

# CHAPITRE I

## L'EVOLUTION DES CAPTEURS D'IMAGES

1. Introduction
2. Principes fondamentaux des capteurs d'images dans le visible
3. Quelques capteurs d'images, vers le CCD et ses performances
4. Un nouveau concept d'imageur: l'APS, et ses avantages par rapport au CCD
5. Conclusions du chapitre I

## RESUME DU CHAPITRE I

*Le but du chapitre I est de présenter l'évolution des capteurs d'images utilisant le Silicium comme détecteur de photons dans le domaine visible. Seuls les capteurs d'images à l'état solide (solid-state imager) sont exposés. Le principe fondamental de détection dans le silicium est évoqué ainsi que la famille de capteurs qui en a découlé (capteurs CID, MOS XY et le CCD).*

*Les CCD (Charge Coupled Device) sont devenus les capteurs d'images les plus utilisés dans de nombreux domaines d'applications d'imagerie (allant du grand public par les caméras de télévision, au contrôle industriel, en passant par le médical et en finissant par des applications pointues comme le spatial et le militaire).*

*Ils offrent des performances proches de la perfection. Cependant, les CCD ont des faiblesses propres à leur principe de base et à leur procédé de fabrication (transfert de charges, coût, impossibilité de mettre sur la puce CCD des fonctions évoluées de lecture, robustesse aux défauts cosmétiques). Le concept d'APS (Active Pixel Sensor ou imageur CMOS) peut résoudre les inconvénients du CCD et la diminution de la lithographie CMOS rend désormais ce concept réalisable. Il sera démontré que le concept APS vient naturellement prendre sa place dans cette évolution des capteurs d'images. Ce type de capteur offre une solution aux principaux inconvénients du CCD. Beaucoup d'industriels l'ont compris et se sont lancés dans l'étude et dans la fabrication de capteurs d'images en CMOS.*

## 1. INTRODUCTION

L'introduction de cette thèse a montré que les efforts des industriels pour améliorer la capture d'image n'ont pas cessé depuis l'invention de la photographie. De nos jours, l'évolution du "tout numérique" est une réalité et est rythmée par une progression exponentielle. L'imagerie numérique est emportée par cette évolution et le chiffre d'affaires que représente les capteurs d'images à l'état solide atteint 680M\$ (1996). Ce chiffre d'affaires concerne les capteurs d'images à l'état solide, et a relégué aux rangs des marginalités un bon nombre de détecteurs d'images basé sur d'autres principes.

C'est pour cela que nous allons nous intéresser uniquement aux capteurs d'images à l'état solide (solid-state imaging) et ne pas décrire des systèmes basés sur des tubes images.

L'objectif de ce chapitre est de recenser les capteurs d'images développés en micro-électronique depuis 1960 et de présenter l'APS (Active Pixel Sensor) comme devenant depuis les années 90, un nouveau type de capteur d'image alternatif au CCD, grâce à l'évolution des technologies CMOS.

## 2. PRINCIPES FONDAMENTAUX DES CAPTEURS D'IMAGES DANS LE VISIBLE

### 2.1 Le principe de l'échantillonnage du capteur d'images

Le principe du capteur d'image est d'échantillonner l'image du plan focal dans les deux directions X et Y. Le point élémentaire d'échantillonnage est le « pixel », ce point élémentaire est, par exemple, une surface rectangulaire ou carrée. On entend par **imageur**, le détecteur complet qui est constitué d'une mosaïque de pixels disposés, en général, orthogonalement dans les deux directions X et Y et du système capable de lire ces pixels.

Le pixel est le lieu où se situe le système qui va convertir les photons en électrons. Le détecteur matriciel devra être capable ensuite de transformer ces électrons en un signal (tension ou courant) pour être manipulé et traité par un ensemble de circuits électroniques. Le pixel effectue une opération d'échantillonnage qui consiste à prélever la valeur du signal pour des valeurs discrètes de l'espace. Le théorème de Shannon définit l'échantillonnage optimum d'un signal.

Une fonction continue  $f(x)$  est parfaitement connue en tout point, si l'on possède un échantillon de ses valeurs espacées avec un pas régulier  $p$  valant :  $p = 1/2\upsilon_c$ .  $\upsilon_c$  étant la borne supérieure du spectre de fréquence du signal.

La fonction  $f(x)$  s'obtient à partir des échantillons  $f(kp)$  par la formule suivante :

$$f(x) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} f(kp) \frac{\sin(\pi(\frac{x}{p} - k))}{\pi(\frac{x}{p} - k)} \quad \text{Eq. 2.1-1}$$

Ce théorème se généralise aisément aux fonctions à plusieurs dimensions (dont les images  $f(x, y)$ ) par séparation de variables.

Certains systèmes électroniques effectuent un filtre passe-bas pour les fréquences temporelles avec une fréquence de coupure  $\nu_c$  (Figure 2.1-1). Pour un détecteur d'images, ce sont les fréquences spatiales qui sont filtrées, (l'optique qui forme l'image est aussi un filtre passe-bas pour les fréquences spatiales, du fait de la taille limitée de sa pupille et de ses aberrations). Les caractéristiques de l'optique et du détecteur permettent donc de définir le pas d'échantillonnage de Shannon, en fonction de la fréquence de coupure  $\nu_c$  du système. Un échantillonnage plus (ou moins) élevé que le pas de Shannon sera qualifié de sur-échantillonnage (ou de sous-échantillonnage).

Le sur-échantillonnage correspond simplement à une redondance de mesures ; le sous-échantillonnage produit le phénomène de réplification (aliasing) qui peut perturber fortement le résultat.

Il est important de noter que le théorème de Shannon s'applique à des fonctions mathématiques de valeurs parfaitement connues en chaque point. Les mesures physiques sont toujours bruitées, leur précision est toujours limitée. Il vaudra souvent mieux, pour cette raison, sur-échantillonner (si possible) le signal.

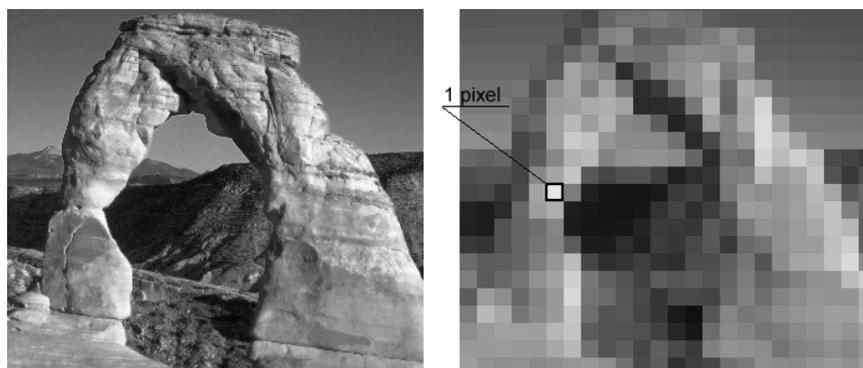


Figure 2.1-1 Effet de l'échantillonnage par des pixels de l'image sur le plan focal

## 2.2 Le principe fondamental de détection dans le silicium

### 2.2.1 L'effet photoélectrique ou des photons vers des électrons

Les capteurs d'images auxquels nous nous intéressons dans cette thèse sont tous basés sur l'emploi du silicium. Le principe fondamental de détection de la lumière est du à l'effet photoélectrique. Le silicium, matériau de base de la quasi-totalité des circuits intégrés analogiques et numériques, s'avère être aussi un détecteur optique performant. Le but de ce matériau est de convertir les photons répartis sur le plan focal en électrons (ou photoélectrons).

La détection de la lumière se produit par effet photoélectrique lorsqu'un photon d'énergie  $h\nu$  est absorbé par un atome de silicium [SZE]. Cela se traduit par la création d'une paire électron-trou dans le semi-conducteur (Figure 2.2-1).

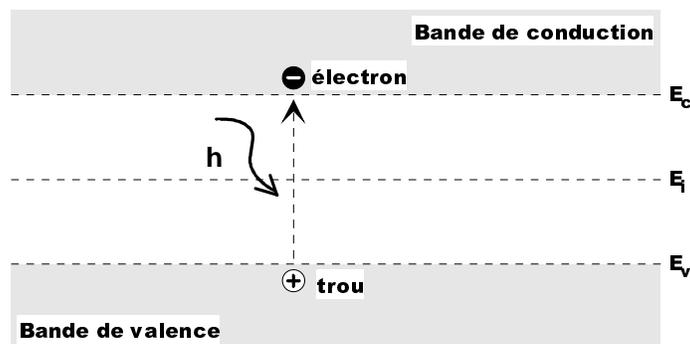


Figure 2.2-1 Effet photoélectrique dans un semi-conducteur.

L'effet photoélectrique se produit lorsqu'un photon est absorbé par un atome de silicium qui libère ainsi un de ses électrons de valence par une transition de bande (passage entre la bande de valence et la bande de conduction). La transition de bande par effet photoélectrique n'est possible en toute rigueur que si l'énergie du photon est supérieure ou égale à la largeur de la bande interdite ( $E_g = E_c - E_v$ ) du semi-conducteur considéré (Si). Pour le silicium,  $E_g$  est égal à 1,12 eV. L'énergie d'un photon est égale à  $h\nu$ ,  $h$  étant la constante de Planck et  $\nu$  la fréquence électromagnétique du photon. Si l'énergie  $h\nu$  du photon absorbé est supérieure à  $E_g$ , une paire électron-trou est générée et l'énergie supplémentaire ( $h\nu - E_g$ ) est dissipée dans le semi-conducteur.

Connaissant la valeur de  $E_g$  du silicium, il est possible de calculer la longueur d'onde maximale ( $\lambda_c$ ) des photons incidents pour qu'ils puissent générer une paire électron-trou par effet photoélectrique:

$$h\nu \geq E_g \Rightarrow \lambda_c = \frac{hc}{E_g} \cong 1,1 \mu m \quad \text{Eq. 2.2-1}$$

$E_g$  = largeur de la bande interdite du silicium (1,12 eV).

