



energie atomique • energies alternatives

A. MEURIS

Formation IN2P3 – Du détecteur à la mesure – juin 2011

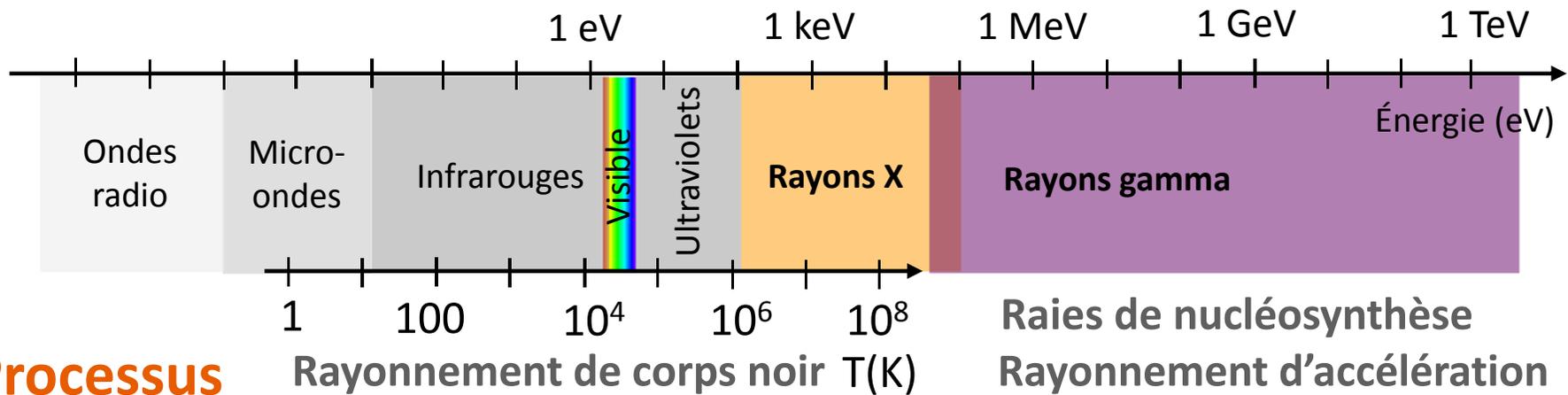
# LES DÉTECTEURS POUR L'ASTRONOMIE DES HAUTES ÉNERGIES – INTRODUCTION

Aline Meuris – CEA/Irfu  
aline.meuris@cea.fr

1

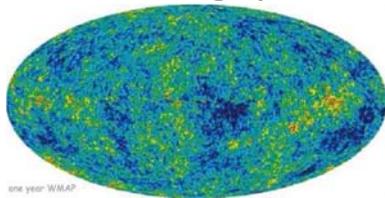
## ○ Spectre électromagnétique

- Théorie corpusculaire : photon d'énergie  $E = h \cdot \nu = h \cdot c / \lambda$
- Unité : électron-volt  $E = q \cdot V = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 1 \text{ eV}$

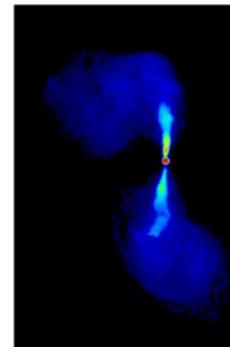


## ○ Processus

Fond cosmologique



Milieu interstellaire Etoiles

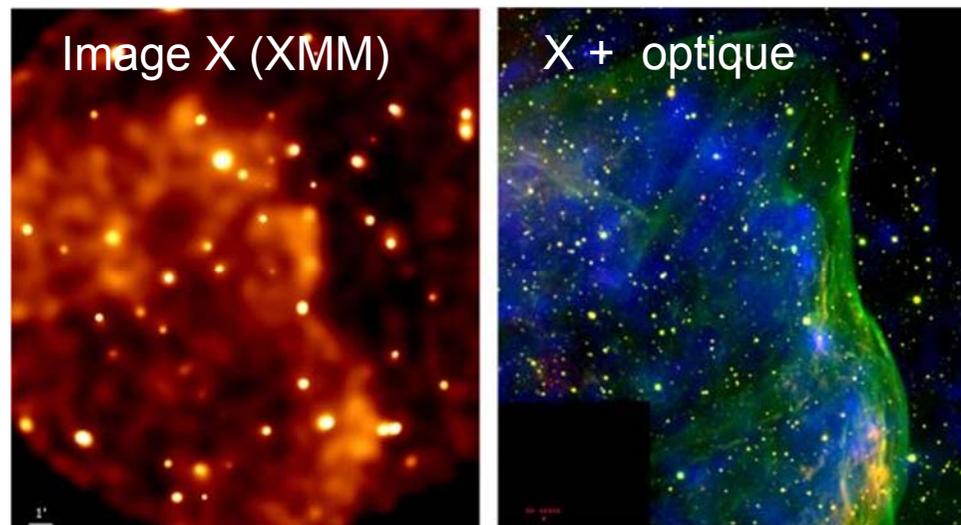


Trous noirs (jets, disque d'accrétion)

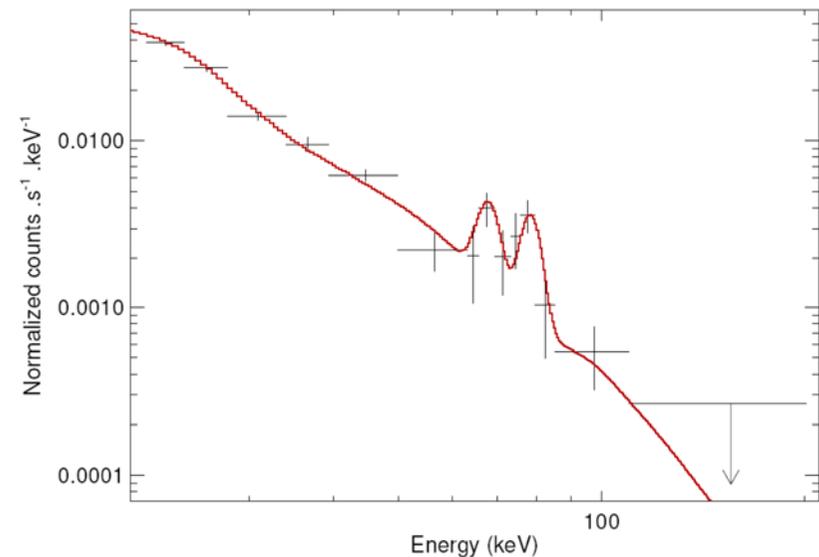
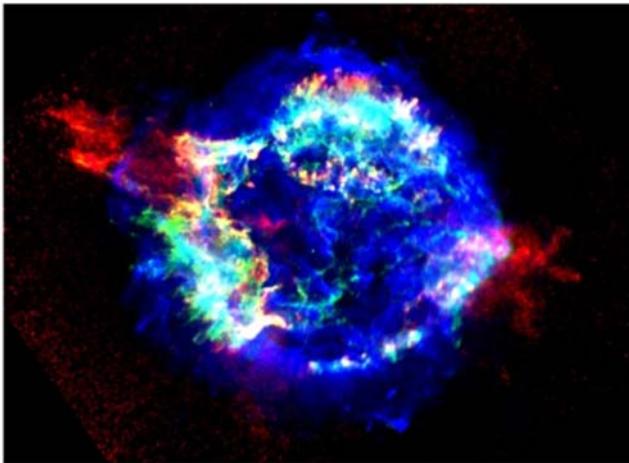
Supernovae (ondes de chocs)

## ○ Objets astrophysiques

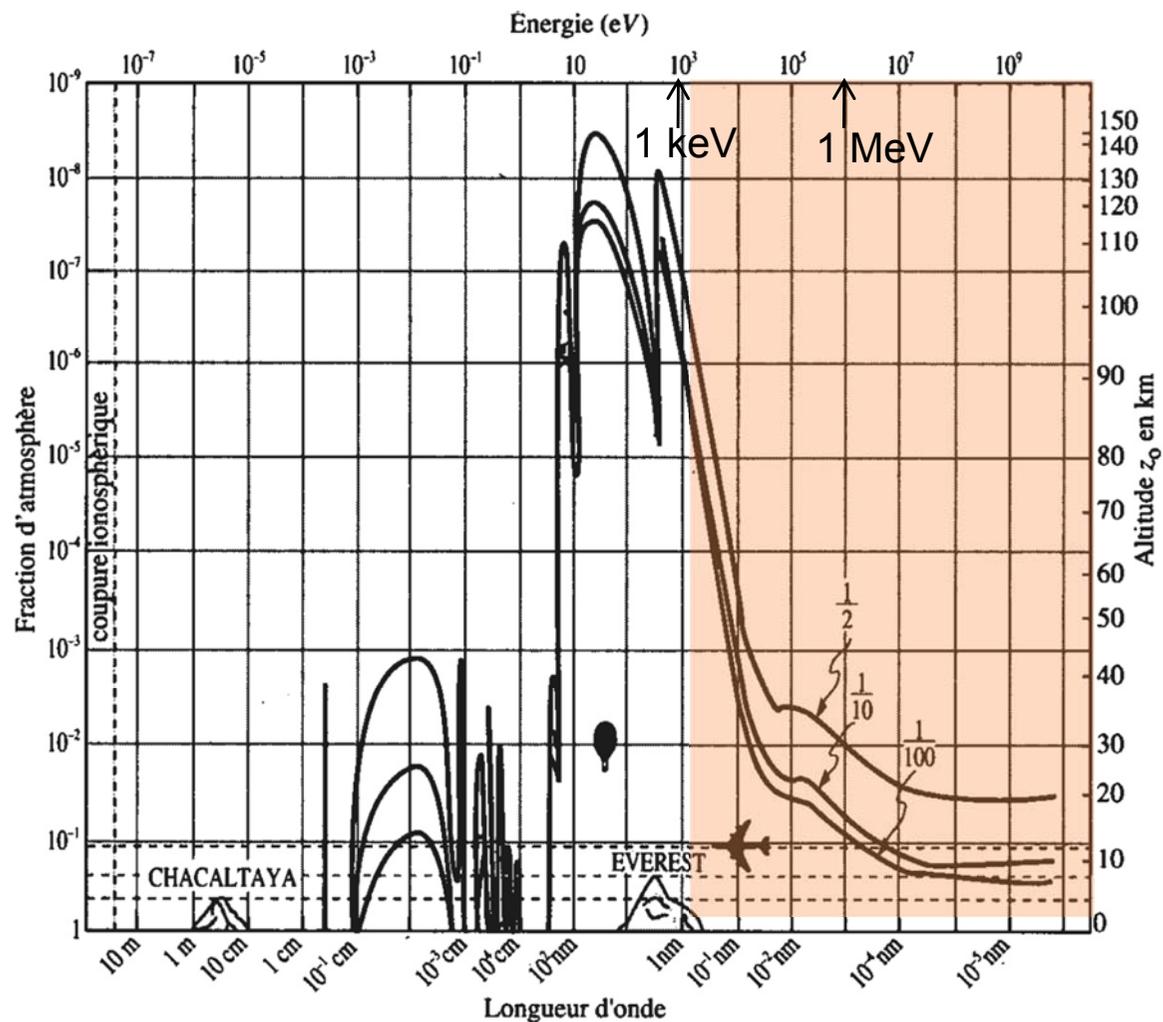
- Les lois de la relativité générale testée dans les trous noirs
  - Observable : Élargissement Doppler des raies du fer
  - Besoins : Spectroscopie haute résolution à 6-7 keV
- L'origine du fond diffus X
  - Observable : Sources
  - Besoins : imagerie, sensibilité de détection



- Le champ magnétique dans les objets compacts
  - Observable : Émission synchrotron (rayonnement polarisé)
  - Besoins : Polarimétrie X et gamma
- La production d'éléments lourds dans les restes de supernovae
  - Observable : Raies de décroissance radioactive du titane 44
  - Besoins : Spectro-imagerie à 70 keV



- L'atmosphère absorbe les rayonnements X et gamma.
  - Nécessité des télescopes spatiaux
  - Contraintes de développement supplémentaires (fiabilité, ressources...)



### ○ **Partie 1 : les principes de la détection**

- Vendredi 17 de 16h à 17h
- Objectif : comprendre comment le rayonnement X et gamma peut être détecté et quelles informations peuvent être mesurées.

### ○ **Partie 2 : les principes et les techniques de mesure**

- Samedi 18 de 17h30 à 18h30
- Objectif : comprendre les spécificités de conception, de mise en œuvre, de performances d'un système de détection.

### ○ **Partie 3 : les technologies et les applications**

- Mercredi 22 de 10h à 11h
- Objectif : comprendre les contraintes de développement et les enjeux futurs pour l'astronomie des hautes énergies.



energie atomique • energies alternatives

A. MEURIS

Formation IN2P3 – Du détecteur à la mesure – juin 2011

# LES DÉTECTEURS POUR L'ASTRONOMIE DES HAUTES ÉNERGIES – PARTIE 1

A- Interaction lumière-matière

B- Familles de détecteurs

C- Critères de performances d'un détecteur X ou gamma

7



energie atomique • energies alternatives

# INTERACTION LUMIÈRE-MATIÈRE

Effet photoélectrique

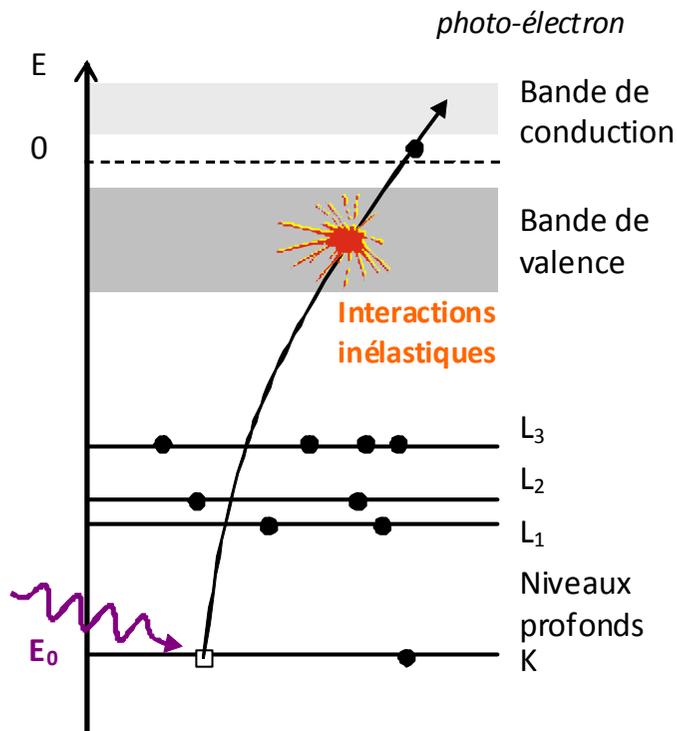
Diffusion Compton

Effet de paire

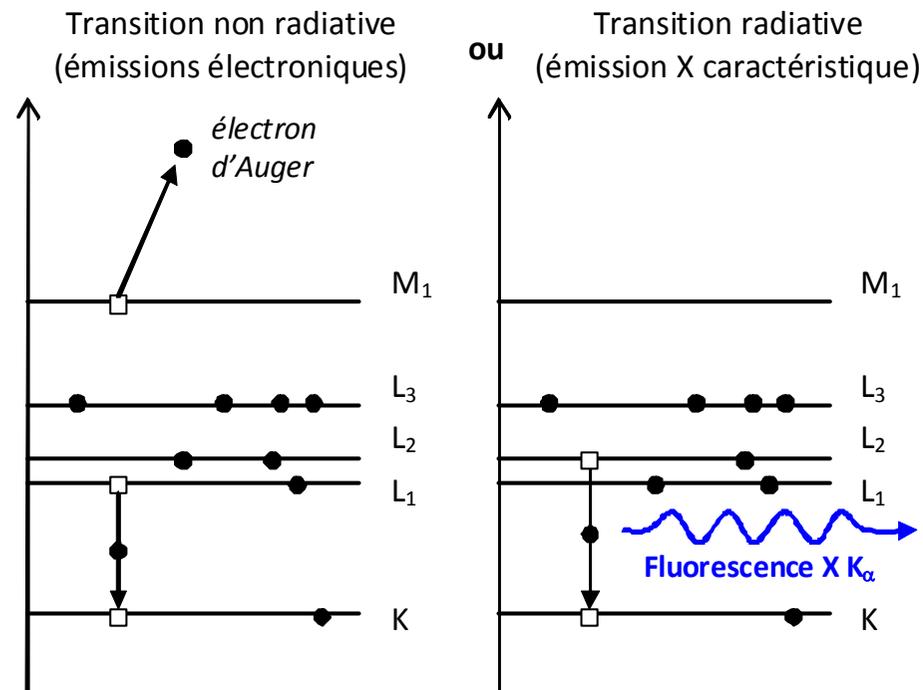
8

- **Absorption totale** du photon et libération d'un photo-électron d'énergie cinétique  $E_C = E_0 - E_L$
- L'énergie  $E_C$  est transférée à d'autres atomes qui ionisent à leur tour  
→ création d'un nuage de charges libres
- L'atome se désexcite et libère l'énergie  $E_L$  restante.

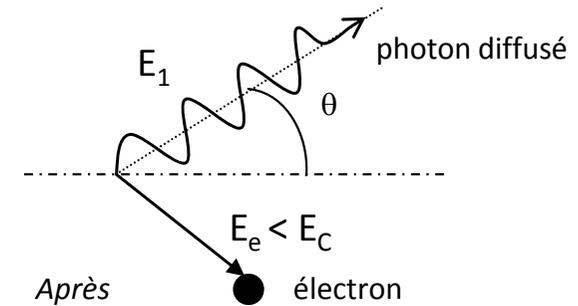
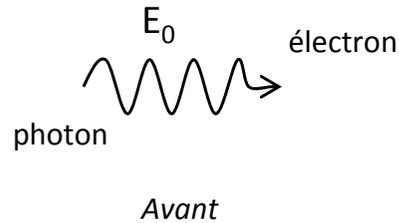
(a) Absorption du photon



(b) Réarrangement du cortège électronique



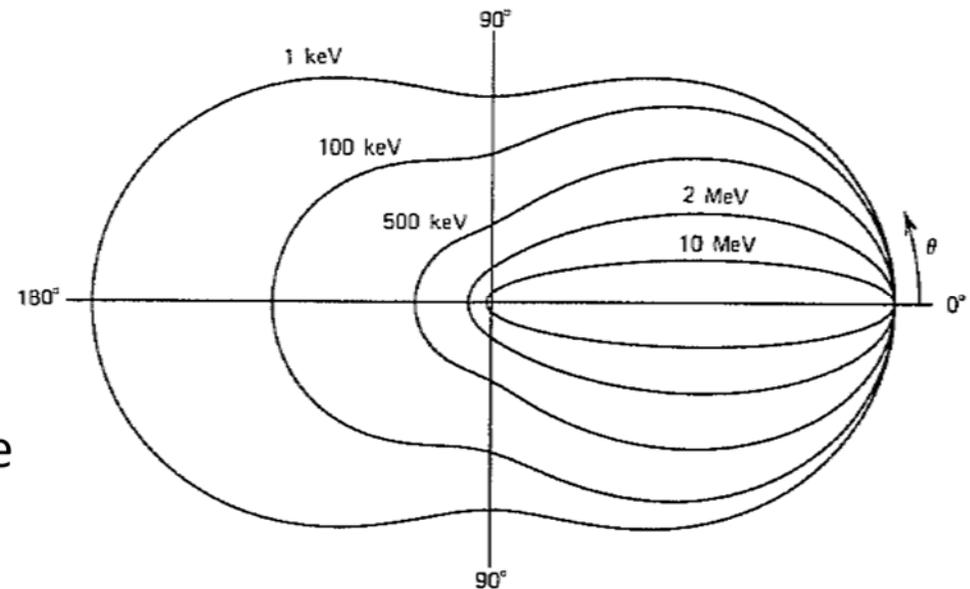
- Absorption partielle de l'énergie du photon



- Le photon diffusé a une énergie :

$$E_1 = \frac{E_0}{1 + \frac{E_0}{mc^2}(1 - \cos\theta)}$$

- Toutes les directions de diffusion ne sont pas équiprobables.
- L'électron « de recul » peut prendre toutes les énergies entre 0 et



$$E_C = \frac{E_0}{1 + \frac{mc^2}{2E_0}}$$

Énergie de front Compton

- Conversion de l'énergie du photon en **énergie de masse** et en énergie cinétique
  - Création d'une **paire électron-positon** si  $E_0 > 2.m c^2$  (1,022 MeV)
- L'électron et le positon perdent leur énergie progressivement leur énergie dans le milieu.
- Le positon finit par s'annihiler avec un électron du milieu en émettant **2 photons de 511 keV** dans des directions opposées.
  - Ces photons s'échapperont ou réagiront par effet photoélectrique ou Compton.

- Définition : surface apparente de la particule cible pour rendre compte de la probabilité d'interaction avec le photon.
- Expression : dépend du numéro atomique Z du matériau.

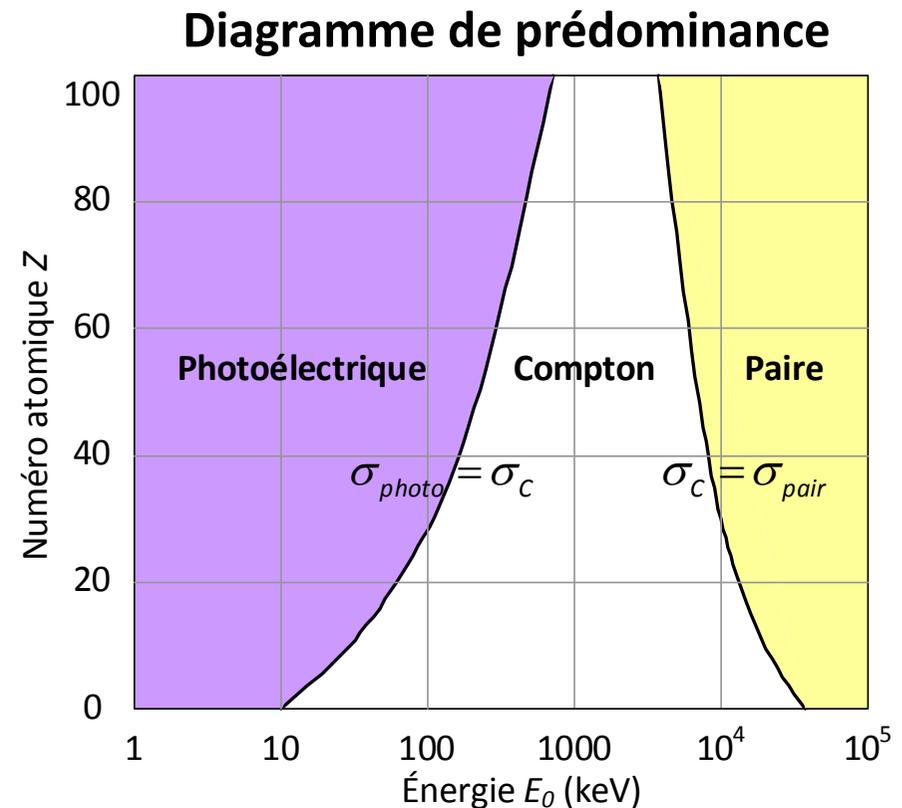
- $\sigma_{photo} \propto \frac{Z^{4,5}}{E_0^3}$

- $\sigma_C \propto \frac{Z}{E_0}$

- $\sigma_{pair} \propto Z^2$

- Section efficace totale d'un atome

- $\sigma_{tot} = \sigma_{photo} + Z \cdot \sigma_C + \sigma_{pair}$





energie atomique • energies alternatives

# LES FAMILLES DE DÉTECTEURS

Les détecteurs à ionisation

Les scintillateurs

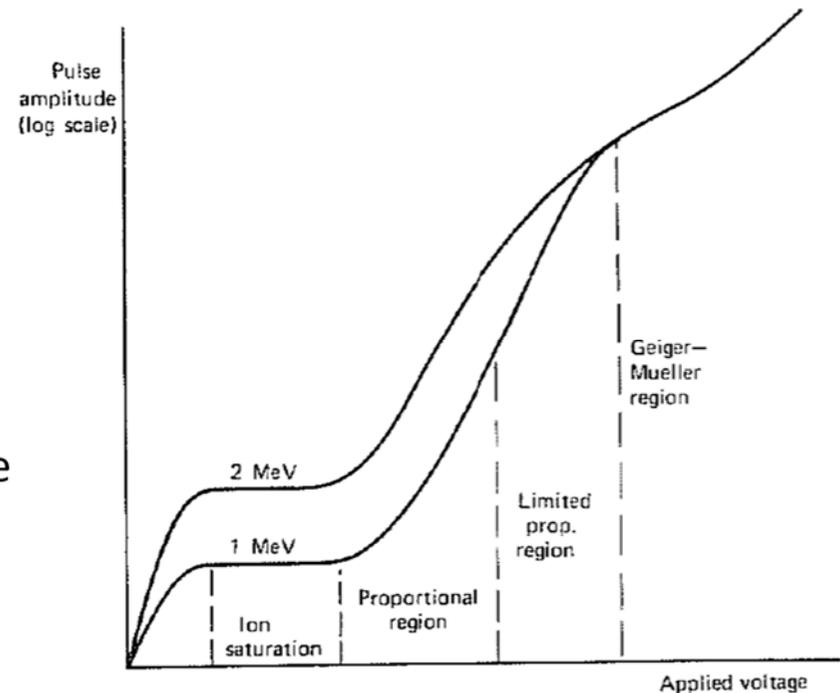
Les semiconducteurs

Les bolomètres

- Principalement des gaz (He, Ar, CH<sub>4</sub> ...) : chambres à ionisation
- Détection directe des électrons et ions d'ionisation (spectroscopie)

- **Chaîne de mesure :**

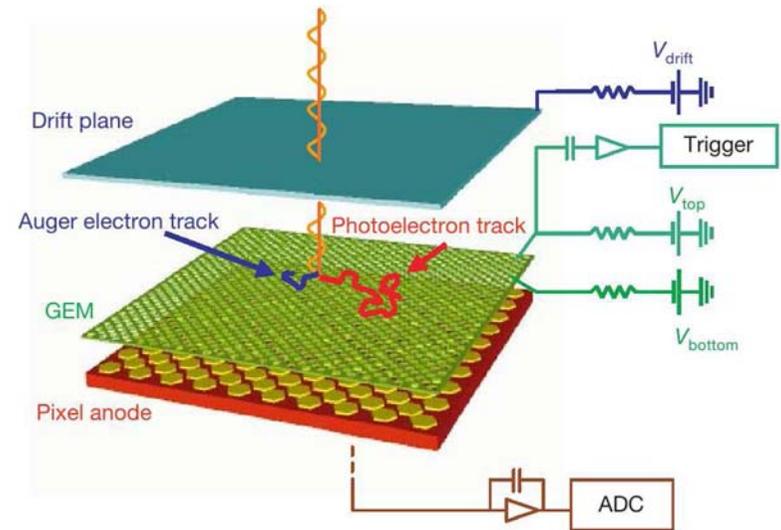
1. Création de paires ions-électrons par effet photoélectrique
2. Dérive des charges sous l'effet du champ électrique vers l'électrode de collection
3. Lecture du signal par l'électronique frontale



- La segmentation de l'anode et la mesure des temps d'arrivée permet de reconstituer des trajectoires des photoélectrons (imagerie, polarimétrie)
- *Gaz Electron Multiplier* (1997, Sauli) : région de fort champ électrique pour déclencher un phénomène d'avalanche créant un courant suffisamment élevé pour l'électronique.

