

Analyseurs d'images

par **Jean-Paul BELAN**

Ingénieur CNAM

Ingénieur à France Télécom - Branche Développement

Centre national d'études des télécommunications

Direction des services de diffusion et multimédia

1. Éléments de comparaison entre tubes et analyseurs intégrés (CCD)	—	2
1.1 Fonctions élémentaires en analyse d'images	—	2
1.2 Comparaison entre un tube et un CCD	—	2
2. Principes de fonctionnement des analyseurs d'images CCD.....	—	5
2.1 Capacité MOS (Metal Oxide Semiconductor)	—	5
3. Analyseurs d'images linéaires et matriciels : différentes architectures	—	8
3.1 Lecture des charges	—	8
3.2 Analyseurs CCD linéaires.....	—	8
3.3 Analyseurs CCD matriciels	—	9
4. Formats et nombre de pixels des matrices CCD.....	—	12
5. Circuit de sortie d'un analyseur d'images CCD	—	13
6. Caractéristiques principales des analyseurs CCD.....	—	15
6.1 Réponse spectrale d'un analyseur CCD.....	—	15
6.2 Réponse d'un analyseur d'images CCD à un éclairage incident	—	16
6.3 Rapport signal-à-bruit	—	17
6.4 Résolution statique.....	—	18
6.5 Résolution dynamique	—	19
6.6 Repliements de spectres (Anglais : Aliasing)	—	19
7. Avantages des analyseurs CCD. Éléments de comparaison avec les tubes	—	21
8. Applications des analyseurs CCD	—	21
8.1 Analyseurs linéaires	—	21
8.2 Matrices CCD : caméras vidéo.....	—	22
9. Conclusion	—	24
Pour en savoir plus.....		Doc. E 5 520

Pendant de nombreuses années, l'analyse d'images a fait appel à la technologie des tubes à vide dans lesquels un faisceau d'électrons vient adresser et lire chacun des points d'une « cible » photosensible. Cette cible est généralement constituée d'une couche transparente conductrice de polarisation superposée à une couche photoconductrice qui convertit l'image optique en image électronique.

Les tubes de prise de vues ont une longue histoire, diverses générations technologiques se sont succédé, les progrès ont été permanents. Les tubes ont finalement atteint des performances remarquables qui les ont fait utiliser en télévision couleur standard et à haute définition ainsi que dans des domaines très exigeants tels que le domaine médical, le domaine spatial et le domaine militaire.

Pour mémoire, on peut citer quelques ancêtres des tubes de prises de vue : Phonton, Orthicon et les familles plus récentes à photoconduction tels que : Vidicon,

Plumbicon, Newvicon, Saticon ; ce dernier étant plus particulièrement adapté à la prise de vues à haute définition.

Cependant, bien que les tubes aient atteint de hauts niveaux de performance en résolution et sensibilité, ils ont toujours été des composants fragiles nécessitant un environnement complexe pour leur mise en œuvre. La difficulté majeure résulte de l'existence d'un faisceau électronique d'analyse qu'il faut créer, focaliser et dévier dans une enceinte à vide poussé. Les tubes ont de surcroît une durée de vie estimée à quelques milliers d'heures, des caractéristiques variables dans le temps et sont assez consommateurs de puissance électrique. La cible photoconductrice est aussi un élément destructible par suréclairage prolongé.

Les progrès fulgurants de la microélectronique ont conduit assez naturellement les constructeurs à réfléchir à une alternative technologique au tube.

La réponse à ces réflexions est venue avec les techniques d'intégration monolithique sur substrat semiconducteur silicium qui ont permis de regrouper les fonctions de conversion optoélectronique, de balayage et de préamplification sur un même substrat de silicium.

Les travaux sur les mémoires à haute densité pour calculateurs et, en particulier, les architectures de mémoires à bulles et de mémoires à cellules (MOSMetal Oxide Semiconductor) ont largement contribué à la recherche de solutions originales.

C'est finalement autour de la cellule MOS que se sont cristallisées les idées qui ont permis la naissance d'une nouvelle génération d'analyseurs d'images intégrés.

Ce document rappelle les principes de base et les caractéristiques essentielles des analyseurs d'images intégrés dont l'usage s'est généralisé dans les secteurs industriels, scientifiques, militaires, médicaux, de la télévision professionnelle et domestique, et des télécommunications.

1. Éléments de comparaison entre tubes et analyseurs intégrés (CCD)

Avant de procéder à la description et au mode de fonctionnement des analyseurs d'images intégrés, il est utile de rappeler quelques principes de base de l'analyse d'images.

1.1 Fonctions élémentaires en analyse d'images

Quelle que soit la technologie de l'analyseur d'image, tube ou CCD, son fonctionnement peut être décrit de façon générique par trois fonctions principales :

- la conversion optoélectronique ;
- l'adressage des points d'images (pixels) ;
- le transfert et le multiplexage des informations des pixels vers un amplificateur de lecture.

La figure 1 représente de façon schématique ces différentes fonctions.

La conversion optoélectronique ou création de charges photoélectroniques dans un tube ou un CCD suppose que la zone photo-

sensible soit illuminée pendant un certain temps classiquement appelé **temps d'intégration**. On peut assimiler ce processus à la prise de vue photographique dans laquelle le film est illuminé pendant un temps déterminé appelé temps de pose.

Ce n'est qu'après ce temps d'intégration que peut être effectuée la lecture des charges *mémorisées* dans la zone photosensible.

1.2 Comparaison entre un tube et un CCD

1.2.1 Tube à couche photoconductrice

La figure 2 donne une vue en coupe longitudinale d'un tube de prise de vues à couche photoconductrice présenté avec ses bobines de focalisation et de déflexion horizontale et verticale.

1.2.1.1 Conversion optoélectronique dans un tube

Dans un tube, la conversion optoélectronique est effectuée par l'intermédiaire d'une couche photoconductrice qui peut être :

- du trisulfure d'antimoine Sb_2S_3 , du trisulfure d'arsenic As_2S_3 pour les tubes *Vidicon* ;
- de l'oxyde de plomb pour les tubes *Plumbicon* ;
- des composés plus complexes à base de sélénium-tellurium-arsenic-trisulfure d'antimoine pour les tubes *Saticon*.

Dans le cas des tubes *Newvicon*, il s'agit d'une hétérojonction à base de sélénure de cadmium.

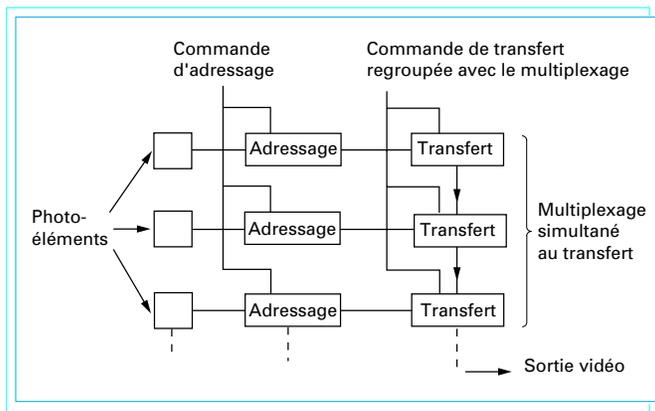


Figure 1 - Fonctions élémentaires d'un analyseur d'images

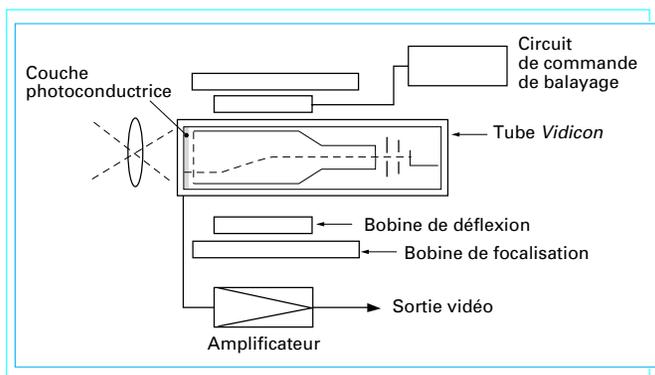


Figure 2 - Coupe longitudinale d'un tube de prise de vues à couche photoconductrice

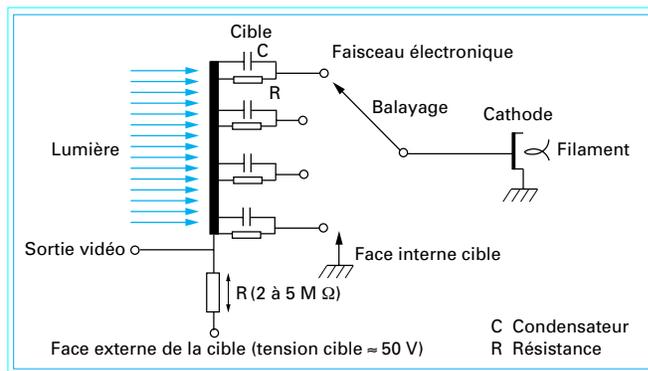


Figure 3 - Conversion optoélectronique et balayage dans un tube à cible photoconductrice

La couche photoconductrice, qui peut être de l'oxyde d'étain SnO_2 , est recouverte d'une couche transparente conductrice destinée à sa polarisation.

Comme indiqué sur la figure 3, chacun des points de la cible peut être modélisé par un condensateur (5 à 15 pF) en parallèle avec une résistance qui varie en fonction de l'éclairement incident. Cette résistance est grande dans l'obscurité et sa valeur diminue lorsque l'éclairement augmente.

Dans les conditions classiques de fonctionnement, la face externe de la cible est polarisée à une valeur typique d'une cinquantaine de volts.

En l'absence de faisceau électronique de lecture, le potentiel de l'armature du condensateur élémentaire qui correspond à la face interne de la cible va croître de façon exponentielle, et ce d'autant plus rapidement que la résistance est faible, donc que l'éclairement local est grand. La figure 4 précise ce mode de fonctionnement.

Quelques rappels historiques

Les premières expériences sur des dispositifs d'analyse d'images mettant en œuvre les technologies du silicium furent réalisées dans les années 1960.

En 1964, Horton présentait son *Scannistor* qui consistait en une ligne de 57 photodiodes au silicium. Cependant, la faible sensibilité du dispositif et de grosses difficultés d'intégration firent que ce composant passa quasiment inaperçu.

Il faut attendre les années 1966-1967 et les travaux de Weimer de RCA (Radio Corporation of America) et de PJW Noble de Plessey Co pour voir le développement de circuits hybrides comportant des réseaux photosensibles adressés par des registres de balayage intégrés en couches minces.

À cette époque, un analyseur matriciel de 180 x 180 photoéléments (pixels) fut réalisé avec succès.

Mais c'est surtout en 1969-1970 que deux découvertes allaient donner le véritable essor aux analyseurs d'images intégrés.

En 1969, Sangster et Teer de Philips proposent un mode d'adressage des pixels par un registre à décalage analogique nommé BBD (Bucket-Brigade Device). Une structure d'analyseur d'images, semi-hybride, allait en résulter.

Toujours en 1969, William Boyle et G. Smith, de Bell Laboratories, annoncent leur invention d'un dispositif original, en technologie

MOS, s'appuyant sur un principe de transfert de charges électroniques dans un substrat de silicium. Leur dispositif fut baptisé (CCD- Charge-Coupled Device). On parle aussi de Dispositif à Transfert de Charges (DTC).

Cette invention constituait, sans conteste, une innovation technologique majeure dans l'analyse d'images puisque, pour la première fois, il devenait possible de réaliser les fonctions de conversion optoélectronique, de lecture (balayage) et d'amplification vidéo avec des éléments de structure MOS intégrés sur un même substrat de silicium.

Vers 1973, Bell Laboratories démontrait la faisabilité d'une caméra couleur à trois CCD de 106 x 128 pixels et, en 1984, la première caméra couleur de qualité TV professionnelle était présentée par RCA (CCD-1). Cette caméra, à trois capteurs de 320 x 512 pixels souffrait cependant d'une insuffisance de sensibilité à la couleur bleue.

Depuis ces dates, la recherche a été très active dans les pays industrialisés et les progrès ont été permanents, même si à certaines époques des difficultés de rendement technologique de fabrication des puces ont pu freiner l'arrivée massive des composants sur les différents marchés.

Ces difficultés ont été surmontées et nous disposons maintenant de gammes d'analyseurs CCD linéaires et matriciels très performants qui satisfont la plupart des applications en prise de vues dans les domaines du visible et de l'infrarouge.

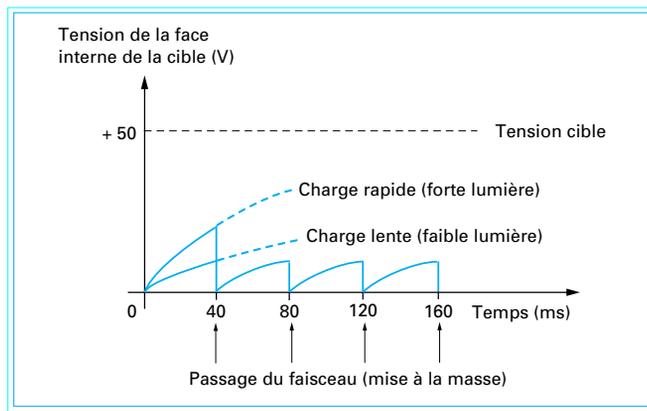


Figure 4 – Principe de lecture des pixels d'une cible photoconductrice

1.2.1.2 Adressage et lecture des pixels

Grâce au balayage de la face interne de la cible obtenu par déflexion horizontale et verticale du faisceau électronique, chacun des condensateurs correspondant à un pixel va voir son armature ramenée périodiquement au potentiel de la cathode du tube, soit 0 V.

La variation de charge qui en résulte « module » l'intensité du courant du faisceau d'électrons. Cette variation de courant est convertie en variation de tension (signal vidéo) aux bornes de la résistance de cible (2 à 5 M Ω).

1.2.2 Analyseur d'images intégré (CCD)

La figure 5 donne des exemples d'analyseurs CCD (linéaires et matriciels).

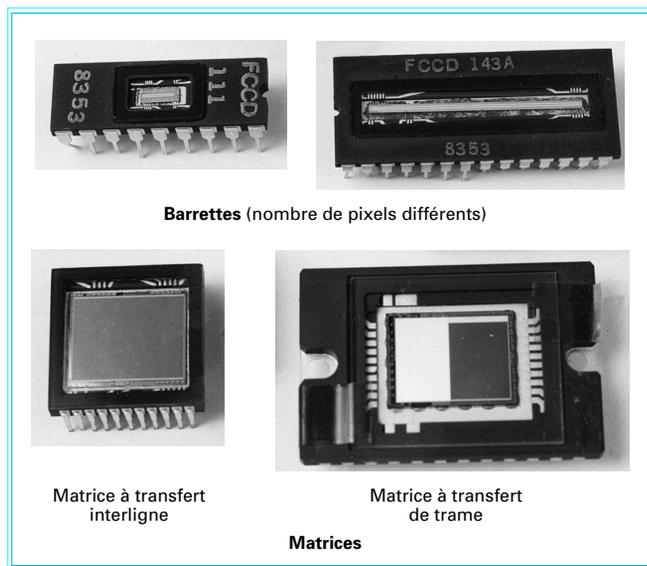


Figure 5 – Exemples d'analyseurs intégrés (CCD) linéaires et matriciels

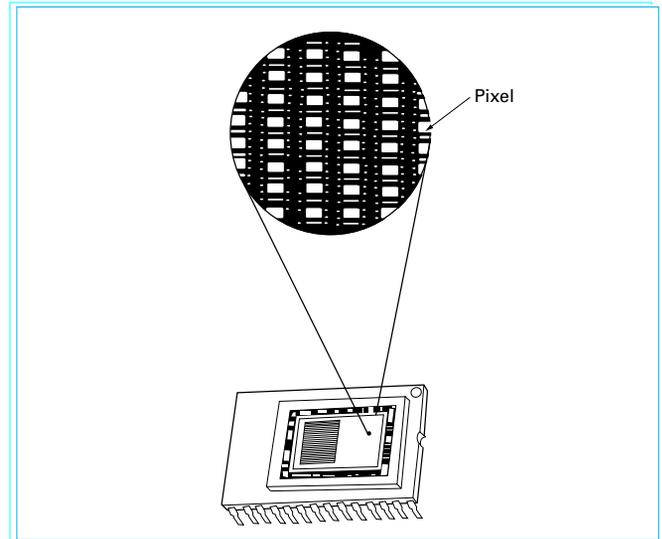


Figure 6 – Structure d'un analyseur CCD matriciel

Ces dispositifs se présentent extérieurement comme des circuits intégrés dont les dimensions de puce et les boîtiers d'encapsulation varient selon les types d'applications.

Ils comportent sur la face supérieure du boîtier une fenêtre transparente qui protège une zone photosensible. Cette zone est constituée d'éléments discrets photosensibles ou pixels disposés en ligne (barrette CCD) ou en lignes et colonnes (rétine ou matrice CCD) selon le type d'analyseur.

Contrairement à la cible photoconductrice d'un tube, les pixels d'un analyseur CCD, assimilables à des petits rectangles, sont répartis de façon régulière en ligne et en matrice. Ces pixels sont distants d'un certain pas et définissent ainsi un échantillonnage spatial mono ou bidimensionnel de l'image. Un exemple de structure matricielle est donné sur la figure 6.

1.2.2.1 Conversion optoélectronique dans un CCD

La conversion optoélectronique est réalisée dans les cellules élémentaires qui peuvent être des photodiodes ou des photocapacités MOS. Les premières structures réalisées utilisaient des phototransistors. Le principe détaillé de conversion est détaillé ci-après.

1.2.2.2 Adressage et lecture des pixels

Lorsque des charges ont été créées dans un pixel par les photons incidents, il convient d'en opérer la lecture. Cette lecture se fait de façon séquentielle en adressant successivement chacun des pixels et en transférant l'information correspondante vers l'amplificateur de lecture.

L'originalité du CCD par rapport au tube réside dans le mode d'adressage et de transfert des charges photoélectroniques ainsi que de leur amplification.

À la différence du tube qui doit mettre en jeu un faisceau d'électrons pour la lecture de la cible et un préamplificateur extérieur ; dans un analyseur CCD, les fonctions de conversion optoélectronique, d'adressage, de transfert et d'amplification sont toutes réalisées à l'intérieur de la puce de silicium.

La figure 7 donne une vue schématique en coupe d'une matrice CCD et en rappelle les principales fonctions.

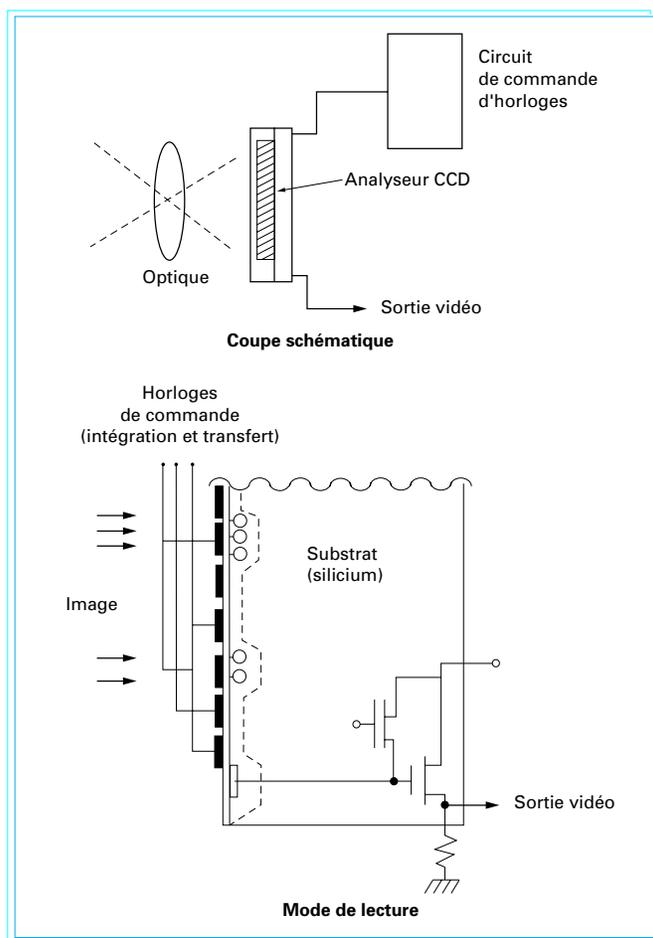


Figure 7 – Coupe d'un analyseur CCD et mode de lecture

2. Principes de fonctionnement des analyseurs d'images CCD

Les analyseurs d'images CCD reposant largement sur la technologie MOS, nous en rappellerons quelques principes de base.

2.1 Capacité MOS (Metal Oxide Semiconductor)

La structure la plus élémentaire en technologie MOS est la capacité MOS. Cette structure constitue l'élément de base des analyseurs d'images CCD et il est donc utile d'en rappeler les principes de fonctionnement.

La figure 8 donne une vue en coupe d'une capacité MOS constituée d'un substrat de silicium, par exemple de type P (trous majoritaires), sur lequel on fait croître une fine couche d'oxyde (SiO_2) d'environ $0,1 \mu\text{m}$. Cette couche est recouverte d'une couche métal-

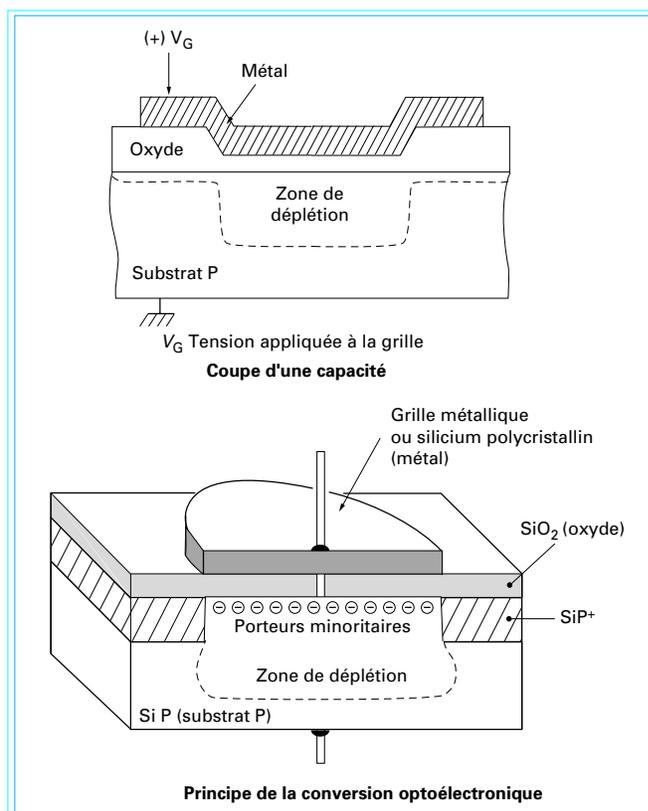


Figure 8 – Coupe d'une capacité MOS et principe de conversion optoelectronique

lique ou de silicium polycristallin fortement dopé qui constitue l'électrode (ou grille) de la capacité MOS.

Si, à un instant donné, la grille est soumise à un potentiel positif, les porteurs majoritaires du silicium P (trous) sont repoussés et un déficit en trous ou *puits* de potentiel se forme près de la surface silicium-oxyde. Le semi-conducteur est en état de déplétion.

Comme l'indique le schéma de principe de la figure 8, une diffusion latérale de même type que le substrat, mais plus fortement dopé P^+ limite latéralement la largeur du puits de potentiel.

À température ambiante, les porteurs minoritaires (électrons) créés par agitation thermique à proximité du puits de potentiel vont venir s'accumuler à l'interface et former une couche dite d'inversion. Cette accumulation se fait pendant un temps de plusieurs centaines de secondes appelé temps de relaxation.

Si la grille de la capacité MOS est rendue transparente (silicium polycristallin), la capacité MOS se transforme en élément photosensible ou photocapacité. Lorsque cette structure est soumise à un flux lumineux pendant un temps court par rapport au temps de relaxation thermique, des photons sont absorbés dans le silicium. Si leur énergie est suffisante, ils libèrent des liaisons dans le silicium et ainsi naissent des paires électron-trou. Les électrons vont alors s'accumuler dans la zone de déplétion et créer un paquet de charges électroniques dont le nombre est proportionnel au nombre de photons absorbés.

La photocapacité MOS constitue donc, dans certaines conditions de polarisation de grille, un dispositif simple de conversion optoelectronique. Son bon fonctionnement suppose que cette polarisation soit appliquée pendant un certain temps (temps d'intégration) qui doit être court par rapport au temps de relaxation afin d'éviter la

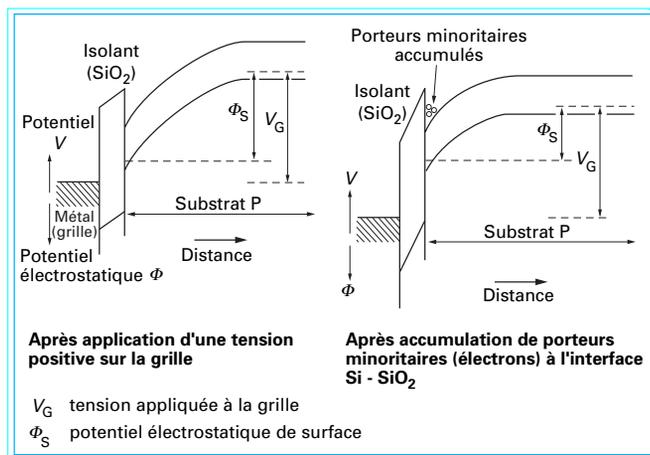


Figure 9 – Diagrammes de bande d'énergie d'une capacité MOS

saturation du puits de potentiel par des électrons d'origine thermique.

L'analyse quantitative du processus physique fait appel aux diagrammes de bandes d'énergie.

2.1.1 Bandes d'énergie : rappels d'électrostatique

Il est possible de calculer le potentiel électrostatique à l'intérieur du substrat en fonction de la tension appliquée à la grille du MOS. Cela se fait en résolvant l'équation de Poisson à une dimension dans une direction perpendiculaire à l'électrode.

On en déduit l'allure des bandes d'énergie dans les différents cas de polarisation. On sait que l'énergie potentielle d'un électron est définie par la relation :

$$E = - e V$$

e étant la charge de l'électron,
 V le potentiel électrostatique.

On rappelle aussi que la théorie des bandes d'énergie dit que l'électron cherche toujours une position correspondant à la plus faible énergie potentielle (ou au potentiel électrostatique maximal).

La figure 9 donne les diagrammes de bandes d'énergie d'une capacité MOS dans les conditions suivantes :

- après application d'une tension positive sur la grille ;
- après que les porteurs minoritaires (électrons) se soient accumulés à l'interface isolant/semi-conducteur.

2.1.2 Principe du transfert de charges

La capacité MOS peut assurer une fonction de conversion opto-électronique (photocapacité), mais elle peut aussi constituer un élément des organes de transfert d'un analyseur d'images.

Si une série de plusieurs capacités MOS sont couplées latéralement, comme indiqué sur la figure 10, de telle sorte que leurs zones de déplétion se rejoignent, les paquets de charges minoritaires vont s'accumuler dans les endroits où le potentiel de surface est le plus élevé (énergie la plus faible).

On conçoit donc aisément que cette structure offre la possibilité de transférer un paquet de charges, à l'interface silice-silicium, par simple action sur les grilles de commande des capacités adjacentes.

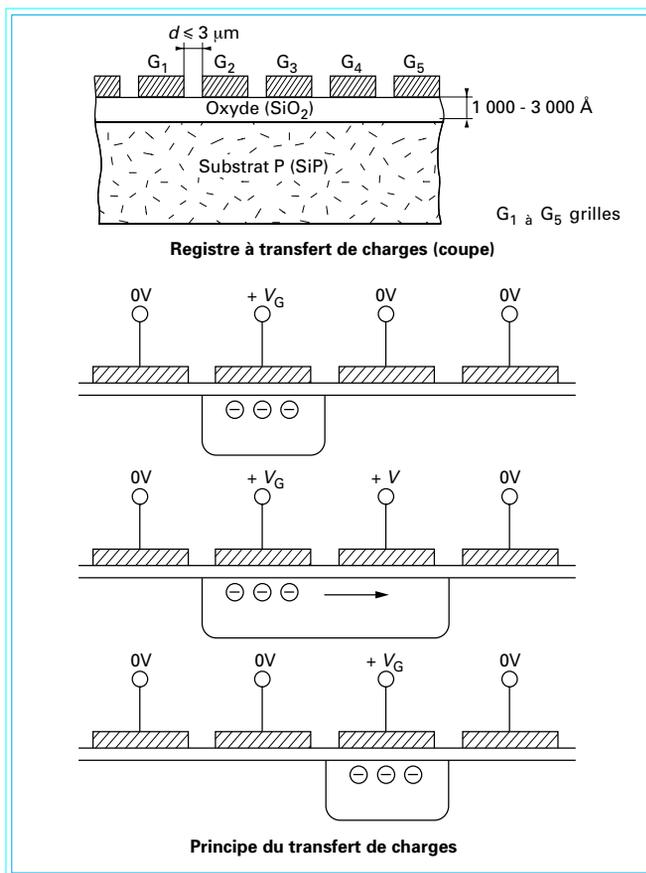


Figure 10 – Registre CCD et principe du transfert de charges (canal en surface)

Un paquet de charges qui aura été créé optiquement sous une grille donnée maintenue à un certain potentiel pourra migrer le long de l'interface SiO₂-Si jusque sous la grille voisine lorsque celle-ci aura été polarisée à un potentiel égal ou supérieur à celui de la grille adjacente.

Si le potentiel de la grille sous laquelle la charge était initialement stockée est annulé, la charge se trouve complètement transférée sous la grille voisine comme indiqué sur la figure 10.

Ces dispositifs constituent donc des organes de transfert des charges stockées dans une photocapacité MOS vers un dispositif de lecture. Ils peuvent être comparés à des registres à décalage analogique commandés par des signaux logiques séquentiellement appliqués sur les grilles des capacités MOS.

Dans ces dispositifs, le transfert s'effectue à l'interface Si-SiO₂ et dans un canal limité par des diffusions latérales.

Pour cette raison, le registre CCD est dit à transfert en surface.

Les premiers dispositifs d'analyse d'images réalisés autour de ces structures mettaient en œuvre des registres CCD à transfert en surface.

Pour des raisons liées à la présence, dans la couche d'oxyde, d'états énergétiques permis pour les porteurs minoritaires (pièges d'interfaces), le transfert d'une cellule à la voisine ne se faisait pas intégralement.

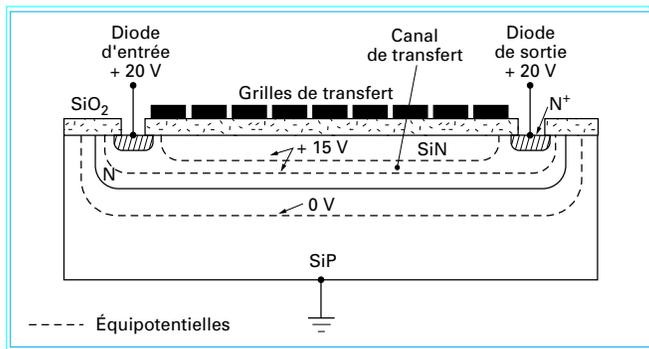


Figure 11 - Registre CCD à canal en volume

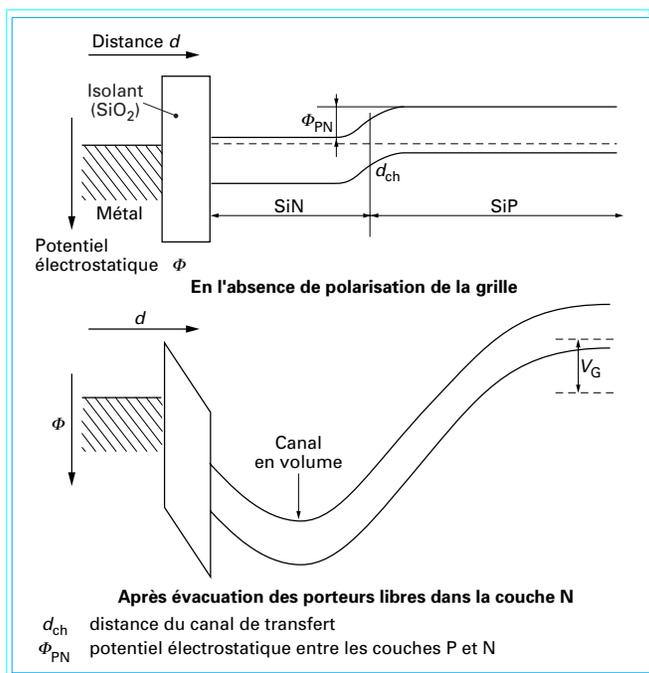


Figure 12 - Bandes d'énergie dans une capacité MOS à canal en volume

Cette limitation a été levée par l'introduction d'un mode de transfert plus profond dans le substrat de silicium appelé transfert en volume.

Le MOS à canal en volume (figure 11) se différencie du précédent par la présence, entre la couche d'oxyde et le substrat de Si, d'une implantation de type opposé à celui du substrat, soit une couche de type N (électrons majoritaires).

Cette couche présente une épaisseur de l'ordre de 1 μm . Bien que légèrement plus complexe à réaliser, la structure à canal en volume s'est pratiquement imposée à tous les analyseurs d'images CCD produits industriellement.

Les principes de stockage et de transfert décrits précédemment restent valables.

La figure 12 montre la nouvelle allure des bandes d'énergie en présence de la couche N. On voit que le maximum de potentiel ϕ_s se situe maintenant à l'intérieur de la couche N et que le canal de

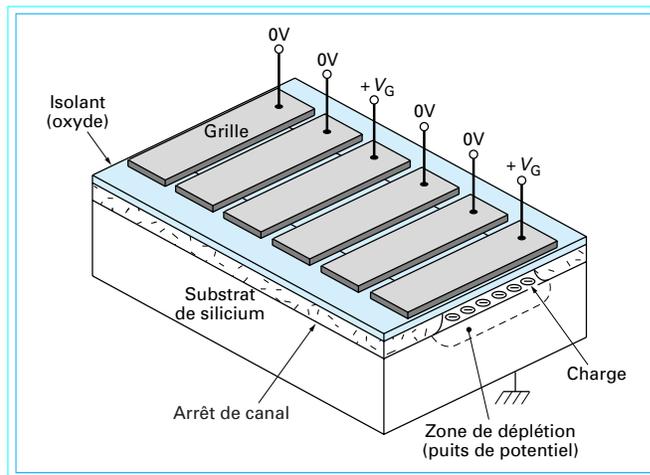


Figure 13 - Structure d'un registre à décalage CCD

transfert est éloigné de l'interface Si-SiO₂. Le résultat est une efficacité de transfert considérablement améliorée compatible avec la réalisation d'analyseurs d'images de grandes dimensions.

2.1.3 Registre à décalage à transfert de charges. Description et fonctionnement

La figure 13 donne une vue schématisée typique d'un registre à décalage CCD.

La figure 14 permet d'explicitier le principe du transfert des charges dans un tel registre.

Si l'on suppose qu'une tension de polarité convenable et d'amplitude suffisante est appliquée à la grille G₁ au temps t₁, un puits de potentiel se forme sous cette électrode. G₂ et G₃ sont maintenues à un potentiel 0.

Des charges créées optiquement ou par agitation thermique peuvent alors « remplir » ce puits de potentiel.

Au temps t₂, une tension est appliquée à G₂ et un puits de potentiel se creuse sous cette électrode. Si on ramène alors la tension G₁ progressivement à 0V, le champ électrique latéral est tel que les charges initialement confinées sous G₁ migrent vers G₂.

Au temps t₃, l'application d'une tension sur G₃ et l'annulation progressive de la tension sur G₂ font que le paquet de charges migre alors de la position G₂ vers la position G₃ et ainsi de suite.

Le dispositif se comporte donc comme un registre à décalage sous le contrôle de signaux d'horloge tels que ceux indiqués sur la figure 14.

Dans certaines architectures qui seront détaillées plus loin, les pixels et les cellules de transfert peuvent appartenir à un même registre.

Un exemple de pixel est donné sur la figure 15. Il comporte trois électrodes (en général en silicium polycristallin) placées perpendiculairement au canal de transfert qui est lui-même délimité par les arrêts de canal. Ces électrodes peuvent servir aussi bien à l'intégration des charges qu'à leur transfert le long du registre.

D'autres structures de pixels existent qui mettent en œuvre 2 ou 4 grilles de commande, voire même une grille unique combinée à des implantations plus ou moins complexes qui définissent le photoélément.

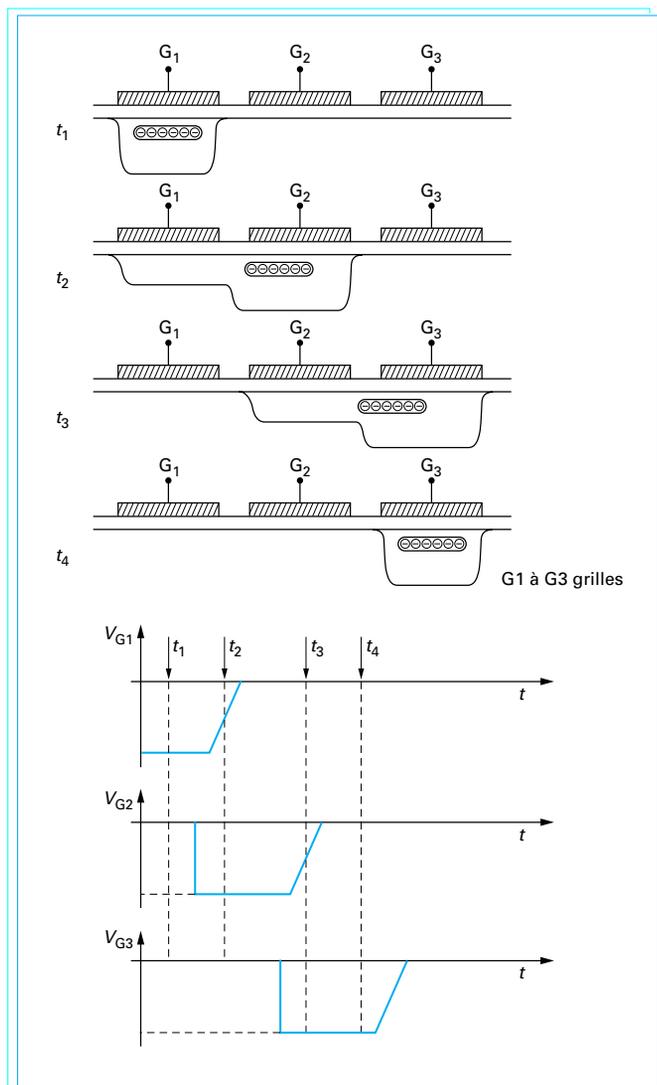


Figure 14 – Mécanisme de transfert de charges et horloges de commande

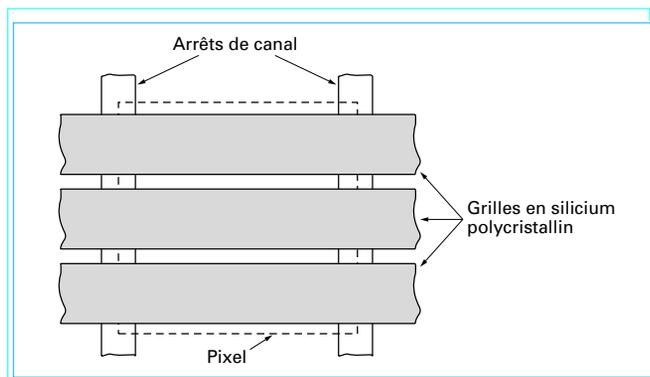


Figure 15 – Vue de dessus d'un pixel avec ses grilles d'intégration et de transfert

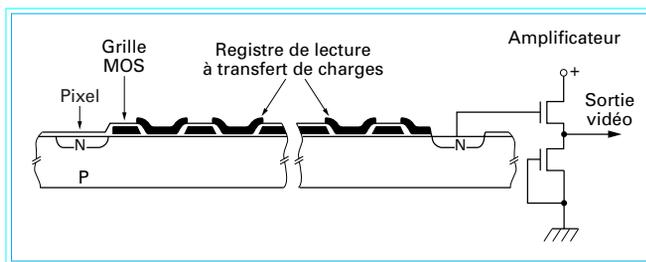


Figure 16 – Principe de lecture de charge par registre CCD (pixel unique)

3. Analyseurs d'images linéaires et matriciels : différentes architectures

3.1 Lecture des charges

Comme déjà mentionné, un dispositif d'analyse d'images comporte des éléments photosensibles et des éléments d'adressage et de lecture des photoéléments.

Afin de mieux comprendre les modes de fonctionnement des diverses architectures, considérons un exemple de structure théorique comportant un pixel unique associé à un dispositif de lecture à transfert de charges et à un amplificateur de sortie (figure 16).

On suppose dans un premier temps que la grille située entre le pixel et le registre CCD induit une barrière de potentiel entre ce pixel et la première cellule du registre.

Le photoélément est polarisé de telle sorte qu'il soit en mode d'intégration (accumulation de charges pendant un temps donné).

À la fin de cette phase d'intégration, la grille d'isolement entre le pixel et le registre est polarisée de telle sorte que la barrière de potentiel soit annulée.

En même temps, la première cellule du registre est mise en état de déplétion, ce qui fait que la charge initialement stockée dans le pixel, migre sous cette première cellule. Enfin, les grilles du CCD sont polarisées séquentiellement et la charge est transférée à l'amplificateur de sortie par l'intermédiaire d'une diffusion (N⁺ dans un substrat P).

Ce mode de fonctionnement se retrouve dans les structures linéaires et matricielles décrites ci-après.

3.2 Analyseurs CCD linéaires

La structure la plus simple pour un analyseur linéaire est reproduite sur la figure 17.

Dans cette structure, les pixels sont isolés du registre de lecture par une grille de transfert dont la polarisation autorise ou non le passage des charges de la zone photosensible vers le registre non photosensible.

On suppose, dans la phase d'intégration, que la grille de transfert isole les pixels du registre CCD. Des charges s'accumulent pendant cette phase.

À l'issue du temps d'intégration, une impulsion appliquée sur la grille de transfert autorise le passage des charges dans les cellules

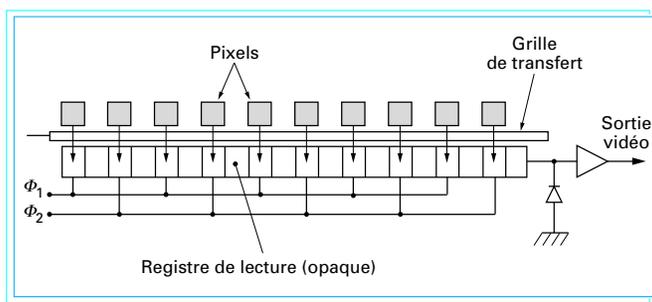


Figure 17 - CCD linéaire à un registre de lecture

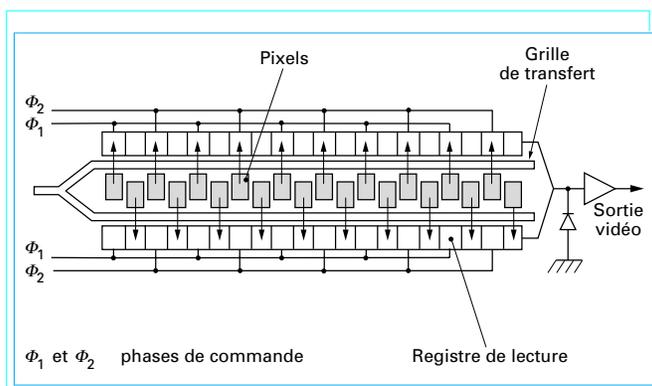


Figure 18 - CCD linéaire à deux registres de lecture (sorties multiplexées)

correspondantes du registre CCD. À la fin de cette impulsion, et pendant que le registre CCD évacue les charges vers l'amplificateur de sortie, une autre phase d'intégration se déroule.

On dispose donc d'une structure simple pour l'analyse d'images dans la direction des pixels de la barrette. L'analyse d'un document ou d'une scène suppose qu'un déplacement relatif barrette-scène soit réalisé.

La structure présentée sur la figure 17 est applicable à des barrettes comportant peu de pixels et, en conséquence, peu de transferts.

En pratique, le nombre de pixels peut atteindre plusieurs milliers et les registres de transfert doivent alors fonctionner à des fréquences horloges élevées.

Dans ces conditions, l'inefficacité de transfert peut être un facteur de dégradation de la résolution d'images. Pour cette raison, les constructeurs ont adopté des structures à deux registres de lecture, qui correspondent aux pixels pairs et impairs. Les fréquences de transfert de ces registres sont divisées par deux par rapport à une structure à registre unique et une bonne efficacité de transfert est garantie.

Les informations issues des registres pairs et impairs sont multiplexées temporellement au niveau de l'amplificateur de sortie.

Un exemple d'une telle structure est donné sur la figure 18.

Les barrettes CCD peuvent, selon les applications, posséder un nombre variable de pixels. Typiquement, on trouvera des produits industriels comportant : 256, 512, 1 024, 1 728, 2 048, 3 456, 4 096, 6 000 pixels et au-delà.

3.3 Analyseurs CCD matriciels

La prise de vues de type télévision suppose qu'on puisse analyser une image complète focalisée par l'intermédiaire d'une optique convenable sur l'analyseur d'image.

La solution est une matrice de photoéléments associée à des dispositifs d'adressage et de lecture déjà décrits. Cette matrice est parfois appelée « rétine » par analogie avec la rétine humaine.

Pour mémoire, les premiers dispositifs matriciels réalisés mettaient en œuvre des photoéléments associés à des portes analogiques connectées à des registres à décalage classiques par des lignes et colonnes métalliques (systèmes d'adressage X-Y). Les similitudes technologiques avec les mémoires RAM dynamiques conduisaient à un coût de production pouvant être faible.

Cependant, les fortes capacités des lignes d'adressage et de lecture, ainsi que les inhomogénéités des portes analogiques associées aux pixels, ont créé des non-uniformités inacceptables pour des utilisations de type télévision.

Les architectures à base de registres CCD se sont donc imposées pratiquement et se sont généralisées dans la plupart des applications.

Les diverses architectures disponibles sur le marché résultent de la recherche des meilleurs compromis entre différents paramètres tels que : sensibilité, résolution, rendements de fabrication, etc.

Les structures les plus courantes sont :

- les matrices CCD à transfert de trame (Frame Transfer : FT) ;
- les matrices à transfert interligne (Interline Transfer : IT) ;
- les matrices à transfert trame-interligne (Frame Interline Transfer : FIT).

3.3.1 Matrice à transfert de trame (FT)

Comme indiqué sur la figure 19, la puce est divisée en deux parties.

La partie supérieure est la partie photosensible ou zone-image. La partie inférieure, occultée par un masque opaque, comprend une zone-mémoire, un registre de lecture horizontal et l'amplificateur de sortie.

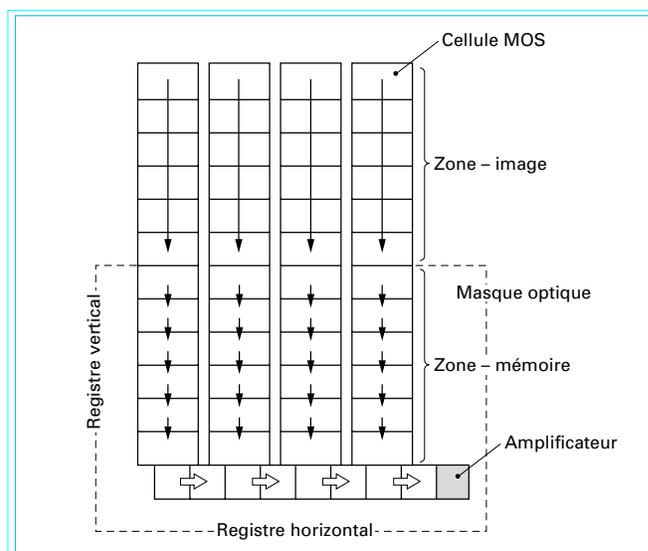


Figure 19 - Principe d'une matrice CCD à transfert de trame



Figure 20 – Défaut sur image (smearing) : colonne surbrillante (doc. BTS)

3.3.1.1 Fonctionnement

On fait l'hypothèse que l'analyse d'image est conforme aux spécifications d'un standard de type télévision qui comporte une analyse en deux trames entrelacées.

On suppose que la zone-image a été illuminée pendant un certain temps (temps d'intégration) et que des charges se sont accumulées dans les cellules MOS qui composent cette zone-image.

À la fin du temps d'intégration qui est typiquement le temps de trame TV, et pendant la période d'effacement vertical du standard TV, les charges créées dans la zone-image sont transférées verticalement et à l'unisson dans la zone-mémoire.

La zone-image se trouve vidée de son contenu et une deuxième trame peut alors commencer à s'intégrer dans la zone-image. Pendant ce temps, la première trame stockée dans la zone-mémoire est lue de la façon suivante.

Chaque ligne de cette trame est transférée, pendant la période d'effacement horizontal du standard TV, dans le registre horizontal. Ce registre est vidé de son contenu pendant un temps correspondant à la durée utile de ligne TV. À l'issue de cette lecture, la ligne suivante de la zone-mémoire est transférée dans le registre horizontal et le processus continue jusqu'à ce que la trame qui était stockée dans la zone-mémoire soit totalement lue et ainsi de suite.

Dans cette structure, chaque colonne est constituée de cellules qui ont une double fonction dans la zone-image : photoélément et élément de transfert.

En effet, pendant le transfert vertical, chaque photoélément fait partie du registre de transfert et les charges des cellules situées au-

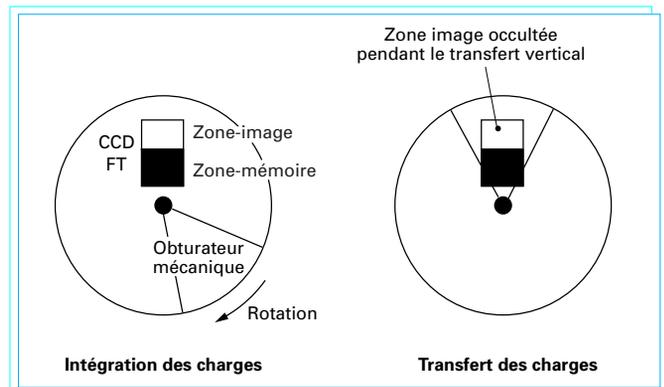


Figure 21 – Suppression du signal parasite par un obturbateur mécanique

dessus d'un photoélément donné vont transiter à travers ce photoélément. Si la zone-image continue à être illuminée pendant ce transfert vertical, chaque photoélément va collecter des charges qui vont s'ajouter aux charges transférées. Le résultat est l'apparition d'un défaut sur image (smearing) qui se traduit par l'apparition d'une colonne surbrillante sur l'image (figure 20).

Il est possible de se débarrasser de ce défaut par l'utilisation d'un obturbateur mécanique qui vient occulter la zone-image pendant le transfert vertical.

Le principe de fonctionnement d'un tel obturbateur est rappelé sur la figure 21. La rotation du micro-moteur d'entraînement de l'obturbateur est synchronisée des horloges de commande de transfert vertical du CCD.

3.3.2 Matrice à transfert interligne (IT)

Dans ce dispositif schématisé sur la figure 22, les pixels des zones photosensibles et les éléments de stockage temporaire sont alternés dans le sens horizontal.

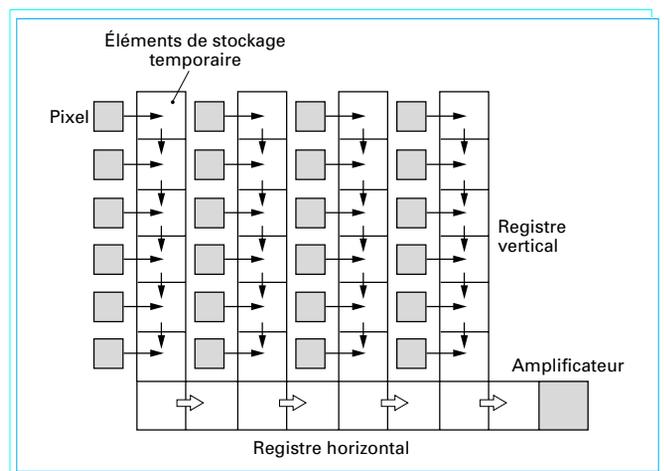


Figure 22 – Principe d'une matrice CCD à transfert interligne

Les registres à décalage CCD sont rendus aveugles par le dépôt d'un film opaque d'aluminium.

3.3.2.1 Fonctionnement

Comme pour la structure à transfert de trame, après une phase d'intégration des charges dans les pixels des colonnes photosensibles, ces charges sont transférées latéralement et rapidement, pendant la période d'effacement vertical, vers les cellules correspondantes des registres CCD.

À l'issue de cette phase, le contenu de ces registres verticaux qui constituent la zone de stockage est transféré ligne par ligne dans le registre horizontal qui est lui-même vidé pendant le temps utile de ligne TV.

Immédiatement après le transfert latéral, une deuxième trame peut être intégrée dans la zone photosensible, et ainsi de suite.

3.3.2.2 Différents modes d'intégration

En principe, à chaque ligne d'une matrice de photoéléments devrait correspondre une ligne affichée sur le dispositif de visualisation.

En télévision classique, ces lignes sont affichées selon un mode dit *entrelacé* dans lequel une première trame correspondant aux lignes impaires et une deuxième trame correspondant aux lignes paires sont imbriquées.

Ce mode entrelacé est appliqué aux matrices CCD de telle sorte que chaque photoélément impair ou pair intègre les charges pendant un temps correspondant à une durée de trame (typiquement 20 ms pour les standards TV à 625 lignes).

Dans une matrice à transfert interligne, du fait du mode entrelacé et du temps de transfert très court par rapport au temps d'intégration, chaque pixel intègre les charges pendant un temps environ double de celui d'une trame, soit 40 ms.

Pour une matrice à transfert de trame, le mode de fonctionnement fait que ce temps d'intégration est de 20 ms.

Le temps d'intégration des charges étant par analogie assimilable au temps de pose en photographie, on sait que plus ce temps est élevé et moins le dispositif est capable de restituer correctement des images en mouvement rapide (« filé » d'image).

On peut donc s'attendre à un type de comportement analogue pour la matrice à transfert interligne dont la réponse dynamique, en mode de fonctionnement classique, est moins bonne que celle de la matrice à transfert de trame.

Cependant, il est possible de faire fonctionner la matrice à transfert interligne selon deux modes : temps d'intégration image = 40 ms ou temps d'intégration trame = 20 ms.

La figure 23 rappelle ces deux principes.

En mode d'intégration image, les lignes impaires et paires sont lues de façon classique pour créer deux trames entrelacées. La réponse dynamique est limitée par un temps d'intégration élevé.

En mode d'intégration trame, les charges de deux lignes adjacentes sont combinées comme indiqué sur la figure 23. De ce fait, chaque pixel se trouve vidé de sa charge avec une périodicité trame. La possibilité d'entrelacé est maintenue, mais la contrepartie est un filtrage spatial vertical dû à la moyenne des informations de deux lignes adjacentes. Le résultat est une perte de résolution spatiale verticale de l'image.

3.3.3 Matrice à transfert trame-interligne (FIT)

La structure d'une matrice à transfert trame-interligne, telle que celle schématisée sur la figure 24, consiste en une combinaison des structures à transfert de trame et à transfert interligne.

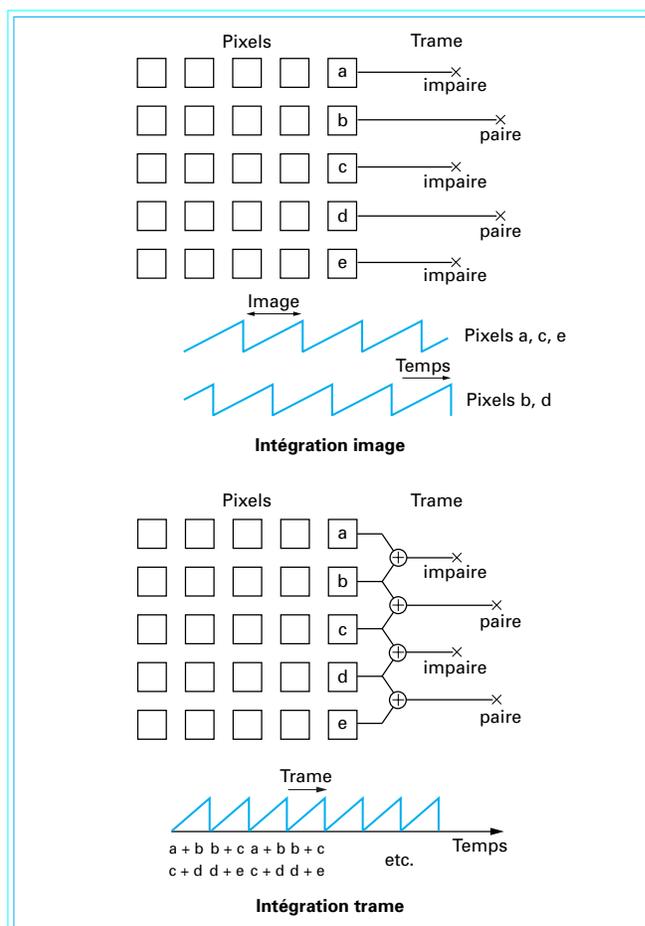


Figure 23 – Mode d'intégration dans une matrice CCD à transfert interligne (doc. SONY)

3.3.3.1 Fonctionnement

Comme dans la structure à transfert interligne, les charges accumulées dans les colonnes photosensibles sont transférées latéralement dans les registres aveugles verticaux pendant le temps d'effacement vertical correspondant au standard TV.

Dans la structure à transfert trame-interligne, les charges contenues dans les registres verticaux peuvent être transférées très rapidement dans la zone de stockage de trame.

L'avantage d'une telle structure par rapport à la structure transfert de ligne résulte du transfert vertical très rapide. Cela réduit le phénomène de pollution des charges-signal lors de suréclaircissements de la matrice (smearing).

En effet, dans une matrice à transfert interligne en fonctionnement normal, une légère fuite optique existe entre le photoélément et le registre opaque.

En présence d'un éclaircissement intense tel que celui d'un projecteur ou du soleil, cette fuite latérale peut devenir importante et la lumière parasite pollue les charges-signal transférées dans le registre vertical.

Cependant, le niveau de charges parasites captées est inversement proportionnel au temps de transfert du registre vertical vers le registre horizontal de lecture. Dans le cas d'un CCD à transfert interligne, la vitesse de transfert est liée au standard : $f = 15,6$ kHz envi-

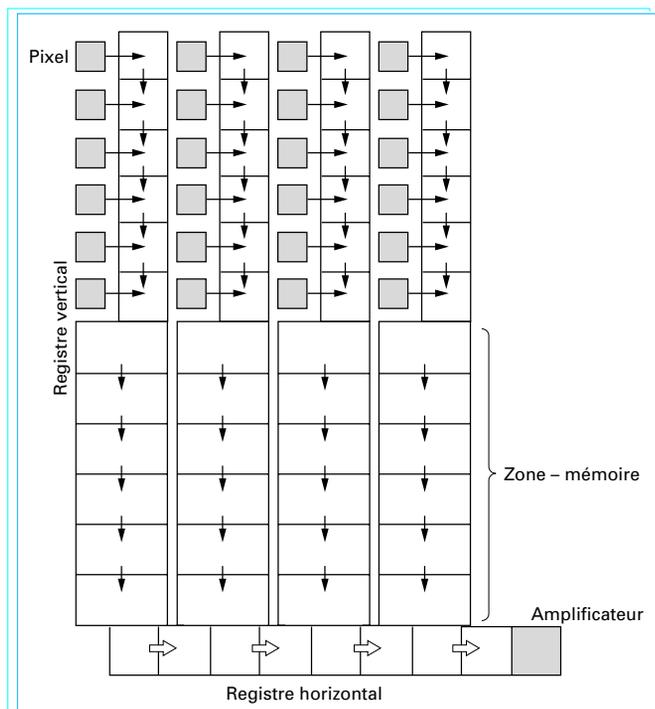


Figure 24 – Principe d'une matrice CCD à transfert trame-interligne

ron. Dans le cas du CCD à transfert trame-interligne, la fréquence de transfert vers la zone mémoire de trame peut être portée à 900 kHz.

La quantité de charges parasites collectées est donc divisée dans le rapport 900/15,6, soit 58 par rapport à la matrice à transfert interligne.

Les performances de ce type de matrice sont donc très bonnes en présence de suréclairements intenses.

3.3.3.2 Réalisation de l'analyse en mode entrelacé dans les matrices CCD

Les standards de télévision spécifient un mode d'analyse des images en deux trames entrelacées.

Les analyseurs CCD, quelle que soit leur architecture, ont donc été conçus de telle sorte que le mode entrelacé soit possible.

Dans une matrice à transfert interligne, l'entrelacé est obtenu de deux façons, comme indiqué sur la figure 23 selon le temps d'intégration sélectionné : 40 ms ou 20 ms.

Dans une matrice à transfert de trame, plusieurs possibilités existent en fonction du nombre de phases de transfert utilisées. Dans le cas d'un CCD à 4 phases, les potentiels appliqués sur les électrodes définissent les positions des centres de gravité des zones de déplétion pour chacune des trames, créant ainsi un entrelacement rigoureux (figure 25).

Certaines architectures permettent un choix entre une analyse de l'image en deux trames entrelacées ou non (balayage progressif).

3.3.3.3 Analyse en mode de balayage progressif

La structure à transfert trame-interligne peut fonctionner en mode progressif qui présente certains avantages en réponse spatiotemporelle par rapport au mode entrelacé.

Dans ce cas, l'analyseur CCD (figure 26) comporte une zone de stockage (zone-mémoire) qui comprend un nombre de cellules

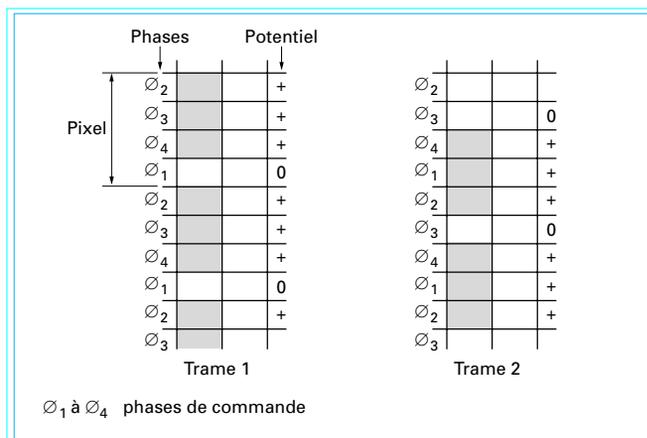


Figure 25 – Entrelacement des trames dans une matrice à transfert de trames (4 phases)

double du nombre de pixels de la zone-image. Cette zone-mémoire peut donc recevoir les informations correspondant à une image alors que dans le cas d'une matrice classique, on ne peut stocker qu'une trame.

Le fonctionnement est le suivant.

Après le temps d'intégration, les charges-signal en provenance des photoéléments impairs sont transférées dans le registre vertical, puis dans la partie supérieure de la zone mémoire.

De la même façon, les charges en provenance des éléments pairs sont transférées dans la zone-mémoire et simultanément décalent les charges correspondant aux éléments impairs vers la partie inférieure de la mémoire, comme indiqué sur la figure 26.

Le contenu de la zone-mémoire est ensuite transféré, ligne par ligne, dans le registre horizontal puis vers l'étage de sortie du CCD.

Le signal de sortie de la mémoire n'est pas une séquence correspondant à un balayage progressif puisque la sortie CCD présente d'abord une trame de lignes impaires, puis une trame de lignes paires.

Il est donc nécessaire de recombinaison ces lignes pour composer un balayage progressif. Cela se fait par l'intermédiaire de mémoires de trames numériques externes au CCD.

La figure 26 précise le processus de recombinaison qui nécessite une conversion analogique-numérique des signaux de sortie du CCD.

4. Formats et nombre de pixels des matrices CCD

Les dimensions typiques de la zone-image, ainsi que le nombre de pixels ou le mode de balayage, varient avec le type d'analyseur selon qu'il s'agit de composants pour des applications scientifiques ou pour des applications à la télévision.

Dans le premier cas, pour des applications à la prise de vues pour l'astronomie, les formats peuvent être carrés avec un nombre très élevé de pixels.

Exemple : matrice 2048 (H) x 2048 (V) pixels, format (largeur/hauteur) zone-image 1/1, dimensions zone image = 55 x 55 mm, dimensions pixel = 27 (H) x 27 (V) µm.

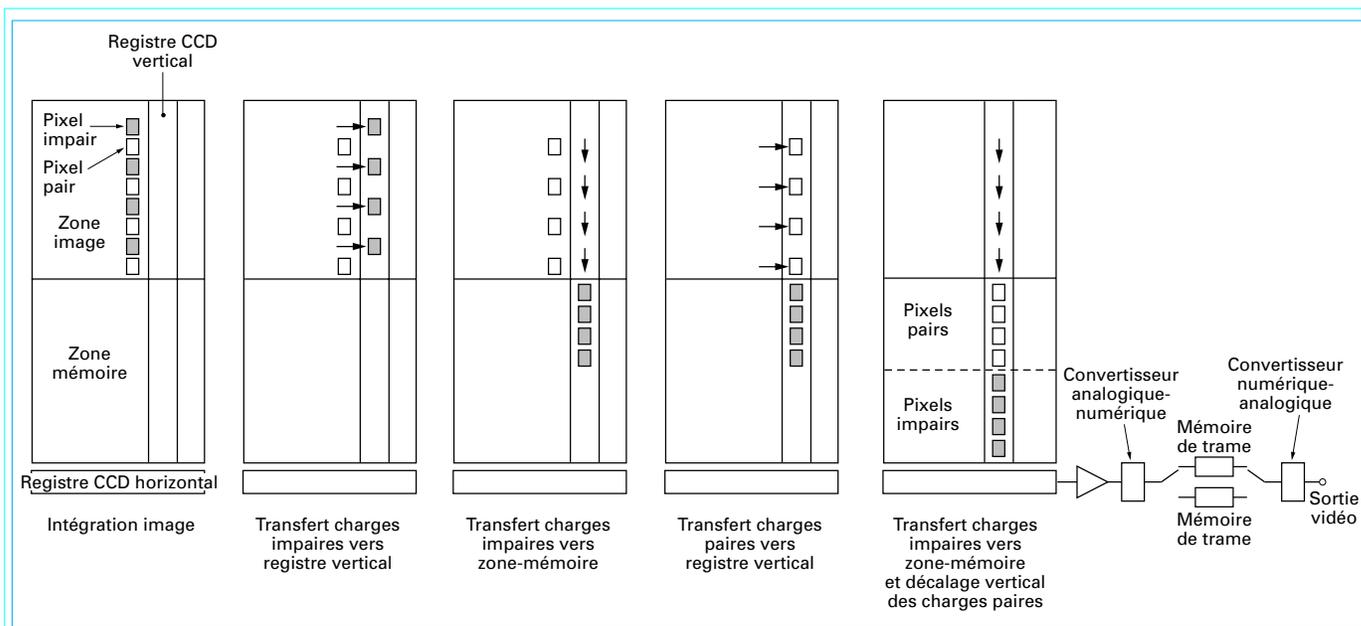


Figure 26 – Principe de l'analyse et de la recombinaison des trames en mode progressif pour une matrice à transfert trame-interligne

Dans le deuxième cas, pour des applications de type télévision, il faut distinguer la télévision industrielle de la télévision professionnelle classique et à haute définition, et de la télévision grand-public pour lesquelles les formats d'image et les nombres de pixels peuvent être différents. Les différents standards de télévision existants (CCIR, EIA, TVHD) sont aussi à prendre en compte dans la détermination du nombre de pixels.

CCIR Comité consultatif international des radiocoms
EIA Electronic Industries Association
TVHD Télévision haute définition

Cependant, pour des raisons liées à la réutilisation des optiques développées pour les tubes, les analyseurs CCD pour la télévision ont adopté les formats et les dimensions normalisés pour les tubes.

On rappelle que le format image pour les tubes (figure 27) est déterminé par le diamètre extérieur de la paroi du tube de verre. Le diamètre, traditionnellement exprimé en pouces, est choisi dans la série : 1/3 pouce, 1/2 pouce, 2/3 pouce, 1 pouce, etc. (1 pouce = 25,4 mm).

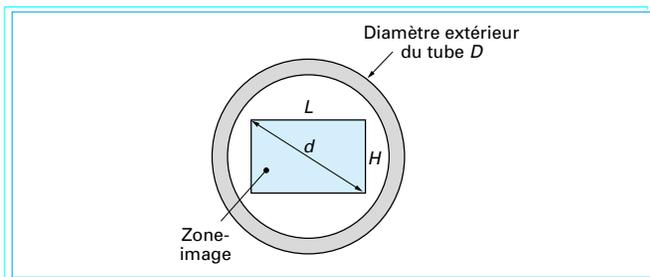


Figure 27 – Format d'image (référence tube de prise de vue)

À ces diamètres correspondent des dimensions géométriques qui sont rappelées dans le tableau 1.

En ce qui concerne le nombre et les dimensions de pixels des matrices, ceux-ci dépendent des formats et des applications visées (TV professionnelle, grand-public ou autres).

Le tableau 2 donne quelques exemples, non exhaustifs, de produits industriels.

5. Circuit de sortie d'un analyseur d'images CCD

Que l'analyseur CCD soit linéaire ou matriciel, les charges créées optiquement vont être transférées vers un dispositif de sortie dont le rôle est de convertir les charges électroniques en signal vidéo.

Si on considère une barrette CCD, les registres de transfert latéraux vont aboutir à un dispositif de détection des charges couplé à un amplificateur intégré à la puce.

De façon identique, dans les analyseurs matriciels, le registre horizontal va aboutir à un système de détection et d'amplification basé sur le même principe que celui des barrettes.

Dans les matrices pour la télévision à haute définition, afin de préserver une bonne efficacité de transfert du registre horizontal de sortie, celui-ci est divisé en deux registres dont les fréquences de transfert sont également divisées par deux. Ce choix technologique ne modifie pas le principe de détection des charges.

À l'extrémité du registre horizontal de sortie se trouve un dispositif qui comprend deux transistors MOS à effet de champ (MOSFET) couplés à une grille de sortie du registre. Ce dispositif convertit les charges-signal en tension. Cette tension de sortie, développée aux bornes d'une charge résistive, a l'allure d'un signal analogique échantillonné à la fréquence de lecture du registre CCD.

Tableau 1 – Formats d'images typiques des analyseurs CCD matriciels

Symboles	Paramètre	1/3 pouce	1/3 pouce	1/2 pouce	2/3 pouce	2/3 pouce	1 pouce
D	Diamètre eq. tube (mm)			14	17,8	17,8	25,4
H	Hauteur image (mm)	3,7	3	4,8	6,6	5,4	7,8
L	Largeur image (mm)	4,9	5,3	6,4	8,8	9,6	13,9
d	Diagonale image (mm)			8	11	11	16
R	Rapport image = L/H	1,32	1,77	1,33	1,33	1,78	1,78
	Format TV	4/3	16/9	4/3	4/3	16/9	16/9

Tableau 2 – Formats et nombre de pixels de produits industriels

Fabricant	Structure	Format optique pouce	Format image	Standard TV	Nombre de pixels (H) x (V)	Dimension des pixels (H) x (V) μm
PHILIPS	FT	1/2	4/3	CCIR	604 x 576	10 x 15,6
PHILIPS	FT	1/2	4/3	EIA	610 x 490	9,9 x 18,6
PHILIPS	FT	1	16/9	TVHD (Eurekâ)	1 920 x 1 152	7,25 x 13,6
THOMSON	FT	2/3	4/3	CCIR	384 x 576	23 x 23
THOMSON	FT	1	16/9	EDTV	1 260 x 1 152	11 x 13,6
SONY	FIT	1	16/9	TVHD (Japon)	1 920 x 1 036	7,3 x 7,6
SONY	IT	2/3	4/3	CCIR	500 x 582	17 x 11
SONY	IT	2/3	4/3	CCIR	756 x 481	11 x 11
SONY	IT	2/3	4/3	EIA	510 x 492	17 x 13
SONY	IT	2/3	4/3	CCIR	768 x 585	11 x 13
SONY	IT	1/2	4/3	EIA	510 x 492	8,4 x 9,8
SONY	IT	1/3	4/3	EIA	768 x 494	6,35 x 7,40
SONY	IT	1/4	4/3	EIA	510 x 492	7,15 x 5,55
MATSUSHITA	FIT	2/3	16/9 ou 4/3	CCIR	954 x 585	10,2 x 9,35
MATSUSHITA	FIT	2/3	4/3	CCIR	768 x 585	11,6 x 11,4
MATSUSHITA	FIT	2/3	4/3	EIA	854 x 494	10,5 x 13,6
MATSUSHITA	FIT	2/3	16/9	EIA	966 x 497	10 x 11
NEC	IT	1	16/9	TVHD (Japon)	1 920 x 1 035	7,3 x 7,6
NEC	IT	1/2	4/3	EIA	768 x 492	11,5 x 13,5
TOSHIBA	FIT	2/3	4/3	EIA	822 x 501	11,6 x 13,2
TOSHIBA	IT	1	16/9	TVHD (Japon)	1 920 x 1 036	7,3 x 7,6
FAIRCHILD	IT	2/3	4/3	EIA	380 x 488	12 x 18
TEXAS INST.	FT	2/3	4/3	EIA	754 x 488	11,5 x 27
KODAK	IT	1/3	4/3	EIA	528 x 484	8,6 x 6,8
KODAK	IT	2/3	4/3	EIA	768 x 484	11,6 x 13,6

Considérons le schéma typique de la figure 28.

Le dernier étage du registre CCD est couplé à une diffusion de type opposé à celui du substrat (exemple N⁺ pour substrat P) par l'intermédiaire d'une grille d'isolement. La diffusion peut être modélisée par une capacité située entre la grille du MOSFET de sortie et le substrat.

Le rôle de cette grille est d'isoler cette capacité des parasites induits par les horloges de transfert. Elle est, en général, polarisée à un potentiel légèrement supérieur au niveau bas de l'horloge de transfert.

Lorsque le MOSFET de recharge de la diffusion est ouvert, cette diffusion est isolée électriquement (diffusion *flottante*).

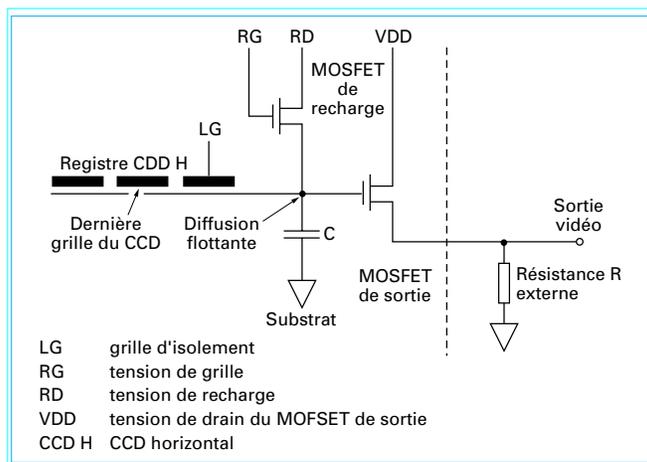


Figure 28 – Circuit de sortie d'un analyseur CCD. Principe de conversion des charges

La capacité équivalente C est alors égale à la somme de la capacité de la diffusion flottante et des capacités parasites associées aux conducteurs métalliques et à la grille du transistor MOSFET de sortie.

La lecture de la charge correspondant à un pixel débute par la mise en conduction du transistor de recharge, ce qui porte le potentiel de la diffusion à la tension de drain du transistor. Ensuite, le transistor de recharge est bloqué, isolant ainsi la diffusion flottante.

Lorsque le potentiel de la dernière grille du registre à décalage est ramené à l'état bas, la charge qui était stockée sous cette grille migre vers la diffusion flottante dont le potentiel V varie proportionnellement à la quantité de charge Q reçue : $dV = dQ/C$.

En sortie, la variation de tension aux bornes de la résistance de source du MOSFET (résistance externe) est égale à $dVs = GdV$ ou G est le gain en tension du transistor.

Ce dispositif de conversion charge-tension se révèle être d'une grande linéarité pour de grandes variations de charges.

6. Caractéristiques principales des analyseurs CCD

Les paramètres importants et les limitations des analyseurs d'images sont rappelés dans ce chapitre.

6.1 Réponse spectrale d'un analyseur CCD

Si l'énergie des photons incidents est supérieure à la largeur de la bande interdite du matériau semiconducteur, ces photons sont absorbés dans le matériau et il en résulte la création de paires électron-trou. La figure 29 rappelle ce processus.

L'énergie en électronvolts du photon s'exprime par la relation :

$$E = \frac{hc}{e \lambda}$$

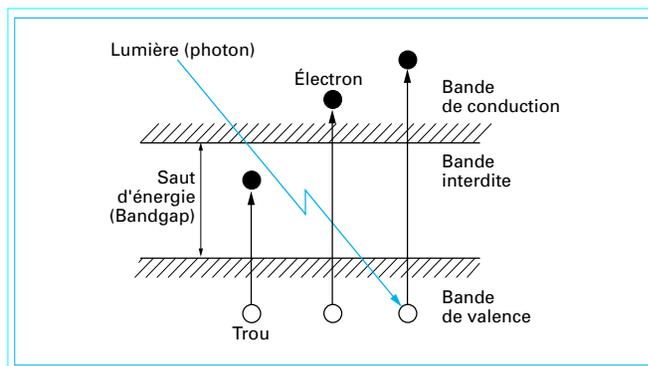


Figure 29 – Processus de conversion optoélectronique

avec E énergie du photon,
 e charge de l'électron,
 h constante de Planck,
 c vitesse de la lumière,
 λ longueur d'onde de la lumière.

Si λ est donnée en nanomètres (nm), E en électronvolts (eV) s'exprime par :

$$E \approx 1240/\lambda$$

Pour le domaine visible qui couvre approximativement le spectre lumineux de 400 nm à 700 nm, l'énergie du photon évolue respectivement de 3,1 à 1,8 eV.

On rappelle que pour le silicium, l'énergie correspondant à la bande interdite est de 1,1 eV. À cette énergie correspond une longueur d'onde d'environ 1100 nm qui se situe dans le domaine de l'infrarouge.

Les analyseurs CCD à substrat de silicium pourront donc être utilisés en prise de vues infrarouge (applications militaires en particulier).

La réponse spectrale d'un analyseur CCD est une courbe qui exprime l'efficacité quantique du matériau semiconducteur en fonction de la longueur d'onde de la lumière incidente.

L'efficacité quantique est définie par :

$$\eta(\lambda) = \frac{\text{Nombre de photoélectrons créés}}{\text{Nombre de photons incidents}}$$

$\eta(\lambda)$ est compris entre 0 et 1.

Du fait de phénomènes d'interférences optiques, de réflexions et de l'absorption éventuelle de photons par les couches qui se situent au-dessus de la zone de collecte des électrons, seule une partie des photons pourra pénétrer jusqu'au substrat.

De plus, la profondeur de pénétration de la lumière augmentant fortement avec la longueur d'onde, les électrons correspondants pourront être créés trop profondément dans le substrat et donc trop loin pour être collectés dans les puits de potentiel.

Les limitations de réponse spectrale se situent donc :

— vers les courtes longueurs d'ondes (bleu et ultraviolet) en raison de l'absorption des photons par les électrodes et autres couches les séparant du substrat ;

— vers les longueurs d'ondes plus élevées (proches de l'infrarouge) en raison de la distance trop grande qui sépare la zone de création des électrons de la zone de capture (puits de potentiel).

Ces limitations sont en général caractéristiques des structures éclairées du côté des électrodes de transfert.

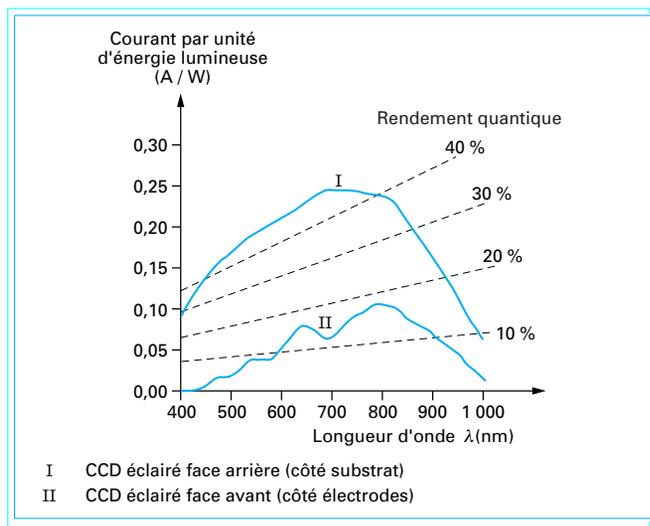


Figure 30 – Réponses spectrales typiques de matrices CCD éclairées côté électrode et côté substrat

Dans le but d'améliorer l'efficacité quantique aux faibles longueurs d'ondes, une solution consiste à éclairer l'analyseur directement du côté du substrat de silicium.

La lumière n'a pas, dans ces conditions, à traverser les électrodes semitransparentes et les couches de passivation. La réponse aux courtes longueurs d'ondes se trouve ainsi considérablement améliorée et la courbe de réponse globale présente moins d'irrégularités dues aux réflexions et réfractions.

À titre d'exemple, les courbes de la figure 30 donnent les réponses spectrales typiques pour des analyseurs CCD à transfert de trame éclairés selon les modes face avant et face arrière.

Dans le cas de l'éclairage face arrière (éclairage directement du côté du substrat de silicium, celui-ci doit être aminci aux environs de 15 μm environ. Cette faible épaisseur impose que ce substrat aminci avec ses électrodes de transfert soit assemblé sur une structure rigide, ce qui rend plus complexe le processus technologique de fabrication.

Cette technique d'amincissement n'est pas applicable aux structures à transfert interligne et trame-interligne pour lesquelles d'autres techniques d'amélioration de sensibilité spectrale ont été étudiées.

SONY a en particulier mis au point un photoélément d'un type original baptisé (HADHole Accumulated Diode) qui confère au CCD des propriétés intéressantes en terme de sensibilité. La figure 31 donne les vues en coupe d'un pixel MOS classique et du pixel HAD.

Les particularités du pixel HAD sont les suivantes :

- une couche très fortement dopée P est ajoutée à la surface de la zone photosensible ;
- la couche supplémentaire de type N, ajoutée sous la couche P, forme une jonction P-N qui se comporte comme une photodiode ;
- cette même couche supplémentaire de type N (substrat) agit comme un drain antiéblouissement vertical (Vertical Overflow Drain) ; dans les structures classiques à pixel MOS, ce drain est placé à côté du photoélément, ce qui peut limiter la zone photosensible utile, un drain antiéblouissement vertical libère donc une surface sensible supplémentaire et confère une meilleure sensibilité au CCD.

La sensibilité peut encore être améliorée par l'adjonction de **micro-lentilles** positionnées sur chacune des photodiodes HAD comme indiqué sur la figure 32. Ces micro-lentilles permettent une capture de lumière sur une surface plus grande que la surface intrin-

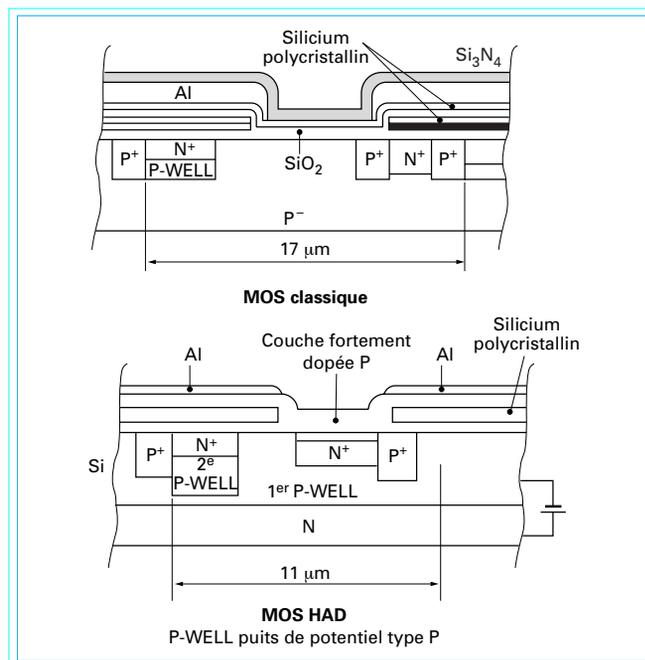


Figure 31 – Comparaison entre MOS classique et MOS aminci (HAD)[®] (doc. SONY)

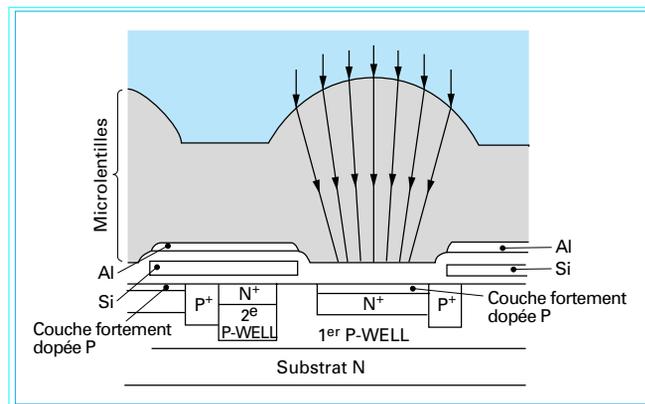


Figure 32 – Amélioration de la sensibilité d'un MOS HAD par microlentilles (doc. SONY)

sèque du pixel et les faisceaux lumineux sont mieux concentrés sur la surface utile de la photodiode. Les phénomènes de lumière parasite (smearing) sont également réduits du fait de la meilleure concentration de la lumière sur la zone photosensible.

6.2 Réponse d'un analyseur d'images CCD à un éclairage incident

On cherche à déterminer la relation qui existe entre la grandeur d'entrée de l'analyseur, c'est-à-dire l'éclairage, et la grandeur de sortie de l'amplificateur, c'est-à-dire une tension.

Cette relation constitue la fonction de transfert optoélectronique de l'analyseur.

On considère, dans ce qui suit, que les unités liées à l'éclairage sont radiométriques.

6.2.1 Réponse à un éclairage monochromatique

On considère un pixel de surface élémentaire $S = \Delta X \Delta Y$ et un flux énergétique lumineux incident Φ_e (watt) monochromatique de longueur d'onde λ ($\Phi_e = ES$ avec E éclairage).

La cellule est éclairée pendant un temps d'intégration t_i .

Le flux de photons Φ_p est égal au nombre de photons par unité de temps, soit $\Phi_p = N_p/t$.

Ce flux photonique peut aussi s'exprimer par $\Phi_p = \Phi_e/W$ où W est l'énergie du photon de longueur d'onde λ (ou de fréquence γ).

On peut donc écrire la relation :

$$\Phi_p = N_p/t = \Phi_e/W$$

dans laquelle $W = h\nu = hc/\lambda$ (h constante de Planck et c vitesse de la lumière).

On a alors :

$$N_p = t\Phi_e \lambda/hc$$

L'efficacité quantique étant égale à :

$$\eta(\lambda) = \frac{\text{Nombre de photoélectrons créés}}{\text{Nombre de photons incidents}} = N_e/N_p$$

On peut exprimer, compte tenu des expressions précédentes, le nombre d'électrons créés par la lumière pendant un temps t_i .

$$N_e \text{ (électrons)} = \frac{E(\lambda) \eta(\lambda) t_i \Delta X \Delta Y \lambda}{hc}$$

Si e est la charge de l'électron, la quantité de charges créées dans un pixel est alors :

$$Q = N_e e = \frac{E(\lambda) \eta(\lambda) t_i \Delta X \Delta Y \lambda e}{hc}$$

Cette charge induit aux bornes de la capacité de la diffusion flottante une tension $V = Q/C$ d'où l'expression complète de la réponse :

$$V = Q/C = \frac{E(\lambda) \eta(\lambda) t_i \Delta X \Delta Y \lambda e}{Chc}$$

La tension aux bornes de la charge du transistor MOSFET de sortie sera obtenue en faisant le produit de cette tension V par le gain en tension du transistor.

La fonction de transfert optoélectronique s'exprime par le rapport :

$$R = V/E(\lambda) = \frac{\eta(\lambda) t_i \Delta X \Delta Y \lambda e}{Chc}$$

6.2.2 Réponse à un éclairage à bande spectrale élargie

Dans le cas d'un éclairage non monochromatique de spectre compris entre les longueurs d'ondes λ_1 et λ_2 , il faut intégrer les

paramètres qui sont fonction de la longueur d'onde et l'expression devient :

$$R = \frac{t_i \Delta X \Delta Y e}{Chc} \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda) \eta(\lambda) \lambda d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda) \lambda d\lambda}$$

6.3 Rapport signal-à-bruit

6.3.1 Types de bruits

Ce paragraphe décrit les sources de bruits les plus classiques présentes dans un analyseur d'images CCD.

On distinguera deux types de bruits :

- le bruit de nature aléatoire ;
- le bruit spatial fixe (FPN Fixed Pattern Noise).

Le bruit aléatoire comprend principalement : le bruit de recharge de la diffusion flottante de sortie, le bruit en $1/f$ (fréquence centrale du spectre), le bruit thermique du MOSFET de sortie, le courant d'obscurité.

Le bruit spatial fixe résulte principalement des non-uniformités du courant d'obscurité des pixels, des non-uniformités de réponse des pixels à saturation, des bruits d'horloges induits.

Les bruits parasites d'horloge peuvent être réduits par filtrage et par des implantations soignées des circuits imprimés.

Le bruit de recharge de la diffusion flottante peut être aussi éliminé par l'application d'un traitement adapté sur le signal de sortie. La technique couramment adoptée, connue sous le nom de *double échantillonnage corrélé* (en anglais CDS = Correlated Double Sampling) est décrite plus loin (§ 6.3.2).

En ce qui concerne le bruit spatial fixe (FPN), les défauts structurels qui le produisent sont de plus en plus éliminés du fait de l'amélioration des procédés de fabrication.

Le courant d'obscurité qui reste le bruit prédominant dépend fortement de la température du substrat et du temps d'intégration des charges. Il varie comme indiqué sur la figure 33 et il double de valeur tous les 7 à 10 °C.

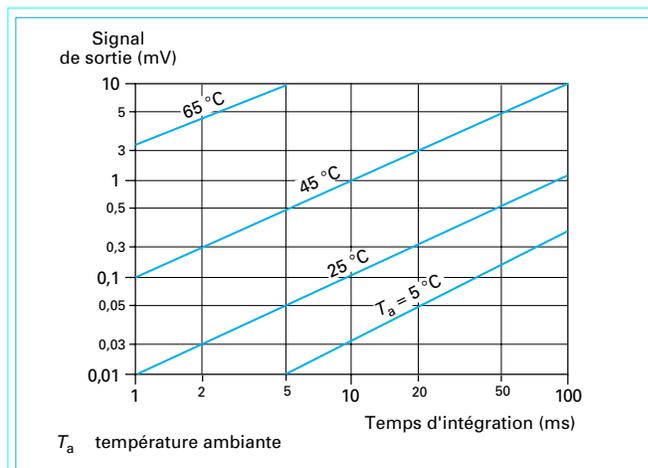


Figure 33 – Variation du courant d'obscurité dans un analyseur CCD

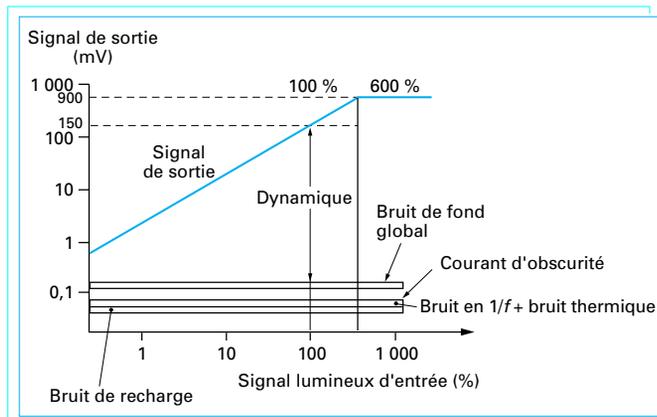


Figure 34 - Courbe de transfert optoélectronique d'un analyseur CCD et contributions au bruit

Pour la prise de vues en astronomie pour lesquelles le temps d'intégration des charges peut être grand en raison du faible niveau de lumière reçue, les analyseurs CCD doivent être refroidis (azote liquide).

Pour la prise de vues en télévision, les capteurs d'image sont, en général, collés sur un séparateur optique qui joue aussi le rôle de radiateur thermique. Dans certaines conditions climatiques, le rapport signal-à-bruit des CCD peut cependant diminuer du fait de l'élévation de leur température.

La figure 34 donne une courbe de transfert optoélectronique typique d'un analyseur CCD ainsi que les diverses contributions de bruits.

Pour des températures n'excédant pas 40 °C et avec un traitement du signal soigné, le rapport signal-à-bruit intrinsèque est supérieur à 60 dB et garantit une excellente qualité d'image.

6.3.2 Amélioration du rapport signal-à-bruit : traitement du signal de sortie des analyseurs CCD

Comme déjà mentionné, le bruit associé à la recharge périodique de la diffusion flottante ainsi que le bruit en 1/f peuvent être considérablement diminués par l'utilisation, en sortie de l'analyseur, d'un circuit de traitement particulier assurant une fonction de double échantillonnage (en anglais : Correlated Double Sampling).

Le schéma de la figure 35 en rappelle le principe.

Le signal de sortie du CCD est un signal analogique échantillonné qui se trouve affecté d'un parasite conséquent (bruit de recharge). Ce bruit résulte de l'incertitude sur le niveau de tension de la diffusion flottante après ouverture du transistor MOSFET de recharge de cette diffusion.

La méthode retenue pour supprimer ce défaut consiste à prendre un échantillon du signal de sortie après recharge de la diffusion flottante (période A) et un autre échantillon après transfert de la charge-signal dans la diffusion (période B) comme indiqué sur la figure 35.

Ces niveaux sont mémorisés dans des capacités et leur différence, réalisée dans un amplificateur de sortie, constitue le signal utile débarrassé des bruits de recharge et de la dérive (bruit en 1/f).

Le rapport signal-à-bruit obtenu avec cette technique peut excéder les 60 dB.

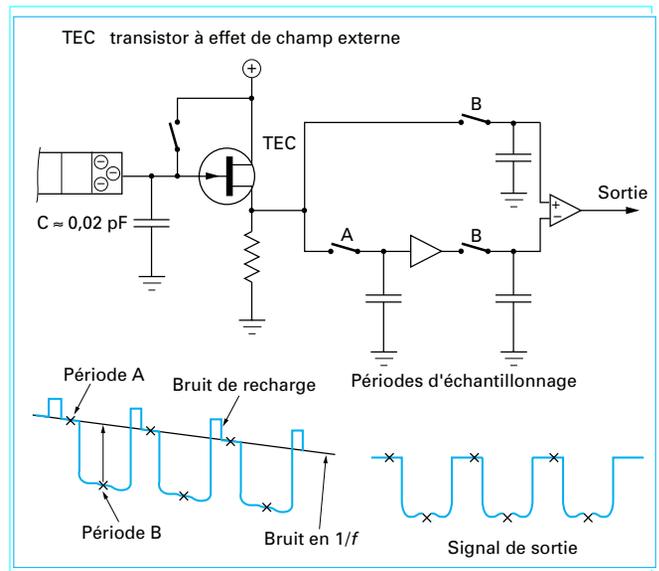


Figure 35 - Traitement du signal de sortie d'un analyseur CCD

6.4 Résolution statique

Le pouvoir de résolution est un paramètre important d'un analyseur d'images puisqu'il caractérise son aptitude à bien séparer les détails fins de l'image analysée.

Un moyen de spécifier ce pouvoir de résolution est la (fonction de transfert de modulation FTM), bien connue des opticiens, qui traduit la réponse de l'analyseur exprimée en % de modulation à une mire optique comportant des salves de fréquence spatiale croissante. Les fréquences spatiales sont classiquement exprimées en cycles/mm ou en lignes TV par hauteur d'image (LTV/PH).

En ce qui concerne les analyseurs CCD, la résolution statique est déterminée par la forme de l'ouverture spatiale du pixel. En théorie, si on assimile la réponse impulsionnelle spatiale du pixel à une fonction *fenêtre* comme indiqué sur la figure 36, la fonction de transfert de modulation correspondante est la transformée de Fourier de la fonction fenêtre.

Dans la direction X considérée, on démontre que la FTM s'exprime par l'équation :

$$FTM(X) = \frac{\sin(\pi FX)}{\pi FX}$$

avec F (cycle/mm) fréquence spatiale.

La FTM selon la direction Y s'exprime par une équation identique.

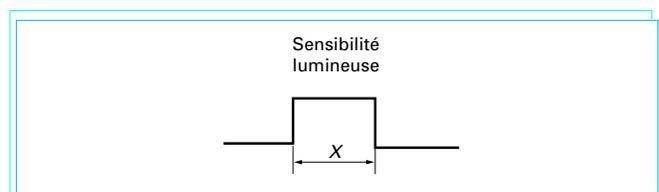


Figure 36 - Réponse impulsionnelle spatiale d'un pixel

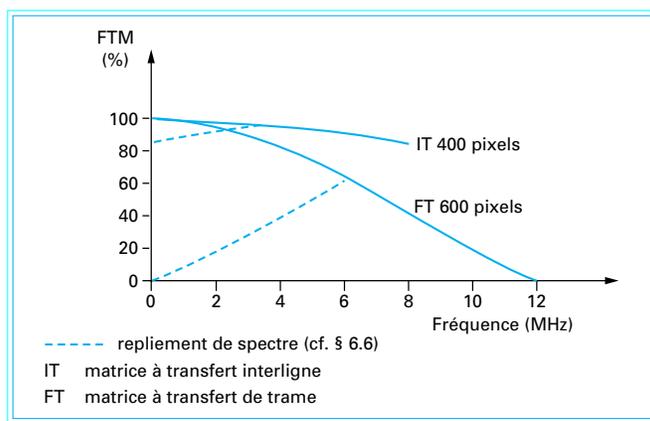


Figure 37 – Exemples de réponses de matrice CCD (fonctions de transfert de modulation)

En pratique, dans la direction horizontale, la fréquence spatiale (cycle/mm) peut être convertie en fréquence temporelle (Hz). En effet, à une durée utile de ligne TV (typiquement $52 \mu\text{s}$ en standard CCIR), correspond une largeur d'image définie par le format de l'analyseur.

