

---

# Détecteur à comptage de photon unique, ultra-rapide, pour applications bio-photoniques

**A. Dominjon<sup>(1)</sup>, E. Chabanat<sup>(1)</sup>, P. Depasse<sup>(1)</sup>, R. Barbier<sup>(1)</sup>  
J. Baudot<sup>(2)</sup>, W. Dulinski<sup>(2)</sup>, A. Dorokhov<sup>(2)</sup>, M. Winter<sup>(2)</sup>**

(1) IPNL, Université de Lyon, Université Lyon 1, CNRS/IN2P3  
4 rue E. Fermi - 69622 Villeurbanne cedex, France

(2) IPHC, Université Louis Pasteur de Strasbourg, CNRS/IN2P3,  
23 rue du Loess - 67037 Strasbourg cedex, France

---

*RÉSUMÉ.* Nous présentons une nouvelle génération de photo-détecteurs sensibles au photon unique avec une résolution spatiale micrométrique sur un large champ de vue (640 kPixels) et une acquisition de 500 images par seconde. La technologie choisie est celle des imageurs électro-bombardés à substrat CMOS (appelés ebCMOS) amincis et passivés pour pouvoir détecter des photo-électrons de basse énergie (quelques keV). Nous présentons les résultats de la caractérisation et les performances du nouveau prototype appelé LUSIPHER pour « Large scale Ultra-fast Single PHoton trackER ». Nous discuterons en conclusion le potentiel de ce photo-détecteur dans le domaine de la bio-photonique.

*ABSTRACT.* We present a new Hybrid Photon Detector (HPD) called ebCMOS - for Electron Bombarded CMOS - sensitive to single photon with a micrometer range resolution on a large view scale (640 kPixels) and a kHz frame rate. The CMOS which is a Monolithic Active Pixel Sensor (MAPS) is back-thinned and passivated to be able to detect low energy photoelectrons (few keV). We report the first characterization results of the new prototype called LUSIPHER for « Large scale Ultra-fast Single PHoton trackER ». We discuss in conclusion the potential of this detector concept for bio-photonic applications.

*MOTS-CLÉS:* Pixel CMOS, ebCMOS, comptage au photon unique, localisation de la cible

*KEYWORDS:* Pixel CMOS, ebCMOS, Single Photon Counting, Target Tracking

---

## 1. Introduction

L'enjeu de la détection de très faibles flux lumineux est d'atteindre la sensibilité au photon unique sur un large champ de vue avec une résolution spatiale micrométrique tout en gardant un courant d'obscurité limité et un rapport signal sur bruit suffisant. De nombreux dispositifs tels que les EMCCD [1], les pnCCD [2], les CCD électro bombardés [3] et les ICMOS [4] atteignent déjà cette sensibilité et cherchent à repousser les limites vers une vitesse d'acquisition encore plus rapide sur un champ de vue encore plus large tout en gardant une bonne résolution spatiale.

## 2 Nom de l'ouvrage

Réussir à concentrer toutes ses spécifications au sein d'un même dispositif permettra certainement l'émergence de nouvelles applications dans les domaines scientifique ou industriel de l'imagerie à très faible luminosité.

Nous présentons ici une des voies prometteuse pouvant répondre à ces spécifications : le détecteur CMOS à bombardement électronique (ebCMOS). Le concept de ce photo-détecteur n'est pas réellement nouveau [5] et [6] mais le défi est d'intégrer un détecteur CMOS spécifiquement étudié pour le suivi de particules chargées très rapides. En 2007, nous avons réalisé en collaboration avec la société Photonis un démonstrateur ebCMOS utilisant un détecteur MIMOSA5. Ce premier prototype a permis de valider le concept de ce type de détecteur et de montrer la sensibilité au photon unique [7] et [8]. Ce photo-détecteur est déjà un bon candidat pour l'imagerie biologique de cellules fluorescentes mais est limité dans la fréquence d'images nécessaires pour le suivi de molécules uniques.

Afin de repousser cette limitation, un nouveau prototype a été conçu et réalisé en 2008 au sein de la même collaboration. La première partie de cet article décrit les spécifications de ce nouveau prototype nommé LUSIPHER. La seconde partie se focalise sur la nouvelle puce CMOS utilisée, appelée Lucy, et présente les résultats de la caractérisation de celle-ci. Une troisième partie présente le prototype de caméra en cours de développement et discute des applications possibles dans le domaine bio-photonique.

