

# Monitorage faisceau diamant pour des faisceaux pulsés de haute intensité

Molle Robin

Doctorant LPSC/ARRONAX-SUBATECH

[robin.molle@lpsc.in2p3.fr](mailto:robin.molle@lpsc.in2p3.fr)



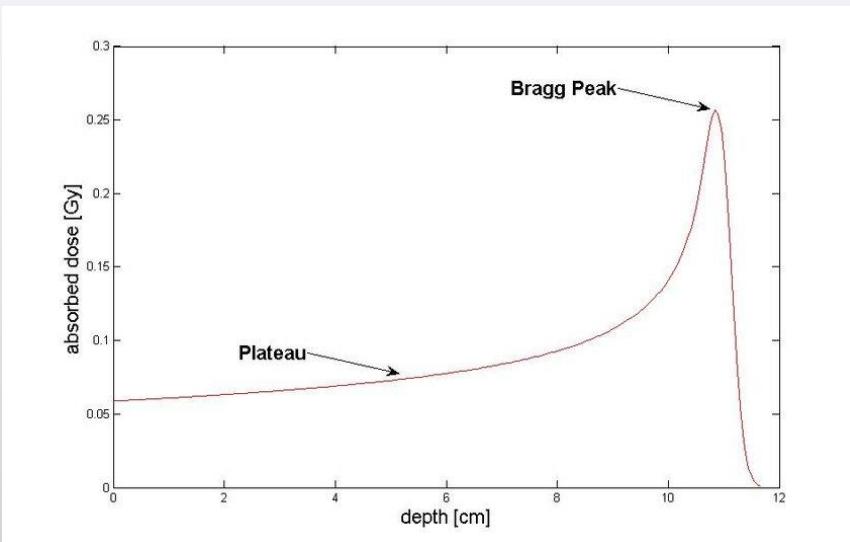
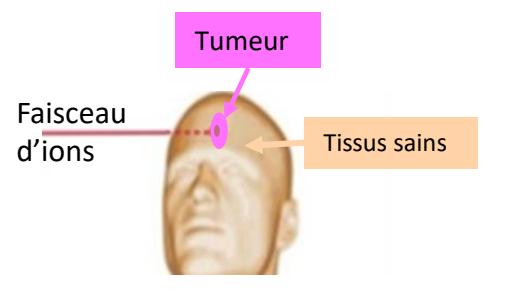
# Sommaire

- 1) Contexte de la thèse et objectifs
- 2) Le diamant en tant que chambre d'ionisation solide pour la détection de particules
- 3) Simulation de détecteurs diamant
- 4) Monitorage faisceau du cyclotron ARRONAX
- 5) Conclusions et perspectives

# Sommaire

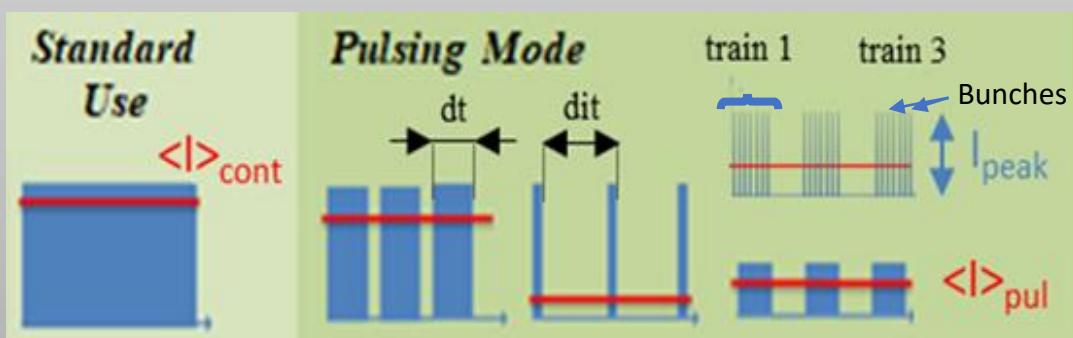
- 1) Contexte de la thèse et objectifs
- 2) Le diamant en tant que chambre d'ionisation solide pour la détection de particules
- 3) Simulation de détecteurs diamant
- 4) Monitorage faisceau du cyclotron ARRONAX
- 5) Conclusions et perspectives

# Monitorage en hadronthérapie et les défis de la FLASH thérapie ?



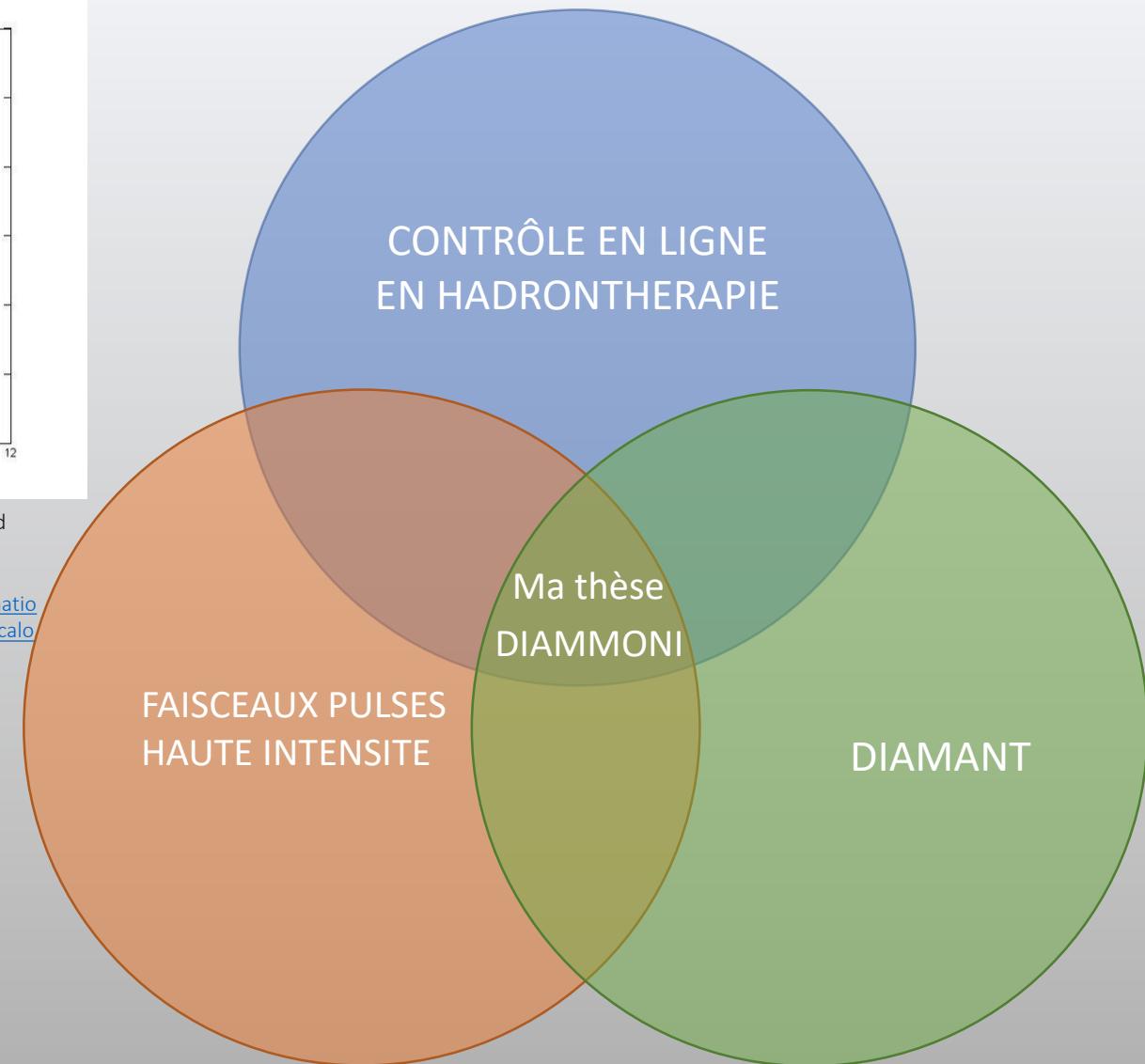
Source : Experimental determination of absorbed dose to water in a scanned proton beam using a water calorimeter and an ionization chamber, S. Gagnebin, 2010. URL :

[https://www.researchgate.net/publication/272623275\\_Experimental\\_determination\\_of\\_absorbed\\_dose\\_to\\_water\\_in\\_a\\_scanned\\_proton\\_beam\\_using\\_a\\_water\\_calorimeter\\_and\\_an\\_ionization\\_chamber](https://www.researchgate.net/publication/272623275_Experimental_determination_of_absorbed_dose_to_water_in_a_scanned_proton_beam_using_a_water_calorimeter_and_an_ionization_chamber)

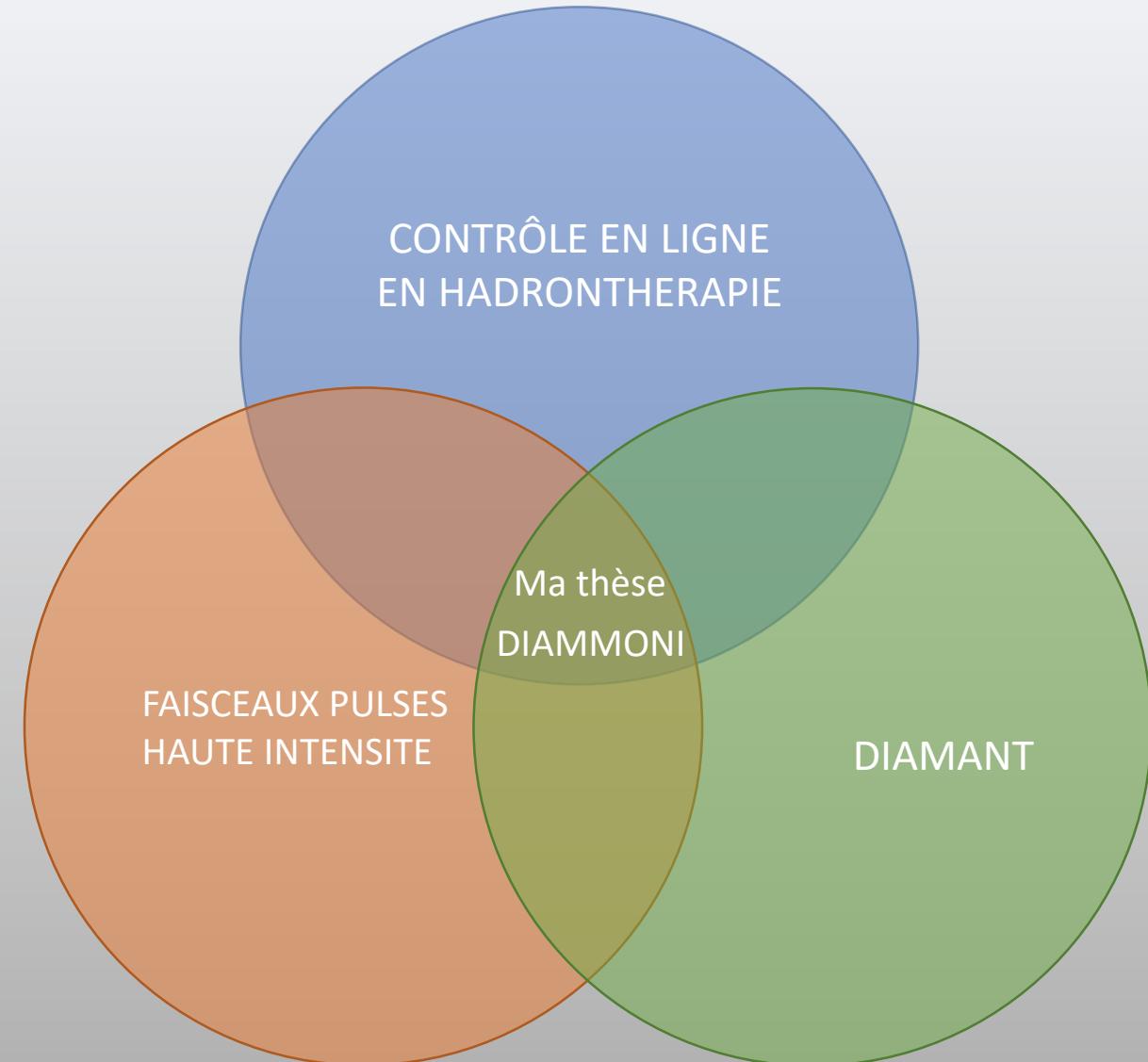
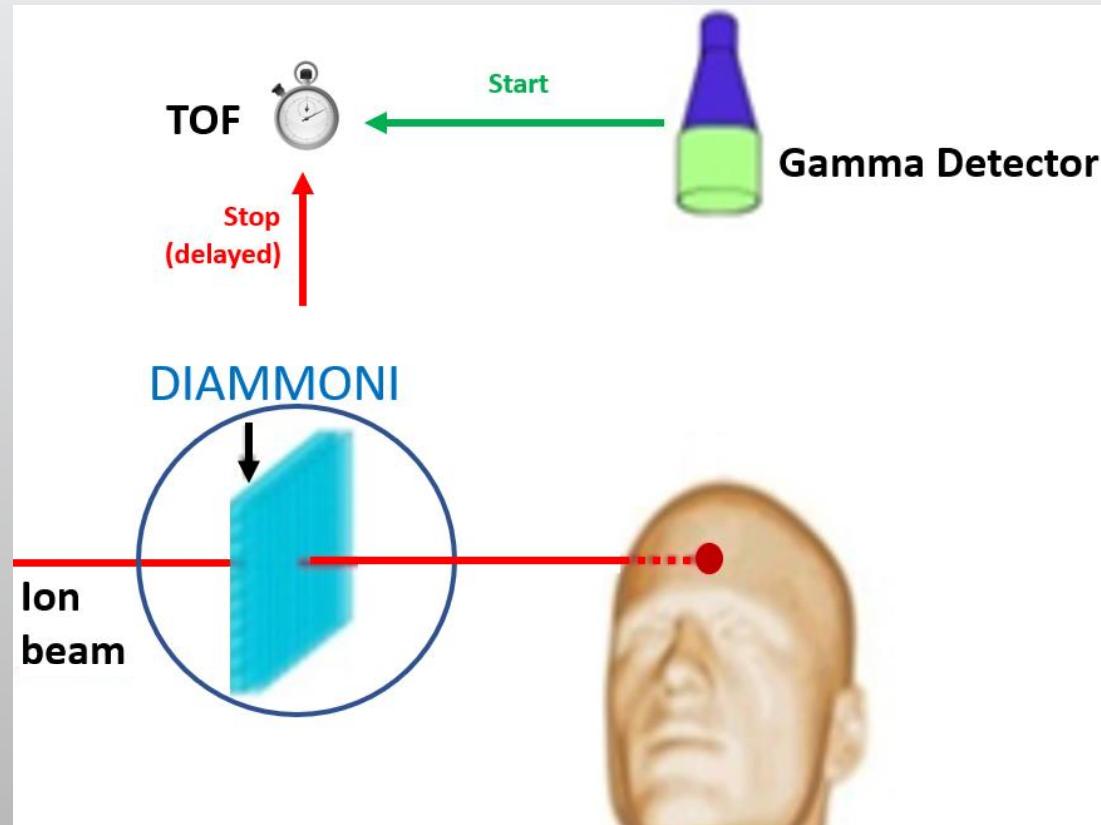