La figure 37 donne deux exemples de FTM pour des analyseurs dont les architectures et le nombre de pixels sont différents.

6.5 Résolution dynamique

La résolution dynamique d'un analyseur CCD peut être définie comme étant son aptitude à préserver la reproduction des détails des images en mouvement.

Les facteurs qui affectent la résolution dynamique sont :

- le temps d'intégration (temps d'exposition) de l'analyseur ;
- le temps de réponse de la cible (rémanence).

Dans les analyseurs CCD, ce sera essentiellement le temps d'intégration des charges qui affectera la réponse dynamique puisque, à l'exception de certains types de pixels (photodiodes), la rémanence est négligeable.

Dans un analyseur à transfert de trame, le temps d'intégration est de 20 ms.

Dans un analyseur à transfert interligne ou trame-interligne, le temps d'intégration dépend du mode de lecture et peut donc être égal à 20 ms ou à 40 ms.

Il est possible d'améliorer la réponse dynamique en diminuant le temps d'intégration des charges. Cette possibilité est intéressante pour saisir des mouvements rapides que l'on souhaite visualiser au ralenti (exemple : événements sportifs).

Cette modification du temps d'intégration peut se faire de façon électronique en contrôlant le temps effectif d'accumulation des porteurs.

Un exemple est donné sur la figure 38 pour un analyseur de type transfert trame-interligne. Le principe retenu consiste à n'autoriser l'intégration effective qu'à partir d'un certain temps.

Les charges créées antérieurement à ce temps sont évacuées dans un drain de collecte.

La réduction du temps d'intégration se traduit par une diminution de la quantité de charges stockées que l'on peut compenser par une augmentation d'éclairement (ouverture plus grande du diaphragme de l'optique).

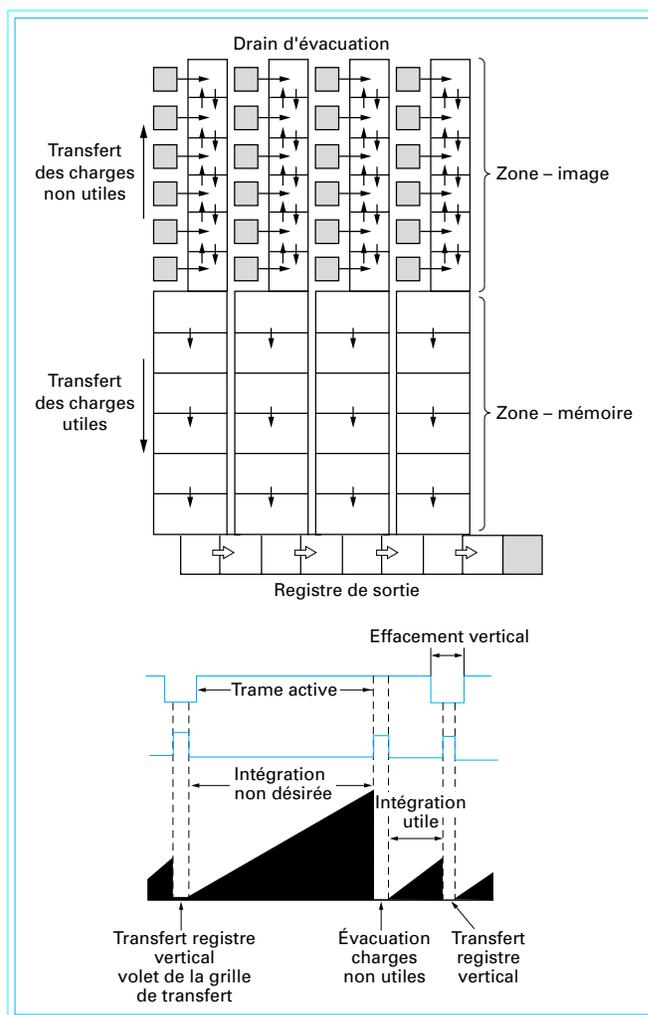


Figure 38 – Amélioration de la réponse dynamique d'un CCD par modification du temps d'intégration

La grande dynamique des analyseurs CCD permet de réduire le temps d'intégration de $1/50 \text{ s}$ à $1/2000 \text{ s}$ pour saisir des mouvements très rapides qui peuvent être restitués au ralenti sans défaut de filé d'image.

6.6 Repliements de spectres (Anglais : Aliasing)

Les analyseurs CCD, en raison de la nature discrète des pixels, échantillonnent spatialement l'image.

En fonction du nombre de pixels, donc du pas d'échantillonnage spatial et des fréquences spatiales de l'image analysée, on risque donc de se trouver en présence de phénomènes comparables à ceux qui existent en électronique.

On sait, en effet, que l'échantillonnage doit respecter des conditions énoncées par le théorème de Shannon qui dit que la fréquence d'échantillonnage doit être au moins égale à deux fois la fréquence la plus élevée du spectre du signal à échantillonner.

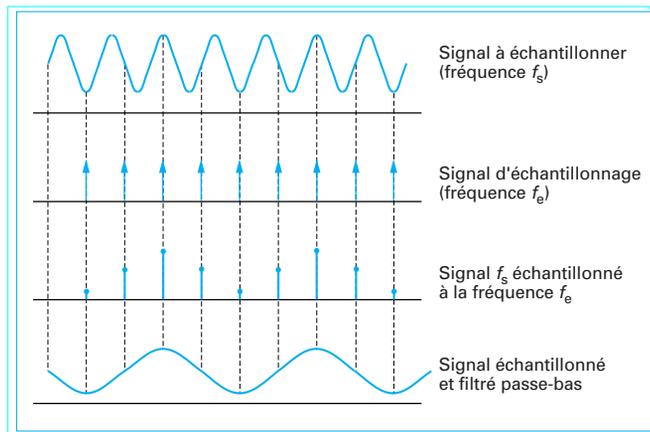


Figure 39 - Effets du sous-échantillonnage d'un signal



Figure 40 - Moirés résultant d'un sous-échantillonnage spatial de l'image (mires de barres)

La figure 39 illustre les effets d'un sous-échantillonnage.

Dans le cas de la figure 39, la fréquence d'échantillonnage ne respecte pas les conditions du théorème de Shannon. Le signal restitué, après filtrage, n'est qu'une caricature du signal à échantillonner.

Pour une image, le sous-échantillonnage de certaines fréquences spatiales élevées se traduit par l'apparition de moirés qui peuvent être très gênants sur l'image. Certaines fréquences élevées apparaissent, du fait des battements, comme des fréquences basses sur l'image visualisée.

La figure 40 donne un exemple de moirés sur image.

Ce phénomène de sous-échantillonnage sera d'autant plus marqué que l'analyseur comportera un nombre réduit de pixels et un pas d'échantillonnage conséquent.

Des solutions existent qui permettent de limiter les défauts de moirés.

6.6.1 Préfiltrage optique passe-bas

En électronique, avant l'échantillonnage d'un signal, il est recommandé de limiter sa bande passante, par filtrage passe-bas, à une valeur égale à la demi-fréquence d'échantillonnage afin de limiter les risques de repliements de spectre.

En analyse d'image par CCD, la même démarche peut être adoptée mais le filtrage passe-bas doit être optique et situé en amont de l'analyseur.

Une solution consiste à mettre à profit les propriétés de biréfringence de lames de quartz. Plusieurs lames convenablement assemblées peuvent constituer des filtres passe-bas dont les réponses fréquentielles suivent des lois en cosinus. Ces filtres calculés en fonction de l'analyseur utilisé permettent de réduire considérablement les phénomènes de moirés.

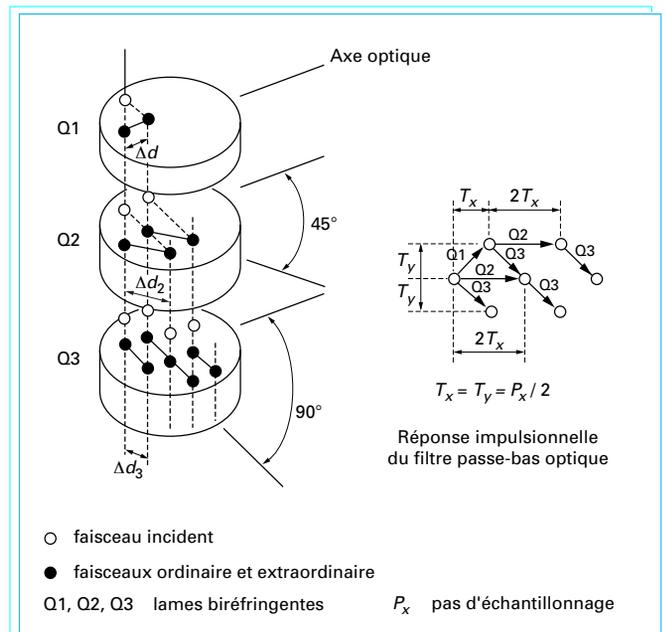


Figure 41 - Exemple de filtre optique passe-bas à lames biréfringentes

La figure 41 donne un exemple de filtre avec sa réponse impulsionnelle.

6.6.2 Technique de décalage spatial

Dans le cas d'une analyse couleur avec trois capteurs R, V et B (rouge, vert et bleu), il est possible d'adopter une technique de décalage spatial, dans le sens horizontal, d'un analyseur par rapport aux deux autres.

L'analyseur vert est décalé horizontalement, d'un demi-pas par rapport aux analyseurs rouge et bleu (figure 42).

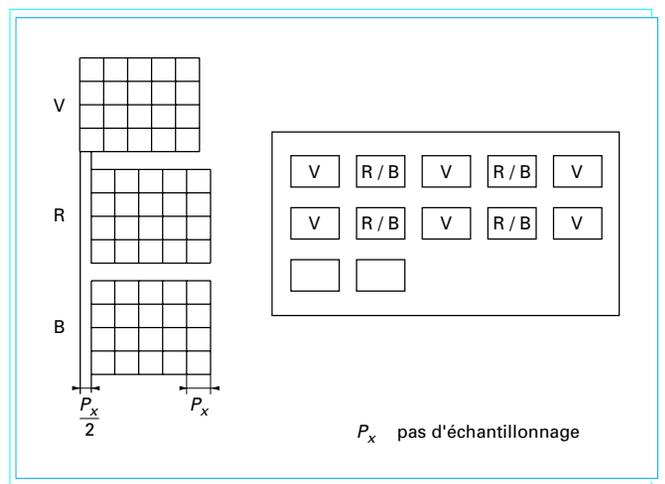


Figure 42 - Amélioration de la résolution par décalage spatial horizontal

Tableau 3 – Éléments de comparaison des performances des analyseurs d'images à tube et à CCD

	Tubes de caméras	CCD
Matériaux utilisés	Verre / métal	Céramique / silicium
Forme	Tube	Circuit intégré
Dimensions (exemple format 1 pouce)	$\phi = 30$ mm (50 mm avec bobines) $l = 200$ mm	$l = 30$ mm, $h = 15$ mm $e = 7$ mm
Poids	Tube = 100 g bobine = 200 g	Quelques grammes
Résistance mécanique	Fragile aux chocs	Robuste
Dynamique à 25 °C	1 000 / 1	> 1 500 / 1 (matrices) > 3 500 / 1 (barrettes)
Loi de transfert opto-électronique (Gamma)	proche de 1	1
Gamme de températures	- 40 à 70 °C	- 100 à 70 °C
Signal de sortie	Analogique	Analogique échantillonné
Niveau de signal disponible	200 à 500 nA $Z = 100$ k Ω	300 à 1 000 mV $Z = 1$ k Ω
Non-uniformité de résolution	20 % (centre - bord)	Aucune
Rémanence	Possible	Négligeable
Destruction par suréclairement	Possible	Aucun risque
Anti-éblouissement	Bon	Bon
Temps moyen de bon fonctionnement (MTBF)	10 000 h	> 20 000 h
Sensibilité aux champs magnétiques	Sensible (Blindage néc.)	Aucune
Distorsion géométrique	Dépend des traitements associés	Aucune (hors optique)
Tension maximale requise	> 500 V	env. 15 V (12 V possible)
Puissance consommée	Quelques watts	<< 1 watt

On peut montrer dans ces conditions que la résolution horizontale est doublée pour la luminance et que les spectres repliés des primaires rouge et bleu s'annulent avec le spectre du vert (phases opposées). La technique serait parfaite si les proportions de R et B additionnées étaient rigoureusement égales à V, ce qui n'est pas le cas.

En effet, l'équation de luminance $Y = 0,30 R + 0,59 V + 0,11 B$ montre que la pondération de R + B (0,41) n'est pas égale à la pondération de V (0,59).

La technique est cependant applicable et l'amélioration apportée est visible sur des caméras qui mettent en œuvre des analyseurs à transfert interligne.

7. Avantages des analyseurs CCD. Comparaison avec les tubes

Le tableau 3 fournit quelques éléments de comparaison des performances des analyseurs d'images à tube et à CCD.

8. Applications des analyseurs CCD

8.1 Analyseurs linéaires

Les applications des barrettes CCD sont nombreuses. Dans ce chapitre sont rappelées deux applications typiques des domaines professionnel et télévisuel.

8.1.1 Télécopie

Des barrettes CCD comportant 1 728 pixels ou 2 048 pixels conviennent à ce type d'application pour laquelle un balayage mécanique est nécessaire.

Une barrette de 1 278 pixels garantit une résolution de 200 lignes par pouce (8 lignes/mm) pour un document de largeur 216 mm.

La barrette de 2 048 pixels assure la même résolution pour un document de largeur 256 mm (norme japonaise des télécopieurs).

Dans la majorité des dispositifs, le document est éclairé par un tube fluorescent et l'image d'une ligne est renvoyée par un miroir sur une lentille qui la réduit et la focalise sur une barrette CCD.

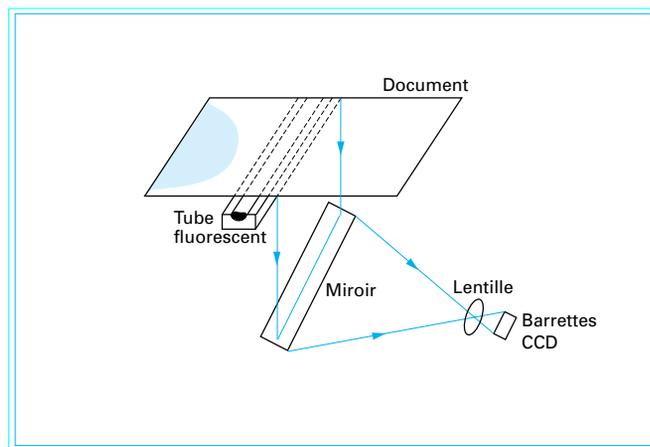


Figure 43 – Application des barrettes CCD à la télécopie

Un schéma de principe de lecture de document en télécopie est donné sur la figure 43.

8.1.2 Production en télévision. Télécinéma à barrette CCD

La technologie CCD a permis de faire progresser la technique de conversion film-vidéo pour la production en télévision.

Les barrettes CCD ont ainsi permis de fabriquer des télécinémas performants dans lesquels le système complexe d'analyse à *flying spot* comportant un tube à rayon cathodique et des photomultiplicateurs, a été remplacé par une source lumineuse et des barrettes CCD couplées à un séparateur dichroïque.

De plus, la possibilité d'analyser le film en continu a simplifié la partie mécanique et les automatismes complexes mis en œuvre dans les télécinémas à *flying spot*.

Un schéma de principe d'un télécinéma à barrettes CCD est donné sur la figure 44.

8.2 Matrices CCD : caméras vidéo

Les matrices CCD se sont progressivement imposées dans beaucoup de secteurs tels que :

- le marché des caméras industrielles noir/blanc et couleur pour la surveillance, les automatismes industriels, la robotique, les applications militaires (domaine infrarouge), spatiales, médicales (endoscopie) et autres ;
- le marché des caméras vidéo *grand-public* et des caméscopes (enregistreur associé à la caméra) ;
- le marché des télécommunications avec des applications telles que la visiophonie, la visioconférence ;
- le marché de la production en télévision professionnelle, y compris en télévision à haute définition, avec les caméras de studio et les caméras de reportage.

8.2.1 Différentes architectures pour la prise de vues en couleur

Plusieurs options existent pour l'analyse couleur par matrices CCD. Leur choix est dicté par des considérations de résolution et de coût de la caméra.

