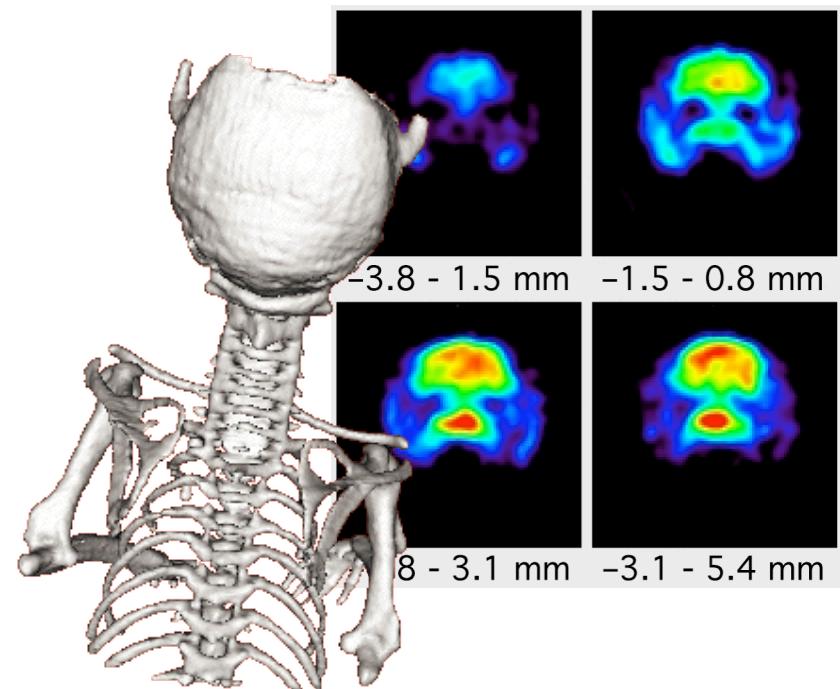
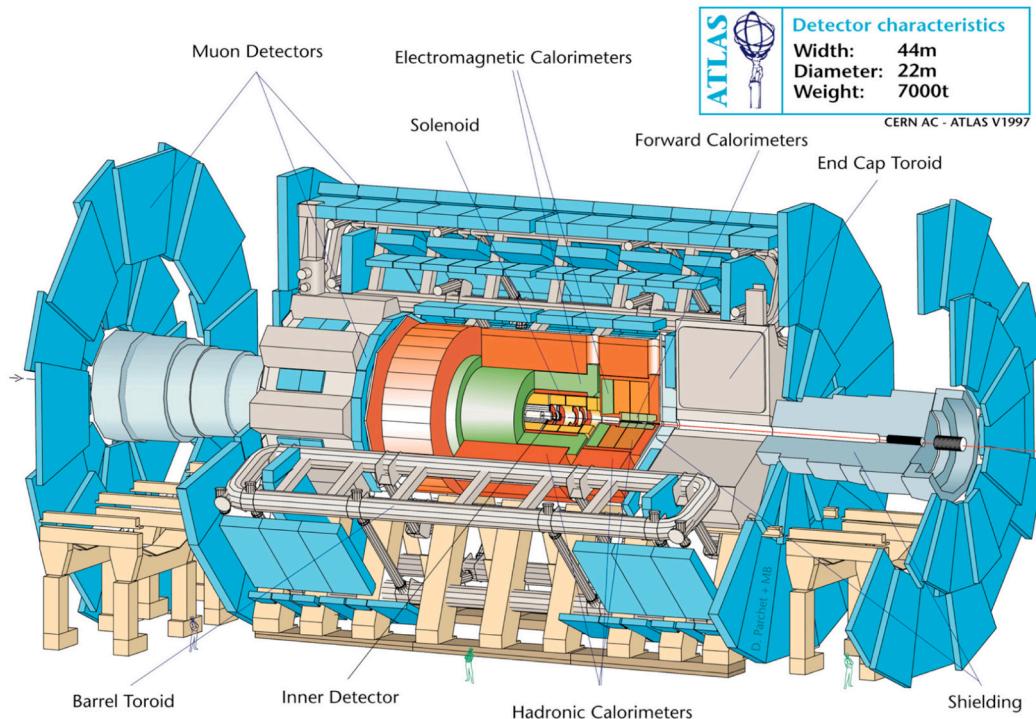
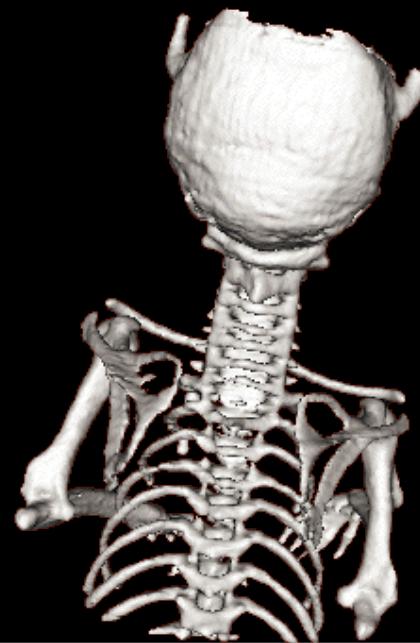


Le scanner X : le passage du noir et blanc à la couleur pour bientôt, grâce aux pixels hybrides



Le **scanner X** : le passage du noir et blanc à la couleur pour bientôt, grâce aux pixels hybrides



UNIVERSITÉ
DE
LA MÉDITERRANÉE
AIX-MARSEILLE II

LAPP/IN2P3, Annecy-le-Vieux, 4 juin 2010

Longueur
d'onde
(mètre)

1

10^{-2}

10^{-4}

10^{-6}

10^{-8}

10^{-10} 10^4

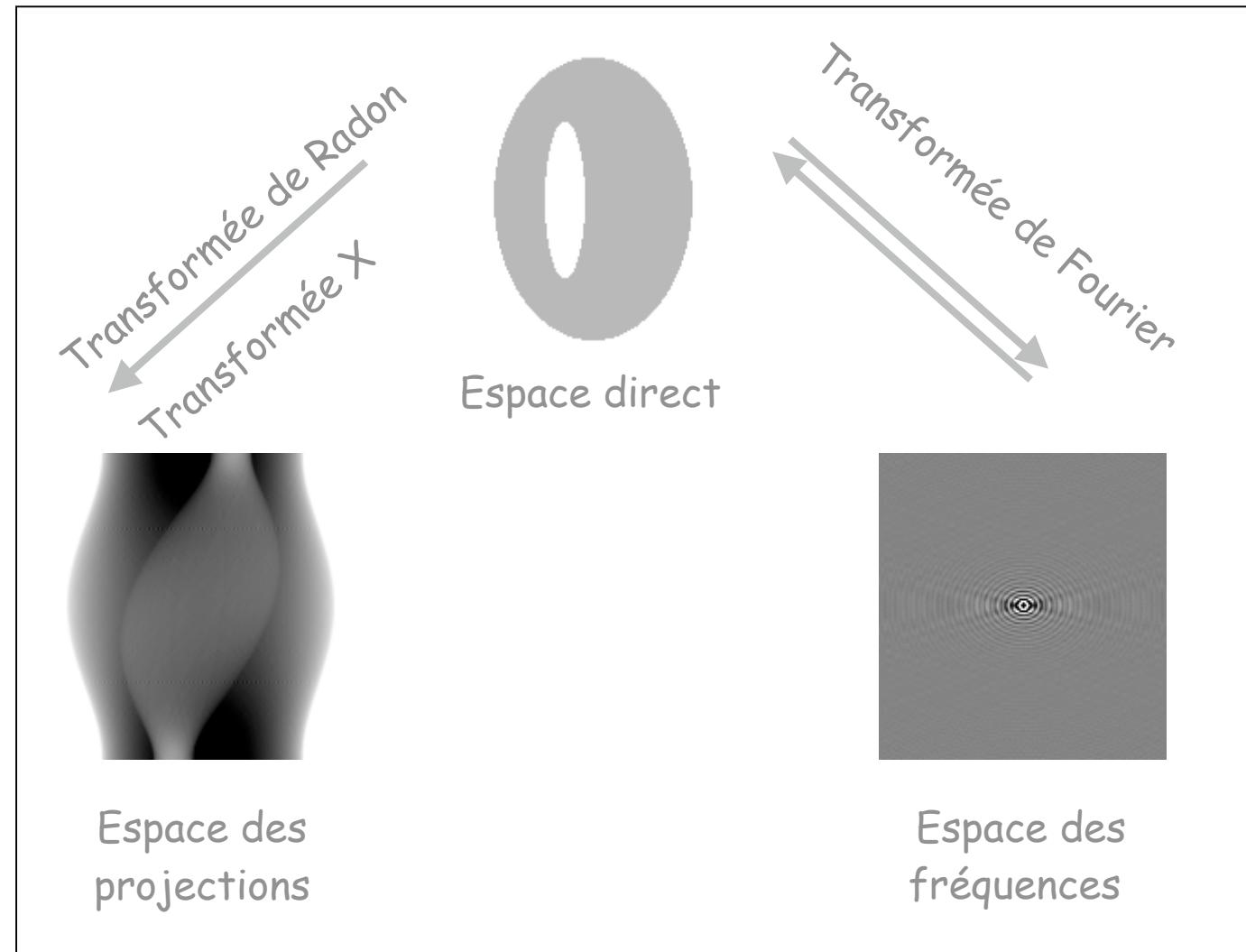
10^7

10^{10}

10^{13}

énergie
(électron volt)

Principe de reconstruction tomographique



UNIVERSITÉ
DE LA MÉDITERRANÉE
AIX-MARSEILLE II

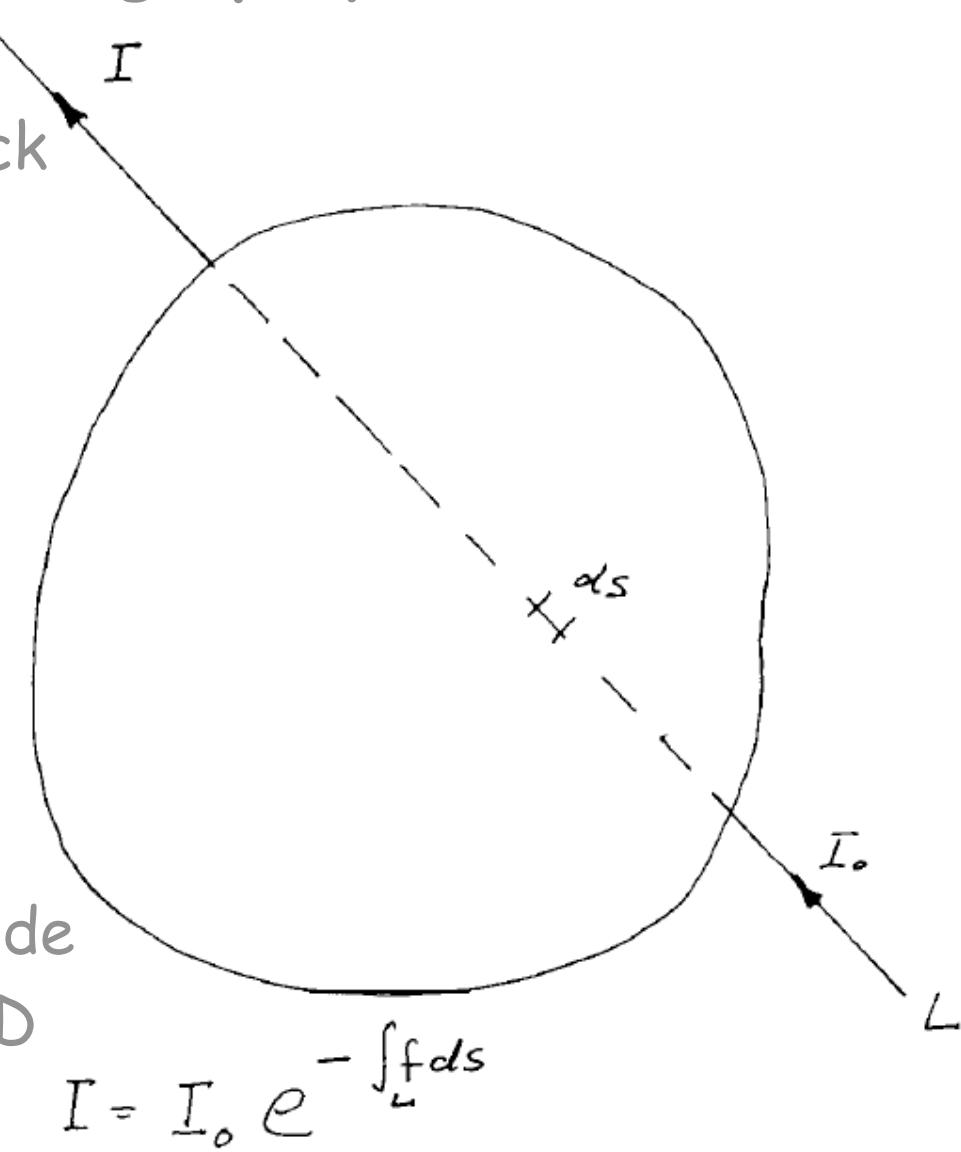
LAPP/IN2P3, Annecy-le-Vieux, 4 juin 2010

Reconstruction tomographique en 2D

1963: Alan McLeod Cormack



Redécouvre une solution mathématique publiée par Radon en 1917 permettant de reconstruire un objet en 2D à partir de ses projections

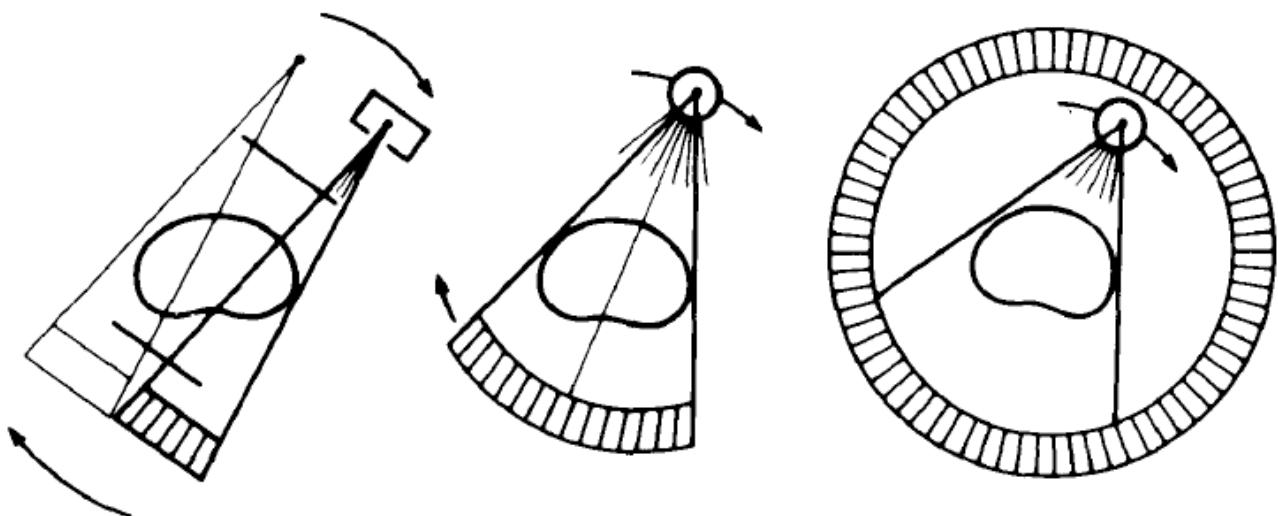
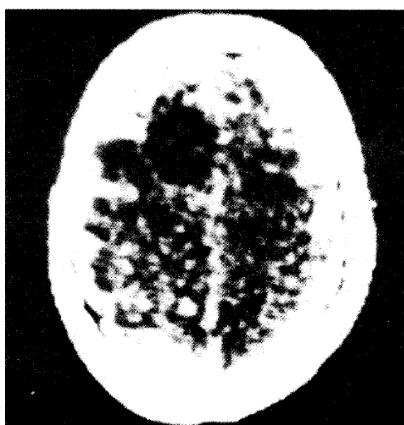


UNIVERSITÉ
DE LA MÉDITERRANÉE
AIX-MARSEILLE II

LAPP/IN2P3, Annecy-le-Vieux, 4 juin 2010

Tomodensitométrie (TDM)

1972: Godfrey N Hounsfield



30 detectors
Scan time 18 seconds

300 detectors
Scan time 2 - 4
seconds

700 stationary detectors
Scan time 2 - 4 seconds

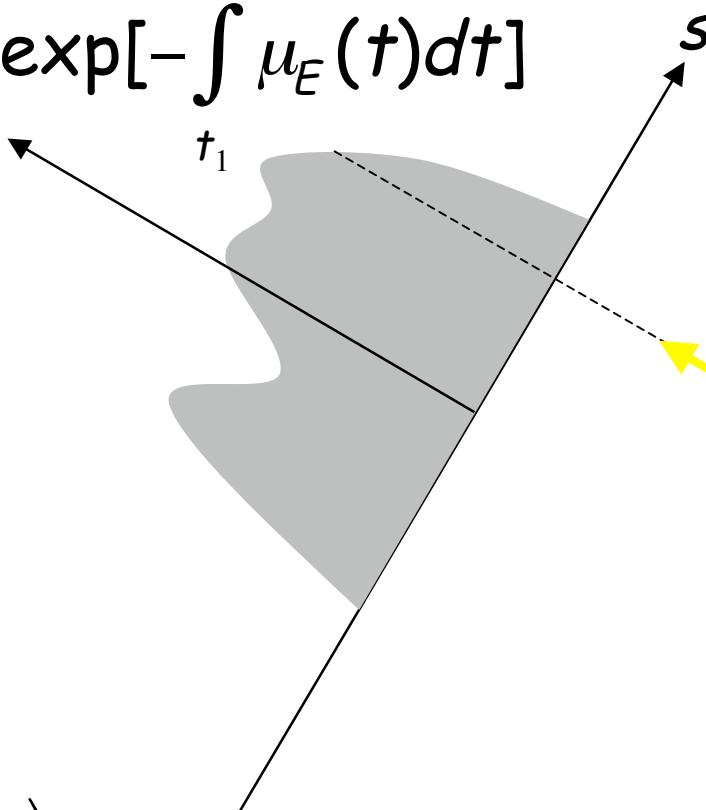
Développe chez EMI le premier scanner
à rayons X ou CT (Computed Tomography)



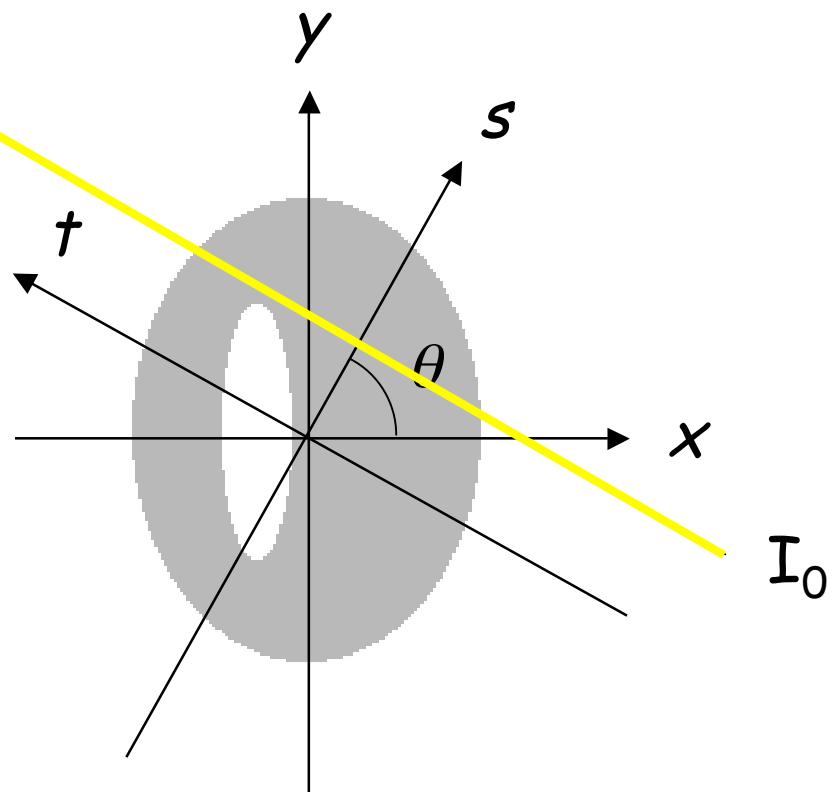
LAPP/IN2P3, Annecy-le-Vieux, 4 juin 2010

Tomographie par transmission

$$I = I_0 \exp\left[-\int_{t_1}^{t_2} \mu_E(t) dt\right]$$



$$\ln\left(\frac{I_0}{I}\right) = \int_{t_1}^{t_2} \mu_E(t) dt$$



DéTECTEURS à intégration de charges

held on Sept. 8, 1969 and the basic scheme was disclosed to F. H. Summ's letter that day. The principle is demonstrated by the following specific structure.