Source: The pulsing chopper-based system of the ARRONAX C70XP Cyclotron, Poirier et al., International Particle Accelerator Conference, 2019. URL

<https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2019-TUPTS008>



# Monitorage en hadronthérapie et les défis de la FLASH thérapie ?



# Les objectifs de la thèse :

- Simulation du transport de charges dans le diamant en fonction du :

➤ Faisceau :

Flux (particule/cm<sup>2</sup>/s)

Fluence (particule/cm<sup>2</sup>)

➤ Diamant :

Propriétés intrinsèques

Piégeage et recombinaison

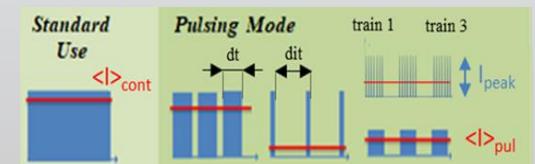
➤ DéTECTEUR :

Électronique de lecture

- Conception du moniteur faisceau avec deux modes de fonctionnement distincts :

➤ mode continu, à faible intensité ⇒ entre 1 et 100 particules par bunch, jusqu'à environ 1 nA sur détecteur → **Bunch Counting**

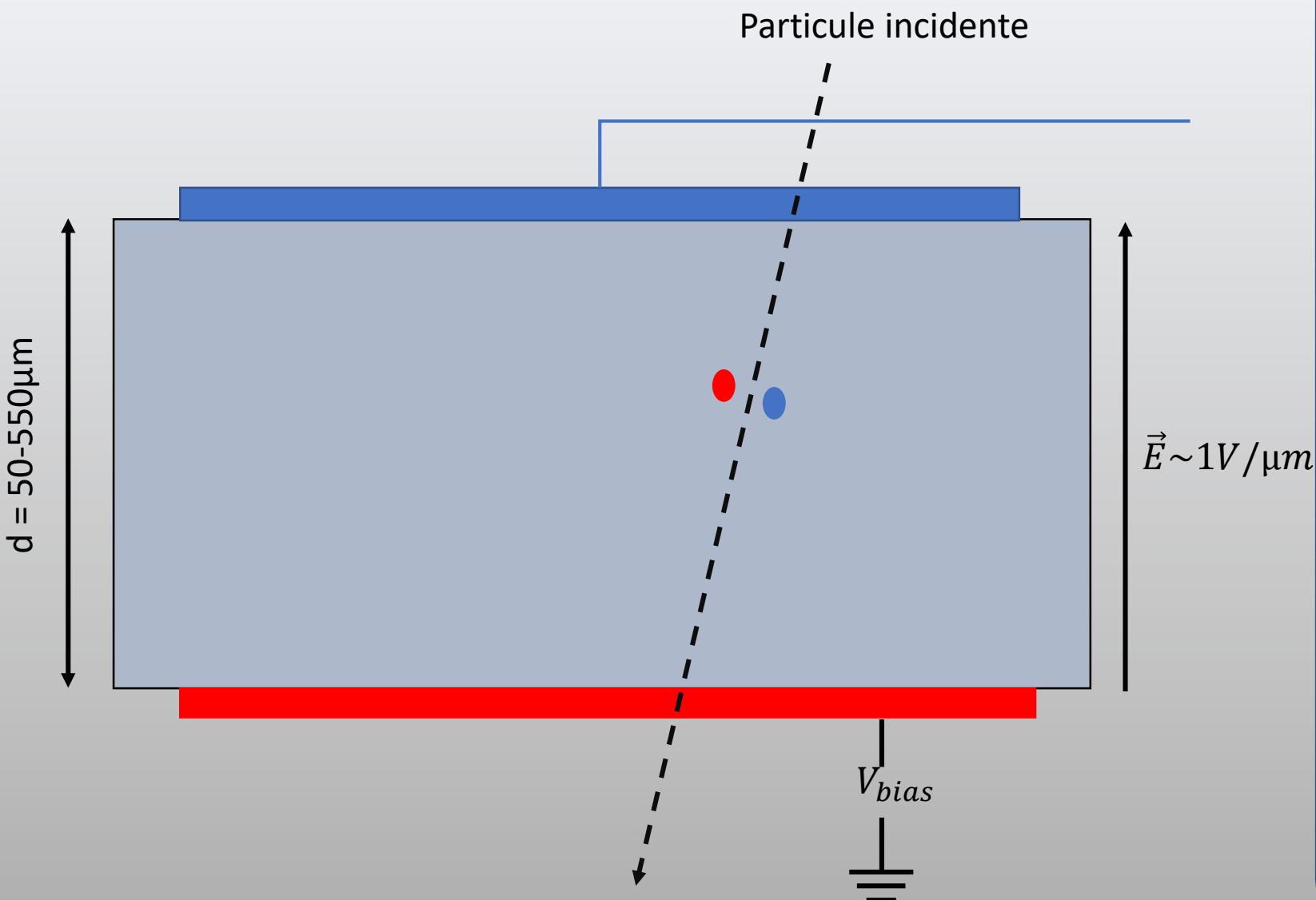
➤ mode pulsé, à haute intensité ⇒ au-delà de 100 particules par bunch, jusqu'à quelques µA sur détecteur ( $10^6$  protons par bunch de 4ns) → **Train Counting**



# Sommaire

- 1) Contexte de la thèse et objectifs
- 2) Le diamant en tant que chambre d'ionisation solide pour la détection de particules
- 3) Simulation de détecteurs diamant
- 4) Monitorage faisceau du cyclotron ARRONAX
- 5) Conclusions et perspectives

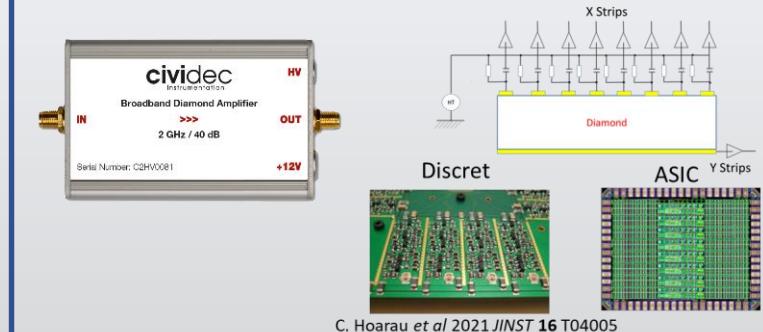
# Le diamant : chambre d'ionisation solide



## Electronique de lecture

- **Préamplificateur de courant**

Read out electronics @ LPSC



C. Hoarau et al 2021 JINST **16** T04005  
<https://doi.org/10.1088/1748-0221/16/04/T04005>  
Front – end electronic developed at laboratory

Bande passante :	2 GHz
Gain :	40 dB
Impédance :	50 Ω
Plage dynamique :	~ +/- 1 V
Alimentation :	12 V / 100 mA

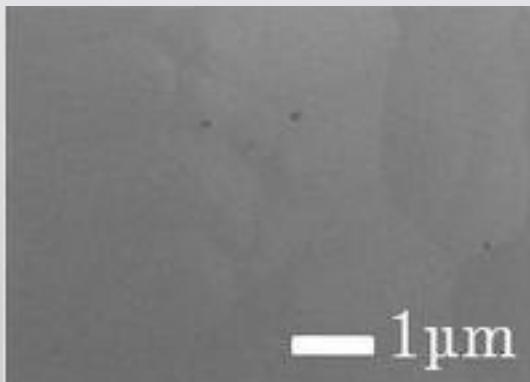
- **Préamplificateur de charge**

Développement en interne au LPSC par le service électronique + QDC (version discrète et ASIC)

# Le diamant : différents types de diamants

CVD : Chemical Vapor Deposition

Monocristallin (sCVD)



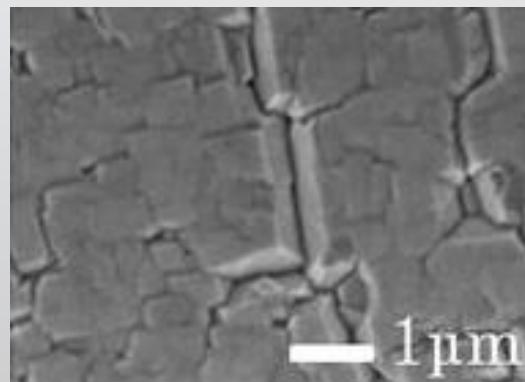
Sans défauts  
Qualité cristalline parfaite  
Qualité du signal



Prix  
Surface maximale ( $5 \times 5 \text{mm}^2$ )



Hétéroépitaxié



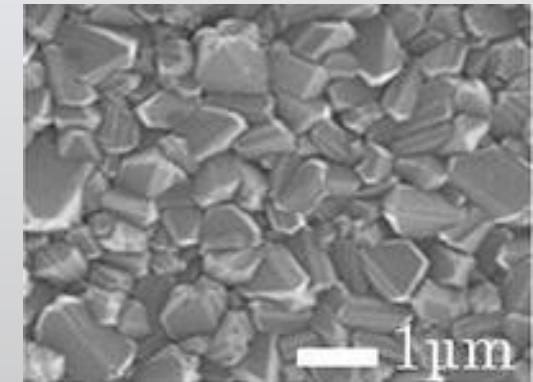
Qualité intermédiaire  
Collecte des charges inhomogène



Prix  
Reproductible



Polycristallin (pCVD)



Plus facile à produire  
Prix  
Surface maximale ( $>1\text{cm}^2$ )



Haute concentration en défauts  
Qualité des signaux



Vaissiere, Nicolas. (2014). Synthesis of high quality diamond film for the dosimeter realization in the radiotherapy domain. URL :  
[https://www.researchgate.net/publication/278645736\\_Synthesis\\_of\\_high\\_quality\\_diamond\\_film\\_for\\_the\\_dosimeter\\_realization\\_in\\_the\\_radiotherapy\\_domain](https://www.researchgate.net/publication/278645736_Synthesis_of_high_quality_diamond_film_for_the_dosimeter_realization_in_the_radiotherapy_domain)

# Sommaire

- 1) Contexte de la thèse et objectifs
- 2) Le diamant en tant que chambre d'ionisation solide pour la détection de particules
- 3) Simulation de détecteurs diamant
- 4) Monitorage faisceau du cyclotron ARRONAX
- 5) Conclusions et perspectives

# Objectifs :

- Simuler la dérive des charges dans le diamant suite à une interaction avec une particule ionisante
- Obtenir le courant mesurable sur les électrodes
- Etude de la dynamique des charges à haut flux

# Développement d'une simulation (avec interface) sur Python 3.9 : PyDiam

Modèle 1D basé sur les équations de dérive-diffusion

- Gestion des paramètres d'intérêt:
  - **Faisceau :**
    - Flux (particule/cm<sup>2</sup>/s)
    - Fluence (particule/cm<sup>2</sup>)
  - **Diamant :**
    - Propriétés intrinsèques
  - **Détecteur :**
    - Electronique de lecture
- Anticipation des signaux attendus expérimentalement
- Gestion des différentes contributions physiques au signal diamant
  - **Dérive**
  - **Piégeage**
  - **Diffusion**
  - **Recombinaison**