## 2. L'ebCMOS LUSIPHER

Un détecteur ebCMOS combine la photo-détection par une photocathode, l'accélération des photo-électrons par un champ électrique et la détection de ces photo-électrons accélérés au moyen d'une puce silicium monolithique pixellisée (substrat sensible et électronique de lecture en technologie CMOS). Le schéma de principe d'un ebCMOS est représenté sur la figure 1.

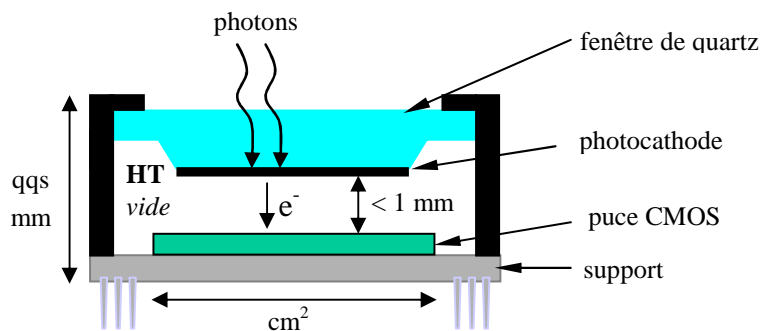


Figure 1. Schéma de principe d'un ebCMOS

Afin d'optimiser l'efficacité quantique sur une large bande du spectre visible allant du vert au rouge, la société Photonis a réalisé une photocathode multi-alkali de type S25, de diamètre utile 12 mm et d'efficacité quantique de l'ordre de 14% à la longueur d'onde 605 nm.

Les photo-électrons créés dans le tube à vide vont subir une accélération due au champ électrique appliqué entre la cathode et le détecteur. Le gain en énergie de ces électrons dépend donc de la valeur de la haute-tension choisie. Pour maintenir une bonne résolution spatiale et un courant d'obscurité acceptable ( $10^{-5}$  e<sup>-</sup>/pixel/ms) il est nécessaire de travailler avec des électrons d'énergie inférieure à 5 keV pour limiter le champ électrique à quelques kV/mm.

L'élément le plus important d'un ebCMOS est la puce CMOS pixellisée permettant de détecter les électrons émis par la photocathode. Le but étant d'atteindre une sensibilité au photon unique, le détecteur doit procéder par une détection face arrière afin de s'affranchir des couches électroniques empêchant toute détection de particules de basse énergie par la face avant. De plus, l'épaisseur de la couche d'entrée du CMOS face arrière c'est-à-dire la couche de passivation doit être inférieure à 100 nm pour minimiser le nombre d'électrons perdus par recombinaison.

La détection du photo-électron s'effectue au sein même de la couche épitaxiée où il crée des paires e<sup>-</sup>/trous. Ces paires e<sup>-</sup>/trous pouvant être créées dans la couche épitaxiée entière, nous avons une surface utile de 100 %. Les électrons créés vont progresser par diffusion vers les diodes de détection. La couche épitaxiée dopée P doit par conséquent être suffisamment fine parce qu'elle détermine le parcours effectué par un électron secondaire pour atteindre les diodes de détection. Dans notre cas, cette couche a une épaisseur d'environ 10 µm.

Les diodes de détection mesurent l'énergie déposée par les électrons secondaires. Une première analyse consiste à ne considérer que la diode ayant récoltée le plus d'énergie (pixel **graine**). Mais à cause de l'étalement des porteurs de charge, il est plus juste de considérer également les pixels contigus au pixel graine et de sommer la charge totale. On crée ainsi un « cluster » dont on peut choisir la taille (3x3, 5x5 ou 7x7 pixels) autour du point d'impact. Cette méthode permet d'améliorer l'efficacité de collection de charge. La pierre angulaire d'un ebCMOS est donc son détecteur CMOS aminci et passivé qui déterminera ses performances en termes de sensibilité et de résolution spatiale.

