

Développement de Capteurs à Pixels CMOS

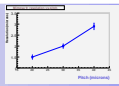
Pour détecter les particules chargées

Marc Winter (IPHC – Strasbourg)

PLAN

- Motivations du développement de capteurs CMOS à l'IN2P3 :
 - ⊕ *Physique subatomique*
 - ⊕ *Imagerie*
- Composition et partenaires de l'équipe de l'IPHC
- Quelques résultats :
 - ⊕ *Détecteurs de vertex et télescopes de faisceau*
 - ⊕ *Imageur EB-CMOS*
- Perspectives : *Technologies d'intégration 3D*
- Atouts des capteurs CMOS pour XFEL

▶ Plus d'information sur le site: <http://iphc.cnrs.fr/-Publications-Presentations-.html>

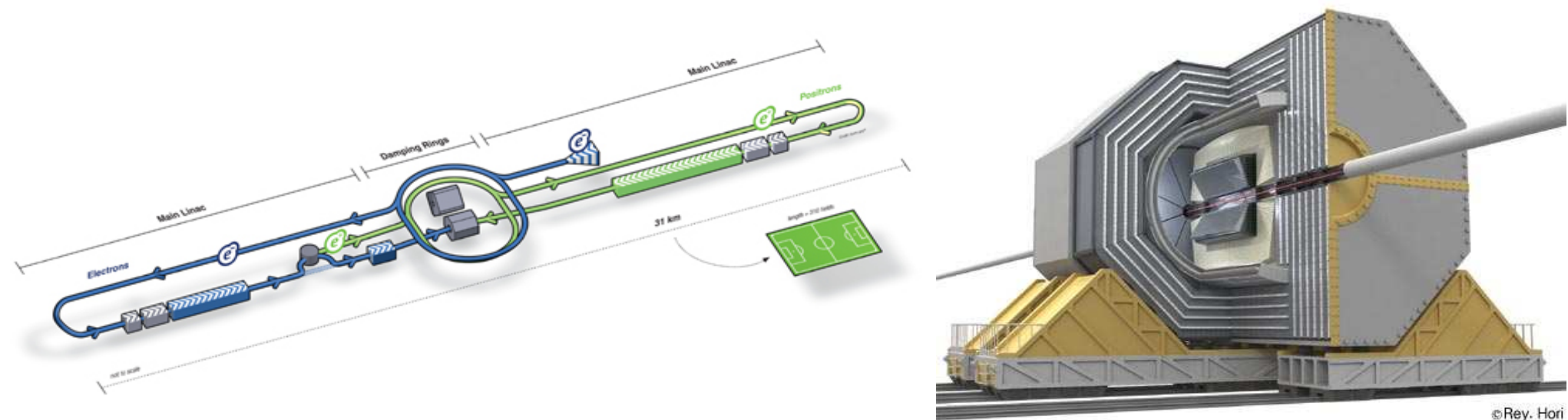


■ Activité de R&D initiée en 1999 pour les expériences de physique subatomique du futur

↳ Nécessité d'une nouvelle génération de détecteurs à pixels, beaucoup plus performants que l'état de l'art, pour les grandes expériences (TGE) de physique subatomique des années 2020

Objectif No 1 : Collisionneur Linéaire à électrons \equiv accélérateur post-LHC

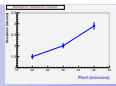
▷ structure en temps des faisceaux comme XFEL



©Rev. Hori

⇒ Programme de longue haleine procédant par étapes \equiv paliers en performances

↳ Applications connexes à plus court terme et moins exigeantes

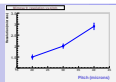


■ **Equiper des détecteurs de position de très haute résolution pour la physique subatomique :**

- ⊖ *Expérience STAR (RHIC - Brookhaven) → 2008 / 2009*
- ⊖ *Expérience CBM (GSI - Darmstadt) → 2011*
- ⊖ *Expérience au Collisionneur Linéaire à électrons → 2012/13*
- ⊖ *Télescopes de faisceau du projet FP7 EUDET (DESY-Hamburg) → 2008*

■ **Equiper des imageurs pour la microscopie électronique, les systèmes de contrôle, etc. :**

- ⊖ *Imageur bio-médical pour neuro-sciences, embryogénèse, etc., avec Photonis-DEP (G.I.S.)*
- ⊖ *Caméra pour SAGEM (G.I.S.)*
- ⊖ *Caméra d'assistance chirurgicale en oncologie (avec universités américaines)*
- ⊖ *Etc.*



■ Si basse résistivité (type p) avec puits de coll. (type n)

- Signal créé dans couche épitaxiée (dopage faible) :
 $Q \sim 80 \text{ e-h} / \mu\text{m} \mapsto \text{signal} \lesssim 1000 \text{ e}^-$
- Collection de charge par jonctions n-well/p-epi
 \hookrightarrow les porteurs de charge diffusent thermiquement vers les jonctions, aidés par les réflexions sur les interfaces avec les puits p et le substrat (dopage élevé)
- Existe en version substrat "Hi-Res" (sans épitaxie !)

■ Avantages spécifiques des capteurs CMOS:

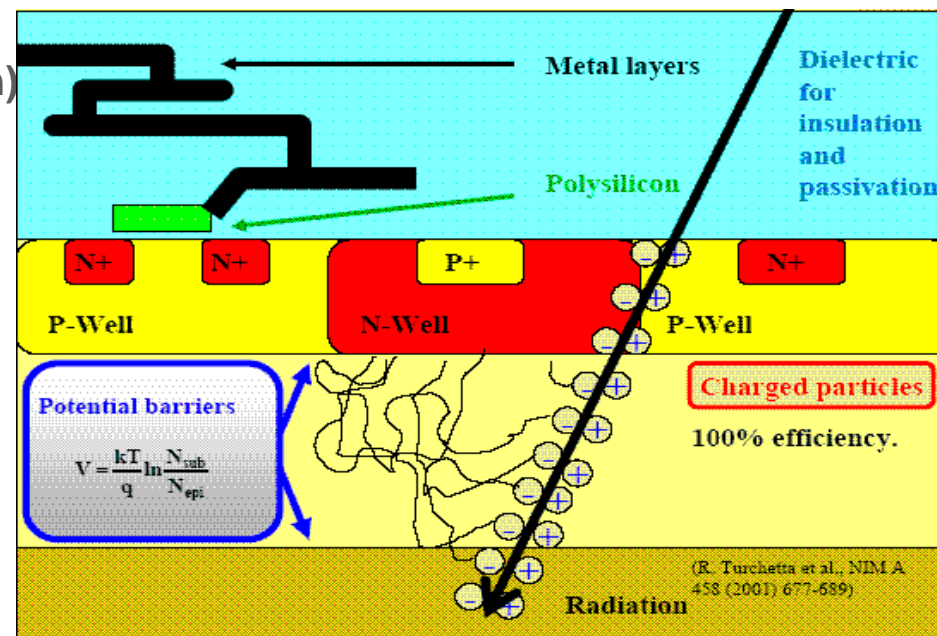
- ◇ μ circuits de conditionnement du signal intégrés dans substrat du capteur (System-on-Chip) \mapsto compact, flexible
- ◇ Epaisseur du volume sensible (\sim couche épitaxiée) $\sim 10\text{--}15 \mu\text{m}$ \longrightarrow amincissement à $\sim 30\text{--}40 \mu\text{m}$ permis
- ◇ Technologie de production standard de masse \longrightarrow runs (multi-projets) fréquents, coûts de R&D réduits
- ◇ Fonctionnement à température ambiante

