

Comment fonctionnent les capteurs CCD et CMOS ?

Thomas ESTRUCH
Ingénieur études et applications, Photon Lines
th-estruch@photonlines.com

Les capteurs numériques d'image sont omniprésents dans notre vie de tous les jours. Téléphones portables, appareils photographiques, caméras scientifiques haute sensibilité, caméras rapides, le marché des capteurs a littéralement explosé ces dernières années. Face aux applications toujours plus poussées et à la grande diversité de produits sur le marché, il est important de revenir à l'essentiel et d'identifier les questions à se poser pour choisir la technologie et donc le capteur adapté au besoin de chacun. Cet article a donc pour vocation de rappeler le fonctionnement et les caractéristiques propres des deux grandes familles de capteurs : CCD et CMOS.

Fonctionnement d'un capteur à capacité MOS

La technologie de base sur laquelle reposent les capteurs CCD et CMOS est la capacité MOS. Il s'agit en fait d'un sandwich de couches minces composé de trois types de matériaux : un métal (appelé porte ou grille), un isolant (en l'occurrence un oxyde) et un semiconducteur (dopé généralement P, avec deux inclusions dopées N appelées source et drain) comme visible en figure 1.

Lorsqu'un photon d'énergie supérieure au gap est absorbé dans le semiconducteur, une paire électron/trou est créée. Il s'agit en fait d'un atome du réseau du semiconducteur qui va libérer un électron (promotion de la bande de valence à la bande de conduction) et laisser à sa place une charge positive appelée trou. Sous l'effet du champ appliqué au niveau de la grille (zone de déplétion), l'électron va migrer à l'interface entre le semiconducteur et l'oxyde et rester piégé dans un puits de potentiel tandis que le trou va migrer vers l'électrode de terre. Le nombre d'électrons qui peuvent ainsi être collectés dépend de

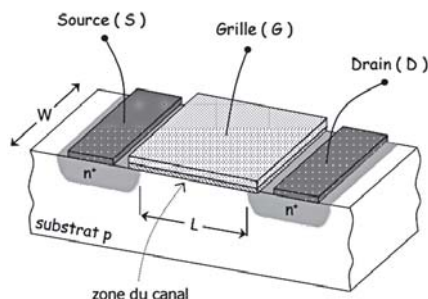


Figure 1. Schéma d'une capacité MOS. La grille (G) représente la zone photosensible tandis que les électrodes de source (S) et de drain (D) permettent de piéger les électrons dans le puits de potentiel situé sous chaque grille.

la contenance du puits qui est une fonction de la surface et de la tension appliquée à la grille ainsi que de l'épaisseur de la couche d'oxyde.

Si le principe de génération et de stockage d'une charge à partir de l'absorption d'un photon leur est commun, les capteurs CCD et CMOS présentent toutefois des différences fortes, dont la principale tient à la manière dont vont être transférées les charges piégées dans les puits de chaque pixel vers la partie électronique de façon à obtenir l'image de la scène.

ScienTec
La SoluTion à vos mesures

Analyseur d'écran Luminance, couleur et Température de couleur CA-310



Chromaticité, balance des blancs, gamma, contraste



KONICA MINOLTA

- Évaluation des faibles et fortes luminances
- Analyse des couleurs
- Respect des courbes de sensibilité CIE 1931
- Précision et rapidité



- Écrans LCD, plasma, OLED, rétroprojecteurs...
- Panneaux d'affichage à matrice active LCD, moniteurs LCD et TV LCD...

ScienTec c'est aussi...

- Spectroradiomètres
- Vidéo-colorimètres
- Photomètres
- Luxmètres
- Chromamètres
- Sources de référence



info@sciente.fr / www.sciente.fr
01.64.53.27.00

Les capteurs CCD

Le CCD (*charge coupled device*) consiste en une juxtaposition matricielle de capacités MOS. Pour obtenir l'image de la scène, il faut compter le nombre d'électrons piégés dans chaque puits, qui est proportionnel au nombre de photons incidents sur chaque pixel. Pour ce faire, on commande séquentiellement la tension des grilles de chaque capacité MOS au rythme d'une horloge, ce qui va permettre de transférer les électrons d'une capacité vers sa voisine : on parle de registre à décalage. Après n transferts, les charges sont converties en tension dans un condensateur puis amplifiées. Elles sont ensuite codées numériquement à l'aide d'un convertisseur analogique/numérique à l'extérieur de la matrice CCD.

