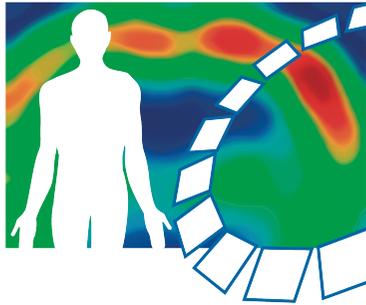
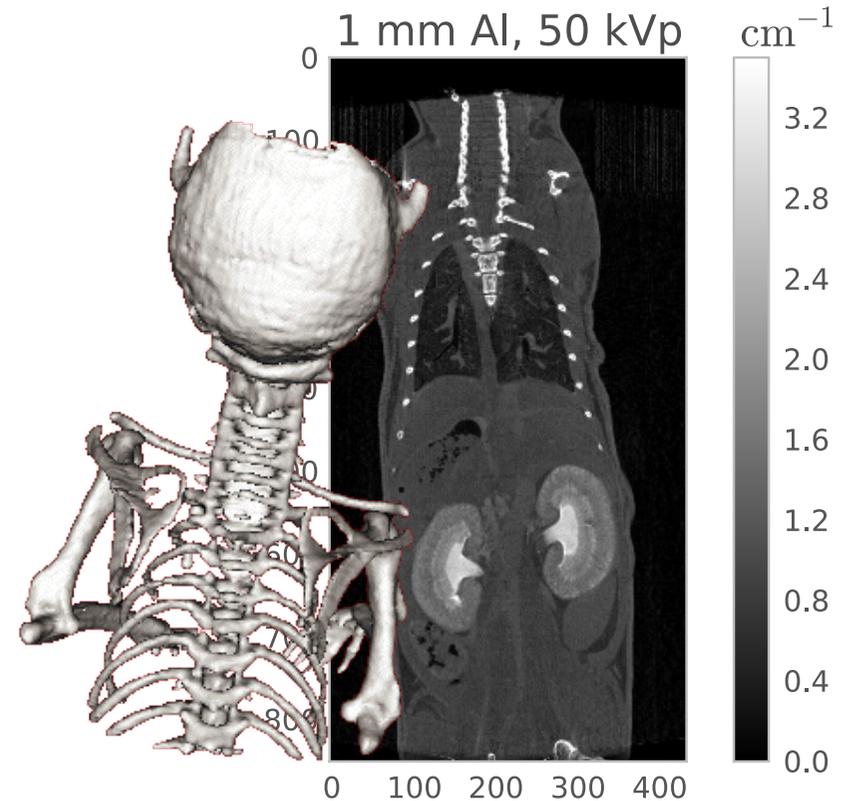
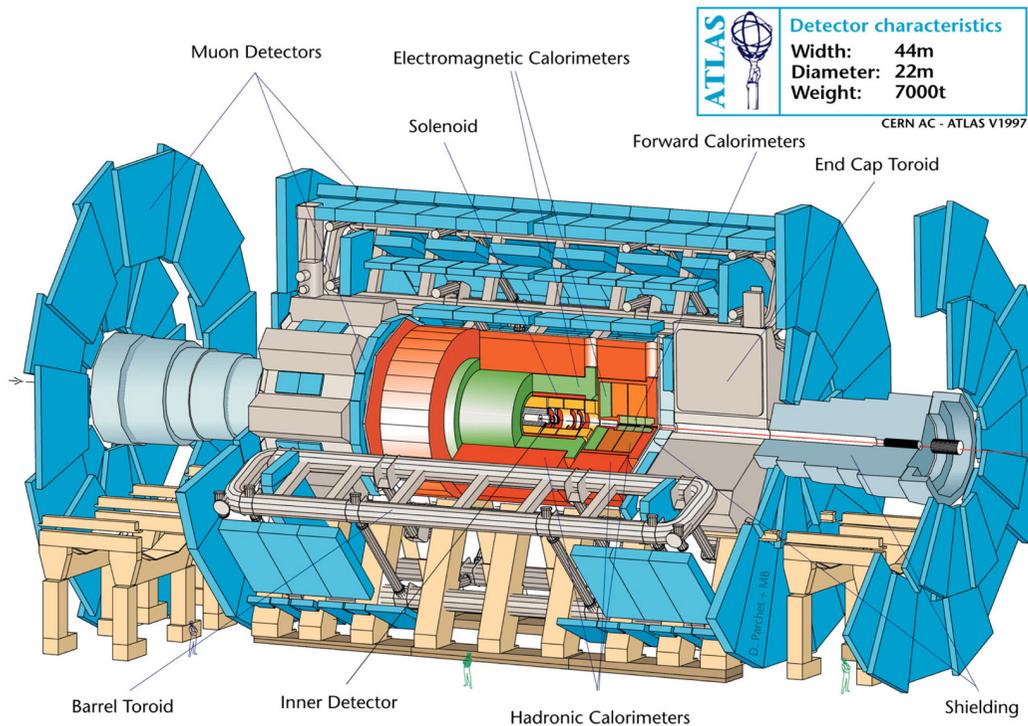


Mi2b



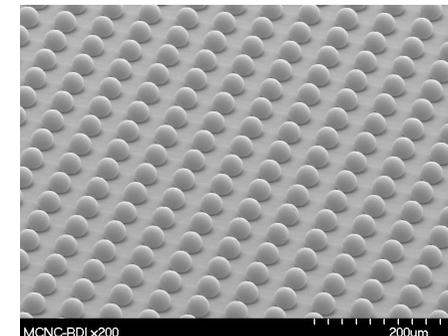
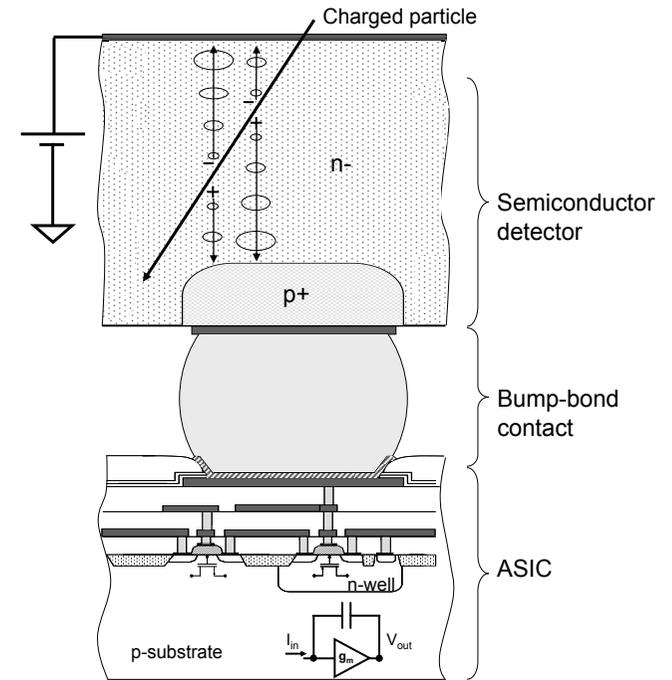
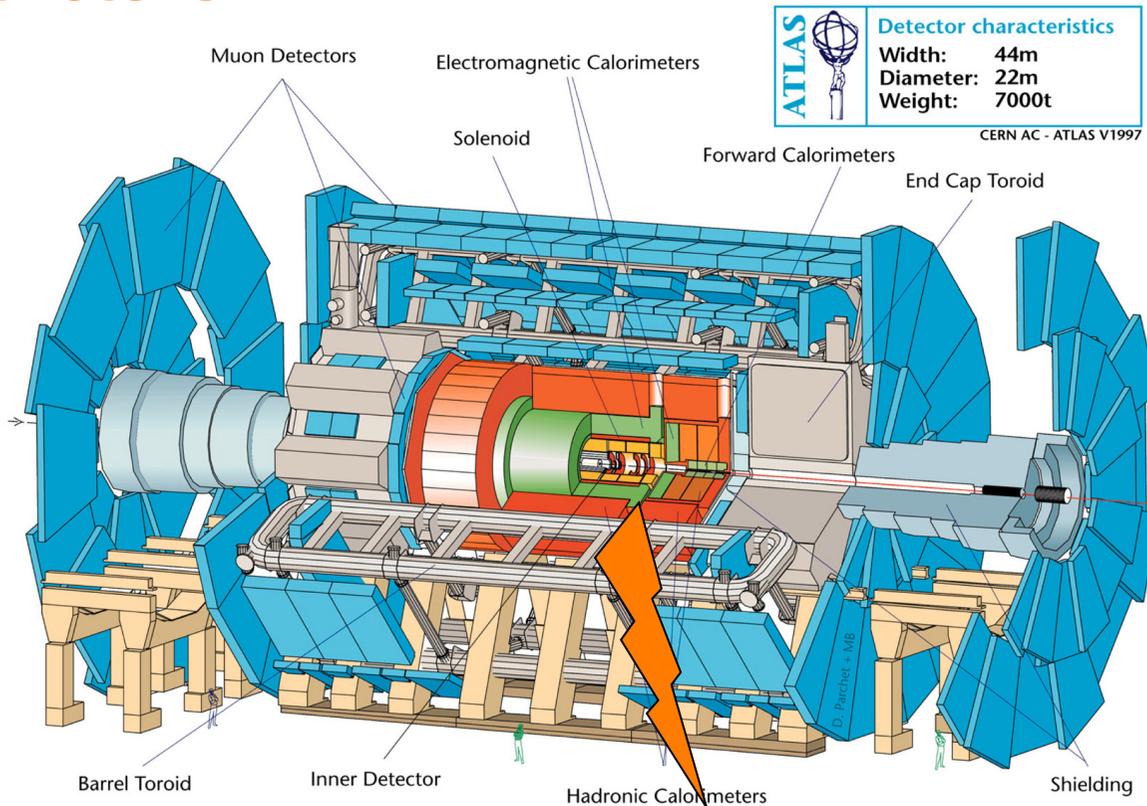
Développement du micro-scanner à comptage de photons PIXSCAN-FLI



