

# Applications et développements actuels des capteurs à pixels CMOS

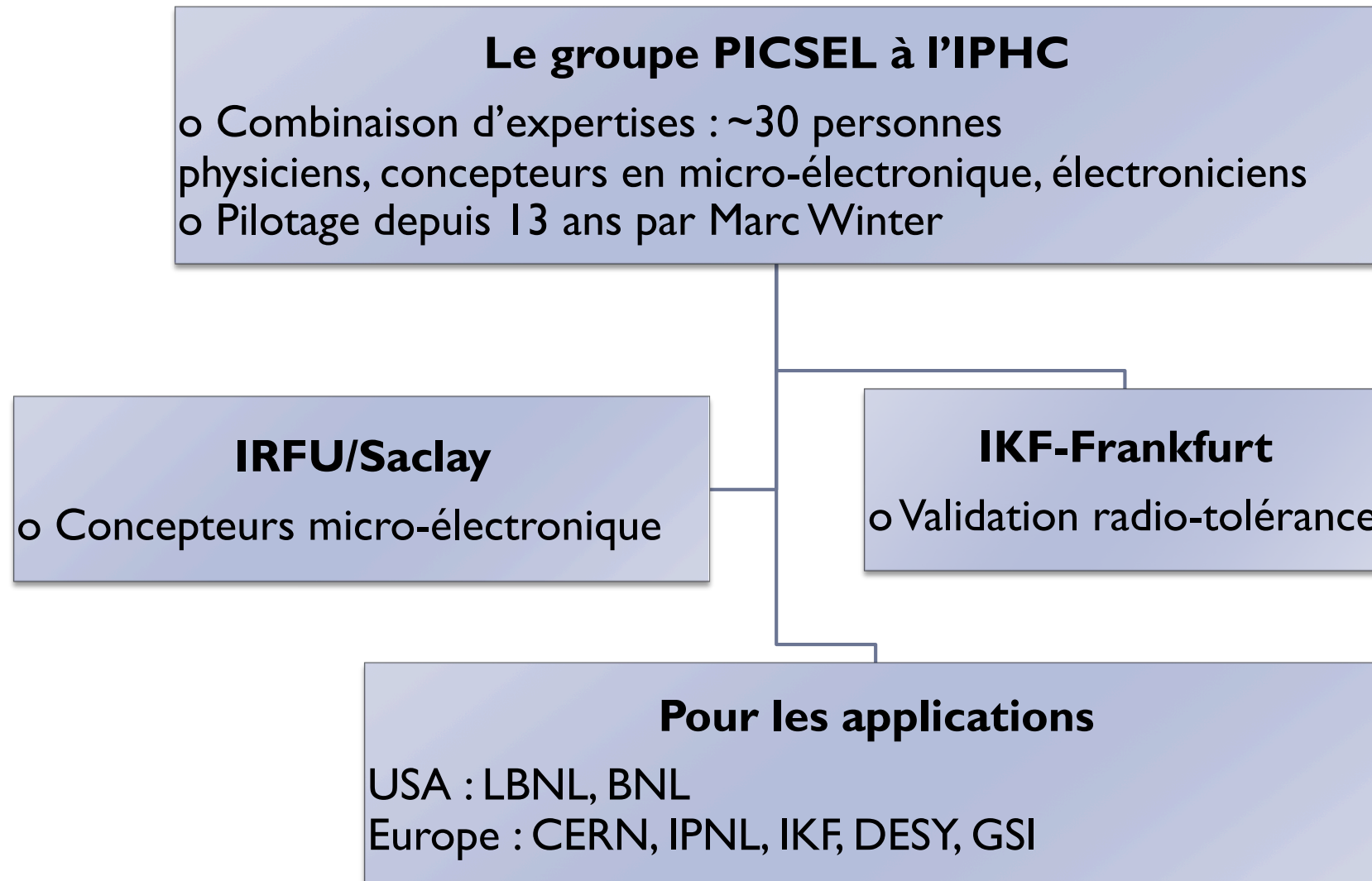
Séminaire au LAPP, 11 janvier 2013

Jérôme Baudot

- ▶ Dét. de vertex et technologie silicium
- ▶ Capteurs à pixels CMOS (CPS) : MIMOSA
- ▶ Intégration des CPS
- ▶ Voies de développement des CPS
- ▶ En dehors des dét. de vertex
- ▶ Applications non-subatomiques



## « team spirit »



## Dét. de vertex et technologie silicium

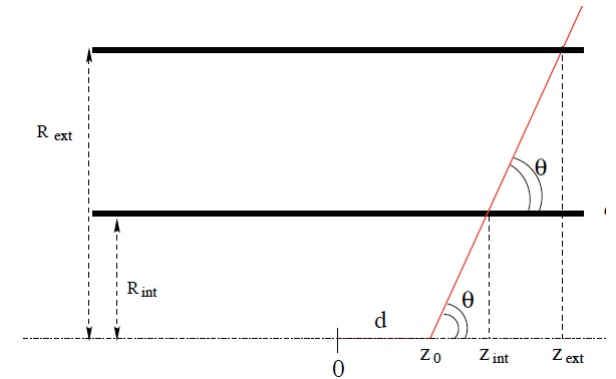
- ▶ Les paramètres principaux
- ▶ Comparaison de besoins variés



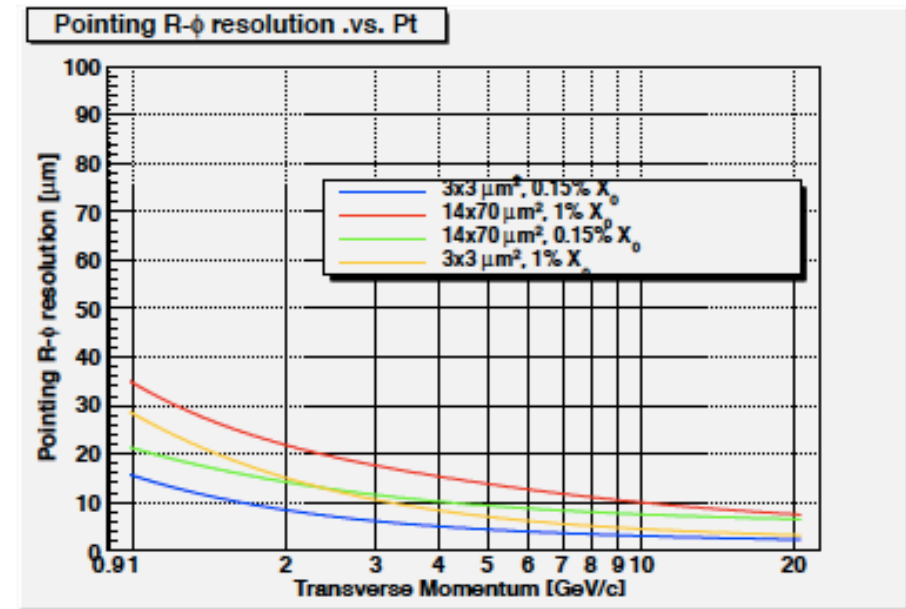
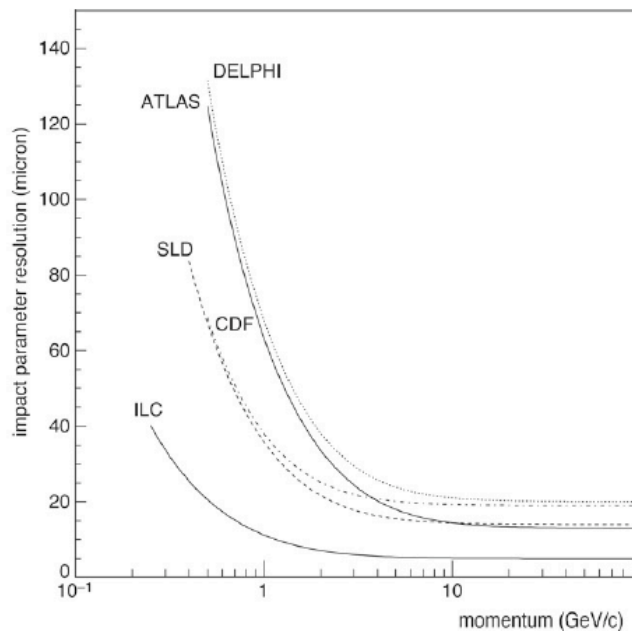
# Performance d'un dét. vertex

## ► Paramètre d'impact

- Résolution intrinsèque de chaque couche  $\sigma_{ext,int}$
- Épaisseur (budget) de matière  $\sigma_\theta$



$$\sigma_{IP} \propto \frac{\sqrt{R_{ext}^2 \sigma_{int}^2 - R_{int}^2 \sigma_{ext}^2}}{R_{ext} - R_{int}} \oplus \frac{R_{int} \sigma_{\vartheta(ms)}}{p \sin^2(\theta)}$$







- ▶ **Tolérance aux radiations**
  - ▶ Perte d'efficacité & de sensibilité
  
- ▶ **« Vitesse »**
  - ▶ Taux de comptage = nbre de part./unité de temps
  - ▶ Résolution temporelle = capacité à étiqueter l'arrivée de la particule
  - ▶ Temps d'intégration du signal
  - ▶ Temps de lecture des informations
    - ▶ éventuellement génère un temps mort
  