### 3. La puce CMOS Lucy : description et caractérisation

#### 3.1. Description de la puce Lucy

La puce Lucy a bénéficié du savoir-faire acquis par l'équipe de l'IPHC sur les puces MIMOSA mais c'est le premier prototype à grande échelle en technologie 0,25 µm. Elle se compose de 2 matrices adjacentes de 400x400 pixels avec un pas de 10 µm ce qui donne une surface sensible de 32 mm<sup>2</sup>. Le pixel, d'architecture classique 3T, comprend une diode (puits N) carrée localisée au centre de celui-ci.

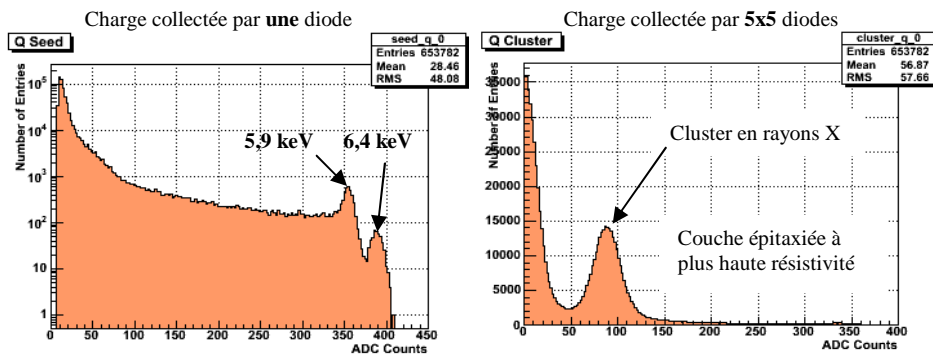
Différents types de diodes ont été testés au cours de « runs multi-projets » avant de choisir celle ayant le plus bas bruit tout en gardant une efficacité de collection de charge suffisante et un étalement de charge sur les pixels adjacents limité. Néanmoins ces paramètres sont également sensibles à l'épaisseur de la couche épitaxiée après amincissement des substrats et passivation de la couche épitaxiée. Le traitement post-process est une étape cruciale pour la détection des électrons de basse énergie qui a été effectué par des industriels. Nous testons ici trois dopages différents de la couche épitaxiée : le premier est dit standard ( $\rho=50 \Omega\cdot\text{cm}$ ), le second a un dopage P plus faible (équivalent à une résistivité  $\rho$  de quelques centaines de  $\Omega\cdot\text{cm}$ ) et le troisième a un dopage non constant (résistivité graduée).

Les paragraphes suivants présentent les trois bancs de test conçus et réalisés à l'IPNL pour la caractérisation de la puce Lucy et exposent les résultats obtenus.

### 3.2. Caractérisation par source de rayons X et mesure de bruit

Le premier banc est un dispositif clos, étanche à la lumière, contrôlé en température (modules Peltier, sondes Pt100) contenant une source de  $^{55}\text{Fe}$  (740 MBq). Le but poursuivi est double : permettre une calibration de la chaîne d'acquisition et du gain de la diode c'est-à-dire calculer le facteur de conversion donnant le nombre d'électrons par unité ADC (ADCU) ainsi que mesurer l'efficacité de collection des charges formées dans la couche épitaxiée et récupérées par les diodes du circuit intégré.

On mesure l'énergie des pics des X à 5,9 keV (24,4%) et 6,4 keV (2,86%) de la source de  $^{55}\text{Fe}$  entièrement convertie dans les diodes. De cette mesure donnée sur la figure 2 (gauche), nous calculons le facteur de conversion C égal à 4,6 e<sup>-</sup>/ADCU.



**Figure 2.** Caractérisation par rayons X : histogramme de la charge collectée soit par une seule diode (pixel graine) (gauche), soit par 5x5 diodes (cluster) (droite)

