

Systemes de Télécommunications

Partie II : Télévision

Table des matières

I.	CONCEPTS FONDAMENTAUX	5
1.	L'IMPRESSION DE MOUVEMENT	5
2.	LE BALAYAGE DE L'ECRAN POUR UNE IMAGE MONOCHROME	5
a.	<i>Principe</i>	5
b.	<i>Balayage entrelacé</i>	6
c.	<i>Définition de l'image et bande passante</i>	6
3.	CONSTITUTION DU SIGNAL VIDEO COMPOSITE	7
a.	<i>Amplitude</i>	7
b.	<i>Synchronisation</i>	8
c.	<i>Correction de gamma</i>	9
d.	<i>Composante continue</i>	9
4.	TRANSMISSION	10
a.	<i>Son</i>	10
b.	<i>Fréquences porteuses</i>	11
5.	RESUME : CHAINES D'EMISSION ET RECEPTION	12
II.	TELEVISION EN COULEURS	14
1.	PRINCIPES	14
2.	ECRAN COULEUR	14
3.	SIGNAL VIDEO COULEUR	15
a.	<i>Colorimétrie</i>	15
b.	<i>Aspect fréquentiel</i>	15
4.	LE DIFFERENTS STANDARDS	16
a.	<i>Système NTSC</i>	16
b.	<i>Système PAL</i>	18
c.	<i>Système SECAM</i>	19
III.	LES ECRANS	20
1.	LES ECRANS A TUBE CATHODIQUE (CRT)	20
2.	LES ECRANS PLATS	21
a.	<i>Les écrans à cristaux liquides (LCD)</i>	21
b.	<i>Les écrans à plasma (PDP)</i>	22
c.	<i>Les écrans à effet de champ (FED)</i>	23
d.	<i>Les écrans électroluminescents (ELD)</i>	24
e.	<i>Autres technologies en développement</i>	24
IV.	VERS LA TELEVISION NUMERIQUE	24
1.	ENJEUX	24
2.	LES CONTRAINTES DU NUMERIQUE	25
3.	LES PREMIERES NORMES	26
a.	<i>Normes MAC</i>	26
b.	<i>Techniques de compression d'images</i>	27
4.	SYSTEMES DVB	28
a.	<i>Le groupe DVB</i>	28
b.	<i>Codage source</i>	28
c.	<i>Le multiplexage</i>	30
d.	<i>Le codage canal</i>	30
V.	ANNEXE : RECEPTION HETERODYNE	33
VI.	SOURCES D'INSPIRATION	33

I. Concepts fondamentaux

1. L'impression de mouvement

La transmission sur un canal, ou l'enregistrement sur un support magnétique ou optique d'une image animée, nécessitent de la mettre sous forme d'un signal électrique dit signal vidéo. Une image animée peut être considérée comme une fonction de 3 variables : "Information d'image" = $I(x,y,t)$

Dans le temps (t), on transmet un nombre suffisant d'images par seconde pour que l'œil, qui réagit assez lentement, ait l'impression d'un mouvement continu ; connu depuis plus d'un siècle, c'est le principe du cinéma. Au cinéma, la fréquence d'affichage est de 24 images par seconde. Pour la télévision elle est égale à la moitié de la fréquence du réseau électrique, soit 25 images par seconde en Europe et dans le reste du monde, à l'exception de l'Amérique du Nord, du Japon, et d'une grande partie de l'Amérique du Sud pour lesquelles la fréquence d'affichage est égale à 30 images par seconde. Les valeurs numériques que nous donnerons par la suite correspondront essentiellement aux normes d'affichage "européennes".

Si l'image contient des fréquences (temporelles ou spatiales) supérieures à la moitié de la fréquence d'échantillonnage, on assiste à des phénomènes de repliement de spectre très nets : effet de moiré dans le domaine spatial, battements dans le domaine temporel (c'est pourquoi une roue tournant à 24 ou 26 tours par seconde apparaît à la télévision comme faisant un tour par seconde, en sens inverse dans le premier cas).

2. Le balayage de l'écran pour une image monochrome

a. Principe

Une image monochrome désigne une image "noir et blanc" (dite "achrome") mais aussi chaque composante d'une image couleur, puisqu'on sait qu'une image couleur peut être reconstituée par la superposition de trois couleurs fondamentales (rouge, vert, bleu).

Dans l'espace (x,y), on décompose l'image en un nombre suffisant de lignes horizontales, puis on l'analyse point par point le long de chaque ligne. Ces principes d'analyses sont les mêmes pour la télécopie ou la transmission de photographies : après l'échantillonnage dans le temps, on doit transmettre des images fixes. Les images sont converties en signal électrique commandant l'afficheur optique.

Au cinéma, l'image est projetée dans son ensemble sur l'écran. En télévision, l'affichage en une seule fois de chaque image nécessiterait des systèmes vraiment trop complexes pour être utilisées en pratique dans un tube cathodique. L'image est en fait analysée par lignes horizontales (très légèrement obliques par rapport à l'écran) lues de gauche à droite (*cf.* Figure I.1). Le balayage de la ligne se fait à vitesse constante par un dispositif de lecture qui était et est encore dans certaines caméras un faisceau d'électrons dans un tube à vide. Un temps mort correspondant au retour du balayage sépare la lecture de deux lignes. Simultanément un balayage vertical décale les lignes analysées de haut en bas. Un ensemble de lignes de haut en bas de l'image forme une trame ; à la fin de celle-ci on a un autre temps mort dû au retour du balayage vertical, qui peut durer plusieurs lignes.

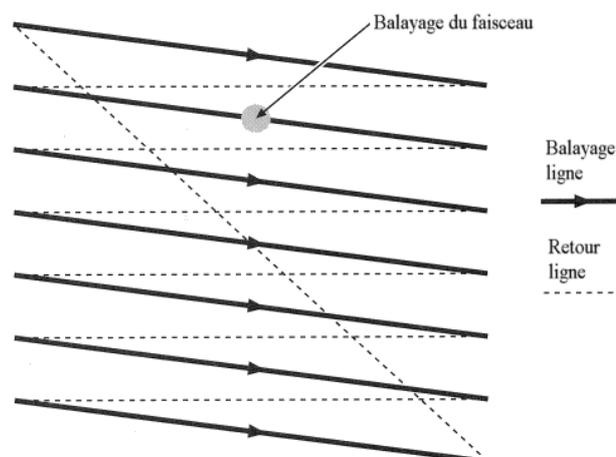


Figure I.1 : Principe du balayage de l'écran.

b. Balayage entrelacé

Cependant, si l'œil est incapable de percevoir des images séparées si celles-ci sont affichées avec un taux de répétition de 20 à 30 Hz, il reconnaît pour cette gamme de fréquences les variations de luminosité d'une image à l'autre, d'où un désagréable effet de papillotement. Pour éviter cela, le taux de "rafraîchissement" de l'ensemble des lignes correspondant à un balayage de l'écran doit être égal à au moins 50 Hz.

Pour conserver une fréquence d'affichage des images égale à seulement 25 Hz (un affichage à 50 images par seconde conduirait au doublement de la bande passante nécessaire pour transmettre le signal vidéo) une image est analysée en deux trames entrelacées. Une ligne sur deux est analysée à la première trame, l'autre à la trame suivante (cf. Figure I.2). Comme il y a en général un nombre impair de lignes par image, chaque trame commence (cas des trames impaires) ou finit (cas des trames paires) par une demi ligne. La fréquence trame est donc le double de la fréquence image, soit en Europe, $F_{\text{trame}} = 50 \text{ Hz}$.

Dans certains téléviseurs haut de gamme, la fréquence trame est même doublée afin d'améliorer la stabilité de l'image (balayage à "100 Hz") et limiter encore plus le problème du papillotement. En pratique, chaque trame est mise en mémoire pour être projetée deux fois à 50 Hz.

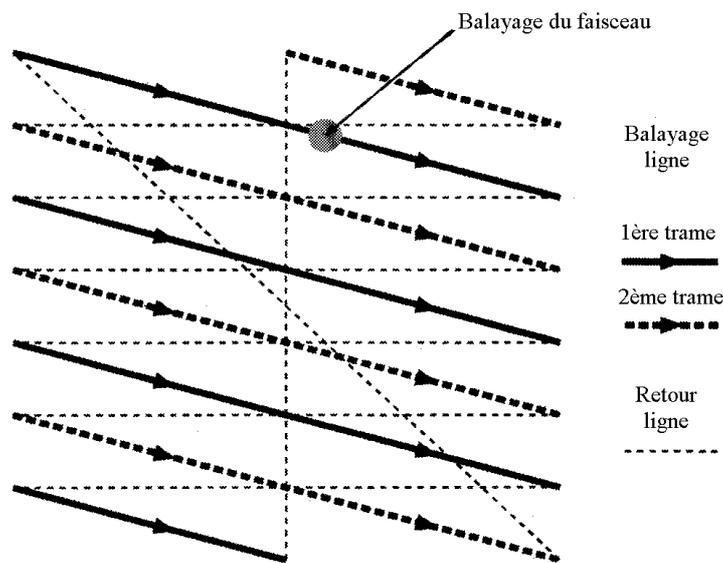


Figure I.2 : Balayage entrelacé.

c. Définition de l'image et bande passante

La définition de l'image, ou définition verticale D_V , est le nombre de lignes disponibles à l'écran pour l'affichage d'une image. Elle est de 625 lignes en Europe et 525 lignes en Amérique du Nord et Japon.

Un certain nombre de ces lignes ne transmet pas d'image : ce sont les lignes "noires", pendant la durée du retour trame, qui correspond à environ 10% de la durée d'une trame. Rendu nécessaire par la technologie des premiers téléviseurs (inertie des oscillateurs de balayage), ce temps mort a dû être conservé pour garantir la compatibilité. Le rapport entre le nombre de lignes "utiles" pour l'image (résolution verticale effective) et le nombre de lignes totales de l'écran, ou (résolution apparente).

La définition horizontale est le nombre de points par ligne. Dans les systèmes classiques il n'y a pas d'échantillonnage le long d'une ligne ; ce nombre est fixé par la bande passante affectée au signal. Si on appelle D_H le nombre de points par ligne, chaque "point" correspond à une durée τ donnée par $\tau = T/D_H$ avec $T = 1/f_L$ durée d'une ligne.

Pour un écran au format 4/3, la définition horizontale D_H est égale pour le standard européen à $4 \cdot 625 / 3 = 833$ "points" par ligne. La fréquence de balayage ligne f_L est quant à elle égale à $25 \cdot 625 = 15625 \text{ Hz}$, ce qui équivaut à une durée T égale à $64 \mu\text{s}$ pour l'affichage d'une ligne. La durée τ correspondant à la durée s'écoulant entre l'affichage de deux "points" successifs d'une ligne est quant à elle égale à environ $1 / (25 \cdot 625 \cdot 4 \cdot 625 / 3) \text{ s}$, soit environ $0,08 \mu\text{s}$.

Si les images étaient constituées par l'ensemble des lignes disponibles à l'écran, la bande passante qui serait requise dans le standard européen pour transmettre un signal vidéo pourrait être estimée en calculant la fréquence d'un signal en créneaux de largeur τ (chaque ligne serait alors constituée d'une suite de points blancs et noirs alternativement) soit $1 / (2\tau) = 25 \cdot 625 \cdot 4 \cdot 625 / 3 \cdot \frac{1}{2} = 6,5 \text{ MHz}$. Mais comme on l'a vu précédemment, une partie des lignes d'une trame sont des lignes "noires" et ne contribuent pas à l'image, d'où une diminution de la bande passante minimale nécessaire. En pratique, la bande passante est normalisée à environ 6 MHz (cette valeur varie suivant les standards). Notons enfin

que la périodisation liée à l'affichage des lignes et trames induit une structure de "raies" dans l'allure du spectre du signal vidéo.

3. Constitution du signal vidéo composite

Le signal vidéo en télévision N&B est constitué par deux composantes (*cf.* Figure I.3) : d'une part des impulsions de synchronisation déclenchant les balayages ligne et trame, et d'autre part par des niveaux de tension variables dits de "luminance", représentatifs de la luminosité des différents points affichés à l'écran. Voyons plus en détails comment s'organise ce signal.

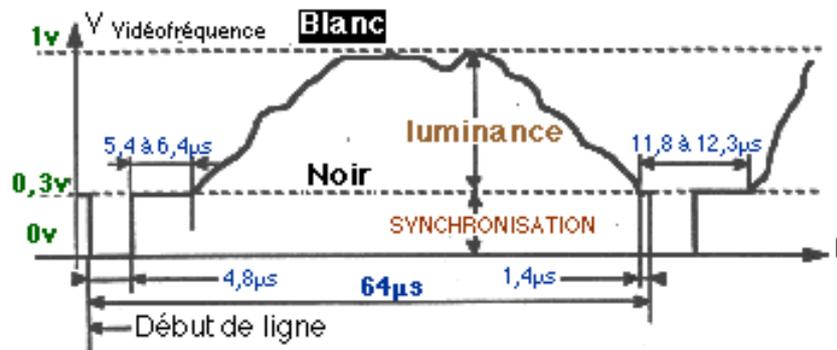


Figure I.3 : Constitution du signal vidéo pour une ligne.

a. Amplitude

L'amplitude du signal vidéo varie dans une plage de 1 V crête à crête (sur lignes adaptées à 75 Ω). Les niveaux de synchronisation occupent 30% de cette plage, les niveaux de luminance les 70% restants. Cette répartition résulte d'un compromis entre la fiabilité de la synchronisation des balayages ligne et trame et la qualité de l'image. Elle permet de plus de séparer facilement à la réception les impulsions de synchronisation des niveaux de luminance par un simple écrêtage.

Pour un signal dont l'amplitude varie entre 0 et 1 V, les impulsions de synchronisation apparaissent entre 0 et 0,3 V. Ce niveau de 0,3 V est désigné comme le niveau de suppression (*blanking*). Il correspond à un affichage noir à l'écran.

Avec l'exemple précédent, les niveaux de luminance s'échelonnent entre 0,3 V et 1 V. Plus le niveau de tension est important, plus l'intensité du faisceau excitant le matériau luminescent (luminophores, en anglais *phosphors*) de l'écran est grand et plus le point de l'écran apparaît clair. Le niveau du "noir" peut coïncider ou non avec le niveau de suppression, suivant que l'on souhaite obtenir à la restitution sur l'écran une image plus ou moins lumineuse (*cf.* Figure I.4). On peut être également conduit à introduire à un décalage pour un problème lié à la non linéarité de la réponse de l'écran (*cf.* la partie I.3.c). Le niveau du noir peut alors être situé 0,07 V au-dessus du niveau de suppression.

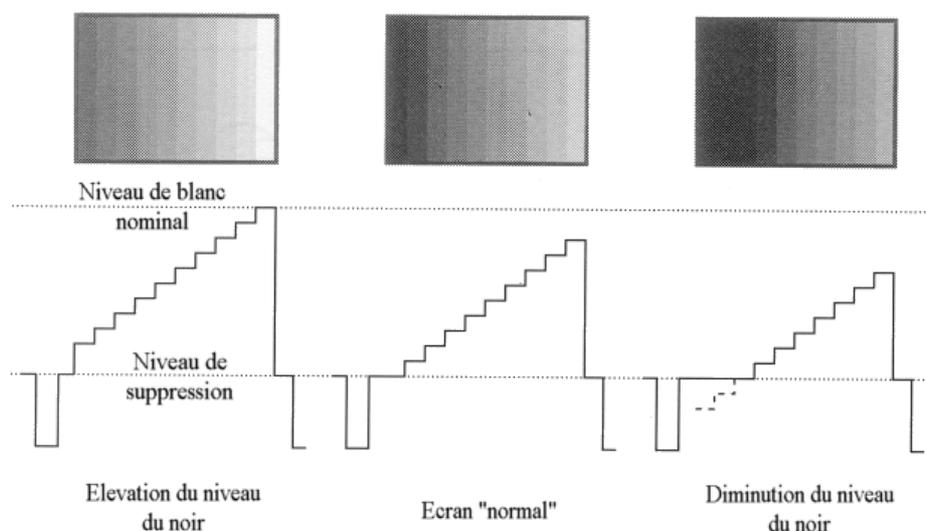


Figure I.4 : Choix du niveau de référence "noir" pour la luminance.

b. Synchronisation

Les impulsions de synchronisation marquent le début d'une trame ou d'une ligne. Elles déclenchent des signaux en dent de scie qui permettent de repérer le balayage des lignes d'une trame ou les points d'une ligne. La différenciation entre impulsion de synchronisation "trame" et "ligne" s'effectue à partir de leurs durées respectives.

Les impulsions correspondant au balayage horizontal sont des impulsions de 0,3 V à 0 V (suivant l'exemple développé dans la section précédente) de durée 4,7 μ s à 4,8 μ s (cf. Figure I.3). Cette impulsion est placée 1,4 à 1,5 μ s après la fin des variations du signal de luminance correspondant à la ligne précédente, et 5,4 à 6,4 μ s avant le début des variations des niveaux de luminance de la ligne à balayer, d'où une durée totale du "retour ligne" de l'ordre de 12 μ s. Les intervalles de temps entre impulsions de synchronisation et niveaux de luminance (occupant pour une ligne les 52 μ s restantes) permettent d'éviter les risques d'interférence entre ces deux types de variations de tension. Pour ce qui est de l'intervalle de 1,4 à 1,5 μ s (*front porch* en anglais), il assure de plus que l'instant de déclenchement du balayage ligne ne soit pas perturbé par le dernier niveau de luminance intervenant dans la ligne précédente (cf. Figure I.5).

