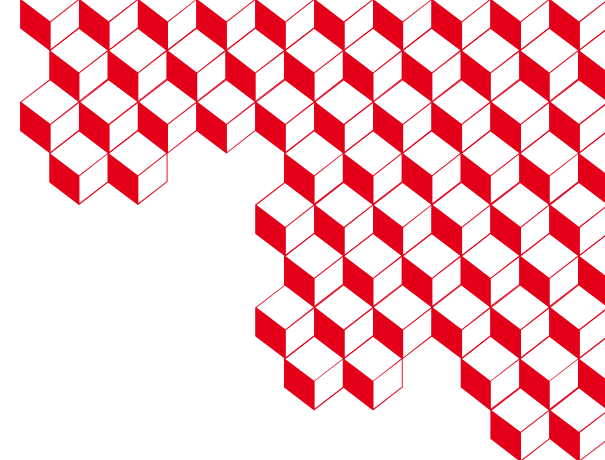




irfu



leti



Modélisation GEANT4 des nuages de charges induit par des rayons X pour la mesure haute précision de la PSF au niveau sous-pixel dans les détecteurs infrarouges

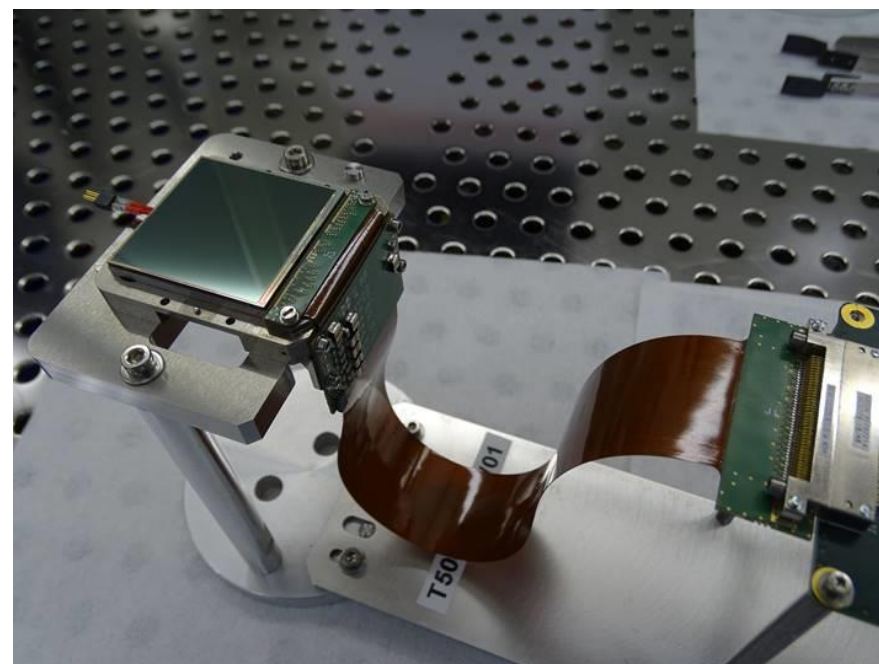
DELILLE Nolane

1^{ère} année

Direction : Olivier Gravrand (CEA Leti)

Encadrement : Thibault Pichon (CEA IRFU), Nicolas Baier (CEA Leti),
Clémentine Durnez (CNES), Thibaud Friess (CNES)

Financement



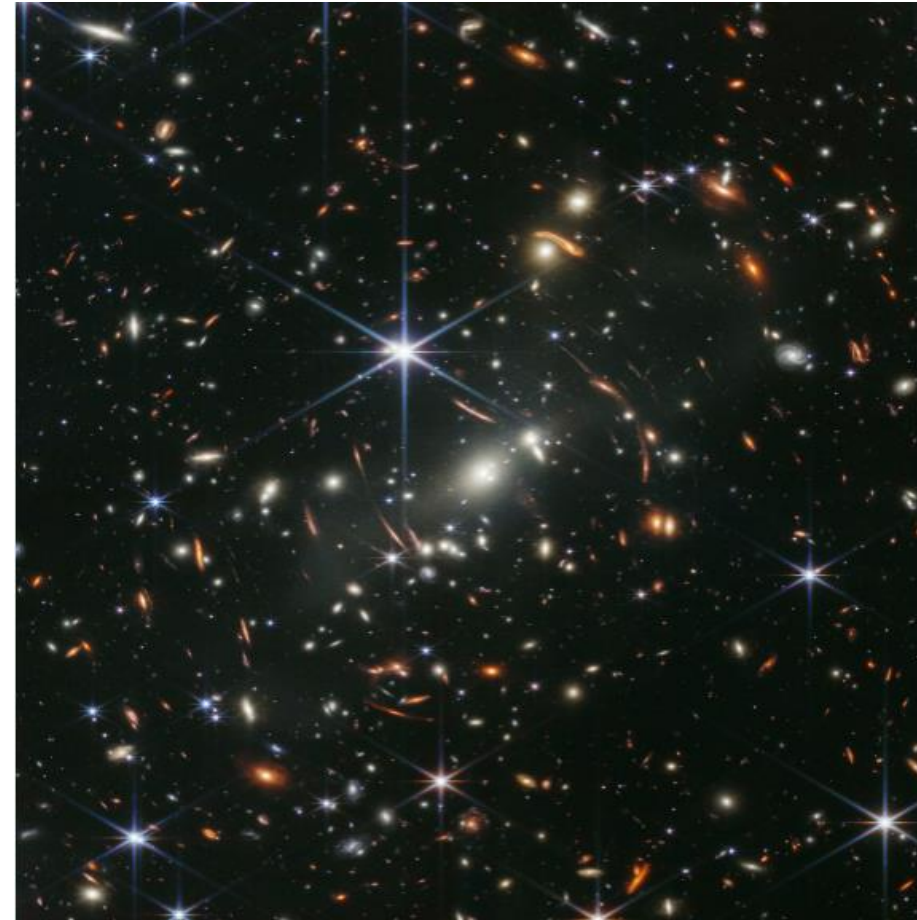
Détecteur ALFA



Sommaire

- I. Introduction
- II. L'idée de la thèse : les photons X
- III. Simulations
- IV. Conclusion et perspectives de simulations
- V. Perspectives expérimentales

Deep Field, JWST





I. Introduction

1. Détecteurs infrarouge

Performances typiques d'un **détecteur infrarouge destiné à l'astrophysique**

Matériau de détection

$$- Hg_{1-x}Cd_xTe, E_g = f(x, T)$$

Dimensions des détecteurs typiques :

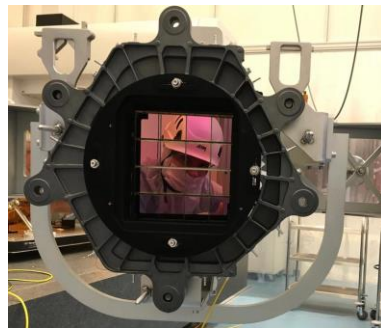
- 2048x2048 à 4096x4096 – pixels de 10 à 18 μ m

Performances des détecteurs NIR typiques (Near Infrared)

- Bruit de lecture d'environ **10 e-**
- Courant d'obscurité < **0.1 e-/pixel/s** à 100K
- Longueur de coupure **2.1 \pm 0.05 μ m**

Exemples d'utilisation :

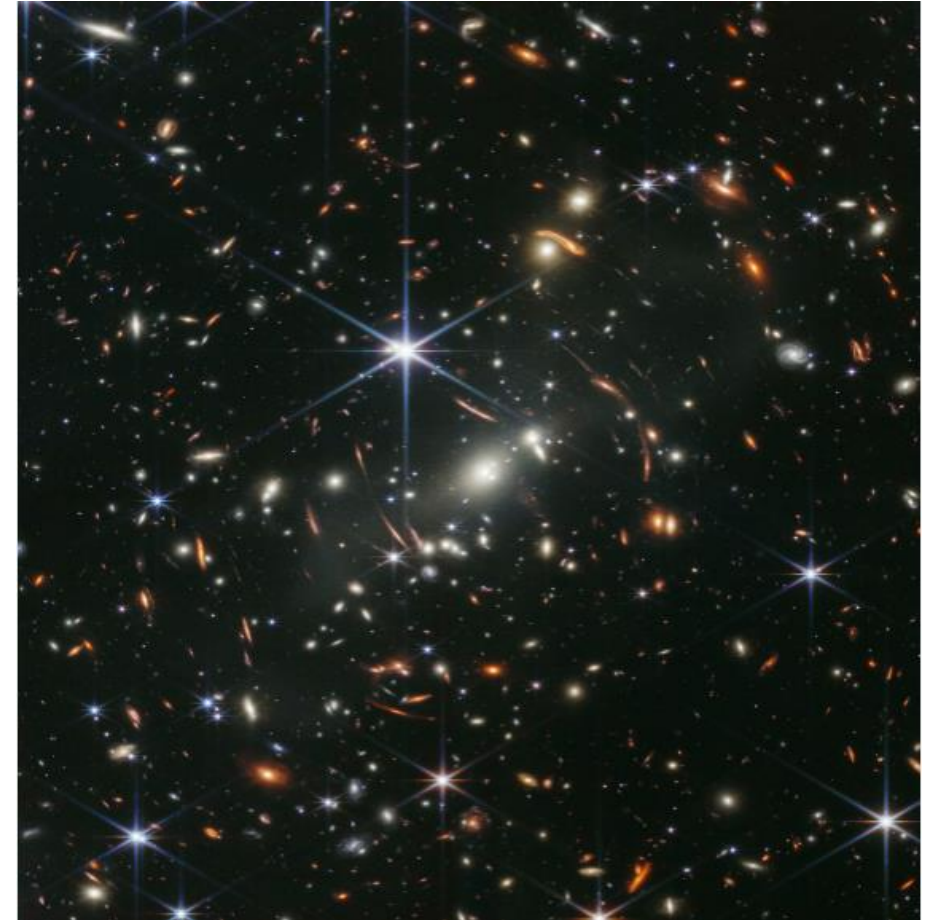
- JWST
- Euclid
- Ariel
- Hubble



Instrument NISP d'EUCLID

Deep Field, JWST.