On peut donc constater que la détection par effet photoélectrique dans le silicium n'est plus possible au delà de 1,1  $\mu\text{m}$ , c'est-à-dire dans le proche infrarouge. Pour être sensible à un flux lumineux dont la longueur d'onde est supérieure à cette valeur, il faut utiliser un matériau avec une valeur de  $E_g$  plus petite, par exemple, le germanium (Ge), qui a une bande interdite égale à 0,7 eV et qui est donc sensible jusqu'à  $\lambda_c = 1,8 \mu\text{m}$ . Aujourd'hui, il existe relativement peu de capteurs utilisant le germanium ou d'autres matériaux avec  $E_g < 1,12 \text{ eV}$ , car le silicium est très bien maîtrisé au niveau de la technologie de fabrication, et permet d'obtenir des dispositifs de bonne qualité à faible coût [YANG].

Afin de collecter les photoélectrons générés par effet photoélectrique, un champ électrique doit être appliqué. Celui ci peut se réaliser à travers une jonction PN « métallurgique » (pour une **photodiode**) ou sous une jonction « induite » par le champ formé par une grille d'un MOS (pour un **photoMOS**).

Nous reviendrons en détail sur ces structures plus loin dans ce manuscrit.

### 2.2.2 Sensibilité

La sensibilité d'un tel détecteur, s'il était parfait, ou s'il possédait un rendement quantique  $Q_e$  égal à 1 (une paire électron-trou pour un photon de longueur d'onde inférieure à 1.1 $\mu\text{m}$ ,  $\lambda < \lambda_c$ ) serait égale à S, S étant exprimée en A/W et  $\lambda$  en microns :

$$S = \frac{e\lambda}{hc} = 0,8\lambda \quad \text{Eq. 2.2-2}$$

e : charge de l'électron

h : constante de Planck

c : vitesse de la lumière dans le vide

$\lambda$  : longueur d'onde

Cette valeur de la sensibilité est une limite fondamentale, un maximum absolu dû à la quantification de l'énergie lumineuse. La valeur de S varie linéairement en fonction de  $\lambda$  et vaut typiquement 0.4 A/W à  $\lambda = 0.5 \mu\text{m}$ .

### 2.2.3 Le coefficient d'absorption

La valeur de la sensibilité est donnée pour un détecteur parfait ( $Q_e=1$ ). Un des paramètres qui rend le  $Q_e$  du silicium inférieur à 1 est l'absorption des photons. Supposons qu'un bloc de silicium reçoive un flux photonique  $F_0$  (photons/cm<sup>2</sup>.s). Au fur et à mesure que le flux se propage dans le silicium (au pas  $\Delta x$ ), une fraction proportionnelle à l'intensité du flux est absorbée (Figure 2.2-2). Par conséquent, le nombre de photons absorbés sur une distance élémentaire  $\Delta x$  est égal à  $\alpha F(x)\Delta x$ , où  $\alpha$  est une constante de proportionnalité nommée

coefficient d'absorption du matériau considéré. De plus, ce coefficient dépend à la fois de la longueur d'onde au premier ordre et de la température au second.

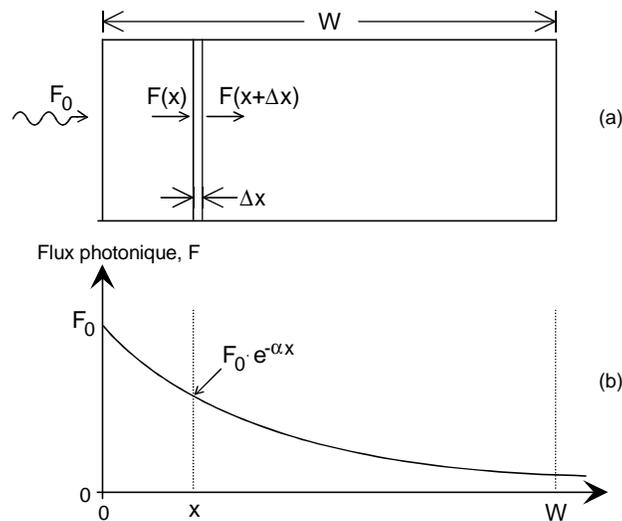


Figure 2.2-2 Absorption optique. (a) Semi-conducteur sous éclairage. (b) Réduction exponentielle du flux photonique dans le matériau.

On peut donc montrer [SZE] que l'intensité du flux dans le silicium suit une loi exponentielle :

$$F(x) = F_0 e^{-\alpha x} \quad \text{Eq. 2.2-3}$$

- $F(x)$  : intensité du flux photonique à la profondeur  $x$  (photons/cm<sup>2</sup>.s),
- $F_0$  : intensité du flux à la surface du silicium (photons/cm<sup>2</sup>.s),
- $\alpha$  : coefficient d'absorption du matériau (cm<sup>-1</sup>).

On en déduit qu'à  $x = 1/\alpha$ , soixante-trois pour cent du flux entrant a été absorbé, et il reste donc trente-sept pour cent du flux qui continue à se propager plus profondément. Egalement, à la distance  $x = 2/\alpha$ , il ne reste que treize pour cent du flux. On peut donc considérer que la plus grande partie de la lumière a été absorbée sur une épaisseur de  $x = 2/\alpha$ .

Le coefficient d'absorption  $\alpha$  dépend fortement de la longueur d'onde du rayonnement. Cela est illustré par la relation suivante [SZE], qui exprime  $\alpha$  en fonction de la partie imaginaire de l'indice de réfraction du milieu (Silicium)

$$\alpha(\lambda) = \frac{4\pi k(\lambda)}{\lambda} \quad \text{Eq. 2.2-4}$$

$k(\lambda)$  : partie imaginaire de l'indice de réfraction du matériau.

La Figure 2.2-3, ci-dessous montre l'évolution de  $\alpha$  en fonction de la longueur d'onde  $\lambda$  pour le silicium [LHAN].

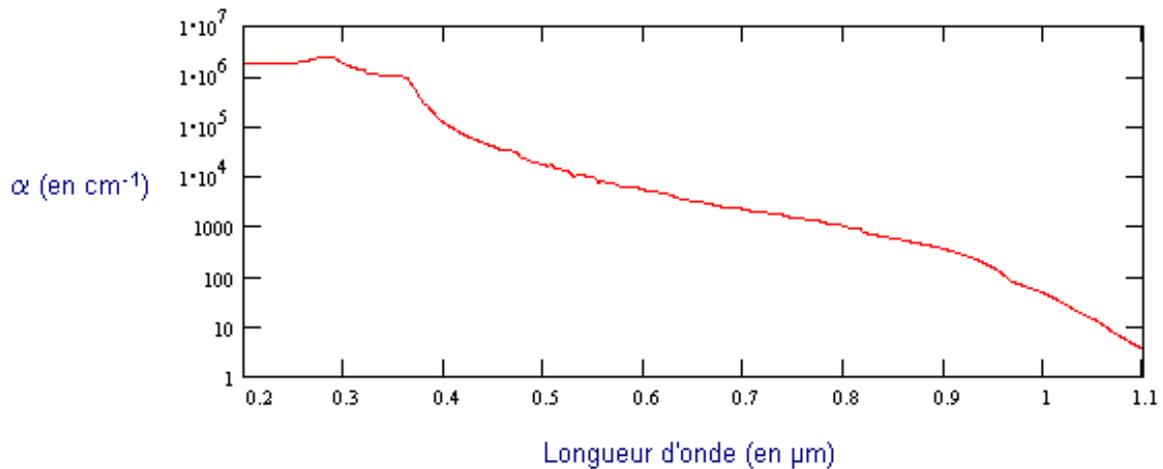


Figure 2.2-3 Coefficient d'absorption pour le silicium en fonction de la longueur d'onde.

On voit, par exemple, que pour une longueur d'onde de  $0,5 \mu\text{m}$ , le coefficient d'absorption est environ égal à  $10^4 \text{ cm}^{-1}$ , ce qui veut dire que 63% du flux est absorbé à une profondeur de  $1 \mu\text{m}$ . On en déduit donc que si l'on souhaite optimiser la sensibilité du capteur pour  $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$ , il faut que la zone photosensible ait une épaisseur d'au moins  $1 \mu\text{m}$ .

Les deux principes fondamentaux du capteur d'images ont été exposés: échantillonnage 2D par des pixels et détection par ces derniers grâce à l'effet photoélectrique dans le silicium.

### 3. QUELQUES CAPTEURS D'IMAGES, VERS LE CCD ET SES PERFORMANCES

Partant des deux principes de base (détection dans le silicium et échantillonnage 2D), plusieurs architectures de capteurs ont vu le jour depuis le milieu des années soixante.

#### 3.1 Les capteurs d'images MOS-XY

Le capteur MOS XY est celui qui vient le plus naturellement à l'esprit. Le pixel de ce capteur est composé d'une matrice de photodiodes. Chaque pixel est muni d'un interrupteur MOS. Deux décodeurs d'adresses en X et Y pour lire le pixel comme un élément mémoire sont situés à la périphérie de la matrice d'éléments photosensibles [IEEE-10][IEEE-11][IEEE-12]. Cette structure est schématisée sur le schéma suivant (Figure 3.1-1).

