

Fonctionnement d'une caméra

1) Introduction.....	3
2) Les composants de la caméra.....	3
A) L'objectif.....	3
a) Netteté et aberrations	7
b) Profondeur de champ et mise au point	13
c) Constitution des objectifs	14
d) Séparation des couleurs.....	15
B) Les filtres et la température de couleur	18
C) La balance des blancs.....	20
D) Fonctionnement du capteur	21
a) Principe de fonctionnement d'une cellule.....	23
b) Structure à transfert interligne (CCD IT).....	25
c) Structure à transfert d'image (CCD FT)	31
d) Structure à transfert d'image interligne (CCD FIT)	32
e) Le cas du CMOS	33
f) L'obturateur et le temps d'exposition.....	34
3) Caméscope et Caméra de plateau	34

1) Introduction

La caméra vidéo est l'outil qui permet de capter les images et les sons en transformant la lumière et les signaux acoustiques en messages électriques. Nous détaillerons le rôle des différents composants essentiels qui permettent de faire cette opération (transduction).

2) Les composants de la caméra

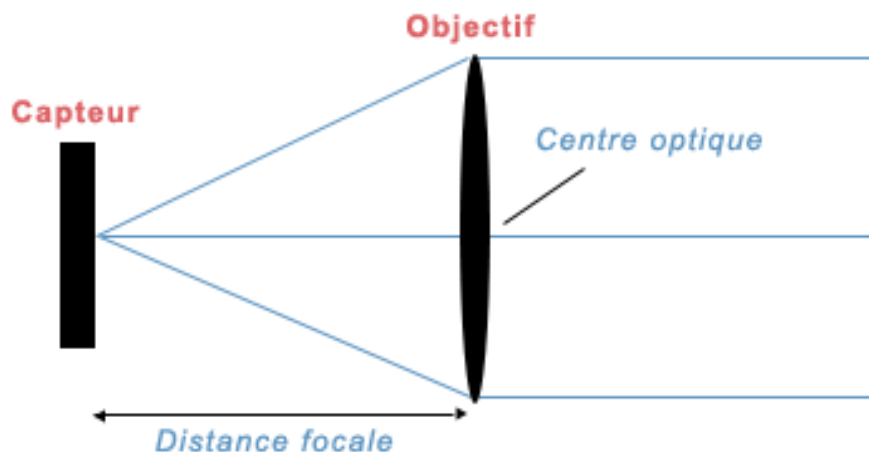
A) L'objectif

De nos jours, la plupart des caméras et tous les caméscopes sont munis d'un objectif à focale variable communément appelé zoom. Il regroupe un certain nombre de lentille grâce auxquelles il sera possible de dévier des rayons lumineux vers le capteur.

Le principal avantage de ce type d'optique est de permettre de changer de focale sans avoir à changer d'objectif. Cependant, dans beaucoup de circonstances les cinéastes préfèrent utiliser des optiques fixes car elles offrent un meilleur piqué.

- **Distance focale**

Un objectif est caractérisé par sa distance focale, distance à laquelle se forme l'image d'un point à l'infini, comptée à partir du plan principal image. Le plan ainsi défini se place à l'intérieur de l'objectif et se déduit de la constitution de ce dernier.

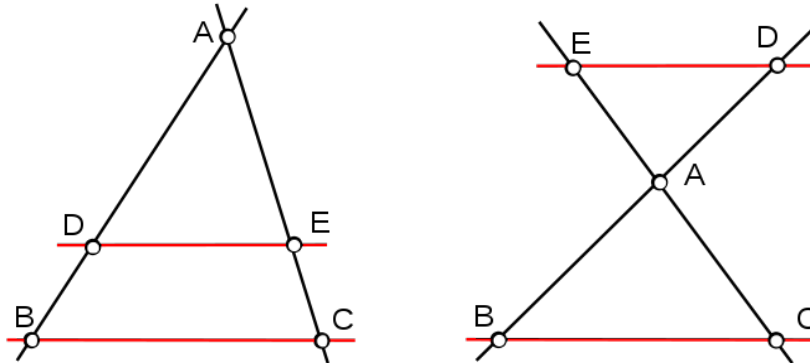


Les objectifs considérés comme « normaux » par une vieille règle de pratique photographique doivent présenter une distance focale égale à la diagonale de l'image enregistrée, ce qui conduirait à une focale de 13 mm pour le film 16 mm. En fait, les objectifs normalement utilisés correspondent à une focale plus longue : 25 mm pour le film 16 mm (28 mm pour le film Super-16). Les objectifs de focale plus courte sont dits grands angulaires et ceux de focale plus longue sont souvent désignés par le terme de télé-objectifs.

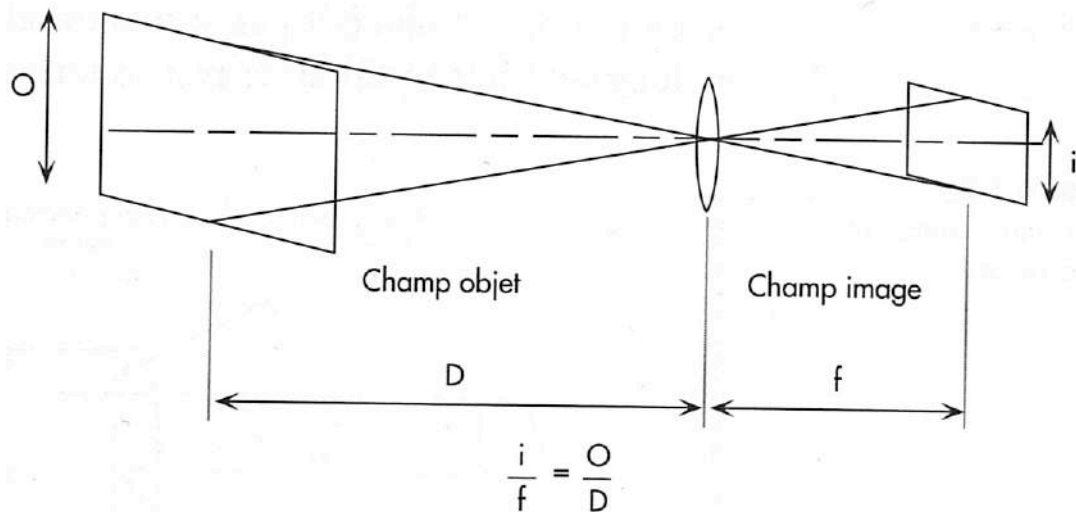
Le théorème de Thalès permet d'établir la correspondance entre la taille de l'objet et de son image formée sur le capteur avec la distance focale et la distance à laquelle se trouve l'objet observé.

Soit un triangle ABC , et deux points D et E des droites (AB) et (AC) de sorte que la droite (DE) soit parallèle à la droite (BC) . On obtient alors:

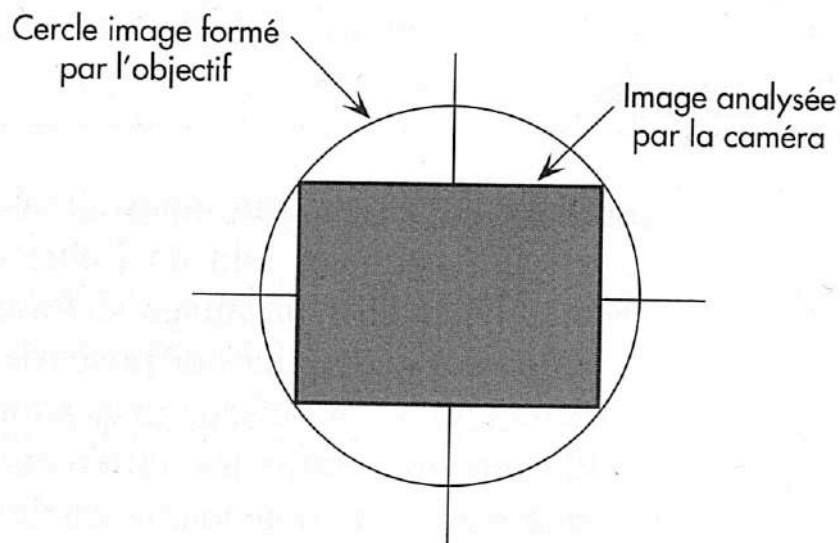
$$\frac{AD}{AB} = \frac{AE}{AC} = \frac{DE}{BC}.$$



En appliquant ceci à un objectif, on trouve:



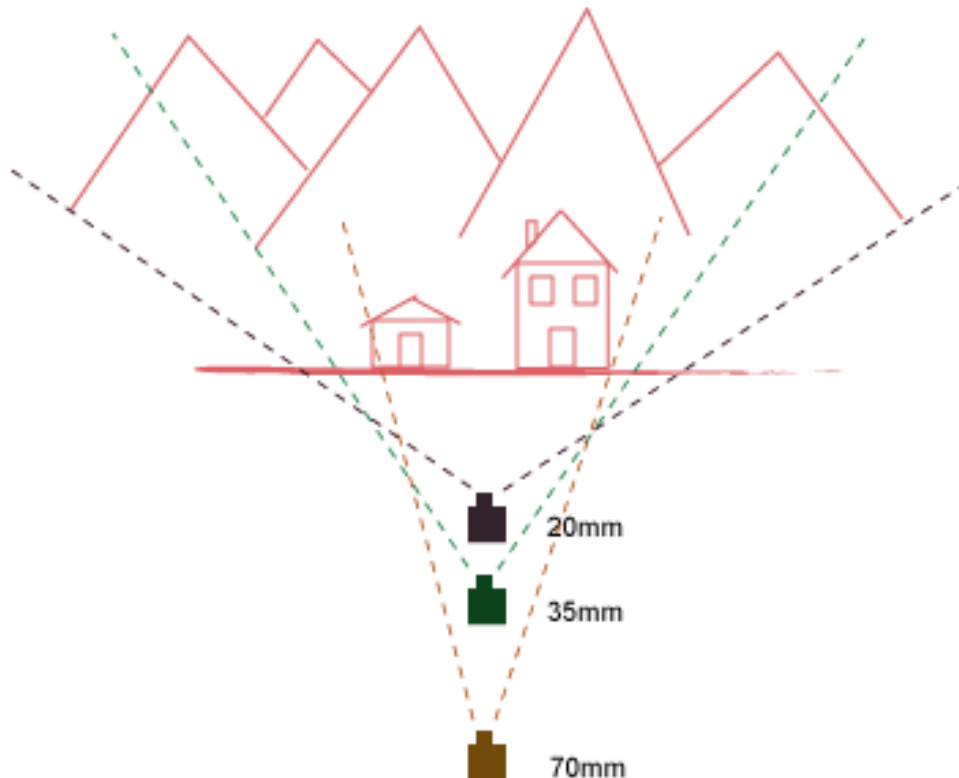
L'image formée sur le capteur sera donc circulaire (comme le système optique):



- **Champ d'un objectif**

Le champ d'un objectif est l'angle qui correspond à l'ouverture des rayons extrêmes admis par le système. De façon pratique, on considère simplement le champ utile qui résulte directement du format d'image et de la focale de l'objectif. La valeur de ce champ se calcule aisément en fonction de la diagonale de l'image et de la focale de l'objectif.

Par exemple : un objectif de 15 mm présente un angle de champ de 45° en format Super-16 et se trouve classé comme grand angulaire, alors que le même objectif n'a plus qu'un champ de 25° en Super-8.



Quelques exemples, les valeurs de focales sont les valeurs équivalentes en 35mm. :

- Focale de 28mm : Il s'agit là d'un grand angle puisqu'il couvre 75°. On se sert de ce type de focale pour des panoramas, des photographies de paysage ou de reportage. Les perspectives sont intéressantes (attention quand même aux déformations) et la profondeur de champ est garantie.
- Focale de 35mm : C'est une focale parfaite pour les photos pour lesquelles vous n'avez pas assez de recul et les photos de groupe par exemple. Son angle de champ est de 63°. Les perspectives sont donc moins flagrantes qu'avec un 28mm mais il y a moins de risques de déformations et de vignettage.
- Focale de 50mm : C'est la focale classique qui correspond à peu près à la vision humaine avec un angle de champ de 47°.
- Focale de 90mm : Le champ couvert par cette focale est de 27°. On l'utilise donc pour des portraits, des gros plans, des détails dans un paysage par exemple. La profondeur de champ est alors plus réduite que les focales précédentes.
- Focale de 135mm : Cette focale couvre 18°. On l'utilise donc pour des photographies d'objets relativement éloignés.
- Focale de 200mm : Ce téléobjectif donne un champ serré de 12°, la profondeur de champ est alors très faible. Une focale de 200mm peut être utile pour isoler et faire un très gros plan sur un sujet.

- **Ouverture relative**

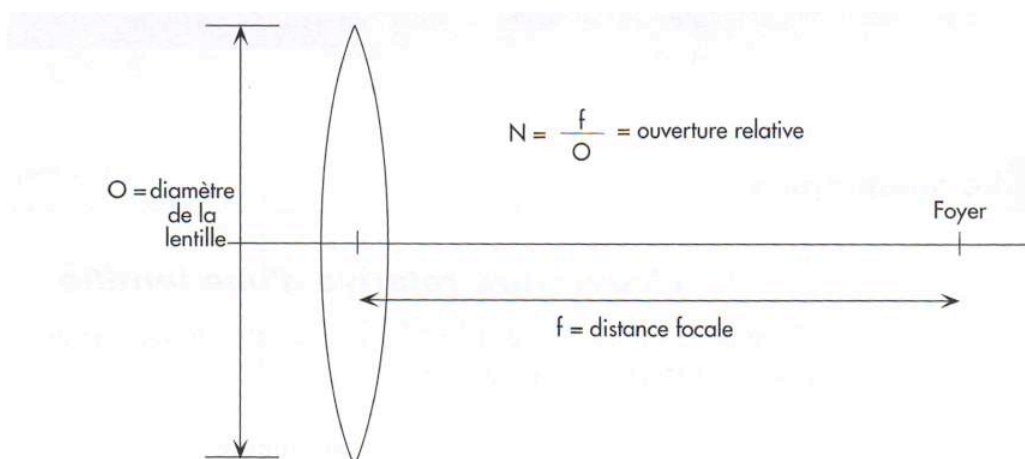
Les objectifs comportent tous un diaphragme réglant l'éclairement de l'image par modification de l'ouverture relative. On peut considérer que les rayons lumineux qui pénétreront jusqu'au film sont ceux qui s'appuieront sur le bord du diaphragme : or ces rayons auront déjà subi une réfraction à travers la lentille antérieure, si bien qu'ils correspondront à des rayons initiaux s'appuyant sur le bord de l'image du diaphragme dans la première lentille : cette image s'appelle la pupille d'entrée de l'objectif et l'on désigne son diamètre par la notation f/n .