Journées du GDR MI2B, 6-7 déc 2017, Caen



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



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

Réduction de la dose
Amélioration du contraste
Développement du CT spectral



Journées du GDR MI2B, 6-7 déc 2017, Caen

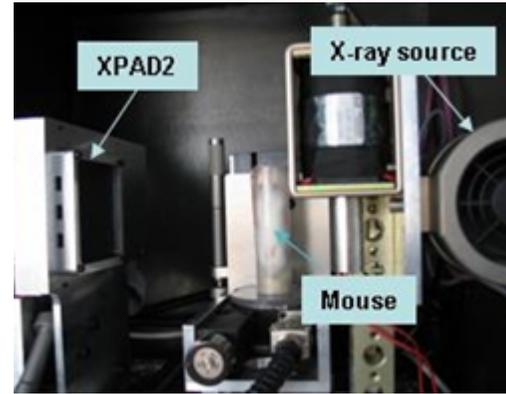


R&D sur les pixels hybrides au CPPM

Début du projet pixel hybrides



ATLAS: 50 x 400 μm^2 pixels



XPAD2: 330 x 330 μm^2 pixels

1991

1998

2001

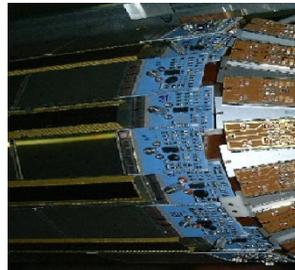


1966

1999

2006

DELPHI:
Première mondiale



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



XPAD3 : 130 x 130 μm^2 pixels

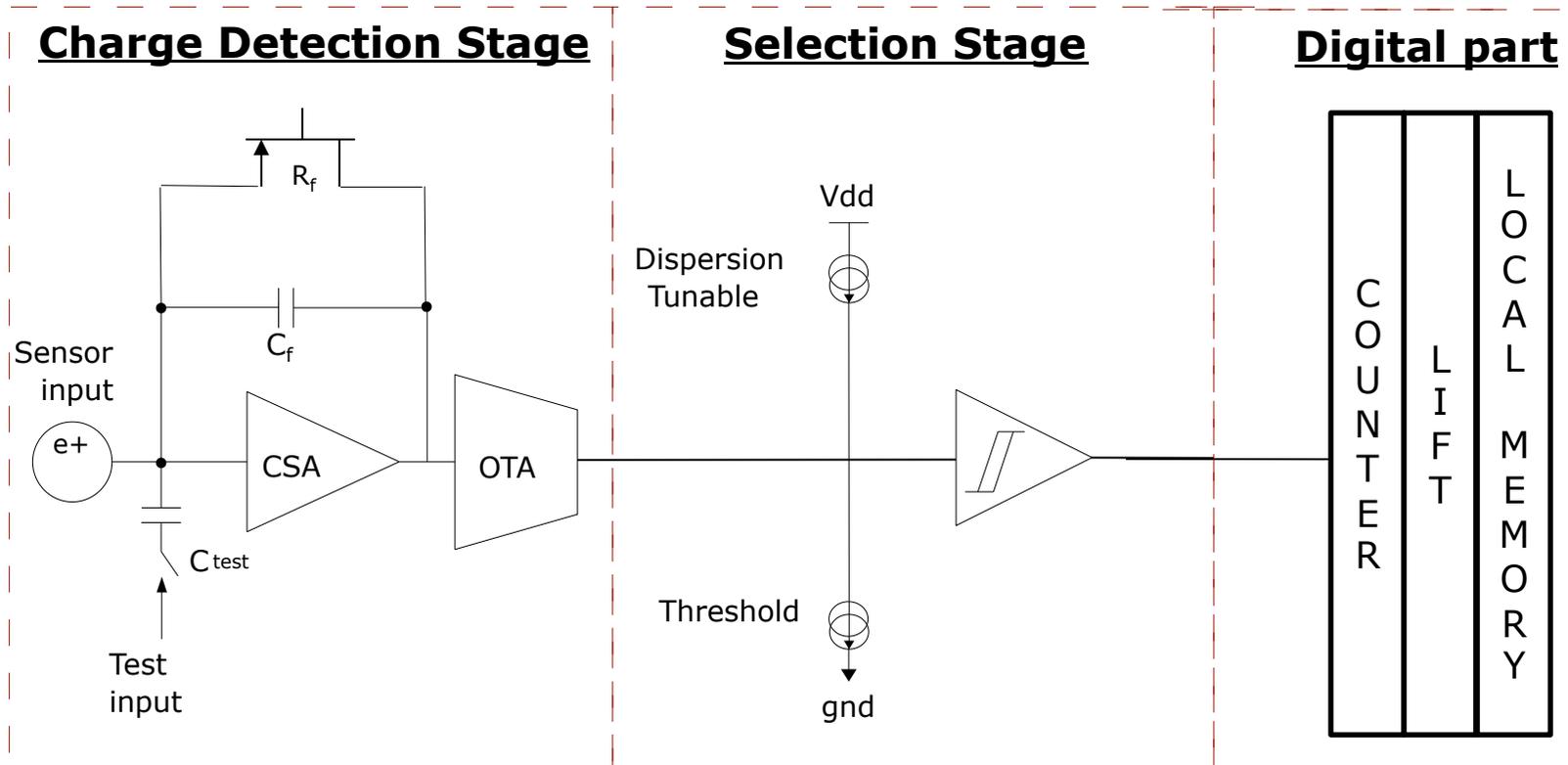
Delpierre, JINST 9 (2014) C05059



Journées du GDR MI2B, 6-7 déc 2017, Caen



XPAD3 pixel architecture



Gain : 89 nA/keV
 Noise : 127 e⁻ rms
 Linearity : < 10% @ 35 keV

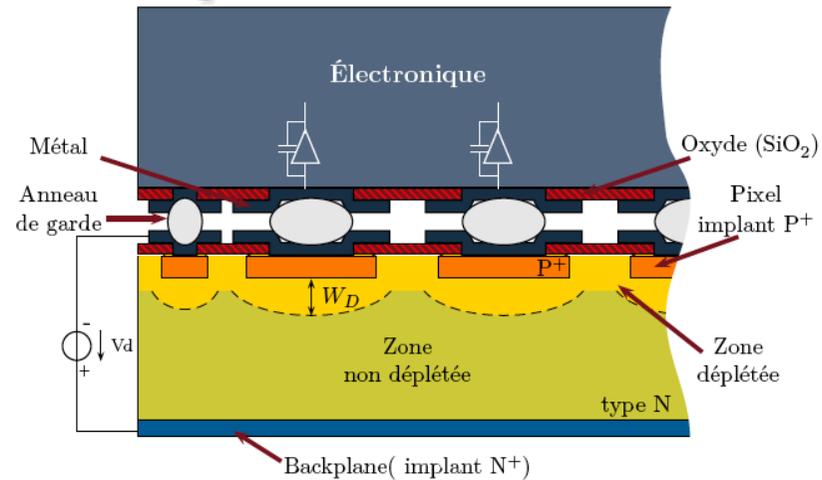
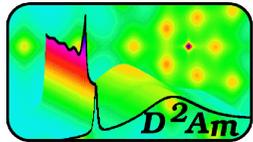
Power consumption : 40 μW/pixel
 Threshold adjustment resolution : 57 e⁻
 Minimum threshold: < 4 keV



Journées du GDR MI2B, 6-7 déc 2017, Caen



XPAD3: pixels hybrides de Si et CdTe pour la détection de rayons X



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

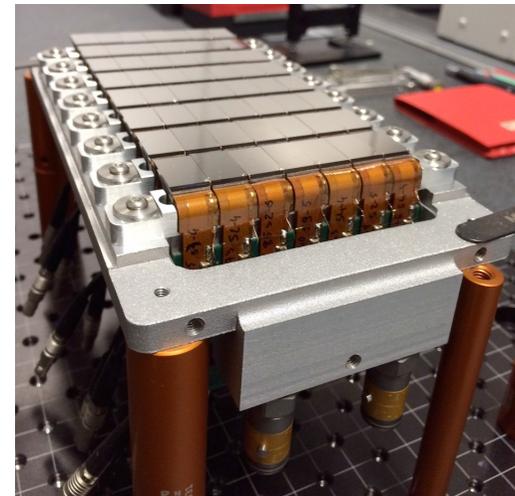
- > 0,5 Mpixels $130 \times 130 \mu\text{m}^2$
- 240 images/s

2011 • 5-35 keV (XPAD3.1/Si: D1-3)

2013 • 5-60 keV (XPAD3.2/Si: D4-6)

CHiPSpeCT (PhysiCancer 12)

2015 • XPAD3.2/CdTe (D7)

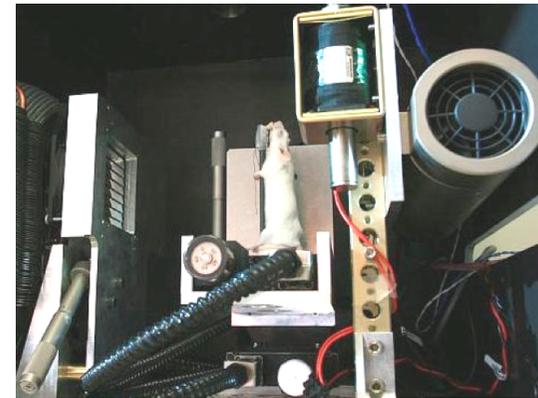
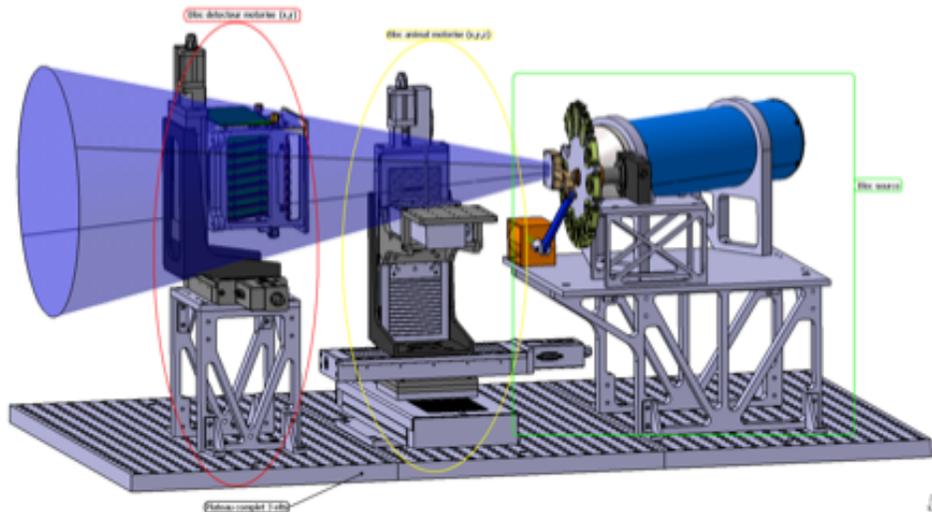


Journées du GDR MI2B, 6-7 déc 2017, Caen



• PIXSCAN: prototype de micro-CT

- Caractérisation de CT à comptage de photons
- Développement du CT spectral



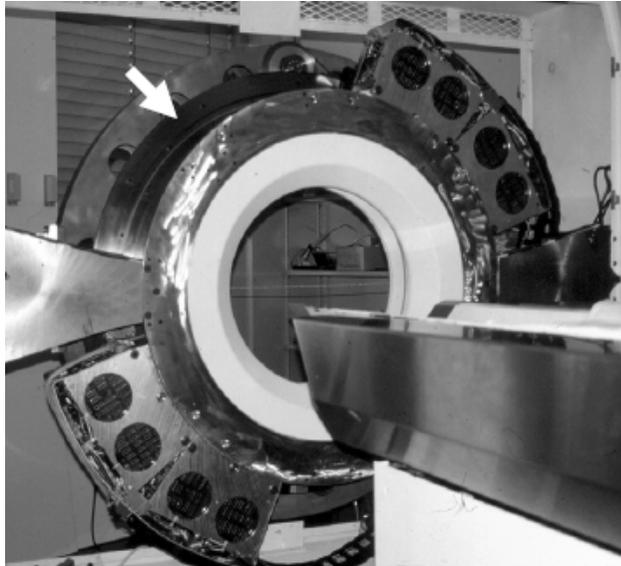
PIXSCAN I
XPAD2



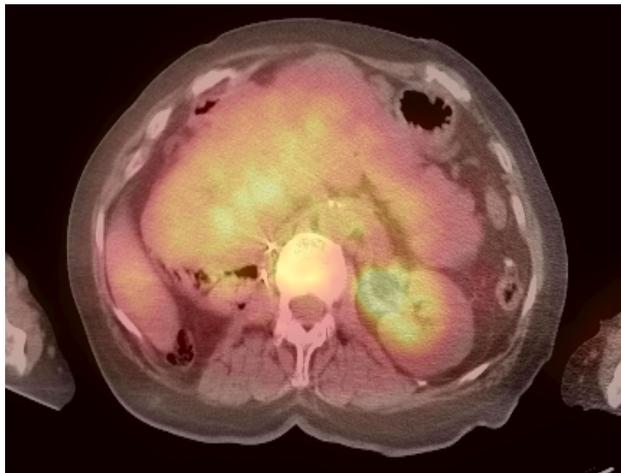
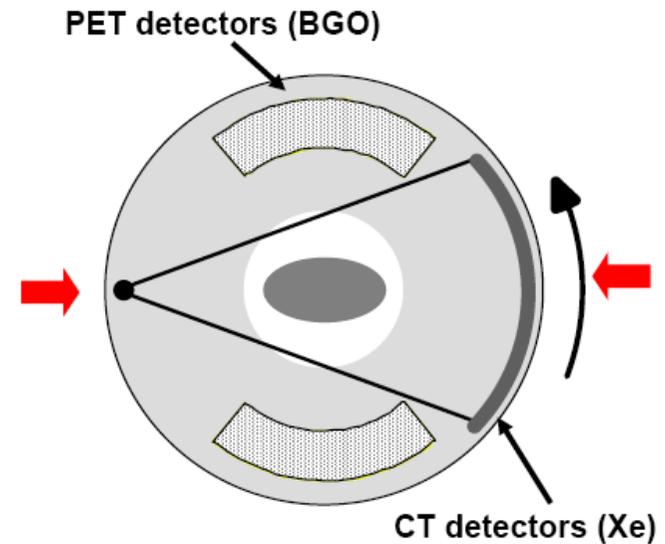
PIXSCAN II
XPAD3

