

Imagerie du vivant avec des caméras CMOS : domaine d'application et développements récents

Timothée Brugière
IPHC Strasbourg / CNRS

Sommaire



- Détecter les faibles flux lumineux
- Rapide historique et différents détecteurs
- CCD et CMOS
- Bruits dans les caméras, avec ou sans multiplication
- Nouveaux développements CMOS et quelques applications
 - EMCMOS et EBCMOS



- **Choisir le bon détecteur pour une observation dépend de plusieurs paramètres :**
 - Intensité lumineuse
 - Temps d'intégration
 - Fréquence d'acquisition
 - Longueur d'onde
 - Résolution spatiale
 - Gamme dynamique
 - ...



- **Observer le « photon unique », i.e. conditions proches de 1 photon / pixel / image :**
 - **Dans quel cas ?**
 - Phénomènes à très faible émission
 - Fréquences d'acquisition élevées
 - *fréquence* ↑ → *tps d'intégration* ↓ → *#photons/pixel* ↓
 - « Pitch »
 - *taille du pixel* ↓ → *#photons/pixel* ↓
 - **Comment détecter 1 photon ?**
 - Réduire le bruit → électronique « bas bruit » / refroidissement
 - Multiplier le signal → dispositif « EM » / vacuum-tube / MCP
 - Efficacité quantique, « Fill-Factor »



Différents types de détecteurs :

- CCD

- EMCCD, iCCD

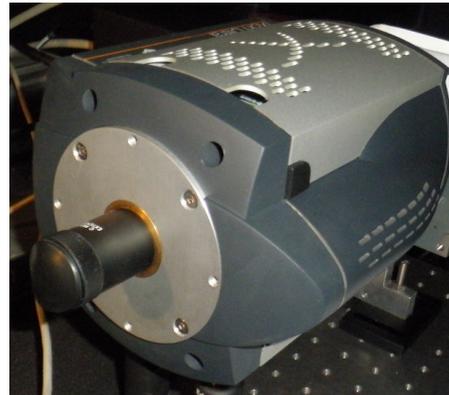
- CMOS

- sCMOS

- prototypes EMCMOS / ebCMOS

- pixels « hybrides »

- APD / PMT

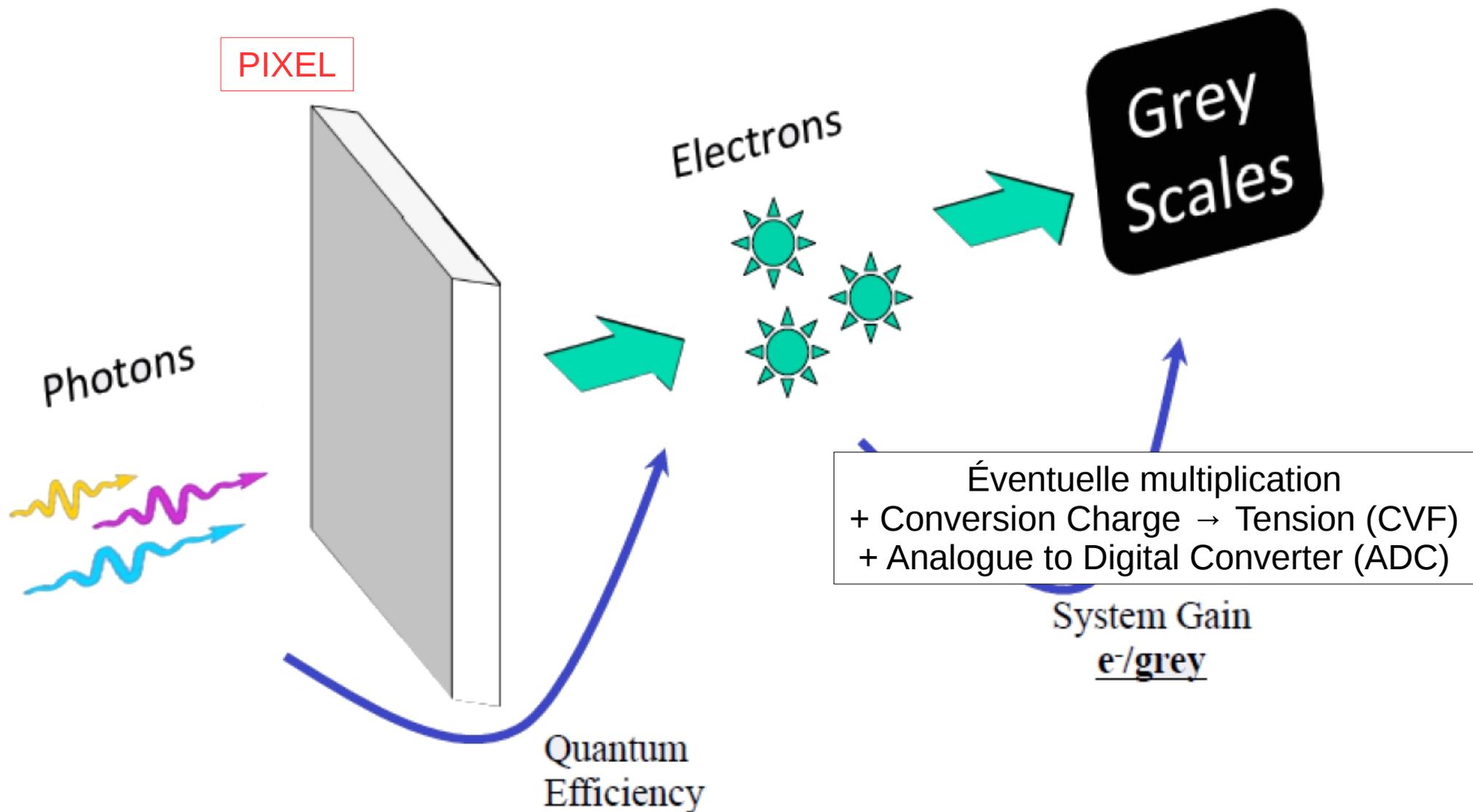


Un peu d'histoire



- **1963** → CMOS @ Fairchild Semiconductor (Frank Wanlass)
- ~ **1968** → Premier « Passive Pixel MOS Sensor » (FPN, beaucoup de bruits, V_{th} instable → variations vs. temps)
- **1968/1969** → Etudes des pixels « actifs » (intégrant l'amplificateur de lecture) par Noble, Chamberlain, Weimer
- **1969** → CCD @ Bell Labs (George E. Smith et Willard Boyle, Nobel en 2009), éclipse les CIS...
- **1992** → CMOS « Active Pixel Sensor » @ NASA/JPL
- **2001** → Premier EMCCD commercial
- **2011** → « Scientific » CMOS : CMOS « bas bruit »