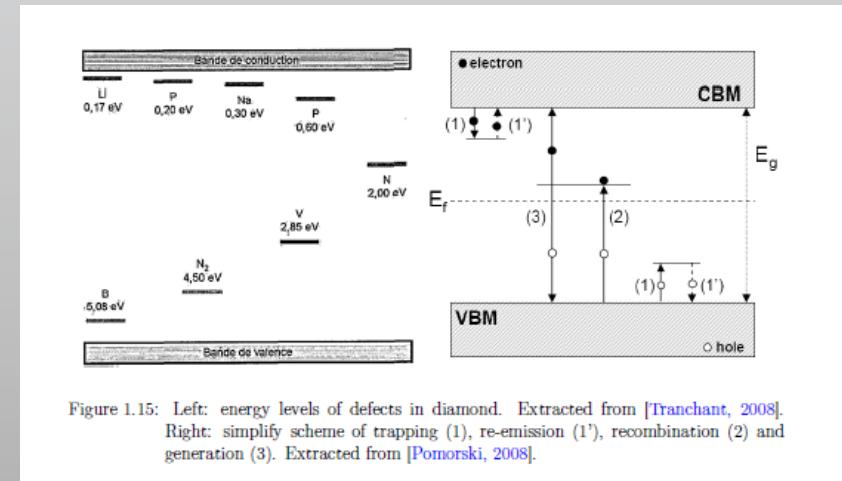


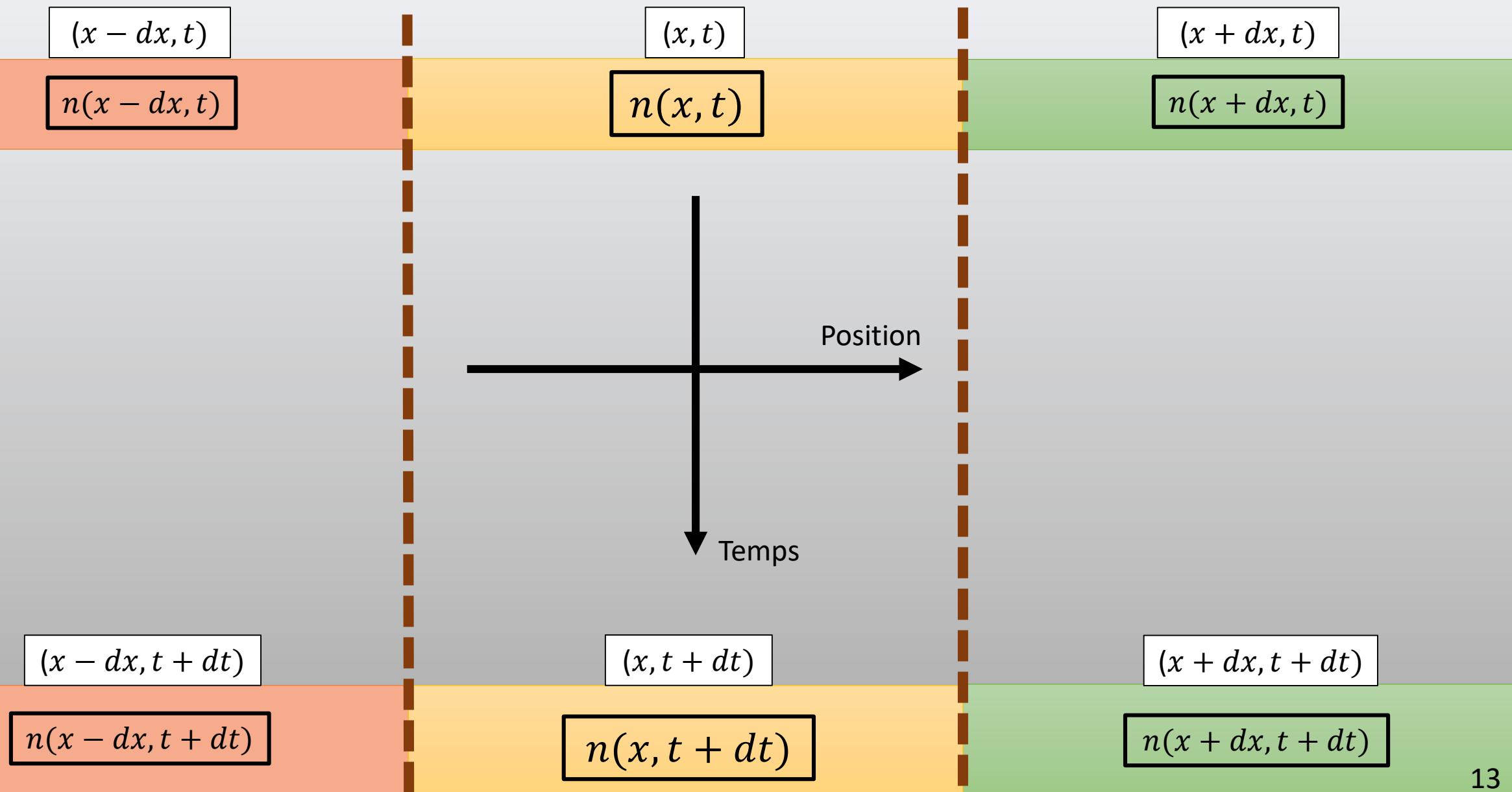
Figure 1.15: Left: energy levels of defects in diamond. Extracted from [Tranchant, 2008]. Right: simplify scheme of trapping (1), re-emission (1'), recombination (2) and generation (3). Extracted from [Pomorski, 2008].

Interface réalisée avec Tkinter pour une utilisation multi-applications

## Explication de l'équation de continuité pour les électrons

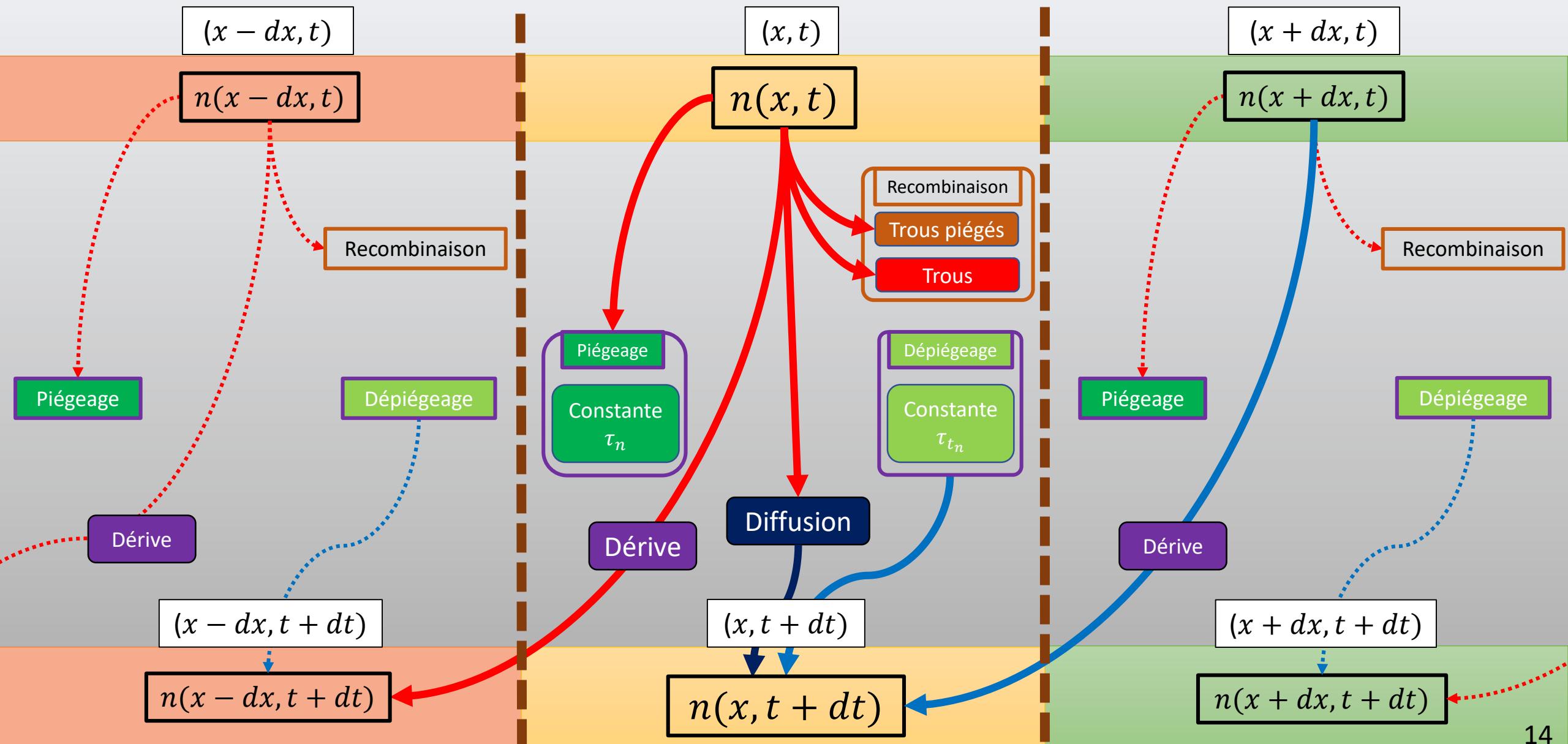
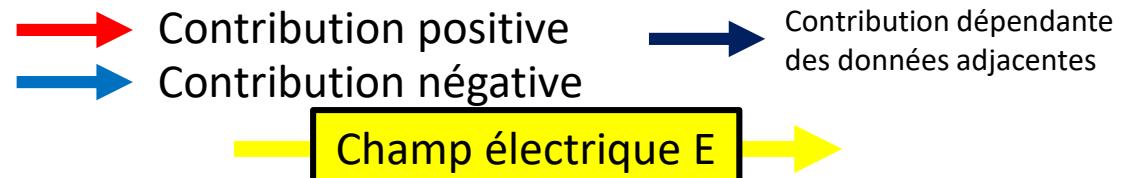
$$\frac{\partial n(x, t)}{\partial t} =$$

→ Contribution positive  
→ Contribution négative  
→ Contribution dépendante des données adjacentes  
→ Champ électrique E



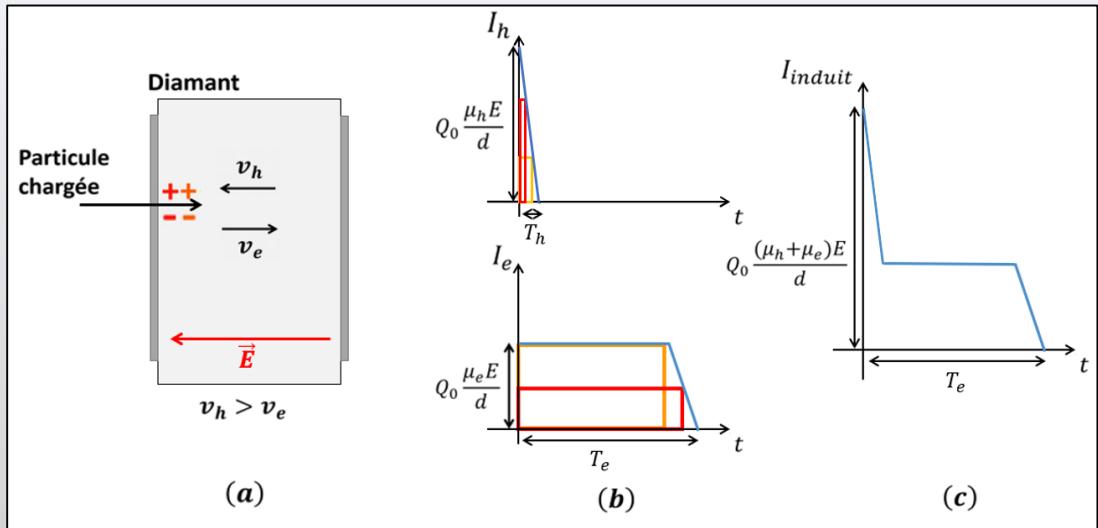
## Explication de l'équation de continuité pour les électrons

