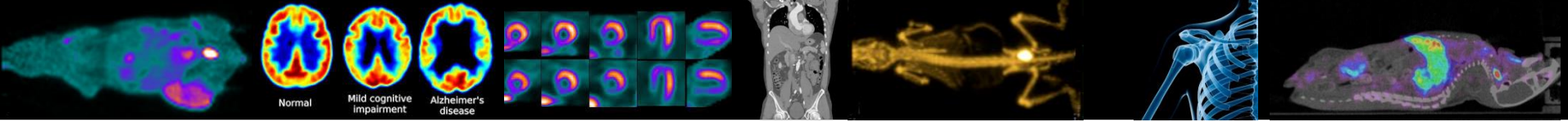


Electronique de lecture compact et modulaire de photo-détecteurs SiPM dans le cadre d'une application TEP

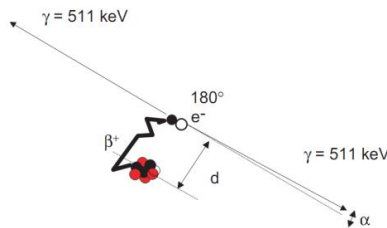
Nicolas Chevillon et Christian Fuchs
pour l'équipe Imagerie Moléculaire, DRHIM/IPHC



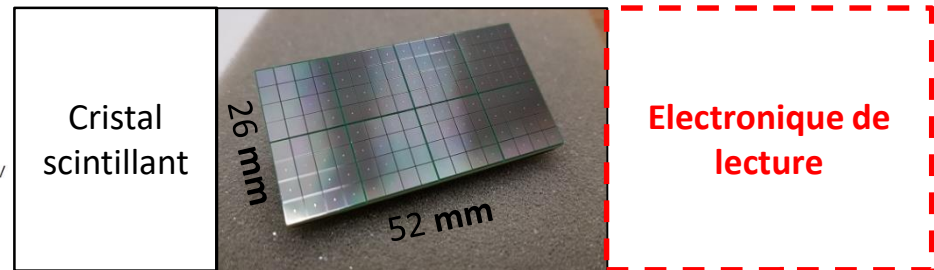
Cahier des charges

Lecture d'un module SiPM 26x52 mm² TEP pré-Clinique dans le cadre du projet DigiPET porté par le chercheur David BRASSE et financé par la région Grand Est

Injection de molécules radio-marquées émettant en bêta+



Puis annihilation dans l'animal engendrant des photons gamma de 511keV



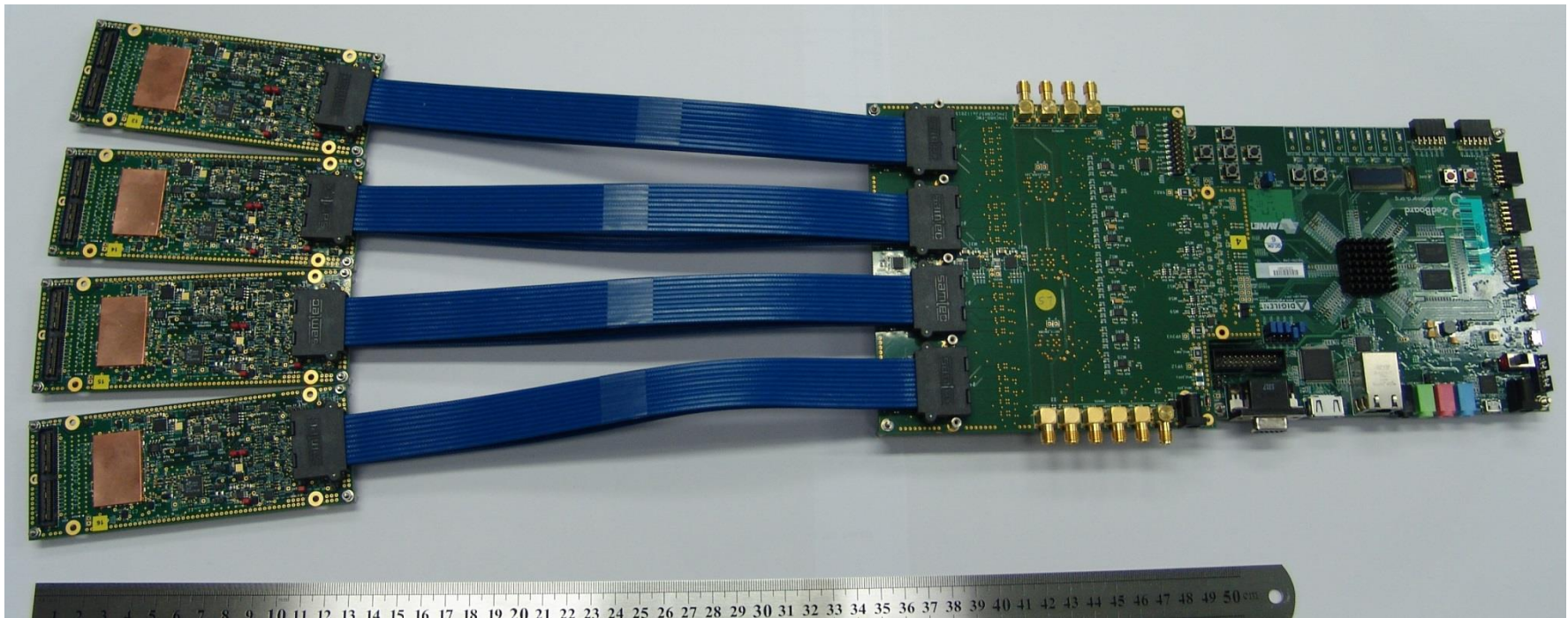
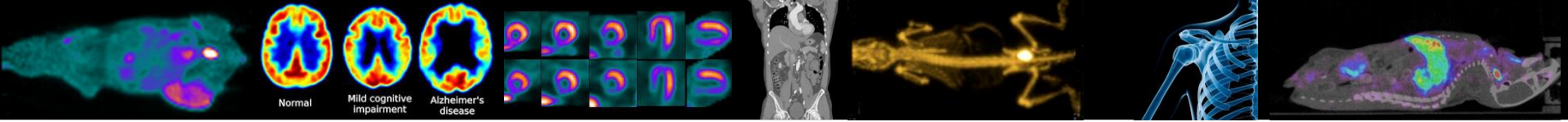
Matrice SiPM 8x16 voies
(8x SiPM S13361-3050 Hamamatsu)

Electronique de lecture

Système de mesure multivoies de **charge** et de **temps** intégrant des réseaux de résistances

Evolution d'une DAQ présentée aux JME en 2016

- Maintien
 - du FPGA Xilinx Zynq-7020
 - d'un lien Ethernet 1 Gb/s
- Evolution
 - de l'ASIC Imotep : gamme de charge, taux de comptage
 - de la compacité :
 - double réseau de résistances sur 26x52 mm
 - largeur maximale de 100 mm (-> 2 modules SiPM)
 - 64 voies de lectures



Système de mesure multivoies
de **charge** et de **temps**
intégrant des réseaux de
résistances

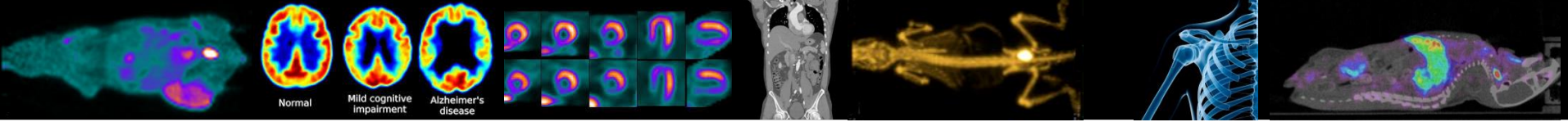
Evolution d'une DAQ présentée aux JME en 2016

