

## LE CAPTEUR D'IMAGES

Le rôle du capteur d'image est de transformer l'énergie lumineuse de chaque point de l'original en un signal électrique.

Les principaux éléments que l'on rencontre dans un capteur sont :

- un système photosensible (capteur ponctuel, barrette, matrice)
- un dispositif électronique et/ou mécanique permettant de balayer toute l'image pixel par pixel.
- un système de conversion analogique/numérique
- un système de transport de l'image numérique vers le calculateur

La réalisation des capteurs est très variable suivant les performances recherchées; aux plus elles sont élevées, au plus le capteur est complexe et difficile de mise en oeuvre.

### Effet photoélectrique

La lumière présente un aspect corpusculaire; elle apparaît comme constituée de grains d'énergie appelés *photons*. L'énergie du photon est liée à sa longueur d'onde :

$$E = h\nu$$

avec  $h = 6.62 \cdot 10^{-34}$  constante de Planck et  $\nu$  fréquence du rayonnement

Lorsqu'un photon incident frappe la matière, l'énergie du photon est cédée aux électrons des atomes qui se retrouvent "libres" si l'énergie du photon est supérieure à un certain seuil  $w_1$ , qui est leur énergie de liaison à la structure atomique. Il en résulte que le phénomène de libération des électrons ne se produit que pour une longueur d'onde inférieure à un seuil  $\lambda_1$ , ce qui introduit une limite inférieure à la réponse du capteur dans le domaine des longueurs d'onde.

De plus, l'onde pénétrant dans le matériau photosensible subit des interférences, une réflexion partielle et une absorption dans le matériau, ce qui réduit son efficacité pour les fréquences croissantes.

Ces deux phénomènes conjugués ont pour effet de donner une bande passante limitée pour chaque type de capteur et rend son usage propre à un domaine particulier du spectre.

Le type de charge créée dépend du matériau:

- des paires électron-trous pour les isolants et les matériaux faiblement conducteurs
- des électrons ou des trous pour les semi-conducteurs dopés.

Le phénomène de libération de charges est également limité par divers paramètres tels que le rendement quantique (chaque photon ne libère pas une charge).

Le nombre de charges créées par unité de temps est donc:

$$G = \eta (1 - R) \phi$$

$\phi$  étant le flux lumineux en watt,  $\eta$  le rendement et  $R$  le coefficient de réflexion.

Selon la structure du capteur, les électrons donnent naissance à un courant (effet photovoltaïque), à une accumulation de charges, à un effet photoémissif (cas des tubes à vide) ou à un effet photoconducteur.

## Paramètres caractéristiques d'un capteur optique

Pour définir les propriétés d'un capteur, il existe un très grand nombre de paramètres caractéristiques des domaines optique, photométrique et spectral ainsi que des conditions d'emploi.

### Réponse spectrale:

La transformation de l'énergie photonique en énergie électrique se fait dans un matériau photosensible. La nature de ce matériau influe très directement sur la réponse spectrale du capteur.

La figure ci-dessous donne les réponses typiques pour les matériaux usuels.

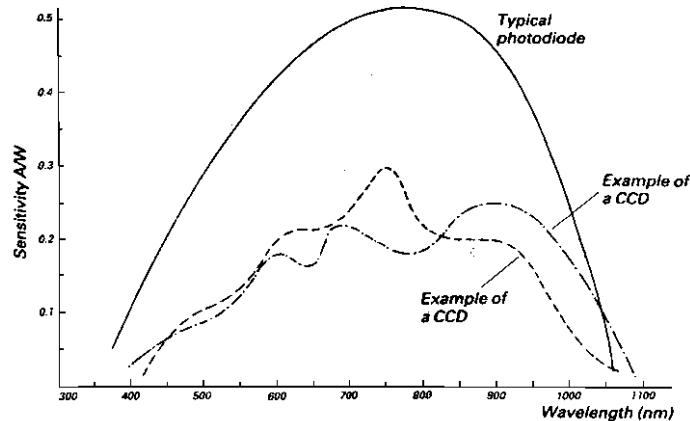


fig 1 - Réponse spectrale des matériaux photosensibles

### Sensibilité spectrale

La sensibilité est le rapport entre le phénomène photonique et le phénomène électrique. La sensibilité étant souvent dépendante de la longueur d'onde, elle s'exprime en fonction de  $\lambda$  :

$$s(\lambda) = \frac{dV(\lambda)}{dj(\lambda)}$$

Ce facteur n'est pas caractéristique à lui seul, l'électronique pouvant amplifier le signal de façon variable (CAG). Il convient donc de préciser les conditions d'éclairement.