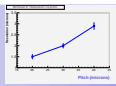
▷ Compromis attrayant entre granularité, budget de matière, radio-tolérance, vitesse et consommation

✘ **Mais :** $\hat{=}$ volume sensible mince \Rightarrow signal de faible amplitude (mV !)

$\hat{=}$ volume sensible \sim non déplété \Rightarrow impact sur la radio-tolérance & la vitesse

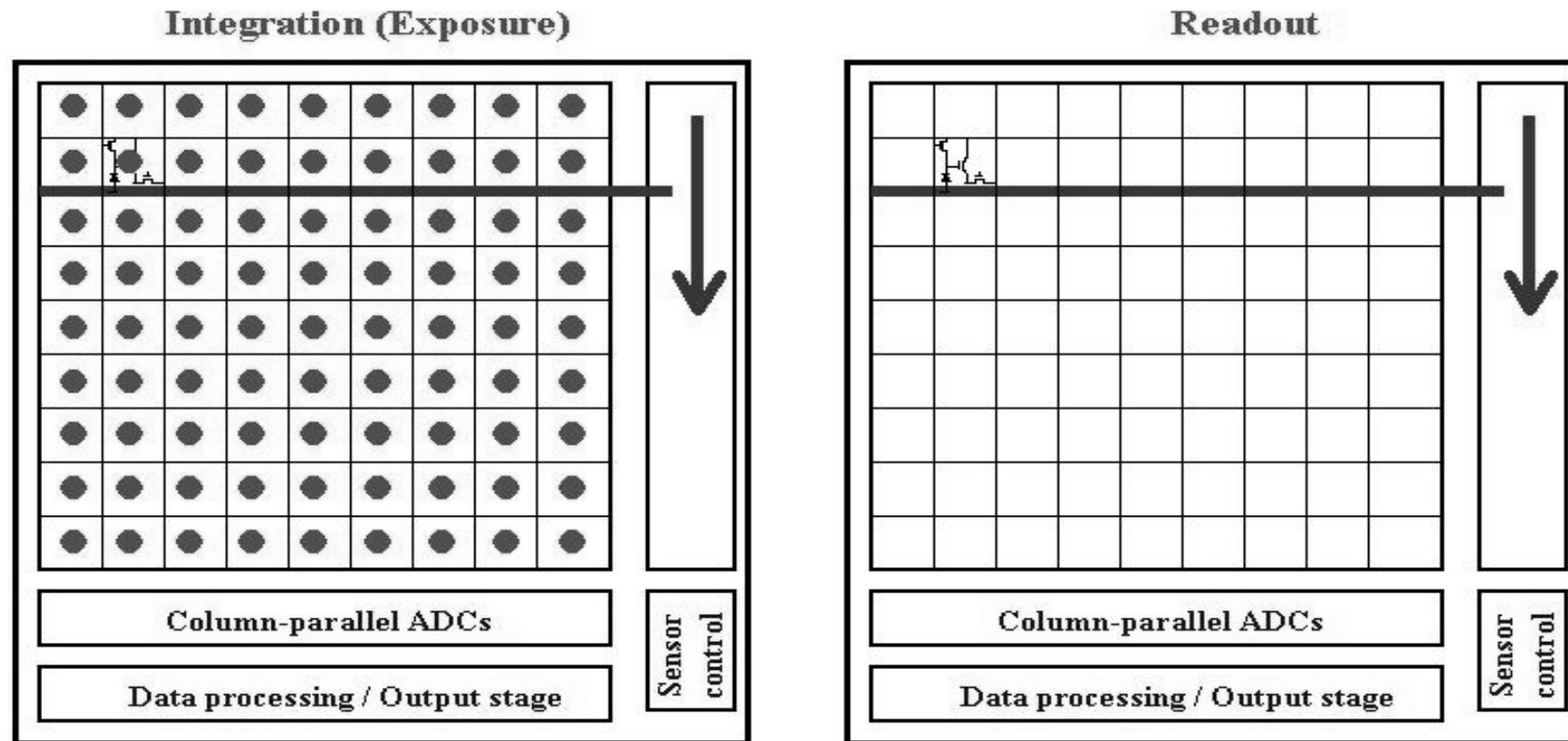
$\hat{=}$ paramètres de fab. dictés par impératifs commerciaux \Rightarrow impact sur les performances & la radio-tolérance



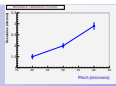


2 modes de lecture des capteurs :

- ◇ **Balayage périodique** (*Rolling Shutter* – cf ci-dessous) : la matrice est lue rangée après rangée
 - ↳ chaque rangée est légèrement décalée en temps par rapport aux autres
- ◇ **Lecture instantanée** (*Snap-shot* – surtout pour l'imagerie) : toutes les rangées sont lues simultanément
 - ↳ temps mort lié au mode pulsé des transistors et à la lecture de la matrice



▷▷▷ lecture "verticale" simultanée de tous les pixels → technologies d'intégration 3D

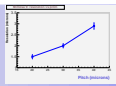


■ R&D adossée à une activité intense de conception de Micro-Circuits :