➤ Maintenance

- du FPGA Xilinx Zynq-7020
- d'un lien Ethernet 1 Gb/s

➤ Evolution

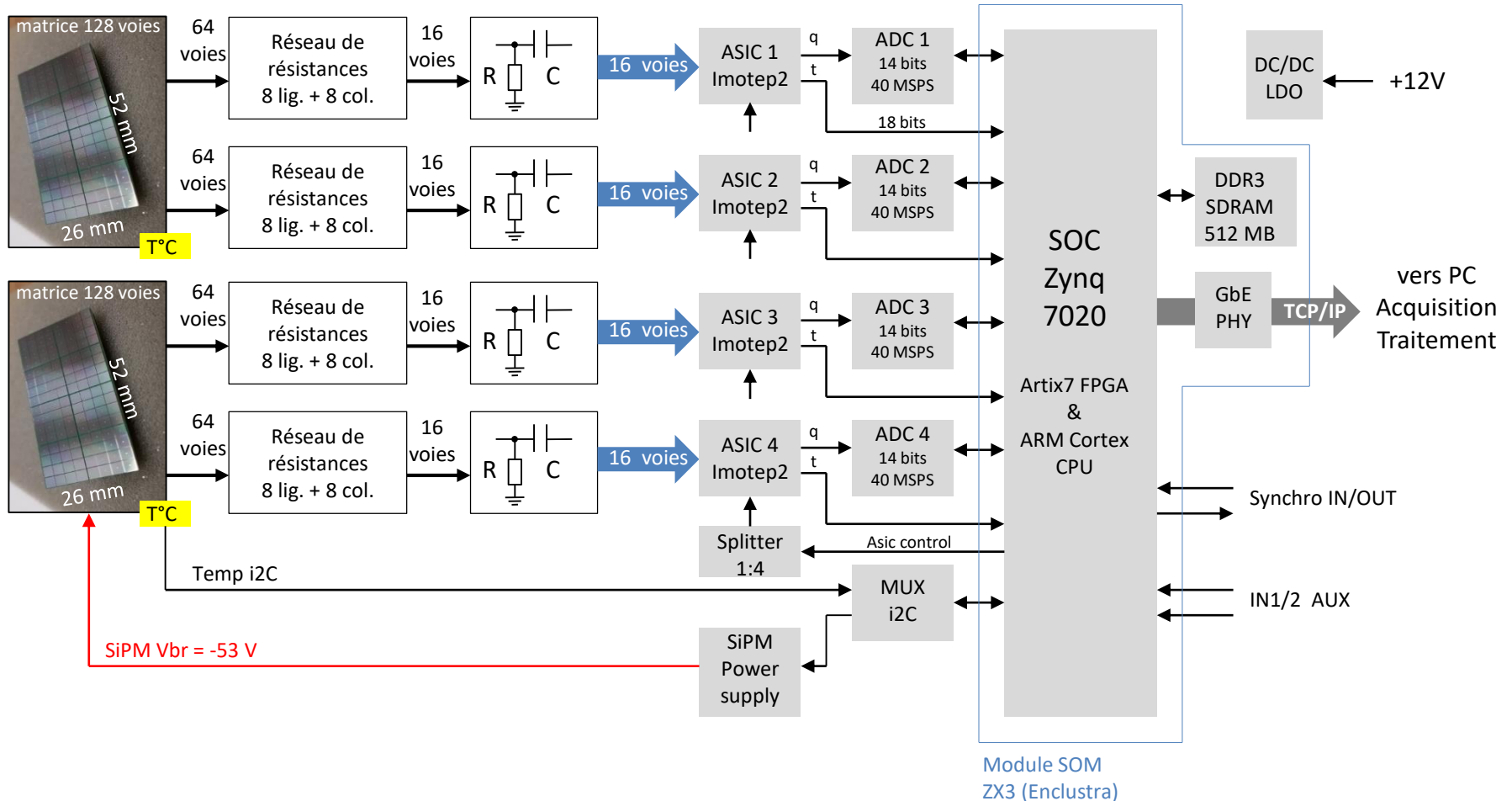
- de l'ASIC Imotep : gamme de charge, taux de comptage
- de la compacité :
 - double réseau de résistances sur 26x52 mm
 - largeur maximale de 100 mm (-> 2 modules SiPM)
- 64 voies de lectures

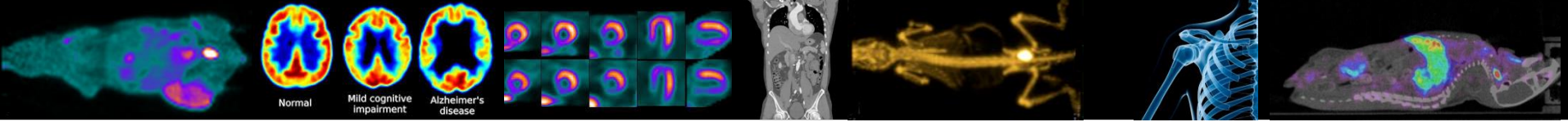


Architecture électronique d'un module DAQ

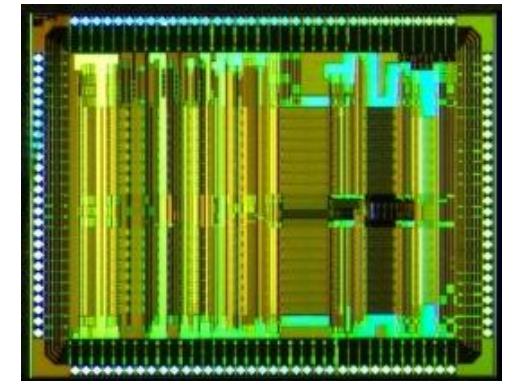
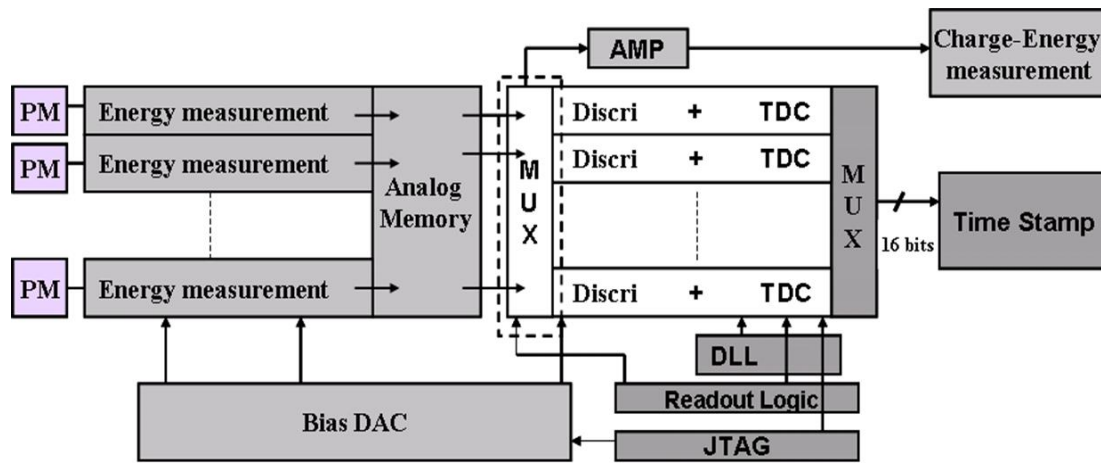
Lecture de 2 modules SiPM soit 256 signaux photodétecteurs

Photodétecteurs SiPM





ASIC Imotep2



Technologie: AMS CMOS 0,35 μm
Die 3,4 mm x 4,3 mm – 122 pads

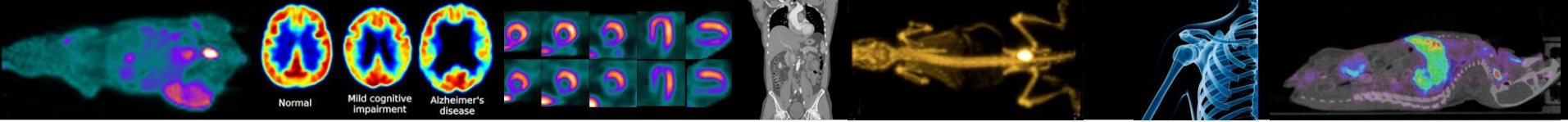
- ✓ Conception IPHC/Imagerie moléculaire
- ✓ Austria Micro Systems (AMS) 0.35 μm
- ✓ 16 voies indépendantes
- ✓ Horloge de référence : 80 MHz
- ✓ Fonctionnement "Triggerless"
- ✓ Période de lecture : 800 ns
- ✓ Taux de mesure : 1,25 MHz /voie

Mesure de temps :

- ✓ DLL avec 32 cellules à retard
- ✓ Ligne à retard Vernier de 16 cellules
- ✓ Echantillonnage du temps : 24.4 ps

Mesure de charge :

- ✓ Gamme de charge : 250 fC à 2 nC

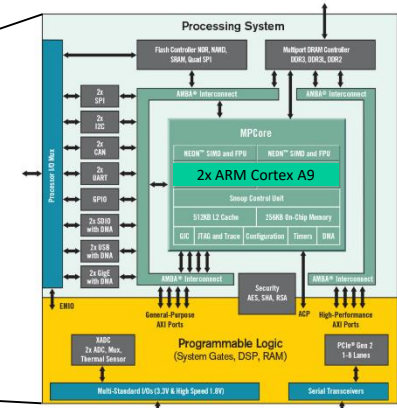
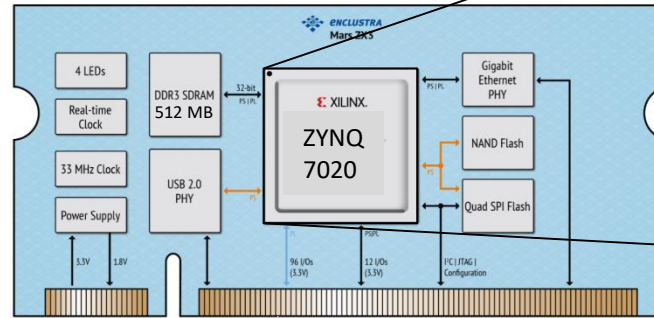