Invention du TEP/CT : une révolution médicale doublée d'une évolution technique

1991: Concept du TEP/CT, DW Townsend (HUG)



PRT-1



TIME magazine
décembre 2000



courtesy: DW Townsend, UPMC



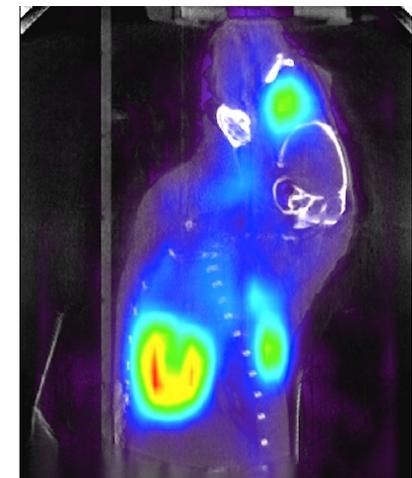
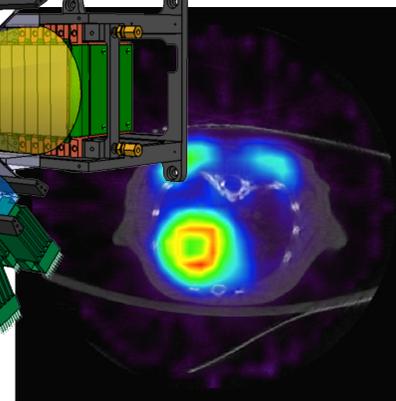
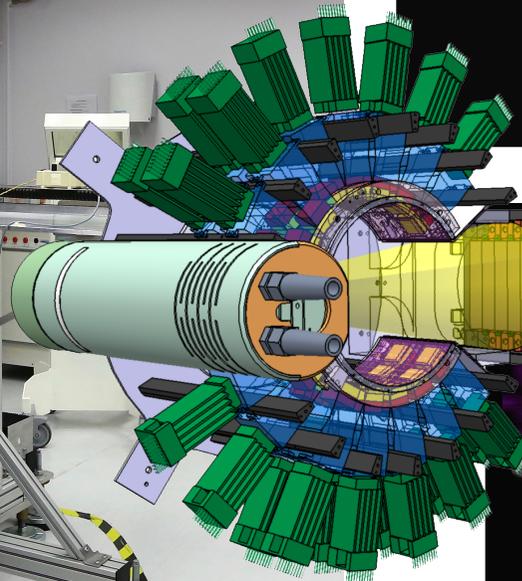
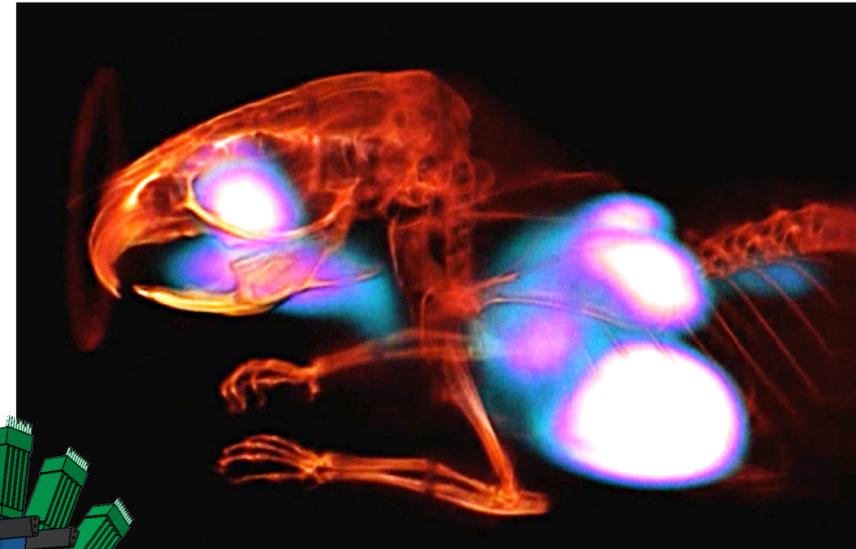
Journées du GDR MI2B, 6-7 déc 2017, Caen



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



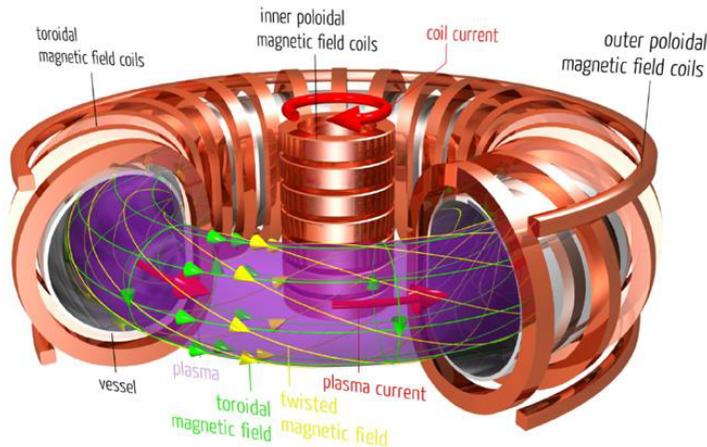
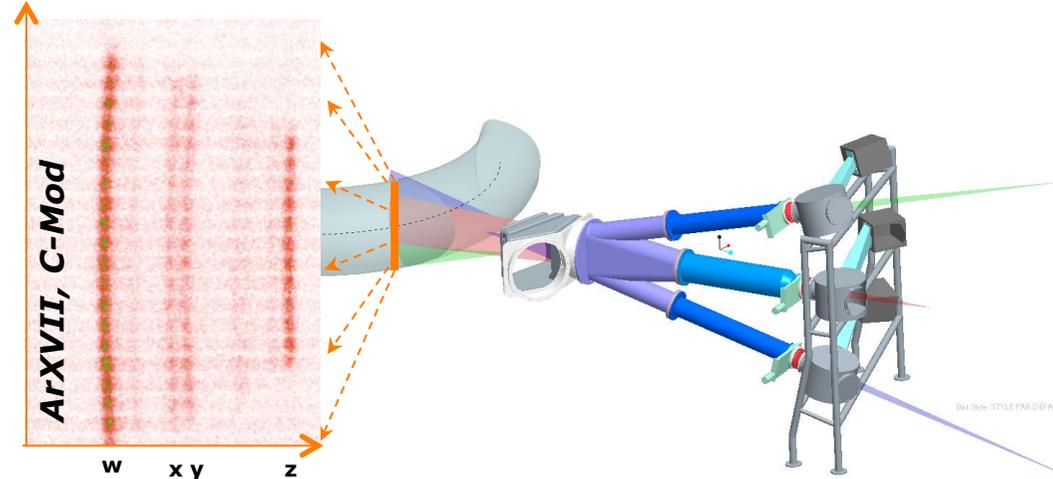
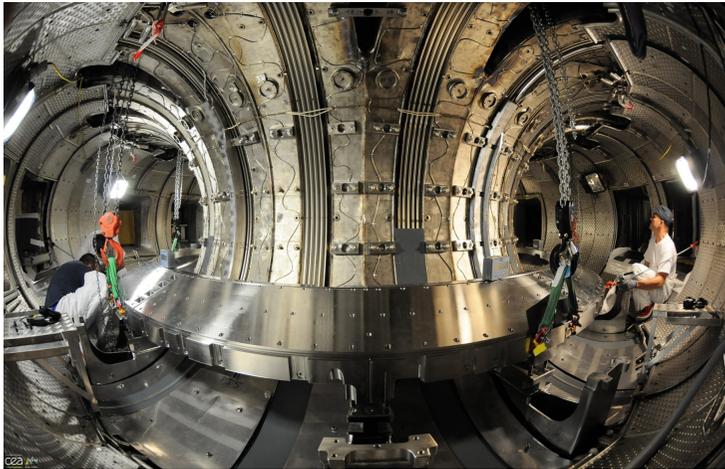
M Hamonet et al., Proc. IEEE NSS/MIC 2016



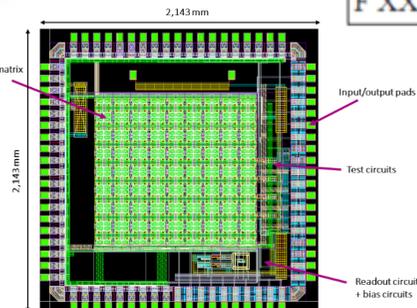
Journées du GDR MI2B, 6-7 déc 2017, Caen



Pixels hybrides pour le diagnostic du plasma d'un tokamak



Element	Energy [keV]	Crystal	Bragg angle [°]	Rowland radius [m]	Meridional focus [m]	Sagittal focus [m]
Ar XVII	3.1218	Qu (11-20)	54.0183	1.3516	2.1875	7.0650
Ar XVIII	3.3206	Qu (10-12)	55.0106	1.3511	2.2138	6.4661
F XXV	6.6685	Ge (422)	53.6045	1.3526	2.1775	7.3599



Développement d'un circuit double seuil (2-8 keV) pour la mesure de la vitesse toroïdale et de la température ionique dans un plasma de fusion d'un tokamak