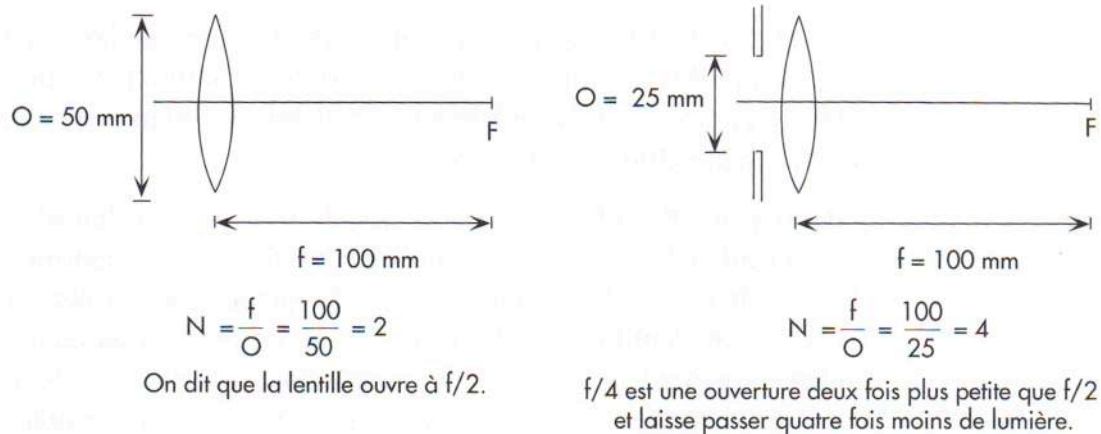


Un calcul photométrique montre que l'éclairement de l'image formé par un objectif est inversement proportionnel au carré du coefficient n ; on graduera donc le diaphragme en chiffres croissants selon une progression géométrique de raison $\sqrt{2} = 1,414...$ soit 1,4 - 2 - 2,8 - 4 - 5,6 - 8 - 11 - 16.

L'éclairement étant divisé par deux à chaque fois que l'on passe d'une ouverture à celle immédiatement supérieure.

Une lentille de diamètre 100 mm et de focale 200 mm ouvre à $f/2$. (grande ouverture) Si on passe le diamètre à 50 mm, on ouvre à $f/4$. (4 fois moins de lumière). Le diaphragme d'une lentille permet réduire le diamètre de la lentille (donc de laisser passer moins de lumière).





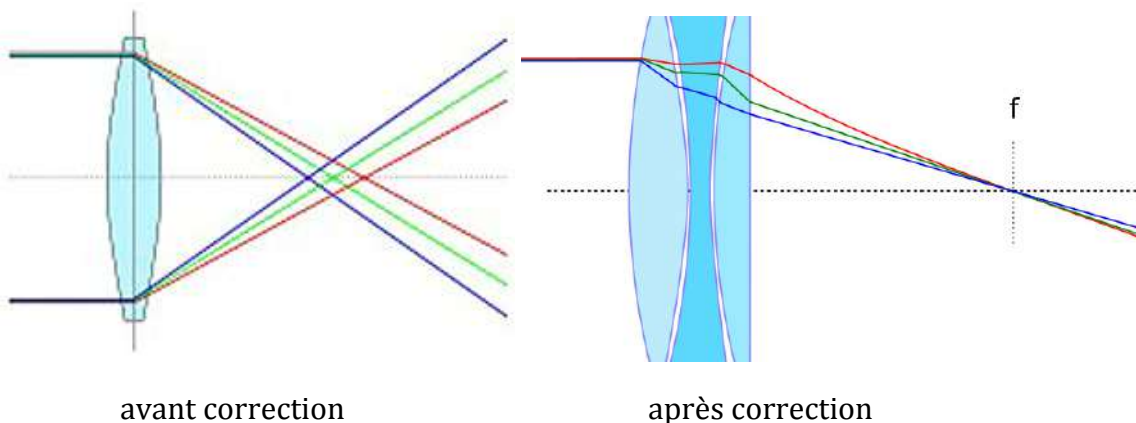
a) Netteté et aberrations

Les objectifs des caméras doivent être optiquement conçus de façon à donner de tout point une image aussi ponctuelle que possible. Mais en réalité de nombreux problèmes subsistent.

- **Les aberrations chromatiques**

On constate que les radiations de courte longueur d'onde (bleu) convergent plus près de la lentille que les radiations de longueurs d'onde plus élevées (vert et rouge). L'image rouge se forme sur un plan plus éloigné de l'objectif que l'image verte ou bleue.

C'est ce que l'on appelle l'aberration chromatique longitudinale (ou de dite de position) elle se traduit par un manque de contraste sur les détails fins d'une image vidéo (en couleurs comme en N&B).



Ce défaut s'accroît en augmentant la focale. Il est réduit aux faibles ouvertures.

On constate que la taille de l'image varie avec la longueur d'onde. En effet l'image rouge est plus grande que l'image verte et que l'image bleue. La conséquence est alors l'apparition sur l'image vidéo de franges colorées sur certains contours et en particulier sur les bords du cadre.

Ce phénomène augmente avec le zoom et le diaphragme n'a ici aucune influence.

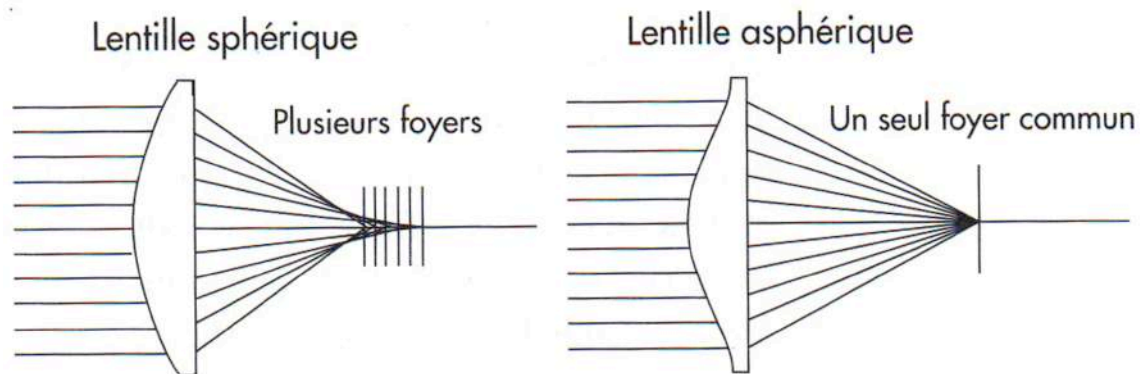
Les aberrations chromatiques sont dues au fait que les lentilles ne dévient pas de la même façon les rayons lumineux en fonction de leur longueur d'onde. Cela se traduit par un manque de piqué sur les détails fins et des irisations colorées sur certains contours.

Il existe également des aberrations dites géométriques déformant les images :

- **L'aberration sphérique**

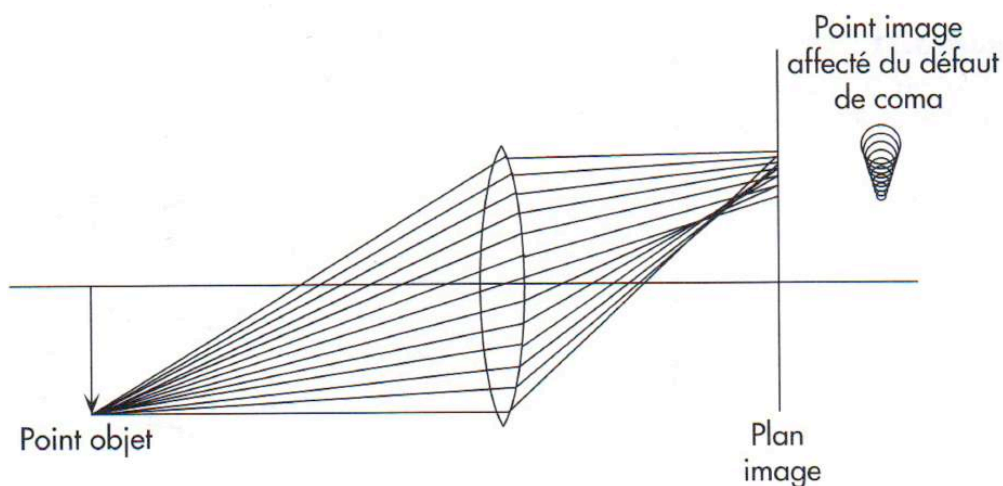
Les rayons qui traversent une lentille ne convergent pas tous au même point, il y a en réalité un étalement des foyers de convergence. Les rayons les plus éloignés de l'axe optique convergent plus près de la lentille (car la surface qu'ils traversent est plus inclinée). Ainsi, au centre de l'image, un point est entouré d'un halo flou comme une tâche. Cette erreur disparaît quand on ferme le diaphragme car les rayons périphériques ne traversent plus la lentille.

On peut corriger cette erreur en accolant une lentille divergente qui dévie les rayons extrêmes. En pratique on utilise le plus souvent une lentille asphérique.



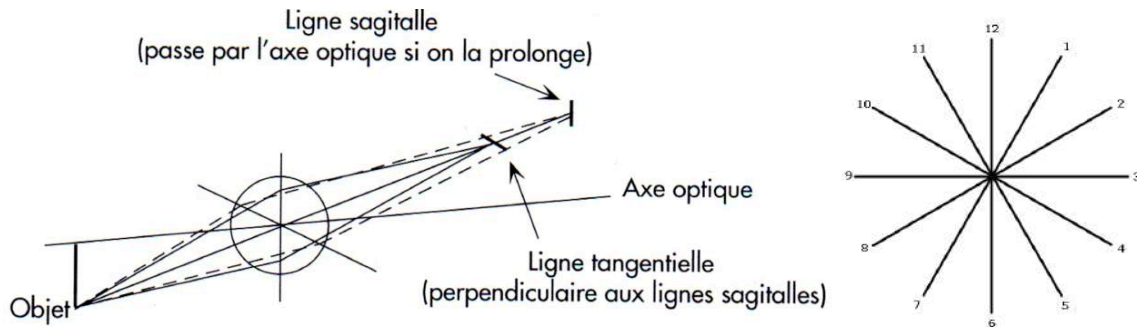
- **L'aberration de coma**

Cela correspond à l'aberration sphérique pour les rayons obliques. Un point devient une série de cercles disposés en cône (vers l'intérieur ou l'extérieur). Cette erreur diminue aussi avec la fermeture du diaphragme. Ce défaut est responsable d'une chute de contraste sur les bords de l'image. Un objectif corrigé pour l'aberration sphérique et la coma est dit aplanétique.



- **L'astigmatisme**

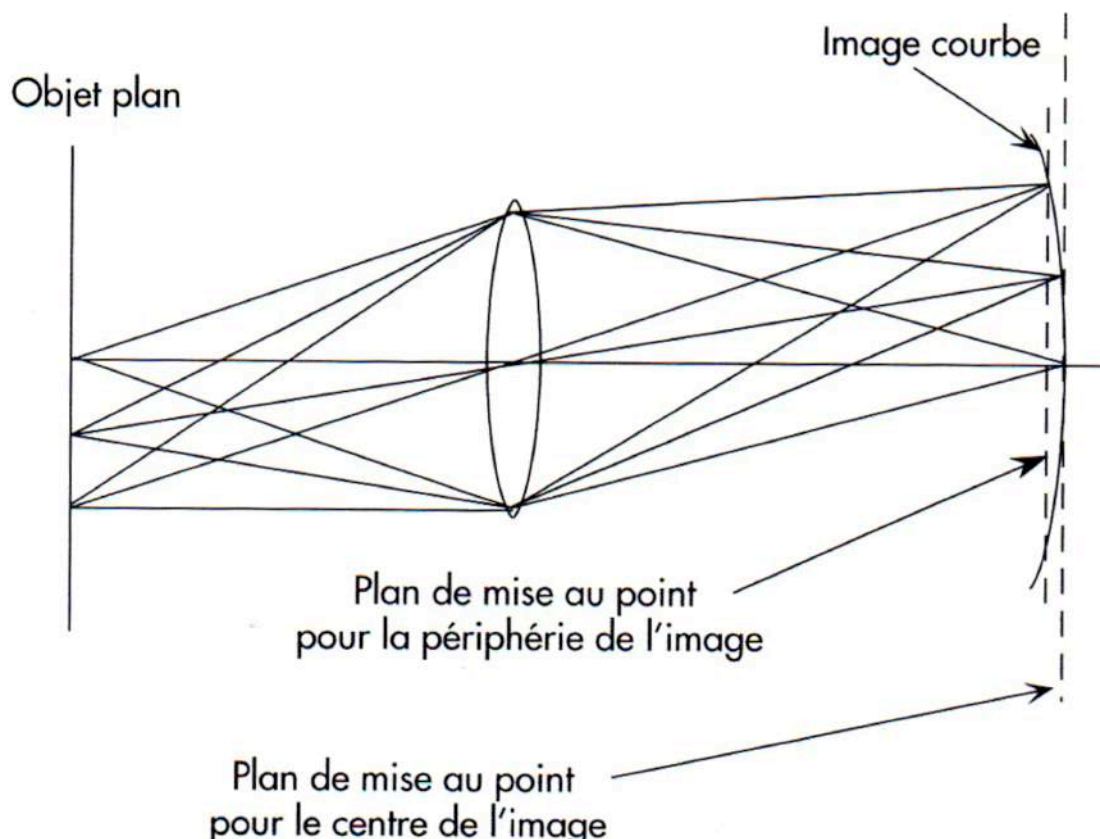
Cette erreur se traduit par une différence de netteté entre les lignes horizontales et verticales d'un même objet du fait d'une focalisation sur deux plans différents. Elle est causée par une lentille non sphérique. L'astigmatisme se réduit en fermant le diaphragme (profondeur de champ élevée) mais est toujours présent. L'astigmatisme est toujours accompagné du défaut de coma



- **La courbure de champ**

On a admis jusqu'à présent qu'en théorie l'image d'un plan est un plan. En réalité l'image se forme sur un plan courbe. On ne peut donc jamais avoir de mise au point parfaite entre le centre et la périphérie de l'image

Ce défaut diminue avec la fermeture du diaphragme (profondeur de champ élevée)

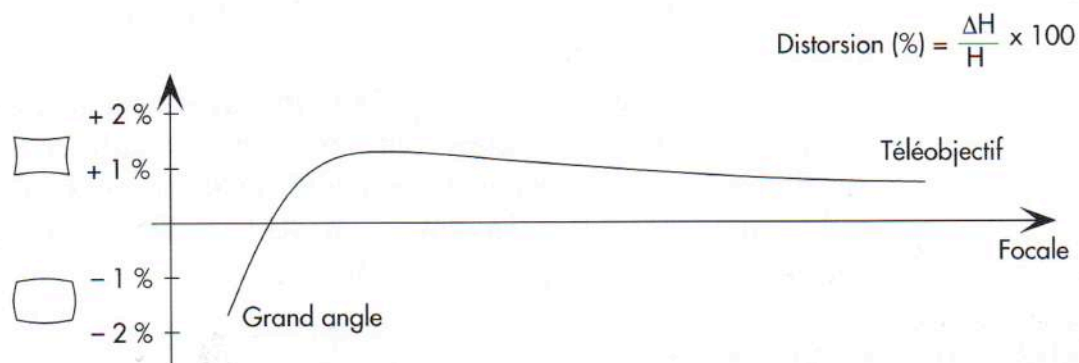
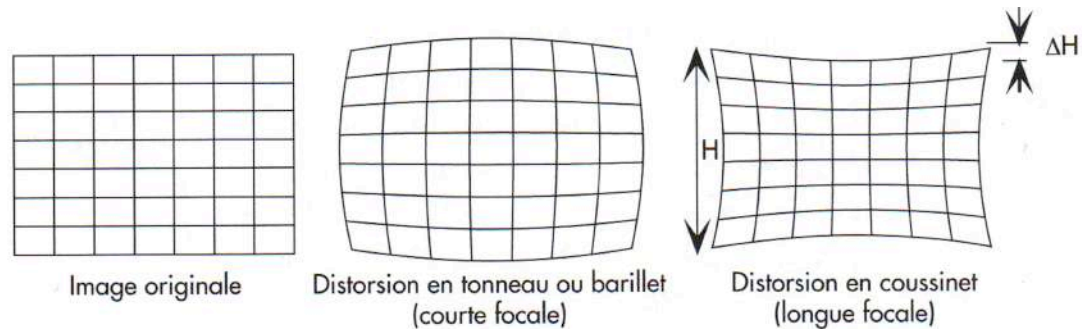


- **Le défaut de distorsion**

C'est le défaut le plus visible car il affecte toute la forme de l'image en courbant les lignes droites.