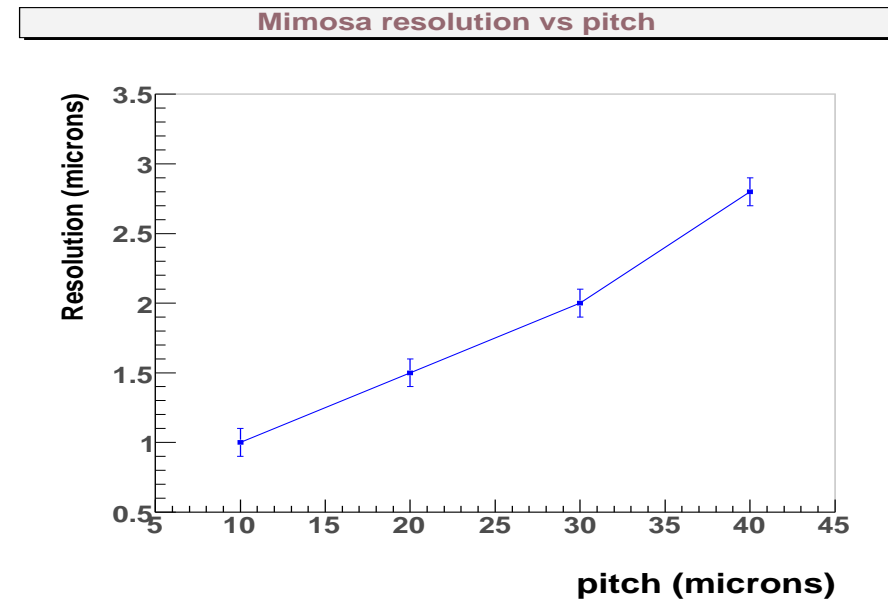
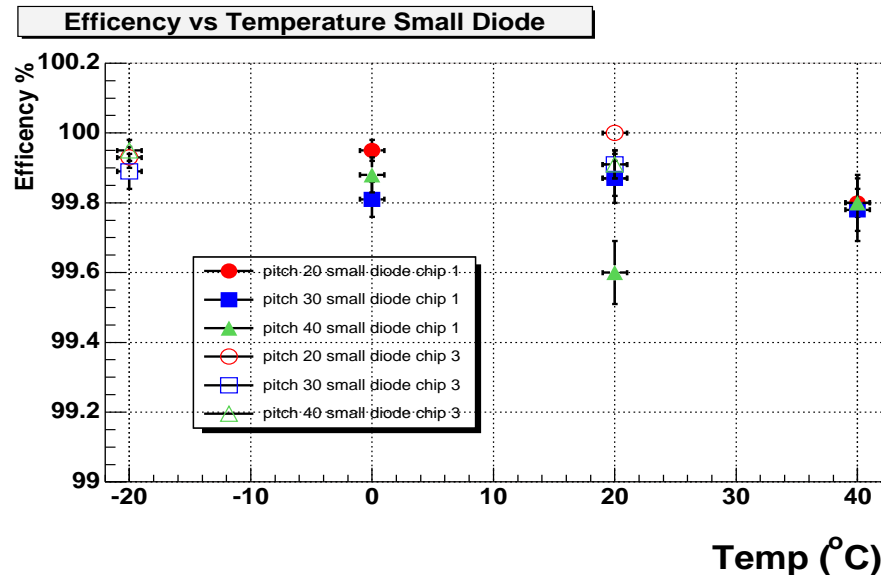
- 15 concepteurs de μ circuits (8 permanents)
- 4 ingénieurs tests μ circuits (tous permanents)
- 9 chercheurs et enseignant-chercheurs (4 permanents)

■ Partenaires :

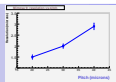
- équipes de micro-électronique de l'IN2P3 et du CEA/Saclay
- équipe de l'IPN-Lyon (cahier des charges et caractérisation d'imageurs EB-CMOS)
- labo de micro-électronique du Fermi Lab (Chicago)
- Instituts de micro-électronique de Dalian et Xi-An (Chine) \rightarrow Accords de coopération universitaires
- Universités et laboratoires européens (DESY/Hamburg, CERN/Genève, GSI/Darmstadt, etc.)
- labos de biologie: LKB/Paris, IGBMC/Strasbourg, EMBL/Heidelberg, INAF/Gif-sur-Yvette
- Universités américaines (Ohio, ...)
- Industriels ou assimilés : Photonis-DEP, SAGEM, Instituts Fraunhofer, IMEC, CMP/Grenoble, ...



- Une trentaine de capteurs différents fabriqués depuis 1999, testés en labo et sur faisceau de particules[±] :
 - *bruit* \rightarrow *rapport signal/bruit* \rightarrow *efficacité de détection (vs température)*
 - *résolution spatiale (et épaisseur* \rightarrow *amincissement*
 - *tolérance aux rayonnements intenses* \rightarrow $\gtrsim 1 \text{ MRad}$, $O(10^{13} n_{eq}/\text{cm}^2)$
 - *rapidité* \rightarrow *sorties numérisées avec suppression des 0 si fréquence de lecture* $\gtrsim 1000 \text{ fps}$
 - *puissance dissipée* \rightarrow *typiquement* $O(100 \text{ mW}/\text{cm}^2)$
- \Rightarrow *exploration continue des caractéristiques des techno. proposées par les fondeurs et des techniques de conditionnement (amincissementS, découpe ss bords amorphisés, câble minces, enveloppes fines, ...)*

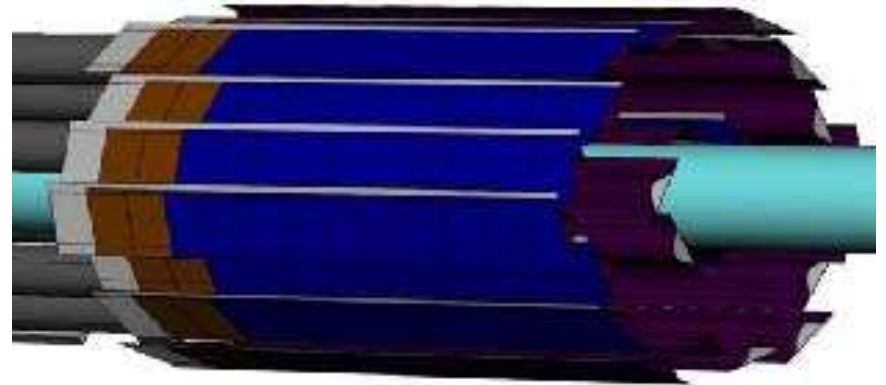


- Principal motif actuel de R&D : vitesse \Rightarrow maximum de fonctionnalités intégrées dans le capteur