Journées du GDR MI2B, 6-7 déc 2017, Caen





Name	Matrix	side (μm)	Energy thresholds	Peaking time (ns)	Maximum count rates (Mcps/pixel)	Maximum count rates (Mcps/mm ²)	Electronics Noise or energy resolution	Power per channel (μW)	CMOS node
Medipix3 (FPM-SPM) ¹	256x256	55	2	120	2.5	826.5	1.37keV FWHM @ 10keV	7.5	0.13 μm
Medipix3 (FPM-CSM) ²	256x256	55	1+1	120	5.0E-01	163.5	2.03keV FWHM @10keV	9.3	0.13 μm
Timepix3 (CERN) ³	256x256	55	10bits	30	1.6E-03	0.53	4.07keV FWHM at 59.5keV	15.2	0.13 μm
Pixirad Pixie II ⁴	512x476	55.6	2	300	5.0E-01	161.5	1.45keV FWHM @ 20keV	12.5	0.18 μm
Samsung PC ⁵	128x128	60	3	NS	NS	NS	68 e- r.m.s.	4.6	0.13 μm
Pixirad Pixie III ⁶	512x402	62	2	125	1.0	260.1	6.6% FWHM @ 60keV	34	0.16 μm
Eiger ⁷	256x256	75	1	30	4.2	711.1	121e- r.m.s. (low noise settings)	8.8	0.25 μm
PXD23K (AGH) ⁸	128x184	75	2	48	8.5	1519.5	89e- r.m.s.	25	0.13 μm
X-Counter PC (PDT25-DE) ⁹	256x256	100	2	NS	1.2	120	8.3keV FWHM @20keV 10keV FWHM @60keV	NS	NS
PXD18K (AGH) ⁸	96x192	100	2	30	5.8	580	168e- r.m.s.	23	0.18 μm
FPDR90 (AGH) ⁸	40x32	100	2	28	8.5	854.7	106e- r.m.s.	42	90nm
AGH_Fermilab ¹⁰	18x24	100	2	48	NS	NS	84e- (Single pixel), 168e- (Charge summing)	34	40nm
Medipix3 (SM-SPM) ¹¹	128x128	110	8	120	4.5	375.7	1.43keV FWHM @ 10keV	30	0.13 μm
Medipix3 (SM-CSM) ¹²	128x128	110	4+4	120	3.4E-01	28.1	2.2keV FWHM @10keV	37.2	0.13 μm
XPAD3 ¹³	80x120	130	2	150	2.0	118.3	127e- r.m.s.	40	0.25 μm
Pilatus 2 ¹⁴	60x97	172	1	110	6.0	202.8	1keV FWHM @ 8keV	20.2	0.25 μm
Pilatus 3 ¹⁵	60x97	172	1	110	15.0	507.0	1keV FWHM @ 8keV	20.2	0.25 μm
Telesystems ¹⁶	40x40	200	4	300-500	8.0E-01	20	5.36keV FWHM @ 122keV	94.4	0.25 μm
Dosepix (CERN) ¹⁷	16x16	220	16	287	1.6	33.9	150 e- r.m.s.	14.6	0.13 μm
Siemens PC ¹⁸	64x64	225	2	20	40.0	790.1	NS	NS	NS
Hexitec ¹⁹	80x80	250	14bits	2000	1.0E-03	0.016	800eV FWHM @ 60keV, 1.1keV @ 141keV	220	0.35 μm
Philips Chromaix ²⁰	4x16	300	4	20	38.0	422.2	4.7keV @60keV (1 channel)	3000	0.18 μm
Ajat-0.35 (PC) ²¹	32x64	350	1	1000	2.2	18.0	4keV FWHM @122keV	390.6	0.35 μm
Ajat-0.35 (ADC) ²²	32x64	350	64	1000	4.9E-05	4.0E-04	4keV FWHM @122keV	390.6	0.35 μm
CIX 0.2 (Bonn) ²³	8x8	353.6	1	NS	12.0	96	330e- r.m.s. (counting channel)	3200	0.35 μm
KTH_Lin_SPD ²⁴	160 ch.	447.2	8	10-20-40	272.0	1360	1.09keV @ 15keV (measured at 40kcps)	80000	0.18 μm
DxRay-Interon ²⁵	16x16	500	4	10	13.3	53	7keV FWHM @60keV, Min TH20keV	NS	NS
Ajat-0.5 ²⁶	44x22	500	2	1000-2000	NS	NS	4.7keV @122keV (1 channel)	413.2	0.35 μm
Hamamatsu ²⁷	64 ch.	632.5	5	NS	5.5	13.75	12keV FWHM @ 120keV	NS	NS
IDEAS ²⁸	64 ch.	894.4	6	50	4.0	5	7keV FWHM @60keV	4200	0.35 μm
GE-DxRay ²⁹	128 ch.	1000	2	30	11.6	11.6	4.75% at 122keV, CZT, 5pF Cin (1 Channel noise= 4.8keV FWHM)	2100	0.25 μm
BNL ³⁰	64 ch.	1241.0	5	40-80-160-320	4.0	5.5	5.5keV at 40ns peaking time/2.15keV at 320ns peaking time	4700	0.25 μm

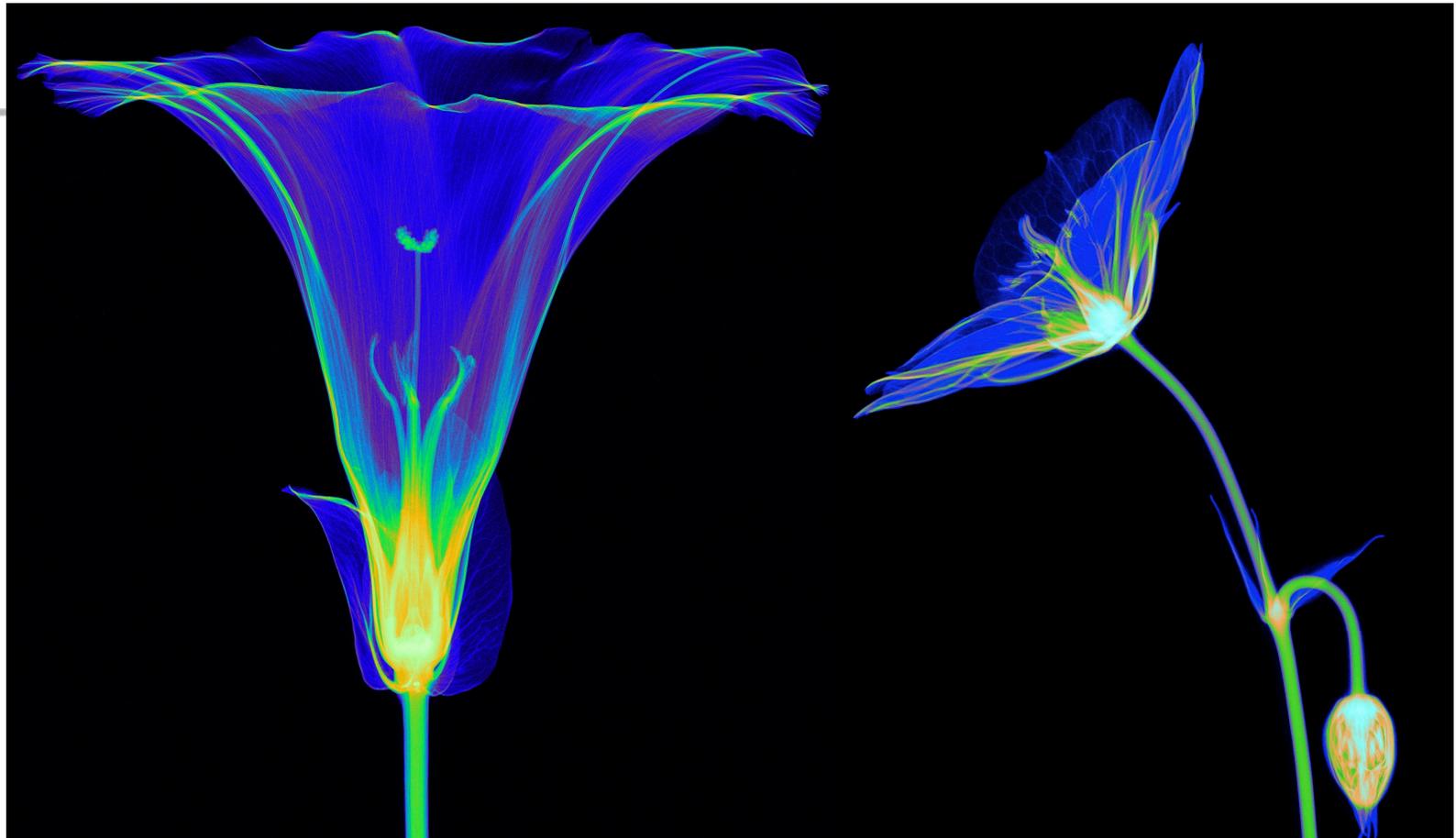
Courtesy: R. Ballabriga, Medipix Collaboration, CERN



Medipix3/Si images RX



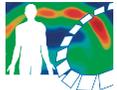
UNI
FREIBURG



Courtesy: S. Procz, Medipix Collaboration, CERN

- Medipix3/Si 55 μ m SPM HGM 24-Bit, 8 x 8 tuiles
- 20 kV/100 μ A, Mag. 2x
- Largeur \sim 45 mm