$$\frac{\partial n(x, t)}{\partial t} =$$

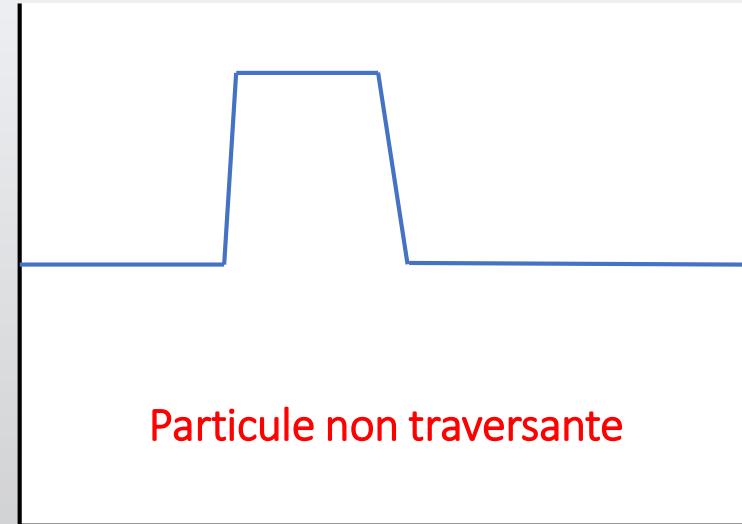


# Les différents types de signaux

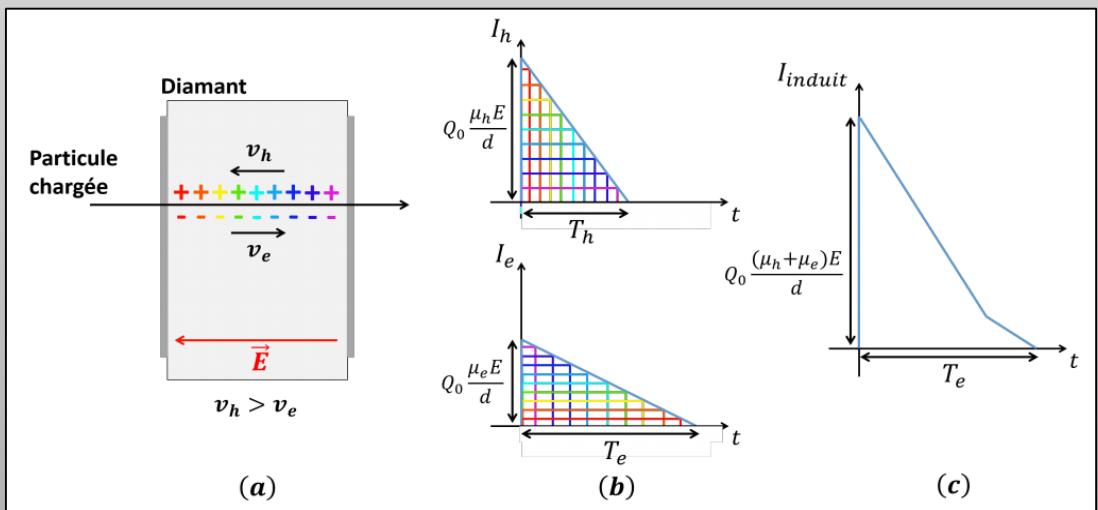
Théorème de Shockley – Ramo :  $i_k = e \times \vec{v}_d \cdot \vec{E}_w^k$



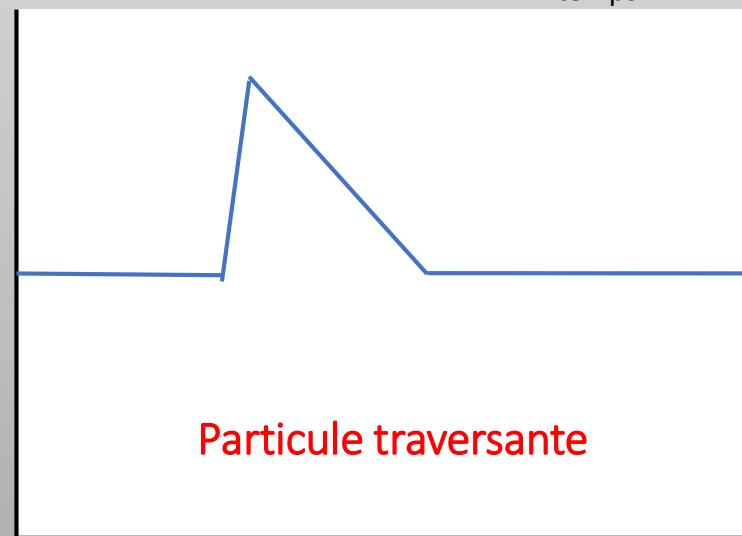
Tension



Particule non traversante

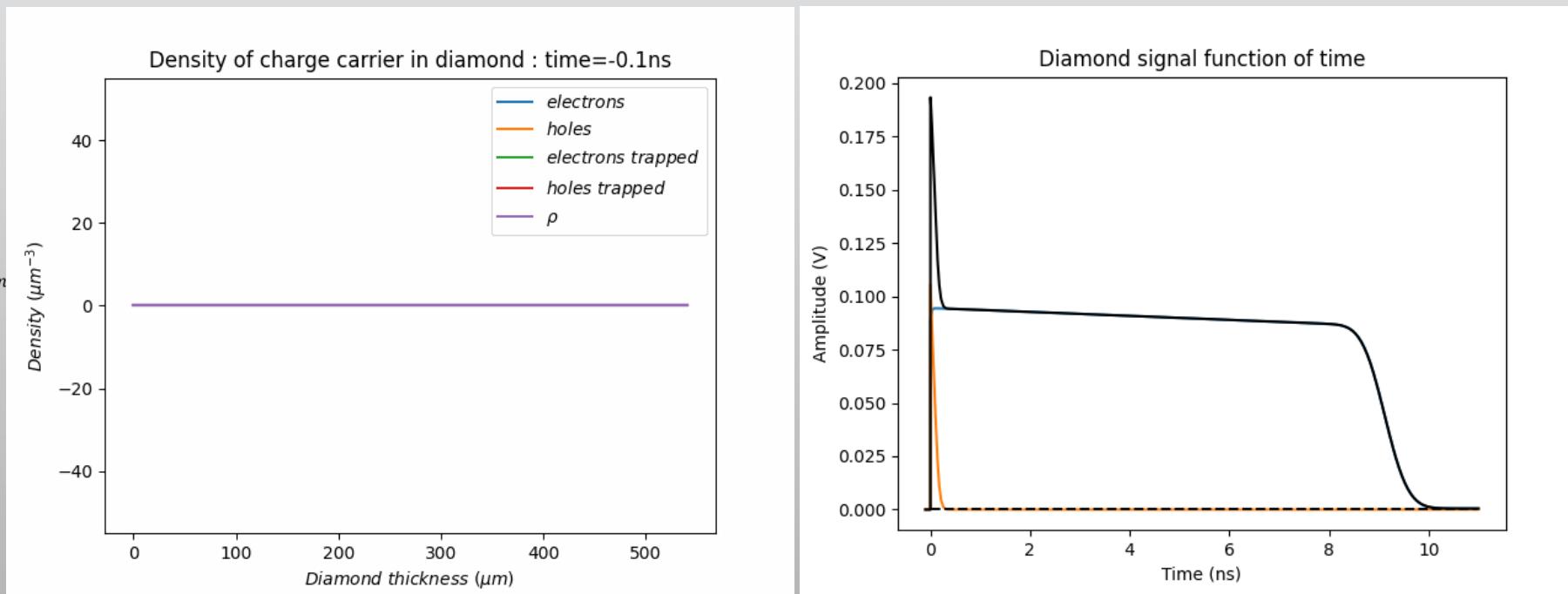
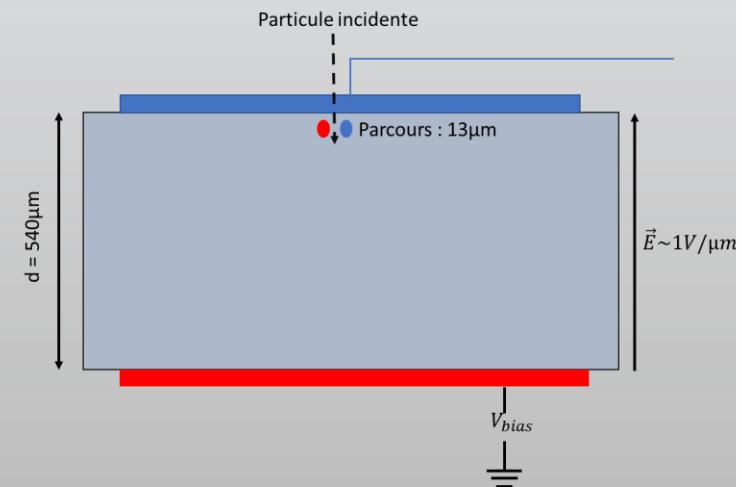
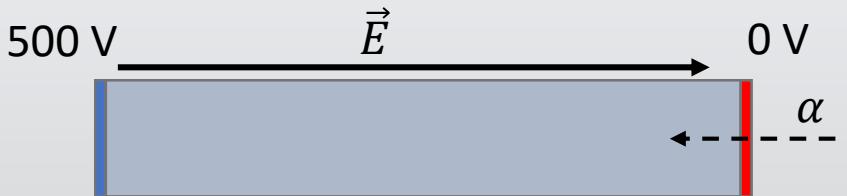