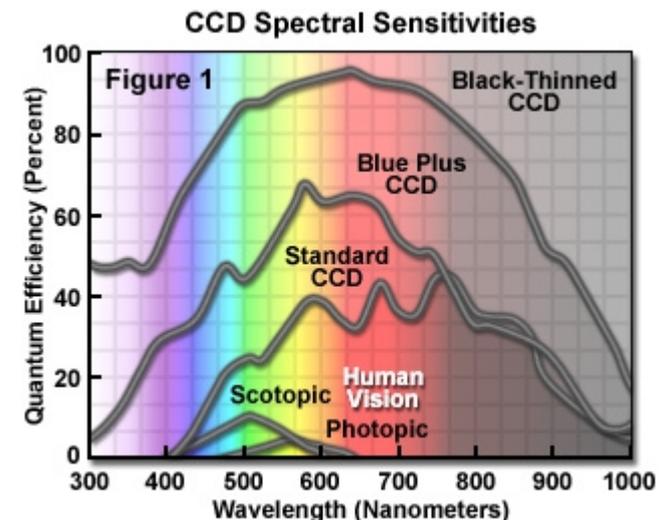
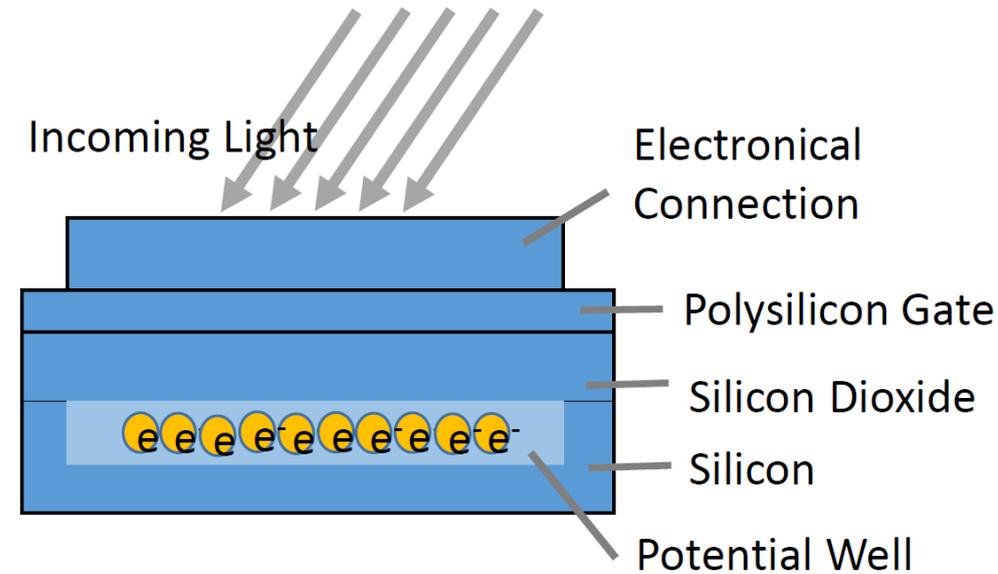
« Digital Imaging »



L'efficacité quantique (QE)



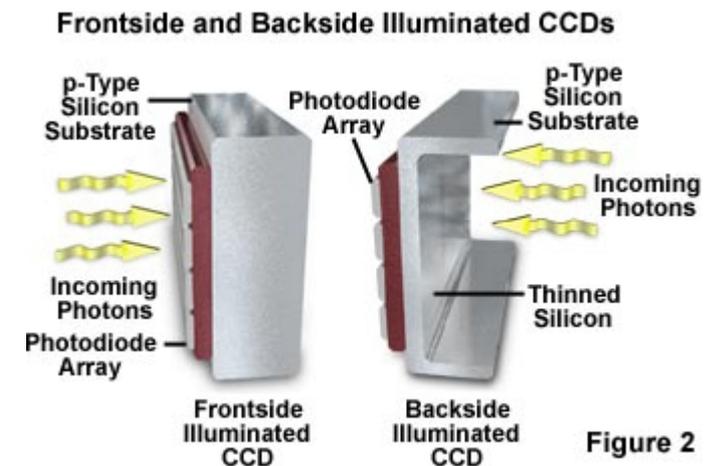
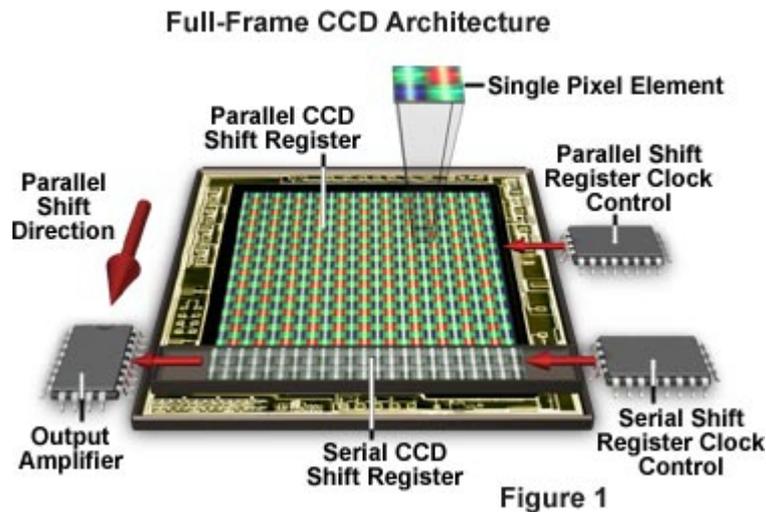
- Capacité d'un dispositif à produire une charge électrique à partir d'un photon incident
 - dépend de λ , λ et profondeur d'absorption sont directement reliées
- plus λ est faible, moins la profondeur d'absorption est grande



LA QE « physique » ne prend pas en compte le « Fill factor » (QE « effective »)



- Quelques bases :
 - Inventé dans les années 1970 @ Bell Labs
 - Puce de silicium segmentée en matrice de sites photosensibles
 - Conversion de la lumière incidente en signal électrique



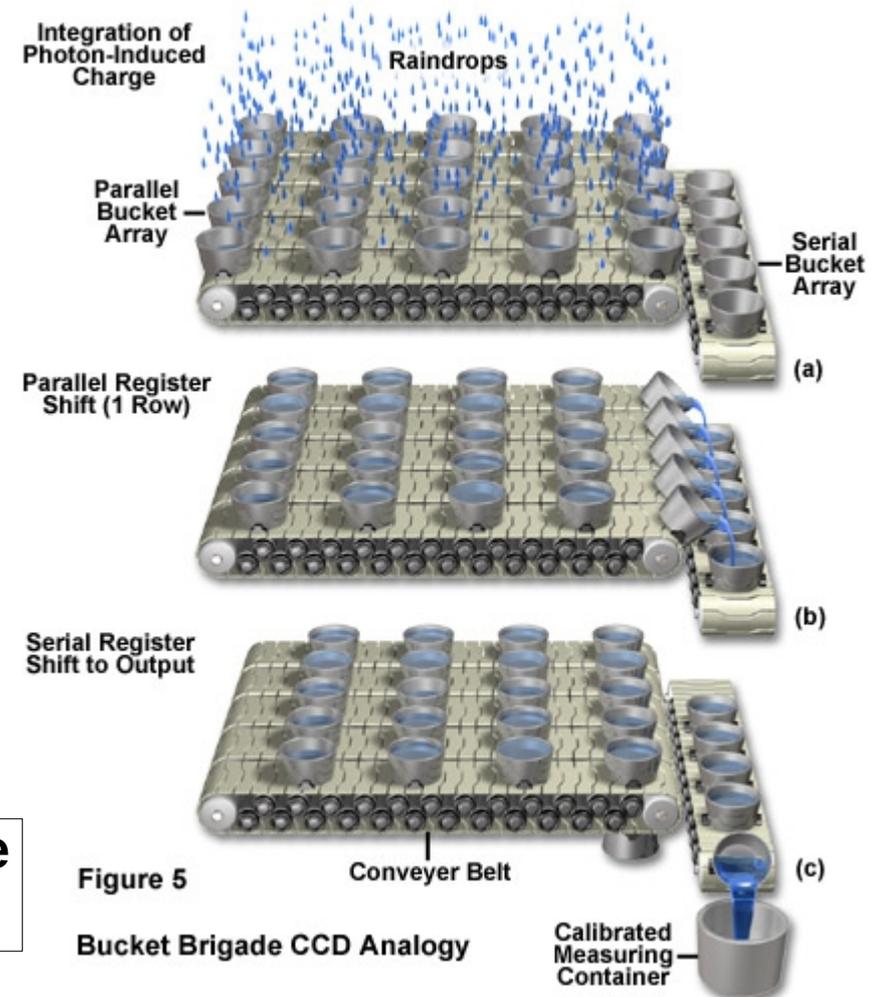
Les dispositifs CCD



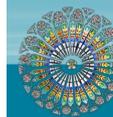
« Bucket Brigade Rainfall Analogy »