Image sous-échantillonnée typique



Flux de photon typique :
quelques e-/pixel/s à 10⁵e-/pixel/s

I. Introduction

2. Présentation de l'architecture du détecteur

Technologie **P sur N** standard

Détecteur à base de **HgCdTe** crû sur un substrat à l'accord de maille de **CdZnTe**

Substrat partiellement ou totalement retiré

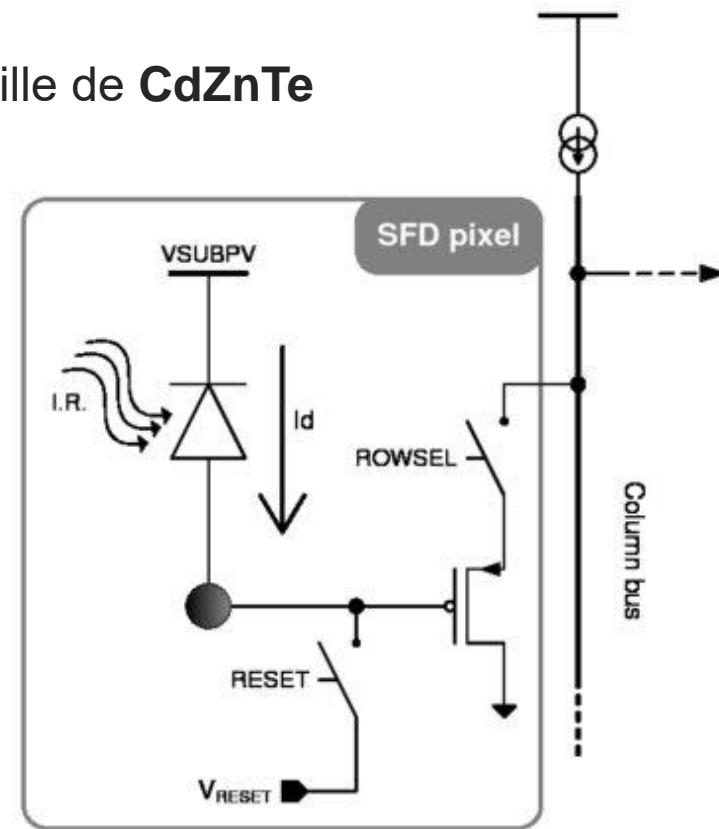
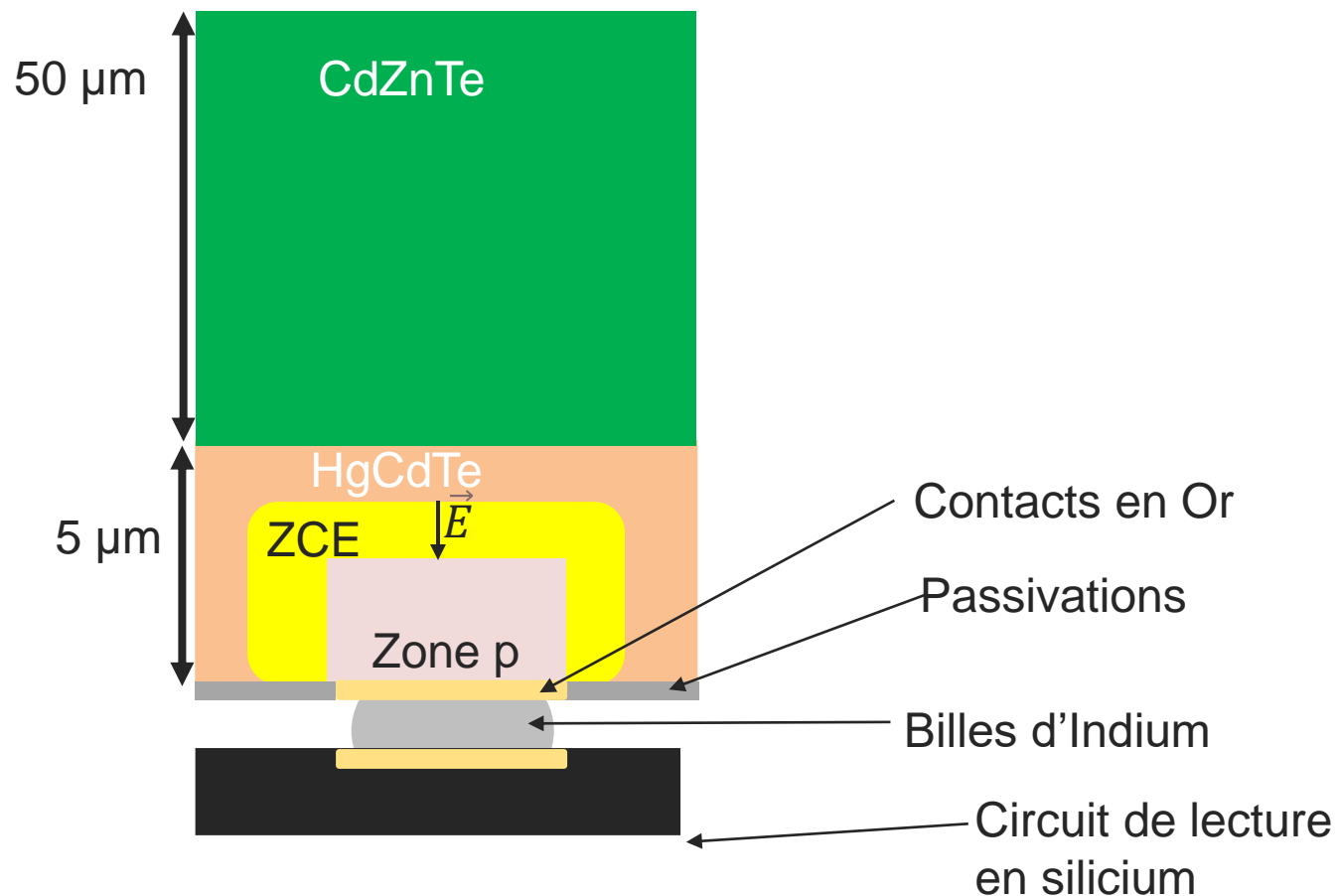


Schéma du circuit de lecture

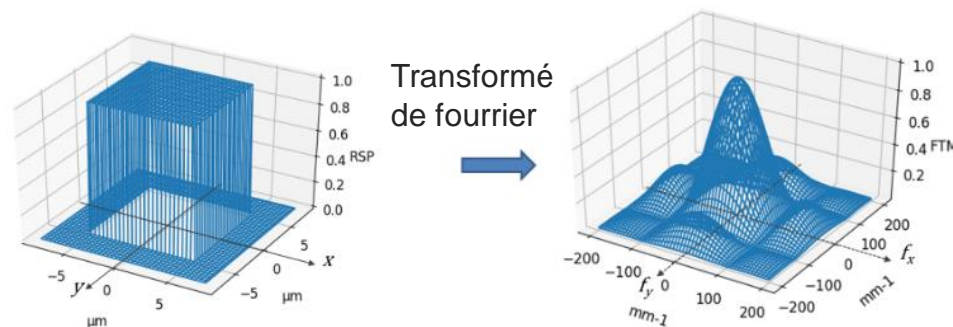
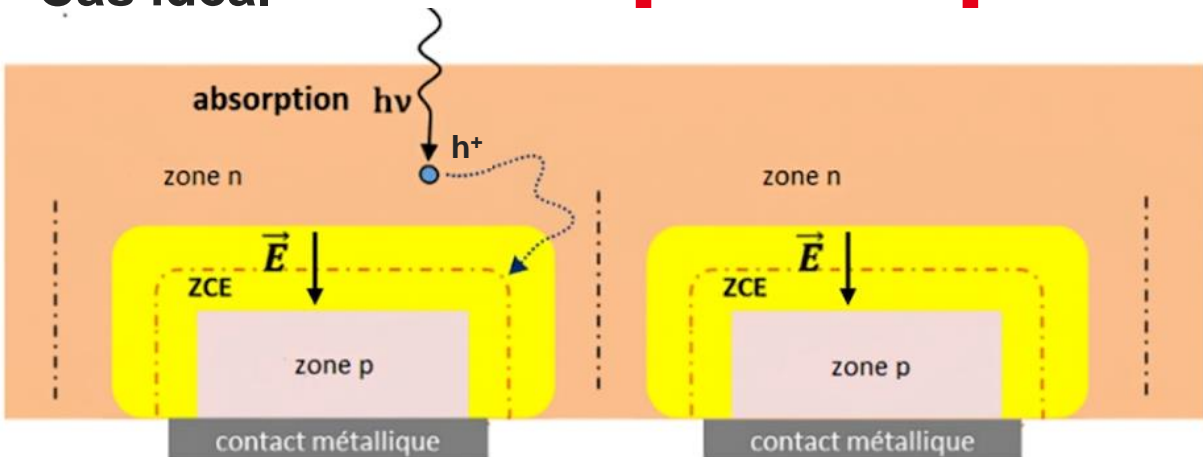
Source Follower Detector (**SFD**)

Courant intégré directement sur la photodiode

I. Introduction

3. Réponse spatiale des pixels (PSF)

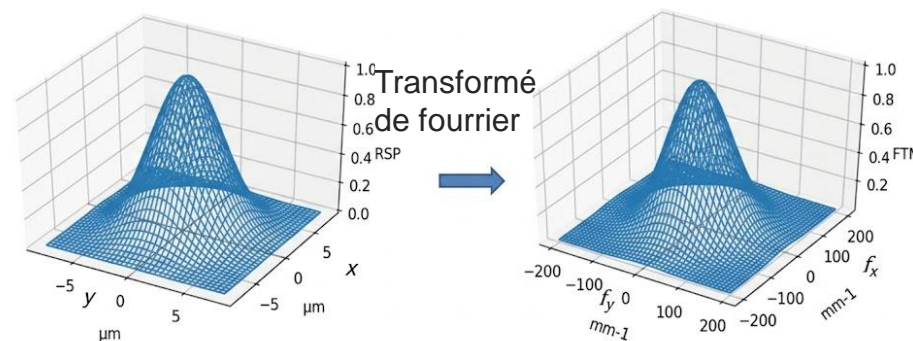
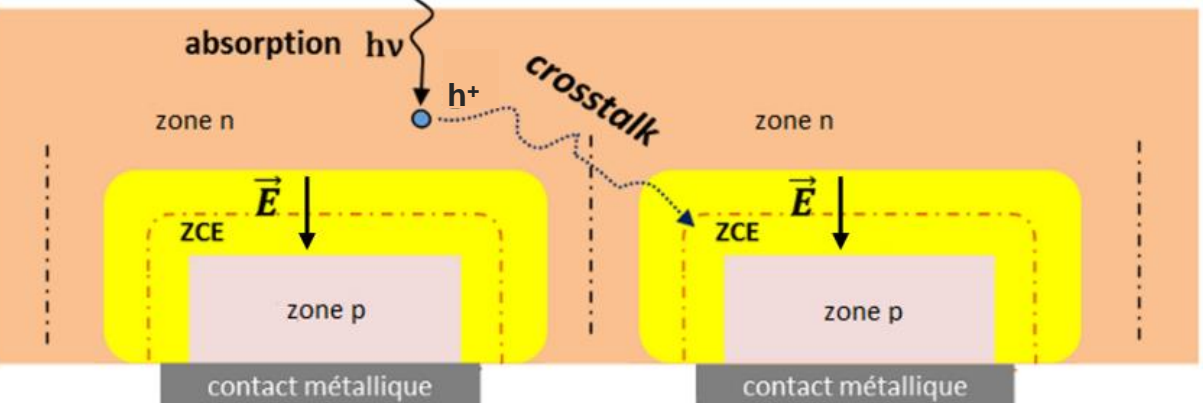
Cas idéal*



(a) PSF d'un pixel carré parfait

(b) |MTF| d'un pixel carré parfait

Cas réel*



(a) PSF d'un pixel réel

(b) |MTF| d'un pixel réel

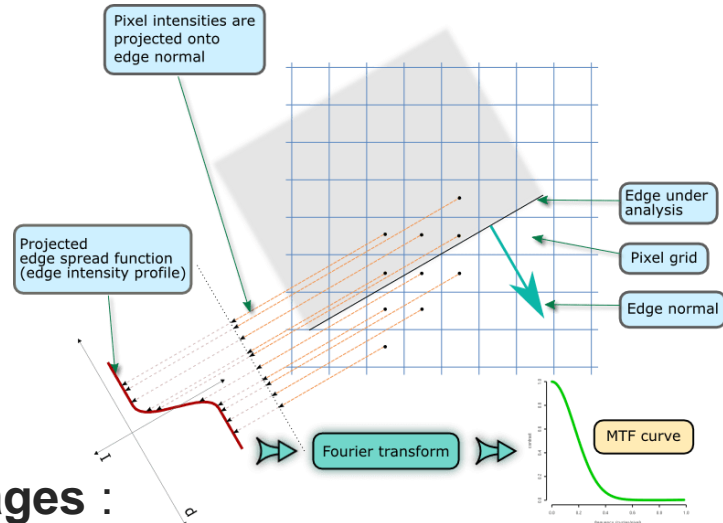
Technologie p+/n planaire

Comment mesure-t-on la réponse intrapixel ?

