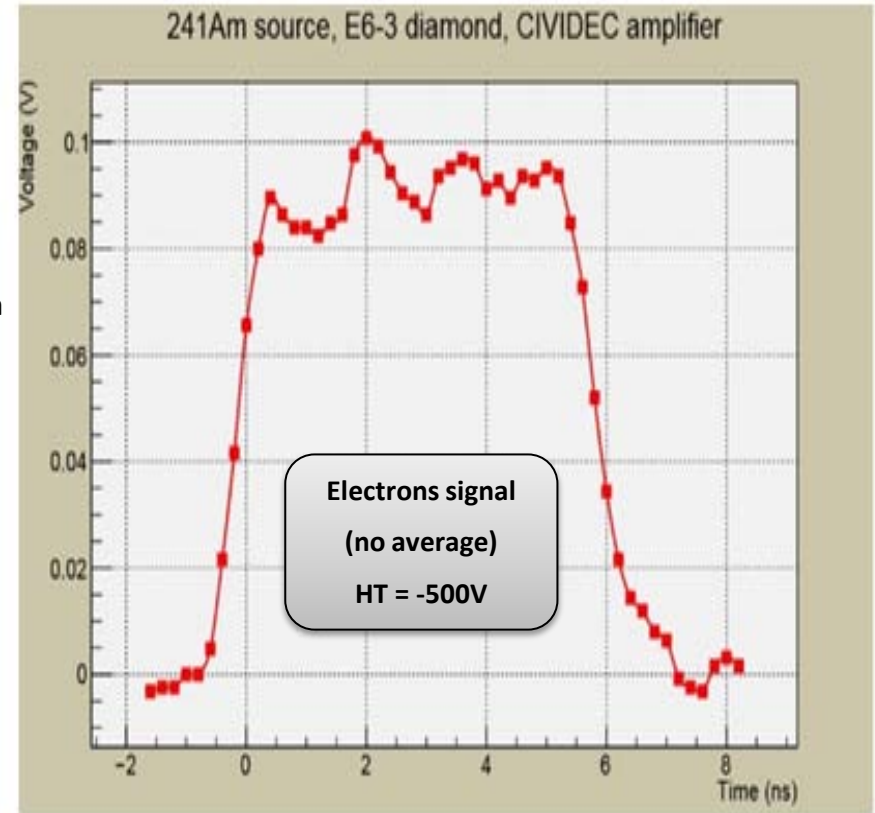
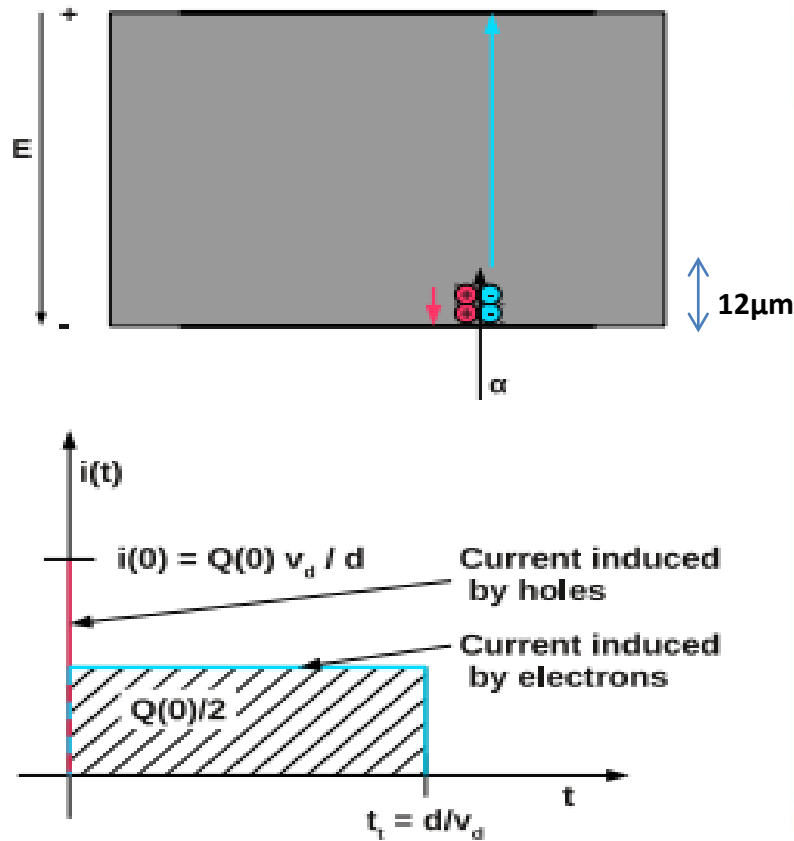
- Source d'Américium 241 de 5.4 MeV (activité : 6.41kBq)
- **Particules peu pénétrantes ($\approx 12 \mu\text{m}$ pour le diamant).**



PROJET MONIDIAM

LPSC

Résultats : Signal théorique vs signal expérimental



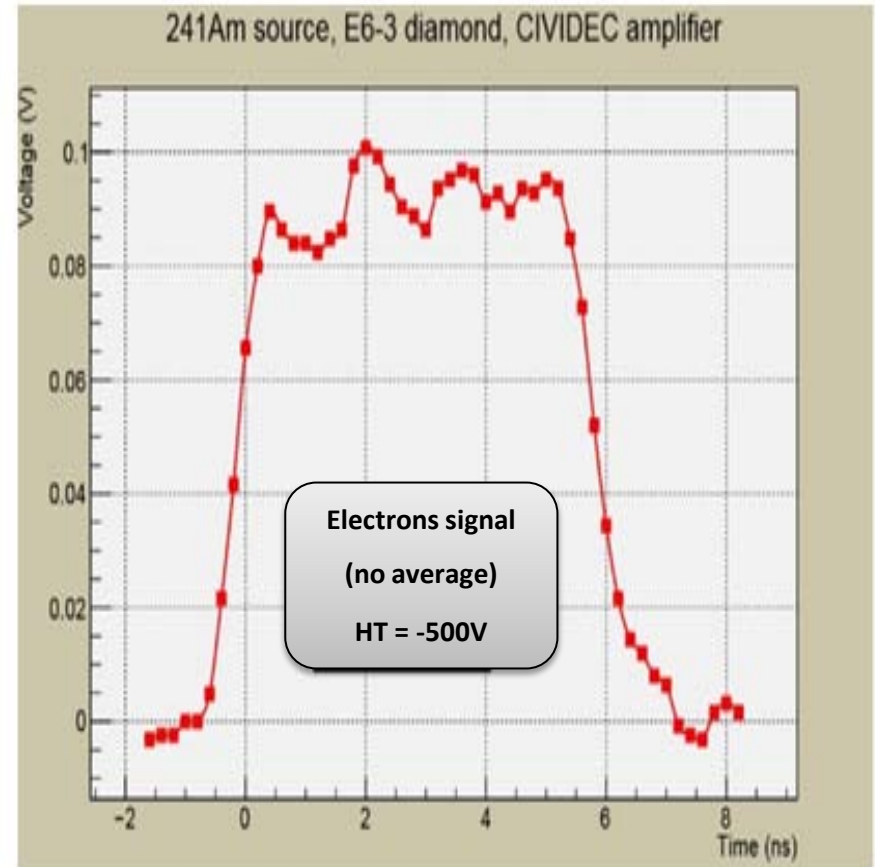
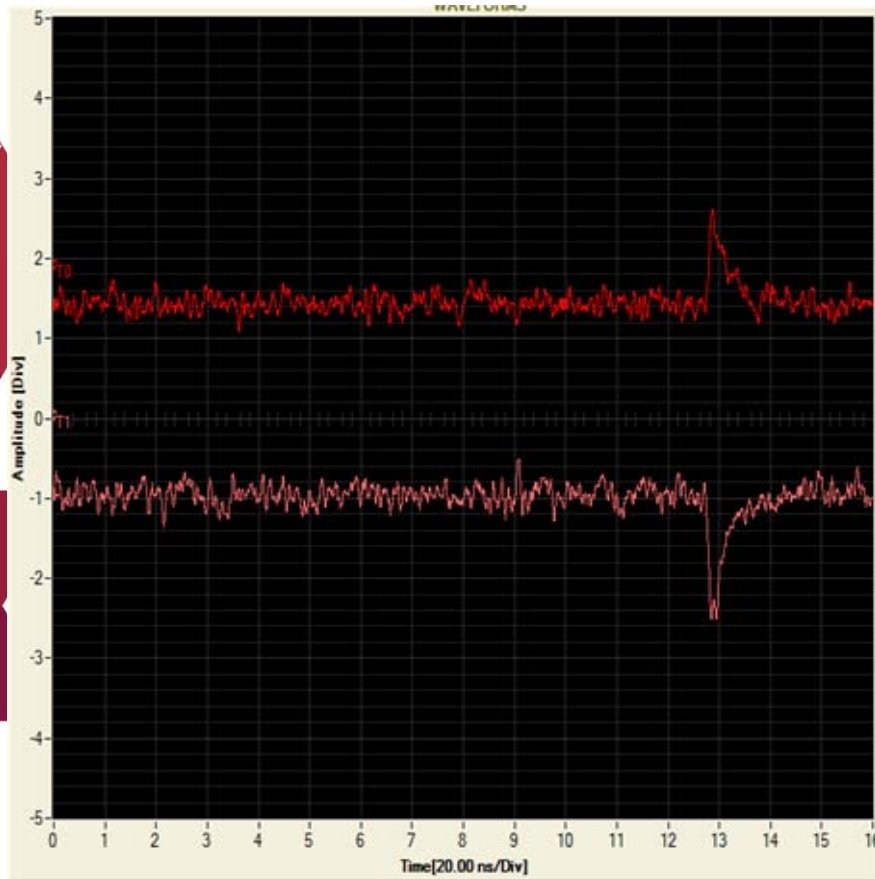
→ D'après le **théorème de Ramo**