- Intensité de la pluie ↔ signal
- Temps de collection ↔ intégration
- Ligne par ligne, le signal est transféré vers un registre « série »
- Puis la conversion « Charge → Tension » et la digitisation sont faites pixel par pixel
- La procédure est répétée jusqu'à la lecture complète de la matrice

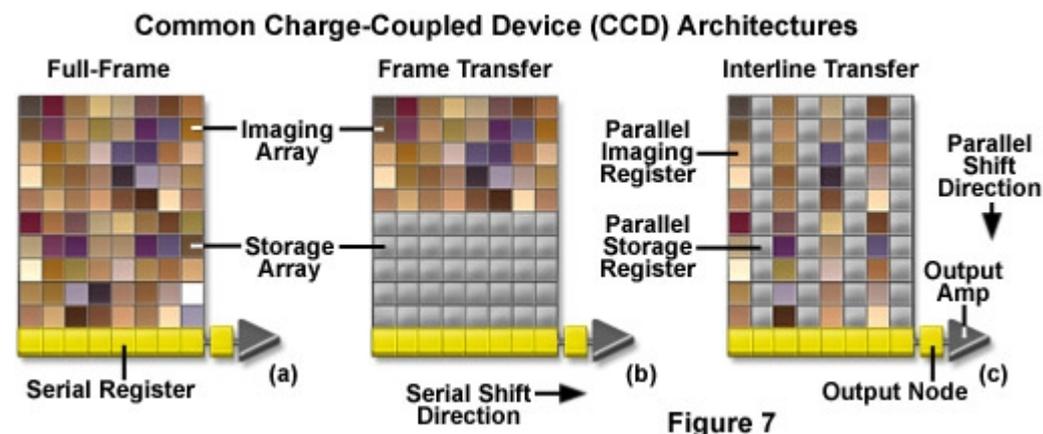
➔ Le système de lecture (readout) est **externe** au pixel, la lecture est **séquentielle**.



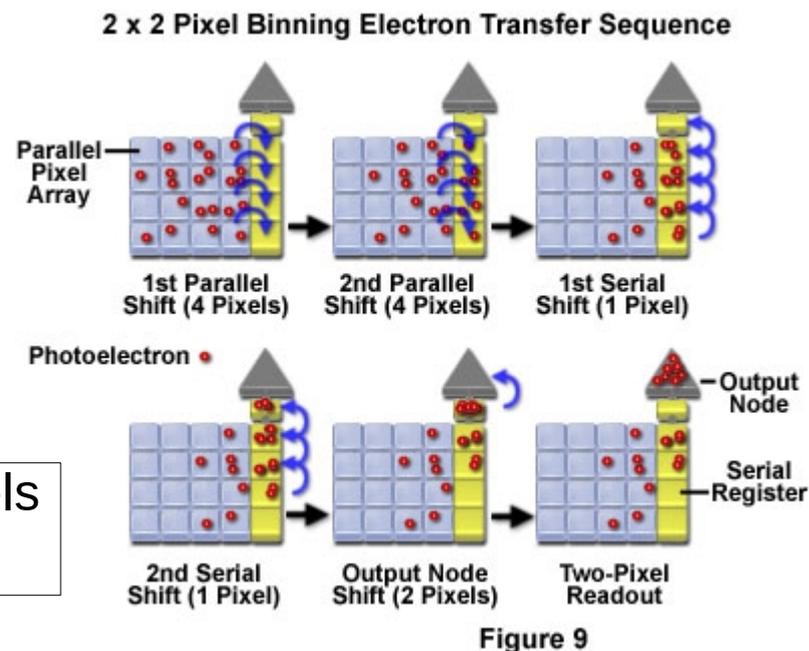
Les dispositifs CCD



- Différentes architectures d'acquisition sont possibles



- Différents mode de lecture sont possibles



➔ Mais « windowing » compliqué (tous les pixels avant ceux de la fenêtre doivent être lus)

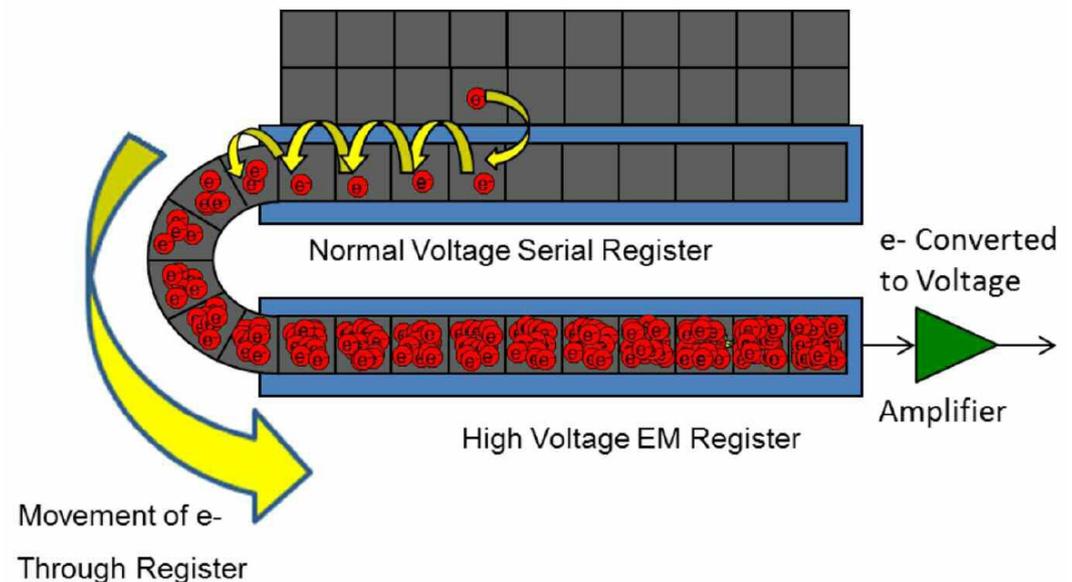


- « **Electron Multiplying** » CCD :
 - Registre de multiplication ajouté après le registre en série classique
 - haute tension appliquée ($\sim 40V$) → Ionisation par impact
 - Gain appliqué avant le nœud de lecture, donc avant les bruits de lecture
 - Amélioration du rapport Signal/Bruit

Mais :

→ Augmentation du courant d'obscurité (donc de sa fluctuation)