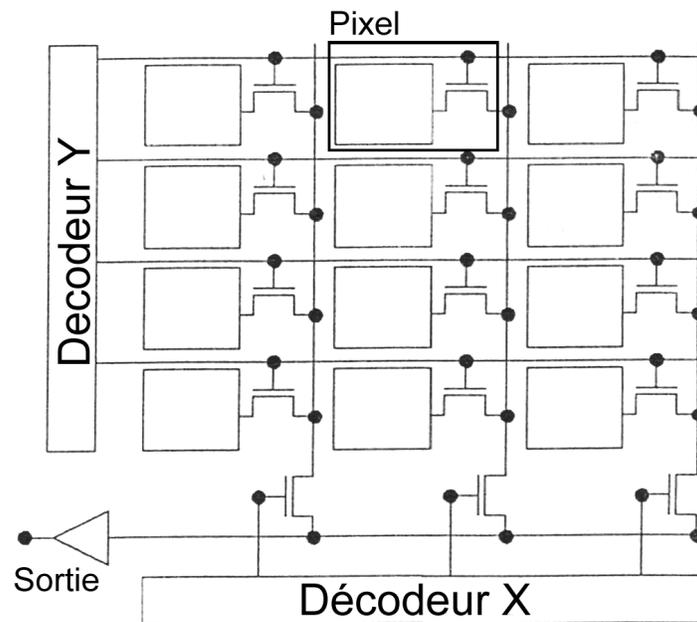


Figure 3.1-1 Architecture d'un capteur MOS XY

Chaque pixel contient donc une photodiode directement reliée à un bus analogique vertical. Afin de convertir l'information spatiale sous la forme 2D en un flux d'informations en série à la sortie du capteur, le but des deux décodeurs est d'adresser séquentiellement chaque pixel. La séquence de lecture est illustrée sur la Figure 3.1-2, un trait épais représente une activation de la ligne correspondante. En premier lieu pour la clarté de l'explication, on considère que le début de l'intégration (ou exposition) a bien commencé en même temps pour tous les pixels. Le premier pixel contenant la valeur "a" est adressé durant la phase 2, il est alors lu et initialisé sans que les autres pixels en soit affectés. Le second pixel de valeur "b" peut être lu en changeant l'adressage, la valeur du pixel "a" recommence à augmenter, car le flux photonique arrive toujours sur le détecteur. L'étape 4 montre un nouvel exemple de ce cycle, mais un aspect important se dégage ici par l'architecture même du capteur : c'est la possibilité d'effectuer un **accès aléatoire** aux pixels.

En termes de performances, ce type de capteur souffre d'un niveau de bruit élevé incluant un bruit spatial fixe (*FPN*) important. Ce défaut est dû au fait qu'une photodiode de faible capacité est directement connectée à un bus analogique vertical de haute capacité, altérant le faible signal produit par la photodiode. Quelques astuces combinant ce type de capteur et le CCD peuvent en améliorer les performances. Mais elles sont loin d'être à la hauteur d'applications qui requièrent un faible bruit et une bonne dynamique. Enfin, ce capteur est aussi connu sous le nom de : "**passive pixels sensors**" (PPS), à l'opposé des capteurs actifs "**active pixels sensors**" (APS) que nous verrons plus loin dans ce chapitre.

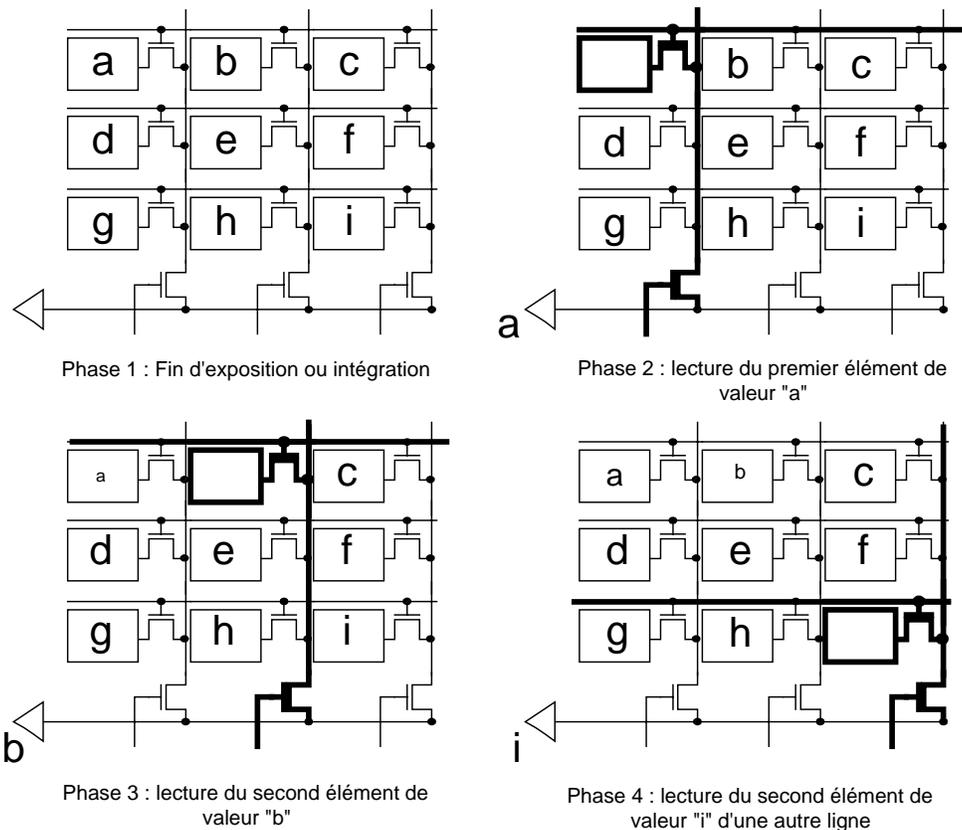


Figure 3.1-2 Principe de lecture des capteurs XY-MOS

### 3.2 Le CID

L'architecture du capteur CID (*Charge Injection Device*), [SPIE91] est similaire à celle du capteur XY-MOS. C'est simplement la conception du pixel qui change. Au lieu d'utiliser des photodiodes comme photosite (on nomme "photosite" la partie du pixel qui est sensible à la lumière), deux capacités MOS partiellement recouvrantes sont utilisées (Figure 3.2-1). Les photoélectrons générés peuvent être collectés sous la grille ayant la plus haute tension (a). En déplaçant les charges d'une grille à une autre au moment de la lecture (de manière similaire au CCD), la tension (flottante) d'une des grilles change (b). Cette variation de tension est mesurée pour connaître la quantité de charges, elle est proportionnelle à la quantité de charges [IEEE-9]. C'est le principe du MOS en mode de lecture avec injection des charges lorsque sa grille est flottante, similairement à une diode flottante.

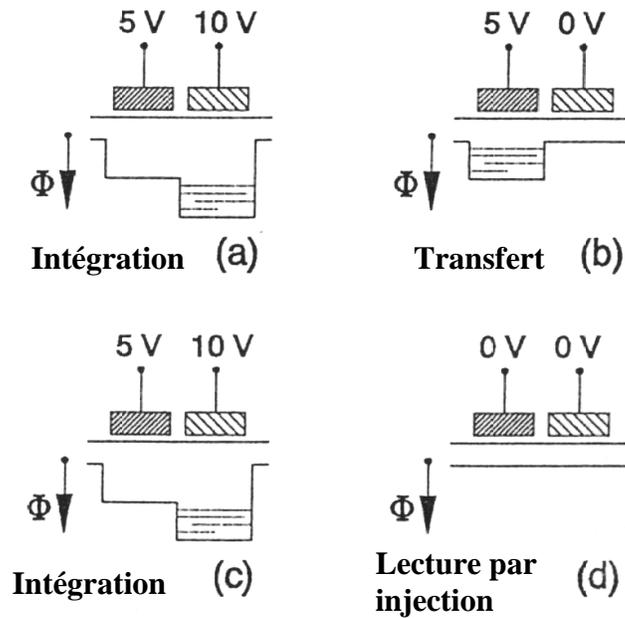


Figure 3.2-1 Principe de fonctionnement des capteurs CID

Le chronogramme de lecture reste quasiment identique par rapport aux capteurs XY-MOS. En rétablissant les tensions des deux grilles dans les conditions initiales (c) l'intégration peut ainsi continuer et une lecture non destructive est possible. Le vidage complet du pixel s'effectue lorsque les deux grilles sont à zéro volts (d), et ainsi injectant les charges dans le substrat. Cette injection produit un courant de substrat qui est proportionnel à l'exposition à la lumière de la grille du CID. Le courant est alors mesuré pour connaître le flux dans chaque pixel, mais cette méthode est destructive.

Ce capteur souffre des mêmes défauts que le XY-MOS, les signaux issus de faibles flux sont rapidement perturbés par la capacité de la ligne de lecture, et offrent des performances médiocres. Par exemple, un capteur CID, [SPIE91], [SPIE93] considéré comme ayant de bonnes performances de 512x512 pixels offre un bruit de lecture de 220  $e^-$ , ce qui, nous allons le voir plus loin, est un bruit important comparé à d'autres capteurs.

### 3.3 Ce que sont devenus ces capteurs

Tous ces types de capteurs sont connus depuis relativement longtemps (par rapport à la naissance de la micro-électronique), mais leur utilisation reste minoritaire pour des applications dans le domaine visible. Leurs performances restent très médiocres. La naissance du CCD dans les années 70, qui a acquis de très bonnes performances, a conduit dans les années 80 à une marginalisation des CID et des capteurs MOS XY (ou PPS). Le paragraphe suivant est dédié à une présentation du CCD et de ses performances.

### 3.4 Introduction au capteur CCD

Le concept du CCD est né en 1970 dans les laboratoires Bell par les travaux des ingénieurs W.Boyle and G.Smith. Initialement utilisé pour réaliser des lignes de retard, des filtres analogiques, ... etc, le concept de CCD a rapidement évolué vers une utilisation majoritaire sur des applications de capteurs d'images. Ce détecteur a atteint une grande maturité alliant un très haut niveau de performances et une importante utilisation dans toutes les applications d'imagerie aussi bien dans le domaine grand public que scientifique. Ce paragraphe fait un tour d'horizon rapide (ou un état de l'art) sur le fonctionnement et les performances d'un tel détecteur mais ne se veut en aucun cas exhaustif sur le sujet.

Nous allons voir que l'APS possède des caractéristiques physiques et des paramètres proches du CCD, c'est pour cela qu'un rappel des performances des CCD est entrepris ici.

**Comme le CCD est devenu une référence (voire un "étalon"), au cours de ce manuscrit, les performances du CCD seront comparées à celles obtenues par les capteurs APS.**

### 3.5 le principe

Le CCD est basé sur une capacité MOS dont la grille est polarisée. Cette tension de polarisation provoque un dépeuplement des trous P sous la grille de la capacité MOS. La lumière traverse l'électrode de la capacité MOS et une génération d'une paire électron-trou se produit. Grâce à l'effet du champ, le photoélectron est attiré sous la grille et le trou repoussé dans le volume du substrat (Figure 3.5-1).