Il existe plusieurs architectures pour les capteurs CCD qui dépendent directement du type d'applications visées. Les systèmes à transferts de bloc complet (*full frame transfer* visible en *figure 2a*) ou partiel (*frame transfer* en *figure 2b*) sont surtout utilisés dans le milieu scientifique. Les systèmes à transferts interligne (*interline transfer* en *figure 2c*) sont utilisés dans les caméras pour le grand public et les systèmes de télévision professionnels.

Les CCD full frame transfer : cette architecture *full frame* est la plus simple. Les photons sont collectés sur l'ensemble de la surface du capteur qui est photosensible. Le capteur est ensuite lu verticalement ligne par ligne à l'aide du registre à décalage. Chaque ligne une fois transférée au registre de lecture est lue horizontalement pour obtenir la valeur de chaque pixel. Cette lecture progressive est lente mais les capteurs CCD *full frame* sont les plus sensibles du marché et peuvent fonctionner dans de nombreuses configurations d'illumination.

Les CCD frame transfer : l'architecture à transfert de bloc (*frame transfer*) est basée sur la division de la zone photosensible du capteur en deux parties symétriques et de mêmes dimensions (cf. *figure 2b*). La première partie collecte les photons de manière classique. Ils sont ensuite rapidement transférés (en quelques millisecondes) vers la deuxième partie du capteur qui est protégée de la lumière incidente et

sert au stockage des électrons pour la lecture de l'image. Ainsi on peut faire l'acquisition de l'image $n+1$ sur la partie exposée du capteur pendant que l'image n est lue sur la partie du capteur masquée. On augmente donc considérablement la cadence par rapport à l'architecture *full frame*. Ces capteurs *frame transfer* ont un facteur de remplissage équivalent au *full frame* mais sont plus chers car la taille du capteur doit être doublée pour être équivalente à un capteur *full frame*.

Les CCD interline transfer : l'architecture interligne incorpore, au niveau de chaque pixel, un canal de transfert de charges (registre vertical recouvert d'un blindage optique métallique) directement adjacent à une photodiode de manière à ce que les charges accumulées puissent rapidement (de l'ordre de la microseconde) être transférées une fois que l'acquisition est terminée. On peut ainsi atteindre des temps d'exposition très courts ce qui permet d'éviter de saturer les pixels et ce, sans avoir recours à une obturation mécanique du CCD. En revanche, le blindage des registres verticaux agit comme un store vénitien et réduit la zone photosensible du capteur par rapport aux architectures *full frame*. Pour compenser cet effet indésirable et réaugmenter le facteur de remplissage, on peut utiliser des matrices de microlentilles pour focaliser la lumière incidente sur les photodiodes mais, dans le cas où l'objectif est très ouvert (illumination grand angle), la sensibilité reste faible.

De par leur architecture, les capteurs CCD offrent l'avantage d'un facteur de remplissage proche de l'unité ($> 98\%$). Cela signifie que la zone photosensible est quasiment égale à la dimension du

capteur. La dynamique d'un capteur est liée au rapport entre la capacité quantique de chaque photosite (proportionnelle à la taille de la zone photosensible) et la somme des bruits d'obscurité (faible pour les CCD) et des bruits de lecture. Les CCD ont ainsi une grande dynamique :

$$\text{Dynamique} = 20 \log (\text{capacité} / (\text{obscurité} + \text{lecture}))$$

De plus, si la sensibilité est définie comme la capacité d'un pixel à atteindre sa saturation rapidement, les capteurs CCD sont très sensibles car continuellement exposés.