→ Diamant **mono-cristallin**

PROJET MONIDIAM

LPSC

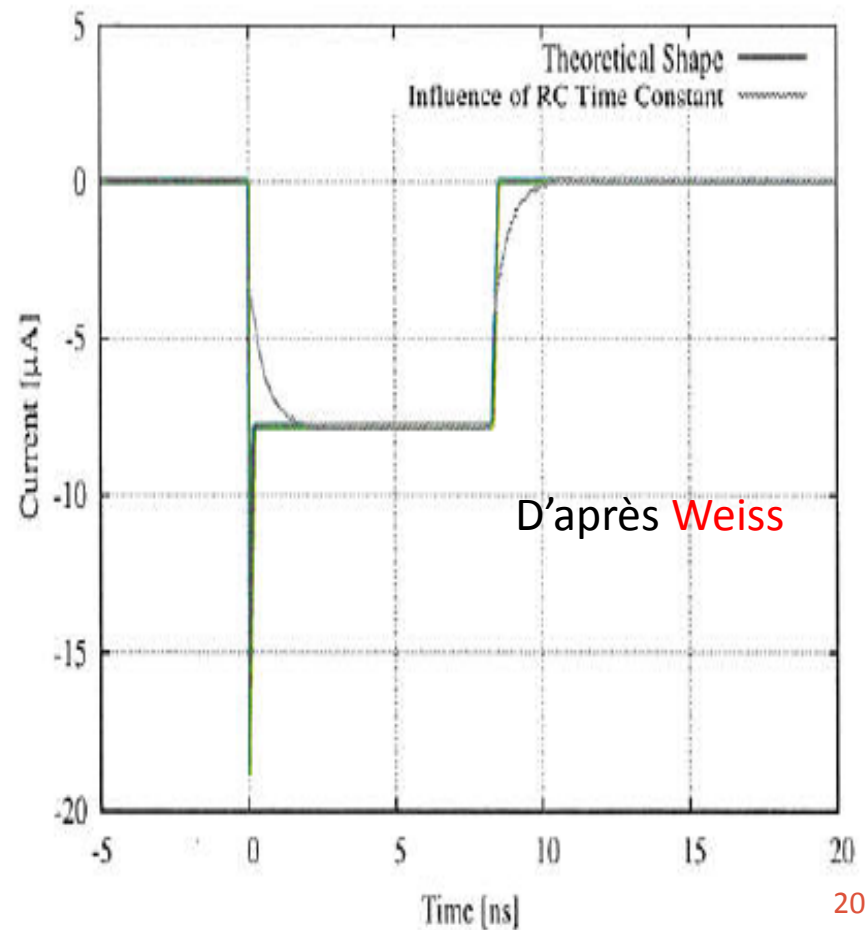
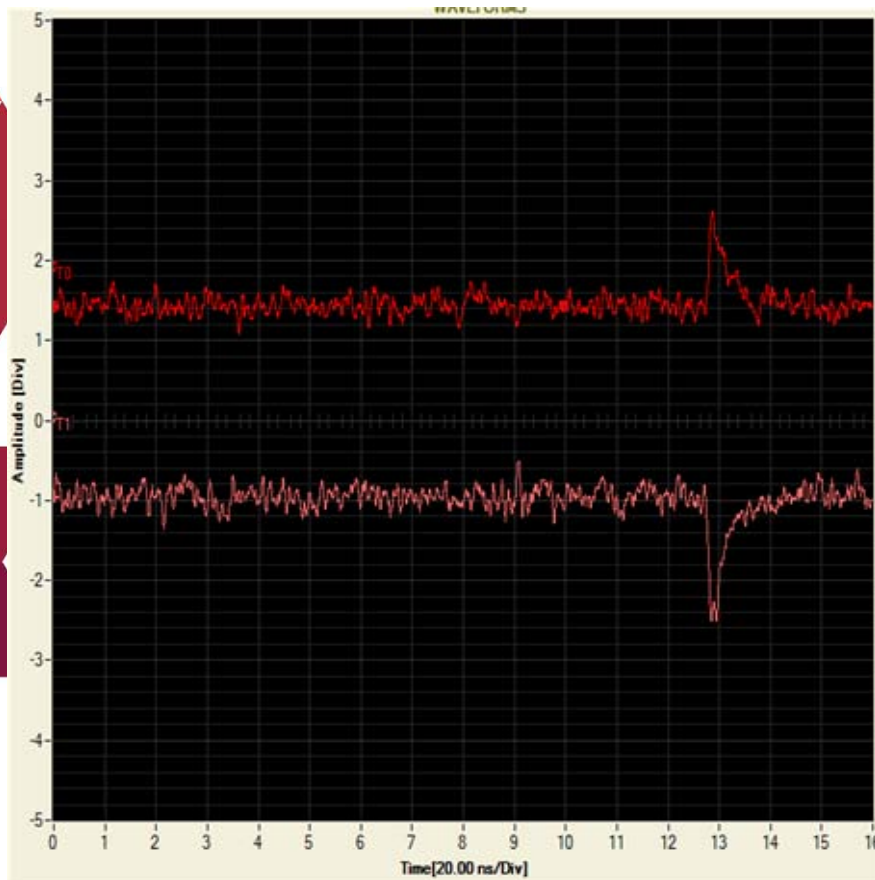
Résultats : Signal d'un détecteur diamant poly-cristallin vs signal d'un détecteur diamant monocristallin



→ Diamant **poly-cristallin**

PROJET MONIDIAM LPSC

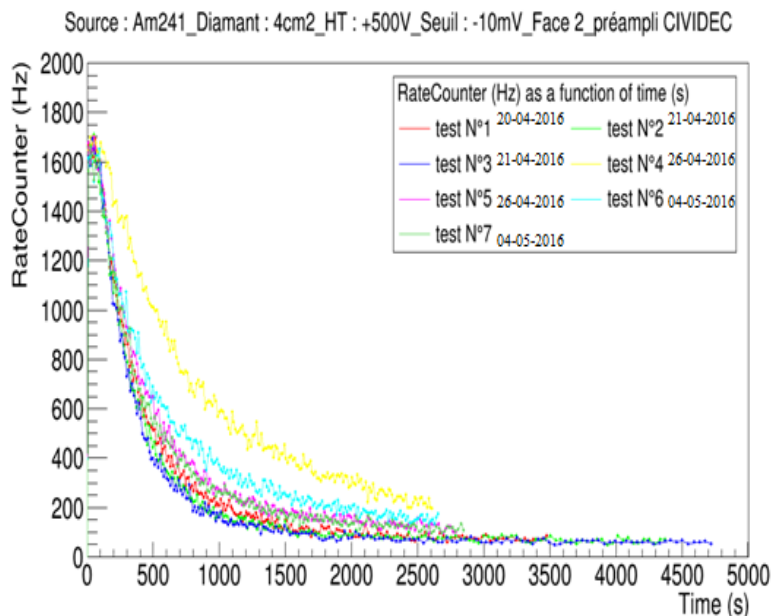
Résultats : Comparaison de signaux issus de diamants poly-cristallins



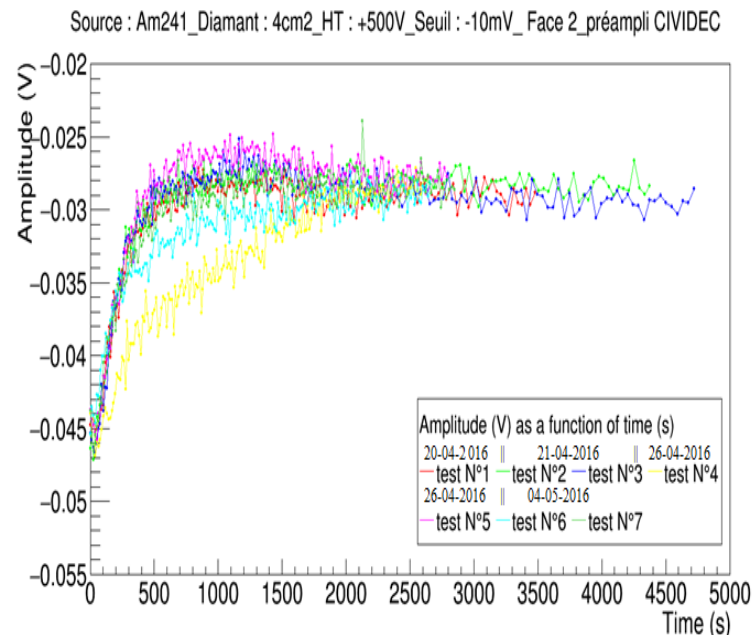
Résultats :

- Collection de charges sur une des faces du diamant : observation du phénomène de dépolarisation du diamant (piégeage, recombinaison).

Variation de la fréquence des événements détectés



Variation d'amplitude des signaux détectés

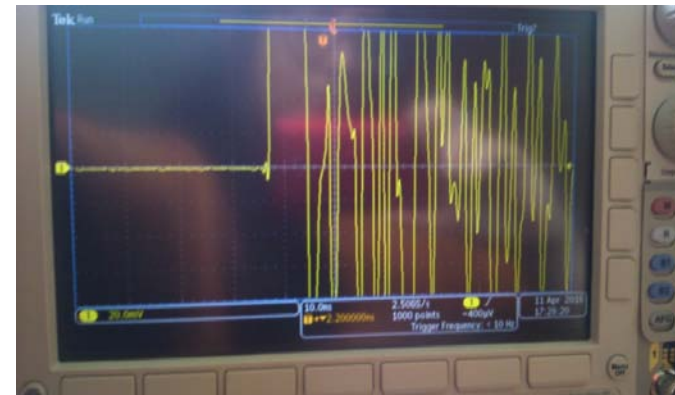
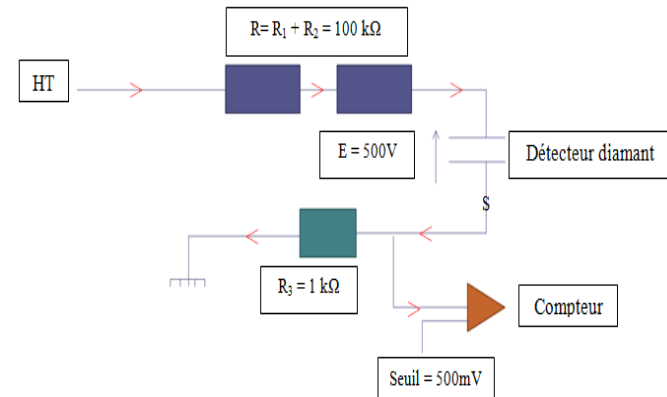
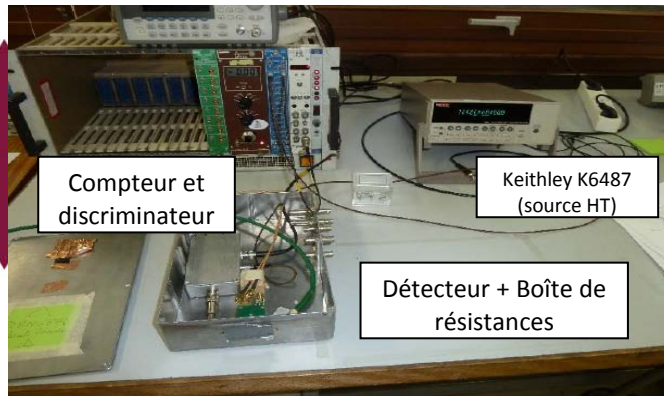


- Etude de la migration des porteurs de charges
- Reproductibilité
- Impossible de faire de la **spectroscopie**

PROJET MONIDIAM LPSC

Résultats :

- **Claquages** : phénomène qui se produit dans un isolant quand le champ électrique est plus important que ce que peut supporter cet isolant.