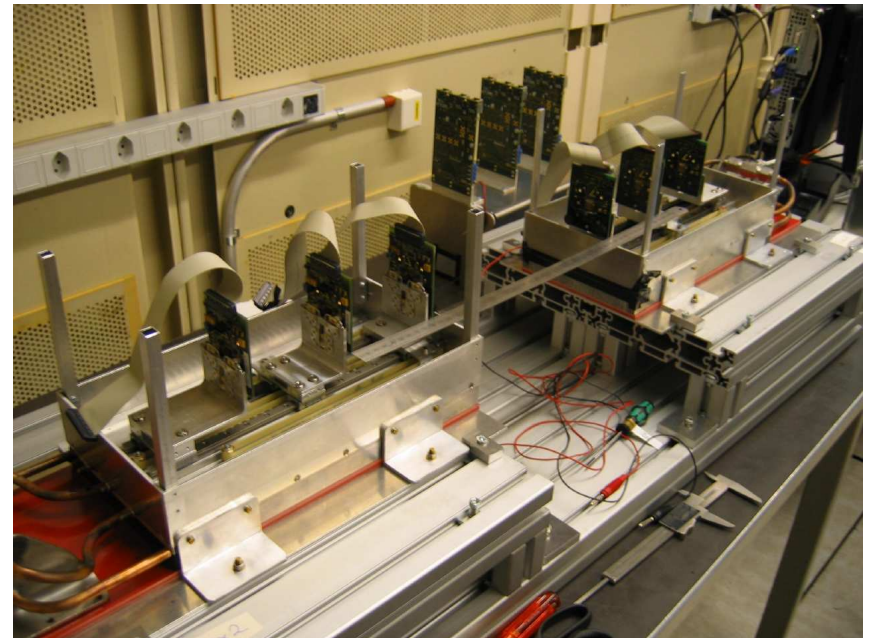
Extension du détecteur de vertex de l'exp. STAR (RHIC/BNL)

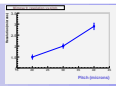
- 2 couches cylindriques : $\sim 1600 \text{ cm}^2$
- $\gtrsim 160$ millions de pixels (pitch = 30/18 μm)
- 3 étapes :
 - ◇ 2007: télescope (3 capteurs) installé dans l'exp.
 - ↳ taux de comptage mesuré, pas de pick-up !
 - ◇ 2008: 2 ou 3 secteurs (8 ou 12 échelles) avec capteurs à signaux numérisés sans \emptyset ($\leq 640 \mu\text{s}$)
 - ◇ 2010: tout le détecteur avec capteurs à \emptyset intégrée ($\leq 200 \mu\text{s}$)



Télescope de faisceau (projet EUDET/FP6)

- 2 bras de 3 plans (plus 1 plan de haute résolution)
- $\sigma_{extrapol.} \lesssim 1 \mu\text{m}$ avec e^- (3 GeV, DESY)
- 2 étapes :
 - ◇ 2007: capteurs à signaux analogiques
 - ↳ télescope mis en service \rightarrow déjà exploité
 - ◇ 2008: capteurs à signaux numérisés avec \emptyset intégrée
 - ↳ temps de lecture $\sim 100 \mu\text{s}$





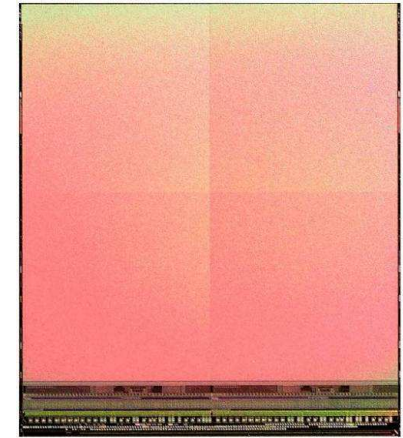
■ Avantages des capteurs CMOS pour l'imagerie :

- μ circuits de pré-conditionnement du signal intégrés dans le capteur
 - ↳ bruit très faible \Rightarrow sensibilité accrue (photon unique)
 - ↳ vitesse de lecture élevée
 - ↳ intégration simple \Rightarrow souplesse \Rightarrow applications variées & nombreuses

\Rightarrow Photo Détecteur Hybride (HPD) : Sensibilité ~ 1 photon / ms / pixel

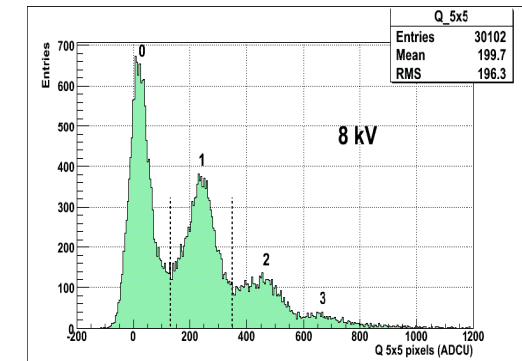
■ Imageur EB-CMOS pour la recherche en biologie cellulaire:

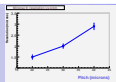
- MIMOSA-5 (1 Megapix, pitch $17 \mu m$, $3.5 cm^2$, 30 Hz) débarrassé du substrat, intégré dans enceinte à vide munie d'une photo-cathode (Photonis-DEP)
- comptage individuel des photo-électrons de quelques keV démontré



■ Imageur (EB-CMOS) pour des applications sociétales :

- caméra pour portiques de sécurité, etc. (SAGEM)
- assistance chirurgicale: localiser cellules cancéreuses résiduelles (Univ. Ohio)
- moniteur de faisceau pour l'oncothérapie (projet SUCIMA / FP5)
- etc.