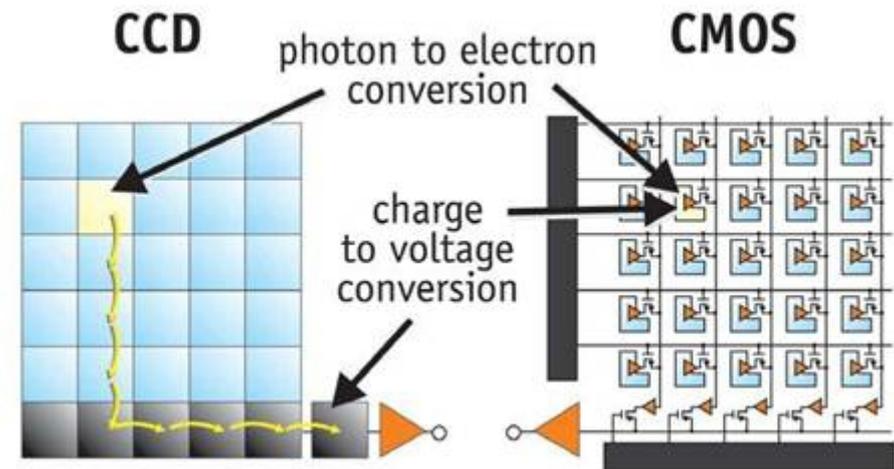
→ « Excess Noise Factor »
Bruit lié à la nature stochastique du phénomène d'ionisation par impact



Les dispositifs CMOS



- « Active Pixel Sensor »
 - lecture intégrée dans chaque pixel. Possibilité d'inclure aussi des fonctions logiques avancées
- L'ensemble des fonctions d'imageurs est inclus sur le silicium → coût moindre, basse consommation



Anatomy of the Active Pixel Sensor Photodiode

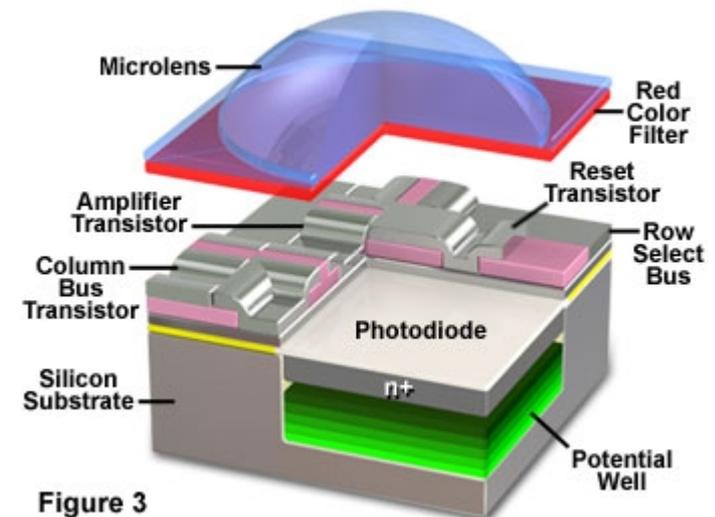


Figure 3

➔ Le système de lecture (readout) est **interne** au pixel, la lecture est **parallèle**.

CMOS vs. CCD



■ CCD

- QE élevée (>90%)
- fonctionne à 10/15V → consommation, refroidissement (EMCCD @ -80°C)
- lecture séquentielle → ~ lent
- CCD hautes performances (amincis, backside) → faible nombre d'industriels → coût
- « Intégration » plus compliquée

■ CMOS

- QE plus faible ~ 70 % (monolithic), mais hybride jusqu'à 90 %
- fonctionne à 3.3/5V → - de consommation, - de refroidissement (sCMOS @ -30°C)
- lecture rapide, « natural windowing »
- antiblooming, pas de smearing
- possibilité de fonctions avancées « on-chip »
- meilleure résistance aux radiations

Le concept MULTIMOS

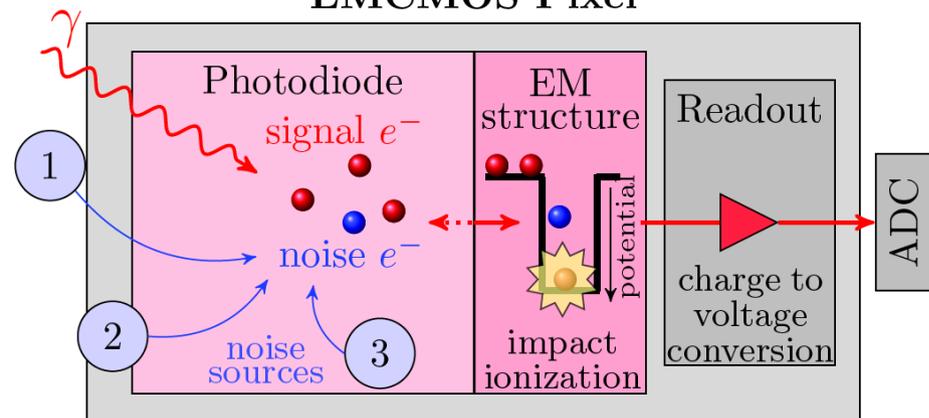


EMCMOS

- ▶ Multiplication intra-pixel → pas de bruit CIC
- ▶ "System-on-chip" → compact
- ▶ Consommation faible
- ▶ Gamme dynamique importante
- ▶ Technologie mature → sécurité et coût

- Prototypes produits par E2V (Saint Egrève – FRANCE)
- Caractérisation faite au sein du groupe ebCMOS @ IPN Lyon

EMCMOS Pixel

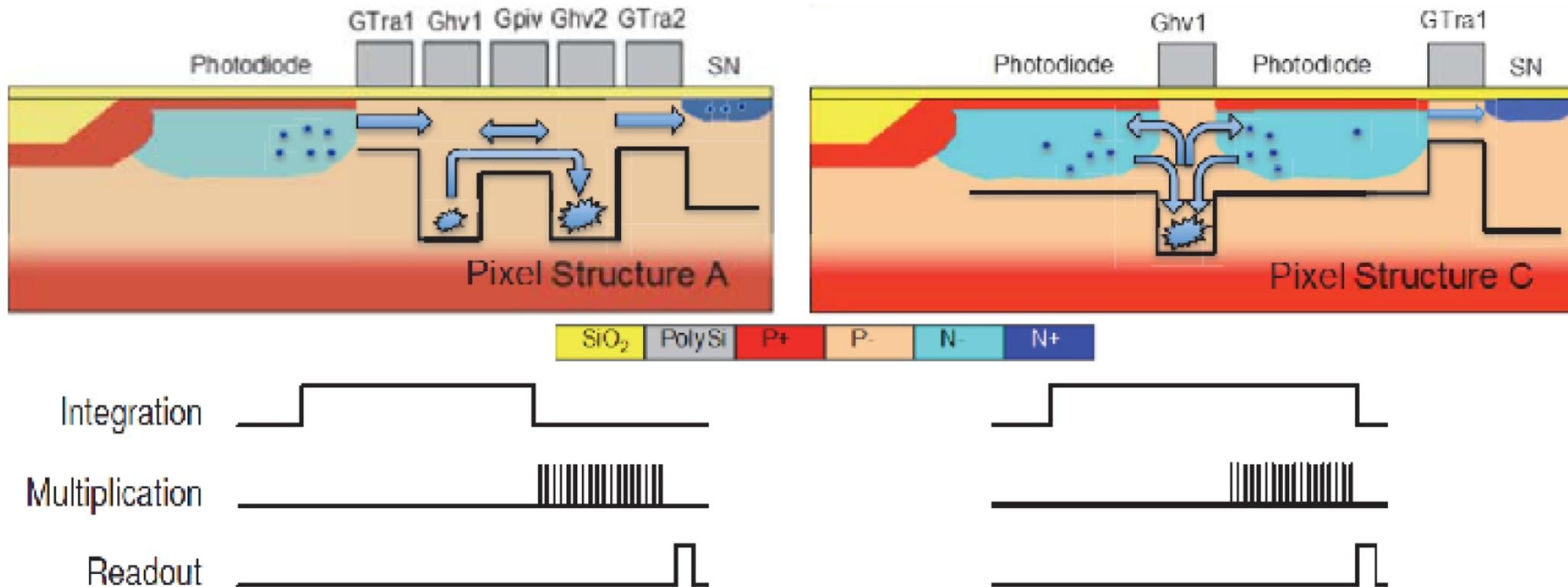
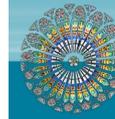