Résultats :

- Courants de fuite

Face 1

HT (V)	Courant de fuite				
	Poly-cristallins				Mono-cristallin
	2 x 2 cm ² x 500 μm	1 x 1 cm ² x 500 μm	1 x 1 cm ² x 300 μm	0.5 x 0.5 cm ² x 300 μm	0.45 x 0.45 cm ² x 518 μm
0	0,4 pA	0,99 pA	88,173 nA	0,548 nA	3,45 pA
100	1,28 pA	2,72 pA	7,91 μA	26,0 nA	2,9 pA
200	2,21 pA	4,32 pA	21,383 μA	70,7 nA	2,59 pA
300	3,77 pA	6,21 pA	52,82 μA	131,3 nA	2,2 pA
400	6,23 pA	7,16 pA	76,452 μA	198,7 nA	2,29 pA
500	10,9 pA	9,58 pA	99,81 μA	0,260 μA	2,98 pA

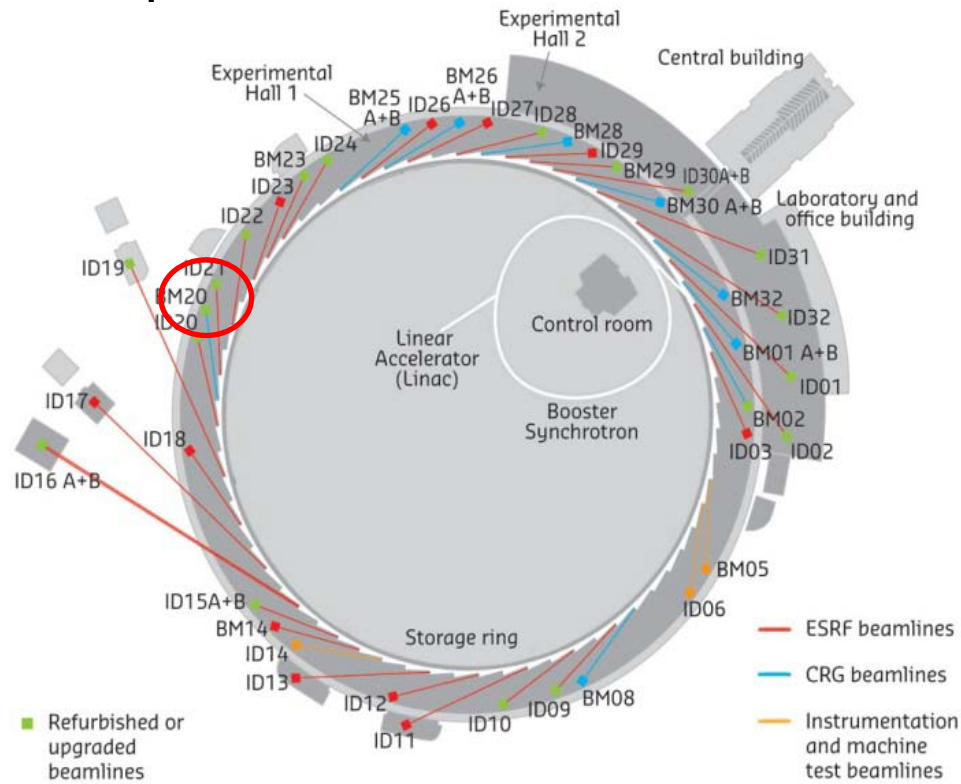
Face 2

HT (V)	Courant de fuite				
	Poly-cristallins				Mono-cristallin
	2 x 2 cm ² x 500 μm	1 x 1 cm ² x 500 μm	1 x 1 cm ² x 300 μm	0.5 x 0.5 cm ² x 300 μm	0.45 x 0.45 cm ² x 518 μm
0	1,35 pA	0,67 pA	105.5 nA	541 pA	0,42 pA
100	2,3 pA	1,21 pA	6,352 μA	24.7 nA	0,52 pA
200	5 pA	1,64 pA	15,687 μA	68.5 nA	1,6 pA
300	6,45 pA	2,46 pA	27,656 μA	123,8 nA	4,5 pA
400	15,3 pA	3,16 pA	51,18 μA	196,5 nA	19,5 pA
500	42,9 pA	5,71 pA	74,253 μA	0,279 μA	22,3 pA

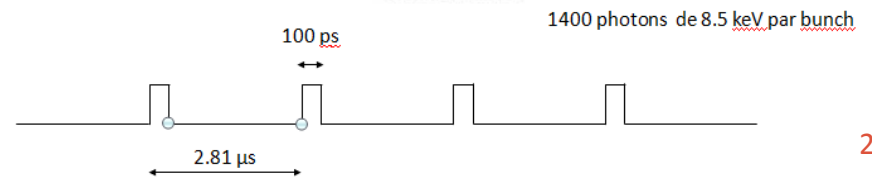
→ Qualité du diamant et de la métallisation

Dispositif expérimental :

- Expériences menées en Mai 2016 - ligne ID21
- Faisceau de photons de 8.5 keV.



- Signal pulsé
- Paquet de particules.

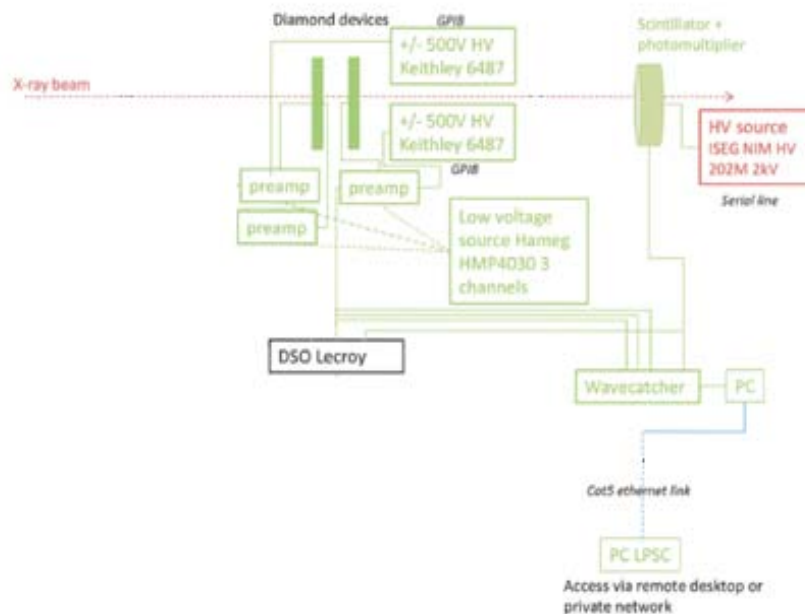


PROJET MONIDIAM

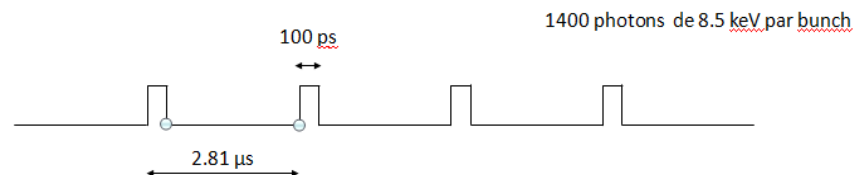
ESRF

Dispositif expérimental :

- Expériences menées en Mai 2016
- Faisceau de photons de 8.5 keV
- Diamants poly-cristallins et monocristallins (MONODIAM).

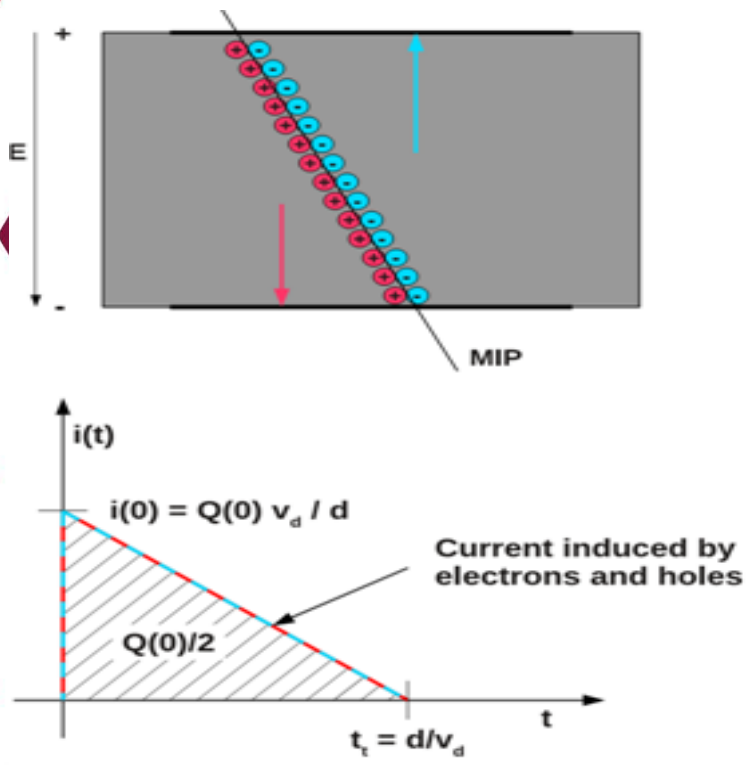


- Signal pulsé
- Paquet de particules.

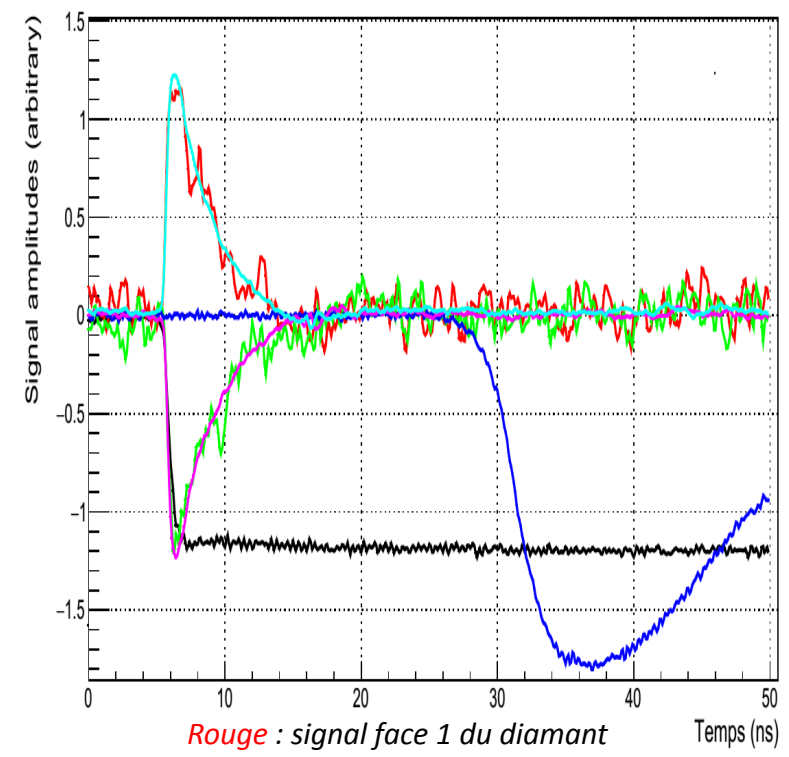


PROJET MONIDIAM ESRF

Résultats : Signal théorique vs signal expérimental



→ D'après le **théorème de Ramo**



- Rouge* : signal face 1 du diamant
- Turquoise* : moyenne du signal face 1 du diamant
- Vert* : signal face 2 du diamant
- Rose* : moyenne du signal face 2 du diamant
- Bleu* : signal du PM couplé au scintillateur
- Noir* : signal du trigger RF