■ Objectif : temps de lecture $\lesssim 20 - - - - 200 \mu s$ \rightarrow capteurs constitués en colonnes de pixels lues en //

■ Stratégie : 3 lignes de R&D simultanées \rightarrow 3 types de μ circuits

- architecture des matrices de pixels organisées en col. lues en //

- ▷ 1 μ circuit de CDS par pixel et 1 discriminateur par colonne :

- ▷ collaboration avec CEA/IRFU-Saclay depuis 2002

- MIMOSA-8 (2004), MIMOSA-16 (2006), MIMOSA-22 (2007/08)

- μ circuits de \emptyset et mémoires de sorties : SUZE-01 (2007)

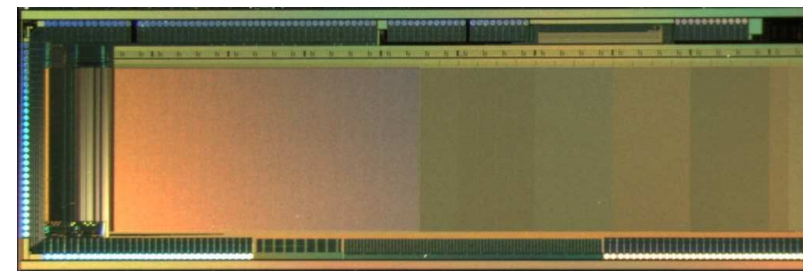
- ADC de 4–5 bits (1000 ADC de $20 \times 500 \mu m^2$ par capteur !)

- ▷ pouvant remplacer (ou compléter) chaque discriminateur

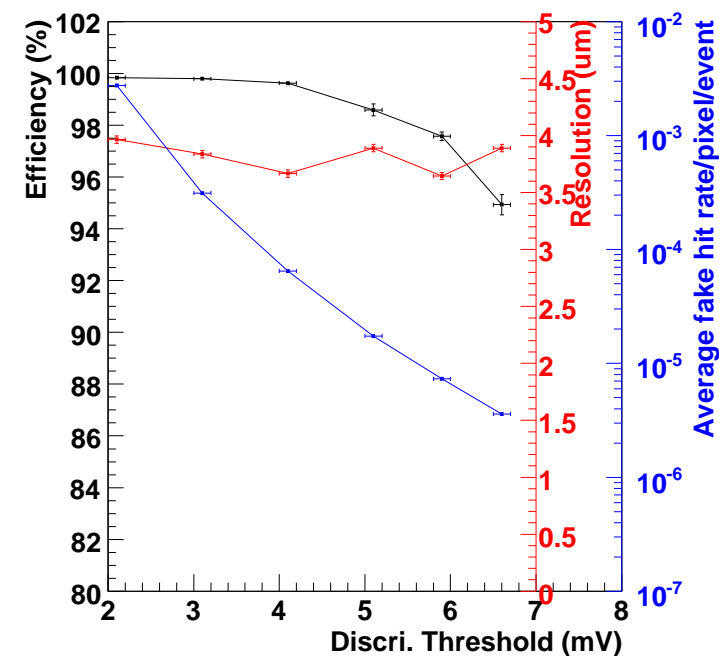
- ▷ R&D avec LPSC-Grenoble, IRFU, (LPCC) depuis 2005

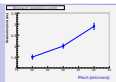
- ▷ encodage 3–5 bits simulé sur données réelles collectées avec m.i.p.
(MIMOSA-9 - pitch $20 \mu m$)

→ $\sigma_{sp} < 2 \mu m$ (4 bits) $\rightarrow 1.7-1.6 \mu m$ (5 bits)

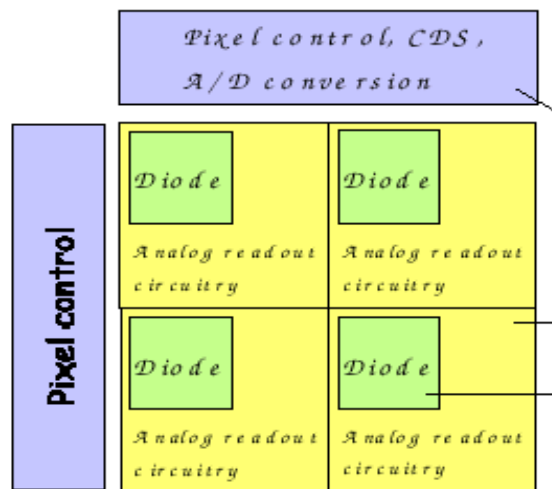


M22 digital S6. Efficiency, Fake rate and Resolution

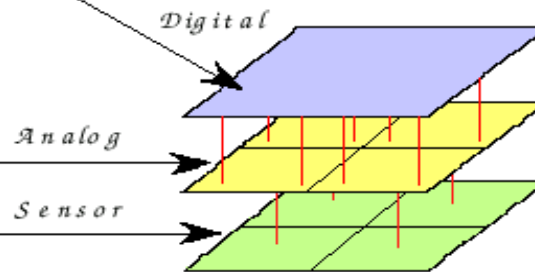




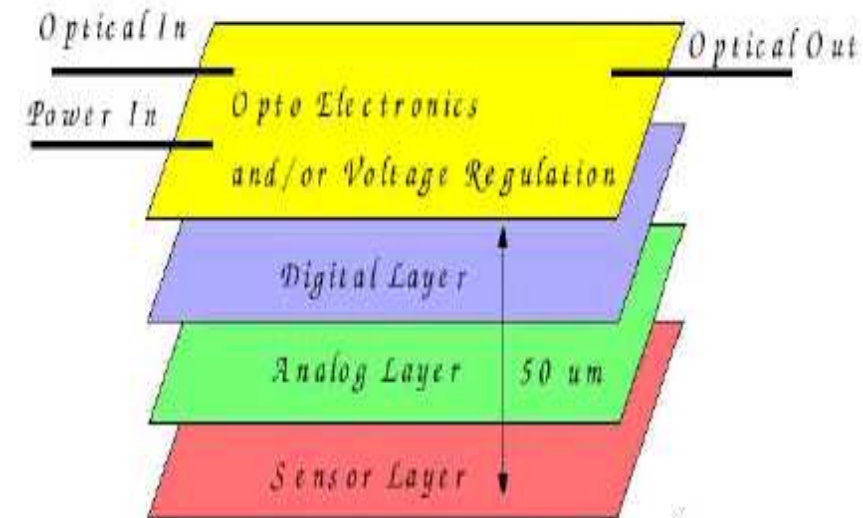
- **Objectif :**
 - ⊕ miniaturiser pour aller beaucoup plus vite
 - ⊕ faire disparaître les zones périphériques non sensibles pour couvrir de grandes surfaces
- **Séparer la collection du signal et les différentes étapes de son conditionnement :**
 - Tier-1: système de collection des charges
 - Tier-2: conditionnement analogique du signal
 - Tier-3: conditionnement mixte du signal
 - Tier-4: conditionnement numérique du signal
 - Tier-5: extraction (optique?) du signal
- **Utiliser la technologie la plus appropriée pour chaque feuille (Tier)**