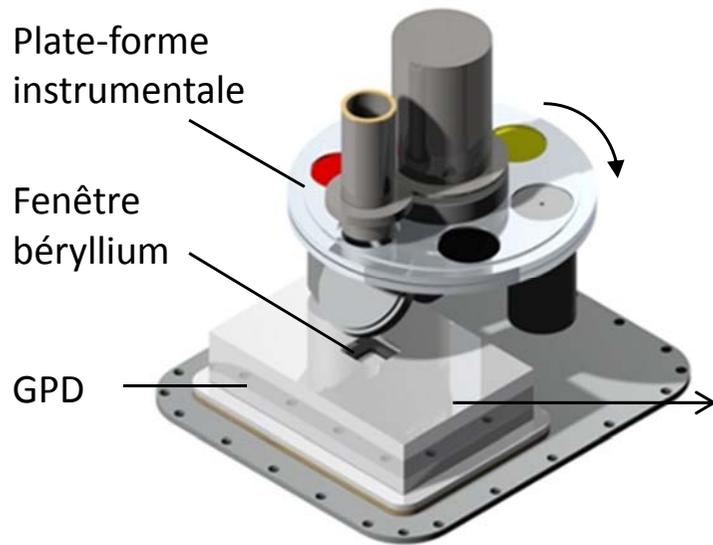
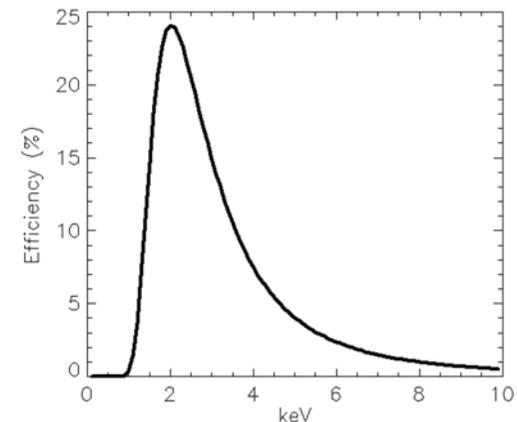
## ○ XPOL : X-ray polarimeter

- Développement pour IXO (International X-ray Observatory)
- Mélange de gaz  $\text{He}_{20}\text{-DME}_{80}$  sous 1 bar
- 105600 pixels au pas de  $50\ \mu\text{m}$
- Une voie de lecture par pixels (ASIC PIXI)



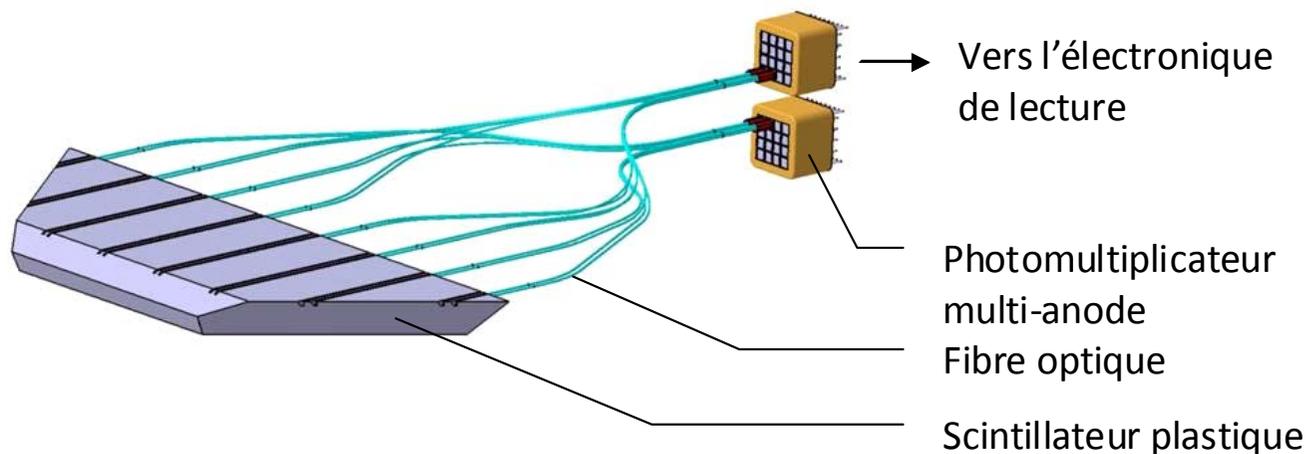
## ○ Performances

- Sensibilité de polarisation : 1 % MDP (1 mCrab, 100 ks)
- Résolution angle polarisation : 2° (1mCrab, P=10%)
- Résolution en énergie : 20% à 6 keV
- Efficacité :



## ○ Chaîne de mesure

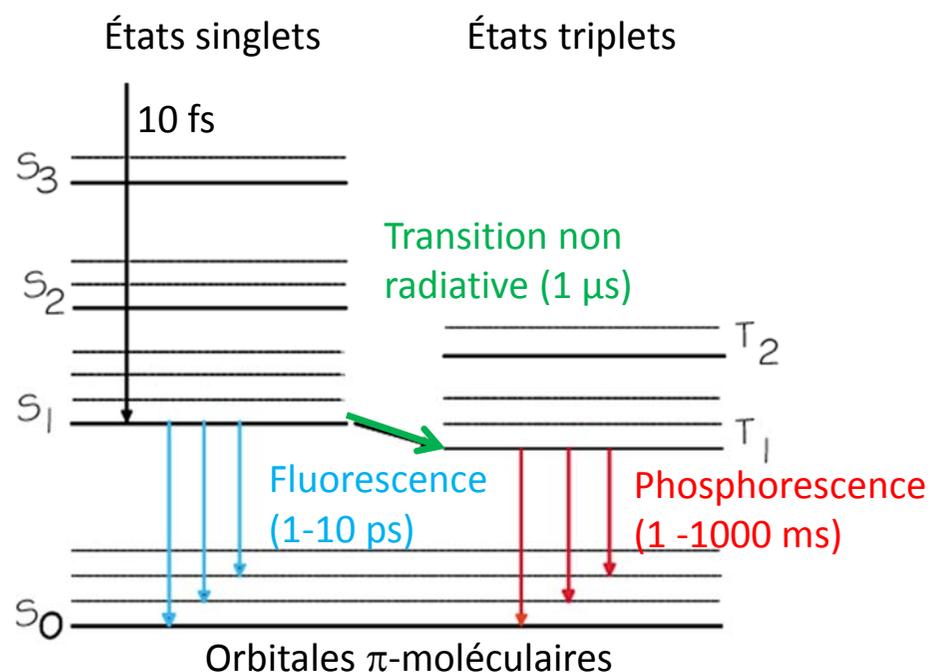
1. Conversion de l'énergie incidente en lumière visible ou UV.
  - L'atome excité par l'absorption du rayonnement se désexcite en émettant des photons de **fluorescence** (10 ps) ou **phosphorescence** ( $>1 \mu\text{s}$ ).
2. Conversion des scintillations en impulsions électriques par un **photomultiplicateur (PM)** couplé en direct ou par un guide d'onde.
3. Détection et la mesure de l'énergie par l'électronique frontale.



*Plaque pour le détecteur d'anticoïncidence de Simbol-X*

## Plastiques organiques

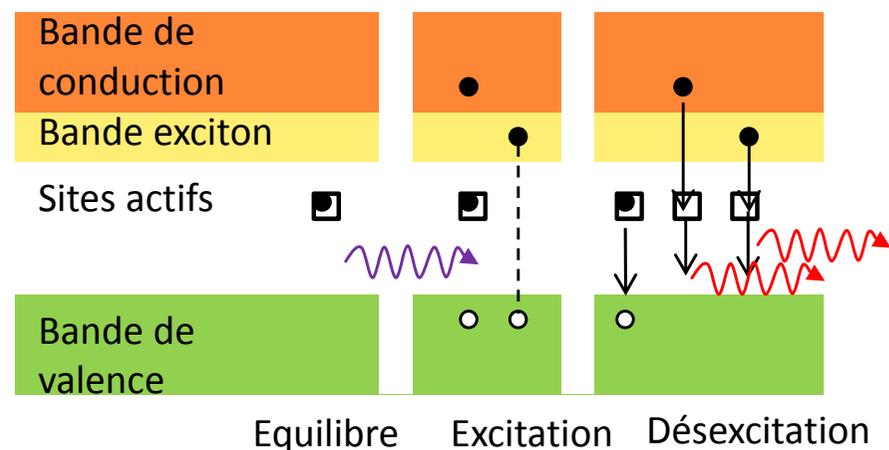
- Liquide scintillant (PBD, PBO, POPOP) dans solvant plastique solide.



- Signal très rapide (2-3 ns)
- Simple à fabriquer et mettre en œuvre
- **Système d'anticoïncidence**

## Cristaux inorganiques

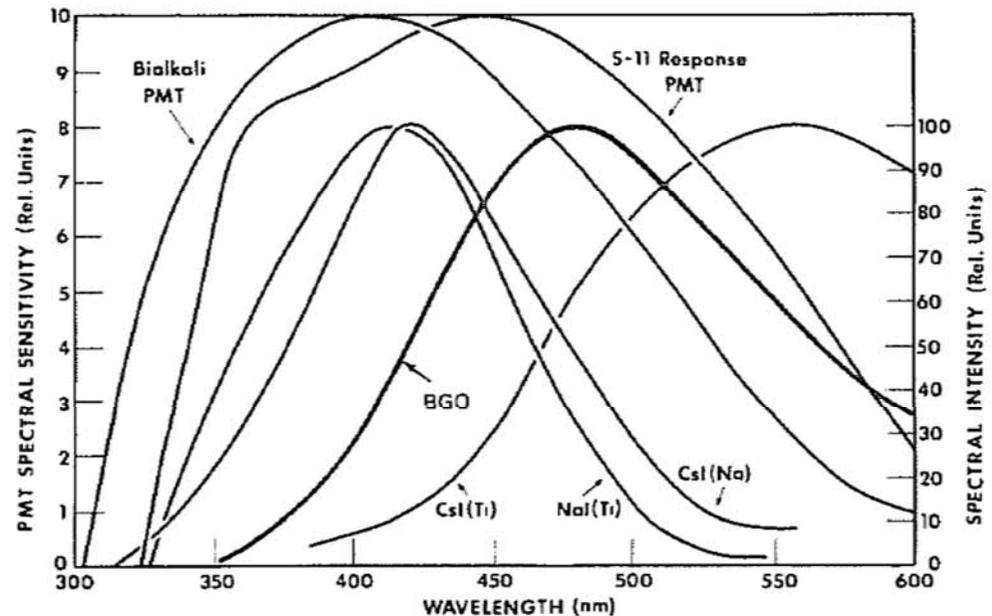
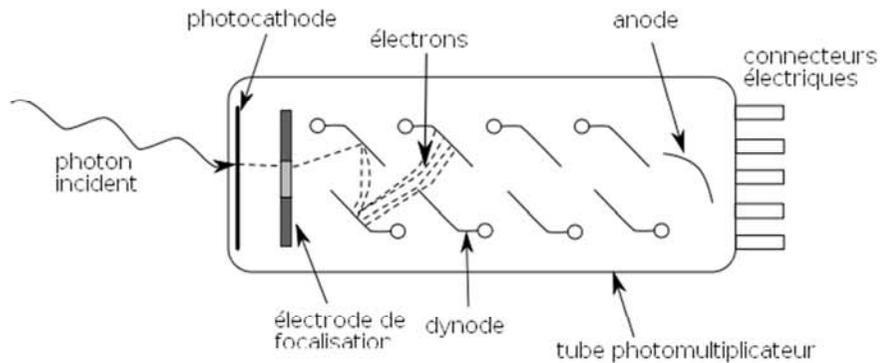
- Alcalins avec impureté d'activation NaI(Tl), CsI(Na) ou non alcalins  $Bi_4Ge_3O_{12}$  (BGO)



- Grand pouvoir d'arrêt
- Signal intense → bonne résolution en énergie
- **Spectroscopie gamma**

## ○ Principe

- Conversion des photons en électrons par la photocathode
- Création d'électrons secondaires en cascade sur les dynodes

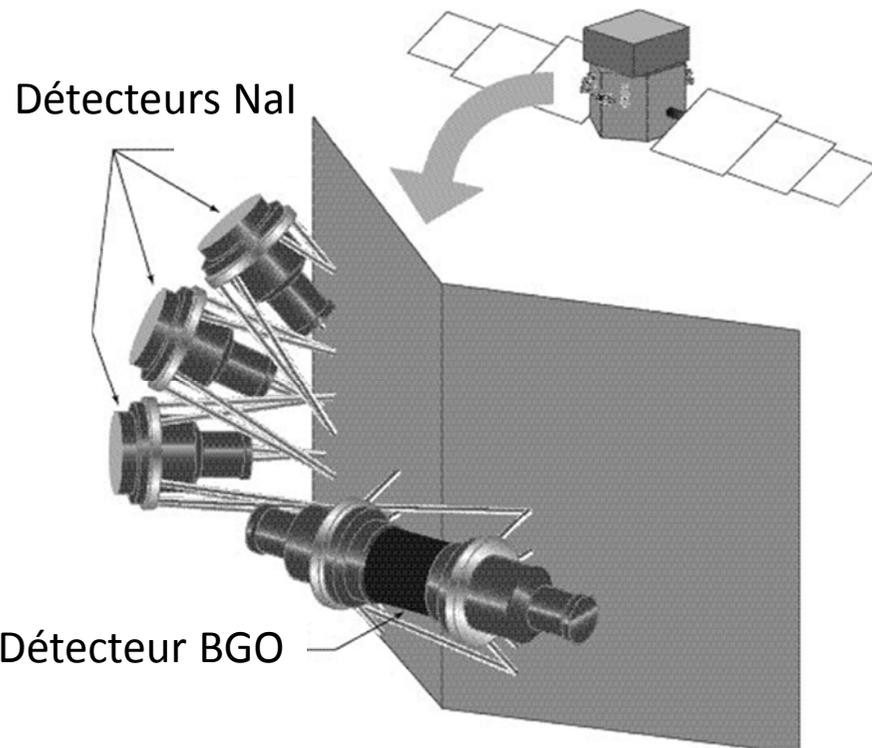


- Efficacité quantique de la photocathode typ. 20 e<sup>-</sup>/ph.
- Résolution temporelle < 1 ns
- Instabilité du gain (dérive, décalage)

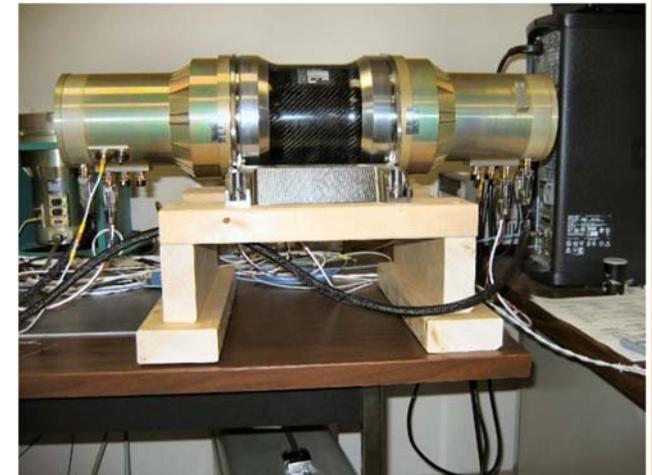
- GLAST Burst Monitor

- Champ de vue 8 sr
- Résolution spectrale : 12% FWHM à 511 keV
- Résolution temporelle : Temps mort 3  $\mu$ s/cp

Paramètres	NaI	BGO
Nombre total	12	2
Surface	126 cm <sup>2</sup>	126 cm <sup>2</sup>
Epaisseur	1,27 cm	12,7 cm
Bande d'énergie	8 keV-1 MeV	150 keV-40 MeV



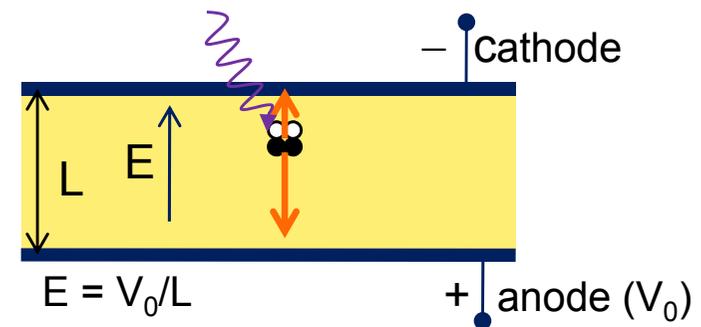
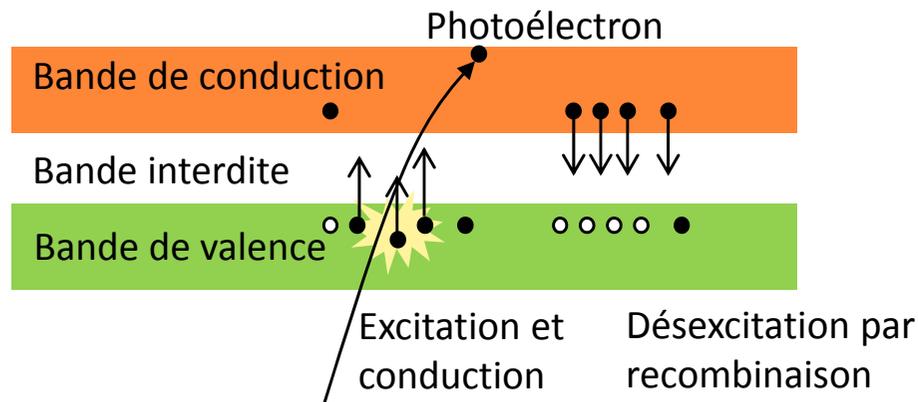
Modules de vol



Lancement de GLAST/FERMI en 2008

### ○ Structure de bande

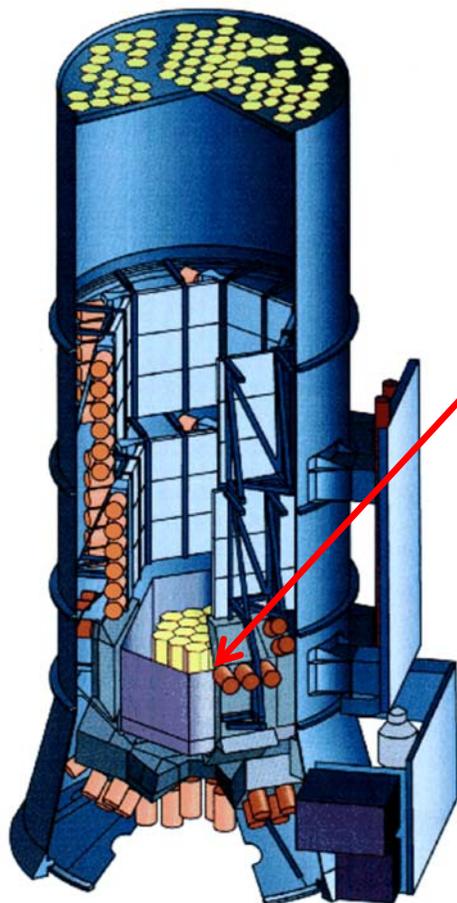
- Les lacunes laissées par les électrons dans la bande de valence peuvent être considérés comme des charges positives appelés **trous**.
- La conduction dans le matériau est assurée par le mouvement des électrons dans la bande de conduction et celui des trous dans la bande de valence.



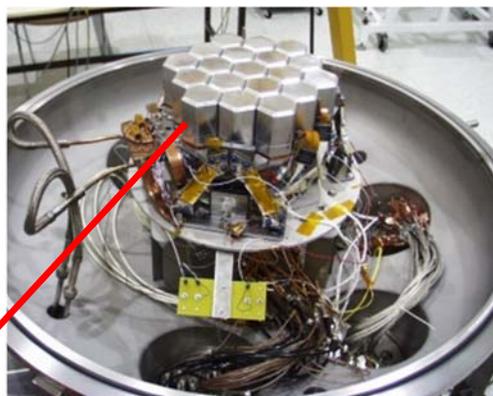
### ○ Chaîne de mesure analogue aux gaz à ionisation

1. Création de paires électrons-trous par effet photoélectrique.
2. Dérive des électrons vers l'anode et des trous vers la cathode.
3. Lecture du signal par l'électronique frontale.

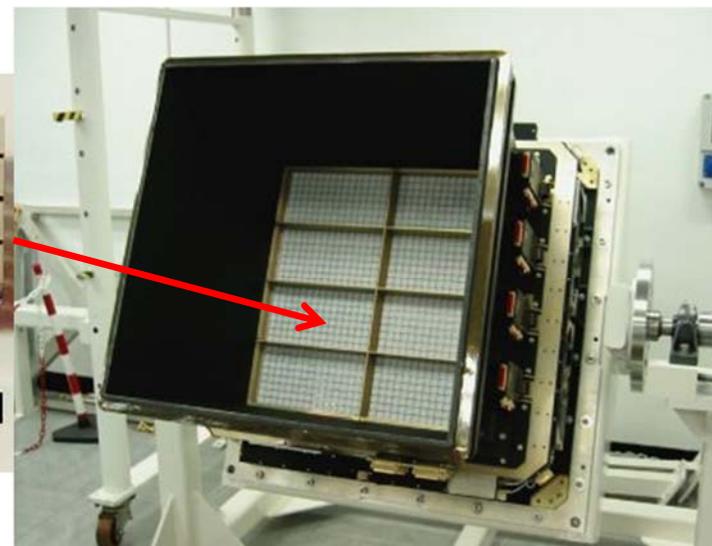
## Spectromètre SPI



Lancement  
INTEGRAL en 2001

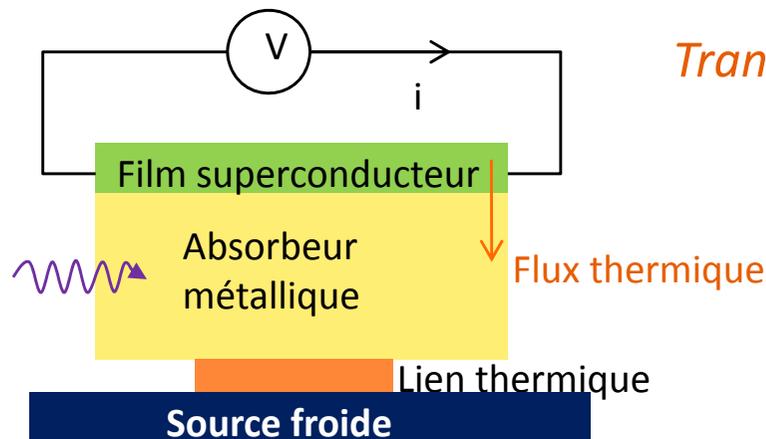


## ISGRI pour l'imageur IBIS

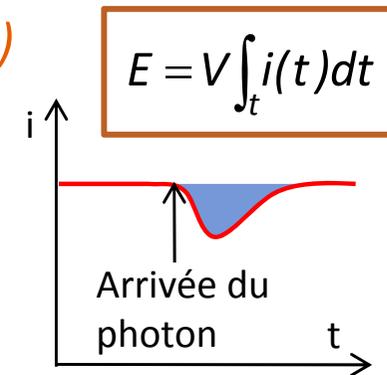
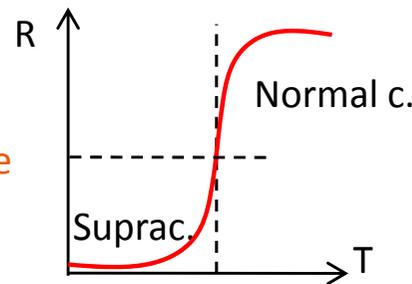


Paramètres	SPI	ISGRI
Semiconducteur	Ge haute pureté	CdTe
Nombre de détecteurs	19	16384
Surface totale	500 cm <sup>2</sup>	2600 cm <sup>2</sup>
Température	85 K	270 K
Bande d'énergie	18 keV-8 MeV	20 keV-1 MeV
Résolution en énergie	0,17 % à 1,33 MeV	8 % à 122 keV

- Bolomètre : tout instrument montrant un excès de température causé par l'absorption d'une particule incidente → nécessite un refroidissement  $< 1 \text{ K}$  : on parle de **microcalorimètre cryogénique**
- Chaîne de mesure classique
  1. Conversion de l'énergie du photon en impulsion de température par l'**absorbeur**.
  2. Conversion par la **thermistance** en contact en impulsion électrique détectable.
 → Limitation en taux comptage car désexcitation très lente (ms).
- Chaîne de mesure utilisant un thermomètre supraconducteur
  - Lorsque la température augmente, le **film supraconducteur** passe à l'état de conduction normale, ce qui provoque une brusque chute de courant détectable.