Structure de l'interface numérique de lecture



Format SODIMM-200
69 mm x 30 mm

Carte FPGA Mars ZX3



Electronique Front-End 64 voies
15 I/O LVCMOS
20 I/O LVDS

Ethernet Gigabit TCP/IP
→ 113,16 MiB/s



Acquisition
Traitement

Logique programmable:

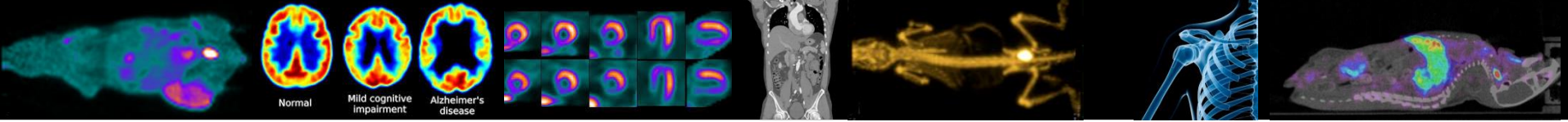
- Codage VHDL et Verilog
- Sélection des données
- Ecriture des données en **FIFOs**

Processeur ARM:

- Lecture des données en **FIFOs**
- Gestion de la transmission des données par protocole **TCP/IP**

Valorisation industrielle par un « dépôt logiciel »

Lecture périodique
Protocole TCP/IP standard
+ ARP, ICMP et DHCP



Module SiPM 128 voies

Photodétecteur SiPM 16 voies (S13361-3050NE-04, Hamamatsu)

13 mm

13 mm

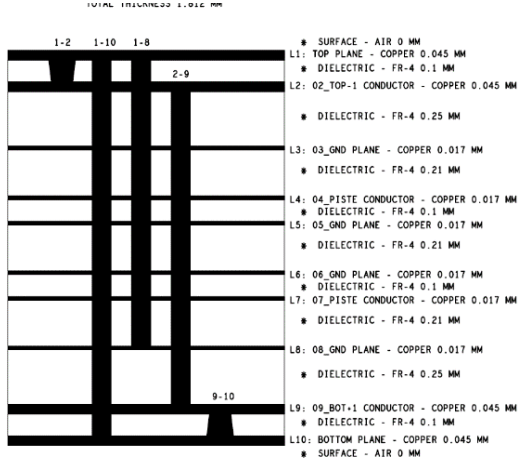
4 x 4 voies: 13 x 13 mm
3 x 3 mm par voie
3584 pixels/voie (50 x 50 µm)

32 pastilles
Ø 0,7 mm
Vbr typ = 53 V

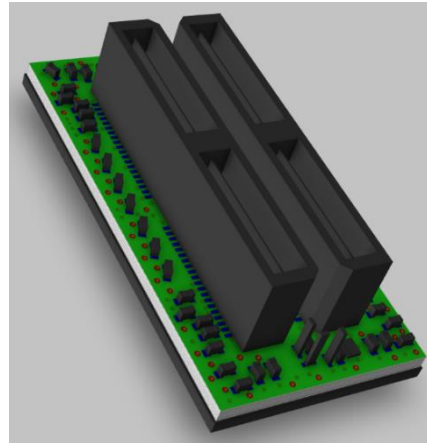
Package edge to photosensitive area: 0.2
Gap between photosensitive areas: 0.2
Resin
Photosensitive surface
Chip
Substrate
Electrode
Solder bump

Epaisseur: 1,35 mm

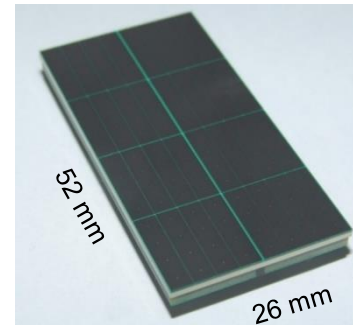
PCB MC10 rigide
Isolement mini: 120 µm
Epaisseur: 1,8 mm
Fabrication: Csi Sud Ouest



Connecteur Samtec 80 pins QTE sur côté Bottom

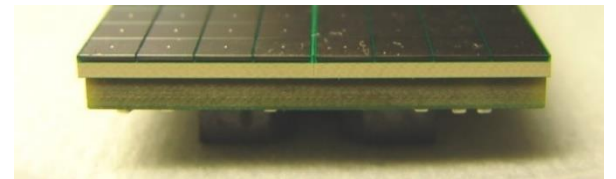


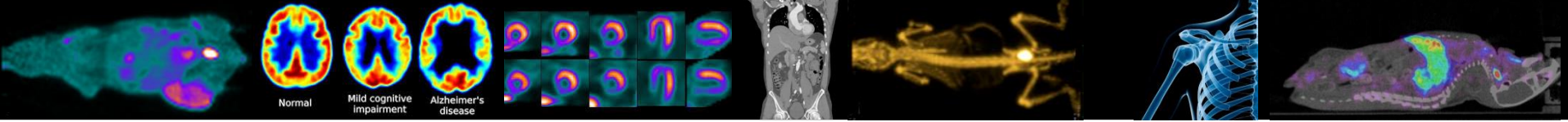
TOP



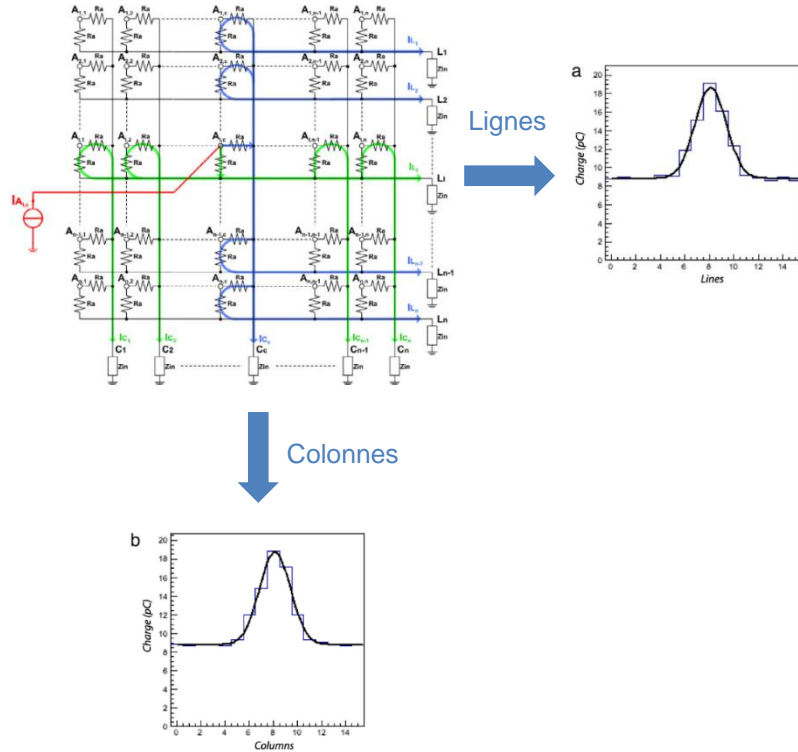
Incertitude d'alignement 100 µm

Bottom



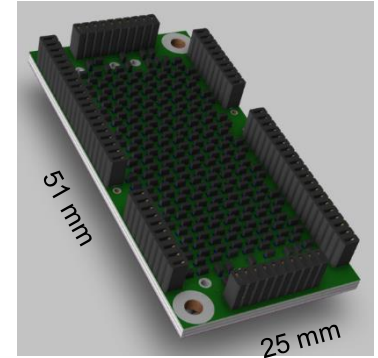
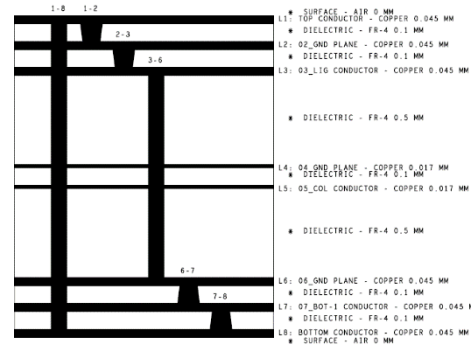


Carte Réseau de résistance

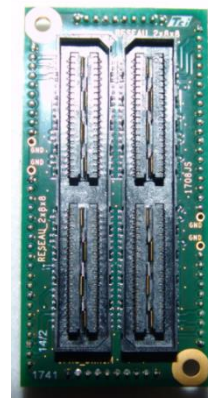


F. Boisson et al. "Description and properties of a resistive network applied to emission tomography detector readouts", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Vol. 872, pp 100-106, 11 Nov. 2017