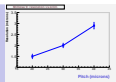
Conventional MAPS 4 Pixel Layout



3D 4 Pixel Layout



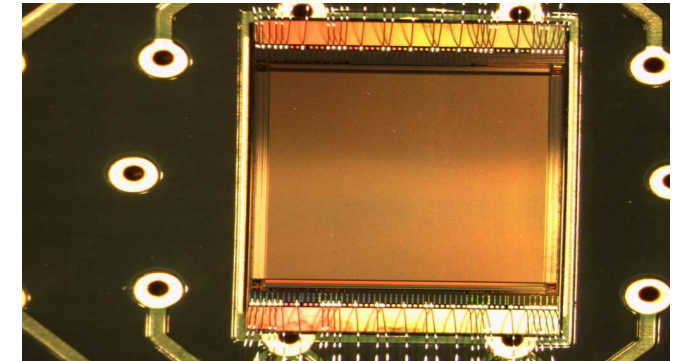
Premiers prototypes prévus pour le printemps 2009



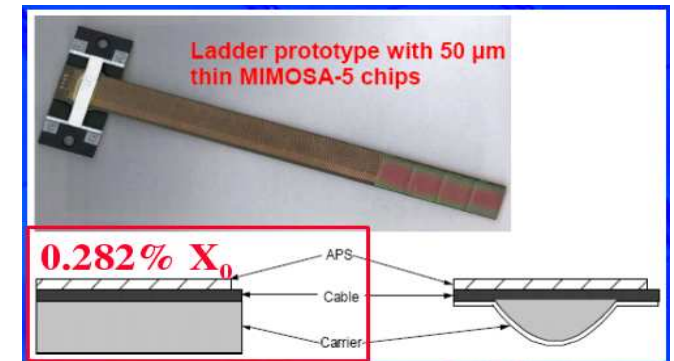
Intérêts des capteurs à pixels CMOS pour XFEL :

- *haute résolution * minceur * surface * vitesse * ...*

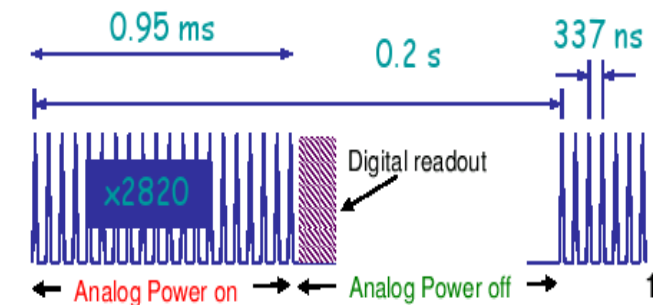
→ *monitorage de faisceaux ? détecteurs de position ?*



- *surfaces $\gtrsim 10 \text{ cm}^2$: aboutement industriel (rendement, coût) ou découpe sans bords amorphisés (en laboratoire)*



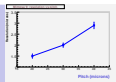
- *architecture de conditionnement du signal avec lecture différée développée pour l'ILC (même structure en temps que XFEL)*



- *substrat high-res: amincissement à 30–50 μm pour X mous*

- *perspectives du CMOS : couche épitaxiée déplétée → sensibilité, résolution spatiale*

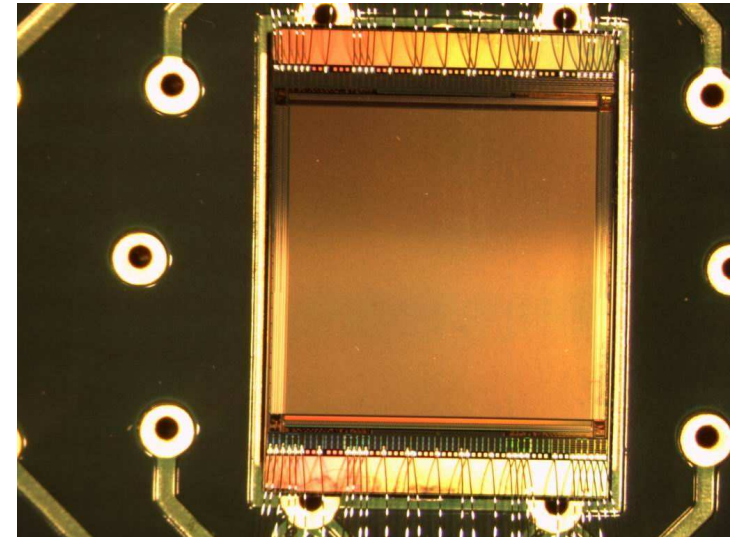
- *perspectives des 3DIT : lecture de qqes 10^5 images /s → $O(10^8)$ impacts / cm^2 / s (?)*



■ Tester les performances d'un capteur à sorties analogiques très précis (MIMOSA-18)

en faisceau (monitorage) ou comme détecteur de position

- *surface sensible : $5.5 \times 5.5 \text{ mm}^2$*
- *nb de pixels : 256,000*
- *pixels de $10 \times 10 \text{ }\mu\text{m}^2$*
- *fréquence d'encodage : 350 fps*
- *épaisseur $\sim 50 \text{ }\mu\text{m}$*



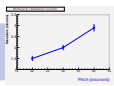
■ Tester les performances d'un capteur à sorties numérisées (\emptyset intégrée) rapide (MIMOSA-26)

en faisceau (monitorage) ou comme détecteur de position

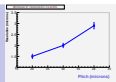
- *surface sensible : $21 \times 10.5 \text{ mm}^2$*
- *nb de pixels : 660,000*
- *fréquence d'encodage : 9,000 fps*
- *pixels de $18.4 \times 18.4 \text{ }\mu\text{m}^2$*

■ Réaliser un dispositif mixte :

réseau d'aiguilles de Csl (conversion des X) monté sur un capteur MIMOSA



BACK-UP SLIDES



■ Numerous different chips addressing 2 types of topics :

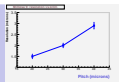
- ◇ Various generic issues influencing detection performances
- ◇ Specific application requirements
- *fabrication technology details: epitaxy thickness, doping profile, I_{leak} , yield, ...*
- *pixel design: charge collection, leakage current removal, ion. rad. tol. design, ...*
- *signal processing μ circuits: CDS/pixel, discri. & ADC at column end, \emptyset μ circuits, ...*
- *repeat small prototype design with large sensors : yield, capacitive effects, offset dispersion, ...*
- *optimise generic design for each specific application : develop chips dedicated to each application*