- ▶ La relation de ces grandeurs dépend de la chaîne de lecture

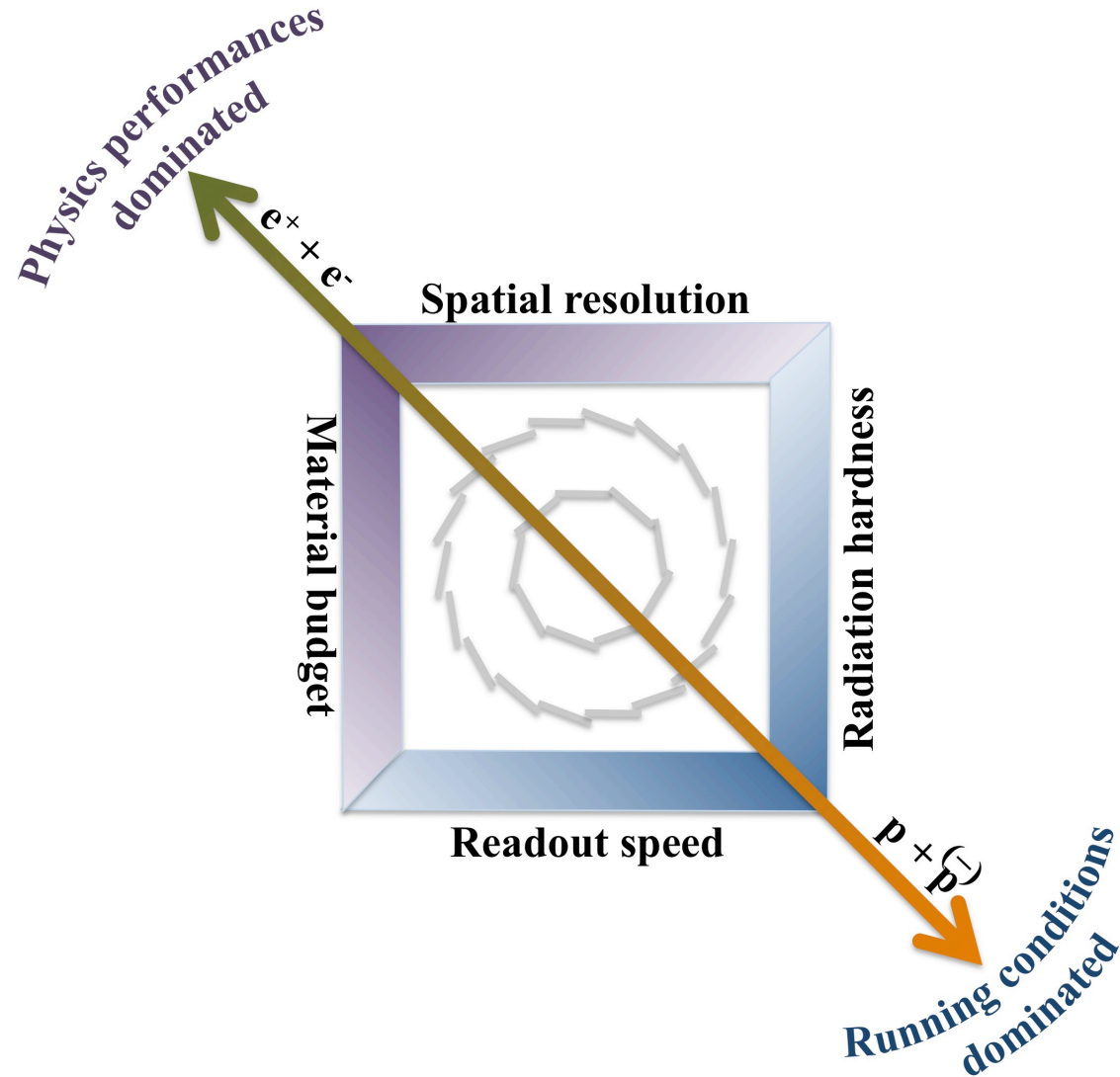


# Les besoins

|                                                              | SLD      | CMS                | STAR                     | CBM                  | ALICE                  | Super Flavor         | ILD                   | CLIC                 |
|--------------------------------------------------------------|----------|--------------------|--------------------------|----------------------|------------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|
| collision                                                    | $e^+e^-$ | p+p                | A+A<br>p+p               | A+A                  | A+A<br>p+p             | $e^+e^-$             | $e^+e^-$              | $e^+e^-$             |
| résolution<br>( $\mu\text{m}$ )                              | 2        | 13                 | < 10                     | ~5                   | ~4                     | < 10                 | $\lesssim 3$          | $\lesssim 3$         |
| Budget matière<br>(% XO)                                     | 0.4      | ~2                 | ~0.3                     | ~0,3                 | ~0.3                   | ~0.5                 | $\lesssim 0.3$        | $\lesssim 0.3$       |
| densité impacts<br>( $10^6 \text{ s}^{-1}\text{cm}^{-2}$ )   |          | O(20)              | O(0,1)                   | O(1-10)              | O(1)                   | 100                  | O(0,2)                | O(1)                 |
| temps<br>d'intégration                                       | 0,2 s    | 25 ns              | 200 $\mu\text{s}$        | ~10 $\mu\text{s}$    | <40 $\mu\text{s}$      | ~1 $\mu\text{s}$     | O(10) $\mu\text{s}$   | O(10)ns              |
| radio-tolérance<br>(Mrad)<br>( $n_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ ) | -        | 100<br>< $10^{15}$ | O(0,2)<br>O( $10^{12}$ ) | O(30)<br>< $10^{14}$ | O(1)<br>O( $10^{13}$ ) | O(20)<br>< $10^{13}$ | O(0,1)<br>< $10^{12}$ | O(20)<br>< $10^{14}$ |
| Puissance diss.<br>(mW/cm <sup>2</sup> )                     | -        |                    | 0.1                      | 1-2                  | ~0.3                   | ~2                   | 0.1                   | 0.1                  |



# Quadrature des dét. De vertex





# Tolérance aux radiations

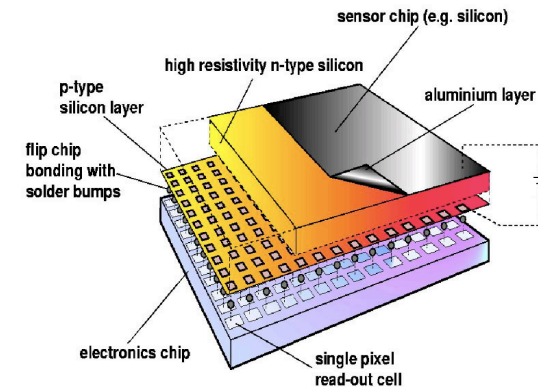
- ▶ **Dose ionisante**
  - ▶ Taille de grille de la technologie des circuits intégrés
- ▶ **Dose non-ionisante**
  - ▶ Dopage/épaisseur de la couche sensible



# Capteurs à pixel

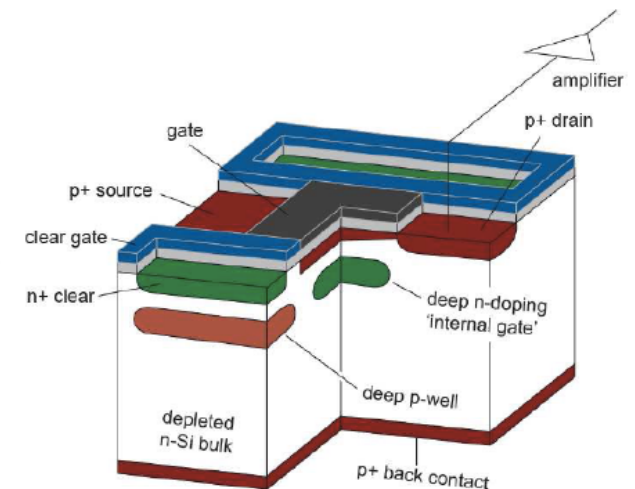
## ► Hybrides

- Séparation capteur / circuit lecture
- Optimisation sur environnement
  - LHC



## ► « Monolithiques »

- Optimisation sur performances
- CMOS (voir la suite)
- DEPFET
  - Vol. sensible déplétée
  - Fabrication spécifique (Münich)
  - Requiert circuits périphériques
- CCD
  - Vitesse faible



## Capteurs à pixels CMOS : MIMOSA

- ▶ Principe & performances fondamentales
- ▶ Architecture rapide
- ▶ Tolérance aux radiations non-ionisantes
- ▶ « state-of-the-art »



# CPS – principe

## ► Fabrication

### ► Tech. circuit intégrée CMOS

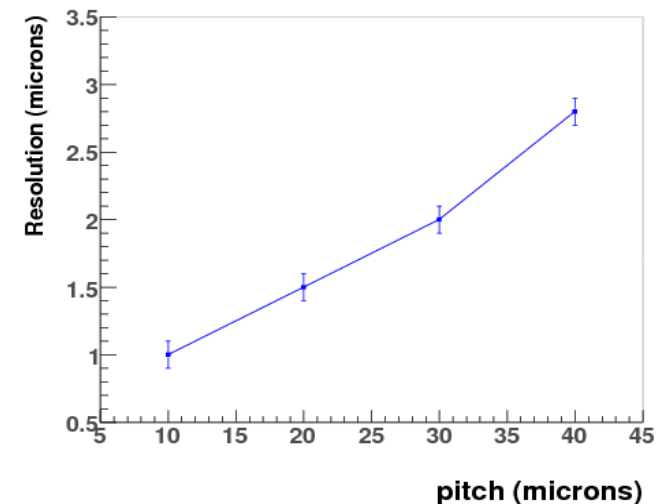
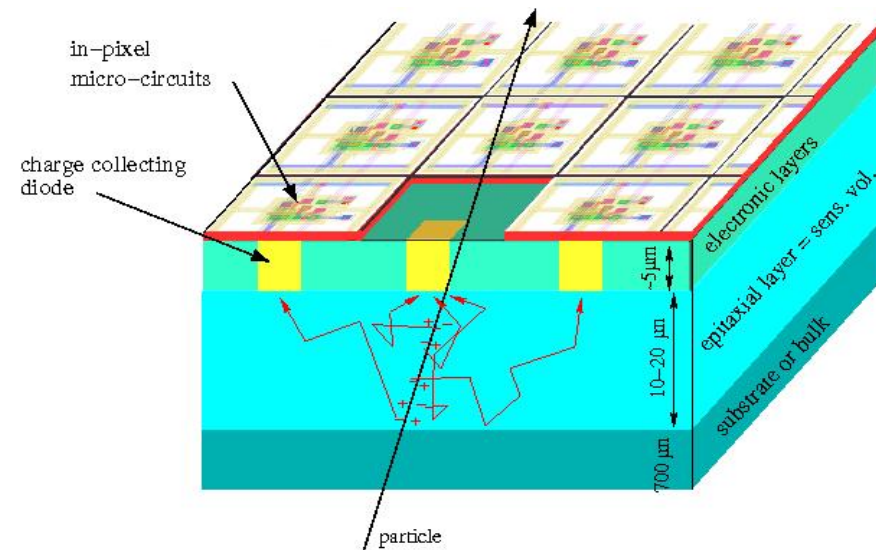
- Fiabilité
- « peu » chère
- évolutive

## ► Spécificité

- Faible épaisseur ( $< 50 \mu\text{m}$ )
- Granularité
- Intelligence embarquée

## ► Signal par mode imagerie

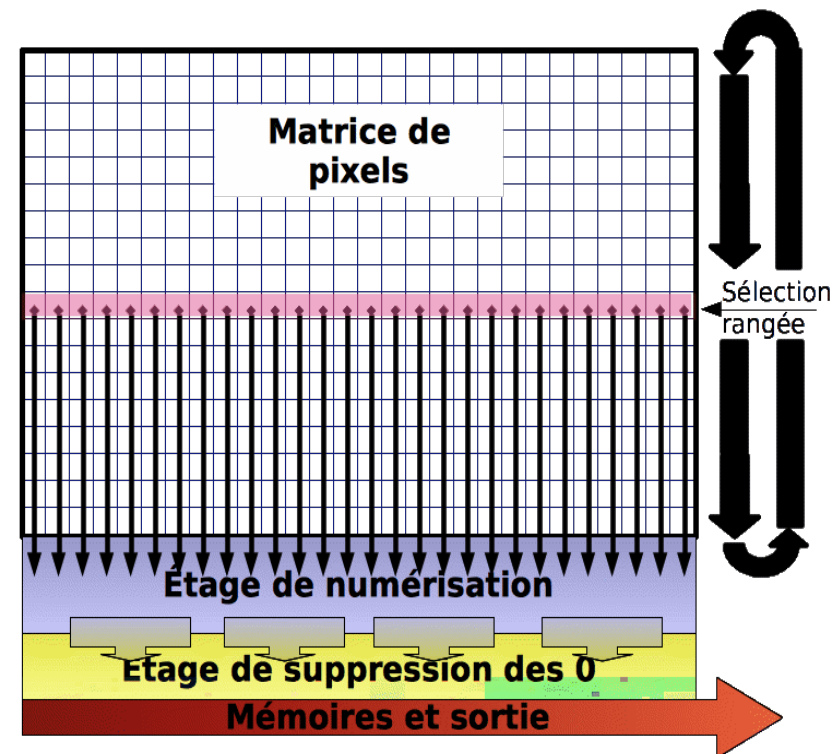
- Mode initial = intégration  
puis double lecture corrélée (CDS) par amplificateur