PCB MC8 rigide
 Isolement mini: 100 μm
 Epaisseur: 1,8 mm

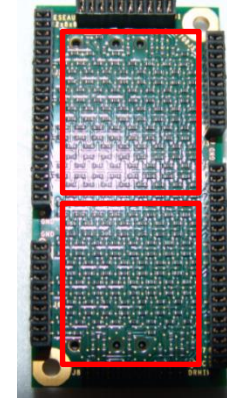


TOP



Connecteurs Samtec
 QSE

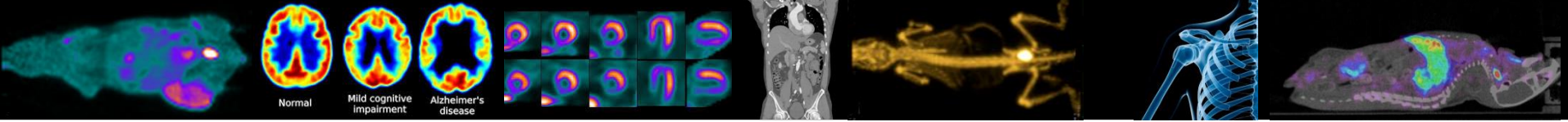
Bottom



256 résistances taille 0402
 Connecteurs Harwin M52

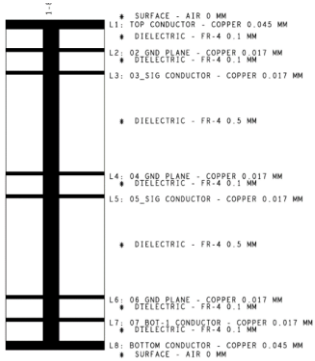
Réseau 1
 8 lignes + 8 colonnes

Réseau 2
 8 lignes + 8 colonnes

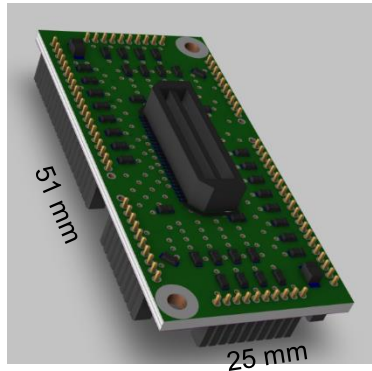


Carte RC

PCB MC8 rigide
 Isolement mini: 120 µm
 Epaisseur: 1,7 mm



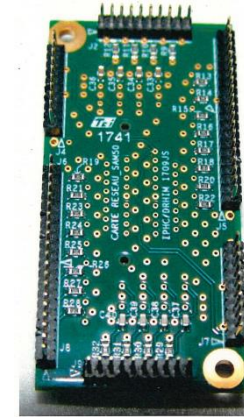
Connecteur Samtec 50 pins QTS sur TOP



TOP

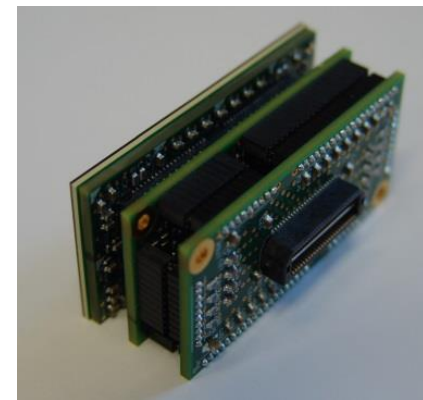
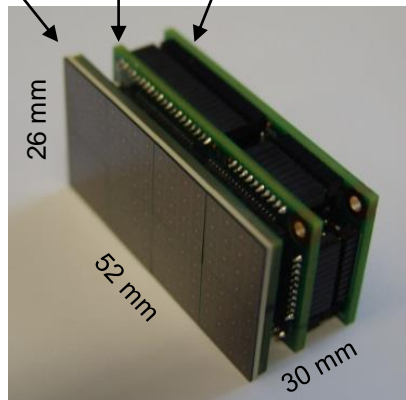


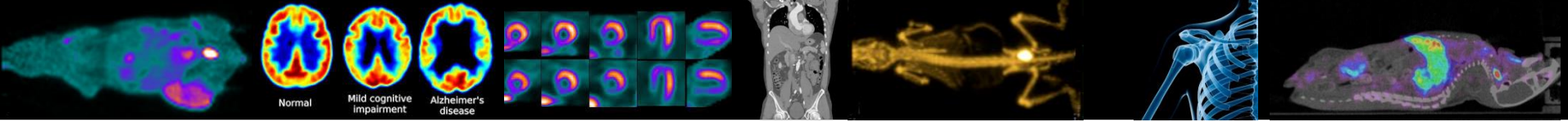
Bottom



Carte Réseau
 Carte SiPM
 Carte RC

Assemblage d'un module SiPM

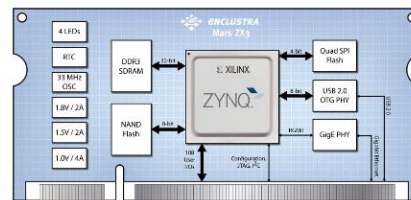
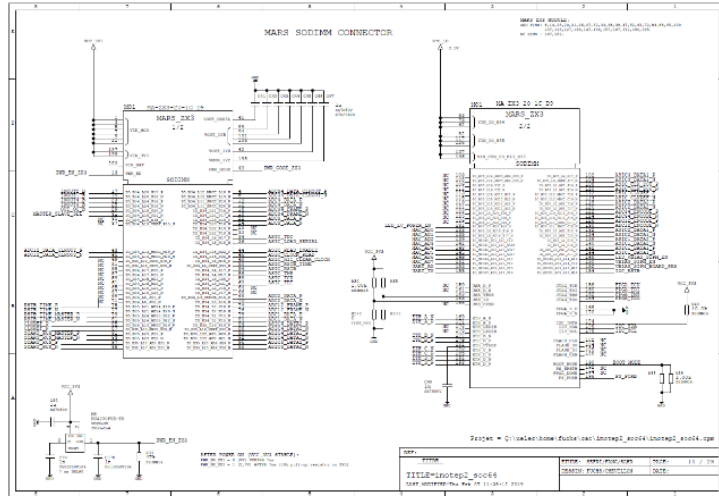




Carte Asic: conception

28 pages de schéma
 900 composants
 100 références différentes

Ex: page 14 – carte Mezzanine ZX3 avec le FPGA Zynq 7020
 Ref: MA-ZX3-20-1C-D9
 Fabricant: Enclustra
 Librairie Cadence: inspecial/mars_zx3

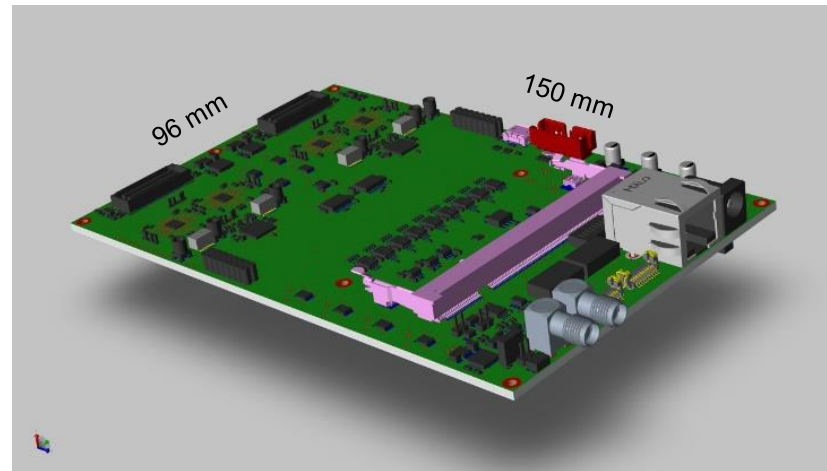
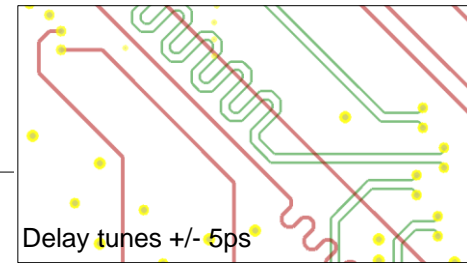


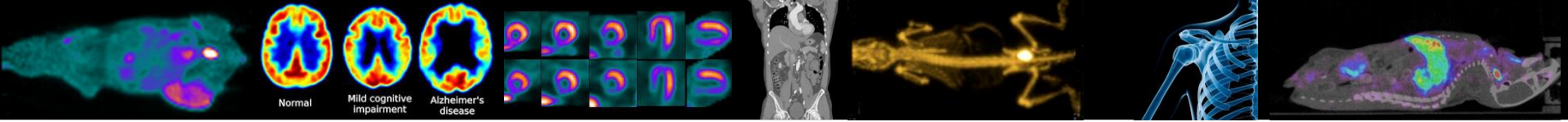
Carte commerciale ZX3 (Enclustra)
 format SODIMM200 (69 x 30 mm)