Tension

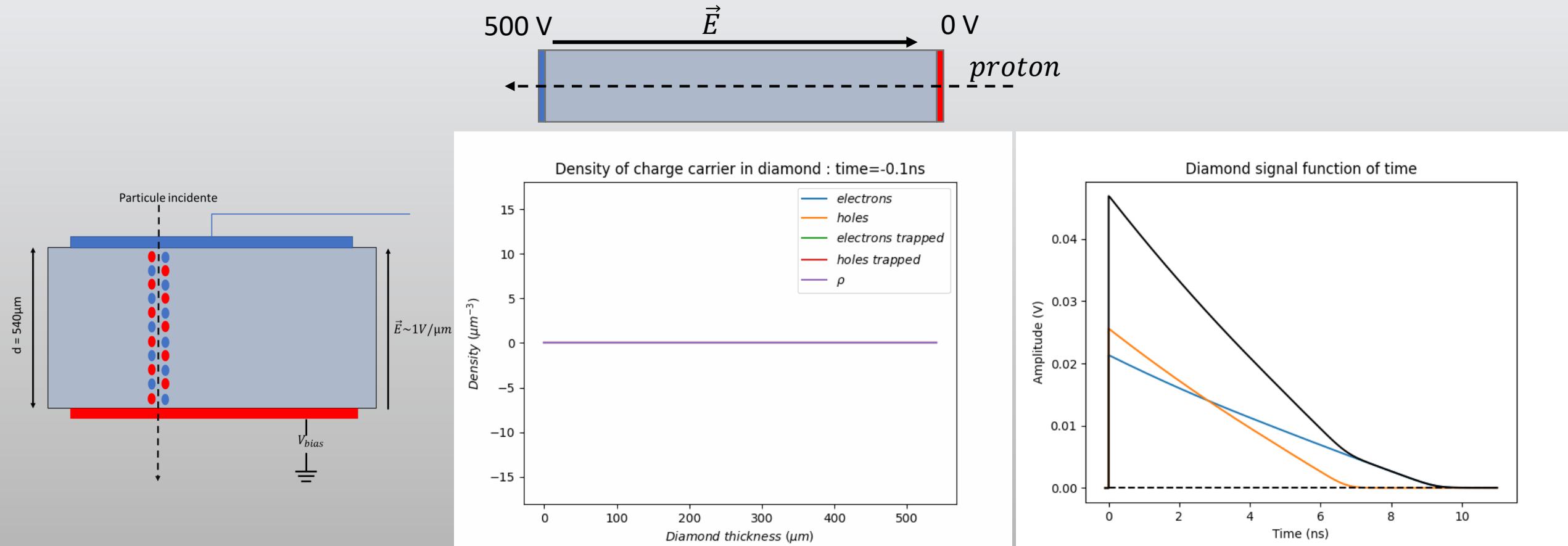


Particule traversante

# Simulation particule non traversante : $\alpha$ de 5,4MeV



# Simulation particule traversante : *proton* de 68MeV



# A très haut flux :

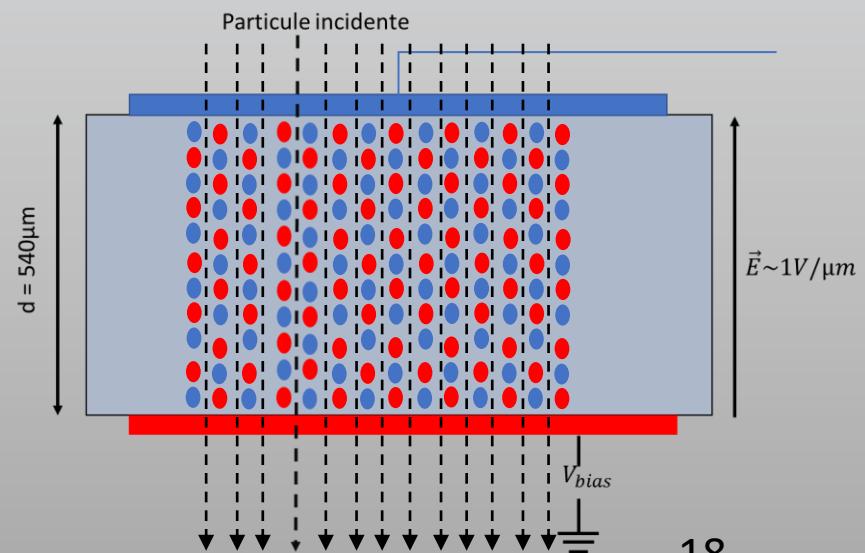
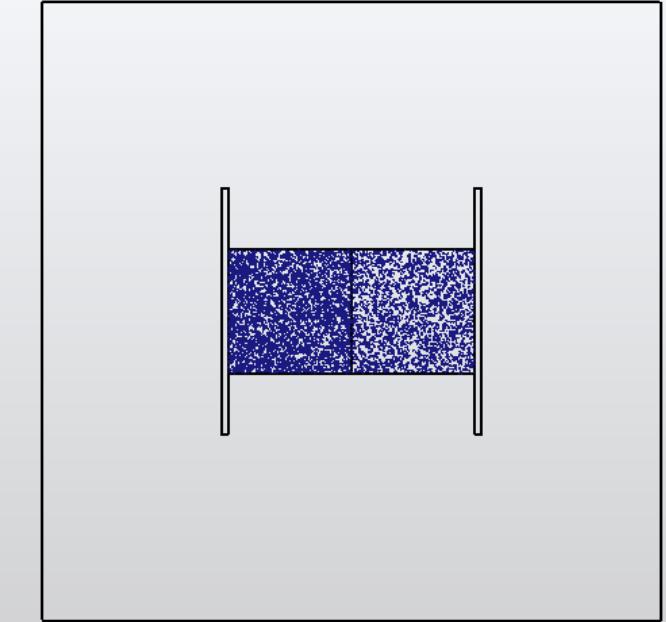
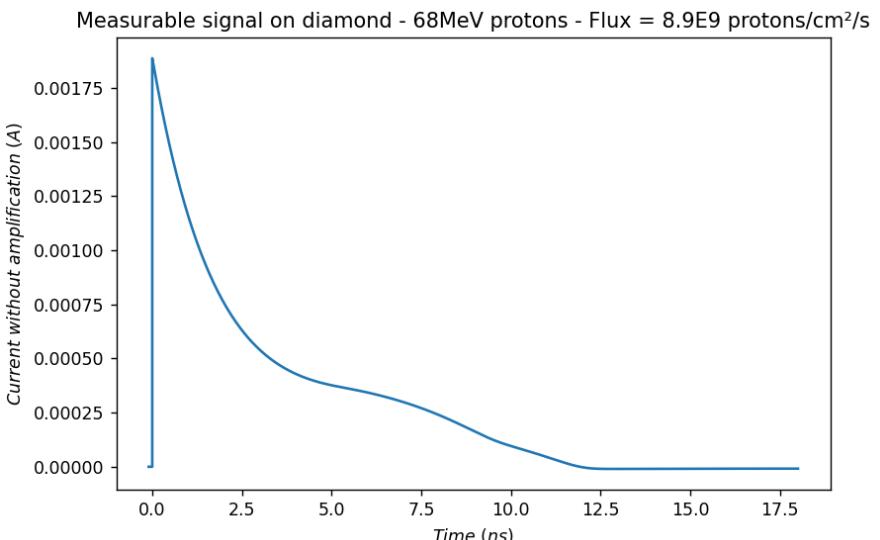
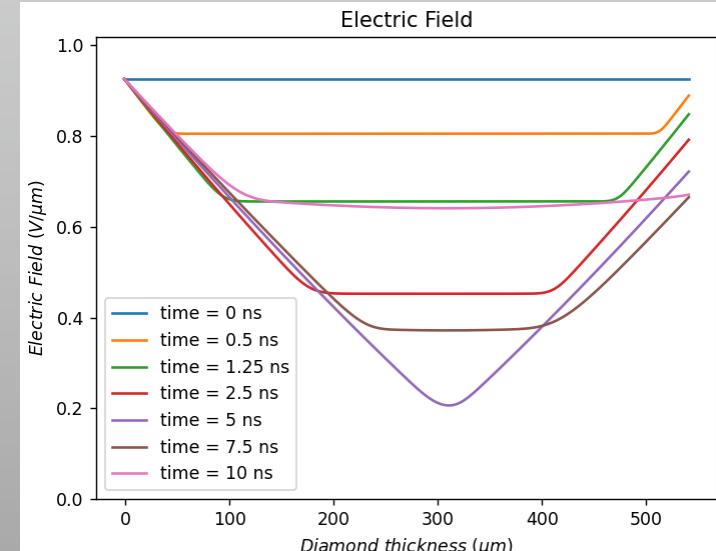
## Simulation Chambre d'ionisation gazeuse

Mouvement des ions positifs, négatifs et des électrons

- oscillations des mouvements liés aux changements de champ électrique
- création d'un champ électrique interne
- écrantage du champ électrique externe
- possibilité de recombinaisons des charges in situ
- Dynamique différente de la basse intensité faisceau



## Simulation PyDiam détecteur diamant



# Etudes futures à mener

Expériences  
sous faisceau

Développements  
électroniques

PyDiam



Études à venir :



Compréhension des effets causés par le  
haut flux du faisceau  
Développement d'un modèle 1D



Optimisation de la  
géométrie du détecteur



Modélisation de la collection de charges à haute et basse intensité  
sur le moniteur de faisceau

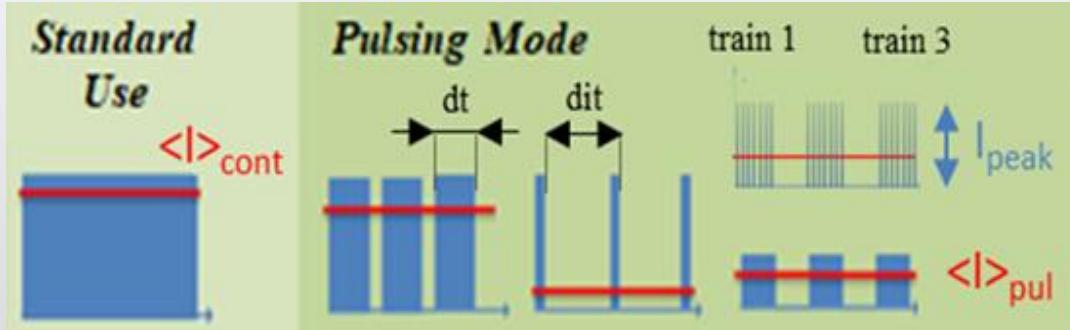


Moniteur de faisceau DIAMMONI

# Sommaire

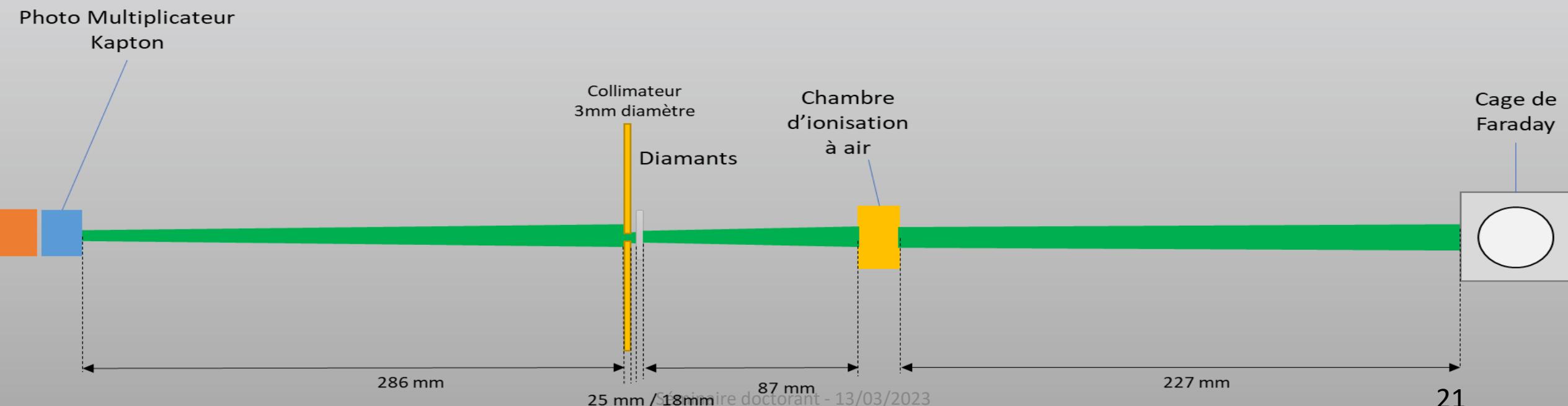
- 1) Contexte de la thèse et objectifs
- 2) Le diamant en tant que chambre d'ionisation solide pour la détection de particules
- 3) Simulation de détecteurs diamant
- 4) Monitorage faisceau du cyclotron ARRONAX
- 5) Conclusions et perspectives

# Tests sous faisceaux pulsés à ARRONAX



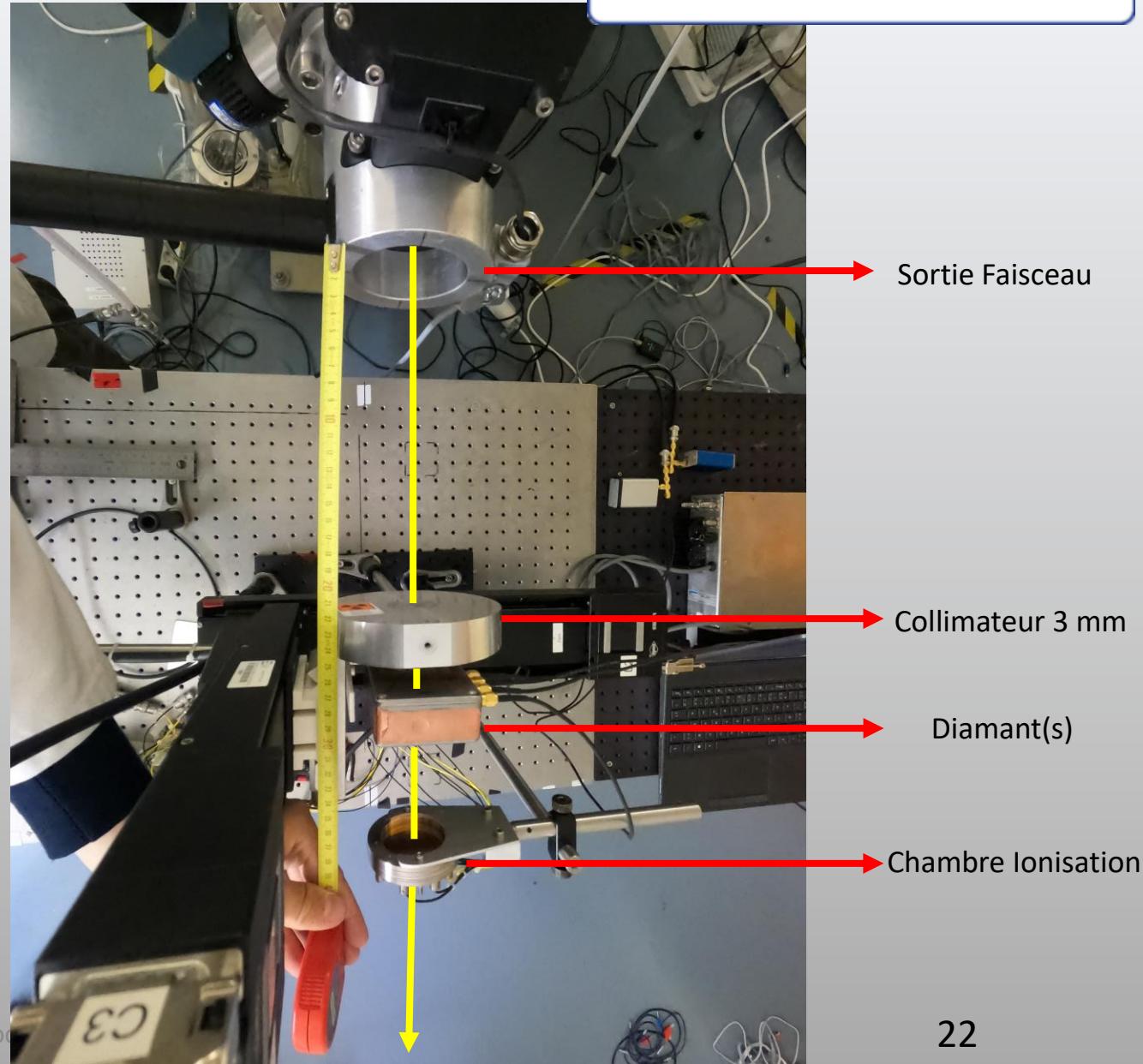
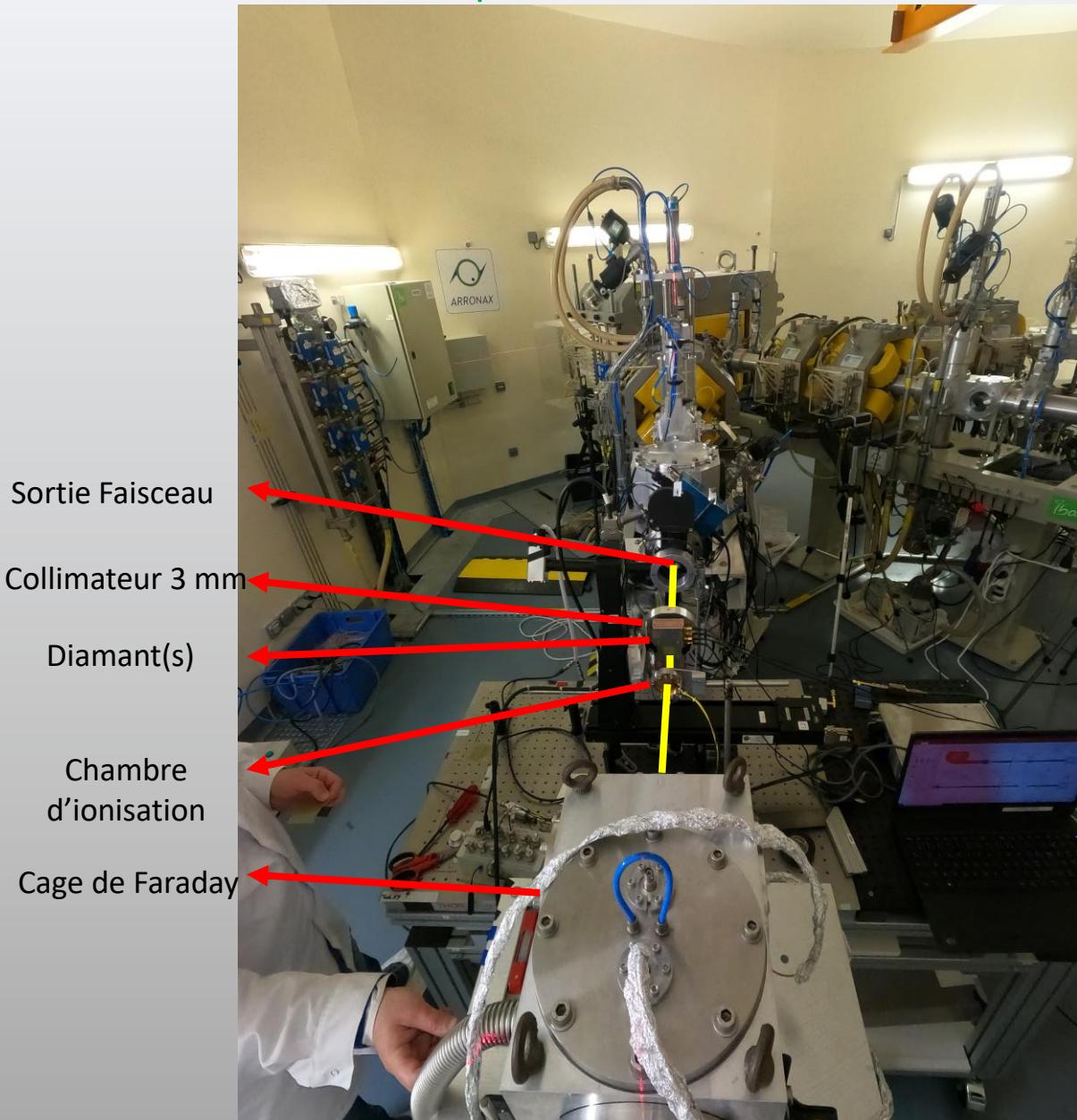
Cyclotron d'Arronax :  
35-70 MeV protons & alphas  
Jusqu'à 20 $\mu$ A protons en sortie de faisceau  
Gestion de la macrostructure du faisceau