A negative voltage applied to the electrodes of the above structure causes a depletion region to form under the electrode. The band bending across section A-A when the voltage is first applied is shown below. As a result of generation-recombination centers in the depletion region and at

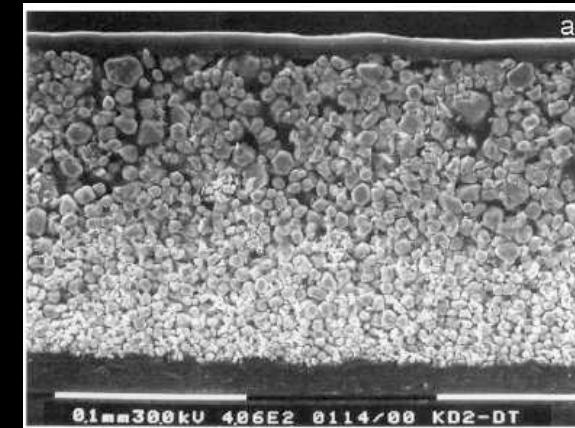
W. S. Boyle
19/9/69

G. E. Smith 10/10/69

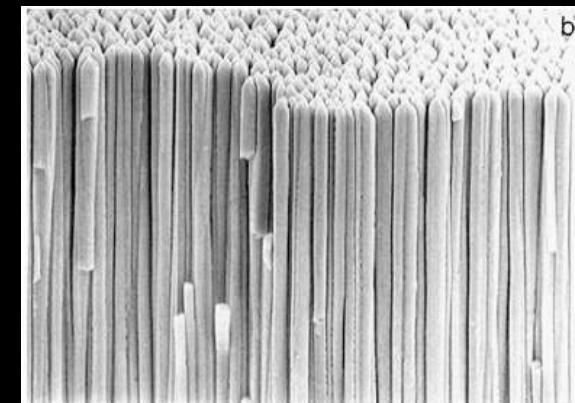
W.S. Boyle and G.E. Smith, 8 sept. 1969

Prix Nobel de Physique en 2009

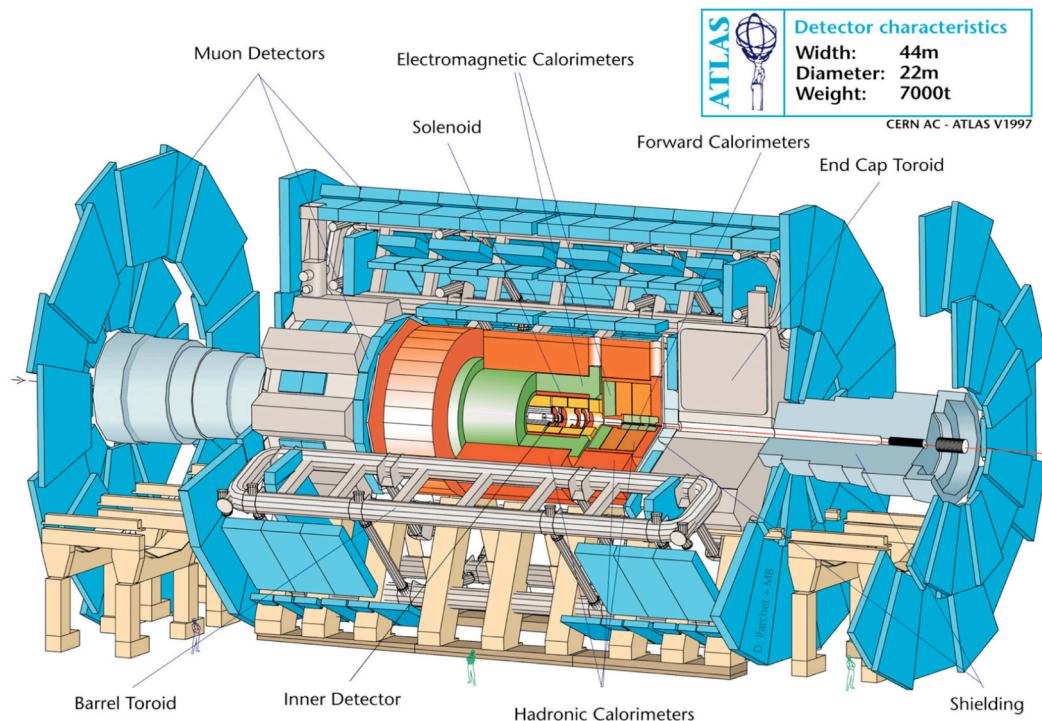
Gadox ($\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$) -> Caméra CCD



CsI -> Pixels CMOS



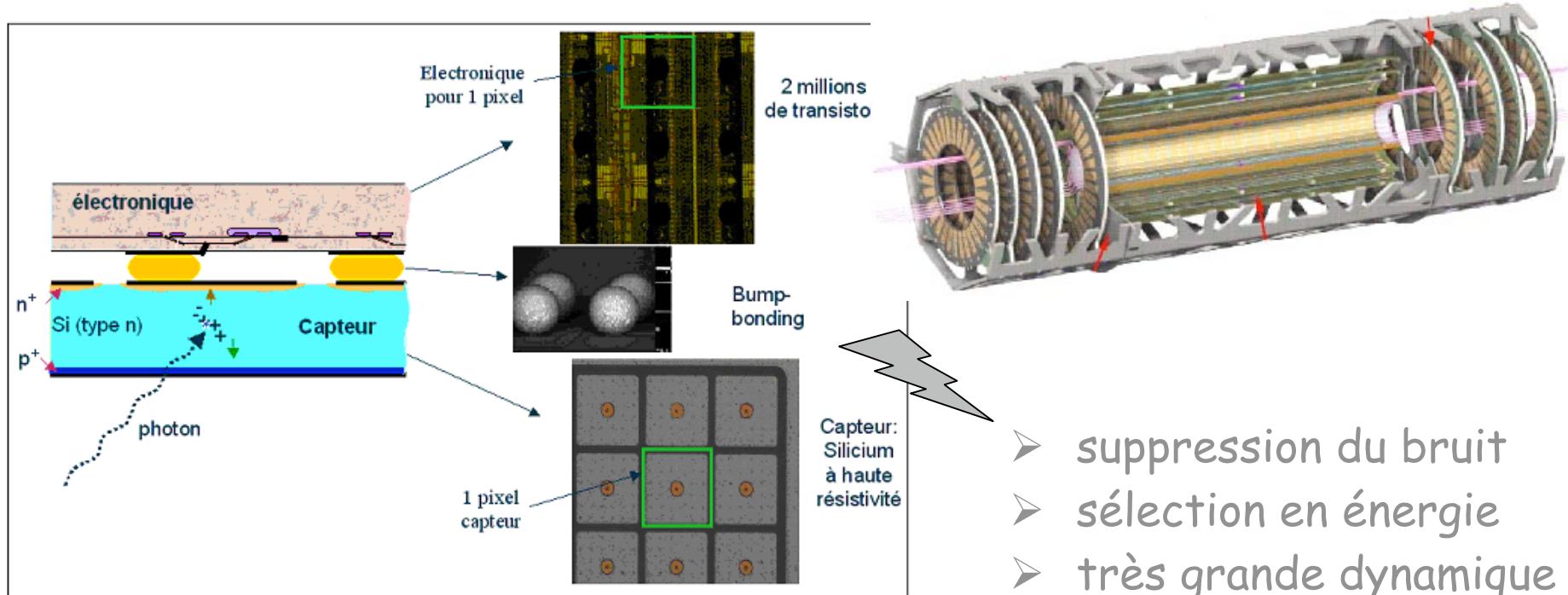
Le scanner X : le passage du noir et blanc à la couleur pour bientôt, grâce aux pixels hybrides



UNIVERSITÉ
DE
MÉDITERRANÉE
AIX-MARSEILLE II

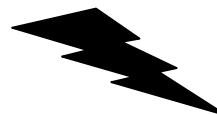
LAPP/IN2P3, Annecy-le-Vieux, 4 juin 2010

Détecteurs à pixels hybrides en TDM



- acquisition de données très rapide
- choix du substrat de détection (Si, CdTE, AsGa)
- efficacité optimale

- suppression du bruit
- sélection en énergie
- très grande dynamique



QUESTION

↳ amélioration du contraste ?
↳ réduction de la dose ?

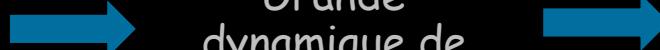
Comptages de photons versus intégration de charge

Comptage de photons

- ✓ Taux de comptage très bas (0,01 ph/pixel/s)
- ✓ Grande dynamique de taux de comptage (10^{-2} - 10^6 ph/pixel/s)



Faibles doses



Grande dynamique de comptage (80 dB)



Meilleure détectabilité à bas contraste

Seuil de détection en énergie

- ✓ Sélection de l'énergie des rayons X



Discrimination des photons diffusés



Meilleur contraste

Choix du capteur

- ✓ Utilisation de capteurs de haute densité



Meilleure efficacité de détection

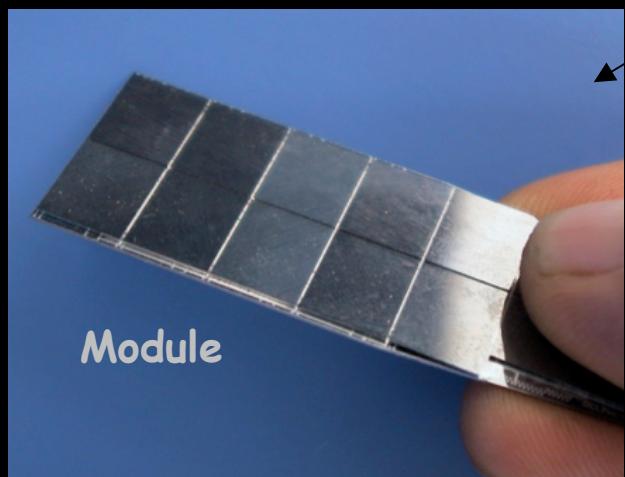
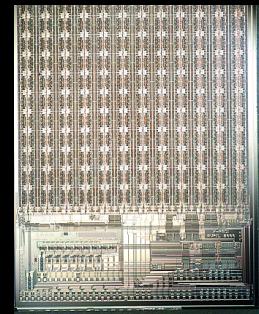


Meilleure détectabilité à bas contraste + Faibles doses

Premier prototype XPAD1 (2003)

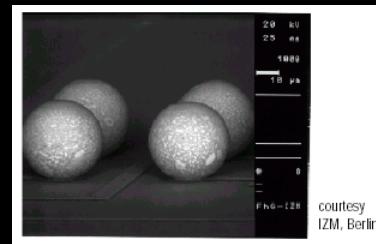
XPAD1:

- amplificateur
- 1 discriminateur
- compteur 15-bits



10 chips bump-bonded on
a $4 \times 1.6 \text{ cm}^2$ Si sensor

Bump-bonding

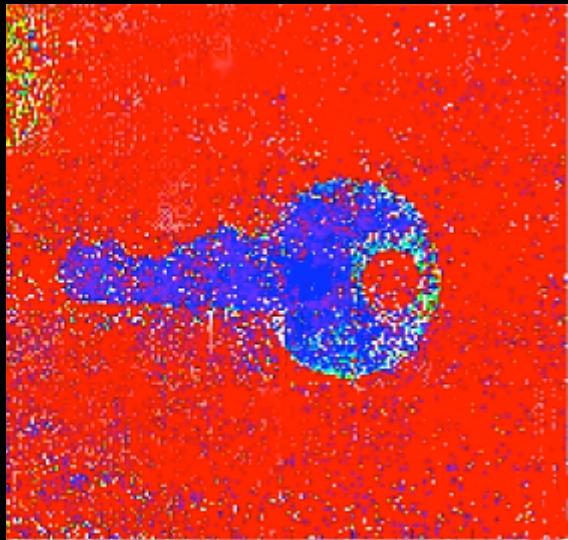


Capteur de silicium pixellisé
 $330 \times 330 \mu\text{m}^2$
(DELPHI)



Pixels hybrides prototype

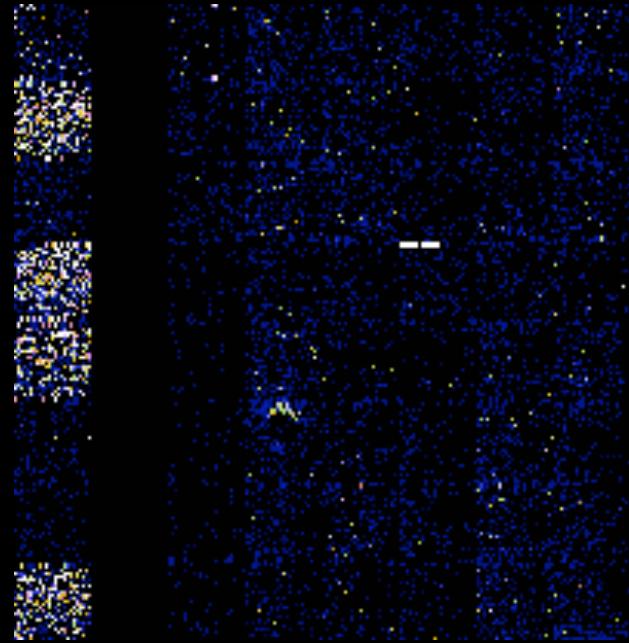
... et premières images (2004)



Clé de bureau
(données brutes)

Diffusion à petit angle :
200 images de 10 ms espacées de 2 ms

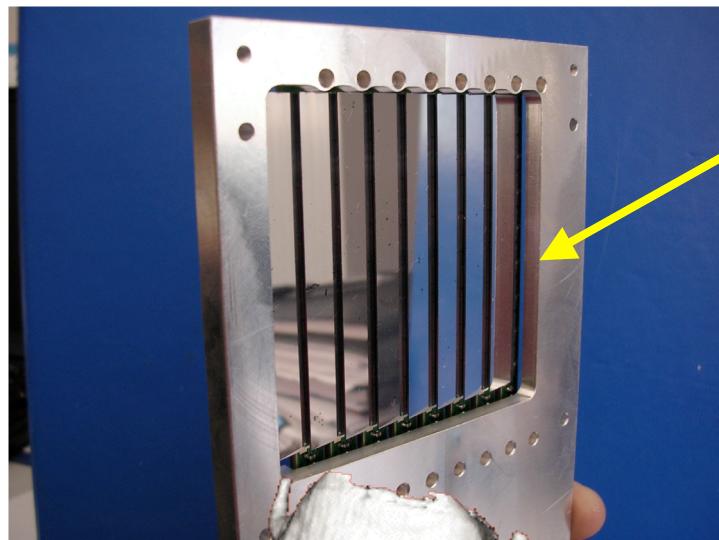
European Synchrotron Radiation Facility (ESRF)



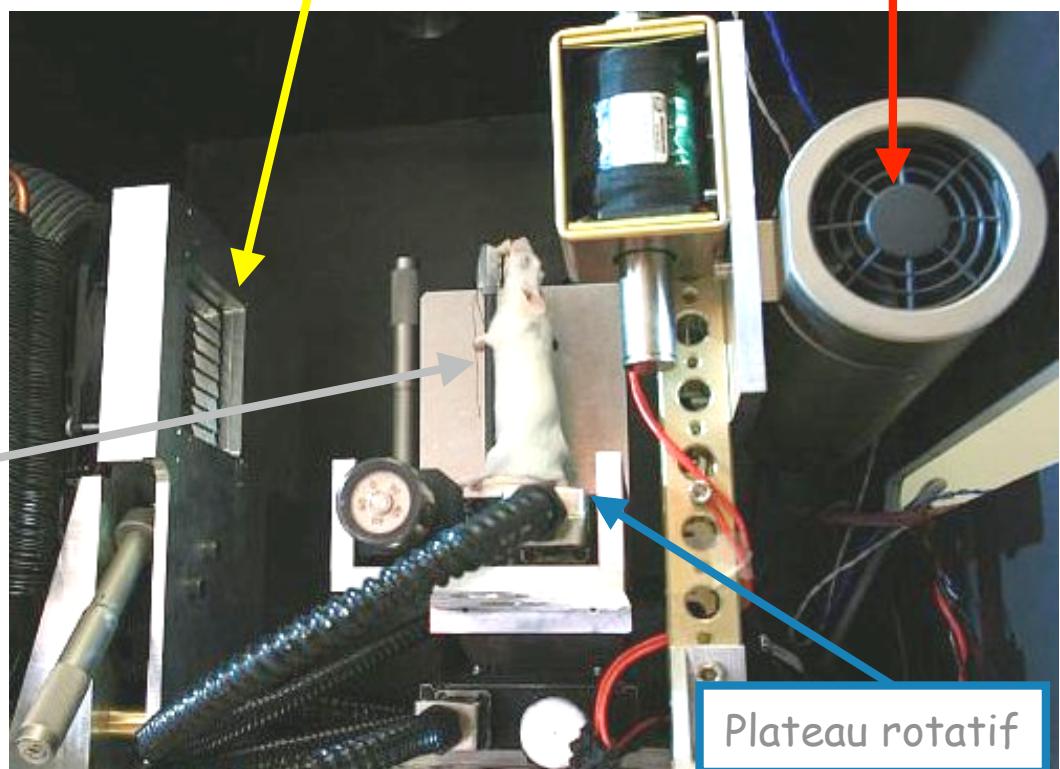
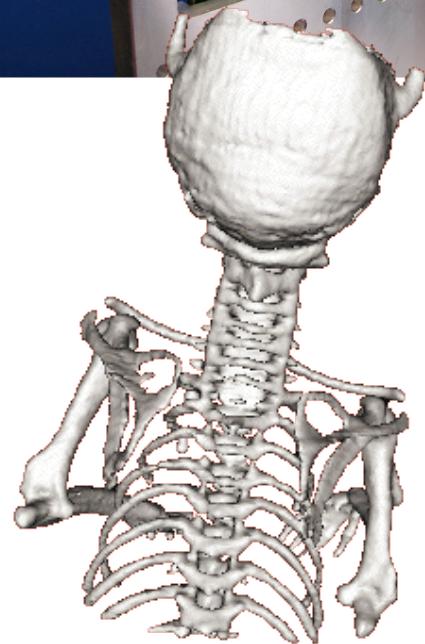
UNIVERSITÉ
DE LA MÉDITERRANÉE
AIX-MARSEILLE II

LAPP/IN2P3, Annecy-le-Vieux, 4 juin 2010

Démonstrateur micro-CT PIXSCAN



XPAD2 Hybrid Pixel Detector
 $330 \times 300 \mu\text{m}^2$ pixels



Source de rayons X

Plateau rotatif

Premières images PIXSCAN/XPAD2 (2005)

360 projections (1 projection par degré)
Reconstruction FDK (recFDK Creatis)

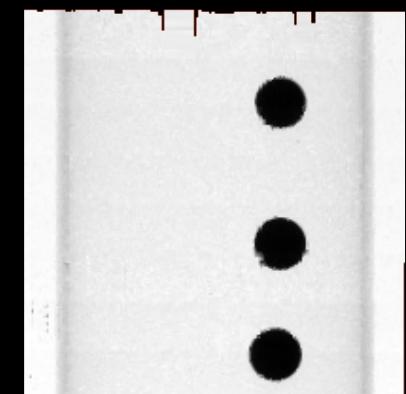
Calibration géométrique



Aile de caille



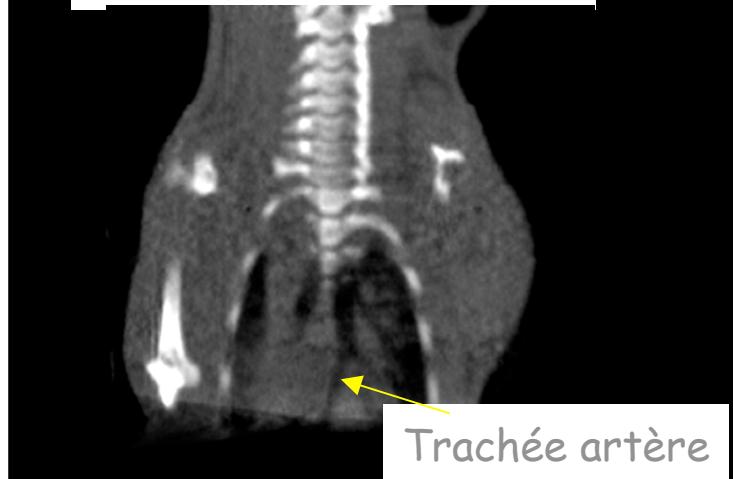
Coupe sagittale



Angiographies avec PIXSCAN/XPAD2

Souris sacrifiée directement après l'injection d'un agent de contraste

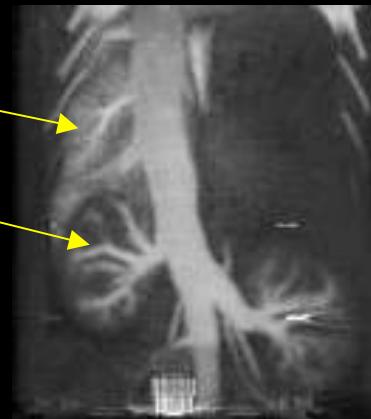
Sans agent de contraste



200 μL dans la veine de queue et 400 μL intracardiac

Rate

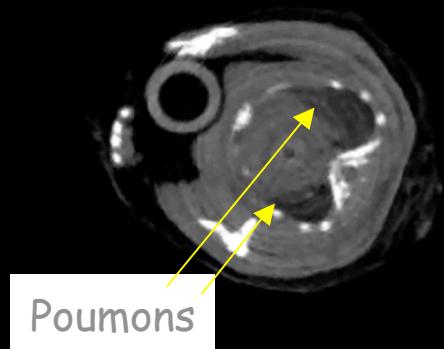
Rein



Coronale

Sagittale

Souris sacrifiée 5 min après l'injection



Poumons

Reins

Uretères



courtesy: F. Debarbieux, IBDML

Exposition 1.5 s, seuil 14 keV, source (50 kV, 500 μA), filtre 6 mm Al, 8000 coups/pixel

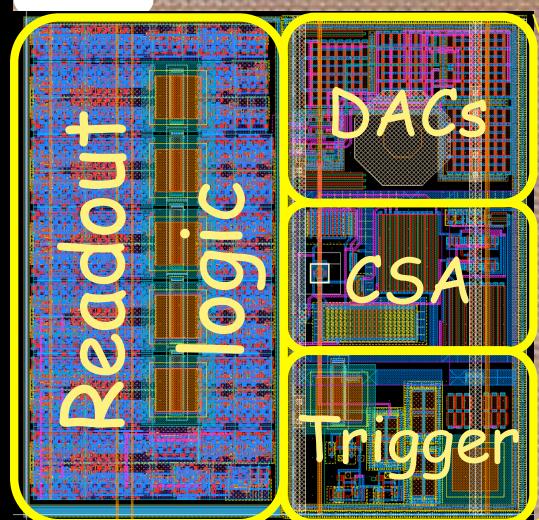
Nouveau circuit XPAD3

Production des circuits (IBM 0,25 μm)

XPAD3-S

Si n type

Pixel



XPAD3-C

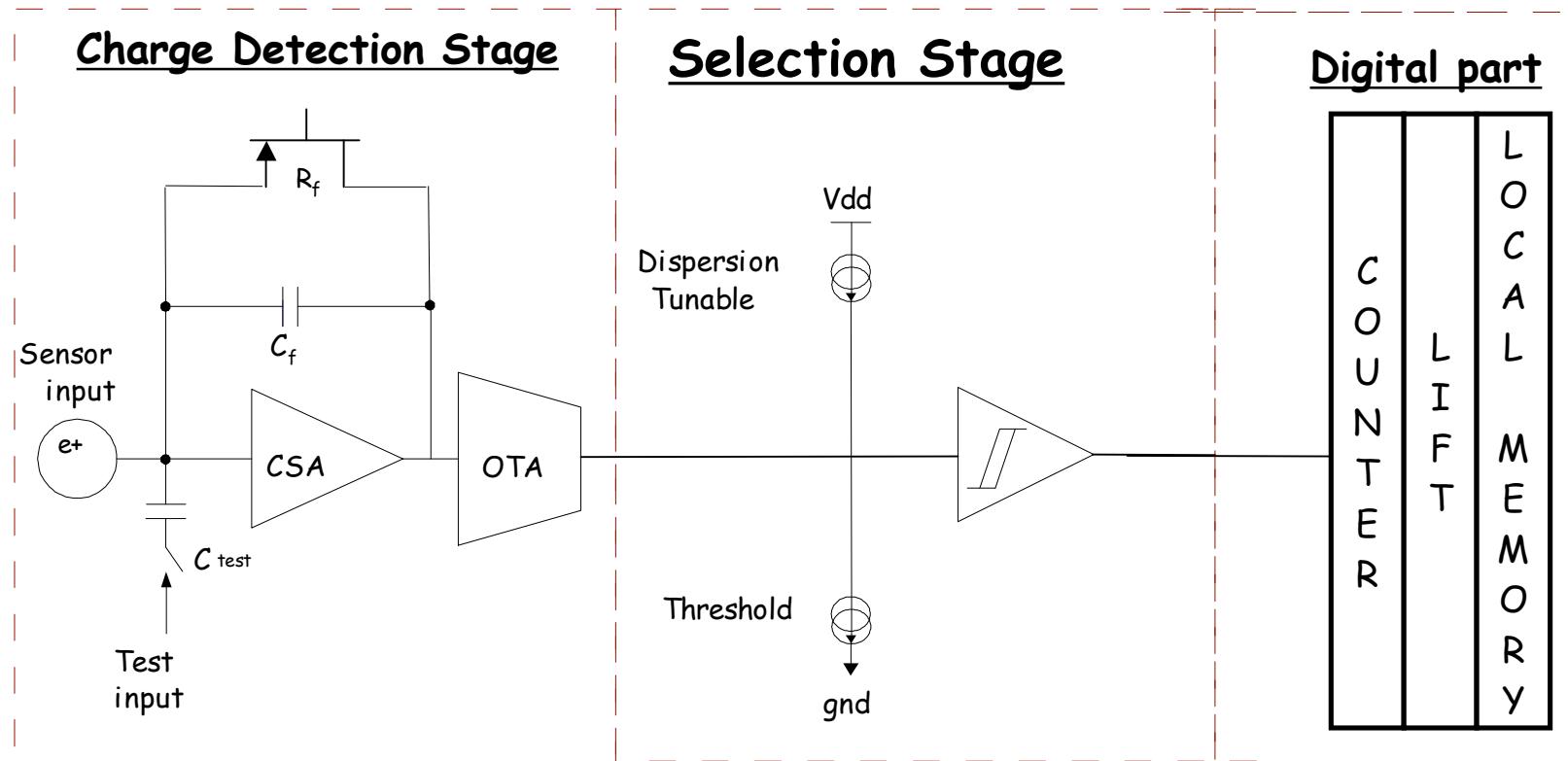
CdTe

9600 pixels
130 \times 130 μm^2
1 \times 1,5 cm 2
circuit

- Double seuil (sélection de l'énergie)
- Lecture continue pendant l'exposition
- Captures 2 ms
- Résistant aux radiations

