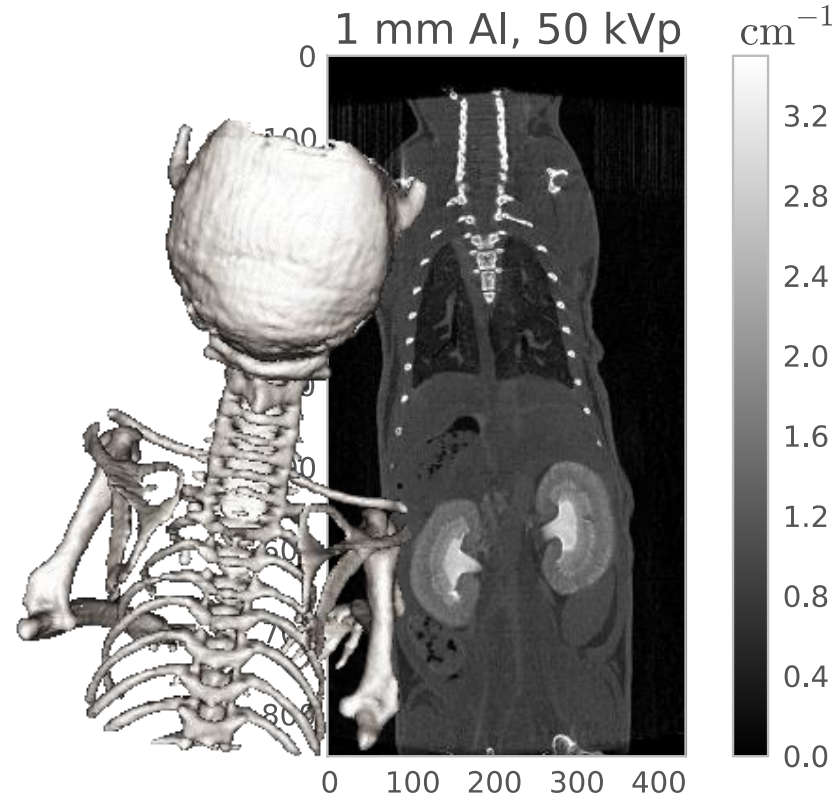
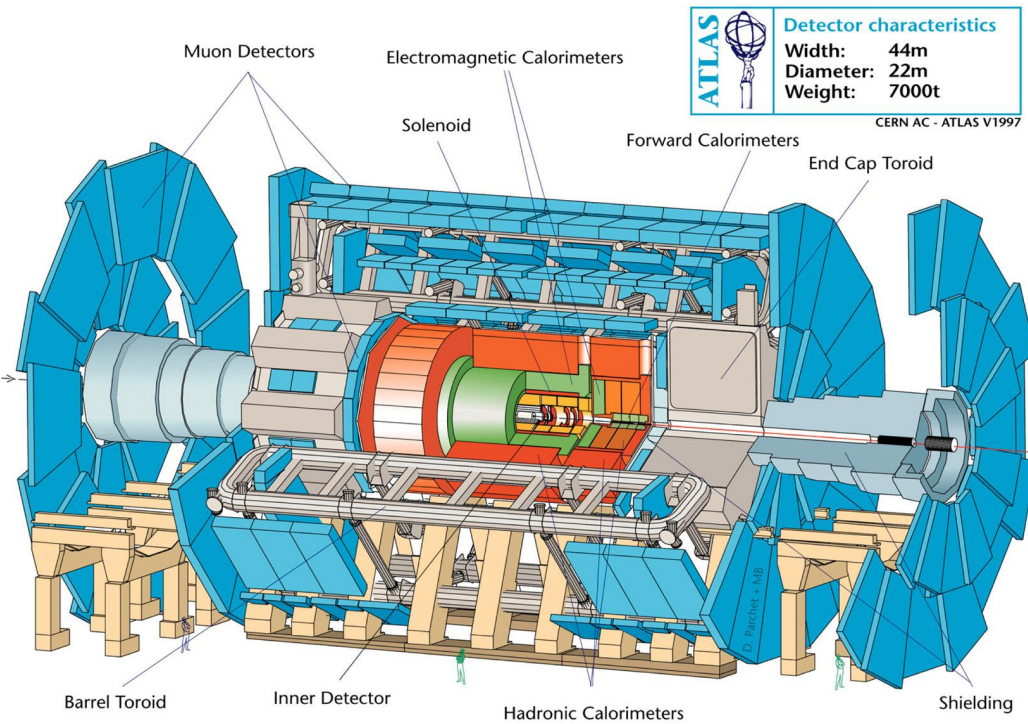
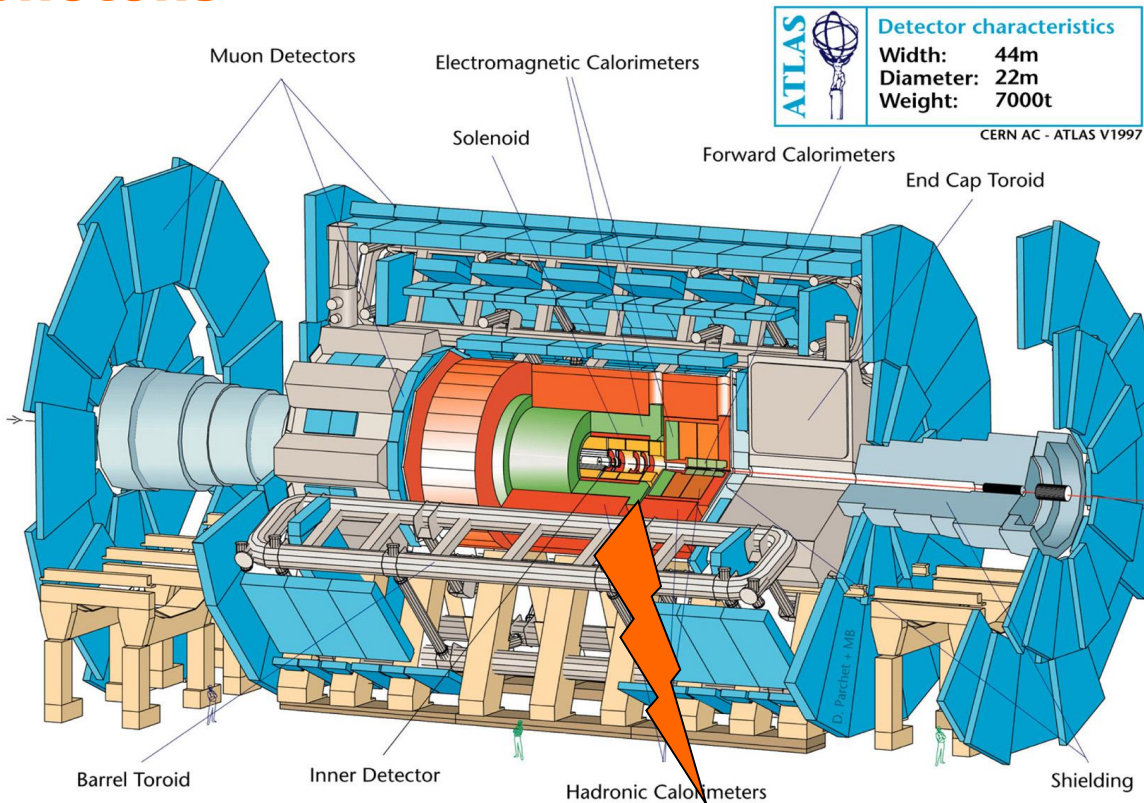


Les caméras XPAD3 à pixels hybrides de Si et de CdTe pour le comptage de rayons X

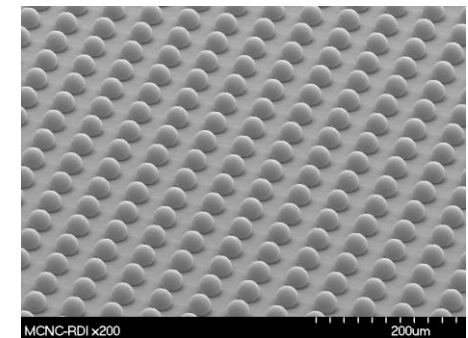
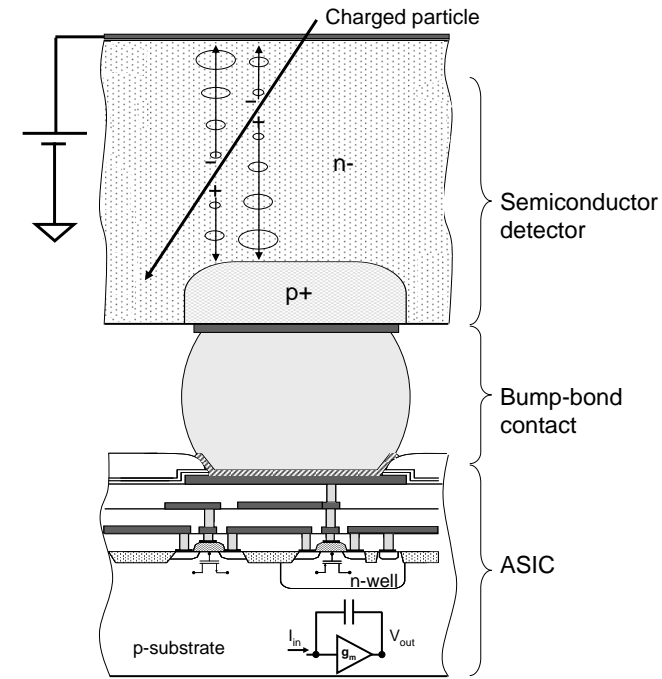


Détecteurs à comptage de rayons X: une rupture technologique pour le développement du CT à comptage de photons



Detector characteristics	
Width:	44m
Diameter:	22m
Weight:	7000t

CERN AC - ATLAS V1997

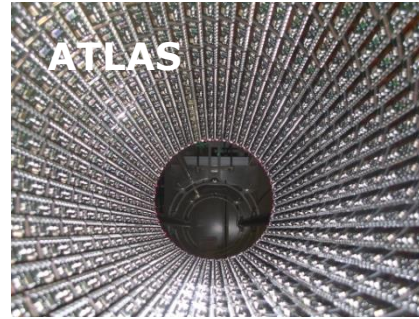


Réduction de la dose
Amélioration du contraste
Développement du CT spectral

- Suppression du bruit
- Sélection de l'énergie
- Grande dynamique

XPAD : X-ray Pixel chip with Adaptable Dynamics

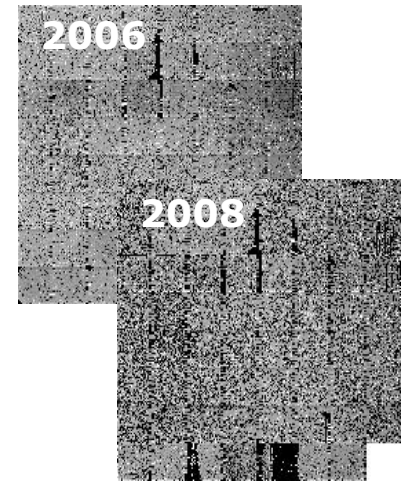
Début du projet pixel hybrides



50 x 400 μm^2 pixels



330 x 330 μm^2 pixels



1991

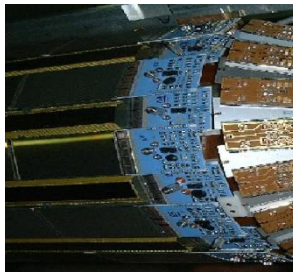
1998

2000



1996

DELPHI :
Première mondiale



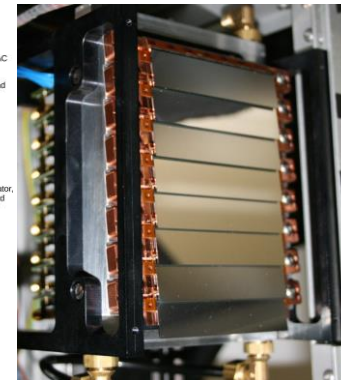
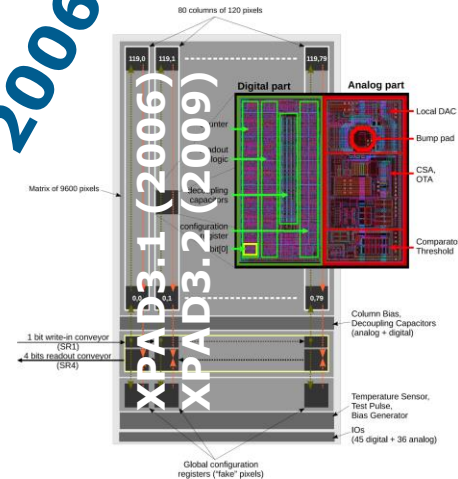
XPAD1 : premier détecteurs à pixels hybrides pour la détection de rayons X