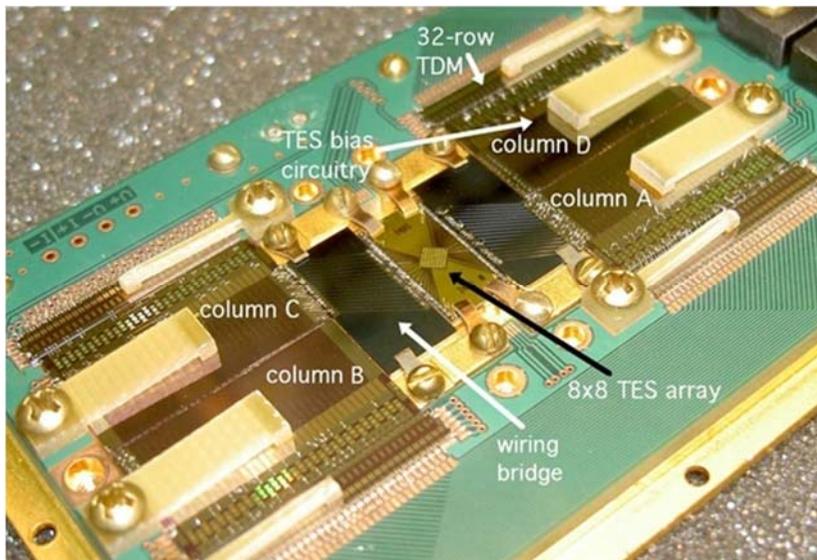


*Transition edge sensor (TES)*

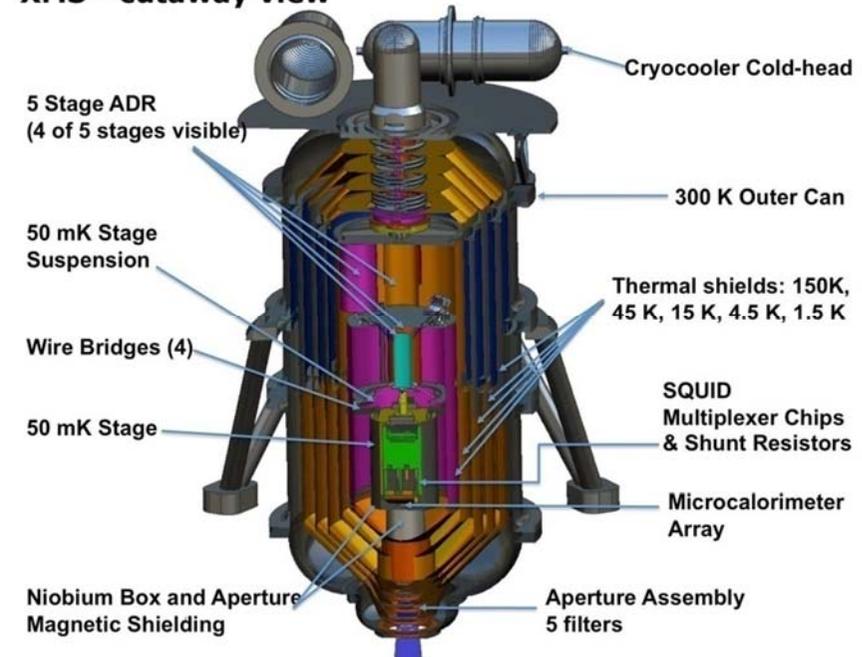


## ○ XMS (X-ray microcalorimeter spectrometer) pour IXO

- TES : Film superconducteur Mo/Au sur substrat Si
- Absorbeur : fils Au/Bi pixelisé
- Lecture par électronique de multiplexage à SQUID
- $40 \times 40$  pixels de  $300 \mu\text{m}$  au centre
- $52 \times 52$  pixels de  $600 \mu\text{m}$  autour



**XMS - cutaway view**



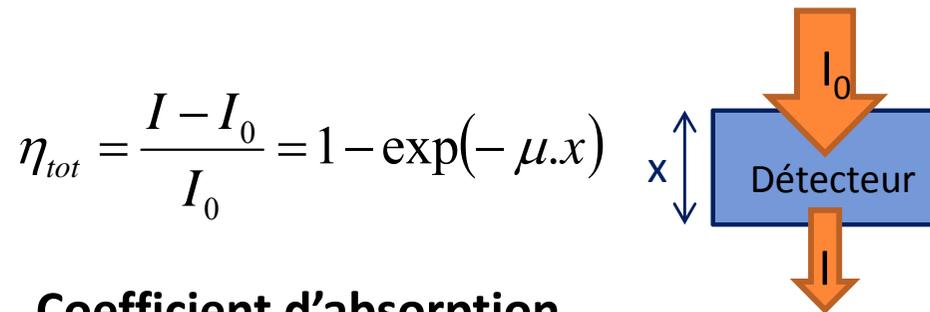
- Gamme d'énergie : 0,3 – 7 keV
- Résolution spectrale
  - 2,5 eV FWHM sur  $2 \times 2$  arcmin
  - 10 eV FWHM sur  $5 \times 5$  arcmin



# LES CRITÈRES DE PERFORMANCES

**Efficacité de détection**  
**Rendement quantique**  
**Résolution spatiale**  
**Résolution spectrale**  
**Capacité de comptage**  
**Capacité de polarimétrie**

- **Efficacité (intrinsèque) totale**  $\eta_{tot} = \frac{\text{Nombre d'événements détectés}}{\text{Nombre de quanta incidents}}$



- **Coefficient d'absorption**

$$\mu = \frac{\rho \cdot N_a \cdot \sigma}{A}$$

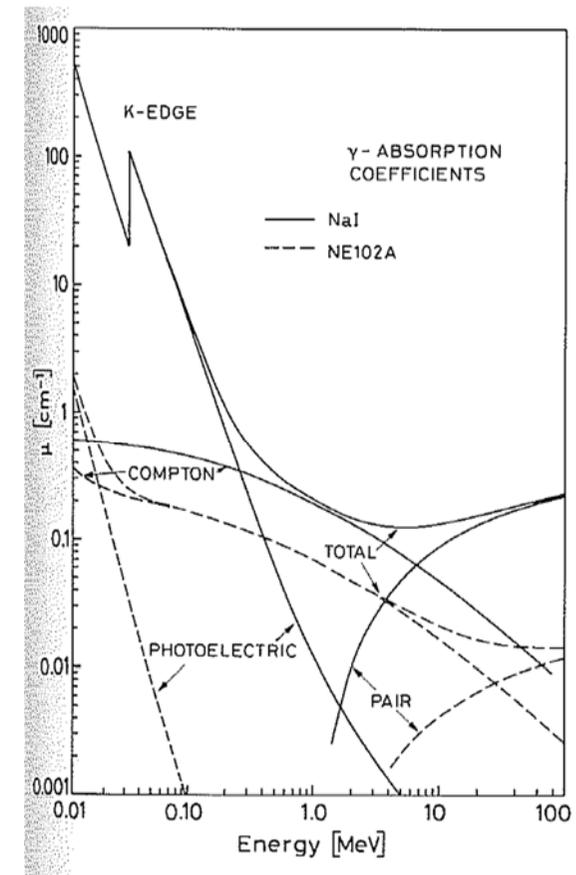
$\rho$  = Masse volumique  
 $N_a$  = nombre d'Avogadro  
 $\sigma$  = section efficace  
 $A$  = masse moléculaire

- Valeurs tabulées :

<http://www.nist.gov/pml/data/xraycoef/index.cfm>

- Pour les applications de spectroscopie (mesure de l'énergie), la grandeur la plus pertinente est l'efficacité dans le pic (**peak efficiency**)

$$\eta_P = \frac{\text{Nombre de quanta ayant totalement interagi}}{\text{Nombre de quanta incidents}}$$



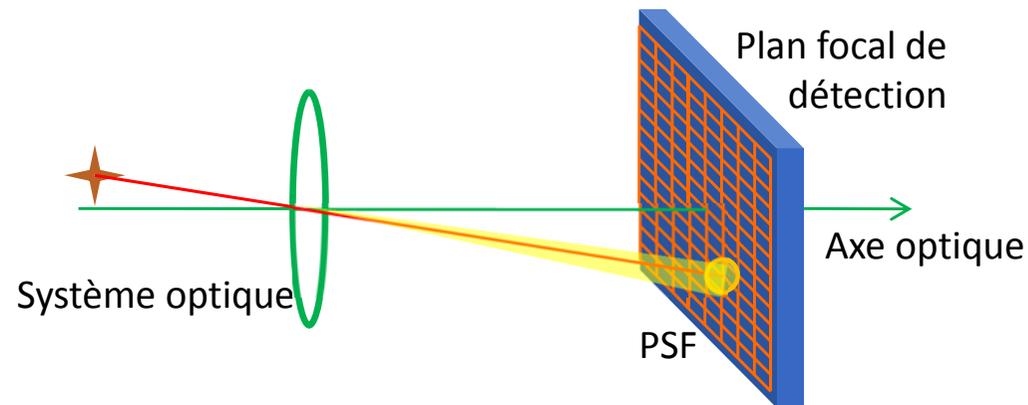
	Gaz à ionisation	Scintillateurs		Semiconducteurs	
Détecteur	Ar	Vinyltoluène	CsI	Si	CdTe
Numéro atomique	18	12	53, 55	14	48,52
Masse volumique $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,78 (1bar)	1,032	4,5	2,33	5,85
Coefficient $\mu/\rho$ d'absorption totale à 10 keV (cm <sup>2</sup> /g)	63,2	2,20	171	33,9	138
Epaisseur pour une efficacité totale de 90% à 100 keV	2,9 mm	6,2 mm	120 $\mu$ m	2,5 mm	110 $\mu$ m

- Généralement exprimé en sensibilité (inverse du gain) : **énergie minimale pour produire un signal  $\varepsilon$  (eV)**
- Gaz : énergie de création de paire électron-ion
- Semiconducteur : énergie de création paire électron-trou
- Scintillateur :
  - énergie de création de photon (anthracène 60 eV/photon)
  - **Rendement quantique** de la photocathode du PM =  $\frac{\text{Nb d'électrons produits}}{\text{Nb de quanta incidents}}$

@300 K	Gaz à ionisation		Scintillateurs			Semiconducteurs	
Détecteur	He	Ar	Plastique	BGO	Bialkali PMT	Si	CdTe
Sensibilité $\varepsilon$	41 eV	26 eV	100 eV/ph	300 eV/ph	QE = 26 %	3,63	4,42
Gain@10keV	244 e-	385 e-	26 e-	8,7 e-		2754 e-	2262 e-

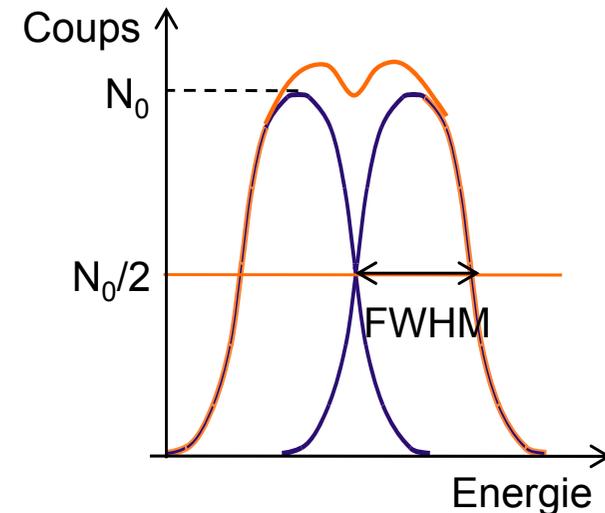
- Le gain augmente généralement avec la température.

- **Plus petite différence mesurable de position** (en 1,2 ou 3 dimensions) d'interaction dans le détecteur.
- Doit permettre d'échantillonner la tâche focale (PSF) du système optique pour ne pas dégrader la résolution angulaire du télescope.



- La résolution spatiale est limitée par des contraintes :
  - Physiques : phénomène de diffusion des charges
  - Techniques : procédé de pixellisation, nombre de chaînes de mesure
    - pixellisation sur du silicium jusqu'à 15  $\mu\text{m}$ .
    - pixellisation sur du CdTe jusqu'à 100  $\mu\text{m}$ .

- Plus petite différence d'énergie mesurable.
- Largeur à mi-hauteur d'une raie
  - *FWHM* : full width at half maximum
- Pour une raie gaussienne :  $FWHM = 2,35 \sigma$
- Dans les gaz et les semiconducteurs, la statistique d'ionisation suit une loi de type Poisson avec un facteur supplémentaire nommé facteur de Fano.
  - Typiquement  $F = 0,15$
  - Variance de charges créées :  $\Delta N^2 = F \cdot N$

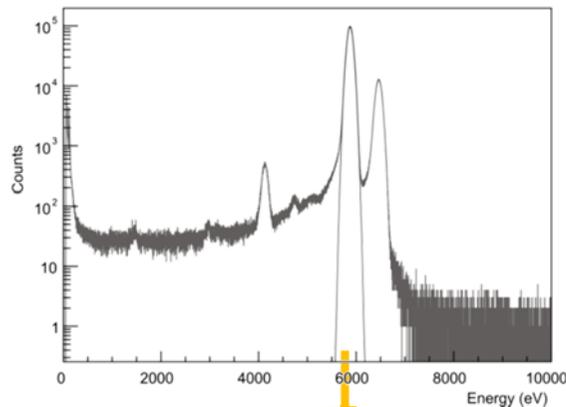


$$\Delta E_{stat} (eV) = 2,35 \cdot \sqrt{F \cdot \varepsilon \cdot E_{\gamma}}$$

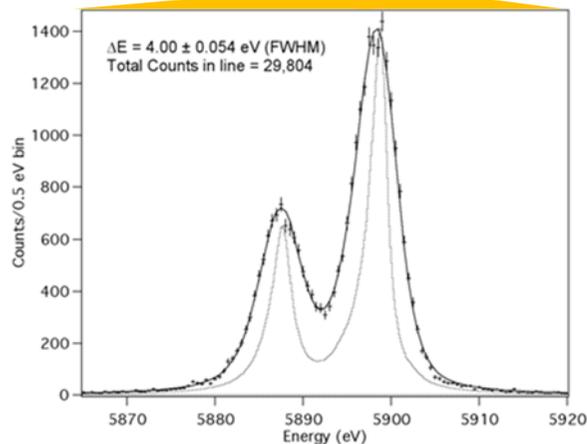
$$\frac{\Delta E_{stat}}{E_{\gamma}} (\%) = 2,35 \cdot \sqrt{\frac{F \cdot \varepsilon}{E_{\gamma}}}$$

## Spectroscopie X

- Résolution à 5,9 keV (Mn-K $\alpha$ )
  - Gaz : 885 eV (15 %)
  - Si : **123 eV** (2%)
  - TES : **3 eV** (0,05%)



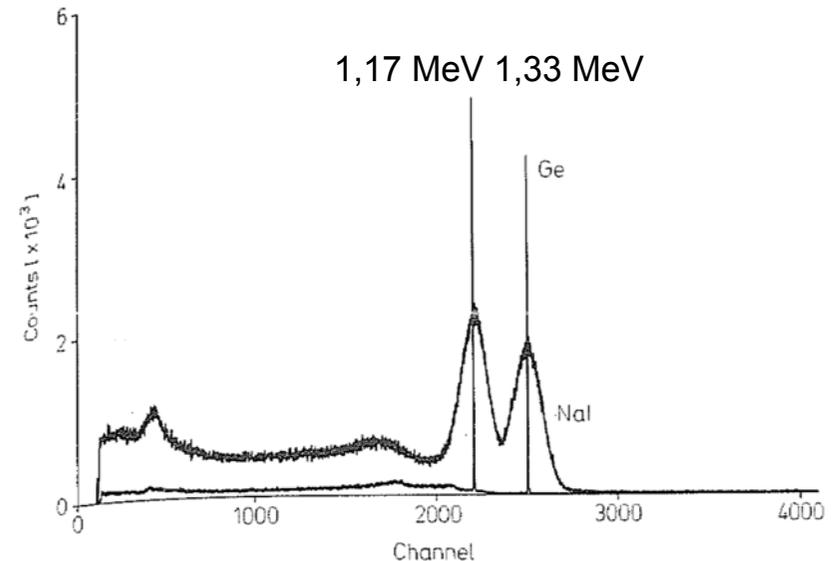
Si DEPFET  
(MPE HLL)  
125 eV @ MnK $\alpha$



SXS Astro-H  
(Jaxa/Nasa)  
4 eV @ MnK $\alpha$

## Spectroscopie gamma

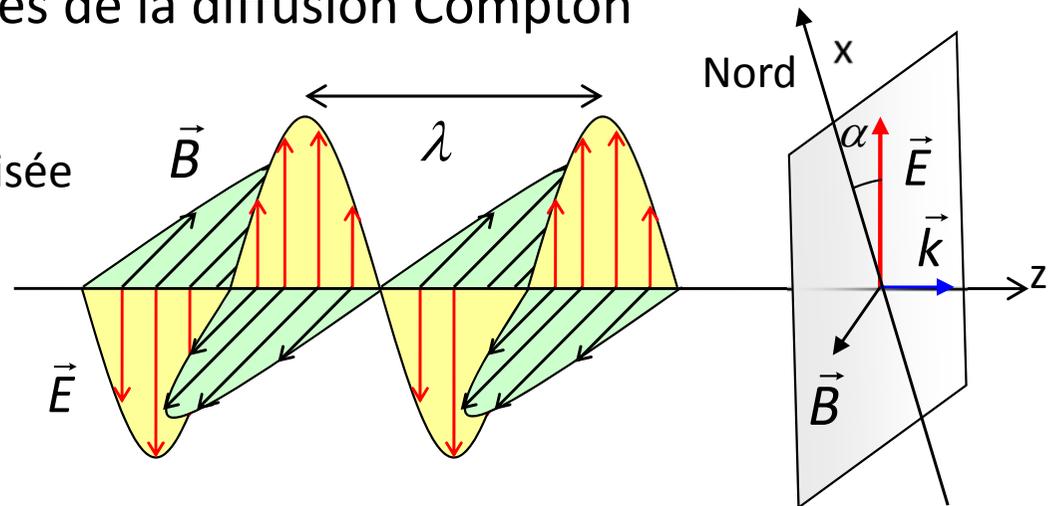
- Résolution à 1,33 MeV (Co60- $\gamma$ )
  - Ge : 2 keV (0.15 %)
  - NaI : > 5 %
  - BGO : 10 %



- Nombre maximal d'événements détectable par unité de temps
  
- Dépend de toute la chaîne de mesure
  - Temps de désexcitation du détecteur
  - Temps de collection du signal (dérive des charges dans le champ électrique)
  - Temps de filtrage de l'électronique frontale (pour minimiser le bruit)
  - Temps de lecture/acquisition/traitement (taille du système)
  
- Ordre de grandeur
  - Bolomètre TES :  $10^3$  cps/s
  - Gaz à ionisation :  $10^4$  cps/s
  - Semiconducteur :  $10^5$  cps/s
  - Scintillateur + PM :  $10^7$  cps/s

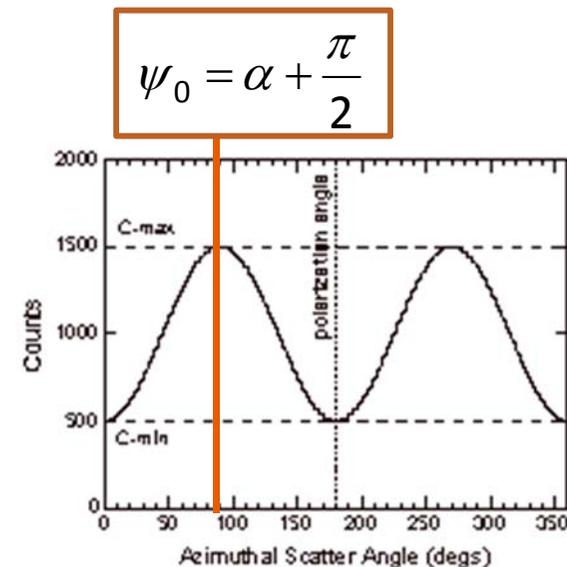
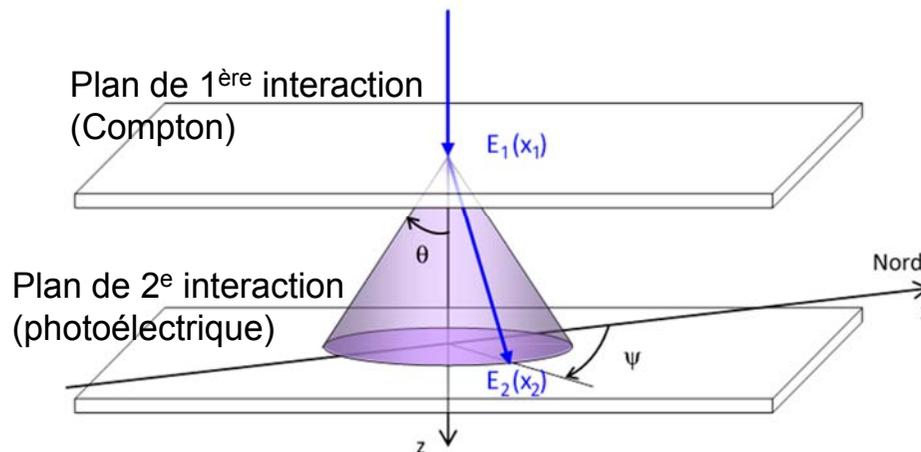
- Détection basée sur les propriétés de la diffusion Compton

- Supposons une onde 100 % polarisée linéairement d'angle  $\alpha$ ,



- La distribution des valeurs d'angle azimutal n'est pas uniforme :

$$N(\psi) = S \left[ 1 + \mu_{100} \cos(2\psi - 2\psi_0) \right]$$



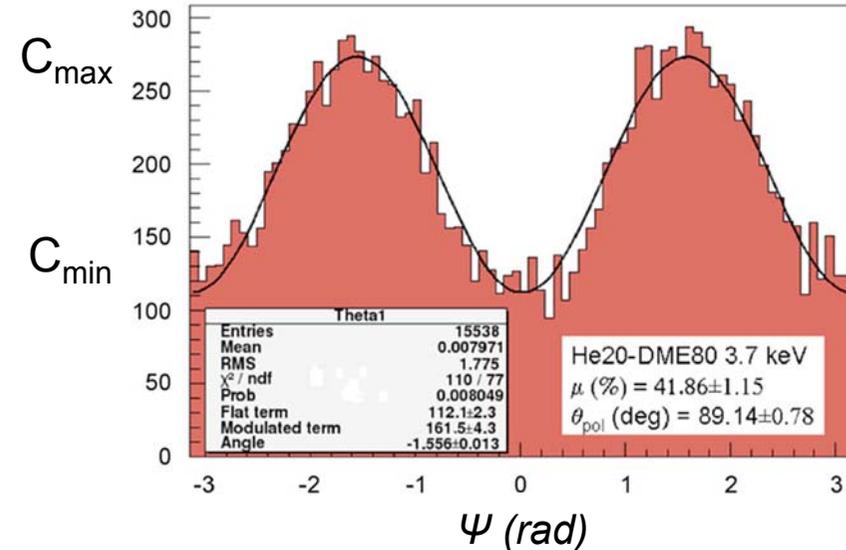
- Facteur de modulation  $\mu_{100}$  :  
Amplitude de modulation  $\mu$   
lorsque la source est polarisée à 100%.

$$\mu = \frac{C_{\max} - C_{\min}}{C_{\max} + C_{\min}}$$

- Polarisation détectable minimale

- $n_\sigma$  niveau de confiance, S et B taux de comptage de la source et du fond, T temps d'observation

$$MDP = \frac{n_\sigma}{\mu_{100}} \sqrt{\frac{S+B}{T}}$$



Type de détecteur	Gaz à ionisation He-DME	Scintillateur NaI	Semiconducteur CdTe
Expérience	XPOL (Bellazini)	POLAR	POLCA (Da Silva)
Gamme d'énergie	2-10 keV	50-250 keV	100-400 keV
Facteur modulation	0,4 à 4 keV	0,4 à 150 keV	0,35 à 300 keV
MDP	1%, 100 ks		35 %

- La mesure de l'énergie des photons X et gamma est basée sur l'effet photoélectrique qui produit un signal proportionnel à l'énergie.
- La diffusion Compton permet une mesure de polarisation de la lumière X ou gamma.
- Plusieurs familles de détecteurs pour plusieurs applications :
  - Spectroscopie et imagerie X : semiconducteurs Si (CdTe),
  - Spectroscopie X : microcalorimètre TES,
  - Spectroscopie gamma : semiconducteur Ge (scintillateur NaI, CsI),
  - Polarimétrie X : gaz à ionisation,
  - Polarimétrie gamma : semiconducteur CdTe, scintillateur,
  - Détecteur d'anticoïncidence (voir partie 3): scintillateur plastique, BGO.