PCB: MC18 rigide
 Ep totale 2,3 mm
 pistes/isol mini 100 µm

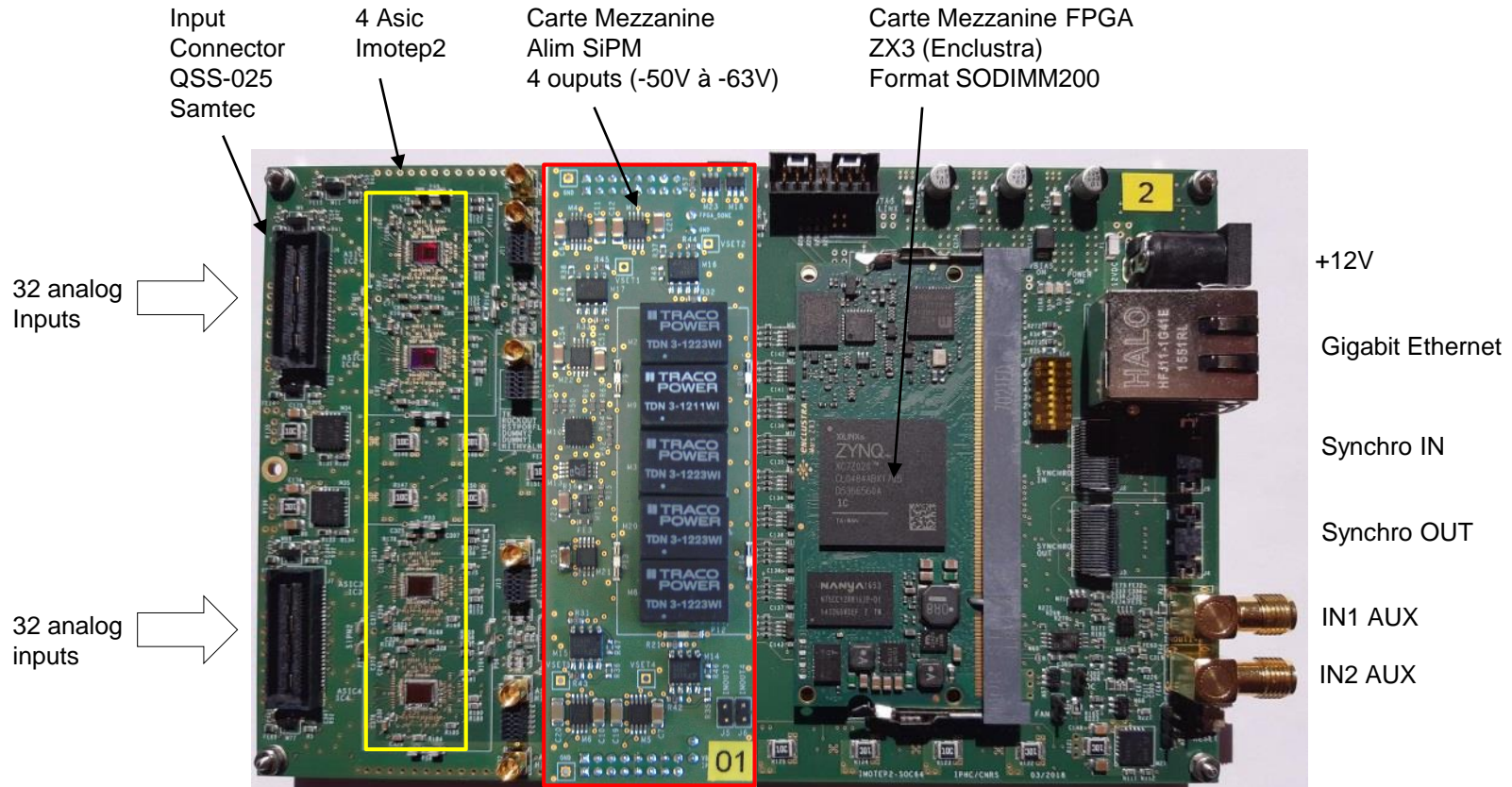
Epaisseur Cu et FR4 nominale (µm)		
1	18	TOP
2	18	TOP-1
3	18	GND
4	18	R1 — Mono 50 Ω (fils 120µ), Diff 100 Ω (fils 120µ), Isol 280µ
5	18	R2 — Mono 50 Ω (fils 120µ), Diff 100 Ω (fils 120µ), Isol 280µ
6	18	GND
7	18	ALIM1
8	18	ALIM2
9	18	ALIM3
10	18	ALIM4
11	18	ALIM5
12	18	ALIM6
13	18	GND
14	18	R3 — Mono 50 Ω (fils 120µ), Diff 100 Ω (fils 120µ), Isol 280µ
15	18	R4 — Mono 50 Ω (fils 120µ), Diff 100 Ω (fils 120µ), Isol 280µ
16	18	GND
17	18	BOT-1 — Mono 50 Ω (fils 125µ), Diff 100 Ω (fils 125µ), Isol 420µ
18	18	BOT

- Séquences de perçage:
1. Micro-vias Laser 1-2: trou 150µ, pastille 350µ
 2. Bloc enterré 2-17: trou 300µ, pastille 550µ
 3. Vias traversants 1-18: trou 300µ, pastille ext 500µ, pastille int 550µ

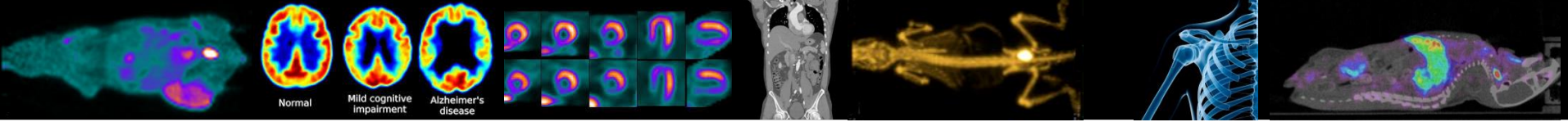




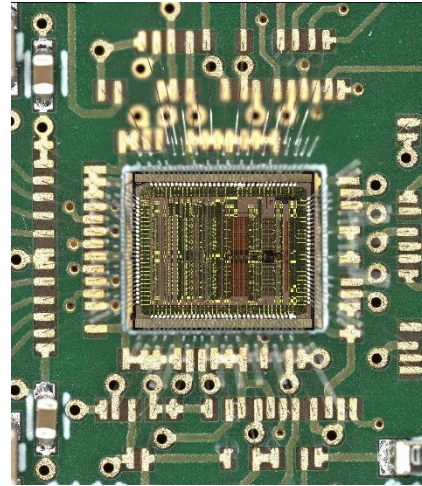
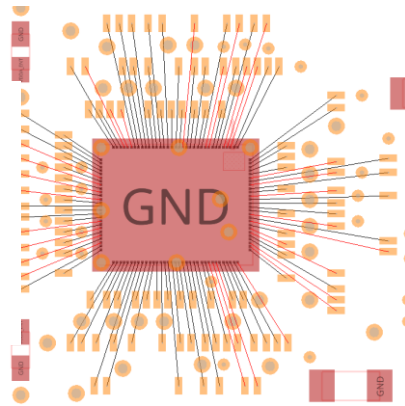
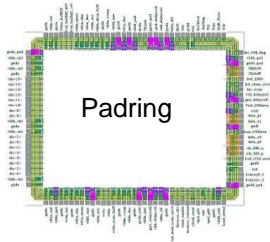
Carte Asic: réalisation



Dimension: 150 x 96 mm
 Taille de boîtier mini: 0402
 Fab PCB: société CIBEL (France)
 Approvisionnement composants: IPHC
 Assemblage: IPHC – Christophe Wabnitz

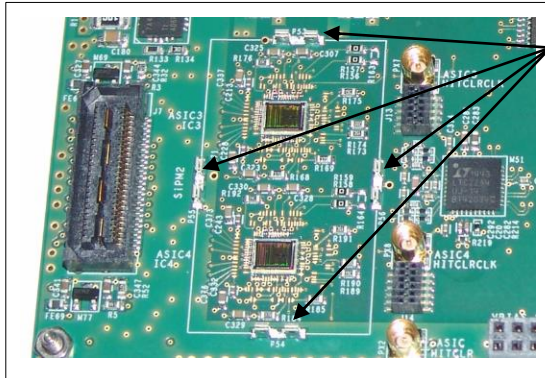


Carte Asic: Bonding des Asic Imotep2



Die imotep2: 4,3 mm x 3,4 mm
 122 pads
 Pitch 100 μ m
 Fils de bonding Alu
 Réalisation: Christophe Wabnitz (IPHC)