Mi2b



Journées du GDR MI2B, 6-7 déc 2017, Caen

Aix*Marseille
université



Hybrid pixels: many spin-offs

2003



www.dxray.com

2006



www.dectris.com

2010



www.imxpad.com

2011



pixirad.pi.infn.it

2006



Pixelated X-Ray Detectors
www.xray-imatek.com

2011



www.amscins.com

2012

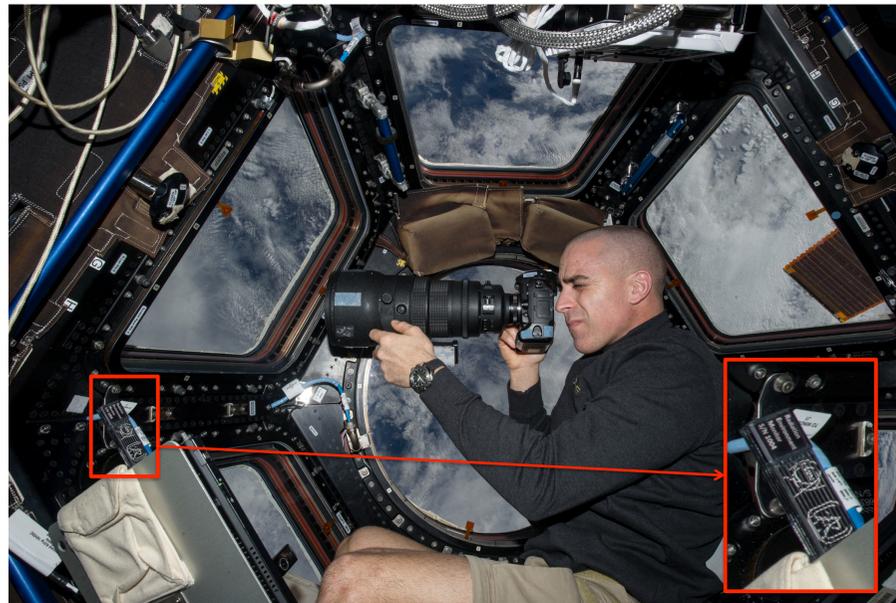


www.advacam.com

2011



www.xi-europe.com



Courtesy: NASA, photo ref. no. iss036e006175

2003



www.kromek.com

2007



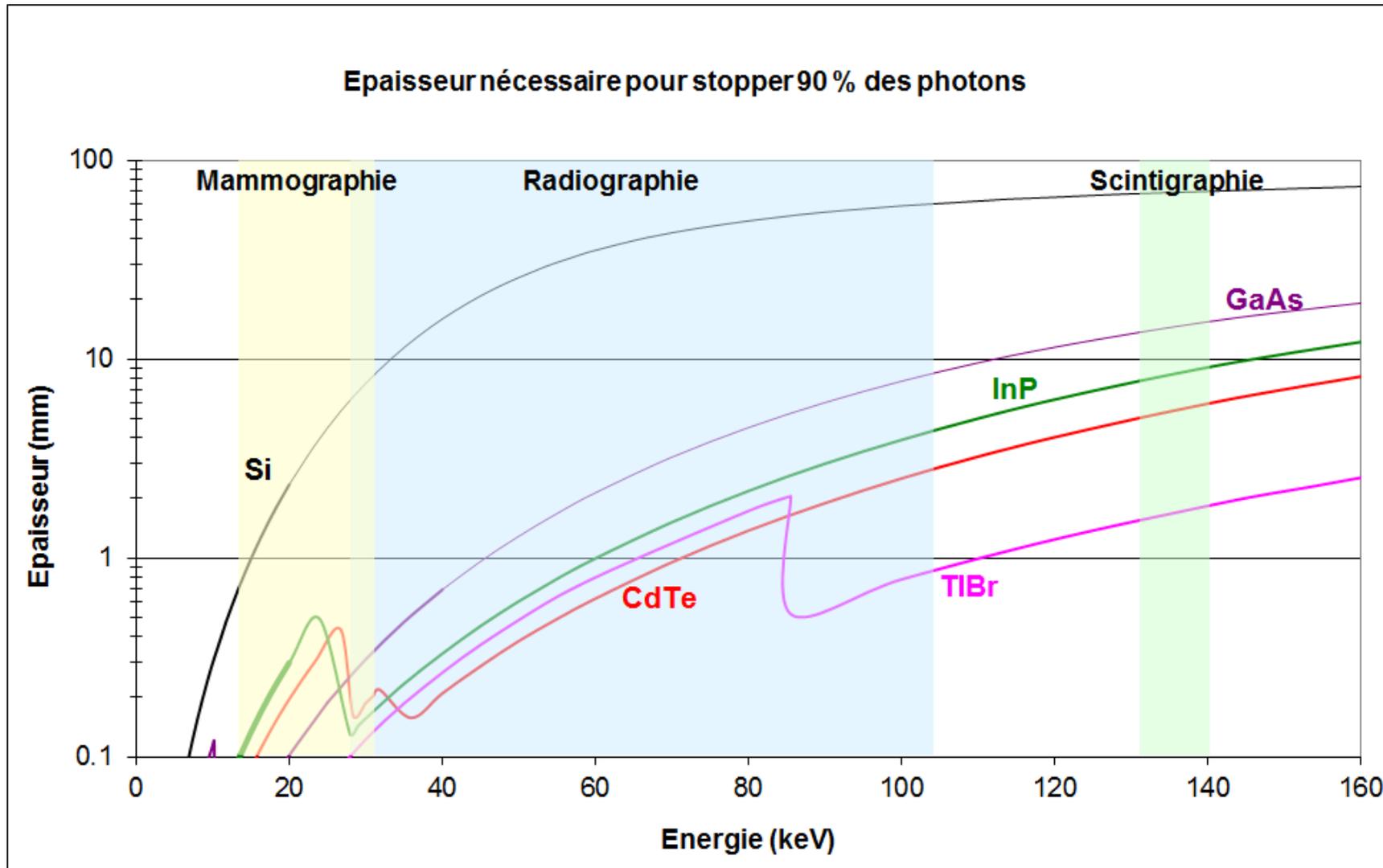
www.marsbioimaging.com



Journées du GDR MI2B, 6-7 déc 2017, Caen



Capteurs pour la détection directe de rayons X



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



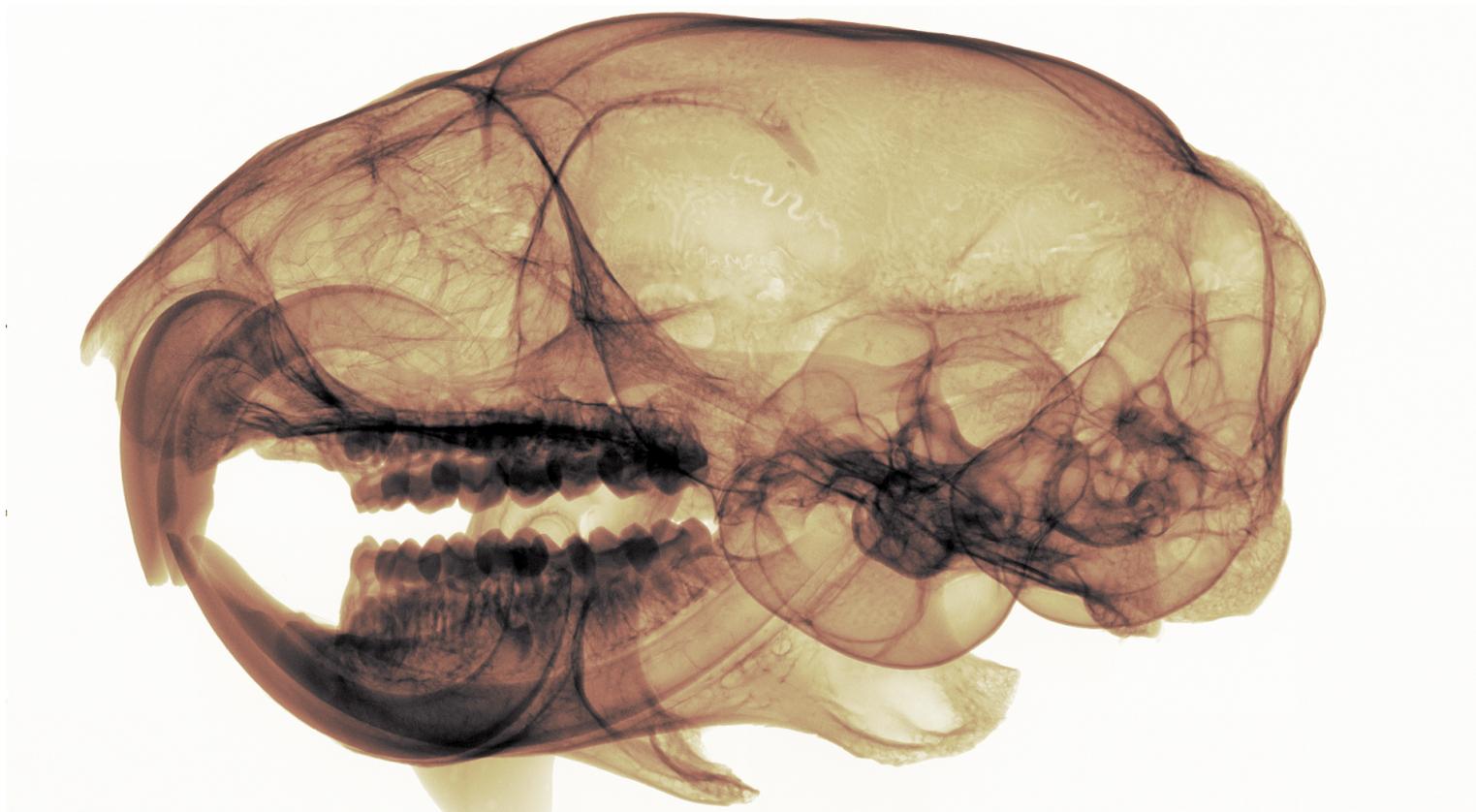
Journées du GDR MI2B, 6-7 déc 2017, Caen



Medipix3 Image (GaAs 55 $\mu\text{m}/500 \mu\text{m}$)



Image tuilée du crâne d'une souris



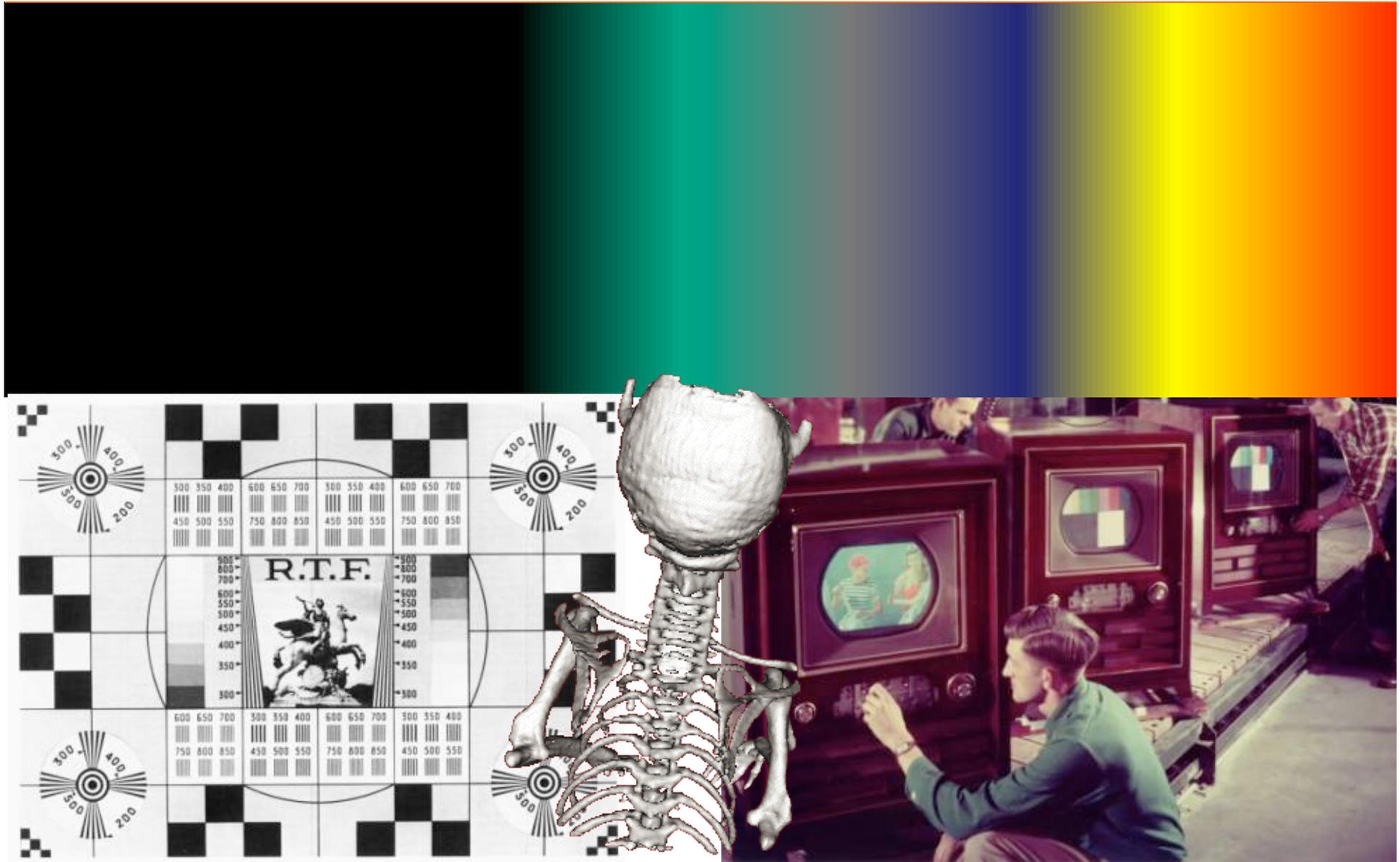
Courtesy: S. Procz, Medipix Collaboration, CERN