# Lecture rapide à faible puissance

- ▶ Partage des fonctionnalités
- ▶ Lecture en colonnes //
- ▶ Tps intégration = temps de lecture
  - ▶ = nbre ligne x tps ligne
- ▶ Pas de temps mort
- ▶ Mode non-déclenché
- ▶ Taux de comptage
  - ▶ Limité par taille mémoire x étage de 0-suppression
- ▶ Puissance dissipée limitée
  - ▶ 1 ligne allumée à la fois

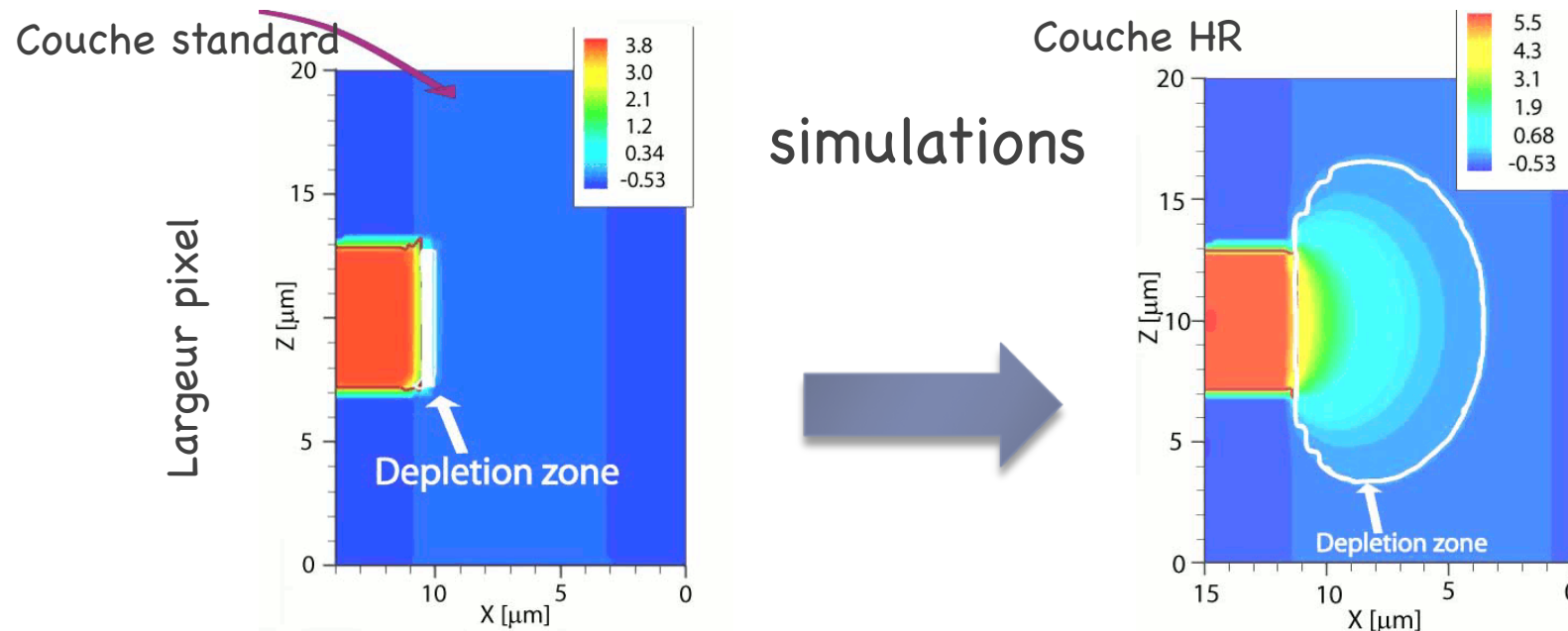






# Radiotolérance non-ionisante

- Evolution des fondeurs CMOS
  - Couche épitaxiée hautement résistive (HR)  $> k\Omega$ 
    - Dopage faible
  - Profondeur déplétion accrue même à faible tension
  - Tolérance  $10^{12/13/14}$   $n_{eq}/cm^2$  démontrée à 30/15/-40 C
    - Atteindre  $10^{15}$  ne semble pas exclu
  - Remarque: la couche sensible est déjà très mince

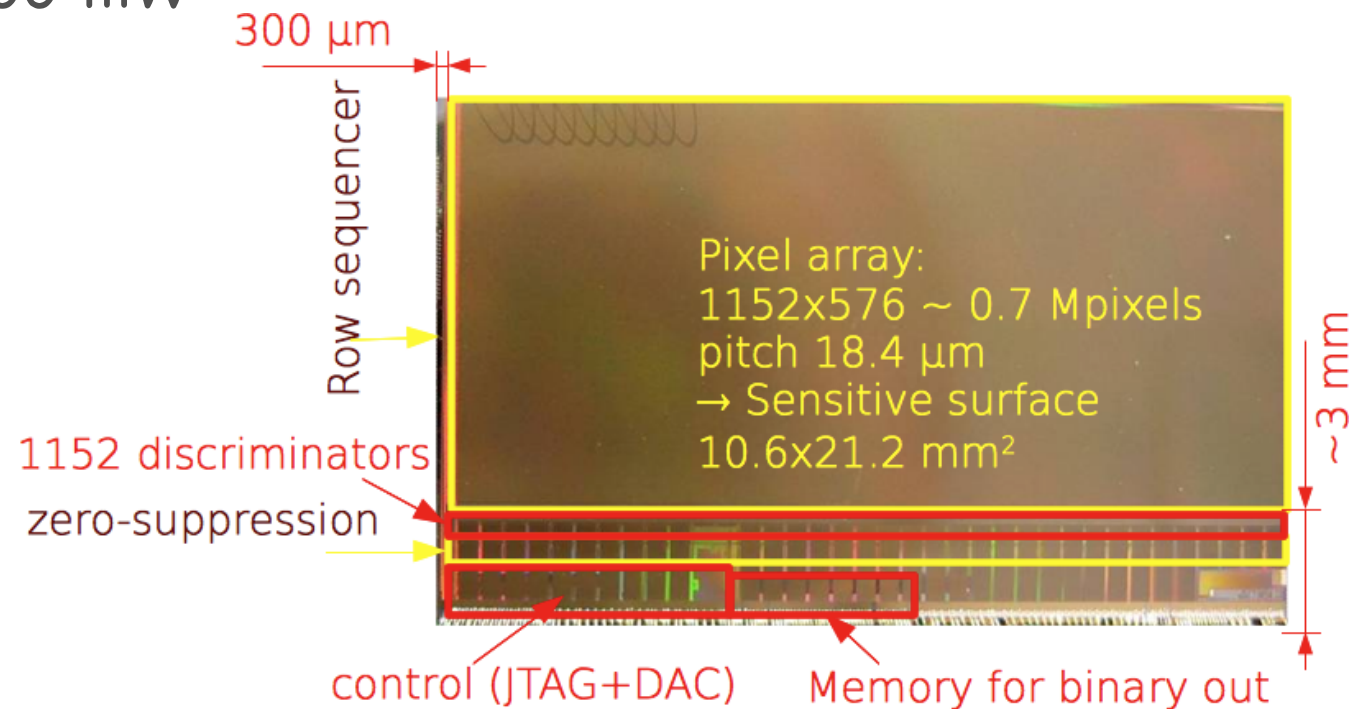




## « state-of-the-art »

### ► MIMOSA 26

- Technologie CMOS 0.35  $\mu\text{m}$
- Couche épitaxiée  $\approx 1\text{k}\Omega$
- Numérisation = discrimination 1 bit
- Dissipation 700 mW
  - 1  $\mu\text{W}/\text{pixel}$  !

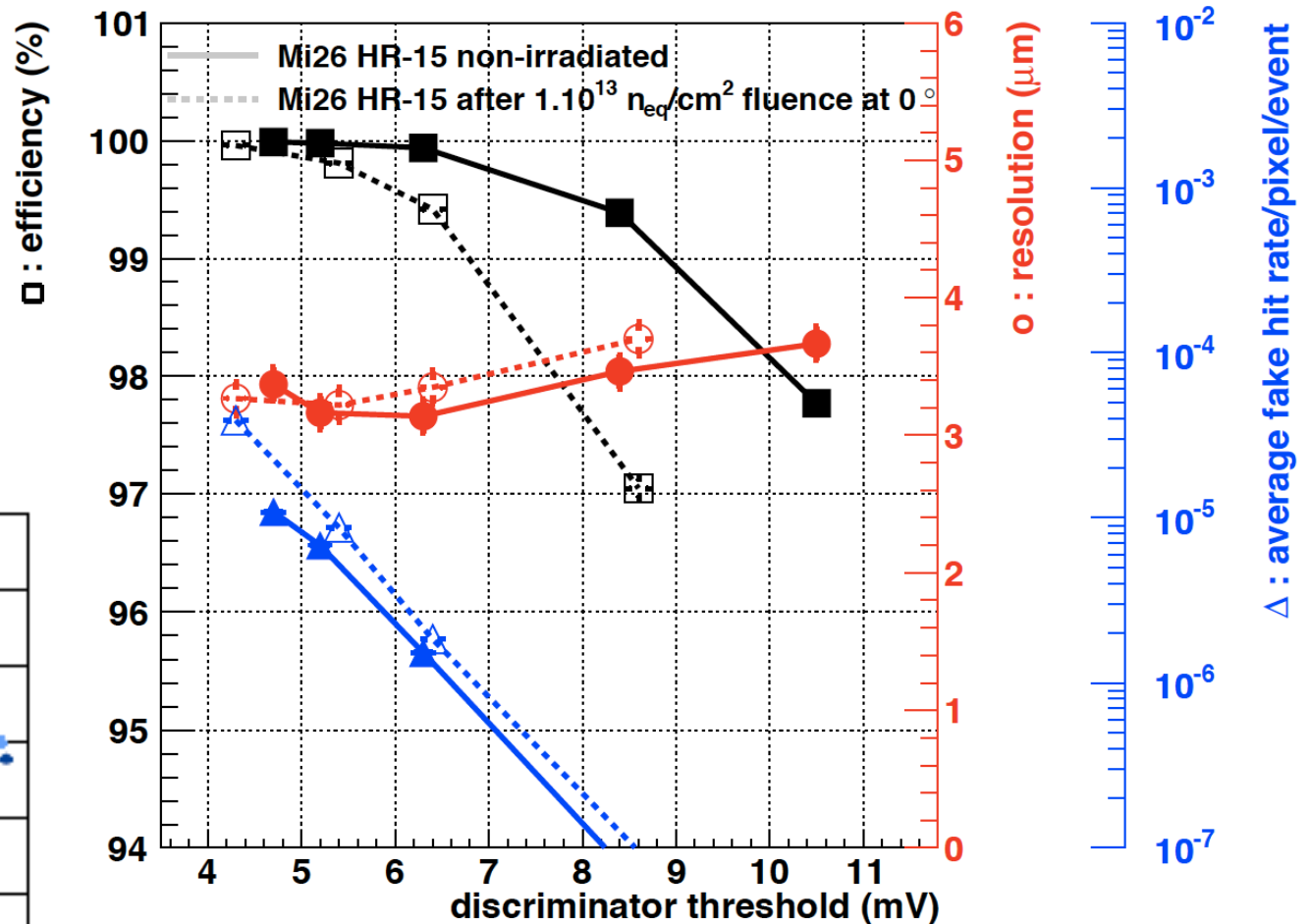
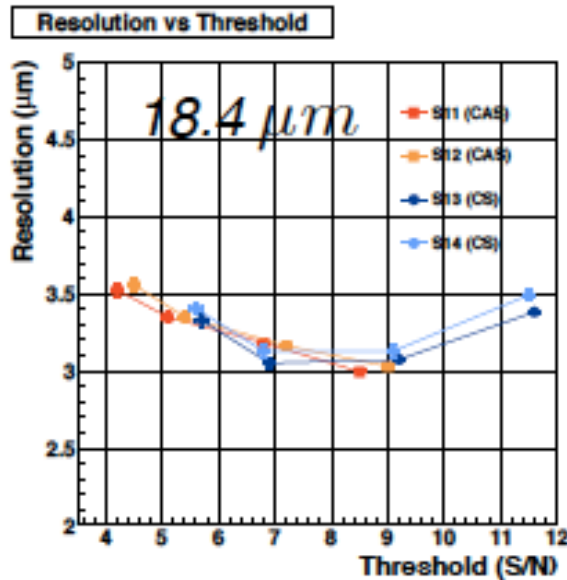