Détecteur de 7 \times 12 cm 2 monté sur le démonstrateur PIXSCAN en 2007
Souris corps-entier avec une résolution de 60 μm

XPAD3-S pixel architecture



Gain : 89 nA/keV

Noise : 127 e- rms

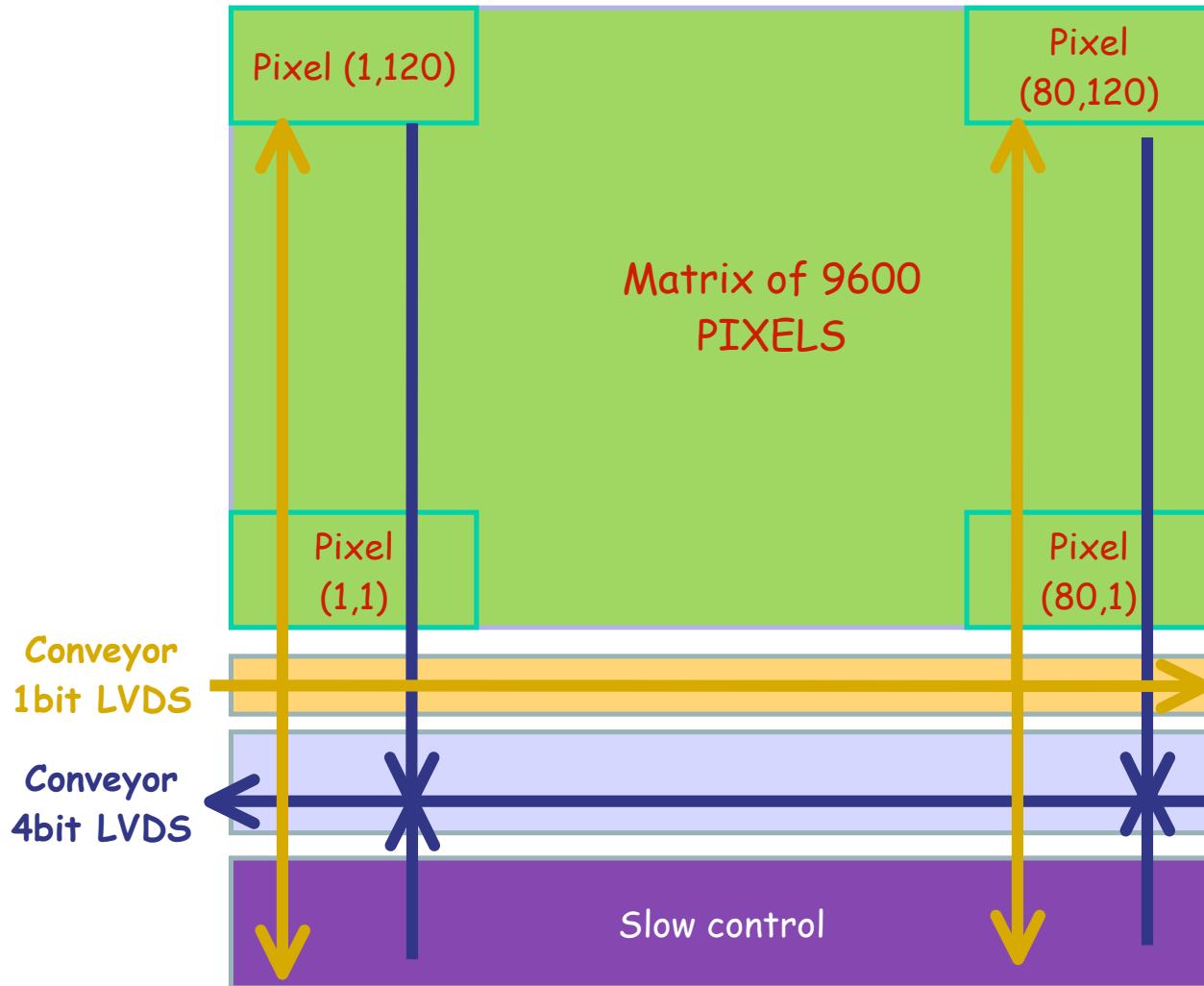
Linearity : 35 keV

Power consumption : 40 μ W/pixel

Threshold adjustment resolution : 57 e-

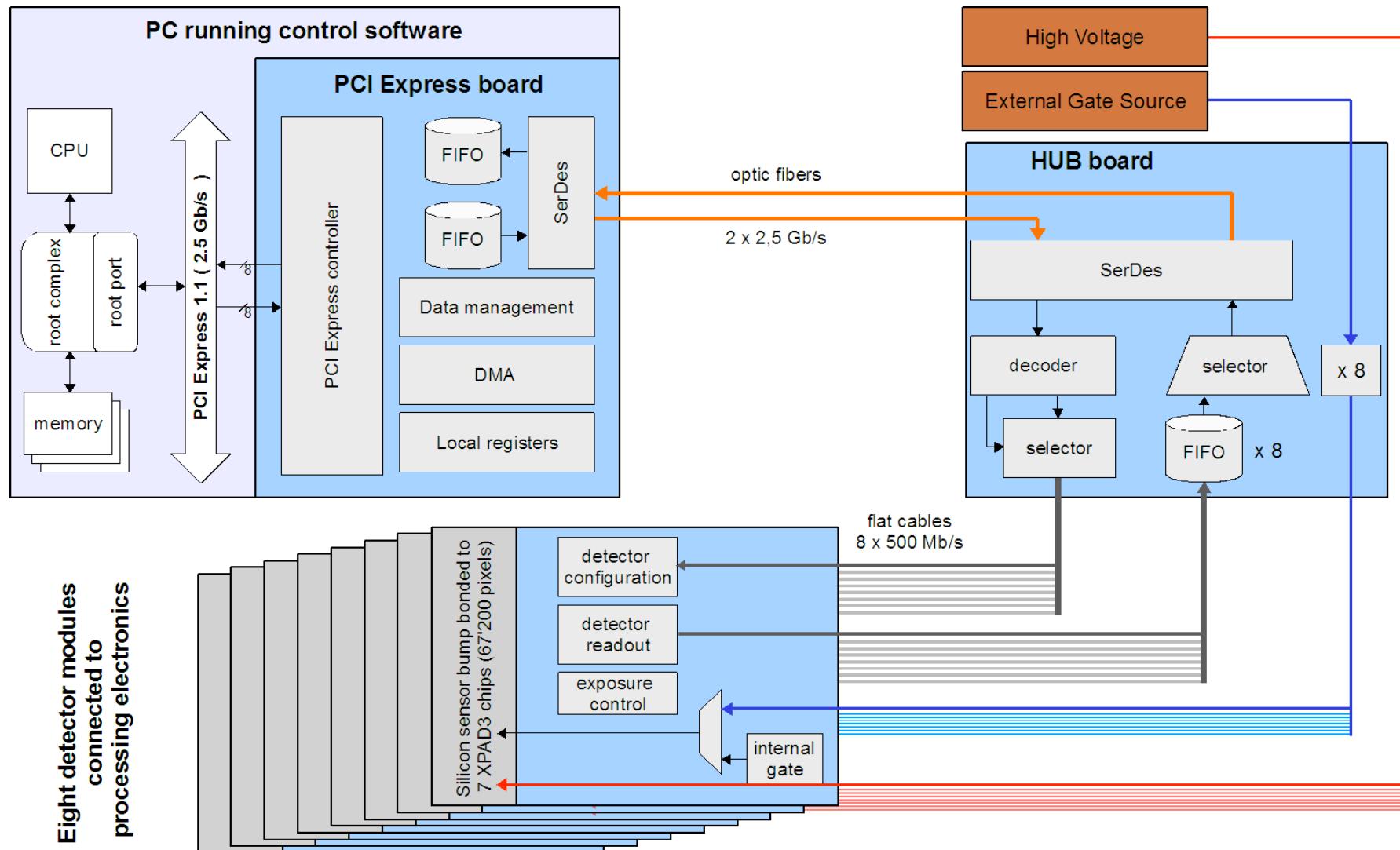
Minimum threshold: < 4 keV

XPAD3 chip architecture

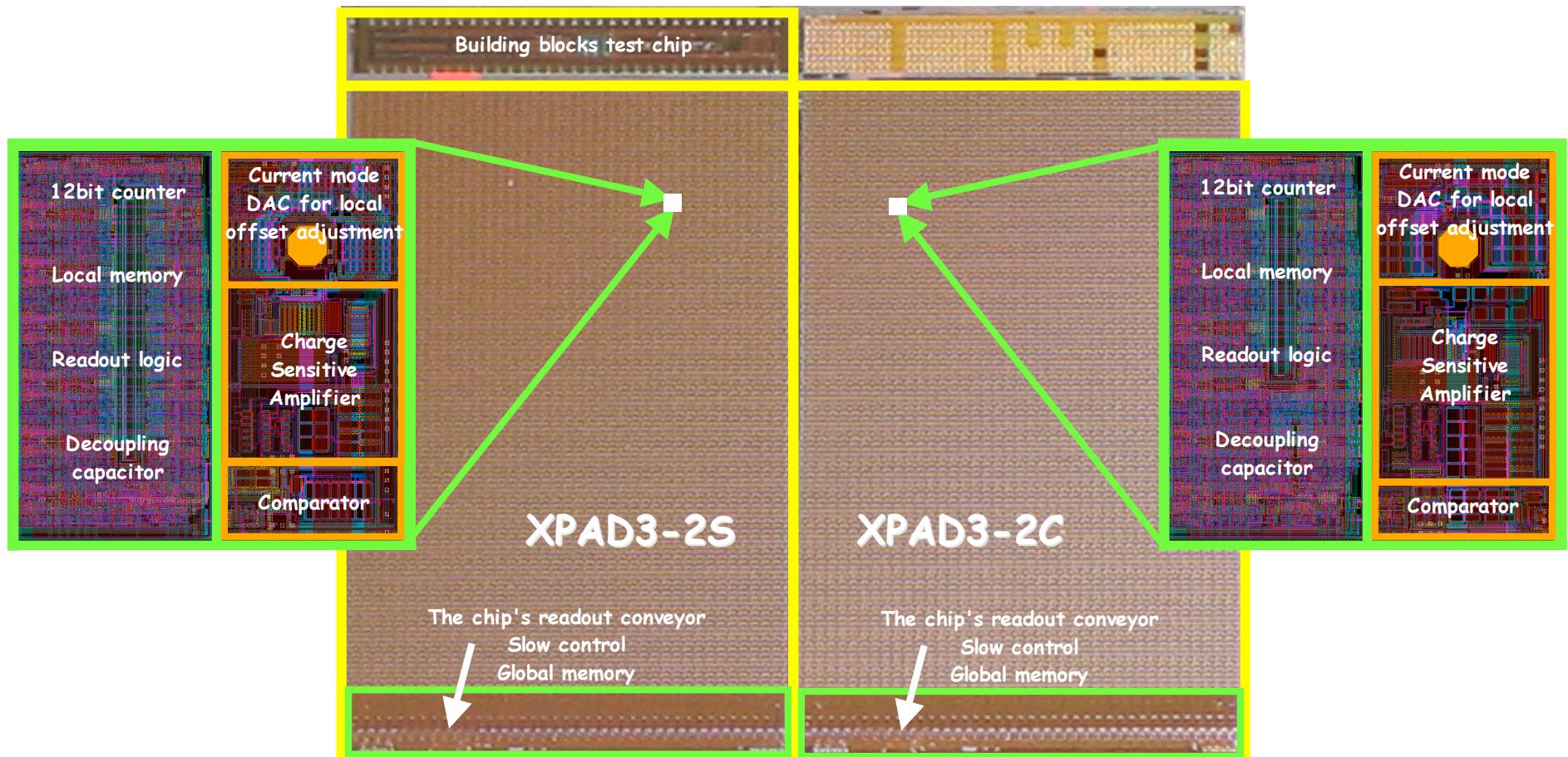


- Data move through the matrix by shift registers (bidirectional)
- Full image readout time is about 2 ms
- On the fly readout capabilities

PCI-Express based readout



XPAD3-2S and XPAD3-2C chips



XPAD3-2S (hole collector)

Gain : **23 nA/100e-**

Noise : ~100e- rms

Linearity : **60 keV**

XPAD3-2C (electron collector)

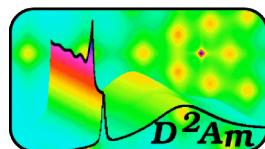
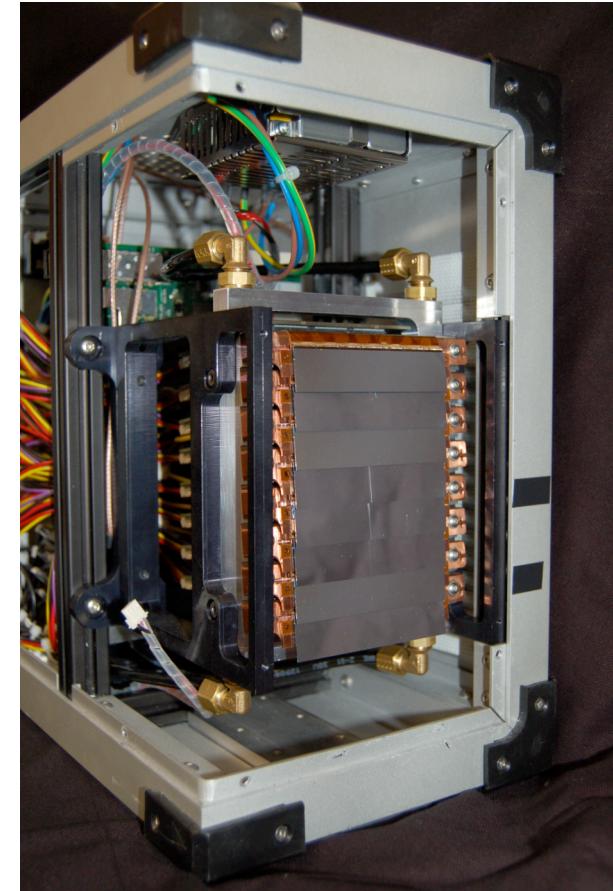
Gain : **17,8nA/100e-**

Noise : ~100e- rms

Linearity : **60 keV**

XPIX - Développement de X-ray hybrid pixels

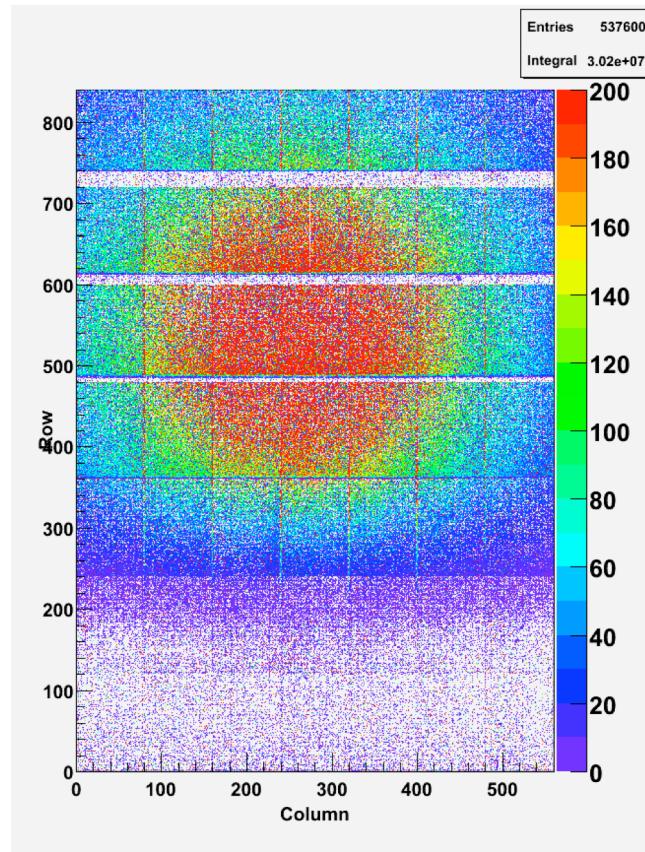
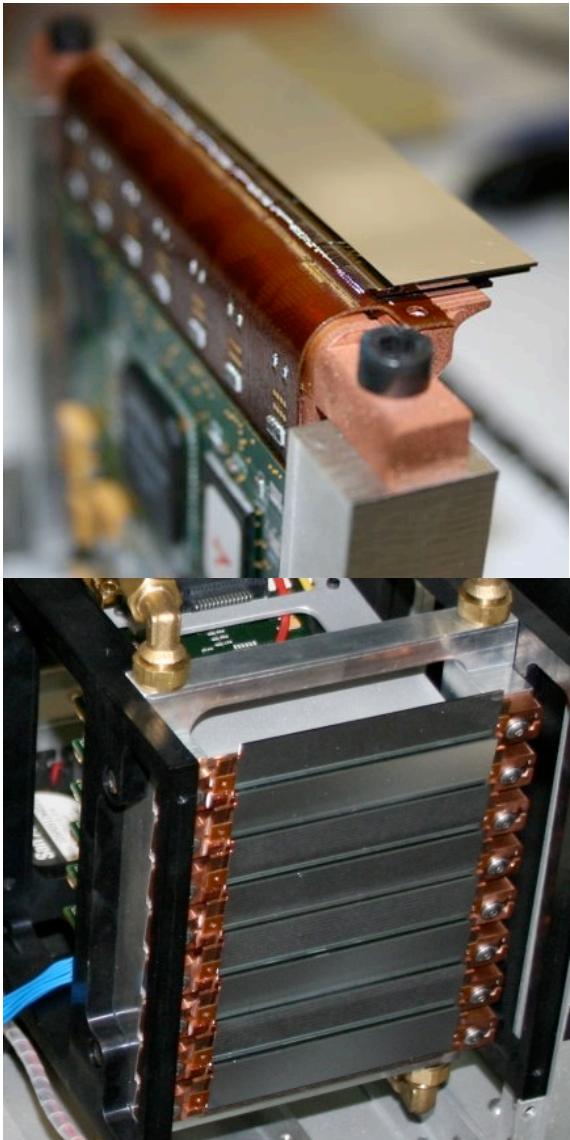
- XPAD3-1/Si (D1, D2, D3: 0,5 Mpixels)
 - Photon counting 5-35 keV
 - $130 \times 130 \mu\text{m}^2$ pixel size
 - 500 μm Si
 - $78 \times 75 \text{ mm}^2$ detector (8×7 chips)
- XPAD3-2/Si (D4, D5, D6: 0,5 MPixels)
 - Photon counting mode 5-60 keV



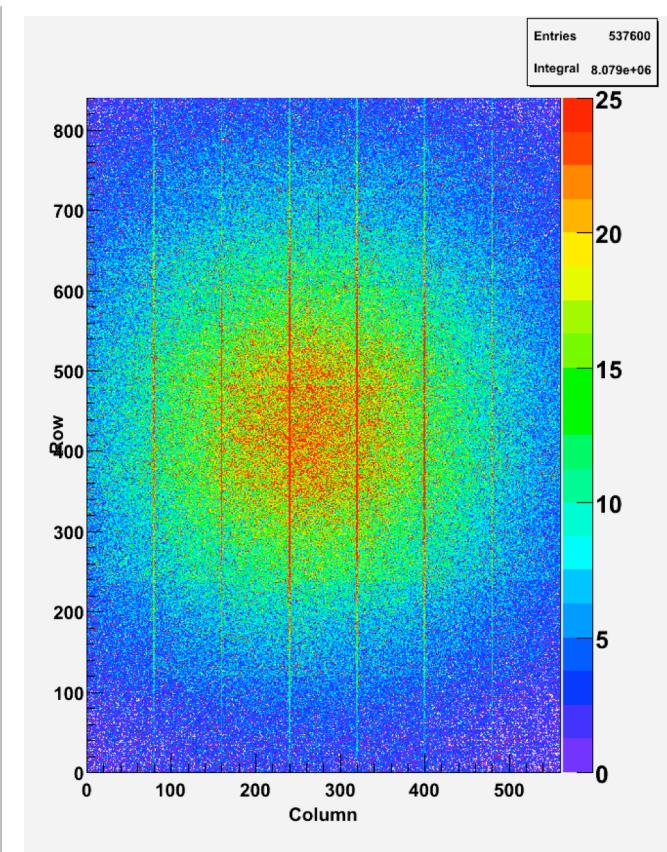
UNIVERSITÉ
DE LA MÉDITERRANÉE
AIX-MARSEILLE II

LAPP/IN2P3, Annecy-le-Vieux, 4 juin 2010

Détecteur XPAD3 : 500,000 pixels de 130 µm

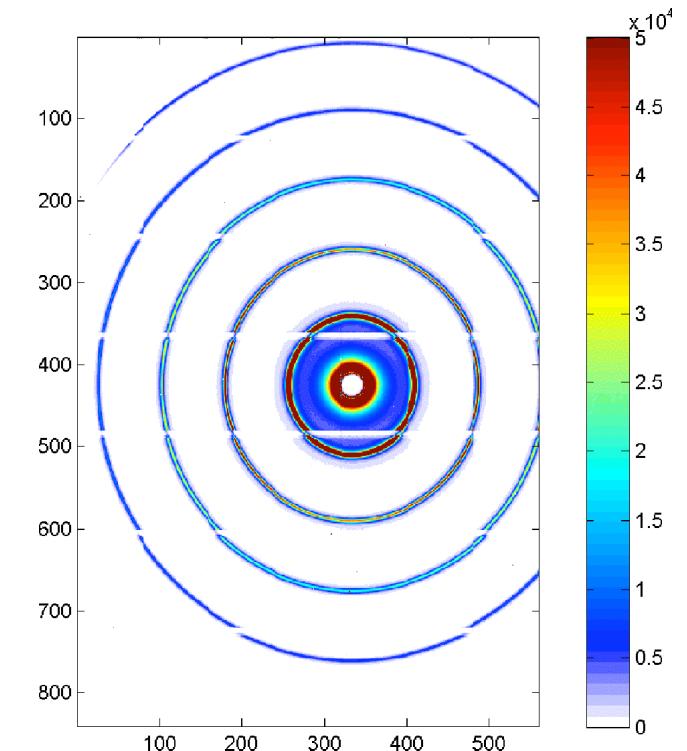
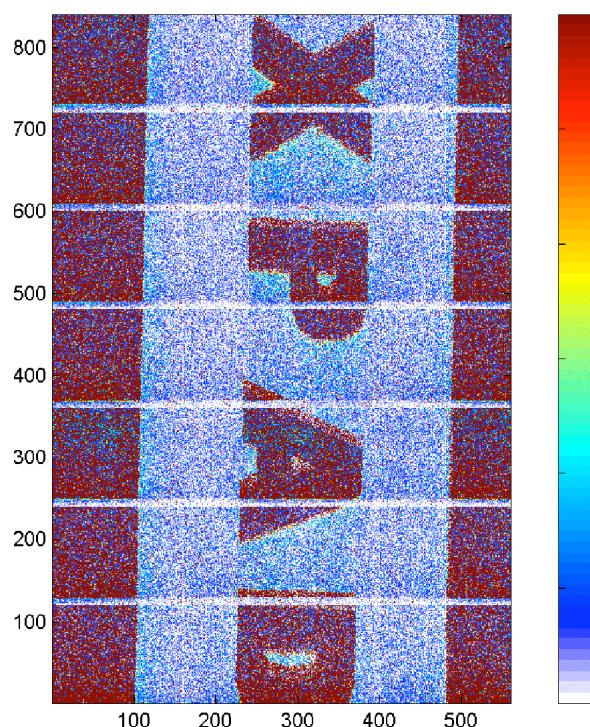
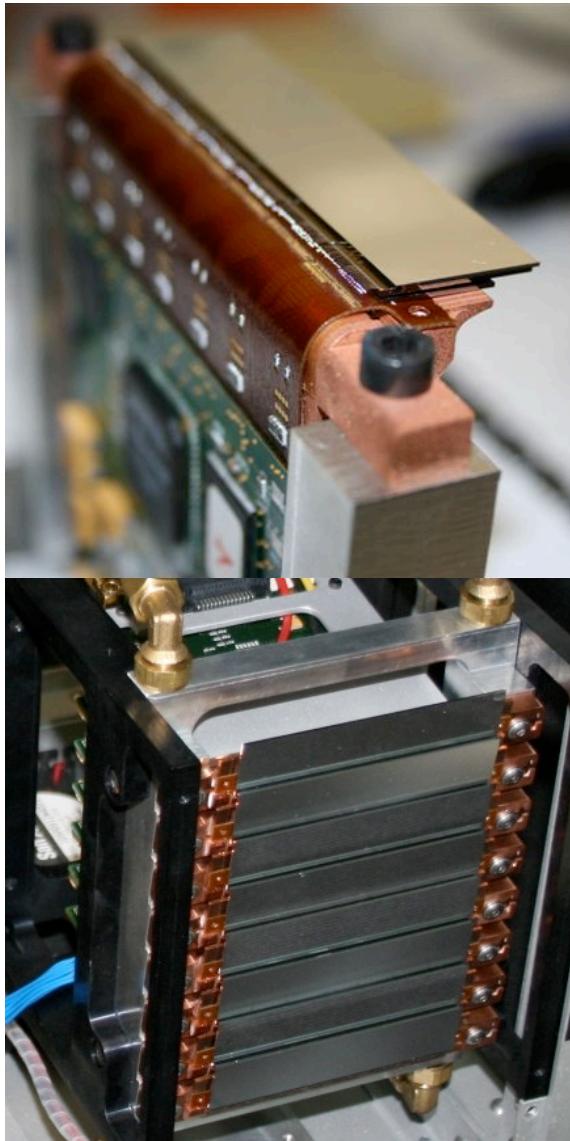