Dans le cas où la réponse est linéaire, la sensibilité devient:

$$s(\lambda) = \frac{V(\lambda)}{j(\lambda)}$$

La sensibilité permet de donner la réponse globale  $V$  du capteur en fonction du spectre  $S_s(\lambda)$  de la source, de la réflectance spectrique de la scène  $R(\lambda)$  et des facteurs géométriques (distance, focale, ouverture) :

$$V = \int_{\text{bande spectrale}} [k S(\lambda) R(\lambda) s(\lambda)] d\lambda$$

Il est donc utile d'adapter chacun des éléments à la bande spectrale recherchée.

Le mot sensibilité est plus souvent employé à tort pour désigner le plus petit signal observable donnant une réponse à pleine échelle. La notion d'*observable* est liée à la qualité de l'image obtenue, en particulier au niveau du bruit de mesure. Bien que cette notion soit clairement définie pour les signaux temporels (rapport signal sur bruit S/B souvent exprimé en dB), elle est actuellement encore peu utilisée pour les capteurs optiques car variables suivant les conditions d'emploi du capteur (temps d'exposition, contraste de la source, température, mesure unique ou cumulée, ...).

A titre d'exemple, le tableau ci-dessous donne les sensibilités pour les capteurs d'images les plus courants actuellement (caméras, film photo, systèmes à intensification de lumière et caméra spéciale refroidie)

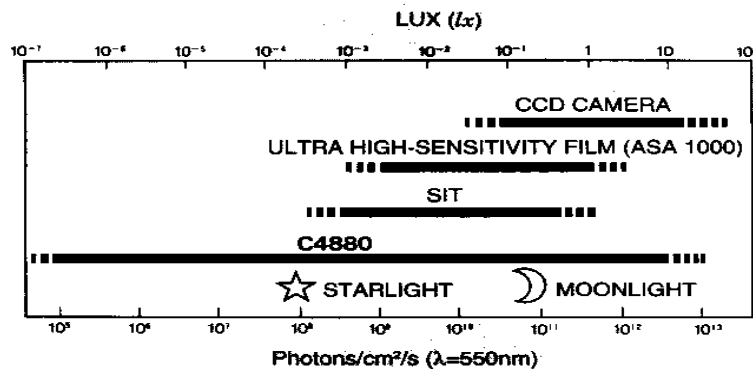


fig2 - Domaines de sensibilité de capteurs usuels

### Linéarité

Le modèle de réponse usuellement recherché est le modèle linéaire. Parmi les erreurs fréquemment rencontrées, on peut citer:

- erreur de zéro dite d'Offset: le signal correspondant au noir n'est pas nul. La compensation est directe par addition d'une constante au signal donné par le capteur placé dans l'obscurité (impossible pour les capteurs infrarouge)

Pour les capteurs multiéléments (CCD/MOS), l'erreur de zéro est propre à chaque élément photosensible. Elle se traduit par une image de *bruit spatial fixe* ou *mosaïque de bruit* particulièrement visible dans les zones sombres. La compensation de cette erreur fait appel à une mémoire de Noir qui peut être propre à chaque pixel (mémoire ligne ou mémoire trame) pour les capteurs de qualité.

- erreur de pleine échelle ou de gain: pour une illumination de référence, on constate que le signal n'a pas la valeur prévue. La compensation se fait par ajustement du gain; pour les capteurs multiéléments, cette compensation se fait par une mémoire de gain étalonnée par mesure d'une image blanche de référence.

- erreur par rapport à la droite idéale passant par zéro ou par rapport à la droite des moindres-carrés ajustée sur la réponse (erreur différentielle).