- En focale courte (grand angle) on aura une distorsion en tonneau ou barillet
- En focale longue (téléobjectif) une distorsion en coussinet

La lentille ne forme pas l'image des rayons centraux et obliques à la même distance. Les différentes parties de l'image sont ainsi agrandies dans des proportions différentes.



Poussé à l'extrême dans le cas du focale courte, c'est l'exemple du fish-eye :



- **Diffraction de la lumière**

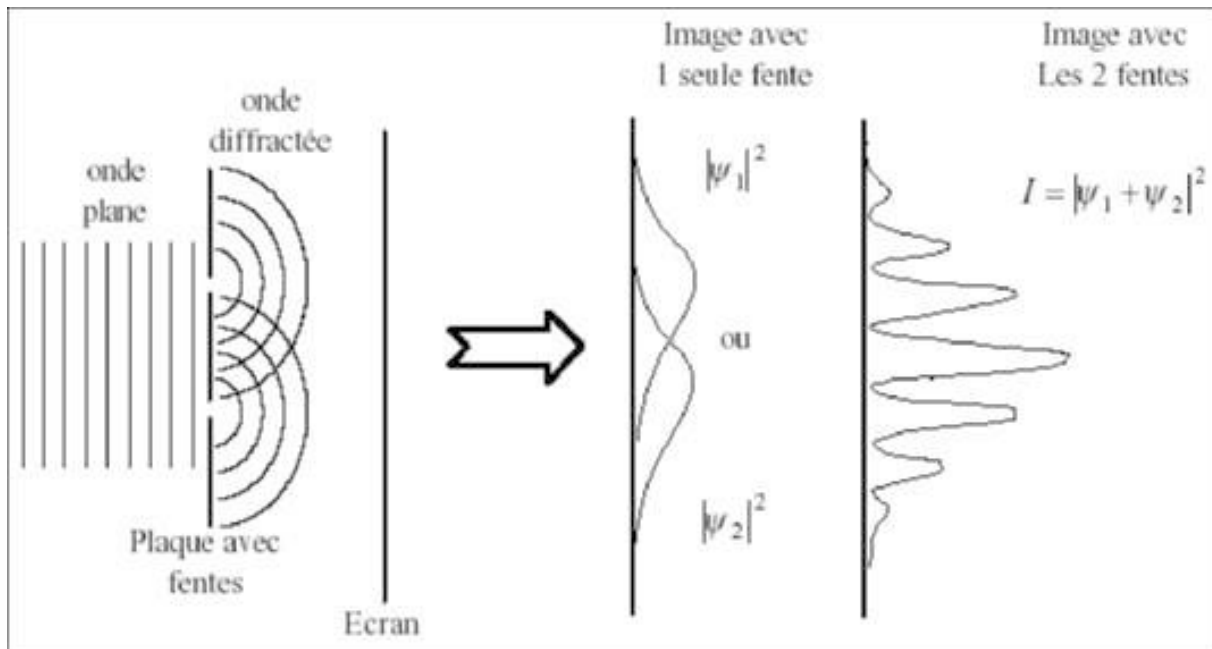
Si un faisceau lumineux traverse une fente, le faisceau qui en ressort est d'autant plus divergent que la fente est petite. La lumière se propage en dehors du faisceau délimité par l'ouverture. On constate que l'image d'une source ponctuelle très fine est une petite tâche entourée d'anneaux.



Plus la fente est étroite plus cette tache de diffraction est grande.

Ce phénomène a été mis en évidence par l'expérience des fentes d'Young qui montre que :

- la lumière est un phénomène ondulatoire
- une source lumineuse émet ou réfléchit des ondes qui provoquent des interférences
- ces interférences sont soit constructives (en phase) soit destructives (hors phase)

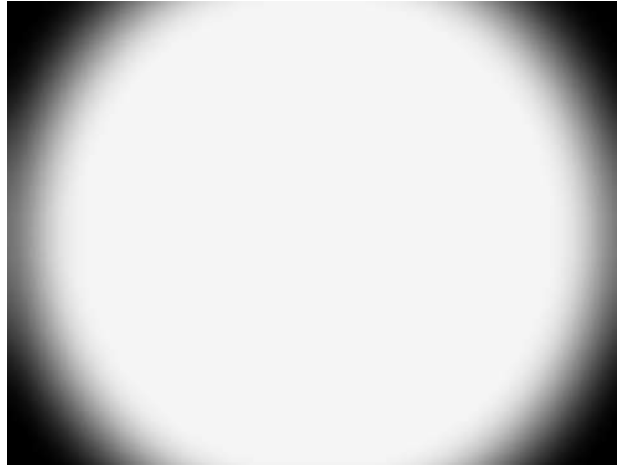


Ce défaut est donc accentué pas la fermeture du diaphragme.

- **Le vignettage**

C'est un problème de distribution et de couverture de la lumière pour les rayons les plus obliques. Ces rayons n'arrivent pas jusqu'au plan de formation de l'image (à cause du diamètre fini des lentilles, de l'iris et des montures).

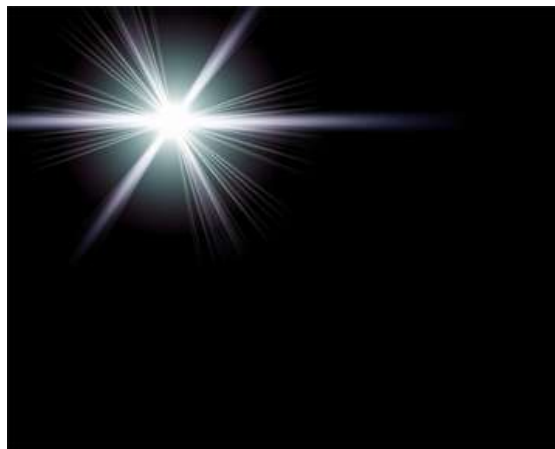
Plus on ferme le diaphragme plus le vignettage est réduit.



Un autre facteur est responsable de la non uniformité de la répartition de la lumière, c'est la loi du cosinus puissance 4. L'éclairement sur la surface photosensible diminue proportionnellement au cosinus puissance 4 de l'angle de champ. Le défaut est donc accentué en grand angle et réduit en téléobjectif

- **Le flare (diffusion optique)**

Ce défaut est dû au parasitage de la lumière dans l'objectif. On constate une perte de contraste dans l'image (réhaussement du niveau de noir et apparition de taches colorées) . Il est corrigé de manière électrique dans la caméra de façon à obtenir un niveau de noir constant.



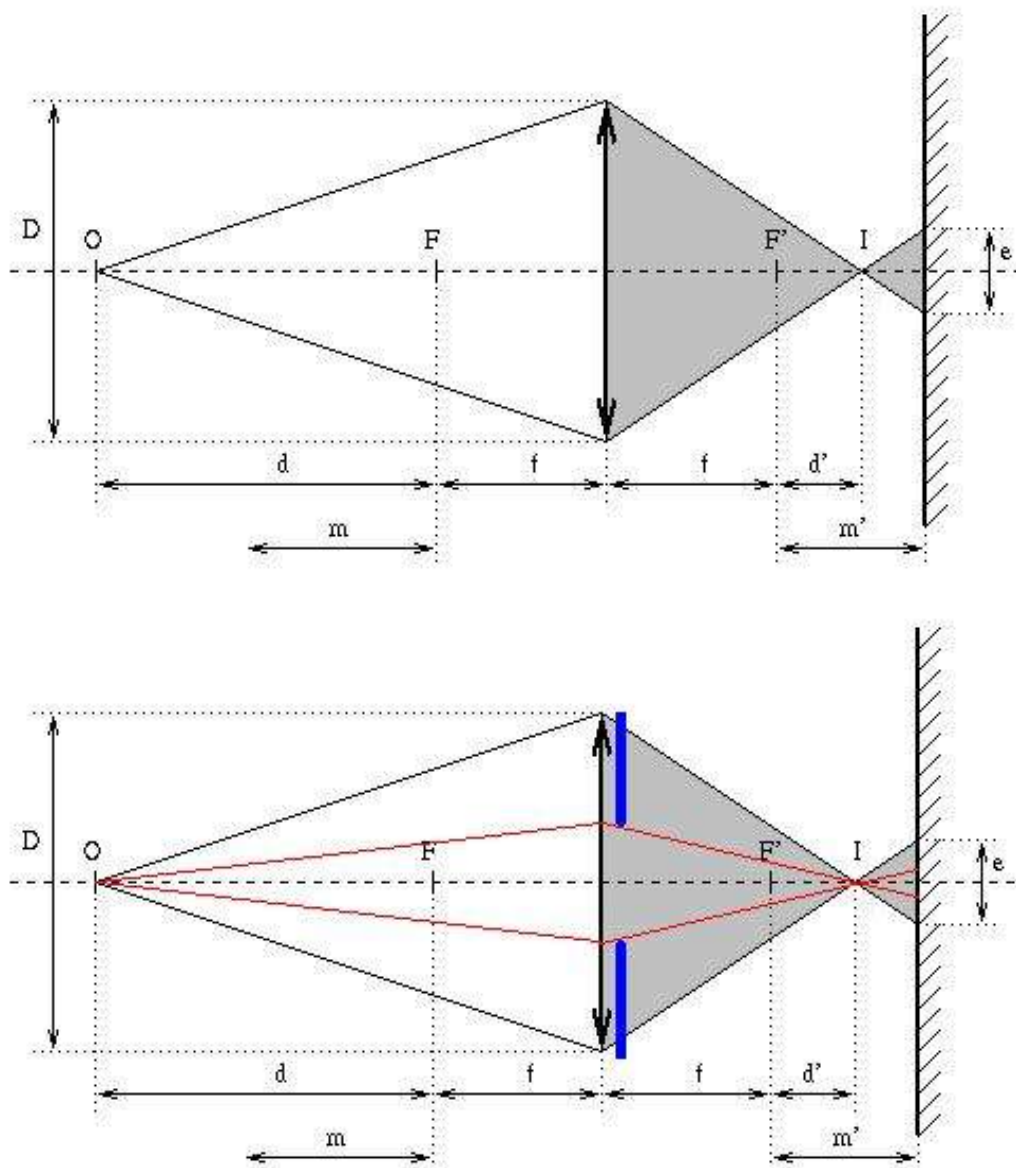
b) Profondeur de champ et mise au point

Étant donné un sujet ponctuel placé à l'infini, l'objectif en donne dans le plan focal une image qui peut être assimilée à un point. Les rayons lumineux formant cette image définissent un cône ayant pour sommet le point et s'appuyant sur le cercle d'ouverture utile de l'objectif.

Or l'œil perçoit quand même comme un point le cercle de très petit diamètre qui se forme si l'image ponctuelle réelle est un peu en arrière du plan focal image. En dessous d'un certain seuil de tolérance, l'image sera perçue comme net.

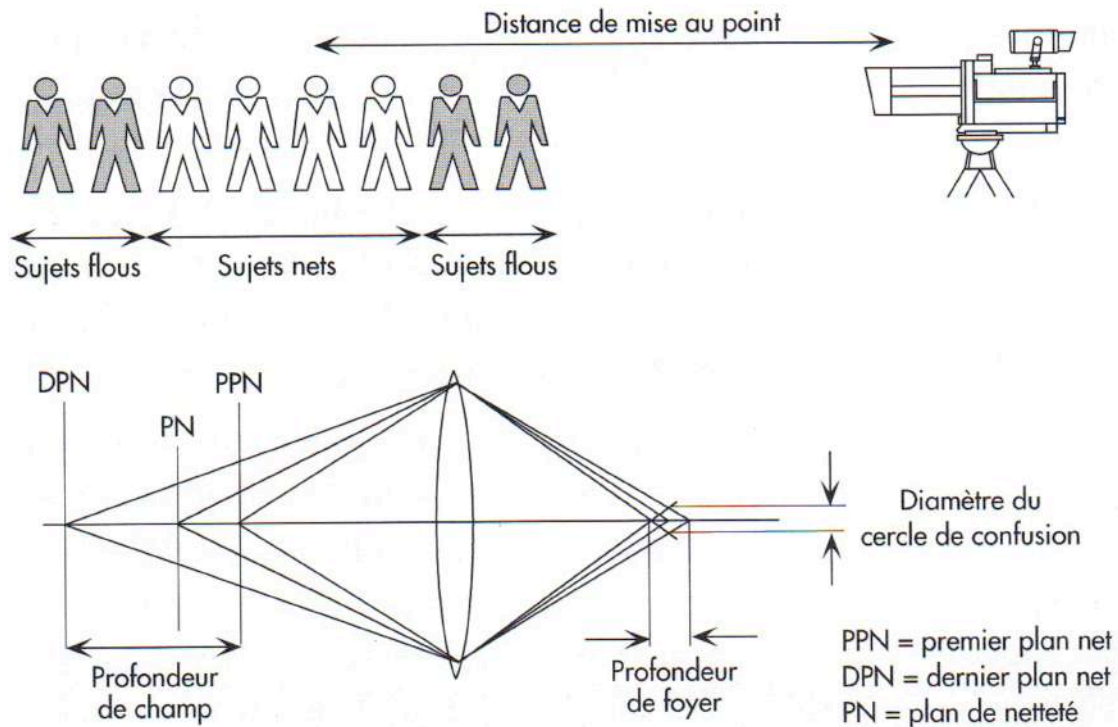
On appelle hyperfocale la distance la plus courte à laquelle un sujet sera net lorsque la mise au point est réalisée sur l'infini.