Journées du GDR MI2B, 6-7 déc 2017, Caen



CT spectral: du noir & blanc à la couleur

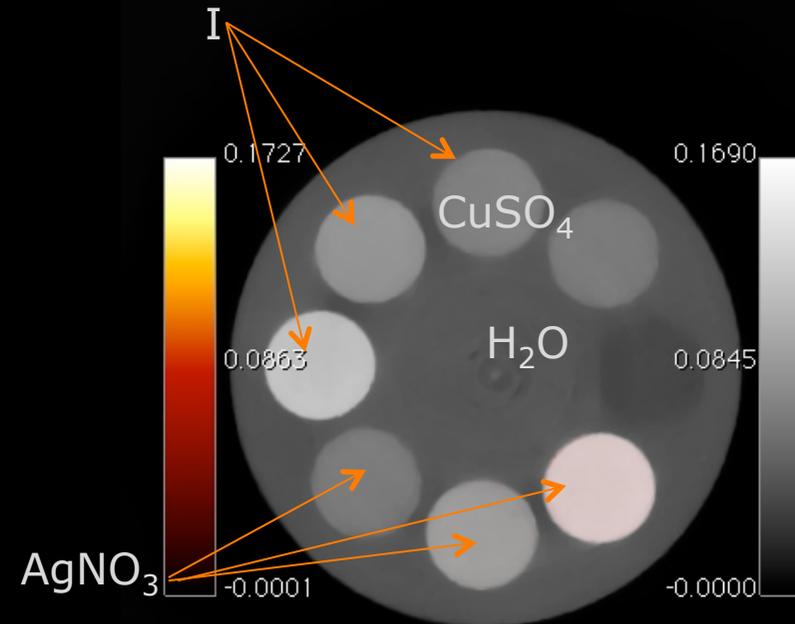
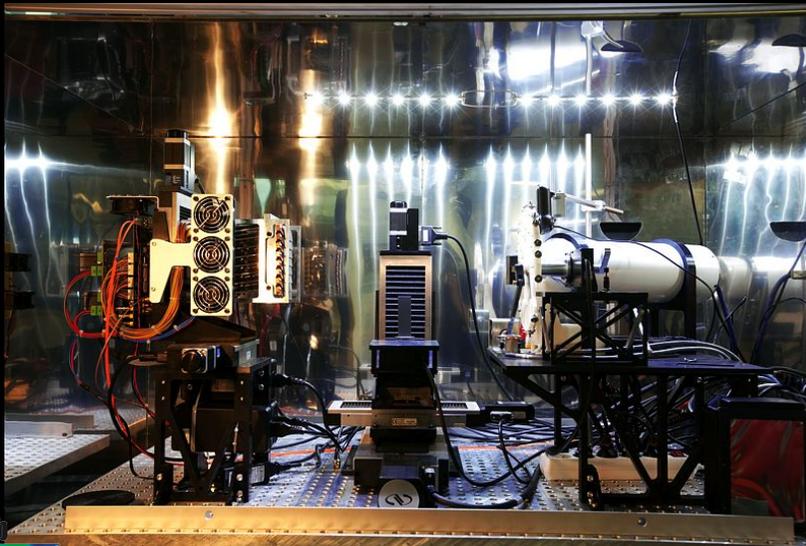
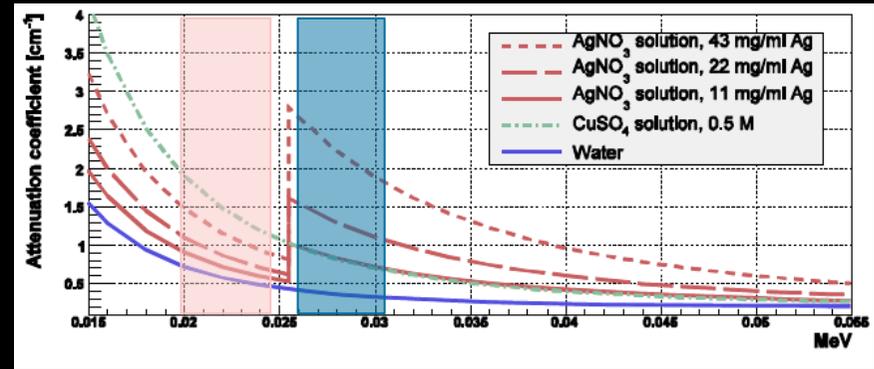


Journées du GDR MI2B, 6-7 déc 2017, Caen

Aix*Marseille
université



CT spectral : du noir & blanc à la couleur



Journées du GDR MI2B, 6-7 déc 2017, Caen

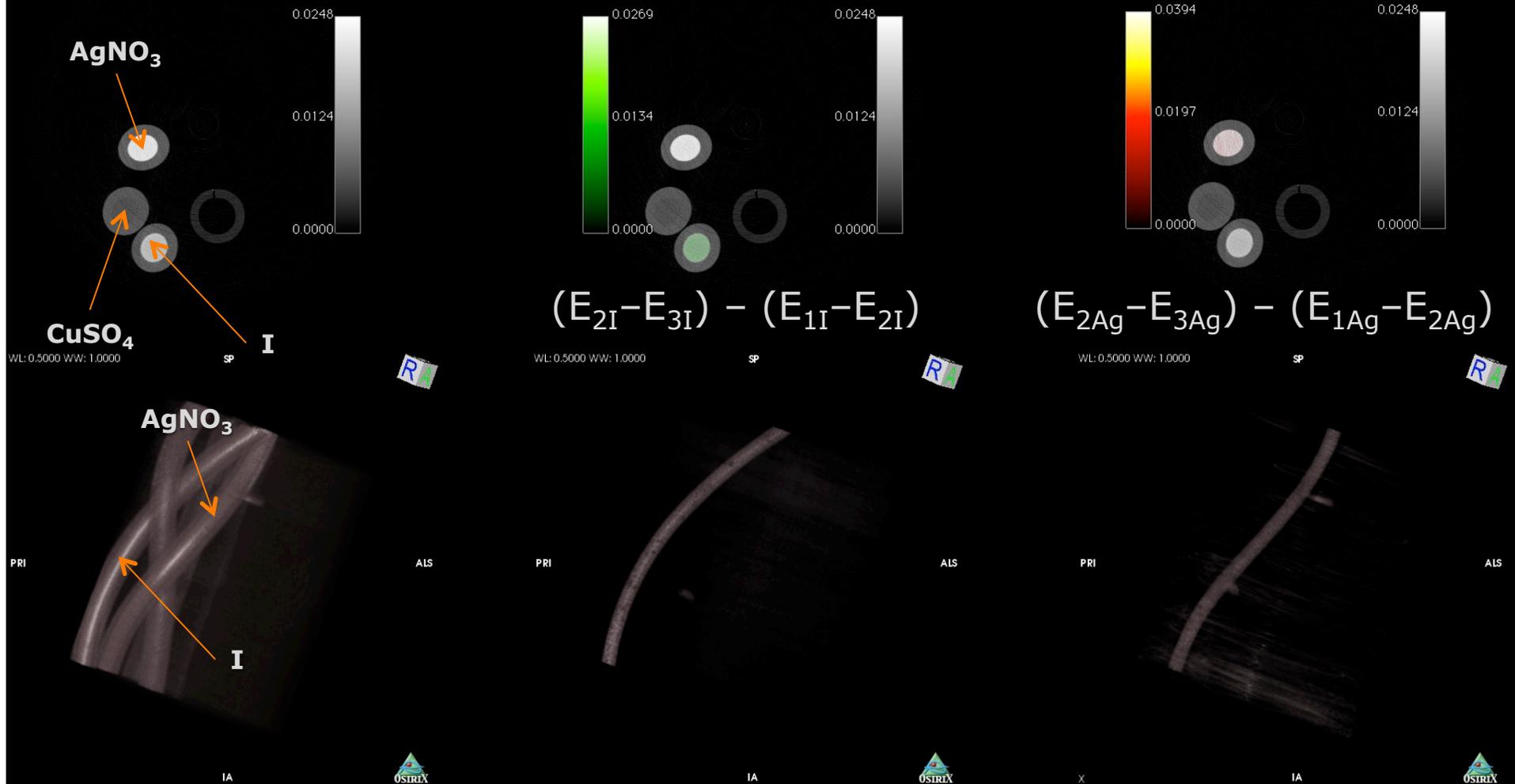
Aix*Marseille
université



CT spectral avec le détecteur XPAD3

CT standard

Imagerie au K-edge de l'iode et de l'argent



Cassol et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. **60** (2013) 103



Journées du GDR MI2B, 6-7 déc 2017, Caen



CT spectral: une nouvelle modalité intrinsèquement anatomo-fonctionnelle

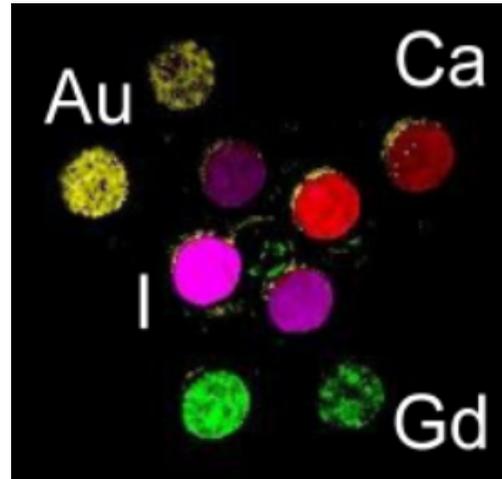
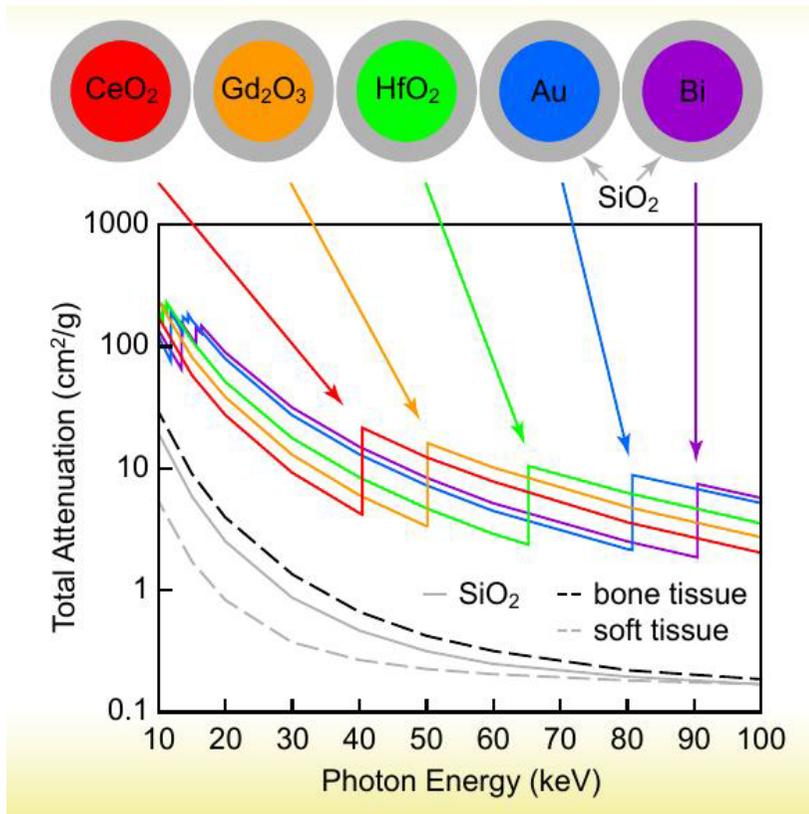
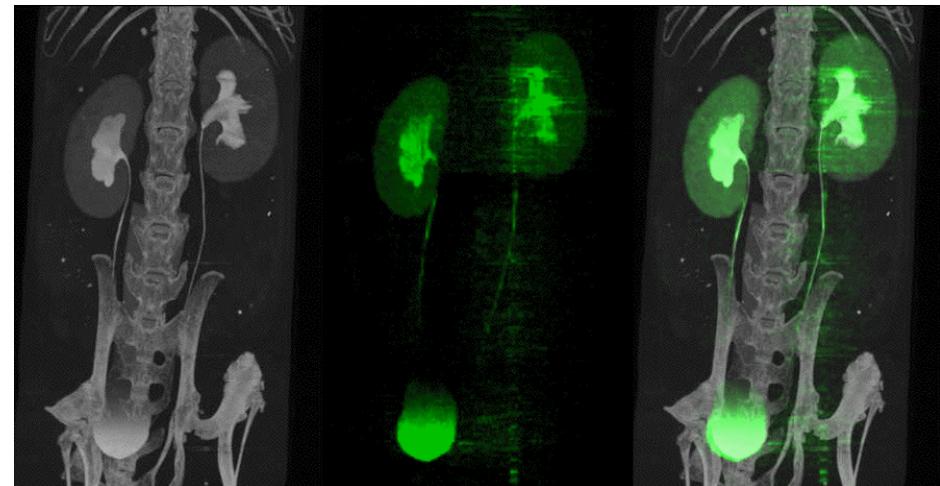


Image de MARS utilisant une gamme d'énergie clinique (CdTe-MedipixRX)

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

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

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



Journées du GDR MI2B, 6-7 déc 2017, Caen



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:

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

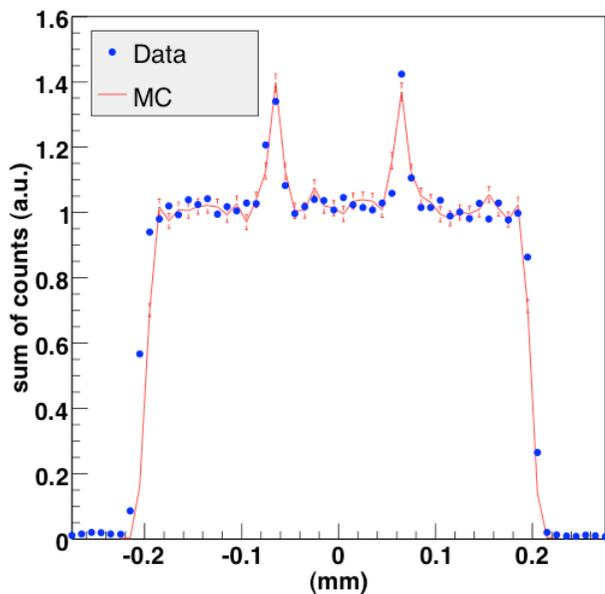
$$n(E_{th}, E_0) = (1-k)n_p(E_{th}, E_0) + kn_{cs}(E_{th}, E_0)$$

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

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

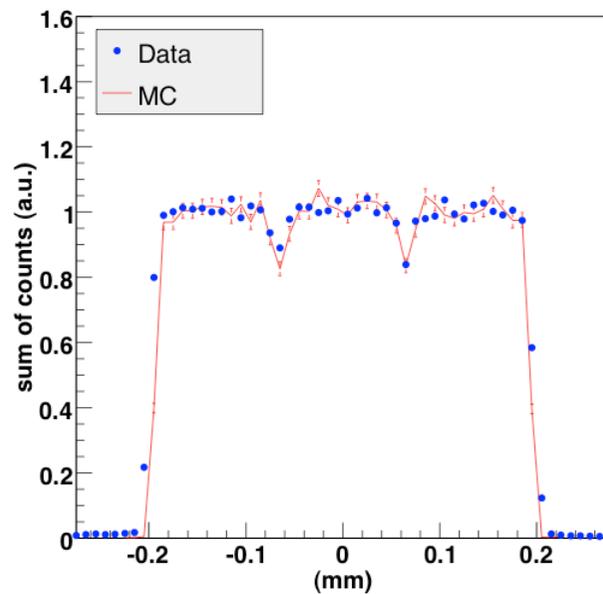
$$\text{eff}_{cs} = k (E_0/2 - E_{th})/E_0$$

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



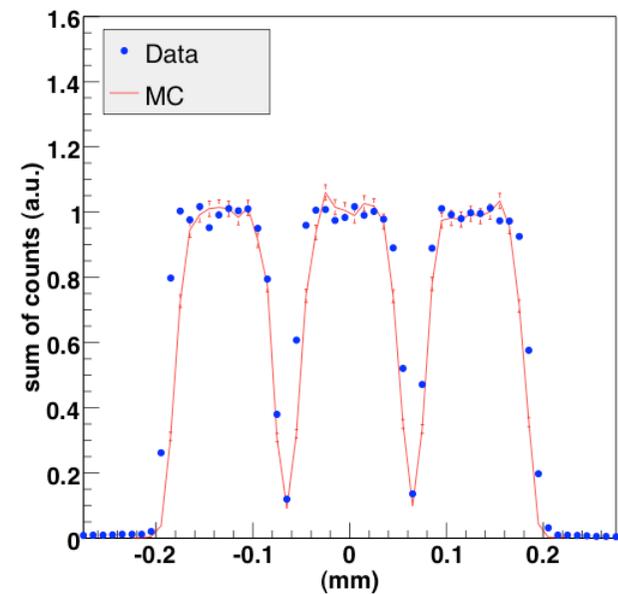
10 keV threshold

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

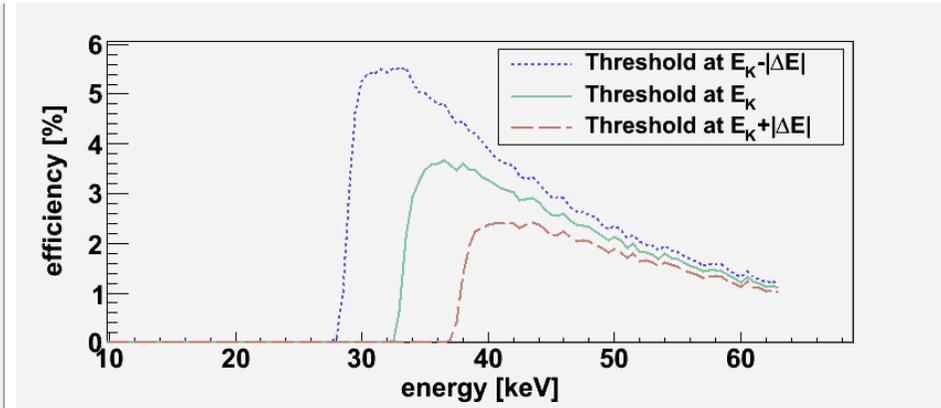
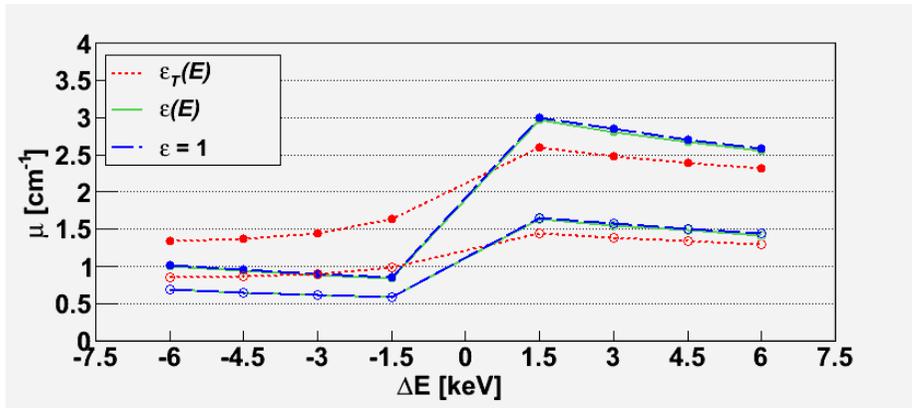


Journées du GDR MI2B, 6-7 déc 2017, Caen



Effet du partage de charges sur le contraste spectral

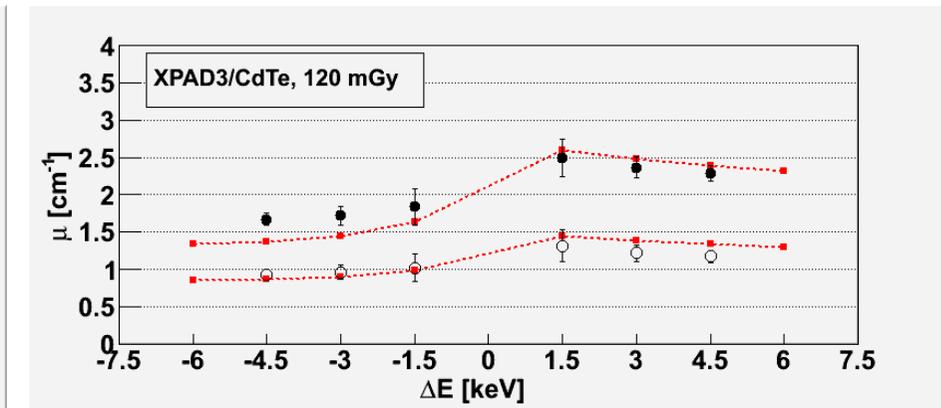
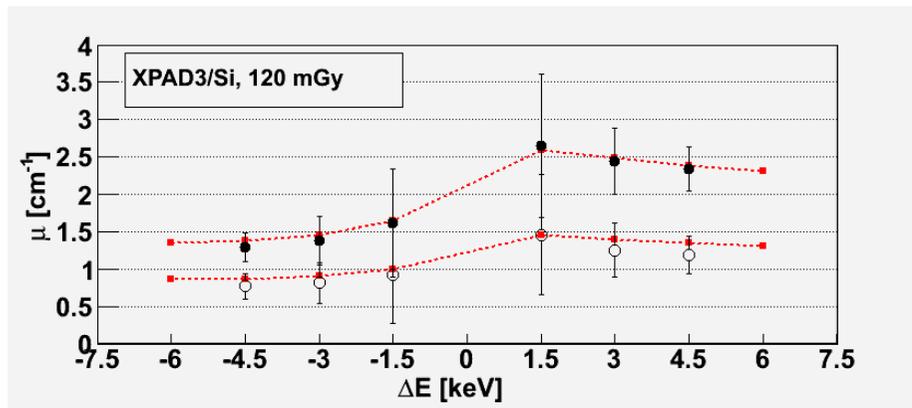
Simulation de capteurs de Si (marqueurs pleins: 0,630 M, marqueurs vides: 0,315 M)



Si

Données mesurées

CdTe



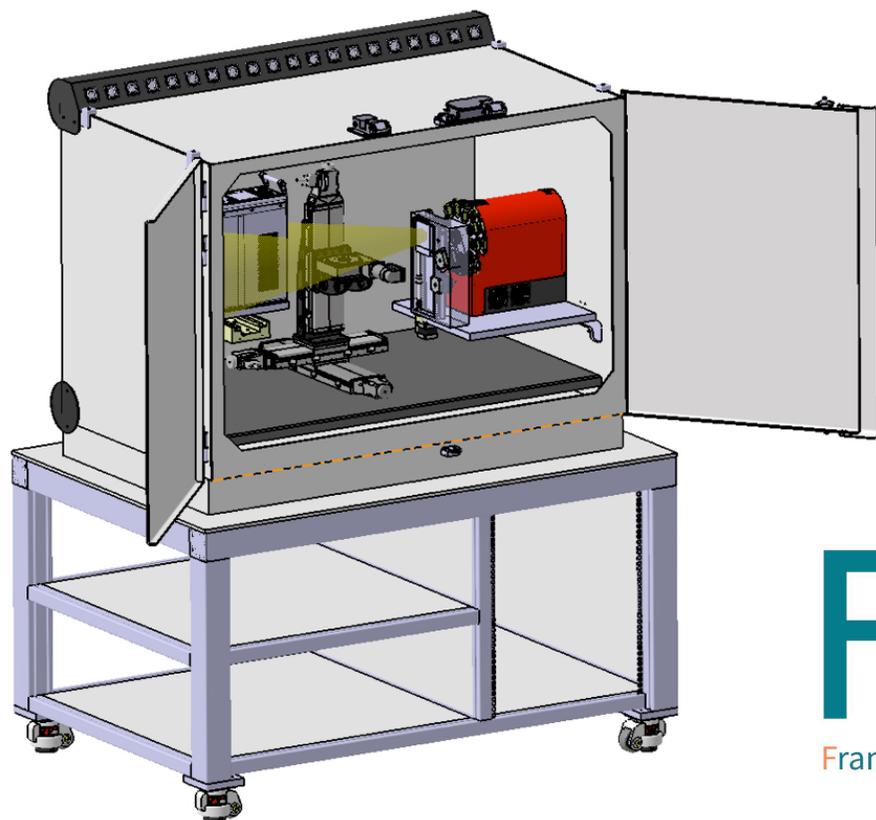
Cassol et al., Phys. Med. Biol. **60** (2015) 5497



Journées du GDR MI2B, 6-7 déc 2017, Caen



Construction du prototype PIXSCAN-FLI



Dimensions (L x l x h)

Poids (kg)