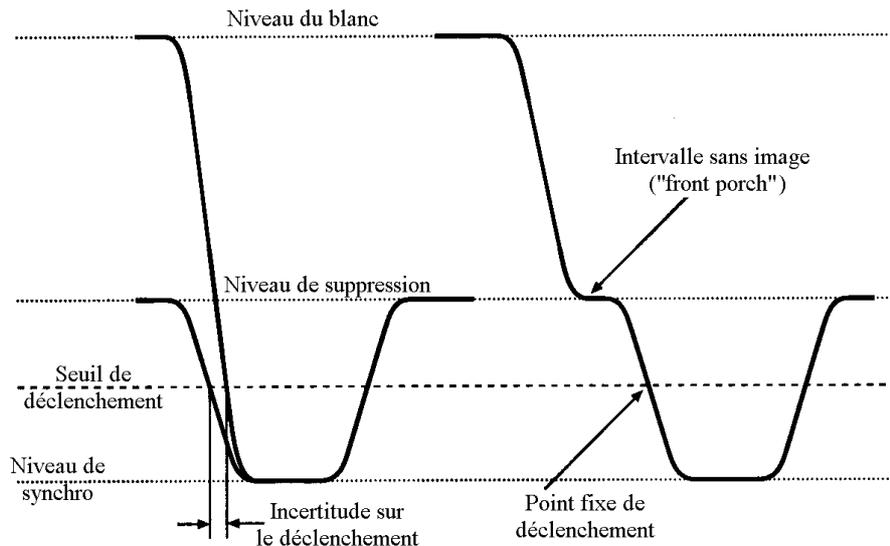


Figure I.5 : Intérêt du "front porch" pour la synchronisation ligne.

Les "codages" des télévisions à péage peuvent consister à faire fluctuer selon un algorithme de cryptage la position du front des impulsions de synchronisation de ligne.

Les impulsions de synchronisation de trame occupent elles-aussi deux niveaux (0,3 et 0 V) mais apparaissent pendant la durée de plusieurs lignes. Elles se décomposent en trois séquences de 2,5 lignes (une trame comporte 312,5 lignes) : une première avec 5 impulsions courtes apparaissant dans les 2,5 dernières lignes de la trame précédente, une deuxième avec 5 impulsions plus larges dans les 2,5 premières lignes de la nouvelle trame, et enfin une troisième avec de nouveau 5 impulsions courtes (cf. Figure I.6).

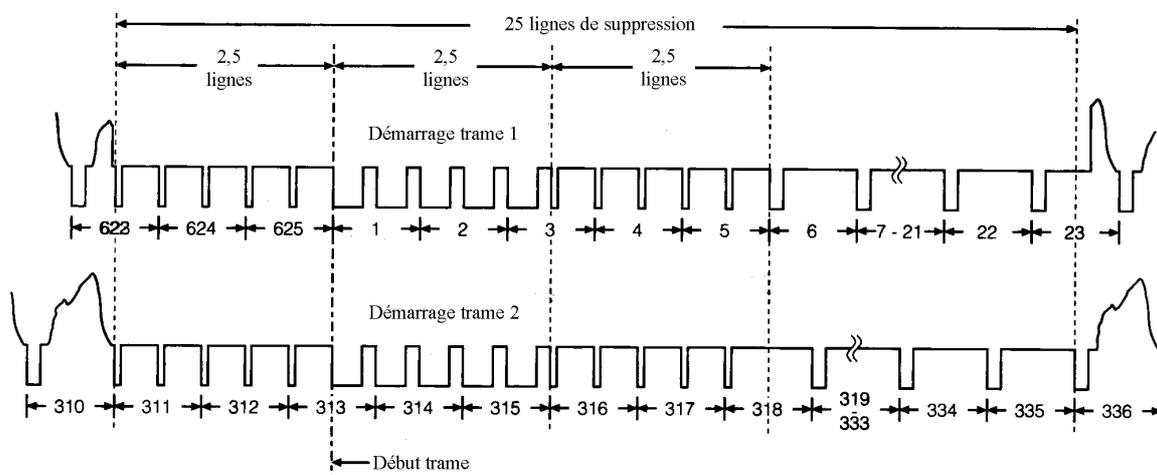


Figure I.6 : Déclenchement des trames pour un standard à 625 lignes.

A ces 7,5 lignes supprimées par trame s'ajoutent encore une vingtaine de lignes "noires" ne transmettant pas d'informations image mais par exemple des lignes test ou des informations codées (sous-titrage, télétexte dans les 12 premières lignes...).

c. Correction de gamma

Un problème se pose du point de vue du traitement du signal vidéo. Si les niveaux électriques fournis par les capteurs d'images (caméra CCD...) varient généralement linéairement avec le niveau de luminosité analysé, il n'en va pas de même de la réponse des luminophores des écrans cathodiques : la puissance lumineuse émise au niveau de l'écran varie généralement avec le niveau V du signal de commande comme V^γ , où γ est une constante sans dimension dépendant de l'écran utilisé. Ce paramètre γ varie entre environ 2,2 pour les tubes monochromes et 2,8 pour les tubes couleurs.

Si l'on ne prend pas garde à cette caractéristique des écrans, les modifications du ton lumineux sont très réduites dans le domaine "sombre" du spectre lumineux et très accentuées dans le domaine "clair".

Afin de ne pas être gêné par la non-linéarité de la caractéristique intensité lumineuse-tension de commande des écrans, on effectue une "correction de gamma" : on insère dans la chaîne de transmission une loi en puissance de $1/\gamma_c$. Si la valeur de γ_c coïncide avec γ , la caractéristique corrigée du système est parfaitement linéaire (cf. Figure I.7).

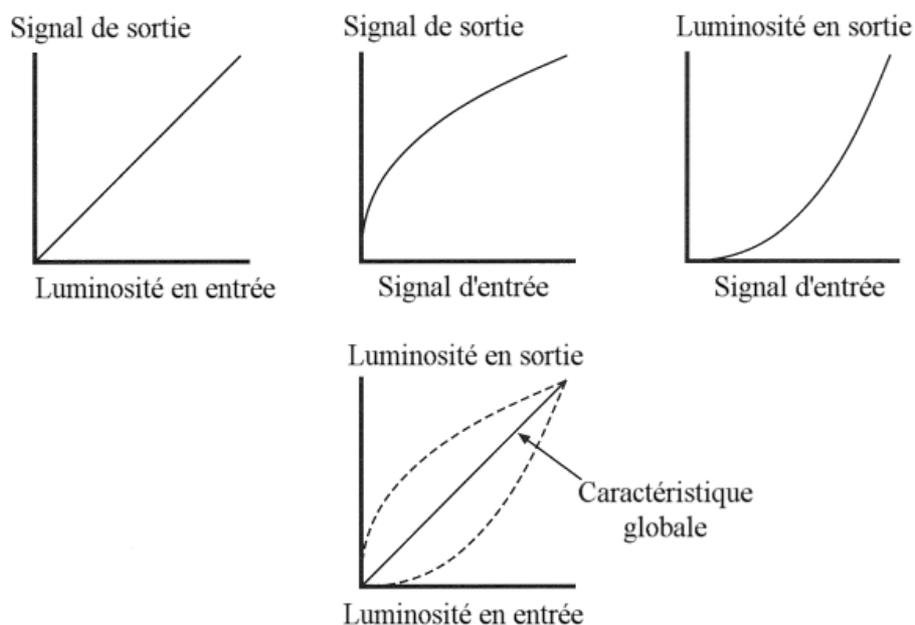


Figure I.7 : Principe de la correction de gamma.

Néanmoins, pour accentuer les contrastes, on peut être conduit à utiliser une valeur de γ_c légèrement différente de γ , de telle sorte que la loi corrigée soit par exemple en $V^{1,3}$.

Le correcteur de gamma est généralement inséré dans la chaîne d'émission, directement en sortie du capteur utilisé, et ce pour diverses raisons. La caméra source de l'image est placée dans un environnement bien contrôlé, ou auquel on s'adapte, alors qu'à l'autre bout de la chaîne on a des millions de récepteurs de télévision. Il est clair qu'un correcteur précis utilisé au niveau de la caméra est plus efficace que différents correcteurs, forcément moins coûteux donc moins efficaces, placés sur les récepteurs. De plus, un bruit introduit dans la chaîne de transmission au niveau de la caméra, après que la correction a été effectuée, est beaucoup moins probable qu'un bruit introduit après la correction. Or les bruits les plus gênants à la visualisation sur l'écran sont surtout ceux dans le domaine sombre. Ces bruits "sombres" sont accentués par la caractéristique du correcteur, alors qu'ils sont réduits par celle de l'écran, les bruits apparaissant après la correction sont donc moins "ennuyeux" que ceux apparaissant avant celle-ci du point de vue de la qualité de l'image à l'écran.

d. Composante continue

La composante continue du signal vidéo est généralement perdue à la réception. Or la valeur moyenne de ce signal, fluctue au cours du temps suivant la luminosité moyenne de l'image transmise (voir la moyenne d'un signal à rapport cyclique variable).

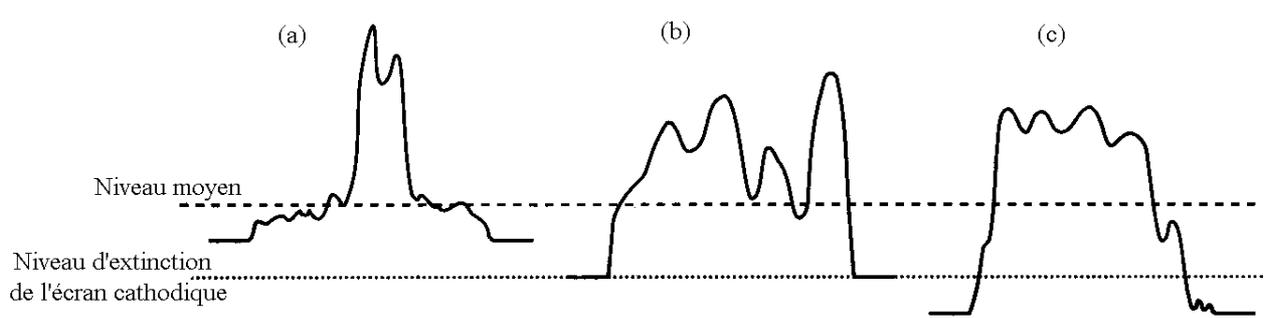


Figure I.8 : Problème de restitution de l'image lié à la non transmission de la composante continue. En (a) dans le cas d'un niveau moyen de luminance de ligne "sombre", le noir est interprété comme un gris. En (b), le niveau moyen de luminance correspond bien avec celui de l'écran, la restitution est correcte. En (c), le niveau moyen de luminance est "clair", on perd des détails sombres à la restitution.

Le niveau de suppression (ou/et le niveau du noir) fluctue donc dans le signal reçu sur le téléviseur. Pour repérer ce niveau et le faire coïncider avec le niveau d'extinction du tube, on reconstitue à la réception la composante continue du signal initial grâce aux lignes noires : le signal est appliqué sur un montage détecteur de crête (du type capacité en série avec une diode, soit le montage *clamp*) pendant les périodes séparant les impulsions de synchronisation des variations des niveaux de luminance (*back porch*, cf. Figure I.9).

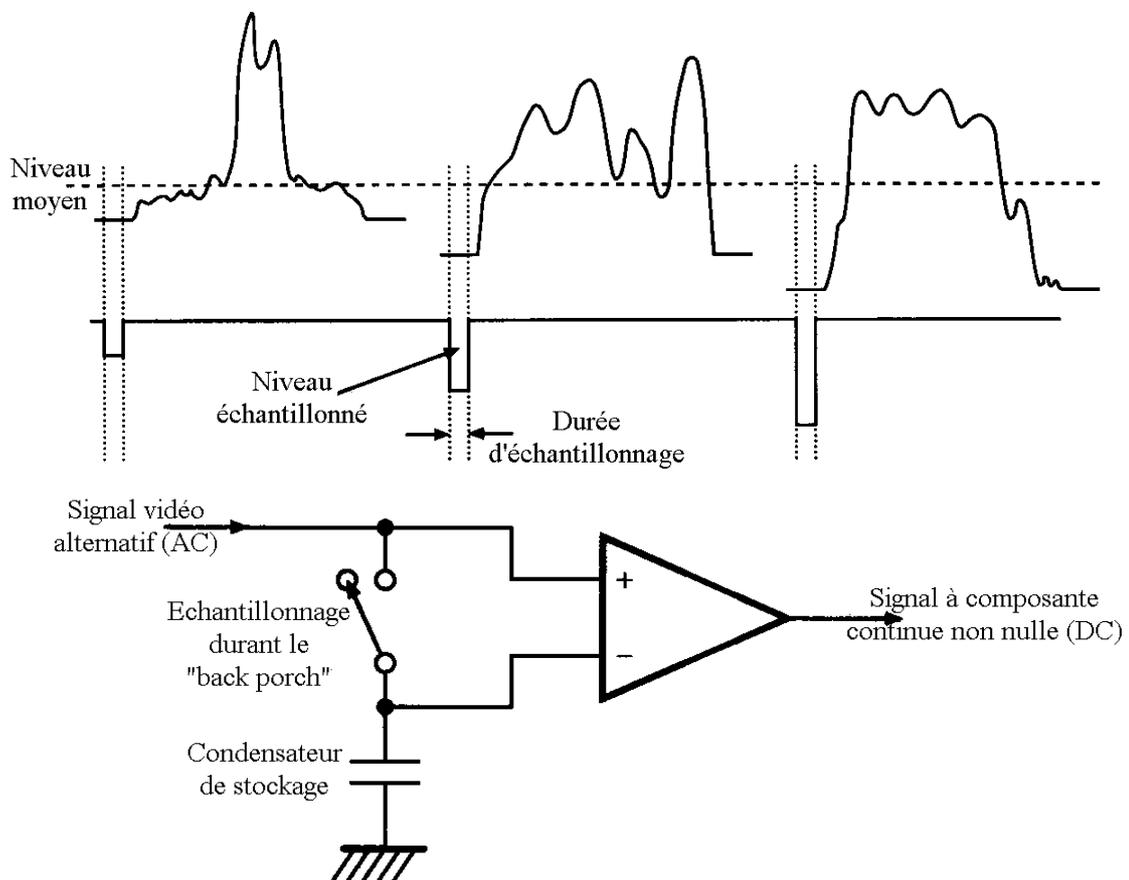


Figure I.9 : Principe de la récupération de la composante continue du signal vidéo (échantillonnage durant le "back porch") et exemple de circuit de réalisation.

4. Transmission

a. Son

Le signal sonore est multiplexé avec le signal vidéo : il est modulé en amplitude (système français pour la diffusion hertzienne) ou en fréquence (la plupart des autres systèmes) sur une sous-porteuse d'environ 7,5 MHz dans le standard européen. Il n'interfère pas alors avec la bande de base du signal vidéo qui occupe au maximum 6 MHz. A l'émission, la puissance transmise correspondant au son est environ 5 fois plus faible que la puissance correspondant à l'image.

b. Fréquences porteuses

Pour transmettre le signal vidéo sur de longues distances, il faut le moduler. Les caractéristiques de la modulation employée varient selon la nature de la transmission (cf. Figure I.10).

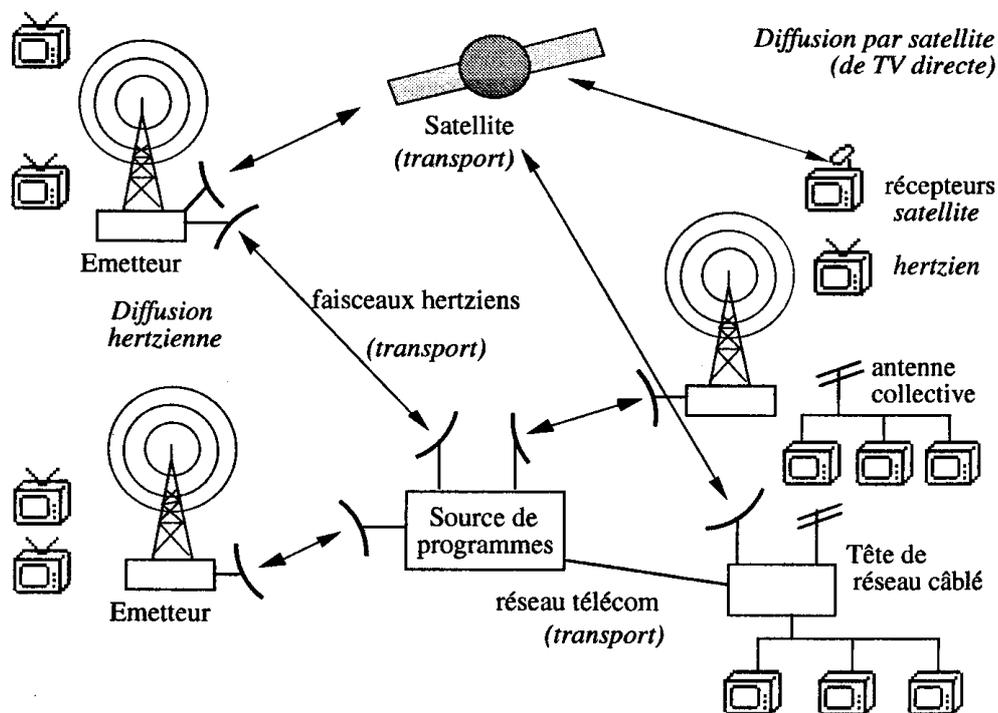


Figure I.10 : Les différentes natures de la diffusion de la télévision.

i) Faisceaux hertziens

Dans le cas du transport sur faisceaux hertziens, soit de la source des programmes vers les émetteurs régionaux, on utilise une modulation FM à une fréquence intermédiaire de 70 MHz, translatée en hautes fréquences dans les bandes 4, 8 ou 13 GHz.

ii) Diffusion hertzienne

La diffusion hertzienne entre les émetteurs régionaux et les récepteurs de télévision, distants de quelques m à environ 50 km, peut utiliser 3 bandes de fréquence :

- ❑ la bande I VHF (*Very High Frequency*) : elle s'étend entre 47 et 68 MHz et contient 3 canaux. Elle est peu employée,
- ❑ la bande III VHF : elle s'étend de 174 à 223 MHz et contient 6 canaux. Employée par l'ancienne "première chaîne" française, cette bande est actuellement utilisée par Canal+,
- ❑ la bande UHF (*Ultra High Frequency*) : elle s'étend de 470 à 860 MHz et contient 49 canaux avec un espacement entre 8 MHz. C'est de loin la plus employée.

