

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Centre Universitaire Nour Bachir El Bayadh
Institut des Sciences
Département de Technologie



Polycopié

Cours UEM 1.2. Intitulé : Télévision Numérique



INTITULE DU MODULE :
COURS Télévision Numérique

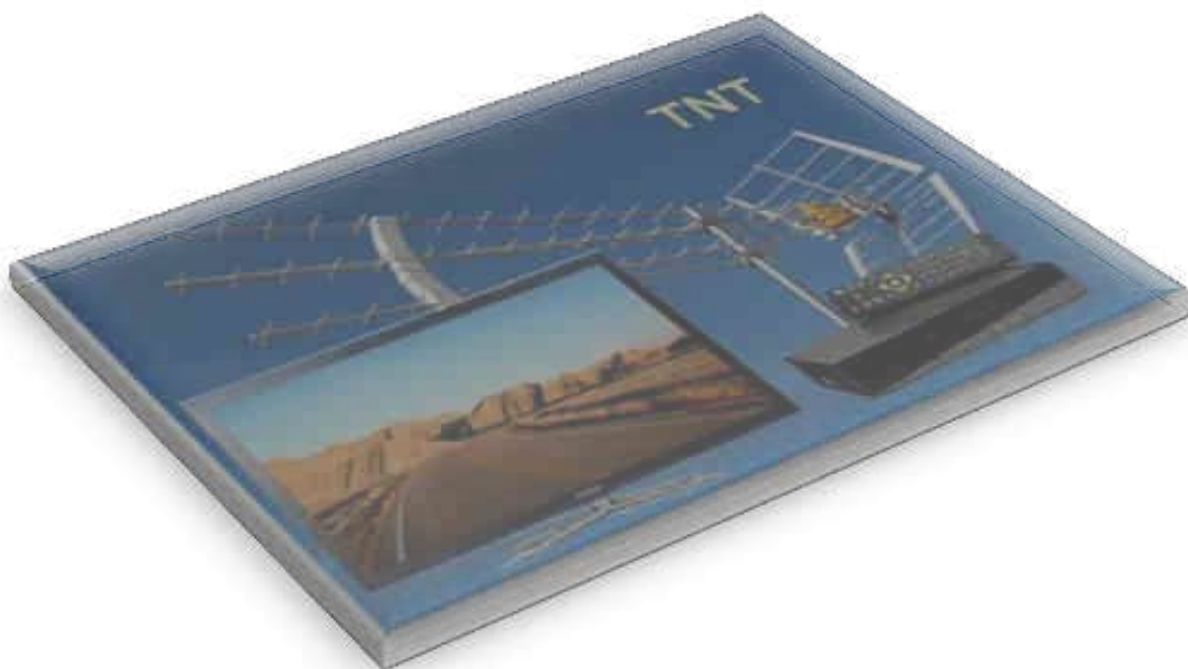
Dr. BOUKENADIL Bahidja
Maître de Conférences Classe « B »
Centre Universitaire Nour Bachir – El Bayadh

2022-2023

TABLE DES MATIERES

Table des matières

| | |
|---|----|
| INTRODUCTION GÉNÉRALE..... | 3 |
| Chapitre 1. Rappels sur la télévision analogique | 4 |
| Chapitre 2. Numérisation des signaux vidéo et audio | 4 |
| Chapitre 3. Les techniques de compression vidéo et audio | 4 |
| Chapitre 4. Les Télévisions numériques | 4 |
| CHAPITRE 1 | 5 |
| RAPPELS SUR LA TÉLÉVISION ANALOGIQUE | 5 |
| CHAPITRE 2 | 34 |
| CHAPITRE 3 | 46 |
| CHAPITRE 4 | 75 |
| LES TÉLÉVISIONS NUMÉRIQUES..... | 75 |



| | |
|-----------------------------------|----|
| REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES | 94 |
|-----------------------------------|----|

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION

Le cours Télévision Numérique est particulièrement adressé aux étudiants de la 2eme année Master Réseau et Télécommunications pour le 3eme semestre. Il vise à brosse le principe de la télévision numérique (transmission et traitement de l'image) et ses applications ainsi que les notions de compression numérique et de codage. le présent cours est présenté comme suite:

Chapitre 1. Rappels sur la télévision analogique

Historique, Normes colorimétriques pour la vidéo couleur, Signal vidéo composite analogique couleur, Sous modulation chrominance, Techniques de codage/décodage couleur (PAL, SECAM et NTSC), Les bandes et canaux de transmission pour la télévision analogique (VHFI, VHFIII et UHF), Rappels sur les standards actuels.

Chapitre 2. Numérisation des signaux vidéo et audio

Rappels sur l'échantillonnage et la quantification des signaux, Dynamique et numérisation des composantes Y, Cr et Cb, Les différents formats des vidéos numériques (4 :2 :2, 4 :2 :1, 4 :2 :0). La ligne vidéo numérique, la trame vidéo numérique. Standards et définitions de vidéo numérique en p et/ou i (SD, HD, Full HD, 4K2K ...).

Numérisation du signal audio.

Chapitre 3. Les techniques de compression vidéo et audio

Introduction, Calcul des débits de transmission vidéo numérique, Redondance spatiale et redondance temporelle, Principe de la Compression intra-image (Transformation-Quantification-Codage), Compression inter-images : analyse du mouvement, compensation du mouvement, Les normes de compression vidéo : MPEG2, MPEG4, H264/AVC et HEVC. Les techniques de compression audio. Multiplexage des signaux.

Chapitre 4. Les Télévisions numériques

Historique et contexte, Différents type de télévision numériques (DVB-T, DVB-S et DVB-C), Schémas synoptiques. Transmission et diffusion de la télévision numérique (DVB) ; La COFDM pour la DVB-T, Les modulations numériques utilisées. Les canaux de la DVB-T. Réception de la télévision numérique. Les autres Standards de diffusion numérique terrestre (ATSC, ISDB-T et DMB-T ...etc). Les nouvelles générations comme DVB-T2, DVB-NGH ...etc

CHAPITRE 1

RAPPELS SUR LA TÉLÉVISION ANALOGIQUE



1.1. Historique

A. Système mécanique

En 1884, l'ingénieur allemand Paul Nipkow a inventé un système mécanique d'analyse d'images appelé disque de Nipkow.

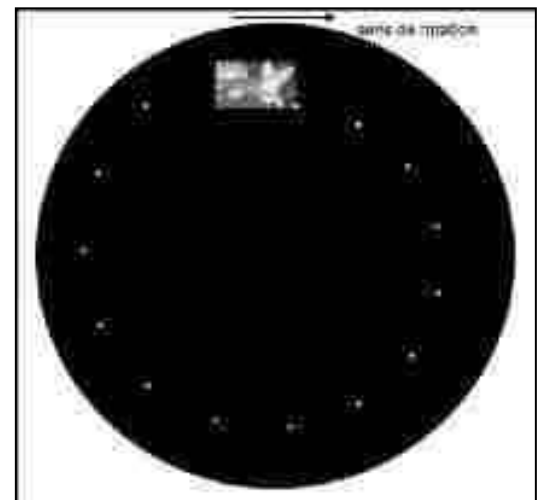
❖ Disque de Nipkow

- Le disque se situe entre l'image et une cellule photoélectrique (un analyseur mécanique).
- Percé de trous disposés en spirale
- Tourne grâce à un moteur électrique
- Chaque trou correspondant à une ligne, il y a donc autant de trous que de lignes (sous forme d'arcs de cercle).



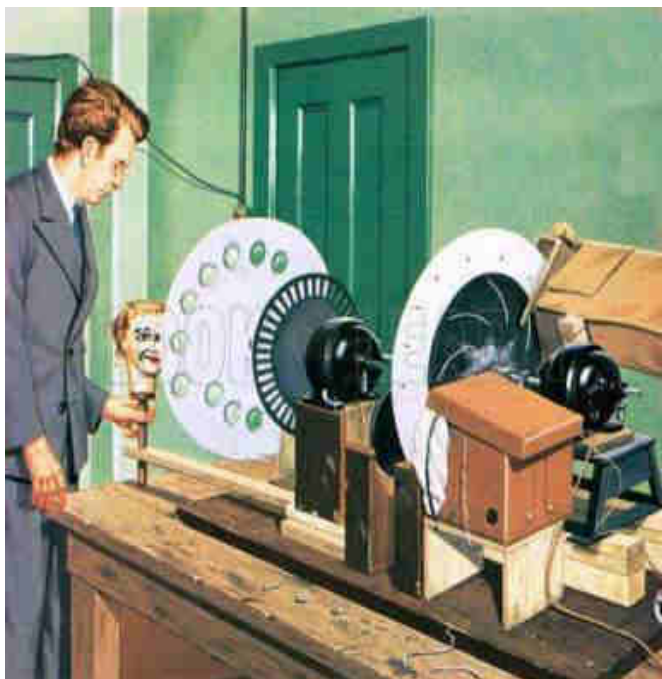
❖ Principe de fonctionnement

- Chaque trou correspondant à une ligne, il y a donc autant de trous que de lignes (sous forme d'arcs de cercle).
- Ils servent à capter la luminosité de chaque point de l'image en faisant tourner ce disque.
- Le premier trou en haut à gauche de l'image parcourt sa largeur, selon une ligne ou courbe.
- Le décalage entre le premier et le dernier trou correspond à l' hauteur de l'image.



- Lorsque le premier trou arrive tout à droite de l'image, c'est alors le deuxième trou qui continue ce balayage de l'image en partant à gauche de l'image, en-dessous de la première ligne faite par le premier trou; et ainsi de suite, jusqu'au dernier trou qui finit l'image en bas à droite.

En 1925, l'anglais John Logie Baird, crée la première société de télévision au monde. Quelques mois plus tard, il fera sa première démonstration publique.



En 1929, la BBC émet des programmes expérimentaux de mauvaise qualité en se basant sur le système Baird. Seules quelques centaines de privilégiés pourront regarder ces images.

Le système Baird était un système à 30 lignes → Les images produites sont saccadées et grossières.

La BBC se reposera dessus jusqu'en 1936 où elle adoptera le système EMI (haute résolution) à 405 lignes.

Le système Baird présentait l'avantage d'être économique et facile à mettre en œuvre.

La BBC avait pu utiliser ses émetteurs radio existants à faible bande passante pour diffuser les programmes.

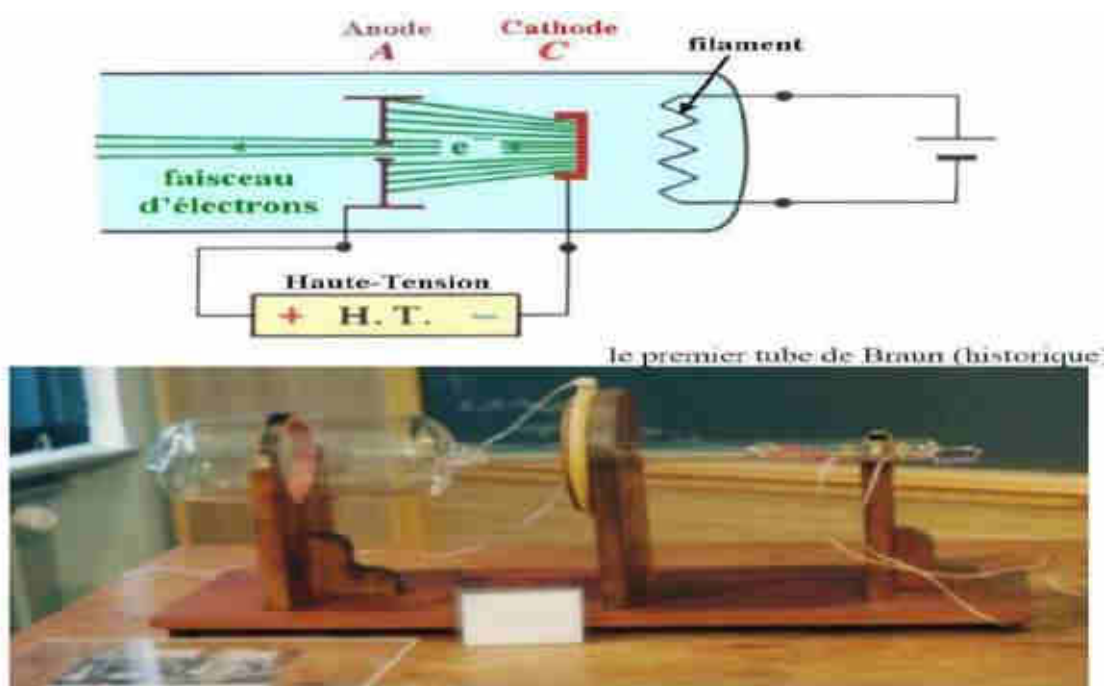
La première pièce avec diffusion simultanée de l'image et du son a eu lieu en juillet 1930.

La télévision de Baird



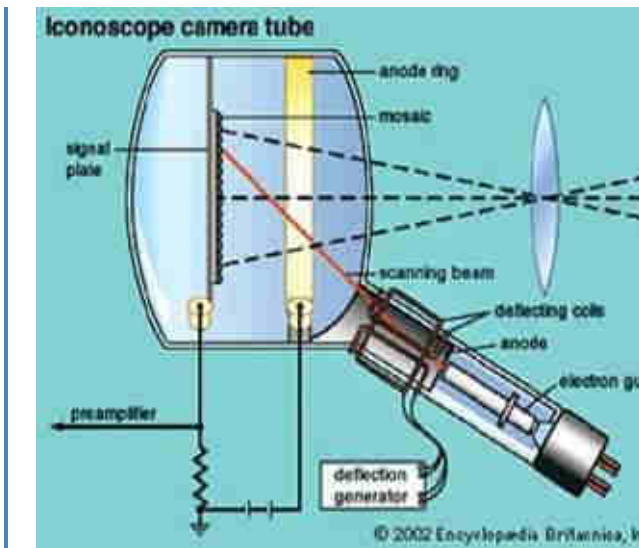
B. Système électronique

- En 1908, l'ingénieur britannique A. Campbell-Swinton a proposé un système analyseur qui utilisait un faisceau d'électrons produit par des tubes à rayons cathodiques (TRC) tant à l'émission qu'à la réception.
- Dès 1897, Ferdinand Braun avait découvert qu'on pouvait faire dévier le faisceau d'électrons (faisceau lumineux) sur la surface du tube en utilisant des champs magnétiques extérieurs.



- Chauffé au rouge lors du passage d'un courant électrique, un filament peut émettre des électrons.
- Ces électrons doivent être accélérés (entre C et A) puis concentrés. On obtient un faisceau fin d'électrons qui, dans le vide, se propage en ligne droite.
- Deux plaques de métal horizontales permettent de provoquer une déviation verticale du faisceau lorsqu'elles sont soumises à une tension.
 - La déviation est d'autant plus grande que la tension est élevée.

- En 1923, Vladimir Zworykin invente l'iconscope, un tube électronique de caméra.



❖ Principe de l'iconscope

- Dans l'intervalle qui sépare deux passages du faisceau, sous l'effet de la lumière, les points éclairés de la mosaïque émettent des photoélectrons et se chargent positivement par rapport aux autres parties de la mosaïque.
 - Au passage suivant du faisceau, chaque élément est ramené à la tension d'équilibre.
 - La neutralisation des charges qui en résulte provoque la libération d'une charge correspondante par la plaque signal. Son passage à travers la résistance de charge fournit la tension de signal utile.
-
- En 1932, l'équipe britannique de Electronic & Musical Industries (EMI) a découvert le tube analyseur « emitron » qui surpassait le système mécanique de Baird.
 - L'électronique venait de prendre le pas sur la mécanique.
 - En 1937, un système fondé sur l'emitron d'EMI a permis de mettre sur pied en Grande-Bretagne le premier service régulier de télévision à haute définition (pour l'époque) de l'histoire humaine.
 - La Grande-Bretagne a établi la norme de 405 lignes et 25 images par seconde (remplacée par celle de 625 lignes) en 1964.

| Récepteur EMI 1938



1.2. Définition de la télévision

- Transmission à distance des images animées et des sons correspondants,
- Utilise deux voies avec leur porteuse, l'une pour l'image, l'autre pour le son, occupant une certaine bande de fréquence, ou canal.
- La transmission des images s'effectue en convertissant à l'émission une image optique en signaux électriques proportionnels à la brillance de chacun des points constituant l'image et en les transmettant les uns après les autres sur un canal unique.
- A la réception on opère la conversion inverse.