Noise sources :

1. Band-to-band tunneling
2. STI (Shallow trench isolation) and metal oxides
3. Thermal generation



Le concept MULTIMOS

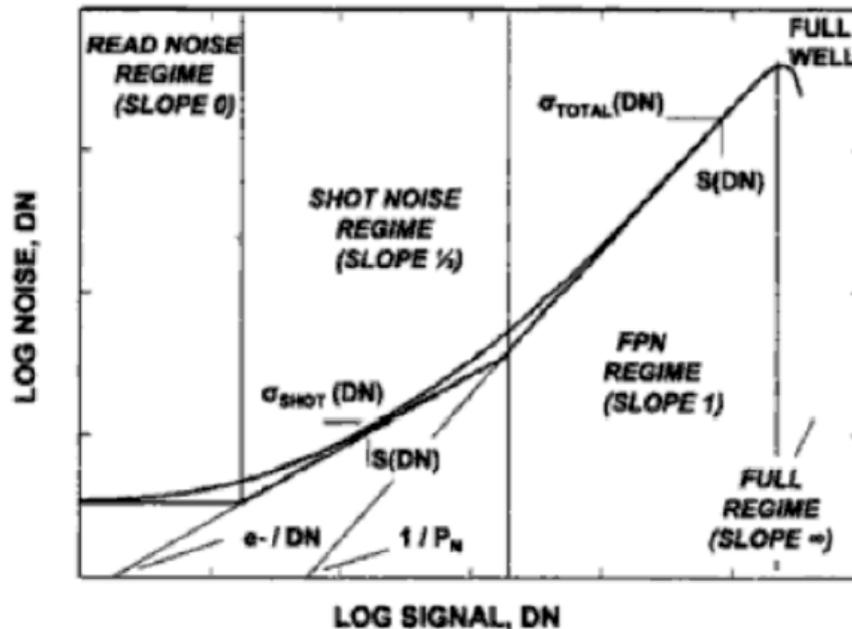


- Cellule de multiplication séparée de la photodiode
 - Les phase d'intégration et de multiplication arrivent l'une après l'autre

- Cellule de multiplication à l'intérieur de la photodiode
 - L'intégration continue pendant la phase de multiplication



4 zones identifiables :



Autres bruits :

→ fluctuation du courant d'obscurité (refroidissement), bruit de reset (CDS), bruit 1/f (filtrage), échantillonnage (K_{ADC}), CIC (si multiplication dans EMCCD)

1. Bruit de lecture :

- Signal trop faible pour être détecté
- Constante

2. Bruit shot :

- Distribution des photons sur les pixels, irréductible
- droite de pente 1/2 (Poisson)

3. Bruit FPN :

- non-uniformité de la réponse des pixels (matrice), réductible
- droite de pente 1 (proportionnel au signal)

4. Saturation

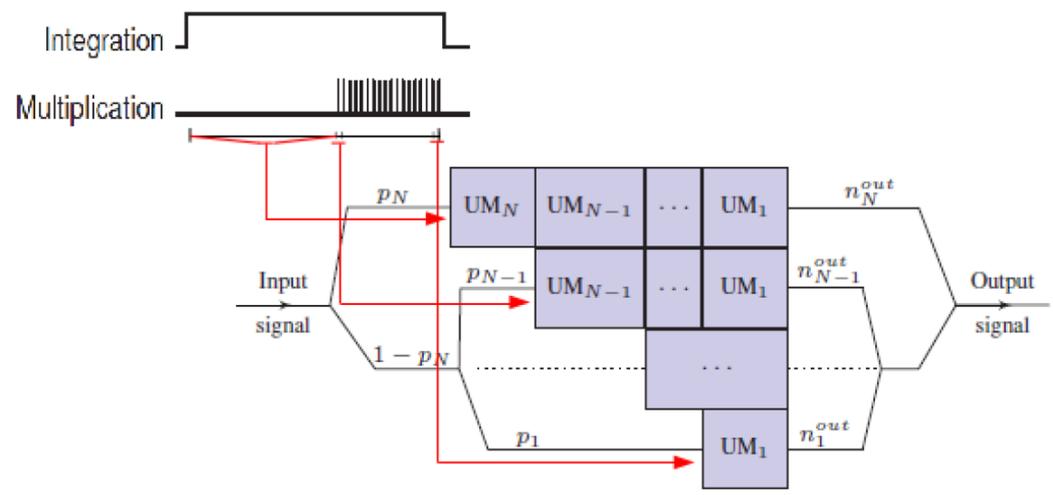
Les bruits liés à la multiplication

Ionisation par impact

- ▶ Processus stochastique :
→ à chaque cycle de multiplication, un électron à une probabilité $\alpha(E)$ de générer un électron secondaire
- ▶ Ajoute une contribution à la fluctuation du signal de sortie

→ Théorème de Burgess : $\sigma_{n_{out}}^2 = \langle m \rangle^2 \sigma_{n_{in}}^2 + \langle n_{in} \rangle \sigma_m^2$

- Démontré par Van Vliet (1979)
- « Excess noise factor » dérivé pour plusieurs structures par Hollenhorst (1990)
- Généralisation au cas de l'EMCMOS (2014)