# MIMOSA 26 performances

## ► Performances

- seuil unique pour tous les pixels





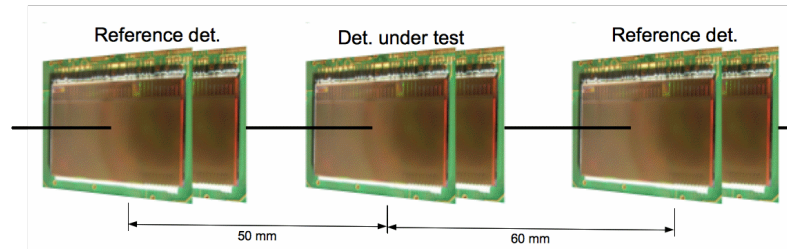
# Applications HEP actuelles

## ► Télescope de caractérisation en faisceau

### ► Projet EUDET (FP6)

► Depuis 2007 au CERN, à DESY...

► Répliques pour ATLAS



## ► Collisions d'ions lourds ultra-relativistes

► Avantage majeur du faible budget de matière

► STAR: détecteur de vertex (PXL)

► 1<sup>ère</sup> prise de données 2013

► Capteur Ultimate = 2x MIMOSA 26

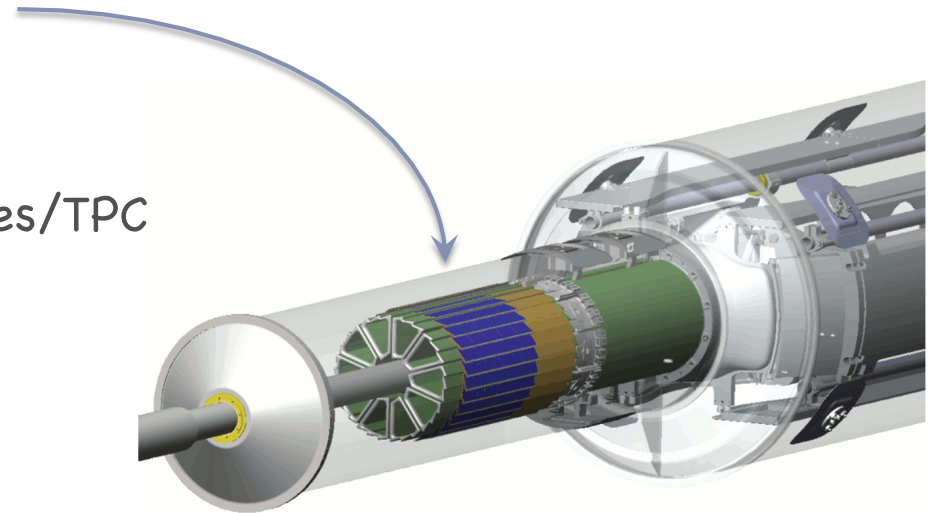
► ALICE: jouvence des 6 couches internes/TPC

► Installation en 2018

► Requier : temps lecture < 40  $\mu$ s

## ► Collisions élémentaires

► 2 capteurs prototypes (M30/31)  
répondant aux spécifications  
ILC 500 GeV



# Intégration des CPS

- ▶ Détecteurs en cours
- ▶ Échelles double-face
- ▶ SERNWIETTE
- ▶ D'autres idées



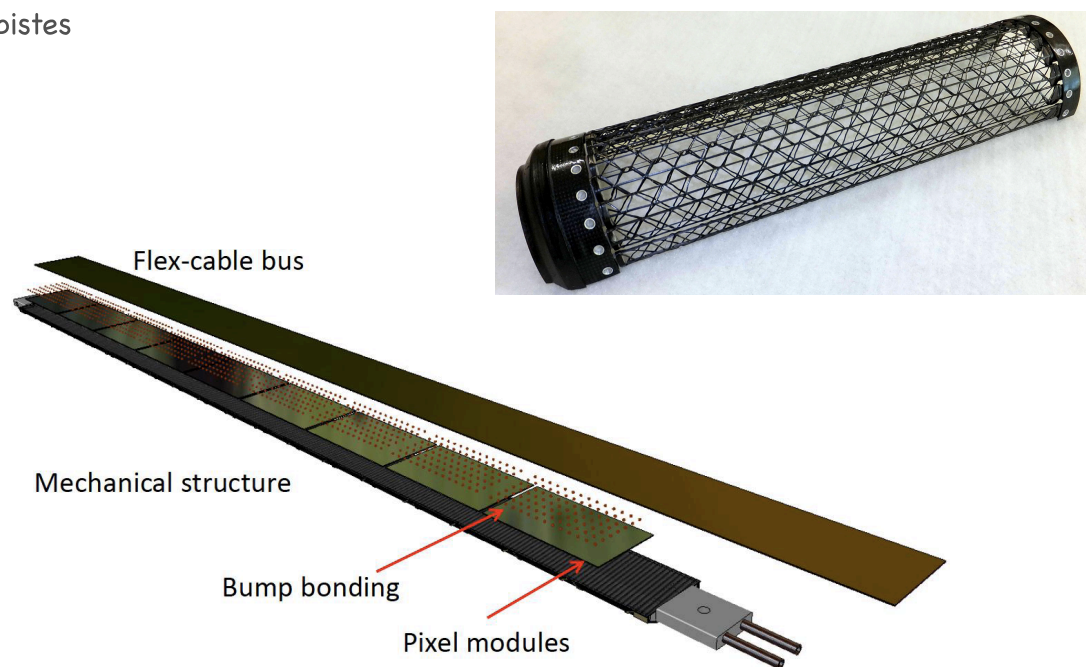
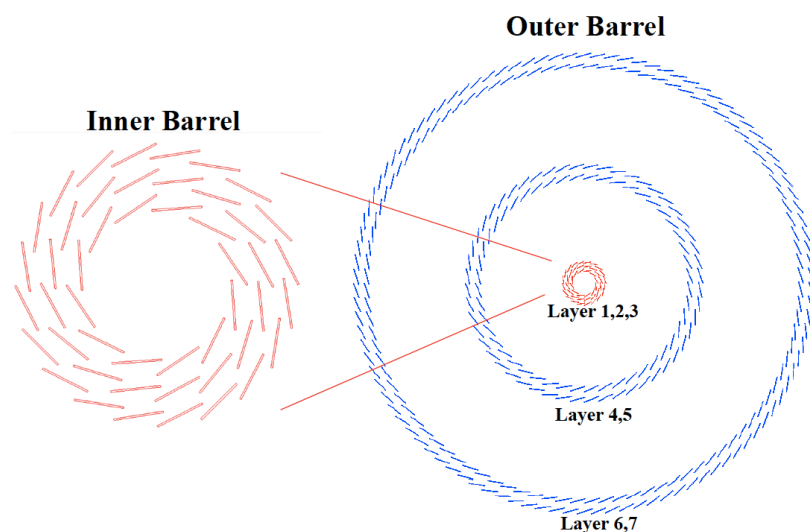
# Détecteurs en cours

## ▶ STAR

- ▶ Intégration par LBNL
- ▶ Support d'un seul côté  
→ possibilité de remplacement rapide si radiotolérance insuffisante
- ▶ Refroidissement par flux d'air

## ▶ ALICE

- ▶ Intégration par CERN
- ▶ Budget matière par couche 0.3 %  $X_0$
- ▶ Refroidissement (30 C) par fluide caloporteur
- ▶ Vers les couches externes (6 m<sup>2</sup>)
  - ▶ Coût 4 couches CPS < 4 couches dét. micro-pistes



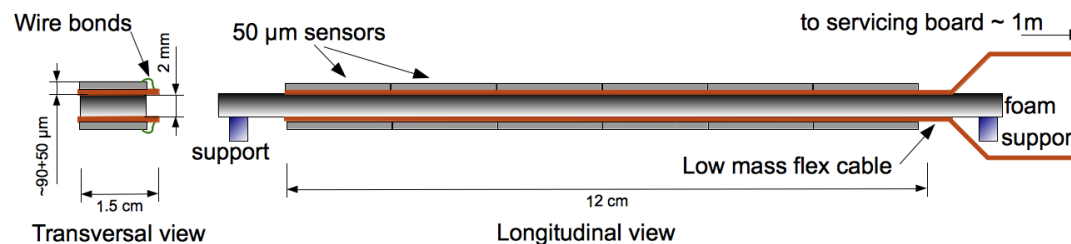




# PLUME

## □ ILC/ILD driven concept

- × Double-sided ladders
- × Air cooled (full vtx det <30W)
- × Power pulsed (200ms)
- × 125 mm long
- × Material budget goal  $\sim 0.3 \% X_0$

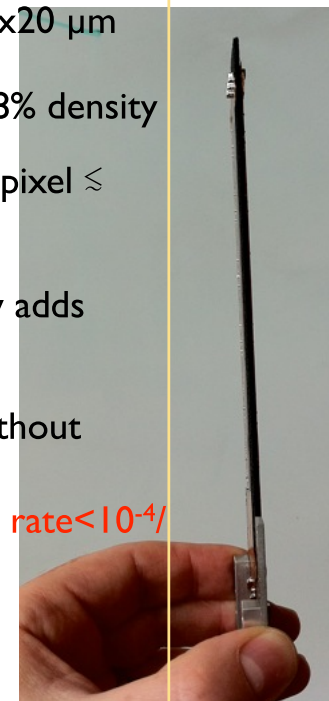


## ● Outlooks 2012/13

- × Prototype 2: eaching  $0.35 \% X_0$  with:
  - × new flex cable: narrower and aluminum traces → fabricated, under test
  - × lighter SiC foam at 4% density