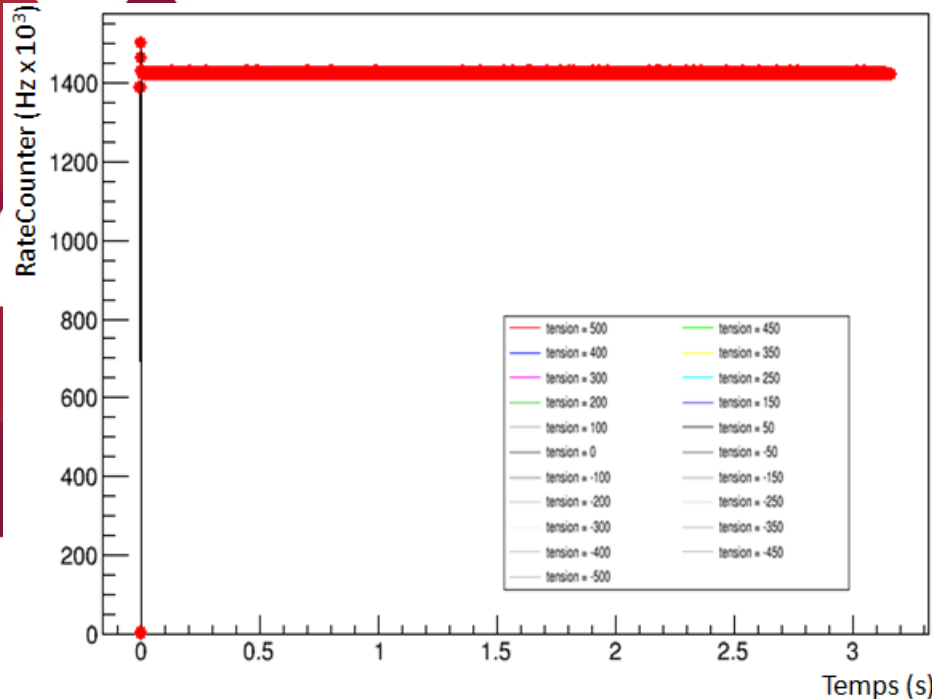
PROJET MONIDIAM

ESRF

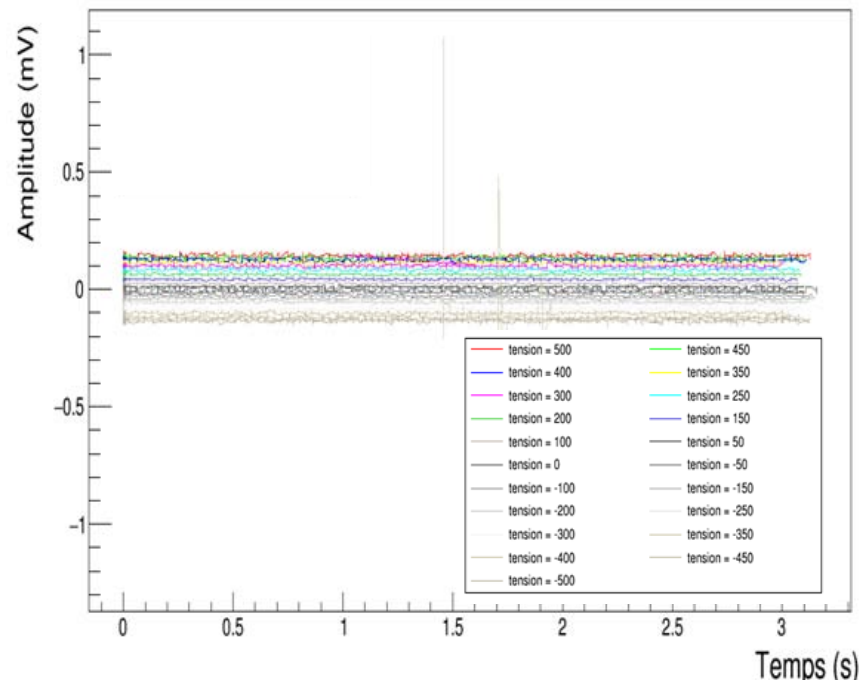
Résultats :

- Signaux collectés sur chacune des faces du diamant

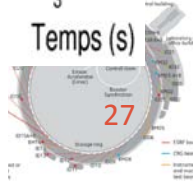
Etude de la fréquence des événements détectés



Etude de l'amplitude des signaux détectés



→ Pas de décroissance observée avec le même dispositif expérimental (WaveCatcher) que pour le banc de test alphas : lié au faisceau

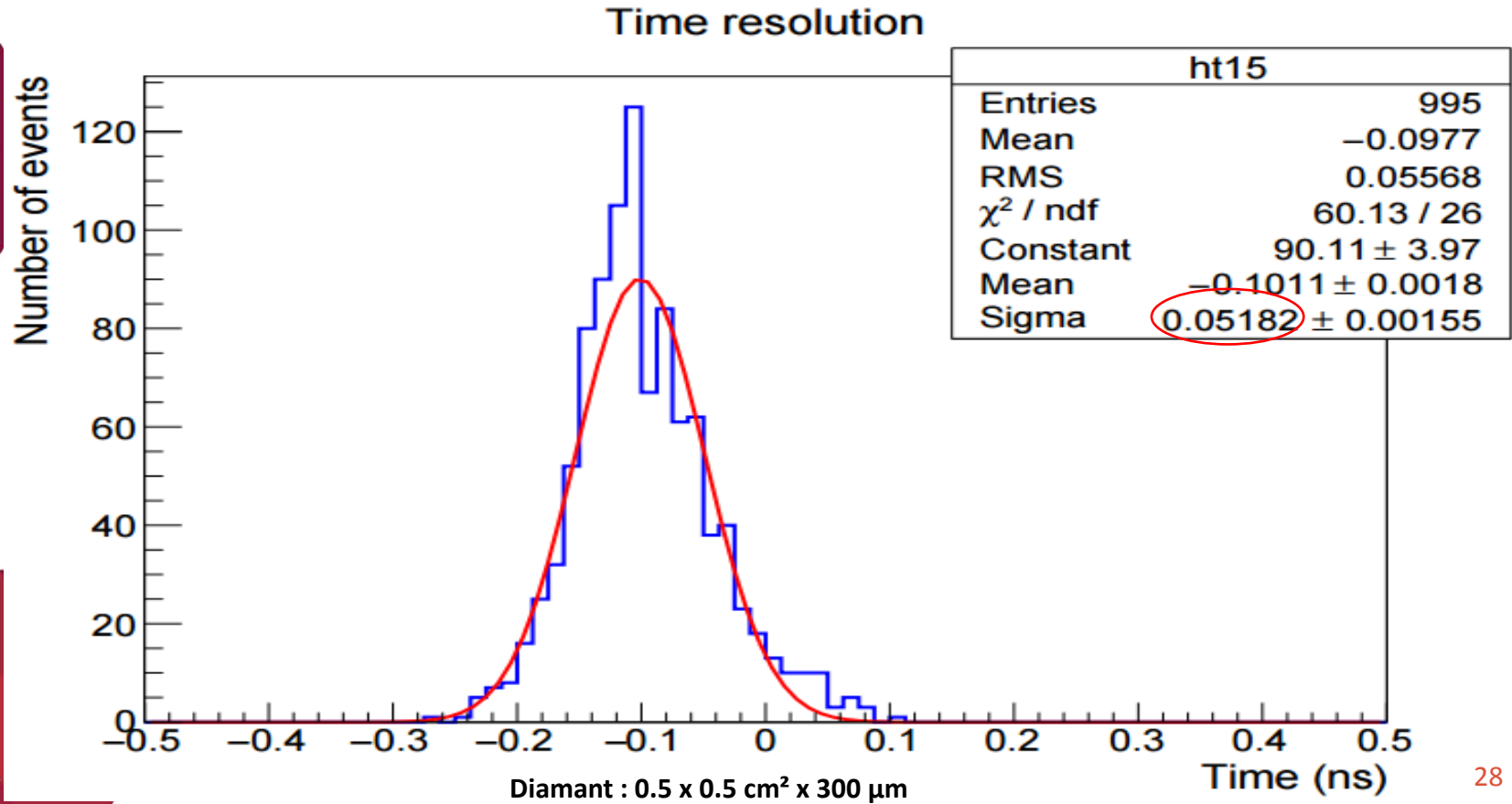


PROJET MONIDIAM

ESRF

Résultats :

Résolution en temps entre deux faces d'un détecteur diamant (Méthode du DFC numérique)



PROJET MONIDIAM

ESRF

Résultats :

- Résolution temporelle des diamants

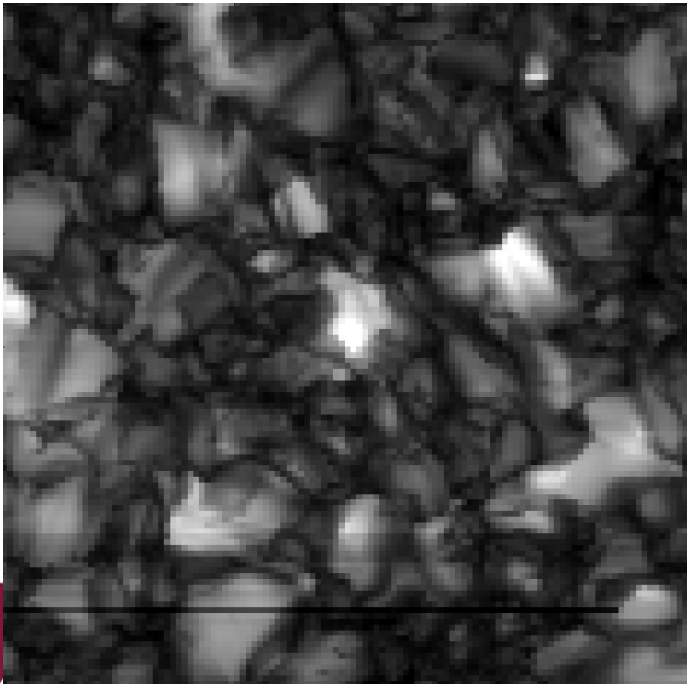
	Dimensions	Préamplis. Utilisés	HT (V)	Amplitude (mV)	Bruit (mV)	Rapport signal sur bruit	Résolution en temps entre les deux faces du diamant (ps)
Diamant Mono-cristallin	0.45 x 0.45 cm ² x 518 μm	Cividec	-500	134,3	2,812	47,76	26,7
			500	148,2	2,229	66,48	25,1
		DBAIII	-500	54,63	2,02	27,04	48,84
			500	52,76	1,987	26,55	50,11
		LPSC	-500	126,5	3,312	38,19	53,8
			500	167,1	4,005	41,72	48,41
Diamants poly-cristallins	0.5 x 0.5 cm ² x 300 μm	Cividec	300	-56,98	2,863	19,9	49,22
	10 x 10 cm ² x 500 μm	Cividec	300	-55,74	2,64	21,11	71,94
	10 x 10 cm ² x 500 μm	Cividec	300	-55,91	3,569	15,66	79,22

PROJET MONIDIAM

ESRF

Résultats :