Fe-55, 5.9 keV



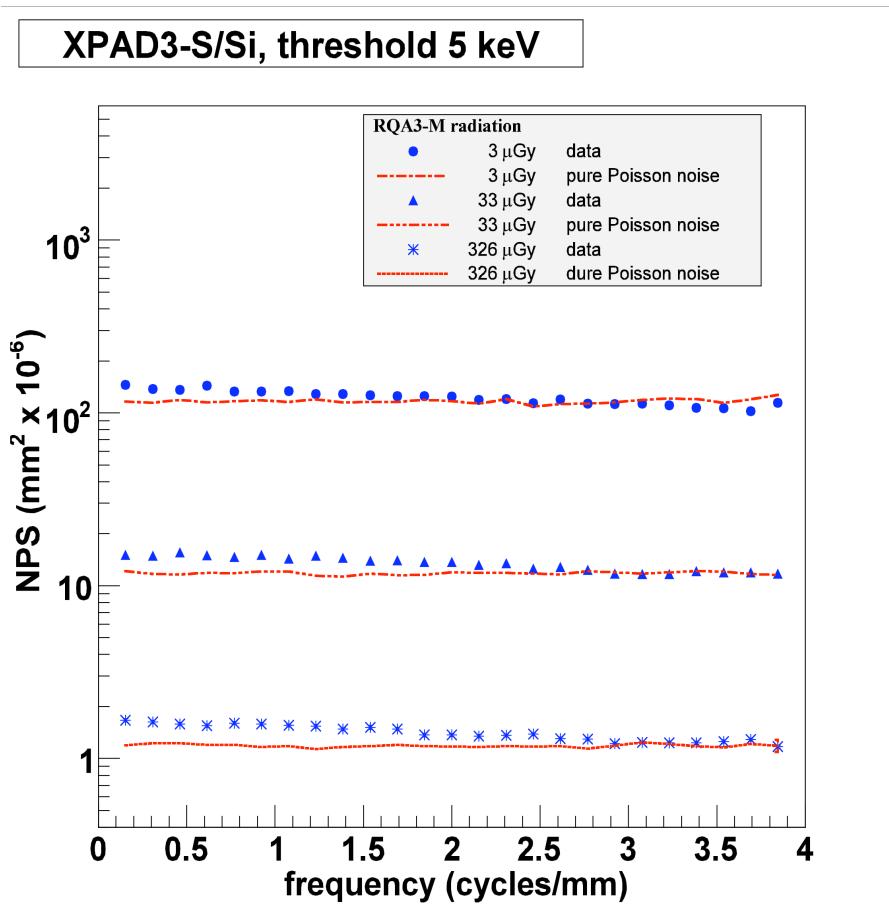
Am-241, 60 keV

Détecteur XPAD3 : 500,000 pixels de 130 µm

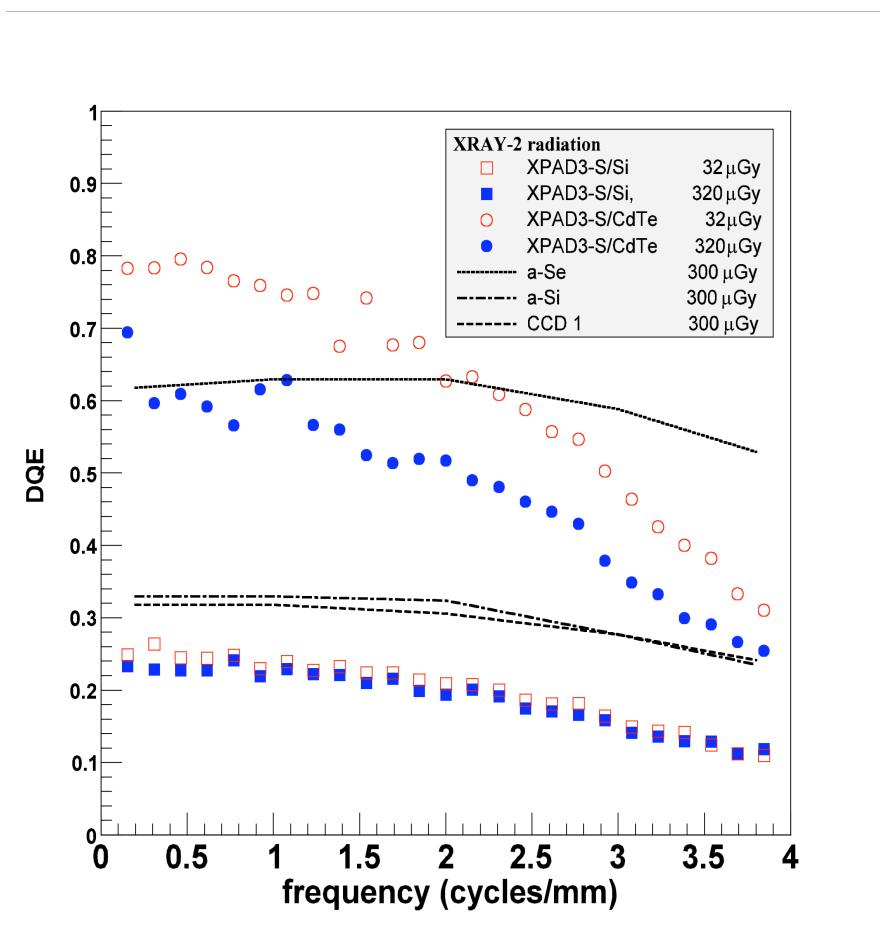


Caractérisation des détecteurs XPAD3-S Si et CdTe

Noise Power Spectrum



Detective Quantum Efficiency



Goertzen *et al.*, Phys. Med. Biol. **49** (2004) 5251
Cassol *et al.*, Phys. Med. Biol. **54** (2009) 1773

LAPP/IN2P3, Annecy-le-Vieux, 4 juin 2010



Etude du partage de charge XPAD3-S Si et CdTe

Faisceau de $E_0 = 26$ keV

$$n_p(E, E_0) = N(E_0, \Delta E_0)$$

$$n(E, E_0) = (1-k)n_p(E, E_0) + k n_{cs}(E, E_0)$$

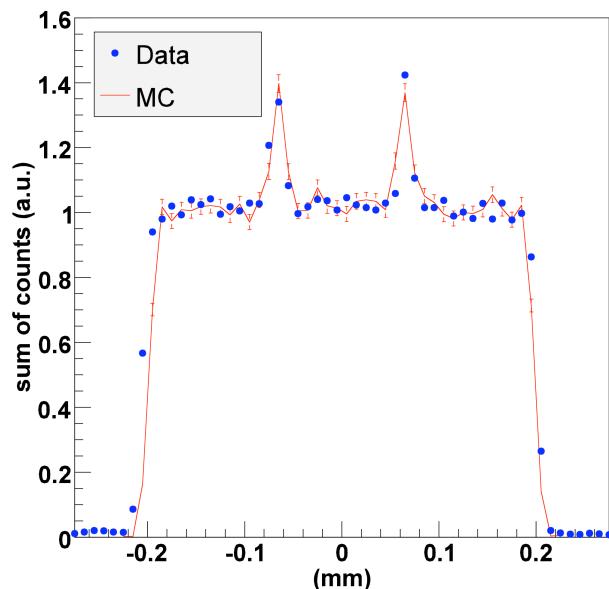
$$n_{cs}(E, E_0) = 1/E_0$$

Probabilité de partage de charge : $k = 0.75$ (mesuré), 0.76 (simulé)

$$\text{eff}_p(\text{pixel}) = 1/(1-\text{eff}_{cs})$$

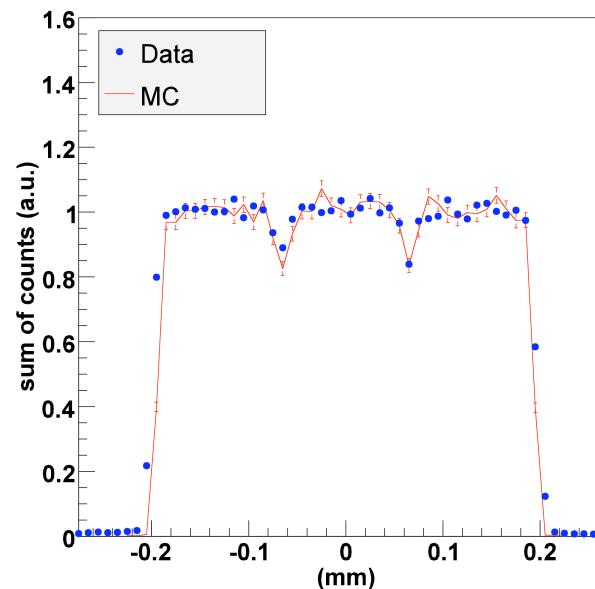
$$\text{eff}_{cs} = k (E_0/2 - E_{th})/E_0$$

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



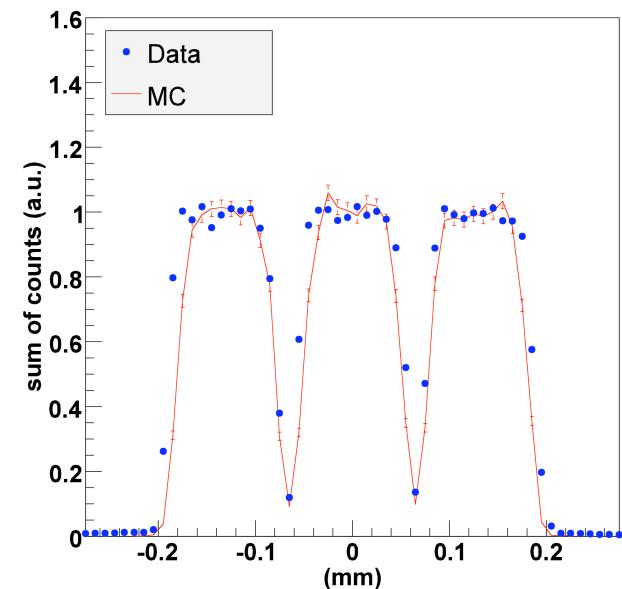
Seuil de 10 keV

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



Seuil de 14 keV

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



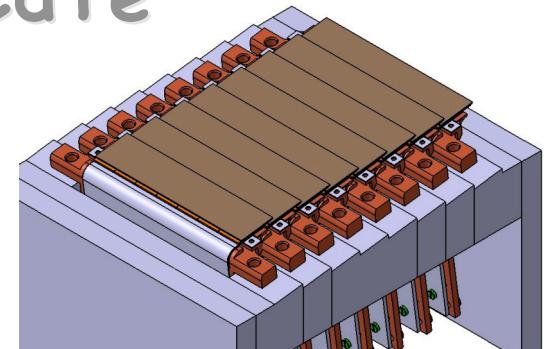
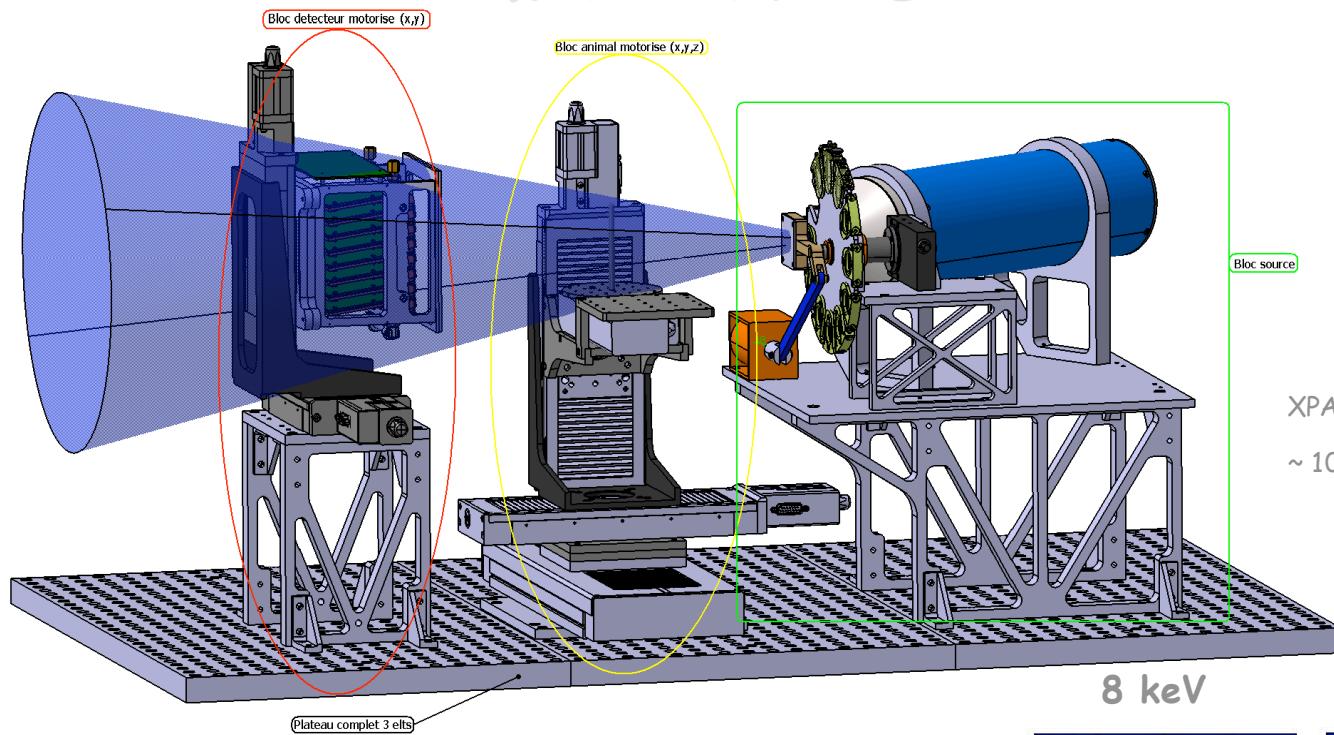
Seuil de 22 keV



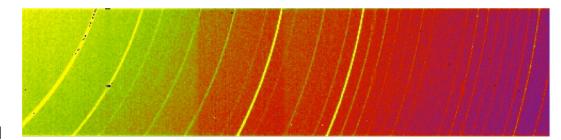
Cassol *et al.*, in Press in NIM A (2010)

LAPP/IN2P3, Annecy-le-Vieux, 4 juin 2010

Caméras XPAD3-S Si et CdTe



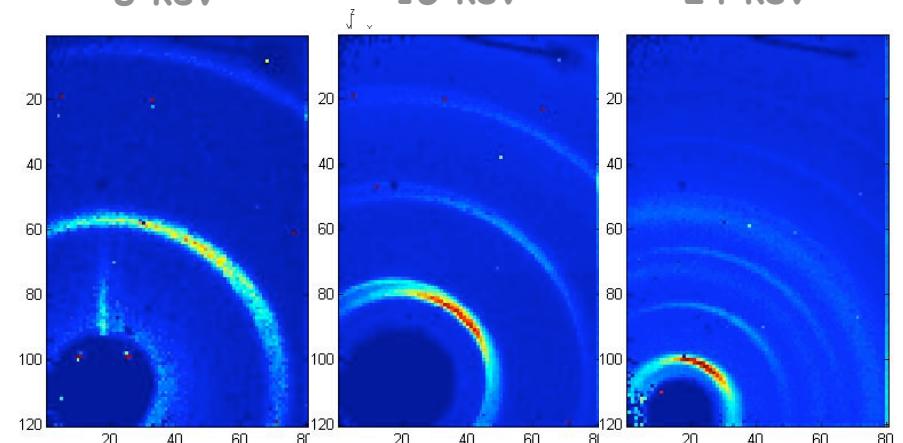
XPAD3: 67200 pixels (130×130) $\mu\text{m}^2/\text{barrette}$
~ 10 dead pixels (< 0.015% dead pixels)



Démonstrateur PIXSCAN II

20 kpixels CdTe XPAD imager (2 chips)

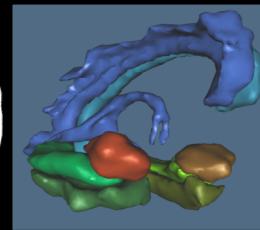
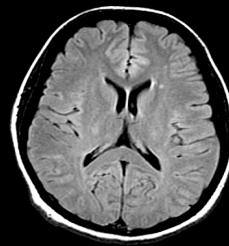
S. Basolo *et al.*, NIM A 589 (2008) 268



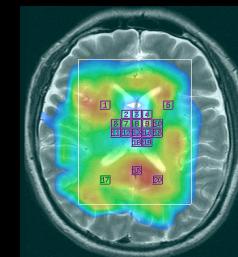
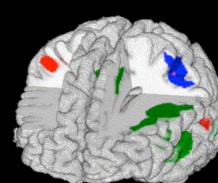
LAPP/IN2P3, Annecy-le-Vieux, 4 juin 2010

En direction de l'imagerie moléculaire

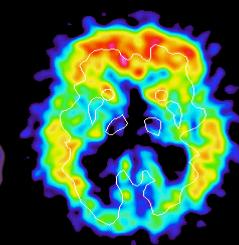
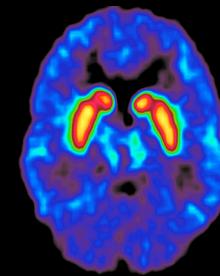
Imagerie anatomique



Imagerie fonctionnelle



Imagerie moléculaire



- Morphologie
- Morphométrie

- Hémodynamique
- Permeabilité vasculaire
- Oxygénation/hypoxie des tissus
- Activité CNS
- Métabolites
- pH

- Agents de contrastes spécifiques
- Imagerie des récepteurs fonctionnelles
- Pharmacocinétique

STRUCTURE

MECHANISME

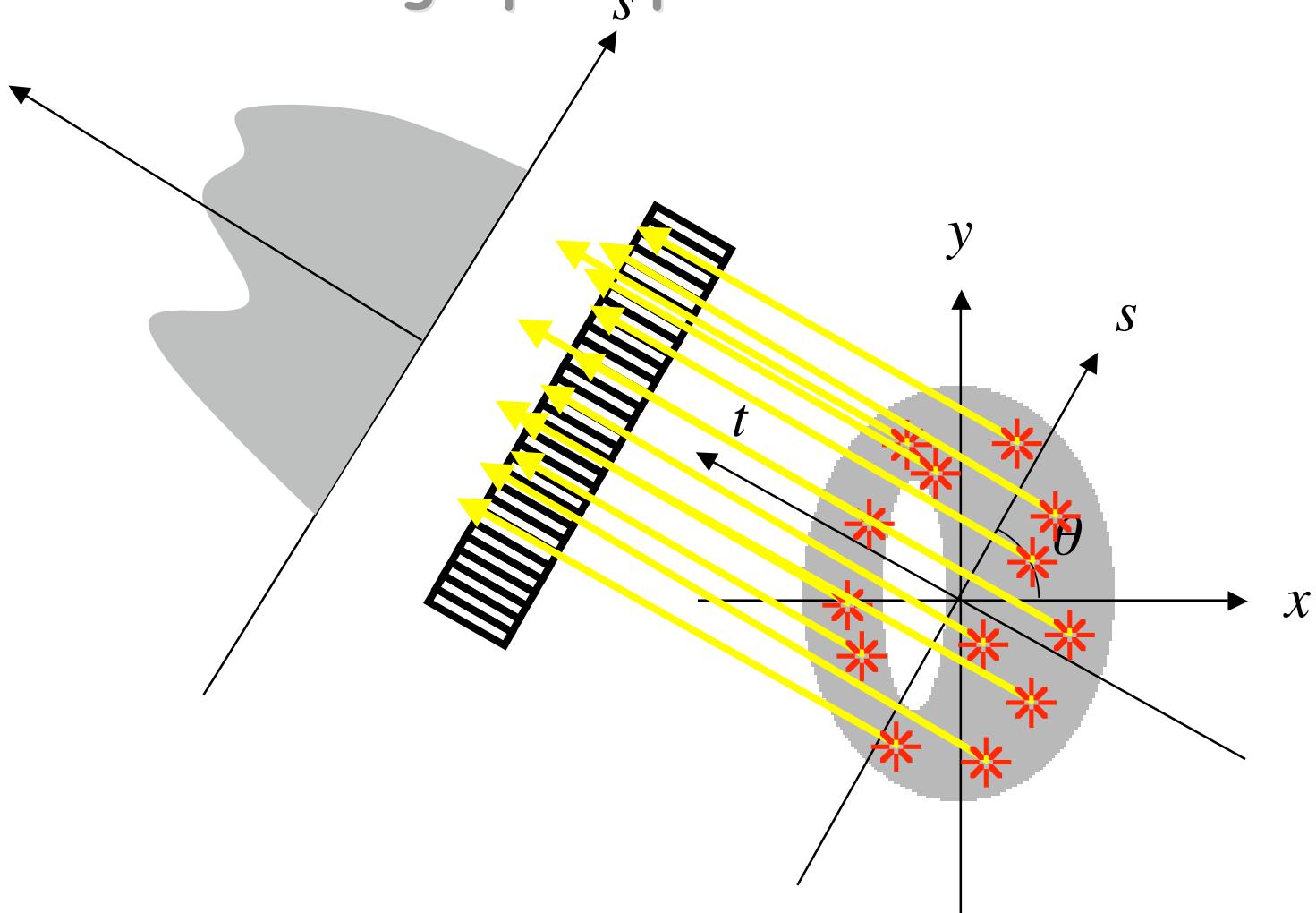
CIBLE

MACROSCOPIQUE

MICROSCOPIQUE

courtesy: J. Prior, CHUV

Tomographie par émission



Tomographie par émission monophotonique (TEMP)