On peut remarquer que la profondeur de champ augmente lorsque l'ouverture du diaphragme diminue :



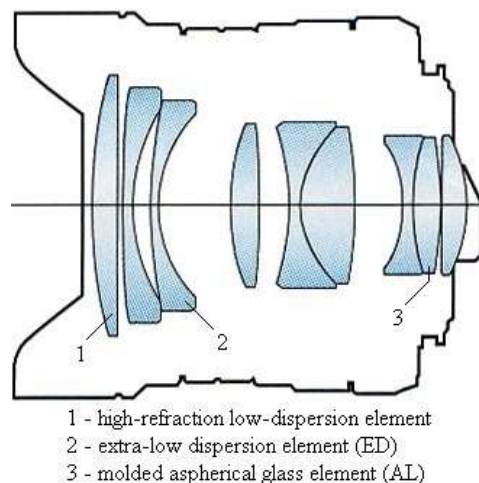
Ces schémas montrent qu'avec une ouverture réduite, le diamètre du cercle de diffusion diminue. C'est pour cette raison que l'on recommande d'utiliser une plus grande ouverture à ceux qui veulent diminuer la profondeur de champ afin de décoller le sujet du décor qui se trouve derrière.

Pour avoir une faible profondeur de champ, il faut donc une longue focale et une grande ouverture de diaphragme.

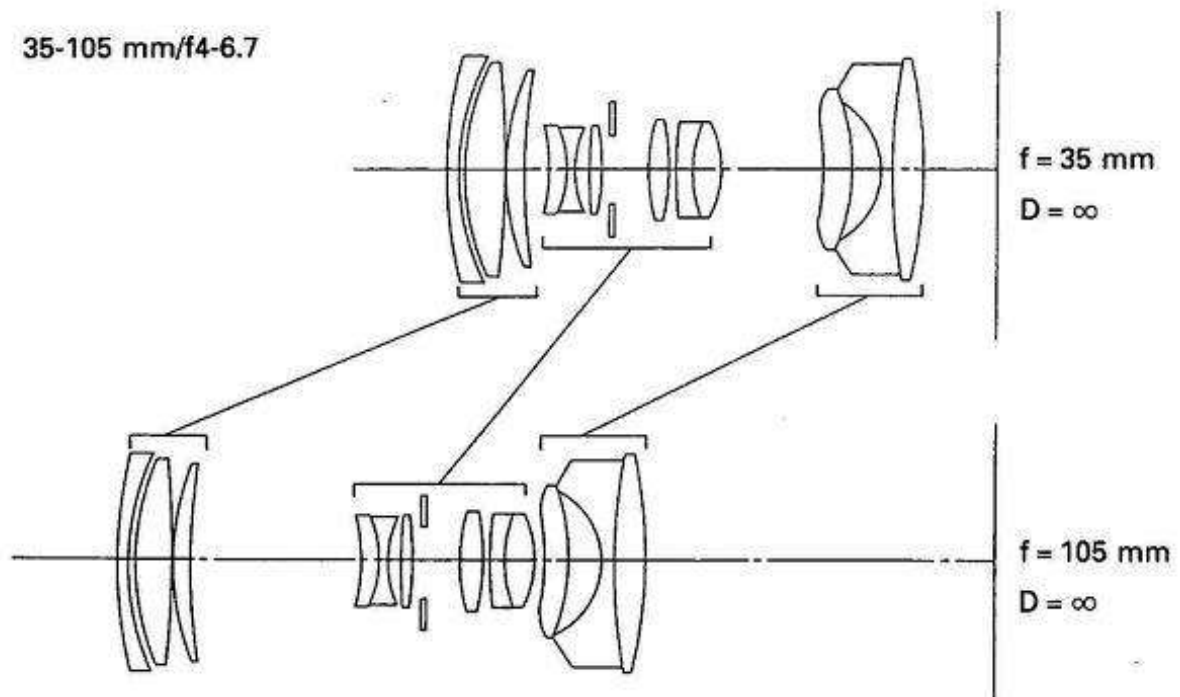


c) Constitution des objectifs

Les montures d'objectifs sont constituées par un assemblage vissé d'un grand nombre de pièces métalliques filetées avec précision. Sur les montures de objectifs de cinéma se trouvent des bagues graduées permettant de commander le diaphragme à iris, la mise au point et les mouvements des lentilles internes pour les zooms.



La précision doit être encore plus grande pour les objectifs à focale variable (zooms) car un groupe de lentilles doit se déplacer à l'intérieur, sans le moindre jeu. Le schéma ci-dessous montre le principe de ces optiques particulières :



La variation de focale est assurée par la translation des lentilles sur l'axe optique. On remarque aussi le mouvement correcteur exécuté par l'élément antérieur.

Certains zooms de grande marque comprennent un nombre beaucoup plus important de lentilles pour corriger toutes les aberrations.

d) Séparation des couleurs

L'image formée par l'objectif est projetée sur un autre élément optique, celui-ci intégré à la caméra, appelé « séparateur optique » ou « séparateur dichroïque ». Il s'agit d'un dispositif d'aiguillage et de filtrage de la lumière, qui achemine vers les capteurs CCD les parties du spectre lumineux correspondant aux trois images primaires rouge, verte et bleue.

Ces images seront alors converties en trois signaux électriques qui traverseront en parallèle tous les circuits de traitement et de corrections de la caméra. Le séparateur optique est constitué de miroirs, de miroirs semi-transparents, de miroirs dichroïques, et de filtres colorés.

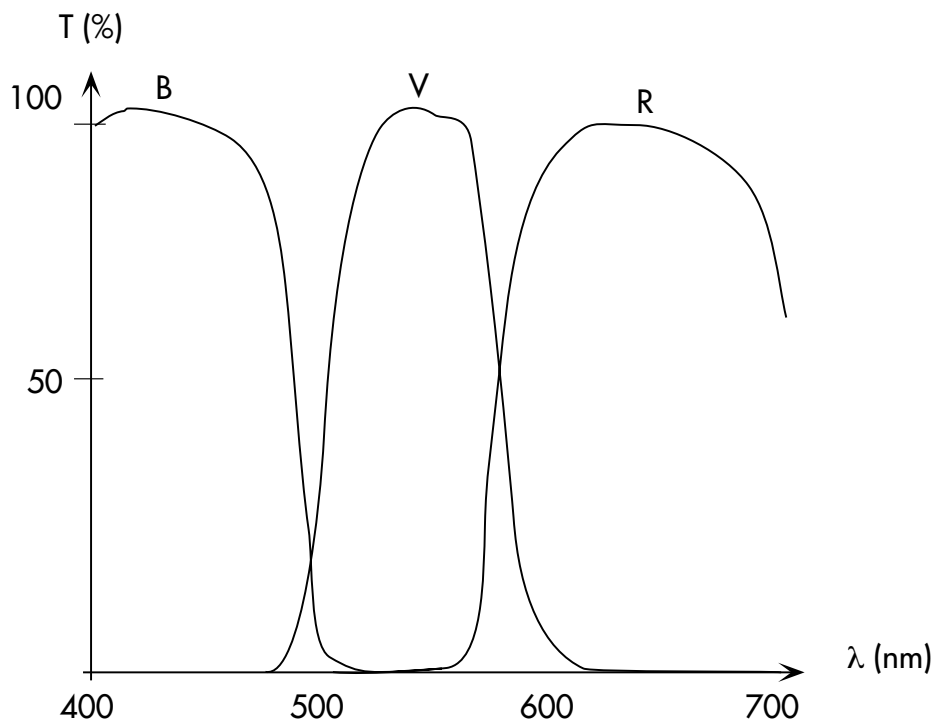
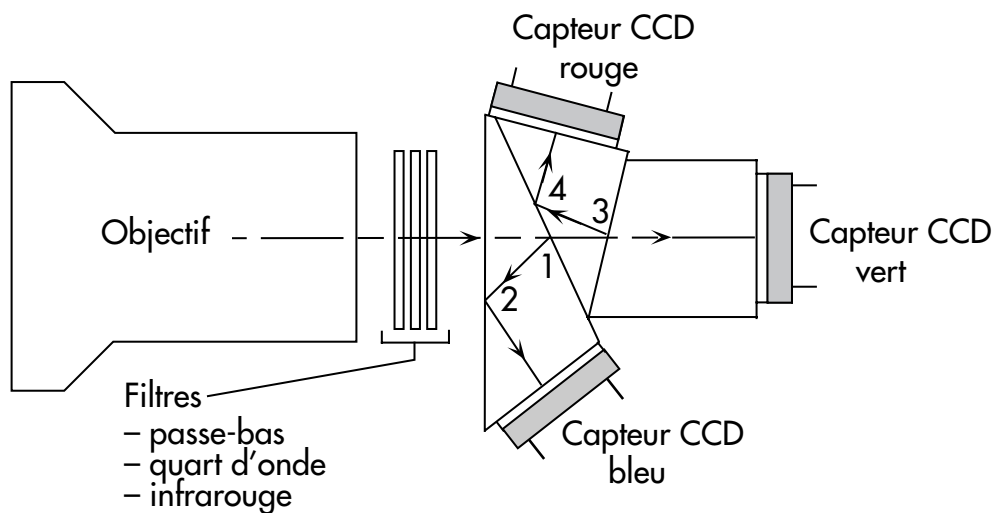
Les rayons lumineux issus de l'objectif pénètrent dans le premier prisme, qui possède une couche dichroïque (1) ne réfléchissant que les rayons bleus.

Ces derniers frappent ensuite une seconde surface (2), totalement réfléchissante, qui les envoie vers la surface sensible du capteur CCD de la voie bleue.

Les rayons rouges et verts passent, quant à eux, au travers de la couche dichroïque bleue, et entrent dans le second prisme. Seuls les rayons rouges sont réfléchis en (3), puis en (4), avant d'atteindre leur capteur.

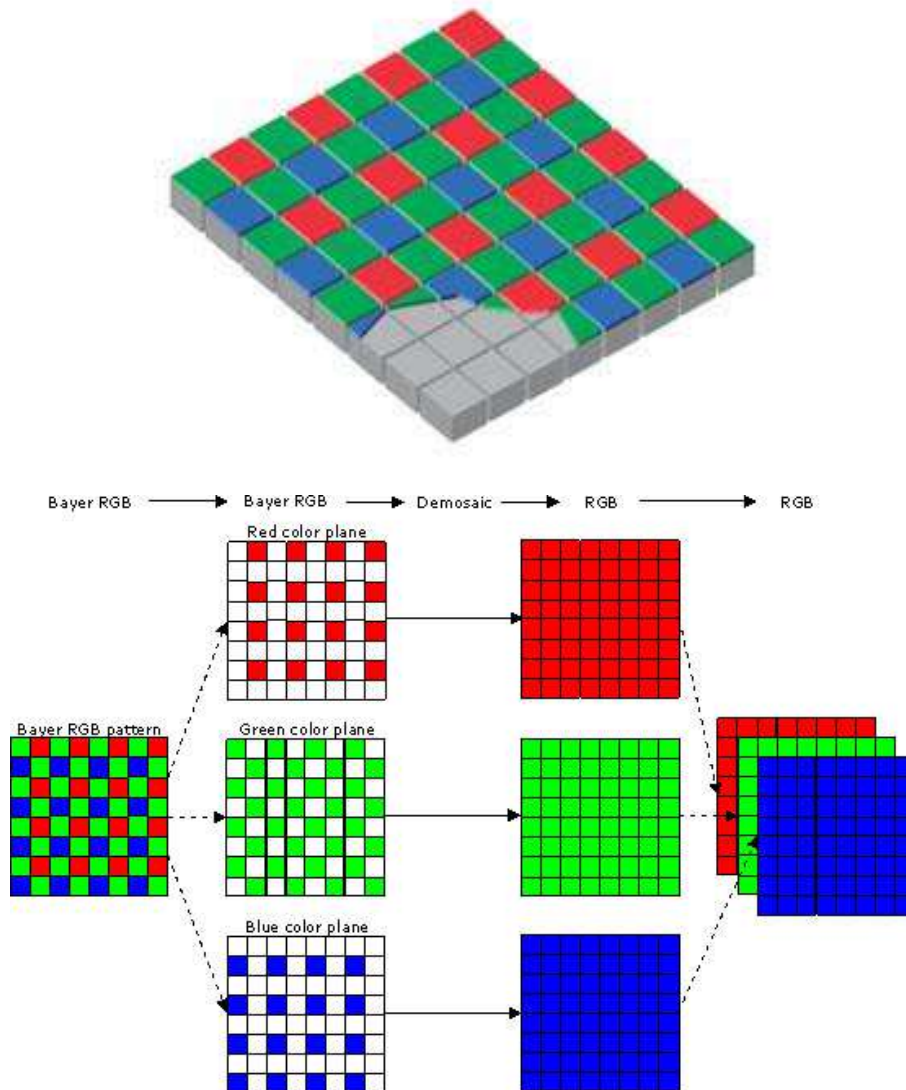
Les rayons verts poursuivent leur trajectoire rectiligne jusqu'au capteur CCD de la voie verte.

Trois filtres de couleur sont placés en sortie de chaque prisme du séparateur. Ils sont chargés d'éliminer le faible pourcentage de rayons résiduels ayant malgré tout été réfléchis par les couches dichroïques censées les transmettre, et qui se sont mélangés avec la couleur de chaque canal.



Pour des raisons de simplicité et d'économie, les caméscopes grand public ne sont équipés que d'un seul capteur CCD ; ils sont dits « mono-CCD », les caméscopes broadcast étant le plus souvent « tri-CCD ».

La séparation des couleurs est alors assurée par une mosaïque de filtres colorés (au pas du pixel) soit avec les couleurs primaires, soit avec les couleurs complémentaires (filtre de Bayer).



La qualité de l'image, tant sur le plan de la définition que sur celui de la colorimétrie, est logiquement inférieure.