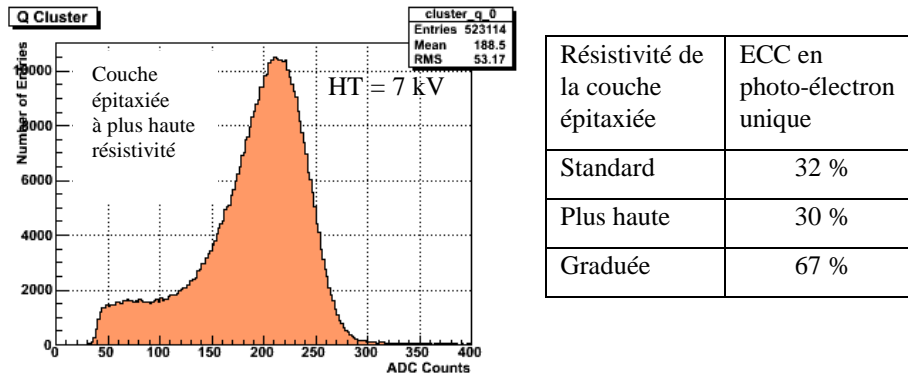
En appliquant ce facteur de conversion à la mesure de bruit (déviatoin standard de la mesure du pixel dans le noir) en unité ADC, nous obtenons un bruit moyen par pixel de 8 électrons. Par conséquent un pixel sera considéré comme une cible valable pour la génération d'un « cluster » si sa charge, après soustraction des piédestaux, est cinq fois supérieure au bruit de pixel c'est-à-dire 40 électrons.

La charge des clusters, montrée sur la figure 2 (droite) peut être reconstruite en considérant soit 3x3, 5x5 ou 7x7 pixels contigus au pixel graine. L'efficacité de collection de charge (ECC) est donnée par le rapport entre la charge des clusters et la charge des pixels graines correspondant à un des pics d'émission de rayons X. Le tableau ci-dessous donne les résultats des ECC obtenues pour trois résistivités différentes de la couche épitaxiée. La comparaison de ces valeurs montre que la résistivité graduée a une meilleure efficacité de collection de charge.

Résistivité de la couche épitaxiée	Standard	Plus haute	Graduée
ECC en caractérisation par rayons X	32 %	25 %	60 %

### 3.3. Caractérisation au photon unique et efficacité de collection de charge

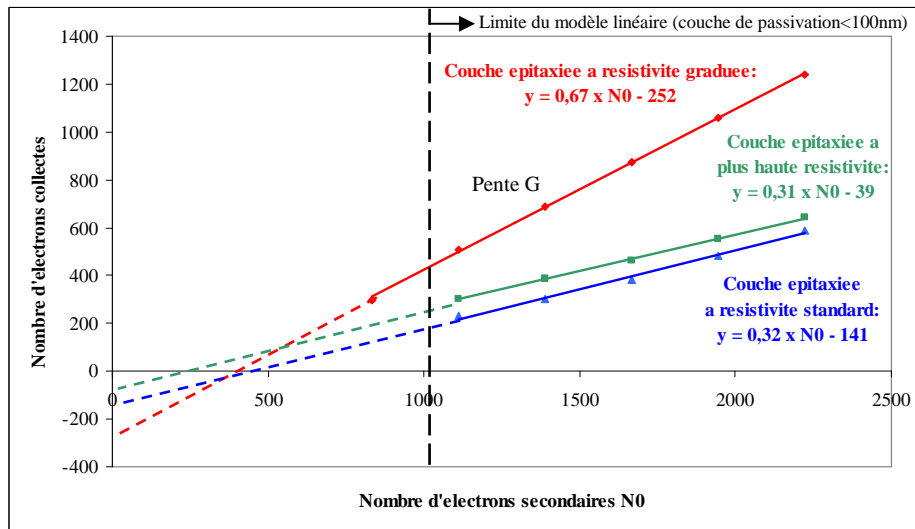
Le deuxième banc de test est une enceinte à vide, contrôlée en température (modules Peltier, sondes Pt100) dans laquelle on réalise un vide poussé ( $10^{-6}$  Torr). Ce banc est destiné à envoyer des électrons dont on maîtrise l'énergie sur la puce CMOS. Les électrons sont produits par effet photoélectrique d'une cathode de palladium illuminée par un flash UV émis par une fibre optique alimentée par une lampe Xénon à arc. Ces électrons sont accélérés sous un champ électrique dont on maîtrise l'amplitude (haute tension appliquée: 30 kV max). A chaque déclenchement de la source Xénon quelques milliers d'électrons sont produits par  $\text{cm}^2$ . Nous obtenons ainsi des événements au photon-électron unique dans chaque image.