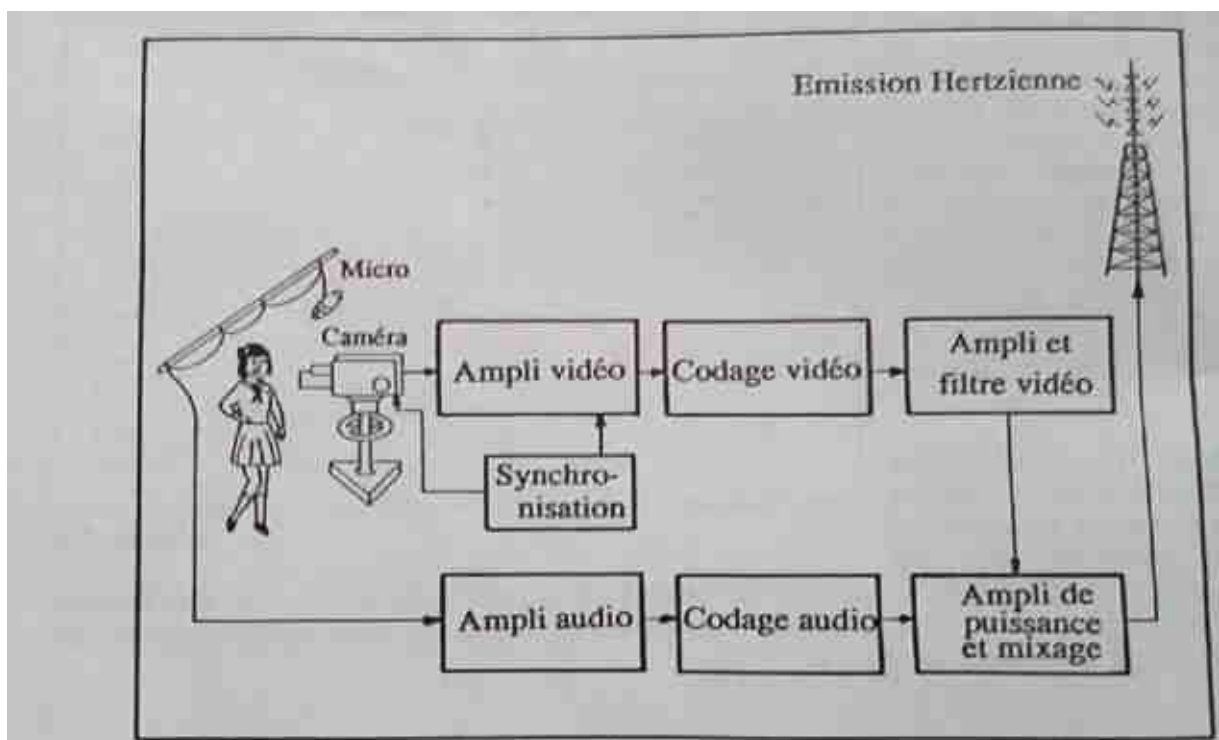


Figure I.1 : Schéma synoptique simplifié d'une émission de télévision

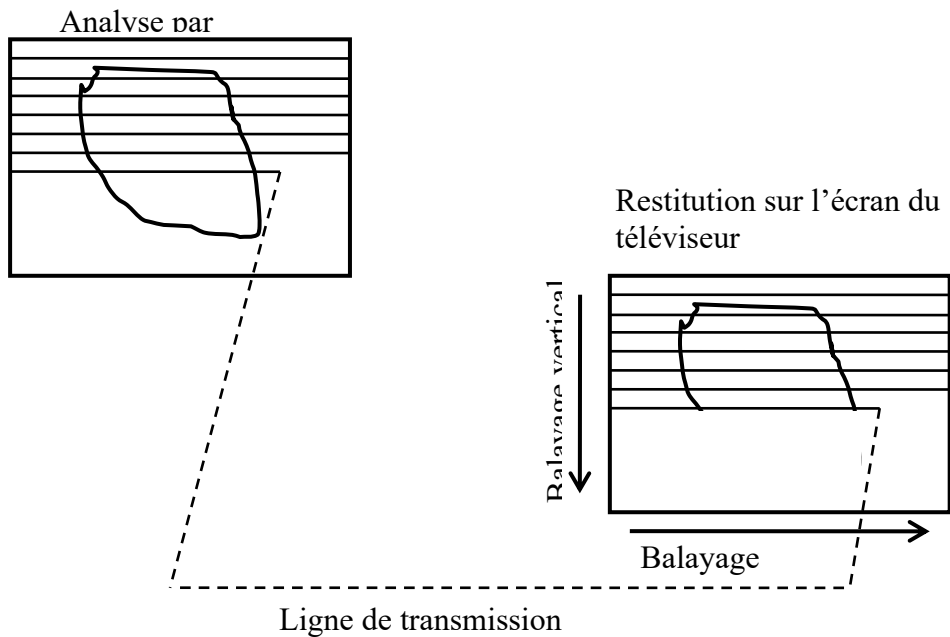


Figure I.2 : Transmission et reconstruction d'image de télévision

1.3. Concepts fondamentaux

❖ La vidéo-images animés

- 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.

➤ Capteur d'images : camera

- Une image animée peut être considérée comme une fonction de 3 variables : "Information d'image" = $I(x,y,t)$
- La durée d'une image est fonction de la persistance rétinienne de l'œil humain (1/15s) et de la fréquence du secteur (50Hz ou 60Hz)
 - **À partir de 16 images/sec l'œil ait l'impression d'un mouvement continu des images (principe de la cinéma)**
- L'affichage d'une image dure 1/25s en Europe et 1/30s aux USA, valeur moitié de la fréquence du secteur, supérieure à la persistance rétinienne.

❖ Balayage de l'écran pour une image

- L'image est en fait analysée par lignes horizontales (très légèrement obliques par rapport à l'écran) lues de gauche à droite.
- Un balayage vertical analyse les lignes de haut en bas.
- Un temps mort correspondant au retour du balayage sépare la lecture de deux lignes.

- Un ensemble de lignes de haut en bas de l'image forme une trame ;
- A la fin de celle-ci on a un autre temps mort dû au retour du balayage vertical, qui peut durer plusieurs lignes.

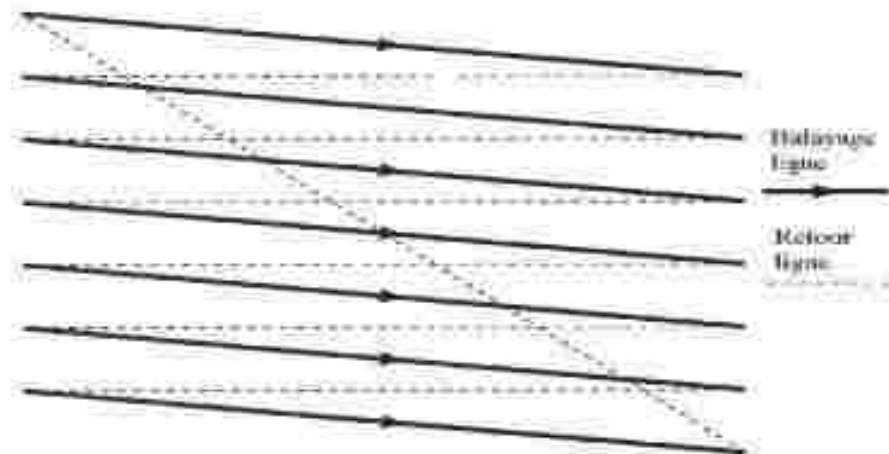


Figure I.3: Balayage de l'écran pour une image

❖ Balayage entrelacé

- L'œil est incapable de percevoir des images séparées si celles-ci sont affichées avec un taux de répétition de 20 à 30 Hz, mais 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, la fréquence d'une image doit être égal à au moins 50 Hz (50images/sec).

- Pour éviter **le papillotement** de l'image et conserver une fréquence d'affichage des images égale à seulement 25Hz, on analyse d'abord les lignes impaires et ensuite les lignes paires, c'est **le balayage entrelacé**.

Un affichage à 50 images par seconde conduirait au doublement de la bande passante.

- Une image est décomposée en deux trames consécutives, **une trame paire et une trame impaire**.

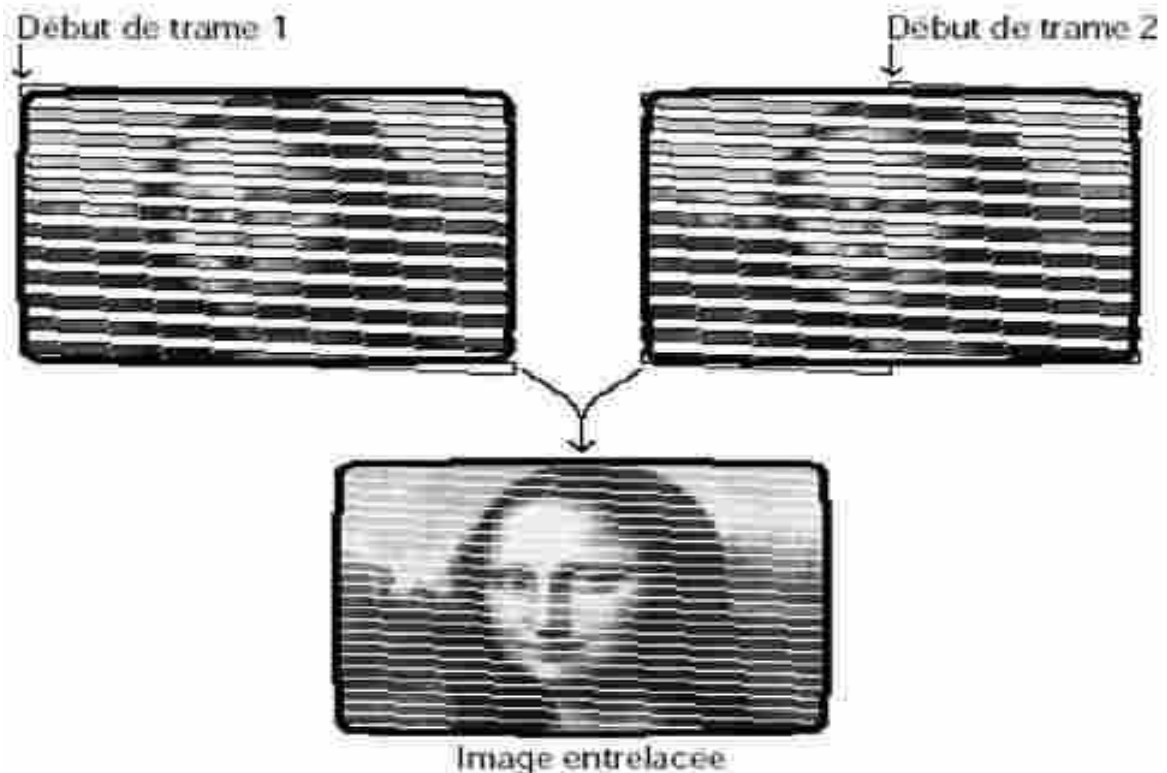


Figure I.4: Balayage entrelacé

❖ **La définition de l'image**

La définition, ou définition verticale, de l'image est liée au nombre de lignes qui composent l'image, Elle est de :

- 625 lignes avec 50 trames/sec en Europe,
- 525 lignes avec 60 trames/sec aux USA et Japon.
- La définition horizontale est le nombre de points par ligne.

Pour un écran au format 4/3, la définition horizontale DH est égale pour le standard européen à $4 \times 625 / 3 = 833$ "points" par ligne.

❖ **La bande passante**

- La bande passante peut 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) :

$$1/(2\tau) = 25 \times 625 \times 4 \times 625 / 3 \times 1/2 = 6,5 \text{ MHz.}$$

Une partie des lignes d'une trame sont des lignes "noires" et ne contribuent dans l'image (la durée du retour trame, correspond à environ 10% de la durée d'une trame), 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).

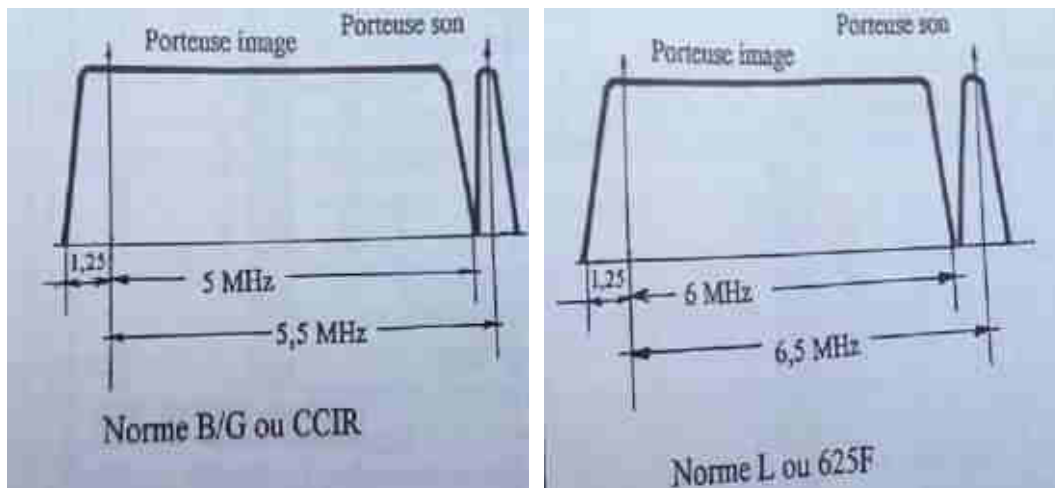


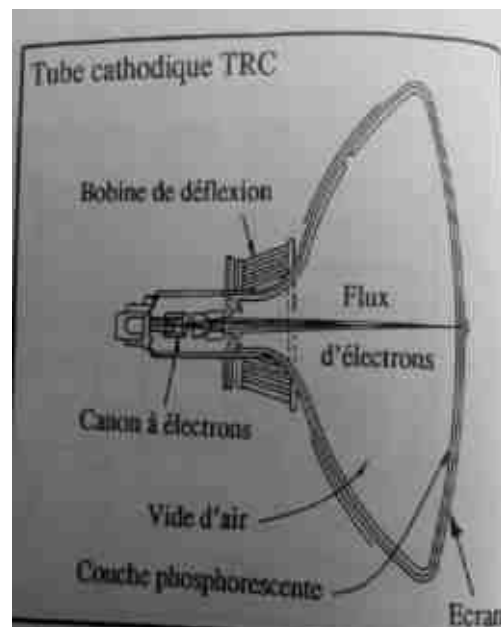
Figure I.5: Bandes passantes normalisées: Exemples

1.4. Principe de la télévision

❖ Affichage de l'image :

Tube cathodique

- Canon à électrons produit un flux d'électrons (spot)
- La couche phosphorescente produit la lumière.
- La lumière sera d'autant plus intense que beaucoup d'électrons sont produits.
- Leur nombre sera proportionnel (à peu près) à la grandeur du signal vidéo qui arrive au canon.
- Le déplacement du spot est assuré par une bobine qui fournit un champ magnétique. Le courant électrique fourni aux bobines (une pour le balayage horizontal et l'autre pour le balayage vertical) est en forme de "dents de scie".

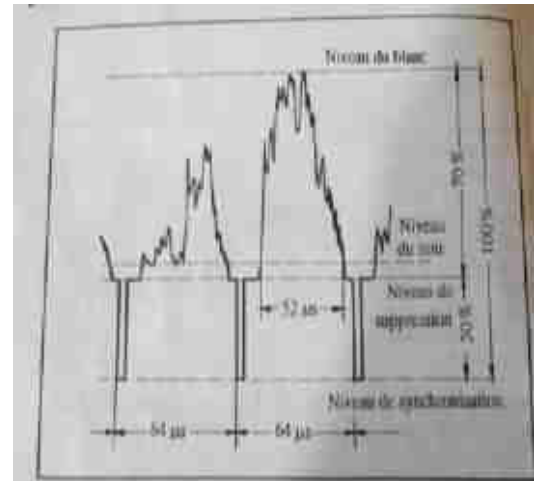
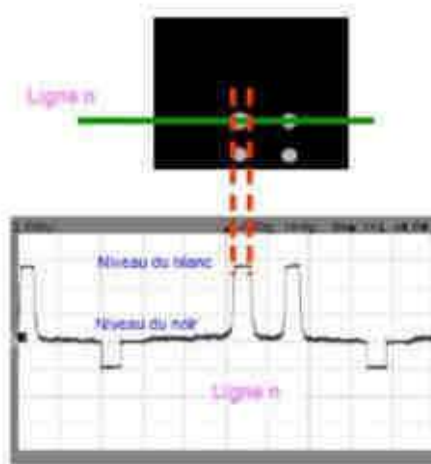


1.5. Signal vidéo composite

❖ Définition

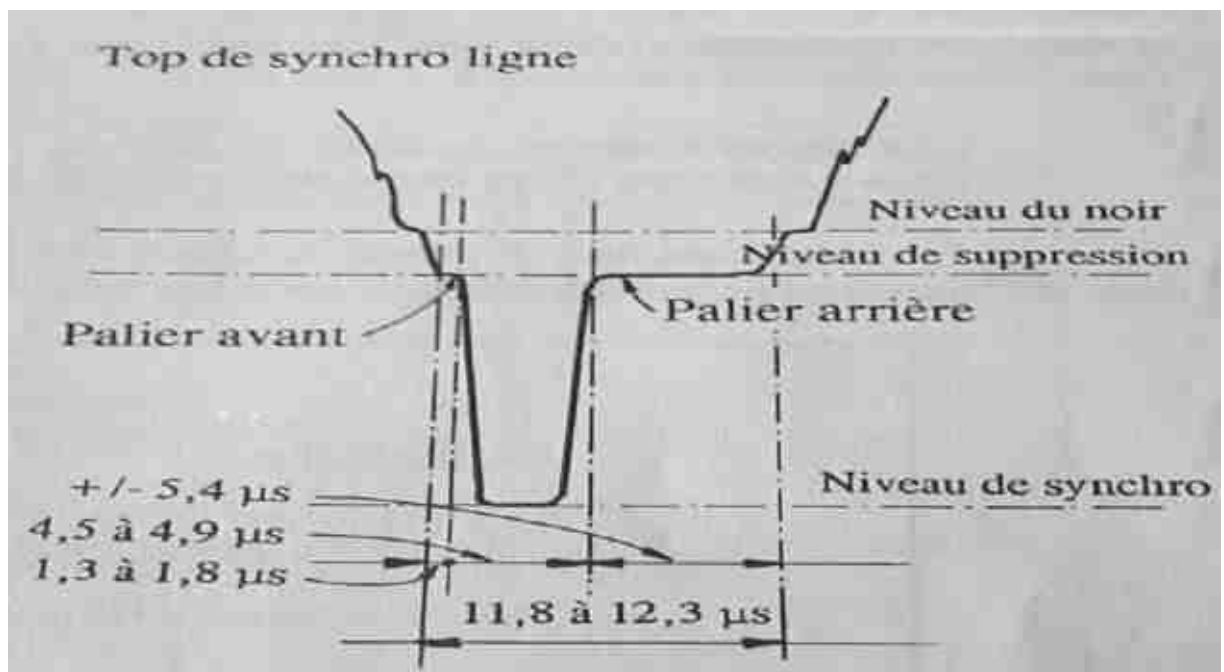
Le signal vidéo composite est constitué par deux composantes :

- Des impulsions de synchronisation déclenchant les **balayages ligne et trame**,
- Les niveaux de tension variables représentant le signal de vidéo (luminance pour un TV N&B, voir la figure ci-dessous).