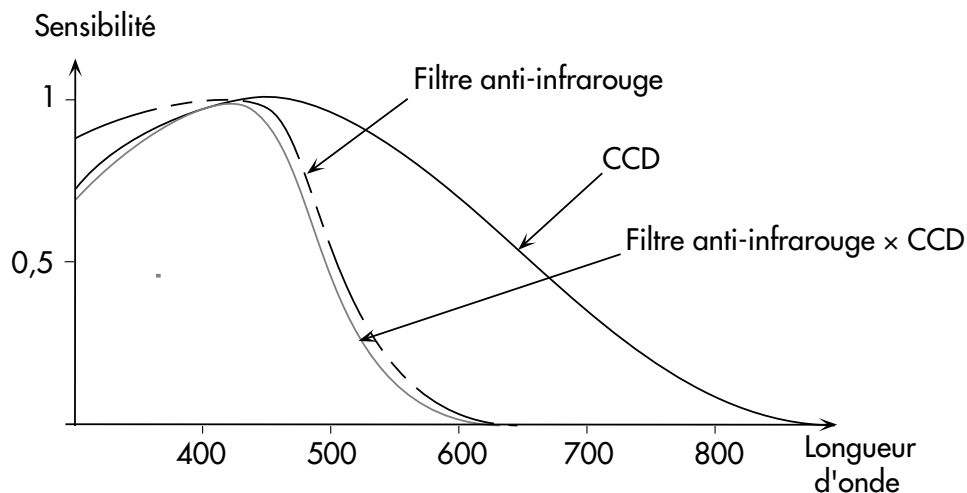
Certains équipement haut de gamme font aujourd'hui appel à cette technologie, les capteurs comportant un très grand nombre de cellules pour compenser la définition moindre.

B) Les filtres et la température de couleur

Devant le séparateur optique, on peut trouver un certains nombres de filtres :

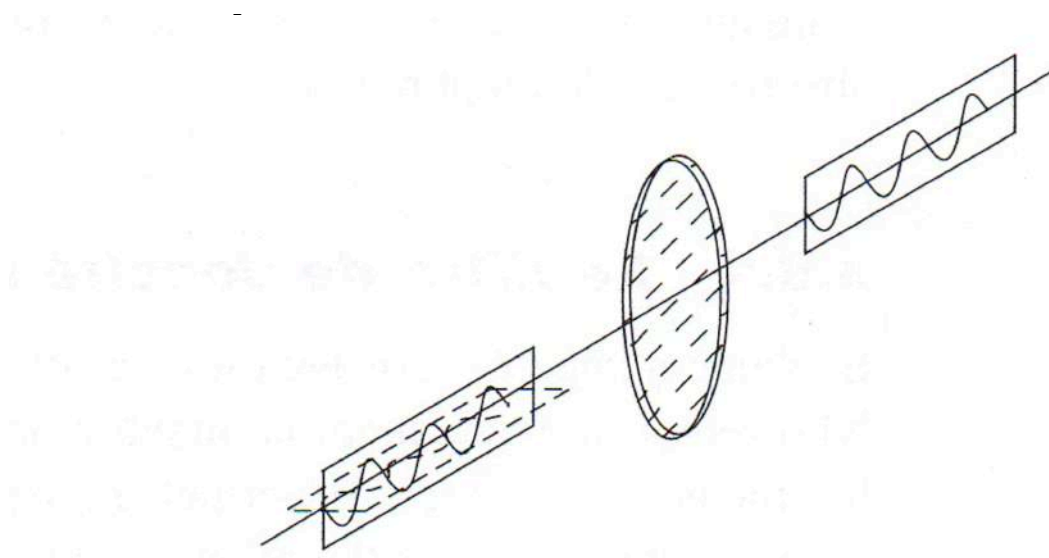
- **Le filtre infrarouge**

Le capteur CCD est très sensible aux rayons infrarouges. Cette caractéristique est d'ailleurs exploitée pour les applications de vidéosurveillance. De manière générale, ce filtre a pour rôle de limiter l'information lumineuse analysée au seul spectre visible .



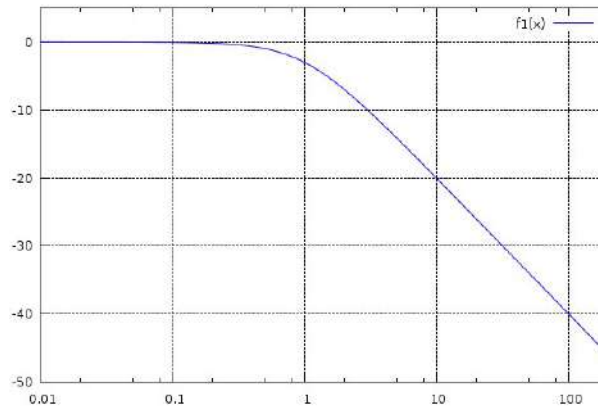
- **le filtre quart d'onde**

Les rayons lumineux sont caractérisés par leur longueur d'onde, certes, mais aussi par leur polarisation. Or le séparateur optique réagit différemment selon que l'axe de polarisation des rayons incidents est horizontal ou vertical. Le rôle du filtre quart d'onde est de rendre circulaire la polarisation de tous les rayons lumineux, afin que le séparateur optique ait le même comportement vis-à-vis de chacun d'eux .



- **Le filtre passe-bas**

Il est chargé d'éliminer les détails extrêmement fins de la scène captée par l'objectif, réduisant ainsi le phénomène d'aliasing que provoque l'échantillonnage de l'image par les capteurs CCD. Les hautes fréquences inutiles sont ainsi supprimées.



Une caméra vidéo intègre par ailleurs une ou deux roues porte-filtres, permettant d'adapter la caméra à l'environnement lumineux de la scène cadrée. On distingue deux types de filtres.

- **Les filtres de densité**

Également appelés « gris neutres » et notés « ND » pour Neutral Density, ils ont pour rôle de réduire, indépendamment du diaphragme, la quantité de lumière traversant l'objectif. En compensant une trop forte intensité lumineuse en extérieur, ils permettent de travailler sur une plage d'ouverture standard du diaphragme, donnant les meilleures performances optiques.

Ils peuvent aussi être d'une grande utilité en studio pour réduire la profondeur de champ particulièrement élevée en vidéo, afin d'obtenir des arrière-plans flous (typiquement le public derrière un animateur).

On trouvera par exemple un filtre ND 1/8 qui le laisse passer que 1/8 de la lumière (3 diaphs)...



- **Les filtres colorés**

Ces filtres(notés « CC » pour Color Correction) permettent quant à eux de changer la température de couleur de la lumière incidente, par exemple pour travailler avec une balance des blancs « studio » à 3 200 K lors d'un tournage extérieur ou inversement.

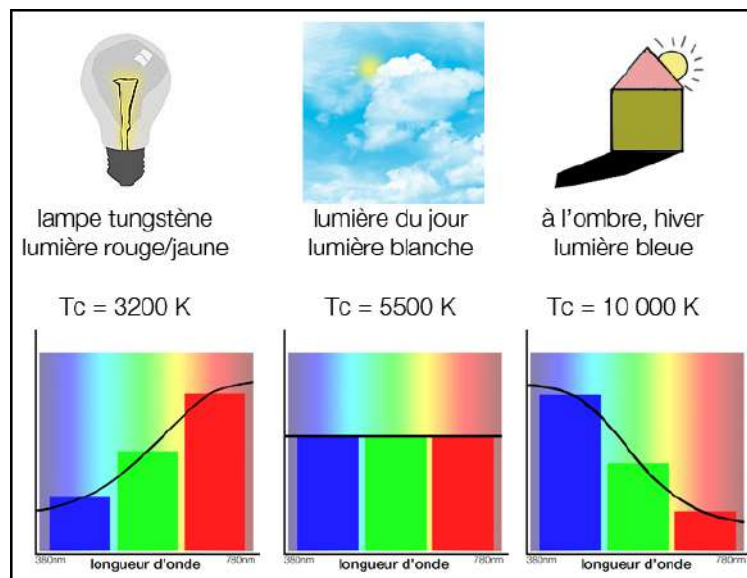
Il existe donc deux types de filtres CTB (Color to Blue) et CTO (Color to Orange).

1/4 CTO	1/2 CTO	FULL CTO	1/4 CTB	1/2 CTB	FULL CTB
CONVERTS 5500K TO 4500K	CONVERTS 5500K TO 3800K	CONVERTS 5500K TO 2900K	CONVERTS 3200K TO 3500K	CONVERTS 3200K TO 4100K	CONVERTS 3200K TO 5500K

Dans certains cas on place directement des gélatine sur les projecteur pour obtenir le même effet.

C) La balance des blancs

La balance des blancs permet, sur un appareil photographique numérique ou un caméscope, d'étalonner le capteur et de corriger la dominante de couleur en fonction de l'éclairage ambiant. En effet, la lumière provenant d'une source naturelle ou artificielle n'a pas toujours le même contenu spectral et donc la même couleur :



On réalise ce réglage en présentant devant l'appareil une surface étalon reconnue comme blanche, normée ou déterminée comme telle par l'œil humain. L'électronique modifie alors les réglages internes de l'appareil pour que cette surface apparaisse blanche lors de l'enregistrement.

Cette opération est à refaire chaque fois que l'on change de conditions d'éclairage. On peut aussi délibérément tromper l'appareil de prise de vue en lui présentant une surface non blanche. Ainsi, certaines personnes font la balance des blancs sur la peau de leur main pour obtenir des tons plus doux.



Ces 4 images illustrent différents réglages de la balance des blancs. De gauche à droite et de haut en bas, ces réglages sont les suivants : automatique, lumière du jour, flash et éclairage tungstène.

Une bonne balance des couleurs est un pré-requis pour une belle photo ou une belle vidéo. En effet, le flash apportera une dominante bleue et donnera souvent une apparence peu flatteuse pour le sujet. Le fait de corriger la balance des couleurs pour enlever cette dominante bleue donnera plus de réalisme à la photo. Elle gagnera ainsi énormément en pertinence.

D) Fonctionnement du capteur

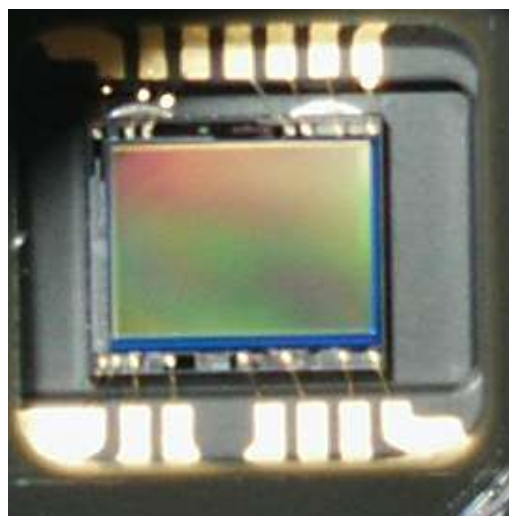
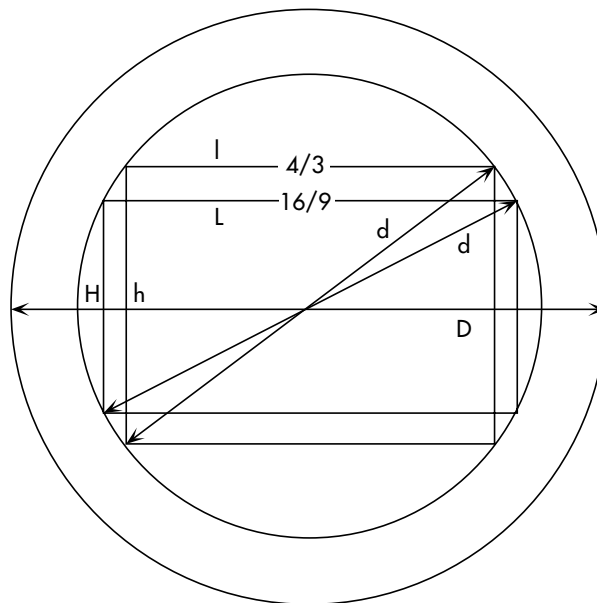
Le capteur est un l'élément de la caméra qui va transformer la quantité de lumière qu'il reçoit en un signal électrique. Il est composé de cellules élémentaires qui traiteront chacune un élément de l'image (pixel).

Les différentes valeurs qui caractérisent les formats des capteurs CCD se réfèrent en fait au diamètre externe des tubes d'analyse qui étaient utilisés jusqu'à la fin des années 1980.

Elles sont exprimées en « pouces » : 1", 2/3", 1/2",... Le diamètre utile de l'image formée sur la surface sensible est cependant inférieur à ces valeurs. Il est par exemple de 11 mm pour un capteur de format 2/3", alors que le diamètre théorique du tube correspondant est de 18 mm. En clair, rien sur un capteur 2/3" ne mesure réellement 2/3".

Toutes les caméras broadcast standard et à haute définition sont aujourd'hui équipées de capteurs 2/3". Les caméras institutionnelles sont pourvues de capteurs 1/2", tandis que les caméscopes grand public n'intègrent que des capteurs 1/3" ou, le plus souvent, 1/4".

Tubes				
d = diamètre utile de l'image	D = diamètre externe du tube		Dimensions de l'image	
			4/3	16/9
	en millimètres	en pouces	I × h (mm)	L × H (mm)
16 mm	25,4	1"	12,8 × 9,6	14 × 7,8
11 mm	17	2/3"	8,8 × 6,6	9,6 × 5,4
8 mm	12,7	1/2"	6,4 × 4,8	6,9 × 3,3
		Format image	I × h 4/3	L × H 16,9
Capteurs CCD				



La zone d'analyse renferme un réseau de plusieurs centaines de milliers de sites de stockage photosensibles d'une dizaine de microns de largeur (les capteurs à haute définition en possèdent plus de 2 millions).