Les têtes d'analyse pour la prise de vues de haute qualité TV et TVDH comportent généralement trois matrices CCD qui traitent les couleurs primaires rouge, vert, bleu définies par les standards TV.

Cependant, il est possible pour des caméras de type « grand-public » et institutionnelles de n'utiliser que deux ou une matrice couleur CCD.

La figure 45 rappelle les différentes architectures possibles.

8.2.1.1 Caméra à deux matrices

Dans le cas d'une caméra à deux matrices, une matrice analyse la couleur primaire verte et une deuxième matrice, comportant des filtres colorés disposés généralement en bandes verticales, analyse les couleurs primaires rouge et bleu.

Dans cette architecture, l'analyse du vert se fait à pleine résolution alors que les composantes rouge et bleu sont analysées avec une demi-résolution en horizontal.

La composante verte qui contribue majoritairement au signal de luminance ($\approx 60\%$), est privilégiée par rapport aux deux autres composantes rouge et bleu qui n'interviennent respectivement qu'à hauteur de 30 % et 10 % environ.

De plus, il est connu que la sensibilité de l'œil est plus élevée au vert qu'aux deux autres couleurs.

De ce fait, la résolution d'une telle tête d'analyse est acceptable.

8.2.1.2 Caméra à matrice unique

Dans le cas d'une caméra à matrice unique, un réseau en bandes ou une mosaïque de filtres colorés sont rapportés ou déposés sur une matrice monochromatique. Les filtres peuvent être des résines organiques colorées.

La figure 46 indique le principe de report d'un filtre coloré sur une matrice monochromatique.

Plusieurs solutions existent pour la fabrication de ces matrices couleur et on trouvera différentes répartitions des pixels colorés et des couleurs primaires R, V, B ou autres.

Ces matrices équipent préférentiellement des caméras et des caméscopes *grand-public*. La solution à matrice unique est en effet très avantageuse économiquement car elle permet de s'affranchir d'un séparateur optique coûteux et fragile et de faire l'économie de deux matrices.

Cette solution exige cependant un traitement vidéo plus ou moins complexe destiné à restaurer les informations couleur manquantes puisqu'un pixel de la matrice ne porte qu'une seule couleur.

La réduction de résolution spatiale pour chacune des couleurs par rapport à la résolution de la matrice monochromatique fait qu'il y a risque de sous-échantillonnage spatial des images couleur analysées et apparition possible de moirés.

En conséquence, un filtrage passe-bas optique sera indispensable en amont de l'analyseur.

À titre d'exemple, la figure 47 donne deux options possibles pour les filtres colorés associés au CCD.

8.2.1.3 Caméra à trois matrices

Pour des caméras de télévision professionnelle, les exigences de qualité requises en production imposent des têtes d'analyse à trois matrices rouge, verte, bleue.

Comme dans le cas des caméras à tubes, un séparateur optique aiguille les trois couleurs primaires vers trois analyseurs CCD.

Ces matrices sont collées sur le bloc de verre lors du montage en usine. Des mires spéciales et des optiques étalon permettent de garantir un réglage très précis des superpositions pour les trois images primaires.

Afin de compenser les aberrations chromatiques longitudinales des optiques, les plans focaux des analyseurs CCD sont décalés

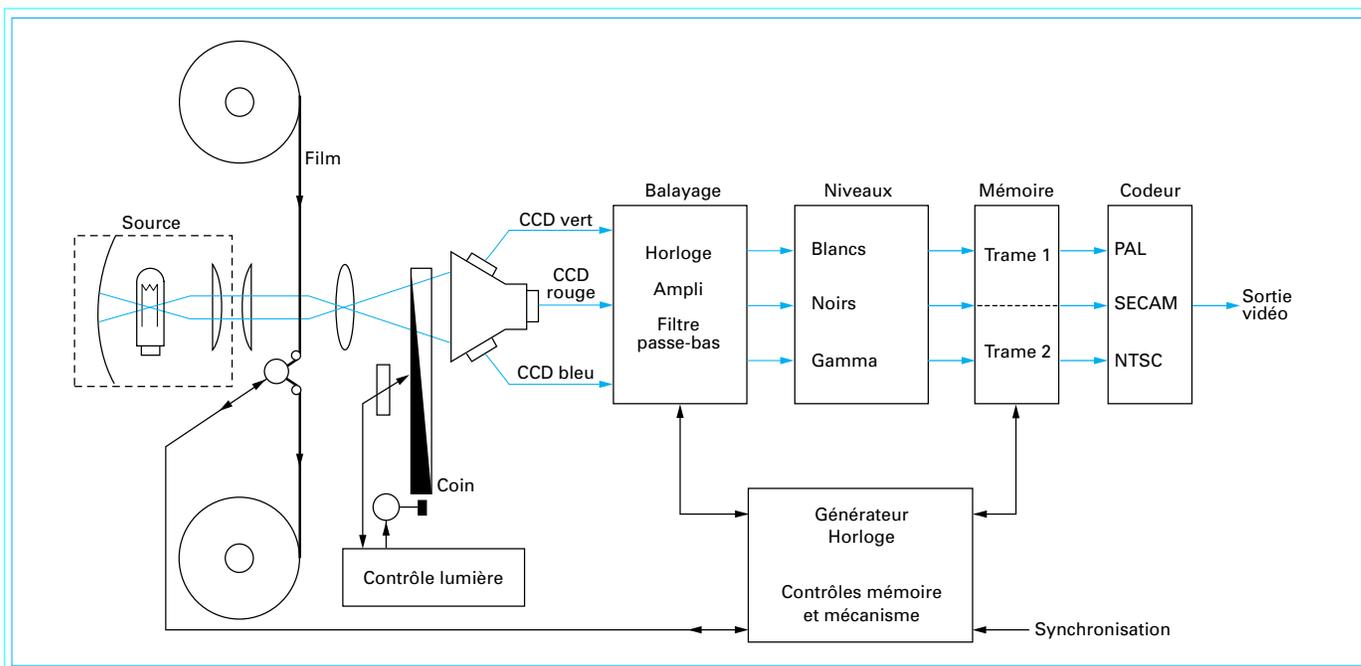


Figure 44 - Application des barrettes CCD au télécinéma

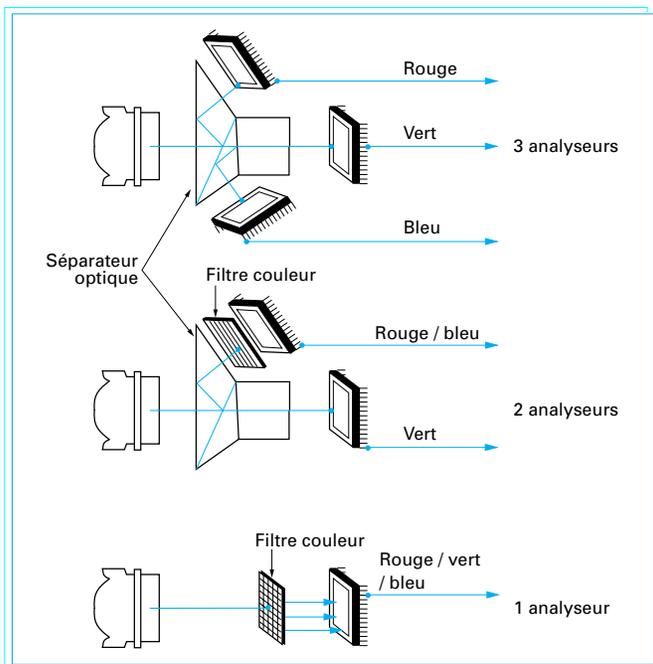


Figure 45 - Options possibles pour l'analyse couleur par matrice CCD

entre eux dans le sens de l'axe optique. Ces décalages ont été normalisés pour pouvoir interchanger les optiques. Par rapport à la matrice verte prise comme référence, les matrices rouge et bleu sont telles que $R - V = 30 \mu\text{m}$ et $B - V = 10 \mu\text{m}$.

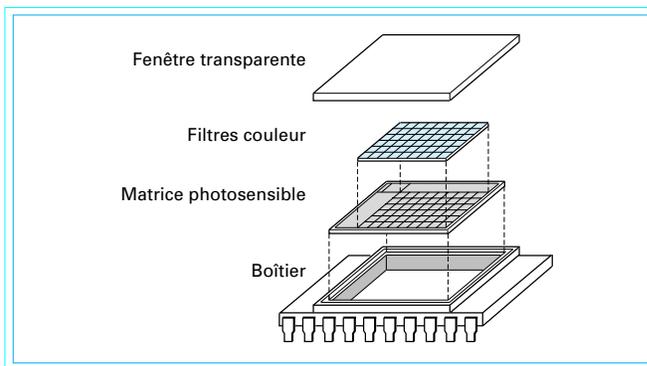


Figure 46 - Matrice CCD à filtre coloré

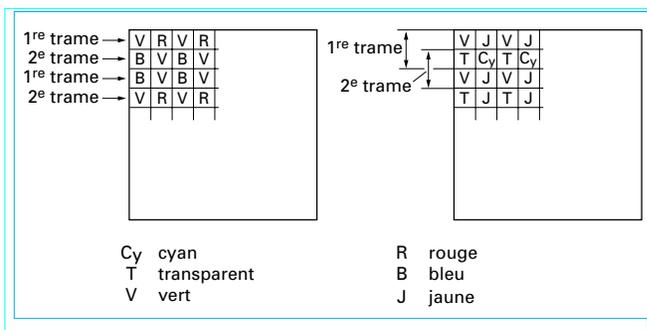


Figure 47 - Exemples de filtres colorés pour matrice CCD

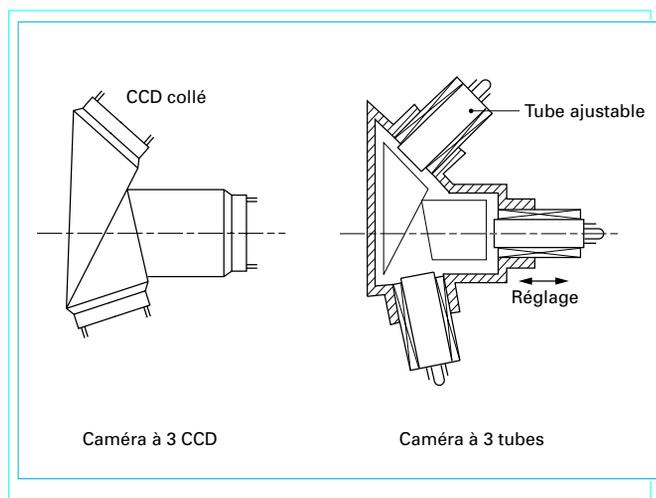


Figure 48 – Montage des tubes et CCD sur séparateur optique : comparaisons

Le collage des matrices sur le bloc de verre présente des avantages par rapport à la technique à tube : précision de positionnement, maintien dans le temps des superpositions des images R, V, B y compris en environnement sévère tel que pour les reportages, compacité plus grande.

La figure 48 donne les exemples de montage pour les analyseurs CCD et pour les tubes.

9. Conclusion

Les analyseurs d'images intégrés à transfert de charges (CCD) linéaires et matriciels sont devenus des composants clés de prise de vues pour un grand nombre d'applications.

Leurs performances ont atteint un niveau tel qu'ils ont remplacé les technologies à tube en télévision, y compris en télévision à haute définition.

Dans le domaine des applications *grand-public*, les caméscopes et les appareils photoélectroniques sont conçus autour d'analyseurs CCD.

Des progrès importants ont pu être obtenus en prise de vues médicales avec les analyseurs CCD. Des systèmes d'endoscopie utilisent des CCD miniatures en remplacement des dispositifs à fibres optiques.

D'autres exemples peuvent être cités : ce sont les applications aux télécommunications, à la robotique, au spatial, à la prise de vues infrarouge, etc.

La précision d'analyse de l'image et la nature échantillonnée du signal de sortie font que les analyseurs CCD sont des bons candidats lorsque les traitements qui suivent sont numériques.

Bien que déjà très performants, les analyseurs CCD continuent d'évoluer en phase avec les progrès de la microlithographie sur silicium. Cela se traduit, à résolution égale, par des tailles de plus en plus compactes, des rendements de fabrication croissants et, corrélativement, des coûts plus faibles.

Les analyseurs CCD constituent sans conteste une réelle « rupture » technologique dans le domaine de la prise de vues longtemps dominé par les tubes à vide.

Analyseurs d'images

par **Jean-Paul BELAN**

Ingénieur CNAM

Ingénieur à France Télécom - Branche Développement

Centre national d'études des télécommunications

Direction des services de diffusion et multimédia

Bibliographie

- SÉQUIN (C.H.) et TOMPSETT. – *Charge Transfer Devices Bell Telephone Laboratories*. Advances in Electronics and Electron Physics, Academic Press, Inc.
- JESPERS (P.G.). – *Solid-State Imaging*. NATO Advanced Study Institute series, Noordhoff.
- HOWES (M.J.) et MORGAN (D.V.). – *Charge-Coupled Devices and Systems*. Dept of Electrical and Electronic Eng., University of Leeds, John Wiley and Sons.
- HOBSON (G.S.). – *Charge Transfer Devices*. Dept of Electronic and Electronic Eng. University of Sheffield, Edward Arnold.
- MIQUEL (J.C.). – *L'observation en vidéo rapide*. Technique et Documentation Lavoisier.
- LETURCQ (P.) et REY (G.). – *Physique des Composants actifs à semiconducteurs*. Dunod Université.
- Doc Tech. APV 6316 THOMSON CSF DTE. – *CCD Image Sensor Primer*.
- BELAN (J.P.). – *Analyseurs d'Images à Transfert de Charges*. Note technique interne CCETT.
- BONNAUD (R.). – *Les Analyseurs d'Images à Couplage de Charges*. Note technique CNET NT/LAB/IFE/232.
- BARBE (D.F.). – *Imaging Devices Using the Charge-coupled Concept*. Proceedings IEEE, vol. 63, pp. 38-67, Janv. 75.
- Special Issue on Solid-State Image sensors*. A publication of the IEEE Electronic Devices Society. Vol ED-32. Number 8. Aug. 85.
- THORPE (L.), TAMURA (E.) et IWASAKI (T.). – *New Advances in CCD Imaging*. SMPTE Journal, pp. 378-387, May 88.
- WONFOR (P.J.) et LACOSTE (J.P.). – *The CCD Camera for Field Production Applications*. SMPTE Journal, pp. 817-822, Oct. 88.
- LACOTTE (J.P.), TICHIT (B.) et LACOSTE (J.P.). – *Towards Full Quality CCD Studio cameras*. THOMSON VIDEO EQUIPMENT.
- SHELDON (I.). – *An introduction to CCD technology*. Note technique SONY BROADCAST.
- WARD (N.). – *Recent Developments in CCD image technology*. Training and Engineering dept. SONY BROADCAST AND COMM, Technology Seminars Montreux 91.
- WADA (N.) et NISHIWAKA (S.) et al. – *A new 525 Line Progressive scanning television camera with 16/9 aspect ratio*. SMPTE Journal, pp. 9-16, Janv. 95.
- Wide Dynamic Range HDTV image sensor with aliasing suppression*. IEEE Trans. on Consumer Electronics, Aug. 88, Vol. 34, N° 3, pp. 506-512.
- YAMAGISHI (M.) et al. – *A 2-million pixel FIT image sensor for HDTV camera systems*. (SONY) IEEE Trans Electron Devices, May 91, Vol. 38, N° 5, pp. 976-980.
- BRISSOT (L.) et al. – *High-definition CCD's for enhanced definition TV*. (THOMSON-TMS) Conf. SPIE-Fev. 92. San José.
- NEGISHI (M.) et al. – *A low smear structure for 2M-pixel CCD Image sensor*. IEEE on Consumer Electronics. Aug. 91, Vol. 37, N° 3, pp. 494-499.
- BLANKEVOORT (J.) et al. – *A high performance, full bandwidth HDTV camera applying the first 2M pixel FT CCD sensor*. SMPTE Journal, pp. 319, 329, May 94.
- Frame Transfer, XY, and Interline Transfer. How do they compare ?* PHILIPS Technical publication N° 170.
- TAKEMURA (Y.) et al. – *CCD miniature color camera*. IEEE Transactions on Consumer Electronics. Vol. 33, N° 2, May 87.
- OHKI (H.) et al. – *A 1/4 inch 250K pixel IT-CCD image sensor*. IEEE Transactions on Consumer Electronics. Vol. 39, N° 3, June 93.
- DEGUCHI (M.) et al. – *Microlens design using simulation programm for CCD image sensor*. IEEE Transactions on Consumer Electronics. Vol. 38, N° 3, Aug. 92.