- Quelle est l'énergie du front Compton d'un photon de 662 keV (Cs 137) ?

$$E_C = \frac{E_0}{1 + \frac{mc^2}{2E_0}} = \frac{662}{1 + \frac{511}{2 \times 662}} = 478 \text{ keV}$$

- Quelle épaisseur de CsI (resp. CdTe) faut-il utiliser pour une efficacité de 25 % à 1 MeV ?  $\mu/\rho = 0,0585$  (resp. 0,0574)

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{\mu}{\rho} \cdot \rho \cdot x\right) \Rightarrow x(\text{CsI}) = \frac{-\ln(1-\eta)}{\frac{\mu}{\rho} \cdot \rho} = \frac{-\ln 0,75}{0,0585 \times 4,5} = 1,09 \text{ cm} \quad x(\text{CdTe}) = 8,6 \text{ mm}$$

- Combien d'électrons produit l'absorption totale d'un photon de 1,33 MeV (Co 60) dans un BGO couplé parfaitement à un PM de rendement quantique 20 % ?

$$1,33 \cdot 10^6 \text{ eV} \Rightarrow 4433 \text{ photons} \Rightarrow 887 \text{ électrons}$$

- Quelle est la résolution spectrale limite du silicium à 5,9 keV ? ( $F = 0,12$ )

$$\Delta E_{stat} (\text{eV}) = 2,35 \cdot \sqrt{F \cdot \varepsilon \cdot E_\gamma} = 2,35 \cdot \sqrt{0,12 \times 3,63 \times 5900} = 119 \text{ eV FWHM}$$



## LES DÉTECTEURS POUR L'ASTRONOMIE DES HAUTES ÉNERGIES – PARTIE 2

- A- La formation du signal dans les détecteurs semiconducteurs
- B- La mesure du signal par l'électronique associée
- C- Les techniques de mesure de la position d'interaction

# LA FORMATION DU SIGNAL DANS LES DÉTECTEURS SEMICONDUCTEURS

Propriétés de transport des porteurs de charges

Génération et recombinaison

Détection du signal

Collection du signal

Imperfections du signal

Synthèse des paramètres critiques

- Les charges migrent sous l'effet d'un champ électrique.
  - Vitesse de dérive

$$\vec{v}_p = \mu_p \cdot \vec{E} \quad ; \quad \vec{v}_n = -\mu_n \cdot \vec{E}$$

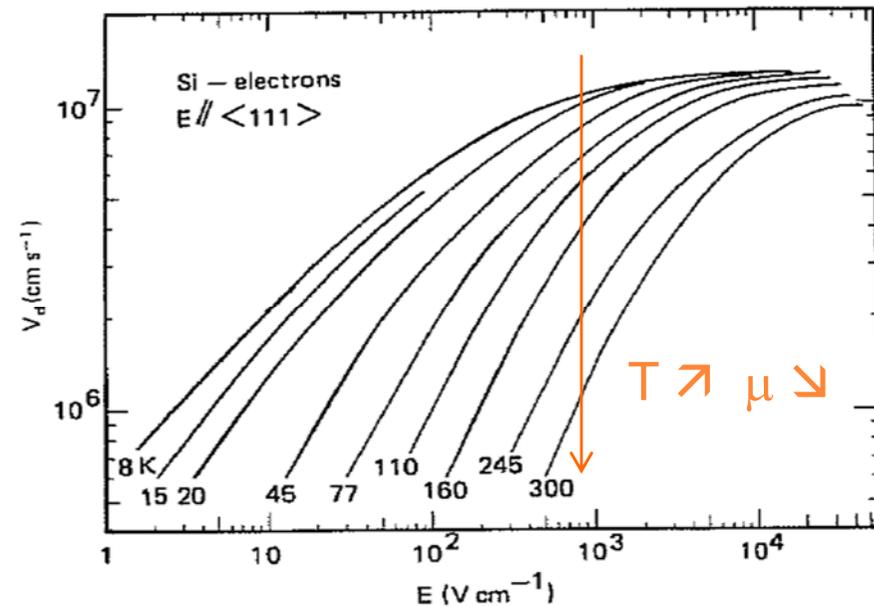
- La **mobilité**  $\mu$  dépend de la température et de la concentration de dopage (imperfections du réseau cristallin).

$$\mu \propto T^{-m}$$

- **Courant de dérive** :

$$J_{drift} = \rho \cdot v = (q \cdot n \cdot \mu_n + q \cdot p \cdot \mu_p) \cdot E = \sigma \cdot E$$

$$q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$



- Une distribution inhomogène des charges dans le matériau provoque un courant de diffusion.

$$J_n = D_n \cdot \overrightarrow{\text{grad}} n = D_n \cdot \frac{dn}{dx} \quad (\text{Cas 1D})$$

$$J_p = D_p \cdot \overrightarrow{\text{grad}} p$$

- Coefficient de diffusion (équations d'Einstein)

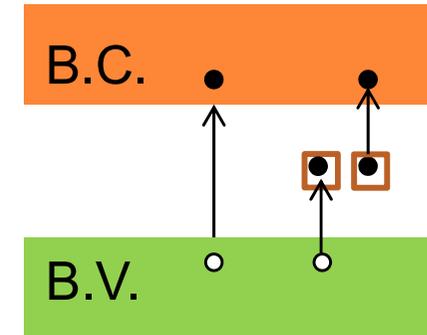
$$J_n = \frac{kT}{q} \cdot \mu_n \quad ; \quad J_p = \frac{kT}{q} \cdot \mu_p \quad k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{J.K}^{-1}$$

- Un nuage de charge initialement ponctuel a au bout d'un temps  $t$  une répartition spatiale pouvant être modélisé par une Gaussienne de variance :

$$\sigma_t^2 = 2 \cdot D \cdot t$$

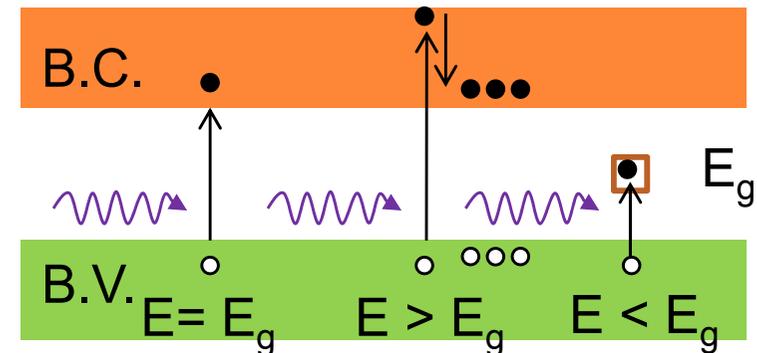
### ○ Génération thermique

- Excitation directe ou indirecte
- Source de bruit pour les détecteurs



### ○ Génération par rayonnement électromagnétique

- Signal pour les détecteurs
- UV: paire électron-trou ( $e/h$ ) unique
- X, gamma: nuage de charges ponctuel

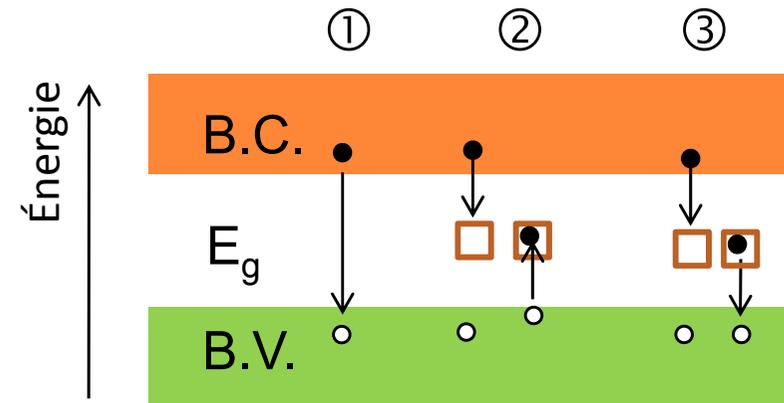


### ○ Génération par des particules chargées

- Electrons relativistes : densité uniforme de paires  $e/h$  le long de la trajectoire.
- Proton, ion : densité d'ionisation inversement proportionnelle à l'énergie de la particule (qui décroît le long de la trajectoire).

- Retour à l'équilibre après la création d'un excès de porteurs de charge.

- *Semiconducteurs directs* (GaAs): recombinaison entre un trou de la bande de valence et un électron de la bande de conduction.
- *Semiconducteurs indirects* (Si, Ge) : recombinaison en 2 temps en utilisant les centres de recombinaison de la bande interdite.



1. Recombinaison directe
2. Capture par un site actif
3. Piégeage / dépiégeage

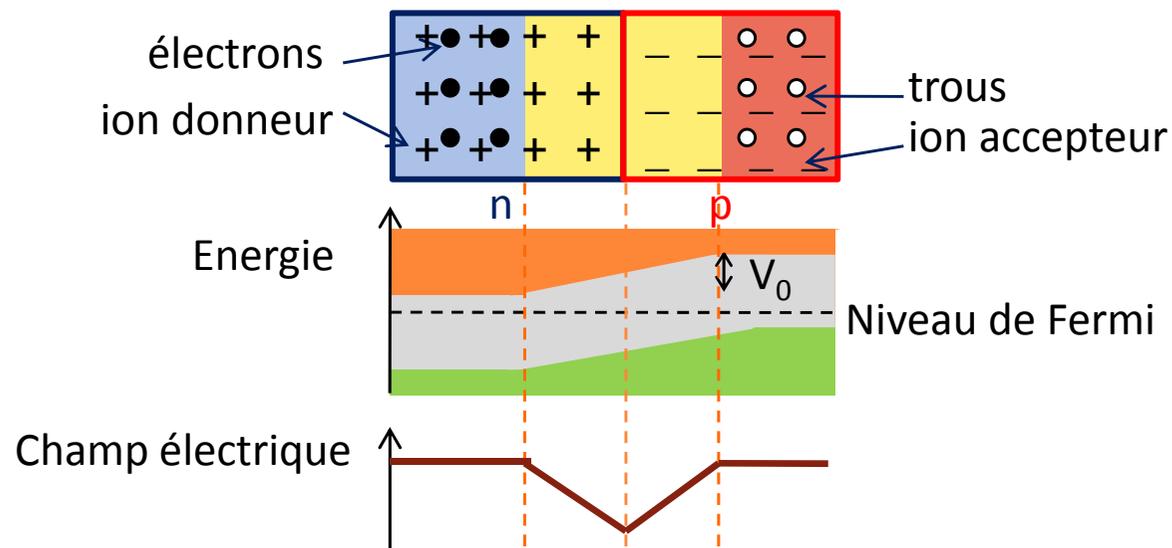
- **Durée de vie  $\tau$**  : temps caractéristique de recombinaison

- Dépend de la concentration en dopants/ impuretés

## ○ Jonction pn

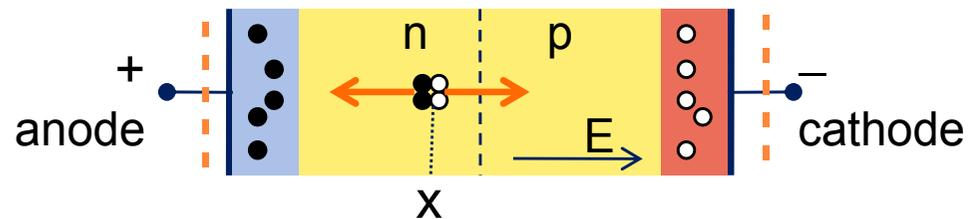
→ diode Ge(Li), Si(Li)

- Diffusion et recombinaison des porteurs de charges
- Interface vide de porteurs libres (non neutre) : zone de déplétion = zone charge d'espace
- Présence d'un **champ électrique** : zone sensible à la détection des radiations



- Principe des détecteurs semiconducteurs : création d'une zone déplétion la plus large possible.

- La dérive de charge dans un milieu équipé d'électrodes crée une charge image sur celles-ci appelée **charge induite**.



- Le signal ne se forme pas au moment où les charges atteignent les électrodes mais dès le début de leur trajet.
- Théorème de Schockley-Ramo** : courant induit sur l'électrode k

$$I_{ind}^k = Q \vec{E}_W^k(\vec{x}) \cdot \vec{v}(\vec{x})$$

- $E_W^k$  champ de pondération, champ si  $V_k = 1V$  et  $V_{i \neq k} = 0V$

- Charges libres excitées thermiquement qui migrent sous l'effet du champ électrique.

$$I = q.(n\mu_n + p\mu_p).E.S$$

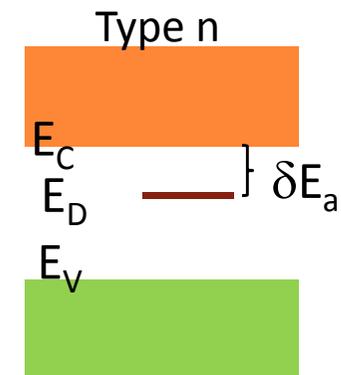
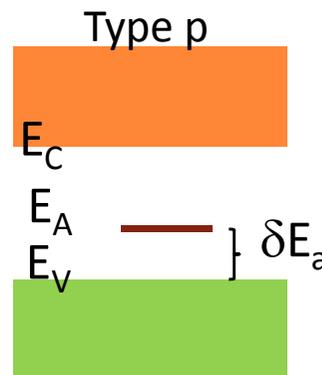
- Semiconducteurs dopés (type n / type p):

$$I_n = q.N_D.\mu_n.E.S \quad ; \quad I_p = q.N_A.\mu_p.E.S$$

- Semiconducteurs quasi-intrinsèques (de haute pureté ou compensés)

$$I_d = I_0.\exp\left(-\frac{\delta E_a}{kT}\right)$$

$\delta E_a$  : énergie d'activation

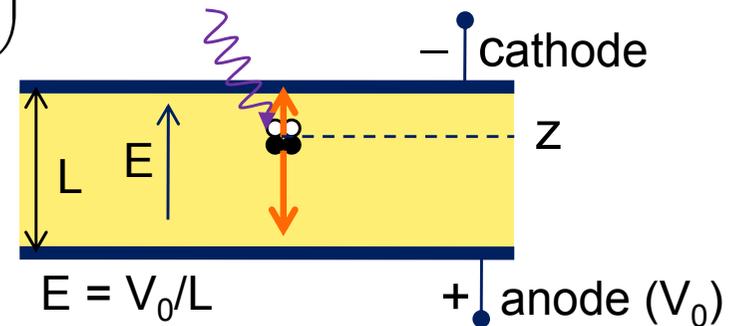


- Evolution des concentrations due à la recombinaison et au piégeage
  - Hypothèses: champ uniforme, pas de dépiégeage, pas de diffusion

$$n(t) = N \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_n}\right) ; \quad p(t) = N \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_p}\right)$$

- Temps de transit

$$t_n = \frac{L-z}{\mu_n E} ; \quad t_p = \frac{z}{\mu_p E}$$



- Charge induite
  - Relation de Hecht

$$\frac{Q}{Q_{tot}} = \frac{V_0}{L^2} \left[ \mu_n \tau_n \left( 1 - \exp\left(-\frac{t_n}{\tau_n}\right) \right) + \mu_p \tau_p \left( 1 - \exp\left(-\frac{t_p}{\tau_p}\right) \right) \right]$$

Paramètre	Impact	Si intrinsèque	Ge intrinsèque	CdTe compensé p
Numéro atomique	Efficacité	14	32	48,52
Densité	Efficacité	2,33	5,32	5,85
Energie de création de paires $\varepsilon$ (eV)	Rendement quantique	3,63	2,96	4,42
Facteur de Fano F	Résolution en énergie	0,115	0,13	0,15
Mobilité à 300 K (cm <sup>2</sup> /V/S)	Temps de transit	$\mu_n = 1500$ $\mu_p = 500$	$\mu_n = 3900$ $\mu_p = 1800$	$\mu_n = 1000$ $\mu_p = 80$
Durée de vie	Perte de charge	2,5 ms	~1 ms	$\tau_n = 1,2 \mu s$ $\tau_p = 4,8 \mu s$
Résistivité à 300 K ( $\Omega \cdot cm$ )	Courant d'obscurité	$2,3 \cdot 10^5$	47	$3 \cdot 10^{10}$

<http://www.siliconfareast.com/sigegaas.htm>

# LA MESURE DU SIGNAL PAR L'ÉLECTRONIQUE ASSOCIÉE

Electronique de détection

Préamplificateur de charge

Filtrage

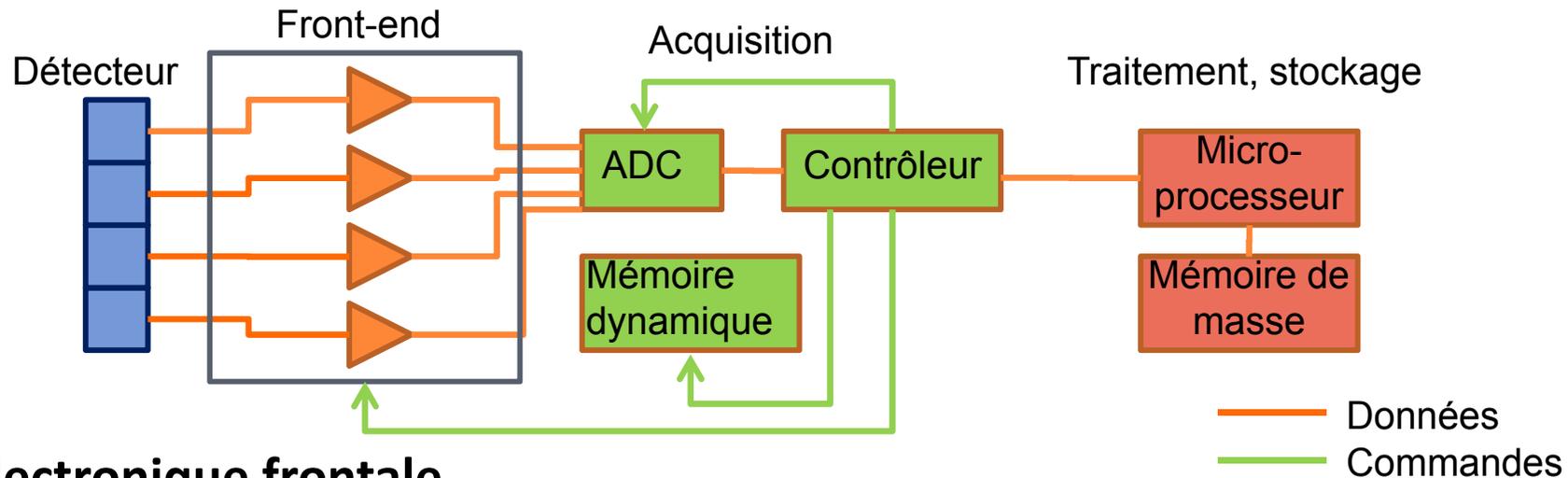
Chaîne de discrimination

Bruit électronique

Hybridation

Paramètres de performances d'une électronique

47



### ○ **Electronique frontale**

- Mise en forme du signal pour rendre possible la mesure
- Au plus proche du détecteur, généralement analogique (*analog front-end*)
- ASIC (*application specified integrated circuit*)

### ○ **Electronique de lecture**

- Acquisition des informations utiles (encodage)
- Contrôleur souvent réalisé avec un FPGA (*field programmable gate array*),

### ○ **Electronique de traitement**

- Fonctions numériques complexes (*digital processing*)
- Microprocesseur : DSP (*digital signal processor*)

- Préamplificateur de tension

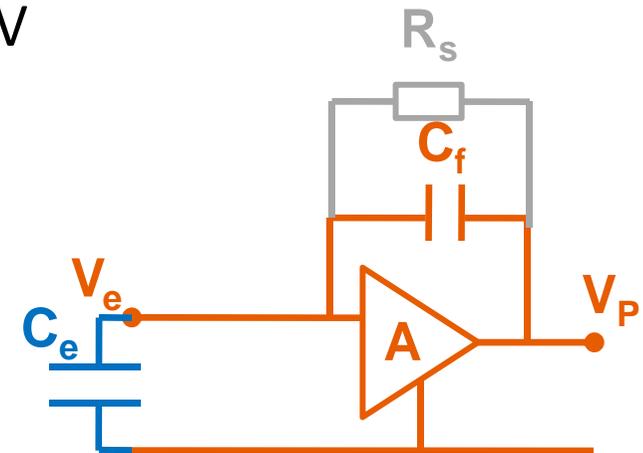
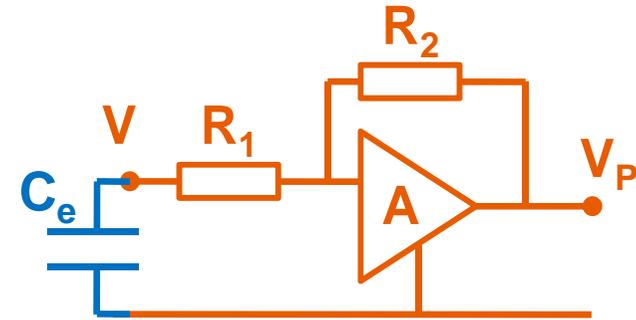
$$V_p = -\frac{R_2}{R_1} V_e \quad ; \quad V_e = \frac{Q}{C_e}$$

- Nécessite capacité d'entrée stable et forte (PM)
- Capacité des semiconducteurs varie avec T,V

- Préamplificateur de charge

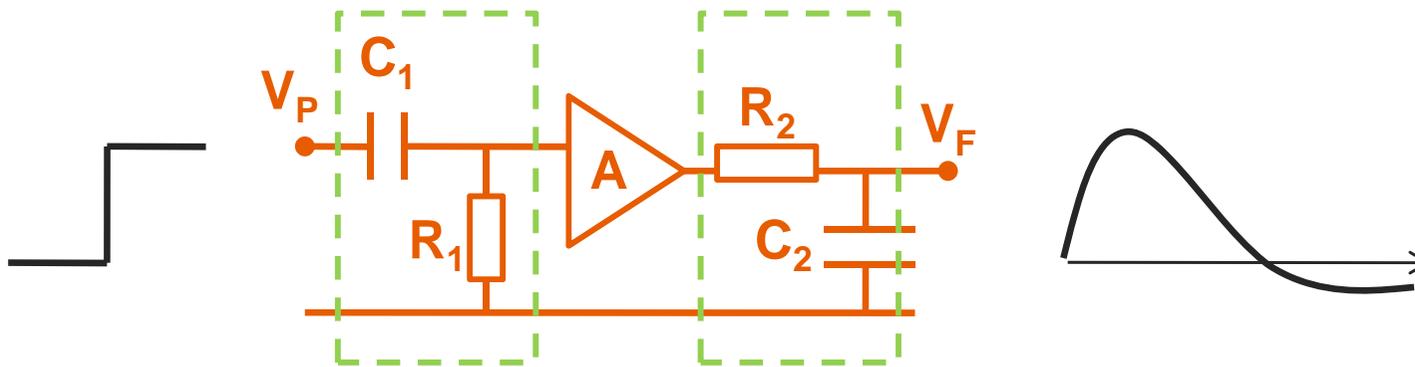
$$V_p = -\frac{Q}{C_f}$$

- Capacité de contre-réaction  $C_f$
- Système de reset ( $R_s$ )

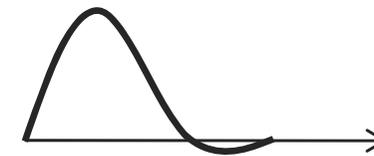


$$V_p = -A.V_e \quad ; \quad V_e = \frac{Q}{C_e + (A+1)C_f}$$

- Mise en forme d'impulsion pour améliorer le rapport signal à bruit
- Circuit classique : CR-RC (différentiation/intégration)



- Ajouts fréquents :
  - Ordre d'intégration plus élevé : CR-(RC)<sup>n</sup>
  - Restauration de la ligne de base (annulation pôle-zéro)

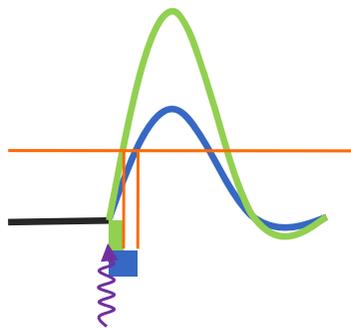
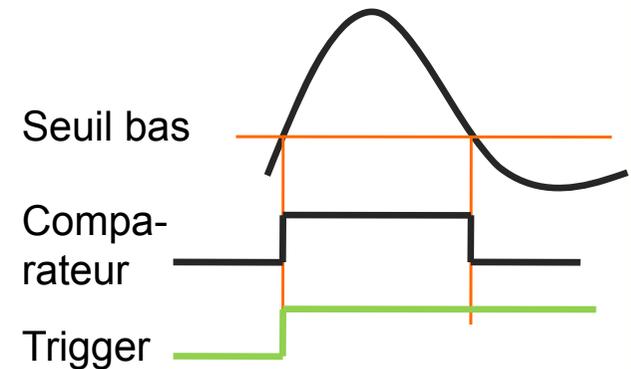


- Comparaison à un niveau de seuil et envoi d'un signal (porte ou échelon)

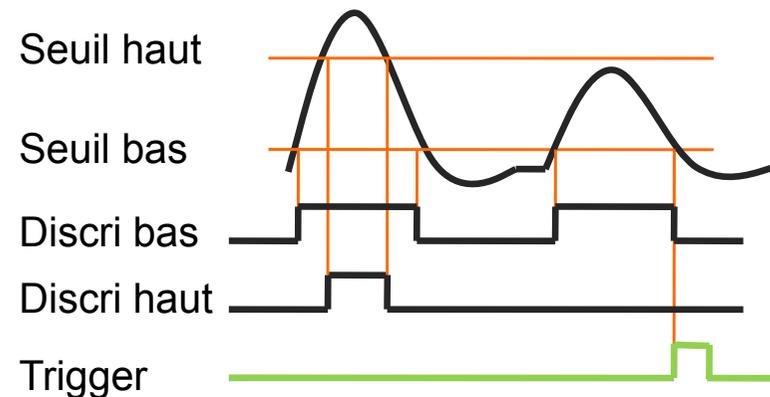
- Signal pour la lecture de l'événement  
(**système auto-déclenché**  $\neq$  lecture cyclique)

- Signal pour la datation de l'événement

- Délai entre date d'arrivée du photon et la date du trigger = **time-walk** (fraction du temps de montée)

