

# Développement d'un capteur pour le synchrotron SOLEIL & sonde endocrânienne

Julian Heymes (*julian.heymes@iphc.cnrs.fr*)

Service de microélectronique et groupe PICSEL - IPHC, Strasbourg

*Journées VLSI - FPGA - PCB et Outils CAO de l'IN2P3 2016*

01/06/2016 – 14h40

# IMIC : Imageur Moléculaire Intra Crânien pour le projet MAPSSIC

Designers : Julian Heymes, Maciej Kachel

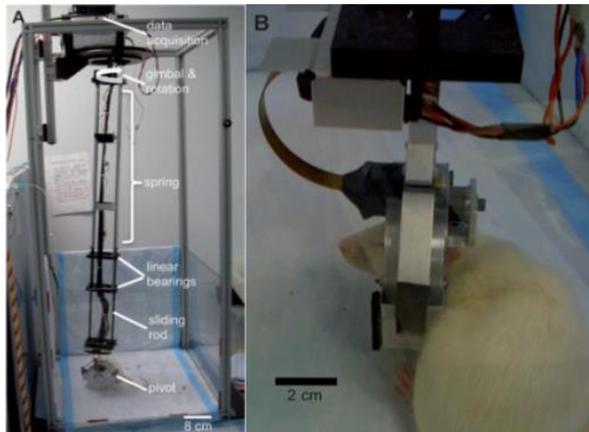


# Intérêt en neuro-imagerie comportementale

- Etudes sur le petit animal éveillé et libre de ses mouvements

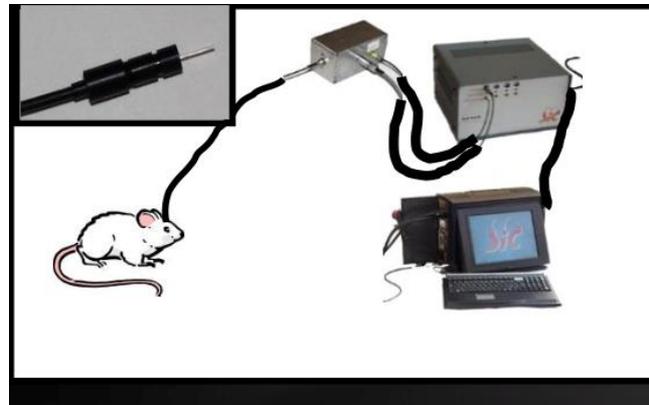
## RatCAP

Rat Conscious Animal PET  
BNL



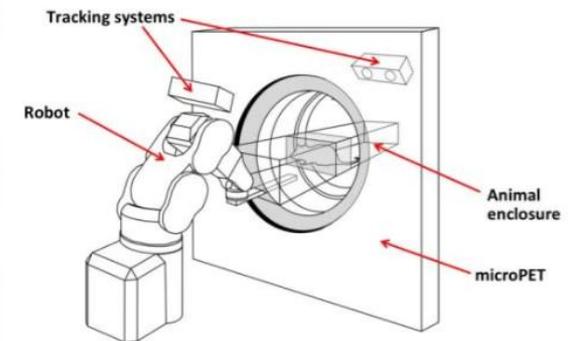
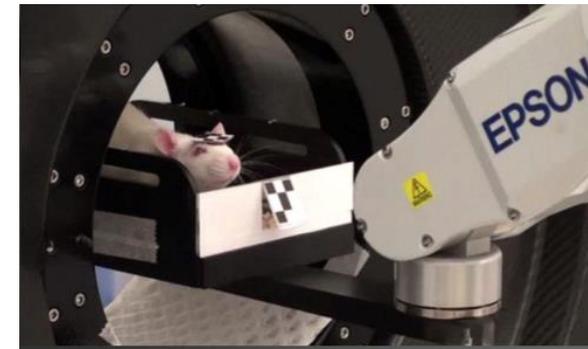
## Beta-Microprobe

Intracerebral Probe  
Orsay & Lyon



## Motion tracking system

combined to PET  
U. Sydney



# Sonde implantée dans le cerveau

- Observation des concentrations de radio-traceurs à proximité de l'émetteur ( $\beta^+$ ) par comptage
- Nécessité d'une immunité aux gammas
  - Annihilation du  $\beta^+$  par capture électronique après un parcours moyen dépendant du traceur utilisé
    - 2 gammas de 511 keV générés dos à dos
  - Peuvent provenir d'autres organes (cœur, vessie)

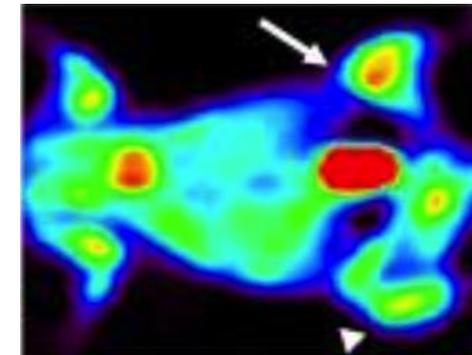
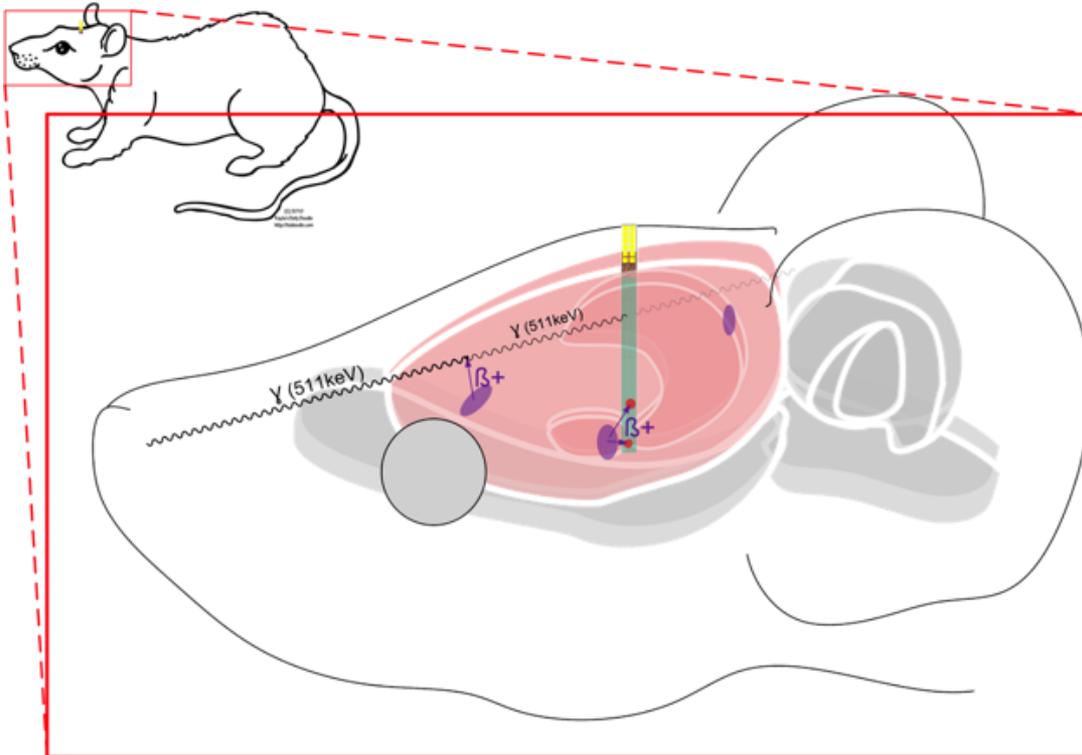
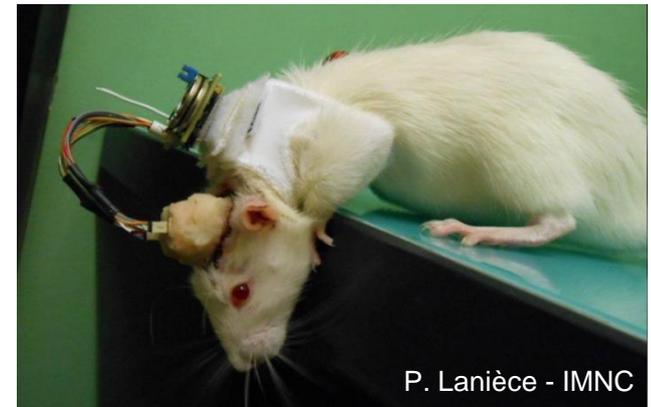


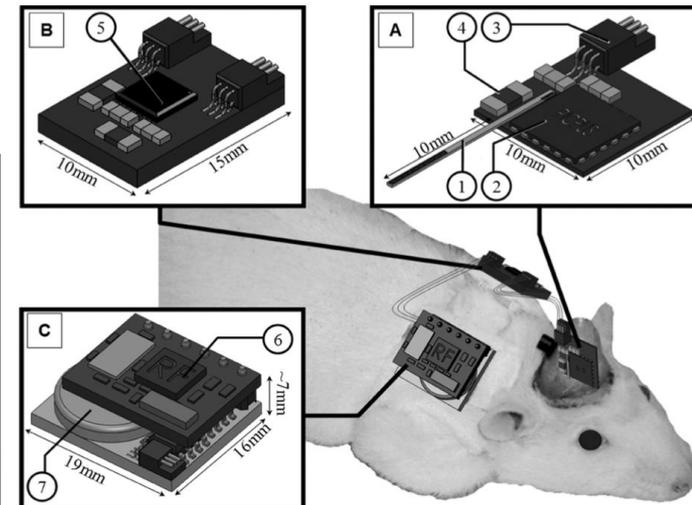
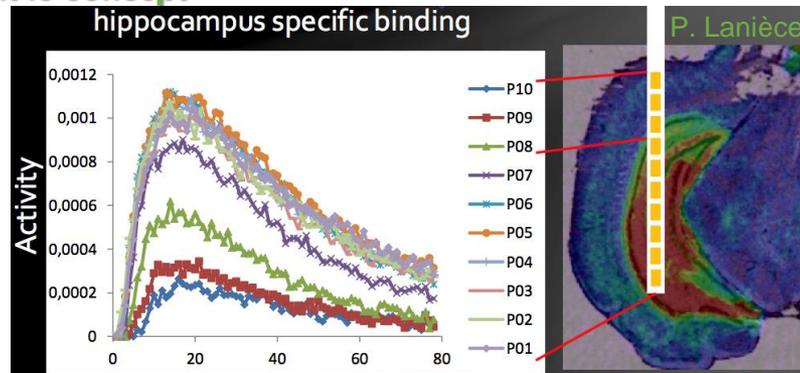
Image obtenue par  $\mu$ PET

# PIXSIC

- **PIXSIC (PIXellated Sonde IntraCrânienne) [IMNC & CPPM]**
  - Sonde pixélisée :
    - 10 pixels passifs de  $200 \times 500 \mu\text{m}^2$  sur substrat haute résistivité
    - Polarisation à 30 V des diodes de collection
    - Encapsulation dans du parylène-C : polymère bio-compatible
  - PICPUS :
    - ASIC de lecture (préamp, shaper, CAN, discriminateurs, logique et gestion de la puissance)
    - Composants passifs à proximité sur la tête
  - Sac à dos :
    - Batterie + gestion de la puissance
    - Microcontrôleur
    - Transmetteur RF



## Des résultats validant le concept



J. Godart et al. PIXSIC: A Pixellated Beta-Microprobe for Kinetic Measurements of Radiotracers on Awake and Freely Moving Small Animals. Jun 2010, IEEE NSS Vol.57, No.3

- $[^{18}\text{F}]$
- Double implantation
- Hippocampus (spe)
- Cerebellum (non spe)
- Soustraction du "bruit biologique"

- **Mais :**
  - Sensibilité insuffisante (Pixels passifs) : 1/3 des mesures exploitables
  - Sensibilité aux gammas (épaisseur sensible)
  - Fragilité mécanique (jonction sonde/PICPUS)

# De PIXSIC à IMIC: cahier des charges

- **Cahier des charges**

- Capteur étroit et fin: **limitation de l'invasivité**
- Amplification à la source: **augmentation du rapport signal/bruit**
- **Intégration des fonctions du PICPUS**: limitation des composants discrets
- **Pixels plus petits (que PIXSIC) en matrice**: granularité plus fine, amélioration de la résolution spatiale et localisation 2D (3D après implantation par chirurgie stéréotaxique)
- **Faible dissipation d'énergie**: limitation de l'échauffement du volume cérébral et d'un effet thérapeutique à proximité.
- Faible activité attendue: **vitesse de lecture minimisable** → limitation de l'échauffement

→ **Les MAPS sont d'excellents candidats**

# IMIC-A et IMIC-C: capteurs à sortie analogique

- **IMIC-A pixel**

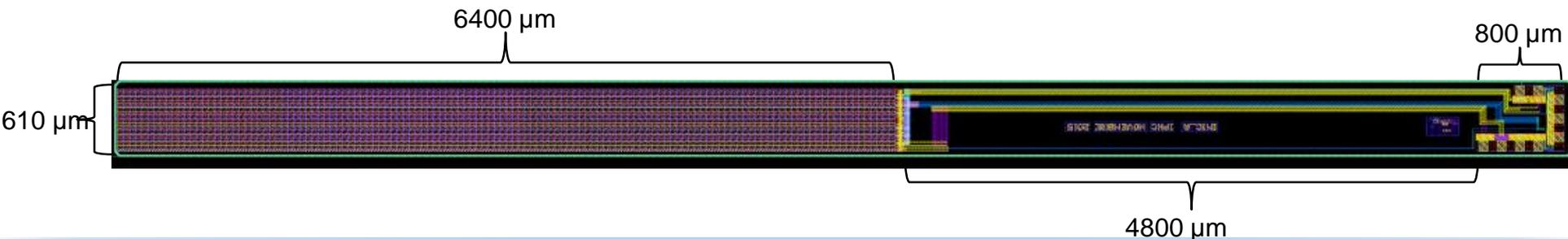
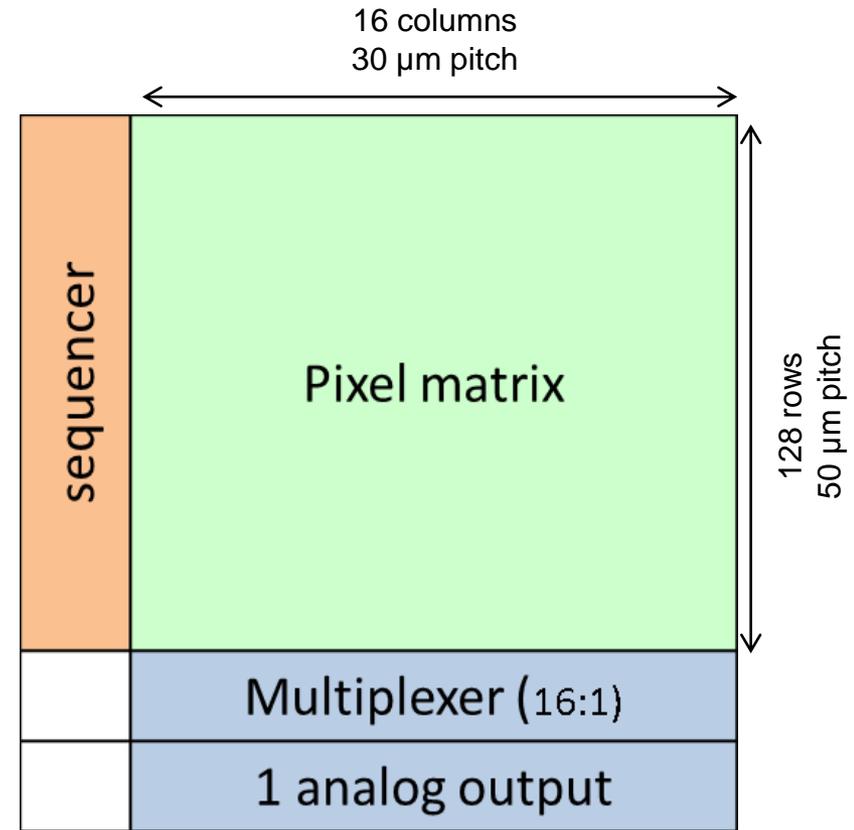
- Pixel type 3-T
  - Architecture connue

- **IMIC-C pixels**

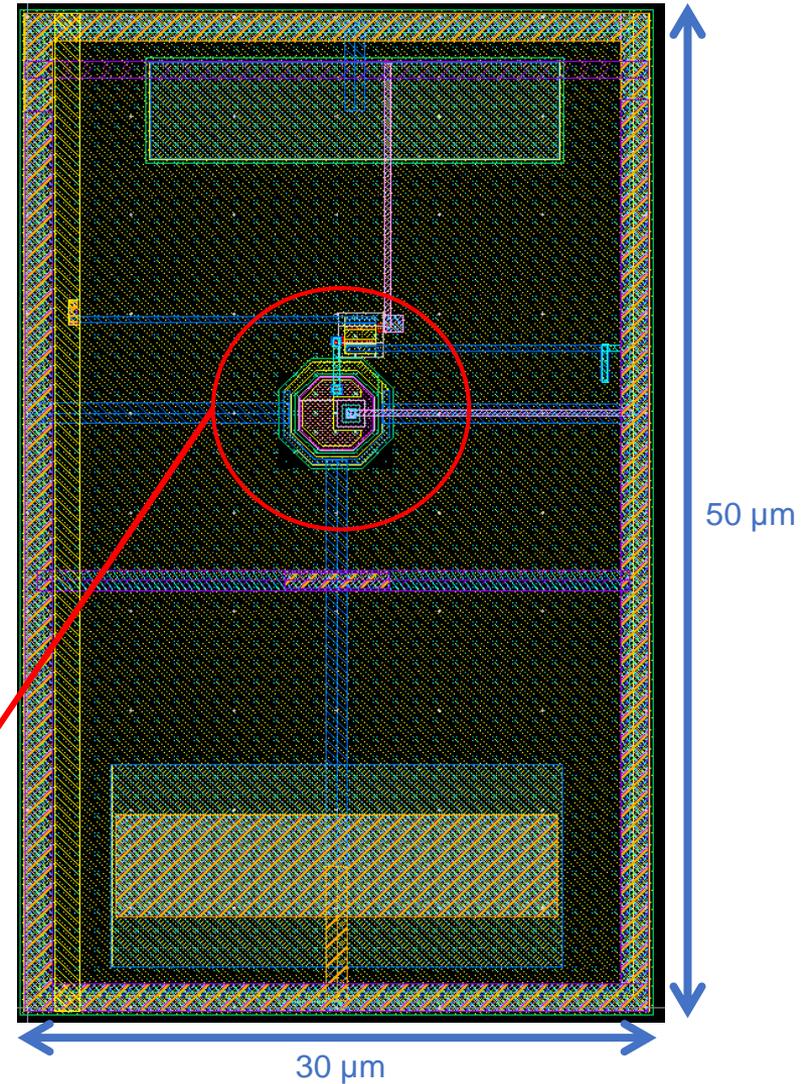
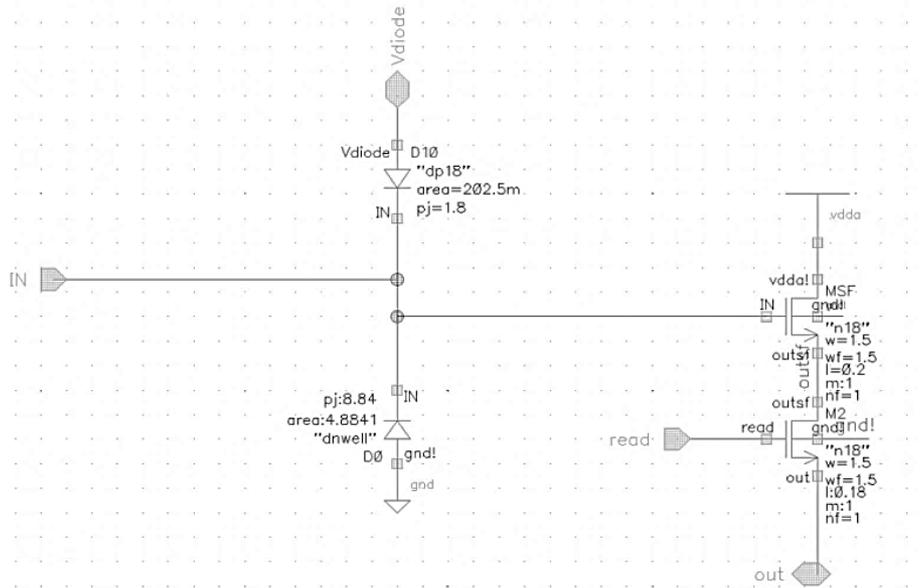
- Pixel type 3T avec 3 diodes de collection
- Pixel type 3T avec couplage AC et 3 diodes
  - Application de la désertion par l'avant

- **Caractéristiques communes**

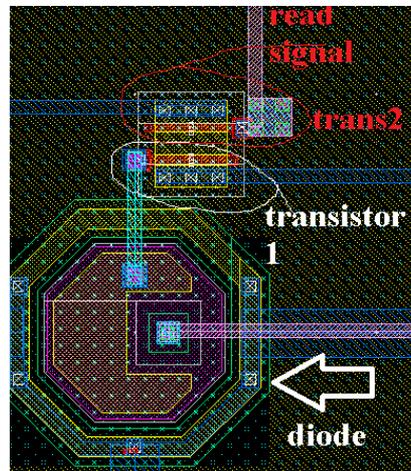
- Lecture en rolling-shutter
- Multiplexage entre colonnes
- Puissance : 288  $\mu\text{W}$  / matrice
  - Limitation du courant de polarisation des colonnes
  - Temps d'établissement limité compatible avec lecture lente
- Temps de lecture d'une ligne: 1.6  $\mu\text{s}$
- Temps de lecture d'une trame: 204.8  $\mu\text{s}$



# IMIC-A: Pixel du capteur analogique

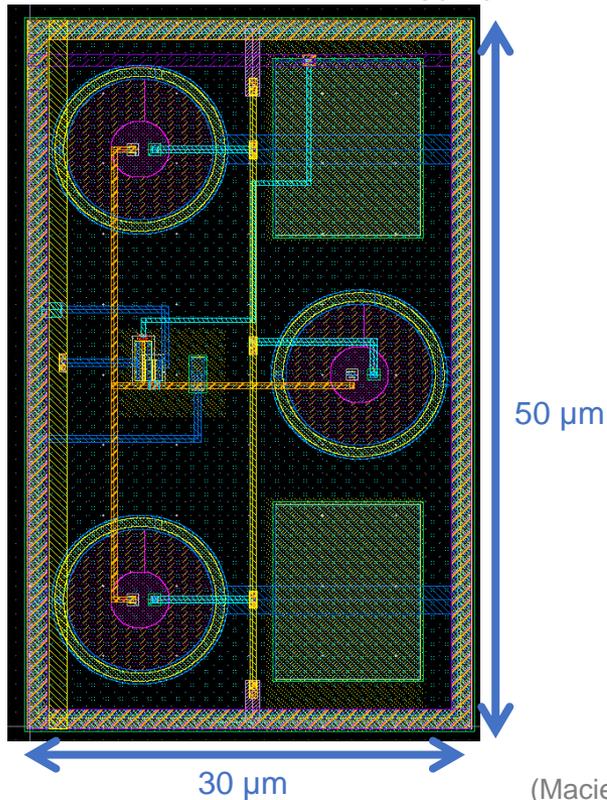
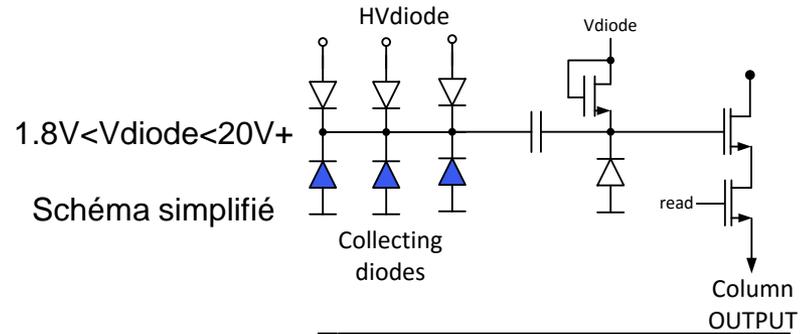
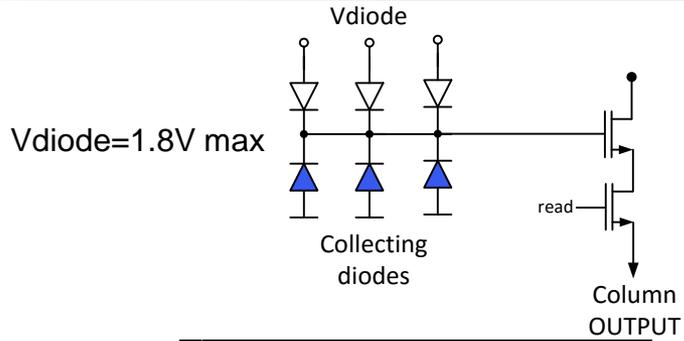


Diode de polarisation en direct et diode de collection sont un seul bloc : P++ dans N-well dans Sub-P

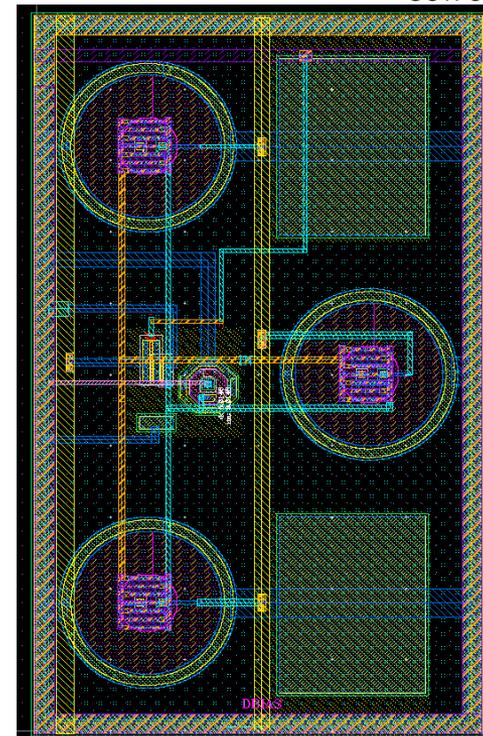


(Maciej Kachel : présentation IMIC-A)

# IMIC-C: pixel multi-diode

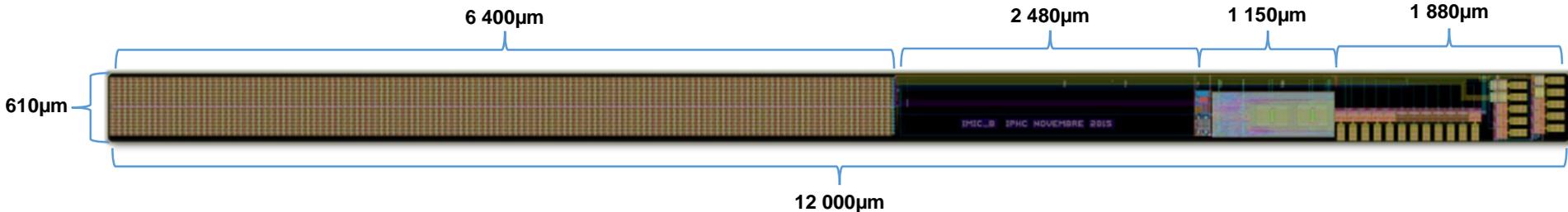
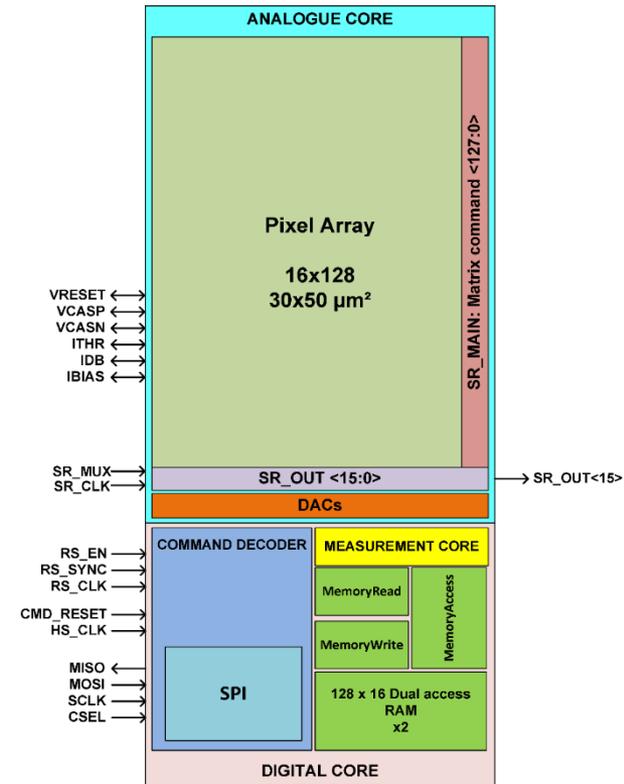


(Maciej Kachel : présentation IMIC-C)



# IMIC-B

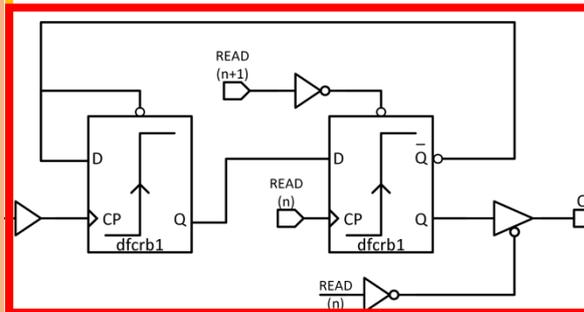
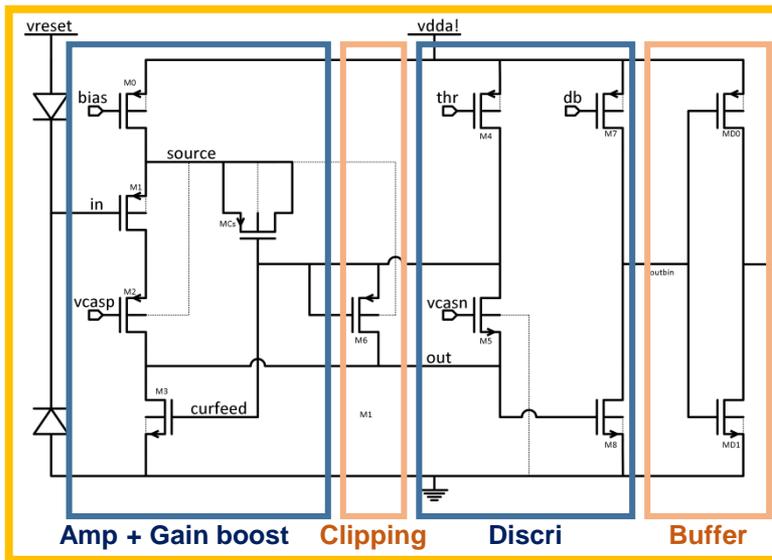
- **Matrice de détection et numérisation**
  - Pixels à sortie numérique à faible puissance
  - Lecture en rolling shutter
- **Traitement et contrôle numérique**
  - Contrôle complet du capteur par « 2 fils »
  - Commandes par protocole SPI custom
  - Contrôle des DAC pour la polarisation des pixels en interne:
    - Tensions 0 V → 1.5V
    - Courants 100 pA → 60 nA
  - Modes de lecture et accumulation au choix
  - Contrôles des mémoires (2 blocs RAM)
    - Lecture/écriture alternée à différentes vitesses pour la gestion de la puissance



# IMIC-B : Pixel (1/2)

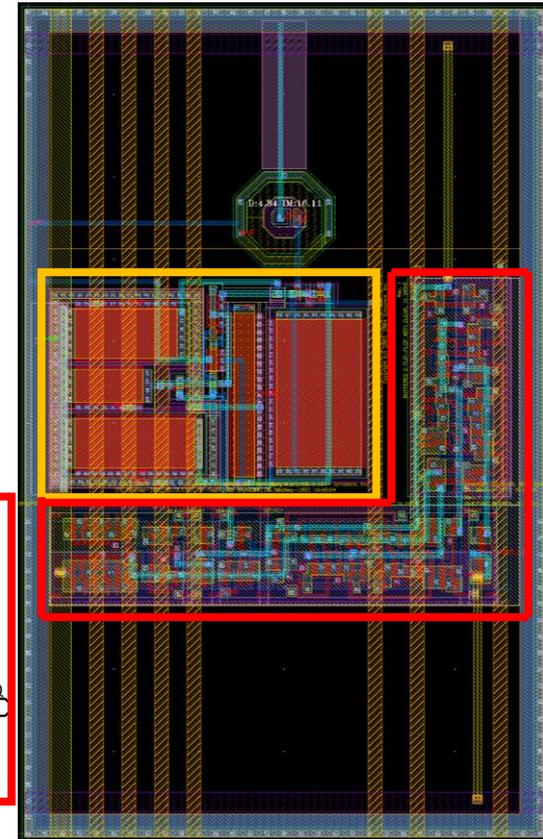
## ○ Front-end analogique (amplificateur et discriminateur)

- Basé sur l'architecture du front-end d'ALPIDE (CERN)
  - Participation de l'IPHC dans le design (A. Dorokhov)
  - Architecture faible bruit
  - Consommation faible
  - Discriminateur inclus
- Sortie binaire asynchrone
- Faible puissance  $\approx 112 \mu\text{W}$  (matrice)



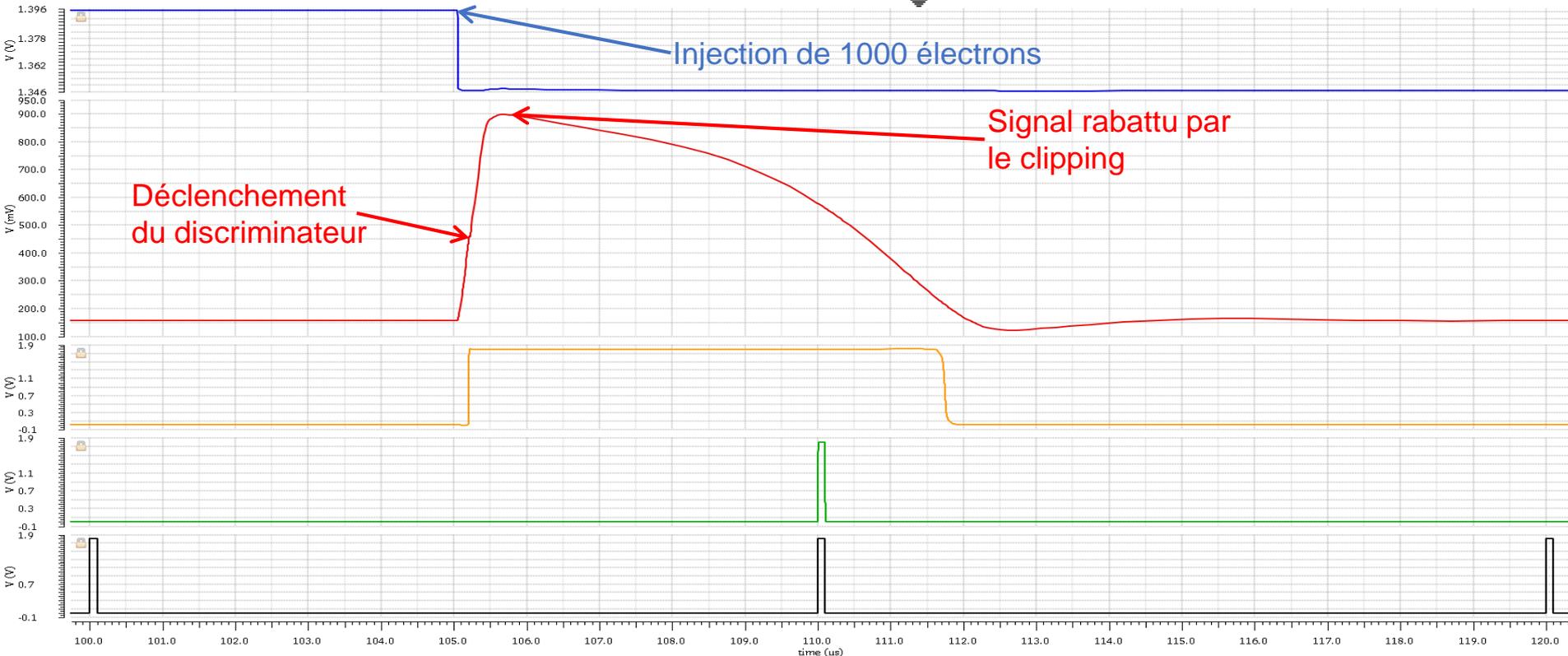
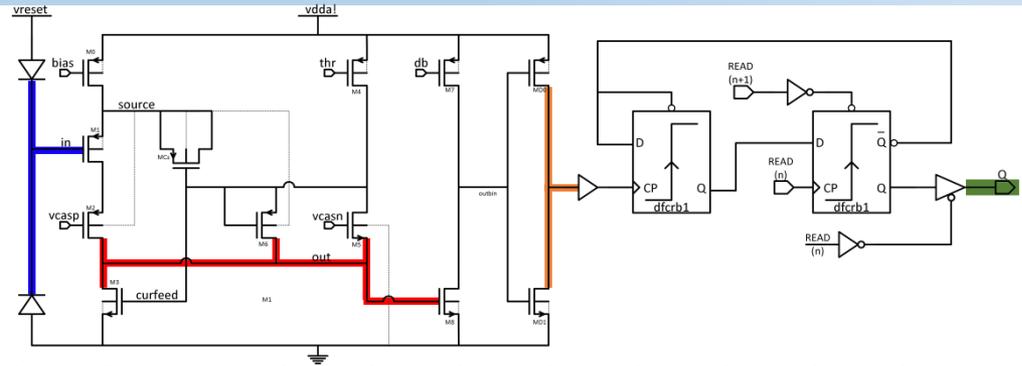
## ○ Mémoire

- Standard cells du fondeur: aucune contrainte de place
- Adapté au projet pour un ampli. existant
- Synchronisation pour lecture en rolling-shutter
- Un unique signal pour deux fonctions
  - Read
  - Reset (= Read de la ligne n+1)



# IMIC-B : Pixel (2/2)

- Déclenchement minimal: 132 électrons
- Rapport Signal/bruit > 140 (@ 1000 e-)
- Puissance < 80μW/matrice
- Restauration en ~10 μs
- Clipping: maîtrise de la durée du signal afin d'éviter la saturation des grands signaux
  - Non linéarité sans importance



# Stratégies de mesure

- **Amplificateur toujours actif: Aucun temps mort, consommation statique**
  - **L'information sur le hit est stocké dans la mémoire du pixel jusqu'à la lecture**
  - **2 modes de mesure permettant d'ajuster les vitesses de lecture et le mode de communication pour réduire la consommation (stockage et envoi « burst »):**
    - Intégration dans le pixel
      1. Information du hit stocké dans la mémoire du pixel pour un temps défini par l'utilisateur
      2. Lecture des pixels par rolling shutter et stockage dans la RAM n°1
      3. La RAM n°1 est lue et la RAM n°2 est en écriture (lecture/écriture alternée)
    - Intégration dans la mémoire
      1. Lecture des pixel en continu par rolling-shutter
      2. Accumulation des hits (sur 1 bit) dans la RAM n°1 pour un temps défini par l'utilisateur
      3. La RAM n°1 est lue et la RAM n°2 est en accumulation (lecture/écriture alternée)
  - **Temps de lecture d'une ligne : 1.6  $\mu$ s**
  - **Temps de lecture minimal d'une frame : 204.8  $\mu$ s**
  - **Temps d'accumulation maximal : 429.5 s (frames à intégrer sur 24 bits + prescaler de 8 bits)**
- ➔ **Acquisition en fonction de l'activité du radio-traceur**

# Réalisation

## ○ Design de IMIC

- 128 (lignes) x 16 (colonnes) de pixels de  $50 \times 30 \mu\text{m}^2$
- Surface totale :  **$12\,000 \times 610 \mu\text{m}^2$**
- Surface active :  $6\,400 \times 480 \mu\text{m}^2$
- 2 capteurs à sortie analogique avec leurs circuit de lecture : IMIC-A et IMIC-C
  - Architectures de pixels différents
- 1 capteur à sortie numérique avec des modes de lecture low-power: IMIC-B

## ○ Technologie : TowerJazz CIS 0.18

- Soumission MPW : 11/2015. Retour : 05/2016
- Produit sur 2 substrats :
  - Hi-Res EPI-18  $> 1\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$ : substrat standard pour le process CIS
  - Hi-Res Czochralski  $200\mu\text{m} @ 600 \Omega\cdot\text{cm}$ : Les  $\beta$  y produiront plus de signal ( $80 \text{ e}^-/\mu\text{m}$ ): sensibilité augmentée si substrat déserté.

# Caractérisations et post-traitement

- **PCB pour tests réalisés par le CPPM**

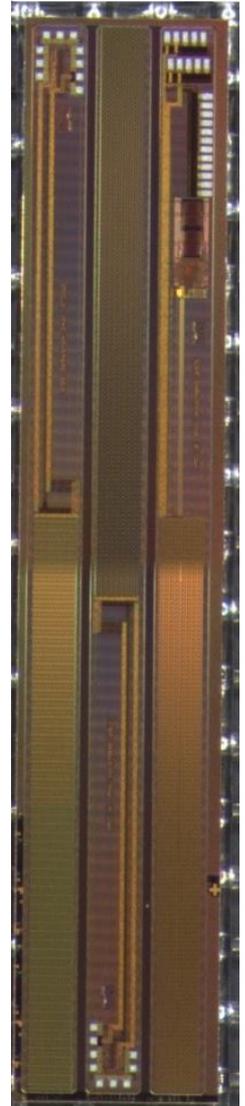
- En cours de fabrication
- Un PCB pour IMIC-A et IMIC-C
  - Adapté aux bancs de test IPHC
- Un PCB pour IMIC-B
  - Nécessite un microcontrôleur dédié (avec RF intégré)
  - Développement en amont du PCB pour les expériences



- **Caractérisations en labo avec Fe55 et Sr90**

- **Post-traitement après validation des capteurs :**

- Découpe des 3 prototypes
- (Thinning à 50  $\mu\text{m}$ )
- Parylénisation
  - Nouvelle caractérisation en laboratoire pour observer l'influence du traitement
  - Caractérisation du capteur dans un b cher d'eau avec  $\beta^+$  par **l'IMNC**



# Capteur dédié aux rayons-X de faible énergie au synchrotron SOLEIL

Designers : Fadoua Guezzi-Messaoud, Maciej Kachel



# Intérêt d'un CPS dédié à la détection des Rx

## ○ Energies disponibles à SOLEIL :

- < 1eV à 100keV
- Capteur pour les Rx mous: de 100eV à 7keV
  - Nécessite une épaisseur sensible de 50µm
  - Les Rx de plus faibles énergies atténués par la metallisation voire l'oxide: **illumination par l'arrière**
  - Collection de toutes les charges par champ électrique: **désertion totale du volume sensible**
  - Bruit < 10e<sup>-</sup>
  - Photon X de 100eV
    - 27e<sup>-</sup> générés
    - 50% atténuation dans 2µm de Si

## ○ Besoin d'un capteur avec une granularité fine

- **Expériences finales : cristallographie**
- Pitch < 25µm pour garantir la résolution spatiale
- Grande surface sensible > 1 cm<sup>2</sup>

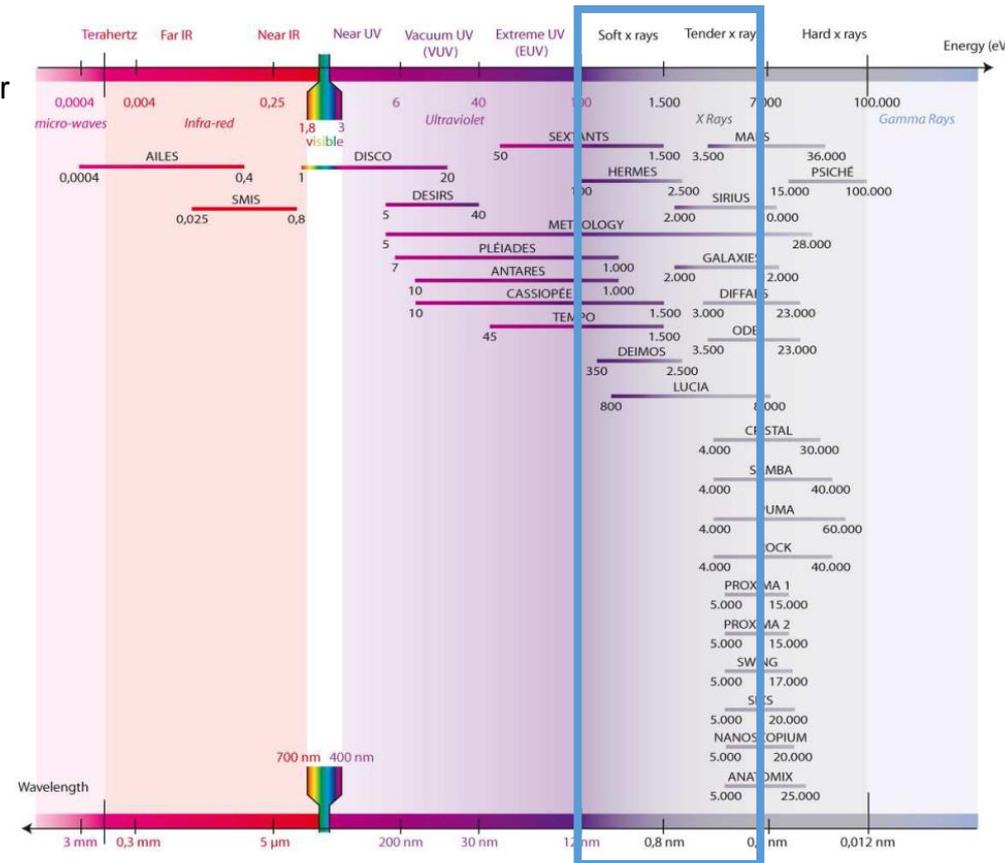
## ○ Taux de comptage supérieur aux CCDs

- **Vers 10<sup>7</sup> photons/pixel/seconde (10<sup>4</sup> pour les 1<sup>ers</sup> prototypes)**

→ Flux important

## ○ Tolérance aux radiations ← désertion

## ○ Prix < capteurs hybrides



Gammes d'énergie disponibles par ligne au synchrotron SOLEIL  
(source : <http://www.synchrotron-soleil.fr/Recherche/LignesLumiere>)

# Exemples d'hybrides

Présentation IPHC - M. Kachel 04/2014

## ○ XPAD 3

- Two versions XPAD3S, XPAD3C
- Technology : IBM 0,25  $\mu\text{m}$
- Pixel Matrix : 80 x 120
- Pixel size : 130 x 130  $\mu\text{m}^2$
- ENC : 100-160e-
- Counting rate :  $10^6$  ph/pix·s
- Minimum threshold: 4keV

Source : P. Pangaud et al. NIM A. , Vol 571, issue 1-2, Feb 2007, esrf.eu

## ○ EIGER3

- The follower of the Pilatus family
- Technology : UMC 0.25  $\mu\text{m}$
- Pixel Matrix : 256 x 256
- Pixel size : 75 x 75  $\mu\text{m}^2$
- ENC : 120-160e-
- Count rate :  $2 \cdot 10^6$  ph/pix·s
- Minimum threshold: 2.5 keV

Source: R. Dinapoli "EIGER characterization results " PIXEL 2012 Workshop, Inawashiro, Japan, www.psi.ch

## ○ MEDIPIX3

- Developed by a big collaboration at CERN
- Technology : IBM 0.13  $\mu\text{m}$
- Pixel Matrix : 256 x 256
- Pixel size : 55 x 55  $\mu\text{m}^2$
- ENC : ~100 e-
- Counting rate : below  $10^6$  ph/pix·s
- Minimum Threshold : 3.5 keV
- (6 keV in charge summing mode)

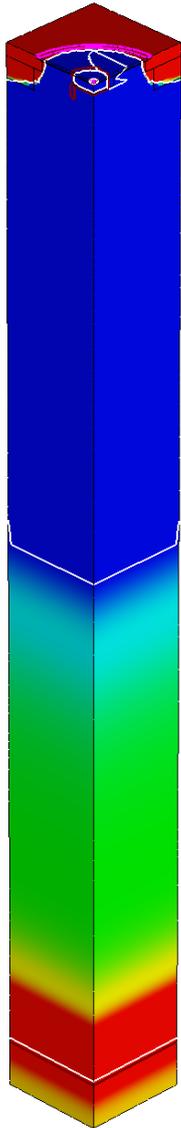
Source: X. Llopert " Experience with the design and submission of the Medipix 3 pixel readout chip in 0.13  $\mu\text{m}$  CMOS "

## ○ Mönch

- Smallest pitch in hybrids 25  $\mu\text{m}$
- Integration mode
- Technology : UMC 0.11  $\mu\text{m}$
- Pixel Matrix : 160 x 160
- Pixel size : 25 x 25  $\mu\text{m}^2$
- Frame rate : 400 fr/sec
- ENC : 60 e-

Source: R. Dinapoli "Charge integration detectors for X-ray applications"

# Pixel compatible avec la désertion à tensions moyennes



- **Diode de collection avec couplage AC avec l'amplificateur**

- Polarisation (par l'avant) de la diode de collection à 15-20 V & Substrat haute résistivité : augmentation du volume déserté
  - Collection des charges par un fort champ électrique
    - Augmentation du rapport signal/bruit
    - Collection dans un seul pixel
  - Augmentation de la radiotolérance
- Couplage AC permet de repasser vers 1.8V

- **← Figure TCAD:**

- ¼ de pixel simulé à une tension de 16V et dopage très faible et épaisseur de 100µm
  - Pitch 22µm et diamètre de la diode: 5µm
- Concentration maximale de porteurs minoritaires
- Concentration de porteurs minoritaires <10% de la concentration maximale de dopants de la couche sensible

→ Désertion sur 50 µm

- **Amplificateur →**

- 2 versions implémentées
  - Schéma simplifié
- Gestion de la puissance
- Double échantillonnage corrélé (CDS) par clamping

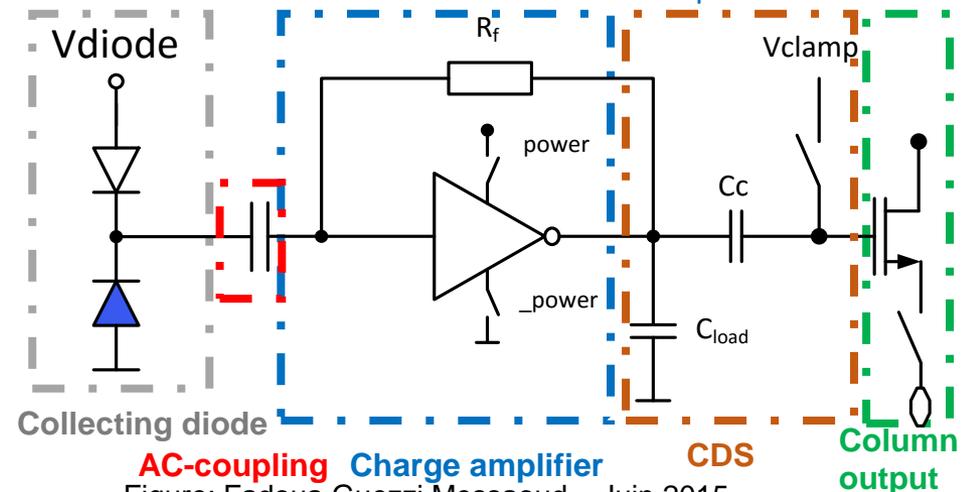


Figure: Fadoua Guezzi Messaoud – Juin 2015

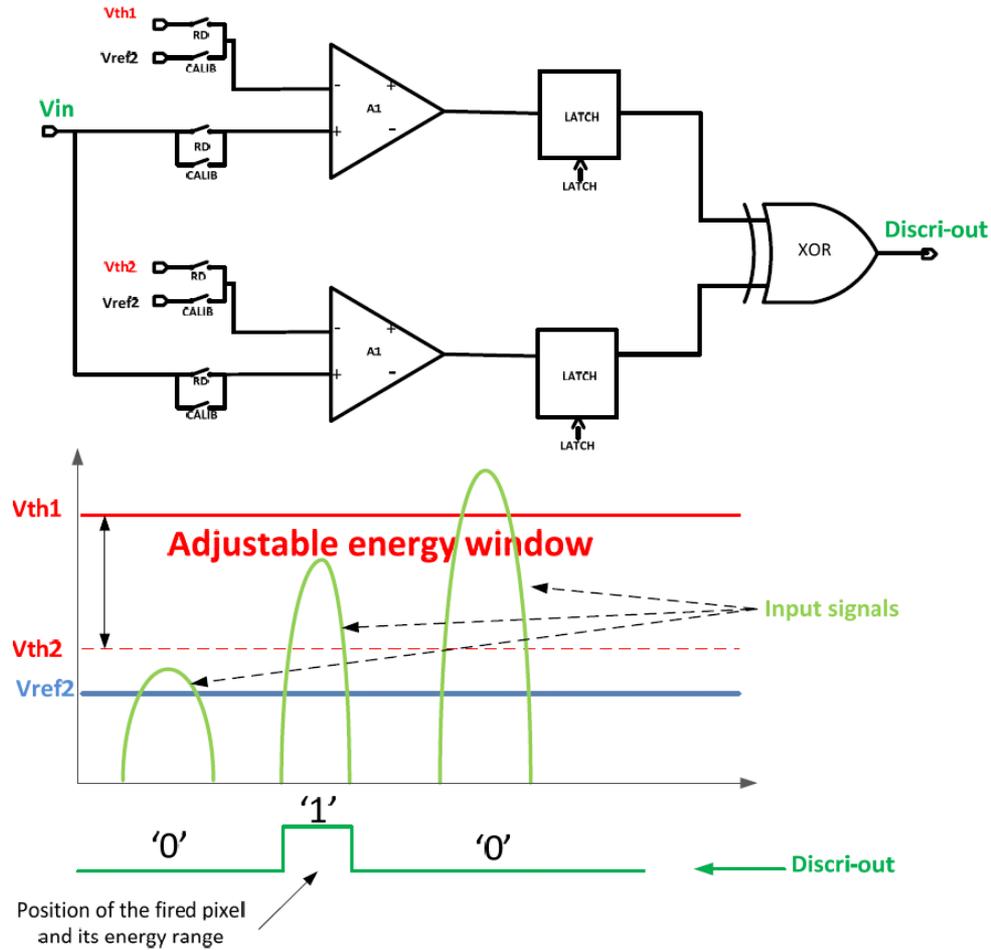
# Fenêtre d'Énergie

- **Deux discriminateurs identiques :**

- Sondent la tension sur la colonne post CDS
- Tension  $\propto$  Énergie du photon
- Se déclenchent à des seuils différents
- Architecture bas bruit
- Pas de 25 mV
- Information binaire sur le dépassement

- **Porte XOR**

- Information du fenêtrage en énergie
  - Observation d'image dans une gamme d'énergie
- '1' si  $V_{th1} < V_{in} < V_{th2}$
- En faisant varier les  $V_{th}$  (fenêtre glissante)
  - Reconstruction du spectre: caractérisation supplémentaire du circuit

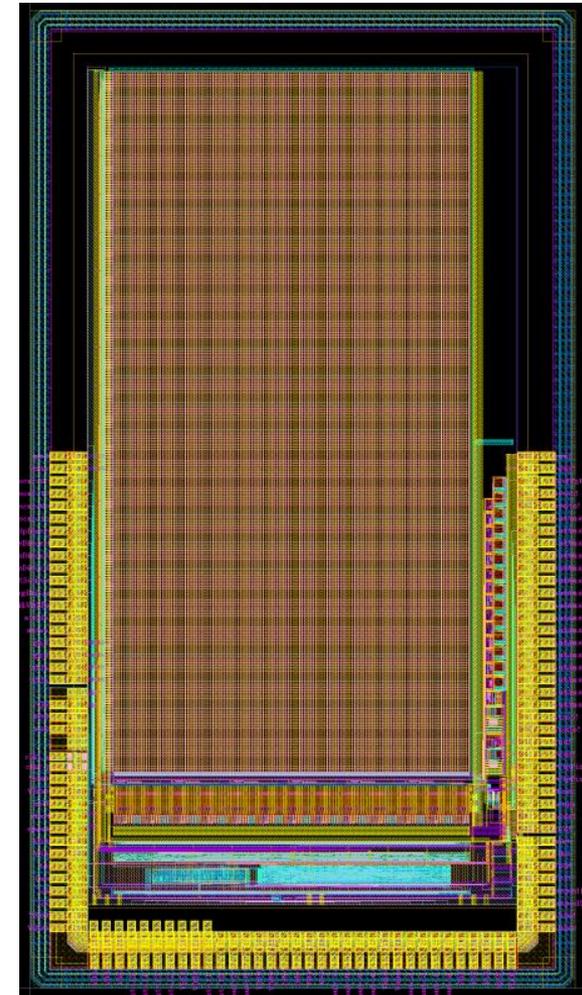


# 1<sup>er</sup> prototype : MIMOSA 22 THR-SX

- **Point de départ : structure MIMOSA 22**
  - M22: Structure de référence à l'IPHC
    - Pading / **géométrie compatible avec les bancs de test** de l'IPHC
    - Test de structures dans un bloc versatile
  - THR : Process TowerJazz 0.18 sur substrat haute résistivité
  - SX : Synchrotron / Rayons X
- **Prototype de petite taille: caractéristiques**
  - 256 (lignes) x 128 (colonnes) de pixels de 22x22  $\mu\text{m}^2$  avec **désertion**
  - Surface totale : 5.6 x 4.0 mm<sup>2</sup>
  - Surface active : 5.6 x 2.8 mm<sup>2</sup>
  - **Fenêtre d'énergie grâce à 2 discriminateurs avec des seuils différents.**
  - Lecture en rolling-shutter avec high frame rate

f(MHz)	Temps/ligne (ns)	Temps/frame ( $\mu\text{s}$ )	$10^4\text{ph/pix/s}$
80→160	200→100	51.2→25.6	1→4

- **Mode 8 lignes (rolling shutter local)**
  - 1.6 à 0.8  $\mu\text{s}/\text{frame}$
  - Data numérique en sortie de chip
  - 8 Sorties analogiques (8 colonnes) pour caractérisation
- **Technologie : TowerJazz CIS 0.18**
  - Soumission MPW : 11/2015. Retour : 05/2016
  - Produit sur 2 substrats :
    - Hi-Res EPI-18 > 1k $\Omega\cdot\text{cm}$ : substrat standard pour le process CIS Tower
    - Hi-Res Czochralski 200 $\mu\text{m}$  > 600  $\Omega\cdot\text{cm}$ 
      - Affiné à 50 $\mu\text{m}$  + désertion = volume intégralement sensible



# Caractérisations et post-processing de M22THR-SX

- **Caractérisation en laboratoire (en cours)**
  - Caractérisation des nouveaux pixels via les 8 sorties analogiques : mesures de gain, bruit, clusters
    - Fe55, Sr90, laser
  - Caractérisation numérique : S-curve et taux de faux hits sur les sorties digitales
- **Caractérisation en faisceau @ SOLEIL (~décembre)**
  - Taux de comptage
  - Résolution spatiale
  - Sensibilité en énergie
- **Post-processing pour illumination par l'arrière**
  - Capteur sur substrat CZ affiné à 50 $\mu$ m
    - Avec désertion totale : collection des énergies les plus faibles par l'arrière
  - Back-side processing
    - Implantation ionique et recuit laser

# Designs finaux

- **Des sondes intra-crâniennes explorant des architectures et stratégies permettant une faible dissipation de puissance**
  - Facteur de forme inédit
  - 2 architectures analogiques simples peu gourmandes en énergie
    - Une version avec 3 diodes/pixel afin d'augmenter la surface couverte
  - 1 architecture numérique avec une architecture bas bruit / basse consommation et des modes de lectures permettant une faible dissipation d'énergie avec le moins de connections possible



- **Un prototype de capteur pour les rayons X mous au synchrotron SOLEIL**
  - Pixels permettant la désertion par l'avant
  - Amplificateur bas-bruit avec double échantillonnage corrélé par clamping
  - Fenêtrage en énergie



---

# Merci