I. Introduction

4. Méthodes de mesure de la réponse spatiale des pixels

Bord de lame



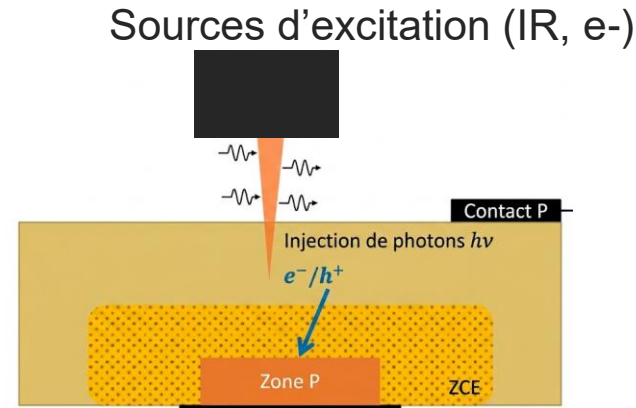
Avantages :

- Méthode rapide
- Méthode globale

Désavantages :

- Complexité d'une mesure indirecte
- MTF moyenne sur tout le détecteur

Spot Scan



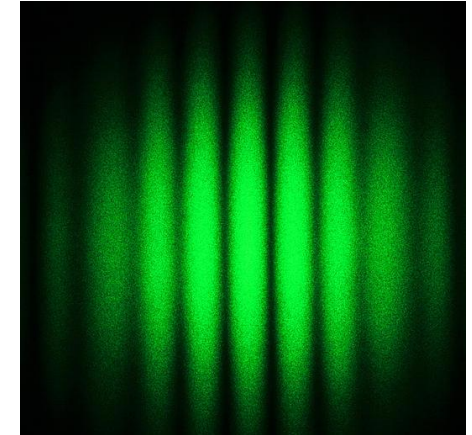
Avantages :

- Mesure directe
- Méthode locale

Désavantages :

- Requiert une décorrelation (IR)
- Mesure lente et complexe

Motifs d'interférence



Avantages :

- Plus rapide que le spot scan
- Méthode globale

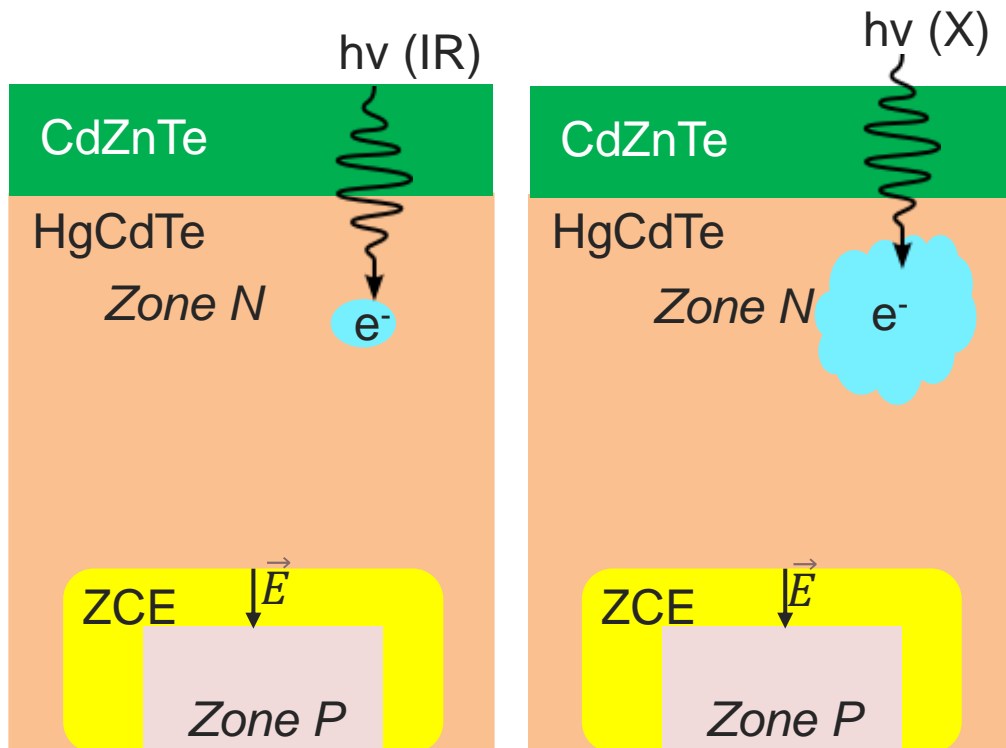
Désavantages :

- Complexité d'une mesure indirecte
- MTF moyenne sur tout le détecteur

En astrophysique, on veut mesurer la PSF de chaque pixel

II. L'idée de la thèse : les photons X

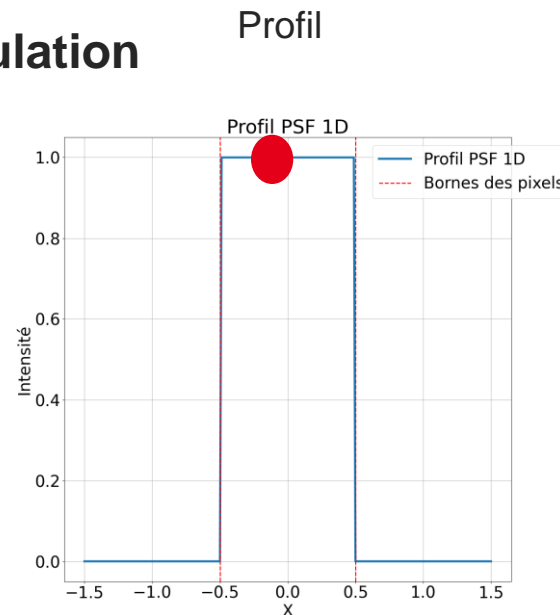
Principe physique



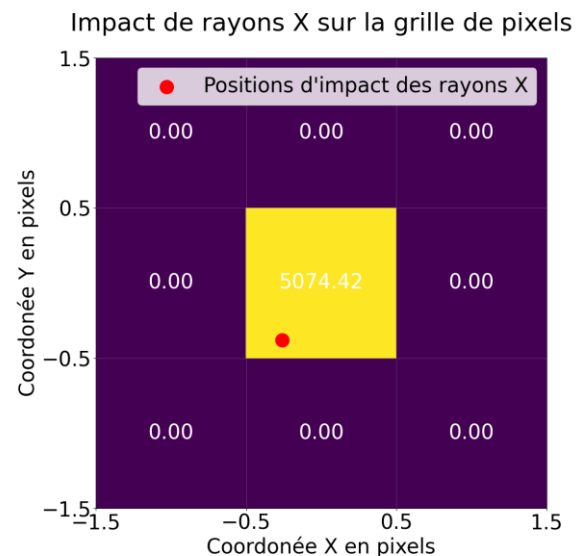
E_X est dans la dizaine de keV

- Quelle est la taille de ce nuage ?
- Quelle forme a-t-il ?