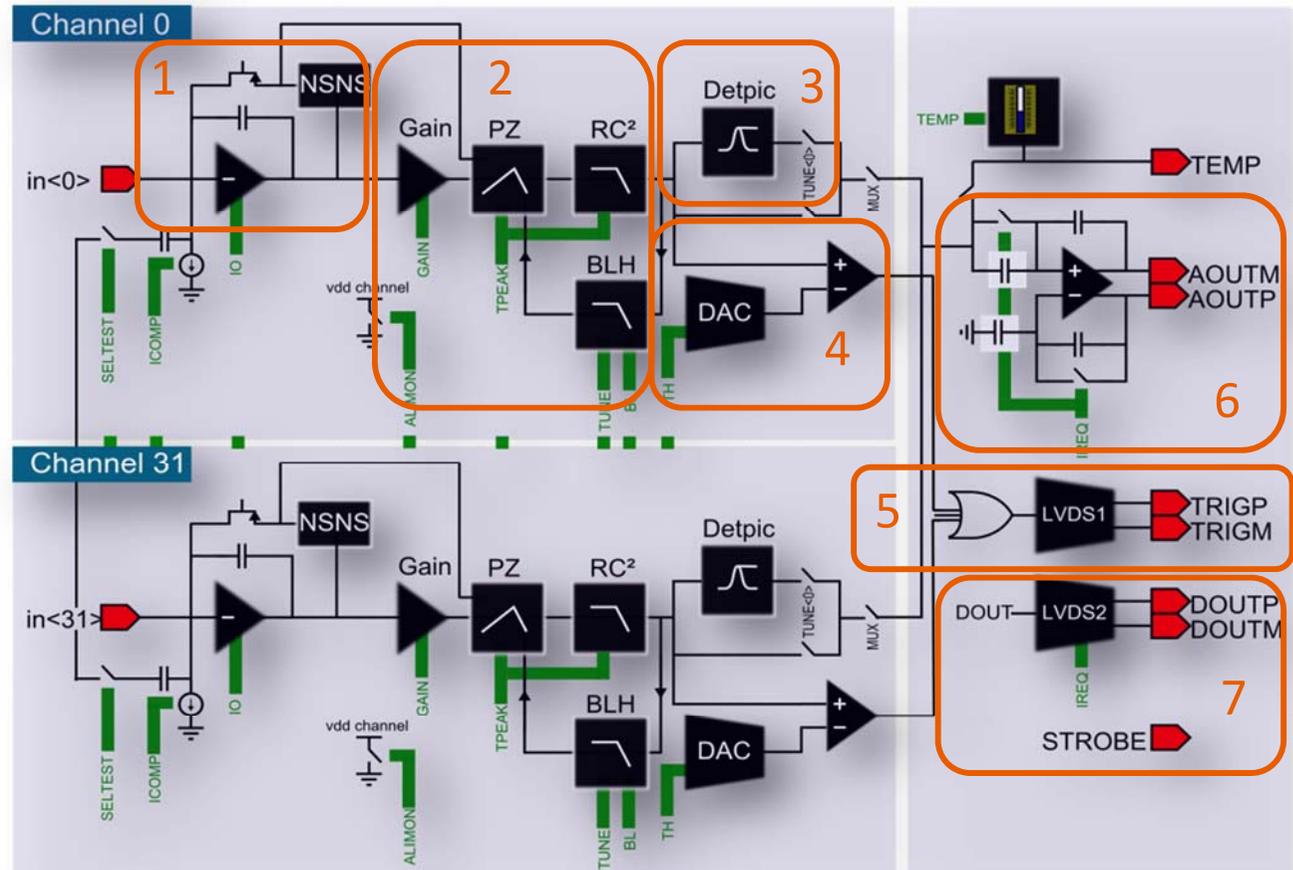


- Discriminateur différentiel



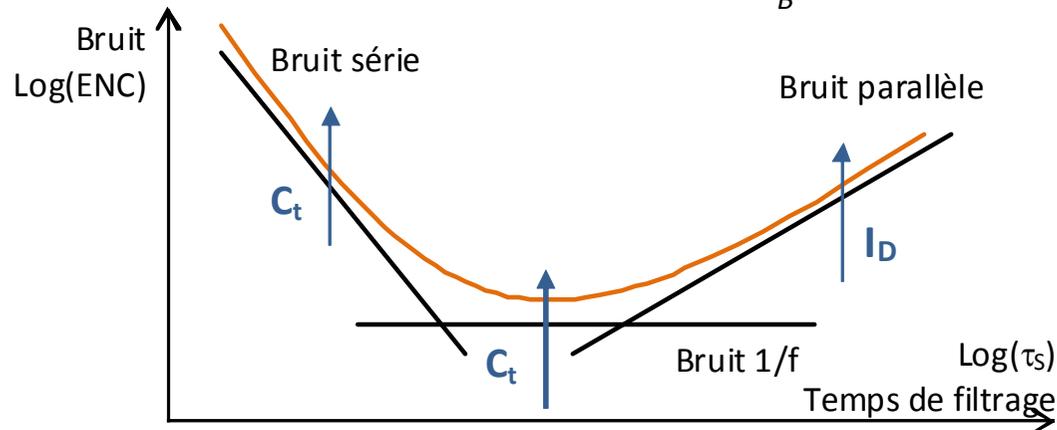
## IDeF-X HD – Imaging detector front-end for X-ray, high dynamic Conception CEA/Irfu/SEDI

1. Préamplificateur avec système de reset
2. Filtrage avec suppression de l'undershoot et stabilisation de la ligne de base
3. Détecteur de pic pour mémoriser l'amplitude
4. Discriminateur de la voie avec seuil bas individuel
5. Trigger commun
6. Buffer de sortie différentielle
7. Signaux numériques d'interface pour la configuration et la lecture



- **Charge équivalente de bruit** : signal d'électrons à l'entrée de l'électronique correspondant un rapport signal à bruit de 1 en sortie.

$$RSB = \frac{U_M}{\sigma_B} = \frac{Q}{ENC}$$



$$ENC^2 = \alpha_s C_t^2 \frac{1}{\tau_s} + \alpha_f C_t^2 + \alpha_p I_L \tau_s$$

En sortie : bruit rms  $\sigma_B$ ,  
signal d'amplitude  $U_M$

$C_t$  : capacité totale à l'entrée  
(capacité parasite sur l'ASIC, capacité du détecteur, capacité de connexion)

$I_D$  : courant d'obscurité

$\alpha_s, \alpha_f, \alpha_p$  : paramètres du circuit  
(technologie, ordre du filtre, transconductance du transistor d'entrée)

- Origines des 3 sources de bruit
  - Bruit série : bruit thermique du canal de conduction du transistor d'entrée
  - Bruit 1/f : défauts cristallins de la grille du transistor d'entrée (technologie CMOS)
  - Bruit parallèle : fluctuation poissonnienne des sources de courant

- Résolution spectrale (FWHM)

$$\Delta E_{elec} = 2,35 \varepsilon ENC_{tot}$$

$$\Delta E_{tot}^2 = 2,35^2 \cdot F \cdot \varepsilon \cdot E_{\gamma} + 2,35^2 \cdot \varepsilon^2 \cdot ENC^2 + \Delta E_{pertes}^2$$

- Seuil bas de détection (*low-level threshold*)

- Pour ne pas enregistrer des événements de bruit, on place généralement le seuil à  $5\sigma$  du bruit.

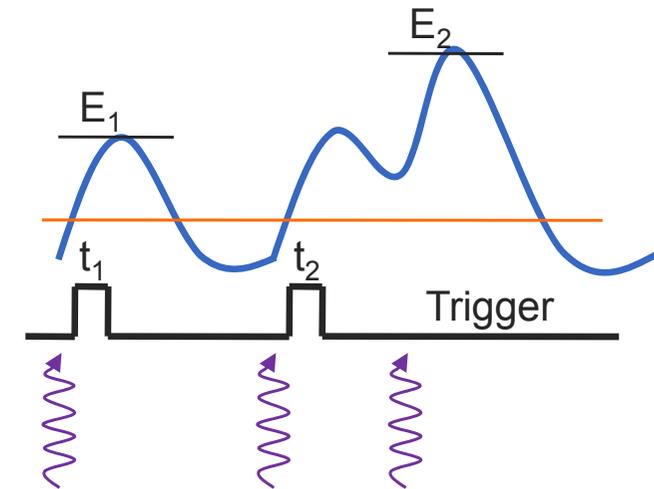
$$LLT = 5 \cdot \varepsilon \cdot ENC$$

- L'optimisation des performances spectroscopiques passe par la minimisation du courant d'obscurité (température) et de la capacité d'entrée (hybridation).

- Il existe un temps qui minimise le bruit électronique (cf. équation ENC).

- Un temps trop long par rapport à la période moyenne des événements provoque un **empilement des signaux** (*pile-up*)

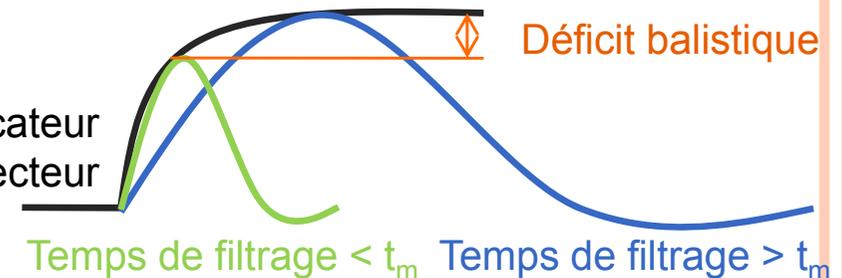
- Informations d'énergie et de taux de comptage erronées



- Un temps trop court par rapport au temps de transit des charges provoque un **déficit balistique**

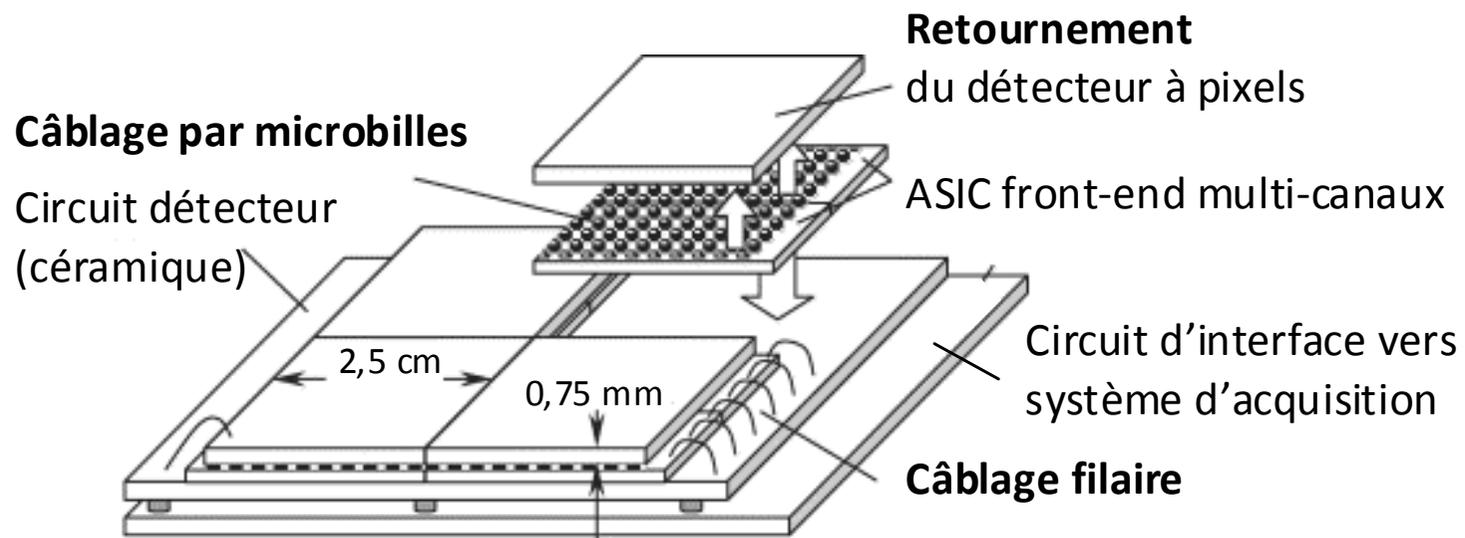
- Collection incomplète de l'énergie

Temps de montée  $t_m$  du préamplificateur  
= temps de collection dans le détecteur



- Compromis comptage/spectroscopie

- Assemblage du détecteur et de son électronique
- Etape critique pour la garantie des performances
  - Choix des matériaux et procédés pour un contact optimal (capacité, fiabilité)

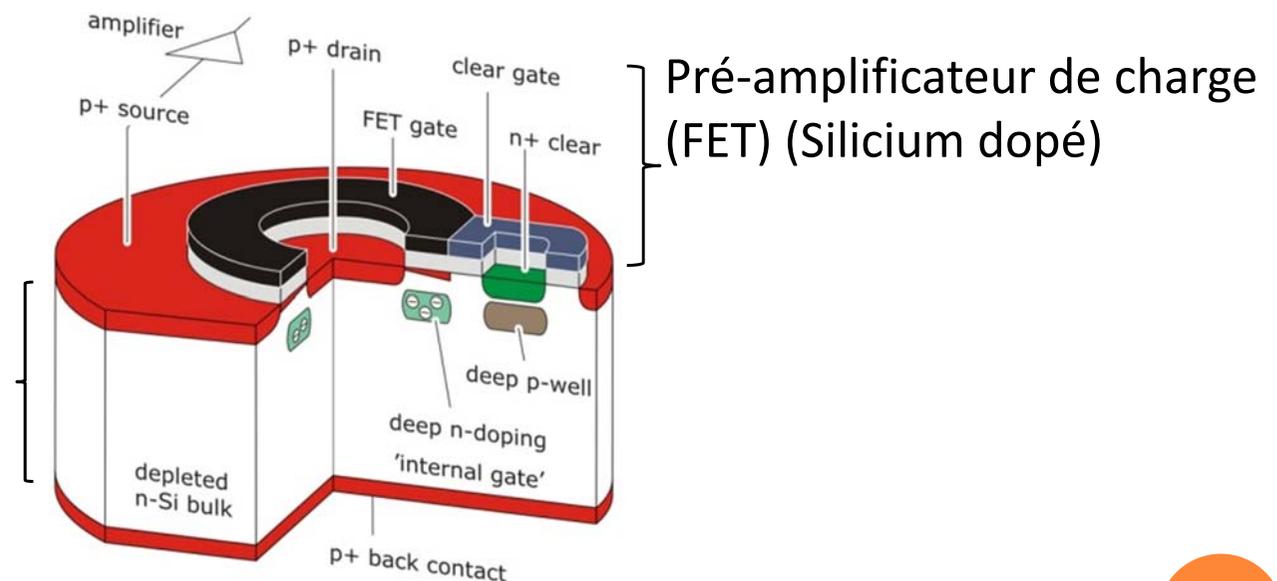


Concept d'hybridation pour un imageur X dur à base de CdTe

- *Flip-chip, polymer or indium bump bonding, wire bonding*

- Détecteur et électronique peuvent être intégrés sur le même *wafer*
  - système monolithique
    - Capacité d'entrée/100 → bruit électronique réduit à quelques électrons
- Difficultés technologiques
  - Substrats et standards de fabrication a priori incompatibles
  - Procédé double face pour les détecteurs
- Exemple : DEPFET (*Depleted p-channel field effect transistor*)

Zone sensible (Silicium haute résistivité entièrement déplété, longue durée de vie des porteurs)



- L'électronique n'est pas performante en soi mais couplée à un détecteur. Elle doit être choisie avec soin suivant les spécificités du système.
- Quelques paramètres clés :
  - Nombre de voies analogiques
  - Gain (mV/fC)
  - Temps de filtrage ( $\mu$ s)
  - Charge équivalente de bruit plancher (électrons rms)
  - Sensibilité à la capacité d'entrée
  - Sensibilité au courant de fuite
  - Consommation électrique
  - Principe de lecture (autodéclenché ou contrôlé par switch)
  - Type de sortie (multiplexage, sorties en parallèle)
  - Tenue aux radiations (pour systèmes spatiaux)



energie atomique • energies alternatives

# LES TECHNIQUES DE MESURE DE LA POSITION D'INTERACTION

Détecteurs à électrodes segmentées

Détecteurs à dérivation

Dispositifs à transfert de charge

59

## ○ Dépôt d'électrodes métalliques segmentées

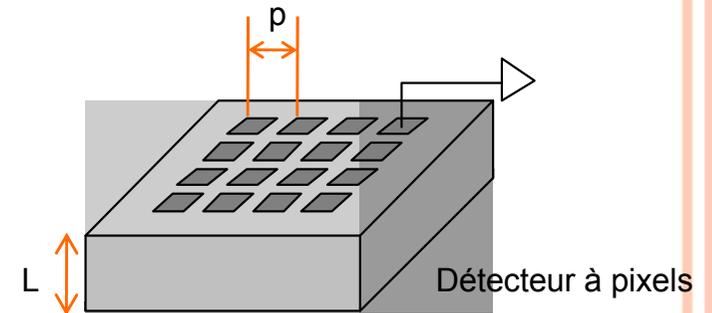
- Tout le volume du détecteur est sensible.
- Le signal est induit principalement sur l'électrode la plus proche de l'interaction et du transit.

## ○ Effet petits pixels

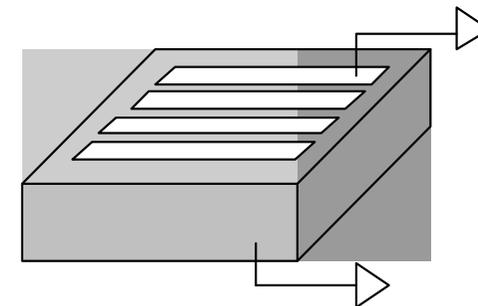
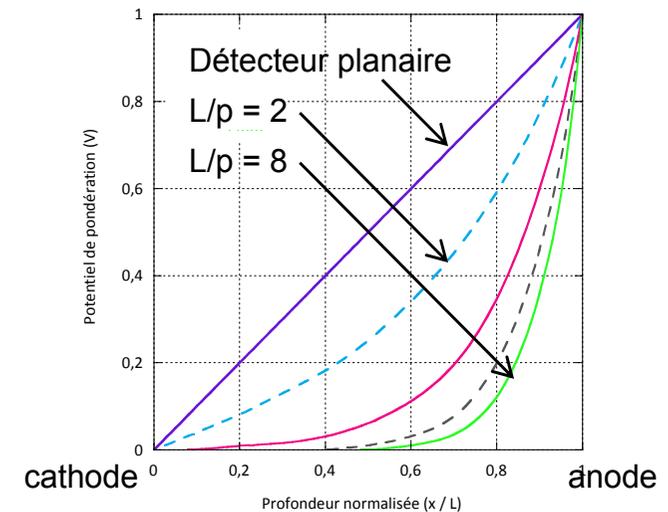
- Signal induit essentiellement par les charges proches de l'électrode.
- Connexion de l'électronique à l'anode pour collecter les électrons et masquer les trous de plus faible produit  $\mu\tau$ .

## ○ *Double-sided strip detector*

- Fine segmentation (10-100  $\mu\text{m}$ )
- Connexion d'un large nombre de voies analogiques sur les bords.



Champ de pondération d'une anode



## Silicon drift detector (SDD)

### De la diode classique à la structure de double diode

- Diode, contacts sur les 2 faces du substrat

↓ équivalent

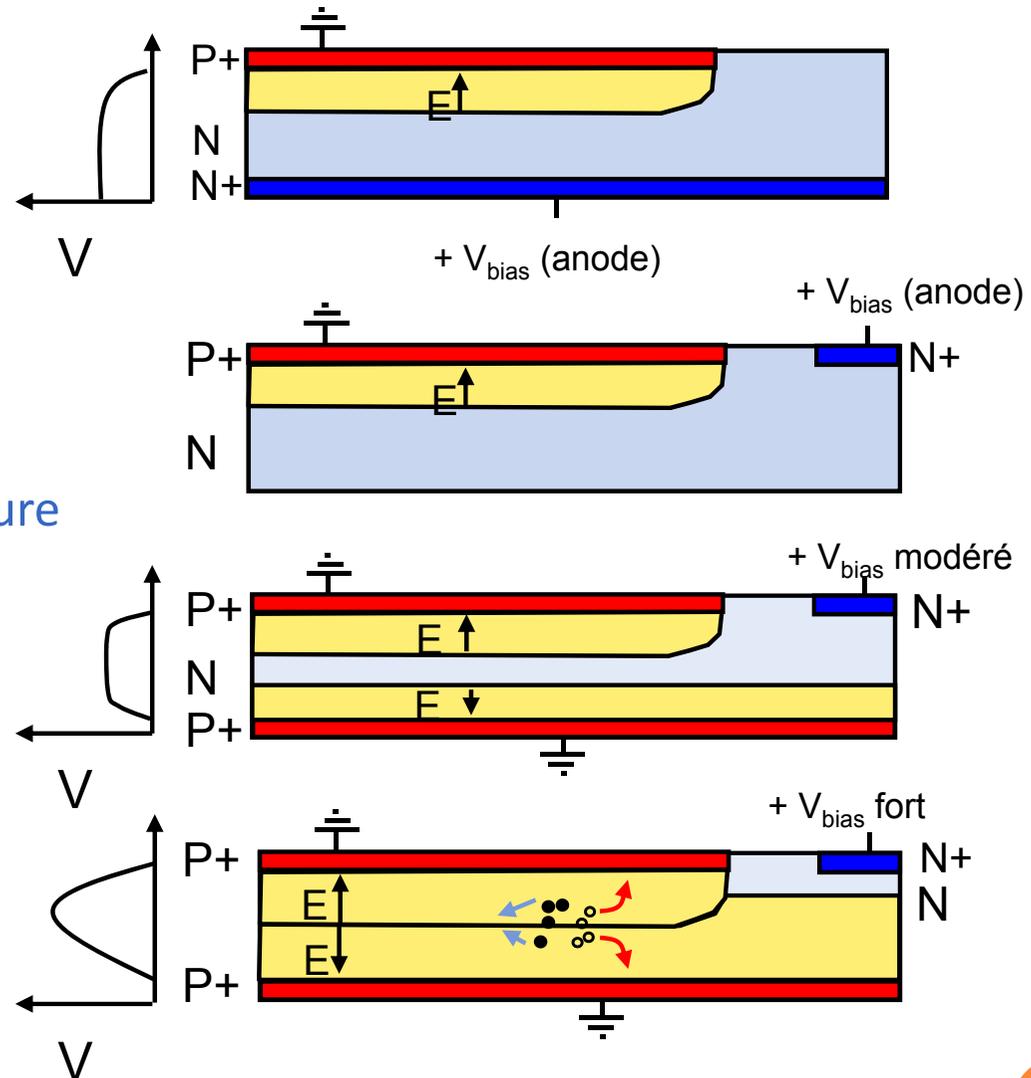
- Diode, anode et cathode sur une seule face

↓ ajout d'une structure

- Double diode partiellement déplétée

↓ polarisation

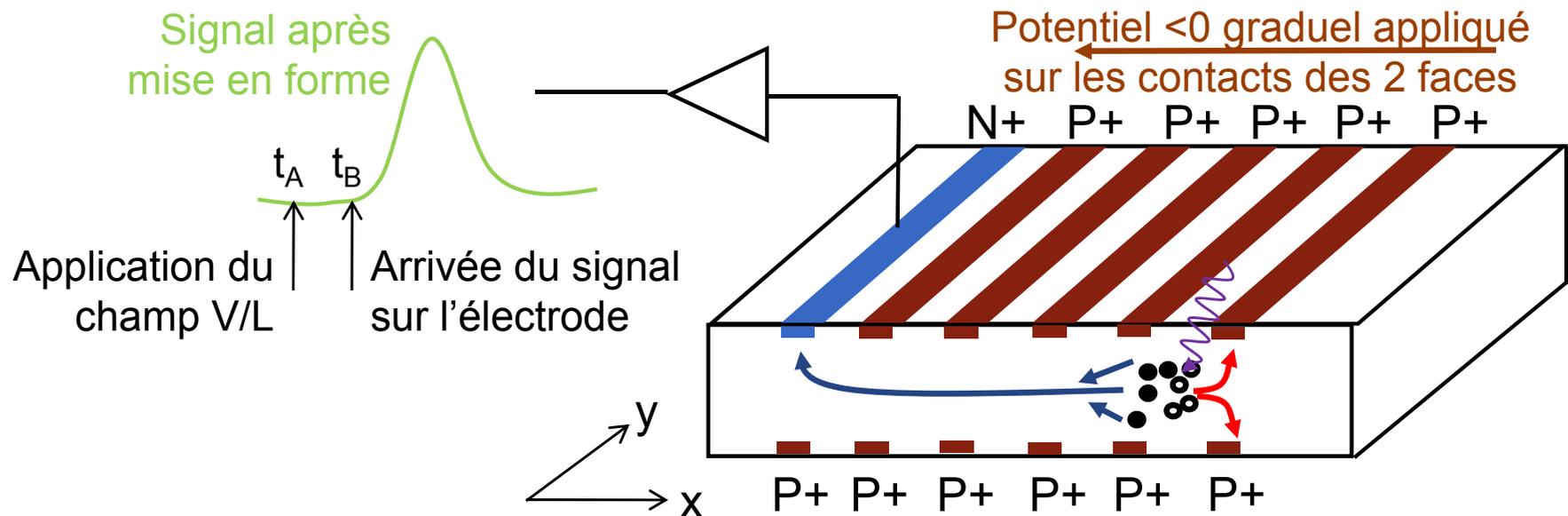
- Double diode entièrement déplétée



*E. Gatti, P. Rehak (1984)*

## Double-sided drift detector

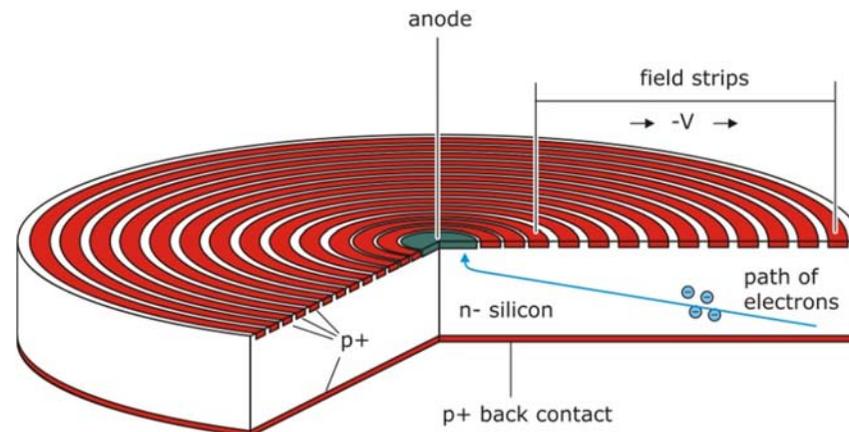
- Pour collecter les électrons à l'anode, on crée un champ électrique supplémentaire parallèle à la surface pour faire dériver les électrons.



- Mesure de la position suivant x par le temps de transit.
- Mesure de la position suivant y par segmentation de l'anode.