Source: The pulsing chopper-based system of the ARRONAX C70XP  
Cyclotron, Poirier et al., International Particle Accelerator Conference, 2019. URL  
<https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2019-TUPT008>



# Tests sous faisceaux pulsés

Particules traversantes – proton 68MeV



# Etude de la linéarité de la réponse du diamant

## La problématique :

Grand nombre de charges à faire dériver à haute intensité faisceau sur diamant car un grand nombre de protons vont impacter le détecteur

## Les conséquences :

Si recombinaisons

⇒ la charge collectée ne correspond plus à la charge injectée

⇒ Perte de linéarité

⇒ Effet cumulatif sur le diamant : quel est l'impact de l'endommagement des diamants sur la réponse du détecteur ?

## Les études à mener :

Réponse du diamant en fonction de l'intensité faisceau

Réponse du diamant en fonction des paramètres intrinsèques au diamant (qualité cristalline, épaisseur, ...)

Endommagement ?

# Etude de la linéarité de la réponse du diamant

## La problématique :

Grand nombre de charges à faire dériver à haute intensité faisceau sur diamant car un grand nombre de protons vont impacter le détecteur

## Les conséquences :

Si recombinaisons

⇒ la charge collectée ne correspond plus à la charge injectée

⇒ Perte de linéarité

⇒ Effet cumulatif sur le diamant : quel est l'impact de l'endommagement des diamants sur la réponse du détecteur ?

## Les études à mener :

Réponse du diamant en fonction de l'intensité faisceau

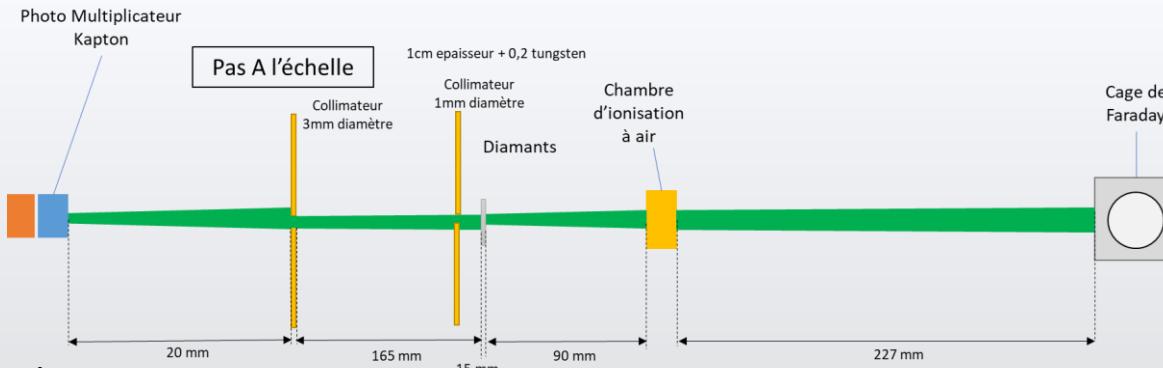
Réponse du diamant en fonction des paramètres intrinsèques au diamant (qualité cristalline, épaisseur, ...)

Endommagement ?

# Irradiation à haut flux

Principe :

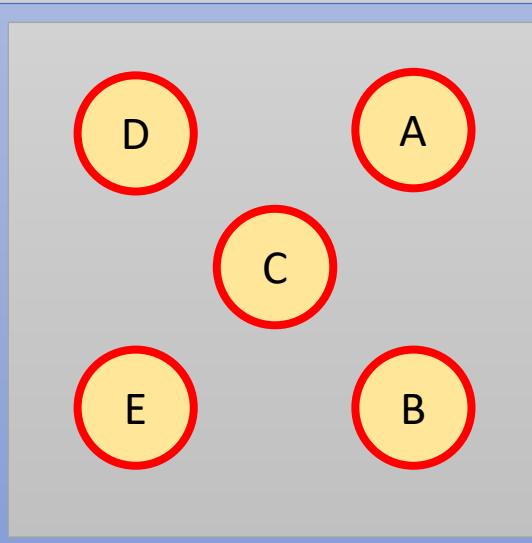
- 1 diamant monocristallin (sCVD, 550µm)
- Irradiation par des  $\alpha$  de 64 MeV
- 5 points disjoints à différentes intensités de faisceau (i.e. flux)
- Irradiation par des trains de 100µs en pulsés
- Chacun des points reçoit à la fin de la manip au cumulé  $7 \cdot 10^{14} \alpha/cm^2$  en fluence
- Acquisition tous les 10èmes de la fluence totale



Flux  $\varphi$

$\times 2$  Point A :  $1,63 \cdot 10^{13} \alpha/cm^2/s$   
 $\times 2,9$  Point B :  $8,28 \cdot 10^{12} \alpha/cm^2/s$   
 $\times 3,6$  Point C :  $2,86 \cdot 10^{12} \alpha/cm^2/s$   
 $\times 2,85$  Point D :  $7,96 \cdot 10^{11} \alpha/cm^2/s$   
 Point E :  $2,73 \cdot 10^{11} \alpha/cm^2/s$

$$\varphi_A \sim 2\varphi_B \sim 6\varphi_C \sim 20\varphi_D \sim 60\varphi_E$$

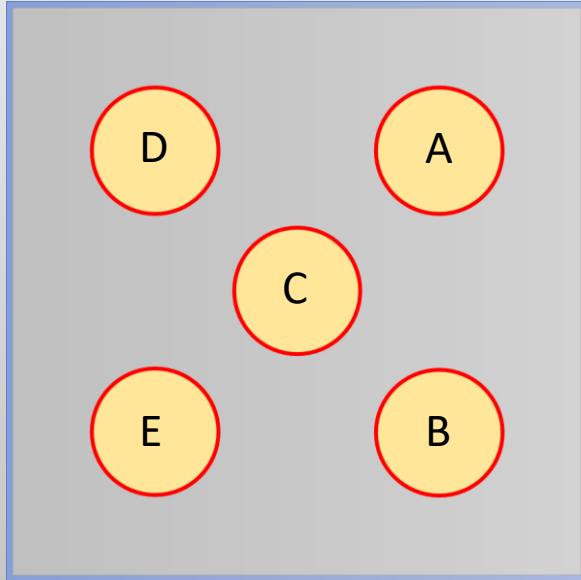


Fluence  $\Phi$

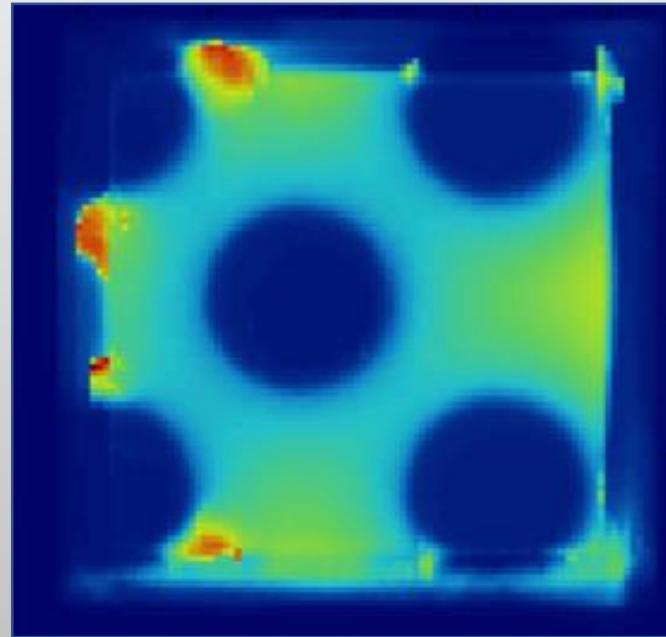
$\sim 1$  Point A :  $7,07 \cdot 10^{14} \alpha/cm^2$   
 $\sim 1$  Point B :  $7,20 \cdot 10^{14} \alpha/cm^2$   
 $\sim 1$  Point C :  $7,08 \cdot 10^{14} \alpha/cm^2$   
 $\sim 1$  Point D :  $5,90 \cdot 10^{14} \alpha/cm^2$   
 $\sim 1$  Point E :  $5,90 \cdot 10^{14} \alpha/cm^2$

$$\Phi_A \sim \Phi_B \sim \Phi_C \sim \Phi_D \sim \Phi_E$$

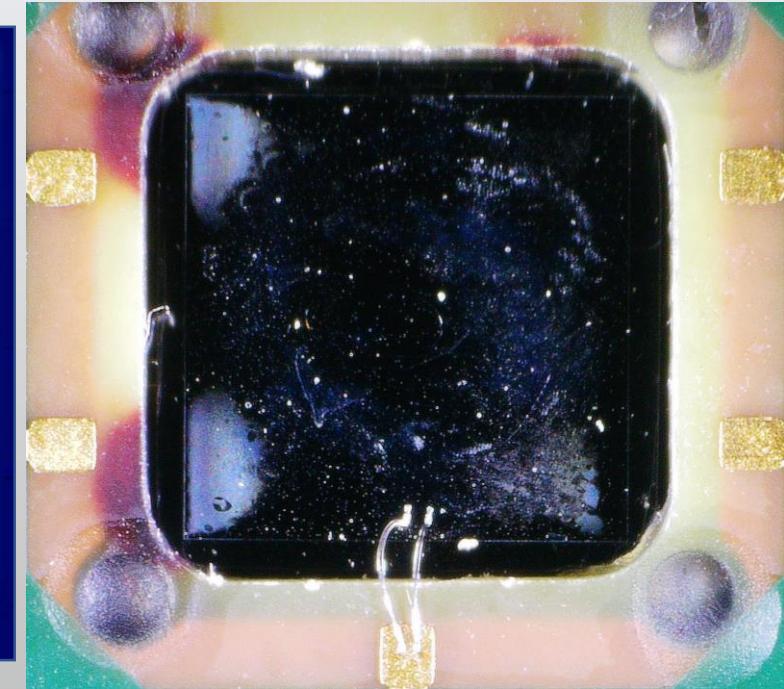
# Etat du diamant après irradiation



Objectif de ciblage

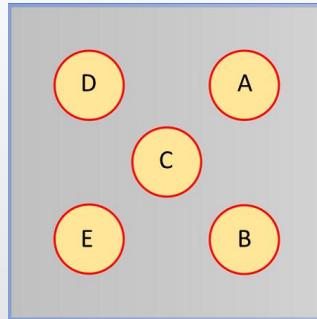


Cartographie XBIC à l'ESRF  
*En bleu les zones de moindre efficacité de collection de charges*