**Figure 3.** Caractérisation en photo-électron unique : histogramme de la charge collectée par un cluster 5x5 (gauche) – Efficacité de collection de charge pour différentes résistivités de la couche épitaxiée (droite)

La charge collectée correspondant aux événements photo-électron unique est donnée par l'histogramme de la figure 3 (gauche) pour une haute-tension choisie (ici 7 kV). La position du pic est déterminée par ajustement gaussien et convertie à l'aide du facteur C en nombre moyen d'électrons secondaires collectés par le « cluster ».

Cette mesure est effectuée pour différentes énergies (variation de la haute tension). La figure 4 montre les résultats obtenus pour trois puces ayant des couches épitaxiées de résistivités différentes.



**Figure 4.** Courbe de gain pour trois résistivités différentes de la couche épitaxiée

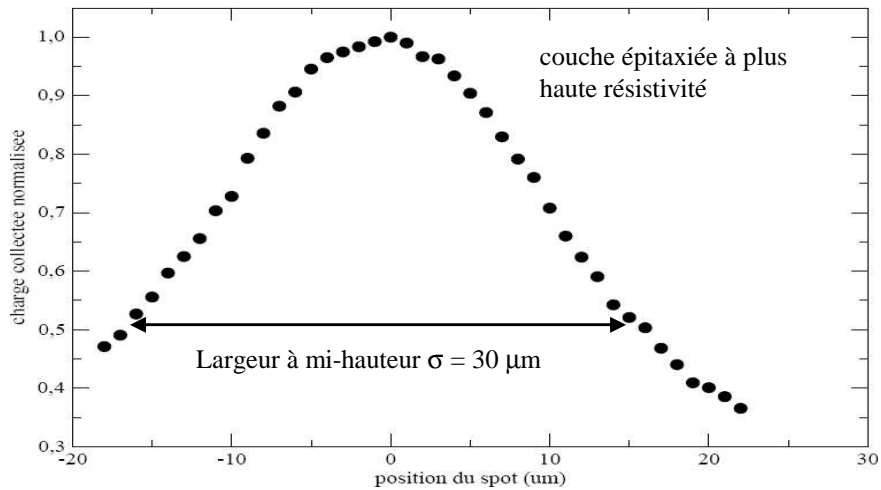
En ajustant ces mesures par une droite, on obtient par la valeur de la pente le gain du détecteur. Pour un événement photo-électron unique d'énergie initiale  $E_0$  ( $N_0 = E_0/3,6$ ) et un nombre  $N_{\text{perdus}}$  d'électrons recombinés dans la couche passive, on obtient un gain  $G = \varepsilon (N_0 - N_{\text{perdus}})$  où  $\varepsilon$  est l'efficacité de collection de charge des électrons secondaires générés **après** la couche de passivation. Ce facteur  $\varepsilon$  tient compte du phénomène de recombinaison ayant lieu tout au long du parcours des électrons secondaires jusqu'aux diodes. Dans ce modèle simple, on considère que le nombre d'électrons recombinés dans la couche passive est constant. Ceci peut-être considéré comme vrai pour une énergie initiale  $E_0$  supérieure à 5 keV si l'épaisseur de la couche passive est inférieure à 100 nm.

La table de la figure 3 (droite) résume les ECC mesurées des trois puces. Les résultats obtenus montrent que lorsque la couche épitaxiée a une résistivité de type graduée, les performances de la puce en termes d'efficacité de collection de charge sont deux fois meilleures que lorsque la résistivité est standard.

### 3.4. Caractérisation de l'étalement des porteurs de charge

Afin de mesurer directement la fonction d'étalement due aux électrons secondaires, nous avons développé un banc de test optique. Des impulsions lumineuses issues d'une diode électroluminescente calibrée (plusieurs longueurs d'onde étant disponibles) sont envoyées via une fibre optique monomode de cœur 8  $\mu\text{m}$  sur un objectif microscopique apochromatique à longue distance de travail (13 mm) Mitutoyo utilisé à l'envers, de grandissement x50. Le spot produit a un diamètre de 1  $\mu\text{m}$  pour  $\lambda = 380 \text{ nm}$  (UV). La longueur d'interaction à cette longueur d'onde est de l'ordre de 100 nm dans le silicium. L'intensité lumineuse est calibrée grâce à la durée de l'impulsion que l'on contrôle et que l'on fixe de façon à ce qu'elle corresponde au nombre moyen d'électrons secondaires collectés lors d'un événement de photo-électron unique.