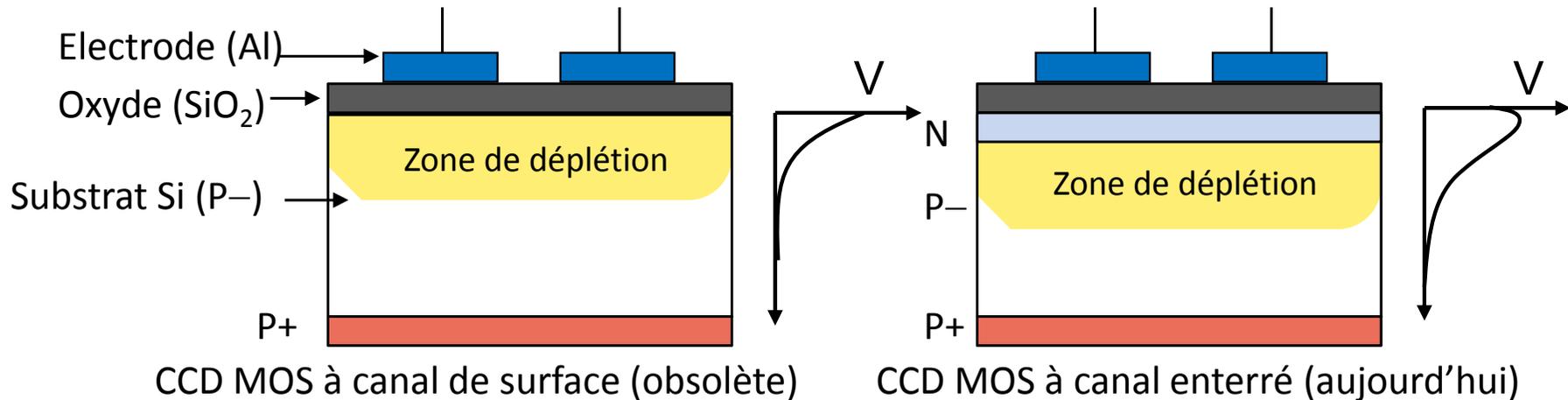
$$t_B - t_A = \frac{x.L}{\mu_n V}$$

- Résolution spatiale
  - Peut atteindre  $3 \mu\text{m}$
  - Champ électrique optimal  $\sim 200 \text{ V/cm}$  (diffusion, précision de la mesure du temps)
- Avantages
  - Positionnement 2D ( $N^2$ ) avec peu de chaînes analogiques (N).
  - Mesure de l'énergie possible (amplitude de l'impulsion).
- Inconvénients
  - Technologie sophistiquée : procédés double face.
  - Absorption non uniforme avec une fenêtre d'entrée segmentée.
- *Single-sided radial drift detector*
  - Excellent spectromètre
  - Composant rapide



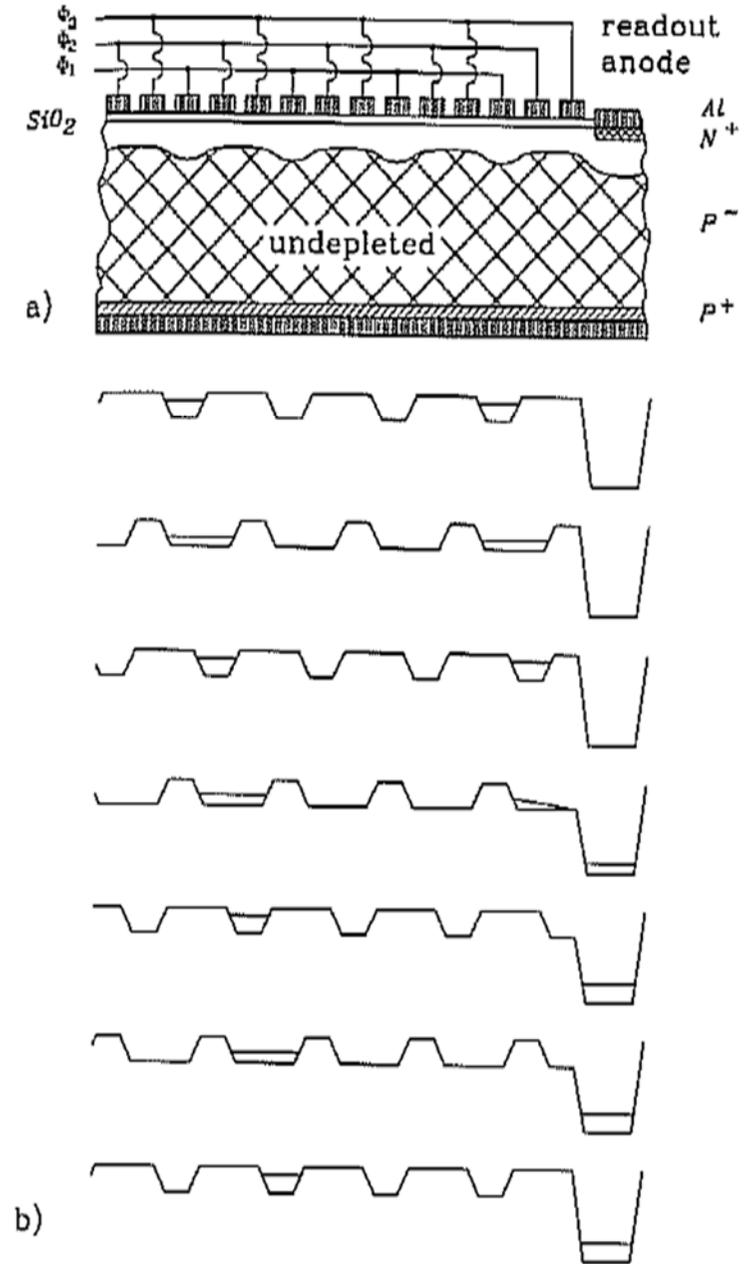
*Charge coupled device (CCD)*

- Structure dérivée d'une structure MOS (métal-oxyde-semiconducteur) classique en divisant l'électrode métallique en bandes (strips).



- Mesure en 4 étapes
  1. Détection des photons incidents par effet photoélectrique
    - Zone de déplétion < 10  $\mu\text{m}$
    - Collection possible par diffusion depuis la région non déplétée (efficacité faible)
  2. Accumulation des charges dans la capacité MOS
    - Ajout d'une couche n pour s'éloigner des défauts de surface

3. Transfert des charges de proche en proche vers l'électronique frontale placée sur le substrat
  - Par pixel : Une électrode de collecte, et deux de barrière
  - Bandes p perpendiculaires aux électrodes pour éviter la diffusion des charges dans le plan (*channel stops*)
4. Lecture de l'information par l'électronique externe



- **Efficacité de détection** : 0,2 à  $E = 10$  keV
  - Amélioration avec les pn-CCD (voir partie 3)
- **Efficacité de transfert (CTE, charge transfer efficiency)** : Fraction des charges transférées d'un pixel au précédent pendant la lecture
  - CCD à canal enterré actuel: CTE  $\sim 0.999999$   
(après  $n = 4000$  transferts, il reste  $CTE^n = 99.6\%$  du signal)
- Température optimale de fonctionnement vers 150-170K
  - Courant d'obscurité, CTE, nombre de pixels défectueux
- **Capacité du pixel** : typ. 200 ke- dans  $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$ 
  - Au-delà, saturation, débordement dans les autres pixels (blooming)
- **Faible bruit électronique** (ENC typ. 4-5 e-) bonne résolution spectrale
  - petite électrode (10-100 fF) et intégration du préamplificateur sur le chip
- **Vitesse de lecture** : filtrage typ. 10  $\mu\text{s}$ , typ. 10-100 trames/s
  - Ajout d'une zone de stockage pour resetter la matrice avant la fin de la lecture

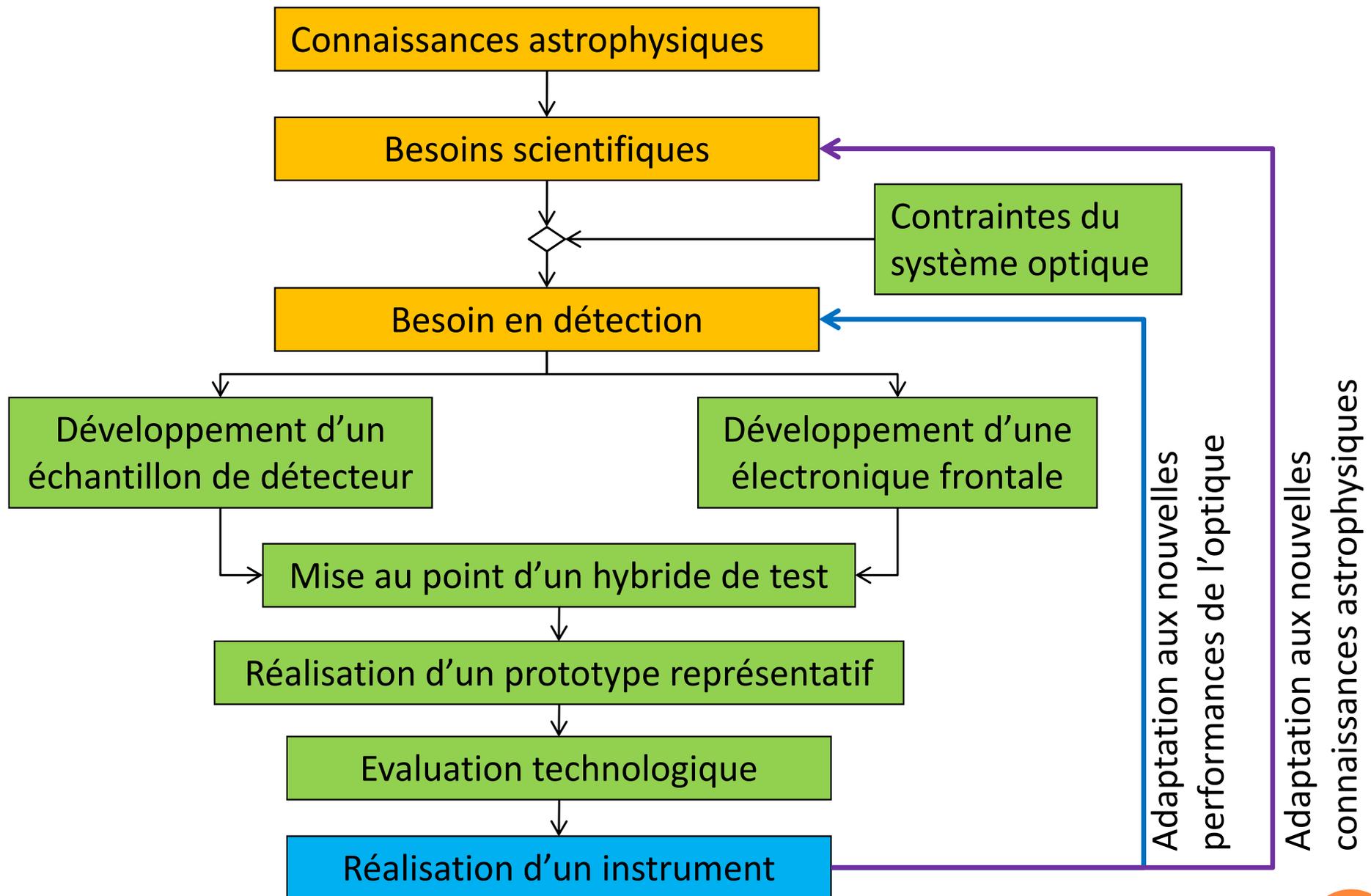
- Les principes de transport et de collecte des charges sont très similaires dans les semiconducteurs et dans les gaz à ionisation.
  
- L'électronique frontale est un élément clé du système de détection.
  - Mêmes concepts de base pour tous les types de détecteurs (sauf les TES).
  - Implantation à optimiser en fonction des propriétés du détecteur (rapidité, capacité, courant d'obscurité).
  
- Les applications pour l'astronomie X sont dominées par les détecteurs à base de silicium.
  - Refroidissement modéré, bonnes propriétés de transport, possibilité d'hybrider l'électronique facilement.

- Le courant d'obscurité mesuré dans un détecteur CdTe est de 1 nA à 20°C. Quel sera ce courant si on le refroidit à  $-20^{\circ}\text{C}$  en supposant une énergie d'activation de 0,4 eV ?
- Soit un détecteur de CdTe de 1 mm polarisé à 100 V. Quelle sera la fraction de charge collectée pour un photon interagissant à 100  $\mu\text{m}$  de la cathode ?
- Quelle est la résolution spectrale d'un détecteur de silicium à 5,9 keV si le bruit de l'électronique frontale vaut pour 3 (resp. 5) électrons rms ?
- Dans un SDD de 1 cm de long polarisé à 500 V à  $-50^{\circ}\text{C}$ , quelle est la largeur du nuage d'électrons à l'anode après dérive sur la longueur totale (resp. sur 1 mm) ?



## LES DÉTECTEURS POUR L'ASTRONOMIE DES HAUTES ÉNERGIES – PARTIE 3

- A- Les contraintes de l'observation X et gamma
- B- Les techniques d'imagerie X et gamma
- C- Revue des développements passés, présents, futurs





energie atomique • energies alternatives

# LES CONTRAINTES D'OBSERVATION DE L'ASTRONOMIE X ET GAMMA

L'observation de sources faibles  
L'environnement spatial

71

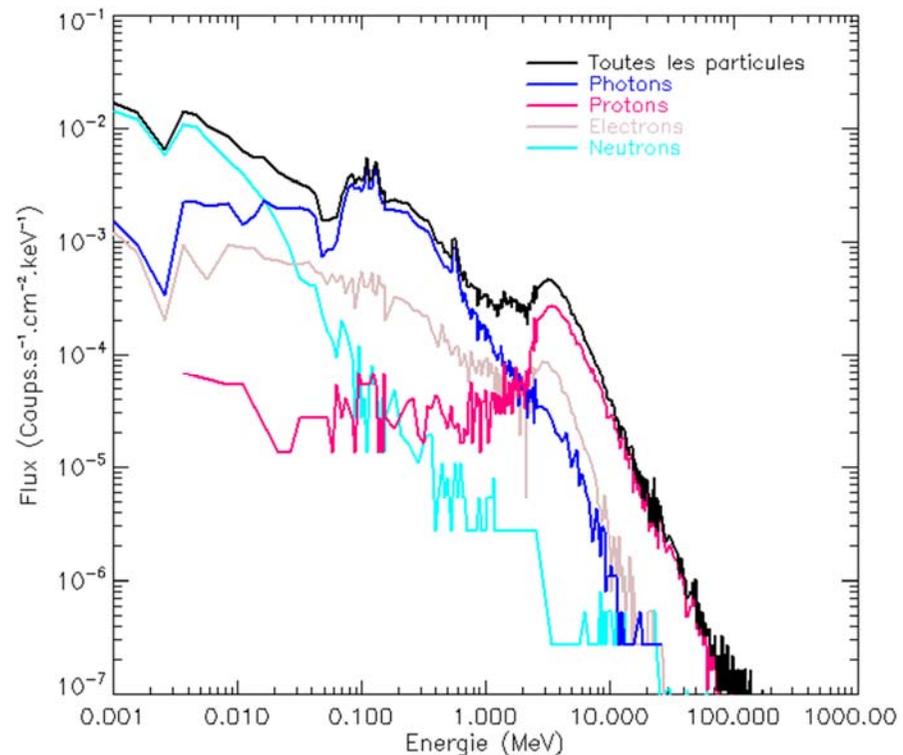
- **Sensibilité  $F_S$  dans une bande d'énergie** : Flux de la plus faible source détectable.
  - Unité : photons.cm<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>.keV<sup>-1</sup> ou erg.cm<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup> ou crab.
- Une source est détectée si son flux est mesuré avec un niveau de confiance  $n_\sigma$  ( $3\sigma$  typ.) après un **temps d'exposition T**.

$$n_\sigma = \frac{S}{\sqrt{S+B}} \sqrt{T} = \frac{F_S \cdot A_{Coll}}{\sqrt{F_S \cdot A_{Coll} + F_B \cdot A_{Det}}} \sqrt{T}$$

- S et B taux de comptage de la source et du fond en coups.s<sup>-1</sup>.
- Incertitude due à la statistique de Poisson et au modèle du fond.
- Le taux de comptage de la source dépend de la **surface efficace de collection  $A_{Coll}$** .
- Le taux de comptage du fond dépend de la **surface efficace de détection  $A_{Det}$** .

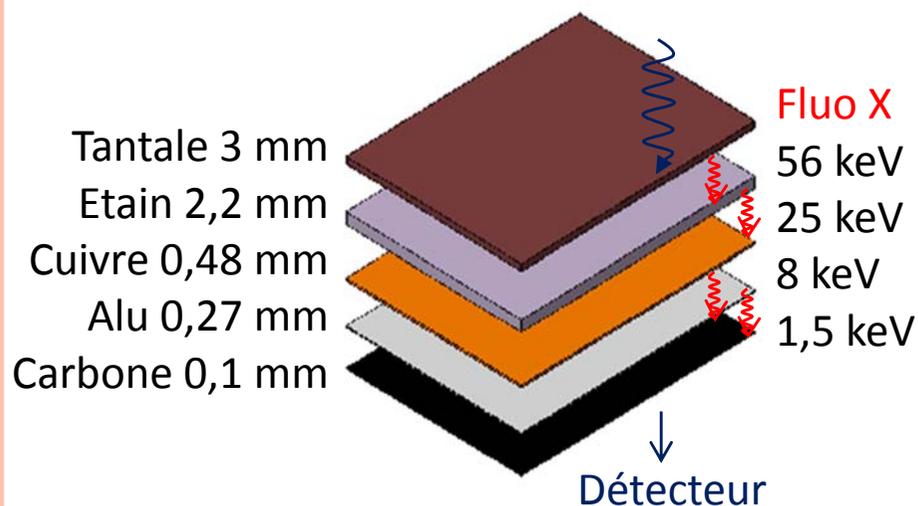
- **Fond cosmique X (CXB : cosmic X-ray background)** : Photons X et  $\gamma$  provenant de la région du ciel observée mais pas d'une source identifiée
  - Modèles à partir d'observations précédentes
- **Fond interne ou instrumental** : particules secondaires provenant de l'interaction des protons cosmiques avec les matériaux du satellite

- Peut être estimé par simulation Monte-Carlo (Geant4)
- Exemple du fond du détecteur de haute énergie de *Simbol-X*



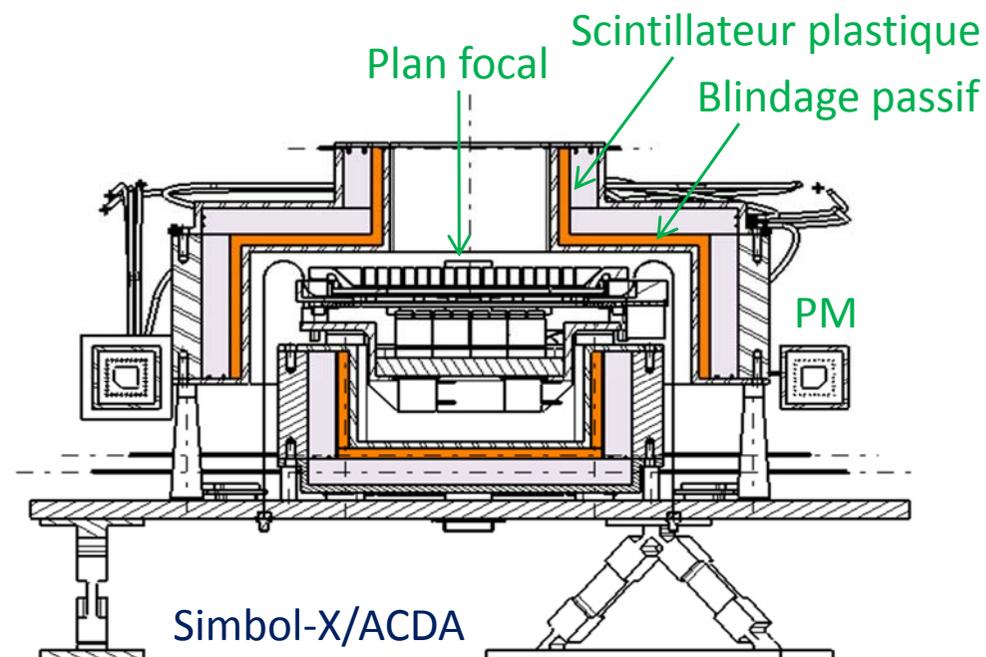
## Blindage passif

- Bloquer le passage des particules vers le détecteur par des matériaux denses (tantale, tungstène...)
  - Ces matériaux peuvent s'activer et produire des raies de fluorescence X vers le détecteur !
  - Solution : Sandwich de matériau

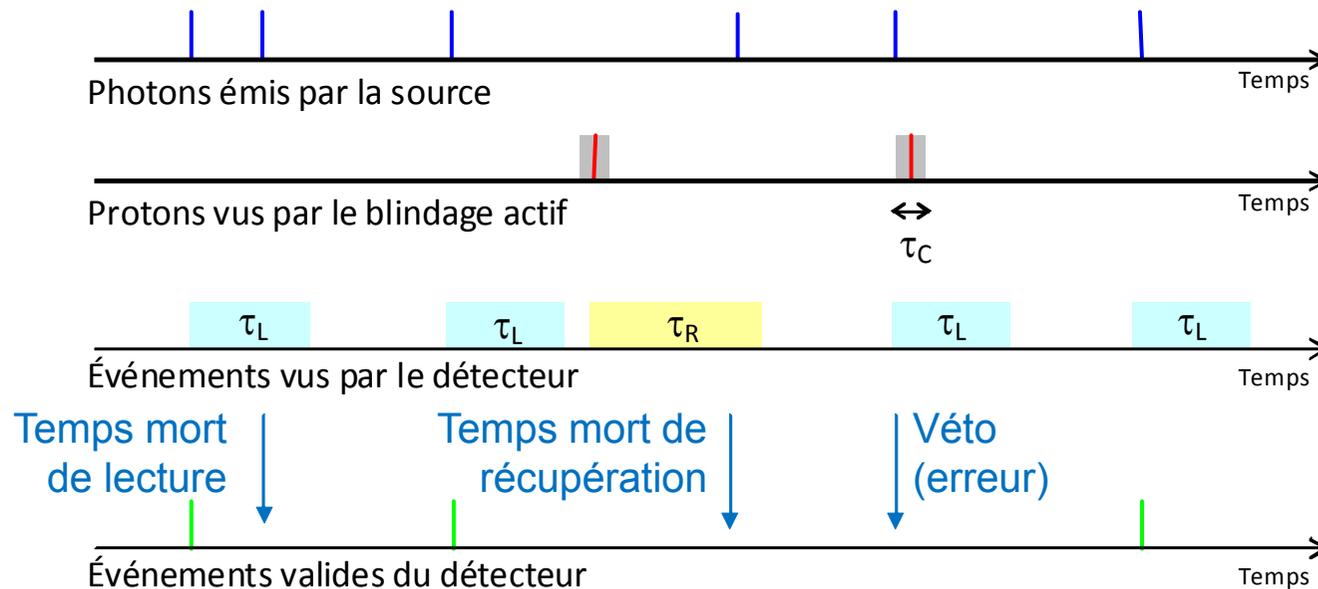


## Blindage actif

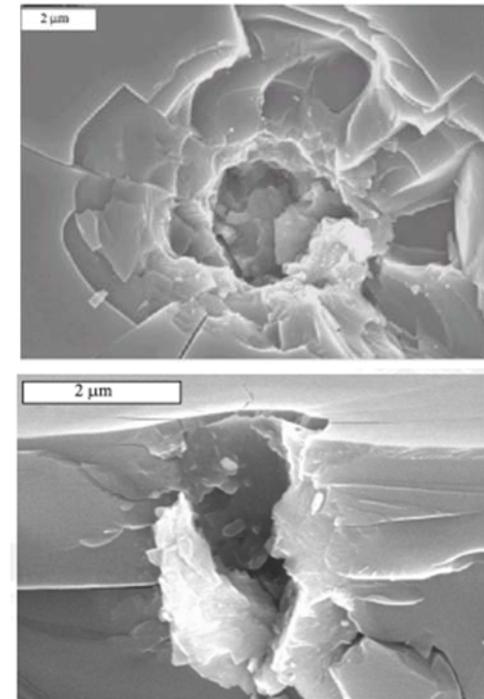
- Détecter les particules passantes sans les bloquer
  - Le traitement électronique marque d'un veto les événements vus en coïncidence sur le détecteur du plan focal.



- Durée pendant laquelle les événements provenant de la source astrophysique ne sont pas pris en compte.
  - Réduit le temps d'observation donc la sensibilité du télescope.
- **Temps mort de lecture**  $\tau_L$  : blocage des chaînes de mesure pour la lecture des événements
- **Temps mort d'anticoïncidence**  $\tau_C$  : fenêtre temporelle ouverte par le passage d'une particule dans le blindage actif
- **Temps de récupération**  $\tau_R$  de la chaîne Le passage d'une particule saturante



- Le lancement
  - Chocs, vibrations
- L'environnement spatial
  - **Variations thermiques** : fatigue des matériaux
    - Panne des mécanismes, rupture
  - **Radiations** : particule ionisante ou énergétique
    - Vieillessement accéléré des détecteurs, panne des électroniques
  - **Contamination** : dépôt de particules, réactions de surface...
    - Dégradation des propriétés optiques
  - **Micrométéorites, débris spatiaux**



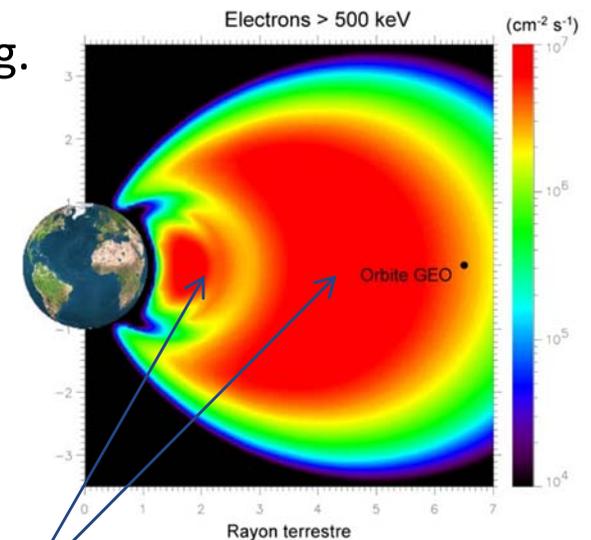
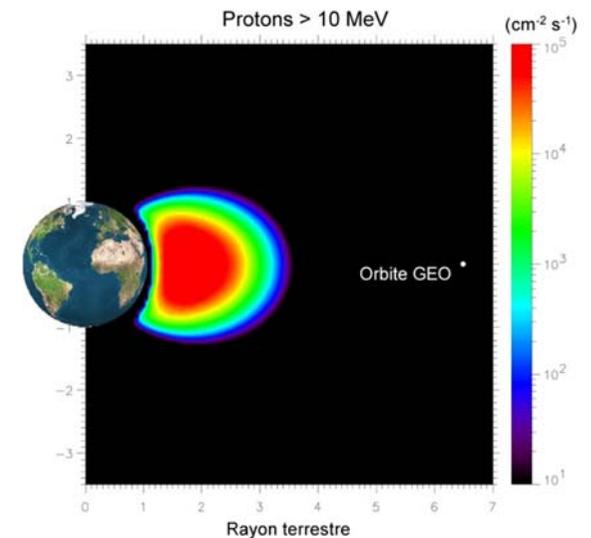
Particules Fe,  $r = 0,3 \mu\text{m}$  ;  $v = 10 \text{ km/s}$   
cratères dans le silicium de  $0,1$  à  $10 \mu\text{m}$

## ○ Effets cumulatifs

- Interaction d'électrons et de protons de plus de 100 keV (irruptions solaires, ceintures de radiation).
- Accumulation des charges dans les isolants (oxydes).
- Dégradation continue des paramètres électriques au cours du temps puis éventuellement perte de fonctionnalité.
- La dose cumulée s'exprime en rad.Si ; 100 rad = 1 J/kg.