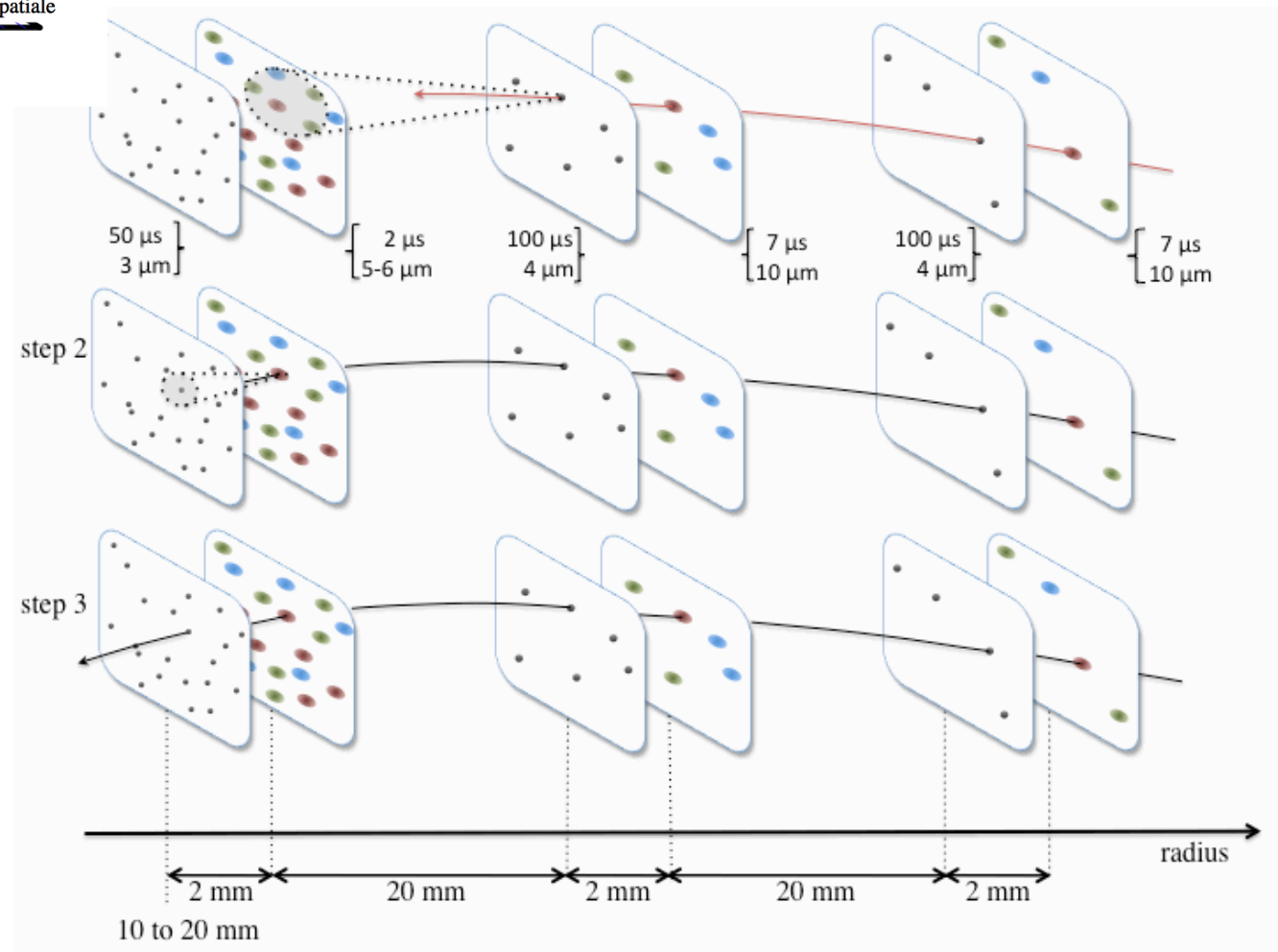
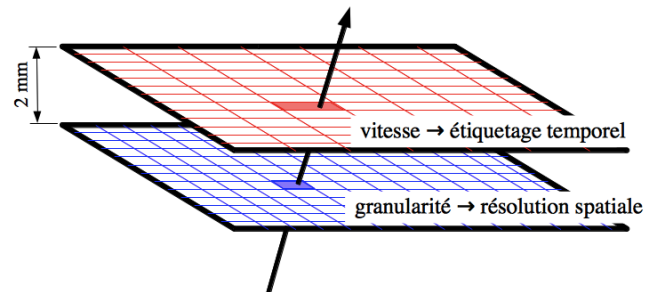
## ● Achievements 2011/12

- × Prototype 1: **8M pixels**, readout time 115  $\mu$ s, 10g,  $0.6 \% X_0$ 
  - × 2x low mass cable with 2x20  $\mu$ m copper
  - × 1x spacer = SiC foam at 8% density
- × Air cooled ( $\lesssim 3$  m/s) Temp on pixel  $\lesssim 50^\circ\text{C}$ ,
- × Planarity within 20  $\mu$ m, air flow adds vibration at 20  $\mu$ m level
- × Beam test with 120 GeV  $\pi$  (without power pulsing)
  - **efficiency > 99%** for fake hit rate  $< 10^{-4}/\text{pixel}$
  - $\sigma$  (point)  $\sim 3 \mu$ m
  - $\sigma$  (angle)  $\sim 0.1^\circ$





# Echelle double face



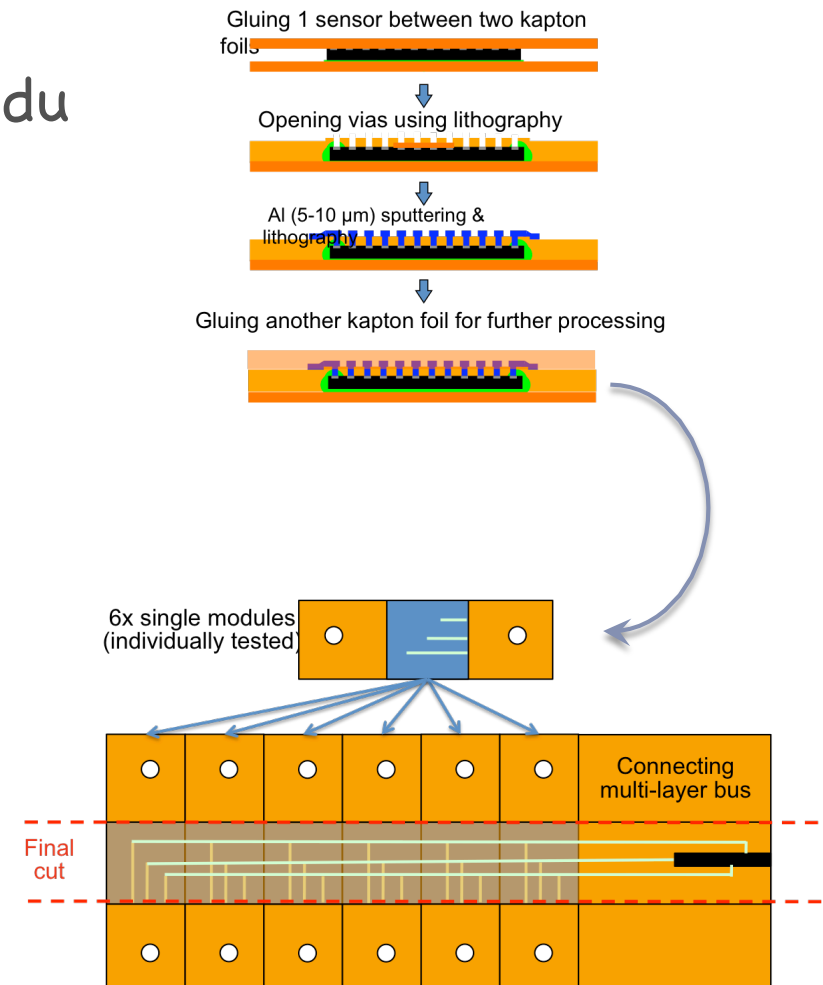
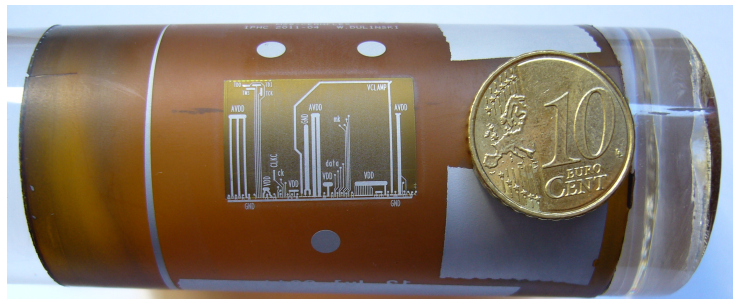




# SERNWIETTE

## ► Encapsulation des capteurs dans le câble

- Avec R De Oliveira (CERN)
- Budget de matière finale attendu 0.15 %  $X_0$
- Échelle « souple »
- Etape 1 validée en 2012
- Câble multi-capteur en 2013





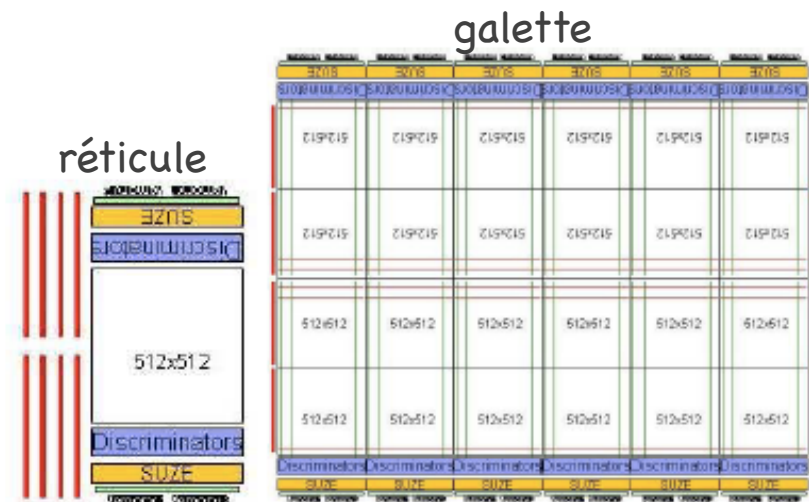
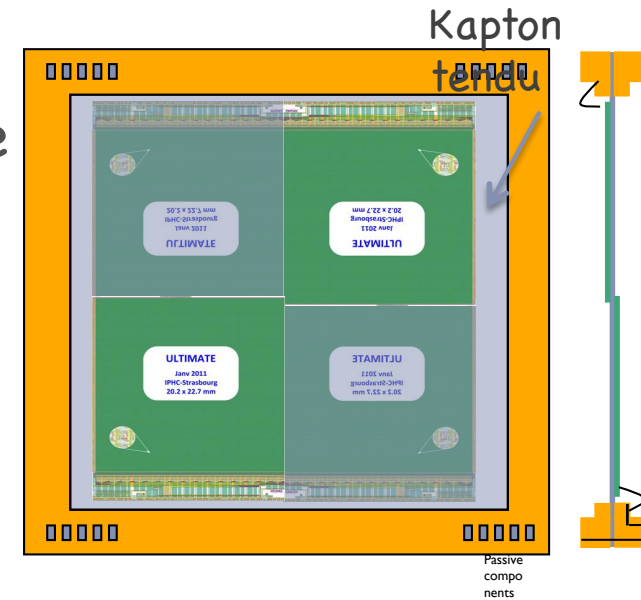
# D'autres idées