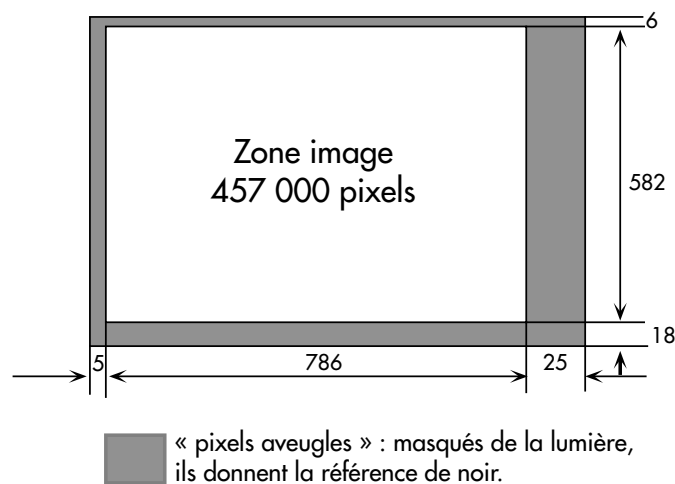
Le même circuit cumule les fonctions de conversion optoélectronique et de lecture des informations. L'image se formant sur un réseau de points, ou pixels, organisés en lignes et en colonnes, elle est par conséquent échantillonnée dès son analyse, ce qui implique de prendre un certain nombre de précautions, comme nous le verrons par la suite. Le fonctionnement d'un capteur CCD peut se résumer en trois étapes :

- la conversion de l'image optique en charges électriques proportionnelles à l'énergie lumineuse reçue
- l'accumulation des paquets de charges ainsi générés dans les cellules de stockage appelées « photosites » ou « photocapteurs »
- le transfert de ces charges selon un mode propre à la structure du capteur vers la porte de sortie du circuit, pour former un signal électrique qui sera traité pour donner par la suite le signal vidéo.

a) Principe de fonctionnement d'une cellule

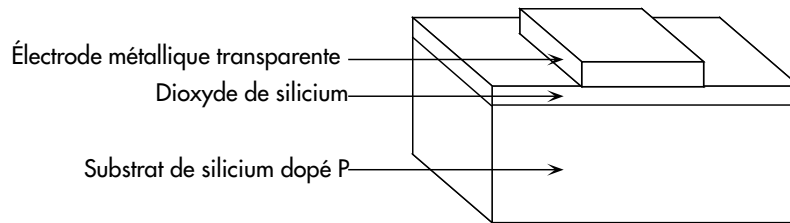
Imaginons un groupe de cellules juxtaposées les unes à la suite des autres et communiquant entre elles par des portes : une cellule se charge proportionnellement à la lumière qu'elle reçoit, puis se vide dans la cellule voisine dès que s'ouvre la porte qui les sépare.

La première cellule est alors disponible pour accueillir de nouvelles charges, et ainsi de suite. La cellule élémentaire d'un capteur CCD se compose d'une zone de stockage exposée à la lumière et d'une zone de transfert masquée de la lumière. Le cycle stockage/transfert est géré par des tensions de commande définissant les phases du fonctionnement, conformément aux caractéristiques du signal vidéo.



Le pixel est l'unité élémentaire de la zone image d'un capteur.

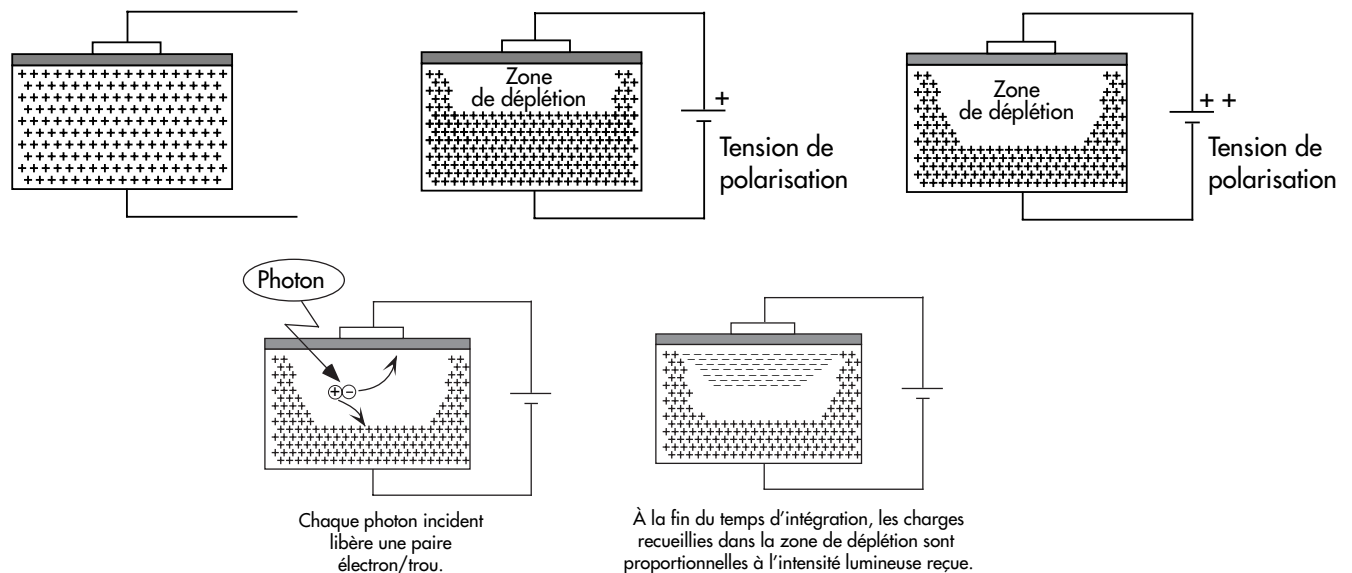
La zone photosensible assurant la capture de la lumière ne représente pas plus du tiers de la surface totale du pixel. Le reste est occupé par différentes cellules associées pour la circuiterie – portes, registres à décalage, etc. L'élément photosensible est composé d'un substrat semi-conducteur en silicium dopé positivement, c'est-à-dire riche en trous, sur lequel est déposée une fine couche isolante d'oxyde (silice), elle-même surplombée d'une électrode métallique transparente à la lumière.



Cette électrode est utilisée pour polariser la cellule de manière à créer, dans le substrat, un champ électrique interne repoussant les charges positives (trous) dues au dopage positif du silicium vers le fond de la cellule. Le puits de potentiel (ou zone de déplétion) alors formé est d'autant plus profond que la valeur de la tension de polarisation est élevée. C'est dans cette zone ainsi désertée que seront attirés les électrons libérés par effet photoélectrique. En effet, lorsqu'un rayon lumineux pénètre dans le silicium, chaque photon incident libère une paire électron/trou.

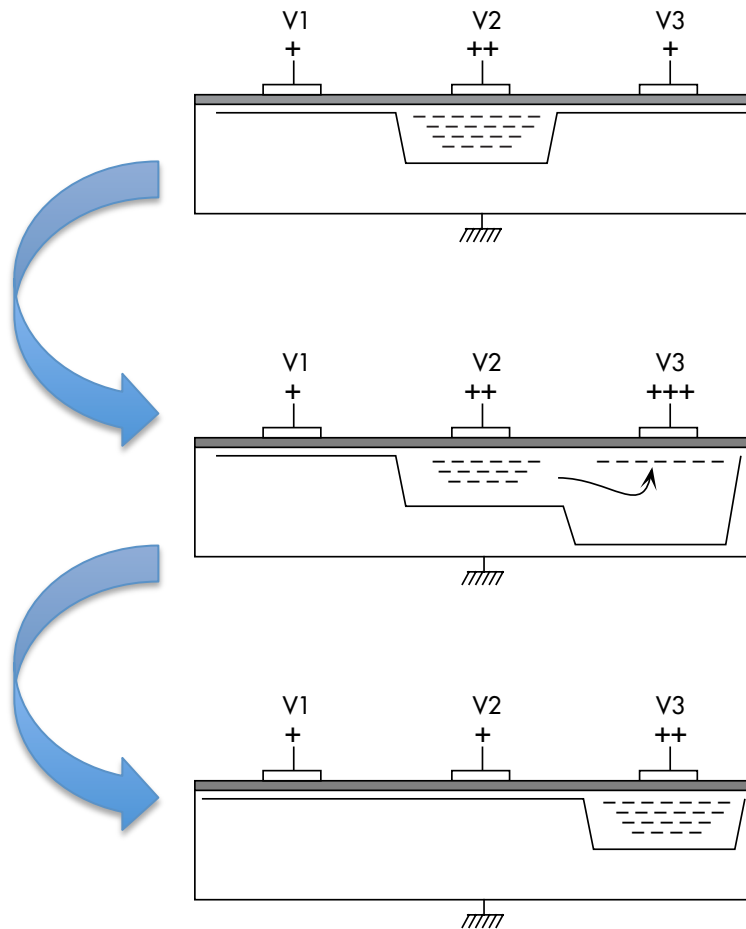
L'électron et le trou se séparent du fait de la polarisation de la cellule : le trou est repoussé vers le fond de la cellule, où il rejoint les autres charges positives ; l'électron est, quant à lui, attiré à la surface par l'électrode métallique, mais il reste dans le puits car il ne peut traverser la couche isolante.

Au bout d'un laps de temps dit « temps d'intégration » (équivalent au temps d'exposition en photographie), le nombre d'électrons accumulés dans le puits est directement proportionnel au nombre de photons incidents, donc à la quantité de lumière reçue par la cellule durant cet instant.



Il reste alors à transmettre les charges de manière à libérer la cellule ayant assuré la capture de la lumière, pour qu'un autre cycle d'acquisition puisse être effectué. Si l'on applique une polarisation plus importante à une cellule voisine, sa zone de déplétion, plus grande, attirera les électrons de la première cellule moins polarisée – un champ électrique est engendré par la différence de polarisation des cellules infiniment proches.

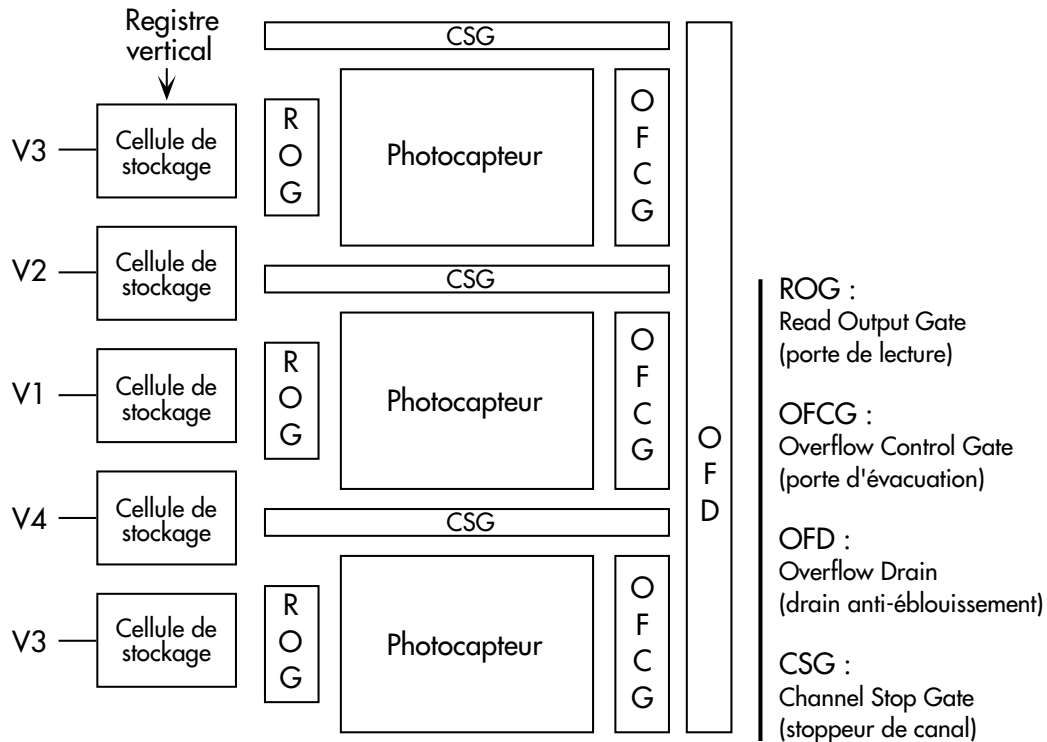
Il suffit alors de rythmer les phases d'accumulation et de transfert avec une tension d'horloge appliquée de façon séquentielle et appropriée aux temps et durées du signal vidéo. La figure suivante illustre le processus de transfert des charges dans un élément de CCD formé d'un alignement de cellules.



Maintenant que nous avons étudié le principe d'accumulation et de déplacement des charges, nous allons pouvoir nous intéresser aux différentes possibilités de lecture de ces charges par un dispositif d'adressage et de transfert séquentiel. Il existe trois structures de capteurs CCD, qui se distinguent essentiellement par la façon dont les charges sont transférées vers le registre de sortie.

b) Structure à transfert interligne (CCD IT)

Dans une structure IT, chaque cellule photosensible (ou photocapteur) est accolée à une cellule servant au stockage et au transfert. Les cellules de stockage sont organisées en colonnes formant des registres verticaux, qui alternent avec les colonnes de photocapteurs.



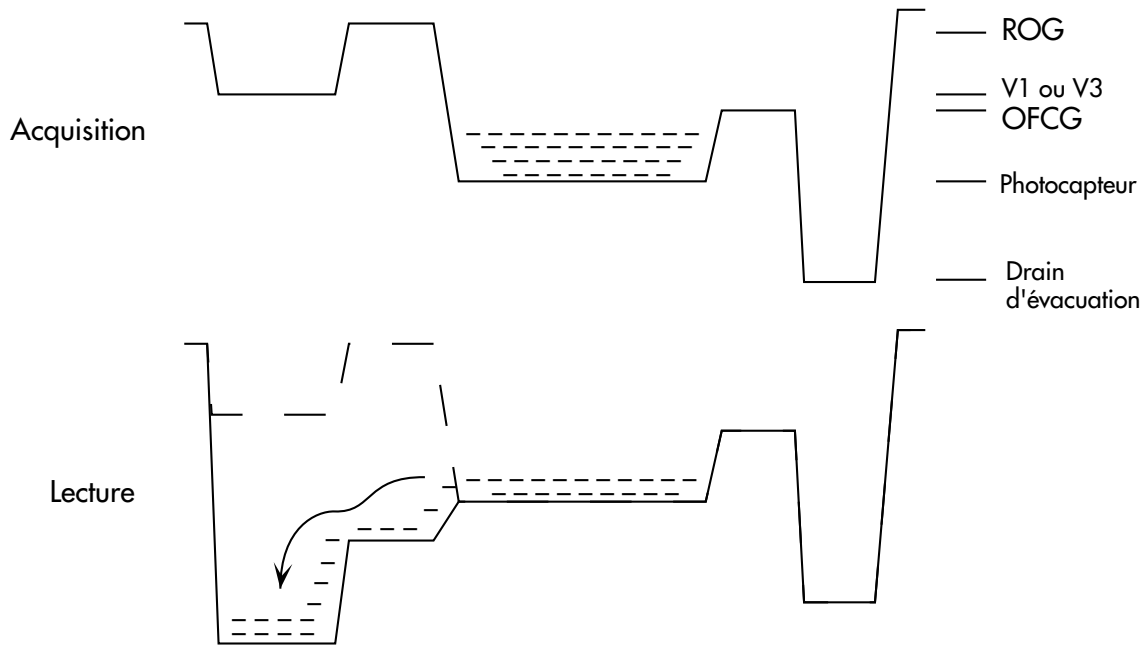
Les cellules photosensibles sont séparées par des stoppeurs de canal (CSG : Channel Stopper Gate) empêchant la diffusion des charges d'une cellule vers les voisines, et par des drains d'évacuation (OFD : OverFlow Drain) dans lesquels sont écoulées les charges en excès produites par une forte illumination.