■ > 20 MIMOSA sensors designed, fabricated in 7 different fabrication technologies:

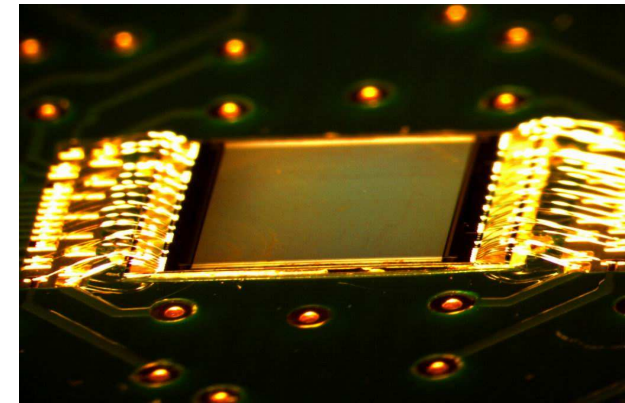
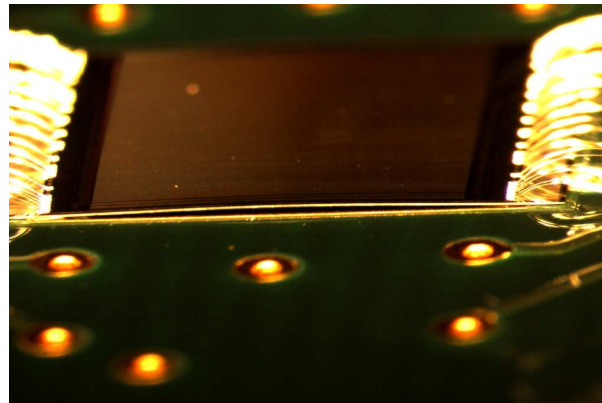
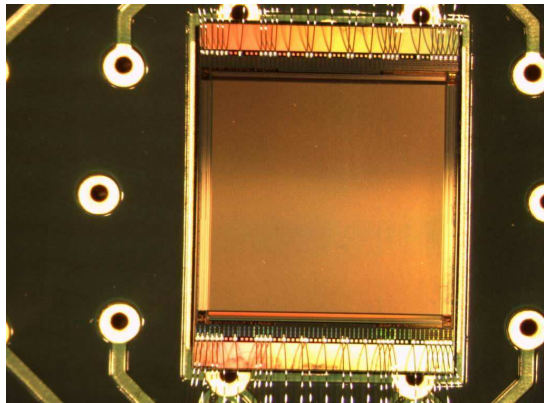
- *AMS-0.6 μm : MIMOSA-1, MIMOSA-5*
- *MIETEC-0.35 μm (became AMI-0.35 μm): MIMOSA-2 and -6*
- *IBM-0.25 μm : MIMOSA-3*
- *TSMC-0.25 μm : MIMOSA-8 and -10*
- *STM-0.25 μm : MIMOSA-21,-21A,B,C*
- *AMS-0.35 μm without epitaxial layer: MIMOSA-4, -12 and -13*
- *AMS-0.35 μm OPTO with epitaxial layer: MIMOSA-9, -11, -14, -15, -16, -17, -18, -19, -20 and -22*

■ Specific difficulties:

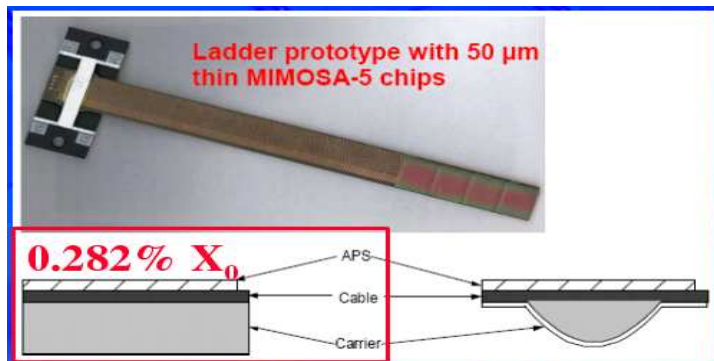
- ◇ Analog part of most sensors cannot be simulated reliably (lack of doping profile details, etc.)
- ◇ R&D addresses simultaneously detection system & signal processing parts integrated on same substrate



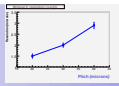
Industrial thinning (via STAR coll. at LBL) \rightarrow MIMOSA-18 ($5.5 \times 5.5 \text{ mm}^2$ thinned to $50 \mu\text{m}$)



Devt of ladder equipped with MIMOSA chips (coll. with LBL) : STAR ladder ($\lesssim 0.3 \% X_0$) \rightarrow ILC ($< 0.2 \% X_0$)



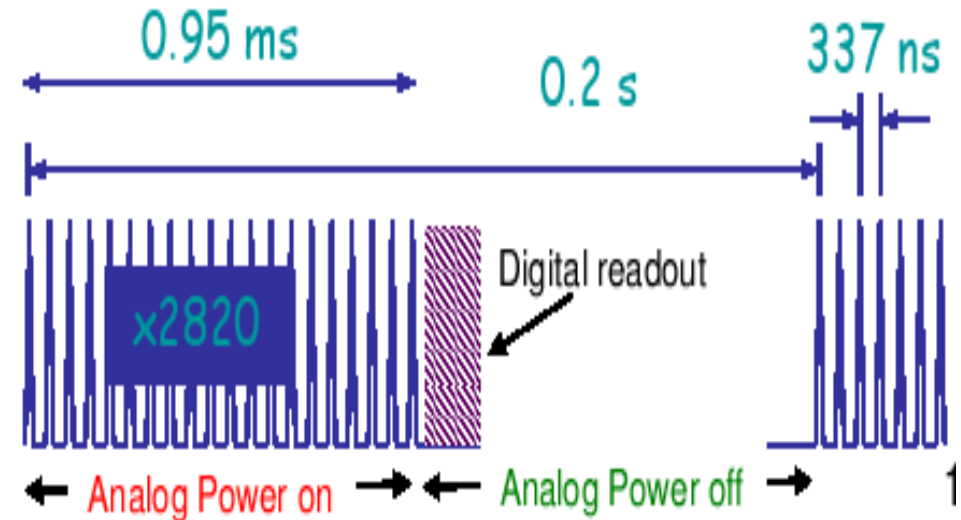
High precision packaging technologies : \rightarrow mount & connect $\lesssim 5$ MIMOSA-18, thinned to $50 \mu\text{m}$, on support made of industrial diamond, thinned to $50\text{--}100 \mu\text{m}$ and aluminised \equiv mecha. support & heat extractor & cable
 \rightarrow project started in 2007: diamond ($50\text{--}100 \mu\text{m}$) fabricated \rightarrow assembly of MIMOSA-18 sensors under way



■ **Beam time structure** : ~ 1 ms train (~ 3000 BX) every 200 ms \Rightarrow duty cycle $\sim 1/200$

▷ 2 consequences :

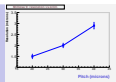
- 1) Switching off the sensors between trains may allow average power reduction by factor of ~ 100
 - \Rightarrow essential for material budget (modest cooling)
 - also: room for high density functionalities integrated inside sensitive area (pixels)
- 2) Only a few BX contain relevant physics info.
 - but all contain large amounts of beam background
 - \hookrightarrow remove irrelevant BX !