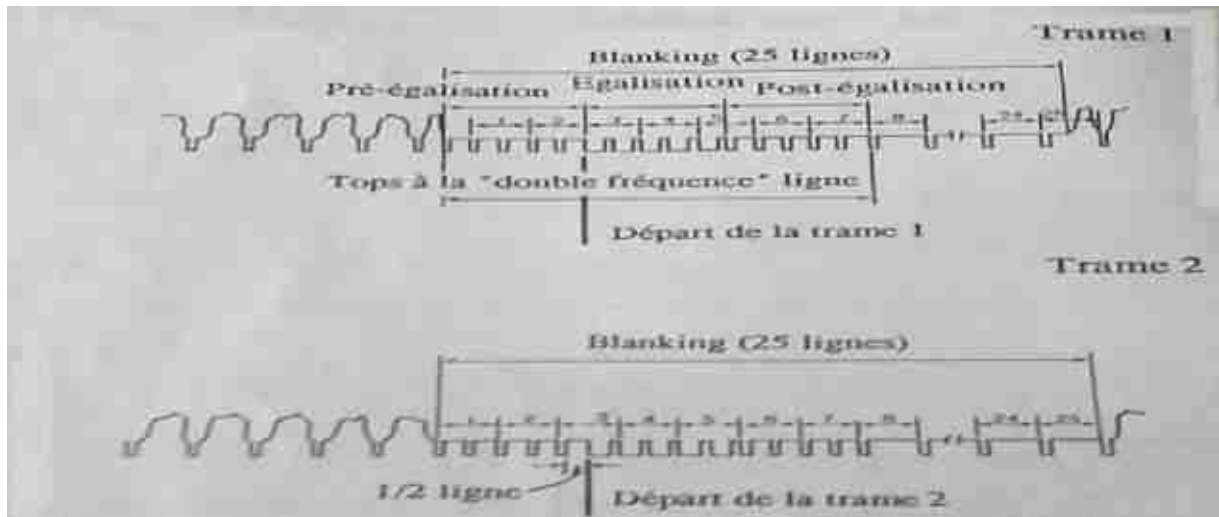
❖ Synchro-ligne

Permet de déclencher le balayage d'une ligne de l'écran d'un tube cathodique,

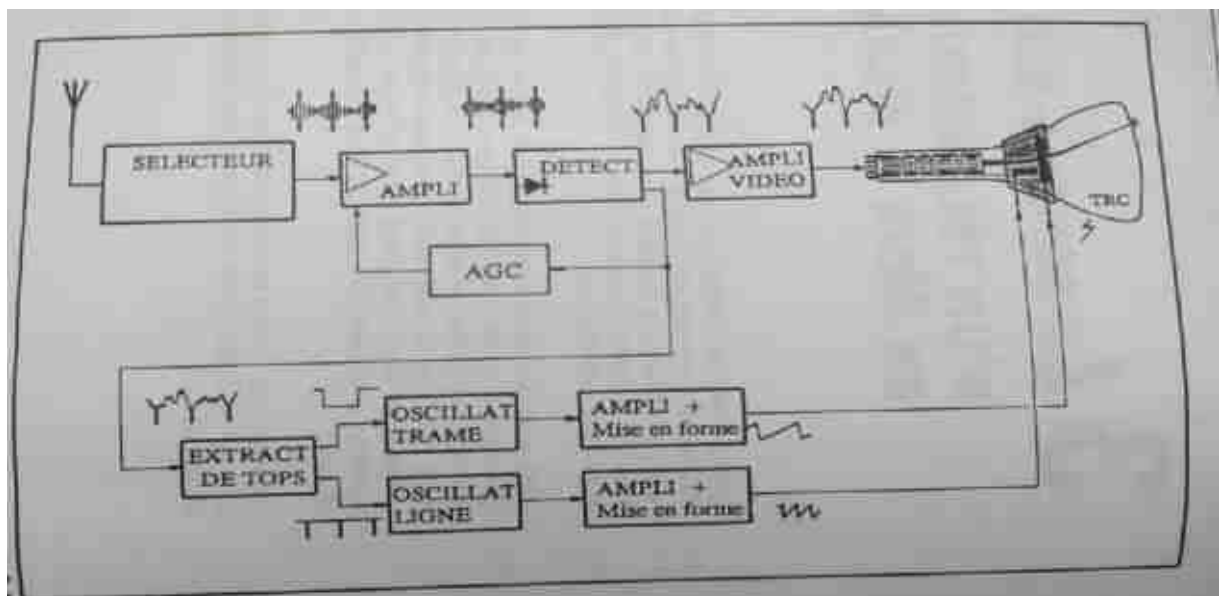


❖ Synchro-trame

- Permet de déclencher le balayage d'une trame.
- Il est composé de 5 tops synchro ligne inversés à double fréquence, précédés de 5 tops de pré égalisation et suivis de cinq tops de post égalisation, viennent ensuite 23 lignes d'effacement.
- Ces lignes d'effacement, nécessaires à la remontée du spot, sont utilisées pour transporter les signaux télétexte, les anti-copie VHS, les signaux destinés au décodages de canal analogique, etc...



❖ Chaîne de reproduction de la vidéo



SELECTEUR : permet la sélection du canal désirée.

AGC (Automatic Gain Control) : contrôle le gain de l'amplificateur.

DETECT : détection du signal vidéo.

1.6. Transmission

o 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.

o Modulation

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 (hertzienne, par satellite, par fibre optique)

o Diffusion hertzienne

Pour la transmission 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.

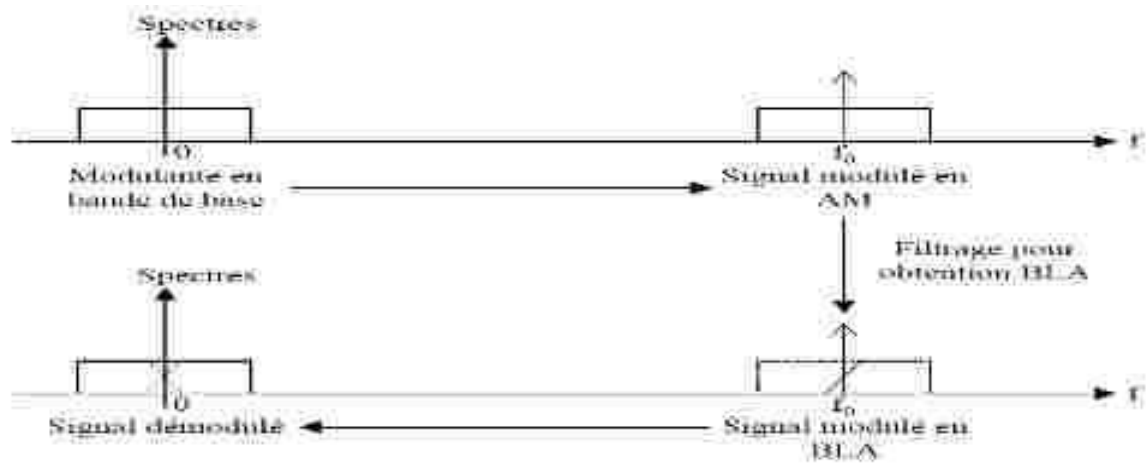
o Bandes allouées à la télévision

La diffusion hertzienne entre les émetteurs régionaux et les récepteurs de télévision, peut utiliser 3 bandes de fréquence :

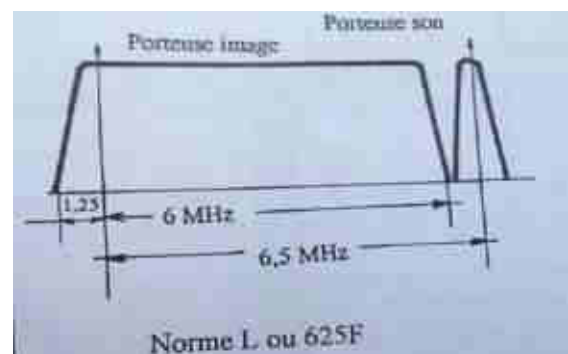
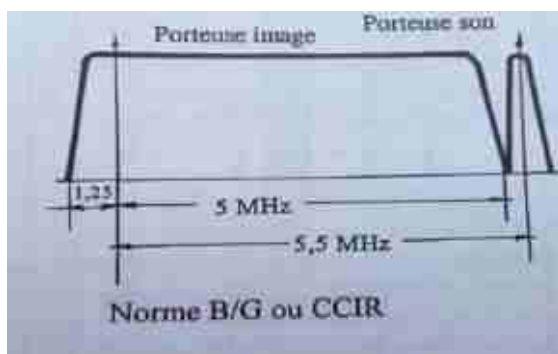
- **La bande I VHF (Very High Frequency)** : elle s'étend entre 47 et 68 MHz et contient 3 canaux : E2 à E4. Elle est peu employée,
- **La bande III VHF** : elle s'étend de 174 à 230 MHz et contient 6 canaux : E5 à E12.
- **La bande UHF (Ultra High Frequency)** : elle s'étend de 470 à 862 MHz et contient 49 canaux (E21 à E68) 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** qui permet de réduire presque la moitié de la bande allouée à chaque émetteur de télévision (on conserve 1,25 MHz de la bande latérale inférieure).

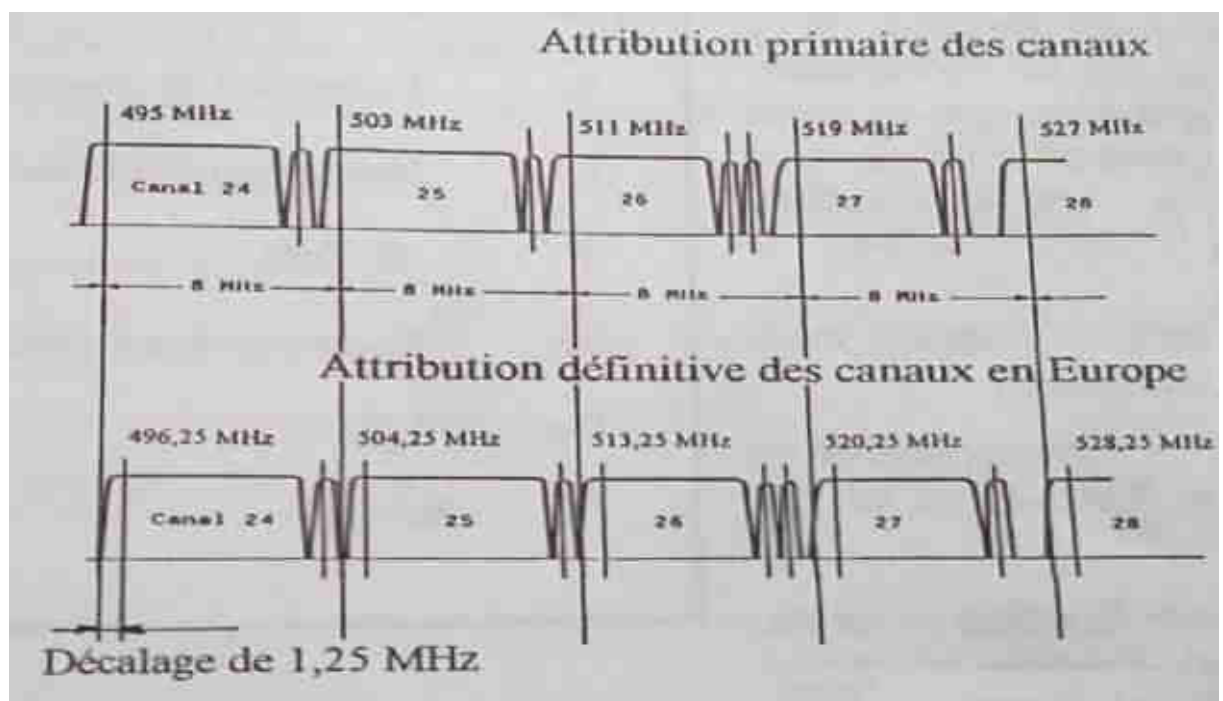
o Modulation à bande latérale atténuée



o Spectres normalisés : Exemples



o Simulation d'occupation des canaux en UHF



1.7. Télévision couleur

❖ Colorimétrie

En télévision, on utilise la trichromie additive :

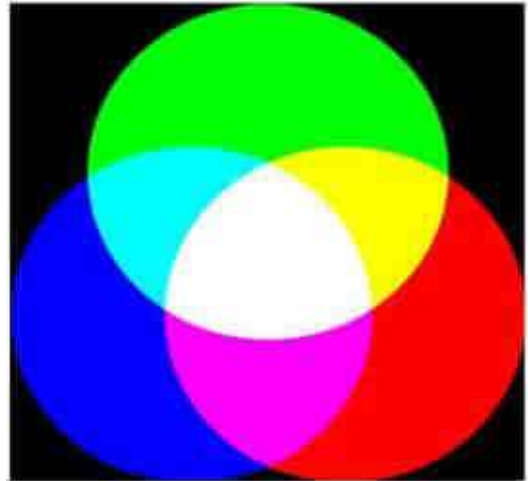
Trois couleurs dites **primaires** pour recomposer toutes les autres couleurs : le rouge R, le vert G (pour Green), et le bleu B.

Rouge + vert = jaune

Bleu + rouge = magenta

Vert + bleu = cyan

Rouge +bleu-vert=blanc



Une relation fondamentale a été établie entre la luminance Y et le RGB :

$$Y = 0,30R + 0,59V + 0,11B$$

Le signal vidéo (composite) sera constitué de l'information de **luminance** et de l'information couleurs, la **chrominance**.

❖ Détermination qualitative des couleurs

Chaque couleur est caractérisée par trois paramètres :

- **La luminance**

Est la luminosité avec laquelle l'œil percevra la couleur.

- **La saturation**

La saturation d'une couleur reflète la mesure avec laquelle elle est mélangée avec la lumière blanche.

Ex. un morceau de verre rouge apparaît tel quel, éclairons-le alors avec une lumière blanche, il apparaît rose. Donc, le rose et le rouge sont de saturations différentes.

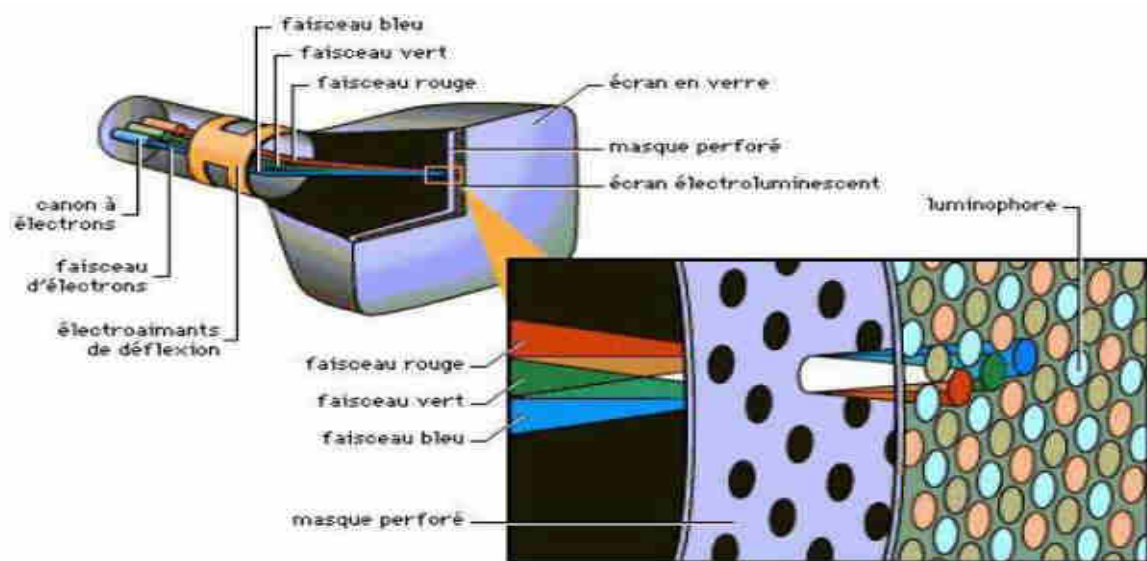
- **La teinte**

Est la manière de percevoir une couleur, c'est en fait sa longueur d'onde. Le rose et le rouge ont une longueur d'onde identique et ont donc la même teinte.

L'orange est composée du rouge et d'une petite quantité de jaune (vert) n'a pas la même teinte que le rouge.

❖ Tube cathodique couleur

- Comporte 3 faisceaux électroniques qui balayent l'écran simultanément, qui sont contrôlés par les 3 signaux analogiques R, G et B.
- Grâce à un masque placé devant l'écran, chaque faisceau n'atteint que les lumiphores de la couleur correspondante. Les lumiphores sont groupés par 3 et chaque groupe constitue un pixel de l'image.
- Quand le faisceau électronique atteint ses lumiphores, ils deviennent lumineux grâce à leurs propriétés fluorescentes et l'œil humain mélange les 3 couleurs d'un pixel.



❖ Principe de la télévision en couleur

📺 Le système doit être compatible :

- Les émissions en couleur doivent être reçues en noir et blanc sur les téléviseurs noir et blanc.
- Les émissions en noir et blanc doivent être reçues en noir et blanc sur les téléviseurs couleur.

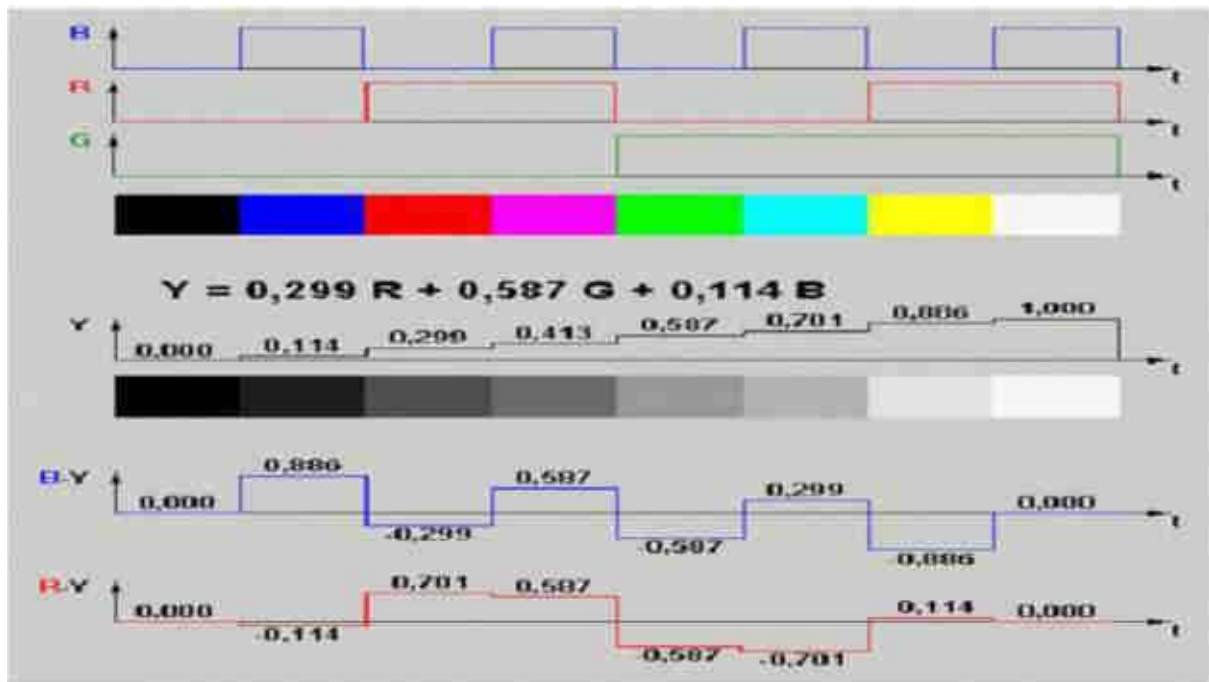
📺 Un TV Noir&Blanc ne sera pas capable de reconstituer Y à l'aide des trois composantes R, G, et B (tube cathodique à un seul canon d'électrons)

- **Il faudra tout naturellement émettre la luminance.**

📺 Au lieu de transmettre Y & les trois composantes R, G, et B, on transmet Y et les deux couleurs R et B sous la forme $D_B = B - Y$ et $D_R = R - Y$.

- Il est possible de reconstituer G-Y :

$$G - Y = -0.51(R - Y) - 0.19(B - Y)$$



Exemple : signaux de chrominance

❖ **Codage de la chrominance**

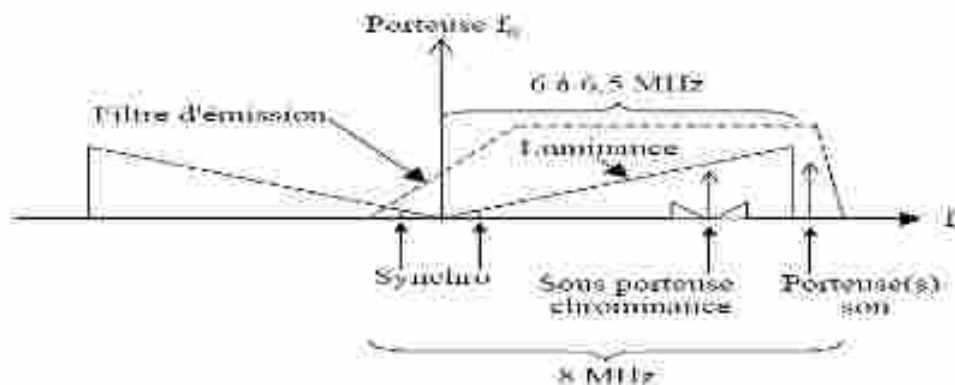
- L'œil est beaucoup plus sensible aux variations de luminance qu'aux variations de chrominance (environ 4 fois plus importante)

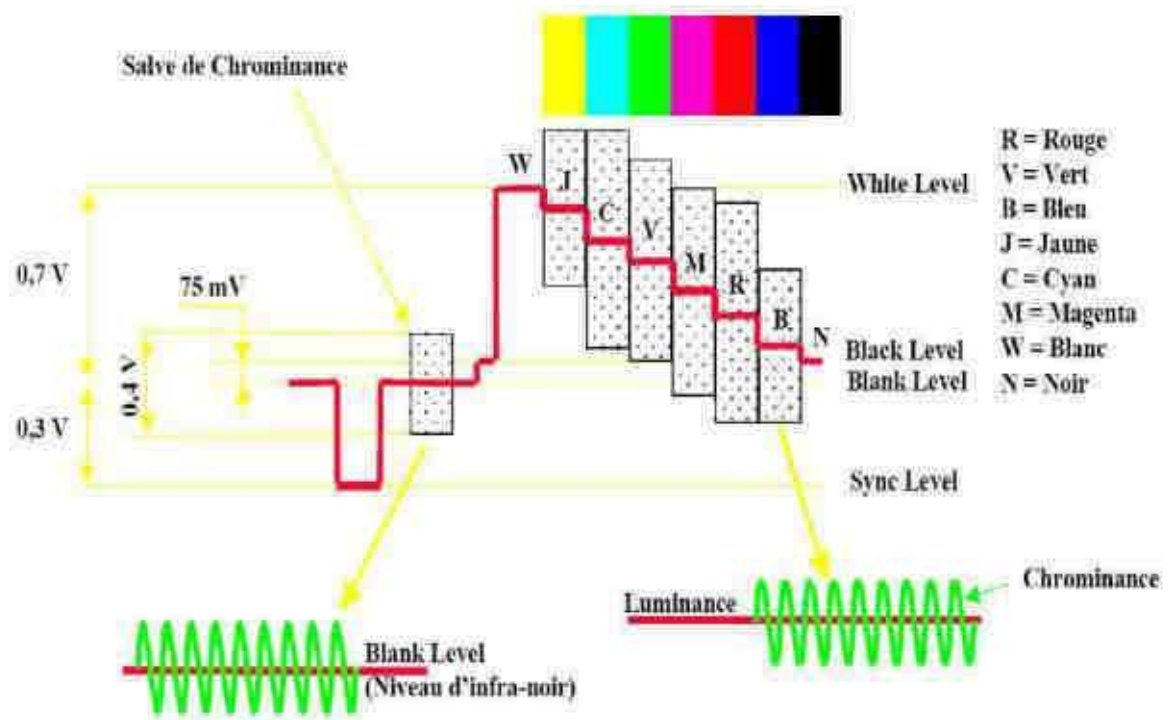
En conséquence, les signaux de chrominance occupent environ le quart de la bande passante vidéo (5.5MHz environ), soit de l'ordre de 1.2 MHz

- Comme le spectre ne laisse pas de place entre canaux pour placer la chrominance, il est impératif de placer la chrominance dans le spectre du signal vidéo composite.

Ce signal va perturber la luminance et supprimer 1.2 MHz à l'endroit où elle sera émise, où placer cette sous-porteuse ?

- Il est préférable de perdre les **détails fins** (hautes fréquences), il est donc clair qu'il faut la placer **à la fin du spectre**.

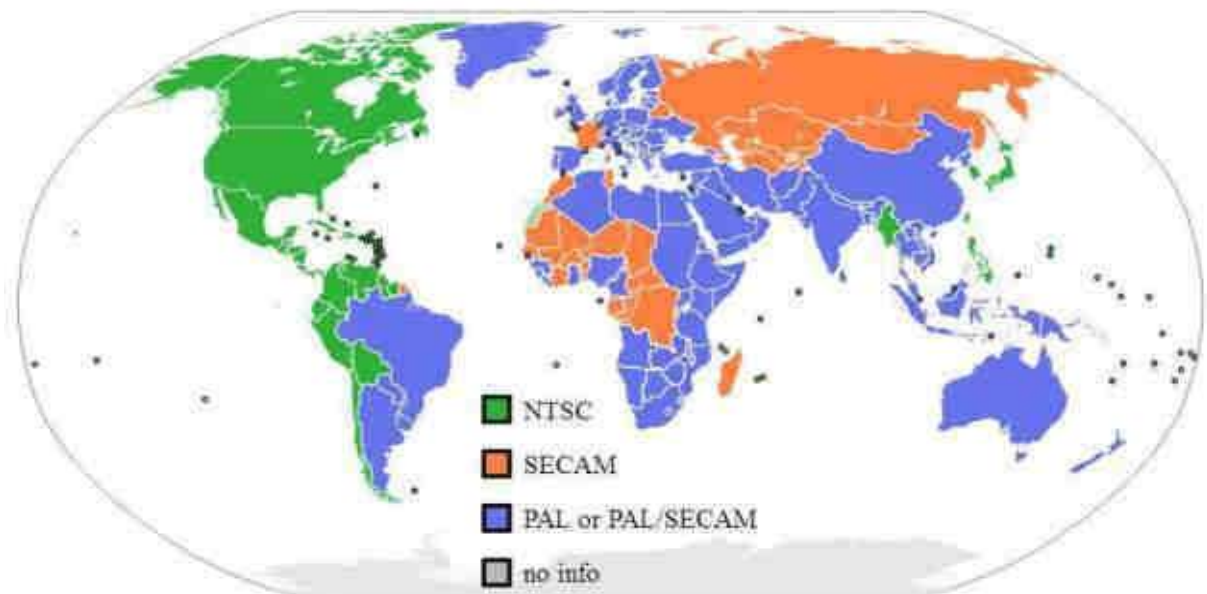




Mire des barres de couleur

1.8. Standards de télévision couleur

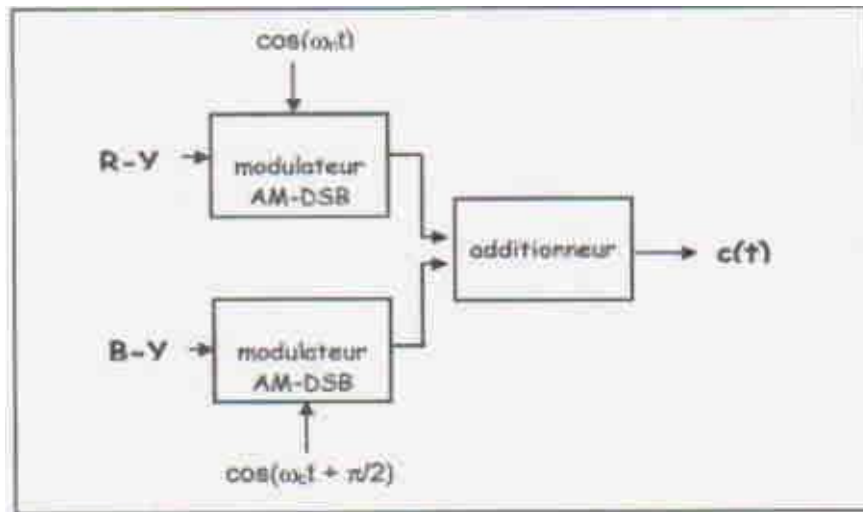
Trois standards ont été introduits pour le codage de chrominance pour la télévision : NTSC, PAL, SECAM.



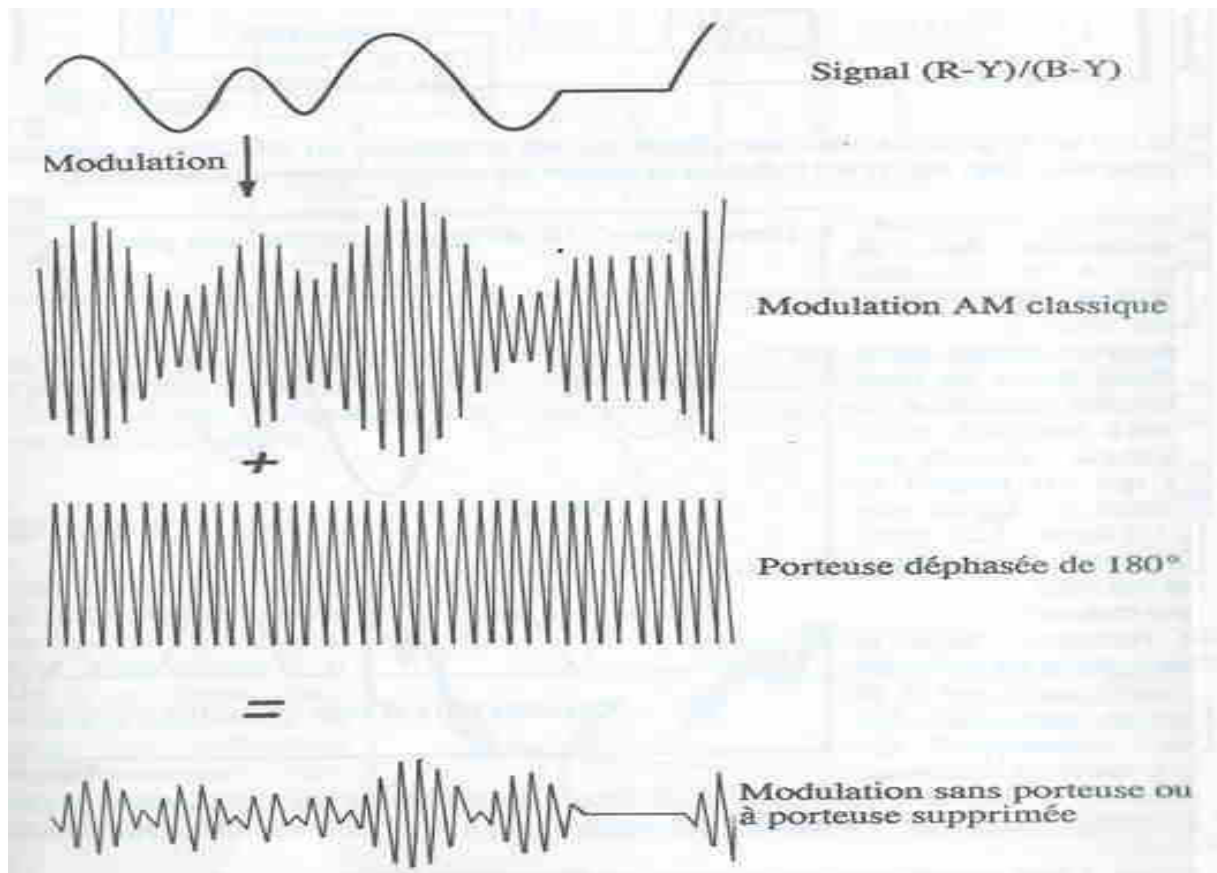
➤ **NTSC** (*National Television System Committee*)

- Est un standard de codage analogique de la vidéo en couleurs lancée aux Etats-Unis en 1953. Il procure un format vidéo de 525 lignes et 30 images par seconde en noir et blanc.

- Les signaux de chrominance DB et DR modulent en amplitude deux porteuses de même fréquence à 3,58 MHz déphasées de 90° (MAQ).
- Comme il est inutile d'occuper spectre de fréquence en présence d'une partie de l'image sans couleur, il suffit de **supprimer la porteuse de la chrominance** lors de la modulation.



- La dernière étape consiste à ajouter ces composantes de chrominance (R-Y et B-Y) à la luminance (Y le noir et blanc) pour ne plus obtenir qu'un seul signal à transmettre.



Modulation à porteuse supprimée

▪ **Plan de couleurs (DB, DR)**

Les deux valeurs D_B et D_R comme les composantes d'un vecteur qui donne la couleur : L'angle que fait le vecteur par rapport à D_B représente **la teinte** et sa **longueur la saturation**.

$$CHR = \sqrt{D_B^2 + D_R^2}$$

- Pour une couleur "purement" rouge : $R = 1$ et $B = G = 0$, on a :

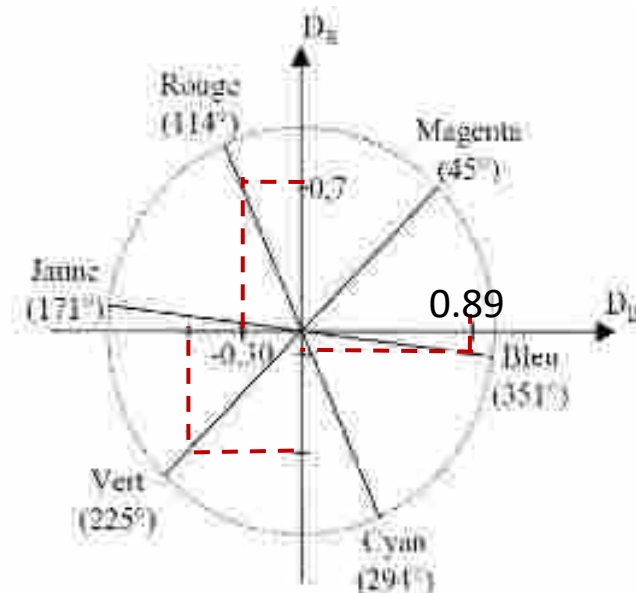
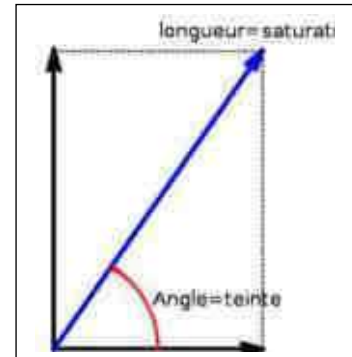
$$D_B = -0,30 \text{ et } D_R = 0,7.$$

Pour un bleu, soit $B = 1$ et $R = G = 0$, on a :

$$D_B = 0,89 \text{ et } D_R = -0,11.$$

- Enfin pour un vert, soit $G = 1$ et $B = R = 0$, on a :

$$D_B = D_R = -0,59.$$



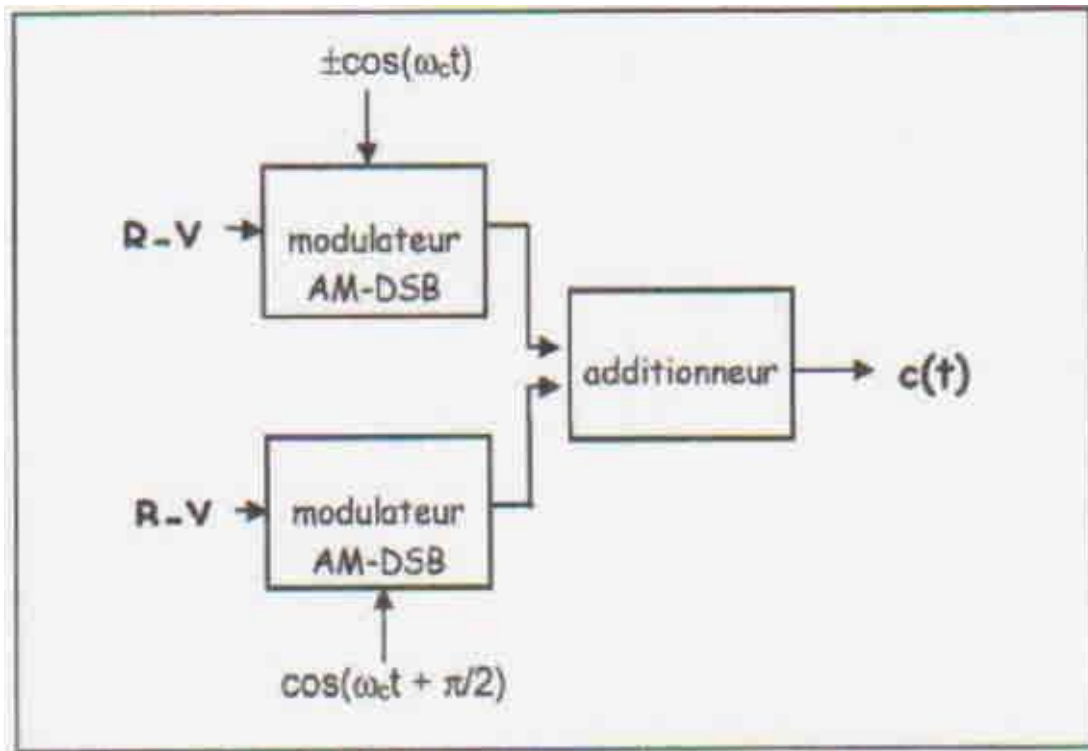
▪ **Inconvénients**

- Malheureusement, des **déphasages** parasites peuvent s'introduire au cours de la transmission radio, qui vont se traduire par une **erreur de couleur** (de teinte).
- Pour éviter ce problème, une référence de phase soit transmise en début de chaque ligne par une **salve de synchronisation**.
- Mais, si la phase du Burst subit des variations de phase différentes de celle de chrominance, le décodeur est impuissant de corriger l'erreur, c'est le défaut du système NTSC, d'où le surnom de **Never Twice the Same Color** "jamais deux fois la même couleur".

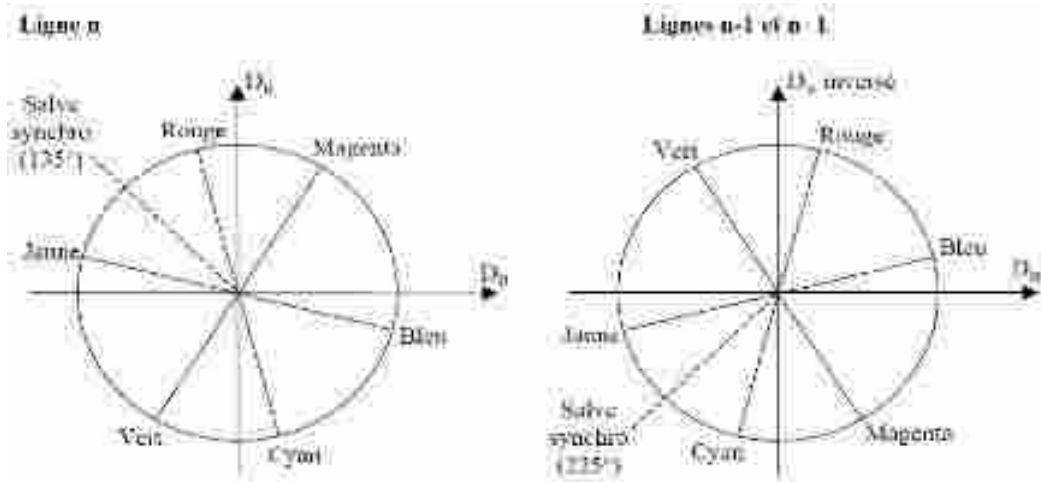


➤ PAL (phase alternation by line)

Ce système allemand, développé en 1963, est associé à un format vidéo de 625 lignes et 25 images par seconde et une fréquence de la porteuse : 4.43MHz.



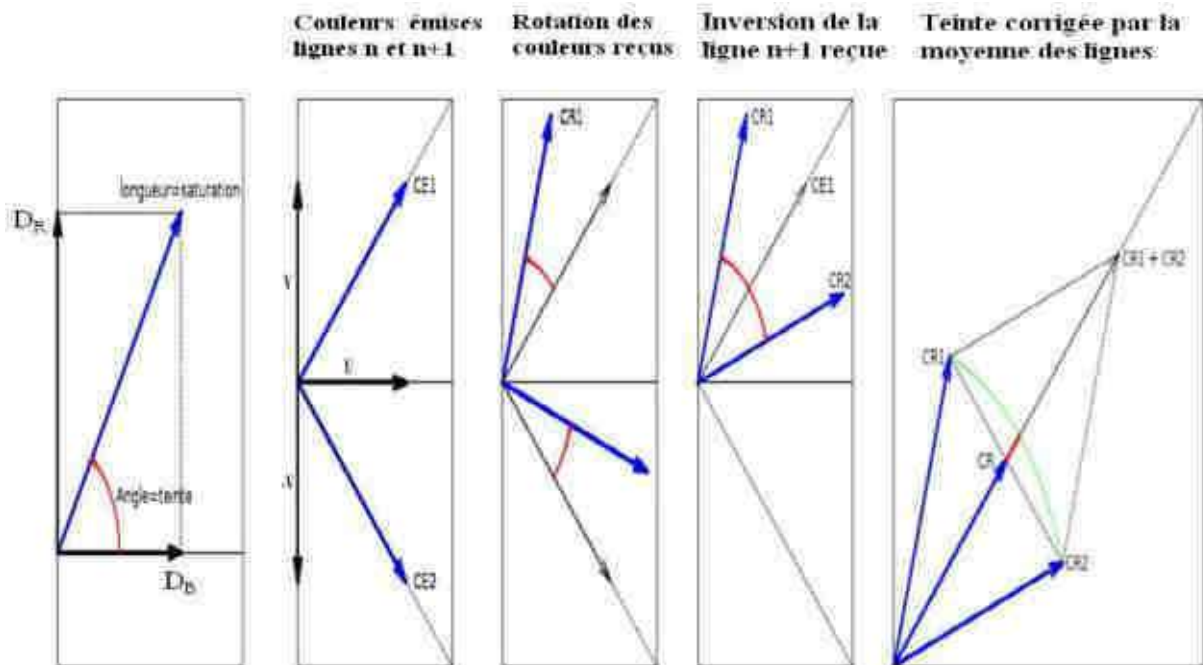
- Ce système a repris le principe du NTSC, en corrigeant son principal défaut, la sensibilité aux erreurs de phase en réception.
- Pour cela, la phase du signal DR modulant en quadrature la sous-porteuse, est alternée à chaque ligne d'où le nom du procédé : Phase Alternance Line, ou PAL (une ligne sur deux de la composante rouge DR est inversée).



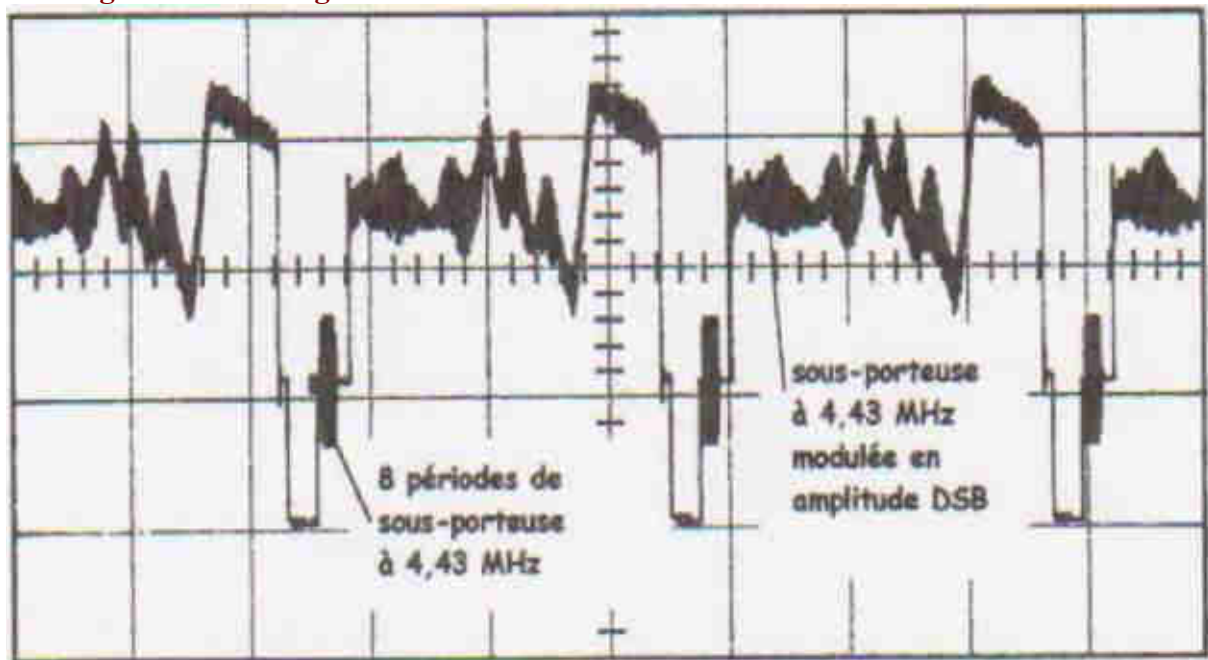
✓ A la réception, et avant la démodulation, on sépare les signaux D_B et D_R en faisant :

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

- Le signal de chrominance reçu sur une ligne est mis en mémoire durant une ligne de façon à pouvoir être combiné avec le signal de la ligne suivante.
- Si la transmission de ces deux composantes est affectée d'un déphasage, leur combinaison électronique permet d'éliminer le défaut.



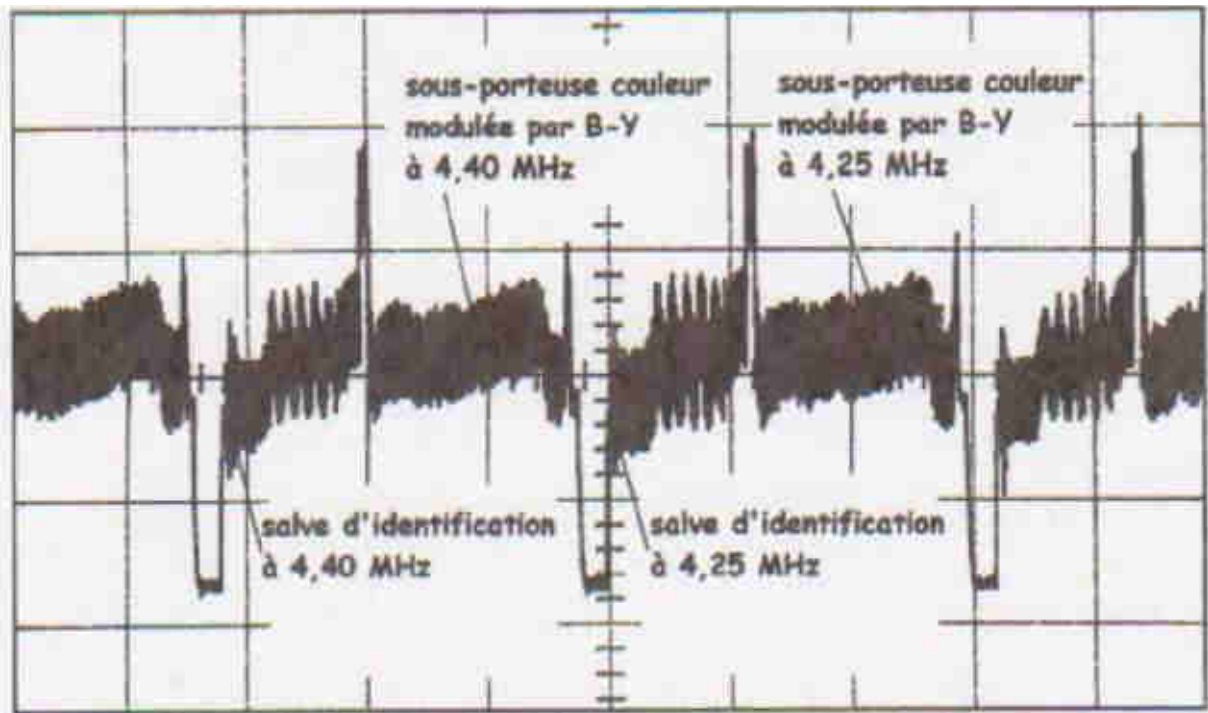
Oscillogramme d'un signal PAL



➤ Le système SECAM

- Le système français SECAM (pour Sequence de Couleurs Avec 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 DR et la composante DB.
- 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 $64 \mu\text{s}$.
- Afin d'éviter tout risque d'erreur, une fréquence de sous-porteuse différente est attribuée à chaque couleur (4,40 MHz et 4,25 Mhz).
- Comme en PAL, il y a réduction de moitié de la définition verticale, ce qui est en général peu visible. Ce système :
 - Procure une image en couleur d'aussi bonne qualité que le PAL
 - Il a été adopté pour éviter la pénétration des téléviseurs étrangers (PAL, NTSC) sur le marché français. D'où l'appellation Système Élégant Contre les Américains !