La modulation utilisée est alors la modulation d'amplitude à bande latérale atténuée (BLA, cf. Figure I.11) qui permet de réduire l'occupation spectrale tout en ne compliquant pas trop les filtrages requis (on utilise un filtre passe-haut, filtre de Nyquist, après la modulation d'amplitude). En l'occurrence, on conserve 1,25 MHz de la bande latérale inférieure.

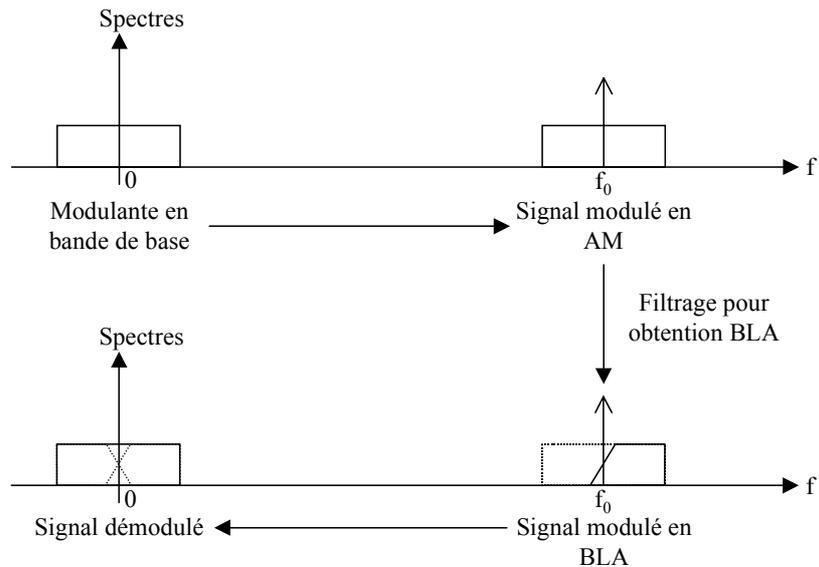


Figure I.11 : Principes de la modulation BLA.

iii) Diffusion par satellite

La diffusion analogique par satellite repose essentiellement sur la modulation de fréquence FM, en attendant le numérique.

iv) Diffusion par câble

La diffusion analogique par câble repose sur la modulation BLA.

v) Fibre optique

La diffusion sur fibre optique analogique repose sur la modulation FM et le multiplexage, mais de plus en plus la diffusion numérique prend le pas sur la diffusion analogique sur ce type de canal.

5. Résumé : Chaînes d'émission et réception

Pour résumer cette partie, on peut se référer aux schémas des chaînes typiques d'émission et de réception, respectivement représentés sur la Figure I.12 et la Figure I.13.

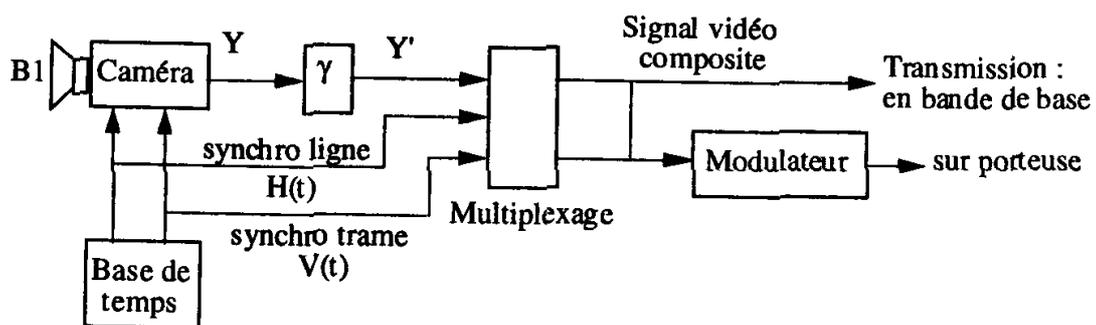


Figure I.12 : Synoptique d'une chaîne d'émission en télévision analogique.

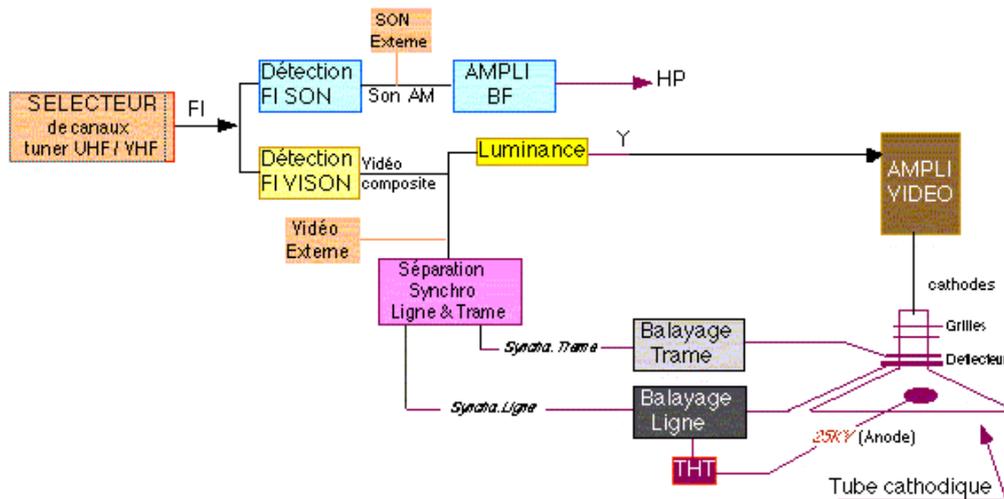


Figure I.13 : Synoptique d'un récepteur en télévision analogique (THT : très haute tension, HP : haut-parleur).

Le sélecteur de canaux, ou tuner, comporte un filtre passe-bande F et un mélangeur dont l'une des deux entrées est la sortie de F et l'autre un signal issu d'un oscillateur local dont la fréquence f_{OL} correspond au canal que l'on souhaite regarder à l'écran. On procède ensuite à la démodulation autour d'une fréquence intermédiaire FI (par exemple $FI = 38,9$ MHz pour la luminance et $FI = 32,4$ MHz pour le son modulé en AM). Il s'agit d'une détection hétérodyne (cf. l'annexe sur ce sujet dans la partie V). Le filtre F est en fait le filtre éliminant la fréquence image du signal à analyser. Ce filtre est accordé par rapport à f_{OL} , grâce à l'utilisation d'une diode varicap.

Le principe de génération du balayage ligne à partir des impulsions de synchronisation ligne est schématisé sur la Figure I.14. En (a), on a l'état du montage au début du balayage d'une trame. En (b), l'interrupteur a été rendu passant au moment de l'impulsion de synchronisation ligne, le courant I_L dans l'inductance L augmente linéairement avec le temps. Au bout de $26 \mu\text{s}$, l'interrupteur se bloque, le faisceau a balayé la première demi-ligne (cf. la Figure I.2). Alors l'énergie emmagasinée dans L se décharge dans la capacité C en parallèle, et le courant I_L diminue assez rapidement, comme indiqué en (c). Il devient même négatif jusqu'à ce que l'interrupteur redevienne à nouveau passant $12 \mu\text{s}$ après son blocage. Le faisceau a effectué le "retour ligne". Puis I_L croît à nouveau linéairement avec le temps. Au bout de $26 \mu\text{s}$, en (d) sur la Figure I.14, le faisceau a balayé une deuxième demi-ligne, l'interrupteur ne se bloque ensuite que $52 \mu\text{s}$ après le dernier blocage (d'où le balayage d'une ligne complète), on revient au même état qu'en (b) et le cycle se répète jusqu'au balayage de la dernière demi-ligne de la trame.

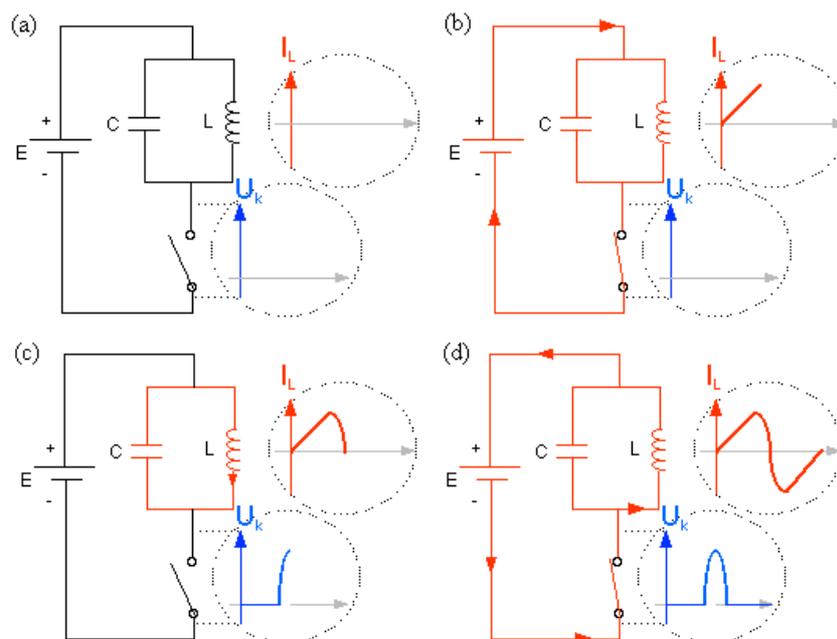


Figure I.14 : Principes de génération du balayage ligne. I_L est le courant traversant l'inductance L , U_K la tension aux bornes de l'interrupteur.

Le balayage trame est obtenu en faisant traverser par un courant en dent de scie un dipôle formé par une résistance (typiquement 15Ω) en série avec une inductance (typiquement 30 mH).

Un exemple de montage amplificateur vidéo (circuit mettant en forme les variations de la luminance pour générer le faisceau d'électrons dans le tube, cf. la Figure I.13) est donné sur la Figure I.15 suivante.

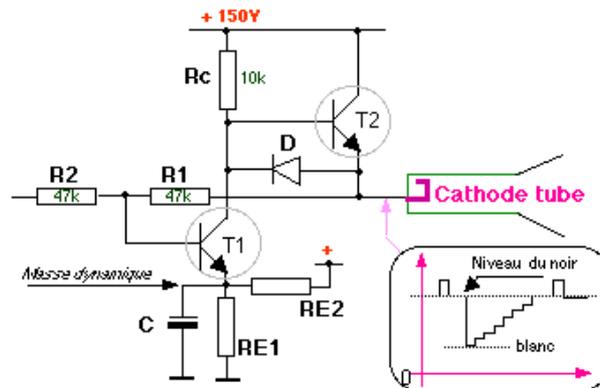


Figure I.15 : Exemple de montage amplificateur vidéo.

II. Télévision en couleurs

1. Principes

Conformément aux caractéristiques de la vision humaine, le cerveau peut reconstituer la plupart des couleurs visibles à partir d'un mélange de 3 couleurs fondamentales situées dans le rouge, le vert et le bleu. C'est la trichromie additive. L'image vidéo est donc décomposée par des filtres optiques en ces trois composantes fondamentales qui seront analysées indépendamment pour donner trois signaux vidéo notés E_R , E_V et E_B . On parle de liaison RVB, en anglais RGB pour *Red, Green, Blue*.

2. Ecran couleur

Sur un écran couleur sont distribués trois types de "luminophores" émettant respectivement dans le rouge, le vert et le bleu. Ces matériaux se répartissent soit sous formes de grains, soit suivant des bandes. L'écran est balayé par trois faisceaux excitant ces matériaux, un faisceau par couleur. Les faisceaux passant au travers d'un masque à trous ou d'une grille à fentes suivant le type de distribution des luminophores (cf. Figure II.1). La première technologie est moins coûteuse et permet un affichage assez précis mais la convergence des faisceaux est problématique. La deuxième technologie permet d'obtenir une image plus lumineuse et avec des couleurs mieux rendues puisque le nombre d'électrons frappant l'écran est plus grand.

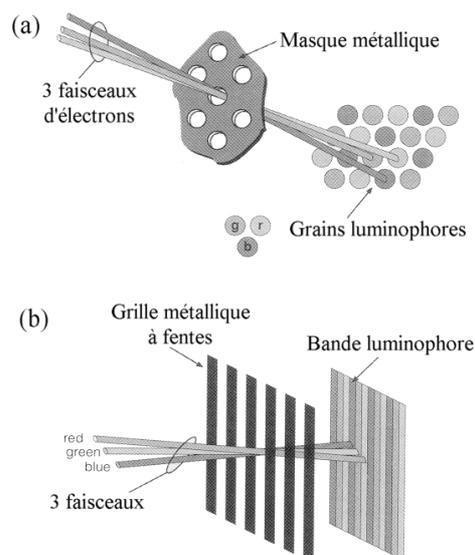


Figure II.1 : Balayage d'un écran couleur. En (a) procédé "shadow mask" ou "Invar", en (b) procédé "Trinitron".

3. Signal vidéo couleur

a. Colorimétrie

Les 3 signaux E_R , E_V et E_B sont équivalents à des luminances et peuvent être transmis séparément. C'est parfois le cas en transmission locale, ou au niveau de la prise péritel des téléviseurs, magnétoscopes, décodeurs, etc... Ce procédé n'est pas applicable en diffusion hertzienne ni en distribution câblé car il n'est pas compatible avec les téléviseurs noir et blanc (problème fondamental lors de l'introduction de la télévision couleur dans les années 60 et 70) et il triple *a priori* la largeur de bande nécessaire à la transmission.

La compatibilité avec le noir et blanc est obtenue en remplaçant les trois signaux E_R , E_V et E_B par 3 autres. Le premier est la luminance qui est la même qu'en télévision N&B. C'est donc le seul signal utile aux téléviseurs monochromes. La luminance Y s'exprime sous la forme :

$$Y = 0,30 E_R + 0,59 E_V + 0,11 E_B$$

(les coefficients proviennent de la différence de sensibilité de l'œil selon les couleurs). Les deux autres signaux, $D_B = E_B - Y$ et $D_R = E_R - Y$, composent la chrominance qui portent l'information de coloration de l'image. Ces deux signaux, qui peuvent être négatifs, suffisent ; $D_V = E_V - Y$ (le plus souvent voisin de zéro du fait de l'efficacité visuelle de l'œil) s'en déduit. On parle alors de "liaison composite YUV" (U et V étant respectivement associés à D_B et D_R).

On peut représenter les composantes dans le plan de couleurs (D_B ; D_R). Pour une couleur "purement" rouge, soit $E_R = 1$ et $E_B = E_V = 0$, on a $D_B = -0,30$ et $D_R = 0,7$. Pour un bleu, soit $E_B = 1$ et $E_R = E_V = 0$, on a $D_B = 0,89$ et $D_R = -0,11$. Enfin pour un vert, soit $E_V = 1$ et $E_B = E_R = 0$, on a $D_B = D_R = -0,59$.

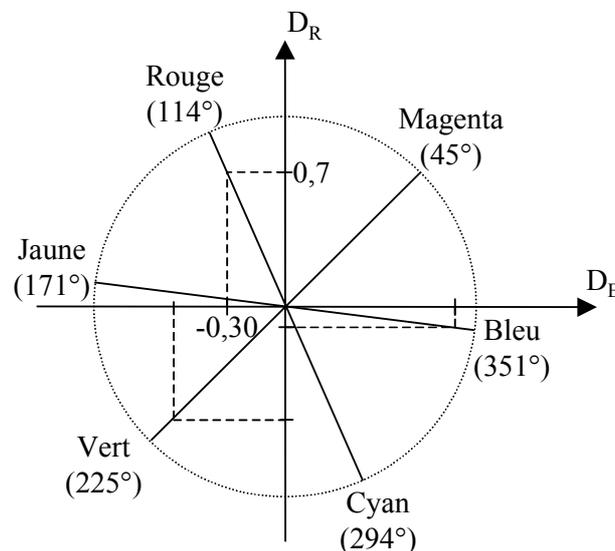


Figure II.2 : Plan de couleurs.

Dans le plan de couleur, les points symétriques par rapport à l'origine des points rouge, vert et bleu correspondent respectivement aux couleurs cyan (bleu clair), magenta (rose pourpre) et jaune, soit les couleurs complémentaires de rouge, vert et bleu (le cyan est obtenu par mélange du vert et du bleu, le magenta du rouge et du bleu, le jaune du rouge et du vert).

b. Aspect fréquentiel

A l'origine de la télévision en couleur, la contrainte était de ne pas modifier la répartition en fréquences des émetteurs. Il a donc fallu insérer les informations de chrominance dans le spectre de luminance. Le principe retenu dans tous les systèmes a donc été de moduler la chrominance sur une sous porteuse et de la multiplexer fréquentiellement avec la luminance. Pour cela il a donc été nécessaire de réduire fortement la bande passante occupée par la chrominance. C'est possible sans trop de gêne car l'œil est beaucoup moins sensible aux variations de chrominance qu'aux variations de luminance. L'acuité visuelle de l'œil est en fait environ 4 fois plus importante pour la luminance que pour la chrominance. En conséquence, les signaux de chrominance sont tout d'abord filtrés à environ le quart de la bande passante vidéo, soit de l'ordre de 1,5 MHz.