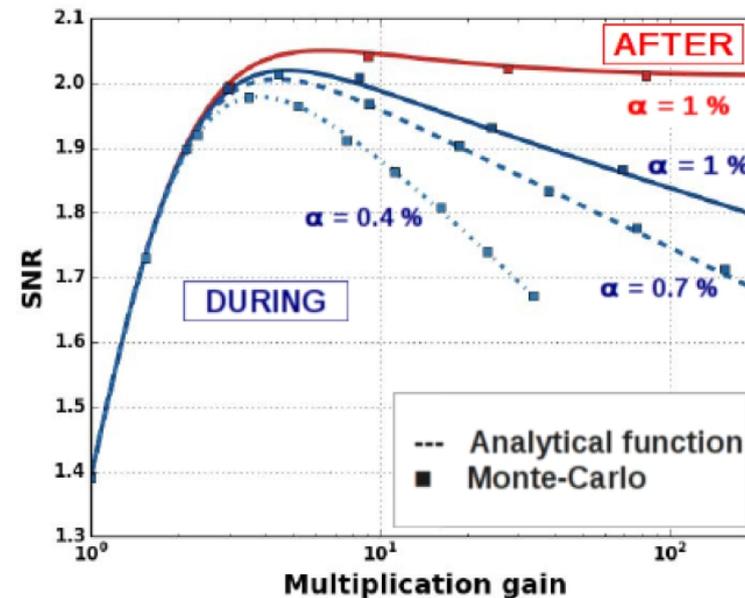
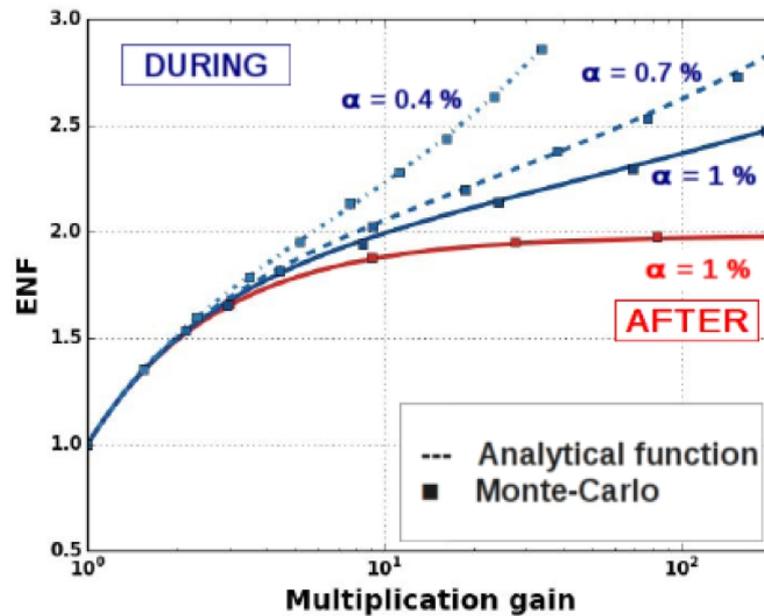


Les bruits liés à la multiplication



Excess noise factor :

$$ENF = 1 + \frac{EN_{\varphi} + EN_{TPN}}{\langle m^{eq} \rangle^2 \sigma_{n^{in}}^2}$$



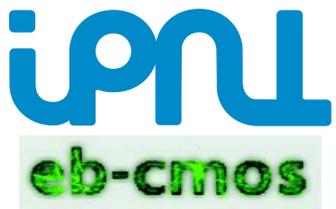
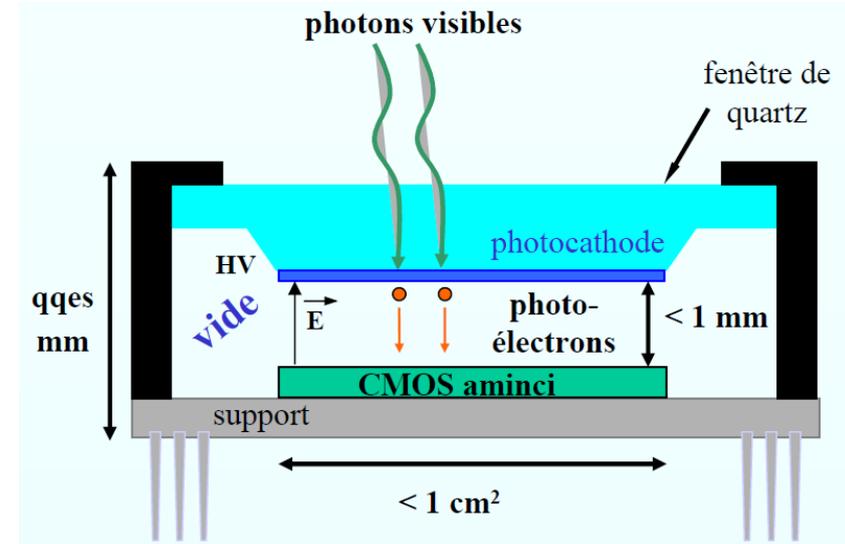
Multiplier via l'ionisation par impact :

- améliore le SNR
- dégrade la possibilité de « photon counting »