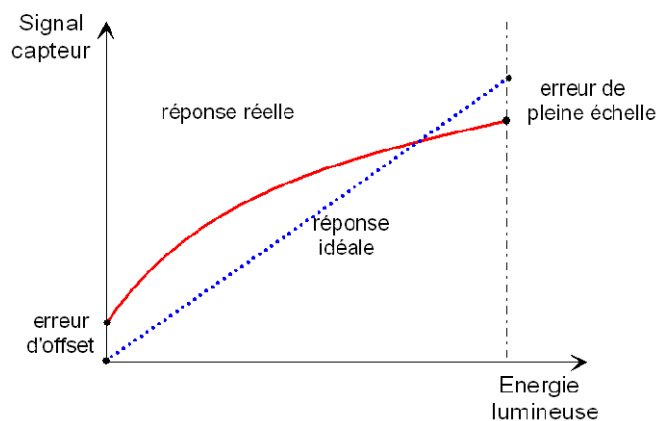


fig3 - Erreur de mesure d'un capteur

### ***Bruit***

Le bruit est un phénomène très fréquent dans les images (effet de *neige*). Il faut distinguer le bruit sur les mesures du bruit spatial fixe déjà évoqué.

Théoriquement, on considère que le bruit est *additif*, à valeur moyenne nulle, non dépendant du niveau gris; il est alors caractérisé par sa *variance*, sa fonction d'autocorrélation. et le spectre fréquentiel en *densité de puissance*. On suppose généralement que c'est un processus stationnaire et ergodique, c'est à dire qu'il a les mêmes caractéristiques pour tous les pixels.

En réalité, le bruit est différent pour chaque pixel; il est dépendant du niveau de gris et sa caractérisation par des statistiques d'ordre 1 est .

Le bruit peut être réduit par divers procédés:

- acquisition répétitive de la même image et intégration des signaux (élimination des bruits à valeur moyenne nulle); l'image doit être fixe pendant la durée de ce processus
- filtrage du signal vidéo par passe-bande; solution incomplète seules les lignes sont filtrées
- filtrage spatial par filtre moyenneur, passe-bas , médian.... Il existe de nombreux inconvénients à la notion de filtrage passe-bas, en particulier la perte de résolution spatiale qui se traduit par un *flou* sur l'image.

### ***Rapport signal sur bruit***

Le rapport signal/bruit s'exprime pour les conditions de mesure optimales, c'est à dire pour une sortie pleine échelle. Le bruit n'étant pas strictement additif, le rapport S/B est à préciser pour diverses conditions de mesures (signal nul, pleine échelle, facteur d'amplification de la CAG).

### ***Dynamique***

La dynamique est le rapport entre le plus grand et le plus signal observables simultanément.; elle est liée à la qualité tolérée pour le plus petit signal, en particulier pour le bruit.

A titre de repère, l'homme possède une dynamique globale de  $10^8$  , en s'adaptant aux scènes à très faible éclairément (0,01 lux ) jusqu'au plein soleil (  $10^6$  lux). Cette dynamique est en partie liée à la présence de l'iris qui limite le flux d'entrée pour les fortes luminosités).

Généralement, les capteurs ont une dynamique plus restreinte que l'oeil (de l'ordre de  $10^3$  soit 60dB).

### ***Vitesse d'acquisition***

La vitesse caractérise le nombre d'images formées par unité de temps.

Deux temps caractérisent la formation de l'image électronique:

- **exposition** des éléments photosensibles aux photons, appelé temps d'*intégration* ou d'*exposition* ; c'est la formation de l'image comme dans le procédé photographique.
- **lecture du signal**, dont la vitesse dépend directement de facteurs technologiques de construction (type de circuit intégré)

Pour de nombreux capteurs, la lecture se fait en temps '*masqué*', l'exposition de l'image suivante se faisant pendant la lecture des pixels de l'image précédente. De plus, il apparaît souvent un couplage entre les deux notions: le temps d'exposition correspond au temps total de lecture.

## Caméras "solides"

Tous les capteurs d'image sont maintenant dits à l'état solide, c'est à dire qu'ils ne comportent aucune pièce mécanique en mouvement ni aucune électronique fragile (tube à vide par exemple). Il s'agit de circuits intégrés présentant sur leur face supérieure des éléments photosensibles, généralement des photodiodes. Elles existent sous la forme barrette ou matrice. Les photodiodes ont la propriété de créer un courant (ou de laisser passer un courant) sous l'action de la lumière.

Le principe de base des capteurs dit "solides" est d'utiliser la propriétés d'apparition de charge électrique sous l'effet d'un photon dans un matériau de type semi-conducteur.