Nous déplaçons le spot lumineux dans une direction parallèle aux lignes ou colonnes des pixels par pas de 1  $\mu\text{m}$  avec une précision de 0,1  $\mu\text{m}$  grâce à des micro-platines de translation. Pour chaque position du spot, la charge collectée par chaque diode est enregistrée. Cette mesure donne accès à l'étalement de charge échantillonnée par les diodes en fonction de la position d'impact à l'entrée de la couche épitaxiée. La figure 5 montre un exemple de la fonction d'étalement obtenue pour la puce dont la couche épitaxiée est plus résistive : la largeur à mi-hauteur vaut  $\sigma = 30 \mu\text{m}$ . Le tableau de la figure 5 donne les résultats obtenus pour les différentes puces : on peut en conclure que la résistivité de la couche épitaxiée de type graduée donne l'étalement de charge le plus étroit.



Résistivité de la couche épitaxiée	Standard	Plus haute	Graduée
Largeur à mi-hauteur	30 $\mu\text{m}$	20 $\mu\text{m}$	10 $\mu\text{m}$

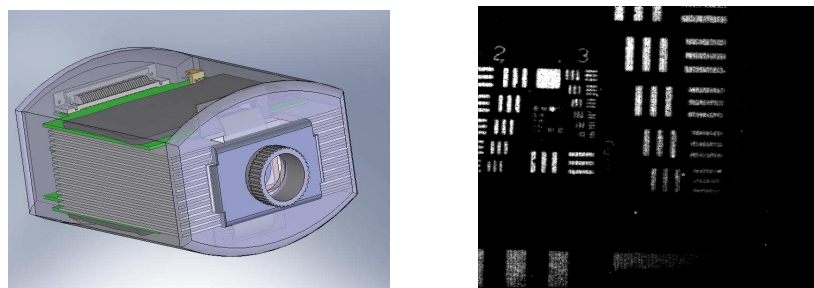
Figure 5. Mesure de la fonction d'étalement de charge

## 5. La caméra LUSIPHER et ses applications dans le domaine bio-photonique

Le premier prototype ebCMOS LUSIPHER (figure 6) a été intégré dans une caméra conçue et réalisée par une équipe d'ingénieurs de l'IPNL. Cette caméra est en cours de test au laboratoire : un premier exemple d'image de mire USAF lue à la vitesse de 500 images par seconde est donné sur la figure 7 (droite) après filtrage.



**Figure 6.** *Vue de dessus de l'ebCMOS (gauche) et vue de dessous (droite)*



**Figure 7.** *Caméra LUSIPHER et image d'une mire USAF vue par cette caméra*

Une des premières applications scientifiques envisagée pour cette caméra est l'imagerie de molécules uniques par sondes fluorescentes dans le domaine biologique. L'étude dynamique d'un ensemble de molécules ou de « Quantum Dots » uniques nécessite une prise d'images sous un très faible flux lumineux avec un temps caractéristique du millième de seconde et une résolution spatiale de quelques microns. Les techniques de microscopie pour lesquelles ce nouveau concept de photodétecteur ultra-rapide apportera très certainement un gain significatif ont été identifiées en collaboration avec de grands laboratoires européens de biologie qui utilisent et développent de nouveaux systèmes d'imagerie par fluorescence. Ainsi les techniques d'imagerie dites super-résolues comme le PALM (Photo-Activated Localization Microscopy) seront les premières à incorporer un ebCMOS. Notons également que les méthodes de « Spinning Disk Confocal Microscopy » (limité par le nombre d'images) est aussi une application ciblée par notre caméra.



## 7. Bibliographie

1. P. Jerram et al., *SPIE* **Vol 4306** (2001)
2. R. Hartmann et al., *Nucl. Instr. And Meth. A* **568** (2006) 118
3. L. Benussi et al., *Nucl. Instr. And Meth. A* **442** (2006) 154
4. T. Ohnuki et al., *SPIE* **Vol 6092** (2006) 1
5. R. Desalvo et al., *Nucl. Instr. And Meth. A* **315** (1992) 375
6. C. D'Ambrosio et al., *Nucl. Instr. And Meth. A* **501** (2003) 463
7. R. Barbier et al., *ICATPP World Scientific Publishing* (2008) pp.23-27
8. R. Barbier et al., *Nucl. Instr. And Meth. A* – en presse