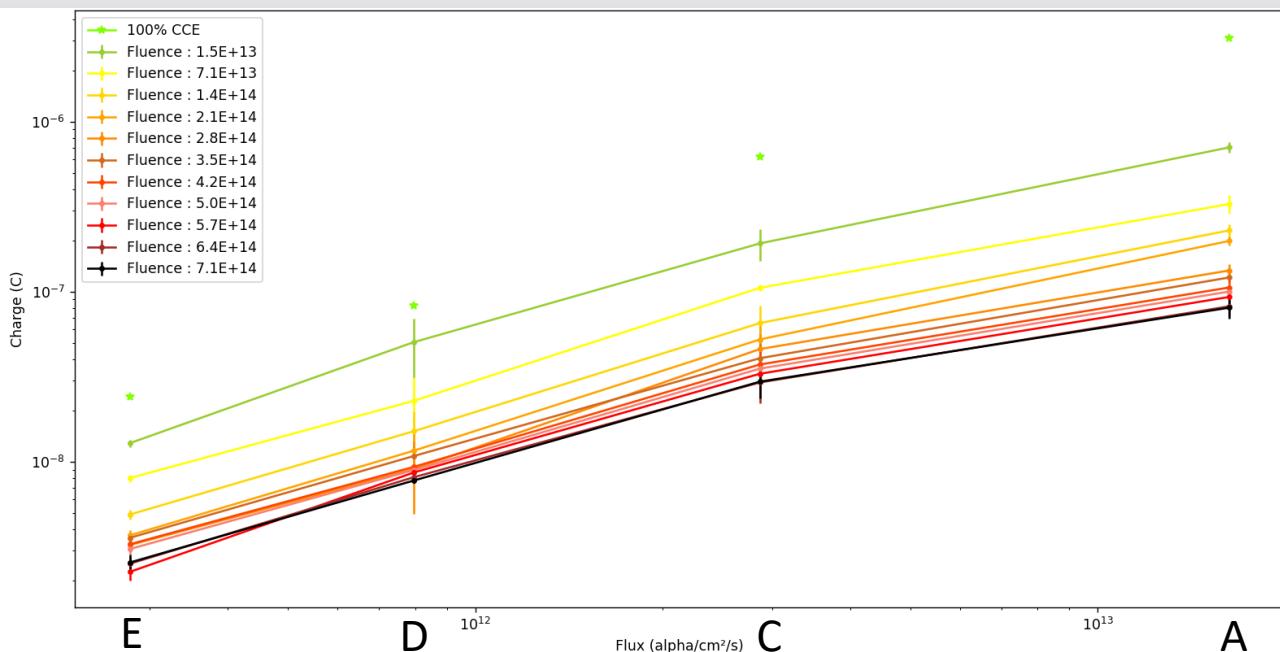


Photographie à la binoculaire de la face de sortie du diamant

# Résultats :



Charge mesurée par train de 100μs, fonction du flux et de la fluence



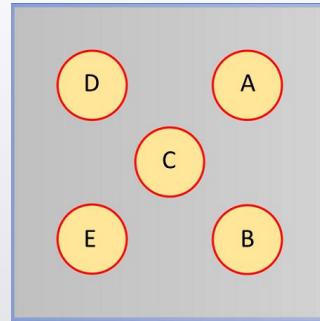
Expérience réalisée avec une particule  $\alpha$  de 64 MeV. La charge a ensuite pu être mesurée sur les points d'irradiation.

Les flux étudiés correspondent à des débits de dose allant jusqu'à 350 kGy/s (Objectif CAL FLASH sur Médicyc : 300Gy/s).

Les résultats au point B n'ont pas pu être exploités dans l'analyse.

La collecte des charges est linéaire sur la portion E-D-C, mais un phénomène de saturation semble émerger au-delà de C.

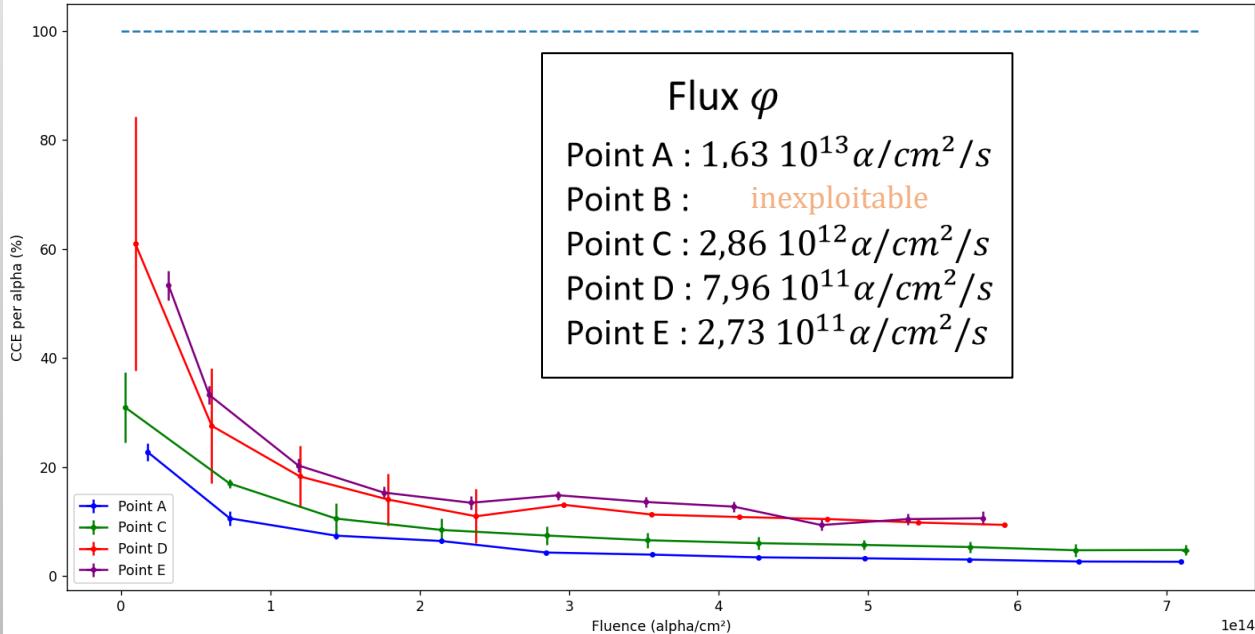
# Résultats :



## Charge normalisée par alpha

CCE : Charge Collection Efficiency

CCE per alpha, function of flux and fluence



Impact du flux sur l'efficacité de collecte de charge

- Avec l'augmentation du flux, la collecte de charge diminue.
- La fluence crée des endommagements dans le détecteur. Cela se traduit par l'apparition de pièges qui viennent perturber la collecte de charges.

Phénomène possiblement réversible : annealing ?

# Etudes futures à mener

Les défauts par faisceau d'ions dans une chambre d'ionisation solide sont inévitables

Études à venir :

Réponse du diamant en fonction de l'intensité et de la qualité cristalline  
@ARRONAX

Défauts créés dans le diamant suite à l'irradiation  
Cartographie de la réponse  
eBIC@Néel / XBIC@ESRF BM05  
Map2D réponse en courant des zones irradiées + étude systématique en fonction de la polarisation

Connaissance de la réponse du diamant en fonction du vieillissement

Moniteur de faisceau DIAMMONI

Développements électroniques

Simulation de détecteurs sous faisceau

# Sommaire

- 1) Contexte de la thèse et objectifs
- 2) Le diamant en tant que chambre d'ionisation solide pour la détection de particules
- 3) Simulation de détecteurs diamant
- 4) Monitorage faisceau du cyclotron ARRONAX
- 5) Conclusions et perspectives

# Conclusions et Perspectives

## Simulation - Modélisation

- Comprendre la dérive des charges à haute intensité
  - Effets liés au nombre de charges créées dans le diamant
  - Etendre les facultés du code PyDiam en le rendant plus ergonomique

## Expériences (tests à venir : faisceau de protons pulsés à ARRONAX au printemps)

- Etude de la linéarité de la réponse du diamant, et de l'endommagement des diamants avec la fluence sous protons

## Instrumentation détecteur

- Intégration diamant sur PCB
- Développements électroniques : tests en laboratoire
- Intégration sur la ligne

# BACK UP Slides

### Énoncé du théorème de Shockley-Ramo :

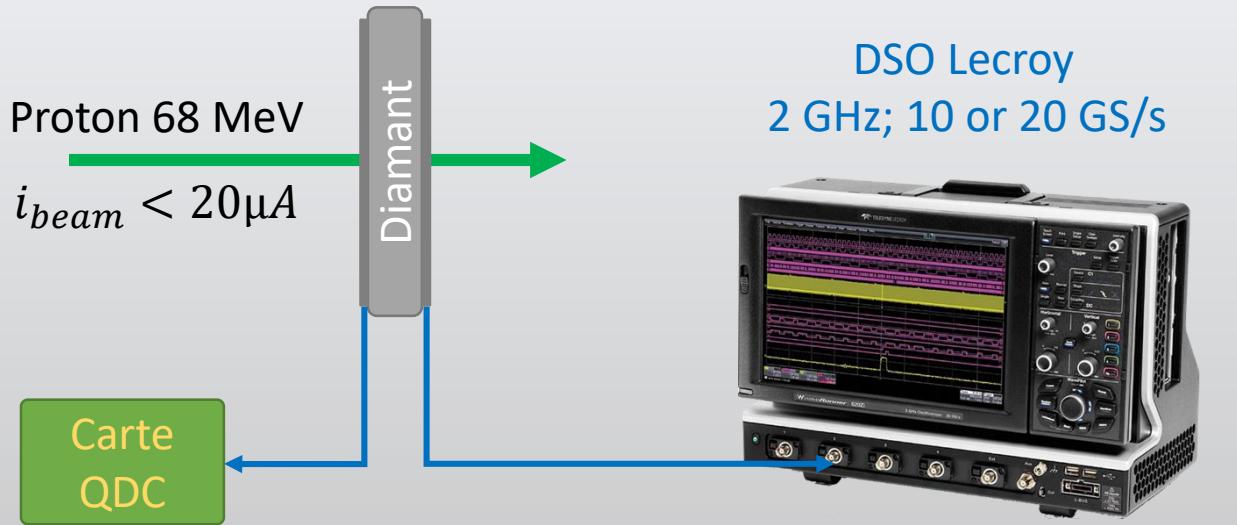
Un électron entre des électrodes polarisées (à la masse, ou non) va générer un courant induit sur chaque électrode suivant la formule :

$$i_k = e \times \overrightarrow{v_d} \cdot \overrightarrow{E_w^k}$$

Avec :

- $i_k$  : le courant induit sur l'électrode k
- $e$  : la charge de l'électron
- $\overrightarrow{v_d}$  : vitesse de drift de l'électron
- $\overrightarrow{E_w^k}$  : le weighting field (associé à l'électrode k)