Après quoi, les signaux de chrominance modulent une sous-porteuse vers les 3/4 de la bande passante vidéo, de sorte que le spectre de la sous porteuse modulée se situe dans la moitié supérieure du spectre de la luminance. C'est dans le choix de la fréquence de la sous-porteuse et du type de modulation que se situe la différence entre les trois systèmes classiques de télévision en couleurs : NTSC, PAL, SECAM.

Il y a donc nécessairement réduction de la qualité du signal de luminance, dont une partie du spectre est occupée par la chrominance. Cette réduction peut cependant être limitée car :

- L'énergie de la luminance est contenue pour l'essentiel dans le bas de son spectre.
- Compte tenu de la périodicité des images, donc des lignes, des demi-frames et de la synchronisation, le spectre vidéo est un spectre de raies. La chrominance est aussi un spectre de raies. Si elle module une sous porteuse telle que les raies de chrominance soient intercalées avec celle de la luminance, il sera alors possible de les séparer avec un filtre en "peigne". Si cela n'est pas le cas, au prix d'une acceptable altération de l'image (récepteurs bas de gamme) il est possible de filtrer la partie "haute" du spectre de luminance pour récupérer les informations de chrominance.

Enfin, on transmet souvent ce spectre en modulation BLA, comme indiqué déjà dans la section I.4.b.ii) pour la diffusion hertzienne. A l'aide d'un filtre passe-haut, on conserve la bande latérale supérieure et une partie de la bande latérale inférieure ainsi que la porteuse f_0 atténuée (cf. Figure II.3). Les différents canaux de télévision peuvent être ainsi espacés de 8 MHz. La présence de la porteuse permet d'utiliser la démodulation par détection d'enveloppe, moyennant une distorsion jugée raisonnable, procédé peu coûteux. Cette méthode est cependant aujourd'hui supplantée par la démodulation cohérente, la porteuse étant facilement récupérable (transmission de salve de porteuse pendant la transmission des niveaux de suppression, ou/et utilisation d'une boucle à verrouillage de phase). C'est dans les basses fréquences de la bande de base que se trouvent les signaux de synchronisation lignes et trames, avec un faible niveau. Le résidu de la bande latérale inférieure permet de doubler leur puissance.

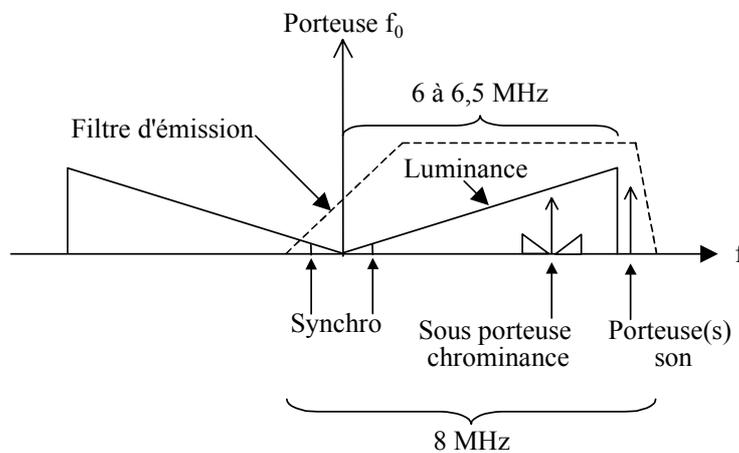


Figure II.3 : Spectre du signal vidéo couleur modulé (standard européen). Le son est généralement modulé en fréquence (systèmes NTSC et PAL) ou en amplitude (SECAM) autour d'une sous-porteuse située en dehors de la bande de fréquence occupée par le signal vidéo.

4. Les différents standards

a. Système NTSC

Ce système américain (NTSC, *National Television Standard Committee*) est ancien ; il date des années 50. Son principe de base est la modulation d'amplitude en quadrature (MAQ) d'une sous-porteuse par les deux composantes de la chrominance. Ce procédé, illustré par le schéma bloc de la Figure II.4, permet en effet de moduler deux signaux indépendants $I(t)$ et $Q(t)$ sur la même sous-porteuse f_{sp} .

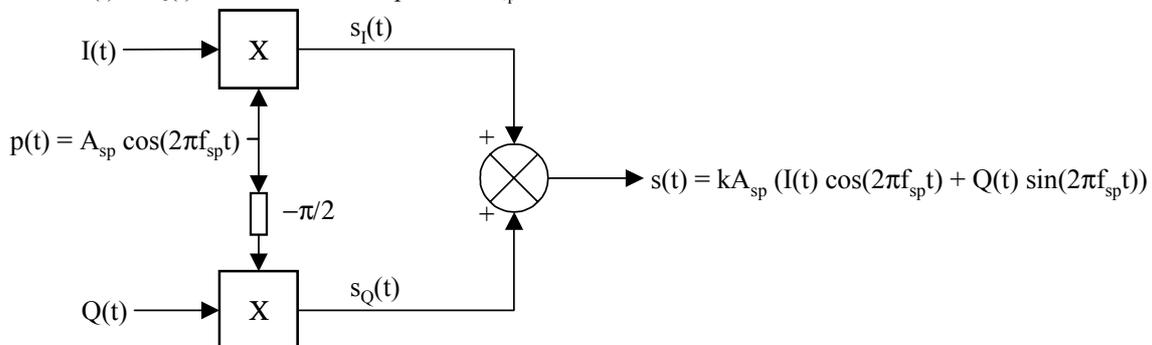


Figure II.4 : Génération d'une modulation d'amplitude en quadrature.

Dans ce cas, les signaux modulateurs $I(t)$ et $Q(t)$ sont produits par un matriçage des signaux de chrominance : $I = -0,27D_B + 0,74 D_R$ et $Q = -0,41D_B + 0,48 D_R$. Dans le plan de couleur (cf. la Figure II.5), la composante I se situe dans la direction de l'orange où l'œil est très sensible aux variations de couleurs, et bénéficie d'une bande passante plus grande que Q (un peu plus de 1000 kHz de bande passante pour I contre seulement 700 kHz pour Q), qui correspond à une direction de faible sensibilité de l'œil (magenta). La sous-porteuse est à 3,58 MHz. L'avantage principal du système est son faible encombrement spectral (cf. la Figure II.6) : avec la sous-porteuse son multiplexée à 4,5 MHz, l'espacement entre canaux NTSC n'est que de 6 MHz en diffusion hertzienne.

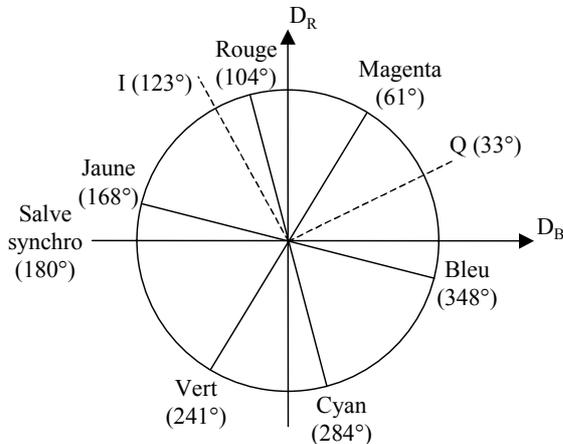


Figure II.5 : Plan de couleurs NTSC. Les salves de synchronisation sont transmises à 180° de D_B .

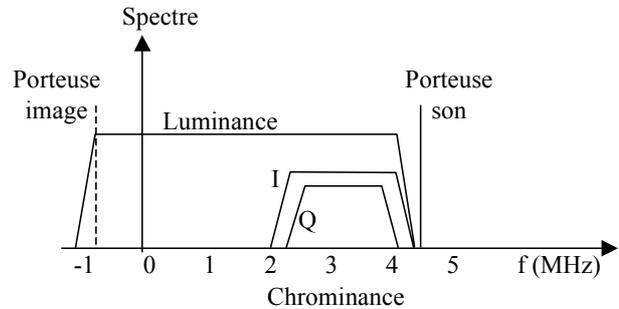


Figure II.6 : Plan de fréquence NTSC. La bande passante de la luminance est limitée à 4,2 MHz.

L'utilisation de la MAQ implique que l'on effectue une démodulation cohérente à la réception, comme illustré sur la Figure II.7. L'inconvénient de cette méthode réside dans le fait qu'elle est très sensible aux erreurs de phase en réception (sur les sorties d_1 et d_2 du montage de la Figure II.7, les signaux ne peuvent être retrouvés séparément que si la sous-porteuse locale utilisée à la réception est en parfait synchronisme avec la sous-porteuse utilisée à l'émission, soit un déphasage sur le schéma φ nul), qui vont se traduire par une erreur de couleur. Bien que la référence de phase soit transmise en début de chaque ligne par une salve de synchronisation (une dizaine de périodes sur le palier suivant l'impulsion de synchronisation, cf. Figure II.8), cet effet reste le principal défaut du système NTSC. C'est peut-être pour cela qu'on l'avait surnommé *Never Twice the Same Color* (jamais deux fois la même couleur).

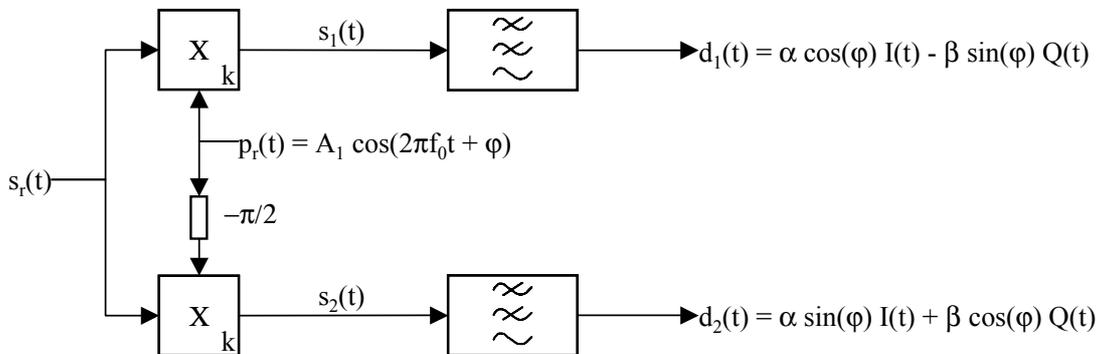


Figure II.7 : Démodulation cohérente d'un signal modulé en quadrature.

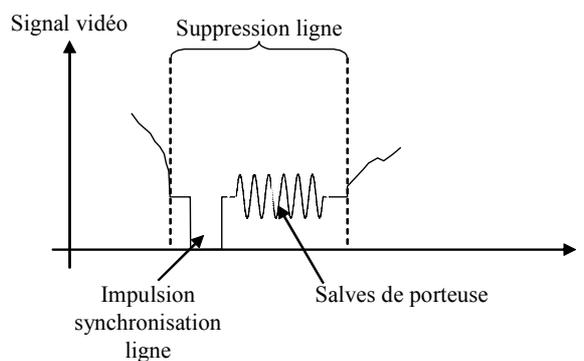


Figure II.8 : Salve de porteuse en début de ligne.

Il est à noter que du fait des valeurs relatives des fréquences de balayage ligne (15734,27 Hz) et de la sous-porteuse chrominance (3579454 Hz), le générateur de sous-porteuse à la réception produit 227,55 cycles lors du balayage d'une ligne. D'une ligne à l'autre, la sous-porteuse chrominance régénérée grâce aux salves est déphasée d'environ 180° (une demi-période). On peut exploiter cette propriété pour concevoir un filtre peigne assez simple permettant de séparer les signaux de chrominance de la luminance : par addition de deux lignes successives on isole la luminance et par soustraction les deux composantes de la chrominance encore modulées par la sous-porteuse f_{sp} .

b. Système PAL

Ce système allemand, développé chez *Telefunken* en 1963, a repris le principe du NTSC, la MAQ, en corrigeant son principal défaut, la sensibilité aux erreurs de phase en réception. Pour cela, la phase du signal D_R modulant en quadrature la sous-porteuse, est alternée à chaque ligne (cf. Figure II.9), d'où le nom du procédé : *Phase Alternance Line*, ou PAL.

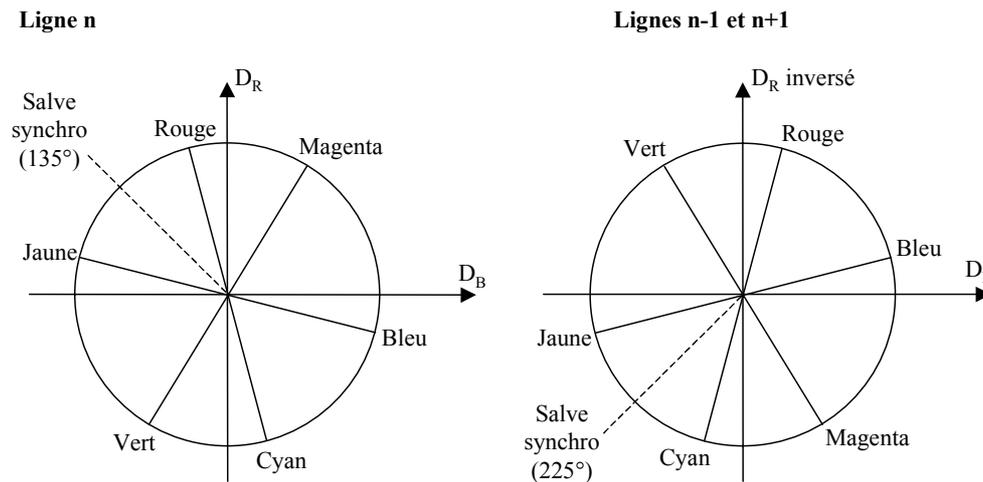


Figure II.9 : Système PAL, plan de couleurs.

A la réception, et avant la démodulation, on sépare les signaux D_R et D_B en faisant :

- ligne $n +$ ligne $(n-1) = 2 D_B$
- ligne $n -$ ligne $(n-1) = \pm 2 D_R$, le signe dépendant de la parité de n .

A ce point, les deux signaux sont toujours modulés, mais ils sont séparés. En contrepartie, la définition verticale est réduite de moitié, puisque l'on fait la moyenne de deux lignes successives.

La porteuse est à 4,434 MHz, et une salve est transmise pour la référence de phase en début de chaque ligne, avec une alternance entre $3\pi/4$ et $5\pi/4$. Cette référence permet de démoduler la voie D_R avec sa phase correcte.

Les schémas des blocs d'émission et de réception du système PAL sont donnés sur la Figure II.10. Le démodulateur inclut une ligne à retard (retard de la durée totale d'une ligne soit $64 \mu s$) pour obtenir simultanément les lignes n et $n-1$. L'addition (ou la soustraction) de deux lignes successives crée l'effet de peigne qui améliore la séparation de la luminance et de la chrominance

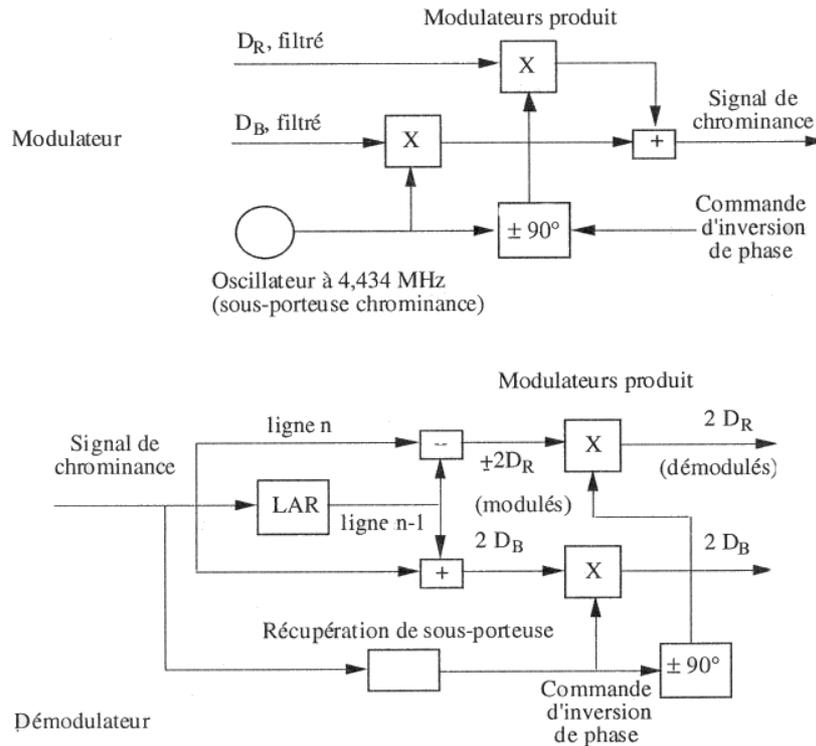


Figure II.10 : Modulateur et démodulateur PAL.

c. Système SECAM

Le système français SECAM (séquentiel couleur à mémoire, mis en service en octobre 1967) utilise la modulation de fréquence de la sous-porteuse de la chrominance. Un seul signal pouvant être transmis de la sorte, on transmet alternativement la composante D_R et la composante D_B . Au décodage, la chrominance est reconstituée en utilisant la composante reçue et la composante complémentaire de la ligne précédente qui a été mise en "mémoire", c'est-à-dire retardée par une ligne à retard de $64 \mu\text{s}$.

Comme en PAL, il y a réduction de moitié de la définition verticale, ce qui est en général peu visible. Un transitoire brusque d'une ligne à l'autre peut créer des erreurs de couleur, mais comme il y a alternance d'une trame à l'autre de la répartition de D_R et D_B entre les lignes, cet effet est atténué.