Oscillogramme d'un signal SECAM



Récapitulatif

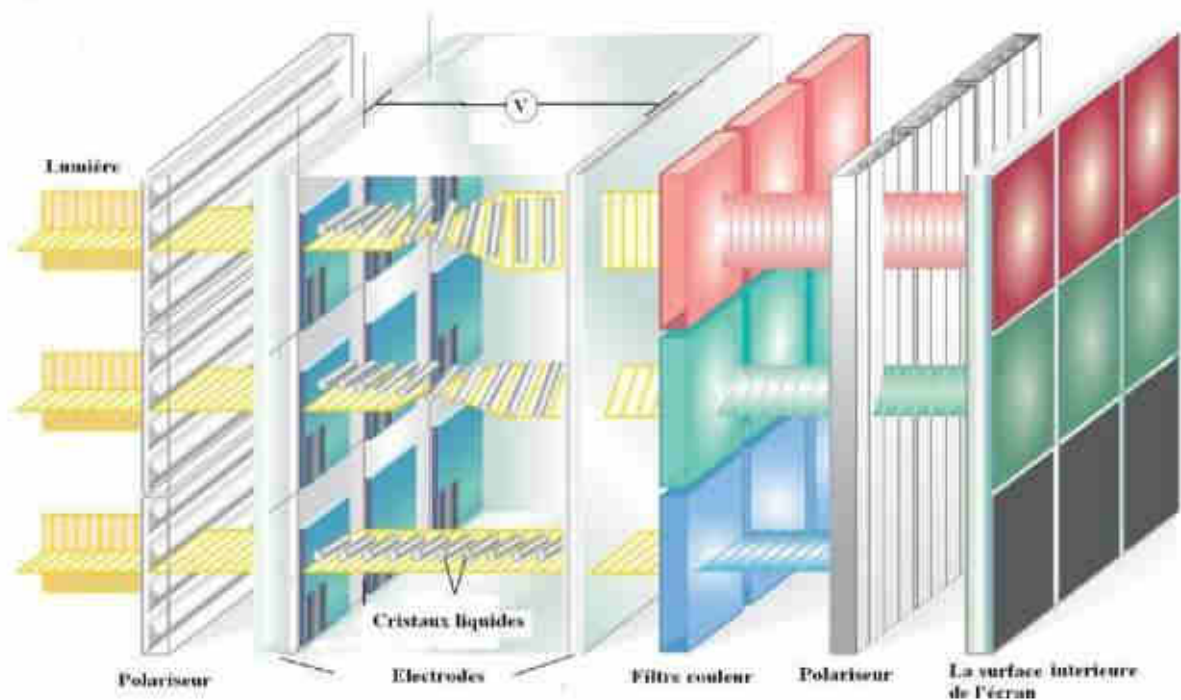
| standard | fréquence des sous-porteuses couleur | modulation | remarques |
|----------|---|------------------|---|
| NTSC | B-Y : $f_c = 3,579545$ MHz R-Y : $f_c = 3,579545$ MHz (déphasée de $+90^\circ$) | AM sans porteuse | <ul style="list-style-type: none"> on transmet simultanément R-Y et B-Y les deux sous-porteuses sont de même fréquence mais déphasées des déphasages parasites durant la transmission faussent souvent les couleurs à l'arrivée d'où l'appellation humoristique Never The Same Color ! |
| PAL | B-Y : $f_c = 4,433619$ MHz R-Y : $f_c = 4,433619$ MHz (déphasée de $\pm 90^\circ$) | AM sans porteuse | <ul style="list-style-type: none"> le PAL est une amélioration du NTSC (sous-porteuse de R-Y déphasée de $+ ou - 90^\circ$ une ligne sur deux) on transmet simultanément R-Y et B-Y meilleur rendu des couleurs |
| SECAM | B-Y : $f_{B-Y} = 4,2500$ MHz R-Y : $f_{R-Y} = 4,40625$ MHz | FM | <ul style="list-style-type: none"> SECAM = Séquentiel à mémoire on ne transmet qu'une couleur par ligne (l'autre couleur est prise de la ligne précédente) \Rightarrow pas de mélange des couleurs bon rendu des couleurs |

1.9. Les écrans plats

1.9.1. Les écrans à cristaux liquides (LCD en anglais: Liquid Crystal Display)

- Un cristal liquide est un état de la matière entre le liquide et le solide.

- 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.
- Du point de vue optique, l'écran à cristaux liquides est un **dispositif passif : il n'émet pas de lumière, seule sa transparence varie**, et il doit donc disposer d'un éclairage.
- Le développement d'écrans plats LCD (Liquid Crystal Display) basés sur leur utilisation s'est effectué dans les années 70 et 80.
- Les écrans LCD consomment peu de puissance par rapport aux écrans CRT (environ 60% de moins), et ne dégagent pas de chaleur.



Fonctionnement d'un écran LCD

✓ Principe (à matrice passif)

- Un écran LCD est constitué d'une lampe, située à l'arrière (parfois ce sont des LED qui sont plus économiques)
- Une cellule de cristaux liquides coincés entre deux polariseurs orientés pour que la lumière ne puisse pas traversée. Un polariseur est un composant optique qui ne laisse passer que la lumière ayant une certaine polarisation. Les cristaux liquides ont la propriété de faire tourner la polarisation de la lumière en fonction de leur orientation.
- En appliquant une tension électrique leur alignement change. La polarisation de la lumière tourne un peu et donc une partie de la lumière peut traverser la cellule.
- Chaque pixel de l'image est constitué de trois cellules de ce type devant lesquelles est placé un filtre (qui correspondent aux luminophores) rouge, vert, ou bleu.

- Pour avoir un écran LCD, il suffit donc de juxtaposer des milliers de cellules LCD et de les piloter grâce aux signaux électriques.

1.9.2. Ecrans à matrice active, TFT (Thin Film Transistor)

- Un écran LCD dispose d'une plaque dite TFT (TFT : *Thin Film Transistor*) formée d'une matrice et de commutateurs. Les transistors en couche mince sont déposés sur une plaque en verre.
- Chaque transistor commande l'inclinaison du cristal liquide d'un sous-pixel.
- Un transistor est un élément à trois terminaisons appelées **la grille, le source et le drain**. Ce composant est un interrupteur commandé par une tension sur sa grille.

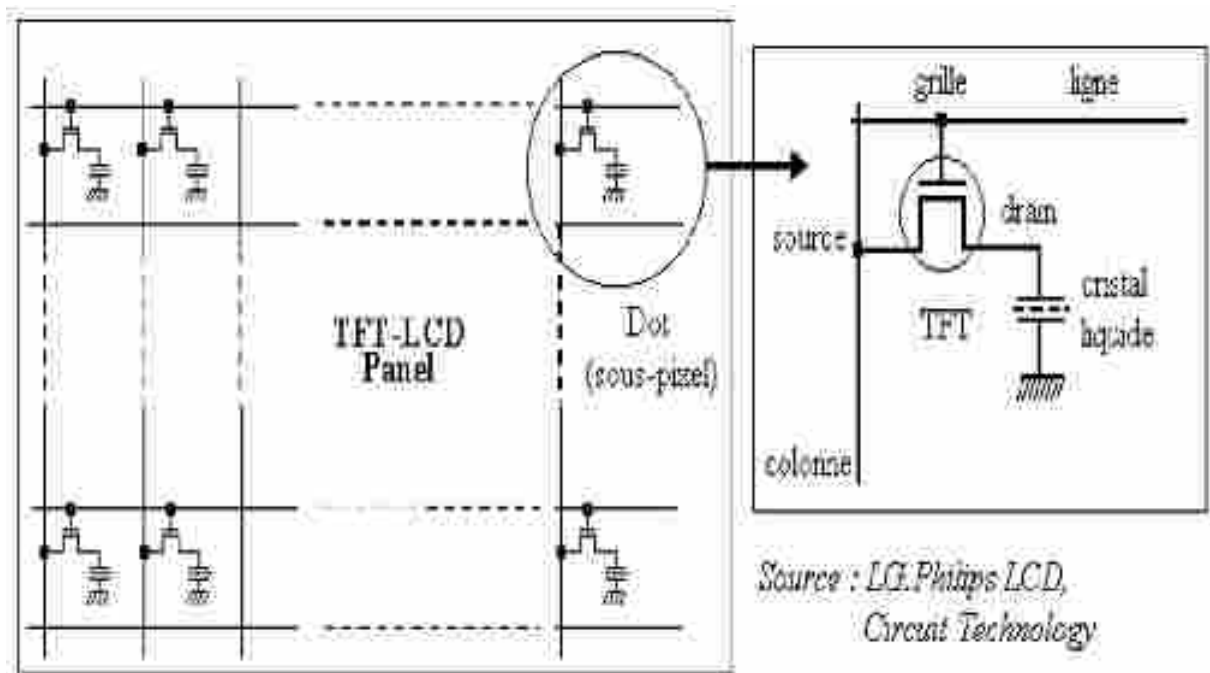
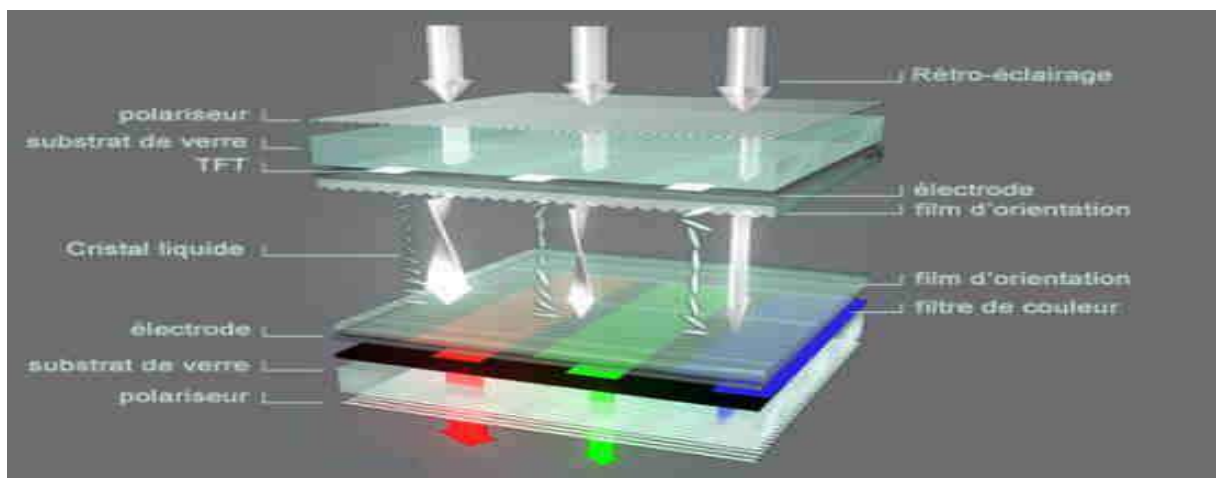
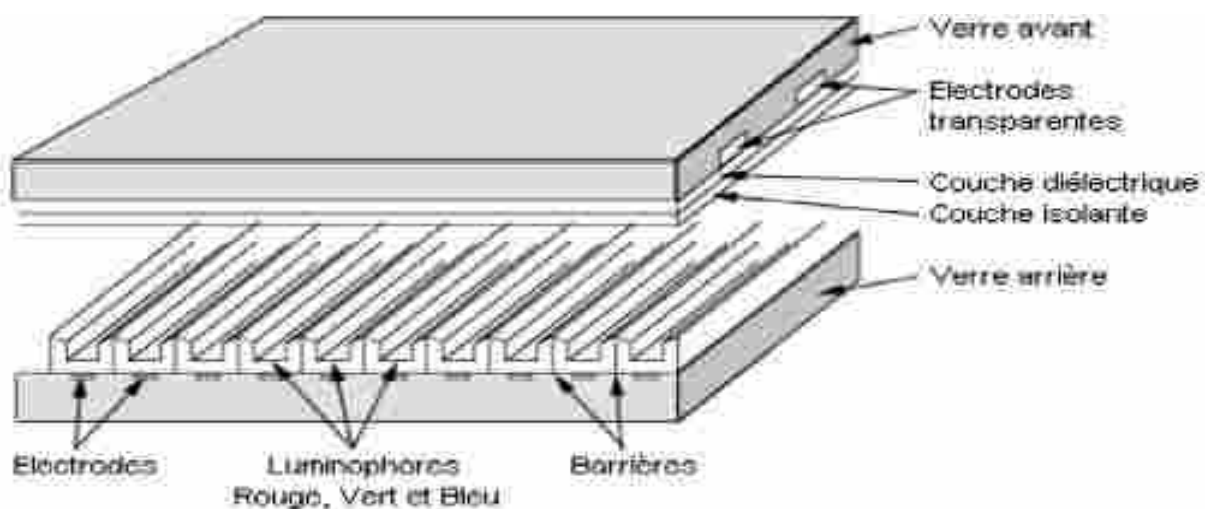


Schéma de la matrice de transistors

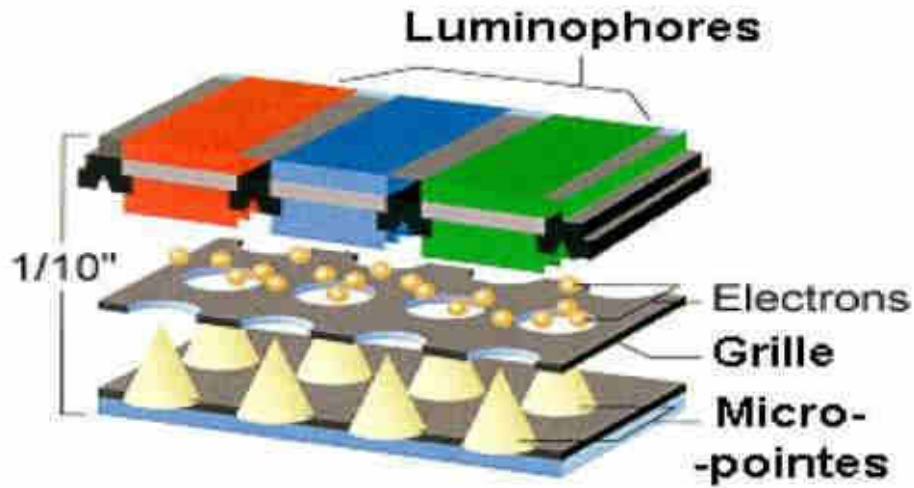
1.9.3. Les écrans à plasma (PDP, Plasma Display Panel)

- 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.
- Les électrodes appartiennent aux réseaux parallèles d'électrodes lignes et colonnes déposées en face interne de deux dalles de verre.
- 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.



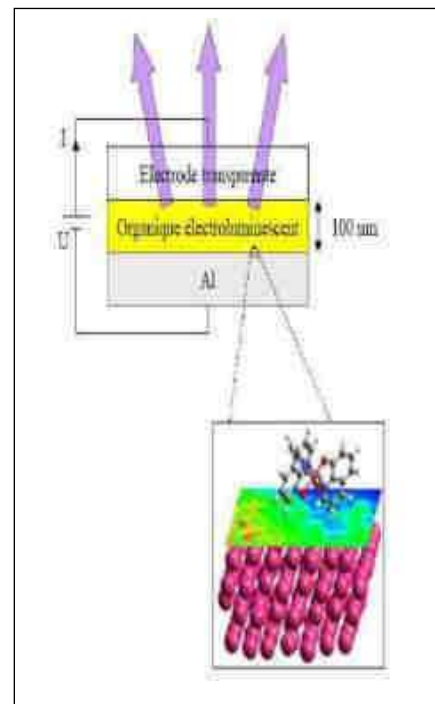
1.9.4. Les écrans à effet de champ (FED, Field Emission Display)

- Reposent 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 .
- 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 .



1.9.5. Les écrans électroluminescents (ELD, ElectroLuminescent Display)

- Sont 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.
- L'adressage des pixels est effectué par une matrice de transistors TFT, généralement réalisés en silicium polycristallin.



1.9.6. Les écrans LED



- Les écrans plats LCD classiques fonctionnent avec un système de rétroéclairage composé de néons (tubes). Cette technologie a pour inconvénient une répartition parfois peu homogène de l'éclairage à l'arrière de la dalle LCD.
- La technologie LED (Light-Emitting Diode, écran à diode électroluminescente), proposant une batterie de pixels éclairée par une diode, assure une image plus précise et homogène.
- L'encombrement : l'absence de système de rétro-éclairage permet d'alléger et d'affiner l'écran LED.
- La consommation d'électricité : elle est inférieure à celles des écrans LCD et plasma.