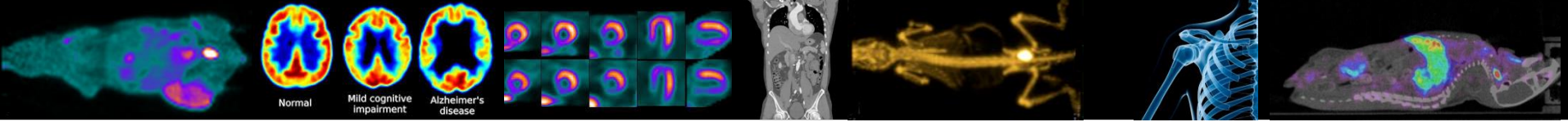
Protection des chips



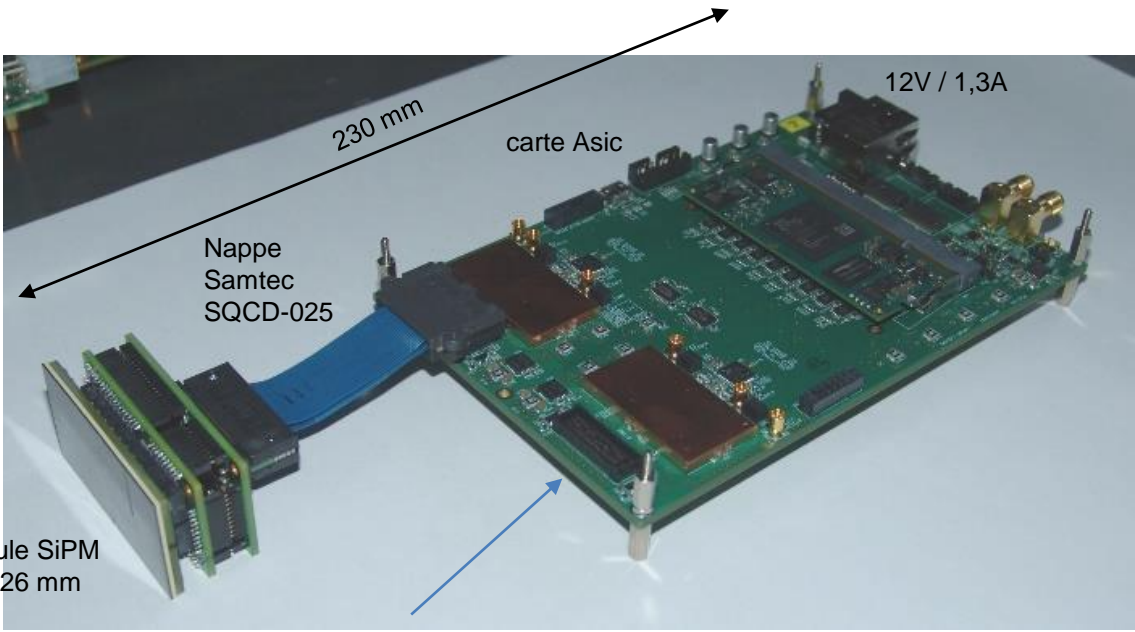
Support de capot:
 Soudé sur le PCB (relié au GND)
 Ref: S0971-46R
 Fabricant: Harwin
 librairie Cadence: biblio/blindage



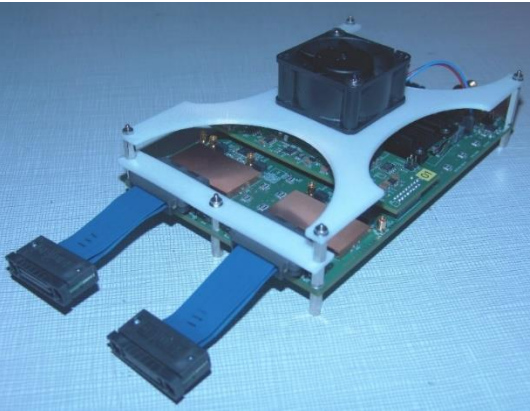
Capot clipsé 20 x 30 x 3 mm
 Ep: 0,15 mm
 Matière: cuivre
 Ref 1500-20-35-3
 Fabricant: Holland Shielding

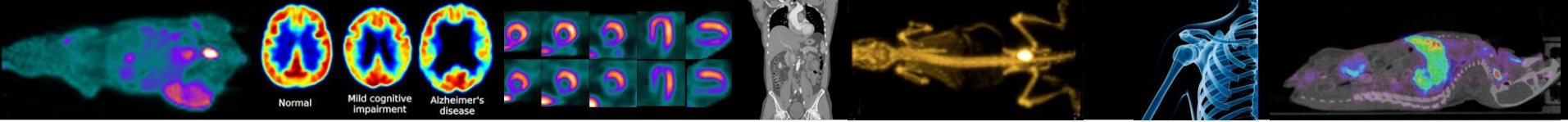


DAQ complète

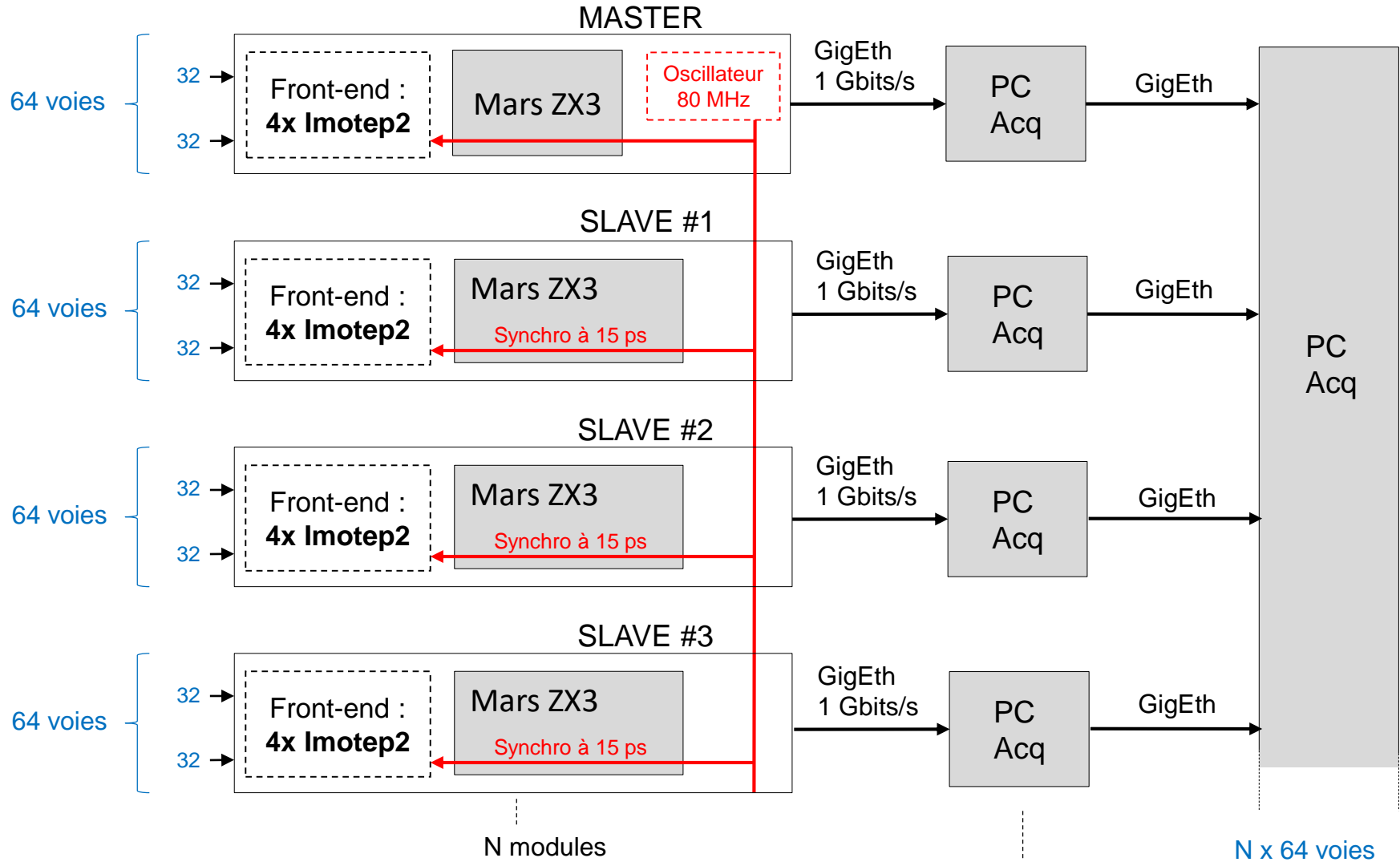


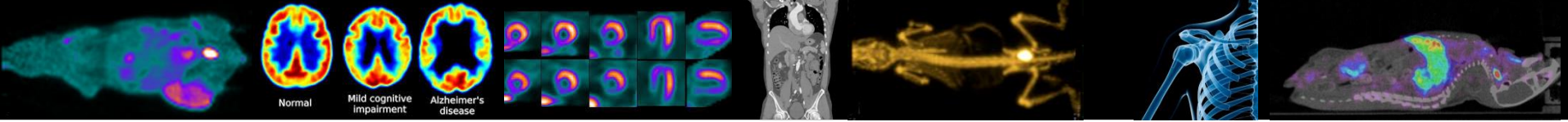
Connecteur prévu pour recevoir un deuxième module SiPM