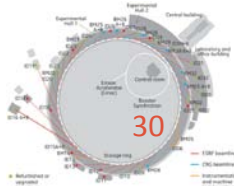
- Radiographie des détecteurs diamants



→ Homogénéité : **NON**

→ **Observation de joints de grains**

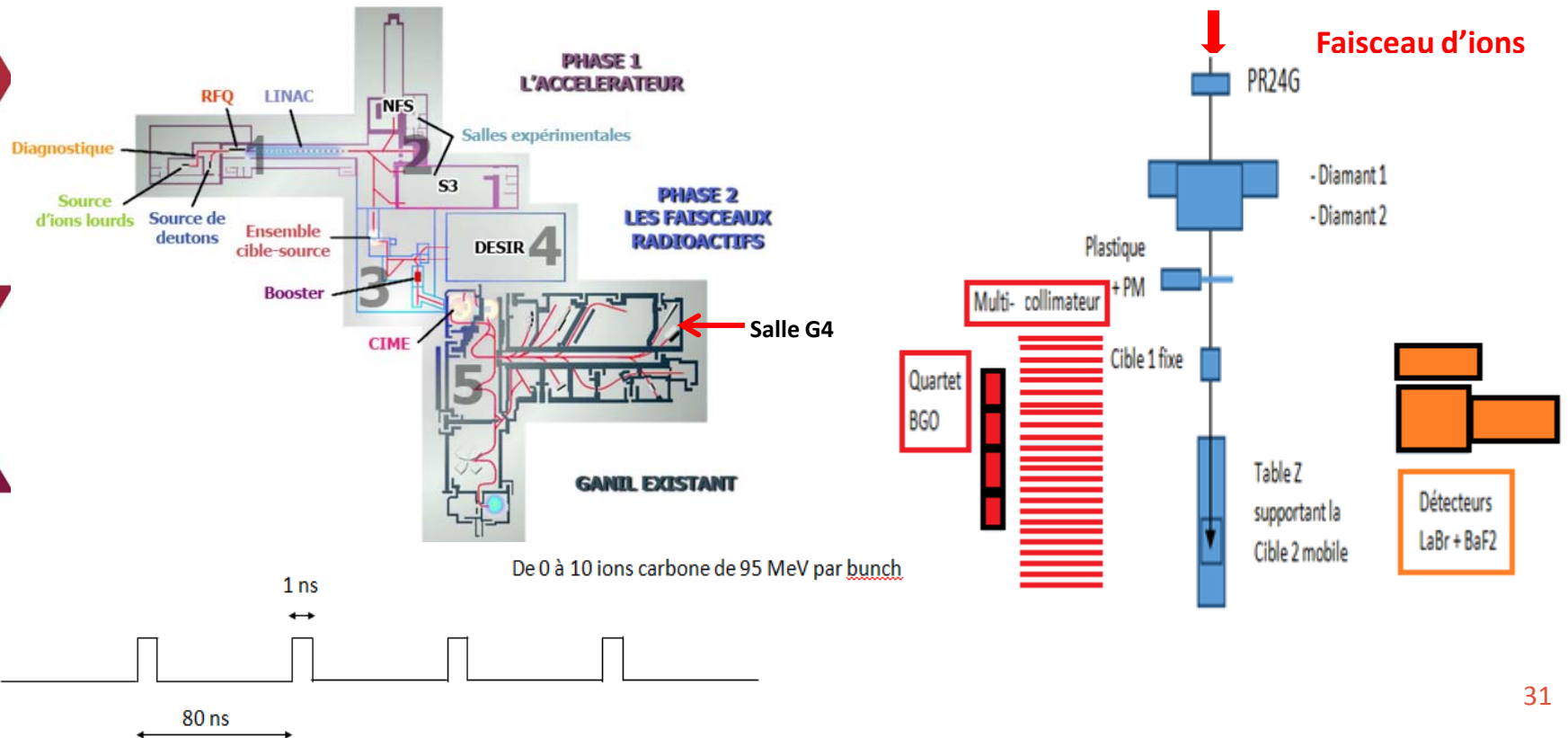
→ Explique les problèmes de collection de charges observés avec la source alpha.



PROJET MONIDIAM GANIL

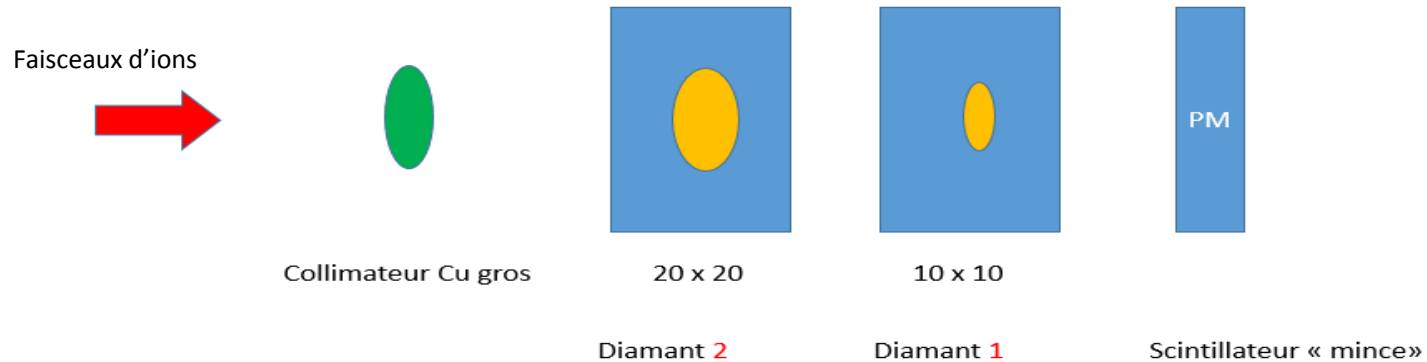
Dispositif expérimental :

- Expériences menées en juillet 2016
- Faisceau d'ions carbone de 95MeV/nucléon



Résultats :

Efficacité de détection des ions



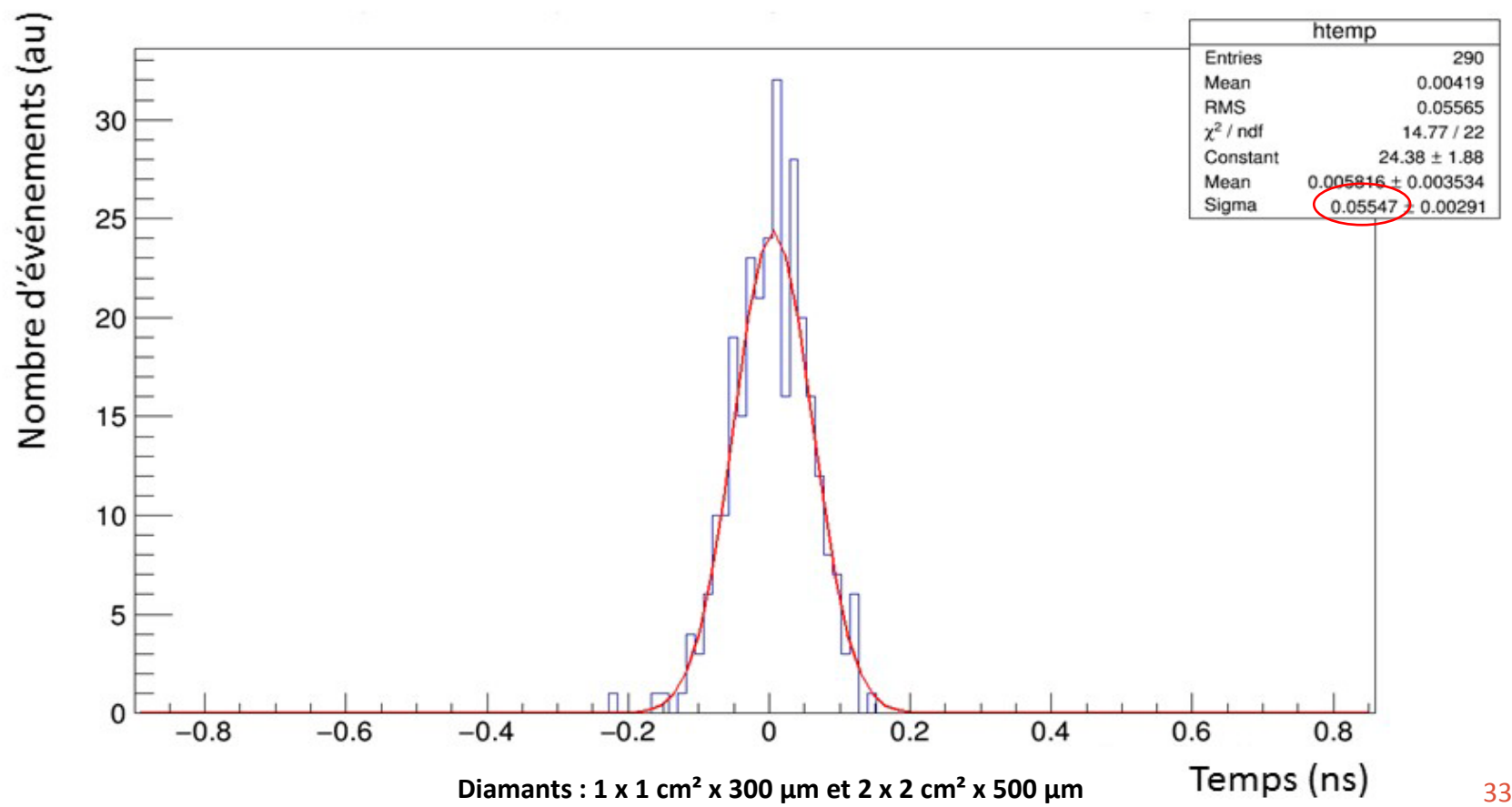
$$eff\ D1 \Rightarrow \frac{D1D2}{D2} = 2972/3685 = 80.7\% \quad \frac{D1D2\ PM}{D2PM} = 2943 / 3637 = 80.9\%$$

$$eff\ D2 \Rightarrow \frac{D1D2}{D1} = 2972/4139 = 71.8\% \quad \frac{D1D2\ PM}{D1PM} = 2943 / 4063 = 72.4\%$$

PROJET MONIDIAM GANIL

Résultats :

Résolution en temps entre deux détecteurs diamant





PLAN

- Introduction
 - Le projet et son contexte
 - intérêt général dans le domaine de la physique médicale
- Problématique et objectifs du stage
- Matériel et Méthodes
- Résultats
- Conclusion
- Perspectives

CONCLUSION

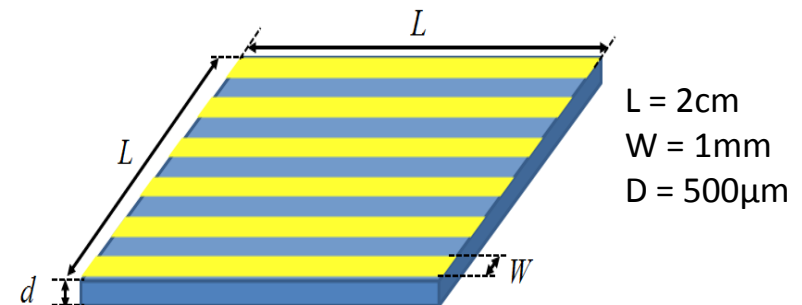
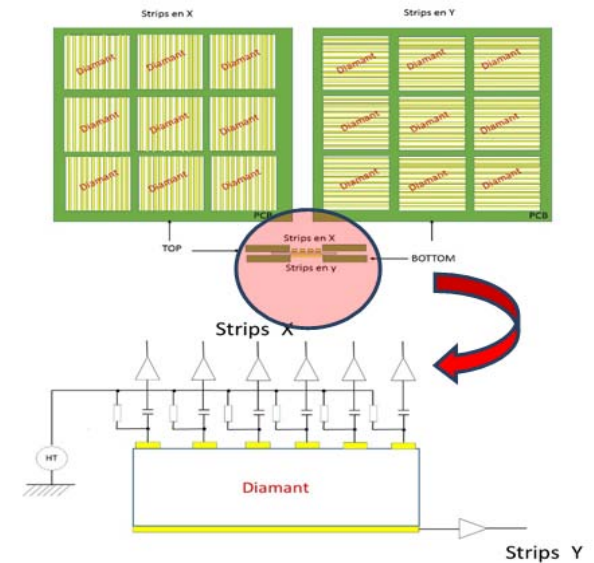
- **Diamants poly-cristallins présentent des défauts intrinsèques**
 - **Problème mis en évidence avec une source alpha mais pas gênant pour notre application : moniteur faisceau en hadronthérapie**
- **Résultats importants pour notre application**
 - **Résolution en temps :**
 - Objectif : < à 100 ps
 - Objectif atteint : **résolution max 80 ps (confirmée par l'ensemble des bancs de tests en laboratoire et sur faisceaux)**
 - **Efficacité de détection des ions :**
 - **70 – 80 % (résultats préliminaires –analyse des données du GANIL)**