Single Photon Emission Computed tomography (SPECT)

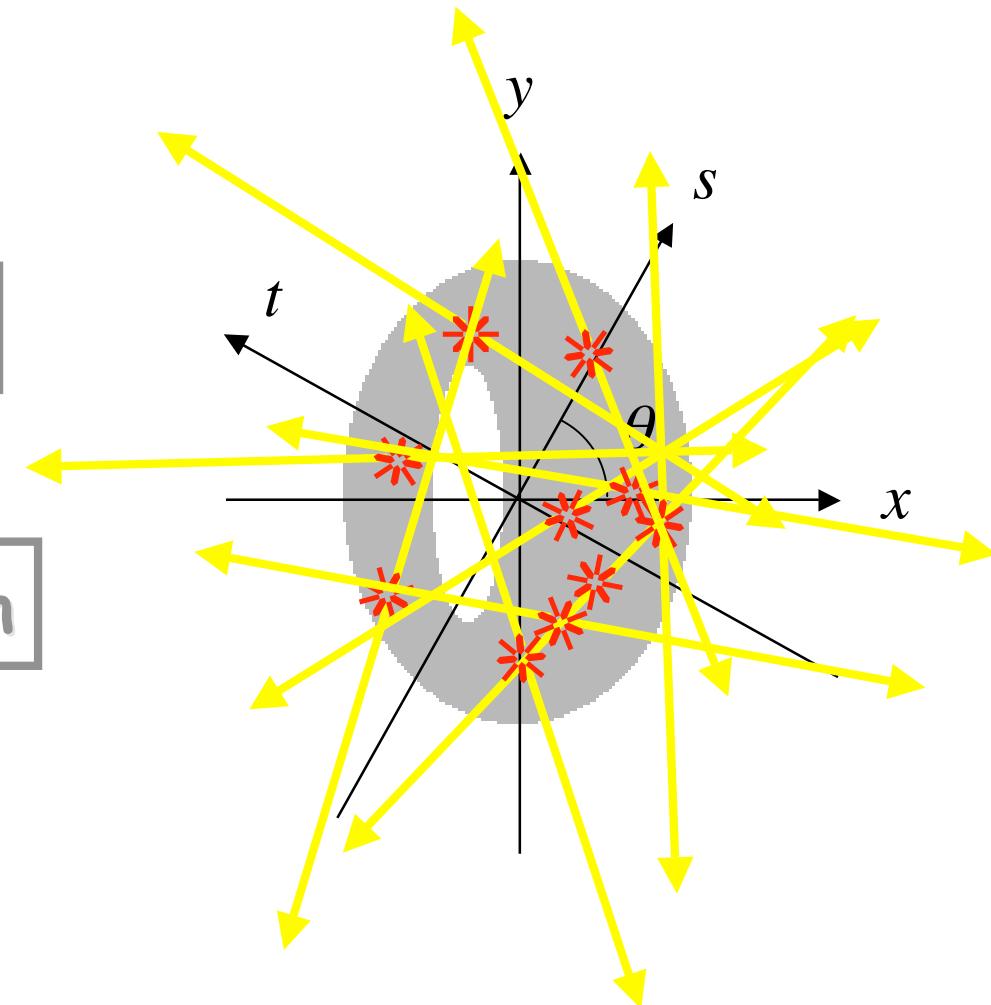
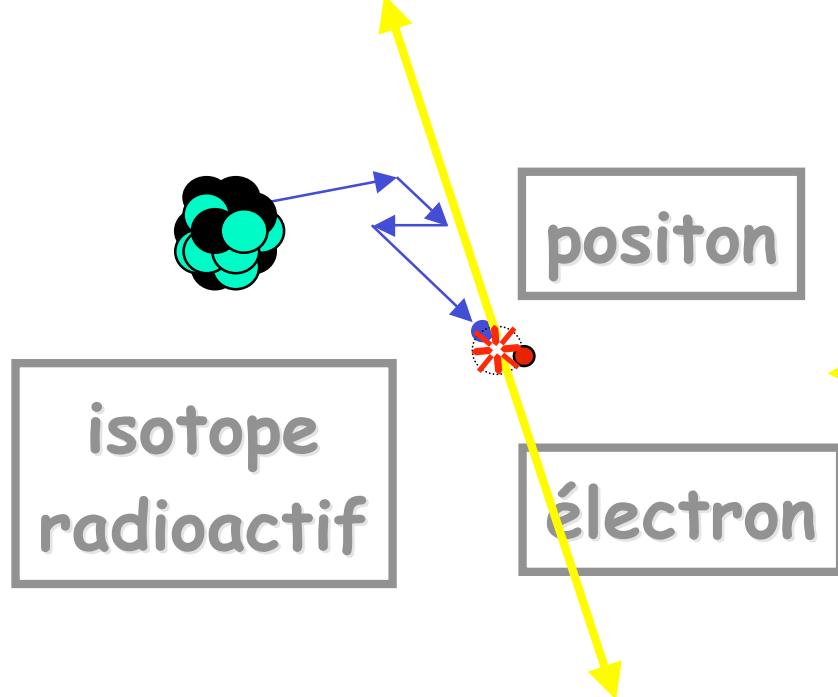


^{99m}Tc (6 h)	140 keV
^{201}TI (73 h)	70 keV
^{123}I (13 h)	159 keV
^{133}Xe (5 min)	81 keV

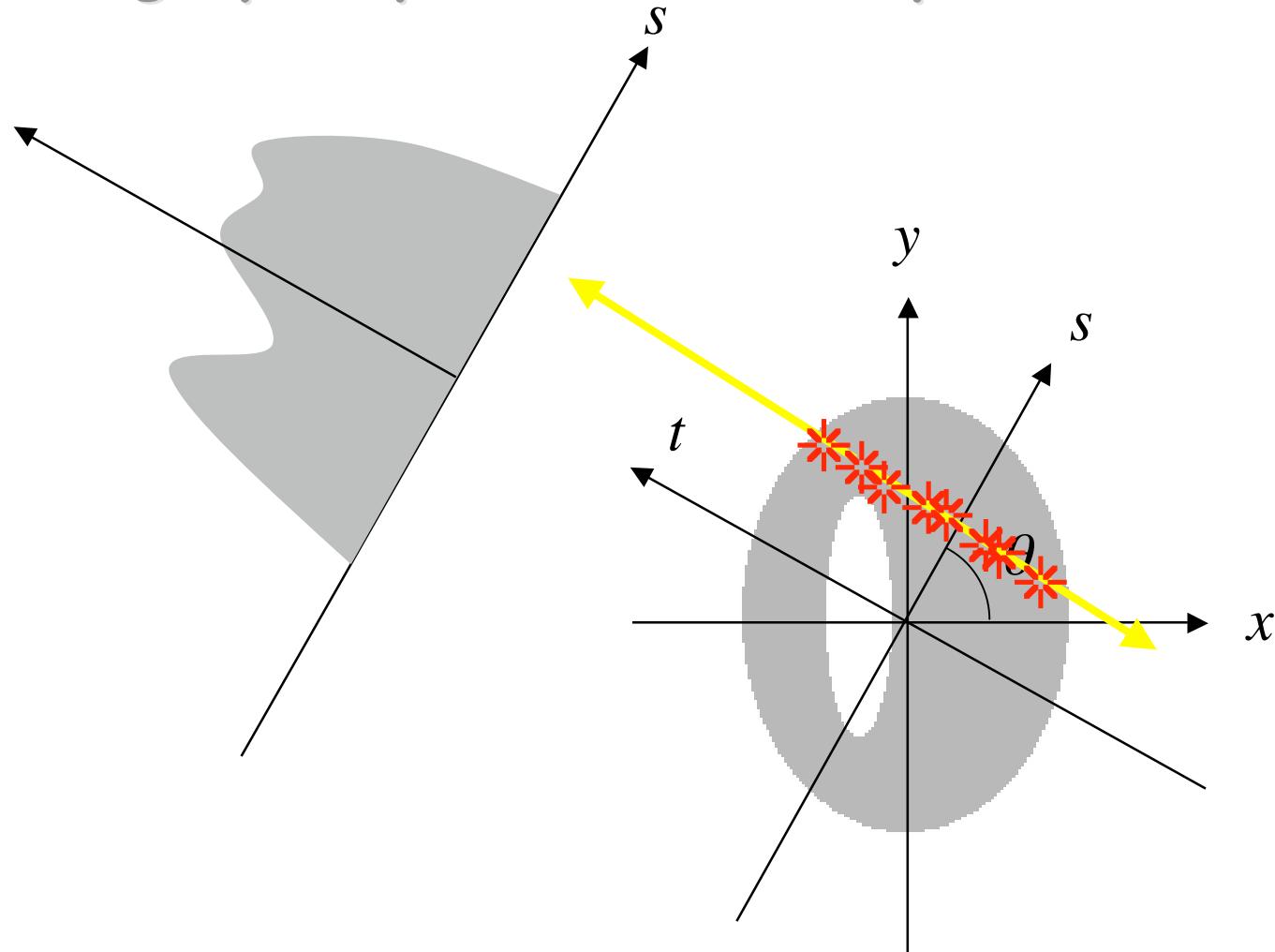


Sensibilité absolue	$\sim 10^{-4}$
Résolution spatiale	6-8 mm
Dose absorbée	5-30 mSv

Tomographie par émission de positons

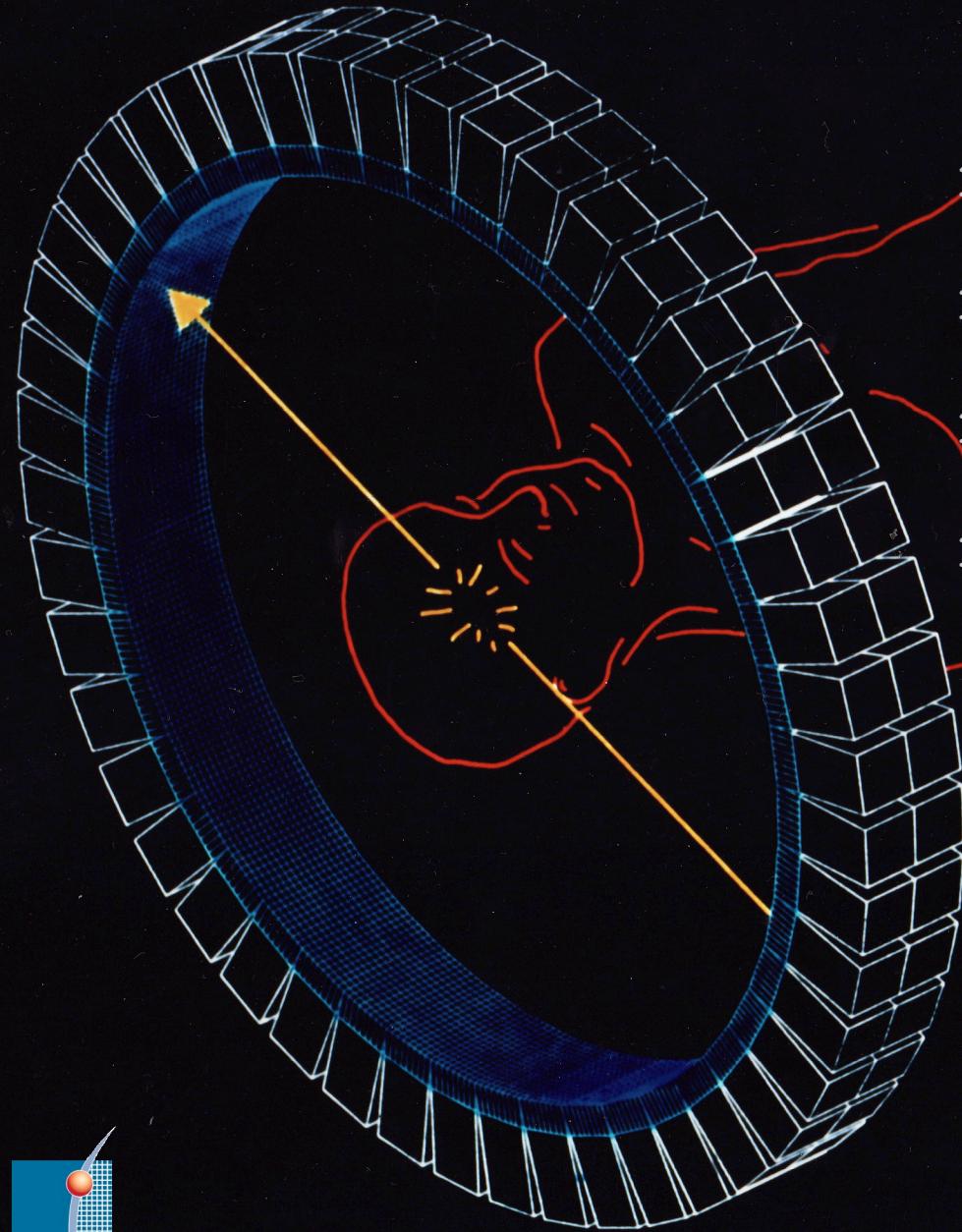


Tomographie par émission de positons



Tomographie par émission de positons (TEP)

Positron Emission tomography (PET)



^{15}O (2 min)

511 keV

^{13}N (10 min)

511 keV

^{11}C (20 min)

511 keV

^{18}F (110 min)

511 keV

Sensibilité absolue $\sim 10^{-2}$

Résolution spatiale 3-5 mm

Dose absorbée 5-10 mSv

M.R.C. Cyclotron Unit.
Hammersmith Hospital.
London.



Distribution normale de FDG



Fixations physiologiques du FDG

Cerveau

Thymus (enfants)

Cœur

Elimination urinaire:

Reins

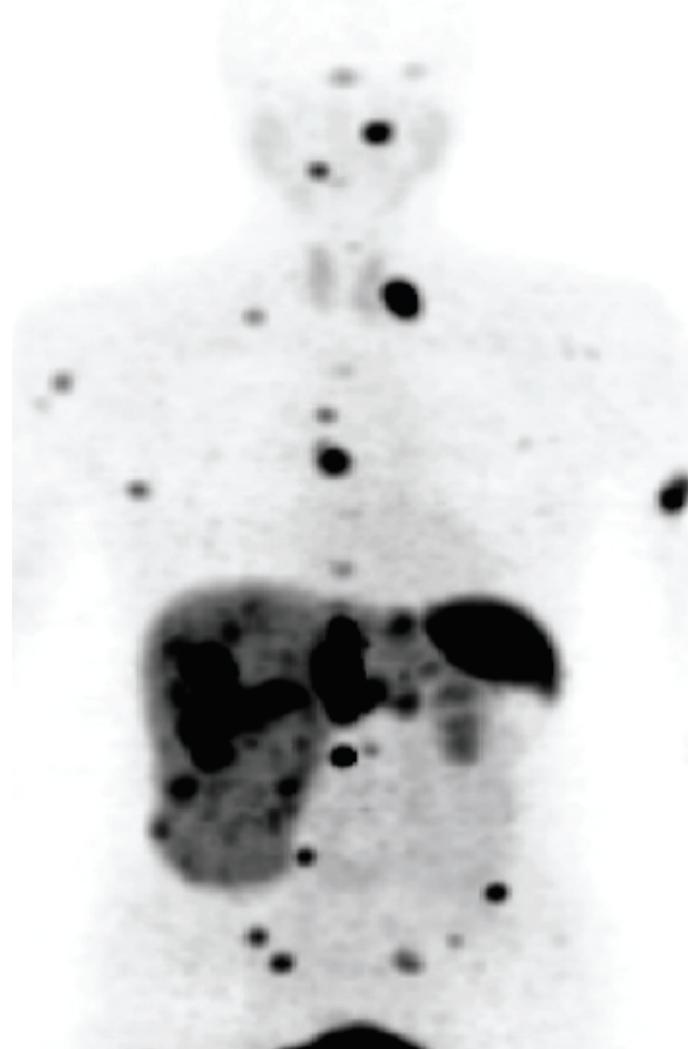
Uretères

Vessie

Distribution normale de FDG



Distribution anormale de FDG



Préclinique + Clinique

microPET Focus 220



Souris
6 MBq

ECAT EXACT HR+



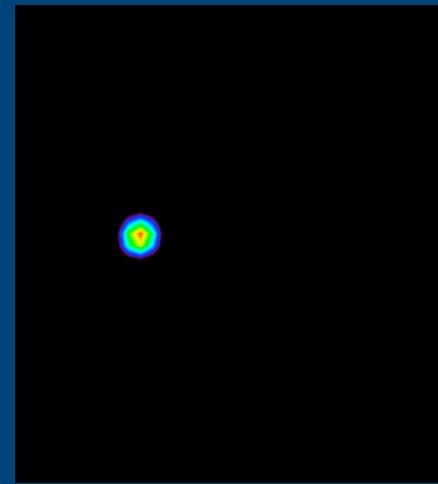
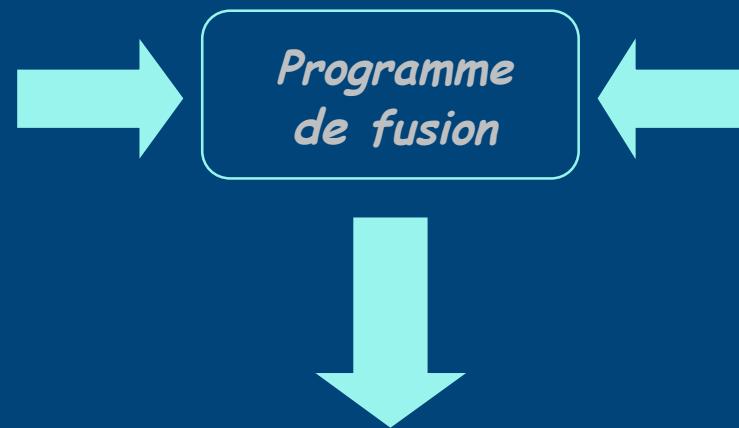
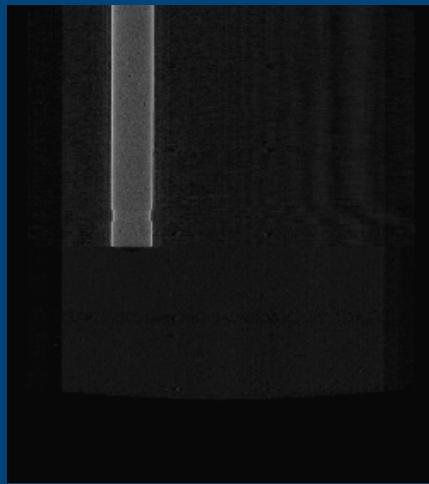
Humain
390 MBq



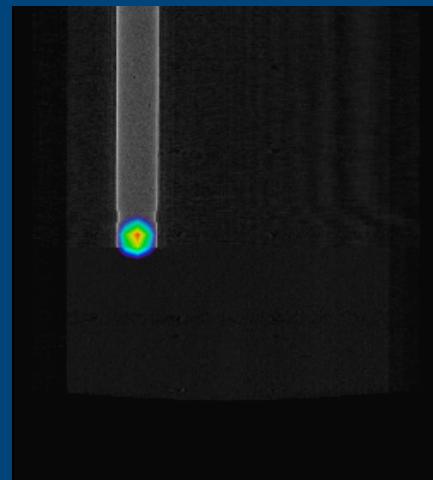
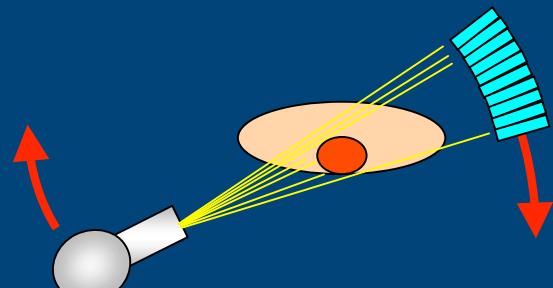
UNIVERSITÉ
DE LA MÉDITERRANÉE
AIX-MARSEILLE II

LAPP/IN2P3, Annecy-le-Vieux, 4 juin 2010

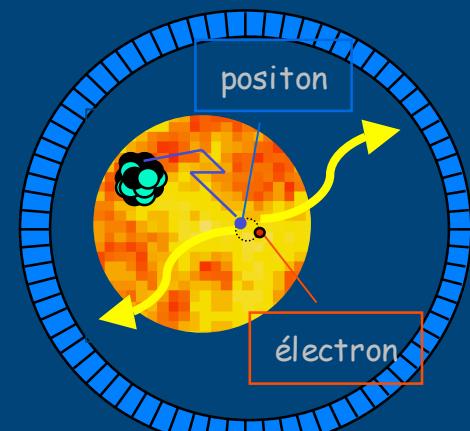
Anatomie + Fonction



Rayons X : TDM -> anatomie



Positons : TEP -> fonction



Fusion d'image



UNIVERSITÉ
DE LA MÉDITERRANÉE
AIX-MARSEILLE II

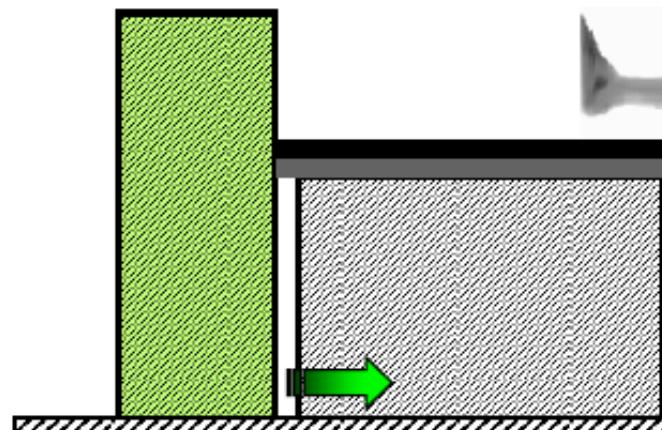
LAPP/IN2P3, Annecy-le-Vieux, 4 juin 2010