Surface

Charge au sol

Consommation

Alimentation

Hamamatsu L8122-01 X-ray tube

1,5 x 1,1 x 1,8 m

< 1 ton

1,65 m²

< 400 kg/m²

< 4,5 kW

230 V AC

40-150 kV, 75 W



Journées du GDR MI2B, 6-7 déc 2017, Caen



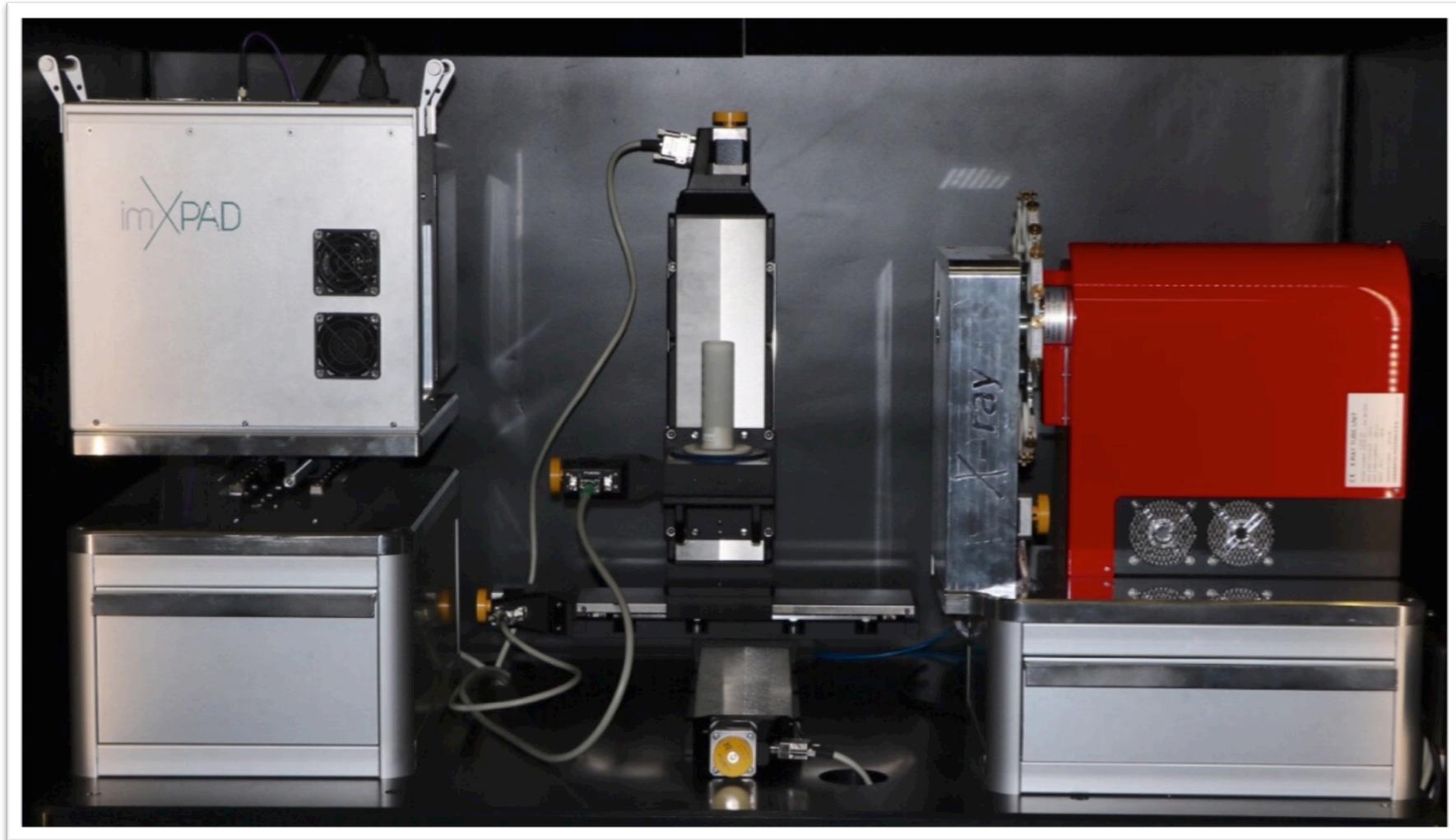
Construction du prototype PIXSCAN-FLI



Journées du GDR MI2B, 6-7 déc 2017, Caen



Construction of the new spectral CT prototype PIXSCAN-FLI



Journées du GDR MI2B, 6-7 déc 2017, Caen



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

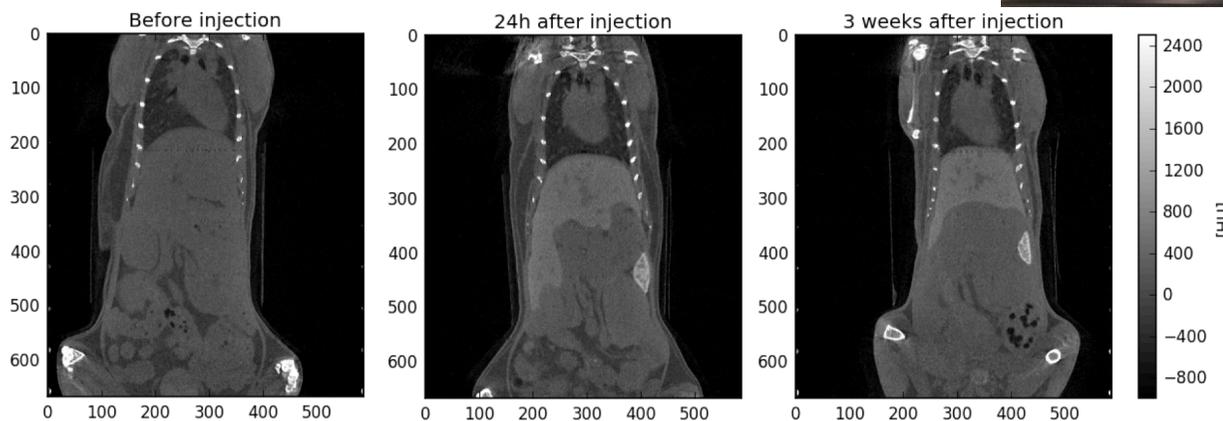
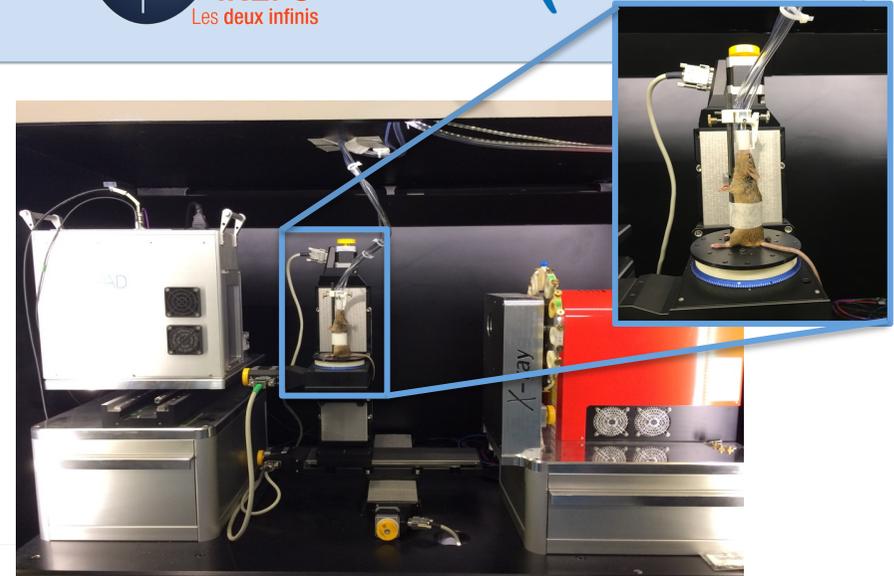
¹ Aix-Marseille Univ, CNRS/IN2P3, CPPM, Marseille, France

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



Choix d'un agent de contraste hépato-spécifique à base de nanoparticules de baryum permettant d'augmenter le contraste du foie par 2 par rapport aux autres tissus mous pendant plusieurs semaines

→ Idéal pour l'étude longitudinale !

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



Journées du GDR MI2B, 6-7 déc 2017, Caen



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



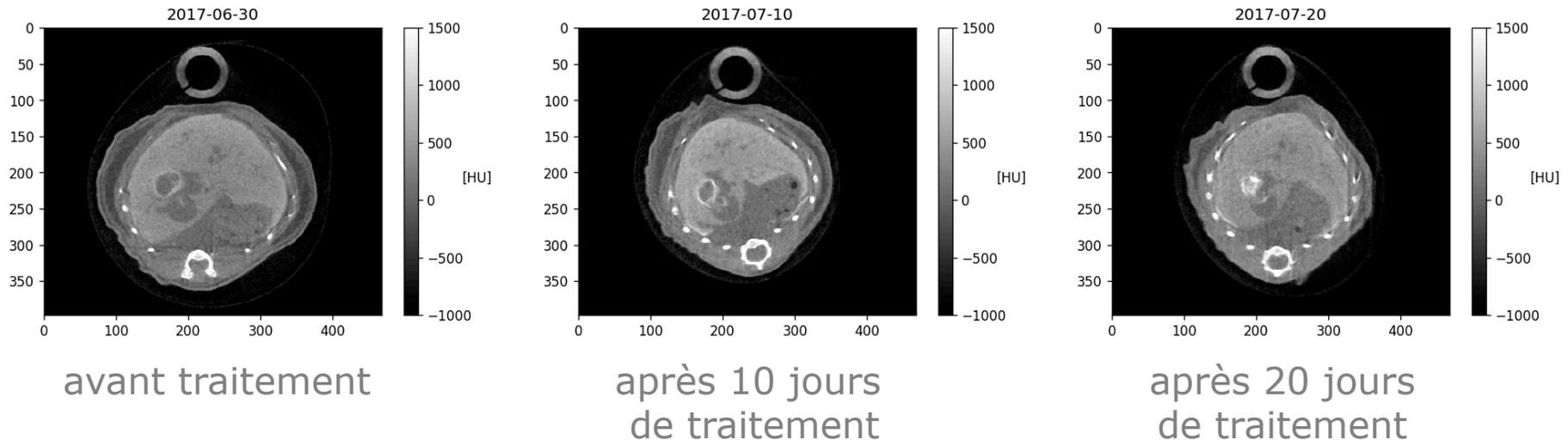
L Portal¹, F Cassol¹, M Dupont¹, Y Boursier¹, S Richelme², F Maina², C Morel¹

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

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



Suivi du développement tumoral :



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

Perspectives :

- Test d'une bi-thérapie sur le développement tumoral hépatique
- Évaluation de l'apport de l'imagerie spectrale au K-edge du baryum (37.4 keV) en comparaison de l'imagerie standard d'absorption



Journées du GDR MI2B, 6-7 déc 2017, Caen





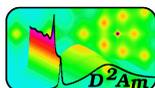
Patrick Pangaud, Stéphanie Godiot, Mohsine Menouni, Franca Cassol, Mathieu Dupont, Loriane Portal, **Margaux Hamonet**, Amr Habib, **Carine Kronland-Martinet**, **Hamid Ouamara**, **Didier Benoit**, **Stanislas Nicol**, Yannick Boursier, Jean-Claude Clémens, **Thomas Fabiani**, **Alain Bonissent**, Eric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

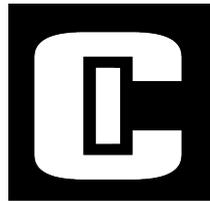


Journées du GDR MI2B, 6-7 déc 2017, Caen





Patrick Pangaud, Stéphanie Godiot, Mohsine Menouni, Franca Cassol,
 Mathieu Dupont, Loriane Portal, **Margaux Hamonet**,
 Amr Habib, **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

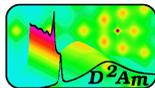
REBIRX



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



Journées du GDR MI2B, 6-7 déc 2017, Caen