# Train Counting Mode

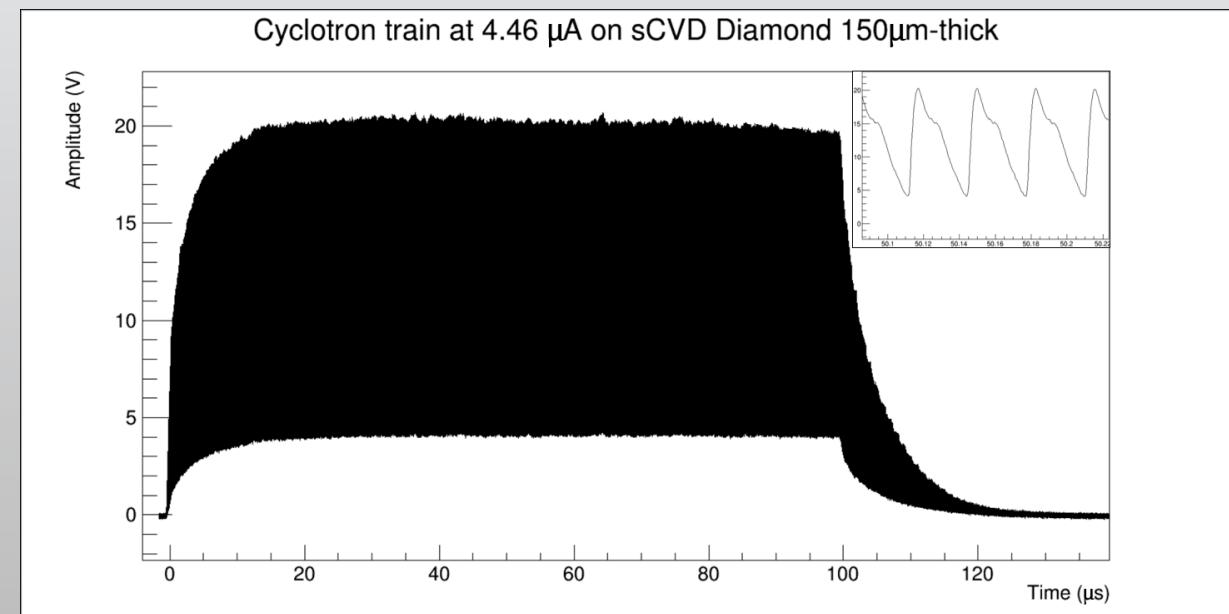


**Objectifs :**  
Compter le nombre d'ions par train de quelques  $\mu s$   
⇒ 5 $\mu A$  déjà atteints sur détecteur

**Electronique validée**

DSO Lecroy  
2 GHz; 10 or 20 GS/s

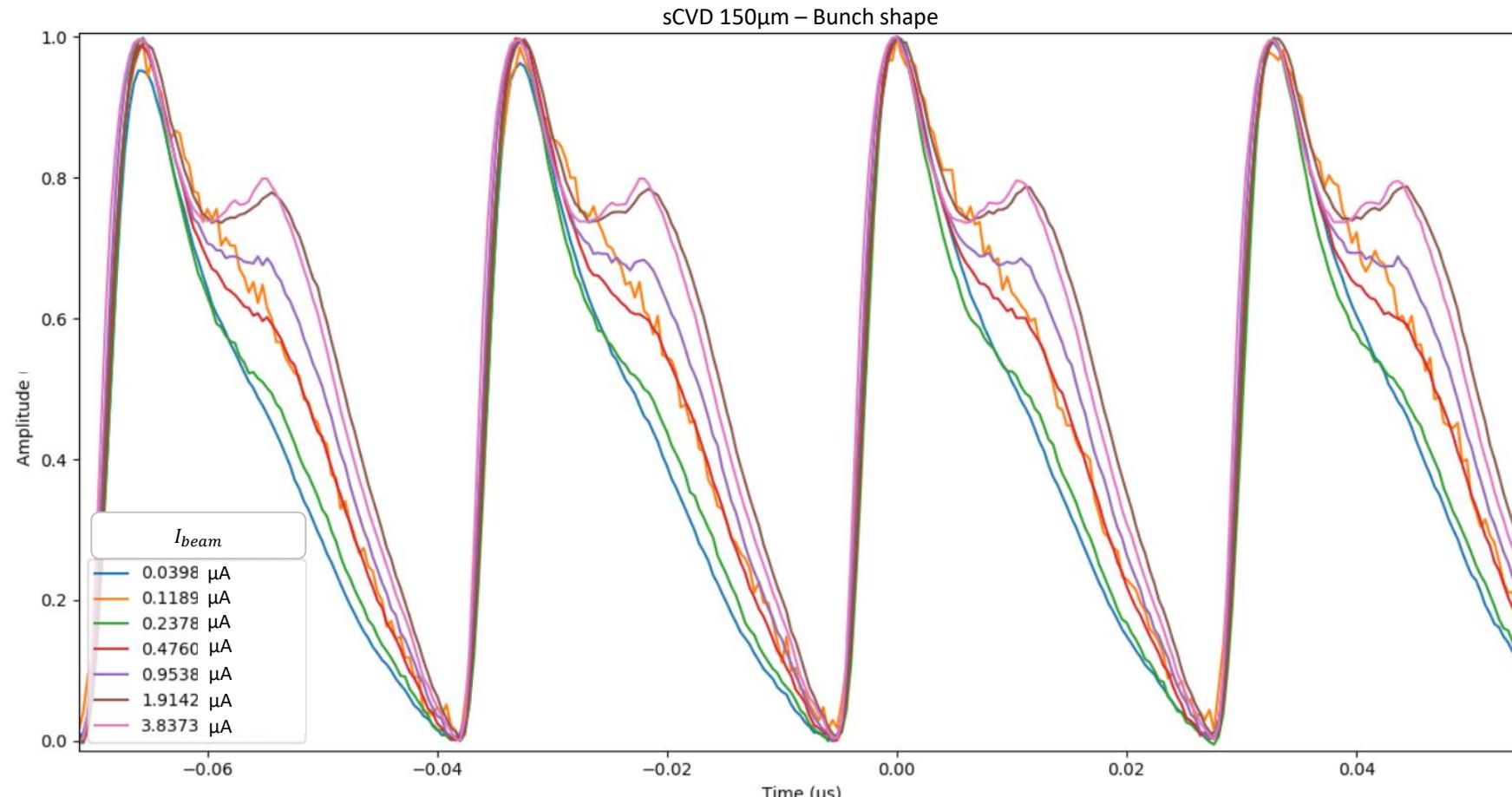
Train de 100  $\mu s$  à 4,46 $\mu A$  sur diamant



# Tests sous faisceaux pulsés à ARRONAX

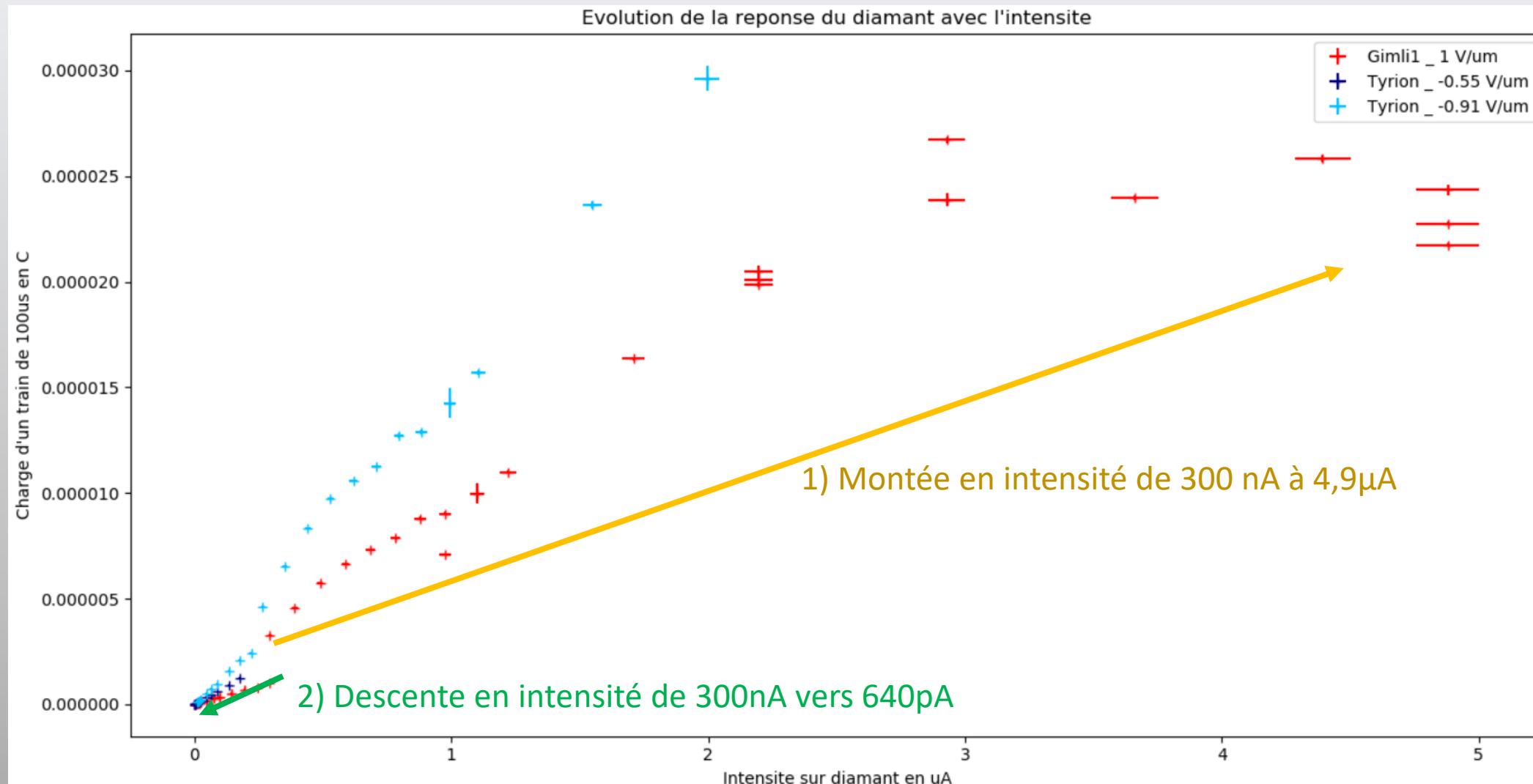
## Etude de la forme des signaux en intensité

Forme des bunch : sCVD 150 $\mu$ m – normalisé à 0 au minimum et maximum à 1



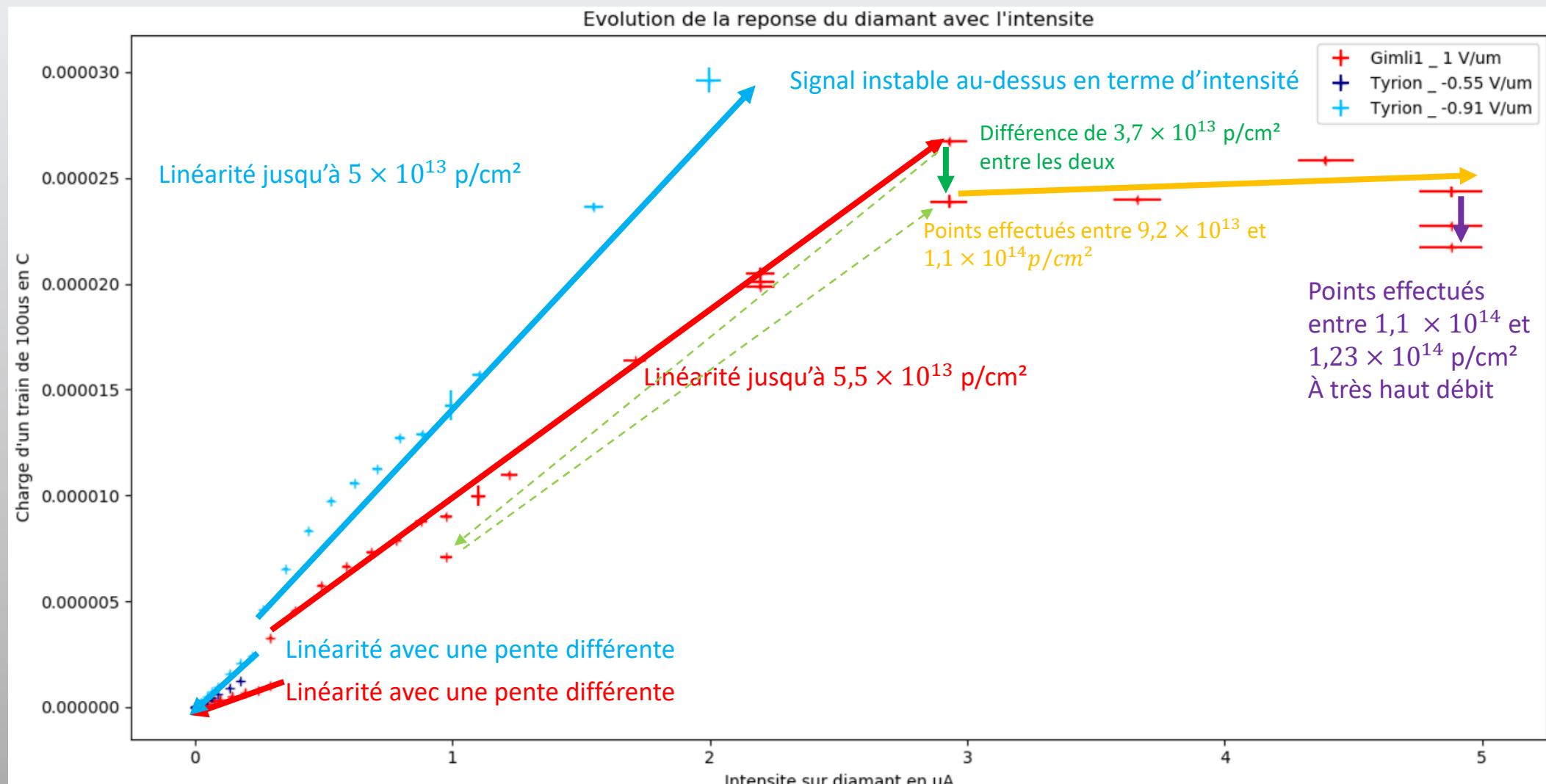
# Tests sous faisceaux pulsés à ARRONAX

## Charge des trains en fonction de l'intensité faisceau



# Tests sous faisceaux pulsés à ARRONAX

## Charge des trains en fonction de l'intensité faisceau



# Tests sous faisceaux pulsés à ARRONAX

## Effet de la fluence sur la réponse du diamant