Les principaux défauts que l'on retrouve sur des images provenant de capteurs CCD sont liés au fait que le capteur est exposé en continu et les charges accumulées dans les puits quantiques doivent être transférées à la fin de l'acquisition. Ainsi lorsqu'un pixel reçoit une quantité trop importante de photons (qui dépasse sa capacité), il sature et déborde sur ses voisins un peu à la manière d'un seau trop rempli. Ce phénomène porte le nom de *blooming* (cf. *figure 3*). De même lorsqu'un pixel est saturé, il va lors de sa lecture par le registre à décalage saturer toute la colonne qui lui est associée. On parle alors de colonnage ou *smearing* (cf. *figure 3*). Il est donc parfois nécessaire d'ajouter un système d'obturation mécanique pour éviter que le capteur ne soit exposé pendant la lecture de l'image. Enfin, malgré l'évolution des architectures des capteurs CCD pour augmenter la cadence de lecture, il est impossible d'adresser la valeur d'un pixel individuel en sélectionnant une région d'intérêt ce qui limite les cadences atteignables par cette technologie (aujourd'hui la limite supérieure est de quelques dizaines de kHz).

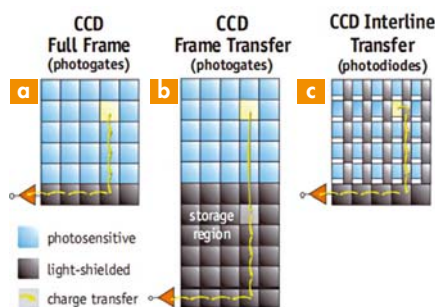


Figure 2. Schéma des différents types d'architecture de capteurs.



Figure 3. Exemple de *smearing* et de *blooming* sur une image prise par un capteur CCD. Le *smearing* donne lieu à une ligne verticale saturée. Le *blooming* donne lieu à une saturation des pixels les plus proches.

Les capteurs CMOS

Technologie plus récente apparue dans les années 90, les capteurs CMOS (*complementary metal oxide semiconductor*) sont néanmoins basés sur le même principe d'absorption de photons et de génération de courant proportionnel au flux incident sur chaque pixel. La différence provient de la façon dont les charges sont lues.

Contrairement aux capteurs CCD, les charges sont cette fois directement converties au niveau du photosite de génération par le biais d'un amplificateur sur chaque pixel (*figure 4*). Cette particularité permet de supprimer un grand nombre de transferts comme dans le cas des registres à décalage du CCD et donc d'augmenter la cadence de lecture. La taille des capteurs est voisine de celle des CCD mais la résolution spatiale est moindre, du fait de la présence des amplificateurs associés à chaque pixel (un peu comme dans le cas des CCD interlignes). On peut là encore adjoindre une matrice de microlentilles pour compenser en partie cet effet.