Plusieurs technologies LED différentes existent :

- **Ecrans plats LCD à technologies EDGE LED**

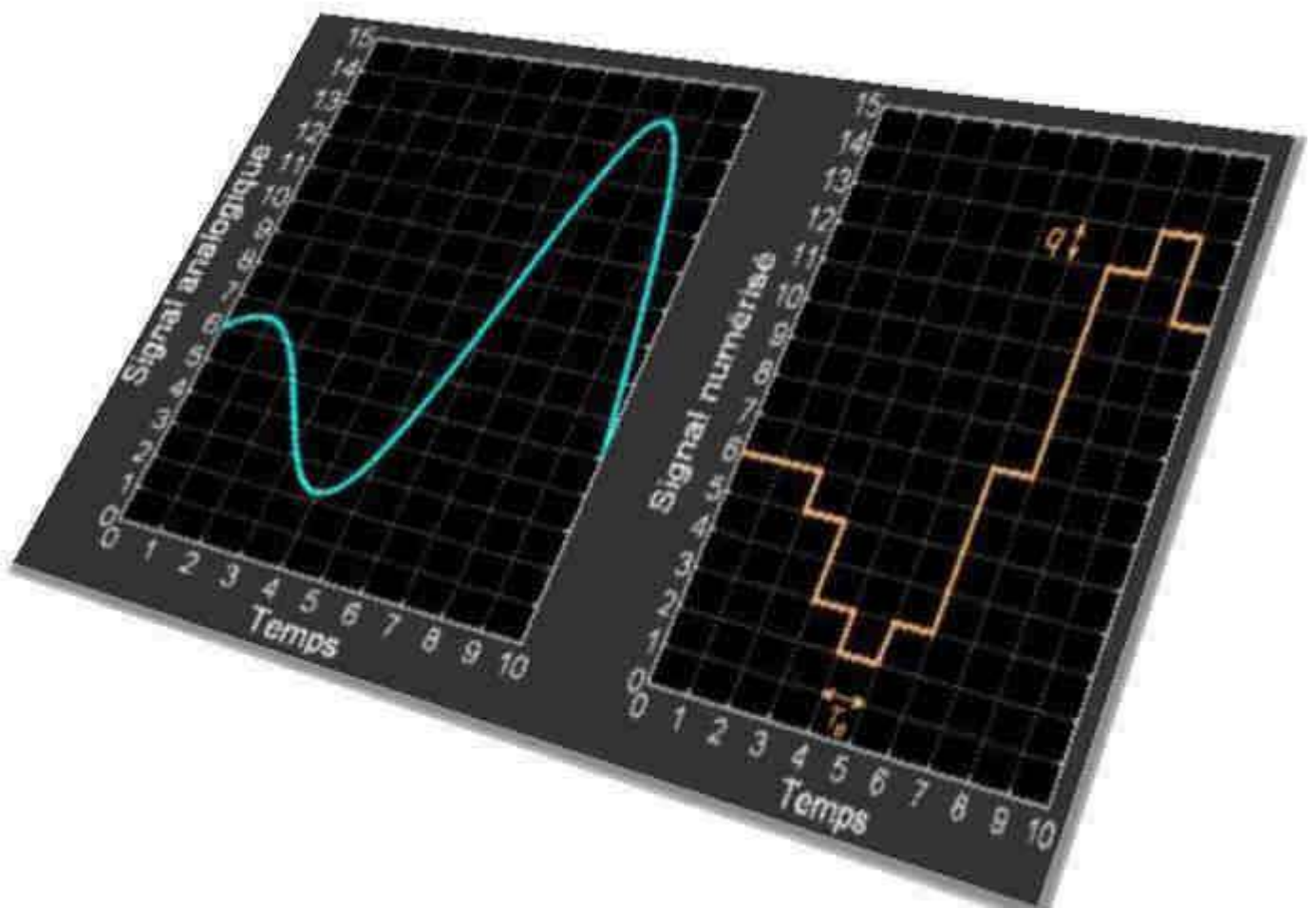
Dans les écrans LCD à technologie LED Edge, les diodes LED sont installées sur tout le bord sur la totalité de la dalle de l'écran LCD. Outre les avantages du rétroéclairage LED, ce système permet de diminuer l'espace nécessaire à l'arrière de la dalle. Sur les TV ultra-slim, l'écran fait moins de 3 cm d'épaisseur de la dalle LCD. Des réflecteurs de lumière permettent de diffuser la lumière des LED.

- **Ecrans plats LCD à technologie Full LED ou Direct LED**

Certains téléviseurs utilisent une répartition des diodes LED de type Full LED ou Direct LED. Cela signifie que les diodes LED utilisées pour le rétroéclairage tapissent l'arrière de la dalle LCD, couvrant ainsi la totalité de l'écran. Le rétroéclairage est encore plus homogène que le EDGE LED, mais l'épaisseur de l'écran est plus importante. Dans certains téléviseurs, le rétroéclairage est assuré par trois LED (RVB : rouge, verte, et bleu). Ce système permet un meilleur ajustement de la colorimétrie.

CHAPITRE 2

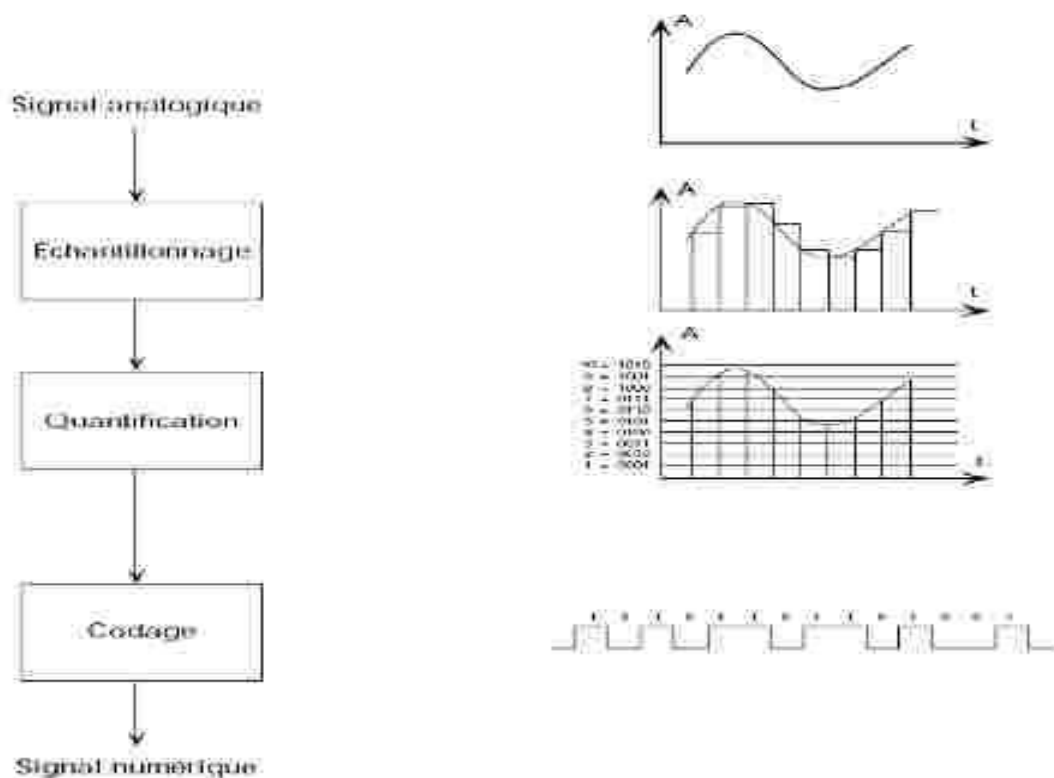
NUMÉRISATION DES SIGNAUX VIDÉO ET AUDIO



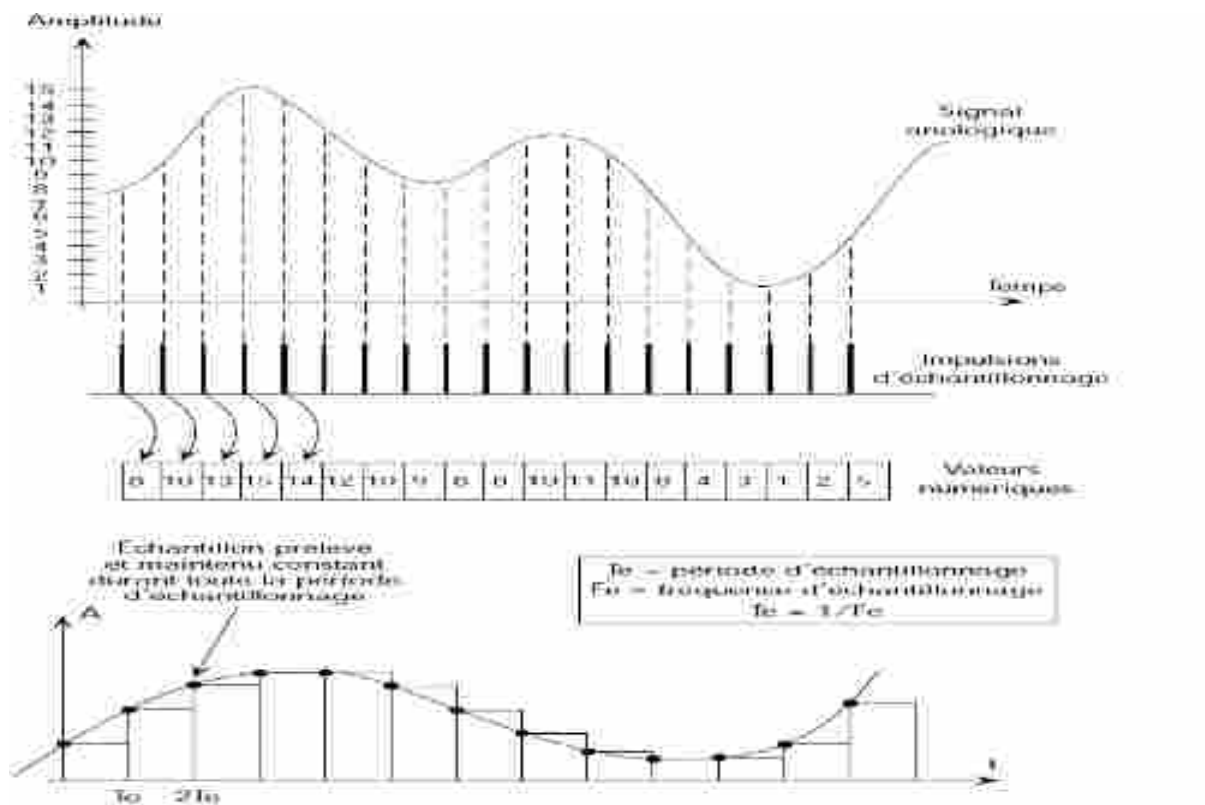
2.1. Vers la télévision numérique

- 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.
- 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 cinéma). Il est en effet possible de diffuser des programmes en format 16/9ème 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...).

2.2. Conversion analogique numérique



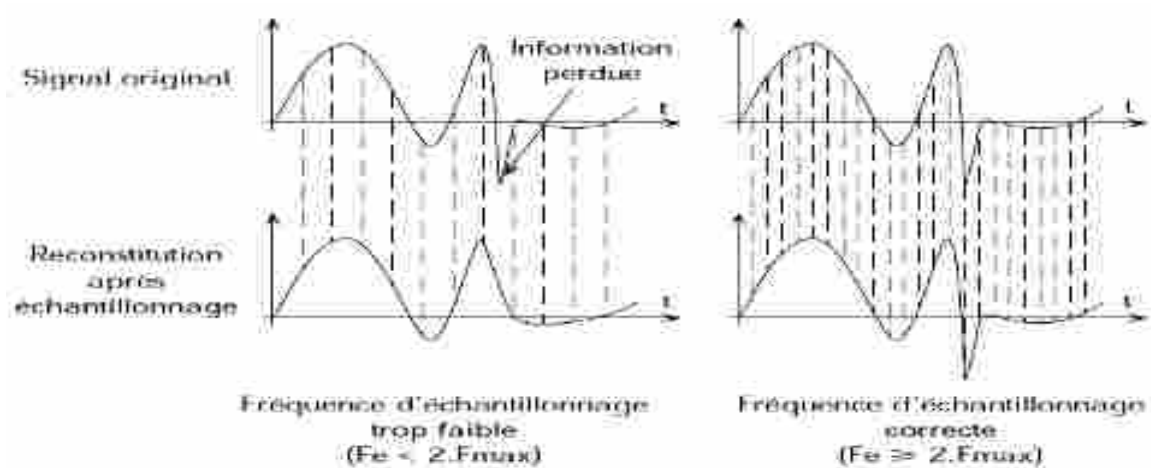
Les principales phases de la conversion analogique/numérique



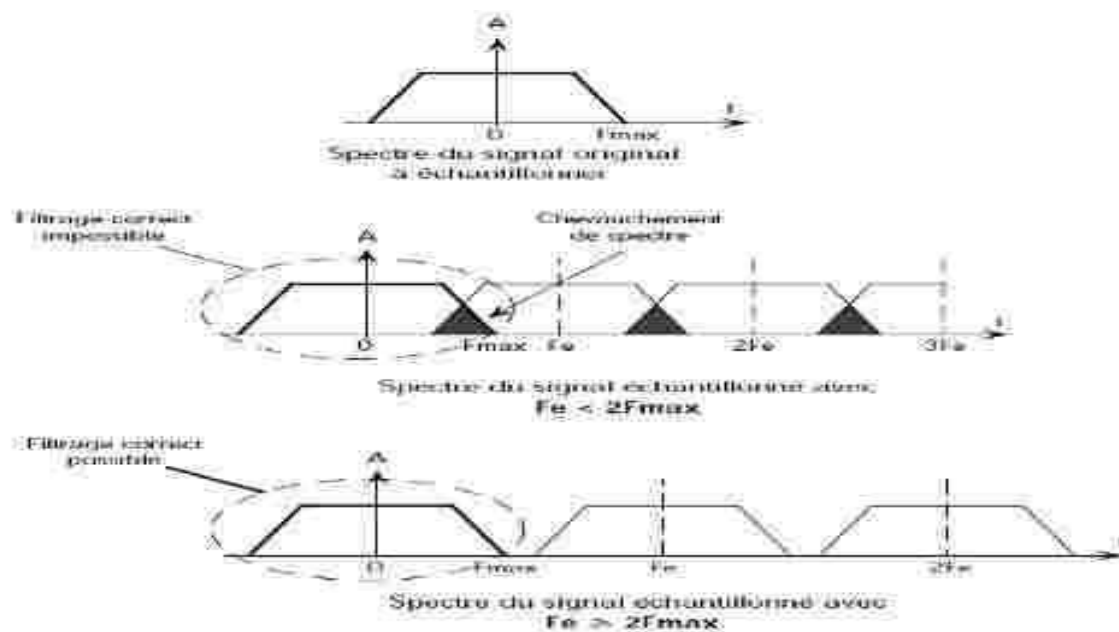
Principe d'échantillonnage

❖ Les principales phases de la conversion analogique/numérique

- Pour numériser un signal analogique de bande passante F_{max} , il faut tout d'abord l'échantillonner avec une fréquence d'échantillonnage F_e 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).
- Si la fréquence d'échantillonnage est trop faible, les variations rapides du signal original ne sont pas représentées par la suite d'échantillons élevés.



- Pour que les répétitions spectrales soient disjointes, il faut que $F_e > 2F_{max}$. Le signal initial peut alors être reconstitué par un filtrage passe-bas supprimant, sur le signal échantillonné, toutes les fréquences supérieures à F_{max} .



2.3. Numérisation des signaux vidéo

2.3.1. Fréquence d'échantillonnage du signal vidéo

o Luminance

- Dans le cas d'un signal vidéo, dont la bande passante est de 6MHz environ, le CCIR (Comité Consultatif International des Radiocommunications) préconise une fréquence d'échantillonnage de **13,5 MHz**.

➤ La compatibilité à l'échelle mondiale impose par ailleurs de choisir une valeur qui soit un multiple commun des fréquences lignes des systèmes à 625 et 525 lignes :

- $864 \times 625 \times 25 \approx 13.5 \times 10^6$ (PAL)
- $858 \times 525 \times 30 \approx 13.5 \times 10^6$ (NTSC)

fréquence ligne

Dans les deux cas, une ligne active numérique renferme 720 échantillons de luminance.

o Chrominance

- Les signaux de différence de couleurs ont une bande passante nominale plate jusqu'à 2,75 MHz, avec un affaiblissement d'au moins 12 dB à 3,375 MHz.

- Les composantes de chrominance sont échantillonnées à une fréquence deux fois plus faible que le signal de luminance :

$$F_c (Cr) = F_c (Cb) = 6,75 \text{ MHz}$$

Cette valeur est égale à 432 fois la fréquence ligne des systèmes à 625 lignes et à 429 fois celle des systèmes à 525 lignes.

Sur une ligne, il y a donc deux fois moins d'échantillons de chrominance que de luminance, soit 360 par ligne active.

- Note :

$$Y = 0,30R + 0,59V + 0,11B$$

$$Cb = 0,564(B - Y)$$

$$Cr = 0,713(R - Y)$$

○ Résolution

La résolution minimum pour la quantification d'un signal vidéo avec une qualité suffisante pour sa diffusion vers un terminal de visualisation est de 8bits.