## ► AIDA (FP7)

- Télescope faisceau de grande surface
  - $\approx 5 \times 5 \text{ cm}^2$
- Phase 1 = mosaïque
- Phase 2 = grand capteur
  - 2014/15

## ► Grande surface

- le « stitching »
  - Concept multi-réticule / 1 galette
- Potentiellement  
taille max  $O(20) \text{ cm}$ 
  - Taux de réussite / coût ?
- Forme trapézoïdale pas exclue



## Voies de développement des CPS

- ▶ Évolution de l'architecture
- ▶ « Nouveaux » process CMOS
- ▶ Intégration 3D



# Evolution de l'architecture

## ► Pour aller plus vite

- Allonger les pixels → diminue le nbre de ligne

- Attention à la collection des charges

- Pas d'accroissement de la puissance dissipée

- Lire plusieurs ligne à la fois

Paralléliser la lecture sur des sous-blocs

- Accroissement de la puissance dissipée

- Requiert plus de  $\mu$ circuits dans le pixel

- taille de grille de la technologie CMOS diminuée

- Intégrer la discrimination dans le pixel

- Transition des signaux numériques + rapide dans le circuit

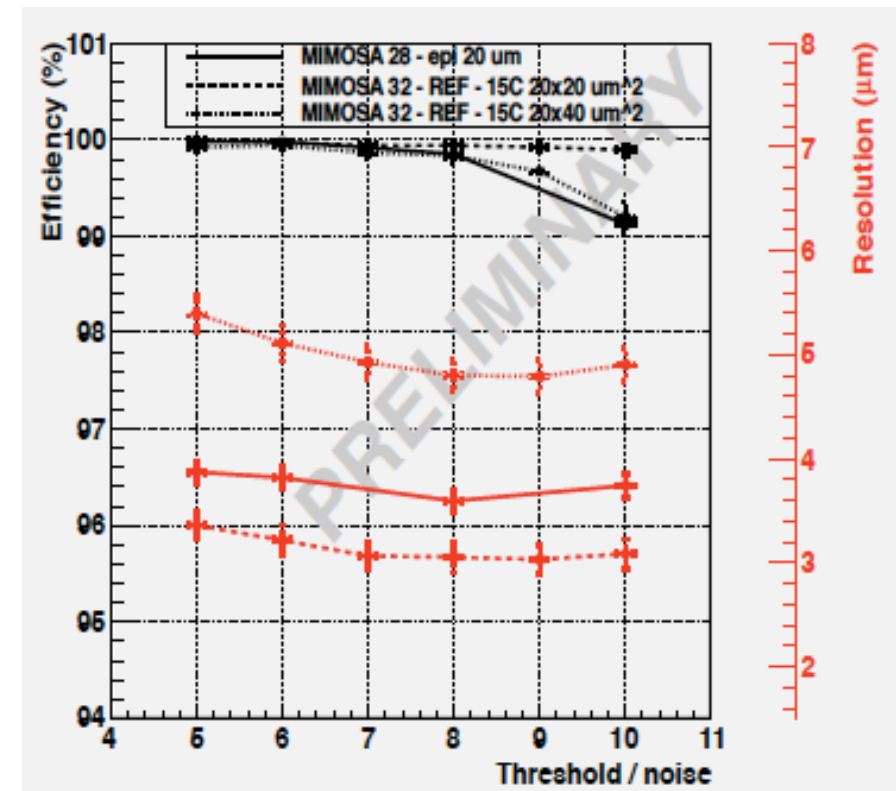
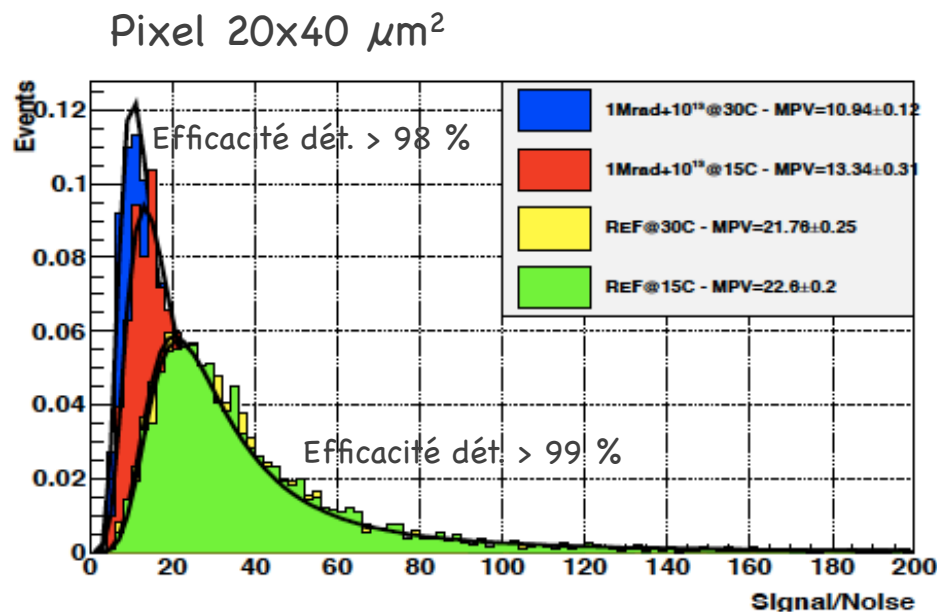
- cadence de lecture augmentée

- Accroissement de la puissance dissipée



# Nouveaux process

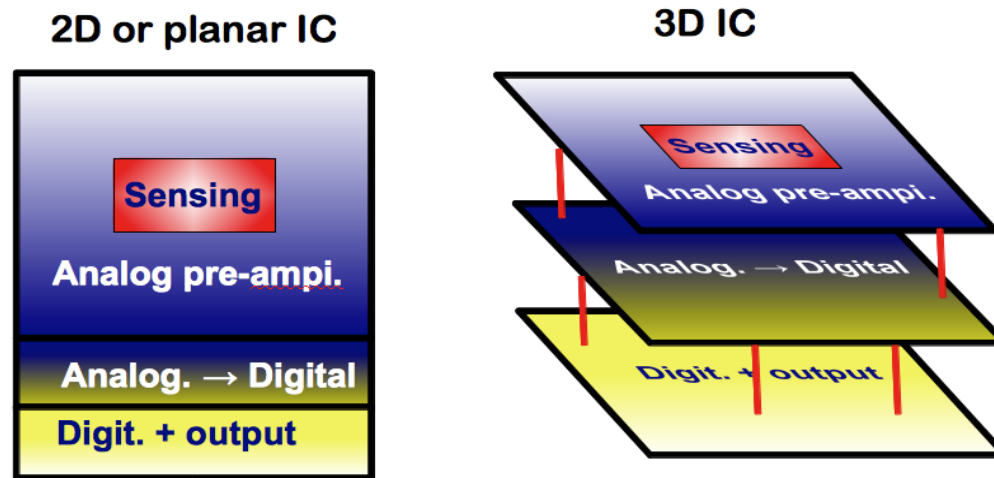
- ▶ 0.18  $\mu\text{m}$  et couche épitaxiée HR 1-5  $\text{k}\Omega$ 
  - ▶ Prototypes (petite taille, lecture anaogique) en 2011/12/13
  - ▶ Dimensions des pixels 20 x 20/40x80  $\mu\text{m}^2$
  - ▶ tests aux SPS en 2012





# Intégration 3D

- Les performances « ultimes »
  - 1 fonctionnalité ↔ 1 couche ↔ 1 techno. Optimisée



- Consortium international depuis ~2008
  - Pas encore de résultats saillants...

## Au delà des dét. De vertex

- ▶ Calorimétrie
- ▶ Sensibilités aux rayonnements
- ▶ Spécificité du comptage
- ▶ Caméra aux photons uniques (IPNL)
- ▶ Dosimétrie spatiale



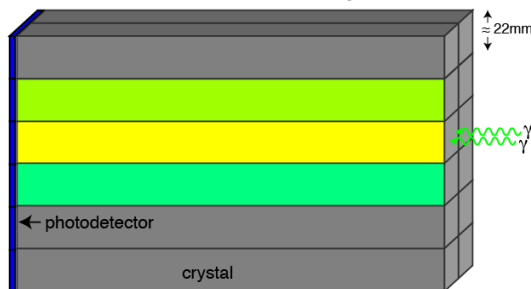


# Calorimétrie digitale

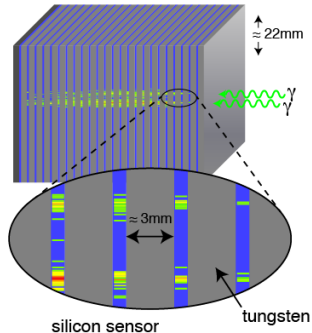
## ► Projet ALICE-FOCAL

- Utrecht-NIKHEF + Bergen groups
- Mesure  $\gamma$  directs vers l'avant p+p, p+A, A+A
- Granularité  $\ll$  rayon de Molière
- Mesure énergie = comptage des particules

measurement with state-of-the-art crystal calorimeter



measurement with ASPECT-HEP: high-resolution Si/W calorimeter

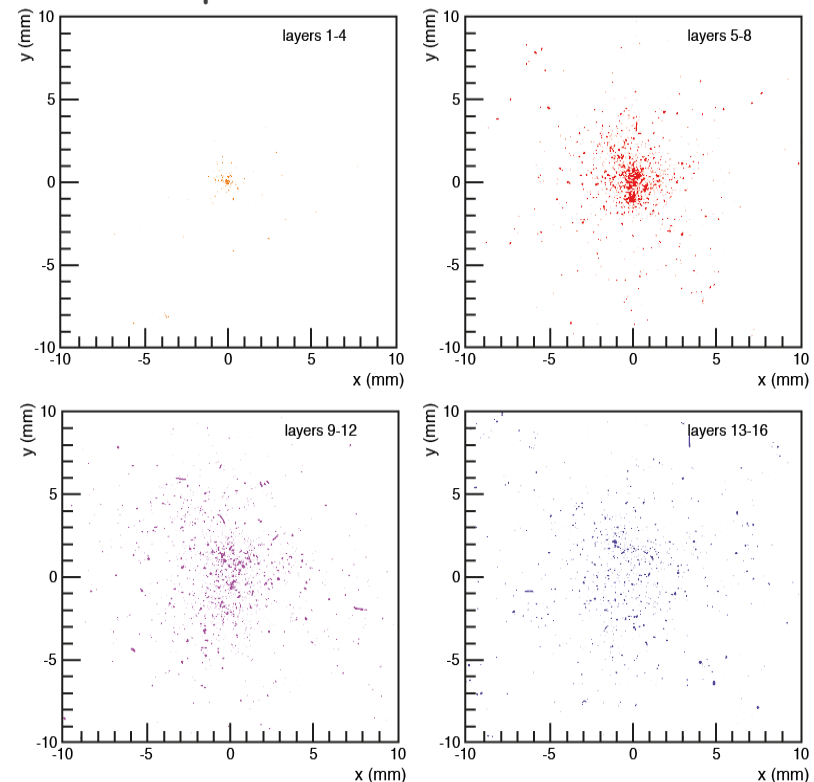


*two-particle separation  
better by orders of magnitude*

*superior particle identification  
from extreme transverse  
and longitudinal granularity*