Design typique d'un scanner TEP/CT clinique

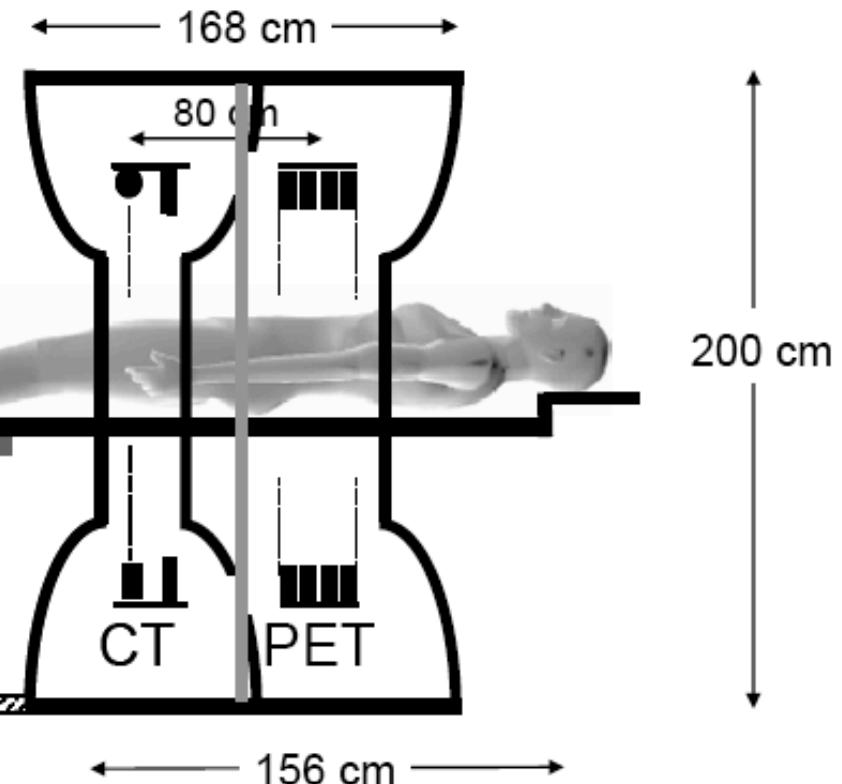
Gantry dimensions:

228 cm x 200 cm x 168 cm

CT rotation: 0.4 s; 16 slice



courtesy: DW Townsend, UT



2001: 1er scanner TEP/CT commercial installé à Zurich par GE

2005: plus de 650 scanners TEP/CT installés, 95% des ventes de scanners TEP

Scanners TEP/CT cliniques commerciaux



GE Healthcare

Discovery ST, VCT



Gemini GXL



SIEMENS

Biograph 6, 16, 64

BGO

6 mm × 6 mm × 30 mm

2D/3D (septa)

8, 16, 64 slice CT

70 cm port

11,7 ns coincidence

GSO

4 mm × 6 mm × 30 mm

3D only (no septa)

6, 10, 16 slice CT

70 cm port

6 ns coincidence

LSO

4 mm × 4 mm × 20 mm

3D only (no septa)

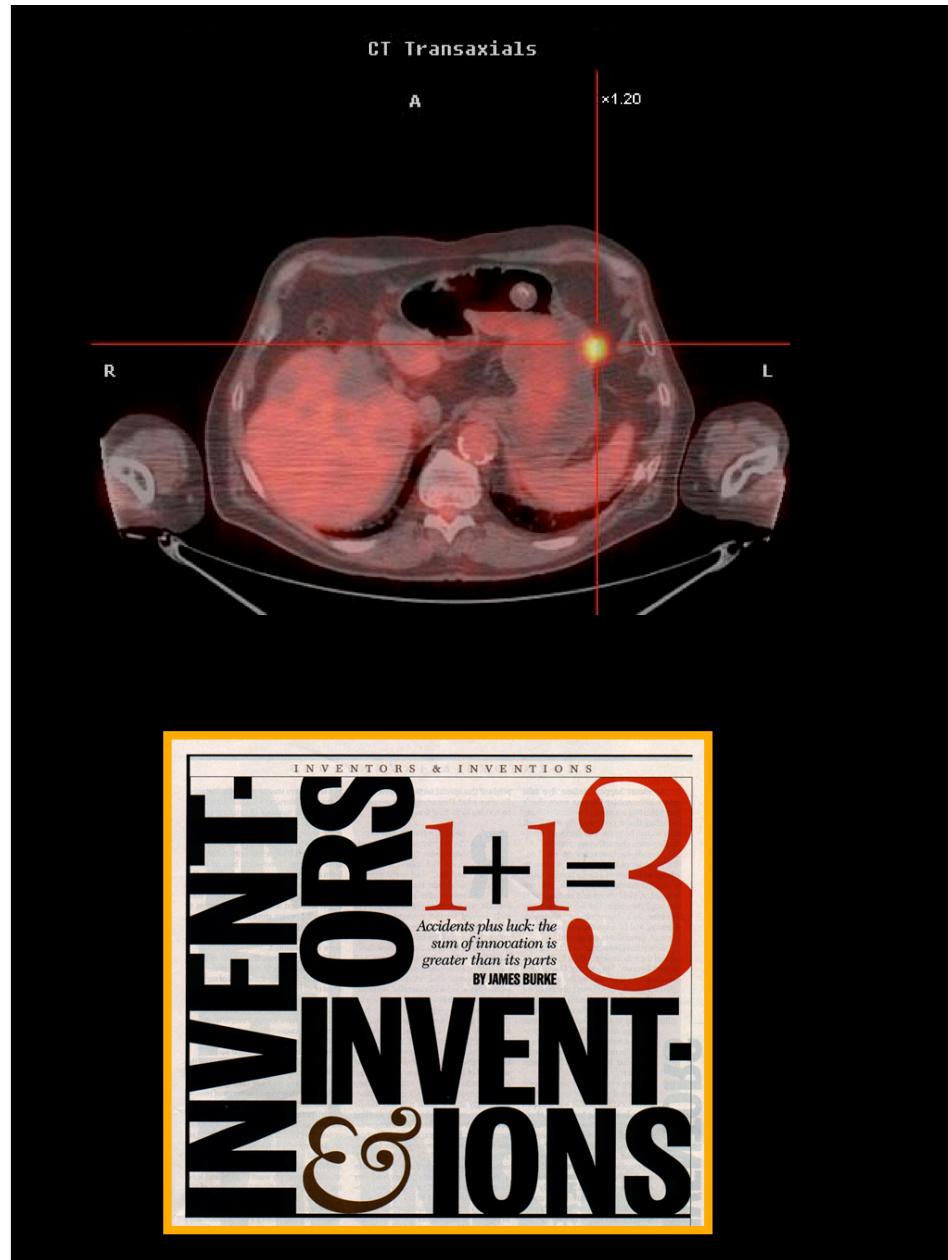
8, 16, 64 slice CT

70 cm port

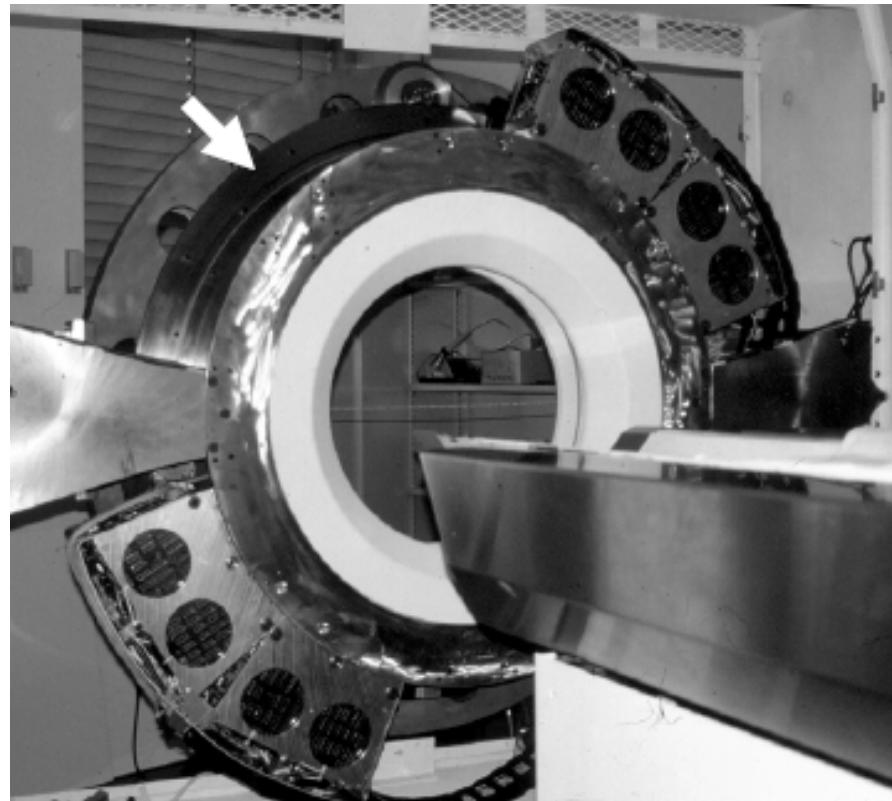
4,5 ns coincidence



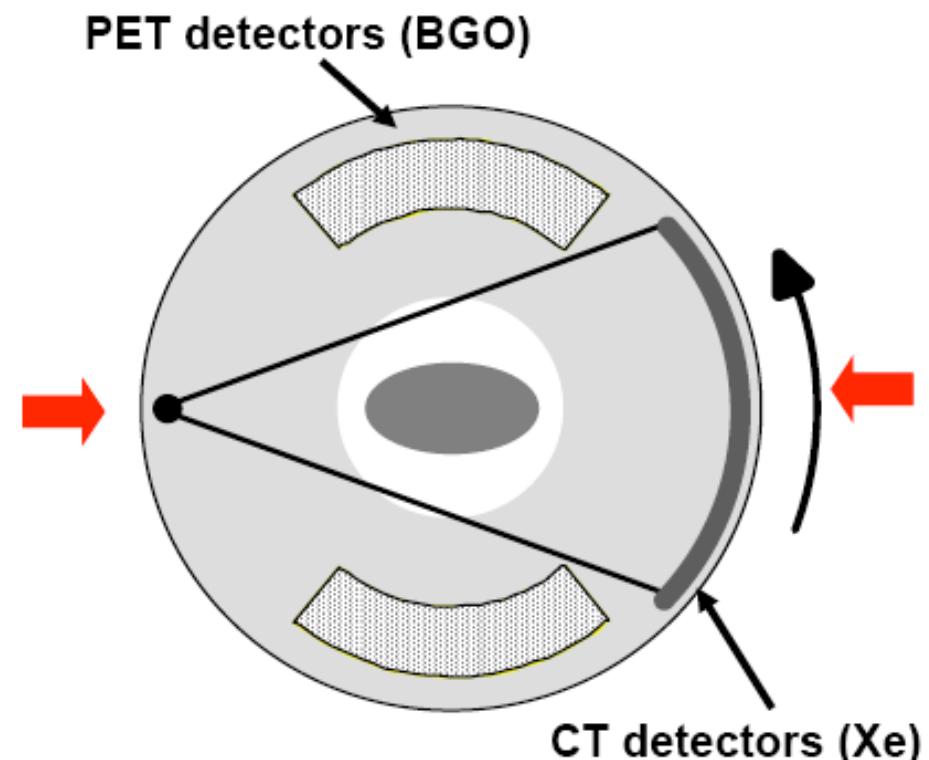
LAPP/IN2P3, Annecy-le-Vieux, 4 juin 2010



1991: Concept du TEP/TDM, D.W. Townsend (HUG)



PRT-1

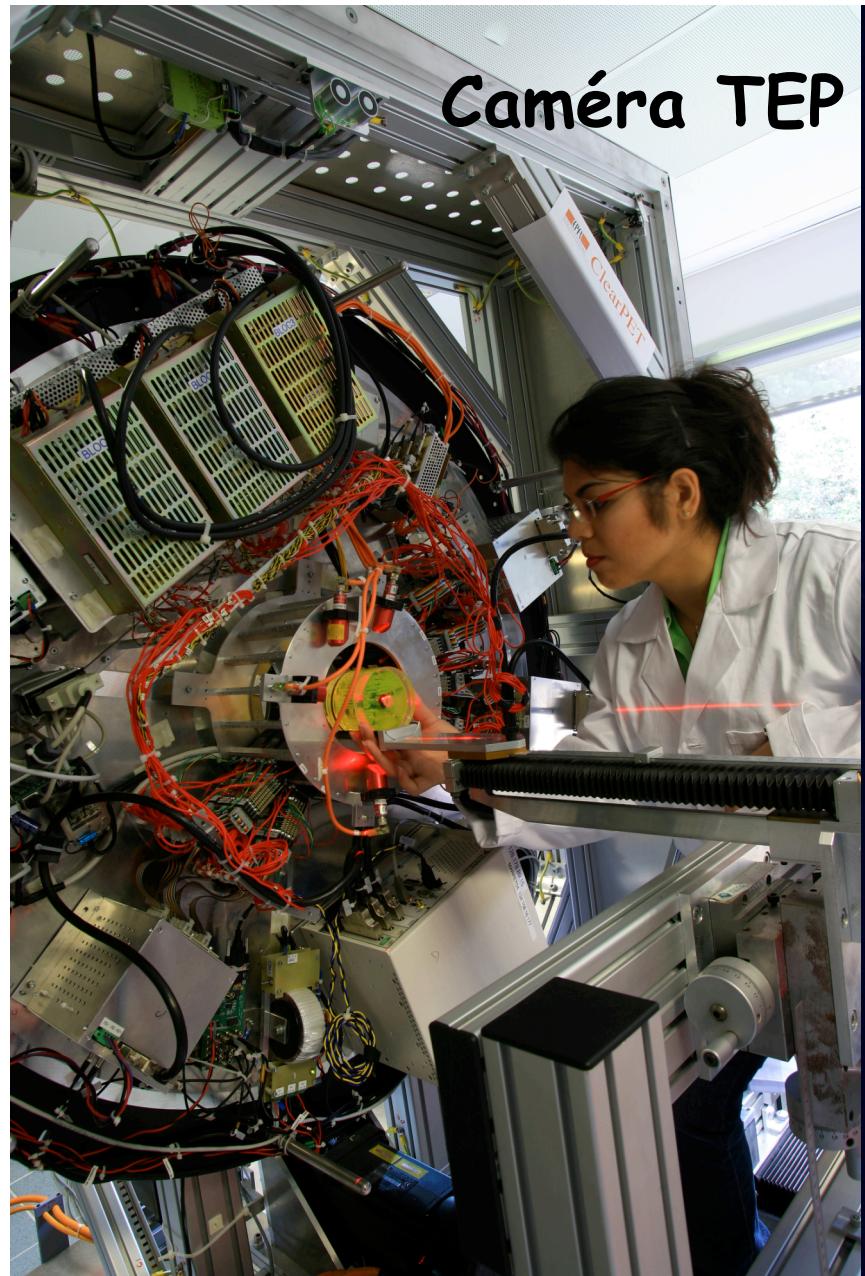


courtesy: D.W. Townsend, UPMC



UNIVERSITÉ
DE LA MÉDITERRANÉE
AIX-MARSEILLE II

LAPP/IN2P3, Annecy-le-Vieux, 4 juin 2010



Caméra TEP pour petits animaux ClearPET

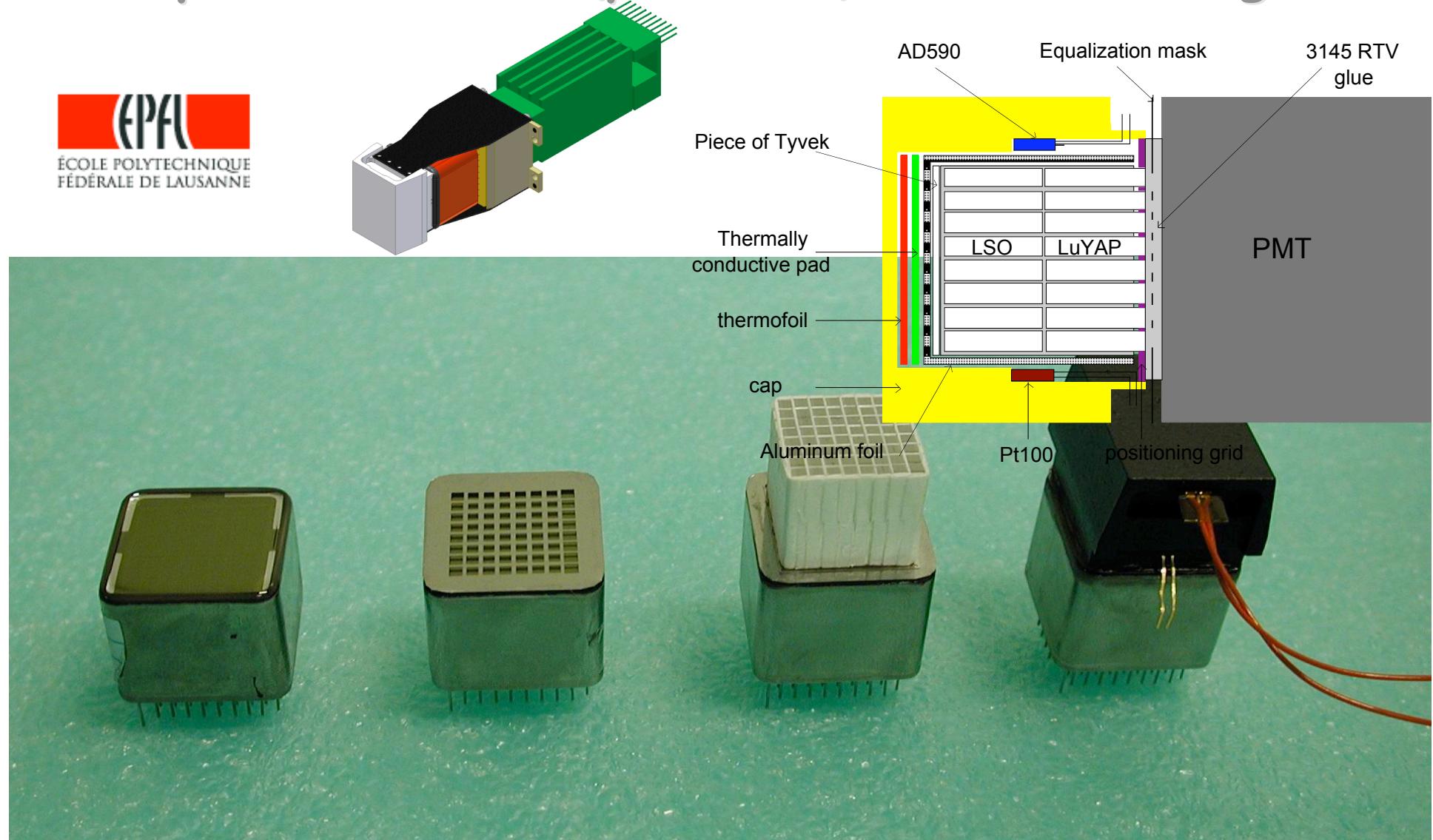


UNIVERSITÉ
DE MÉDITERRANÉE
AIX-MARSEILLE II



IN2P3, Annecy-le-Vieux, 4 juin 2010

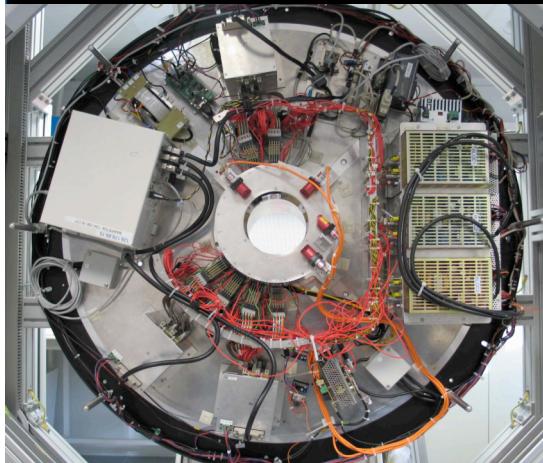
Phosphor Sandwich (phoswich) detector design



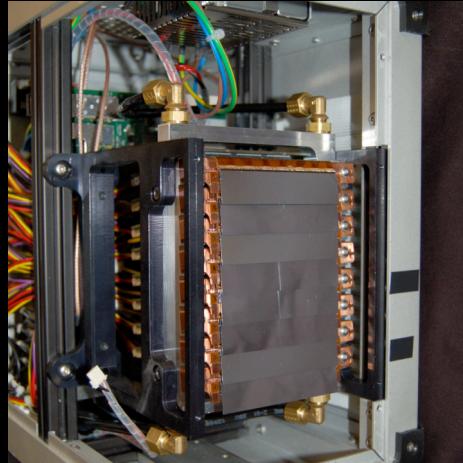
UNIVERSITÉ
DE MÉDITERRANÉE
AIX-MARSEILLE II

LAPP/IN2P3, Annecy-le-Vieux, 4 juin 2010

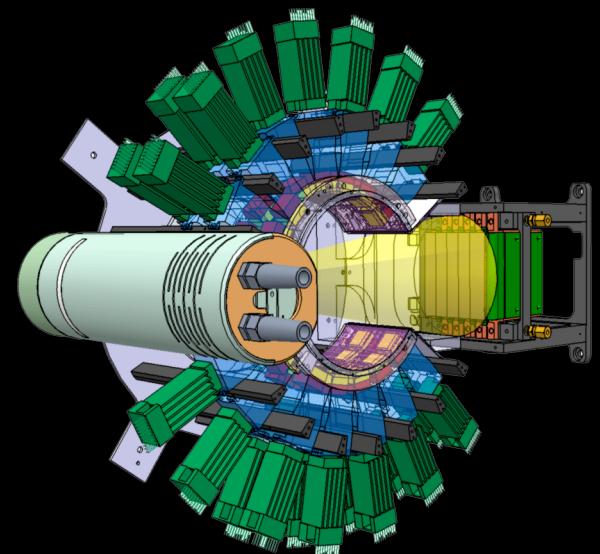
ClearPET + XPAD = ClearPET/XPAD



+



=



ClearPET (EPFL)

- Géometrie ouverte
- DéTECTEURS phoswich LSO/LuYAP
- 2×64 cristaux de $2 \times 2 \times 8 \text{ mm}^3$
- PMT multi-anodes à 64 canaux