La fréquence centrale de la sous-porteuse et l'excursion en fréquence ne sont pas les mêmes pour D_R et D_B :

- $f_0 = 4,406 \text{ MHz}$ (soit 282 fois la fréquence de balayage horizontal f_L) et $\Delta F = \pm 280 \text{ kHz}$ pour D_R ,
- $f_0 = 4,250 \text{ MHz}$ (soit 272 fois f_L) et $\Delta F = \pm 230 \text{ kHz}$ pour D_B .

Ces fréquences, asservies sur f_L , sont transmises en salves en début de chaque ligne, ce qui permet l'identification de la composante transmise. Au codage, un commutateur aiguille alternativement D_R et D_B vers l'émission (cf. Figure II.11), tandis qu'au décodage (cf. Figure II.12), un permutateur synchronisé par l'identification des salves envoie le bon signal à l'entrée de chaque démodulateur.

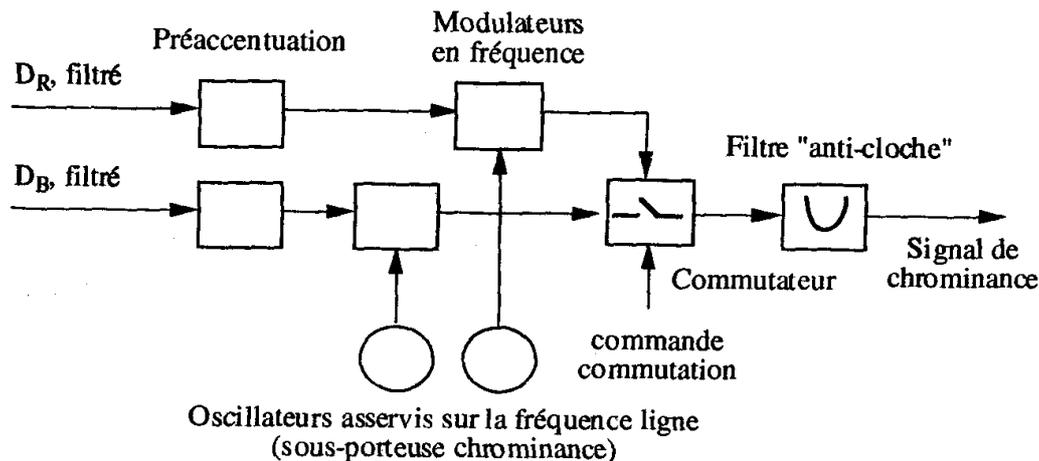


Figure II.11 : Modulateur SECAM.

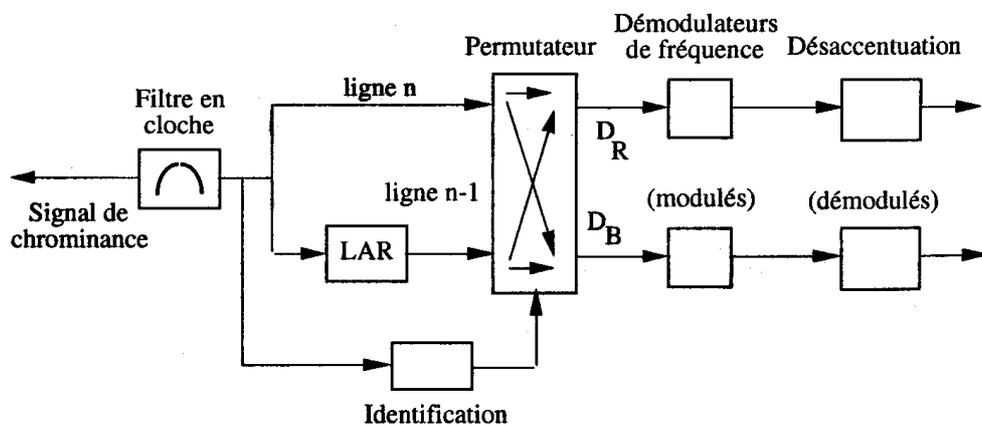


Figure II.12 : Démodulateur SECAM.

Comme il est classique en modulation de fréquence, on utilise une préaccentuation-désaccentuation pour limiter l'effet du bruit en hautes fréquences.

Le spectre de chrominance s'étend environ de 3,9 à 4,7 MHz. Il n'apparaît plus sous forme de raies du fait de la modulation de fréquence. Il est donc nécessaire de le séparer du spectre de la luminance par des filtrages supplémentaires :

- ❑ au codage, par un filtre coupe-bande centré autour de 4,285 MHz pour éviter une présence de la luminance dans la chrominance,
- ❑ au décodage, le même filtrage est effectué sur la voie de la luminance pour en enlever la chrominance, elle-même séparée par un filtre passe-bande,
- ❑ au codage, un filtre de mise en forme (dit "anti-cloche" car compensé par un filtre en cloche au décodage) permet d'améliorer le rapport chrominance à luminance pour des signaux éloignés de la fréquence centrale. Il en résulte une modulation artificielle d'amplitude de la chrominance, qui ne contient pas d'information utile.

III. Les écrans

Le marché international des écrans se chiffre à 70 milliards d'€ par an, avec environ 50% pour les écrans cathodiques et 50% pour les écrans plats (en termes de volume la part des écrans plats, généralement plus coûteux que les écrans cathodiques, est évidemment inférieure à 50%).

1. Les écrans à tube cathodique (CRT)

Le fonctionnement des écrans à tube cathodique (CRT, *Cathode Ray Tube*, cf. la Figure III.1) a déjà été évoqué dans la première partie. Leur invention date de 1897.

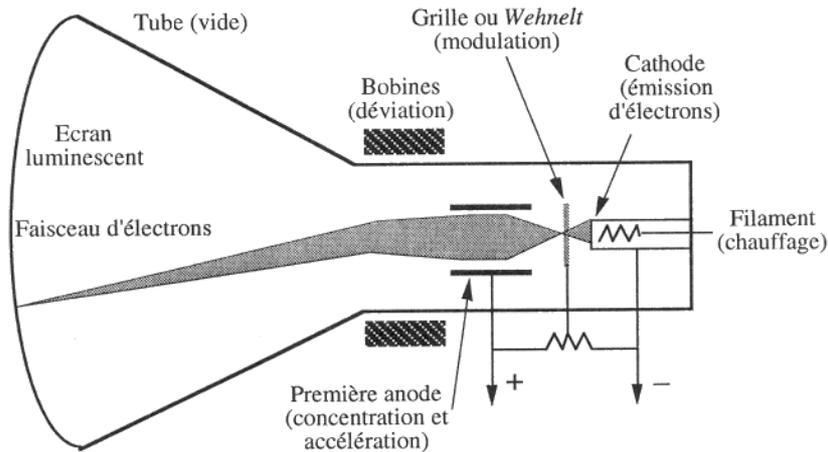


Figure III.1 : Schéma d'un écran à tube cathodique.

2. Les écrans plats

Les écrans CRT devenant rapidement lourds et encombrants quand on augmente la surface d'affichage, on cherche à mettre en œuvre des technologies à écrans plats quand les dimensions des écrans augmentent. Ces technologies peuvent se classer en deux grandes catégories : les écrans de type passif et les écrans de type émissif. Les premiers doivent être éclairés par une source externe pour produire la lumière qui sera ensuite filtrée pour produire les couleurs. Les seconds produisent eux-mêmes la lumière visible, par exemple par excitation de luminophores comme dans le cas des CRT.

a. Les écrans à cristaux liquides (LCD)

Les cristaux liquides sont des matières organiques amorphes qui ont la propriété de modifier la propagation de la lumière, plus exactement sa polarisation, si on leur applique un champ électrique. Le développement d'écrans plats LCD (*Liquid Crystal Display*) basés sur leur utilisation s'est effectué dans les années 70 et 80.

Le principe de l'écran LCD consiste à placer des cristaux liquides en sandwich entre deux plaques gravées et orientées à 90° l'une de l'autre (cf. Figure III.2). Les molécules de cristaux liquides, de forme allongée, s'orientent sur chacune des plaques parallèlement aux sillons de la plaque. L'écran est rétro-éclairé avec une lumière polarisée parallèlement aux sillons de la première plaque. Quand les molécules sont au repos (tension appliquée nulle), leur orientation varie progressivement d'une plaque à l'autre, modifiant également progressivement la polarisation de la lumière. La polarisation a tourné de 90° au niveau du second polariseur qui laisse alors passer l'intégralité de la lumière. Sous l'effet d'une électrode de commande, on oriente selon la tension appliquée une proportion plus ou moins importante de molécules dans une seule et même direction. Ces molécules ne modifient alors plus la polarisation incidente et on contrôle donc la quantité de lumière que laisse passer le second polariseur (ou celle déviée). Chaque pixel de l'image est constitué d'une cellule de ce type devant laquelle est placé un filtre rouge, vert, ou bleu.

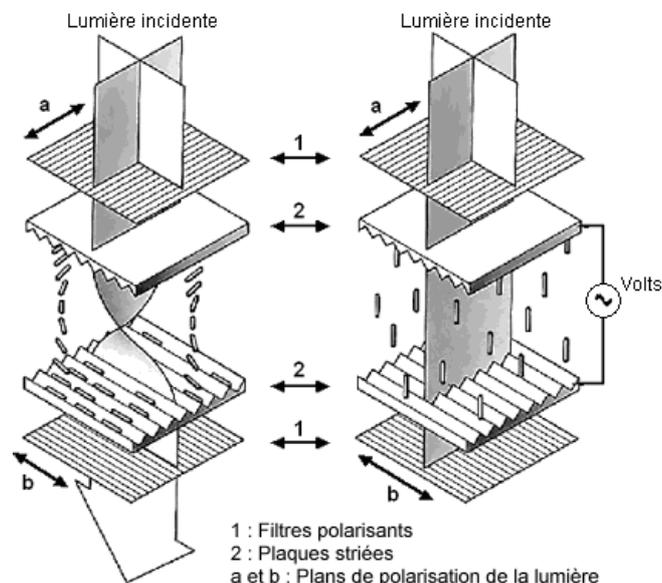


Figure III.2 : Principe des écrans à cristaux liquides.

Au sein des écrans LCD, on distingue deux types d'écrans :

- ❑ écrans à matrice simple (passive), STN (*Super Twisted Nematic*, nom provenant de la forme en hélice que forme entre elles les molécules du cristal liquide en sandwich quand elles changent d'orientation d'une plaque à l'autre, cf. Figure III.2),
- ❑ écrans à matrice active, TFT (*Thin Film Transistor*).

Les matrices passives sont le plus simples à réaliser. Une face comporte les électrodes d'adressage des lignes (X), l'autre face les électrodes d'adressage vertical (Y). Le dispositif de commande est extérieur. Le simple fait d'imposer un potentiel à une électrode X et à une électrode Y crée un champ électrique au travers de la surface en vis à vis de ces électrodes. La conception de ces matrices est simple, mais ce type de matrice reste inadapté aux applications télévisuelles, du fait de temps de réponse insuffisant (ralentissement lié au multiplexage ligne-colonne). Ce type de matrice était principalement utilisé sur les ordinateurs portables de bas de gamme (avec la variante *Dual STN*, matrice passive à double balayage assurant une meilleure qualité de l'image), actuellement elle l'est plutôt dans les domaines des "mini-ordinateurs" et autres "assistants personnels" PDA (*Personal Digital Assistant*) voire dans celui des nouveaux téléphones portables.

La configuration en matrice active est la seule technologie mature qui permette actuellement la réalisation de systèmes de visualisation de type téléviseur. Pour ce type de matrice, la commande de chaque pixel de l'écran est assurée par des transistors à effet de champ (transistors du type TFT à couches de silicium amorphe) connectés en série avec les cellules. La matrice TFT correspond en fait à un "énorme" circuit intégré (*huge integrated circuit*) associés à des composants électroniques périphériques (*drivers*) moins coûteux que ceux utilisés dans les matrices STN. En termes "monétaires", les écrans TFT représentent actuellement 60 à 70% du marché des écrans plats.

Les écrans LCD consomment peu de puissance par rapport aux écrans CRT (environ 60% de moins), et ne dégagent pas de chaleur. De plus, ils associent une absence de rayonnement qui entraîne une suppression des interférences avec des appareils émettant des rayonnements électromagnétiques. Cependant, cette technologie commence à montrer ses limites dès que la diagonale de l'écran dépasse 20" (soit 50,8 cm) : coût important du fait du faible rendement de fabrication et pixels TFT non émissifs, ce qui réduit la luminosité, l'angle de vue réduit des écrans... La commercialisation d'écrans plats LCD de 70 cm de diagonale a néanmoins commencé récemment.

b. Les écrans à plasma (PDP)

Dans les écrans à plasma PDP (*Plasma Display Panel*, environ 3% en termes monétaires du marché des écrans plats), le principe de base est celui de la structure matricielle. Il repose sur l'utilisation de l'émission lumineuse (visible ou dans l'UV) d'un mélange de gaz rares (Xe-Ne ou Xe-Ne-He) faiblement ionisé et généré par une décharge électrique créée entre deux électrodes. Ces électrodes appartiennent aux réseaux parallèles d'électrodes lignes et colonnes déposées en face interne de deux dalles de verre (cf. Figure III.3). Celles-ci sont scellées entre elles ce qui forme l'espace gazeux de l'écran. Les électrodes qui jouent alternativement les rôles d'anode et de cathode sont recouvertes de couches de diélectriques.

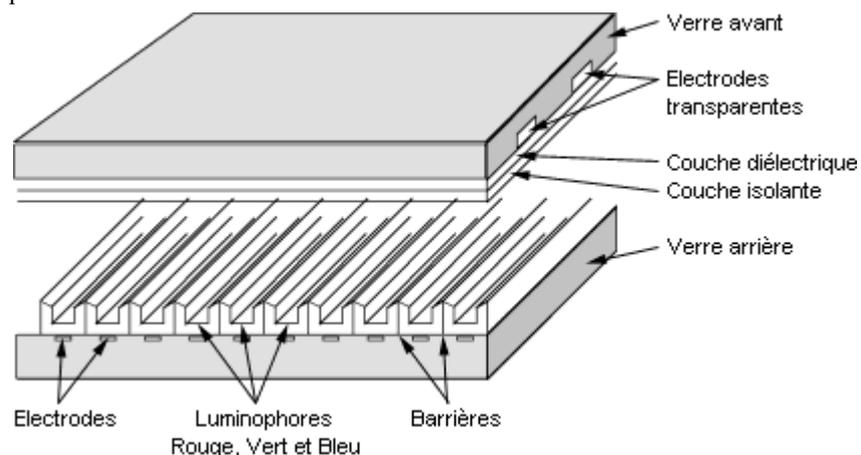


Figure III.3 : Schéma d'un écran à plasma.

L'émission de chaque pixel, défini par la cellule de décharge à l'intersection d'une électrode ligne et d'une électrode colonne, est utilisée soit directement dans le cas des PDP monochromes, soit comme des sources d'excitation des luminophores déposés sur la face arrière dans le cas des PDP couleur. Les luminophores utilisés actuellement en panneaux à plasma sont pour le bleu, le BAM ($\text{BaMgAl}_{10}\text{O}_{17}:\text{Eu}^{2+}$), pour le vert, le $\text{Zn}_2\text{SiO}_4:\text{Mn}^{2+}$, pour le rouge, le $\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Eu}^{3+}$ ou le $(\text{Y-Gd})\text{BO}_3:\text{Eu}^{3+}$.

La technologie des PDP possède des atouts incontestables : relative simplicité de fabrication, bonne qualité d'image, angle de vue comparable aux CRT, conception adaptable aux grandes dimensions, plus faibles volumes et masses comparativement aux CRT (un PDP de diagonale 42" pèse 25 kg et sa profondeur est inférieure à 10 cm alors que pour un écran CRT de même surface d'affichage on a une masse de 150 kg pour une profondeur d'environ 100 cm). Mais de nombreux points restent à améliorer : durée de vie (les couches isolantes protectrices, en oxyde de magnésium MgO , des électrodes étant progressivement pulvérisées par le plasma...), rendement lumineux (encore un peu inférieurs à ceux obtenus dans les CRT), et coût de fabrication. Il est du reste à noter que l'électronique d'adressage des pixels est assez complexe : un affichage en 16,7 millions de couleur suppose la modulation du nombre d'impulsions de courant excitant chacun des pixels (les 256 niveaux requis pour chacune des couleurs primaires étant associés à autant de séquences possibles d'impulsions).

c. Les écrans à effet de champ (FED)

La technologie des écrans à effet de champ (FED, *Field Emission Display*) ou écrans à cathode froide étendue dont l'exemple le plus connu est le réseau de micropointes, repose comme les écrans CRT sur le principe de luminescence. La différence se situe au niveau du mode d'émission électronique. L'écran FED est un tube à vide délimité par deux plaques de verre distantes de quelques centaines de μm (cf. Figure III.4). La plaque arrière, ou cathode froide, comporte un réseau d'émetteurs d'électrons à effet de champ disposé en colonnes, en forme de micropointes agissant par effet de champ comme des microcanons à électrons lors de la mise sous tension. La plaque avant est quant à elle recouverte de luminophores.

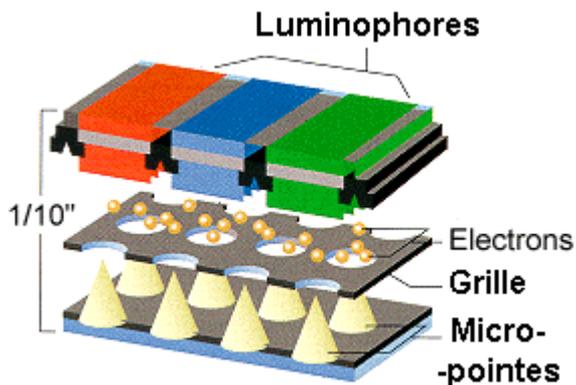


Figure III.4 : Principe des écrans FED à micropointes.

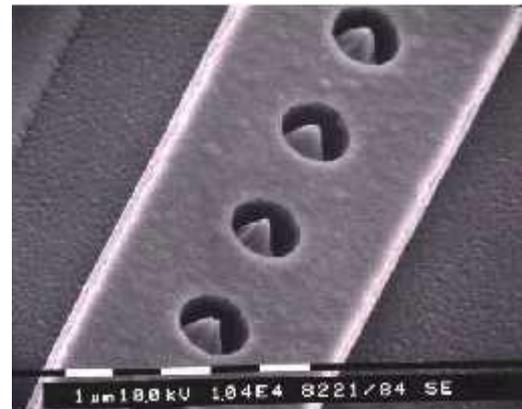


Figure III.5 : Micropointes observées à l'aide d'un microscope électronique à balayage (réalisation : PixTech, "start-up" issue du laboratoire LETI du CEA).

La complexité de fabrication des micropointes (leur densité peut atteindre $40000 / mm^2$) rend toutefois ces écrans FED très coûteux. La durée de vie des micropointes est également problématique. Cette technologie ne semble en fait pas viable d'un point de vue commercial. La société PixTech, "jeune pousse" dépositaire d'une licence sur ce sujet en 1992, a ainsi été placée en liquidation judiciaire en juin 2002.

Une deuxième génération d'écran FED est actuellement en cours de développement. Il s'agit de profiter du grand facteur de forme des nanotubes de carbone (cf. Figure III.6) pour émettre par effet de champ un faisceau d'électrons intense à la pointe du nanotube. La difficulté principale tient dans la maîtrise de la croissance perpendiculaire à la surface d'un substrat d'un très grand nombre de nanotubes (typiquement $200000 / cm^2$) aux propriétés les plus homogènes possibles... Si en 1999, une équipe de Samsung a publié dans la revue scientifique *Applied Physics Letters* la réalisation d'un premier démonstrateur d'écran FED à nanotubes, le développement de cette technologie requiert encore des recherches intensives, y compris du point de vue fondamental.

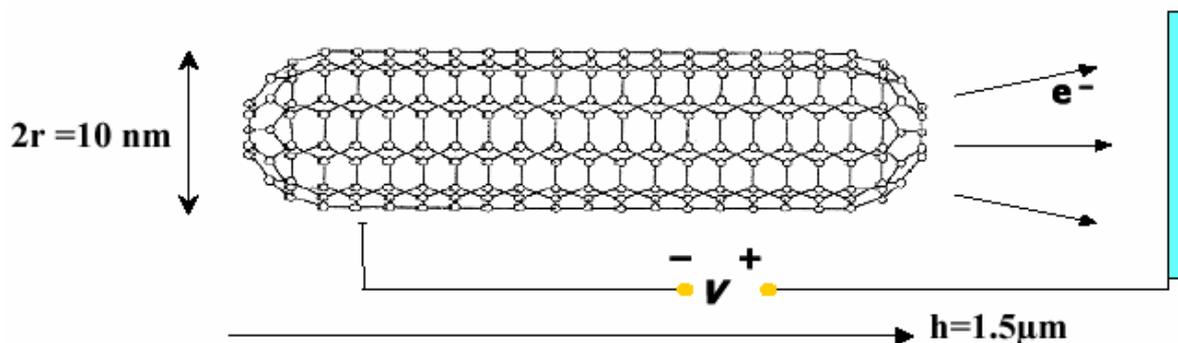


Figure III.6 : Emission de champ à l'extrémité d'un nanotube de carbone.

d. Les écrans électroluminescents (ELD)

La technologie des écrans électroluminescents (ELD, *ElectroLuminescent Display*) est basée sur l'utilisation de matériaux luminescents (par exemple ZnS:Mn) disposés entre des couches diélectriques transparentes et des électrodes lignes en Al (en face arrière) et colonnes transparentes (en face avant, réalisé en oxyde d'indium et d'étain ITO, *Indium Tin Oxide*, qui est à la fois bon conducteur et transparent à la lumière). Ces matériaux sont déposés sous un format pixel. Lorsqu'une tension est appliquée sur un point de l'écran, le matériau électroluminescent correspondant passe de l'état isolant à l'état conducteur, ce qui induit un courant électrique et à la désexcitation une émission de lumière se produit (cf. la Figure III.7 dans le cas de l'utilisation de matériaux organiques). La longueur d'onde émise dépend de la nature du matériau utilisé. L'adressage des pixels est effectué par une matrice de transistors TFT, généralement réalisés en silicium polycristallin. Les écrans ELD fonctionnent sous faible tension, sont robustes, dotés d'un bon angle de vue (160°) et d'un excellent contraste, mais si le coût de fabrication est faible pour les affichages de faibles surfaces, il devient très élevé quand les dimensions augmentent. Ils ne sont pas (encore ?) utilisés pour la télévision.

Une piste de développement est l'utilisation de matériaux organiques (polymères). Les premiers écrans à base d'OLED (*Organic Light Emitting Diode*) commercialisés, par Kodak et Sanyo, ne sont pour l'instant utilisés que dans les cas où une faible surface d'affichage est nécessaire (autoradio Pioneer, téléphone mobile Motorola...). Pour de plus grandes surfaces, des problèmes de fiabilité et de durée de vie (dégradation des matériaux organiques, à cause de l'humidité par exemple) restent en effet à résoudre. En avril 2002, Toshiba/Matsushita a néanmoins diffusé l'annonce de la réalisation d'un écran OLED de 17" de diagonale au format XGA (1024 par 768 pixels).

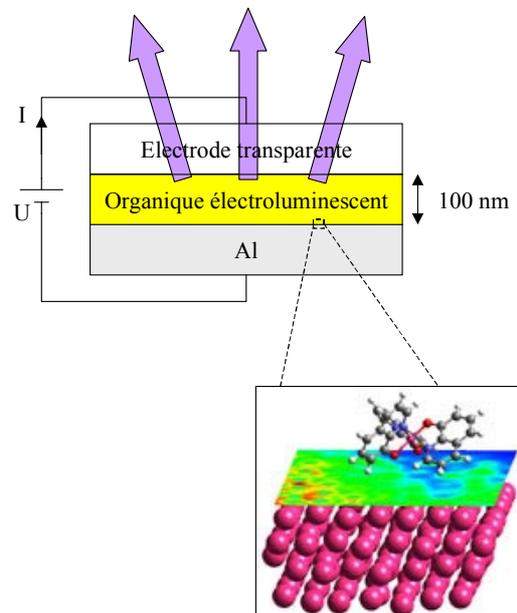


Figure III.7 : Principe des écrans ELD dans le cas de l'utilisation de matériaux organiques électroluminescents.

e. Autres technologies en développement

Dans ce domaine en plein essor, d'autres voies sont explorées. Citons ainsi les technologies DLP (*Digital Light Processing*, cf. www.dlp.com) mettant en œuvre des matrices de micro-miroirs, *e-ink* (mouvement de particules de toner dans une capsule sous l'influence de forces électrostatiques) ou encore SED (*Surface Emission Display*) étudiée actuellement par Canon et dans laquelle l'émission d'électrons se produirait au niveau de nano-craquelures favorisant le passage d'électrons par effet tunnel.

IV. Vers la télévision numérique

1. Enjeux

On ne peut aujourd'hui que constater l'évolution rapide vers la numérisation du monde de l'audiovisuel. Cette numérisation est d'abord apparue dans les équipements et régies de production pour ensuite gagner les secteurs des réseaux de transmission et de diffusion que sont le câble et le satellite. Aujourd'hui, c'est au tour des réseaux hertziens terrestres d'être numérisés.

Les raisons du passage au "tout numérique" sont nombreuses :

- Les opérateurs TV sont très favorables au numérique car il abaisse les coûts de diffusion par rapport à l'analogique. L'harmonisation des techniques de diffusion et à la compression numérique permet ainsi la diffusion de plusieurs

chaînes au lieu d'une seule en analogique. Ces capacités supplémentaires offrent la possibilité aux opérateurs de proposer des chaînes de complément ou de diffuser plusieurs fois leurs programmes. On a l'exemple de Canal+ avec ses déclinaisons (bleu, vert, jaune). En outre, la baisse des coûts en numérique facilite le lancement et la réussite de nouveaux opérateurs dans le monde de la télévision.

- Les téléspectateurs ont un choix plus vaste de programmes et de services. Ils bénéficient d'une qualité (théoriquement) irréprochable de l'image et du son. Le numérique ouvre les portes du "cinéma à domicile" (*home cinema*). Il est en effet possible de diffuser des programmes en format 16/9^{ème} et en *Dolby Digital*. Le numérique, c'est aussi une nouvelle façon d'utiliser la télévision, grâce à l'interactivité : guide des programmes, services à la carte (météo, informations, offres d'emplois...). Bref, le téléspectateur n'est plus passif (sic) devant son téléviseur.
- La possibilité d'offrir Internet à haut débit, quel que soit le mode de transport utilisé (câble, satellite, hertzien...)

La logique voudrait donc que la télévision hertzienne se convertisse au numérique. Certains prévoient pour 2015 l'arrêt de la télédiffusion analogique hertzienne.

2. Les contraintes du numérique

i) Numérisation et HDTV

Pour numériser un signal vidéo analogique dont l'occupation spectrale est de 6 MHz, il faut tout d'abord l'échantillonner avec une fréquence d'échantillonnage F_{ech} au moins égale à deux fois la fréquence maximale du signal (théorème de Shannon). Ceci permet d'éviter le phénomène de repliement de spectre (*aliasing*). Dans le cas d'un signal vidéo, le CCIR (Comité Consultatif International des Radiocommunications) préconise une fréquence d'échantillonnage de 13,5 MHz.

En outre, la résolution minimale est de 8 bits pour la quantification d'un signal vidéo avec une qualité suffisante pour sa diffusion vers un terminal de visualisation.

On aboutit alors à un débit brut égal à $13,5 \times 8 = 108$ Mbits/s. Ce débit est considérable. C'est pourquoi cette manière de numériser le signal vidéo n'est pratiquement pas utilisée dans les applications de diffusion de télévision (*broadcast*).

Pour certaines applications, on utilise d'autres fréquences d'échantillonnage pour obtenir des pixels carrés facilitant le mélange d'images vidéo et informatiques sans distorsion d'aspect (le rapport d'aspect étant défini par le rapport largeur sur hauteur).

Pour que les résolutions horizontales et verticales soient identiques, il faut que le rapport entre le nombre de pixels par ligne et le nombre de lignes utiles soit égal à 4/3 ou 16/9. Par exemple, pour un tube de 625 lignes, 576 lignes utiles constituent l'image, il faut alors 768 pixels par lignes si l'on respecte le format 4/3. Or on s'oriente plutôt vers les formats prévus pour la télévision à haute définition (HDTV, *High Definition TeleVision*), le nombre de lignes devient supérieur à 1000 et le format est le 16/9^{ème}. En Europe, le standard prévu en HDTV correspond à 1250 lignes dont 1080 utiles, soit 1920 pixels par lignes. Même si on suit les principes classiques pour la diffusion hertzienne analogique, la bande passante requise pour transmettre un signal vidéo devient de l'ordre de 27 MHz, ce qui est difficilement envisageable, même pour les transmissions par satellite.

Notons aussi qu'en HDTV l'évolution du son accompagne celle de l'image. Le système Nicam (*Near Instantaneously Compended Audio Multiplex*, multiplex audio compressé presque instantanément) permet la diffusion d'un son de haute fidélité, numérique et stéréophonique, intégré à un signal vidéo analogique. Les canaux audio gauche et droite sont insérés dans le spectre du signal vidéo en modulation QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*) sur une sous-porteuse à 6,5 MHz.

ii) Format 4:2:2

Une norme de numérisation a été adoptée pour la vidéo professionnelle en 1982, la norme CCIR 601 plus connue sous le nom "standard 4:2:2". Elle définit une fréquence d'échantillonnage de 13,5 MHz pour la luminance Y et de 6,75 MHz pour chacun des signaux relatifs à la chrominance U et V (l'appellation 4:2:2 rappelle que les fréquences d'échantillonnage pour la luminance et les deux composantes couleurs sont dans le même rapport que les chiffres 4, 2 et 2). Elle a également fixé la quantité de bits utilisés pour cette opération à 8 bits dans un premier temps, puis à 10 bits. On peut ainsi calculer le débit nécessaire à véhiculer une image complète : $(13,5 + 6,75 + 6,75) \times 10 = 270$ Mbits/s (ou 216 Mbits/s si on ne code que sur 8 bits).

Cette norme détermine aussi que chaque ligne doit contenir 720 pixels pour la luminance et 360 pixels pour chacune des composantes couleur. Cela signifie qu'un pixel sur deux ne contient pas d'informations couleur ; il est transmis en noir et blanc (cf. Figure IV.1).

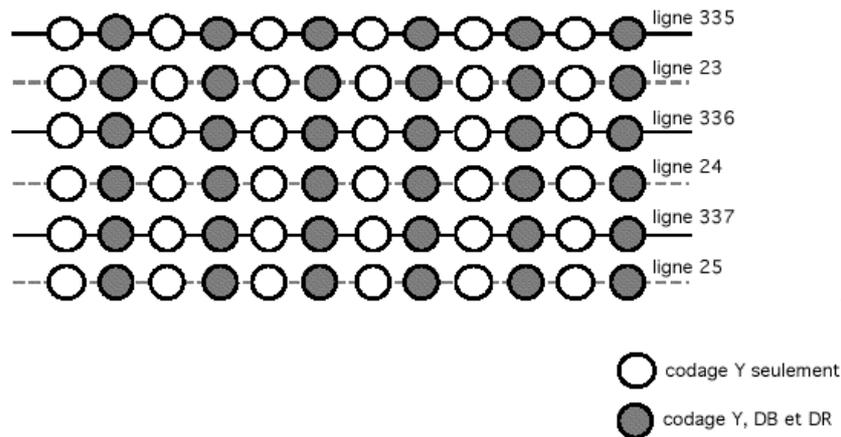


Figure IV.1 : Standard 4:2:2.

Le débit numérique correspondant à la norme 4:2:2 ne rentre pas dans des canaux ordinaires : si l'on prend en compte le critère de Nyquist, un débit de 200 Mbits/s peut être transmis dans un canal de 40 MHz avec une modulation 64QAM (modulation d'amplitude en quadrature à 64 états, soit 6 bits par état) et on n'a le droit qu'à 8 MHz.

Le but est de réduire le débit numérique pour que le canal soit le plus petit possible pour faire rentrer un ou plusieurs programmes dans une bande de 8 MHz, d'où la nécessité d'une compression par un facteur de 20, 30 ou 40.

Pour des applications moins exigeantes en résolution et visant des débits de transmission aussi faibles que possibles, certains sous-produits du format 4:2:2 ont été définis : 4:2:1 et 4:2:0. La différence entre le 4:2:2 et ces formats dérivés concerne uniquement le traitement de la chrominance par rapport à la luminance. Le principe du format 4:2:0 est ainsi de "colorier" 2 lignes successives avec la même chrominance. Ce format a servi de base au codage D2MAC (*Multiplexed Analog Components*, multiplexage alternée des composantes des signaux de chrominance et de luminance), que nous évoquerons dans la partie suivante, et à la norme de compression MPEG2 (*Motion Picture Expert Group*).

3. Les premières normes

a. Normes MAC

Au début des années 80, au sein de l'Union Européenne de Radiodiffusion (UER), a été conçue une norme de télédiffusion intermédiaire entre l'analogique et le numérique, "D2MAC Paquets". Cette norme représentait alors un compromis élégant et intelligent entre ce que les technologies analogiques et numériques disponibles à l'époque pouvaient avoir de meilleur. Elle repose sur le multiplexage temporel d'échantillons analogiques de luminance et de chrominance, ainsi que de données en paquets et de 4 canaux son numériques, le tout au débit de 20,25 Méch/s (cf. Figure IV.2). Ce signal est diffusé en modulation de fréquence.

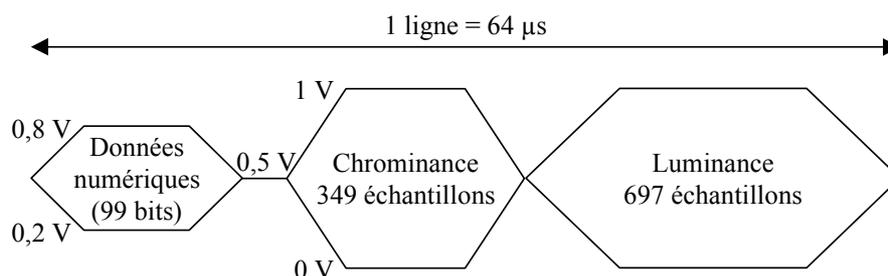


Figure IV.2 : Format d'une ligne en D2MAC. Les données numériques comprennent les informations de synchronisation, le son, et des données embrouillées et codées. La chrominance et la luminance sont des signaux analogiques échantillonnés multiplexés temporellement.

La norme D2MAC présentait notamment l'avantage :

- ❑ d'être conforme à la norme de production numérique internationale 4:2:2, basée elle aussi sur la numérisation séparée des composantes de luminance et de chrominance ;
- ❑ de supprimer ainsi, grâce à un multiplexage temporel et non plus fréquentiel, les défauts inhérents à la superposition de ces composantes, dans les systèmes antérieurs ;

- de disposer de plusieurs voies pour le son et de permettre la transmission de données complémentaires (sous titrage, télétexte) ;
- enfin, de faire l'objet d'un certain consensus de la part des industriels et des pouvoirs publics en Europe.