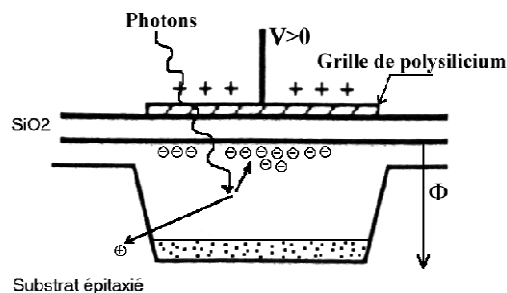


fig 4 - Photoélément MOS

Il existe plusieurs types de caméras solides qui fondamentalement différentes dans leur principe d'exploitation du principe.

L'exploitation directe du courant photovoltaïque est quasi impossible: pour des photo-éléments de taille courante (  $10\mu m \times 10\mu m$  ), le courant n'est pratiquement pas mesurable avec les outils adaptés à la fabrication d'un circuit intégré.

## Intégration de la quantité de lumière:

Afin d'augmenter la sensibilité de chaque élément, on préfère souvent mesurer la quantité de lumière reçue pendant un intervalle de temps (et non la valeur instantanée de l'éclairement au moment de la lecture). Technologiquement, le courant créé par le photo-élément est intégré dans la capacité parasite de la photodiode (ou une capacité auxiliaire). La charge ainsi créée est proportionnelle à la quantité de lumière reçue.

Deux techniques de lecture de la charge accumulée sont en concurrence:

- la lecture directe (capteur CMOS)
- le transfert de charge vers un système de lecture (capteur CCD)

Le cycle de fonctionnement d'un capteur est le suivant:

- intégration (notion équivalente à celui d'*exposition* en photographie)
- lecture *sérielle* ou partiellement *parallèle* des valeurs
- remise à 0 des photoéléments ; cette fonction peut être maintenue active pendant un temps important sur certains capteurs et forme un obturateur électronique ou *electronic shutter* ( le capteur n'intègre pas pendant cette phase)

Selon la technologie, la phase d'intégration est soit globale (même durée et même borne temporelle de l'intégration pour tous les éléments) soit glissante (l'intégration est décalée pour chaque pixel).

## Caméra CMOS

C'est le principe le plus simple: la quantité de charge accumulée est directement évaluée par une connexion temporaire à une ligne de lecture.

La tension aux bornes de chaque élément photosensible est reliée à la charge par la loi  $Q = CV$  avec  $C$  capacité parasite de la jonction. Chaque photodiode est "lue" successivement par un transistor commandé par un registre à décalage logique. Le signal de sortie est un pic de hauteur égale à la variation de tension de chaque élément lors de la lecture, chaque élément se déchargeant lors de sa lecture.

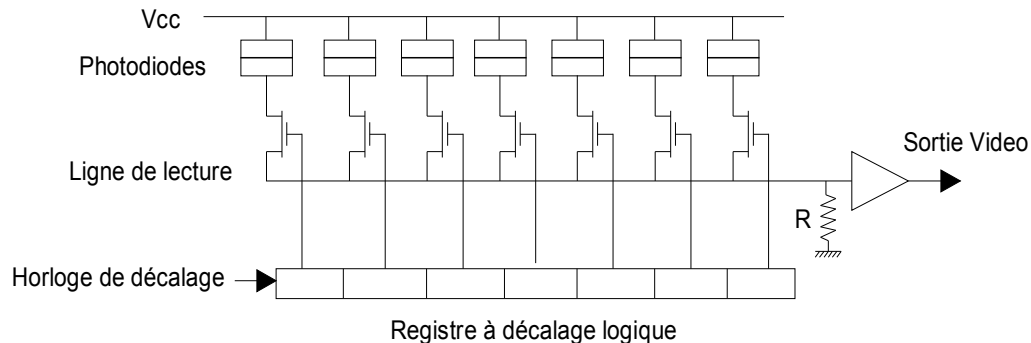


Fig 5 - Principe d'un CMOS

Cette structure est souvent adoptée pour les appareils photographiques, plus rarement pour les caméras industrielles.