*unique measurement capabilities  
for high particle densities*

Développement longitudinal  
gerbe d'électron à 200 GeV  
Avec 25 couches basées  
sur capteur prototype  
pixel  $30 \times 30 \mu\text{m}^2$  mais lent

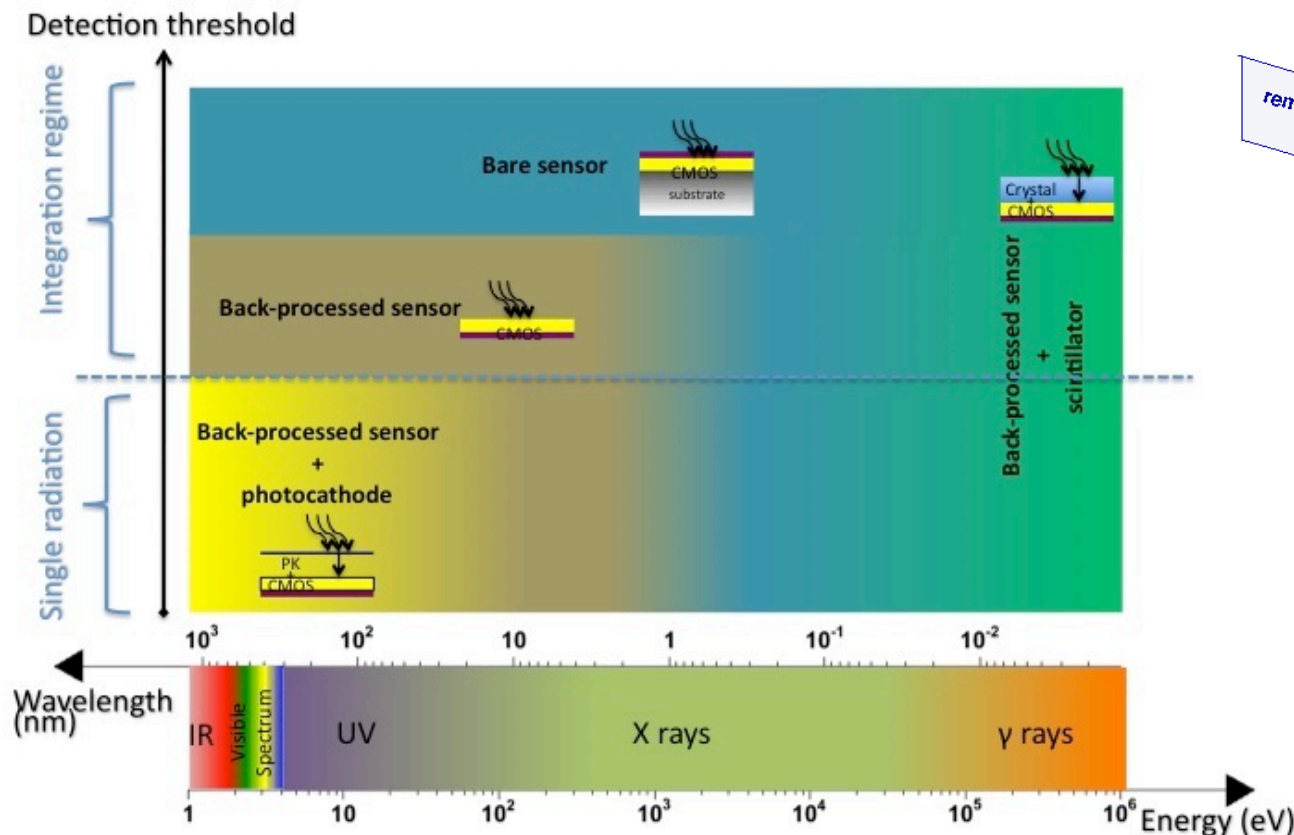
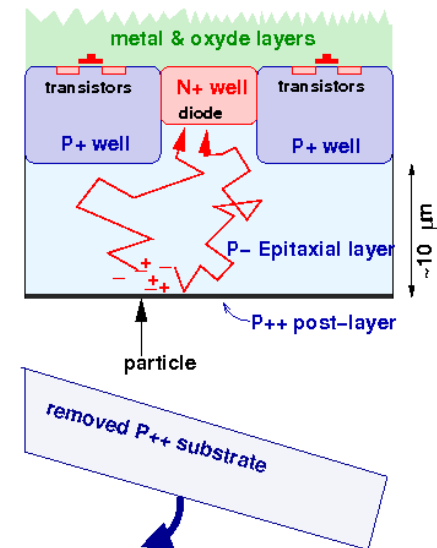


► Nécesite capteurs avec temps d'intégration  $< 50 \mu\text{s}$

## ► Particules chargées

- Sensible à tous les rayonnements chargés
- Efficacité seulement limitée à basse énergie (4 keV/e<sup>-</sup>)

## ► Photons





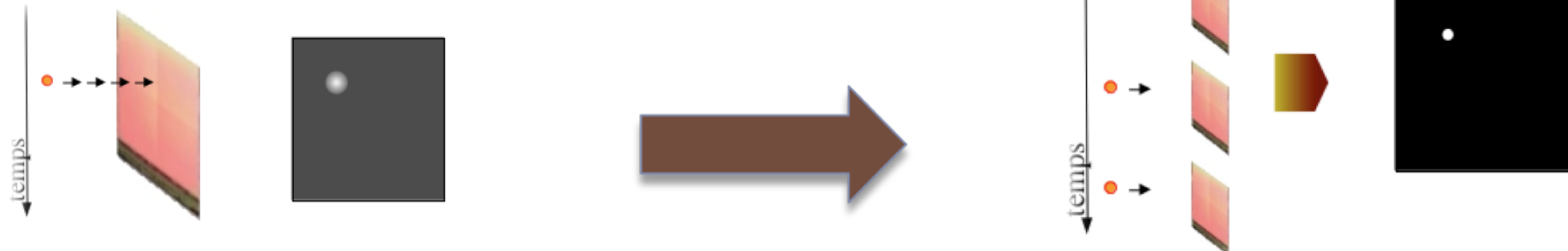
# Spécificité d'une imagerie par comptage

## ► Remarque

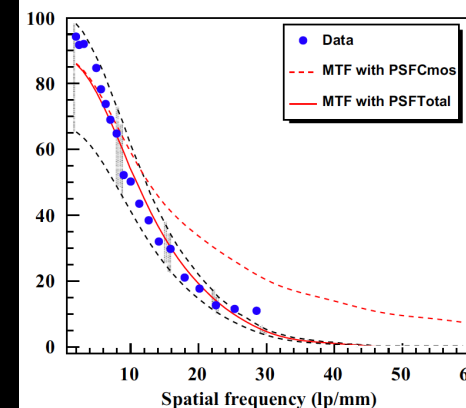
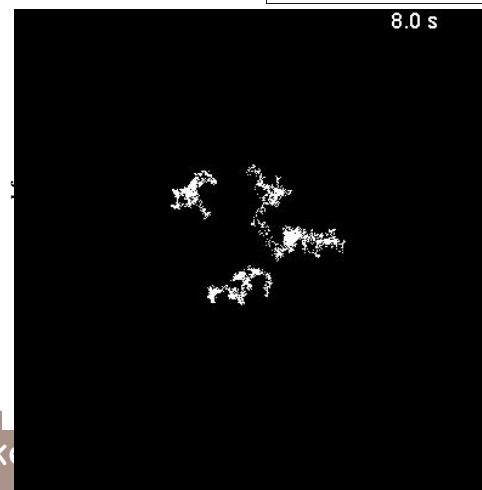
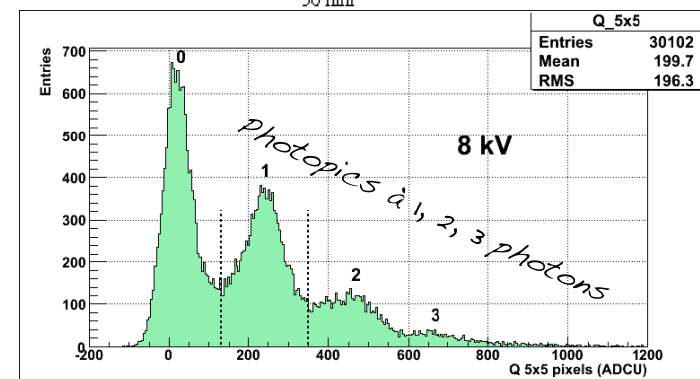
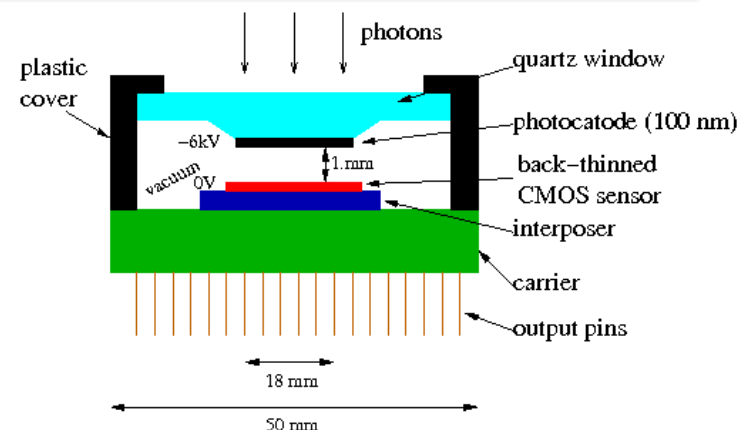
- Dvpmts pour les det. de vertex : capteurs rapides et sensibles

## ► Bénéfice de la combinaison vitesse & sensibilité

- Acquisition d'une image "classique" par intégration
  - Définition donnée par la variation du contraste pixel par pixel (MTF ou fonction de transfert de modulation)
  - Faible taille de pixel avec une grande dynamique
- Reconstruction d'une image par localisation individuelle des quantas d'information (comptage)
  - étalement du signal réduit par reconstruction impact  $\Rightarrow$  amélioration de la définition (MTF)
  - filtrage des impacts  $\Rightarrow$  diminution du bruit, suivi spatio-temporel
  - dynamique indépendante de la dynamique du pixel
  - «DQE » = efficacité quantique



- ▶ **Caméra ebCMOS**
  - ▶ Photo-détecteur hybride
  - ▶ Collaboration IPN-Lyon (Rémi Barbier) & PHOTONIS
- ▶ **Performances de LUSIPHER**
  - ▶ Capteur LUCY, 400x800 pixel 10  $\mu\text{m}$ , 600 fps
  - ▶ Photocathodes QE~15-25 % @ 480 nm
  - ▶ Dark count ~ 15 Hz/mm<sup>2</sup>
- ▶ **Applications**
  - ▶ Suivi de sources lumineuses très faibles
  - ▶ Bioluminescence sous-marine (ANTARES)
- ▶ **Perspectives**
  - ▶ Dvpmt technique stoppé par manque partenaire
  - ▶ Actuellement marché occupé EMCCD
  - ▶ Potentiellement remplaçable par SiPM numériques

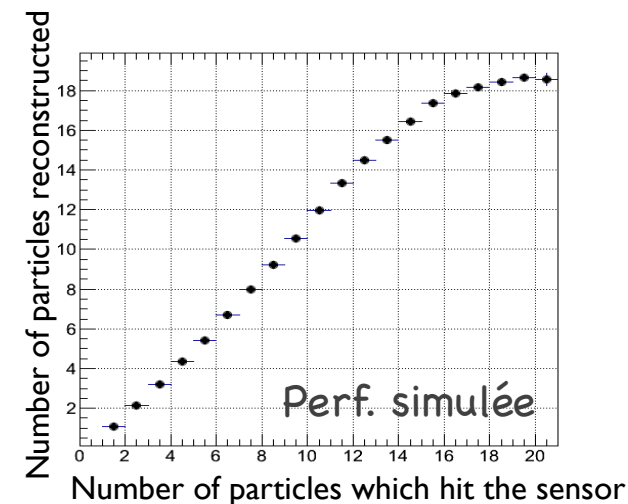
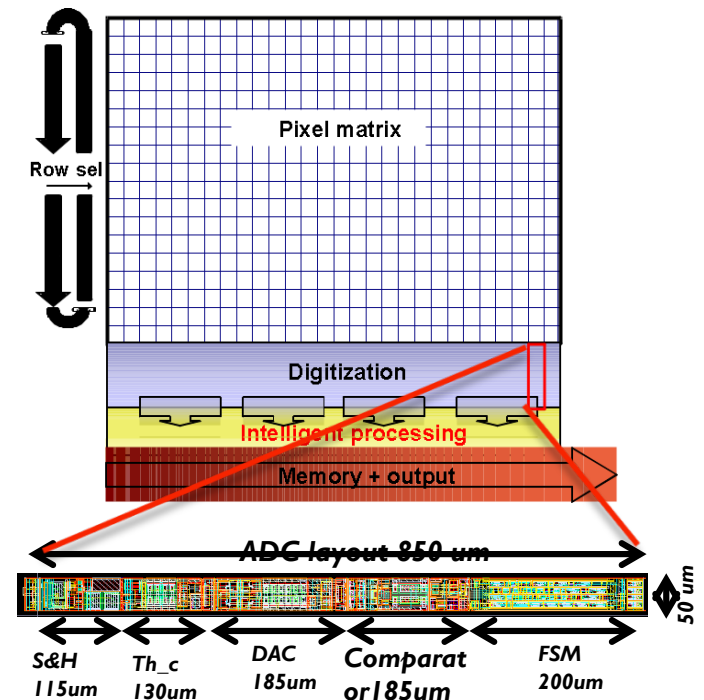


Résultats obtenus par R.Barbier et al. @ IPNL



# Dosimétrie spatiale

- ▶ Comptage des flux par particules
  - ▶ Satellites « Medium Earth Orbit »
  - ▶ Electrons: 100 keV–7 MeV;  
 $10^4 \rightarrow 10^7$  particles/cm<sup>2</sup>/s
  - ▶ Protons: 100 keV– 400 MeV;  
 $10^3 \rightarrow 10^4$  particles/cm<sup>2</sup>/s
- ▶ Contraintes
  - ▶ Poids, encombrements, consommation
  - ▶ Information temps réel
- ▶ CPS bien adapté
  - ▶ Si mesure énergie déposée
  - ▶ Architecture MIMOSA 26 + ADC + logique « clusterisation »
  - ▶ Prototype COMETH, fab fin 2012

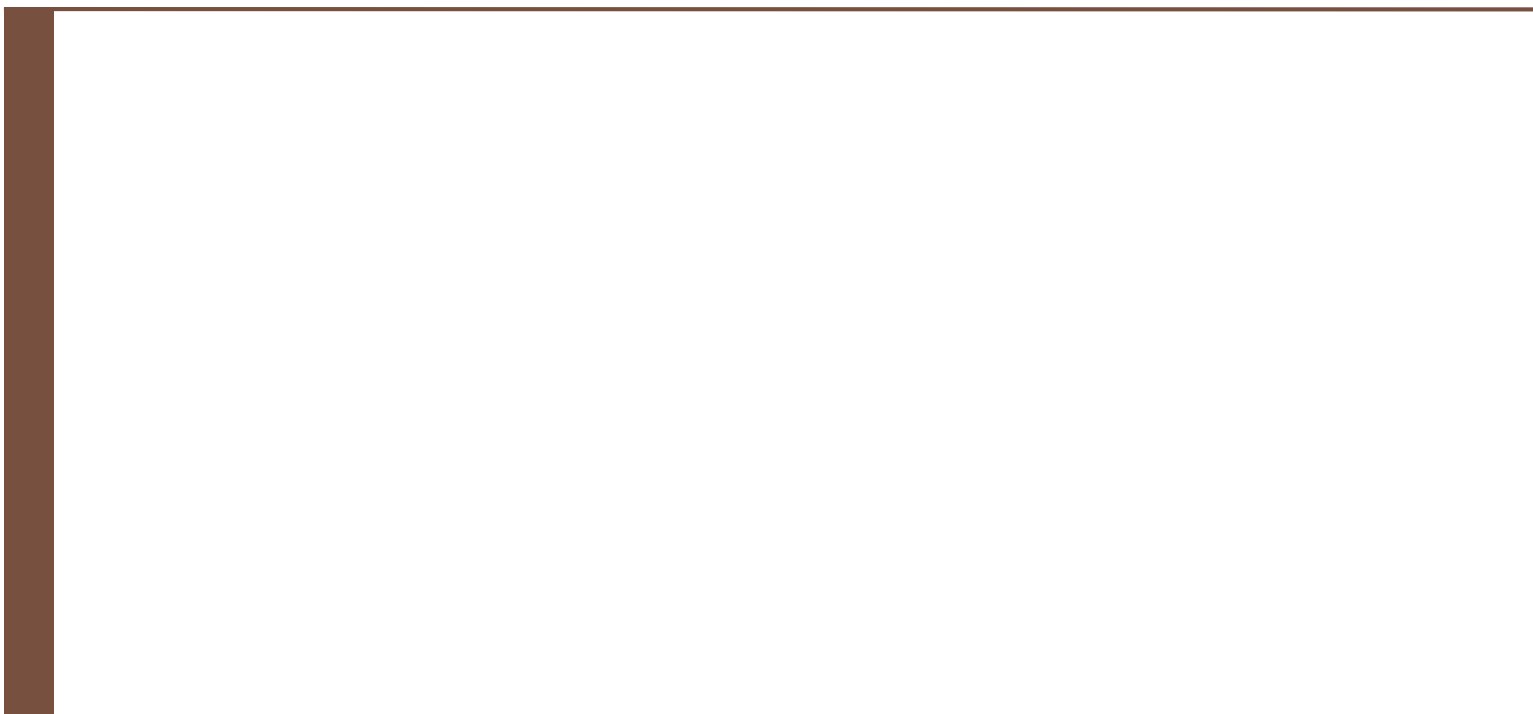




## Conclusion

- ▶ **CPS = un détecteur complet sur une puce**
  - ▶ Son développement nécessite de nombreuses expertises
- ▶ **Une technologie qui n'a pas encore atteint son potentiel complet**
  - ▶ Porté par les avancées de l'industrie
- ▶ **Modalités d'intégration nouvelles offertes**
  - ▶ Nous n'avons encore « découvert » que peu de leur applications

# Planches additionnelles





## ■ Initial objective: ILC, with staggered performances

↳ CPS applied to other experiments with intermediate requirements

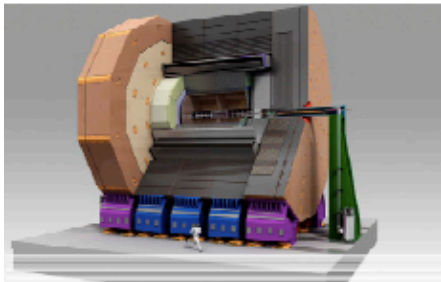
### EUDET 2006/2010

*Beam Telescope*



### ILC >2020

*International Linear Collider*



*EUDET (R&D for ILC, EU project)*

*STAR (Heavy Ion physics)*

*CBM (Heavy Ion physics)*

*ILC (Particle physics)*

*HadronPhysics2 (generic R&D, EU project)*

*AIDA (generic R&D, EU project)*

*FIRST (Hadron therapy)*

*ALICE/LHC (Heavy Ion physics)*

*EIC (Hadronic physics)*

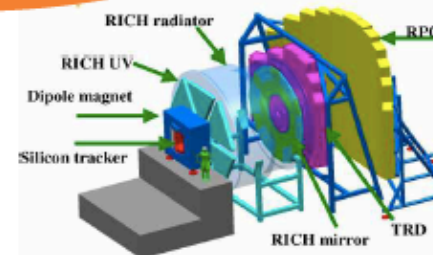
*CLIC (Particle physics)*

*SuperB (Particle physics)*

...

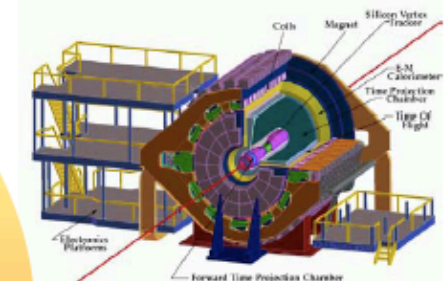
### CBM 2018

*Compressed Baryonic Matter*



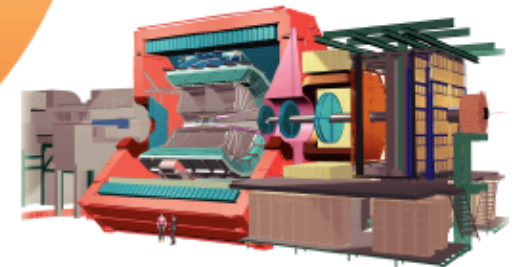
### STAR 2013

*Solenoidal Tracker at RHIC*



### ALICE 2018

*A Large Ion Collider Experiment*







# Correlated Double Sampling: CDS