Chaque pixel est constitué d'une ou plusieurs grilles et les photoélectrons une fois collectés sont transférés (Figure 3.5-1, Figure 3.5-2) verticalement d'une ligne à une autre à l'aide de plusieurs phases d'horloges (de 2 à 6 phases  $\phi V$ ) vers un registre horizontal « Rh ». Ensuite, ces charges sont transférées horizontalement par des phases d'horloge  $\phi H$  vers une diode de lecture, dont le but est de convertir les photoélectrons en une tension (Figure 3.5-4). [THEU]

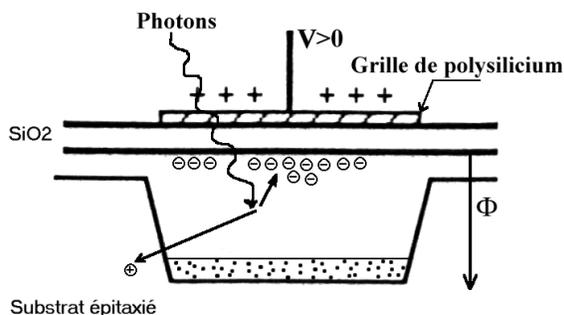


Figure 3.5-1 Principe d'accumulation des charges dans un photoMos.

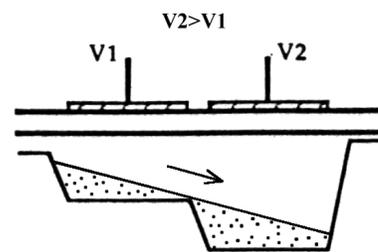


Figure 3.5-2 Principe du transfert de charges d'un pixel CCD vers un autre.

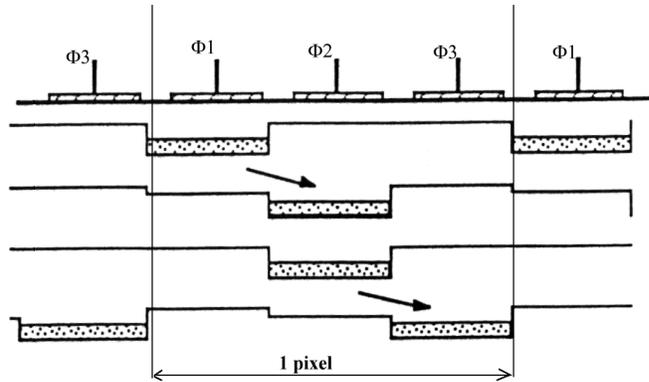


Figure 3.5-3 CCD avec transfert de charges à trois phases.

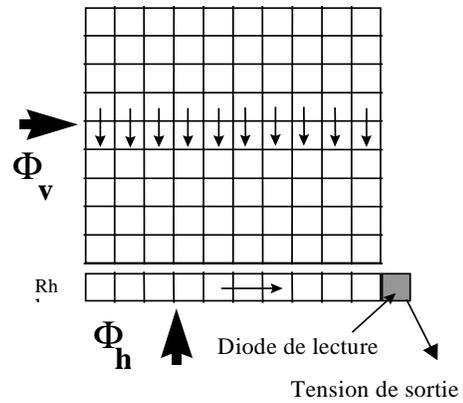


Figure 3.5-4 Exemple de lecture d'un CCD pleine trame.

L'architecture d'un CCD est très variée, elle comporte des (Figure 3.5-5):

- CCD pleine trame (mais nécessite un obturateur) : *type (a)*
- CCD à transfert de trame, l'image est envoyée dans une zone mémoire pour éviter le "smearing" ou la pollution de l'image par des photons pendant la lecture. (la surface totale du CCD est alors multipliée par deux) : *type (b)*
- CCD à interligne (le pixel n'est plus carré et une partie de celui-ci est insensible à la lumière, ce qui peut poser des problèmes pour des mesures de positions d'objets ponctuels) : *type (c)*
- CCD en barrettes pour une imagerie en mode balayage pour les satellites (SPOT) ou scanner de documents : *type (d)*

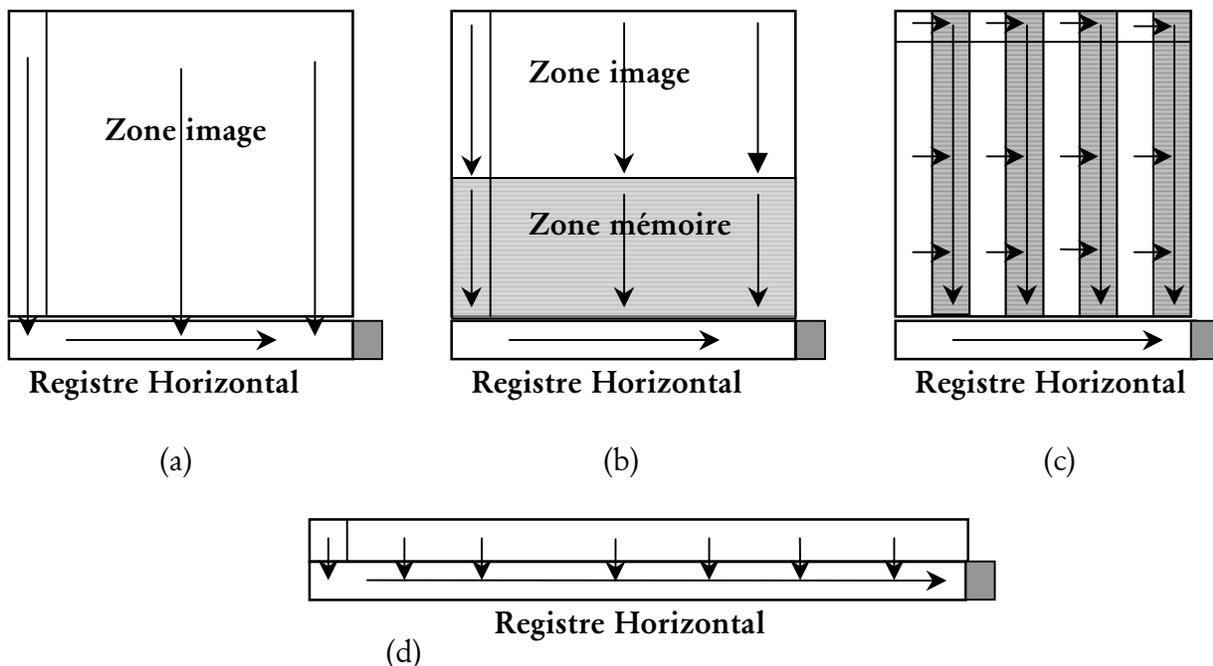


Figure 3.5-5 Différentes architectures de CCD. Le rectangle sombre à droite du « Registre horizontal » est le point où s'effectue la conversion des photo-électrons en une tension.

### 3.6 un aperçu des performances, vers l'imageur idéal ?

Les principaux défauts de "jeunesse" du CCD sont maintenant éliminés. Ils peuvent se résumer ainsi [ASAP91]:

- les problèmes d'inefficacité de transfert des charges (CTE) ont été résolus par la conception de CCD à canal enterré (BCCD) (Figure 3.6-1).
- le courant d'obscurité a été réduit grâce au mode MPP (Multi Pinned Phase)
- la réduction des défauts cosmétiques (pixels, groupe de pixels ou colonne défectueux) par une amélioration continue de la technologie et par une meilleure "propreté" des salles blanches.
- le nombre de pixels, initialement faible, a été augmenté grâce à la résolution du premier point (CTE) et à un rendement technologique amélioré.

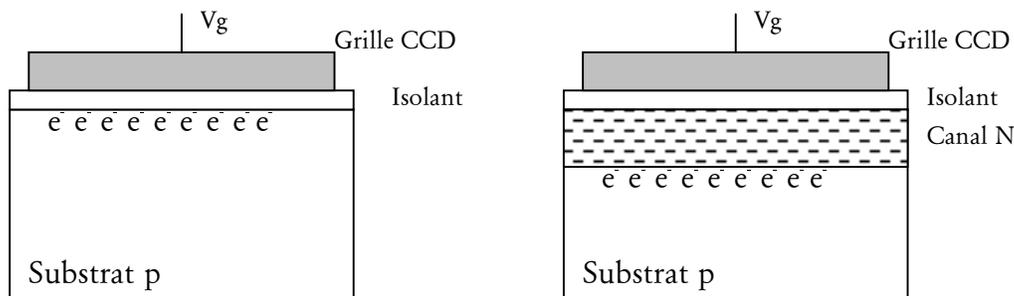


Figure 3.6-1 A gauche une coupe d'un SCCD (Surface CCD), le transport des électrons à lieu à l'interface Si-SiO<sub>2</sub>. A droite un (Buried) BCCD, le transport des électrons à lieu dans un canal N.

#### 3.6.1 Le nombre et la taille des pixels CCD

De nos jours des capteurs possédant plus de 1000x1000 pixels sont considérés comme des tailles "médium". Des capteurs ayant 2048x2048=4 millions de pixels peuvent se trouver pour \$1500. Mais le nombre de pixels va au delà de 4 millions, chez presque tous les fabricants de CCD des capteurs monolithiques de 4096x4096 (4Kx4K) sont disponibles sur leur catalogues [ASAP89],[SPIE90],[SPIE93B] voire même un CCD de 7Kx9K (soit 63 millions de pixels) [PHIL] a été récemment développé. Des techniques d'aboutement sur trois cotés permettent de fusionner des matrices entre elles pour obtenir des « matrices de matrices » de 8K par 12K.

De telles résolutions sont demandées pour des applications comme l'astronomie, l'imagerie médicale ou la photographie d'art numérique. La réussite de grands capteurs CCD nécessite une grande maîtrise de la technologie CCD et une efficacité de transfert la plus proche possible de l'unité.