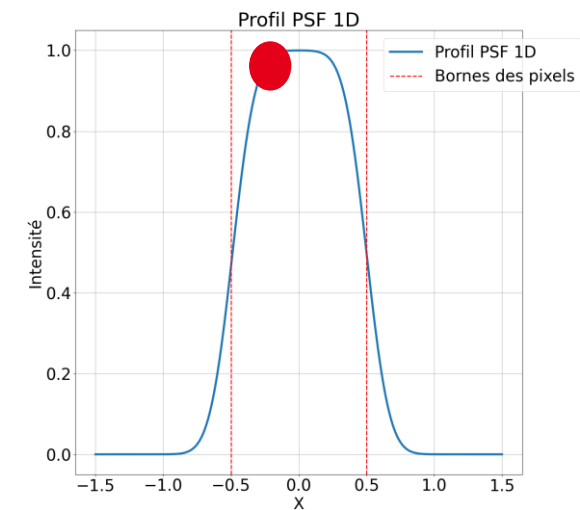
Simulation



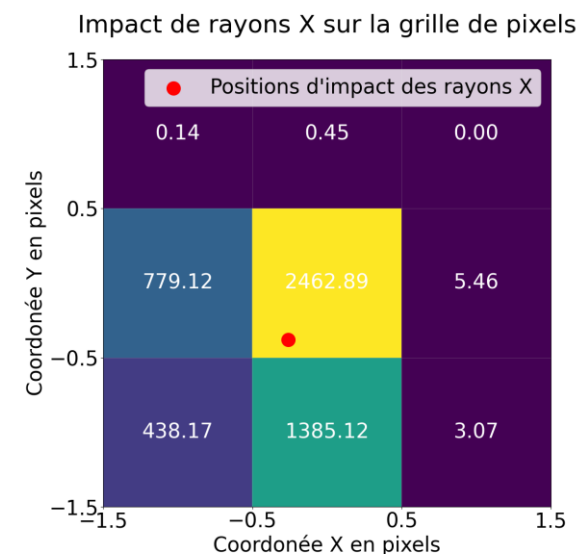
Pixel Spread Function parfaite



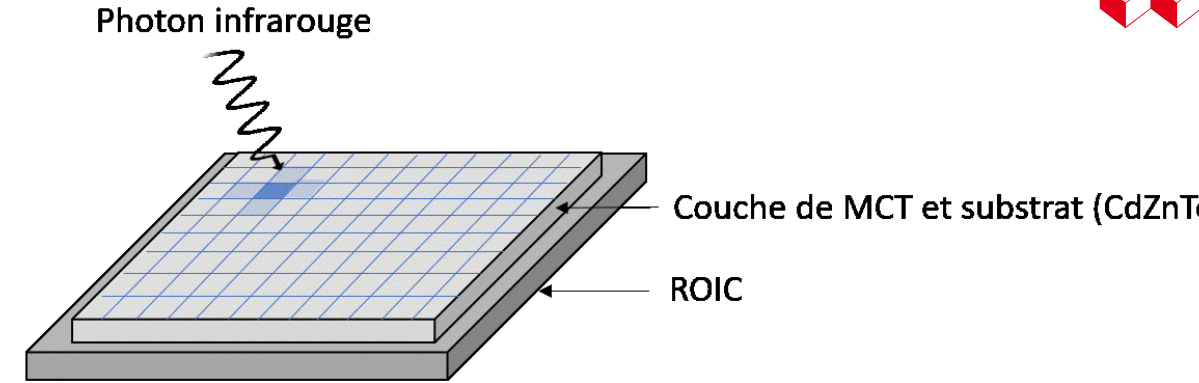
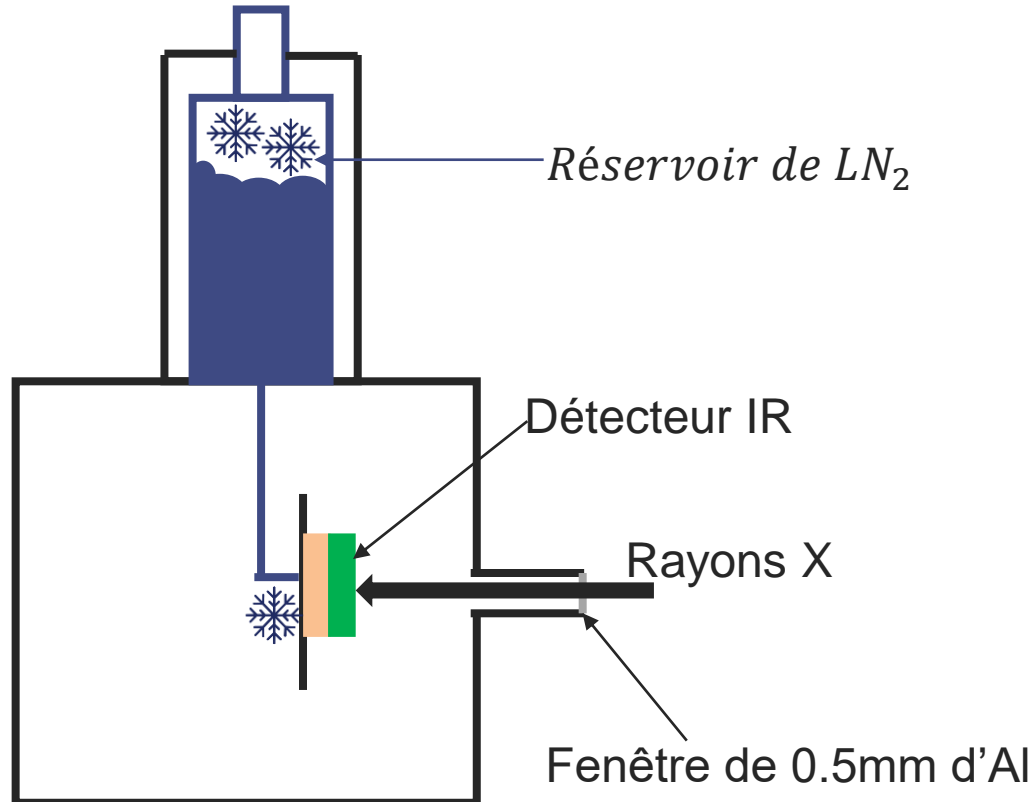
Profil



Pixel Spread Function dégradée



II. L'idée de la thèse : les photons X



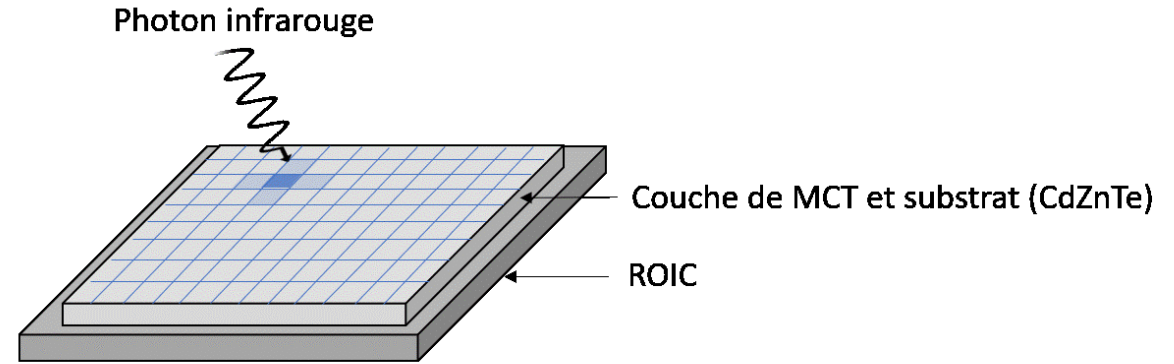
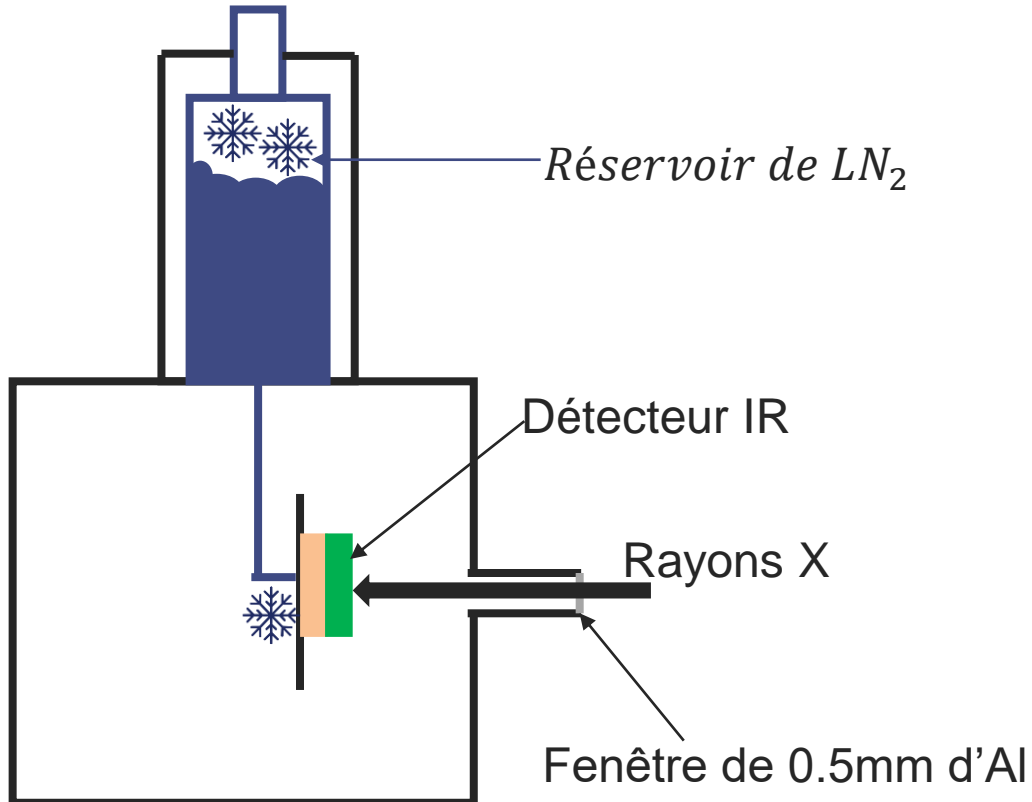
Avantages :

- Mesure rapide
- Mesure **locale** et globale
- Méthode directe

Inconvénients :

- La déconvolution est nécessaire, mais elle est « universelle »
 - Ne dépend pas du setup expérimental, mais seulement de l'énergie des X et des propriétés des matériaux
- Faible flux de photons X
 - Contraintes sur la source X
- **Positions des impacts de photons X aléatoires**

II. L'idée de la thèse : les photons X



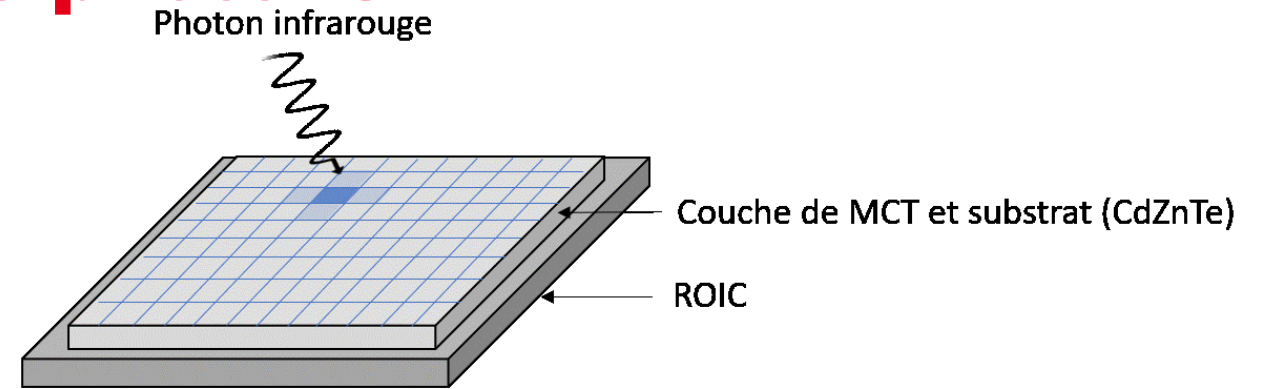
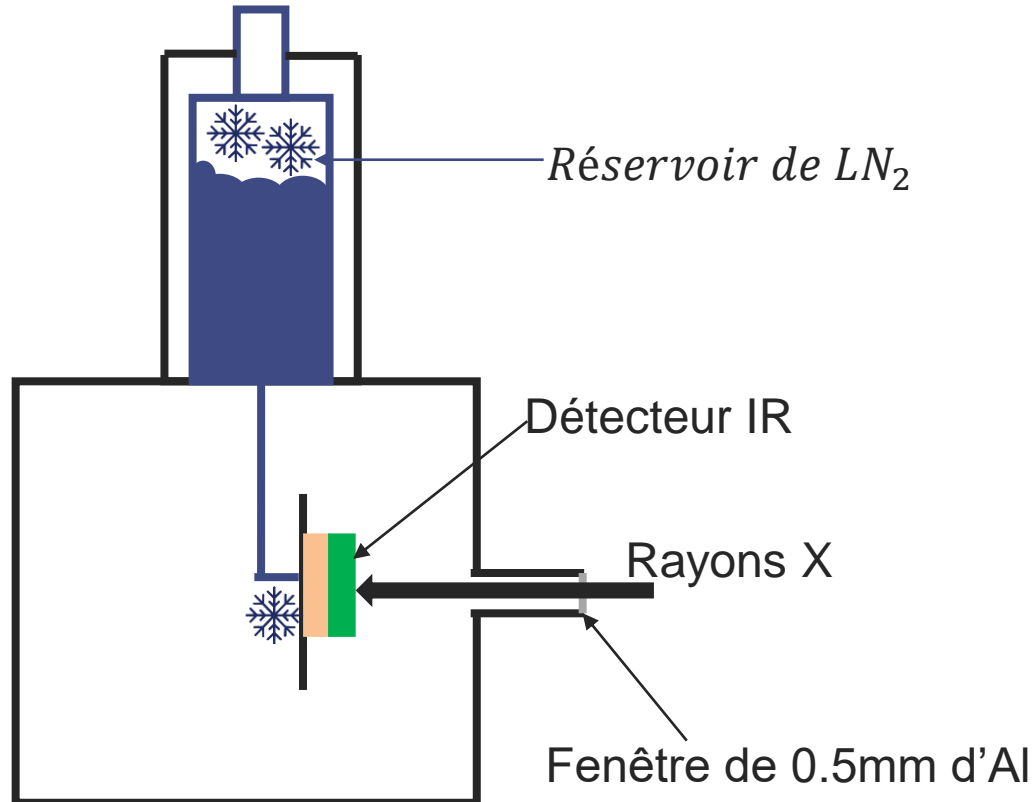
Avantages :