XPAD1 (1998)



DELPHI diodes

2006

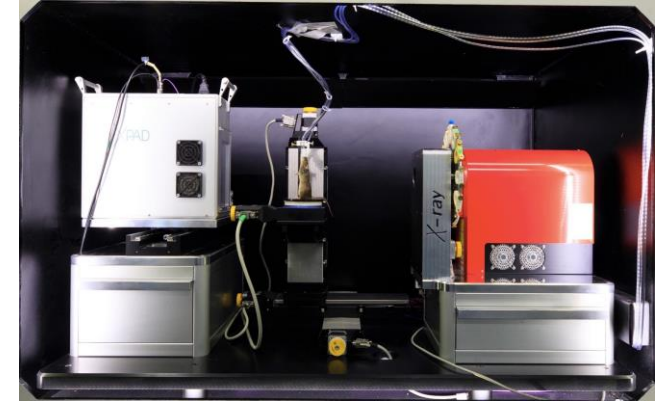
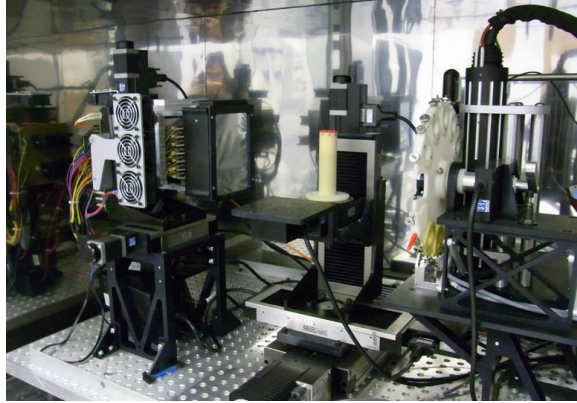
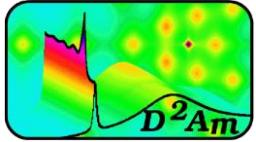


130 x 130 μm^2 pixels

Delpierre, JINST 9 (2014) C05059

Journée thématique du réseau détecteurs semi-conducteurs
IN2P3-IRFU, 31 mai – 1^{er} juin 2018, LPSC, Grenoble

Pixels hybrides XPAD3 de Si et CdTe pour la détection de rayons X



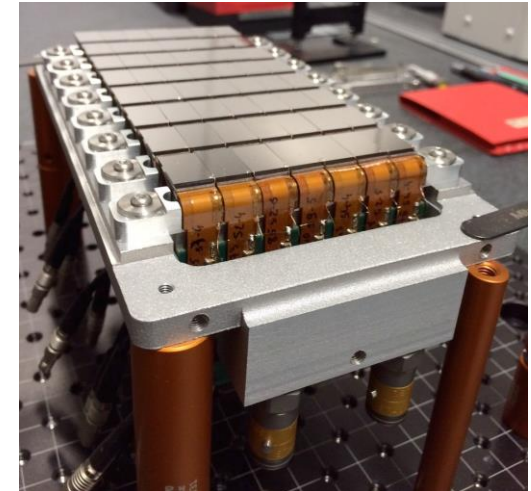
- **XPIX**: Développement des détecteurs à pixels hybrides XPAD.1 (2006) et XPAD3.2 (2009) avec des capteurs de Si et de CdTe

- > 0,5 Mpixels $130 \times 130 \mu\text{m}^2$
- 240 images/s
- 5-35 keV (XPAD3.1/Si: D1-3)
- 5-60 keV (XPAD3.2/Si: D4-6)

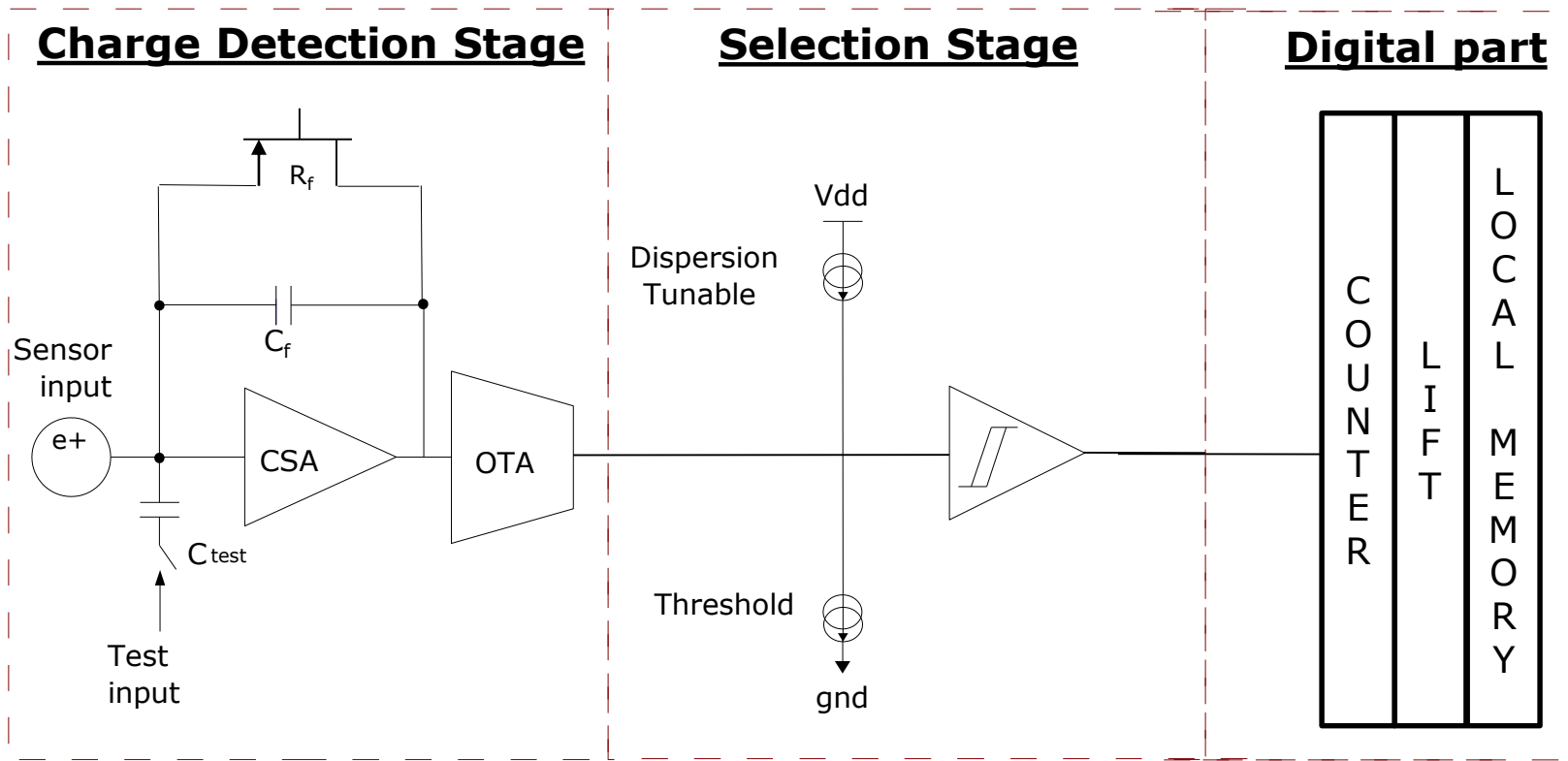
2011
2013

CHiPSpeCT (PhysiCancer 12)

- XPAD3.2/CdTe (D7)



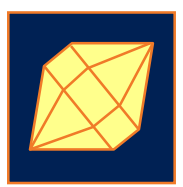
Architecture du pixel XPAD3



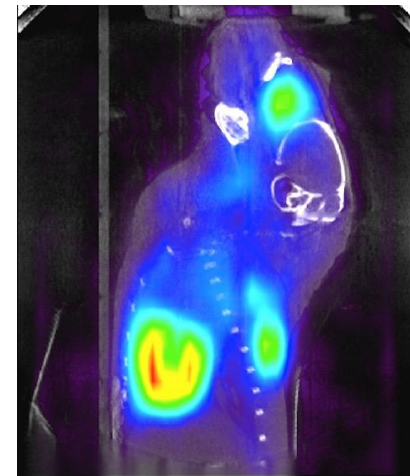
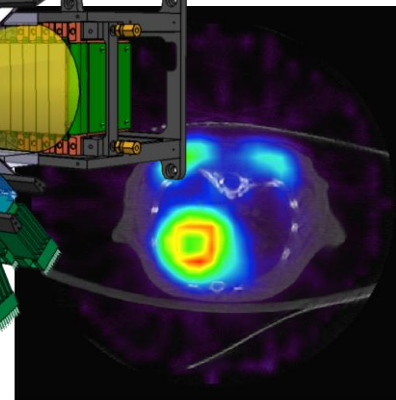
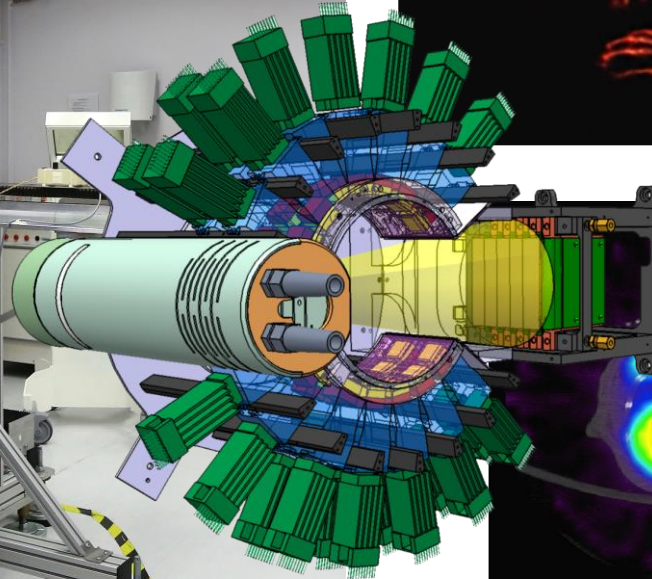
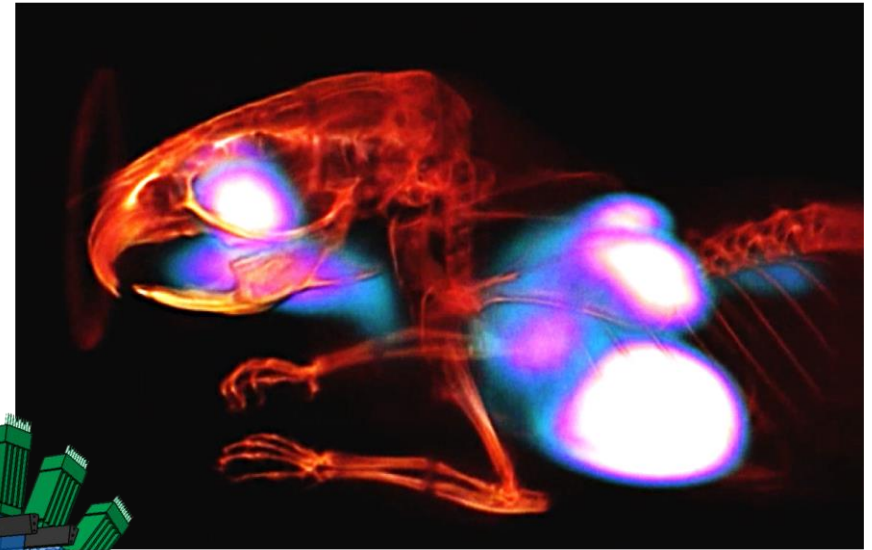
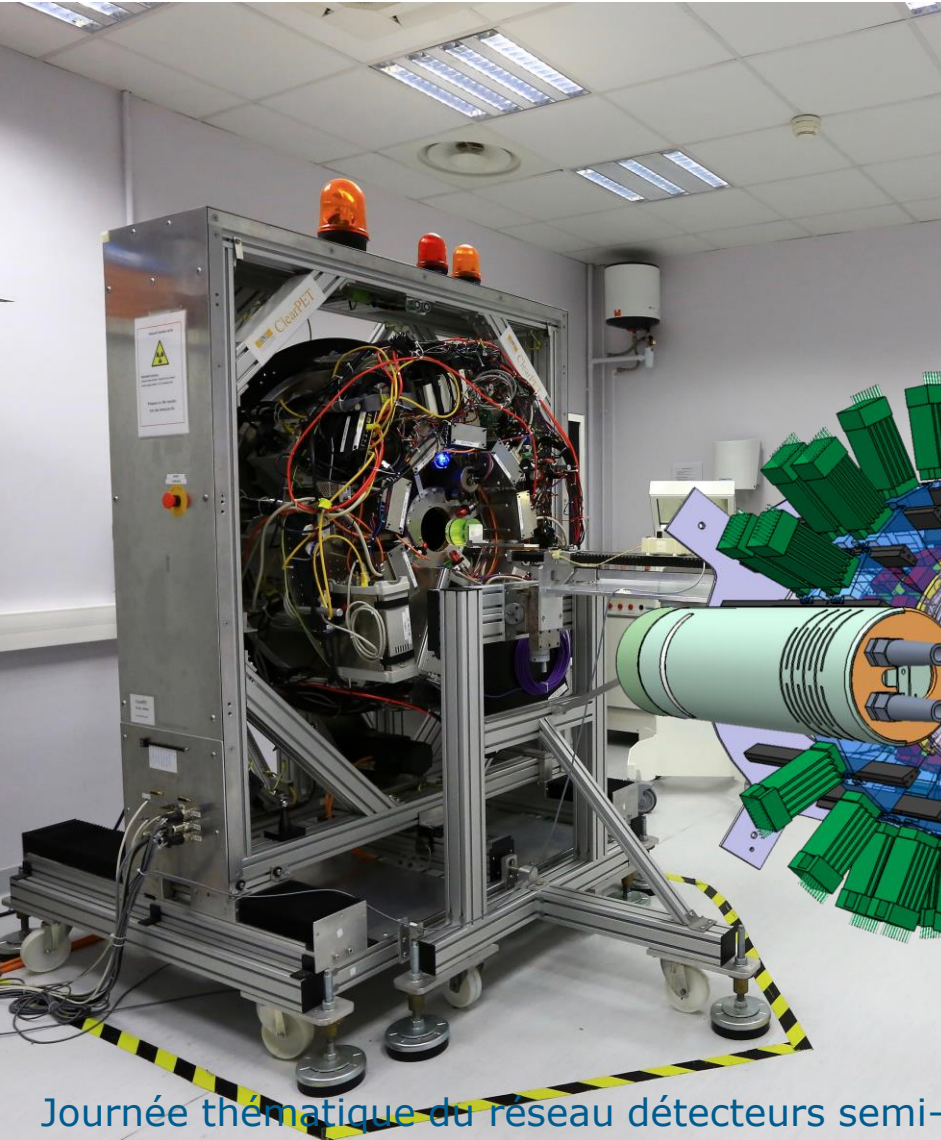
Gain : 89 nA/keV
Bruit : 127 e⁻ rms
Linéarité : < 10 % @ 35 keV

Consommation : 40 μ W/pixel
Résolution du seuil : 57 e⁻
Seuil minimum : < 4 keV

TEP/CT simultané: preuve de concept avec le prototype ClearPET/XPAD



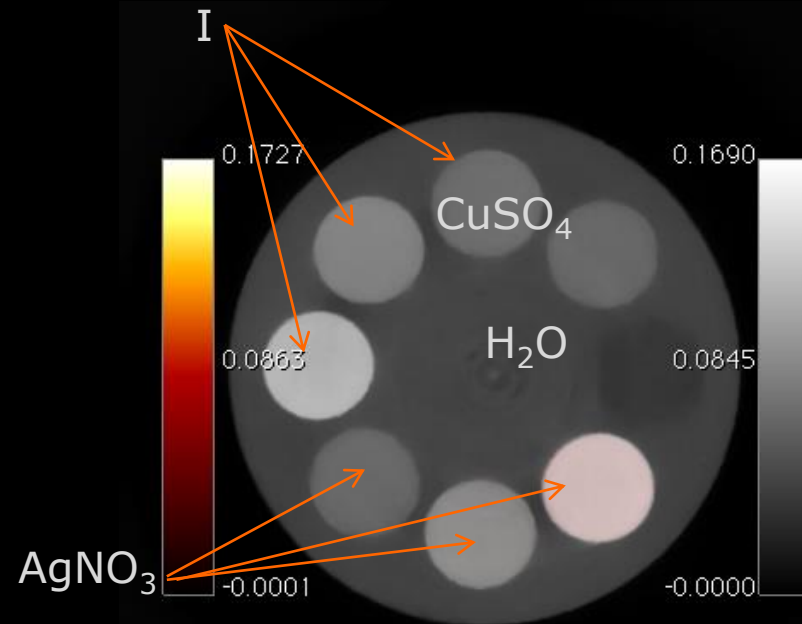
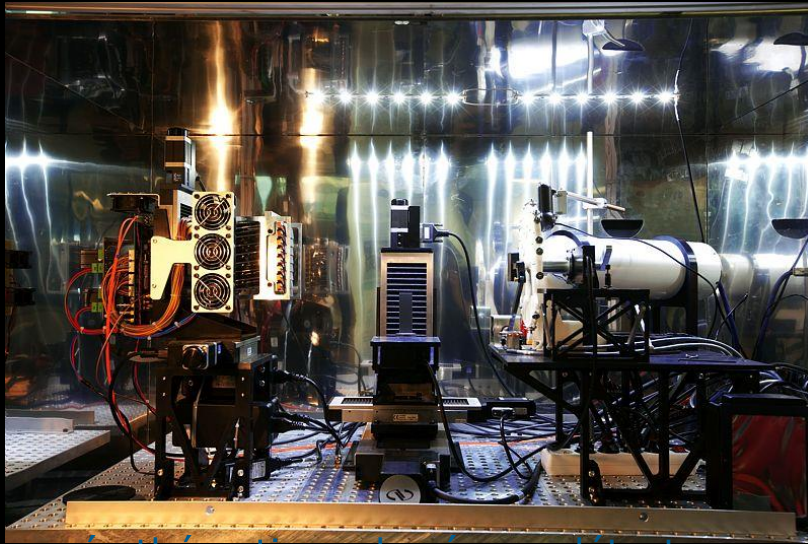
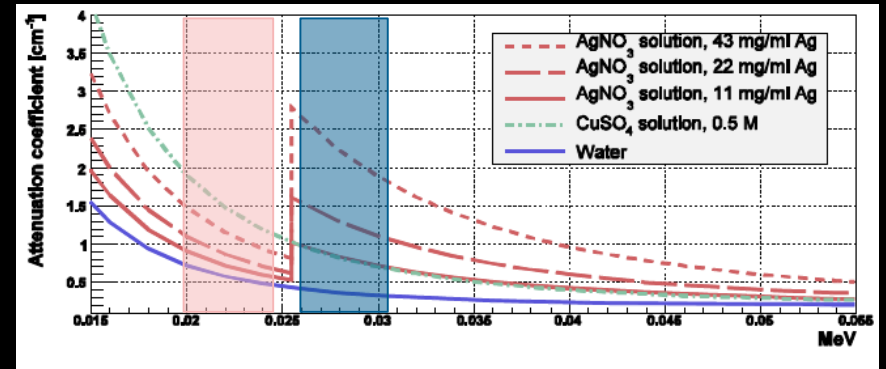
M Hamonet et al., Proc. IEEE NSS/MIC 2016



Journée thématique du réseau détecteurs semi-conducteurs
IN2P3-IRFU, 31 mai – 1^{er} juin 2018, LPSC, Grenoble



CT spectral : du noir & blanc à la couleur



CT spectral : une nouvelle modalité intrinsèquement anatomo-fonctionnelle

Imagerie au K-edge de l'iode utilisant des pixels composites avec le détecteur XPAD3

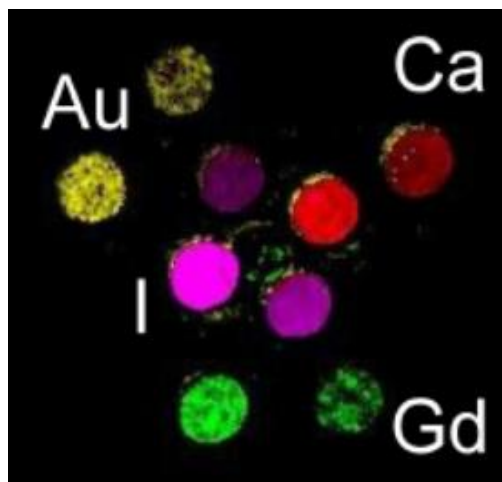
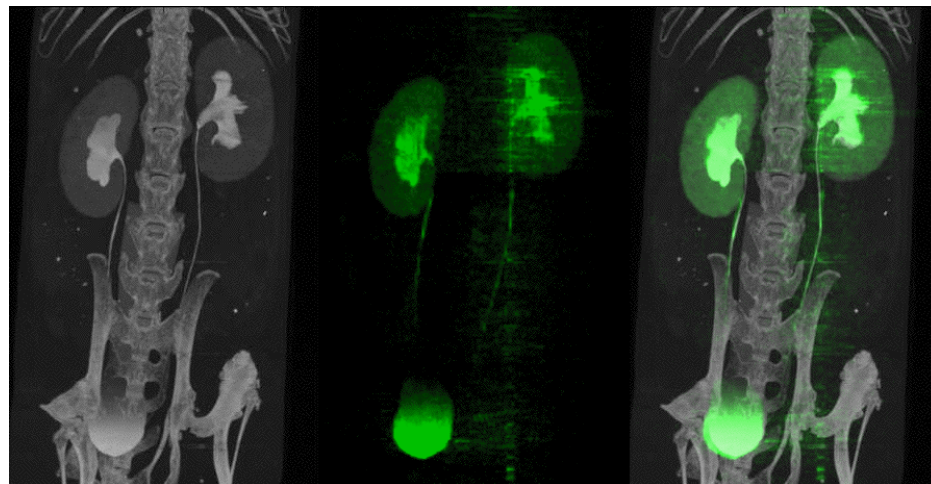
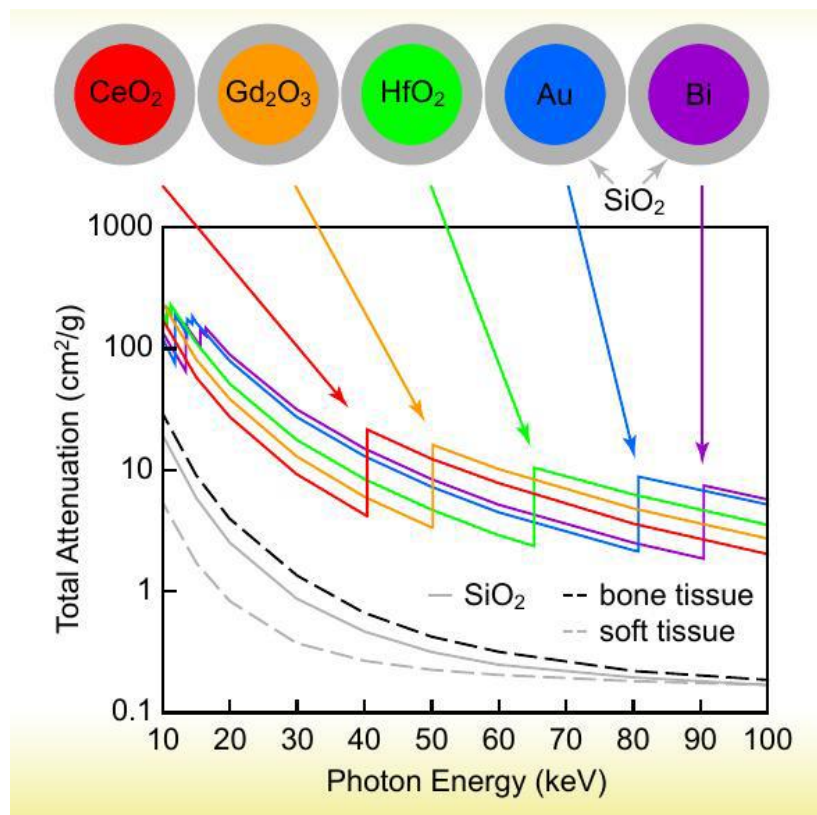


Image de MARS utilisant une gamme d'énergie clinique (CdTe-MedipixRX)

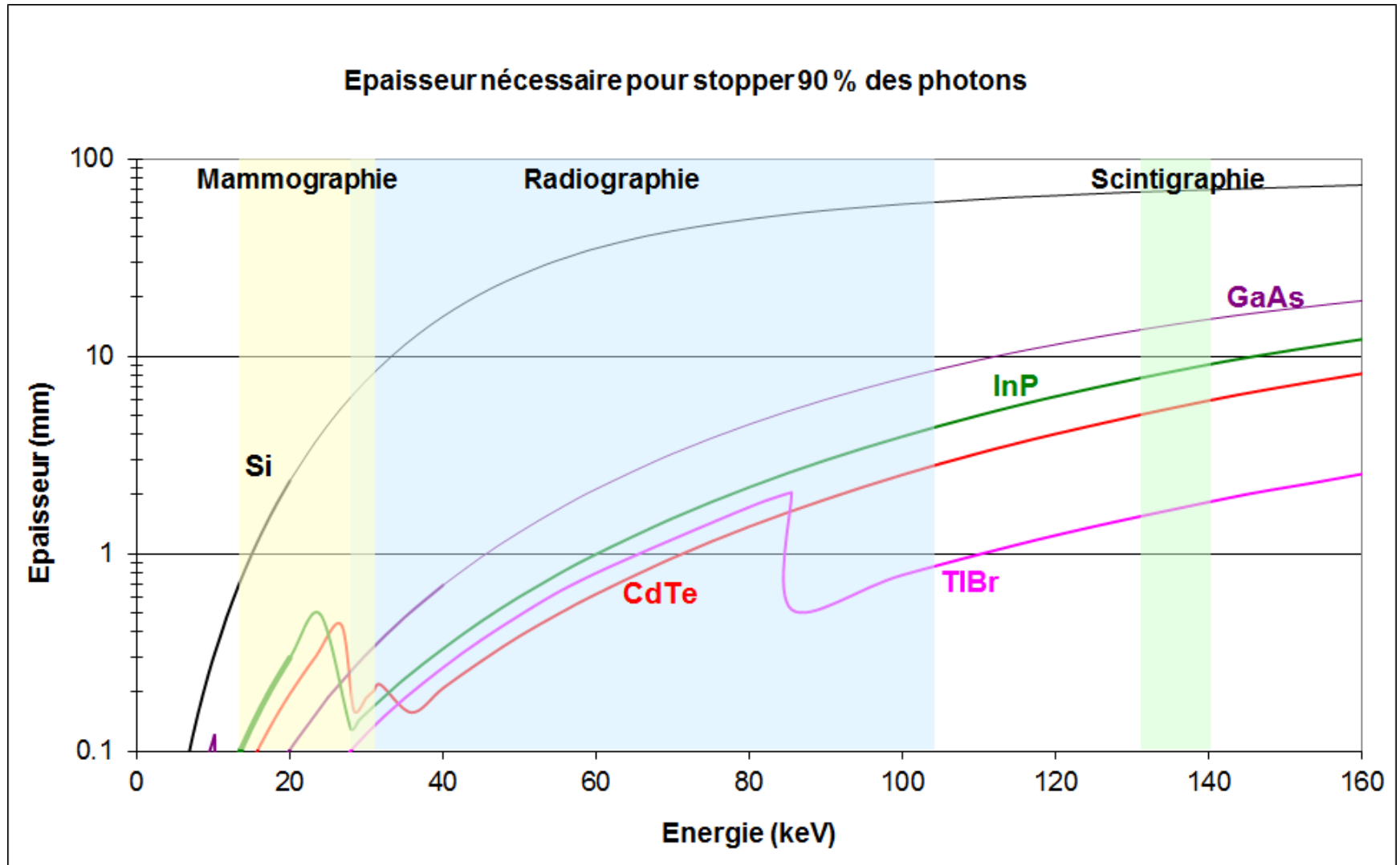
LE Cole et al. Nanomedicine **10** (2015) 321

courtesy: A Buttler, Medipix Collaboration, Mars Bio-Imaging

Journée thématique du réseau détecteurs semi-conducteurs
IN2P3-IRFU, 31 mai – 1^{er} juin 2018, LPSC, Grenoble



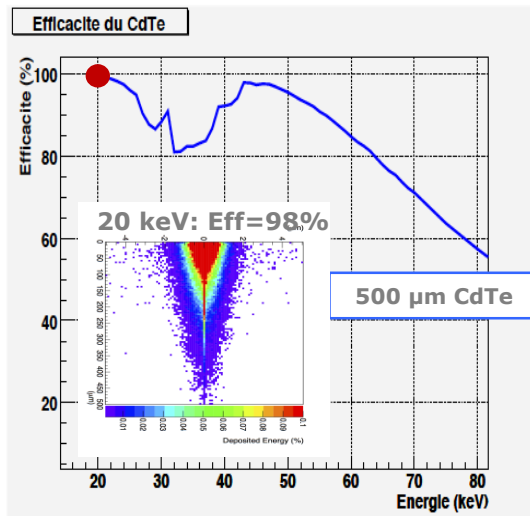
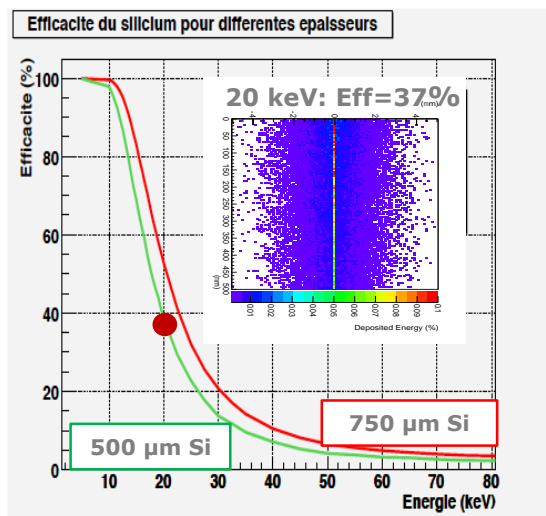
Capteurs pour la détection directe de rayons X



Courtesy: E. Gros d'Aillon, CEA-LETI

Quelles sont les differences ?

	Z	P (g/cm ³)	E _g (eV)	E _p (eV)	μ _e (cm ² /V/s)	τ _e (s)	μ _h (cm ² /V/s)	τ _h (s)	μ _e τ _e (cm ² /V)	μ _h τ _h (cm ² /V)
Diamond	6	3.52	5.5	13.0	4500		3800			
Si	14	2.32	1.12	3.62	1400	1×10 ⁻³	480	2×10 ⁻³	1.4	0.96
Ge	32	5.33	0.67	2.95	3900	1×10 ⁻³	1900	1×10 ⁻³	3.9	1.9
GaAs	32	5.32	1.43	4.30	8000	1×10 ⁻⁸	400	1×10 ⁻⁷	8×10 ⁻⁵	4×10 ⁻⁵
Cd _{0.9} Zn _{0.1} Te	49.1	5.78	1.57	4.64	1000	3×10 ⁻⁶	50	1×10 ⁻⁶	3×10 ⁻³	5×10 ⁻⁵
CdTe	50	5.85	1.44	4.43	1100	3×10 ⁻⁶	100	2×10 ⁻⁶	3.3×10 ⁻³	2×10 ⁻⁴



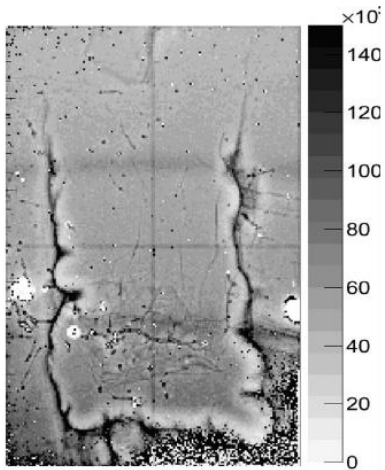
K-edge Cd : 26.7 keV

K-edge Te : 31.8 keV

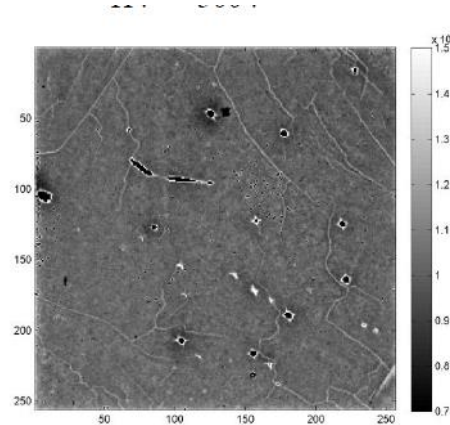
K-alpha Cd : 23.1 keV

K-alpha Te : 28.4 keV

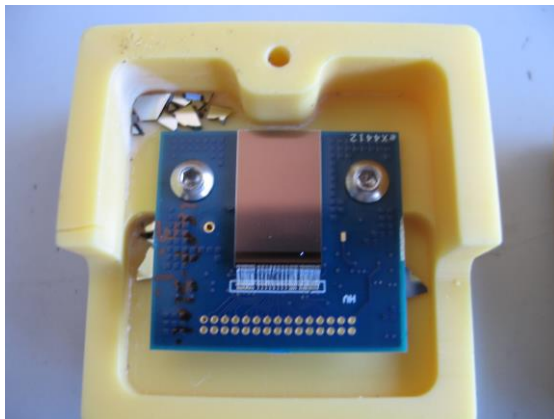
ChiPSpeCT & CALIPSO : caméra XPAD3.2/CdTe



XPAD3 Quad



Medipix II Quad

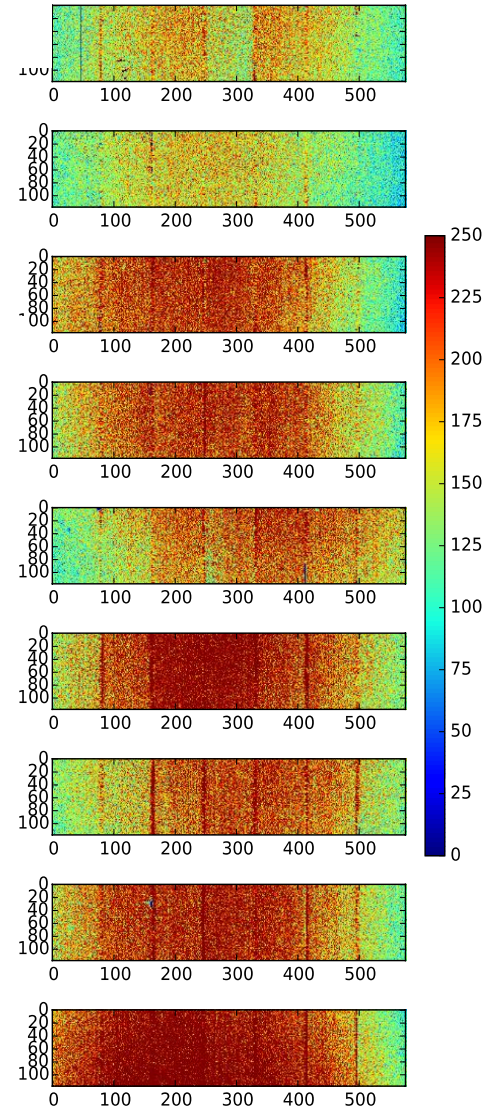
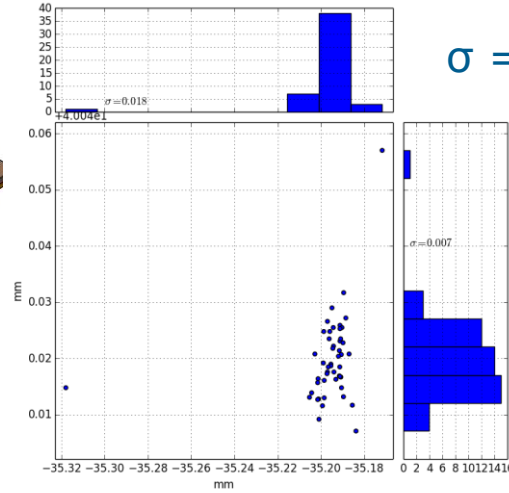
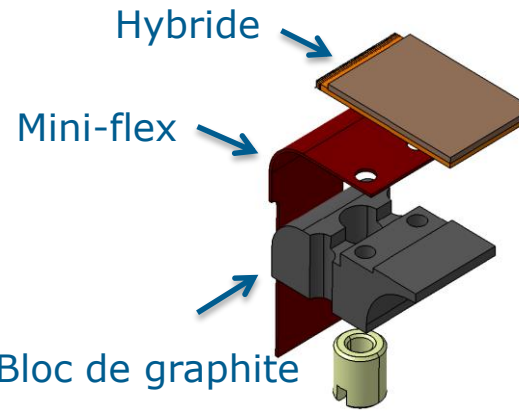


7 juin 2013

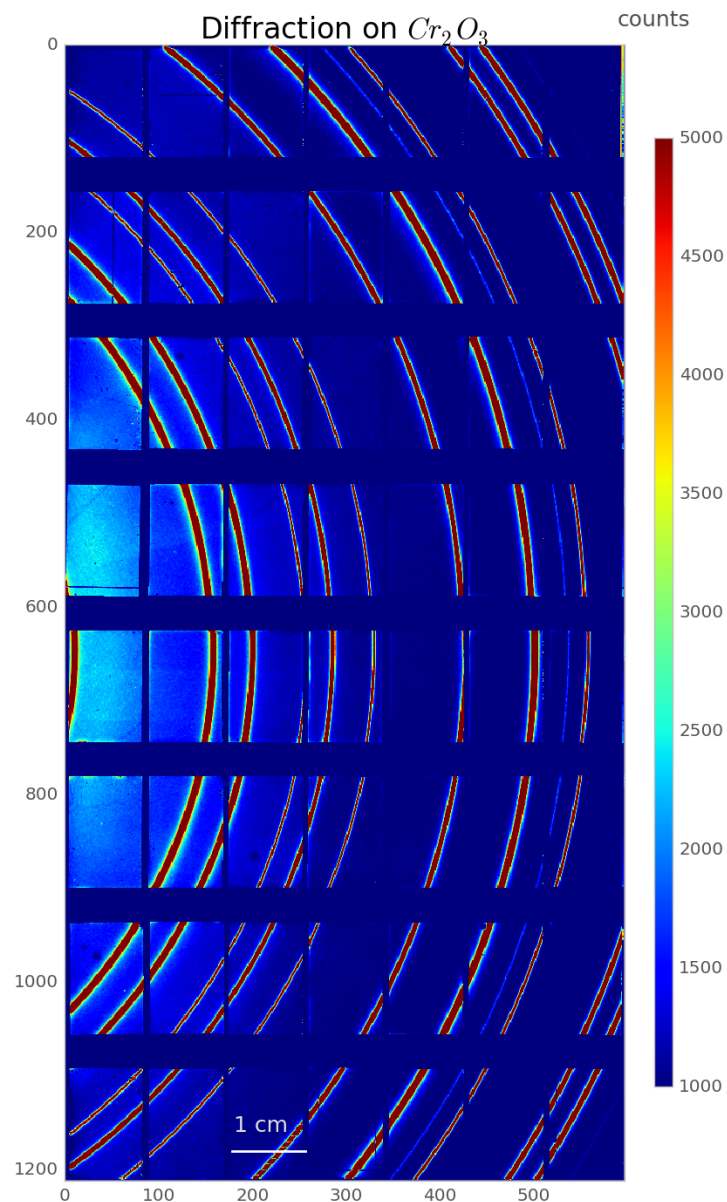
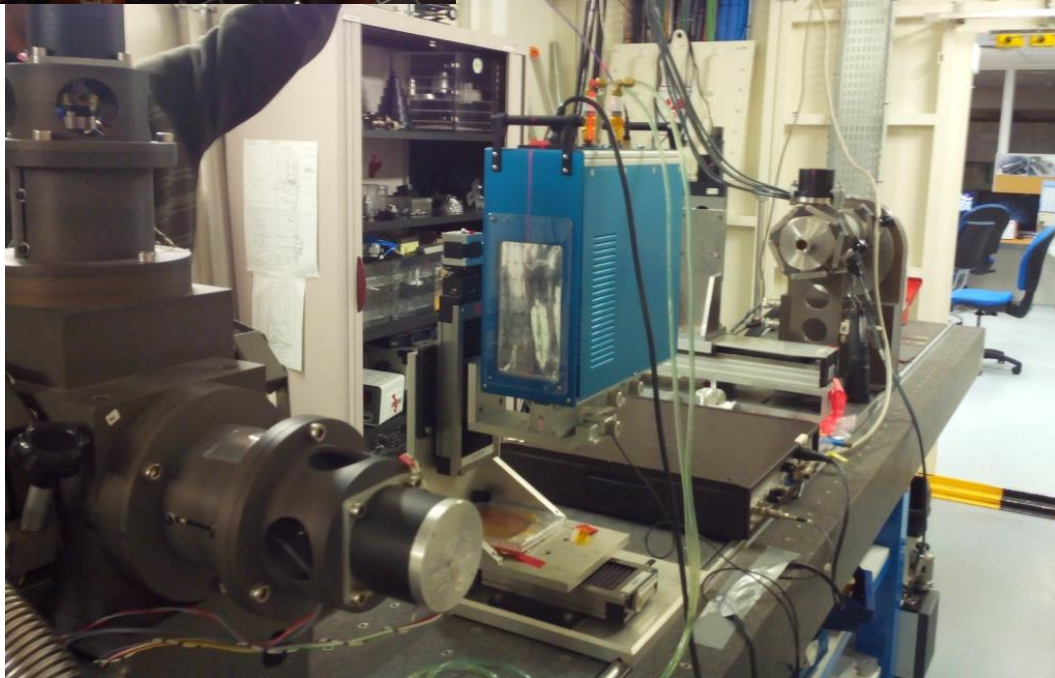
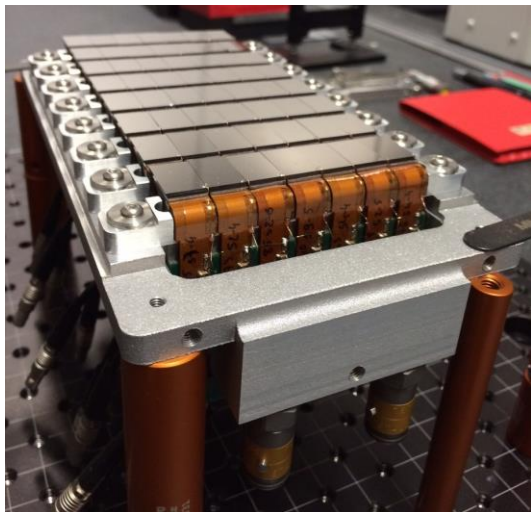
► HighZpad (FP7 ELISA)

- « Survey » de l'état de l'art en matière de capteurs à Z élevé et des moyens de les hybrider sur des circuits pixel pour obtenir des capteurs de la plus grande dimension possible
- 3 circuits pixel considérés (Medipix 2, Pilatus, XPAD3)
- Un « hybrideur » : XIE, techno indium
- Capteurs CdTe (Acrorad), ohmique → dimension pour faire un « Quad »
- Pour tous les circuits considérés: problèmes d'hybridation ou dommages aux capteurs → taches et courant de fuite élevé

Construction de la caméra CHiP SepCT



Premières irradiations sur la ligne D2AM de l'ESRF à 25.5 keV



Journée thématique du réseau détecteurs semi-conducteurs
IN2P3-IRFU, 31 mai – 1^{er} juin 2018, LPSC, Grenoble

Première étude longitudinale du développement tumoral hépatique chez la souris avec le micro-CT PIXSCAN-FLI



L Portal¹, F Cassol¹, M Dupont¹, Y Boursier¹, S Richelme², F Maina², C Morel¹

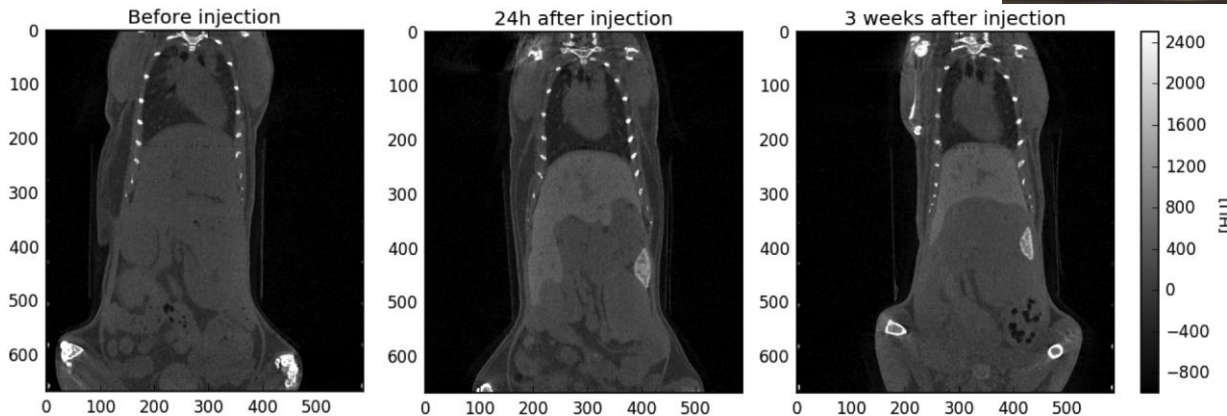
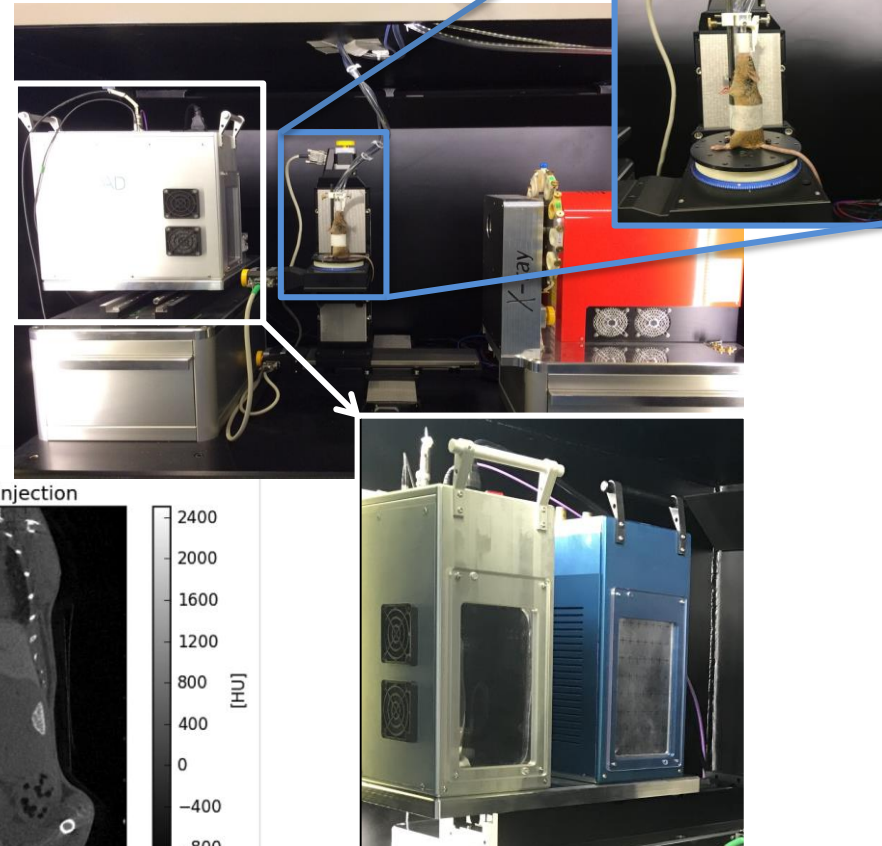
¹ Aix-Marseille Univ, CNRS/IN2P3, CPPM, Marseille, France

² Aix-Marseille Univ, CNRS, IBDM, Marseille France



Protocole d'acquisition in-vivo :

- Imagerie d'absorption standard
- Anesthésie gazeuse : 3 % Isoflurane
- Source : 50 kV/500 μ A/0.6 mm Al
- Mode d'acquisition : continue
- Temps d'exposition : 575 ms + 50 ms DT
- Projections : 720 (0.5°)
- Dose délivrée : 177 mGy/acquisition



Vues coronales d'une souris imagée avant, un jour après et trois semaines après injection de 100 μ L/30g d'Exitron nano 12000

Journée thématique du réseau détecteurs semi-conducteurs
IN2P3-IRFU, 31 mai – 1^{er} juin 2018, LPSC, Grenoble



Première étude longitudinale du développement tumoral hépatique chez la souris avec le micro-CT PIXSCAN-FLI



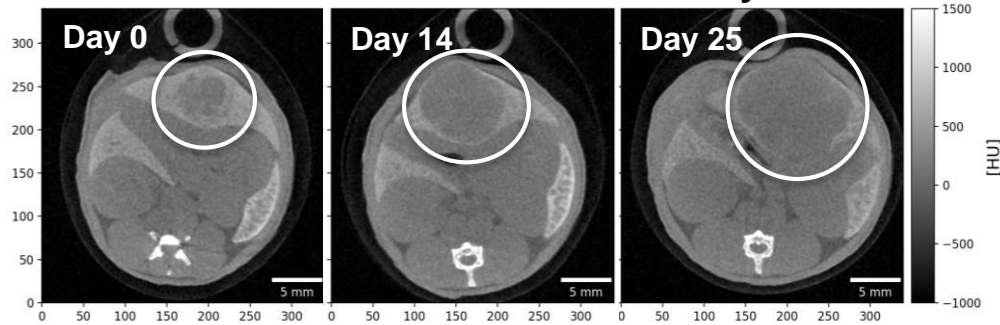
L Portal¹, F Cassol¹, M Dupont¹, Y Boursier¹, S Richelme², F Maina², C Morel¹

¹ Aix-Marseille Univ, CNRS/IN2P3, CPPM, Marseille, France

² Aix-Marseille Univ, CNRS, IBDM, Marseille France

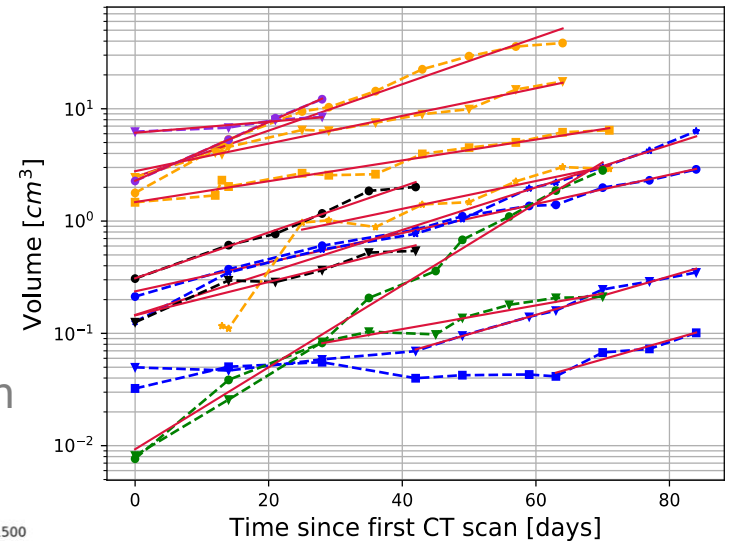
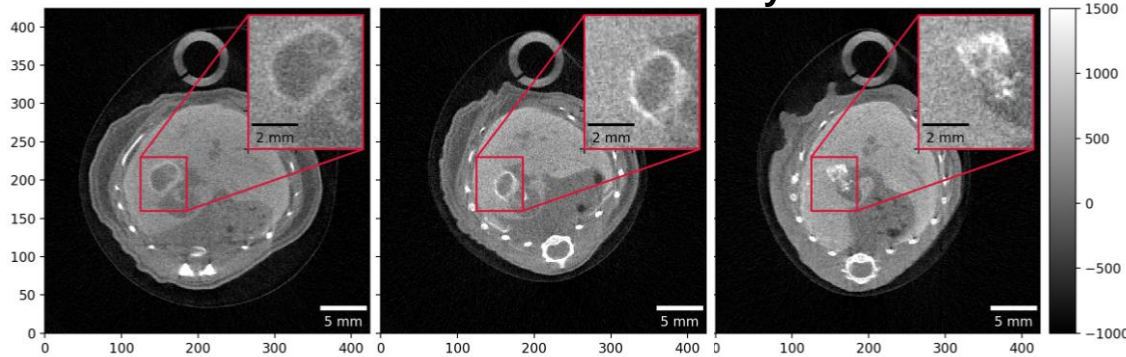


XPAD3/Si – 180 mGy



Suivi sur un mois d'une souris présentant un carcinome hépatocellulaire

XPAD3/Si – 180 mGy



Suivi de la réponse du traitement par une thérapie hépato-spécifique (Mek + Bcl-XL inhibition*) pendant 40 jours

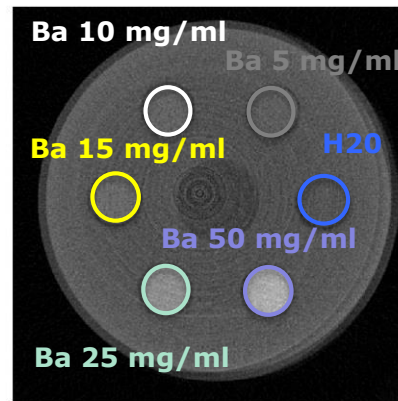
*Y. Fan et al., Hepatology 66 (2017)

Imagerie in vivo au K-edge du baryum

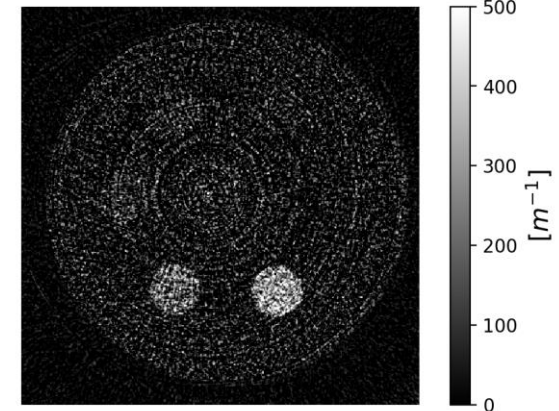
Tests préliminaires sur fantôme :

→ Identification de concentrations > 25 mg/ml

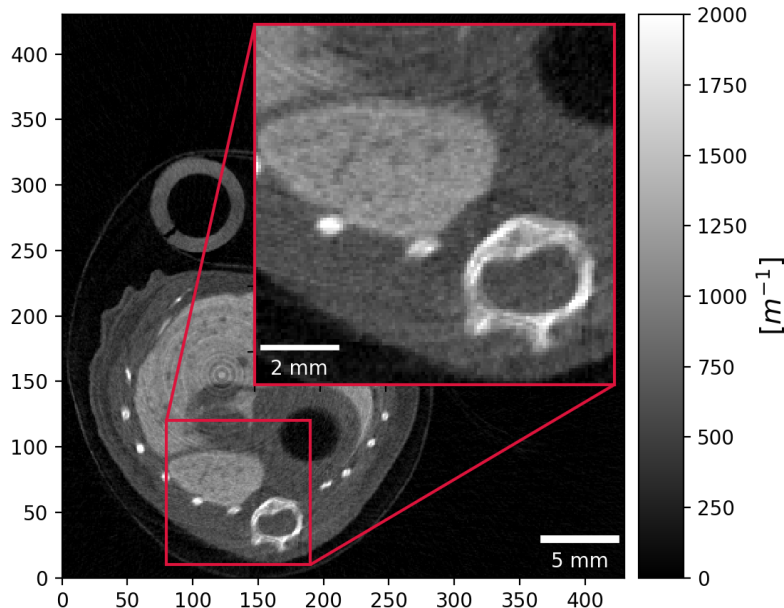
XPAD3/CdTe - PCCT - 40 mGy



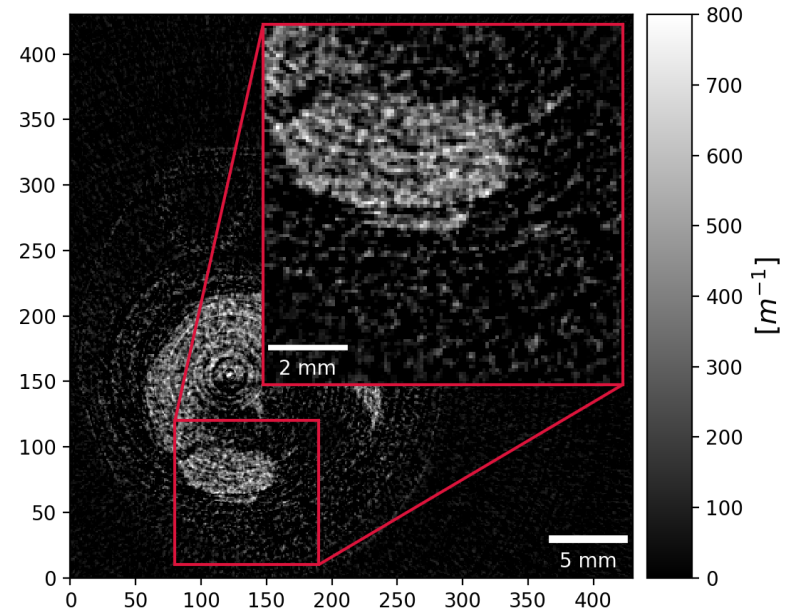
XPAD3/CdTe - 37.4 keV - 300 mGy



XPAD3/CdTe - PCCT - 40 mGy

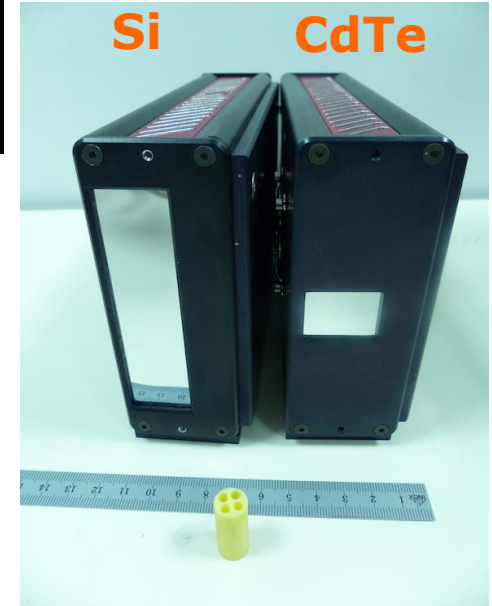
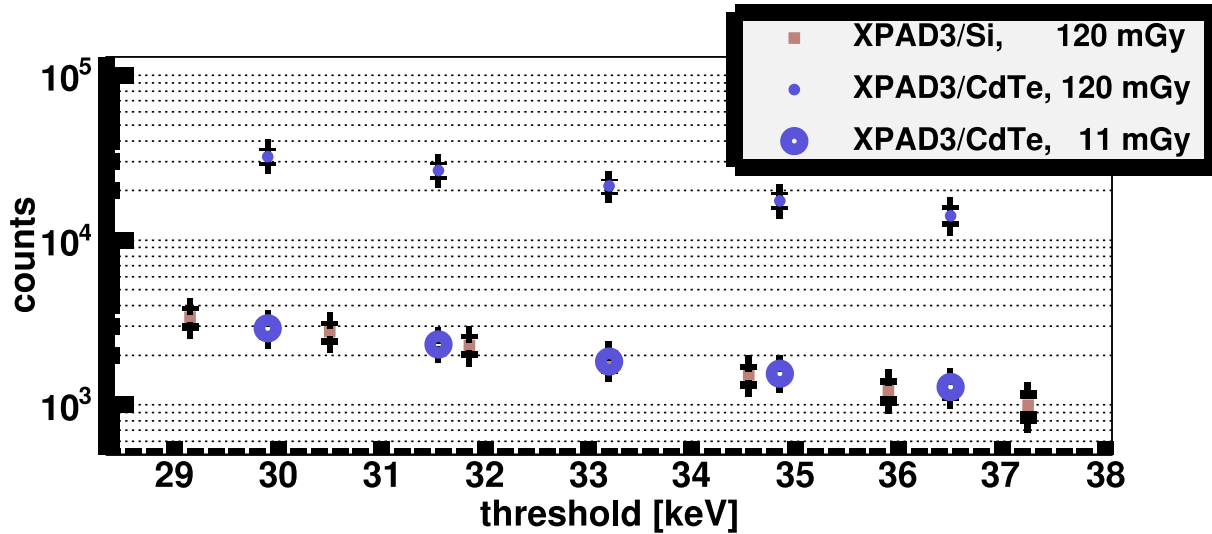


XPAD3/CdTe - 37.4 keV - 300 mGy



CdTe versus Si en CT d'absorption standard

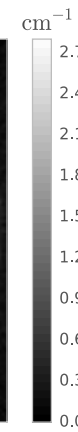
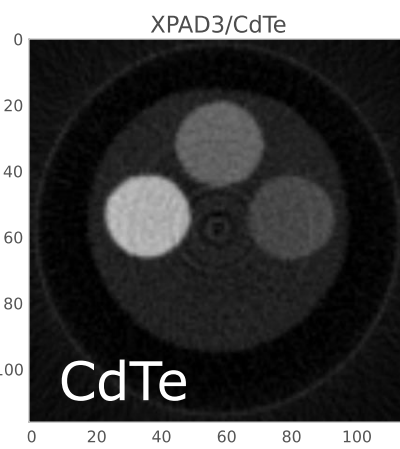
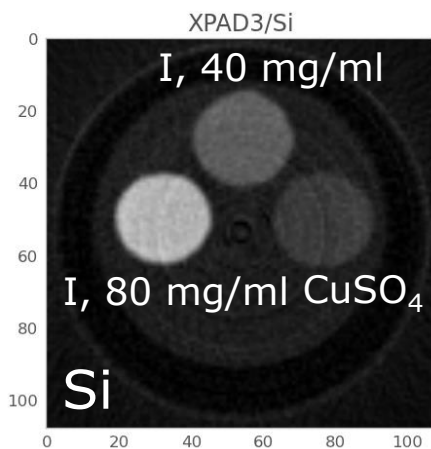
➤ Réduction de la dose x 10 pour $E > 30$ keV



120 mGy



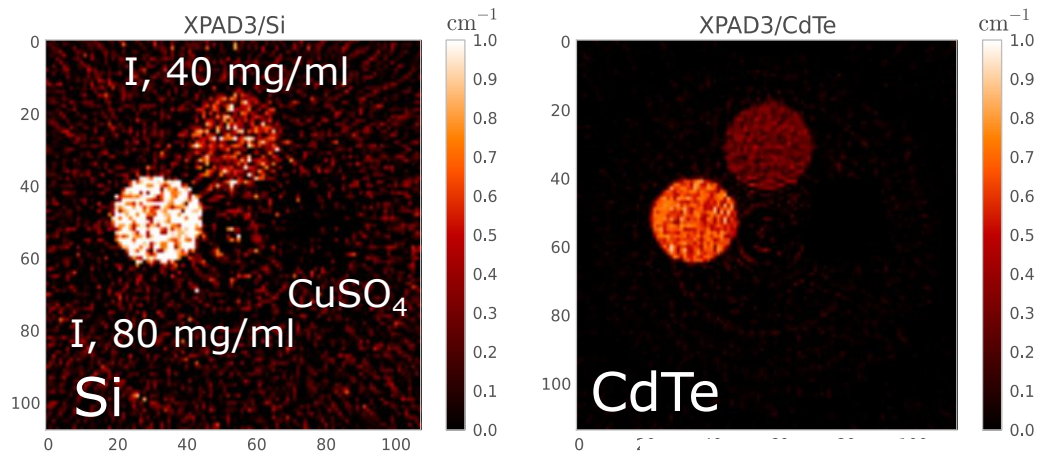
11 mGy



A statistique égale

CdTe versus Si en imagerie au K-edge

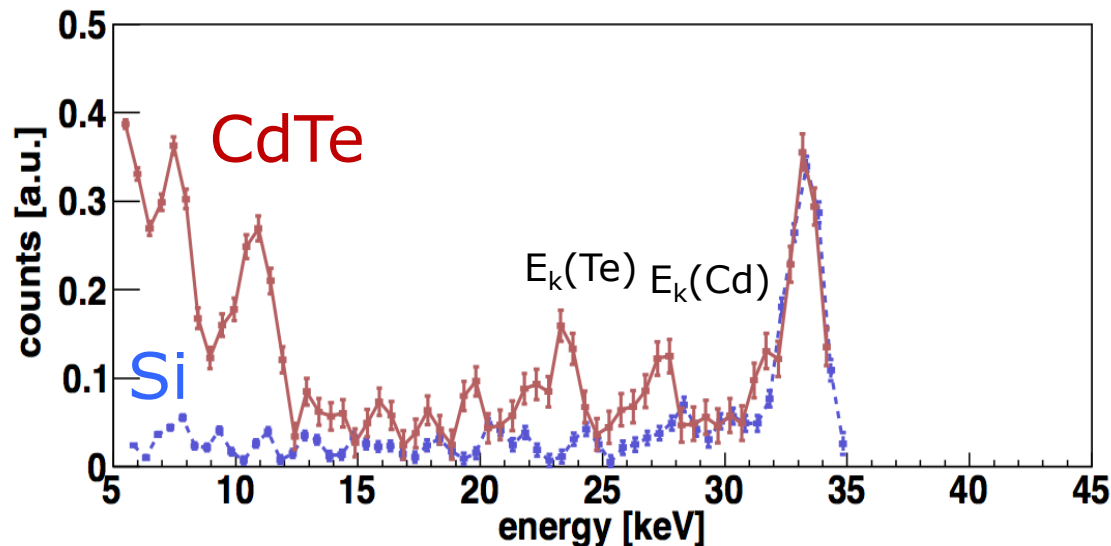
- Augmentation contraste/bruit $\times 2$



A dose égale (120 mGy)

- Limité par le partage des charges entre pixels et par la fluorescence (CdTe)

Faisceau à 33.2 keV



Etude du partage de charges avec XPAD3 Si et CdTe

Faisceau de $E_0 = 26$ keV

$$n_p(E_{th}, E_0) = N(E_0, \Delta E_0)$$

Probabilité de partage:

$$eff_p(\text{pixel}) = 1/(1-eff_{cs})$$

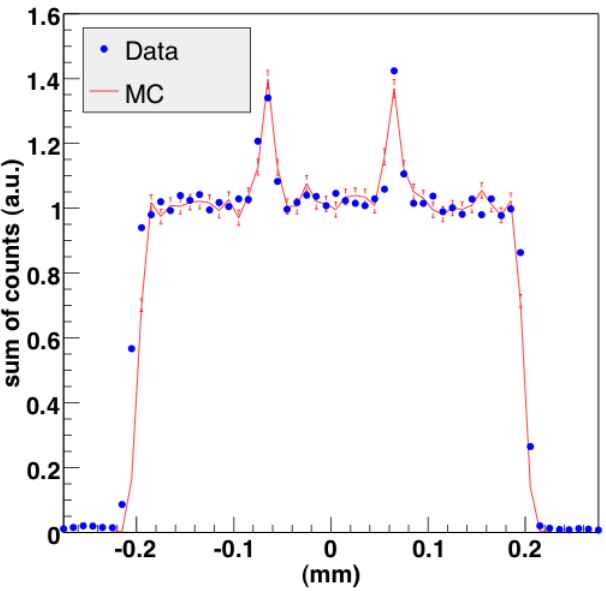
$$n(E_{th}, E_0) = (1-k)n_p(E_{th}, E_0) + kn_{cs}(E_{th}, E_0)$$

$$n_{cs}(E_{th}, E_0) \sim 1/E_0$$

$$k = 0.75 \text{ (mesuré), } 0.76 \text{ (simulé)}$$

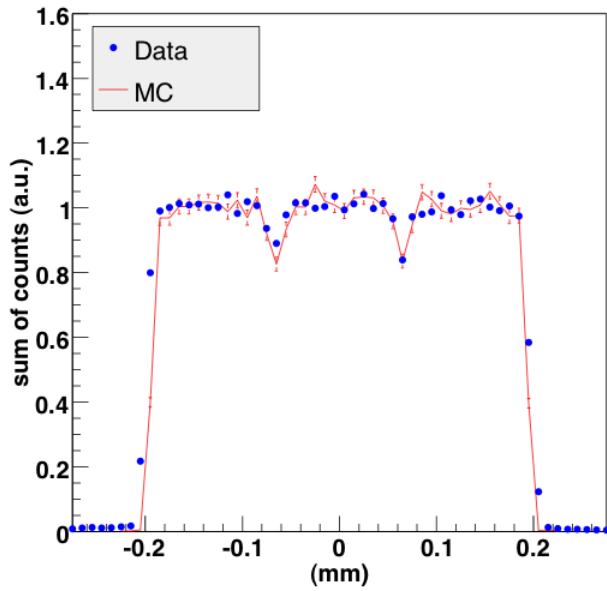
$$eff_{cs} = k (E_0/2 - E_{th})/E_0$$

XPAD3-S/Si, beam 26 keV, threshold 10 keV



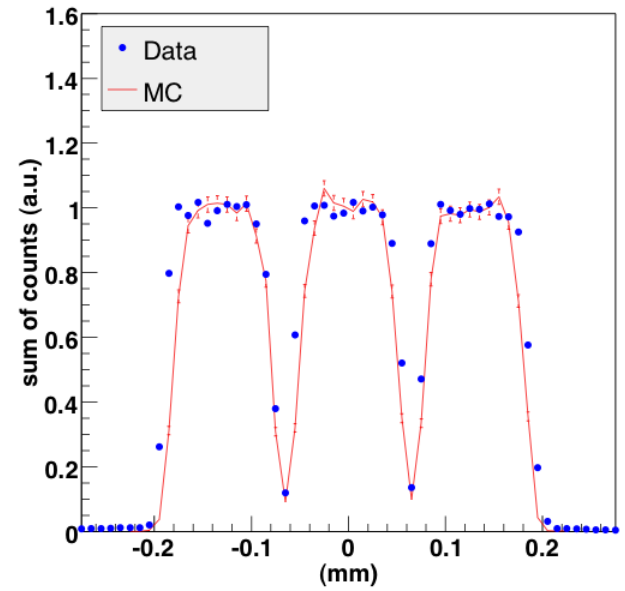
10 keV threshold

XPAD3-S/Si, beam 26 keV, threshold 14 keV



14 keV threshold

XPAD3-S/Si, beam 26 keV, threshold 22 keV

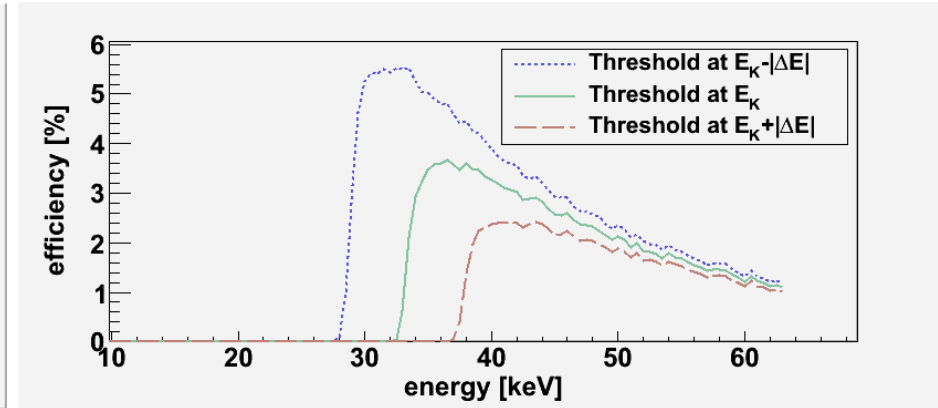
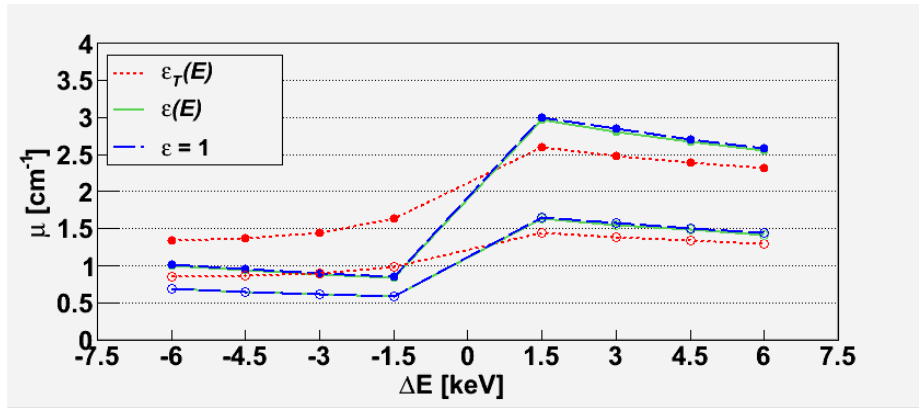


22 keV threshold

Cassol *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A **633** (2011) 111

Effet du partage de charges sur le contraste spectral

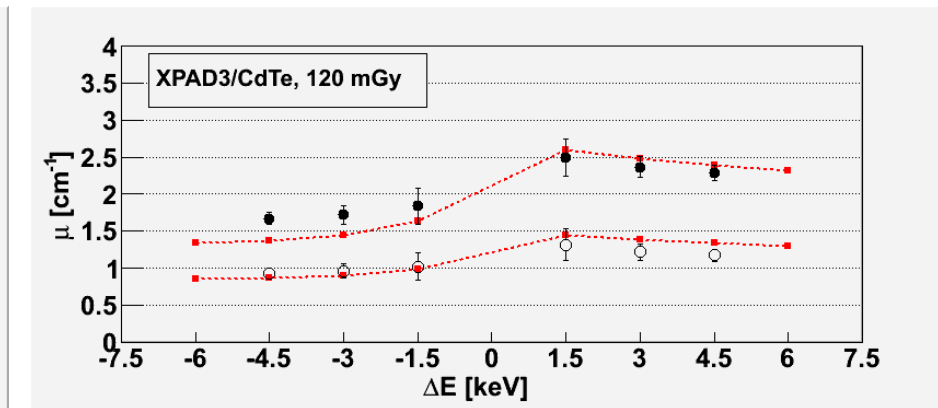
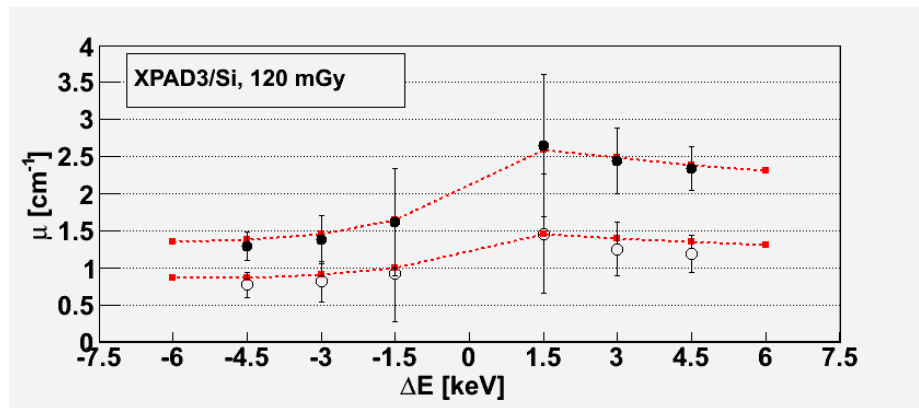
Simulation de capteurs de Si (marqueurs pleins: 0,630 M, marqueurs vides: 0,315 M)



Si

Données mesurées

CdTe



Cassol *et al.*, Phys. Med. Biol. **60** (2015) 5497



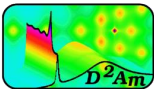
Patrick Pangaud, Stéphanie Godiot, Mohsine Menouni, Franca Cassol,
 Mathieu Dupont, Loriane Portal, **Margaux Hamonet**,
Carine Kronland-Martinet, **Hamid Ouamara**, **Didier Benoit**,
Stanislas Nicol, Yannick Boursier, Jean-Claude Clémens, **Thomas Fabiani**, **Alain**
Bonissent, Eric Vigeolas, Christophe Meessen,
 Franck Debarbieux



Frédéric Bompard,
Hector Perez-Ponce,



Stéphanie Hustache,
Arkadisuz Dawiec,
 Clément Buton



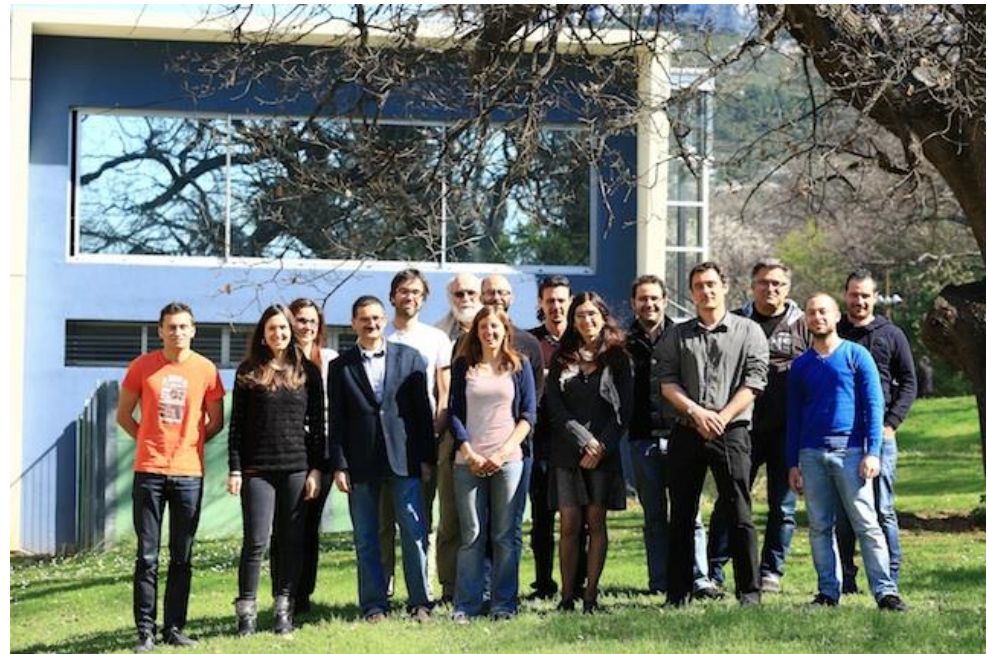
Nathalie Boudet, Nils Blanc,
 Jean-François Bézar



ITMOs Technologie
 pour la Santé et Cancer,
 France Life Imaging



CERN Crystal Clear Collaboration





Patrick Pangaud, Stéphanie Godiot, Mohsine Menouni, Franca Cassol,
 Mathieu Dupont, Loriane Portal, **Margaux Hamonet**,
Carine Kronland-Martinet, **Hamid Ouamara**, **Didier Benoit**,
Stanislas Nicol, Yannick Boursier, Jean-Claude Clémens, **Thomas Fabiani**, **Alain
 Bonissent**, Eric Vigeolas, Christophe Meessen,
 Franck Debarbieux

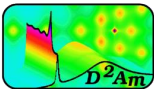


Frédéric Bompard,
www.cegitek.com

REBIRX



Stéphanie Hustache,
Arkadisuz Dawiec,
 Clément Buton



Nathalie Boudet, Nils Blanc,
 Jean-François Bézar



ITMOs Technologie
 pour la Santé et Cancer,
 France Life Imaging



CERN Crystal Clear Collaboration



Journée thématique du réseau détecteurs semi-conducteurs
 IN2P3-IRFU, 31 mai – 1^{er} juin 2018, LPSC, Grenoble