## ○ Effets singuliers

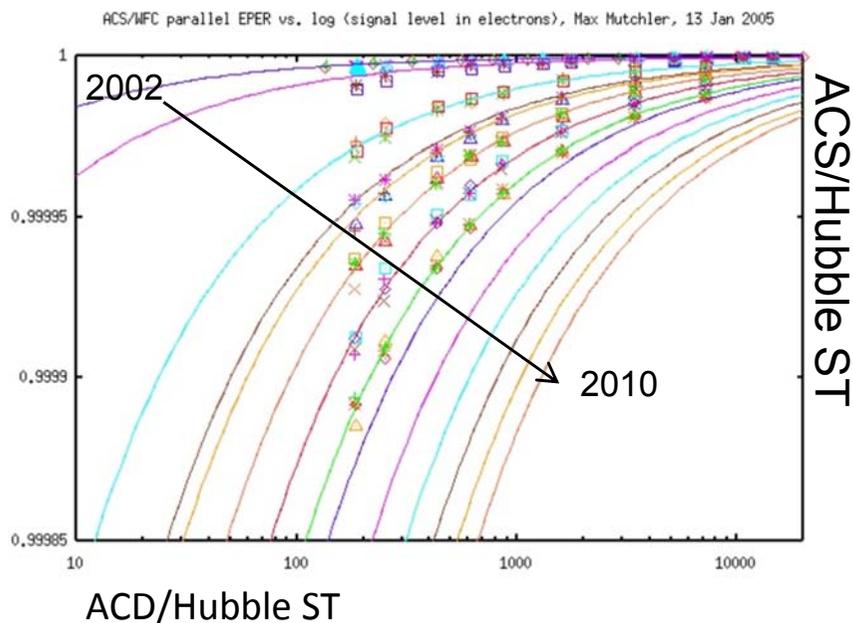
- Interactions des ions du rayonnement cosmique et des protons solaires ou des ceintures de radiation.
- Effets destructifs ou non pour les composants électroniques.



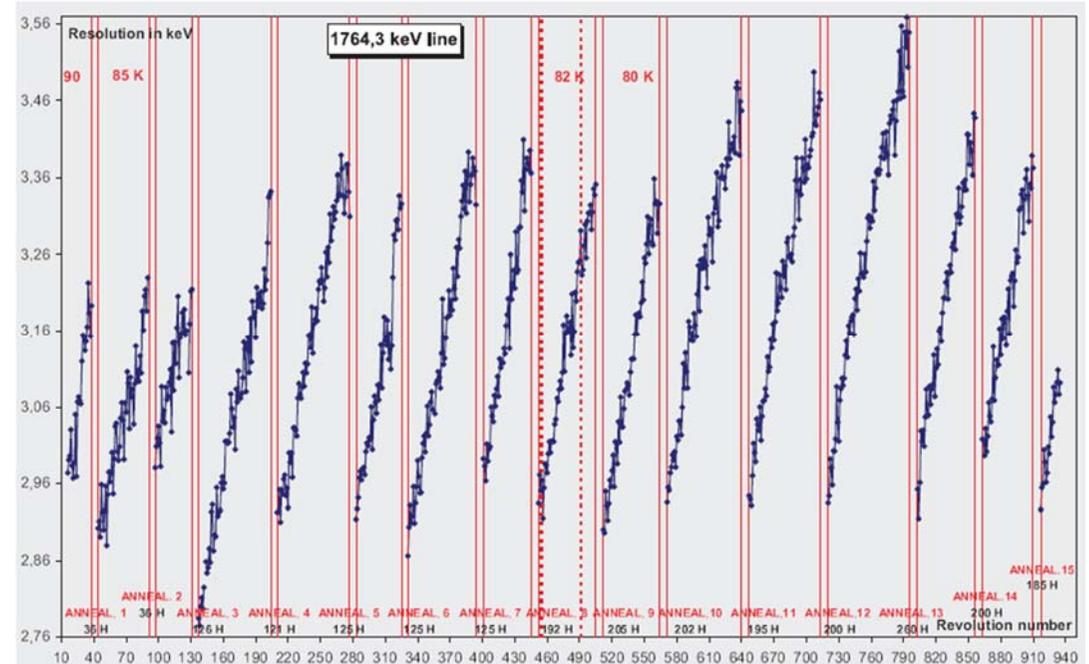
Ceintures intérieure et extérieure  
de Van Allen (10<sup>7</sup> électrons.cm<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>)

- Les effets transitoires peuvent se supprimer par comparaison de trames successives et mesure de l'énergie.
- Dose cumulée : les **particules non ionisantes** (neutrons) provoquent des défauts cristallins (déplacement, lacunes) qui créent des pièges dans le gap des semiconducteurs.
  - Le **recuit** régulier des détecteurs (*annealing*) est une technique efficace.

## Dégradation du CTE dans les CCD



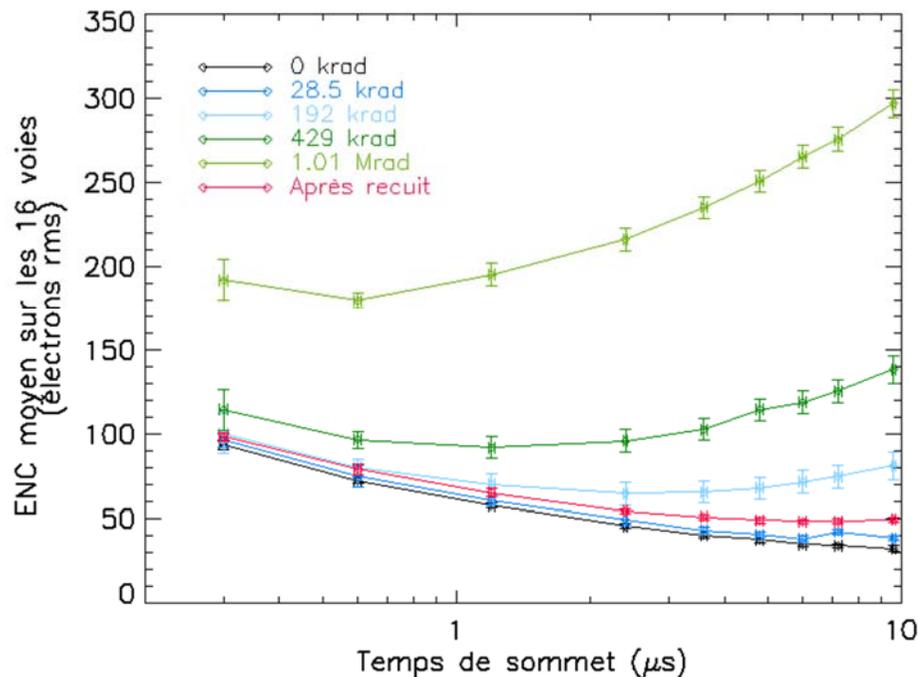
## Dégradation de la résolution spectrale dans les Ge-HP



SPI/Integral – Recuit à 105 C pendant 35 à 200 h

## Effet de dose cumulée

- Effet de la dose cumulée sur les circuits CMOS
  - Variation de la tension de seuil des transistors
  - Apparition de courants parasites



## Effets singuliers

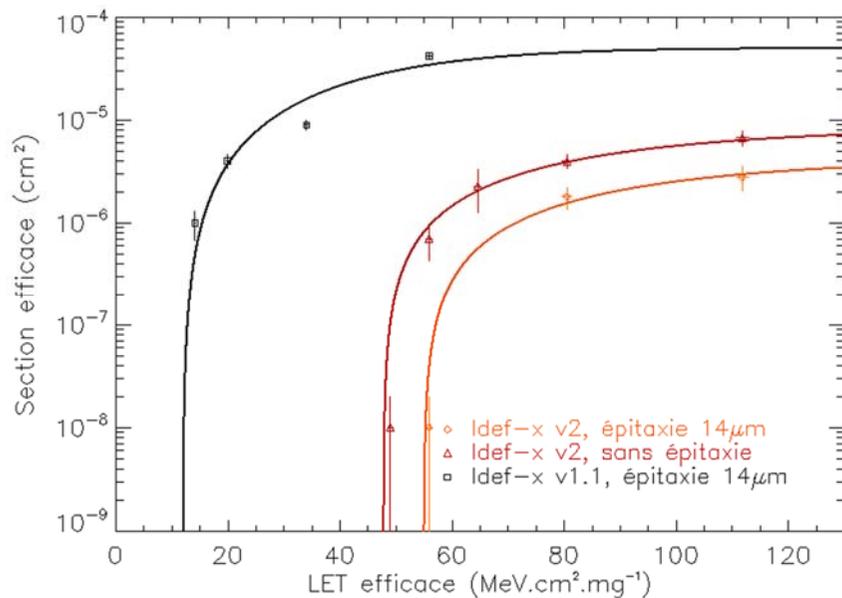
- L'effet de l'interaction de la particule ionisante dépend de sa faculté à déposer de l'énergie dans la matière.

$$LET = \frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx}$$

- **Latch-up** : courant parasite entre les alimentations positive et négative court-circuit pouvant provoquer la destruction du composant.
- **Single event upset** : basculement d'un bit d'un registre
- Technique de **durcissement** pour rendre les cellules numériques immunes.

## Propriété du circuit

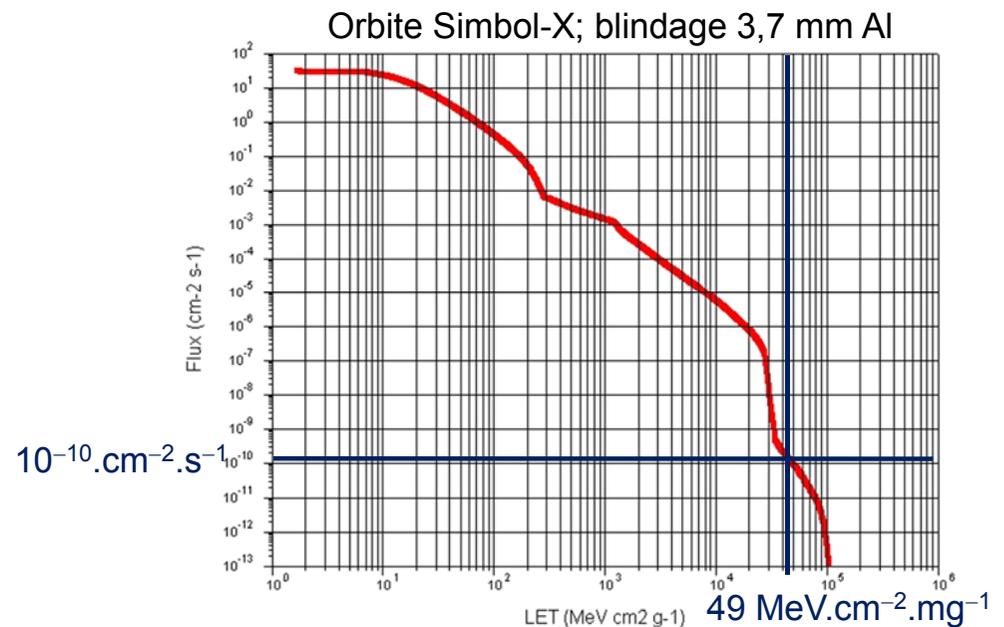
- Sections efficaces de SEL et SEU (*single event latch-up / upset*) en fonction du LET (*linear energy transfer*)



- Peut se décrire par une courbe de Weibull avec un **seuil de LET**.

## Probabilité de panne en orbite

- La convolution de la section efficace ( $\text{cm}^2$ ) par le spectre de LET ( $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) donne un taux d'événements ( $\text{s}^{-1}$ )
  - garantit l'immunité aux latch-up
  - définit la fréquence de rechargement des registres



3 ans  $< 10^8$  s



energie atomique • energies alternatives

# LES TECHNIQUES D'IMAGERIE X ET GAMMA

Critères de performances

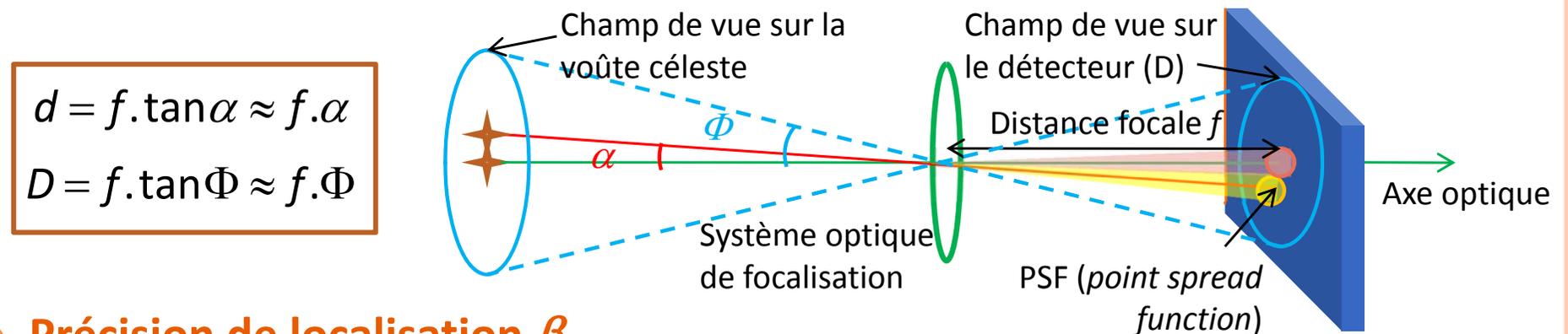
L'imagerie directe avec des miroirs

L'imagerie indirecte avec des masques codés

81

### ○ Résolution angulaire $\alpha$

- Distance angulaire minimale entre 2 sources que le télescope sépare.
- Le détecteur doit avoir des pixels au moins 2 fois plus petits que le diamètre  $d$  de la PSF (théorème d'échantillonnage) : typ. 3-5 fois



### ○ Précision de localisation $\beta$

- D'autant meilleure que la source est brillante  $\beta = \frac{\alpha}{\sqrt{n_\sigma}}$

### ○ Champ de vue $\Phi$

- Angle solide sous lequel le télescope observe le ciel (50% sensibilité sur l'axe).
- Le détecteur doit avoir une surface contenant tout le champ de vue.

### ○ Surface efficace de collection $A_{coll}$

- Voir sensibilité

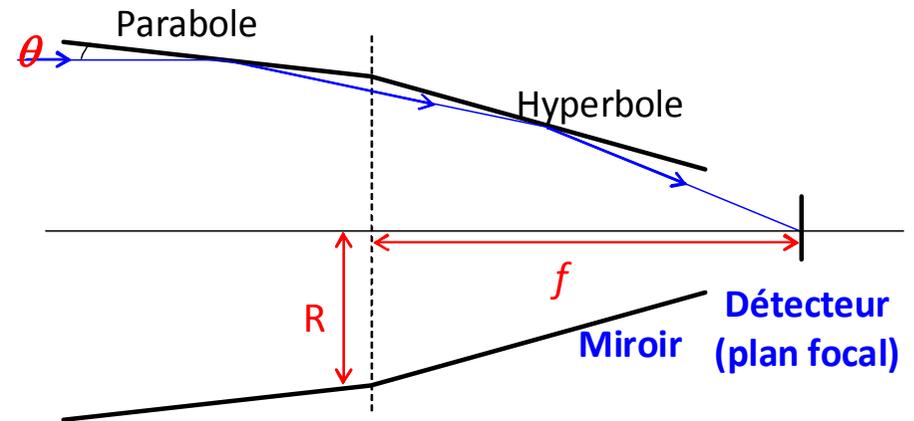
## ○ Focalisation des rayons X par des **miroirs en incidence rasante**

- Configuration de Wolter I

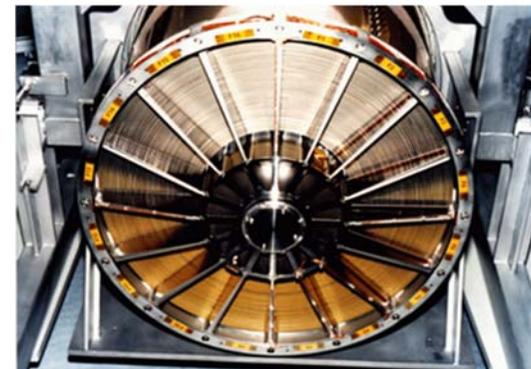
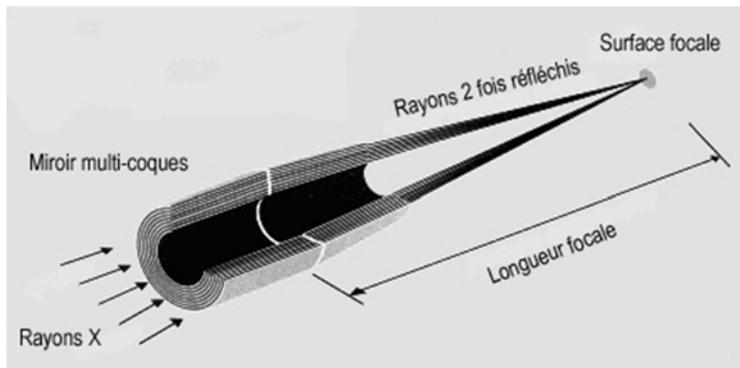
$$\tan 4\theta = \frac{R}{f}$$

- Surface efficace d'un miroir

$$A_{coll} = \pi \eta_R^2 (f \sin 4\theta_C)^2$$



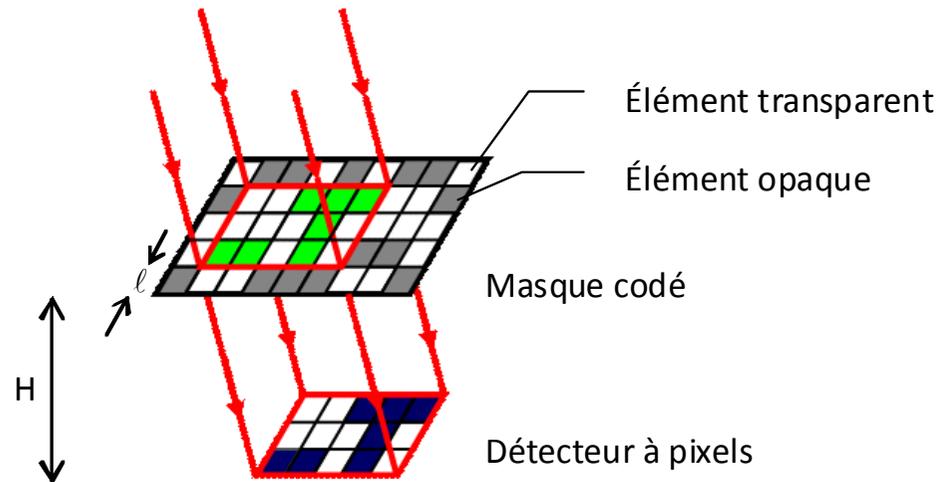
- $\eta_R$  réflectivité nécessite un polissage extrême
- $\theta_C$  angle critique au-delà duquel la réflectivité n'est pas totale, décroît avec l'énergie (0,25° à 20 keV ; 0,1° à 50 keV)



Miroir multi-coque pour XMM-Newton

- Technique de collection et de localisation des rayons gamma
  - La focalisation n'est pas possible à haute énergie.
  - **Systeme à masque codé** : la source à l'infini projette sur le détecteur une « ombre » caractéristique de sa position dans le ciel.

$$\alpha = \arctan\left(\frac{\ell}{H}\right)$$



- Les masques pseudo-aléatoire permettent de reconstruire par **déconvolution** la position des sources de manière unique en minimisant l'influence du bruit de fond

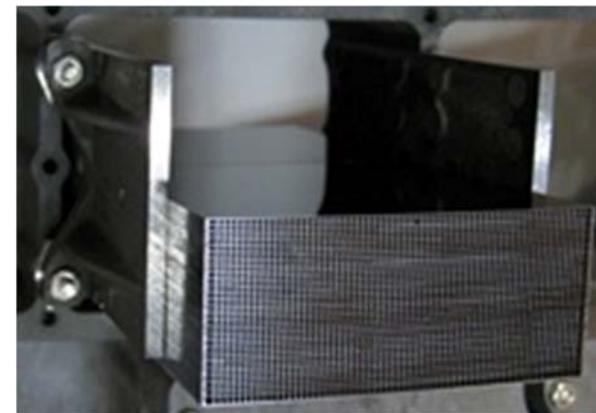
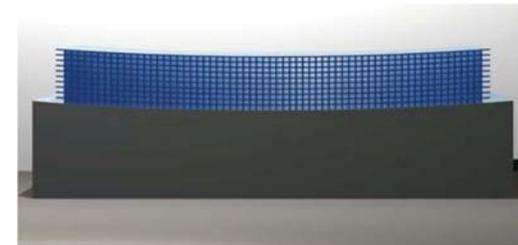
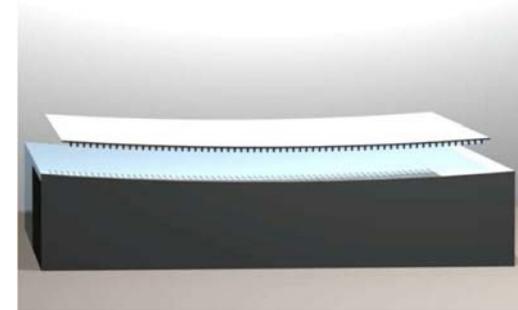
- Ordre de grandeur, valeurs typiques

Paramètres	Miroirs en incidence rasante	Masque codé
Bande d'énergie	0,2-10 keV	10 keV-10 MeV
Résolution angulaire	10 arcsec	10 arcmin
Précision de localisation	1 arcsec	Arcmin pour sources fortes
Champ de vue	1° $\emptyset$	20° × 20°
Surface efficace de détection	PSF = 1 mm $\emptyset$	$A_{Det} \approx \frac{1}{2} A_{Coll} > 1000cm^2$
Sensibilité	10 <sup>-7</sup> -10 <sup>-8</sup> ph.cm <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> .keV <sup>-1</sup> 0,1-1 $\mu$ Crab	10 <sup>-5</sup> -10 <sup>-6</sup> ph.cm <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> .keV <sup>-1</sup> 0,1-1 mCrab

- DéTECTABILITÉ 
$$n_{\sigma} = \frac{F_S \cdot A_{Coll}}{\sqrt{F_S \cdot A_{Coll} + F_B \cdot A_{Det}}} \sqrt{T}$$

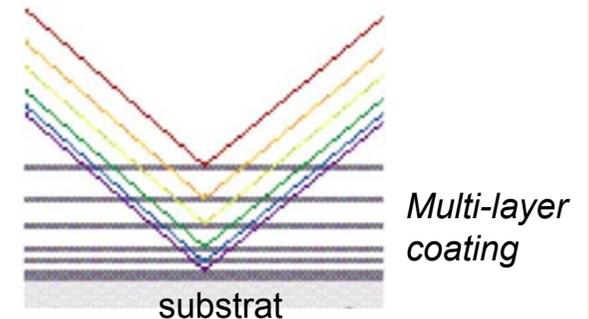
## o Silicon Pore Optics

1. Préparation de plaques de silicium nervurées (*ribbed plates*) de 1 mm d'épaisseur (polissage, revêtement réfléchissant).
  2. Courbure et empilage des plaques sur un mandrin cylindrique → **structure à pore.**
  3. Assemblage de 2 structures en une approximation parabole-hyperbole → **module optique.**
- Léger, rigide, peu coûteux (à partir de wafers commerciaux).
  - Excellente résolution angulaire (5 arcsec à 1 keV, 15 arcsec à 30 keV).
  - Surface efficace limitée à hautes énergies.