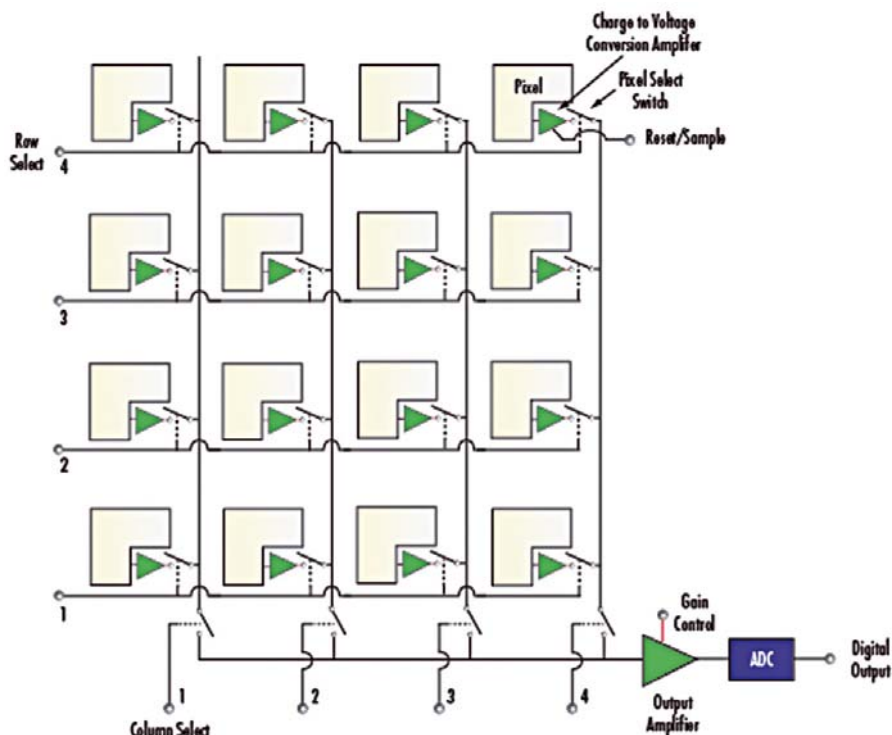


Figure 4. Schéma de l'architecture d'un capteur CMOS. Chaque photosite dispose de son propre amplificateur. Chaque pixel peut donc être adressé individuellement et possède une réponse propre indépendante de ses voisins.

OPTOÉLECTRONIQUE

La Flexibilité et l'Expertise au service de l'Innovation

- **Emetteurs UV-VIS-IR**
 - LEDs et Power LEDs
 - Solutions "Chip on Board"
 - Sources lumineuses à LED ou Xénon
 - Diodes lasers
 - Lampes flash Xénon
 - Corps noirs miniatures
- **Détecteurs UV-VIS-IR**
 - Pyrodétecteurs
 - Thermopiles
 - Photodiodes
 - Phototransistors
 - Photorésistances
 - SPCM, Compteurs de photons
 - Modules SiPM Lynx
 - Photodiodes PIN et APD

HTDS

Hi-Tech Detection Systems

APPLICATIONS

- > Industrielles
- > Grand public
- > Médicales
- > Biomédicales
- > Aéronautiques
- > Scientifiques
- > Défense
- > Automobile

Des solutions et un service sur mesure

Petites à très grandes séries - Programmes spécifiques - Qualifications - Tests

HTDS (Hi-Tech Detection Systems) - 3 Rue du Saule Trapu - BP 246 - 91 882 Massy Cedex - Tel : 01 64 86 28 28 - info@htds.fr - www.htds.fr

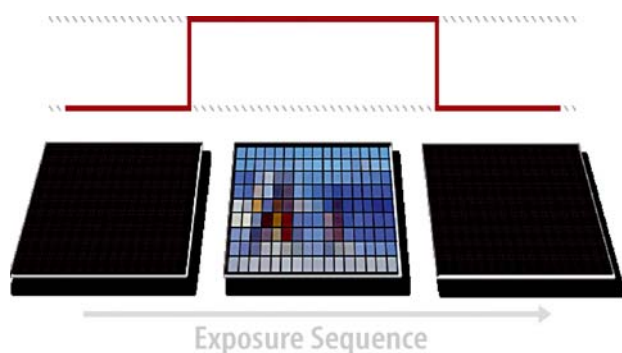


Figure 5. Fonctionnement du capteur CCD en *global shutter*. Le capteur est entièrement exposé puis obturé le temps de la lecture de l'image.

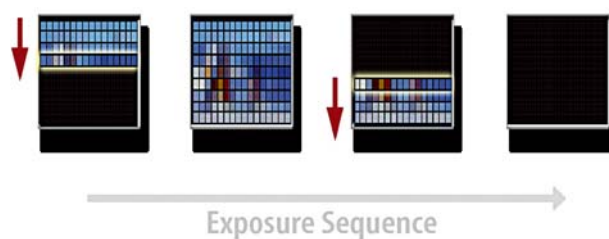


Figure 6. Fonctionnement en *rolling shutter* d'un capteur CMOS. Le capteur est lu séquentiellement ce qui peut induire des défauts de représentation si le phénomène se déplace trop rapidement.

Une autre différence fondamentale est la façon dont est acquise l'image. Dans les architectures CCD, à un instant donné, l'ensemble du capteur et donc des pixels est exposé simultanément. L'instant d'après les photosites sont obturés le temps du comptage des électrons générés de manière à obtenir une image. On parle de fonctionnement en *global shutter* (cf. figure 5). Dans le cas du capteur CMOS, chaque photosite ou pixel va être exposé pendant un temps identique mais ne collecte pas la lumière au même instant. Cette acquisition séquentielle ligne par ligne en partant de la partie supérieure du capteur porte le nom de *rolling shutter* (cf. figure 6).