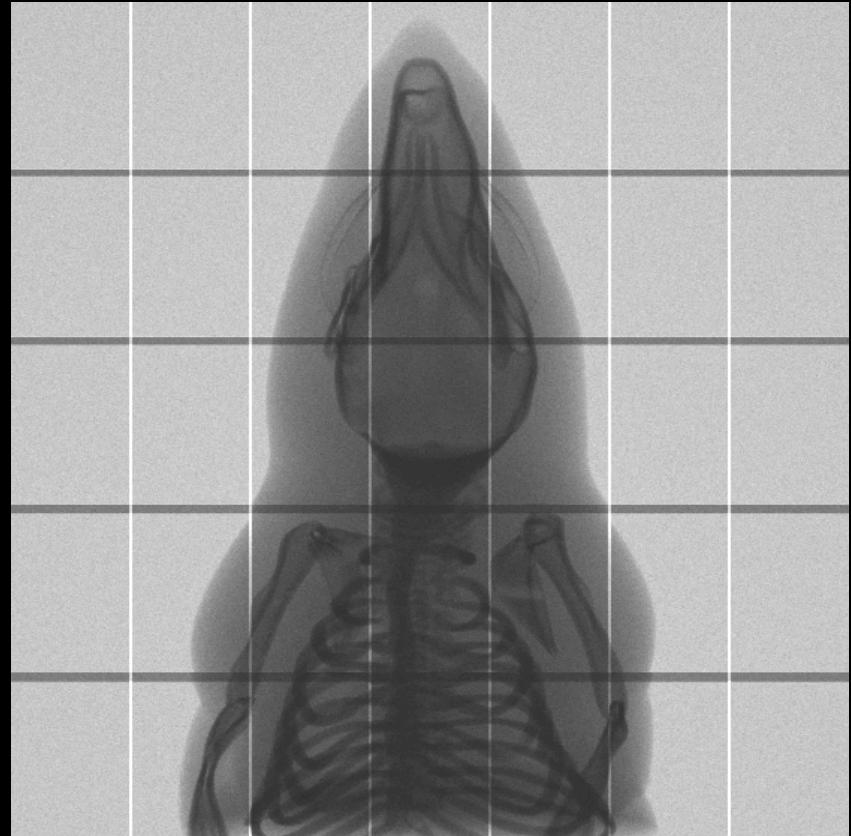
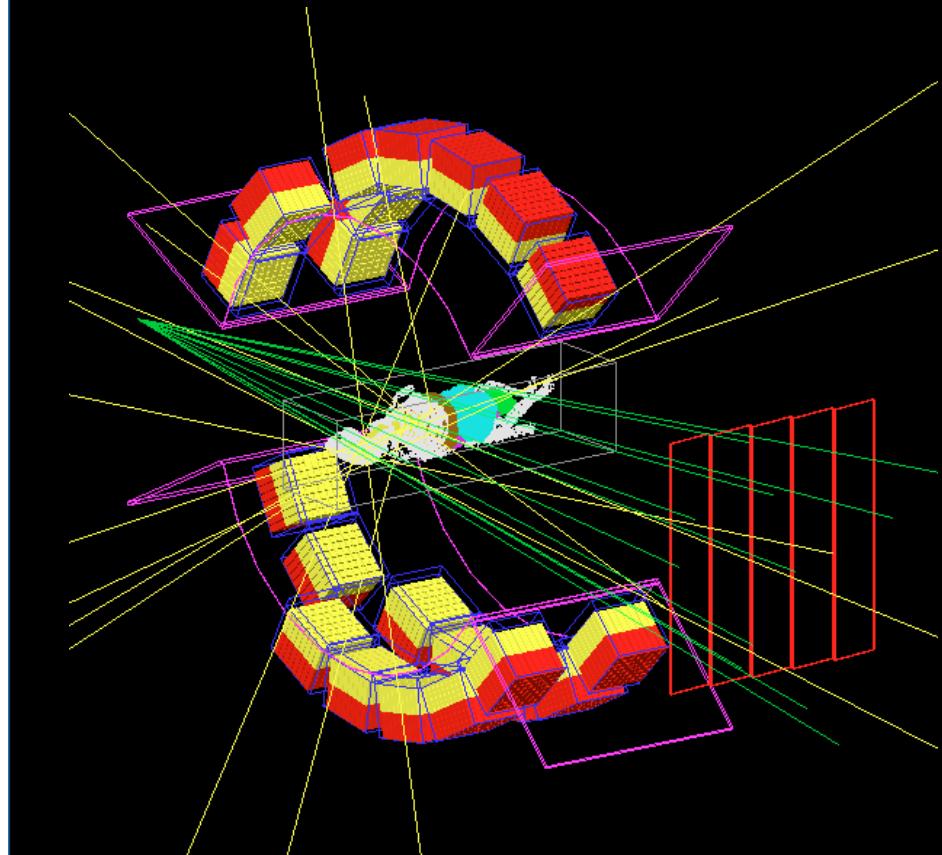
XPAD (CPPM)

- DéTECTEUR XPAD3
- $500 \mu\text{m}$ Si pixellisé
- Pixels $130 \times 130 \mu\text{m}^2$
- 0,5 Mpixels
- Seuils réglables 5-35 keV
- Tube RTW anode de Mo

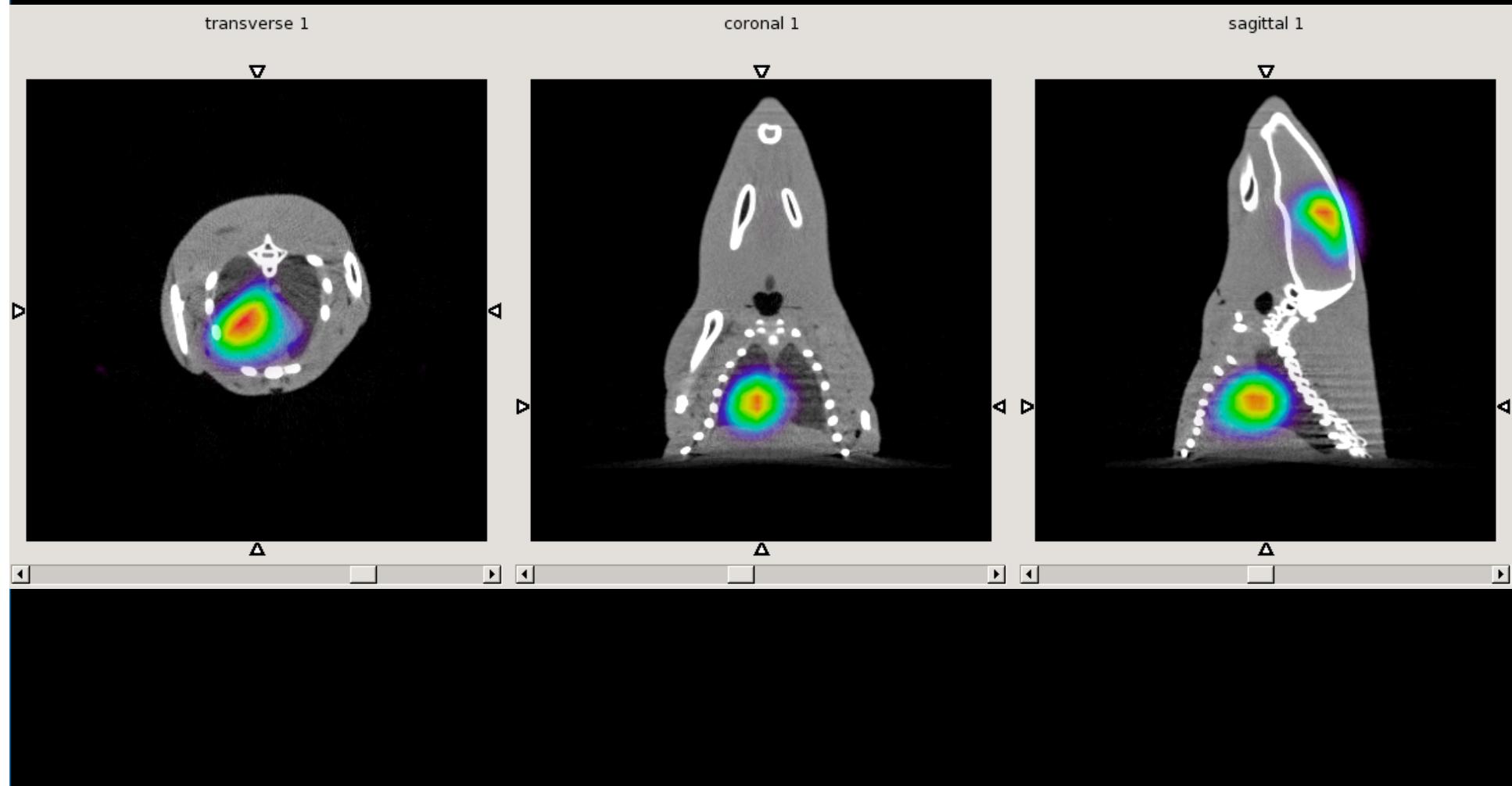
ClearPET/XPAD

- Tomographie hybride TEP/TDM simultanée
- TEP : 55 mm axial
111 mm transverse
- TDM : 59 mm axial
38 mm transverse

Simulation Monte Carlo avec la plate-forme GATE

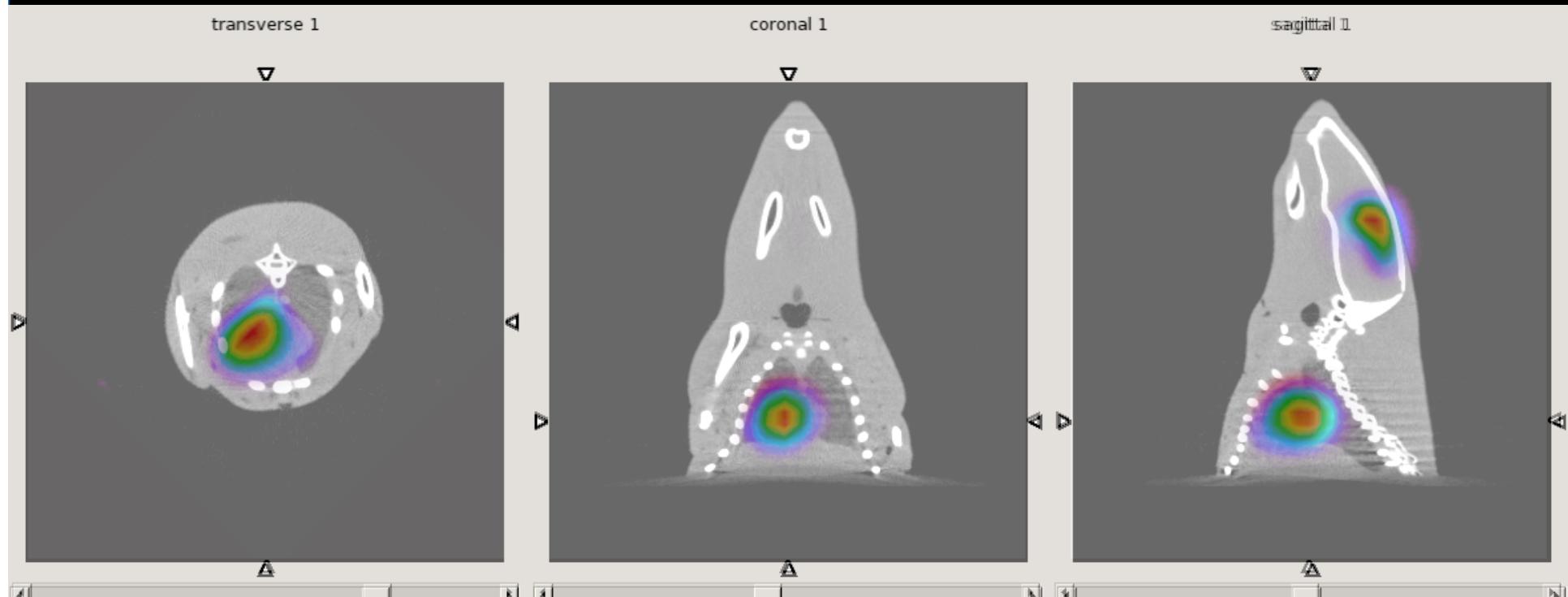


Simulation Monte Carlo avec la plate-forme GATE



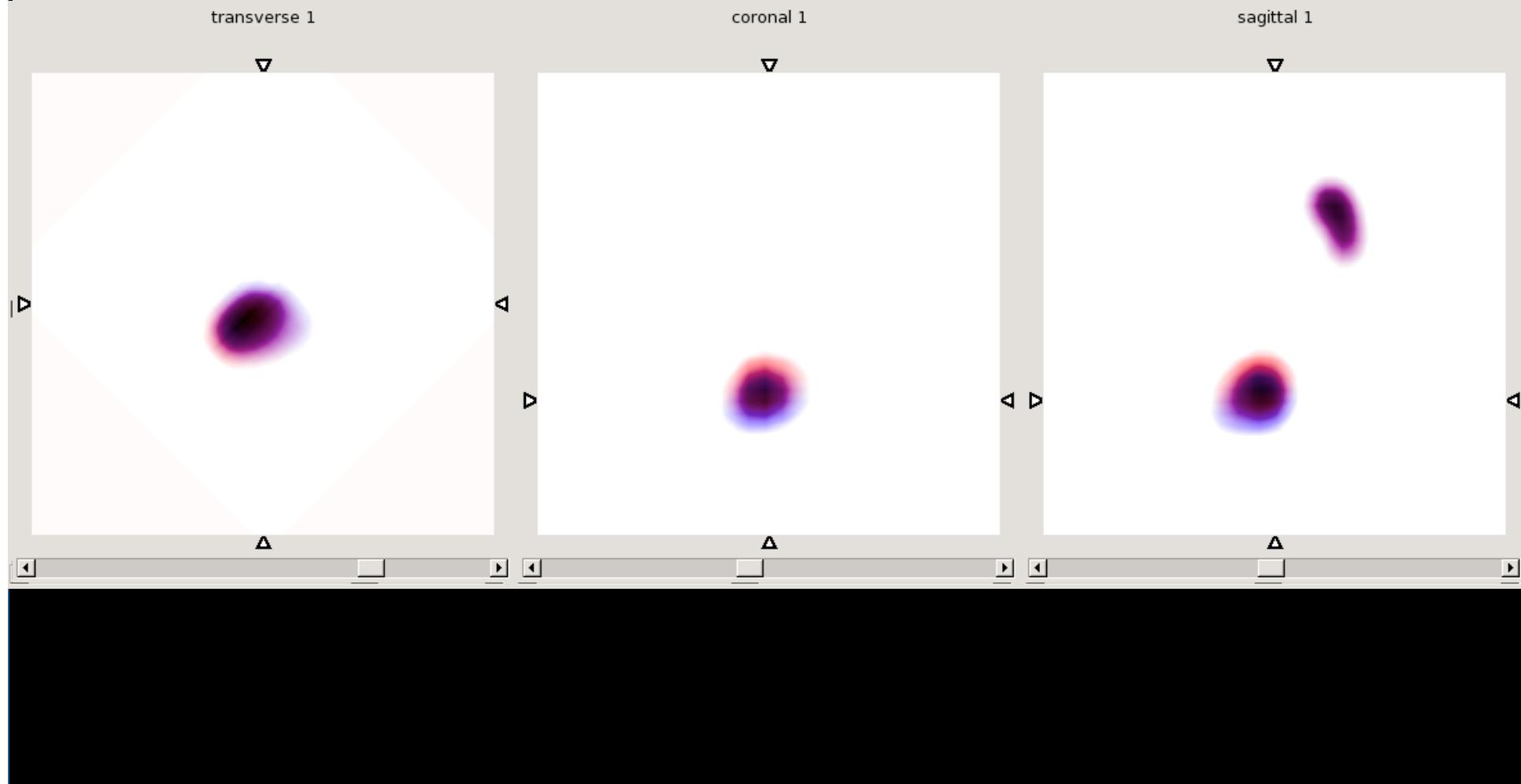
LAPP/IN2P3, Annecy-le-Vieux, 4 juin 2010

Simulation Monte Carlo avec la plate-forme GATE



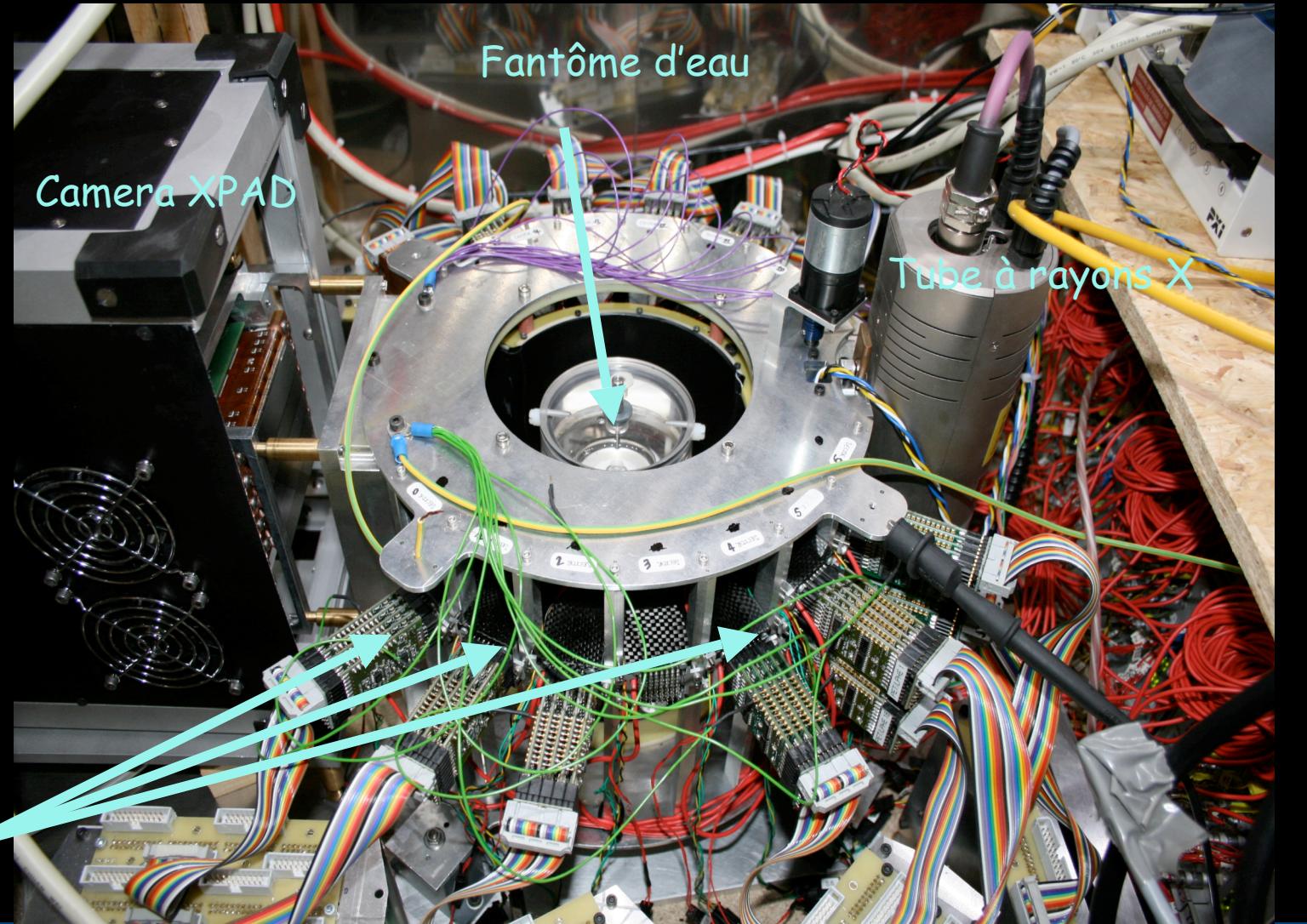
LAPP/IN2P3, Annecy-le-Vieux, 4 juin 2010

Simulation Monte Carlo avec la plate-forme GATE



LAPP/IN2P3, Annecy-le-Vieux, 4 juin 2010

Preuve de concept pour la tomographie TEP/CT simultanée



UNIVERSITÉ
DE LA MÉDITERRANÉE
AIX-MARSEILLE II

LAPP/IN2P3, Annecy-le-Vieux, 4 juin 2010

Scan TDM d'une tarente

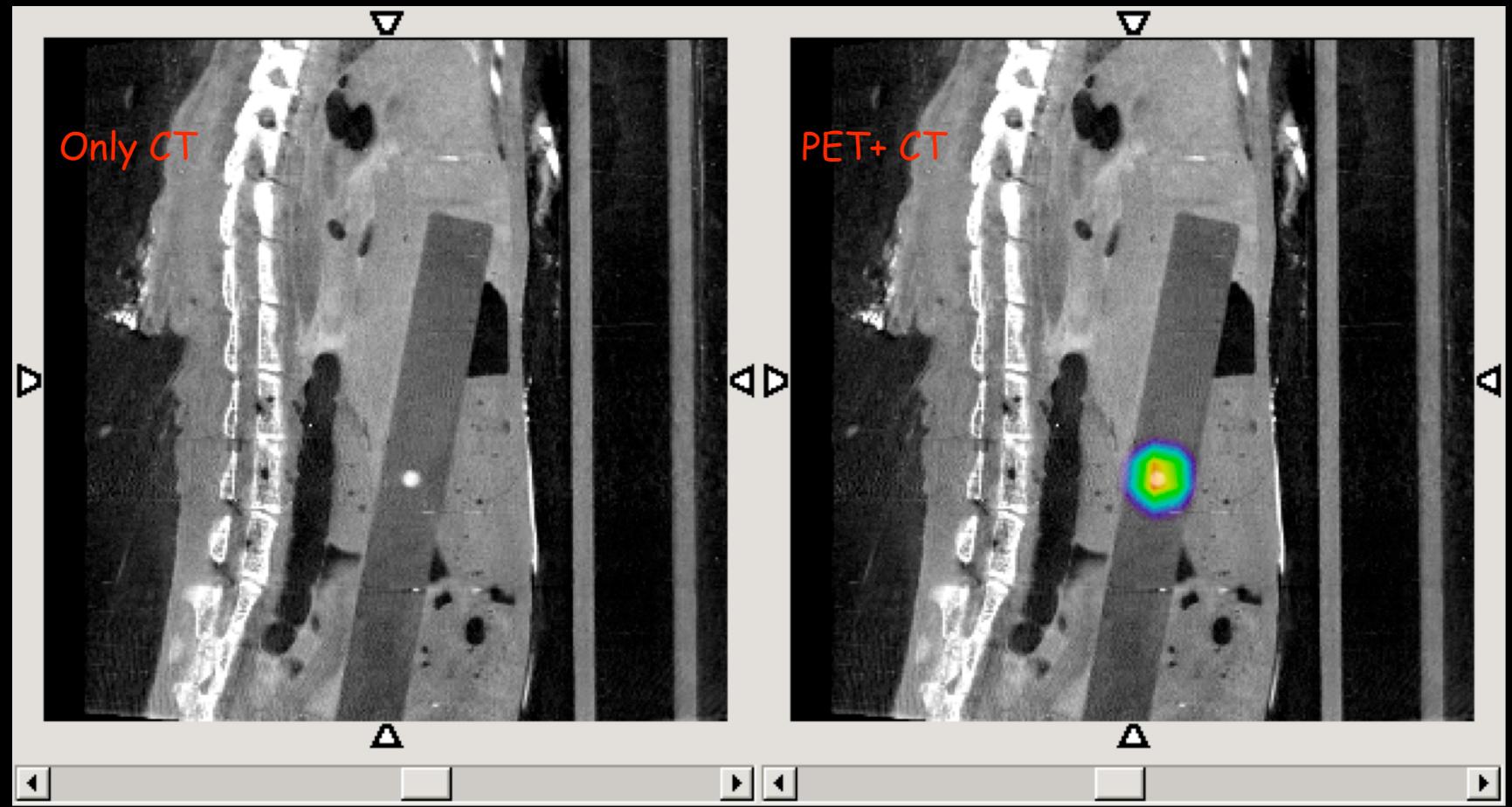
- Rendus volumiques superposés
- Segmentation des poumons
- 40 kV, 800 μ A,
filtre Nb/Mo
- 720 projections
- 1 s/projection
- 10000 photons/pixel
- Dose (air) : 1 mGy/s à 160 mm