Chaque cellule photosensible est isolée de sa cellule de stockage par une porte de lecture (ROG : Read Out Gate) au travers de laquelle les charges vont circuler.

Pendant la durée utile de la trame, l'énergie lumineuse fournie par l'optique est traduite en énergie électrique : les charges s'accumulent dans les cellules photosensibles proportionnellement à la lumière reçue.

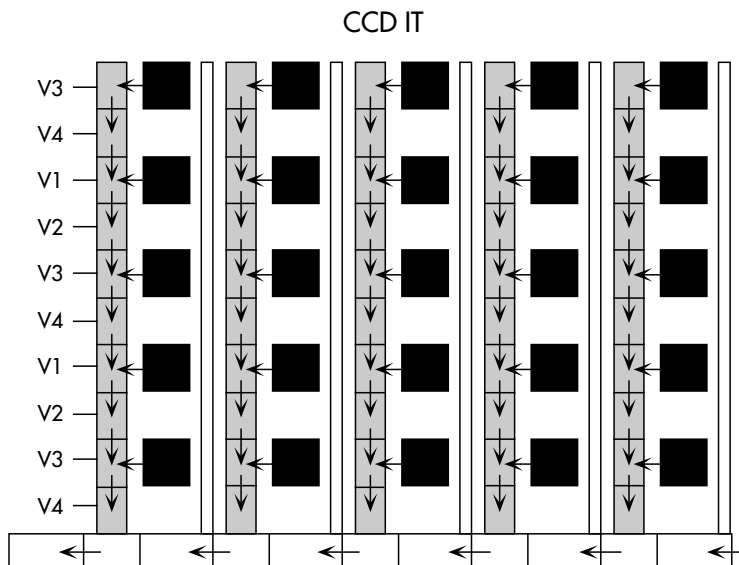
Puis au cours de l'intervalle de suppression trame, c'est-à-dire pendant le laps de temps séparant la fin de l'analyse d'une trame et le début de la suivante, une impulsion de forte amplitude est appliquée simultanément aux électrodes de toutes les cellules de stockage. La différence de potentiel établie entraîne alors un déplacement latéral simultané de l'ensemble des charges des photocapteurs vers les registres de transfert, qui sont évidemment masqués de la lumière.

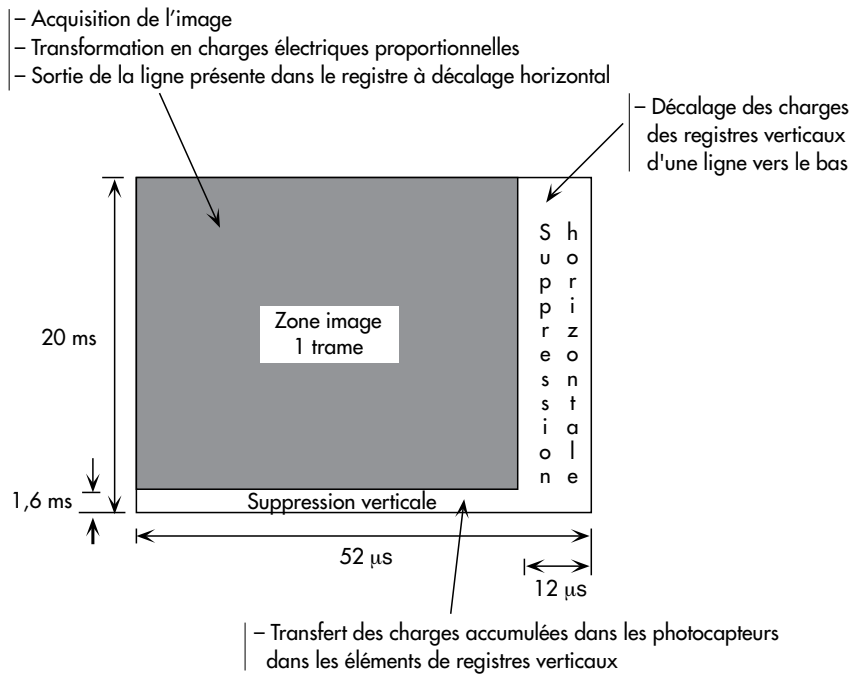
À l'issue de l'intervalle de suppression trame, les zones de déplétion des photocapteurs sont vidées, donc prêtes à recevoir de nouvelles charges provenant de l'analyse de la trame suivante.



Pendant la durée active de la trame, à chaque intervalle de suppression ligne, c'est-à-dire pendant les 12 ms qui séparent deux lignes utiles, les charges des registres verticaux se décalent ligne par ligne vers le bas jusqu'au registre horizontal de sortie, placé sous les registres verticaux. Ce registre à décalage de sortie délivre alors une à une toutes les charges d'une ligne en 52ms.

Il fournit ainsi une analyse séquentielle échantillonnée de l'image. Lorsqu'arrive l'intervalle de suppression trame, les photocapteurs, qui ont fini d'accumuler les charges d'une nouvelle trame, se vident vers les registres verticaux. Et le processus de lecture se renouvelle.



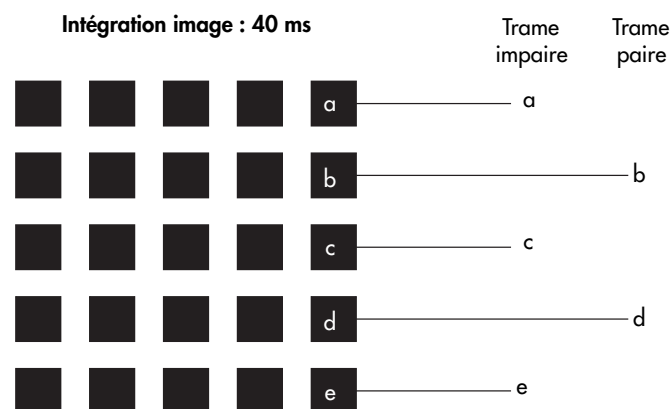


On remarquera que dans une telle structure IT, les registres de transfert, ainsi que les autres éléments de protection et d'évacuation, occupent une grande proportion de la surface de la zone image du capteur. L'espace entre les cellules photosensibles est donc important, ce qui engendre un pas d'échantillonnage élevé.

Les photodétecteurs de la puce CCD forment un réseau matriciel dont nous allons considérer ici que chaque rangée correspond à une ligne de l'image vidéo. Le balayage de l'image de télévision étant effectué selon un mode entrelacé, le même procédé doit être appliqué par le système de lecture du capteur. Deux solutions sont proposées.

• Le mode intégration image

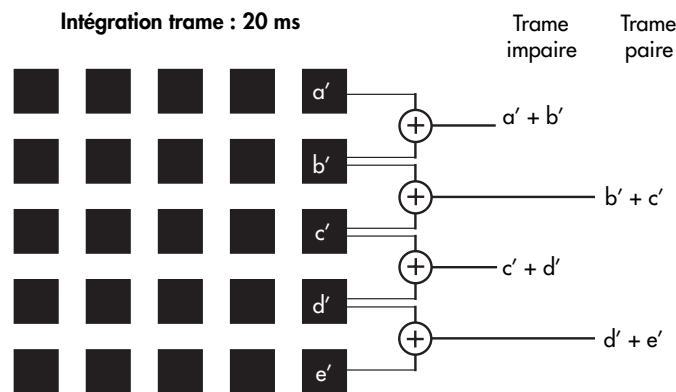
Pendant la durée d'une image, soit 40 ms, chaque rangée de photodétecteurs se charge pour la trame paire ou impaire, selon la ligne de l'image à laquelle elle est associée. Les charges des lignes paires et des lignes impaires sont donc accumulées simultanément, mais elles sont transférées alternativement dans les registres de lecture verticaux, une trame sur deux. À chaque trame, seule la moitié des pixels est par conséquent analysée.



- Le mode intégration trame

L'intégration s'effectue indépendamment pour chaque trame, pendant donc 20 ms. L'image vidéo est par conséquent formée après deux saisies. Il est en effet possible de combiner les charges de deux rangées de photocapteurs consécutives lues simultanément, l'une appartenant à la trame paire, l'autre à la trame impaire. Les pixels sont ainsi lus toutes les trames, et non toutes les images, soit deux fois plus souvent.

Dans un capteur de type IT, les charges accumulées durant le temps d'intégration – équivalent au temps d'exposition en photographie – sont transférées dans un registre à décalage vertical pendant la suppression ligne. Celui-ci les fait descendre ligne par ligne vers le registre horizontal de sortie.

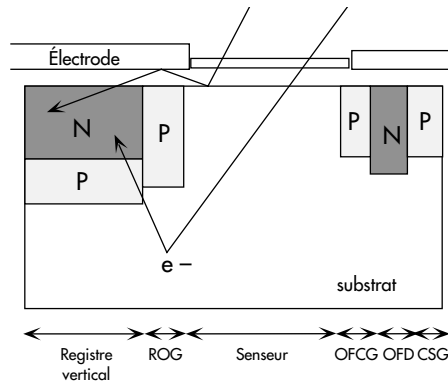


Pour respecter le balayage entrelacé, il suffit d'alterner la combinaison de rangées à chaque trame. Cette solution entraîne une perte de résolution verticale, une ligne de l'image résultant du moyennage de deux lignes du capteur. Mais la résolution dynamique, qui est la faculté de conserver les détails dans des images en mouvement, est nettement meilleure (plus le temps d'exposition est long, plus grand est le risque de voir apparaître flous des sujets en déplacement rapide). La qualité subjective d'une image issue d'une intégration trame est supérieure à celle produite par une intégration image.

Le mode d'intégration d'un CCD IT peut être sélectionné sur la caméra en fonction du type de prise de vues réalisée. En mode intégration image, les cellules se chargent à la lumière pendant 1/25 s, alors qu'en mode intégration trame, elles se chargent pendant seulement 1/50 s. L'intégration à fréquence image donne une bonne résolution statique et est donc adaptée au traitement des images fixes. L'intégration à fréquence trame est mieux appropriée à l'analyse d'images en mouvement.

- Le défaut de smear

Ce défaut est caractéristique d'un capteur IT (surtout sur les premières générations). Il se traduit à l'image par une raie verticale blanche, ou plus rarement rouge, traversant une zone très lumineuse, tel un projecteur ou un phare de voiture. Il est dû à la pollution du registre vertical par des électrons parasites générés par un excès de lumière, qui viennent s'ajouter aux données utiles au cours de leur transfert.



Deux raisons expliquent cette diffusion de charges. La première est que la capacité du canal d'évacuation OFD, certes prévue pour drainer un excédent d'électrons en cas de forte lumière, est assez limitée.

Ainsi, dans les cas extrêmes, c'est-à-dire pour des niveaux d'illumination supérieurs à dix fois le niveau nominal, certaines charges ne peuvent être canalisées par ce conduit et atteignent le registre à décalage vertical, malgré les blindages par les barrières de potentiel qui le protègent. Là, elles s'écoulent lentement, puisque le déplacement dans ces registres s'effectue par décalage d'une ligne vers le bas à chaque suppression horizontale.

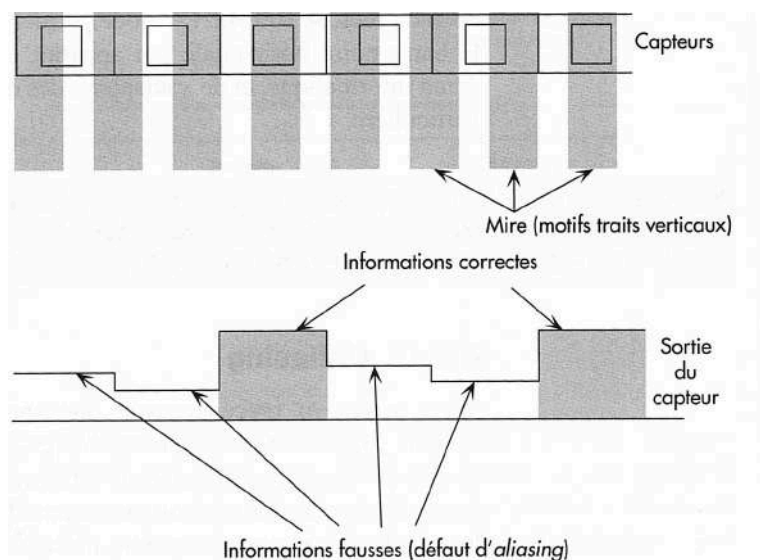
D'autre part, les électrons générés par des rayons lumineux de longueur d'onde élevée – proche de l'infrarouge –, issus de sources chaudes, peuvent pénétrer en profondeur dans la structure de la cellule et s'introduire par le bas dans le registre vertical dont elles modifient le contenu. C'est la seconde explication du smear.

Ce défaut a été considérablement réduit sur les dernières générations de capteurs IT.

- Le défaut de l'aliasing

Les cellules photosensibles ne recouvrent pas la totalité de la surface des capteurs. Il faut en effet intercaler les autres éléments du capteurs (collecteurs, registres de stockage etc...) On est en présence d'un sous échantillonnage spatial, dans la mesure où certains détails peuvent ne pas être analysés convenablement.