La taille du pixel varie entre 7µm et 25µm, répondant à des critères standard en résolution spatiale des systèmes optiques. Cependant, il est à noter ici que des pixels plus grands que

30 $\mu$ m, pour des applications très faible flux, ne sont réalisables qu'au prix d'un grand nombre de phases d'horloges verticales et d'une complexité croissante de mise en œuvre de l'électronique de lecture.

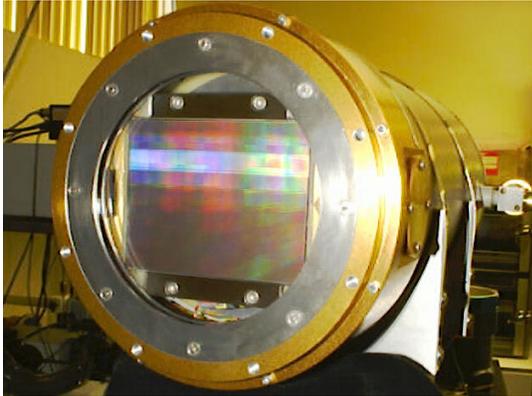


Figure 3.6-2 Un CCD de 7Kx9K dans son cryostat.

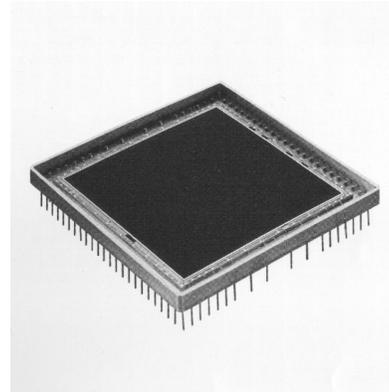


Figure 3.6-3 Un CCD de 2048x2048 pixels.

La figure suivante (Figure 3.6-4) montre un aperçu des différents capteurs CCD qui existent dans le commerce, avec une comparaison à la même échelle de la surface photosensible.

Il apparaît clairement que tous les fabricants maîtrisent la conception et la réalisation de grands capteurs. Certains même, ont adopté des systèmes de conception de CCD avec un bloc de base de 1Kx1K répétable et aboutable par logiciel à volonté sur la surface de la tranche « wafer » de silicium.

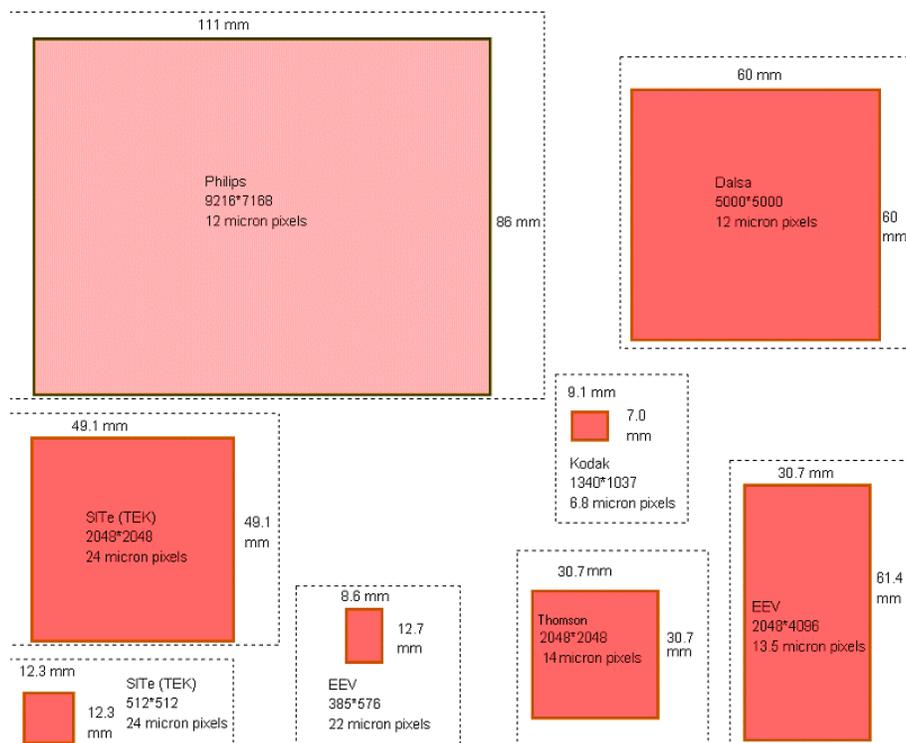


Figure 3.6-4 Un aperçu global sur les différentes matrices CCD existantes

### 3.6.2 Le rendement quantique

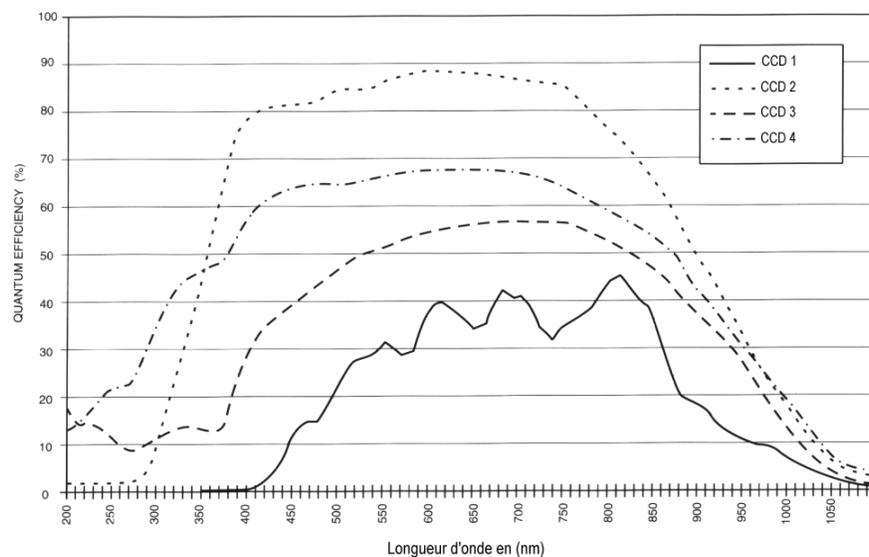
Le rendement quantique est un rapport dépendant de la longueur d'onde des photons incidents il est défini tel que :

$$Q_e(\lambda) = \frac{\text{NbreMoyenphotoelectrons}(\lambda) / \text{pixel}}{\text{NbreMoyenphotons}(\lambda) / \text{pixel}} \quad \text{Eq. 3.6-5}$$

Des efforts importants de recherche et de développement ont été entrepris pour approcher un  $Q_e$  proche de 1 sur toute la bande spectrale entre  $0.2\mu\text{m}$  et  $1.1\mu\text{m}$  (la coupure naturelle du silicium). Le facteur limitatif du rendement quantique est principalement l'opacité des grilles du CCD vis à vis de la lumière incidente.

Pour combattre cet effet du aux grilles sur les pixels, il existe des CCD amincis à l'aide d'acides depuis la face arrière jusqu'à  $10\mu\text{m}$  d'épaisseur. La face arrière est dopée et traitée anti-reflets pour éviter respectivement la perte de photo-électrons générés en surface et le gradient d'indice Air-Si trop important.

Ces CCD sont donc éclairés par la face arrière et possèdent un rendement proche de 100% dans le rouge et une sensibilité dans le bleu accrue d'un facteur 6. Pour être sensible dans l'UV, les photons UV étant totalement absorbés par la surface du silicium, des couches fluorescentes (Lumigen, Coumarin 481) [SPIE91A] sont déposées à la surface même du CCD. Les photons UV provoquent la fluorescence de la couche et une émission de photons vers des longueurs d'onde visibles et ils sont donc susceptibles d'être détectés par le CCD. Par ailleurs, cette technique s'applique aussi bien sur des CCD amincis que non amincis.



### Figure 3.6-5 Différentes courbes du rendement quantique de CCD

La Figure 3.6-5 montre à quel point le rendement quantique du CCD est remarquable, voire même proche de la perfection. La courbe CCD1 est le rendement quantique d'un CCD éclairé par l'avant (*front side CCD*), la courbe CCD2 est celle d'un CCD aminci et traité anti-reflet dans le visible (*back side CCD*), la courbe CCD3 concerne le même CCD que le précédent mais avec absence de traitement antireflet. La courbe du CCD4 est celle d'un CCD *backside* sans couches antireflet, mais qui a subi un traitement pour améliorer la réponse spectrale dans l'UV. Le CCD2 possède un rendement supérieur à 80% entre 350 et 800nm.

Nous reviendrons au cours de cette thèse sur les mécanismes mis en jeu dans le rendement quantique d'un détecteur silicium.

#### 3.6.3 Le bruit de lecture, dynamique et vitesse de lecture

Le bruit de lecture est une caractéristique importante d'un capteur d'image. Il est la somme de bruits issus de l'amplification et du bruit de remise à zéro, il est aussi dépendant de la vitesse de lecture (Pour le moment nous n'entrerons pas dans le détail sur l'expression mathématique de ces bruits). Ce bruit est exprimé en électrons *rms* (root mean square) et vaut typiquement de 20 à 10 électrons pour des CCD non scientifiques et moins de 10 pour des CCD scientifiques. On rapporte même [ASAP-89] des bruits inférieurs à 1 électron !

La dynamique d'un CCD est le rapport du nombre maximal d'électrons que peut accumuler le pixel en restant dans une zone linéaire, divisé par le bruit. Selon la technologie du CCD (MPP ou non) et la taille du pixel, ce nombre maximal d'électrons varie entre 80 Ke<sup>-</sup> et 600Ke<sup>-</sup> et la dynamique résultante varie entre 12 (4096 niveaux) et 16 bits (65535 niveaux) pour des CCD scientifiques.

La haute fréquence de lecture pixel d'un CCD est un élément important pour, par exemple, l'acquisition d'images en temps réel ou en mode vidéo. Ceci peut être critique pour la lecture de grandes matrices et on trouve couramment des CCD qui se lisent à 20Mpixels/s. Les CCD scientifiques, afin d'obtenir le bruit le plus faible possible, sont lus à 100Kpixels/s. Des astuces qui consistent à employer deux registres horizontaux de sortie en haut et en bas de la matrice avec 4 diodes de lecture au total, placées sur chaque extrémité du registre horizontal, multiplient par 4 la fréquence image, mais au prix d'une électronique plus complexe.