- Mesure rapide
- Mesure **locale** et globale
- Méthode directe

Inconvénients :

- La déconvolution est nécessaire, mais elle est « universelle »
 - Ne dépend pas du setup expérimental, mais seulement de l'énergie des X et des propriétés des matériaux
- Faible flux de photons X
 - Contraintes sur la source X
- **Positions des impacts de photons X aléatoires**

II. L'idée de la thèse : les photons X



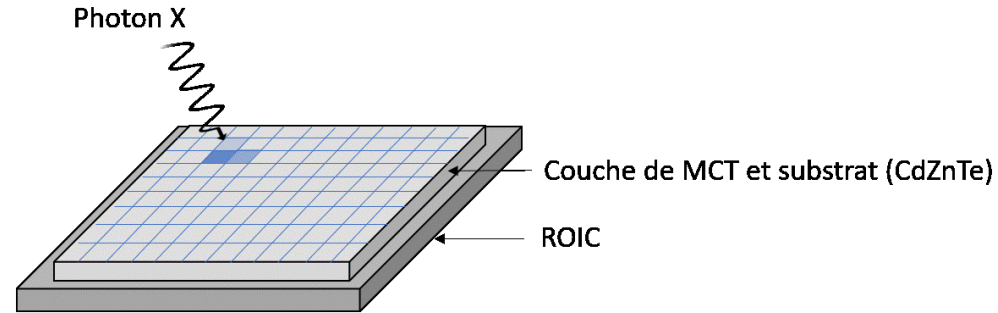
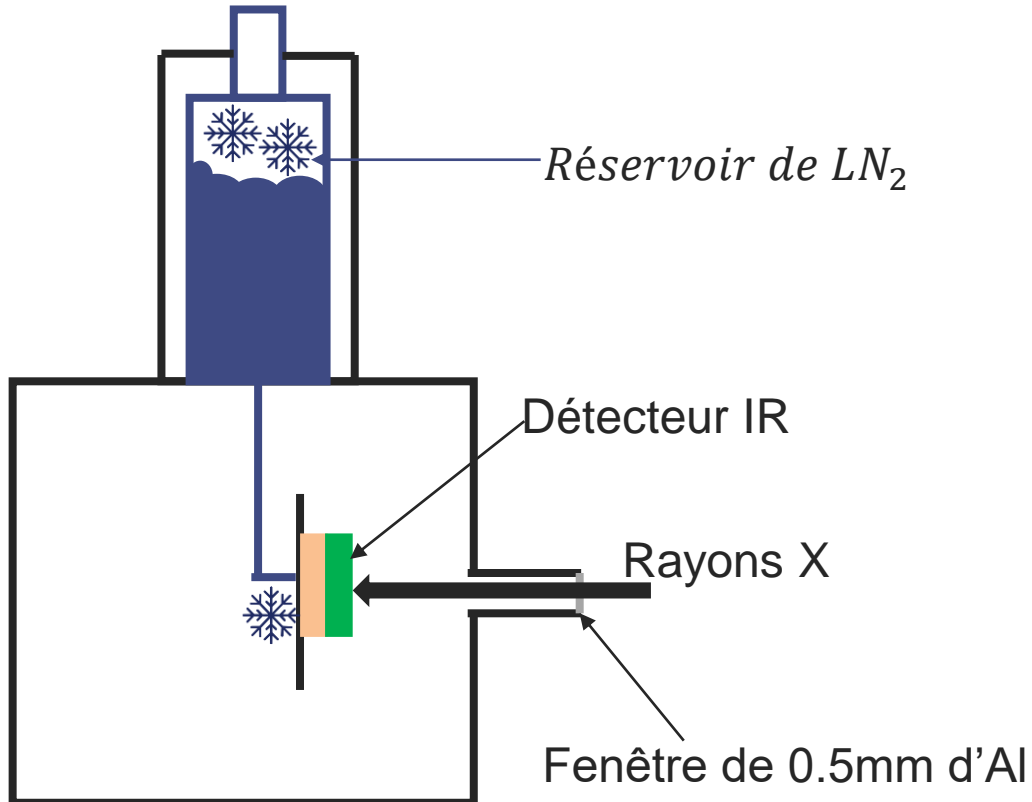
Avantages :

- Mesure rapide
- Mesure **locale** et globale
- Méthode directe

Inconvénients :

- La déconvolution est nécessaire, mais elle est « universelle »
 - Ne dépend pas du setup expérimental, mais seulement de l'énergie des X et des propriétés des matériaux
- Faible flux de photons X
 - Contraintes sur la source X
- **Positions des impacts de photons X aléatoires**

II. L'idée de la thèse : les photons X



Avantages :

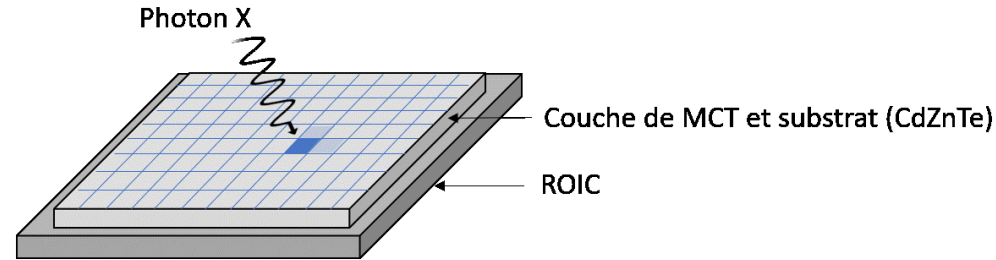
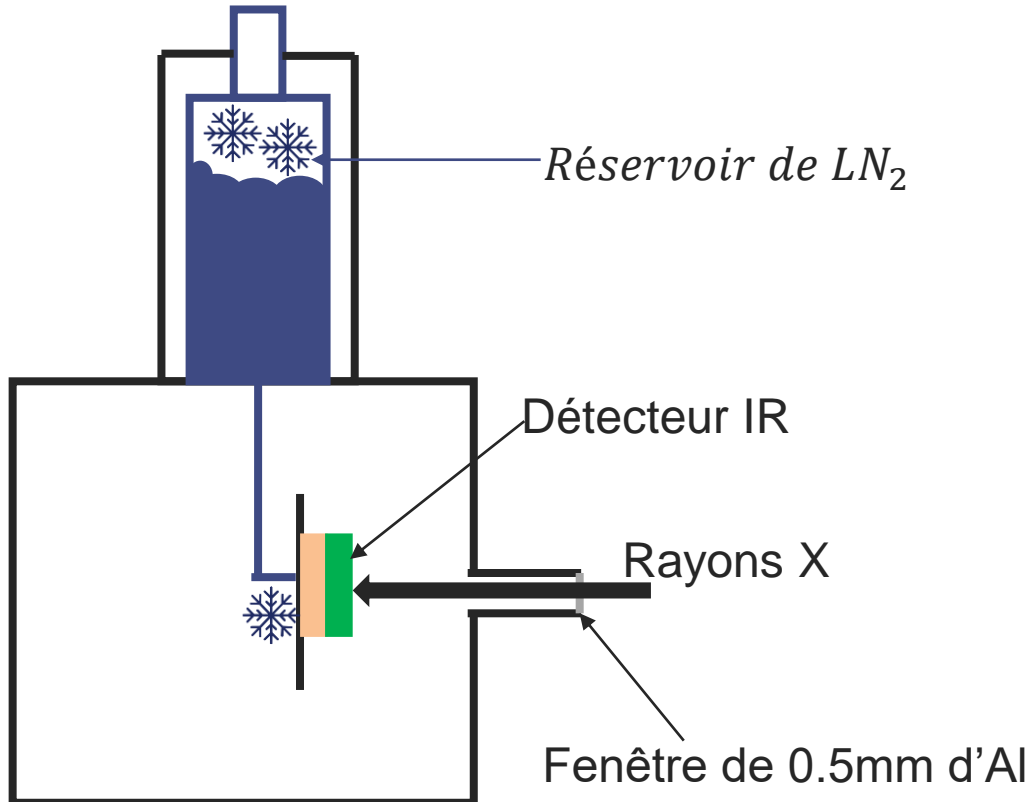
- Mesure rapide
- Mesure **locale** et globale
- Méthode directe

Inconvénients :

- La déconvolution est nécessaire, mais elle est « universelle »
 - Ne dépend pas du setup expérimental, mais seulement de l'énergie des X et des propriétés des matériaux
- Faible flux de photons X
 - Contraintes sur la source X

- **Positions des impacts de photons X aléatoires**

II. L'idée de la thèse : les photons X



Avantages :

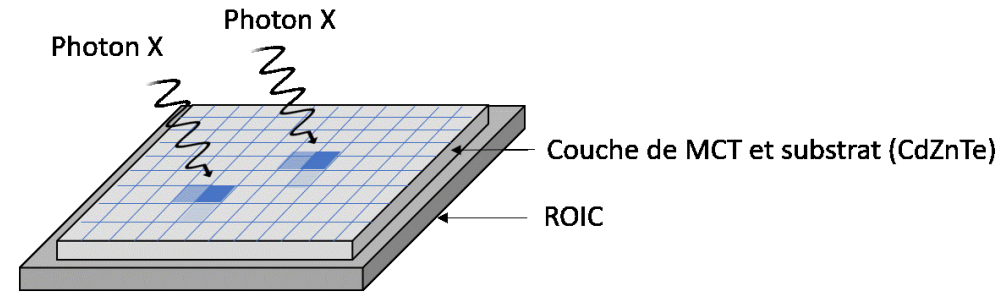
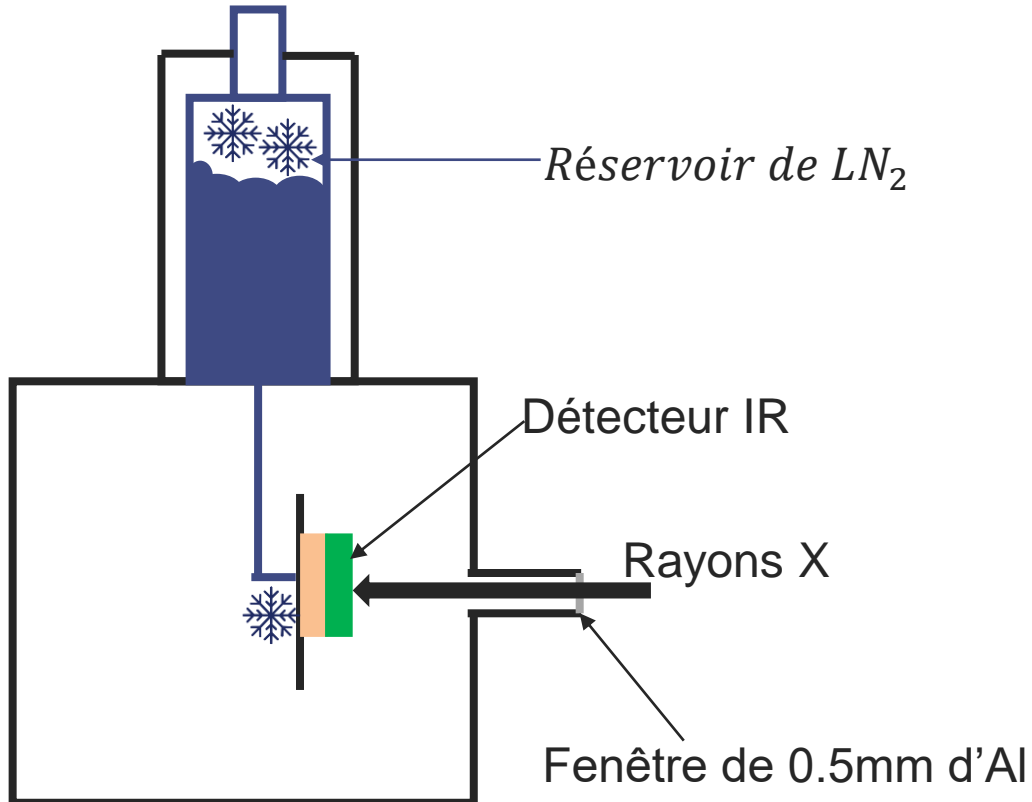
- Mesure rapide
- Mesure **locale** et globale
- Méthode directe