■ **Electro-Magnetic Interference from bunch wake field** :

- ◇ beam delivery elements may be source of very short λ EM field
- ◇ specific sensor architecture : store signal during train (~ 1 ms) and read out after train
 - \Rightarrow large nb of memories \Rightarrow short time slices \Rightarrow better background rejection

\hookrightarrow 3DIT may allow a big step towards this goal



► **Problématique: microscopie de la dynamique cellulaire rapide à basse luminosité**

↪ **comportement et interaction de molécules biologiques dans leur environnement cellulaire**

● **Cahier des charges type:**

◇ *imageur (capteur CMOS) intégré dans un Photo-Détecteur Hybride (HPD)*

↳ *détecte des e^- émis par photocathode*

↳ *développer un capteur sensible aux e^- de qqes keV !!!*

◇ *surface de l'imageur: qqes cm^2*

◇ *résolution intrinsèque $< 10 \mu m$*

◇ *S/N > 3*

◇ *sensibilité ≤ 2 photons / $10 \times 10 \mu m^2$ / ms*

◇ *taux d'images ~ 1000 fps* ↳ *conditionnement du signal dans capteur*

◇ *horloge effective au niveau des pixels: $\lesssim 10$ MHz*

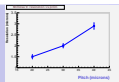
● **Cadre – collaboration:**

◇ *Groupement d'Intérêt Scientifique (GIS) entre l'IN2P3 (IPHC - IPNL) & Photonis-DEP*

◇ *IPHC: développement d'un EB-CMOS (= capteur débarrassé de son substrat) rapide*

◇ *IPNL: caractérisation du HPD, développement du système d'acquisition*

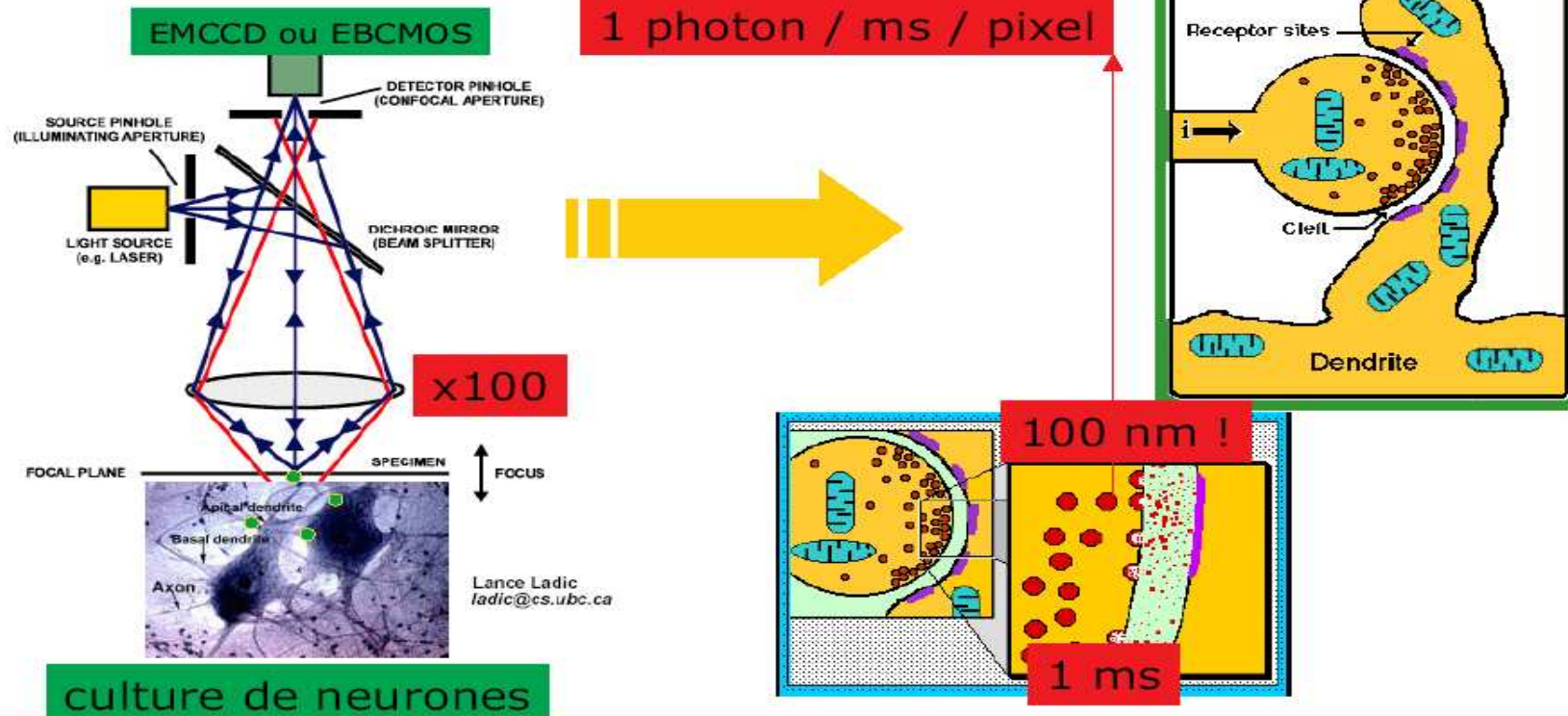
◇ *Photonis-DEP: réalisation du phototube incorporant le capteur CMOS*



Exemple d'application en neuroscience

- Etude des signaux dans les terminaisons synaptiques :

microscopie confocale



RB, CS IPNL, 2/12/04