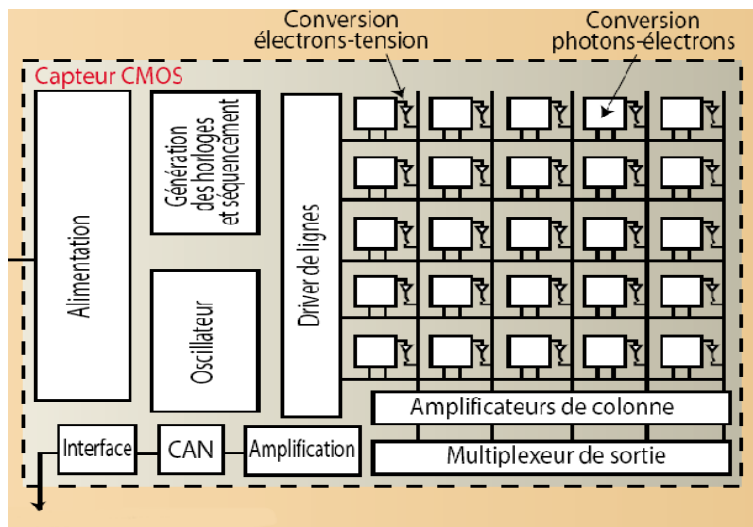


Fig 6 - Structure d'une matrice CMOS

Ce système paraît simple, et présente l'avantage d'une absence de couplage latéral entre les éléments, ainsi qu'un faible niveau de bruit dynamique.

Toutefois le temps d'intégration est défini par la fréquence de balayage de l'ensemble. De plus la fenêtre d'intégration de chaque élément est «glissante», la fenêtre d'intégration d'un pixel étant décalée du temps d'une période d'horloge par rapport à la précédente (déformation des images de scènes dynamiques)

### ROI & Binning,

Certains capteurs CMOS autorisent la lecture selon des modes spécifiques :

- lecture d'une partie de la matrice définie comme *Region Of Interest* . L'intérêt est d'accélérer la lecture qui est limitée à la région (augmentation de la cadence d'acquisition)

- lecture couplée de plusieurs pixels sur une même ligne (2 par 2), en pavé (2x2 ou plus). Le signal est la somme moyennée des signaux individuels, ce qui revient à faire des pavés de plus grande dimension par association de pixels. L'image formée est nativement de moindre résolution, avec une lecture plus rapide.

#### Capteur CMOS logarithmique

Pour améliorer la dynamique du capteur, certains constructeurs proposent de créer une loi de sensibilité logarithmique, en plaçant une charge non linéaire sur l'élément photosensible. Les autres éléments de la structure sont similaires aux capteurs à sensibilité linéaire.

Pour des applications industrielles, le constructeur annonce une dynamique de 120dB pour une fréquence de lecture pixel de 4MHz.

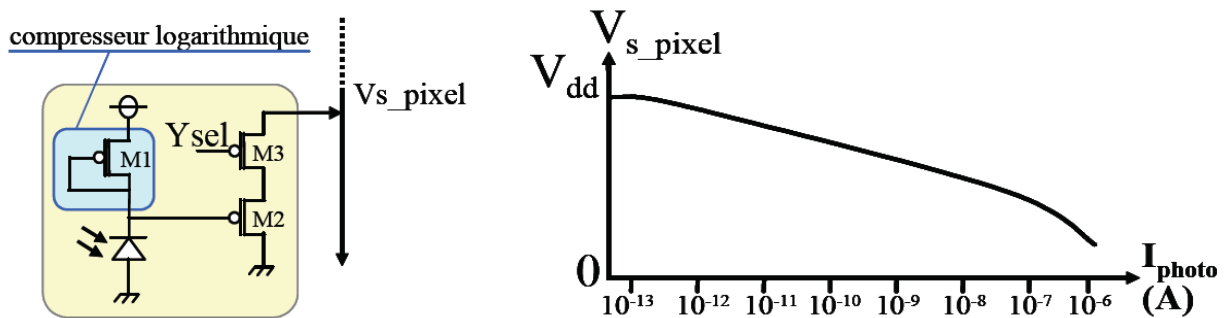


fig 5 - Principe de la matrice Fuga et réponse du capteur

Les principaux défauts viennent de la dispersion de fabrication de chacun des éléments et du bruit direct de mesure qui augmente fortement.

#### Technique CCD:

Dans la technique CCD (Charge Coupled Devices ou Dispositifs à Transfert de Charges), les charges accumulées dans les capacités parasites des photodiodes sont transférées dans un registre à décalage analogique ou registre CCD.

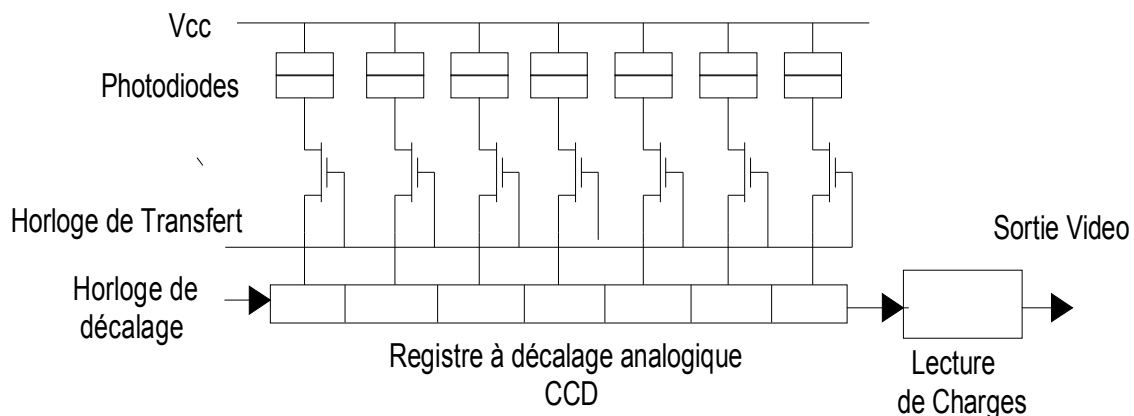


fig 7 - Structure d'un capteur à registre CCD

Les réalisations sont du type linéaire (suite de pixels) ou matricielle.

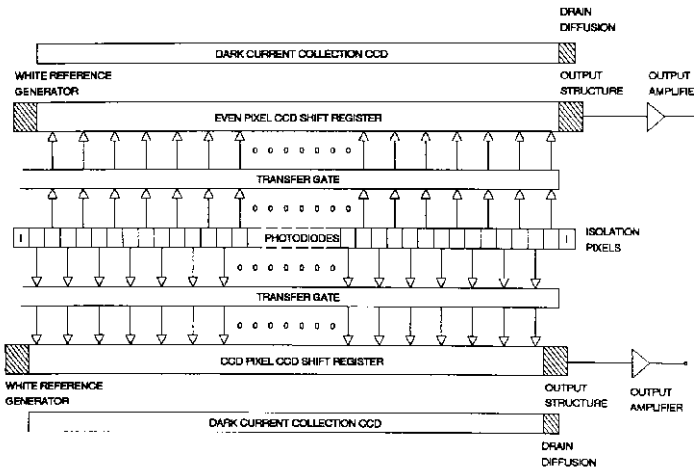
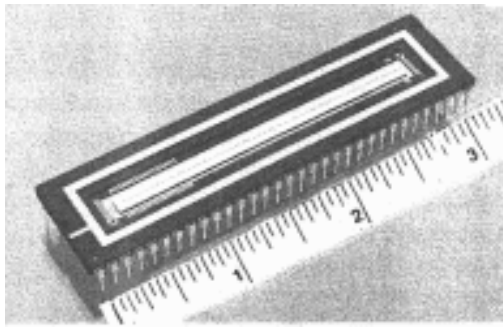


Fig 8 - Camera linéaire 6000 pixels (scanner)

Le *décalage des charges* se fait dans un canal par attraction des paquets de charges par des électrodes convenablement polarisées. Pour obtenir la circulation dans un sens, il faut au moins une structure à 3 phases, voire 4 phases pour une gestion simplifiée des signaux d'horloge. Le transfert se fait progressivement jusqu'à un poste de lecture constitué une capacité qui convertit la charge injectée en tension suivant la loi  $V = \frac{Q}{C}$ . La charge est éliminée du poste de lecture en fin de chaque temps de lecture par un transistor en parallèle sur le condensateur.

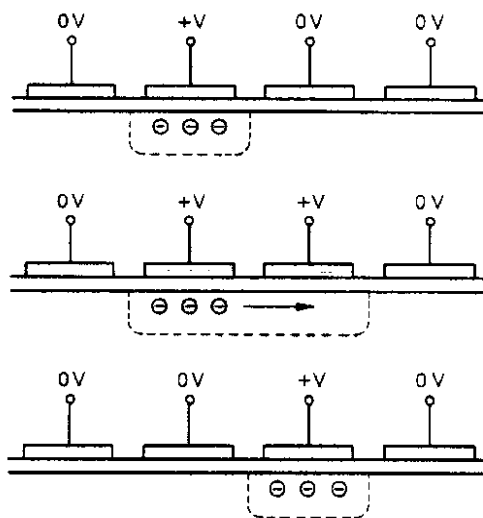


Fig 9 - Principe du décalage de charges dans un registre CCD

#### Capteur CCD à Transfert de Trame:

Pour les capteurs les plus simples, la structure photosensible est constituée par les électrodes de la structure CCD; l'accumulation de charges se fait directement dans le canal, la lecture se faisant alors que l'intégration constitue (pas de *portes de transfert* ni de blocage de l'intégration par «*shutter*»).