Inconvénients :

- La déconvolution est nécessaire, mais elle est « universelle »
 - Ne dépend pas du setup expérimental, mais seulement de l'énergie des X et des propriétés des matériaux
- Faible flux de photons X
 - Contraintes sur la source X

- **Positions des impacts de photons X aléatoires**

II. L'idée de la thèse : les photons X



Avantages :

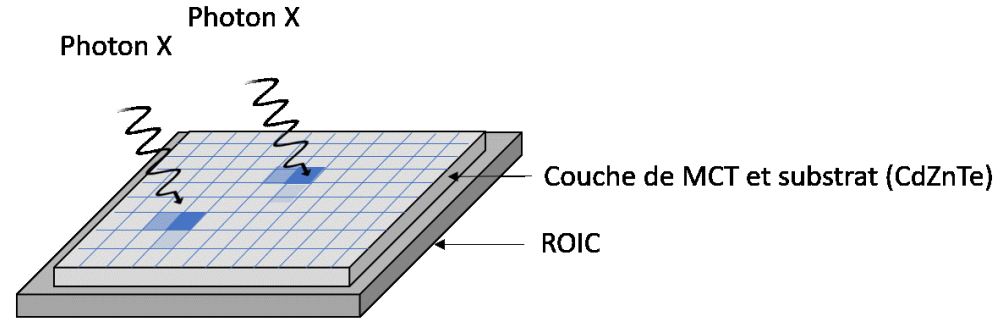
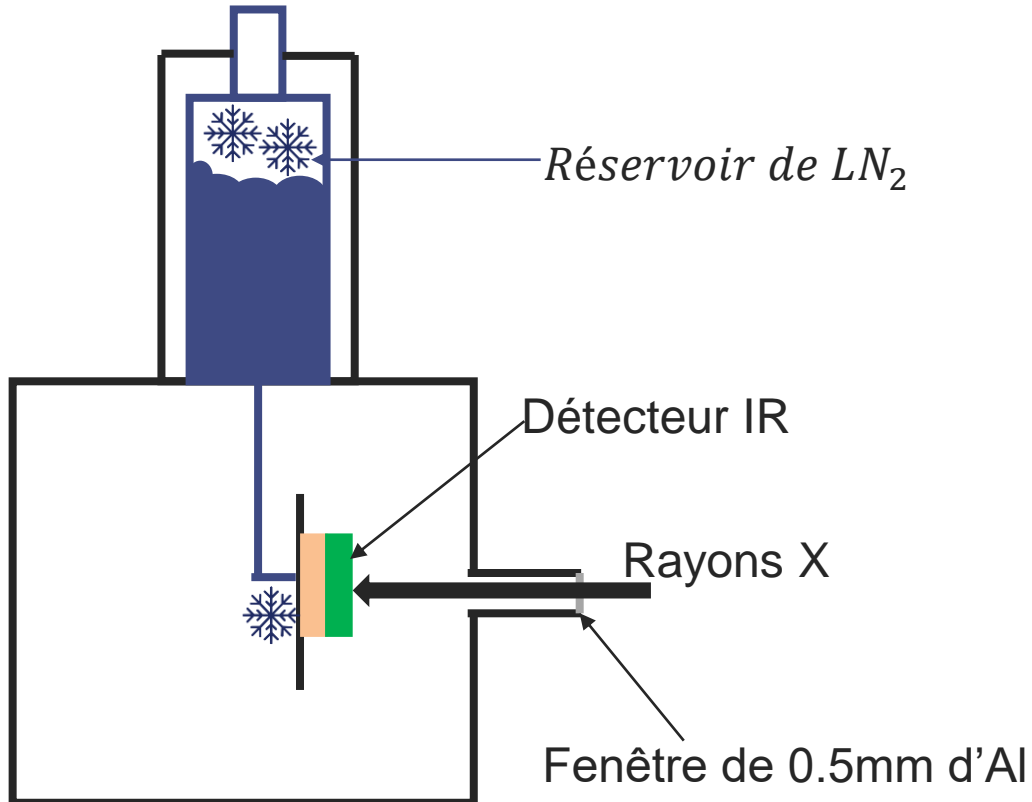
- Mesure rapide
- Mesure **locale** et globale
- Méthode directe

Inconvénients :

- La déconvolution est nécessaire, mais elle est « universelle »
 - Ne dépend pas du setup expérimental, mais seulement de l'énergie des X et des propriétés des matériaux
- Faible flux de photons X
 - Contraintes sur la source X

- **Positions des impacts de photons X aléatoires**

II. L'idée de la thèse : les photons X



Avantages :

- Mesure rapide
- Mesure **locale** et globale
- Méthode directe

Inconvénients :

- La déconvolution est nécessaire, mais elle est « universelle »
 - Ne dépend pas du setup expérimental, mais seulement de l'énergie des X et des propriétés des matériaux
- Faible flux de photons X
 - Contraintes sur la source X

- **Positions des impacts de photons X aléatoires**

III. Simulations

1. Rappels de physique

Electron primaire d'énergie $E_{e^-} = h \nu - E_b$

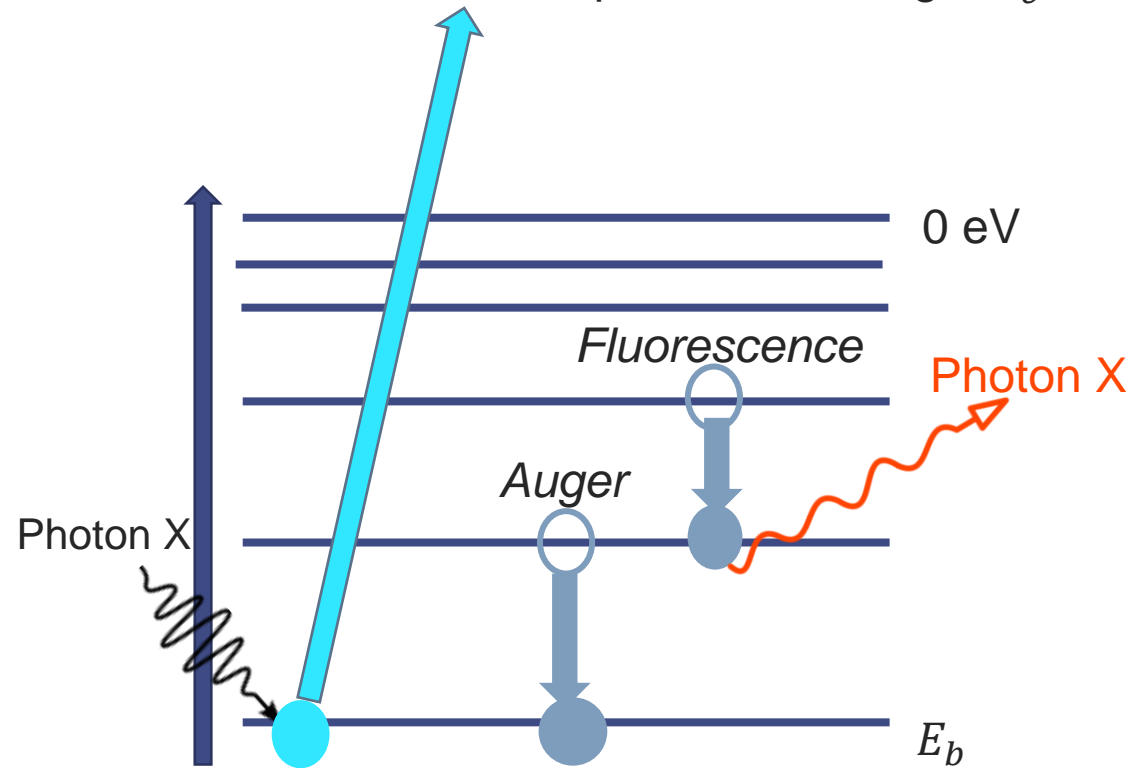


Schéma de l'effet d'un photon X sur un atome

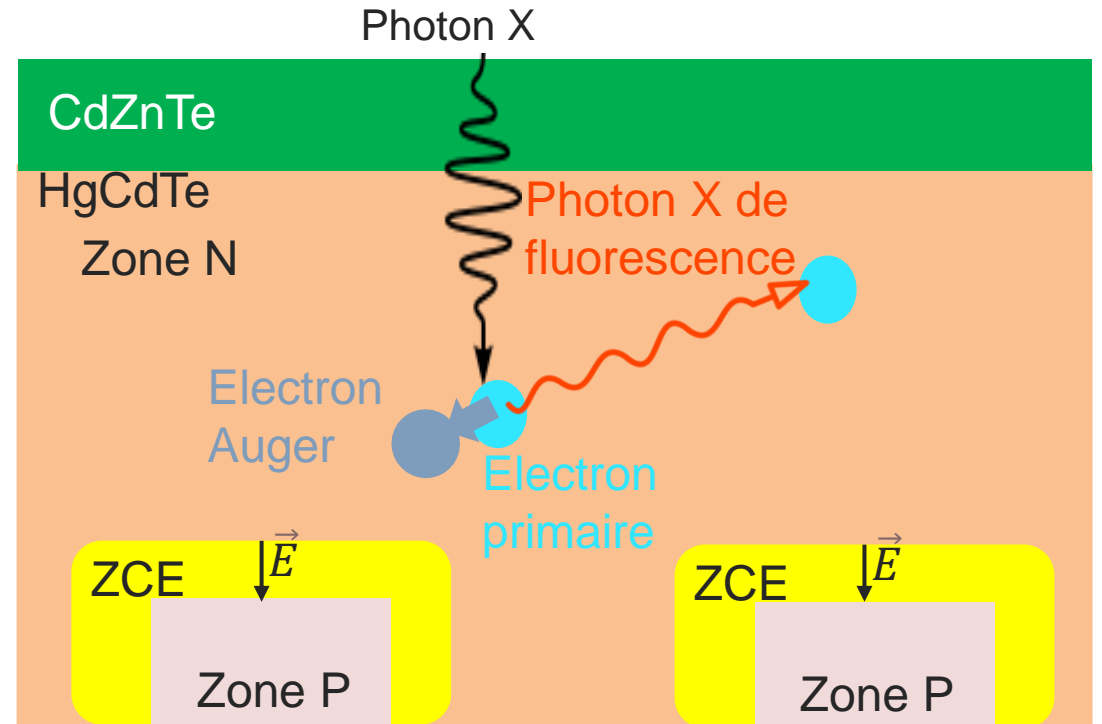


Schéma de l'effet d'un photon X sur le détecteur

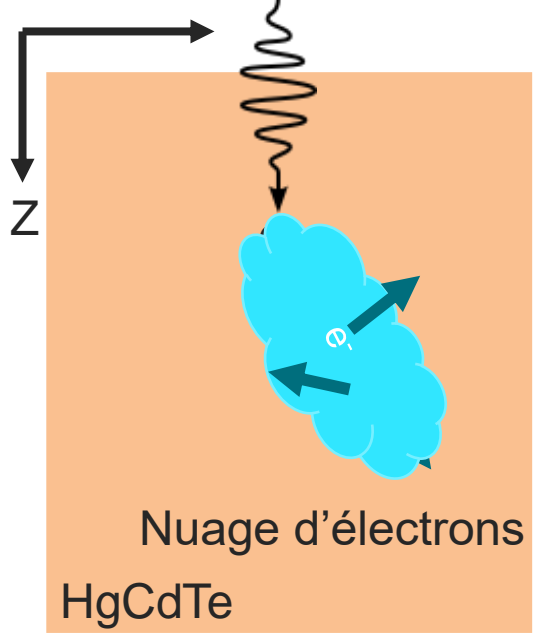
Un photon X éjecte un électron du noyau.
Recombinaison de la configuration des électrons par émission
d'électrons d'Auger / fluorescence X