LAPP/IN2P3, Annecy-le-Vieux, 4 juin 2010

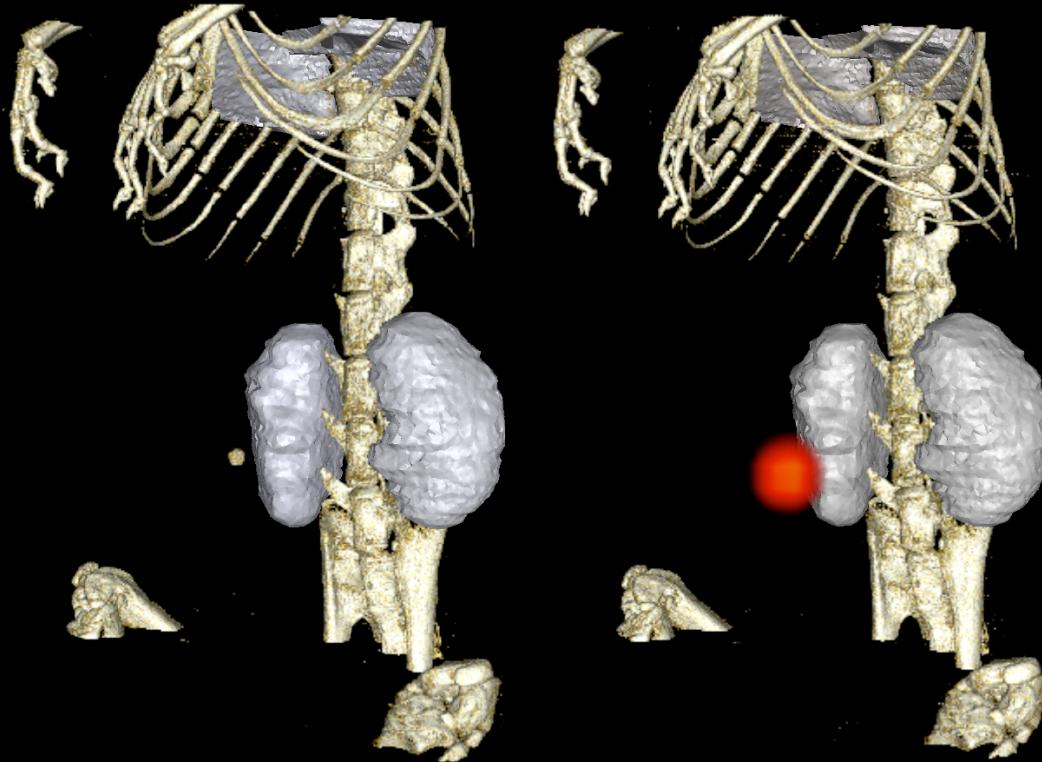
Scan TEP/TDM d'une souris acquis simultanément

Source de ^{22}Na scellée dans un disque de plastic
inséré chirurgicalement dans l'abdomen d'une souris morte



Scan TEP/TDM d'une souris acquis simultanément

- Rendus volumique
- Segmentation des poumons et des reins
- 40 kV, 800 μ A, filtre Nb/Mo
- 360 projections
- 1 s/projection
- 10 000 photons/pixel

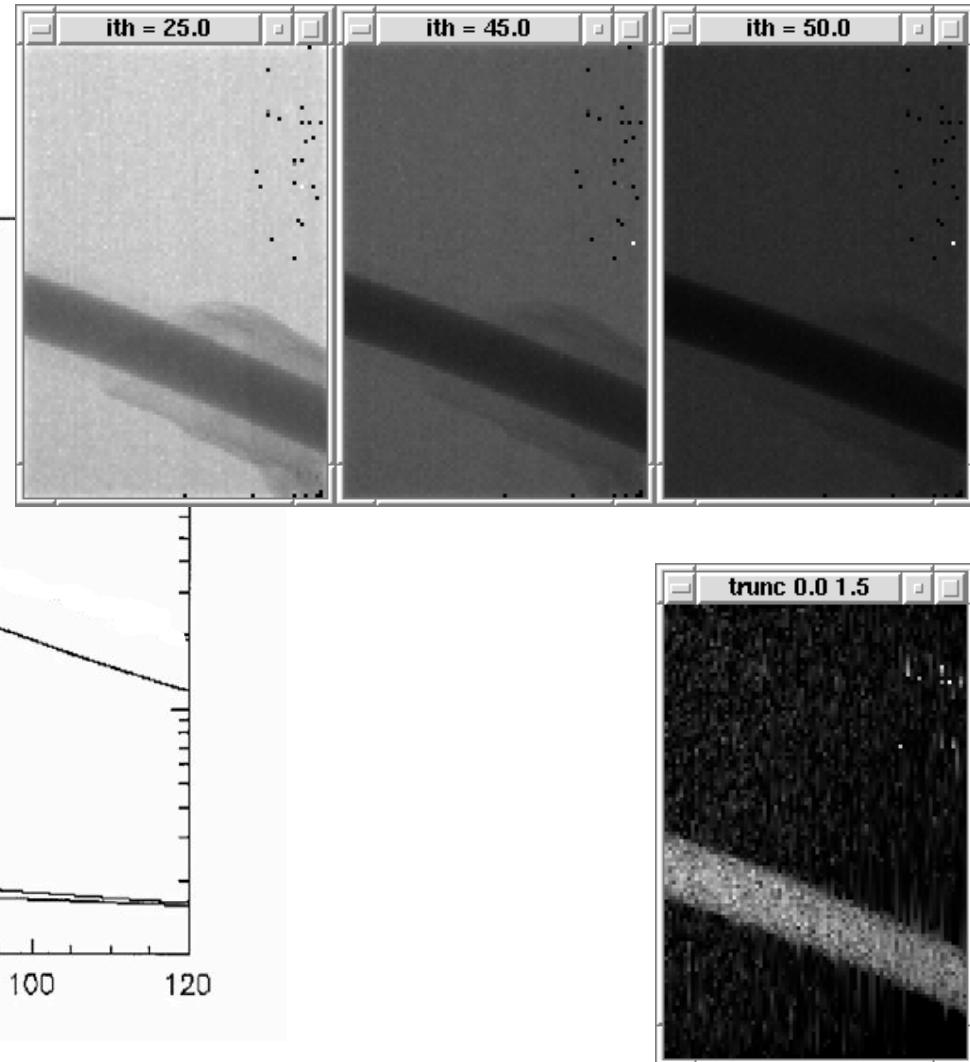
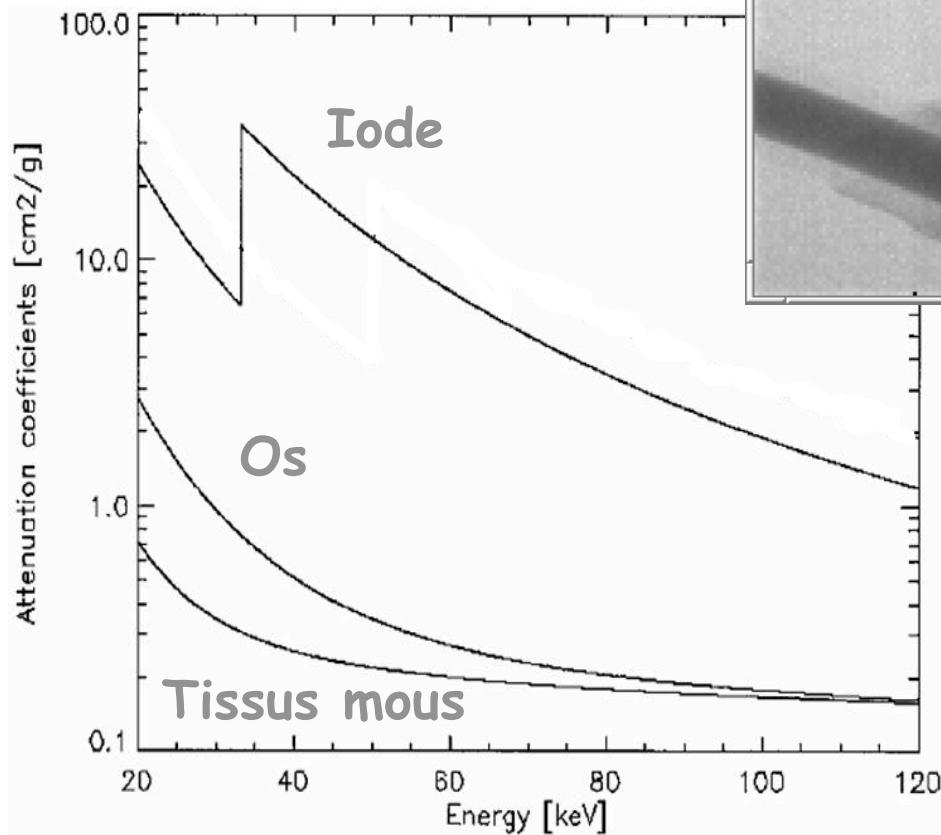


Le scanner X : le passage du noir et blanc à la couleur pour bientôt, grâce aux pixels hybrides



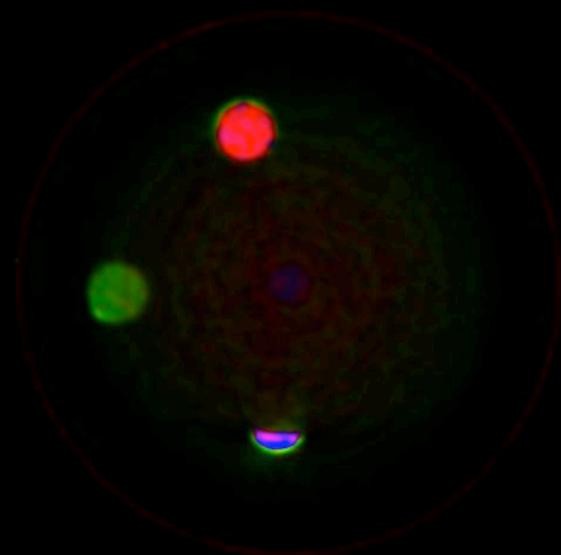
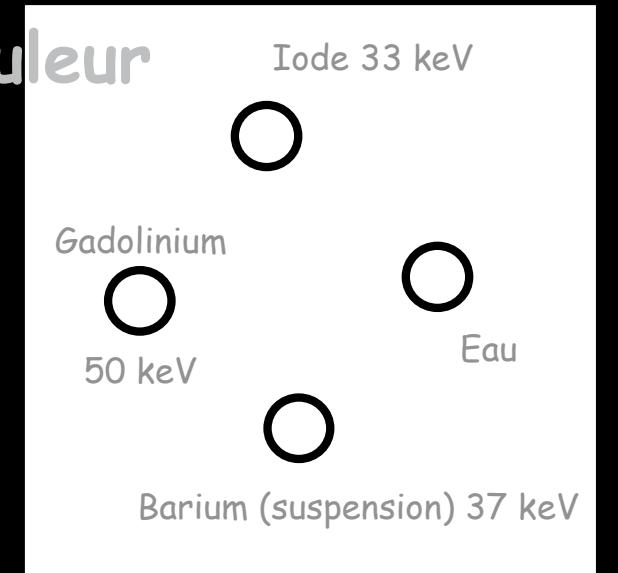
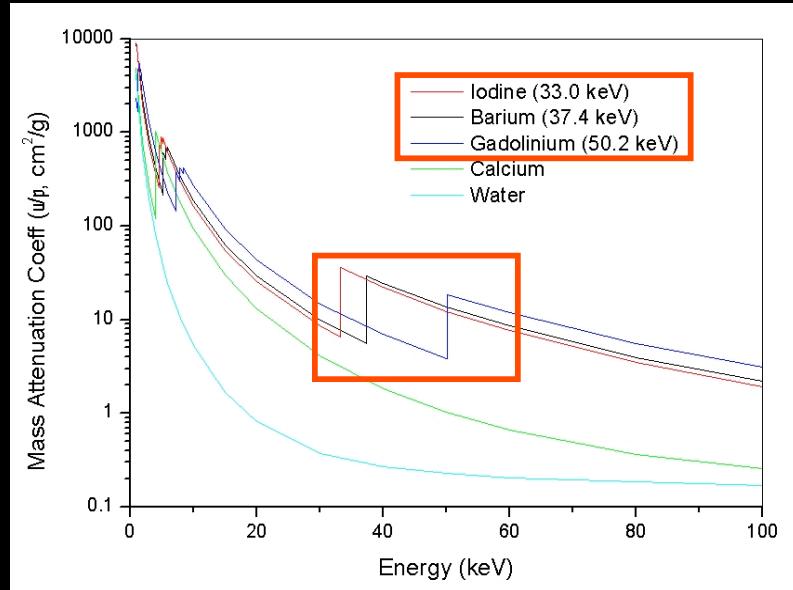
Scanner X : du noir et blanc à la couleur

Magnification de contraste



Scanner X: du noir et blanc à la couleur

Capteur CdTe efficace jusqu'à 100 keV



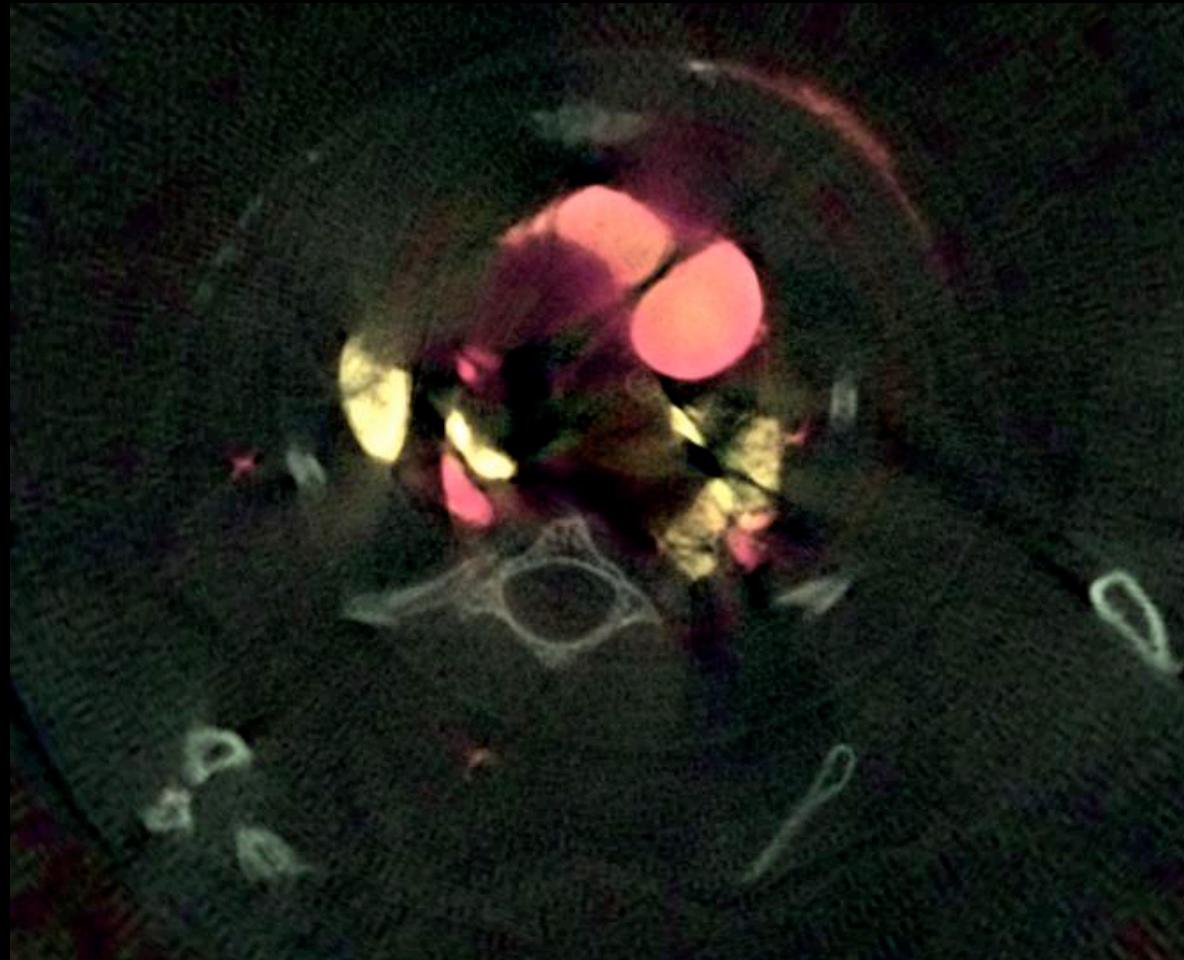
courtesy: A. Butler, MARS Biomedical Imaging Ltd.



UNIVERSITÉ
DE
MÉDITERRANÉE
AIX-MARSEILLE II

LAPP/IN2P3, Annecy-le-Vieux, 4 juin 2010

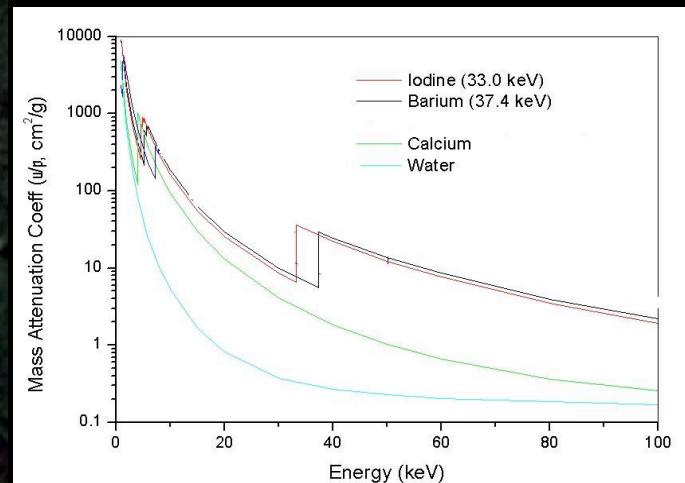
Scanner X : du noir et blanc à la couleur



Iode : circulation pulmonaire

Barium : poumons

Calcium : os normaux



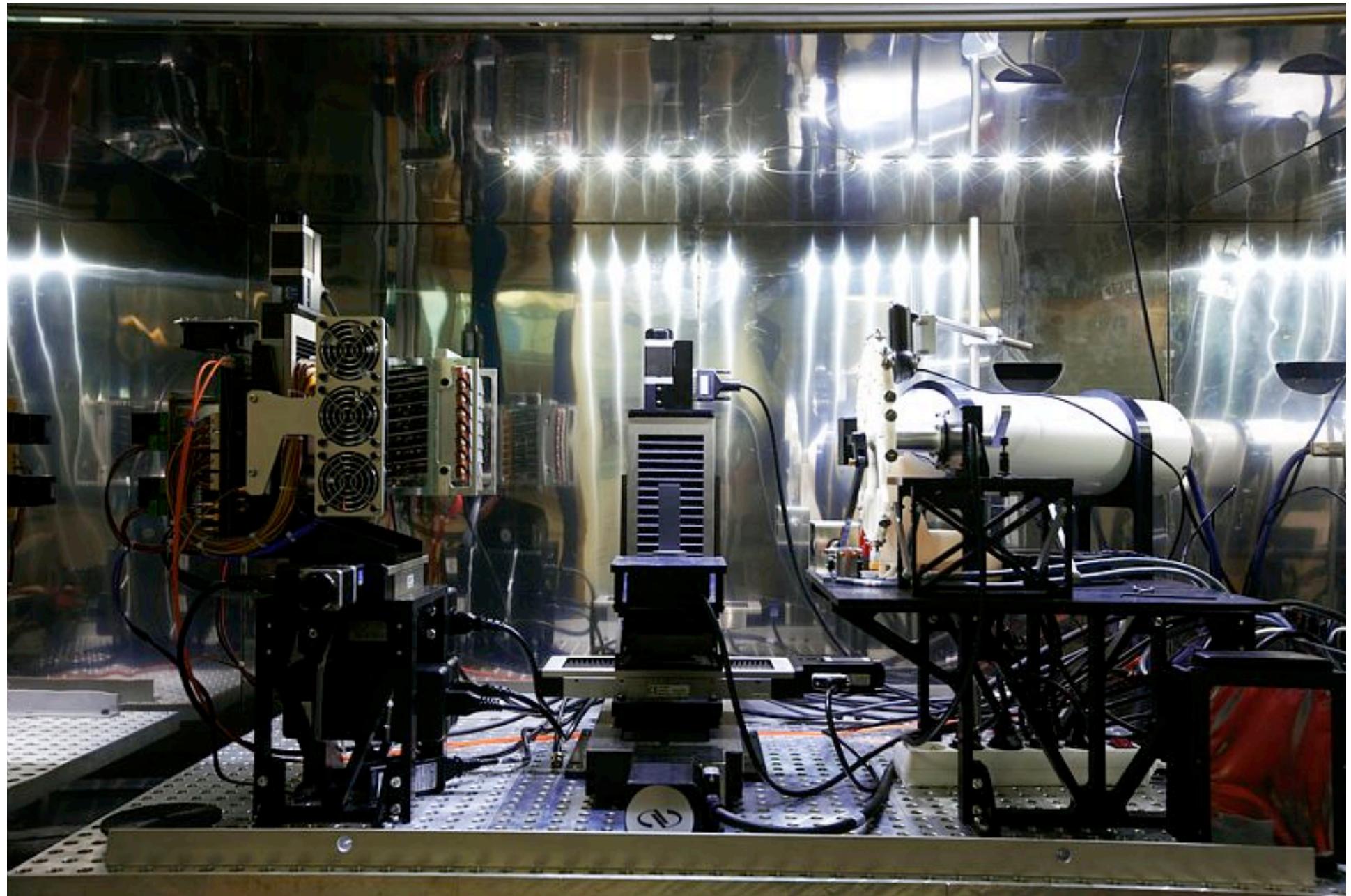
Système quantitatif développé à l'université d'Erlangen-Nürnberg

courtesy: A. Butler, MARS Biomedical Imaging Ltd.



UNIVERSITÉ
DE LA MÉDITERRANÉE
AIX-MARSEILLE II

LAPP/IN2P3, Annecy-le-Vieux, 4 juin 2010



UNIVERSITÉ
DE LA MÉDITERRANÉE
AIX-MARSEILLE II

LAPP/IN2P3, Annecy-le-Vieux, 4 juin 2010

Equipe imagerie X et gamma



Physique, instrumentation, informatique :

- Alain Bonissent
- Didier Benoit (*fGATE* → IMNC)
- Oussama Buhadida (doctorant LPC)
- Yannick Boursier (MCF, UAM 09)
- Jean-Claude Clémens
- Franca Cassol
- Pierre Delpierre
- Pierre-Yves Duval
- Jérémy Godart (doc IMNC, Dr 08)
- Sonia Karkar (IR, UAM 06)
- Maryam Khodaverdi (postdoc 06-07 → Philips)
- Rana Khoury (Dr 08)
- Christophe Meessen
- Christian Morel (PR, UAM, 05)
- Stan Nicol (doctorant 06)
- Hamid Ouamara (doctorant 10)
- Peter Weiss (postdoc)

Biologie :

- Franck Debarbieux (MCF, UAM 05)
- Thiéric Rodriguez (IBDML)

Électronique/microélectronique :

- Stéphanie Godiot
- Patrick Breugnon
- Benoît Chantepie (Dr 08)
- Arkadiusz Dawiec (doctorant 08)
- Bernard Dinkespiler
- Michel Jevaud
- Mohsine Menouni
- Patrick Pangaud
- Jérôme Royon

Mécanique :

- Jean-Philippe Logier
- Mathieu Niclas
- Françoise Rivière
- Eric Vigeolas



UNIVERSITÉ
DE LA MÉDITERRANÉE
AIX-MARSEILLE II

LAPP/IN2P3, Annecy-le-Vieux, 4 juin 2010