PLAN

- Introduction
 - Le projet et son contexte
 - intérêt général dans le domaine de la physique médicale
- Problématique et objectifs du stage
- Matériel et Méthodes
- Résultats
- Conclusion
- Perspectives
 - Hodoscope diamant
 - Electronique dédiée
 - Futures expériences

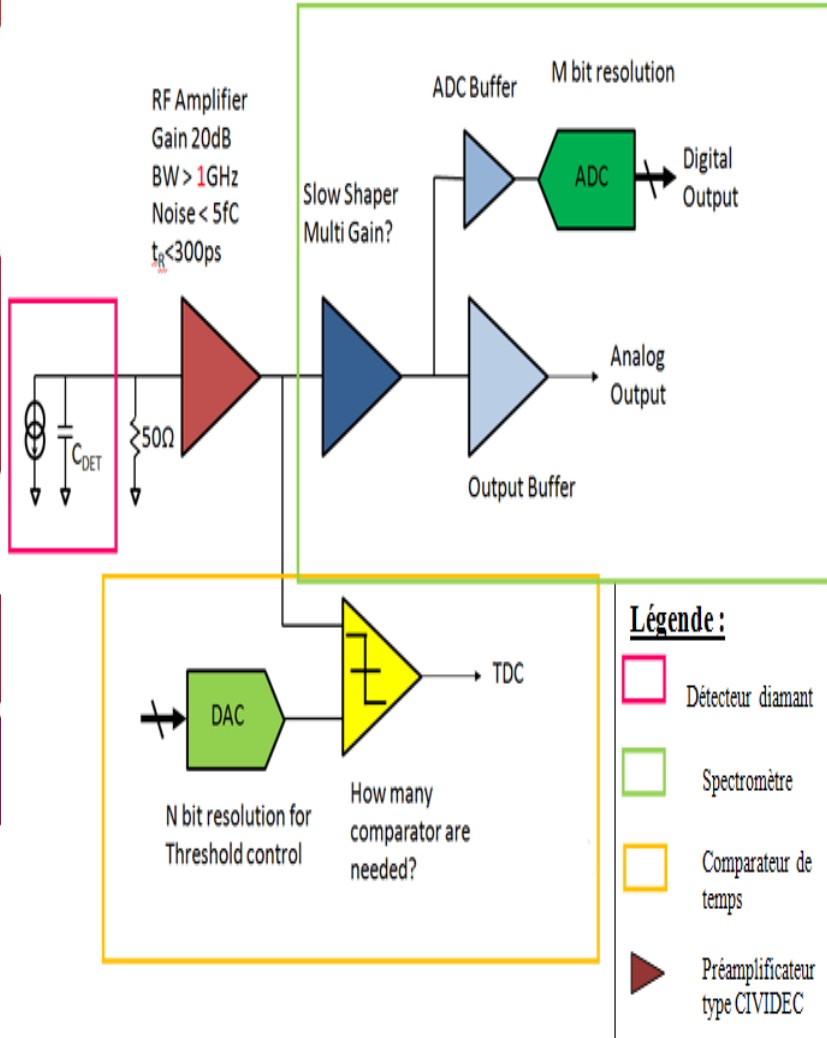
ARCHITECTURE DU FUTUR HODOSCOPE DIAMANT

- **taille de la mosaïque : 15cm x 15cm**
- lecture double face (transparence)
- **taille des détecteurs : 2cm x 2cm**
(pour un diamant polycristallin, en stock chez Element 6)
→ 56 détecteurs
- **nombre de pistes par détecteur : 32 de 1mm**
→ 1800 voies de lecture



ELECTRONIQUE DÉDIÉE

FUTURES EXPÉRIENCES



Centre Lacassagne de Nice

- Faisceau de protons de 64MeV

LPSC

→ Faire un premier démonstrateur pour 2019


**Merci de votre
attention !**



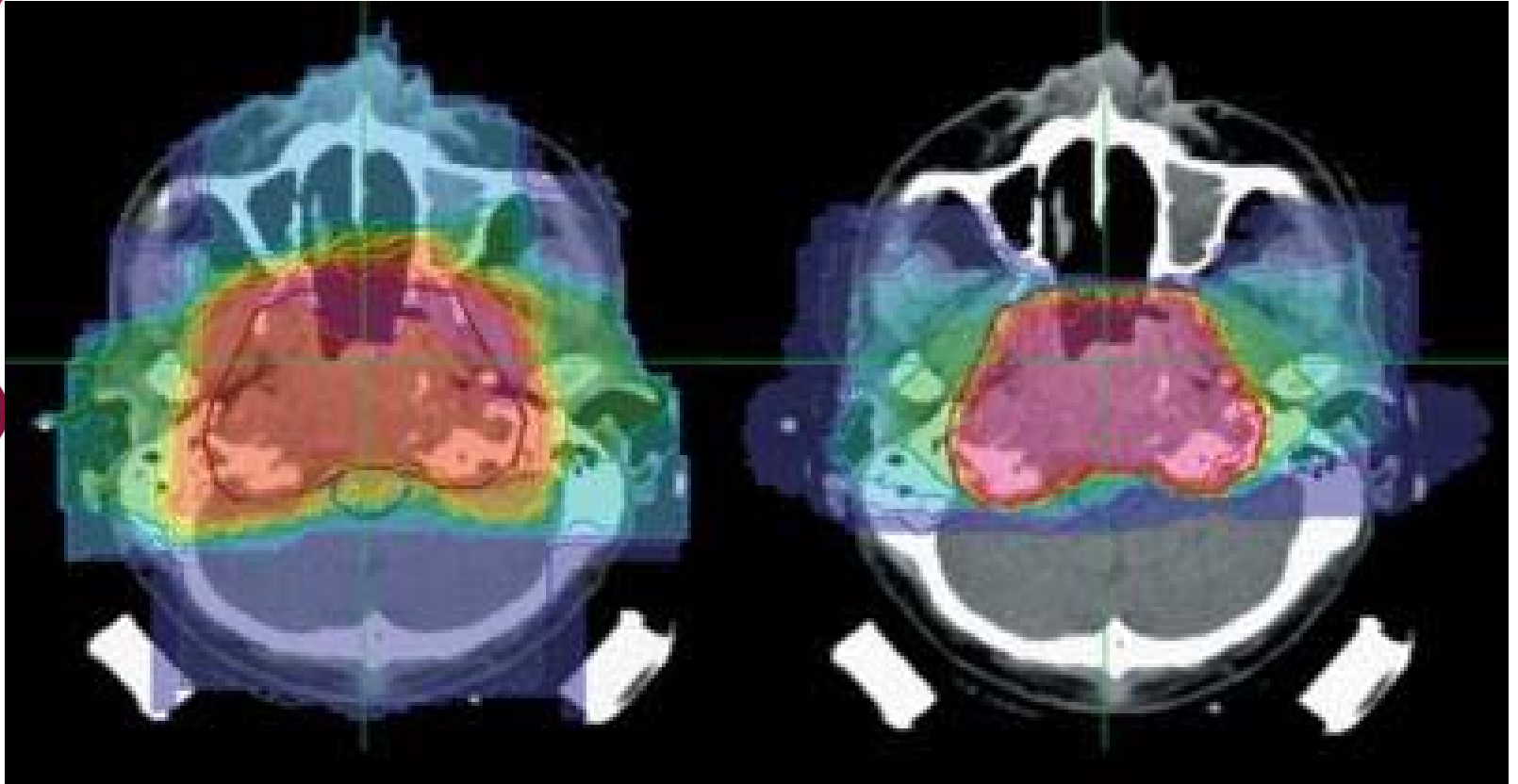


BIBLIOGRAPHIE

- <http://cds.cern.ch/record/1738115/files/vol23-issue4-p139-f.pdf> : plan du ganil
- [Weiss, 2014], Christina Weiss. A CVD diamond Detector (n, α) Cross-Section Measurements, Detectors and Experimental Techniques ; Nuclear Physics – Experiment, CERN-THESIS, 2014, p.155
- <http://cours.lal.in2p3.fr/EnsUniv/coursSchuneStocchi/cours2.pdf> : MIP



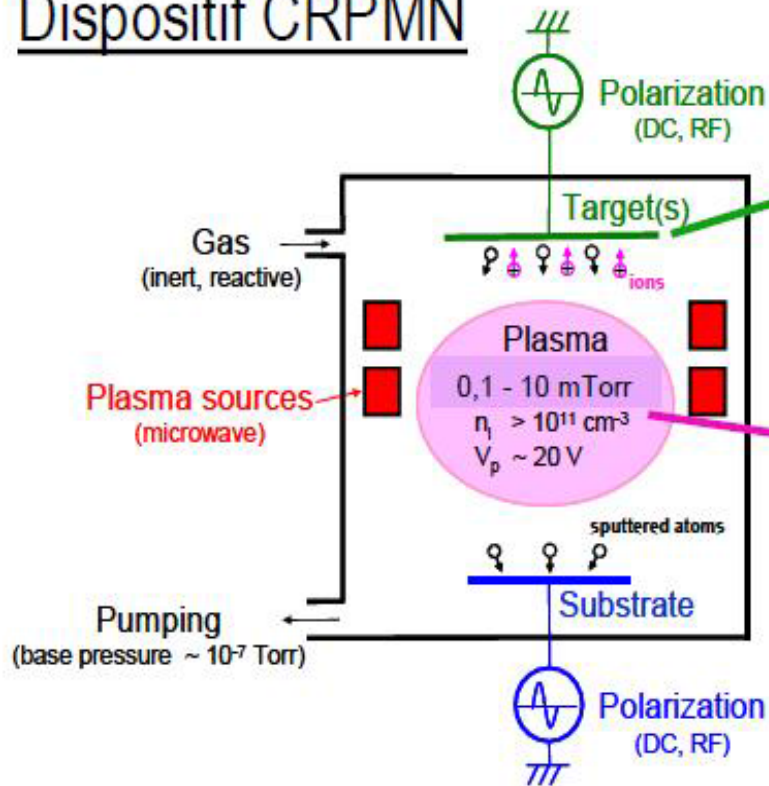
ANNEXE 1 : RCM I



Plan de traitement avec 8 champs d'irradiation (à gauche) et avec 2 champs d'irradiation (à droite)

ANNEXE 2 : MÉTALLISATION GROUPE PLASMA

Dispositif CRPMN



Épaisseur de la métallisation : 50-60 nm

Les étapes de métallisation :

Étape 1 : Décapage chimique

→ Application d'un mélange d'acide sulfurique, chlorhydrique et phosphorique à une température de 100°C.

Étape 2 : On serre le diamant dans le porte échantillon qui nous permettra de donner la dimension de la pastille de métallisation.

Étape 3 : Pompage

→ Le diamant est mis sous vide pendant quelques heures au minimum.

Étape 4 : Nettoyage du diamant avec un plasma composé d'argon et d'hydrogène. On polarise la surface du diamant négativement.

Rq : Possibilité d'utiliser des magnétrons à la place du mélange Argon/hydrogène

Étape 5 : Nettoyage des cibles d'aluminium avec de l'argon pur. Polarisation de cibles à -300V. Cette étape dure environ 10 min.