A l'origine, l'utilisation de ce format devait être réservée à la télédiffusion par satellite. Des variantes adaptées au câble et même à l'espace hertzien terrestre en ont ensuite été conçues.

En 1986, pour contrer la tentative des japonaises visant à imposer au monde entier leur système Muse (*Multiple Sub-Nyquist Encoding*, standard à 1125 lignes, 60 Hz, opérationnel depuis 1991), les Européens ont élaboré en toute hâte à partir du D2MAC leur propre norme de télévision à haute définition, HDMAC. Ce système utilise les techniques de sous-échantillonnage, filtrage, brassage et compensation de mouvement, expliquées dans la section suivante. Le HDMAC, compatible avec le D2MAC, possède un système de compensation de mouvement plus raffiné que son rival japonais et prévoit déjà la transmission numérique de certaines données (assistance au décodage et, comme pour le D2MAC, son stéréophonique). La démonstration du nouveau système européen est effectuée pour la première fois au salon international des diffuseurs de Brighton en 1988.

La crédibilité de l'alternative qu'il représente par rapport aux propositions japonaises est établie et reconnue au niveau international. Les normes MAC ont d'autres attraits : elles se prêtent plus facilement au cryptage que les systèmes précédents, alors que naît la télévision à péage, et permettent l'utilisation du nouveau format 16/9^{ème}.

Elles demeurent cependant analogiques en ce qui concerne la transmission des images. Le D2MAC ne s'est en fait pas imposé avec la rapidité qu'exigeait sa viabilité en tant que norme transitoire, il n'a pas rencontré l'adhésion nécessaire au-delà de celle des industriels, des producteurs et des diffuseurs.

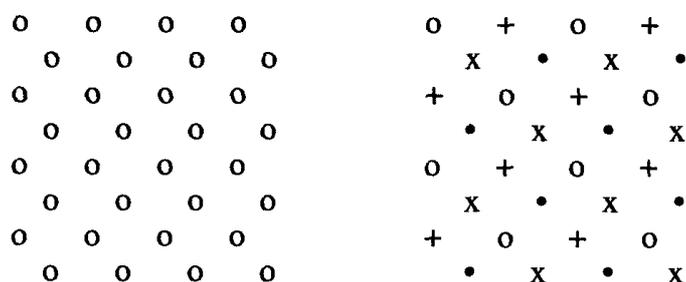
b. Techniques de compression d'images

Les méthodes de compression des données jouent sur le fait qu'une séquence vidéo contient beaucoup d'informations redondantes d'une image à une autre. On distingue deux types de compression :

- *spatiale* (ou intra-image) : les informations sont similaires ou se répètent dans des zones de l'image proches l'une de l'autre ;
- *temporelle* (ou inter-images, ou inter-trame) : les informations se ressemblent ou se répètent dans le temps d'une image à une autre.

Plusieurs méthodes de compression ont été mises au point. Une première catégorie de techniques de compression, dites non dégradantes ou réversibles, évite de transmettre la même information plusieurs fois. Malheureusement les taux de compression obtenus ne sont guère importants. Les techniques "non dégradantes" sont :

- Le sous-échantillonnage : on adapte les fréquences d'échantillonnage (spatiale et temporelle) au contenu de l'image. Ainsi, une zone fixe est transmise avec une définition "normale" et une fréquence plus faible que la normale, alors qu'au contraire une zone en mouvement est transmise avec une définition réduite et une fréquence normale. En HDMAC comme en Muse, on divise par 4 le nombre d'échantillons : dans les zones fixes, un point sur 4 est analysé à chaque trame, avec décalage à la trame suivante des points analysés. En 4 trames (fréquence équivalente de 6,25 Hz), tous les points ont été analysés, comme illustré par la Figure IV.3. Les points manquants sont reconstitués par interpolation avec filtrage. Dans les zones mobiles, un point sur 4 est analysé à la fréquence normale des 25 Hz. Le HDMAC utilise de plus une catégorie intermédiaire de zones en "mouvement lent", analysée à 12,5 Hz.



échantillonnage de l'image

répartition en trames :

o : trame 1, + : trame 2, x : trame 3, • : trame 4

Figure IV.3 : Principe du sous-échantillonnage pour les zones fixes.

- Le brassage, mélange de deux lignes voisines, qui assure la compatibilité avec la définition standard.

- ❑ Le codage différentiel avec prédiction, qui permet de profiter des fortes redondances d'une ligne à l'autre et d'une image à la suivante. En vidéo, la prédiction est multidimensionnelle (utilisation des points, lignes et images précédents pour réaliser la prédiction), elle est donc beaucoup plus efficace que pour le son qui est un signal unidimensionnel.

Si on veut réduire considérablement le débit des données, il faut appliquer des algorithmes de compression qui induisent des pertes d'informations. En choisissant judicieusement le type d'informations qui seront perdues ou dégradées, il est néanmoins possible de reconstruire des images d'une qualité telle que l'œil humain ne pourra les distinguer des images originales. Parmi ces techniques, on peut mentionner :

- ❑ L'utilisation de transformations mathématiques, comme la transformée en cosinus discrète (*Discrete Cosine Transform*, DCT), qui transforme une représentation spatiale d'un bloc de pixels en une représentation sous forme mathématique différente. En elle-même, cette méthode ne comprime pas d'image, mais elle la représente simplement sous une forme qui facilite sa compression. La DCT a pour propriété importante de niveler toute information non pertinente. Ainsi tout bruit ou toute distorsion provenant de fréquences parasites sont éliminés.
- ❑ L'utilisation de "codes à longueur variable" VLC (*Variable Length Coding*, comme les codages de Shannon, Huffman...), dits aussi codes entropiques. Dans ce type de codage, un mot est traduit par un code d'autant plus court que ce mot est probable. Cette technique est intéressante en codage différentiel, puisque dans ce cas les différences faibles sont plus probables que les grandes.

4. Systèmes DVB

a. Le groupe DVB

Le groupe DVB (*Digital Video Broadcasting*) est le nom du projet européen associant plus de 180 structures (des industriels aux diffuseurs et aux instances de régulation) de plus de 20 pays en Europe. Il a travaillé à l'élaboration de spécifications techniques pour la diffusion numérique et à la réalisation de normes compatibles aussi bien pour le câble que pour le satellite et la transmission hertzienne (d'où les différentes appellations DVB-C, DVB-S, DVB-T).

La télévision suivant le système DVB permettra la transmission de plusieurs programmes sur un canal de transmission classique, offrira plusieurs niveaux de qualité possibles à partir d'un seul signal, permettra la réception stable avec des récepteurs mobiles, autorisera la transmission de la télévision haute définition (HDTV, *High Definition TeleVision*) sur des réseaux terrestres...

Les différents groupes d'étude ont travaillé à la normalisation des procédés de modulations numériques, à la mise en place d'un dispositif commun d'information, à la définition des systèmes d'accès conditionnels et de cryptage...

Compte tenu du nombre important de langues utilisées en Europe, le système DVB propose aussi plus de canaux audio que le modèle américain équivalent.

Au delà des retards entraînés par la relative lenteur de l'évolution du matériel, la compression de données va devenir omniprésente. L'explosion de la taille des données manipulées va encore s'accroître avec l'explosion du multimédia et toutes les méthodes de compression efficaces seront les bienvenues.

La compression des signaux audio et vidéo, la constitution du multiplex (multiplexage) et l'embrouillage sont communs à tous les supports de diffusion (terrestre, câble, satellite). Il n'y a que les techniques de transmission qui sont spécifiquement adaptées.

Pour la compression des signaux audio et vidéo, DVB a retenu le standard MPEG2. Il est clair que MPEG possède l'avenir le plus prolifique car il est indépendant de tous les constructeurs et des architectures matérielles.

Pour le multiplexage, DVB a retenu le *Transport Stream* MPEG (flux de transport MPEG).

En ce qui concerne les systèmes de contrôle d'accès, seul l'embrouillage a été normalisé.

b. Codage source

i) Principes

La numérisation transforme une image vidéo composite en une somme gigantesque de données dont le transport "brut" (c'est-à-dire sans traitement préalable) est impossible même sur des supports comme le câble et le satellite. C'est là qu'apparaît la compression, ou "codage source", étape qui vise à comprimer les données (quitte à parfois perdre quelques informations) afin qu'elles puissent être véhiculées sur ces média.

Le codage source est appliqué à l'audio (Musicam) et à la vidéo (MPEG2). Il a pour fonction de réduire la quantité d'informations transmises. Le codage vidéo MPEG2, retenu comme norme, utilise l'estimation et la compensation de mouvements entre images successives. Le codage audio est réalisé grâce au procédé Musicam qui utilise les propriétés de l'oreille humaine pour permettre de coder uniquement les informations nécessaires.

Pour résumer, le principe du MPEG est de ne pas transmettre ce qui l'a déjà été et ce qu'on n'entend pas !

ii) Compression spatiale en vidéo

Lorsque l'on étudie une image animée on s'aperçoit de la redondance des données : l'image est un signal très fortement corrélé.

Or, il s'avère que les formats de compressions communs ne sont pas ce qu'il y a de plus puissant. On applique alors la compression MPEG (extrapolation de la compression JPEG, *Joint Photographic Expert Group*, pour les images fixes). Cette compression comprend 5 étapes dont 3 sont purement dédiées à la transformation des données et 2 qui sont utilisées pour la compression des données.

En premier lieu, on divise l'image en blocs de 8*8 pixels sur lesquels on applique une DCT. Les coefficients ainsi calculés sont débarrassés du bruit, seule l'information pertinente est conservée.

Ensuite, on passe à une étape de quantification/seuillage qui détermine les coefficients de la DCT à prendre en compte. En effet la DCT réduit largement les bruits mais des valeurs quasi-nulles demeurent dans les matrices de coefficients. On les élimine donc par l'étape du seuillage. Cette étape n'est pas réversible car on perd des informations, mais comme elle tient compte des spécificités et surtout des défauts de l'œil, on ne perçoit pas ou très peu les modifications (suivant la degré de compression appliqué).

Par la suite, on passe par de la compression dite statistique réversible et qui repose sur deux algorithmes que sont le RLC (*Run Length Coding*) et le VLC. On lit au préalable en zig-zag les coefficients pré-traités, de telle sorte que les coefficients soient réarrangés sous la forme d'un vecteur, plus commode à transporter. Cette sérialisation des 64 éléments de la matrice est effective en commençant par les composantes à basse fréquence et en finissant par celles à hautes fréquences.

L'algorithme RLC code le nombre d'occurrences des coefficients nuls et la valeur du prochain non nul, ce qui réduit la quantité de données à transmettre.

L'algorithme VLC ou d'Huffman permet de coder les coefficients avec une longueur d'autant plus courte qu'ils sont plus fréquents statistiquement.

Ces deux traitements associés permettent d'obtenir un facteur de compression variant entre 2 et 3 pour une image fixe.

Au terme de la compression dite spatiale, un grand nombre des données ont été compressées. Pour passer à une taille encore plus réduite de données à transmettre, il faut réaliser un compression temporelle.

iii) Compression temporelle en vidéo

En fait de compression temporelle, on parle plutôt de prédictions temporelles quand il s'agit de la norme de compression MPEG.

La plupart des images animées d'une même séquence contiennent de nombreuses redondances. Cependant, le codage d'une image ne dépend pas uniquement de l'image précédente. Il existe trois types de codage pour traiter l'ensemble des images d'une séquence vidéo :

- ❑ Le codage I (*Intraframes*) : on procède alors comme pour une image fixe, sans référence à d'autres images, ce traitement est nécessaire car la séquence nécessite toujours un commencement...
- ❑ Le codage P (*Predicted Frames*) : l'image est calculée à partir de l'image de type P ou I la plus récemment calculée (chaque bloc d'une image peut être codé par des méthodes différentes). Le taux de compression d'une image de type P est plus important que celui d'une image de type I.
- ❑ Le codage B (*Bidirectionnal Frames*) : L'image est codée à partir des 2 images de type I ou P les plus récentes, l'une dans le passé, l'autre dans le futur. Trois calculs sont nécessaires pour connaître le meilleur codage possible : à partir de l'image antérieur, à partir de l'image future, et à partir de la moyenne des deux images. Le calcul des images B est le plus complexe donc aussi le plus lent. Ce type d'image offre cependant le taux de compression le plus élevé.

iv) MPEG appliqué à l'audio

L'audio numérique est bien connu depuis la mise sur le marché du *Compact Disc* (CD) en 1984 : échantillonnage 16 bits à 44,1 khz ; gamme de fréquences de 20 Hz à 20 kHz ; débit égal à $44,1 * 16 * 2 = 1411,2$ kbits/s en stéréo.

Le principe de la compression audio consiste à utiliser les faiblesses de l'audition humaine pour réduire la quantité d'information à transmettre sans pour autant détériorer la qualité du signal audio.

La bande de fréquence audio est divisée en 32 sous-bandes égales en largeur et inégales en hauteur en fonction des caractéristiques de l'oreille humaine. Les signaux inférieurs au niveau des sous-bandes sont éliminés. Les zones où l'oreille est la plus sensible peuvent ainsi être quantifiées, avec plus de précision.

Le débit fixe peut être choisi entre 32 et 192 kbits/s par voie. La qualité hi-fi demande 64 kbits/s par voie, soit 128 kbits/s en stéréo ; c'est celle qui est retenue. Le taux de compression est de $1411,2/128$ kbits/s = 11,025.

c. Le multiplexage

Les données audio et vidéo viennent de subir des opérations de réduction de débit. Il est nécessaire maintenant d'organiser ces données grâce à des codeurs audio et vidéo, afin de réaliser le multiplexage de plusieurs séquences vidéo et de services variés sur un même canal.

Les codeurs audio et vidéo fournissent à leur sortie des trains élémentaires de données qui constituent la couche de compression. Chaque train élémentaire ES (*Elementary Stream*) est divisé en paquets qui constituent ainsi un PES (*Packetized Elementary Stream*). Les PES sont obtenus en découpant le flux ES en morceaux plus ou moins longs. Un en-tête est rajouté à chaque paquet PES pour l'identifier. Ces paquets restent de longueur importante et variable et ne sont pas du tout adaptés à la transmission.

En transmission, on travaille avec des paquets de format court, fixe, et à débit constant. C'est pourquoi on réalise, à partir des flux de données PES, un flux de transport TS (*Transport Stream*) composé de paquets de 188 octets (4 octets d'en-tête ou *packet header*, et 184 octets de données utiles ou *payload*). Ces paquets TS sont obtenus en découpant les PES en petits morceaux de 184 octets (*payload*). La longueur des paquets est courte (188 octets) afin de permettre l'ajout de dispositifs de correction d'erreurs mis en œuvre dans le codage de canal.

Les PES vidéo sont découpés en TS vidéo. Les PES audio sont découpés en TS audio. Les PES audio et vidéo d'un même programme sont multiplexés pour obtenir un STPS (*Single Program Transport Stream*). Les STPS de plusieurs programmes peuvent être ensuite multiplexés par un opérateur de multiplexage pour obtenir un MPTS (*Multiple Program Transport Stream*).

Le multiplexage permet la diffusion dans un même canal de plusieurs programmes de télévision (quatre à six) organisés en "multiplex de programmes".

Toutes les données numériques organisées en flux de transport STPS sont ensuite transmises à l'opérateur de multiplexage.

Une partie des émissions numériques seront payantes. La norme DVB a donc défini un algorithme commun d'embrouillage CSA (*Common Scrambling Algorithm*, à ne pas confondre avec le Conseil Supérieur de l'Audiovisuel...) qui consiste à transformer un signal numérique en un signal numérique aléatoire en vue d'en faciliter la transmission ou de le rendre inintelligible.

L'embrouillage peut intervenir à deux niveaux :

- ❑ soit au niveau paquet élémentaire de données PES,
- ❑ soit au niveau paquet transport TS.

d. Le codage canal

i) Généralités

Le codage canal met en œuvre des techniques anticipant les erreurs de transmission dues aux défauts des média de transport, augmentant de même le nombre de bits à transmettre, alors que le codage source s'était évertué à le diminuer.

Le codage de canal comporte trois à quatre étapes, suivant le médium utilisé. Pour tous il inclut :

- ❑ le brassage, qui permet d'assurer la dispersion d'énergie du spectre radiofréquence rayonné, c'est-à-dire une répartition uniforme de l'énergie dans le canal d'émission. Pour éviter de longues suites de 0 ou 1 le signal doit être rendu quasi aléatoire, ceci au moyen d'un embrouillage des données par une séquence pseudo-aléatoire de polynôme générateur $1+X^{14}+X^{15}$ (dispositif simple à registre à décalage à 15 bits et XOR, cf. Figure IV.4) ;
- ❑ le codage externe ou codage de Reed-Solomon (qualifié de "204, 188, T = 8", 204 étant le nombre d'octets après codage, 188 le nombre d'octets utiles et 8 le nombre d'erreurs pouvant être corrigées). Il permet, avec l'étape d'entrelacement qui le suit, la correction des erreurs en rafales introduites par le support de transmission. Il ajoute 16 octets de parité aux 187 octets d'information et à l'octet de synchronisation d'après lesquels il est calculé. On ne peut toutefois corriger plus de 8 octets erronés.
- ❑ L'entrelacement (*interleaver*). Il assure la dispersion temporelle des erreurs et vise à augmenter l'efficacité du codage de Reed-Solomon. Le principe est de transmettre les différents caractères d'un même mot au sein de paquets distincts afin que les erreurs temporaires éventuelles (orage violent sur la station d'émission) ne portent pas sur la totalité d'un mot mais que sur un nombre limité de caractères. Les paquets ne se suivent plus dans l'ordre chronologique après cette étape.