Electronique modulaire



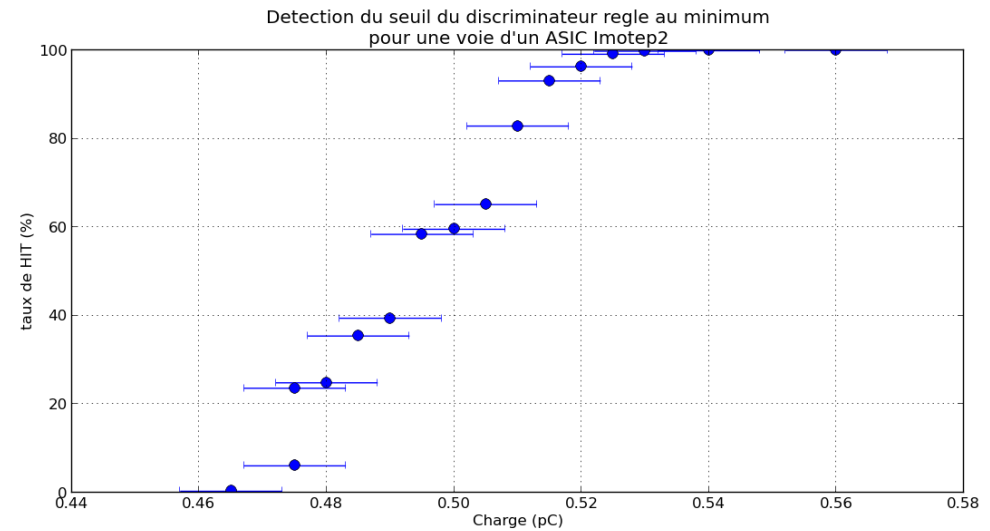
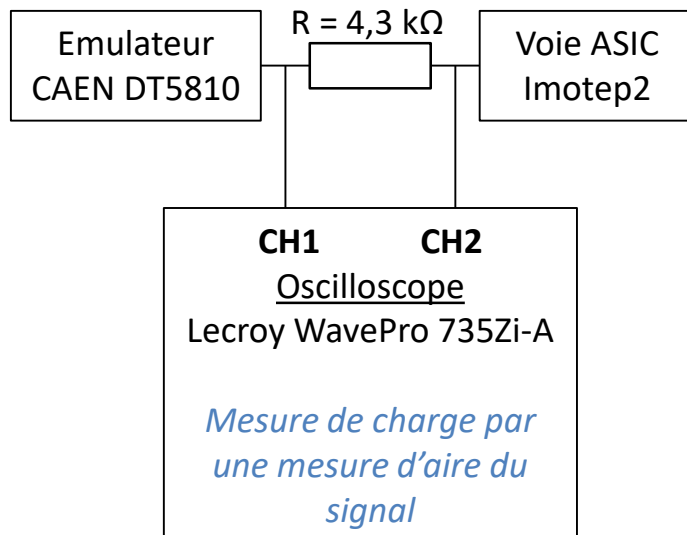


Résultats de test de l'ASIC Imotep2

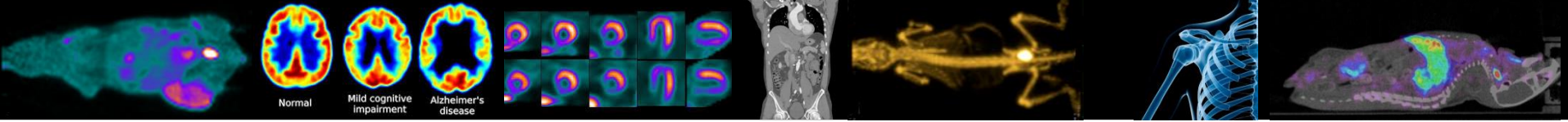
Test d'une voie à la limite de déclenchement

Seuil de déclenchement réglé au minimum au-dessus du bruit électronique

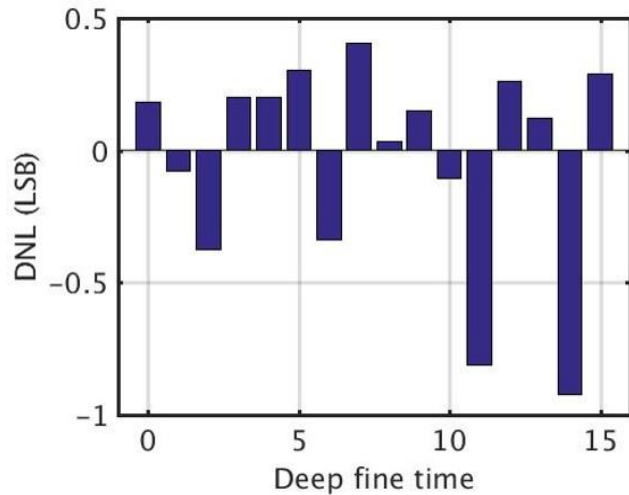
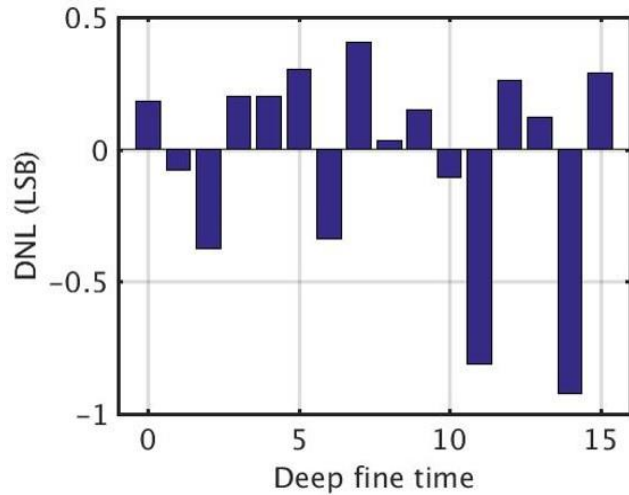
Expérimentation d'une nouvelle méthode d'injection pour imposer la forme du signal
 $t_{\text{RISE}} = 15 \text{ ns}$ (valeur issue d'une mesure), $t_{\text{FALL}} = 40 \text{ ns}$ (scintillation d'un cristal de LYSO)



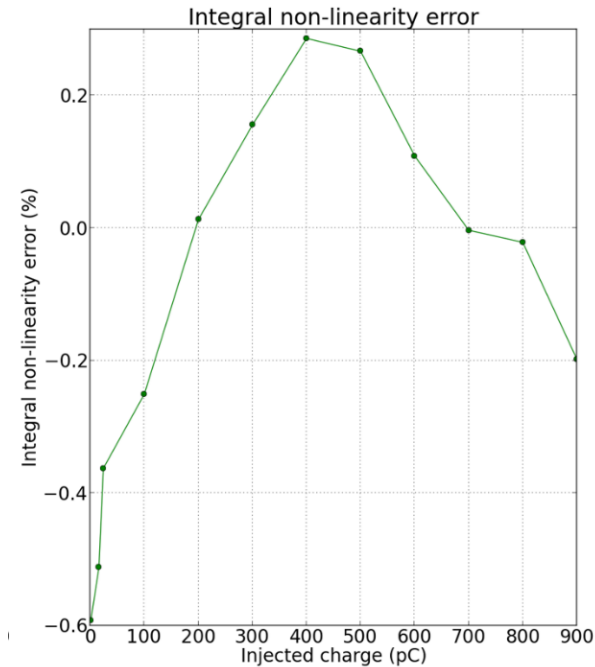
Charge minimale détectable pour la voie testée d'un ASIC Imotep2 = 500 fC

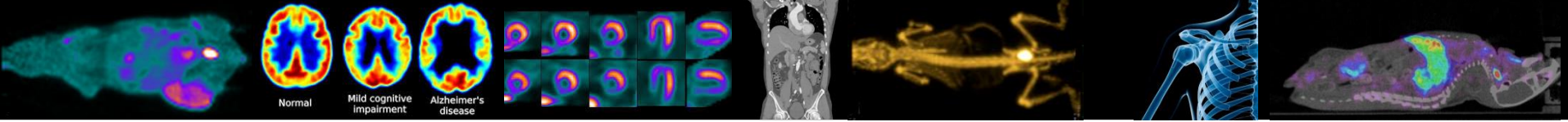


Résultats de test de l'ASIC Imotep2

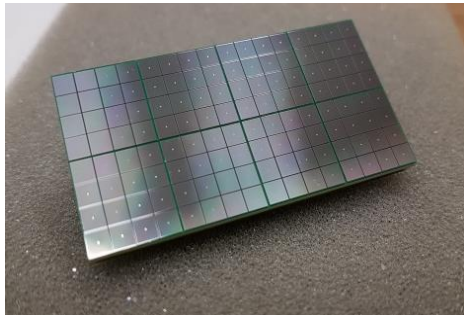


- ✓ Mesure de temps :
 - $-0.92 \text{ LSB} < \text{DNL} < 0.42 \text{ LSB}$
 - $-0.85 \text{ LSB} < \text{INL} < 0.72 \text{ LSB}$
- ✓ Mesure de charge :
 - $\text{INL} < 0.6\%$
 - $\text{Crosstalk} < 0.1 \text{ ‰}$