Étape 6 :Deuxième nettoyage de la surface de diamant en argon pur pour éliminer toute trace d'hydrogène. Cette étape dure également 10 min environ .

Étape 7 : Étape de dépôt.

→ On stoppe la polarisation du diamant et on démarre celle de l'aluminium. L'aluminium adhère au diamant par pulvérisation.

Rq : La pulvérisation permet un rendu plus homogène des atomes d'aluminium comparé à la méthode d'évaporation.

Contrôle de l'épaisseur du dépôt d'aluminium :

Ce contrôle se fait par rapport à une calibration i.e un dépôt de référence.

Calibration : 100 nm correspond 30 min.

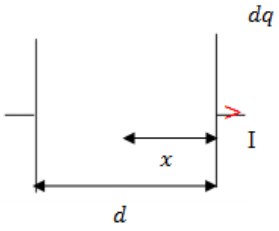
On déduit alors notre épaisseur par rapport à un temps suivant une règle de trois.

Nettoyage du diamant post utilisation : acétone + alcool.



ANNEXE 3 : THÉORÈME DE RAMO

On considère le détecteur comme un condensateur plan.



Pour un condensateur plan, le déplacement d'une charge entre deux électrodes parallèles distantes de d induit un signal sur ces électrodes : $\frac{dq}{q} = -\frac{x}{d}$ pour des électrons.

Avec : $I = \frac{dq}{dt}$ et $v_{dr} = \frac{dx}{dt}$

- Avec : v_{dr} : la vitesse de dérive des porteurs de charges (ici les électrons)
- d : épaisseur du condensateur (ici le diamant)
- q : charge du porteur

D'où : $I = -\frac{q}{d} \times v_{dr}$ ➔ Théorème de Ramo-Shockley

Cette formule représente le courant instantané induit sur les électrodes.

Si on néglige les charges d'espace, $v_{dr} = \mu E$

- Avec μ : la mobilité des porteurs de charges
- E : le champ électrique

On a alors : $I = -\frac{q}{d} \times \mu E$

Dans notre détecteur diamant, le courant est fonction des effets de pièges, de recombinaison...

De ce fait : $I(t) = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$

Avec τ : le temps de vie des porteurs de charges

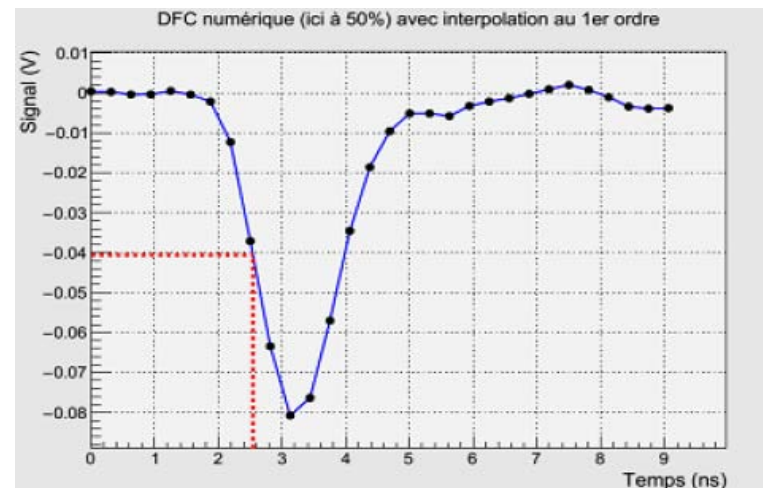
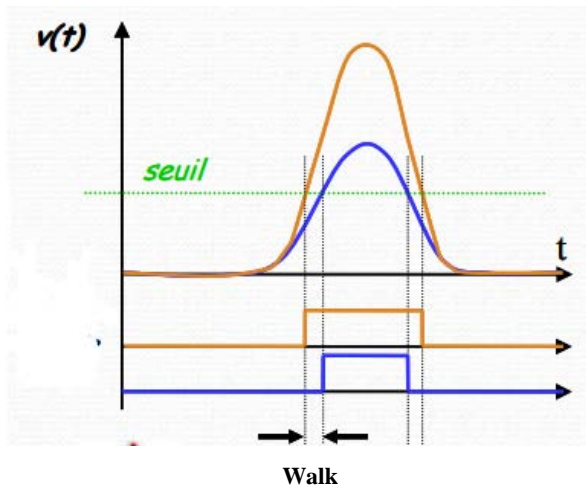
Il faut savoir que pour les diamants parfaits, τ est infini donc : $I(t) = I_0$. Pour les diamants polycristallins le terme en exponentielle est dominant et les charges se recombinent ou sont piégées.



ANNEXE 4 : DISCRIMINATEUR À FRACTION CONSTANTE

Les différentes étapes :

1. calculer la ligne de base un peu en amont du signal proprement dit (50 ou 100 points d'échantillonnage dans notre cas),
2. rechercher le maximum de l'amplitude du signal,
3. retrancher la ligne de base et diviser par 2 (c'est à dire 50%) puis rajouter la ligne de base. On obtient ainsi la valeur du seuil dépendant de l'amplitude du signal Figure 37
4. on localise les deux points qui entourent la valeur calculée du seuil en 3, et par interpolation linéaire on déduit la valeur temporelle t ,
5. on fait ensuite un mesure de Δt ($\Delta t = t_2 - t_1$) entre 2 signaux (issus de deux détecteurs différents ou de deux faces d'un même diamant) provenant des 2 préamplificateurs : l'écart type de cette distribution pour un grand nombre d'événements (résolution temporelle) est alors bien meilleur, entre 26 et 80 ps pour le diamant le moins performant.





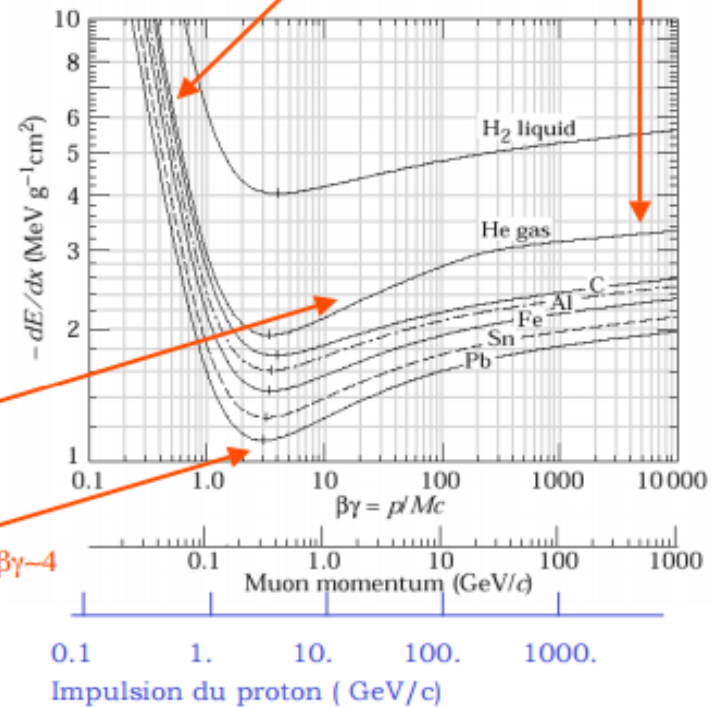
ANNEXE 5 : MIP

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi}{m_e c^2} \cdot \frac{nq^2}{\beta^2} \cdot \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \cdot \left[\ln\left(\frac{2m_e c^2 \beta^2}{I - (1 - \beta^2)}\right) - \beta^2 \right] \rightarrow \text{Bethe et Block}$$

$$-\frac{dE}{dx} = kz^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\ln \frac{2m_e c^2 \gamma^2 \beta^2}{I} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right]$$

- « descente » : effet classique : « plus la particule va lentement plus elle a le temps d'ioniser le milieu »
- Minimum large situé vers $\beta\gamma \sim 4$
- Remontée relativiste : le champ électrique transverse est proportionnel à γ ; quand l'énergie augmente les collisions à grandes distances sont de plus en plus importantes.
- Plateau : quand le paramètre d'impact devient de l'ordre des distances inter-atomiques les effets de polarisation du milieu deviennent importants.


Constante (δ) à cause des effets de densité



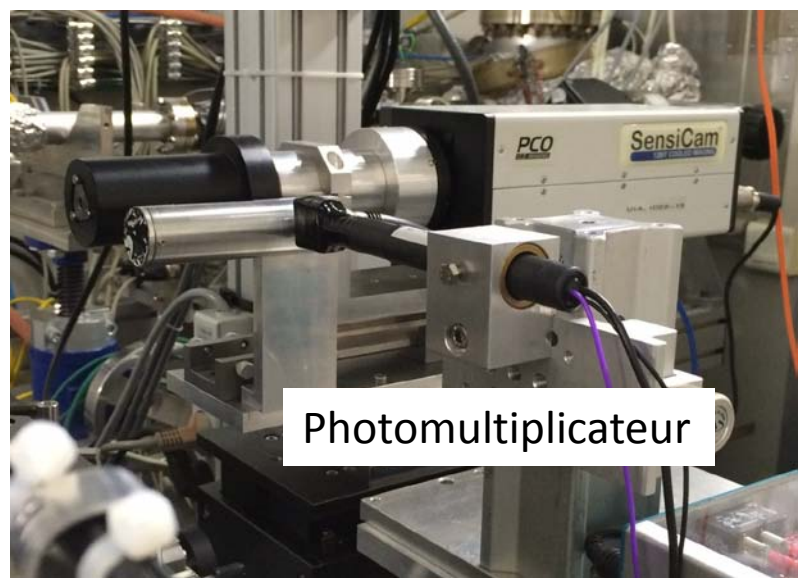
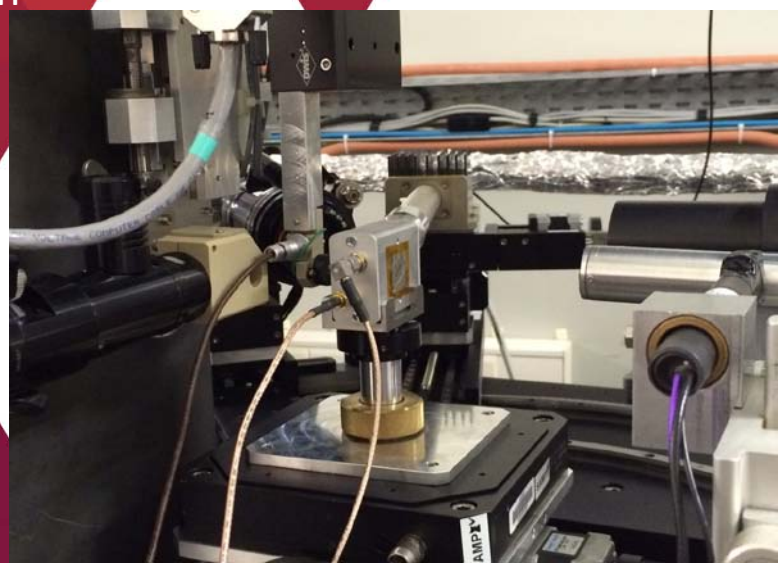
$2\ln(\gamma)$ remontée relativiste

Particule au minimum d'ionisation $\beta\gamma \sim 4$
 $(dE/dx)_{\min} = MIP \sim 2MeV g^{-1}cm^2$

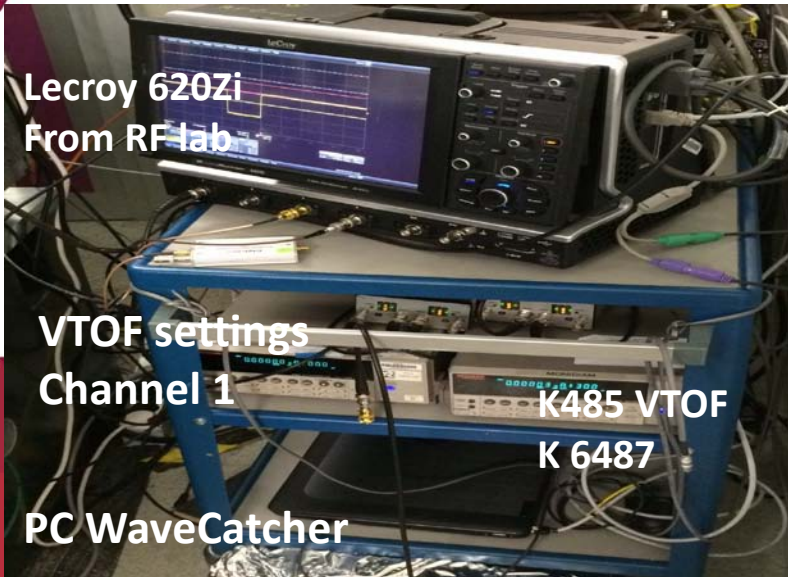
petit !