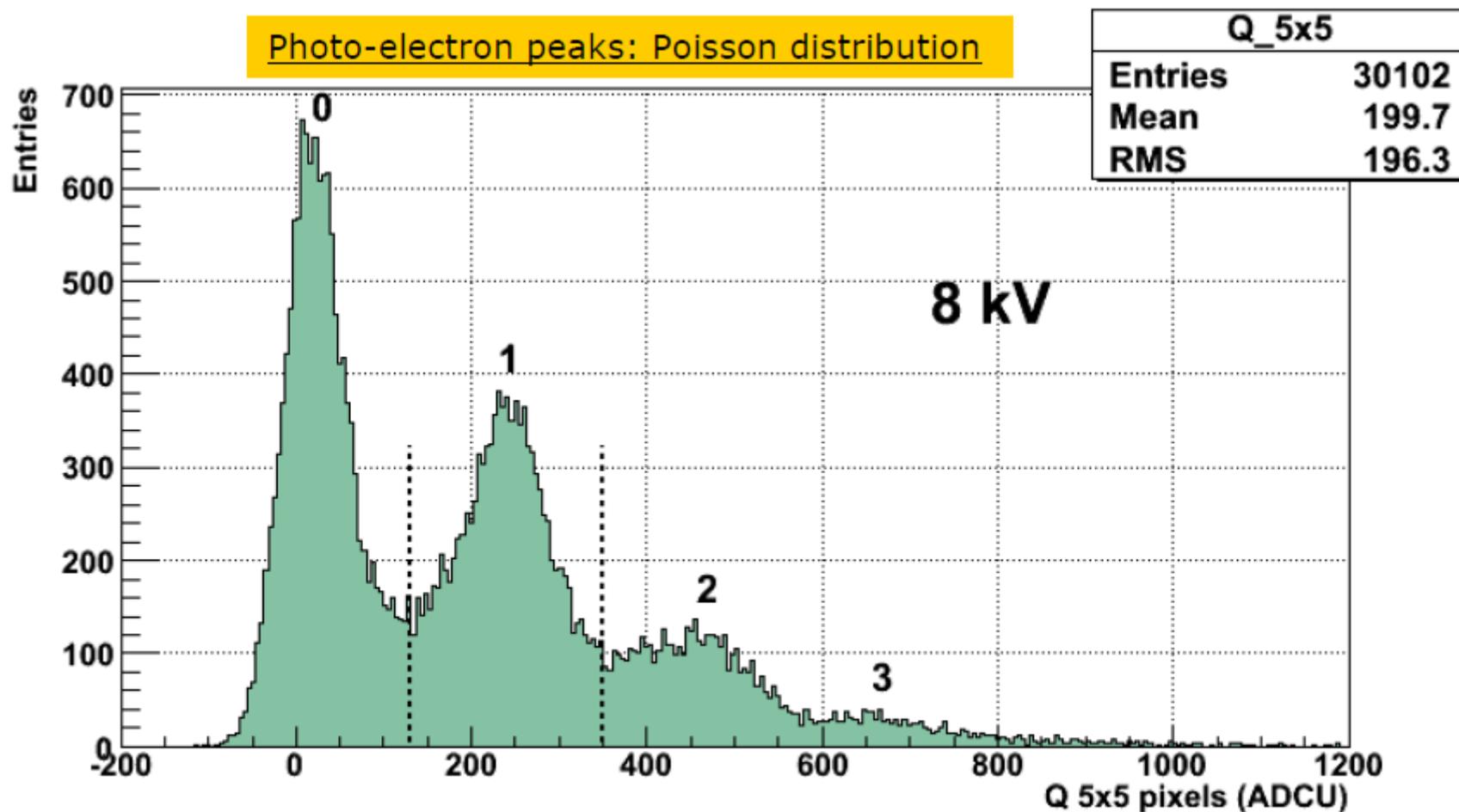
L'ebCMOS



- Photocatode + tube + Back-side bombarded CMOS (Puce amincie <math><80\text{nm}</math>)
- 400 x 400 pixels (10 μm pitch)
- Frame rate \rightarrow 500-1000 images/s
- Gain \sim 300 (@2.5kV)
- ENF \sim 1.3 \rightarrow « Photon counting »
- QE \sim 25 % (@530nm)
- Faible courant d'obscurité
(\sim 15Hz/mm \rightarrow 6.5 10^{-5} evt/pix/frame)
- Output 10 Gb/s

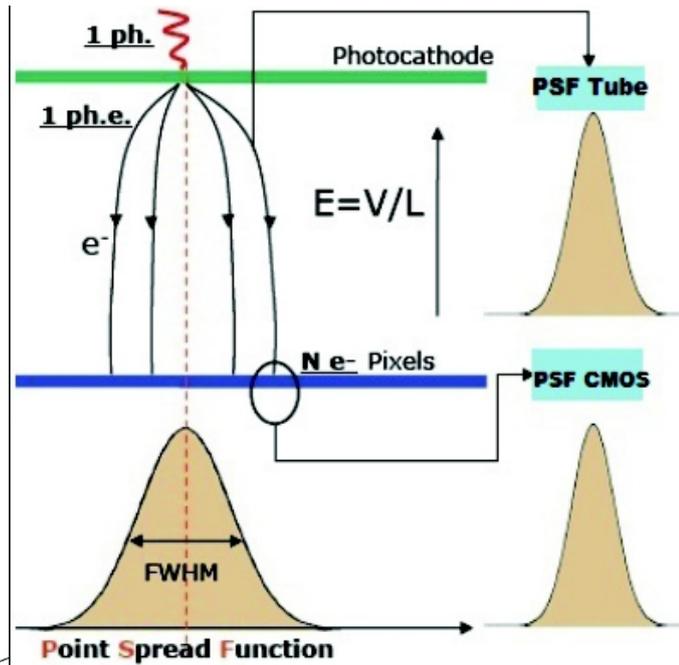


L'ebCMOS



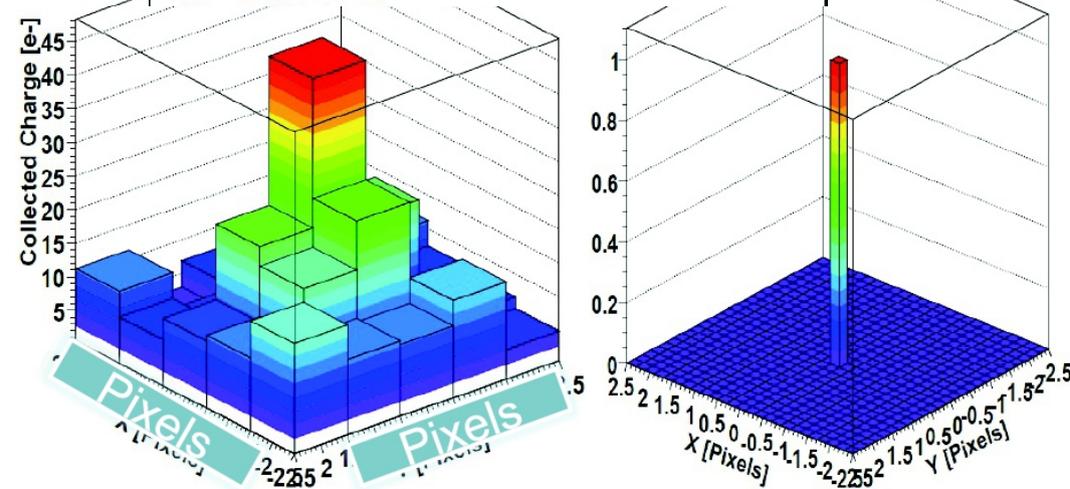
=> Advantage against EMCCD

L'ebCMOS

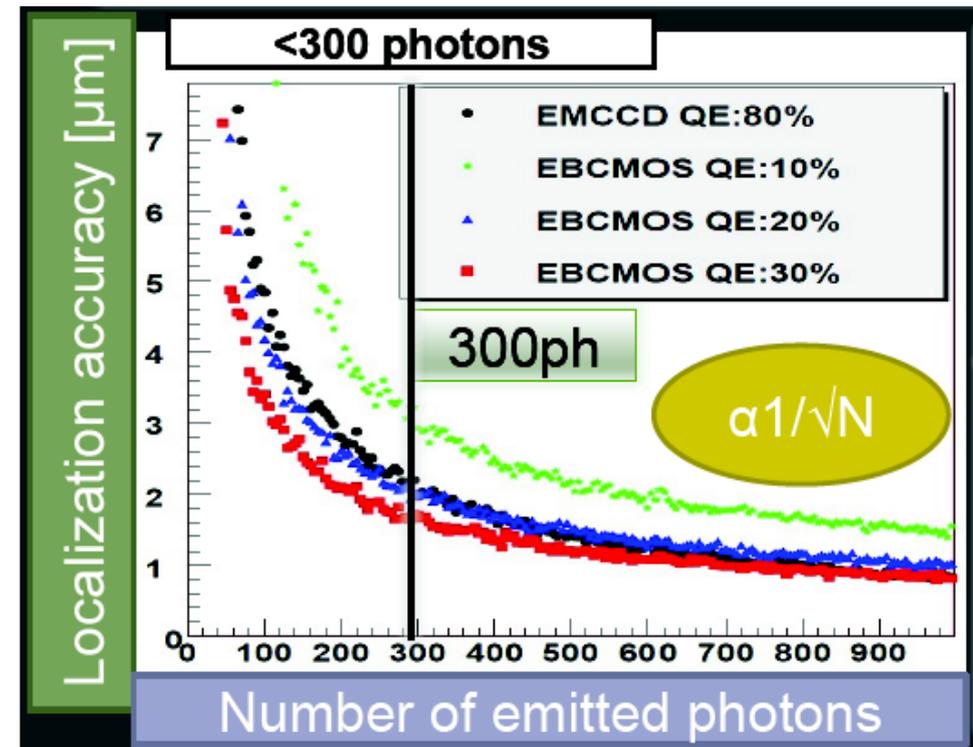


Sub-Pixel resolution (COG)