#### 3.6.4 Le courant d'obscurité

Le courant d'obscurité est le courant provoqué par des électrons générés thermiquement pendant l'intégration de l'image. Ces électrons thermiques s'ajoutent au signal photonique utile, mais aussi leur bruit, qui obéit à une statistique de Poisson (N électrons thermiques produisent un bruit de variance N). On aura intérêt particulièrement à réduire la charge thermique au minimum soit:

- en réduisant le temps d'intégration lorsque c'est possible (flux photonique important).

- en réduisant la température du capteur (le courant d'obscurité est divisé d'un facteur 2 tous les 5 à 8°C)
- en utilisant des procédés technologiques (MPP) mais au prix d'une diminution de la dynamique

Le courant d'obscurité s'exprime en pA/cm<sup>2</sup>, et les meilleurs CCD atteignent 10 voire 5 pA/cm<sup>2</sup> ce qui permet de repousser la limite de saturation due à des charges thermiques à température ambiante à des temps de plusieurs minutes.

### ***3.6.5 Bilan***

Ce rapide aperçu sur les performances des CCD est éloquent : elles illustrent un capteur proche de la perfection. Cependant, aucun CCD ne possède toutes ses performances réunies en un seul composant. Certains CCD ont été optimisés pour un rendement quantique élevé, d'autres pour un faible bruit et certains pour une dynamique importante: ceci dépend de l'application à laquelle le composant CCD est destiné. On peut trouver des CCD ayant presque simultanément toutes ces performances à la fois, mais à un prix extrêmement élevé (plusieurs centaines de KF), les réduisant à des emplois scientifiques ou militaires. Nous allons maintenant nous intéresser à la nouvelle génération de capteurs aux performances très prometteuses qu'est l'APS.

## 4. UN NOUVEAU CONCEPT D'IMAGEUR: L'APS, ET SES AVANTAGES PAR RAPPORT AU CCD

### 4.1 Introduction

Comme il a été dit dans l'introduction générale, le concept d'APS (ou *Active Pixel Sensor*) a été imaginé avant le CCD.

Ce concept repose sur le même principe que le capteur XY-MOS, mais le pixel au lieu d'être **passif** (simple photodiode lue en courant), est dit **actif** dans la mesure où il intègre à la fois le photoélément, ou photosite, et le circuit d'amplification pour une sortie à faible impédance à travers le bus analogique qui doit parcourir toute la matrice.

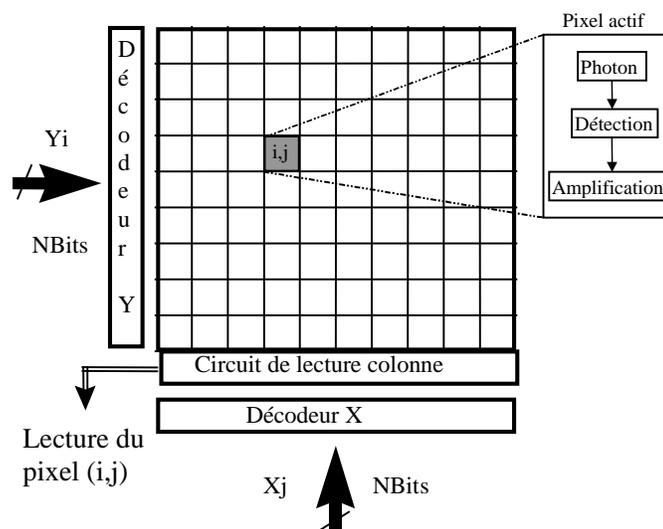


Figure 4.1-1 Structure de base d'un capteur d'images à pixels actifs où chaque pixel est pourvu d'une partie photosensible et de son amplificateur.

En fait, le pixel APS est constitué de la partie sensible d'un pixel CCD qui opère la conversion des photons en électrons, associée à une diode de lecture telle qu'elle est présente à la sortie d'un CCD réalisant la conversion électrons en tension (Figure 4.1-2). Cette conversion photo-électrons en tension définit une grandeur importante pour un capteur d'images : le facteur de conversion exprimé en  $\mu\text{V}$  pour un électron injecté dans la diode de lecture.

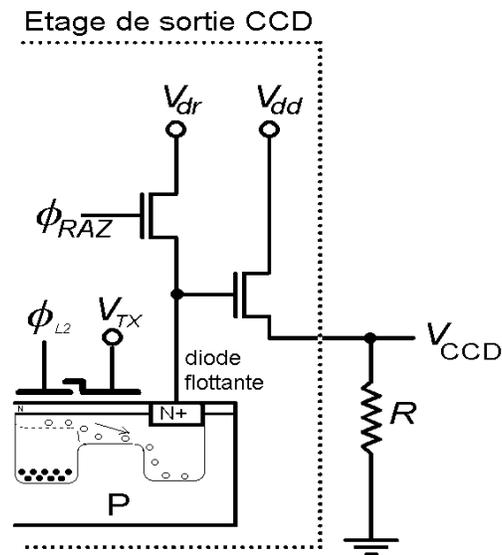


Figure 4.1-2 Etage de sortie d'un capteur CCD. La conversion photo-électrons tension s'effectue sur une diode flottante lorsque  $\Phi_{raz}$  est ouvert.

L'idée d'incorporer des transistors actifs dans les capteurs matriciels n'est pas nouvelle [IEEE-1],[IEEE-2],[IEEE-3]. Mais, c'est seulement durant ces dernières années que ce concept a commencé à devenir réalisable en raison de la diminution des règles de dessin de la technologie CMOS, permettant l'intégration dans un pixel de fonctions plus complexes.

Des recherches, depuis quelques années, ont été entreprises dans le monde. Par exemple, au Japon, on cherche surtout à s'affranchir des problèmes de transfert de charge pour des capteurs à très haute résolution et à grande vitesse de lecture, par exemple des imageurs HDTV [IEEE-4][IEEE-5][IEEE-6][IEEE-7]. Etant donné leur technologie très avancée, les japonais étudient des structures APS verticales complexes (et donc non compatibles CMOS) et très performantes, qui peuvent certainement remplacer les CCDs dans le futur.

En Europe, on a développé des imageurs en CMOS, sans amplificateur dans les pixels, pendant plusieurs années [IEEE 8][SPIE93C], et on commence maintenant à s'intéresser aussi au concept APS, surtout pour des applications dites "capteur intelligent" où on bénéficie notamment de la possibilité de traiter l'image dans le plan focal, afin d'extraire l'information utile en temps réel [SAP][BERN92][IEEEW].

Pour maintenir une bonne sensibilité, il faut une technologie très fine de manière à pouvoir intégrer des éléments actifs dans les pixels, sans trop dégrader le taux de remplissage de la surface du pixel par le photosite ("fill factor", en anglais). C'est donc l'arrivée des technologies CMOS sub-microniques qui a fait accélérer la recherche dans ce domaine.

Actuellement, la recherche sur les APS est en pleine expansion dans le monde entier, et on l'expérimente avec plusieurs types de technologies de fabrication (CMOS, BiCMOS, CCD et d'autres) afin d'obtenir des structures optimisées pour une application donnée. Aux Etats Unis, on étudie en particulier des structures APS à bas coût et adaptées au domaine du multimédia [ISSCC96A][ARVLSI]. Leur recherche est donc concentrée sur des structures réalisables en technologie CMOS standard [ISSCC96B][SPIE93E].

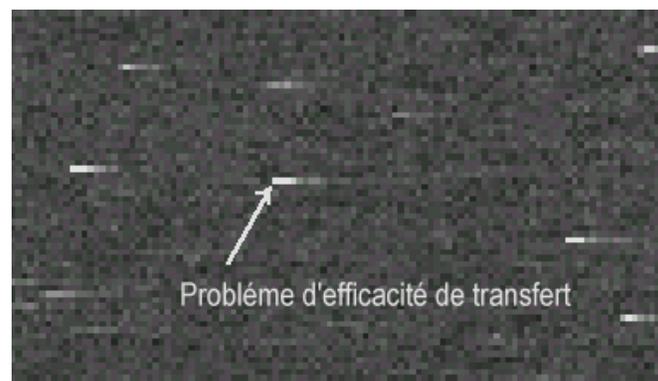
Avec les technologies CMOS actuelles, des travaux ont été initiés par le Jet-Propulsion-Laboratory (CA-USA [SPIE93E]). Leurs premiers résultats ont montré des performances très prometteuses et le but de l'APS s'affirme bien comme étant de préserver les hautes performances du CCD tout en proposant de nouvelles fonctionnalités comme, par exemple, l'accès aléatoire. Mais l'APS propose bien plus encore: éliminer certains inconvénients propres au concept CCD, et c'est ce que nous nous proposons de discuter dans le paragraphe suivant.

## 4.2 Les inconvénients du CCD, résolubles par l'APS

### 4.2.1 L'efficacité de transfert du CCD et les problèmes inhérents aux transferts de charges.

Depuis son invention, le nombre de pixels du capteur CCD n'a pas cessé d'augmenter, aujourd'hui, il existe des capteurs monolithiques de plus de 8000x8000 pixels. Néanmoins, cette croissance de taille du CCD devient son talon d'Achille. En effet, lors du transfert des charges d'un pixel vers la sortie, les charges se déplacent à travers de très nombreux pixels. A l'arrivée, une partie des charges sera définitivement perdue. Des efforts importants ont été menés pour réduire au minimum cette perte.