Grâce à son système de lecture qui permet d'adresser chaque pixel individuellement contrairement au cas du capteur CCD, il est possible de ne lire qu'une partie de la matrice du capteur CMOS. Cette sélection d'une zone d'intérêt sur l'image permet de diminuer le temps de lecture

pour chaque image et donc d'atteindre des cadences supérieures à ce qu'il est possible d'atteindre avec un capteur CCD interligne par exemple. Il est également possible de corriger la valeur de chaque pixel en lui appliquant une fonction choisie ce qui permet de corriger la non-linéarité de certains phénomènes, ou tout simplement de s'affranchir du bruit FPN (bruit *fixed pattern noise* lié à la réponse non uniforme de chaque pixel de la matrice du capteur à une même illumination ou en l'absence d'illumination). De plus, la fabrication de cette technologie de capteur a l'avantage d'être compatible avec les installations de fabrication de masse des circuits intégrés et son coût en est largement diminué.

En contrepartie, la zone photosensible associée à chaque pixel étant réduite par la présence des amplificateurs, le facteur de remplissage (sans utilisation de matrice de microlentilles) est beaucoup plus faible que pour un capteur CCD (< 30 %) ce qui

impacte grandement la sensibilité. De plus, ce type de capteur est très sensible aux sources de bruits (bruits de lecture et de numérisation) qui vont dégrader le rapport signal à bruit sur une image. Enfin, le fonctionnement en *global shutter* des capteurs CMOS peut avoir des conséquences sur la qualité de l'image dans le cas d'un mouvement d'objet trop rapide par rapport à la cadence de la caméra. Si l'objet se déplace horizontalement, il est possible que son image apparaisse avec un angle lié à la lecture séquentielle de chaque ligne du capteur. Pour les mêmes raisons, dans le cas d'un éclairage fluctuant, l'intensité de l'image ne sera pas uniforme sur la matrice.

En conclusion, les capteurs CCD et CMOS sont deux technologies performantes qui sont complémentaires. Il est donc important d'identifier les facteurs clés qui vont permettre de réaliser une image exploitable sur la scène considérée pour choisir son type de capteur. Si la sensibilité et la dynamique sont prépondérantes par rapport à la cadence, on optera plutôt pour un capteur CCD *full frame*. Si la cadence et le temps d'exposition de la scène (risque de saturation) sont les éléments déterminants, alors il faudra s'orienter vers des capteurs CMOS.

Tableau comparatif des CCD et CMOS.

	CCD	CMOS
Facteur de remplissage	50 à 98 %	30 à 50 %
Sensibilité à la lumière	Élevée (0,1 lux)	Plus faible (10 lux)
Sensibilité aux UV et IR	Étendue	Étroite
Réponse	Moyenne	Très rapide (10 à 100x plus)
Consommation d'énergie	Élevée (2 à 4x plus que CMOS)	Faible
Dynamique	Élevée	Moyenne
Uniformité du capteur	Élevée (1 à 2 % de FPN*)	Faible à modérée (5 à 20 % de FPN*)
Bruit électronique	Faible	Moyen à élevé (10x plus que CCD)
Courant d'obscurité	Faible	Moyen
Sélection d'une région d'intérêt	Très limité	Élevé
<i>Anti blooming</i>	Absent (sauf solution custom)	Présent par défaut
<i>Shuttering</i>	Assez rapide	Faible
<i>Biasing et clocking</i>	Multiple, tension élevée	Unique, basse tension

*FPN : *fixed pattern noise*

Références

http://www.optique-ingenieur.org/fr/cours/OPI_fr_M05_C06/co/OPI_fr_M05_C06_web.html
<http://www.astrosurf.com/luxorion/photo-numerique3.htm>
https://www.tedpella.com/cameras_html/ccd_cmos.htm
<http://www.red.com/learn/red-101/global-rolling-shutter>
http://genelaix.free.fr/IMG/pdf/MOS_Diaporama.pdf