III. Simulations

2. Cascade d'électrons et simulations de nuage



X (15/60 keV, ^{241}Am)



1. Impact X – création d'un photoélectron
2. Mouvement de l'électron primaire dans une direction
3. Ionisation de la matière environnante : création d'électrons secondaires
4. Création d'électrons supplémentaires => cascade !
5. Thermalisation de ces électrons : formation du nuage de charge

Problème : Comment peut-on caractériser ce nuage d'électrons ?

En utilisant un outil appelé GEANT4 (**Geometry And Tracking version 4**)

Utilisé pour simuler le passage de particules à travers la matière

Simulation d'un accélérateur de particules, par exemple



But: Définir les caractéristiques du nuage d'électron produit par le photon X

Forme ?

Taille ?

HgCdTe :

ρ : 6.93 g/cm³

E_g : 0.59 eV

Composition :

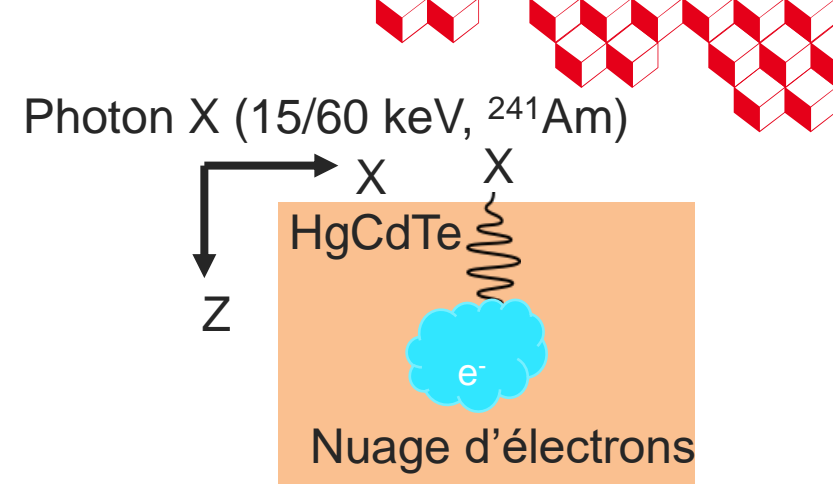
- Cd (48) : 20.51%

- Te (52) : 45.13 %

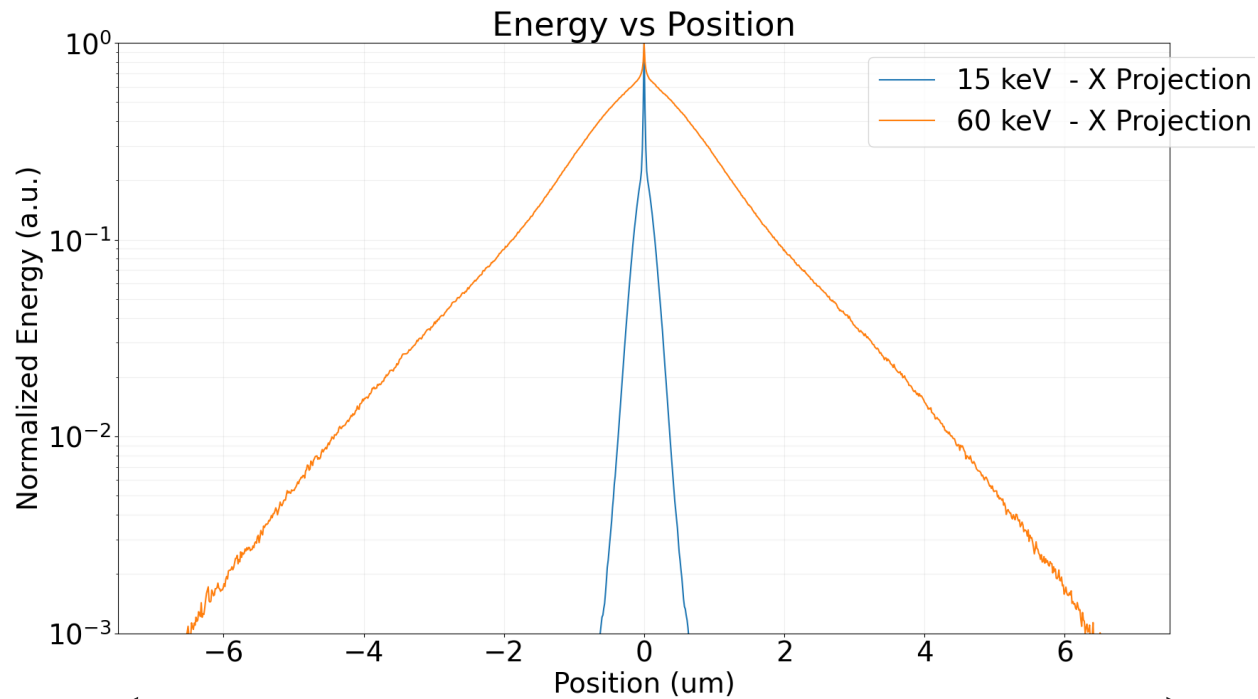
- Hg (80) : 34.36 %

III. Simulation

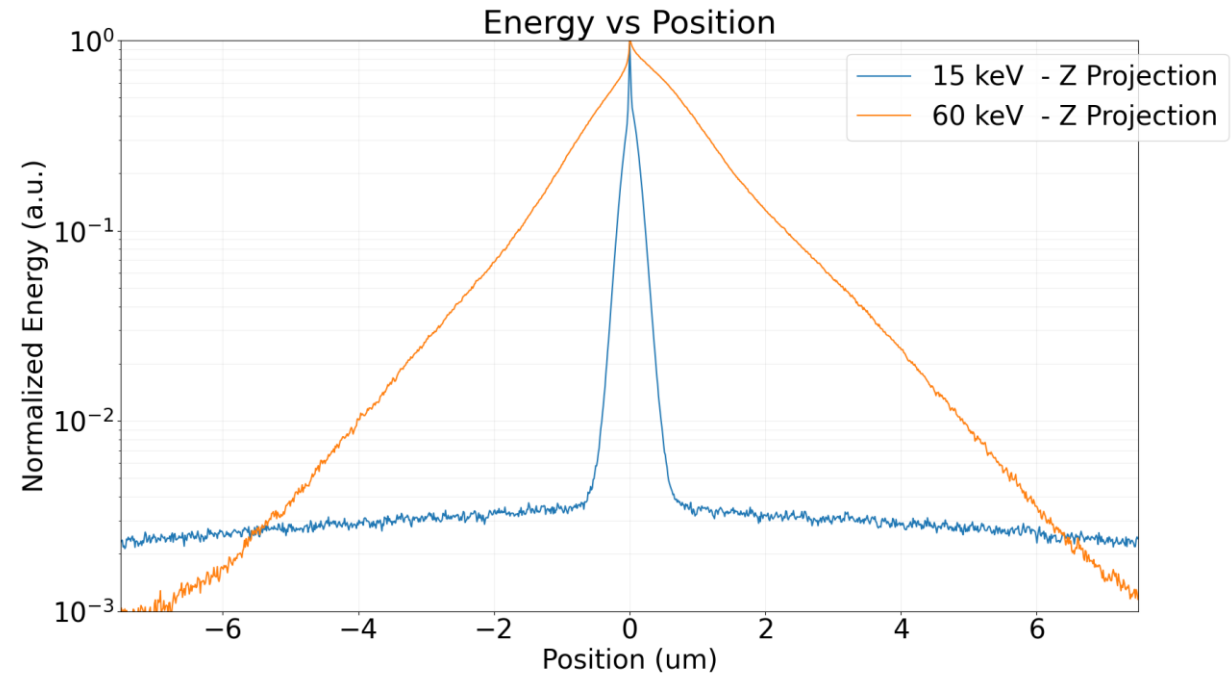
3. Forme du nuage



Projection X/Y



Projection Z



Pas pixel : 15 μm

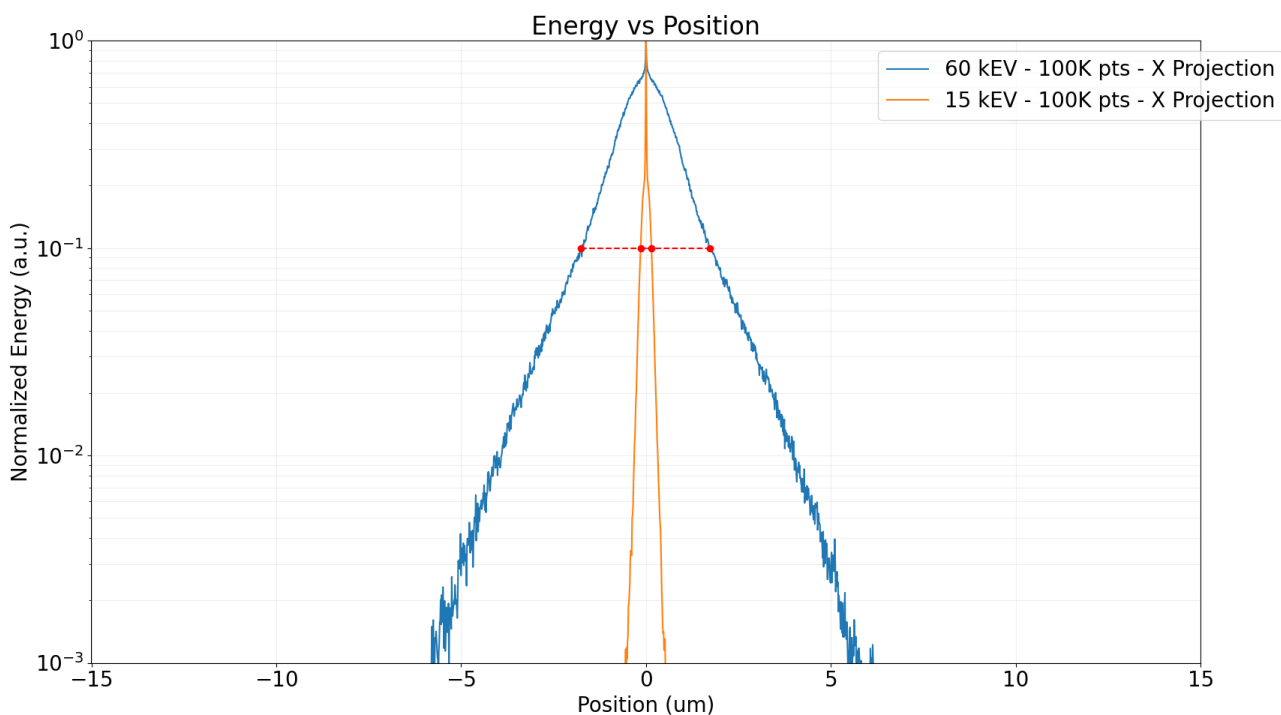
III. Simulation

4. Taille du nuage

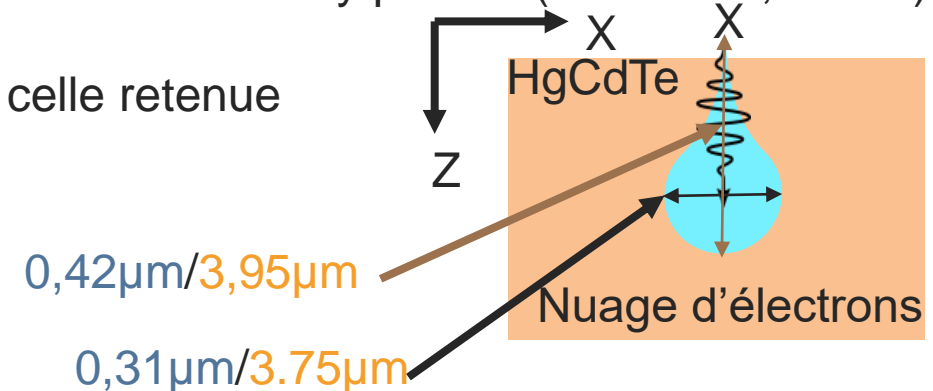
⇒ La métrique choisie pour évaluer la taille du nuage est la même que celle retenue par Samantha Bustillos Vasco (1)

⇒ 10% du maximum

⇒ Métrique existante au CEA Leti



X ray photon (15/60 keV, ²⁴¹Am)



Energie	Diamètre maximum
15 keV	0,42 µm
60 keV	3,95 µm