## o Slumped Glass Optics

1. Courbure du segment de verre : chauffage à 600°C et affaissement (*slumping*) sous son propre poids sur le mandrin super poli.
2. Revêtement multicouche pour augmenter les angles de réflexion à haute énergie (diffraction de Bragg).
3. Alignement et assemblage.
  - Focalisation jusqu'à 80 keV
  - Résolution angulaire 20 arcsec



Miroirs de NuSTAR (2013)



énergie atomique • énergies alternatives

# REVUE DES DÉVELOPPEMENTS PASSÉS, PRÉSENTS, FUTURS

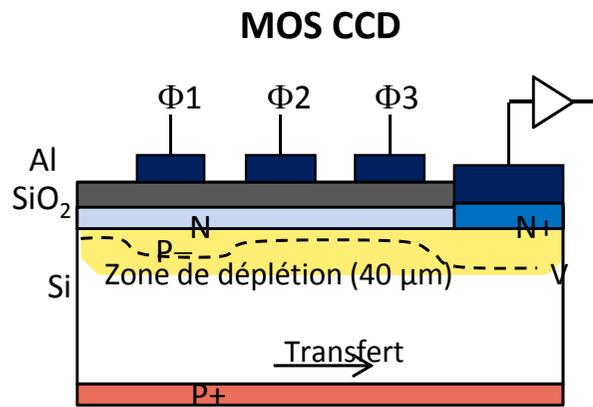
Les détecteurs en vol

Les détecteurs en fabrication

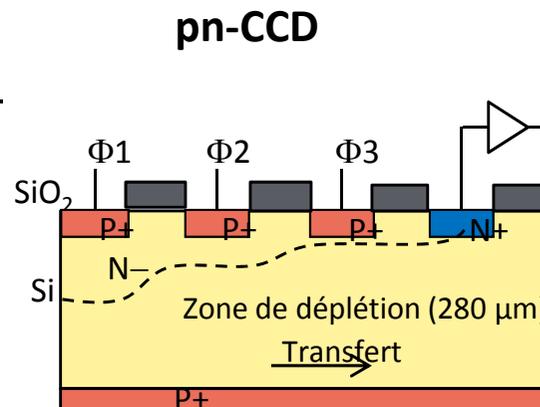
Les détecteurs en développement

88

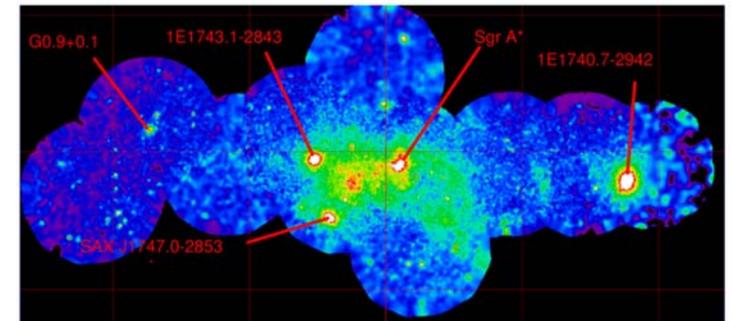
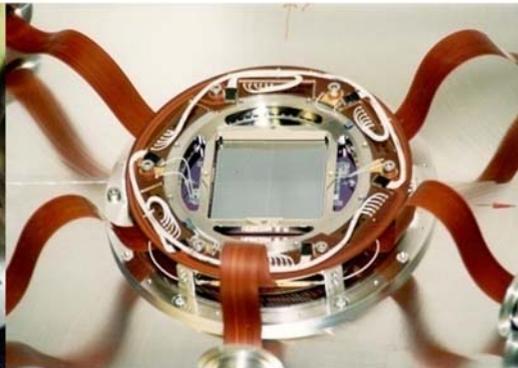
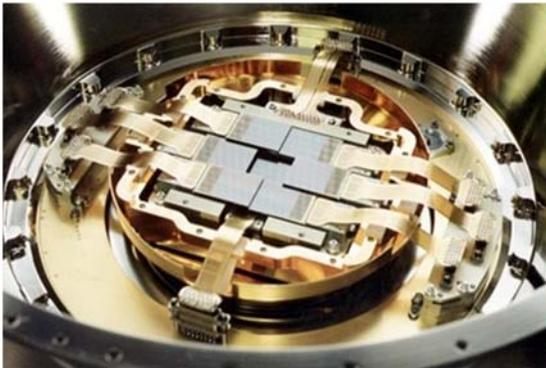
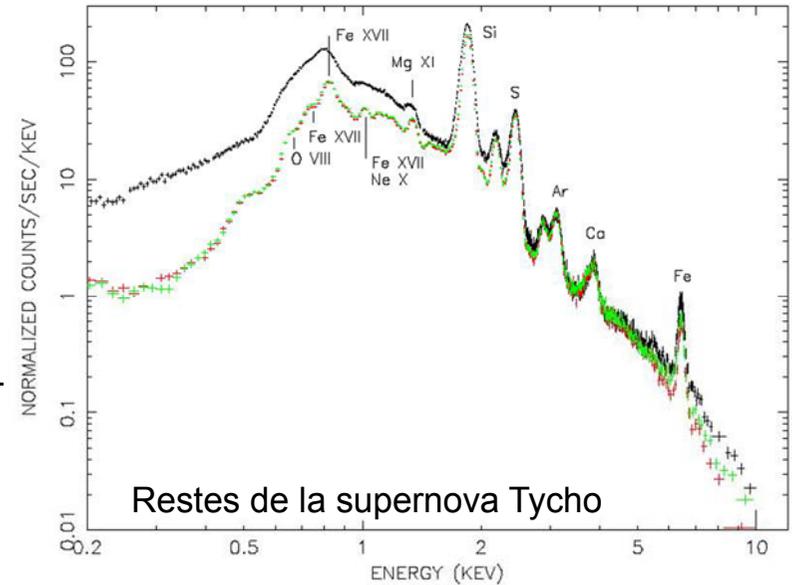
- EPIC : 2 CMOS CCD et 1 pn-CCD
  - Pn-CCD : structure de double diode
    - déplétion complète sur 280  $\mu\text{m}$
    - efficacité 0,9 à 10 keV



7 détecteurs de  $2,5 \times 2,5 \text{ cm}^2$



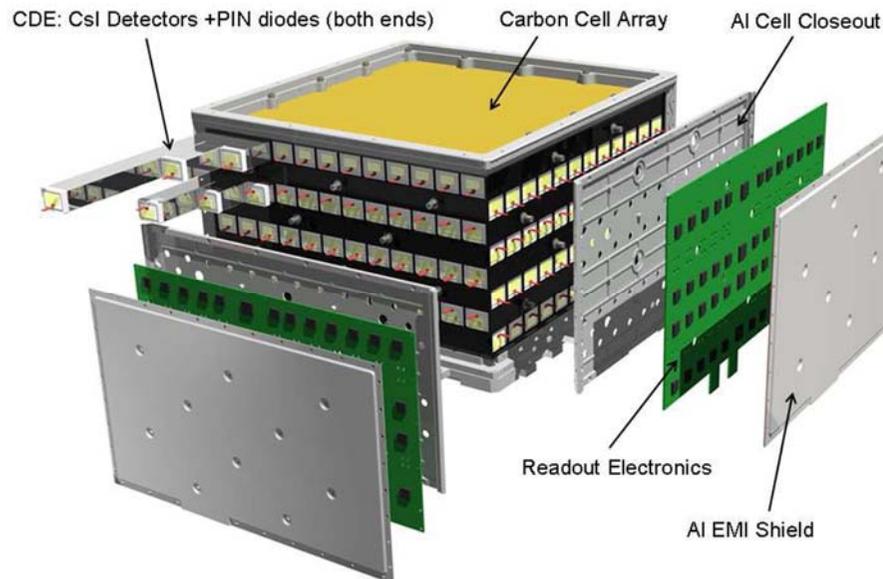
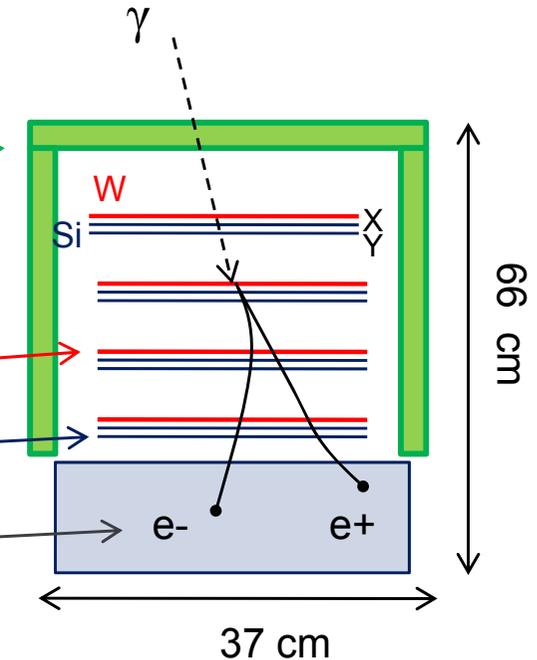
détecteur monolithique de  $6 \times 6 \text{ cm}^2$



Centre galactique

### Module de détection :

- Détecteur d'anticoïncidence : scintillateur plastique
- 18 feuilles de conversion pour produire des paires  $e^-/e^+$  : tungstène (W)
- 16 × 2 « trackers » : silicium strip detectors
- 1 calorimètre pour mesurer l'énergie totale : 96 scintillateurs CsI en 8 couches



### Au total :

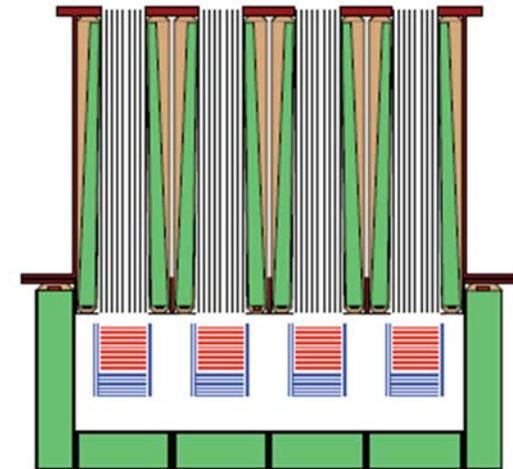
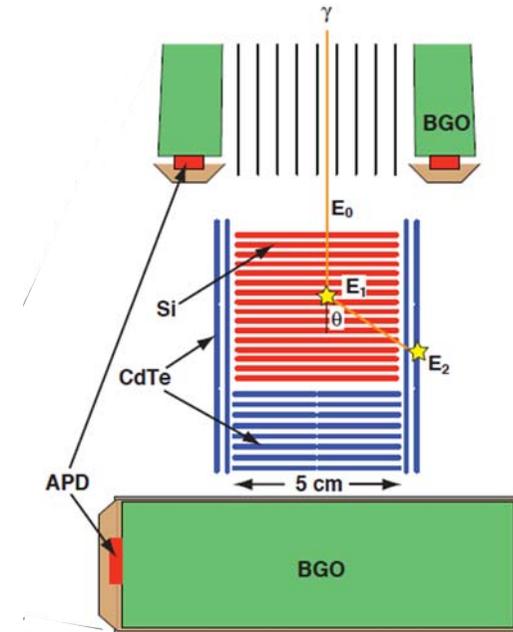
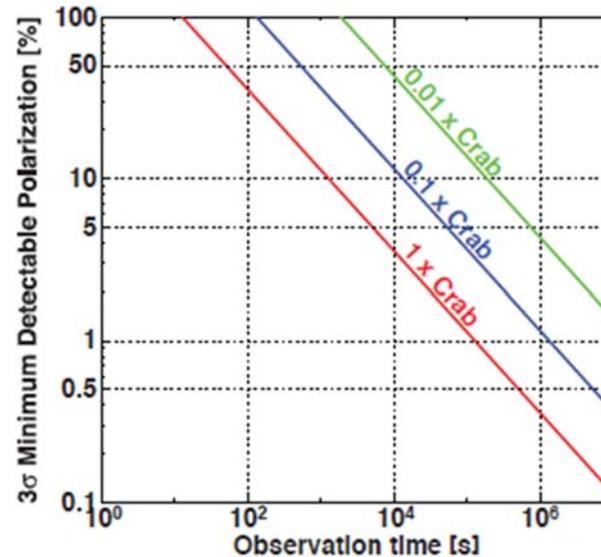
- 16 modules de détection
- 2789 kg, 650 W
- 1,8 m de côté, 72 cm de haut
- Surface efficace 7000 cm<sup>2</sup> à 1 GeV
- Champ de vue 60
- PSF 3 à 100 MeV ; 0,04 à 100 GeV

### ○ Caméra Compton

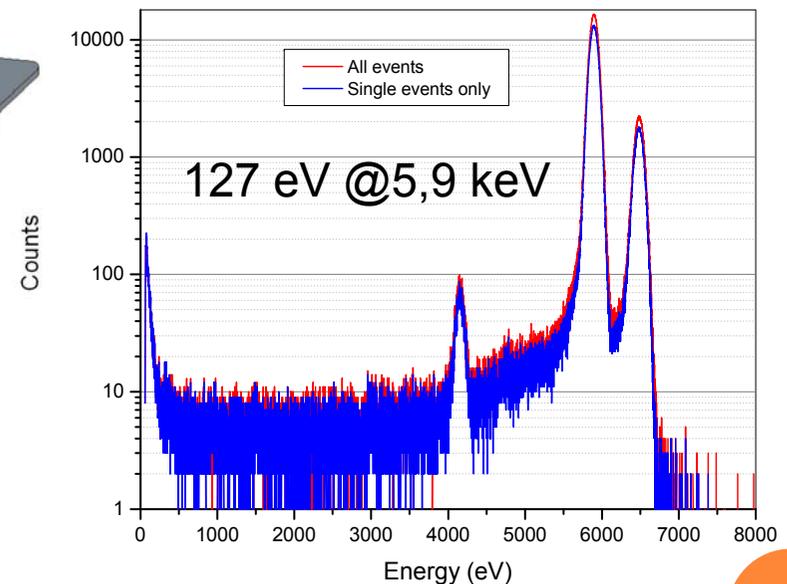
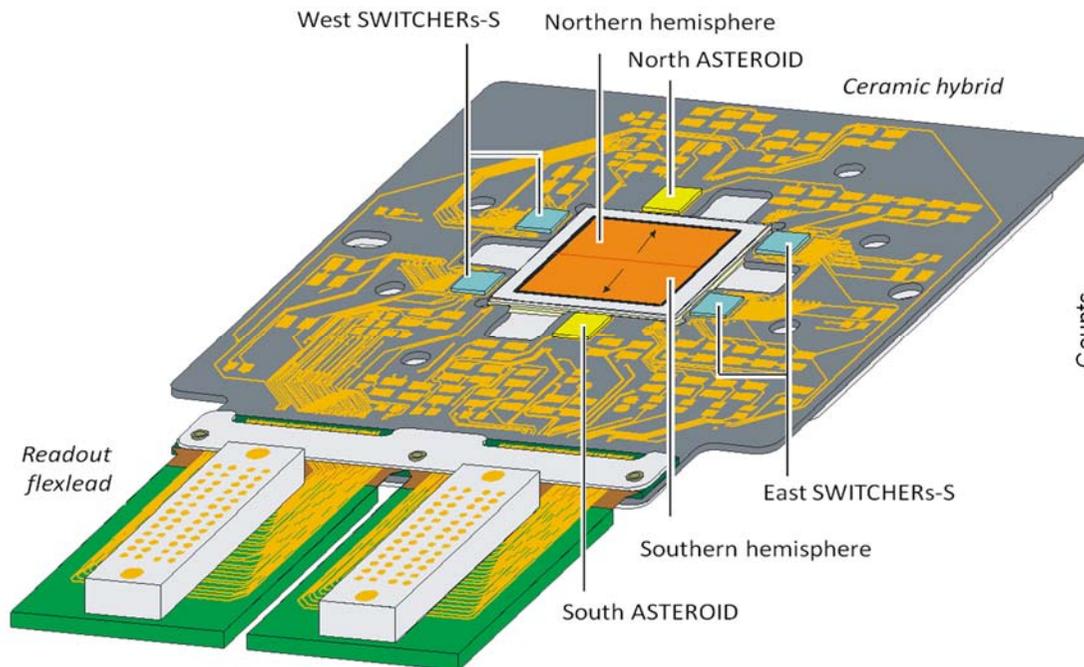
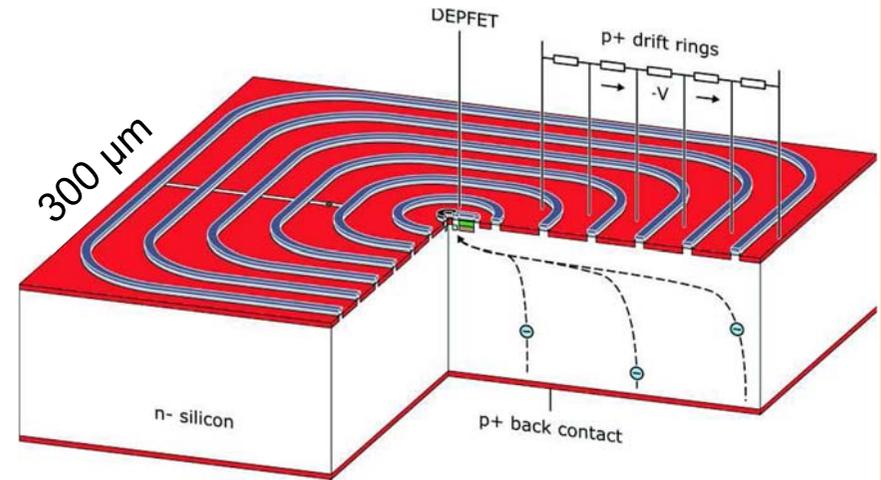
- Diffusion Compton dans le silicium (32 couches)
- Absorption photo-électrique dans le CdTe
- Blindage actif : BGO + photo-diodes
- Polarimétrie sur 50-200 keV

### ○ Au total

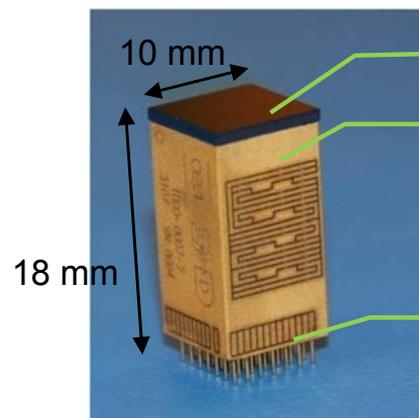
- 4 caméra Compton
- 150 kg
- 40-600 keV
- $\alpha = 8$  à 100 keV (effet Doppler)
- Sensibilité 1 mcrab
- Sensibilité de polarimétrie 10 mcrab



- Macropixels : SDD + DePFET
  - SDD : large surface, faible capacité
  - DePFET : stockage dans la grille interne, lecture et reset à la demande
- Matrice de  $64 \times 64$  macropixels
  - Lecture cyclique en ligne, mise en forme des colonnes en parallèle ( $6 \mu\text{s}$ )



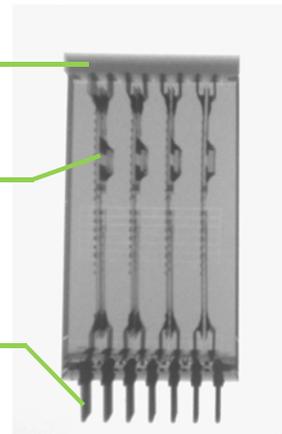
- Hybride à base de CdTe :
  - Chaînes spectroscopiques individuelles autodéclenchées ultra bas bruit (seuil bas 2 keV,  $\Delta E < 1$  keV à 60 keV).
  - Dispositif aboutage sur 4 côtés pour réaliser un large plan focal spectro-imageur X-dur (dynamique 300 keV, extension possible jusqu'à 1 MeV).



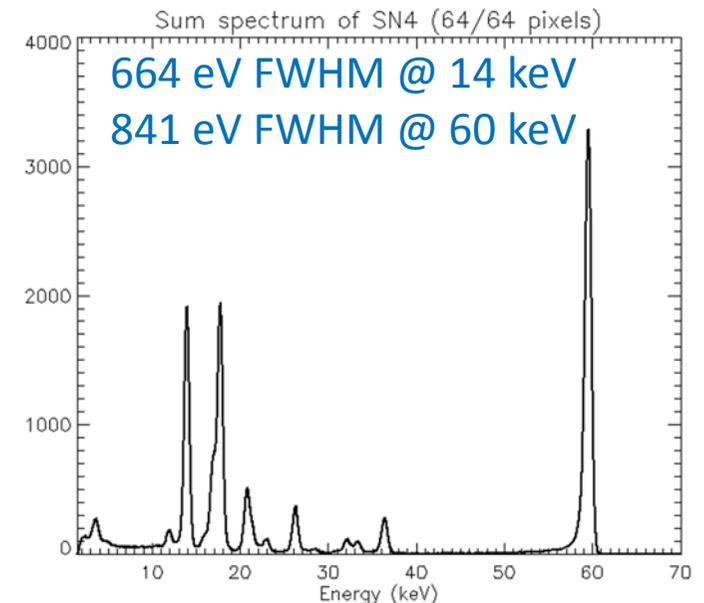
Cristal de CdTe à pixels)

Electronique frontale  
(ASIC IDeF-X montés sur  
micro-circuits et empilés)

Interface arrière pour  
report sur un circuit

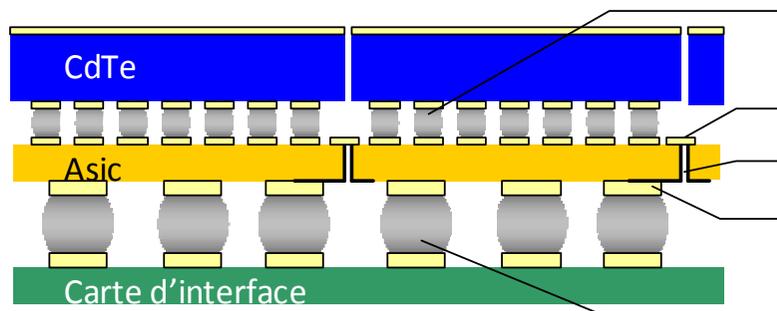
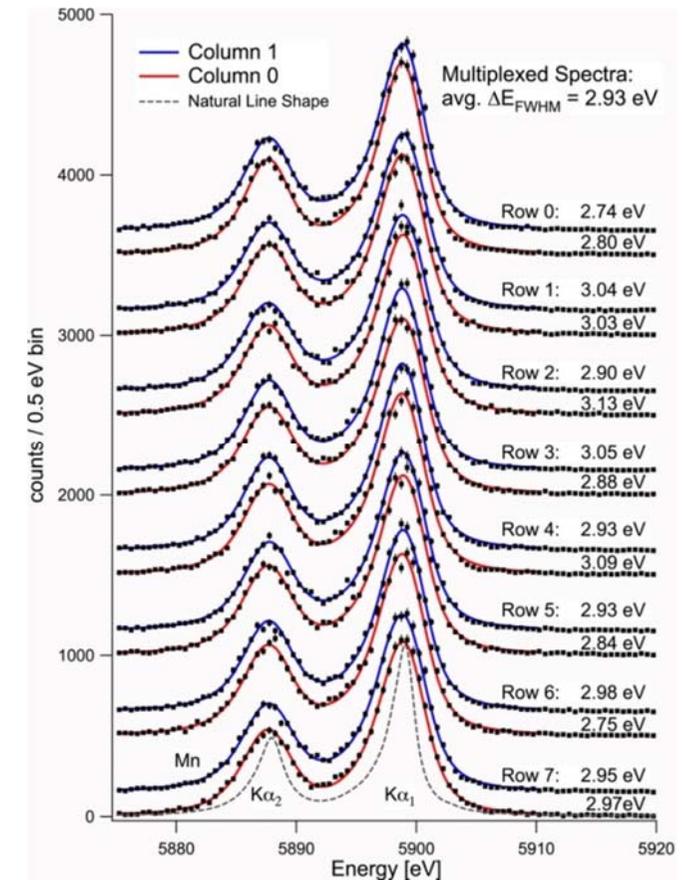


Radiographie



- 3 générations de prototypes réalisés : Caliste 64, Caliste 256, Caliste HD
- Contraintes mécaniques, thermiques, électriques résolues
  - Concept mature pour des télescopes avec des PSF de 1-2 mm

- Microcalorimètre X
  - Imagerie en évitant les couplages électriques et thermiques entre pixels  
→ Développement d'électronique cryogénique
- Détecteurs X : Silicon active pixels sensors
  - Diminuer le temps mort de lecture → Développement de nouveau concept de lecture
- Détecteurs X-dur
  - Hybrides 3D à base de CdTe pour une fine pixelisation et des performances spectrales ultimes → Développement d'électronique 2D



Bille intérieure d'indium

Plot intérieur d'entrée-sortie

Trous traversant

Plot extérieur d'entrée-sortie

Bille extérieure d'indium

- Les systèmes de détection pour l'astronomie de hautes énergies gamma sont généralement l'association de plusieurs détecteurs :
  - Si/CdTe pour une large bande spectrale
  - Plan focal/détecteur d'anticoïncidence
  - Détecteur à gaz + matrice de pixels Si (*gaz pixel detector*)
  
- La tendance pour les optiques est le développement de miroirs à haute résolution angulaire (10-20 arcsec) au-delà de 10 keV et des longueurs focales modérées (10 m).
  - Nécessite des détecteurs à petits pixels (100  $\mu\text{m}$ ) et de large surface.
  
- L'obtention des performances ultimes des détecteurs passent par la mise au point de procédés d'hybridation et le développement d'électronique frontale.

## ○ Ouvrages

- G. F. Knoll, Radiation Detection and Measurement, 3rd Ed, 1999.
- W.R. Leo, Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiment, Springer-Verlag, 1994.
- G. Lutz, Semiconductor Radiation Detectors, Springer-Verlag, 1999.
- A. Meuris, Etude et optimisation du plan de détection de haute énergie en Cd(Zn)Te de la mission spatiale d'astronomie X et gamma Simbol-X, Thèse de doctorat, 2009.

## ○ Sites web

- IXO instruments: <http://constellation.gsfc.nasa.gov/technology>
- R&D Silicon devices: [http://www.hll.mpg.de/05\\_research/res\\_device-physics.html](http://www.hll.mpg.de/05_research/res_device-physics.html)
- [http://xmm.esa.int/external/xmm\\_user\\_support/documentation/technical/EPIC/index.shtml](http://xmm.esa.int/external/xmm_user_support/documentation/technical/EPIC/index.shtml)
- <http://www-glast.stanford.edu/instrument.html>
- INTEGRAL instruments: <http://sci.esa.int/science-e/www/object/index.cfm?fobjectid=31175>

### ○ Papiers

- F. Muleri et al., " Low energy polarization sensitivity of the Gas Pixel Detector", NIM A 584 (2008) 149-159.
- T. Takahashi et al., "The ASTRO-H mission", SPIE 7732 (2010).
- H. Tajima et al., "Soft Gamma-ray Detector for the ASTRO-H mission", SPIE 7732 (2010).
- P.A.J. de Korte, "Cryogenic imaging spectrometers for X-ray astronomy« , NIM A 444 (2000) 163-169.

### ○ Contributions

- Philippe Laurent (APC): détecteur d'anticoïncidence de Simbol-X.
- Stéphane Schanne (CEA/Irfu) et Jean-Pierre Roques (CNRS/CESR) : INTEGRAL/SPI.
- Arnaud Claret (CEA/Irfu) : Cellule Radiations Spatiales au CEA/Irfu.
- Olivier Gevin (CEA/Irfu) : Conception ASIC IDeF-X.
- Olivier Boulade (CEA/Irfu) : CCD.