Le plus souvent les charges sont envoyées rapidement dans une structure aveugle pour y être lue à plus faible cadence. Ce type de capteur est appelé à *transfert de trame*; ses principaux avantages sont sa sensibilité et ses possibilités d'intégration sur des durées longues (de l'ordre de la seconde à basse température).



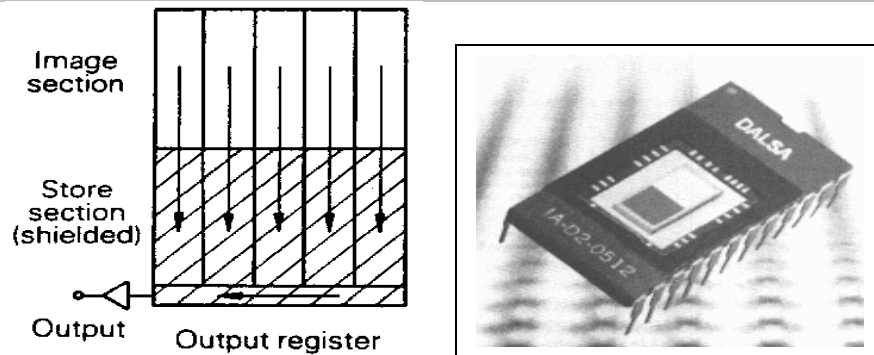


Fig 10 - Capteur CCD à Transfert de Trame

**Capteur CCD Inter-Ligne:**

Pour des usages plus industriels, on isole la fonction photosensible de la fonction lecture par un jeu d'interrupteurs (*Transfert gates*), le chargement du registre CCD devenant parallèle avec lecture série. Il y a donc indépendance entre le temps d'exposition et la vitesse de transfert.

Ceci présente deux avantages

- possibilité de prise de vue du type "flash", c'est à dire" sur un temps très court, ou inversement assez long. Le créneau d'exposition est le même pour tous les éléments, donc pas de déformation des objets en mouvement.
- Vitesse de lecture de registre très élevée (jusque 20MHz), sans aucune modification de la sensibilité.

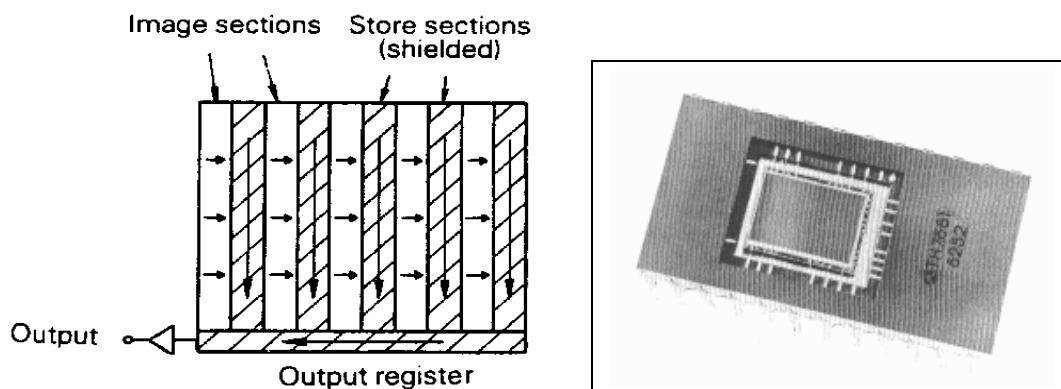


Fig 11 - Capteur CCD Matriciel à Transfert InterLigne

Les principaux défauts pour tous les CCD sont:

- la "fuite" de charges au cours du transfert, malgré un rendement de l'ordre de 99,99% pour chaque décalage, se traduisant par une sensibilité plus forte pour les éléments près de la sortie et un étalement de fronts raides. De plus, l'étalement des charges dans les structures se traduit par une réponse impulsionnelle en forme de gaussienne, ce qui nuit à la qualité de l'image et limite sa résolution spatiale
- la courbe de réponse à l'éclairement de chaque pixel est différente de son voisin. La correction des mesures pixel/pixel est quasi indispensable pour des mesures d'éclairement.- la réponse spectrale qui présente un maximum dans le rouge; la sensibilité restant importante dans l'infrarouge proche (utilisation en faible éclaircissement visible) mais faible dans le bleu.

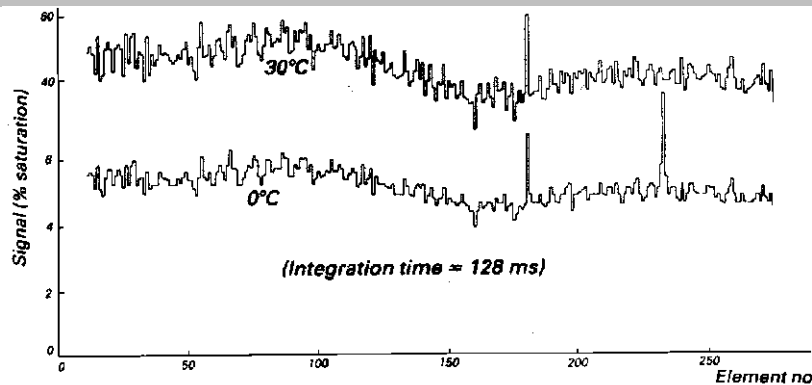


Fig 12 - Exemple de réponse d'un capteur CCD dans le noir avant correction

Les éléments CCD se présentent sous forme ligne (de 256 à 4096 points) ou sous forme matrice comportant davantage de points au fur et à mesure des progrès de la technologie:

- 100x100 Réticon (1978), 576 x 384 pour l'élément Thomson (1980), 580x780 pour les éléments courants voire grand public(1994)
- jusqu'à 2000x2000 dans les applications particulières (hors standard TV)

Les caméras CCD *matricielles* sont à employer là où la stabilité dimensionnelle de l'image est indispensable comme par exemple:

- contrôle dimensionnel
- soustraction d'image point par point, pour éliminer le "fond" de la scène lorsque cela est possible.

Les caméras *linéaires* sont utilisées pour les fortes résolutions. Elles doivent être complétées par un dispositif de balayage transversal, le plus souvent mécanique (translation de l'objet, miroir tournant ou oscillant). Des résolutions de 600dpi (point par pouce) suivant les deux axes sont très courantes. La limitation vient plutôt des moyens de stockage et de traitement des images.

## Conversion analogique numérique du signal

Le signal que fournit le capteur doit être converti en signal numérique, généralement suivant une relation linéaire. Pour les capteurs lents, les convertisseurs classiques peuvent suffire. Pour les signaux vidéos classiques la bande passante de 5Mhz demande un échantillonnage à la cadence de 100nS environ. Peu de techniques sont capables de répondre à une telle vitesse.

- Conversion par approximations successives.

Elle repose classiquement sur un convertisseur D/A et d'un registre logique dit à approximation successives; un seul comparateur n'intervient dans la chaîne de calcul de la valeur de sortie. La précision globale est très bonne et permet d'atteindre 12-14 bits de résolution. Le temps de conversion est directement lié au nombre de bit de résolution; cette technique est souvent limitée à 5MHz, soit 200nS par pixel pour les convertisseurs les plus rapides. Son application est limitée aux caméras linéaires haute-résolution.

- Convertisseur Flash.

Le principe de base est celui du comparateur dont l'une des entrées est reliée à une référence de tension et l'autre à l'entrée vidéo. Pour obtenir n bits en sortie, on met en place  $2^n$  comparateurs reliés à une chaîne potentiométrique constituée de n résistance identiques. La comparaison d'effectue en parallèle (30nS pour des comparateurs classiques) suivie d'un encodage (n circuits classiques  $2^n$  entrées 1 sortie soit 20nS). Le temps total de conversion n'est pas lié à la résolution; le circuit peut être statique

dans certaines réalisation ce qui autorise les accès à vitesse variable.

La précision est directement liée à la chaîne potentiométrique (erreur due au courant dérivé par les entrées de comparateurs et à la précision des résistances) et à la dispersion des offsets de comparateurs. Des réalisations 20Mhz soit 50nS par pixels sur 8 bits sont très courantes.

Fig 14 - Convertisseur Flash