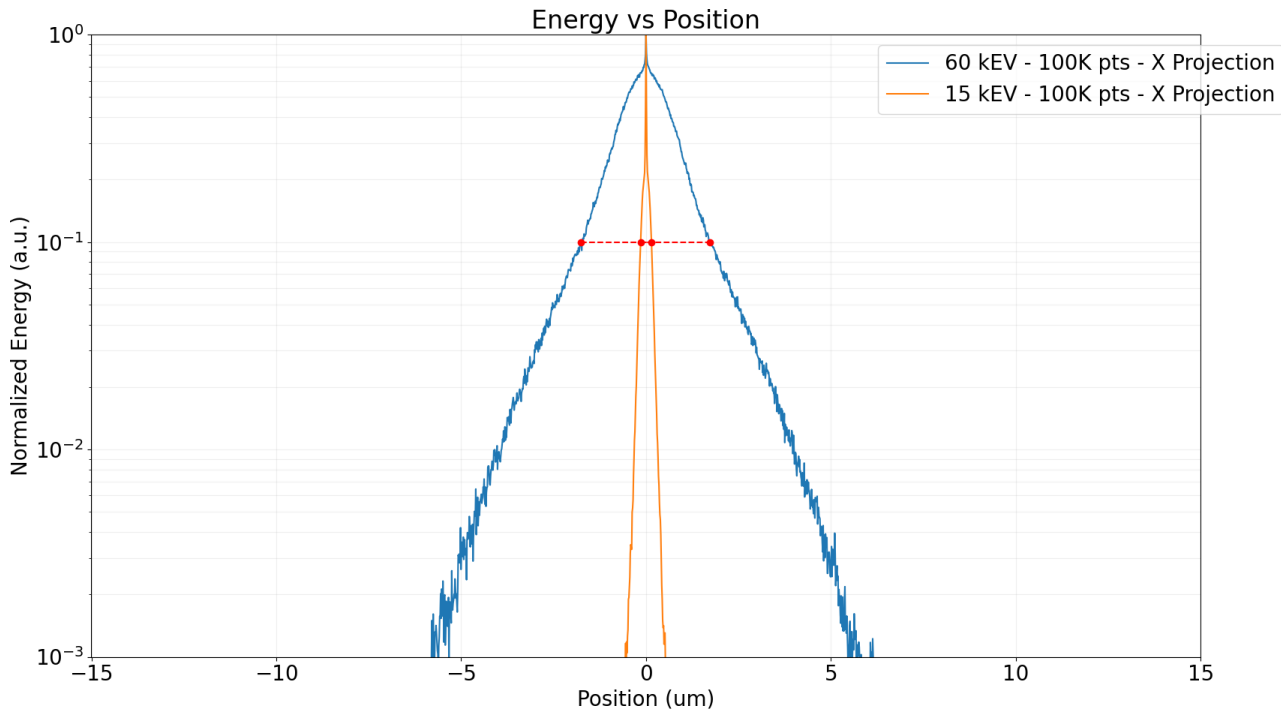
III. Simulation

4. Taille du nuage

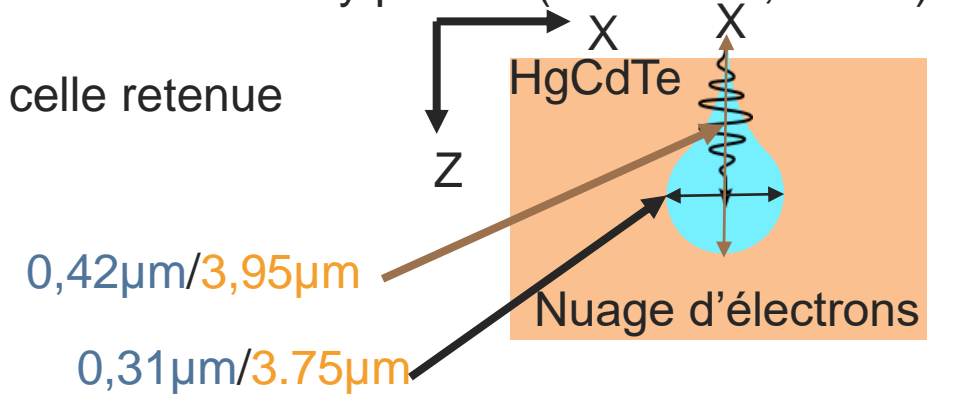
⇒ La métrique choisie pour évaluer la taille du nuage est la même que celle retenue par Samantha Bustillos Vasco (1)

⇒ 10% du maximum

⇒ Métrique existante au CEA Leti



X ray photon (15/60 keV, ^{241}Am)



Comparaison entre la taille du spot scan SWIR du CEA Leti (1) (F# = 1) et le nuage d'électrons .

Type	Diamètre maximum
15 keV (X)	0,42 µm
60 keV (X)	3,95 µm
0.915 µm F#=1 spot (1)	4 µm

IV. Conclusion & perspectives de simulations



Conclusion:

- ⇒ Taille de la source d'excitation $< \mu\text{m}$
- ⇒ Compatible avec la mesure FTM et inférieur au pas de pixel
- ⇒ Permet d'extraire la PSF à partir des données d'irradiation

Perspectives :

- ⇒ Évaluer l'impact de la fluorescence sur le détecteur et son environnement
- ⇒ Compléter la chaîne de simulation

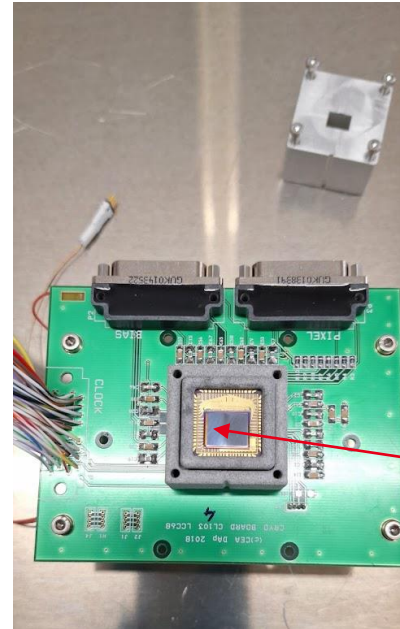


V. Perspectives expérimentales



Cryostat sous vide refroidi à l'azote liquide (~77 K)

Irradiation à travers la fenêtre (1) via une plaque d'aluminium de 0,5 mm d'épaisseur



Pas de pixel de 15 μ m

Taille de 640x512

50 μ m de substrat

Température de fonctionnement: ~77K

Technologie planaire du CEA Leti

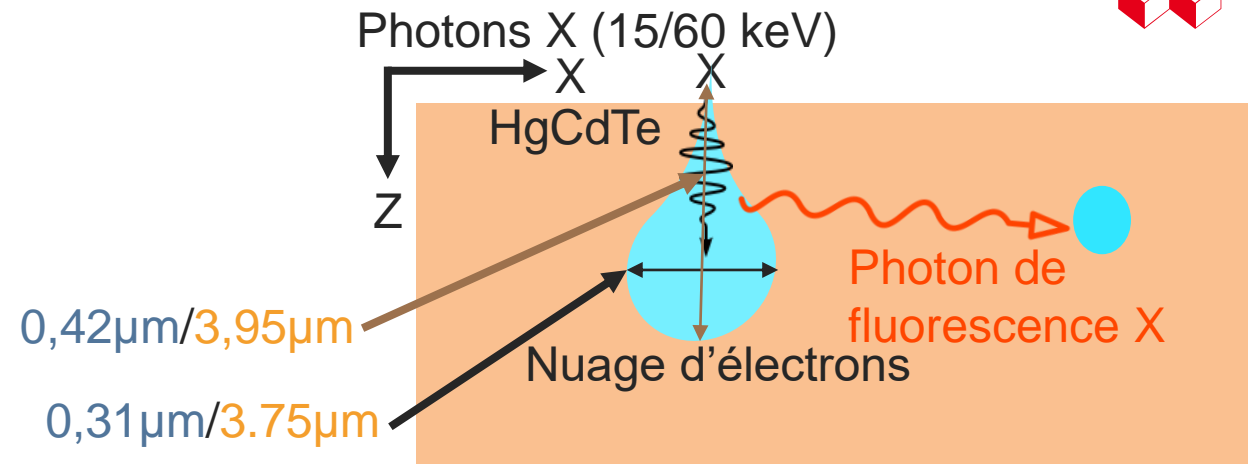
→ MCT

Détecteur

Setup du
cryostat et du
détecteur

Irradiations

Traitement
des données



Merci de votre attention.
Avez-vous des questions ?

Mesure globale et locale de la PSF en astrophysique