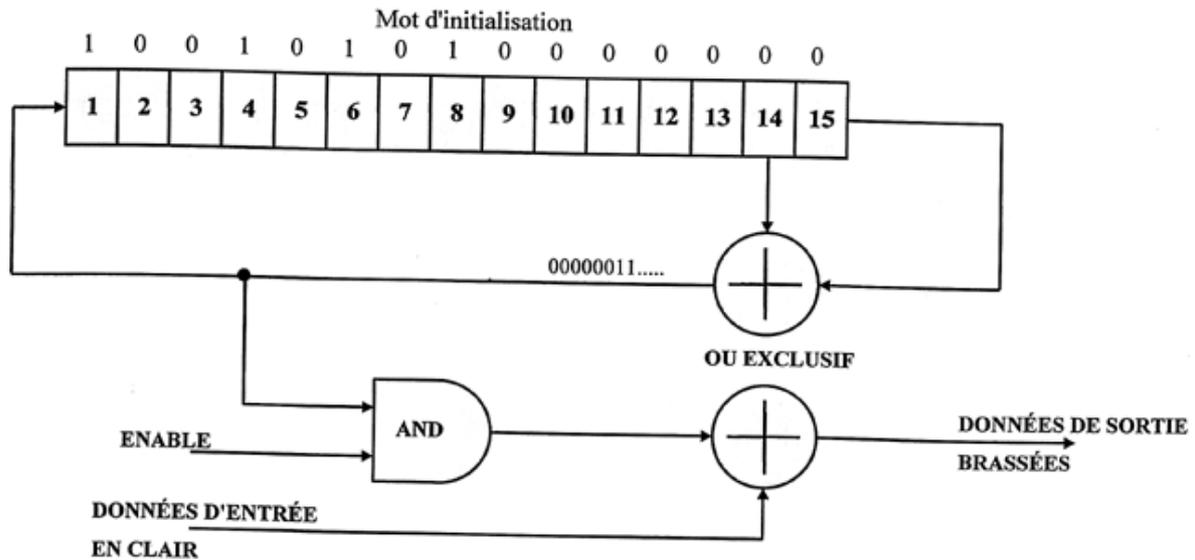


Figure IV.4 : Brassage en DVB.

Dans le cas du câble (modulation 64QAM) il reste ensuite à convertir le train de bits série en deux signaux I et Q de trois bits, chacun représentant des symboles de six bits, avant le filtrage et la modulation (*symbol mapping*).

Pour les cas de la diffusion terrestre mais aussi, voire surtout, du satellite, il faut anticiper et corriger au maximum les erreurs aléatoires qui peuvent découler des faibles rapports signal/bruit dans ces transmissions. C'est le rôle du codage interne, de type convolutif. Si l'on regarde bit à bit le signal, aucun lien ne les relie. Chaque bit est rigoureusement indépendant. L'idée du code convolutif est de lier un bit à un ou plusieurs bits précédents de sorte à pouvoir retrouver sa valeur en cas de problème. On peut pour cela réaliser un codage "en treillis", comme illustré sur la Figure IV.5. Il va permettre de retrouver la valeur la plus probable d'un bit en observant les bits précédemment reçus. L'opération de décodage est réalisée en réception par le décodeur de Viterbi.

Notons que dans le cas de l'utilisation du codage convolutif, on double le nombre de bits transmis, ce qui n'est pas très raisonnable étant donné tout ce que nous avons vu jusqu'à présent. On réduit le nombre de bits en effectuant une opération de poinçonnage, c'est-à-dire en ne transmettant pas certains bits sortant du codeur convolutif. Si trois bits se présente en entrée de codeur, on va en retrouver 6 en sortie mais on n'en transmettra que 4. Le rendement sera alors de 3/4. On parle aussi de FEC 3/4 (FEC = *Forward Correction Error*).

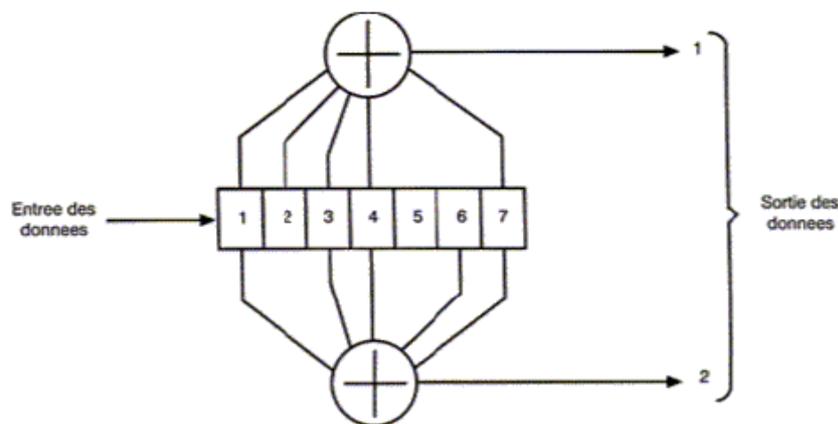


Figure IV.5 : Code convolutif.

Dans le cas des émissions terrestres en modulation OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplex*), il faut encore effectuer des opérations de "sérialisation", d'entrelacement interne et de *symbol mapping* pour adapter le train série au grand nombre de porteuses utilisées.

Il ne reste plus qu'à réaliser la modulation "numérique", après filtrage de Nyquist. Le type de modulation utilisé dépend du canal de transmission étudié (satellite, câble ou diffusion hertzienne).

ii) Transmission par satellite

La largeur de canal disponible est fréquemment égale à 36 MHz. Un signal provenant d'un satellite subit une atténuation de plus de 200 dB. On reçoit donc un signal très faible et bruité. On a dans ce cas choisi la modulation la moins sensible aux distorsions d'amplitude : la modulation à saut de phase en quadrature QPSK (cf. Figure IV.6).

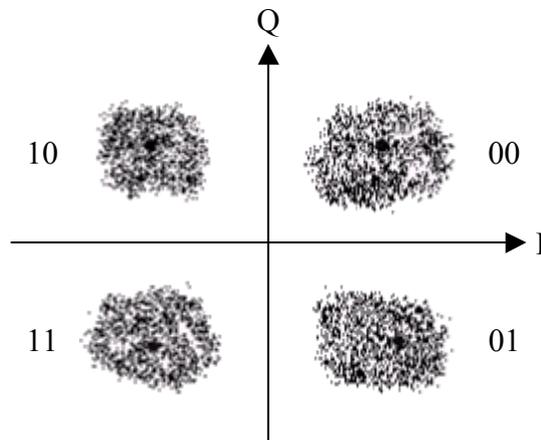


Figure IV.6 : Constellation d'une modulation QPSK en présence de bruit.

iii) Transmission par le câble

La largeur de canal est très réduite, elle est égale à 8 MHz. En revanche, le milieu de transmission est très protégé. On choisit alors une modulation à efficacité maximale, c'est-à-dire transportant un maximum de bits par symbole. En pratique, la plupart des réseaux câblés travaillent en 64QAM (cf. Figure IV.7).

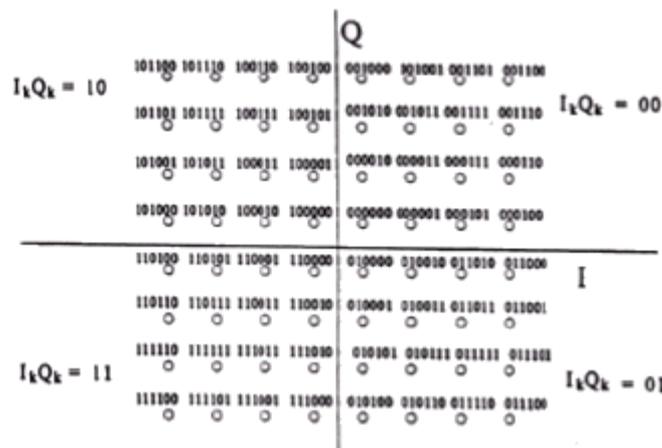


Figure IV.7 : Constellation d'une modulation 64QAM.

iv) Transmission hertzienne

La largeur de canal est également limitée à 8 MHz. Le système choisi doit de plus être insensible aux phénomènes d'échos. Transmettre un train numérique par voie hertzienne n'est pas une mince affaire et c'est pourquoi, c'est la technologie qui a demandée le plus de temps pour émerger.

Le multiplexage utilisé en DVB-T est le COFDM, pour *Coded Orthogonal Frequency Division Multiplex*. Son principe est de répartir un flux à haut débit en plusieurs flux à petit débit.

Le défi à relever est qu'à la réception on puisse retrouver les symboles transmis indépendamment des chemins multiples (réflexions, échos, antenne recevant deux émetteurs différents, effet Doppler dans le cas de la réception mobile) empruntés depuis le ou les émetteurs.

Par définition, les caractéristiques d'un canal de transmission ne sont pas constantes dans le temps. Mais durant un court laps de temps, les caractéristiques d'un canal hertzien sont stables. Le COFDM découpe le canal en cellules selon les axes du temps et des fréquences.

Le canal est alors constitué d'une suite de sous-bandes de fréquence et d'une suite de segments temporels. A chaque cellule fréquence/temps est attribuée une porteuse dédiée qui représente un symbole COFDM. On va donc répartir l'information à transporter sur un ensemble de ces porteuses, modulée chacune à faible débit par une modulation du type

QPSK ou QAM. Deux choix existent, le mode dit 8k (6817 porteuses dans le canal) ou le mode dit 2k (1705 porteuses dans le canal). Chacune des porteuses est orthogonale à la précédente.

V. Annexe : réception hétérodyne

La Figure V.1 résume l'organisation générale d'une chaîne de réception en transmission hertzienne. L'antenne "large bande" de réception permet de capter des signaux modulés autour de différentes fréquences porteuses $f_0, f_1, f_2, f_3, \dots$. La chaîne de réception doit donc obligatoirement comporter un filtre sélectif pour choisir un signal modulé autour d'une porteuse en particulier, par exemple f_0 . Or l'encombrement en fréquence des gammes d'onde réservées à la radiodiffusion et à la télévision exige une très grande sélectivité des récepteurs. L'universalité des récepteurs accordables implique en outre que cette sélectivité soit garantie à la réception de chaque émetteur. Pour la radiodiffusion FM par exemple, cela implique qu'il faudrait pouvoir réaliser des filtres sélectifs de facteur de qualité de l'ordre de 1000 accordables autour de 100 MHz, ce qui est impossible. Pour résoudre cette difficulté, on met en œuvre une réception "hétérodyne", comme nous allons le décrire désormais.

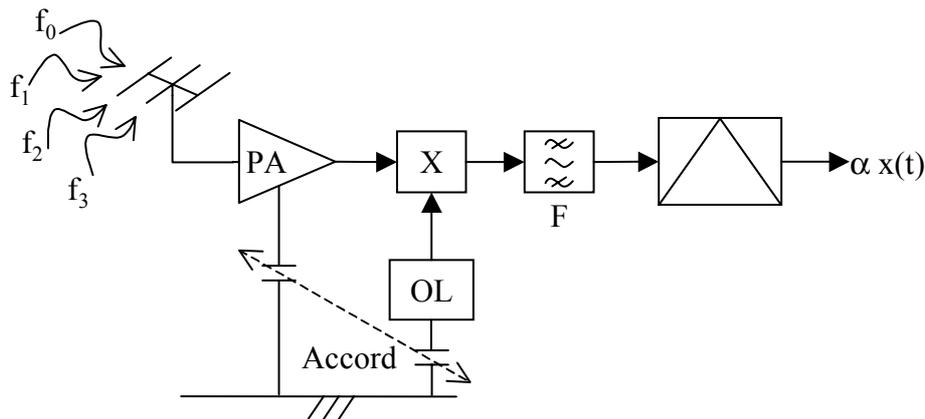


Figure V.1 : Chaîne de réception hétérodyne. Des amplificateurs sont généralement placés en amont et en aval du démodulateur qui suit le filtre passe-bande F. L'amplificateur en amont du démodulateur fonctionne dans un domaine de fréquence situé autour de la fréquence intermédiaire f_{FI} , celui en aval dans la bande de base du signal modulant initial $x(t)$, c'est-à-dire à basse fréquence.

Après réception par l'antenne le signal est amplifié par un préamplificateur PA dont les performances vis-à-vis du bruit doivent être optimisées (nous reviendrons sur ce problème dans la suite du cours). On réalise ensuite un mélange avec un signal de fréquence f_{OL} issu de l'oscillateur local OL. Cette fréquence f_{OL} est ajustée de telle sorte que la différence $f_{OL} - f_0$ soit égale à une constante f_{FI} appelée fréquence intermédiaire. Le signal est ensuite filtré par un passe-bande sélectif F centré en f_{FI} , destiné à éliminer tout autre signal que celui modulé autour de f_0 , et on effectue finalement la démodulation. Comme $f_{OL} > f_0$, on parle alors de réception "superhétérodyne". Pour une gamme donnée de valeurs de f_0 , ce choix conduit à une plage de variation relative plus faible pour f_{OL} que si on avait choisi $f_0 > f_{OL}$, d'où une facilité de réalisation plus grande.

Un problème se pose cependant : si on n'y prend garde, la fréquence $f_0' = f_{OL} + f_{FI}$ traverse également le filtre passe-bande centré sur f_{FI} , perturbant ainsi la démodulation. Pour éviter cela, il est nécessaire que le préamplificateur assure également le rôle de filtre passe-bande afin d'éliminer les composantes spectrales situées autour de la fréquence f_0' , dite fréquence image de f_0 . Ce filtre doit donc être accordé sur f_0 , mais sa sélectivité n'est cependant pas nécessairement très importante.

Les valeurs des fréquences pour les différents systèmes de diffusion ne font pas forcément l'objet de normes très précises. Si pour la radiodiffusion en FM (f_0 de 88 à 108 MHz) on a $f_{FI} = 10,7$ MHz, la valeur de f_{FI} varie entre 440 et 490 kHz en radiodiffusion AM (f_0 de 530 à 1700 kHz).

VI. Sources d'inspiration

- ❑ "Technologie des télécoms", par Pierre Lecoy, collection Réseaux et Télécommunications, édition Hermès (abondamment pillé...).
- ❑ "Broadcast Television Fundamentals", par Michael Tancock, édition Pentech Press, 1991.
- ❑ "Télévision", par Georges Bernède, cours Supélec 3^{ème} année, 1999 et "Télévision", par Alain Azoulay, cours Supélec, 2002.
- ❑ "Electronique grand public, les bases de la télévision", <http://www.multimania.com/bftel/test/QUEST.htm>.

- ❑ "Réparation d'Appareils Électroniques Audio-vidéo", par Michel St-Gelais, <http://pages.infinet.net/niuton>.
- ❑ "L'écran à plasma", <http://pcml.univ-lyon1.fr/Luminophores/scrplasm.html>.
- ❑ "Les écrans plats", par Stéphane Pesque et Brieu de Larrard, http://www.utc.fr/dess/gti/accueil/05_techno_cles/ecrans_plats/ecranplat.htm.
- ❑ "Technologies d'écrans plats : Présent et futur", par Gunther Hass (Thomson Multimédia), 13^{ème} Journée de la Nanotechnologie, Paris, 16 janvier 2003.
- ❑ "Les écrans plats", par Yannick Corroenne, <http://www.cst.fr/dtech/03-jan98/dtech03.html>.
- ❑ "Contribution à l'étude de l'érosion de la magnésie d'un panneau à plasma", par Christelle Macé, Thèse de l'Université Paris Sud, avril 2001.
- ❑ "Plasma display panel: physics, recent developments and key issues", par J. P. Boeuf, Journal of Physics D: Applied Physics Volume 36, pages R53-R79 (2003).
- ❑ "Fully sealed, high-brightness carbon-nanotube field-emission display", par W. B. Choi, D. S. Chung, J. H. Kang, H. Y. Kim, Y. W. Jin, I. T. Han, Y. H. Lee, J. E. Jung, N. S. Lee, G. S. Park, J. M. Kim, Applied Physics Letters Volume 75, Numéro 20, pages 3129-3131, 15 novembre 1999.
- ❑ "Large area electronics platform outline", par R. Meyer, Revue Annuelle du CEA-LETI, Grenoble, 24 juin 2003. Présentation disponible sur le site web du LETI : <http://www-leti.cea.fr>.
- ❑ "Field emission display with carbon nano tubes", par J. Dijon, Revue Annuelle du CEA-LETI, Grenoble, 25 juin 2003. Présentation disponible sur le site web du LETI : <http://www-leti.cea.fr>.
- ❑ "Télévision, le coup de Canon", par Ridha Loukil et Jean-Charles Guézel, Industrie et Technologies, n°854, pages 14 et 15, janvier 2004.
- ❑ "Les formats vidéo numériques", par Philippe Gasser, note technique du Centre National de Documentation Pédagogique, avril 1996, <http://www.cndp.fr/DOSSIERSIE/>.
- ❑ "Des pyramides du pouvoir au réseau de savoir - Tome 1", par René Trégouët, Rapport d'information 331 du Sénat, 1997, <http://www.senat.fr/rap/r97-331-t1/r97-331-t160.html> (pour les éléments d'informations sur les systèmes MAC).
- ❑ "DVB-T, principe de fonctionnement, perspectives d'implantation en France, et état de développement actuel des récepteurs", par Luc Grimaud, Conservatoire National des Arts et Métiers (Département Physique-Electronique), oral probatoire du 2 décembre 2000, http://perso.libertysurf.fr/IPhilGood/download/DVBT_france.pdf.