Si  $\epsilon$  représente la fraction de charge perdue pour chaque transfert, alors le CTE (Charge Transfert Efficiency) vaut  $1-\epsilon$ . Les valeurs de CTE, atteintes actuellement, sont de l'ordre de 0.99999, ce qui paraît proche de la perfection. Or, si le capteur comporte, par exemple, 4096 lignes, on aura 4096 transferts à réaliser pour lire le pixel situé sur la ligne la plus éloignée du registre horizontal. On n'obtiendra en sortie du CCD que  $0.99999^{4096}$  soit 0.959 de la charge réelle du pixel, c'est à dire une perte de 4% du signal. L'image (Figure 4.2-1) montre la traînée mieux visible sur un point chaud d'un CCD ayant une faible efficacité de transfert, les électrons non transférés se retrouvent en retard sur un autre pixel et ainsi de suite sur le pixel suivant.

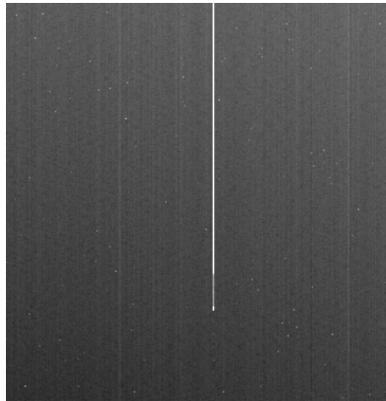


**Figure 4.2-1** Illustration d'un problème d'efficacité de transfert dans le registre horizontal d'un CCD. Le phénomène est mieux visible avec un point chaud, que sur le « bruit de fond » de l'image.

Cette perte n'est pas constante dans l'image puisqu'elle dépend de la position du pixel à lire par rapport au registre de sortie. De plus, un tel niveau de performances ne peut être atteint qu'avec l'utilisation de tranches de silicium d'une qualité irréprochable. En fait, il s'agit d'effectuer des transferts de charges sur des distances macroscopiques (cm) le plus rapidement possible, alors que dans l'APS, il s'agit plus simplement de propager une tension sur une ligne, ce qui améliore en définitive les performances d'un détecteur comprenant un grand nombre de pixels. Les limitations dues au transfert des charges entraînent un autre problème : la vitesse maximale de lecture. Ainsi, pour limiter la perte de charges par les transferts successifs, les CCD

scientifiques se lisent couramment à 50kpixels/s. Ceci est inutilisable pour des applications embarquées à bord de satellites comme le guidage ou « star tracking » qui réclament une cadence image élevée. Il existe des CCD vidéo plus rapides qui se lisent à 70Mpixels/s, mais leurs performances en sensibilité restent médiocres.

Si on exclut le problème d'efficacité de transfert et qu'on ne s'intéresse qu'au transfert des charges en lui-même, on se rend compte que la présence d'un seul pixel défectueux dans une colonne du CCD condamne la colonne entière.



**Figure 4.2-2 Image d'obscurité d'un CCD et l'effet d'un pixel défectueux: toute une colonne défectueuse à partir du pixel défectueux.**

Un cas plus fatal peut se présenter, c'est celui où un pixel du registre horizontal de sortie est défectueux : cette fois, c'est la matrice entière qui n'est plus utilisable. En un mot : un seul pixel défectueux peut compromettre le bon fonctionnement du CCD en entier. Les pixels défectueux apparaissent dès la fabrication du CCD. Ce problème devient très critique lorsqu'on fabrique de grands CCD (supérieur à 2Kx2K pixels). Dans ce cas, le rendement de fabrication de grandes matrices avec des qualités cosmétiques suffisantes devient faible et mène à des capteurs très coûteux.

**L'APS n'a pas de transfert de charges à réaliser vers une sortie**, on comprend aisément que les défauts du CCD précédemment décrits sont éliminés : ni perte de signal, ni dégradation cosmétique de la matrice par un point défectueux... Toutefois, des pixels défectueux peuvent exister dans un APS, mais ceux-ci restent isolés et n'ont pas d'influence de dégradation sur les pixels voisins. Ils ne polluent pas une colonne de la matrice et encore moins la matrice entière puisque l'APS n'a pas besoin de registre horizontal de lecture comme le CCD.

Un autre phénomène inhérent au transfert des charges dans les CCD, est l'éblouissement (blooming). Les lignes du CCD ne sont pas totalement isolées les unes des autres et il suffit qu'un point brillant de la scène (reflets, sources lumineuses,...) sature un pixel, pour que celui-ci affecte toute la colonne et donc finalement toute l'image. Il existe des CCD conçus avec des dispositifs anti-éblouissement (anti-blooming), mais c'est au prix d'une réduction du

remplissage du pixel par le photosite (fill-factor), d'où une baisse du rendement quantique effectif.

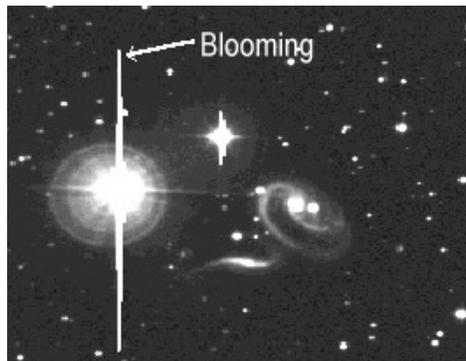


Figure 4.2-3 Image CCD provenant d'une application en imagerie astronomique. L'étoile brillante sature quelques pixels, mais les charges en excès se dispersent sur une colonne entière de la matrice, c'est l'éblouissement ou « blooming ».

L'APS ayant tous les pixels d'une colonne isolés les uns des autres, n'est pas concerné par ce problème. Enfin, dans le CCD, le transfert de charges induit, pour des matrices sans zone mémoire (full-frames), le « smearing ». C'est à dire que l'image est lue ligne à ligne alors que la matrice est encore éclairée par la scène. Ceci provoque un phénomène de traînage de l'image. Il existe des solutions qui nécessitent l'emploi d'obturateurs électromécaniques, mais peu fiables dans la cas d'applications spatiales. Une autre solution est d'utiliser des CCD à transfert de trame ou interligne pouvant éliminer ce défaut, mais au prix respectivement d'un doublement de la surface du CCD ou d'une perte de fill-factor d'au moins 50%. **Par son principe, l'APS ne souffre pas du traînage ("smearing" et "lag").**

#### **4.2.2 Tenue aux radiations**

Lorsqu'un CCD est placé dans un environnement spatial, il subit l'influence des particules et du rayonnement provenant de l'univers et du soleil, qui est composé essentiellement de protons énergétiques et d'un rayonnement gamma. La première cause conduit à la création de pixels défectueux. On a décrit dans un paragraphe précédent (§4.2.1), ce que peut produire un tel défaut sur un CCD. Celui ci peut rapidement conduire à un non fonctionnement global du CCD. Dans le cas de l'APS, un nouveau pixel défectueux peut être créé sans conséquences pour les pixels voisins. Le rayonnement gamma, a un effet plus global et provoque une augmentation du courant d'obscurité aussi bien dans un CCD que dans l'APS [CIMI-96] [SPIE-94].

#### **4.2.3 Accès aléatoire**

L'accès aléatoire de l'APS réside dans la nature même de son architecture. Il suffit d'appliquer numériquement l'adresse X et Y du pixel à lire pour en obtenir « instantanément » sa valeur analogique, voire numérique. Ceci peut s'apparenter à la lecture d'une mémoire.

Avec un CCD, c'est plus complexe : il faut décaler et vider tous les pixels entre le registre de sortie et le pixel à lire. Cette opération est coûteuse en temps et détruit le contenu de tous les autres pixels situés en dessous de la fenêtre. Par contre, l'APS permet de lire une chaîne de pixels suivant n'importe quelle forme : fenêtres, cercles, ellipses, courbes non fermées, alors qu'avec un CCD ce type de lecture est impossible sur une même intégration. Cet accès permet de réaliser des zooms et des fenêtrages donnant une très grande flexibilité pour des applications comme le suivi d'une cible mobile, la compression de données ou le traitement des données de l'image en temps réel.

#### **4.2.4 Facteur de remplissage (Fill Factor)**

Les CCD ont atteint la perfection dans ce domaine, avec des taux de remplissage de 100% de la surface du pixel par le photosite. L'APS perd une partie de la surface consacrée à la détection de la lumière du fait de la présence de transistors situés dans le périmètre du pixel. L'utilisation d'un « post-process », comme des micro-lentilles, permet de corriger ce défaut et d'augmenter de manière appréciable le fill-factor de l'APS (voir Chapitre IV).

#### **4.2.5 Intégration de la chaîne de mesure et de pilotage dans une même puce et consommation de puissance**

L'APS, réalisé en technologie CMOS, s'insère parfaitement dans le monde de la VLSI (Very Large Scale Integration). Elle permet l'intégration sur la même puce de l'imageur, d'un séquenceur programmable, d'une chaîne analogique, d'un convertisseur analogique - numérique et de fonctions numériques de traitement du signal (DSP) comme la compression de données ou la correction de non-uniformités (liste non exhaustive !). Une telle intégration permet d'obtenir un composant monolithique complet, donc plus fiable, plus petit, moins coûteux, plus facile à mettre en œuvre et consommant moins de puissance par rapport à un système classique réalisé à partir de composants discrets. L'incidence dans le domaine spatial d'une telle intégration est directement bénéfique : moins de poids et de volume à embarquer sur un satellite et aussi finalement moins d'énergie à produire et à évacuer. Un système classique avec CCD nécessite de nombreuses cartes volumineuses, toutes fonctionnant avec des tensions couvrant une grande plage (-15,+15V voire +24V pour des CCD scientifiques) induisant une dissipation de puissance importante (2-5W avec numérisation). L'APS fonctionnant uniquement sous 5V (voire 3.3V) ne dissipera que 20 à 50mW. A vitesse de lecture identique, le système CCD consomme 50 à 100 fois plus de puissance qu'un APS. De plus, un CCD étant un capteur très capacitif, il nécessitera des courants d'horloges atteignant plusieurs Ampères crête. Il dissipe et fait dissiper aux composants de pilotage d'autant plus de puissance que sa taille augmente (croît comme le carré de sa taille) alors que la consommation de l'APS reste faible et n'augmente que linéairement par rapport à sa taille.