Thomas Cajgfinger @ IPNL



Résolution $\sim 2 \mu\text{m}$



L'ebCMOS, applications



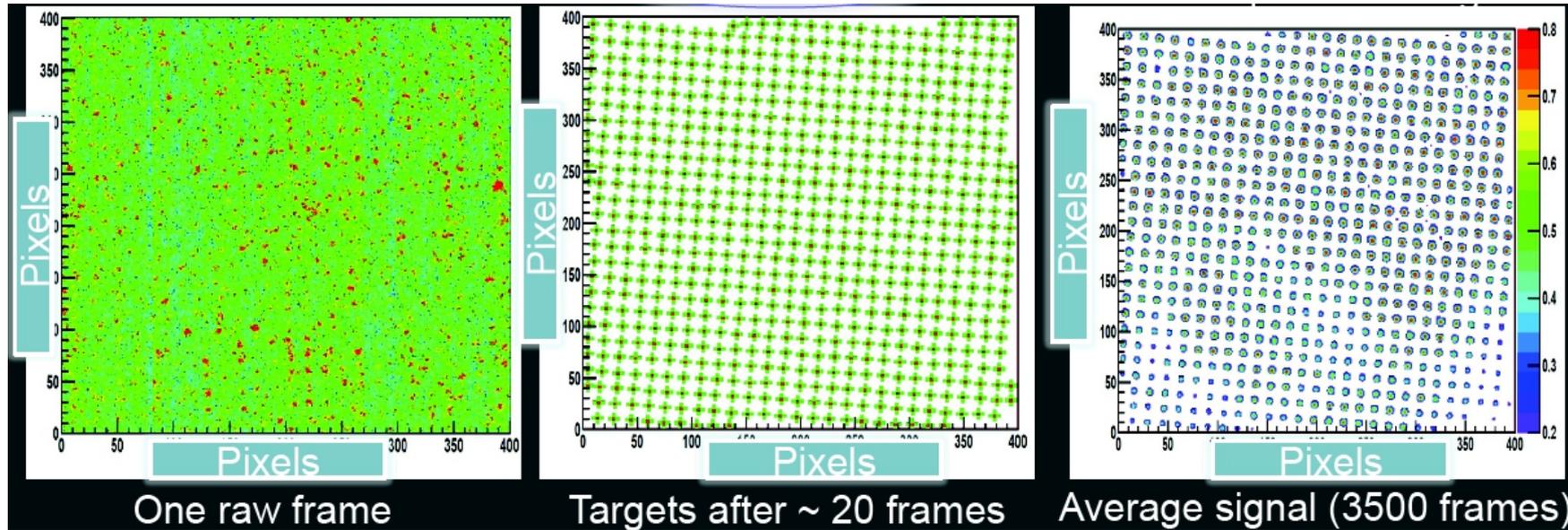
- Etudes des trajectoires de bactéries E. Coli en surface, phénomène de «tumbling »
- Site ANTARES : bioluminescence marine → Caméra LUSIPHER
- Matrice de microlentilles, Shack-Hartmann, suivi multi-spot en parallèle
- Etude des coefficients de diffusion de nanoparticules CdSe (Nanoptec)
- ... plus → <https://www.ipnl.in2p3.fr/spip.php?rubrique75>

L'ebCMOS

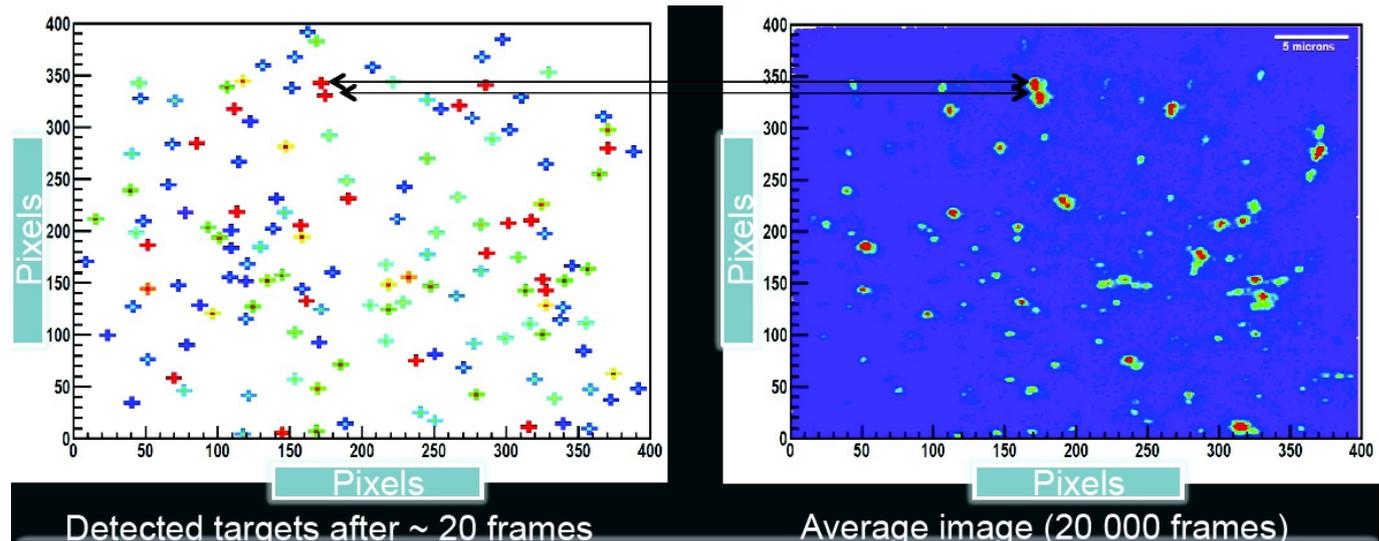


➔ « Parallel Processing »

Localisation de sources
(microlens array
150µm pitch)



Qdot tracking



Conclusion



- Depuis 2011 et l'arrivée des sCMOS, ces dispositifs deviennent réellement compétitifs sur le marché « scientifique » :
 - bruit sCMOS $\sim 1 e^-$
 - bruit « relatif » EMCCD $\sim 0.1 e^-$
- Même à bas niveau lumineux, cette technologie offre déjà des solutions très intéressantes.
- L'utilisation de processus de multiplication permettent (et permettront) d'atteindre le niveau des EMCCD tout en conservant les avantages de la technologie CMOS :
 - rapidité et faible consommation
 - grandes matrices
 - intégration de fonctionnalités avancés, compacité des systèmes
 - coût...

Références



■ Bruits de multiplication :

K. M. Van Vliet and L. M. Rucker, *Theory of carrier multiplication and noise in avalanche devices—Part I: One-carrier processes*, IEEE Transactions on Electron Devices 26 (1979)

J. N. Hollenhorst, *A theory of multiplication noise*, IEEE Transactions on Electron Devices 37 (1990)

M. S. Robbins, B. J. Hadwen, *The noise performance of electron multiplying charge-coupled devices*, IEEE Transactions on Electron Devices 50 (2003)

T. Brugière, et al., *A theory of multiplication noise for Electron Multiplying CMOS Image Sensors*, IEEE Transactions on Electron Devices 61 (2014)

■ EMCMOS

T. Brugière, et al., *First measurement of the in-pixel electron multiplying with a standard imaging CMOS technology : study of the EMCMOS concept*, NIM-A (2015)

■ EBCMOS

R. Barbier, et al., *Performance study of a MegaPixel single photon position sensitive photodetector EBCMOS*, Nuclear Inst. And Methods in Physics Research, A 610 (2009)

R. Barbier, et al., *A single-photon sensitive ebCMOS camera: The LUSIPHER prototype*, Nuclear Inst. And Methods in Physics Research, A 648 (2011)