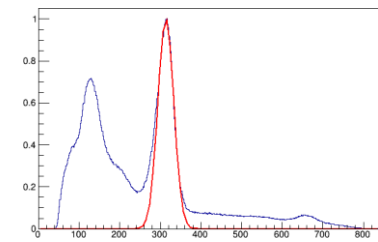
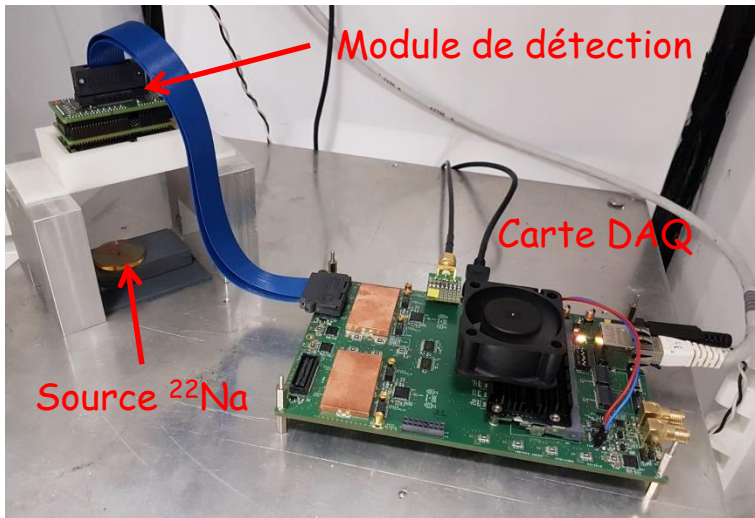
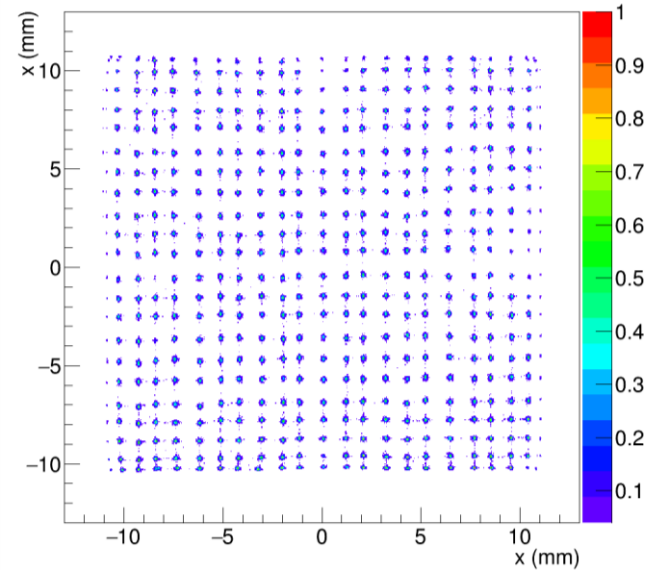
Résultats de lecture d'un module SiPM



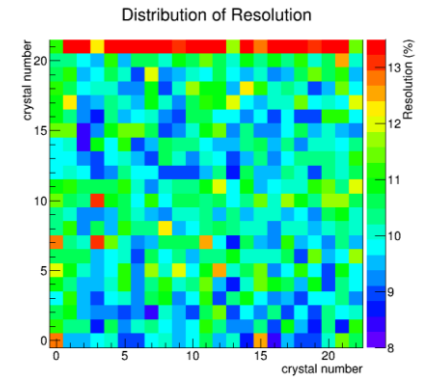
Hamamatsu S13361-3050
8x16 pixels - 26x52 mm²

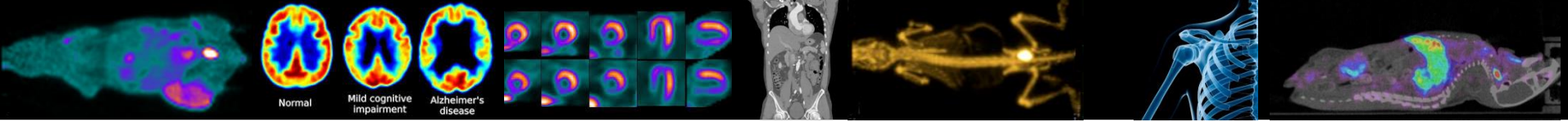


23 x 23 LYSO
1.065x1.065x6 mm³



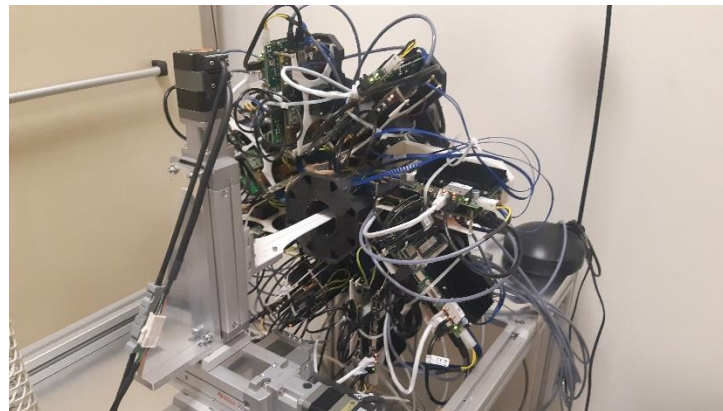
Meilleur : 8.46%
Moyenne : 10.36 ± 1.45%
Max : 22.77%
(Sans correction de linéarité)



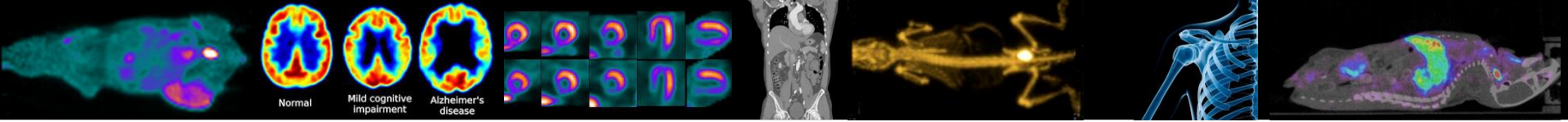


Conclusion

- Conception, réalisation et exploitation de modules d'acquisition de données à l'IPHC
- Module photodétecteur SiPM compact intégrant une réduction par 4 du nombre de voies
- Conception et exploitation d'un ASIC dédié : Imotep2
- Firmware du SoC valorisé par un "dépôt logiciel"
- Compacité et modularité de l'ensemble de la DAQ



Prototype TEP du projet DigiPET
financé par la région Alsace



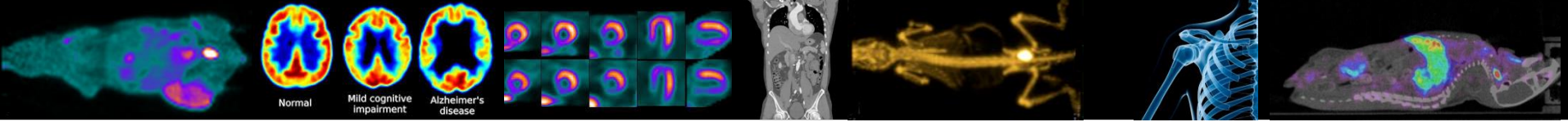
Concepteurs du module DAQ Imotep2

- ✓ CAO des cartes
 - Jacky SAHR
 - Christian FUCHS
- ✓ CAO microélectronique d'Imotep2
 - Rachid SEFRI
 - Xiaochao FANG
- ✓ Développement firmware
 - Nicolas CHEVILLON
- ✓ Test des cartes et du module DAQ
 - Christian FUCHS
 - Virgile BEKAERT
 - Nicolas CHEVILLON

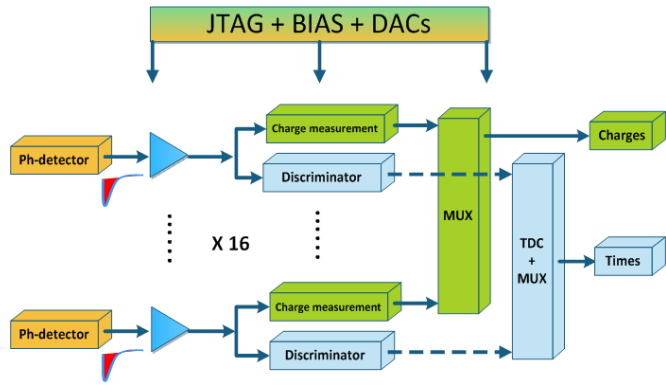
Merci de
votre
attention

Contact : nicolas.chevillon@iphc.cnrs.fr

Slides supplémentaires



Voie de mesure IMOTEP2



Pre-amp & Discriminateur en mode courant