#### **4.2.6 Coût**

Le CCD utilise une technologie spécifiquement développée et optimisée à son égard. De plus, le rendement de fabrication du CCD devient faible lorsqu'on réalise de grandes matrices, pour des raisons de transfert de charge sur une distance macroscopique. De plus, les CCD sont très sensibles aux ESD (Electro Static Discharges) et une mauvaise manipulation peut aboutir à un dysfonctionnement complet du capteur.

L'APS est conçu avec la technologie CMOS utilisée en standard à 90% pour la fabrication des mémoires et des microprocesseurs et de ce fait, est déjà amortie. Cette technologie permet la fabrication de grandes séries et s'avère à priori considérablement moins coûteuse que la technologie spécifique requise pour le CCD [FOSS93].

Un des avantages de cette technologie de capteur d'images par rapport aux CCDs est son faible coût de fabrication grâce à l'énorme volume de production des circuits numériques en CMOS. Le Jet Propulsion Laboratory (JPL), USA, a évalué le coût d'un capteur en CMOS à environ \$200 par million de pixels, par rapport à \$1000 par million de pixels d'un CCD scientifique [SSN].

Enfin, le rendement de fabrication d'un APS de grandes dimensions (>1Kx1K) n'est pas strictement limité par la présence de mauvais pixels et de défauts du silicium. Le rendement de fabrication sera meilleur que celui du CCD<sup>(1)</sup>, pour un prix bien plus faible.

## 5. CONCLUSIONS DU CHAPITRE I

La conception de capteurs APS est maintenant possible grâce à la réduction de la lithographie CMOS et les premiers travaux ont montré des performances très intéressantes par rapport au CCD. De plus la conception des APS est possible dans un laboratoire dans la mesure où la technologie CMOS est très utilisée et répandue dans le milieu industriel. Les nombreux avantages offerts par le concept APS en font une véritable alternative au CCD dans le domaine de l'imagerie numérique.

L'objectif de notre étude a été de comparer et de réaliser différentes structures de matrices APS utilisant des technologies CMOS standard différentes. Le but étant d'obtenir un APS dont les performances se rapprochent le plus de celles offertes par les CCD pour des applications scientifiques.

Grâce à des intermédiaires comme CMP (Circuits Multi Projets, Grenoble) et EUROPRACTICE, il est possible de choisir parmi plusieurs fabricants de circuits intégrés en CMOS en Europe, par exemple AMS (Austria Micro Systems), ES2 (European Silicon Structures), Alcatel-Mietec et SGS Thomson. Cinq conceptions et envois aux différents fondeurs ("run de test") ont été entrepris durant cette thèse pour valider, caractériser et améliorer le concept de matrices APS CMOS.

---

<sup>1</sup> Aucune de nos puces de capteurs APS réalisé dans le cadre de cette thèse s'est révélé incapable de réaliser une image. Pourtant, aucune forme de tri de nos puces a été réalisé. Alors que, dans le cas du CCD, de nombreuses puces peuvent être incapables de réaliser une image (défauts statiques ou dynamiques), et le tri s'avère indispensable.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES DU CHAPITRE I
---

- [ASAP89] JANESIK, ELLIOT « *New Advancement in CCD Technology Sub-Electron Noise and 4Kx4K Pixels CCD in Astronomy* » Astronomical Society of the Pacific, Vol 8, Sept 1989.
- [SPIE91] ZARNOWSKI, WILLIAMS “*Selectable one to four port, very Hight Speed 512x512 CID*”, SPIE proceedings vol 1447, Feb 1991.
- [SPIE91a] ROBINSON, BROWN, KIRK “*Performance Tests of Large CCDs*”, SPIE proceedings vol 1447, Feb 1991 §4.2.
- [THEU] THEUWISSEN, “*Solid-State Imaging with Charge-Coupled Devices*”, Edition *Kluwer Academic Publishers*, pg. 79, Dordrecht, 1995.
- [SPIE90] LEE, CHANG, MILLER “*A Four Million Pixel CCD Image Sensor*”, SPIE proceedings vol 1242, Feb 1990.
- [SPIE93] ZARNOWSKI, ARNOLD, “*Performance of a Large CID*”, SPIE proceedings vol 1900, Feb 1993.
- [SPIE93b] CHAMBERLAIN, KAMASZ, “*A 26.2 millions pixel CCD image sensor*”, SPIE proceedings vol 1900, Feb 1993.
- [PHIL] Page web : <http://bilbo.as.arizona.edu/projects/adi.html>
- [SZE] SZE, “*Physics of Semiconductor Devices*”, Edition John Wiley & Sons, New York, 1981.
- [YANG] YANG, BLOUKE, HEIDTMANN, CORRIE, L. D. Riley et H. H. Marsh, “*Trap characteristics in large area CCD image sensors technologies*”, Optical Sensors and Electronic Photography, Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng., vol. 1071, pg. 213-228, 1989.
- [LHAN] MELCHIOR, “*Demodulation and Photodetection Techniques*”, Laser Handbook, vol. 1, pg. 725-835, Amsterdam, 1972.
- [IEEE-1] NOBLE, “*Self-scanned silicon image detector arrays*”, IEEE Trans. on Electron Devices, vol. ED-15(4), pg. 202-209, 1969.
- [IEEE-2] CHAMBERLAND, “*Photosensitivity and scanning of silicon image detector arrays*”, IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. SC-4(6), 1969.

- [IEEE-3] ANDOH ET.AL., "*A 250000 pixel image sensor with FET amplification at each pixel for high speed television cameras*", ISSC Conf., Digest of technical papers, pg. 212-213, février, 1990.
- [IEEE-4] MATSUNAGA, YAMASHITA, MANABE, et HARADA, "*A high-sensitivity MOS photo-transistor for area image sensor*", IEEE transactions on electron devices, vol. 38, no. 5, mai, 1991.
- [IEEE-5] MATSUMOTO, TAKAYANAGI, KAMURA et OHTA, "*The operation mechanism of a charge modulation device (CMD) image sensor*", IEEE Trans. Electron Devices, vol. 38(5), pg. 989-998, 1991.
- [IEEE-6] HYNCECK, "*BCMD-An improved photosite structure for high density image sensors*", IEEE Trans. Electron Devices, vol. 38(5), pg. 1011-1020, 1991.
- [IEEE-7] NAKAMURA, et.al, "*Design of bipolar imaging devices (BASIS): analysis of random noise*", IEEE Trans. Electron Devices, vol. 39(6), pg. 1341-1349, 1992.
- [IEEE-8] DENYER, RENSHAW et al., "*CMOS image sensors for multimedia applications*", IEEE Proc. CICC, pg. 11.5.1-11.5.4, 1993.
- [SPIE93C] SEITZ, LEIPOLD et al. "*Smart optical and image sensors fabricated with industrial CMOS/CCD semiconductor processes*", Proc. SPIE, vol. 1900, pg. 21-30, 1993.
- [SAP] RICQUIER et DIERICKX, "*Random addressable CMOS image sensor for industrial applications*", Sensors and Actuators A. Physical, vol. 44, no. 1, pg. 29-35, 1994.
- [ARVLSI] DICKENSON, et. al, "*Standard CMOS active pixel image sensors for multimedia applications*", Proc. conf. on advanced research in VLSI, pg. 214-224, mars, 1995.
- [ISSCC96A] ACKLAND et DICKENSON, "*Camera on a chip*", ISSCC96, Digest of technical papers, vol. 39, pg. 22-25, 1996.
- [ISSCC96B] NIXON, KEMENEY et al., "*256x256 CMOS active pixel sensor Camera-on-a-chip*", ISSCC96, , Digest of technical papers, vol. 39, pg. 178-179, 1996.

- [SPIE93E] MENDIS, PAIN, NIXON et FOSSUM, "*Design of a low-light-level image sensor with an on-chip sigma-delta analog-to-digital conversion*", CCD's and Optical Sensors III, Proc. SPIE, vol. 1900, pg. 31-39, 1993.
- [SSN] CAST et DOYLE, "*New imaging sensor shrinks cameras to the size of a chip*", Scientific Space News, Release 95-98, 20 juin, 1995.
- [SPIE-94] FOSSUM, « *Assessment of image sensor technology for future NASA missions* », SPIE vol. 2172 p38
- [CIMI-96] SOLHUSVIK, CAVADORE, AUDOUX, VERDIER, FARRÉ, SAINT-PÉ, DAVANCENS, DAVID, "*Recent experimental results from a CMOS Active Pixel Image Sensor with Photodiode and Photogate Pixels*", Proc. SPIE, vol. 2950, Berlin, 1996.
- [BERN92] BERNARD "*Des rétines artificielles intelligentes*", Mémoire de These Orsay n° d'ordre 2295, 1992.
- [IEEEW] BRAJOVIC, KANADE "*New massively parallel technique for global operation in Embedded Imagers* ", IEEE workshop on CCD and advanced image sensors, 1995.
- [IEEE-9] BURKE, MICHON. « *Charge-injection imaging : operating techniques and performances characteristics* ». IEEE Journal of solid-state circuits, vol. SC-11, no. 1, pp.121-127, february 1976
- [IEEE-10] ANDO, OHBA, NAKAI ET AL. « *Design consideration and performance of a new MOS imaging device* » IEEE transactions on electron devices, vol. ED-32, No.8, pp. 1484-1489, August 1985
- [IEEE-11] OHBA, NAKAI, ANDO ET AL. "*MOS area sensor:PartII-low-noise MOS area sensor area sensor with antiblooming photodiodes*" IEEE transactions on electron devices, vol. ED-27, No.8, pp. 1682-1687, August 1980
- [IEEE-12] KOIKE, TAKEMOTO, "*MOS area sensor:PartI -Design consideration and performance of an n-p-n structure 484x384 element color MOS imager*" IEEE transactions on electron devices, vol. ED-27, No. 8, pp. 1676-1681, August 1980
- [ASAP91] JANESICK, ELLIOTT "*History and advancements of large area array scientific CCD imagers*", Astronomical Soc. Pacific Conf. Series, Tuscon, AZ, USA, 1991
- [FOSS93] FOSSUM, « *Active Pixel Sensors : Are CCD's Dinosaurs ?* », SPIE, Vol 1900, Feb 1993.

**Page sans texte**