ANNEXE 6 : ESRF



Photomultiplicateur

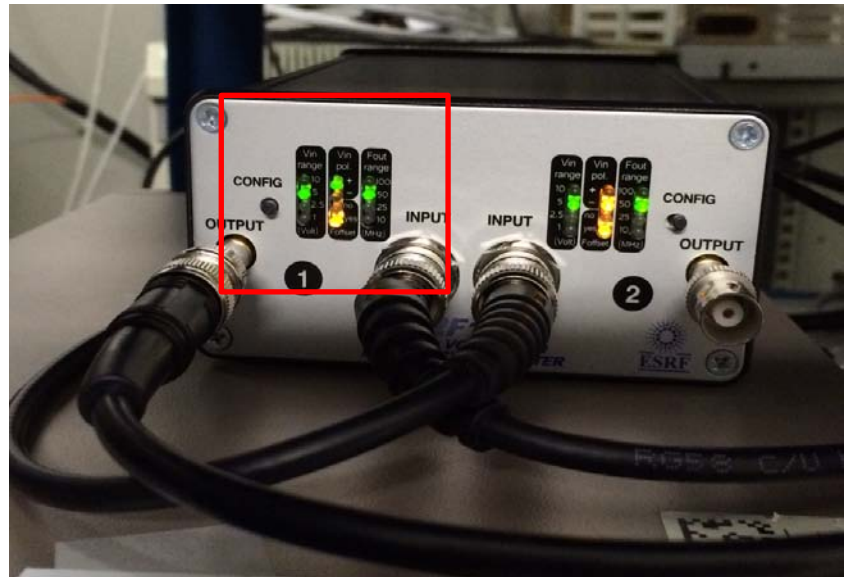


Lecroy 620Zi
From RF lab

VTOF settings
Channel 1

K485 VTOF
K 6487

PC WaveCatcher





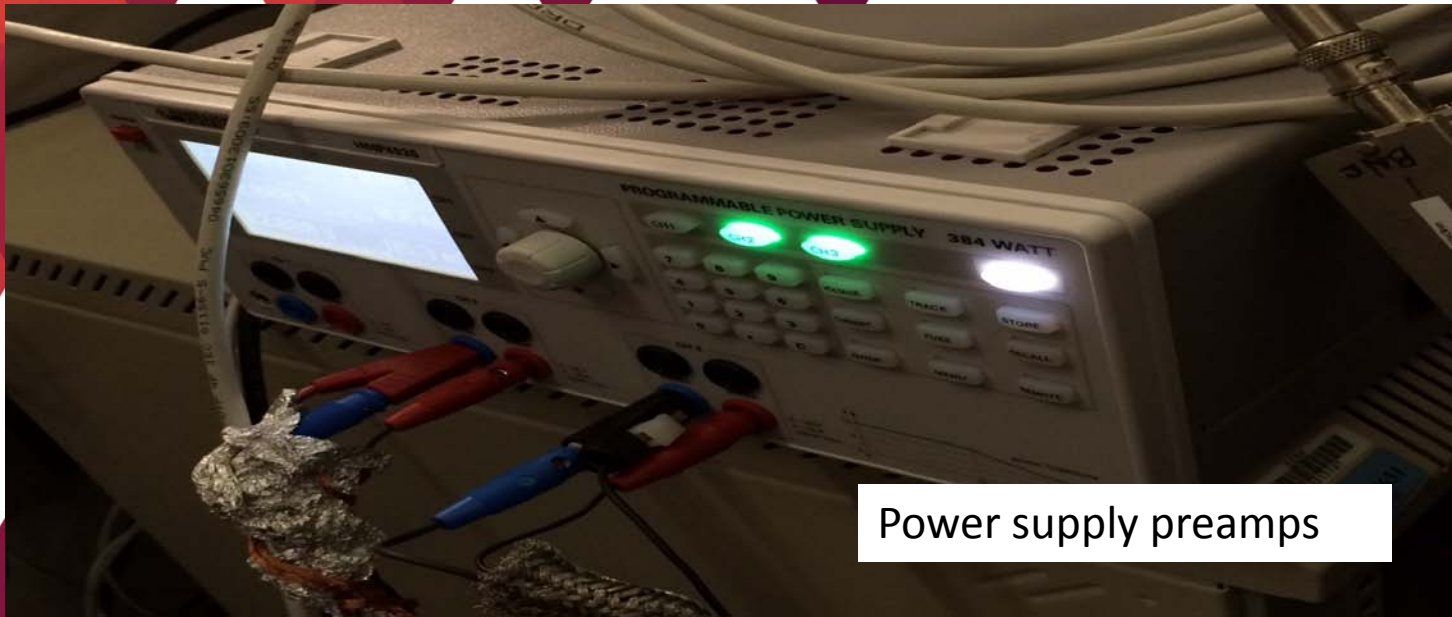
NHQ HV for PM

BCDU8

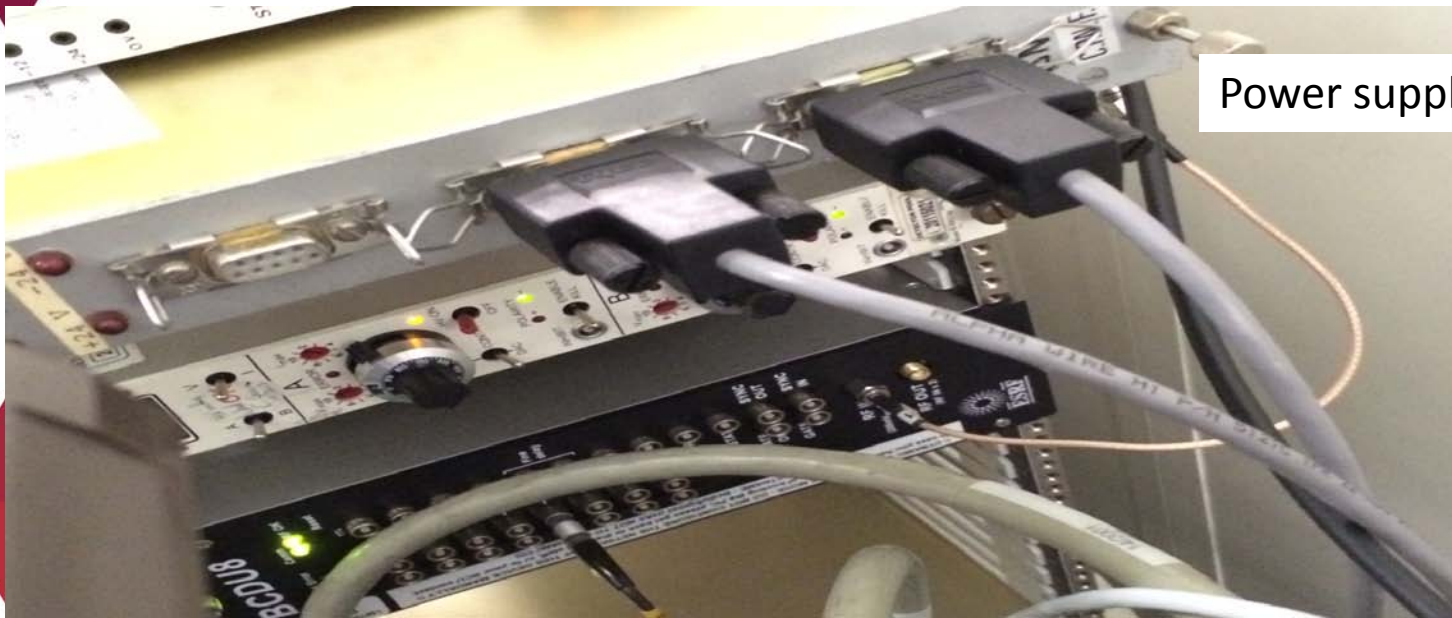


NHQ on serial line

BCDU8 on Ethernet

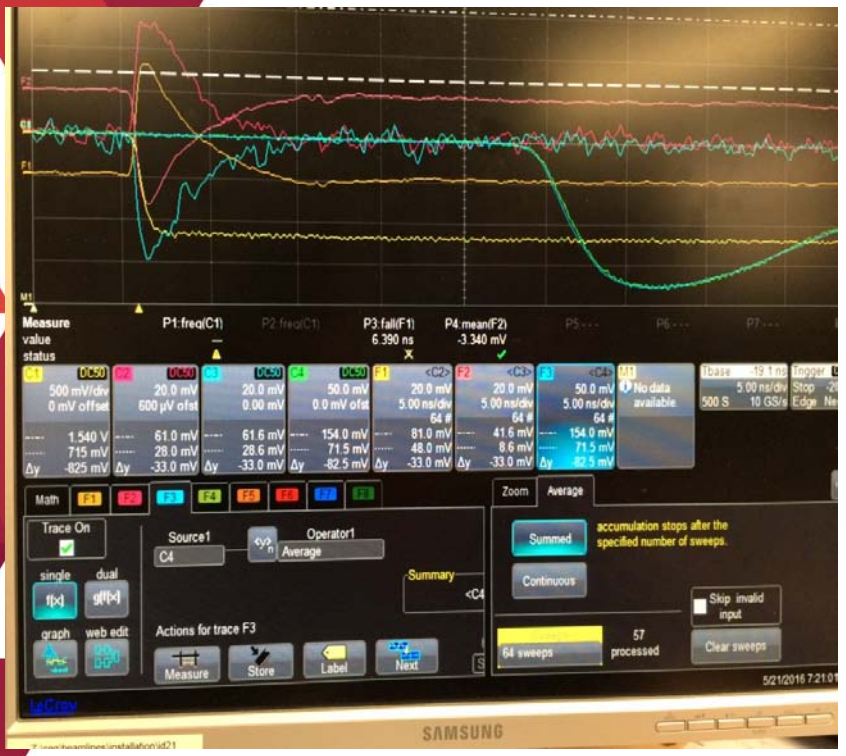


Power supply preamps



Power supply preamps

Last settings scope



- C1 RF trigger
- C2 diamond
- C3 diamond
- C4 Pm

How to set F1 average, summed, 64 sweeps



ANNEXE 7 : GANIL