Le schéma suivant représente une image composée de lignes verticales analysés par un capteur :

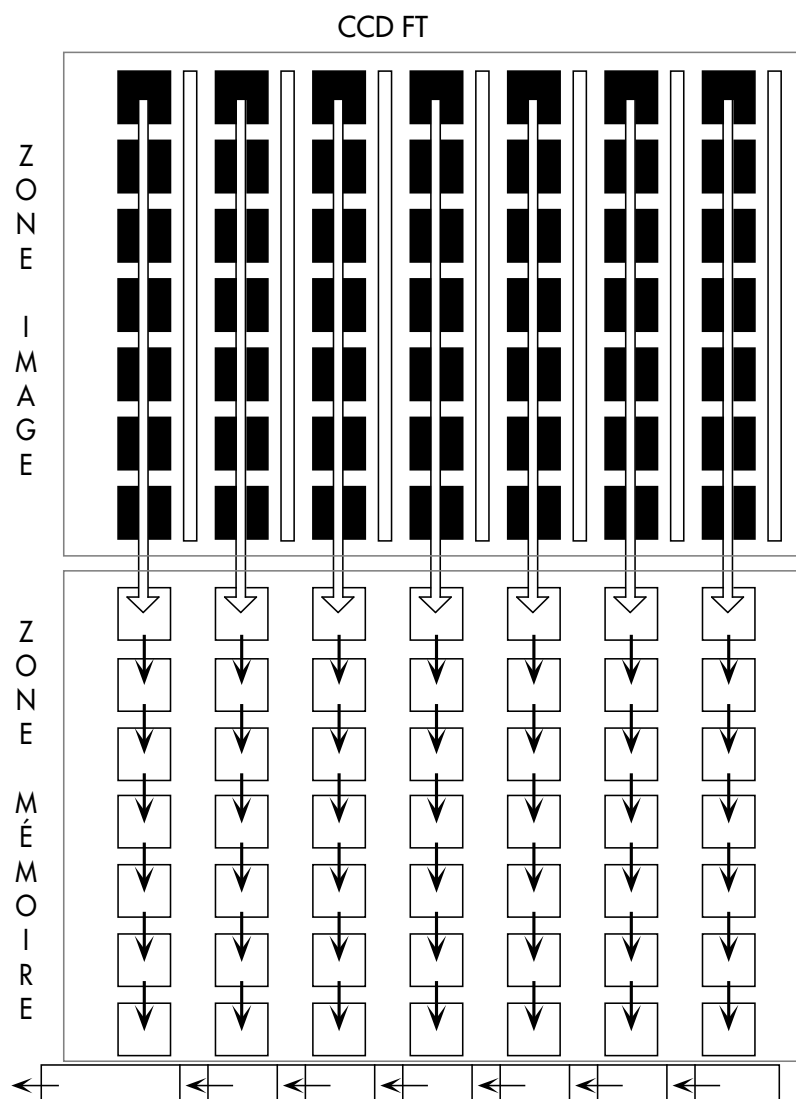


Il existe plusieurs moyens pour corriger ce défaut :

- On décale d'un demi pixel le capteur vert (celui qui a le plus d'influence)
- On filtre l'image en amont du capteur. Les détails sont perdus, mais le défaut est limité.

c) Structure à transfert d'image (CCD FT)

Un capteur à transfert d'image (FT, pour Frame Transfert) est caractérisé par une zone image qui n'est constituée que de photocapteurs, sans aucun registre à décalage vertical. Au-dessous de cette surface photosensible se trouve une zone de stockage, de capacité équivalente à la zone image, à l'extrémité de laquelle prend place le registre à décalage horizontal de sortie.



L'accumulation dans les photocapteurs s'effectue pendant la période trame de durée 20 ms. Quand arrive l'intervalle de suppression trame, toutes les charges descendent simultanément dans la zone de mémoire tampon, qui devient alors une copie exacte de ce qu'était la zone image à la fin du temps d'intégration. Les photocapteurs ainsi vidés sont alors prêts à effectuer l'intégration de la trame suivante.

Pendant ce temps, à chaque intervalle de suppression horizontale, les charges présentes dans la zone mémoire sont transférées ligne par ligne dans le registre horizontal. Les photodétecteurs assurent donc ici eux-mêmes le transfert vertical de leurs charges vers la zone de stockage. Cela implique de masquer cette opération par un obturateur asservi à chaque suppression trame, afin de conserver la résolution verticale. Le rendement des obturateurs optoélectroniques n'étant pas suffisant, c'est un obturateur mécanique qui est utilisé, selon un principe analogue à celui mis en place sur les caméras film ou les projecteurs de cinéma.

L'avantage de la structure FT est qu'elle autorise une plus grande densité d'éléments sensibles, puisque toute la surface de la zone image n'est occupée que par des cellules photosensibles (rappelons que dans un capteur IT, une colonne de pixels utiles alterne avec un registre à décalage vertical). Le pas d'échantillonnage est donc plus faible que dans une structure IT.

Par ailleurs, l'obturateur mécanique confère au capteur FT une totale immunité au smear. On observe en revanche un autre type de défaut assez étrange, se manifestant sous la forme d'une sorte de moustache de chat autour d'une source ponctuelle très lumineuse.

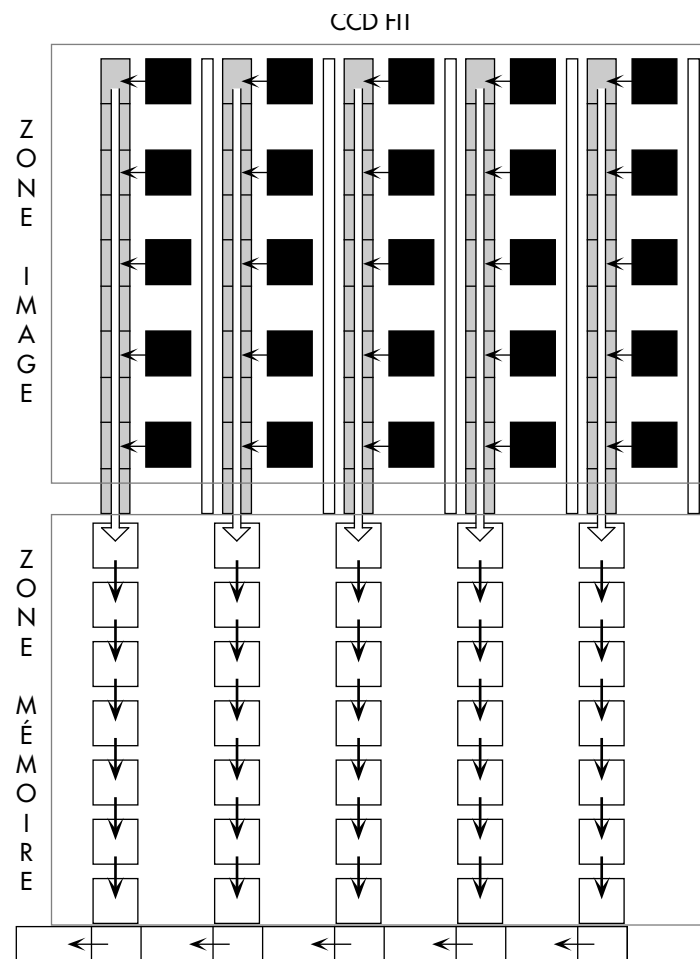
Dans un capteur de type FT, les charges accumulées durant le temps d'intégration sont simultanément transférées dans une zone mémoire tampon, à chaque intervalle de suppression trame. Puis elles sont transférées ligne par ligne dans un registre horizontal de sortie. Il n'y a pas de registres verticaux, mais un obturateur mécanique est nécessaire pour masquer ce mouvement massif des charges.

d) Structure à transfert d'image interligne (CCD FIT)

La structure FIT (Frame Interline Transfert) résulte d'une combinaison astucieuse des deux structures précédentes : elle associe les registres verticaux du capteur IT à la zone mémoire tampon du capteur FT.

Les charges accumulées dans chaque photodétecteur pendant le temps d'intégration sont transférées, durant la suppression trame, vers les registres verticaux, qui les acheminent immédiatement vers la zone mémoire de capacité une trame. Les charges sont alors transmises ligne par ligne, à chaque intervalle de suppression horizontale, vers le registre à décalage de sortie. Les cellules photosensibles assurent uniquement la fonction de conversion optoélectronique, puisque le transfert dans la zone de stockage s'effectue via les registres verticaux, occultés de toute lumière.

L'obturateur mécanique du capteur FT n'est donc plus utile. Quant au smear, rappelons que, dans la structure IT, il était essentiellement causé par la lenteur de déplacement des charges dans les registres verticaux. Dans la structure FIT, la vitesse de déplacement des charges dans les registres verticaux est beaucoup plus élevée, car celles-ci vont toutes simultanément dans la zone de stockage durant la suppression verticale. Ainsi, les registres verticaux ne sont pas pollués longtemps par les électrons en excès qu'engendre une forte illumination. Le phénomène de smear est donc absent sur une structure FIT.



Dans un capteur de type FIT, les charges accumulées sont d'abord transférées durant la suppression trame dans des registres verticaux (comme dans la structure IT). Puis elles sont toutes envoyées simultanément dans une zone mémoire (comme dans la structure FT).

e) Le cas du CMOS

Nous nous sommes attachés jusqu'ici à décrire le fonctionnement d'un capteur CCD. La technologie CMOS permet également de transformer la lumière en tension électrique. Le fonctionnement est relativement différent et les deux systèmes présentent chacun des avantages et des inconvénients.

- Le CMOS coûte moins cher que le CCD et consomme moins d'énergie.
- La gestion des pixels est plus efficace avec le CMOS (image multi format).
- Le capteur CCD a un niveau de bruit plus faible et une meilleure sensibilité.
- Les images issues d'un CCD sont plus homogènes...

On pourrait en déduire que le CMOS convient aux applications «bas de gamme» et le CCD pour le « Broadcast », mais les progrès récent des capteurs CMOS font qu'on les retrouve également dans des dispositifs professionnels.

f) L'obturateur et le temps d'exposition

Dans un capteur photosensible, l'analyse et la lecture de l'image sont indépendantes. On peut ainsi choisir de réduire la durée d'exposition des cellules lorsqu'il s'agit de capter des mouvements rapides.

L'obturateur permet alors de déterminer une période utile et une période d'obturation durant laquelle les charges créées sont inutilisées. Les images obtenues sont plus nettes (pas de flou de mouvement) mais il faut augmenter l'ouverture pour conserver une quantité de lumière suffisante.

En mode normal, l'obturateur est réglé sur 1/50s, mais il est possible de le régler sur 1/100s, 1/250s,... 1/2000s...

On peut aussi utiliser un réglage particulier de l'obturateur pour éliminer les traces disgracieuses qui apparaissent lorsque l'on filme un écran d'ordinateur, ou s'adapter à des conditions de lumières spécifiques (néon,etc..).



Pose longue (1/50^{ème} s)
Image floue, notion de mouvement



Pose courte (1/1600^{ème} s)
Image nette, temps figé

3) Caméscope et Caméra de plateau

Une caméra comporte comme nous l'avons vu de nombreux éléments pour produire le signal vidéo et éventuellement l'enregistrer. Cependant il peut être difficile pour un seul opérateur de contrôler tous les paramètres en même temps pour produire des images de qualité optimales.

Dans le cas d'un caméscope - On parle parfois de caméra monobloc ,ENG ou combo - toutes les étapes de captation, de corrections, de traitements, de mise au normes et d'enregistrement sont rassemblées dans une machine qui doit être aussi maniable que possible. C'est donc une affaire de compromis !



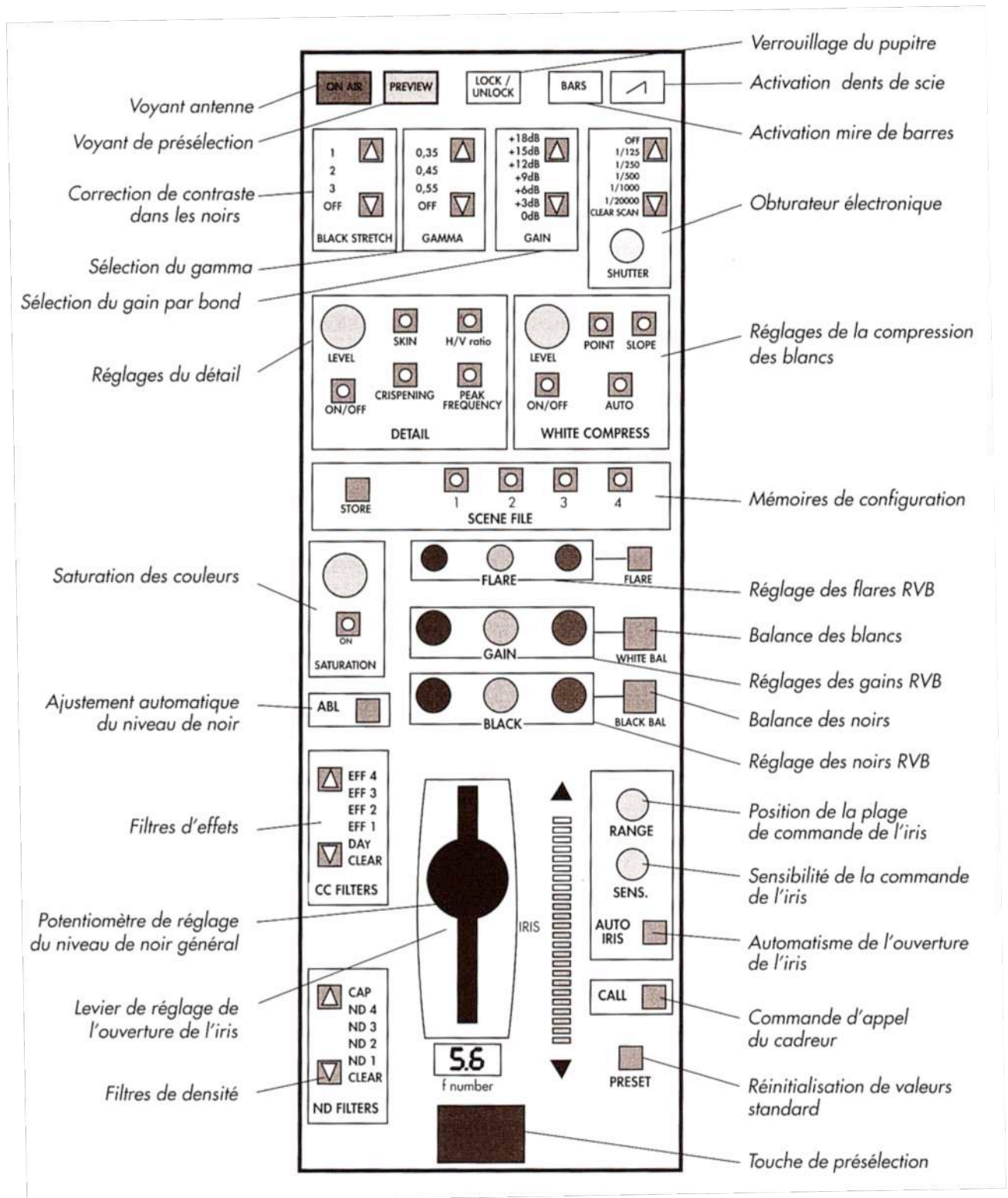
D'un autre côté on trouvera les caméras de plateau, dite EFP (Electronic Field Production) qui se résume à l'étage de captation.

Il est toujours nécessaire d'assurer toutes les étapes pour obtenir un signal vidéo convenable mais elles sont déportées en régie.

On utilise alors une unité de contrôle et un panneau de commande reliés à la caméra par un câble TRIAX ou CCZ. Ces liaisons permettent de communiquer avec l'opérateur depuis la régie grâce à un système de retour vidéo et audio.



Voici un exemple des contrôles disponibles sur le pupitre de commande :



La liaison TRIAX véhicule ainsi plusieurs signaux dans les deux sens par l'intermédiaire d'un multiplexage fréquentiel:

