



LA DÉTECTION DE L'INFINIMENT PETIT AU C4PI



Centre de Compétences de
Capteurs CMOS à Pixels Intégrés (C4PI)



De quoi allons-nous parler ?



G π ⁴

- ❑ Qui sommes-nous ?
- ❑ Que voulons-nous mesurer ?
- ❑ Comment le faisons-nous ?

Notre orientation :
la physique subatomique

IPHC
Institut Pluridisciplinaire
Hubert CURIE
STRASBOURG

Des disciplines variées pour étudier la nature sous toutes ses formes afin de comprendre l'univers et tout ce qui y vit.

Qui sommes-nous ?

Une équipe complémentaire & cohérente



Formation

PhD Master Licence
IUT/BUT Apprentissage

E. Sacchetti - Doc2 | H. Shamas - Doc2

G. Bertolone - IR

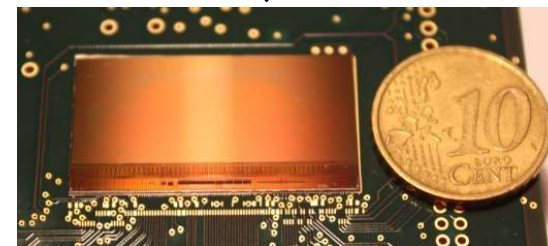
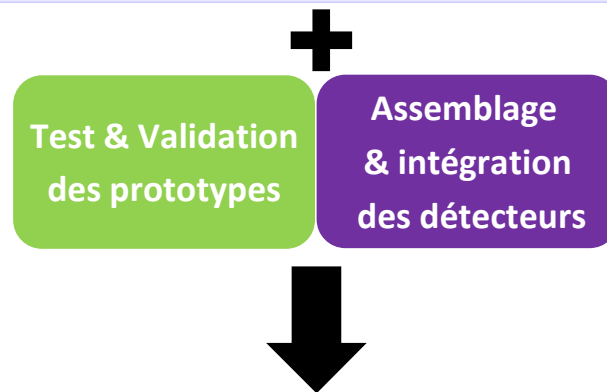
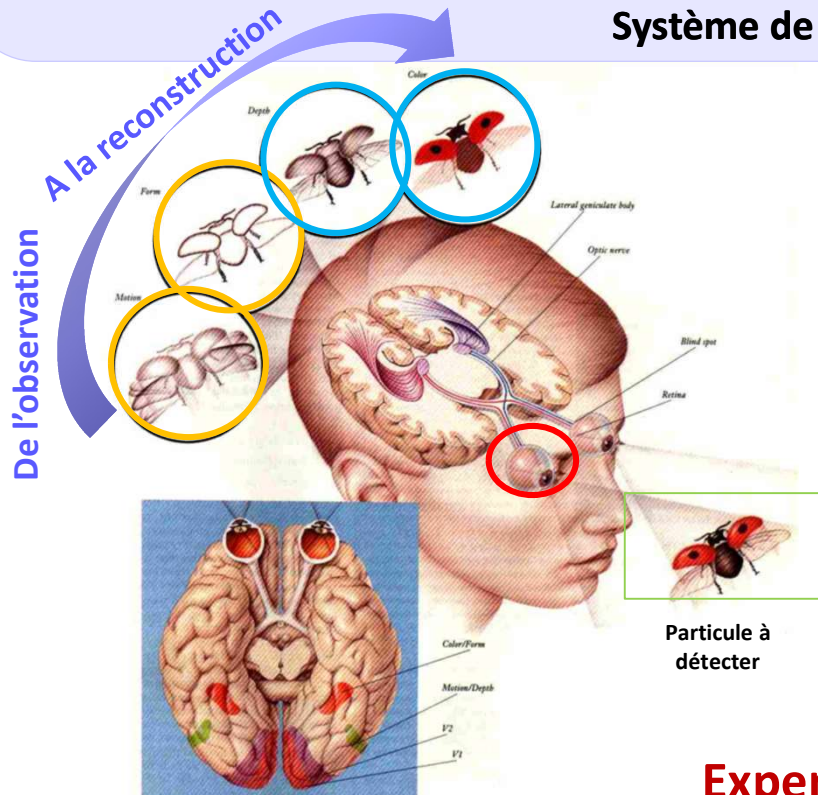
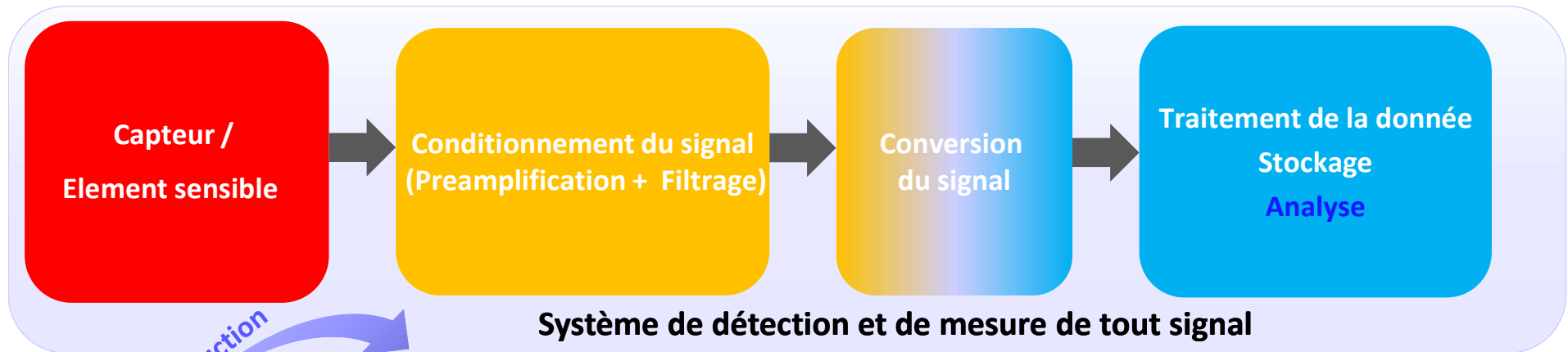
C. Lemoine (CERN) - Doc3

G. Chevrier - Apprenti BUT MP2

T. Jacques - Apprenti BUT GEI3

Objectif: détecter et étudier les traces de particules de très hautes énergies suite aux collisions sur accélérateur

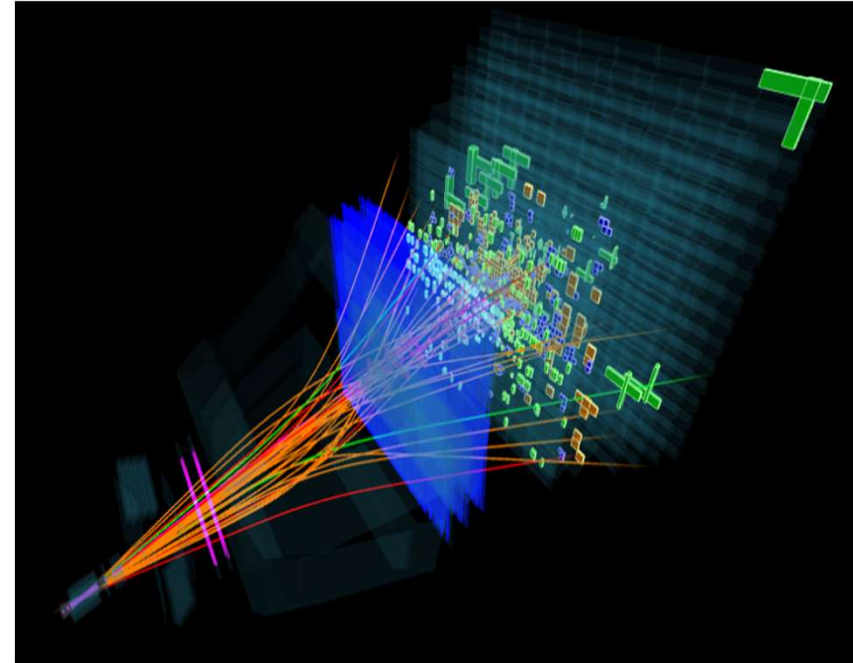
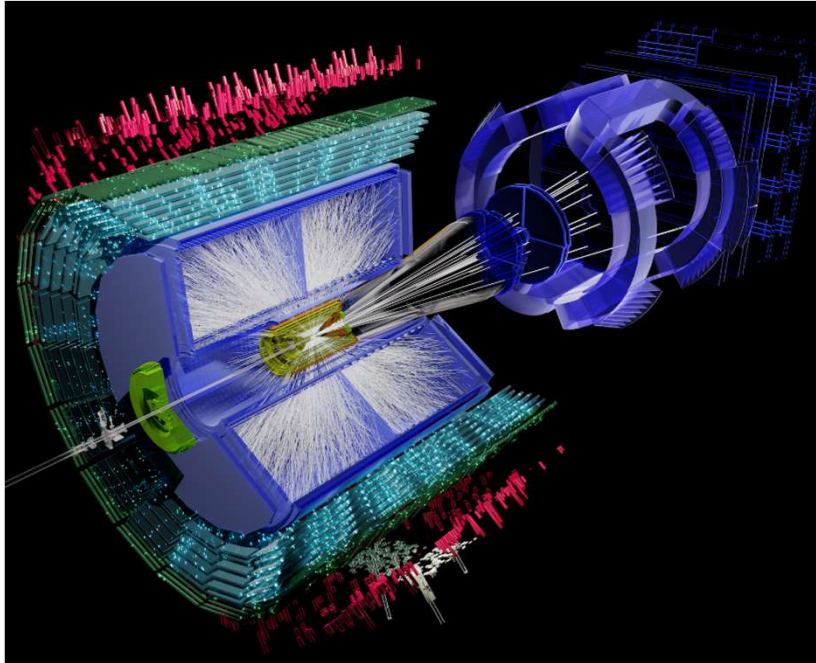
Pourquoi sommes-nous si nombreux?



Capteur MIMOSIS, 2020

Expertise requise pour chaque nœud de la chaîne

Que voulons-nous mesurer ?



Gerbes de particules dans le détecteur ALICE à l'occasion des premières collisions entre des ions de plomb de 2024 © ALICE/CERN (gauche), Collision enregistrée par LHCb (droite)

Taux d'événements important

Tout détecter !

Une efficacité de détection élevée

Discerner entre deux événements voisins

Une résolution spatiale élevée

Détecter des millions d'événements/s

Une résolution temporelle élevée

Durée de vie de l'expérience

Une forte tolérance aux radiations

Contraintes physiques

Compromis entre plusieurs contraintes !

Applications scientifiques
Imagerie X



Détecteur ultra-mince

Physique subatomique

Résolution spatiale
~ (1-2 μm)

~ ($\frac{1}{50}$ le diamètre d'un cheveu)

Marché grand public



Taux de détection

Puissance dissipée faible
(~50 mW/cm^2)

Notre axe de R&D:

Applications scientifiques très hautes énergies

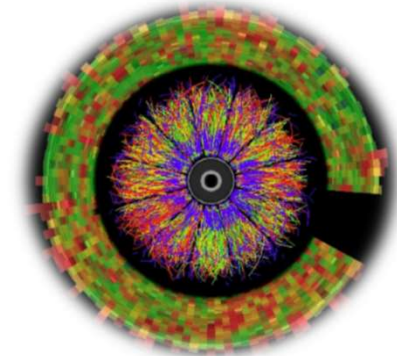
Applications tierces

Applications scientifiques type synchrotron



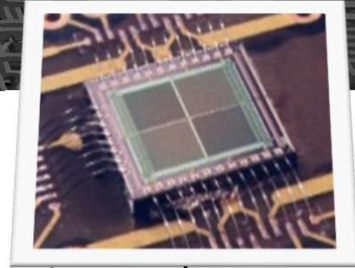
Tolérance aux radiations

Résolution temporelle
~ **qqc millions images /s**



Solution C4PI : Les MAPS

- Les capteurs monolithiques CMOS à pixels sont apparus au début des années 90 en tant qu'imageurs
- En 1999 : R&D initiée à IPHC sur les capteurs CMOS pour la physique subatomique



La preuve de concept:
MIMOSA-1, 2001
3x3 mm²

CMOS

Monolithic

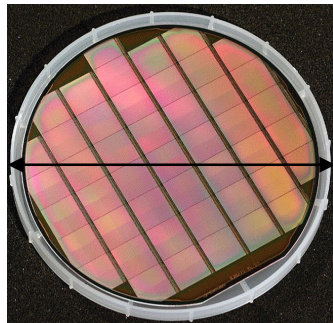
Active

Pixel Sensors

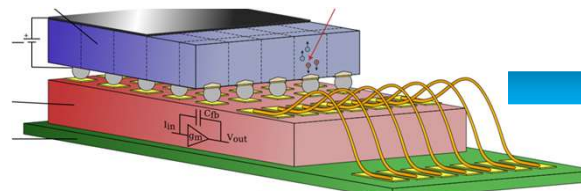
Technologie circuits intégrés

Détection & traitement intégrés au même substrat

Amplification & Traitement dans le pixel



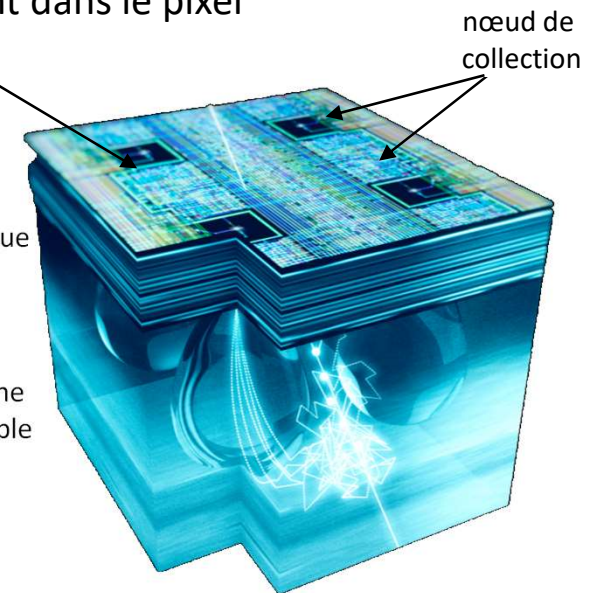
Wafer MIMOSA 5 (2001)



Capteur hybride avec bump-bonding

Couche électronique

Couche sensible



2x2 pixels ALPIDE (2016)
~50x50 μm²

en diamètre



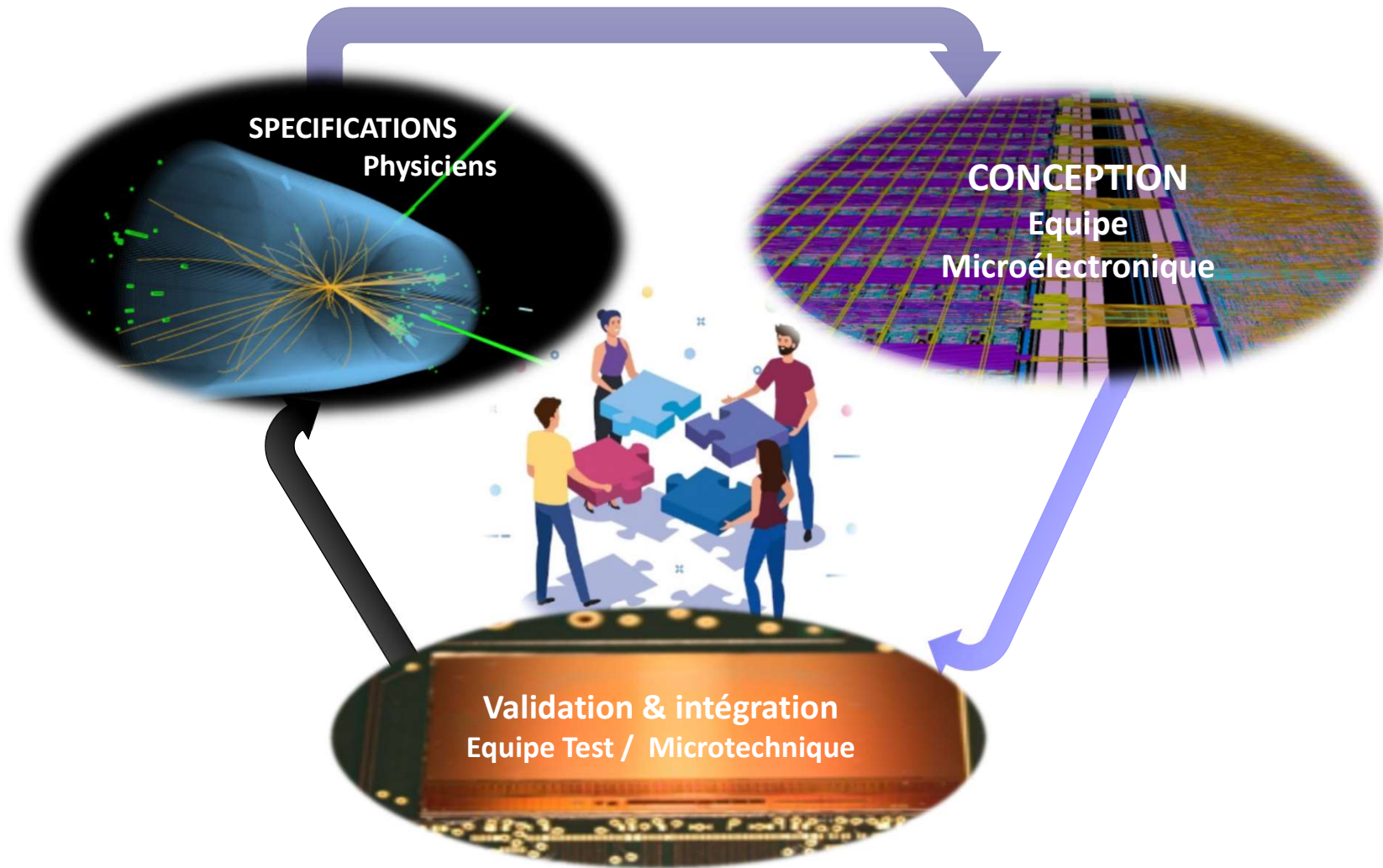
en épaisseur

$\frac{25}{1000}$



~30 Capteurs
85 millions
Transistors
/ capteur

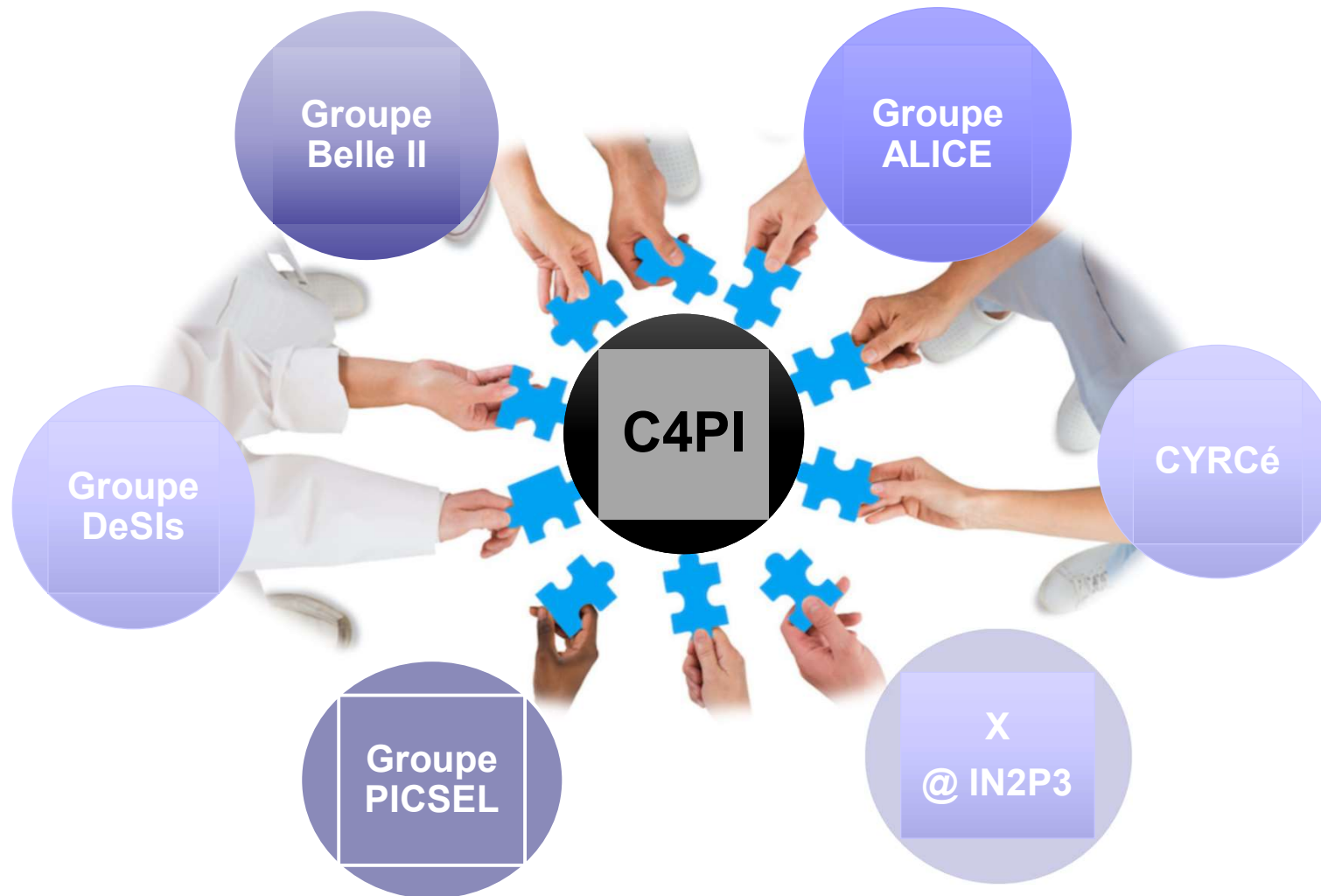
MAPS : cycle de développement



MAPS : début de l'histoire ...

SPECIFICATIONS
Physiciens

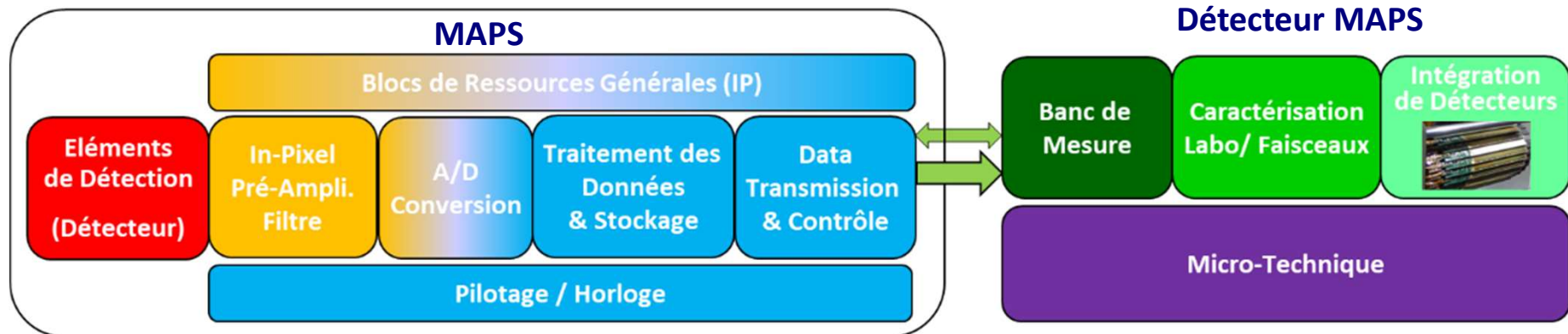
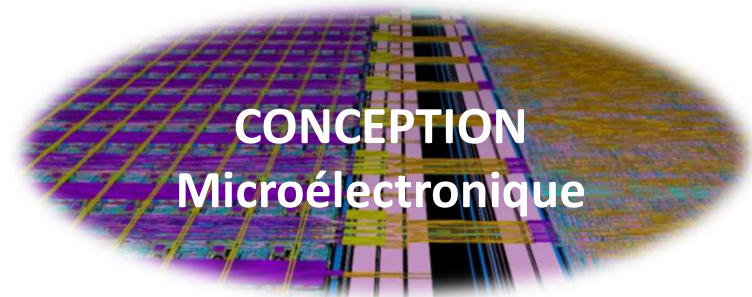
Nouveau projet de physique = nouveau détecteur MAPS



MAPS : phase de développement (1)

■ Nouveau détecteur : cahier des charges

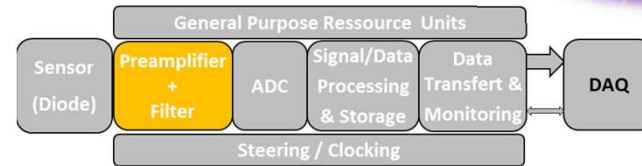
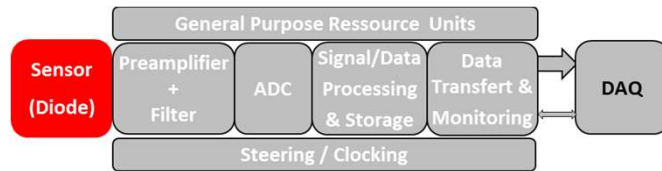
- ↗ Taille de la matrice
- ↗ Architecture de lecture et d'alimentation
- ↗ Fonctions intégrées dans le pixel
- ↗ Technologie de fabrication
- ↗ Ressources impliquées
- ↗ Différentes phases clés (temps de développement, prototypes ...)



Chaque étape nécessite une expertise et de l'art ...

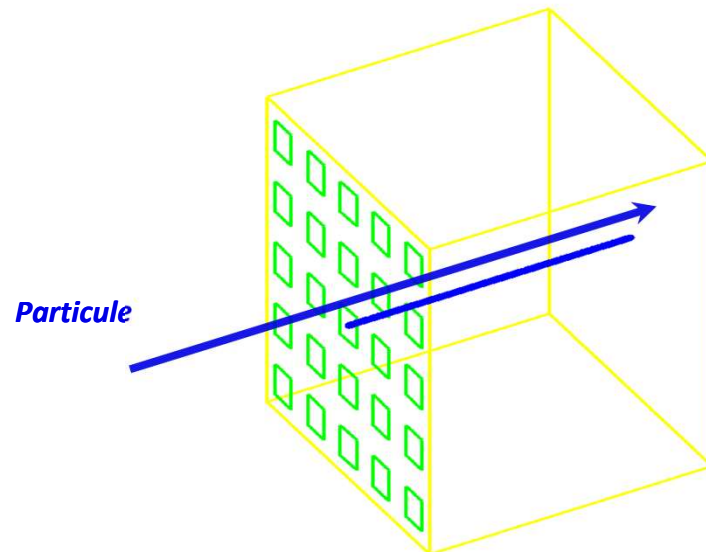
MAPS : phase de développement (2)

CONCEPTION
Microélectronique



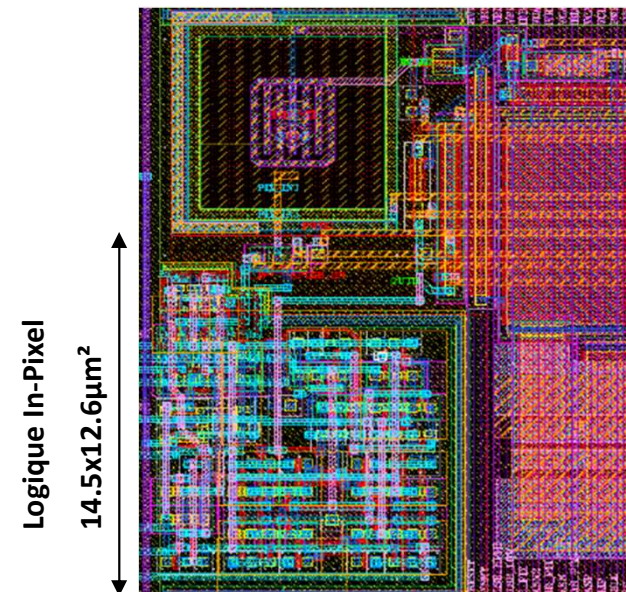
1 Collection de charge

- ↖ Taille de l'élément de detection : diode
- ↖ Sensibilité à la particule unique



2 Préamplification dans le pixel

- ↖ Amplification proche pixel
- ↖ Rapport signal à bruit
- ↖ Filtrage de bruit (CDS ...)

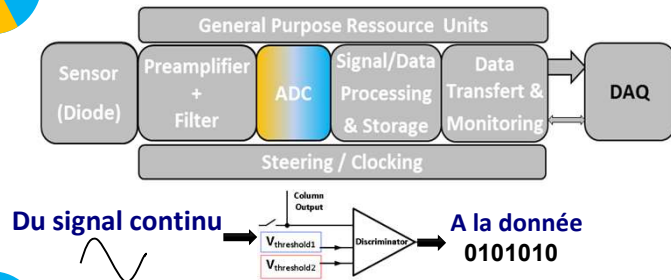


MIMOSIS (Diode+FE + Logique In-pixel)
→ ~ 90 transistors

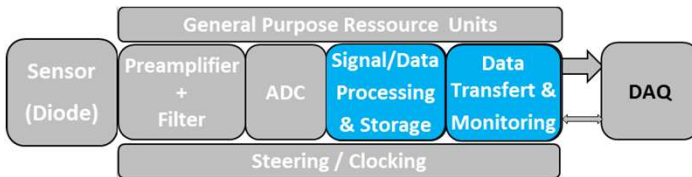
MAPS : phase de développement (3)

CONCEPTION
Microélectronique

3 Conversion analogique numérique



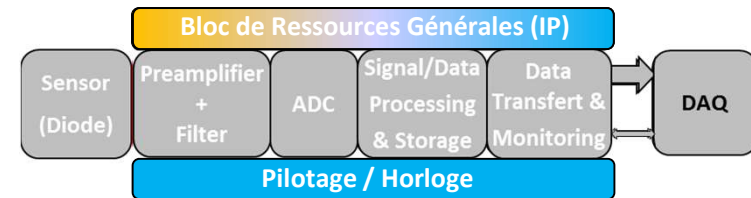
4 Traitement numérique de la donnée



↳ Traitement embarqué on-chip :

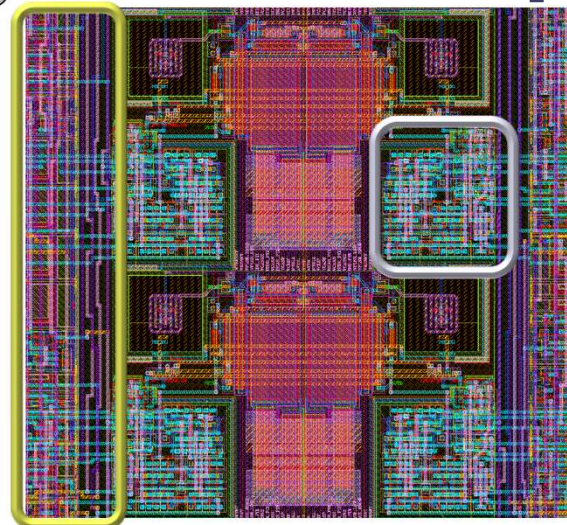
- Acheminement des données
- Réduction du taux de données
- Interprétation des données ...

5 Périphérie & ressources communes



↳ Mise en communication de tous les blocs :

- Distribution de l'alimentation
- Distribution de l'horloge
- Protocole de communication
- Pilotage du circuit...

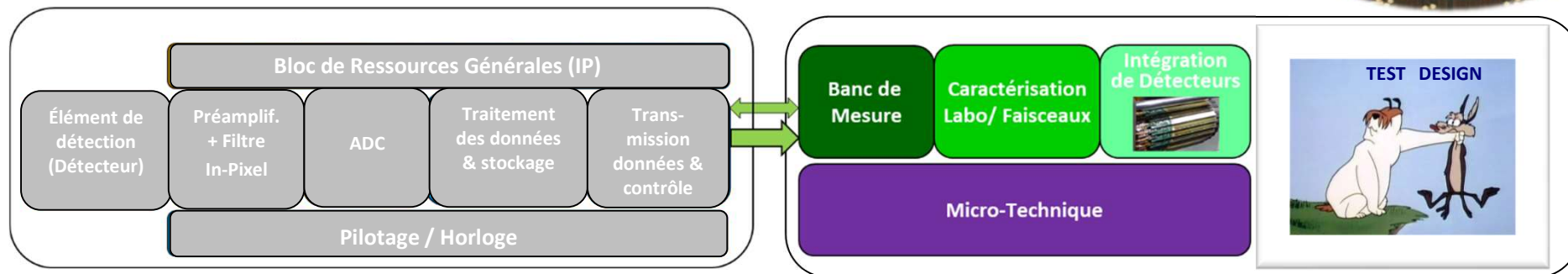


*MIMOSIS AC-coupled
Memories and part of the priority encoder logic → ~ 600 transistors*

↓
**Envoi en fonderie
(TOWER)
≈ 200-500
kEUR/an**

MAPS : validation & intégration

Validation & intégration
Equipe Test /
Microtechnique

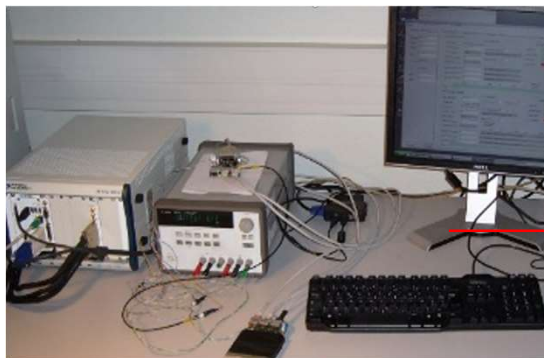


■ Tests & caractérisation

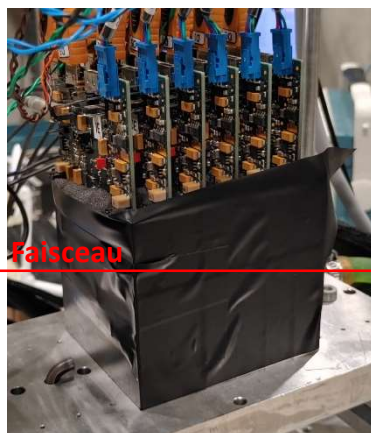
- ↪ Conception des bancs de tests / mesure
- ↪ Caractérisation du détecteur MAPS
- ↪ Déploiement des MAPS sur les sites d'expériences

■ Microtechnique : Intégration des MAPS

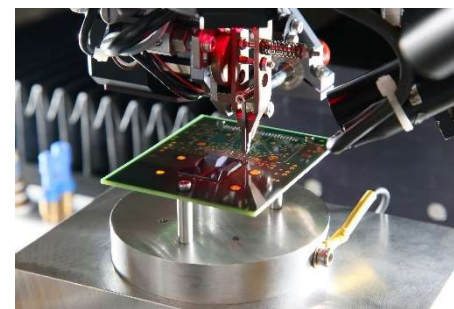
- ↪ Conception et assemblage PCB
- ↪ Assemblage des modules de détection
- ↪ Activité pour les projets C4PI et en prestation



Banc de test d'un capteur MAPS au laboratoire



Télescope de faisceaux :
4 MAPS de référence
2 MAPS caractérisés

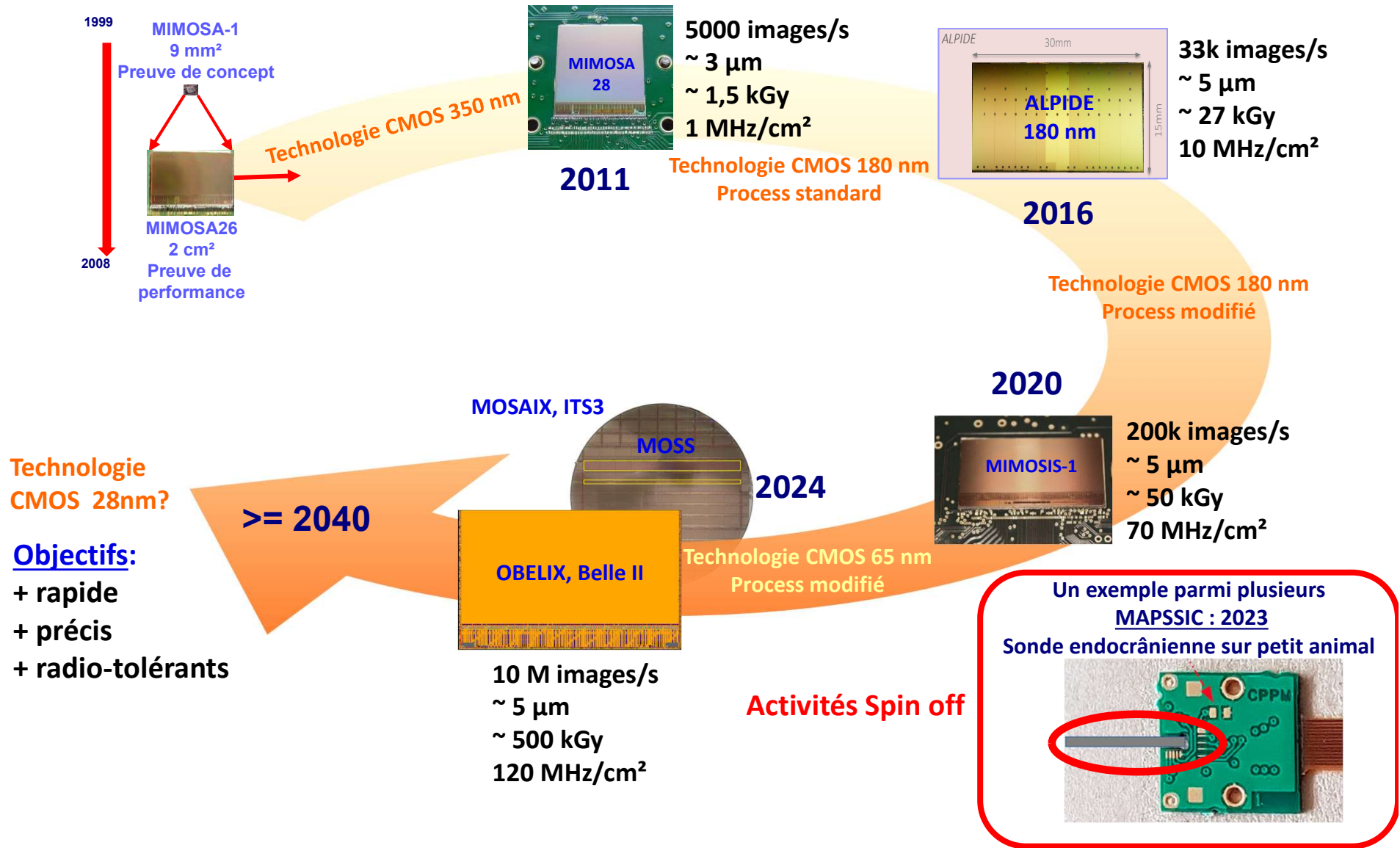


Bonding d'un MAPS sur circuit imprimé



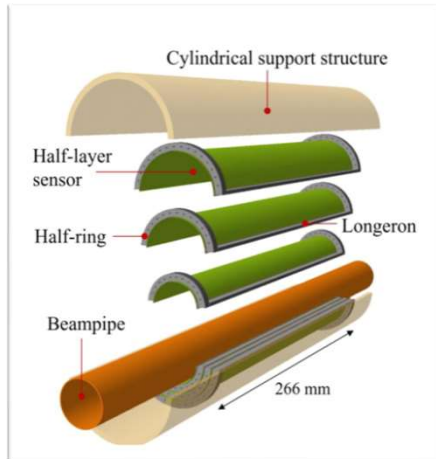
Assemblage du détecteur PLUME (Mimosa 26)

MAPS : performance, diffusion, complexification

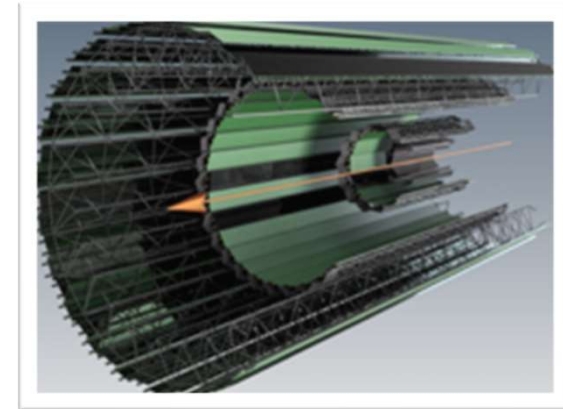


MAPS : défis actuels et à venir ...

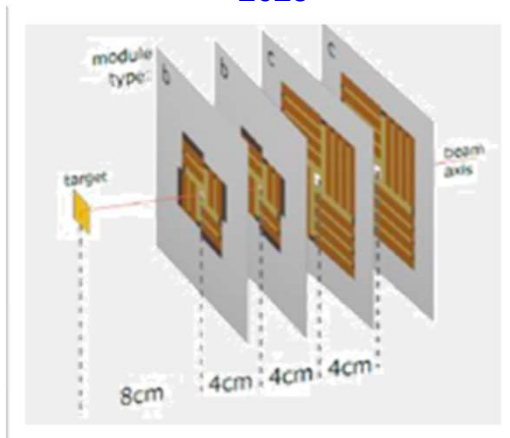
ALICE – ITS3
→2027



Belle II
→2032



CBM
→2028



La lumière au bout
de la réalisation ...

**Collisionneur Futur
du CERN ee~2045**



C4PI : une expertise reconnue

Prix « Expertise Recherche » de l'Unistra, septembre 2024

& Cristal collectif du CNRS, Novembre 2024



Merci de votre attention

"La patience et la persévérance viennent à bout de tout." – Jean de La Fontaine