Ceci donne un débit minimum de $13,5 \times 8 = 108 \text{ Mb/sec}$

Le rapport signal à bruit de quantification est en effet : 6dB par bit de quantification, soit environ 48dB

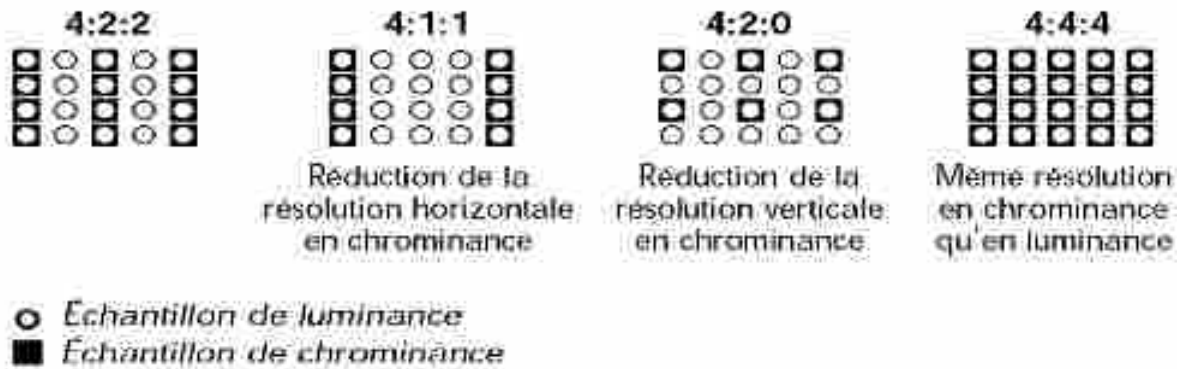
Numérisation d'un signal vidéo

2.4. Formats des vidéos numériques

La norme 4:2:2

La plus faible sensibilité de l'œil humain à la couleur qu'à la luminosité autorise de prélever deux fois moins d'échantillons de chrominance que d'échantillons de luminance (4 échantillons Y pour 2 échantillons pour C_b et 2 échantillons pour C_r). La luminance est échantillonnée à 13,5 MHz, les composantes de couleurs sont échantillonnées à 6,75 MHz.

- Destinée aux applications de studio,
- Utilisé dans l'ensemble des équipements numériques, et par les formats d'enregistrement haut de gamme.

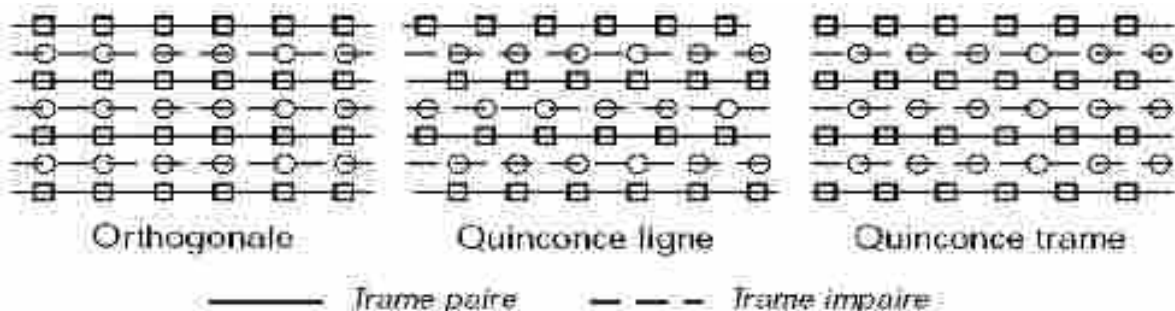


🎨 Formats des vidéos numériques

- **4:2:2:4** C'est un codage 4:2:2 incluant un signal de découpe échantillonné à 13,5 MHz.
- **4:1:1** La luminance est échantillonnée à 13,5 MHz, les composantes de couleurs sont échantillonnées à une fréquence quatre fois plus faible, soit 3,375 MHz. Il est notamment utilisé par le format d'enregistrement DVCPRO25.
- **4:2:0** La luminance est échantillonné à 13,5 MHz, les composantes de couleurs sont échantillonnées à 6,75 MHz, mais alternativement une ligne sur deux. Il est utilisé par les systèmes de diffusion numérique, le DVD, ainsi que par le DV et le DVCAM (en 625/50).
- **4:4:4** Toutes les composantes sont échantillonnées à la même fréquence de 13,5 MHz, sur toutes les lignes. Il est utilisé par les stations informatiques de retouche et de compositing.
- **4:4:4:4** C'est un codage 4:4:4 incluant un signal de découpe échantillonné à 13,5 MHz.

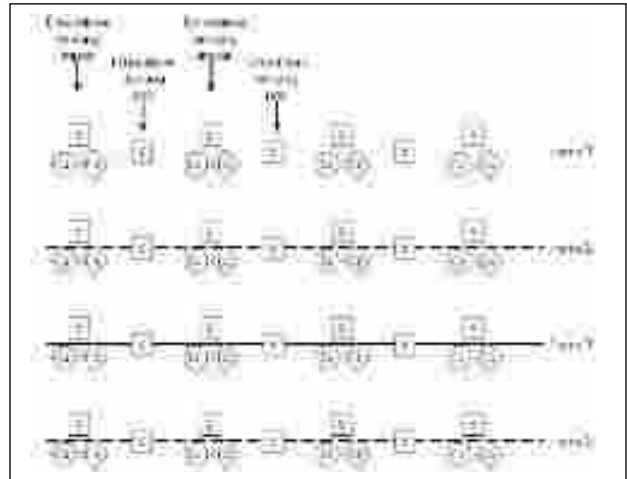
🎨 Choix de la structure d'échantillonnage

On appelle structure d'échantillonnage, la répartition des échantillons dans le temps et l'espace.



La structure orthogonale :

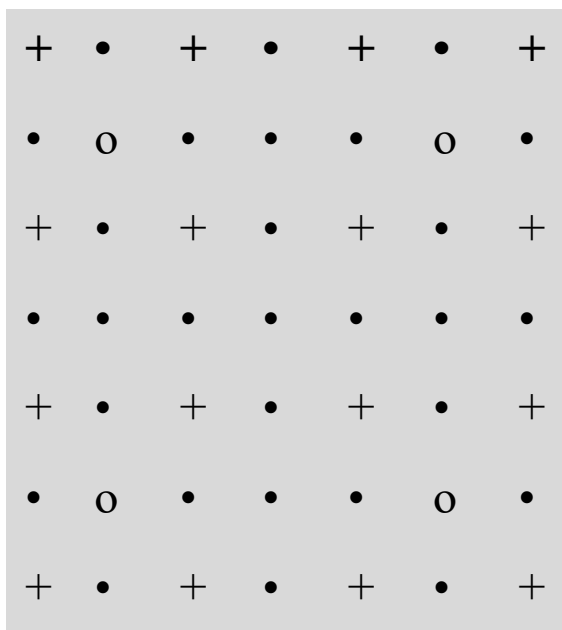
Sur une image 4:2:2, les échantillons de différence de couleurs Cr et Cb coïncident avec les emplacements impairs des échantillons de luminance sur chaque ligne.



Les formats 4:2:0 SIF, CIF, et QCIF (Quart de CIF)

✓ Le format SIF

- Il a une résolution luminance de 360×240 à une fréquence image de 29,97 Hz ou 360×288 à 25 Hz selon le standard d'origine (525 ou 625 lignes).
- En luminance, il est obtenu en supprimant une trame sur deux (plus d'entrelacement) et en effectuant un filtrage horizontal réduisant d'un facteur 2 le nombre d'échantillons par ligne.
- En chrominance, on effectue à partir de la trame d'origine un filtrage à la fois horizontal et vertical, ce qui donne une résolution de 180×144 ou 180×120 selon le standard.



- + Luminance
- O Chrominance
- Echantillons supprimés

✓ **Le format CIF (Common Intermediate Format)**

- Il est un compromis entre les formats SIF Européen et Américain, défini pour servir de base aux applications de visiophonie;
- Il reprend la résolution spatiale dérivée du 625 lignes (360×288) et la résolution temporelle du 525 lignes (29.97Hz).

✓ **Le format QCIF (Quart de CIF)**

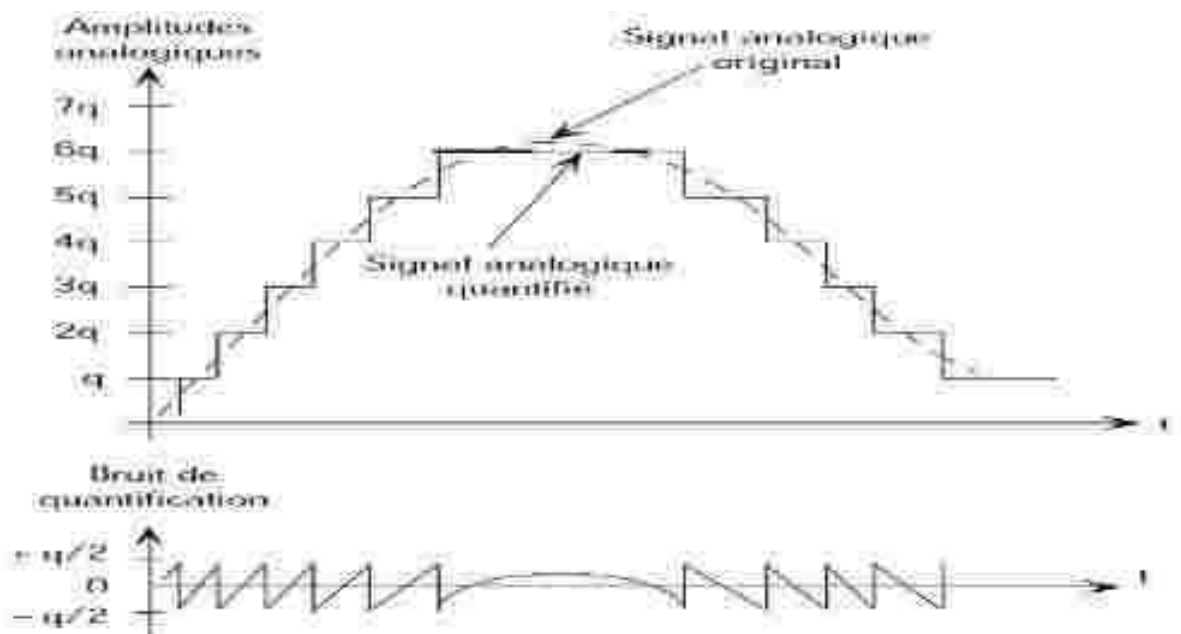
- Il est divisé encore cette résolution par 4 (deux selon chaque axe), en luminance comme en chrominance ;
- Utilisé comme base pour la compression H261 dans les applications de type visiophone ou vidéo conférence RNIS.
- La résolution temporelle est également divisée par deux ou quatre (fréquence de rafraîchissement d'image de 15 ou 7,5Hz pour le visiophone).

2.5. Quantification

- La quantification du signal vidéo

En télévision, le rapport S/B d'un signal numérique est approché par la relation :

$$6R+10 \text{ dB}$$

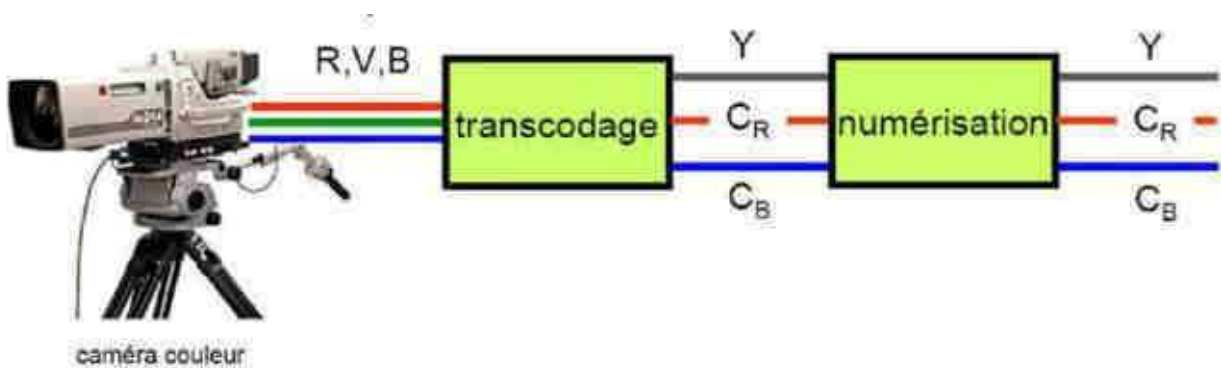


- La norme 4:2:2 spécifiait une quantification sur 8 bits des composantes du signal vidéo.

- Une quantification sur 8 bits permet de disposer de 256 niveaux numériques, dont 220 utiles pour représenter les niveaux de gris ce qui donne un rapport S/B de 58 dB : Cela insuffisant pour les applications de production et de postproduction haut de gamme !!!
 - Avec une extension à 10bits, on dispose alors de 1024 niveaux, dont 880 utiles. Le rapport S/B passe à 70dB.
- Quantification sur le signal de luminance et sur les signaux de différence de couleurs.

Le format de base pour l'image numérique est le 4:2:2, caractérisé par :

- Signal de luminance $Y(t)$ échantillonné à 13,5 MHz ($F_{max} = 6,5$ MHz)
- Signaux de chrominance $C_r(t)$ et $C_b(t)$ échantillonnés à 6,75 MHz ($F_{max} = 3,25$ MHz)
- Échantillons codés sur 10 bits,



On peut ainsi calculer le débit nécessaire à véhiculer une image complète :

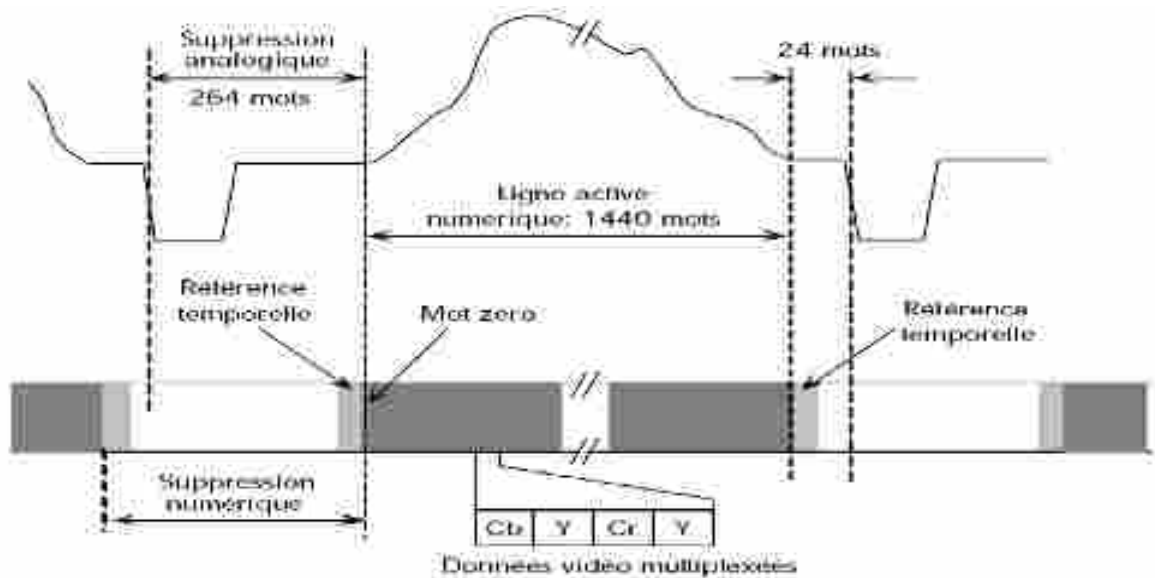
$$(13,5 + 6,75 + 6,75) * 10 = 270 \text{ Mbits/s}$$

Ou 216 Mbits/s si on ne code que sur 8 bits. **Très important !!!**

2.6. La trame et ligne vidéo numérique

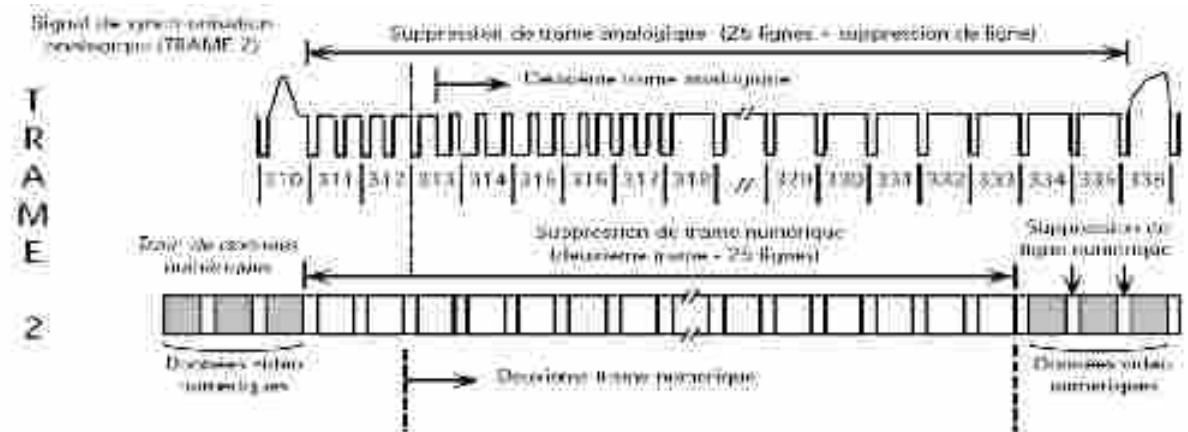
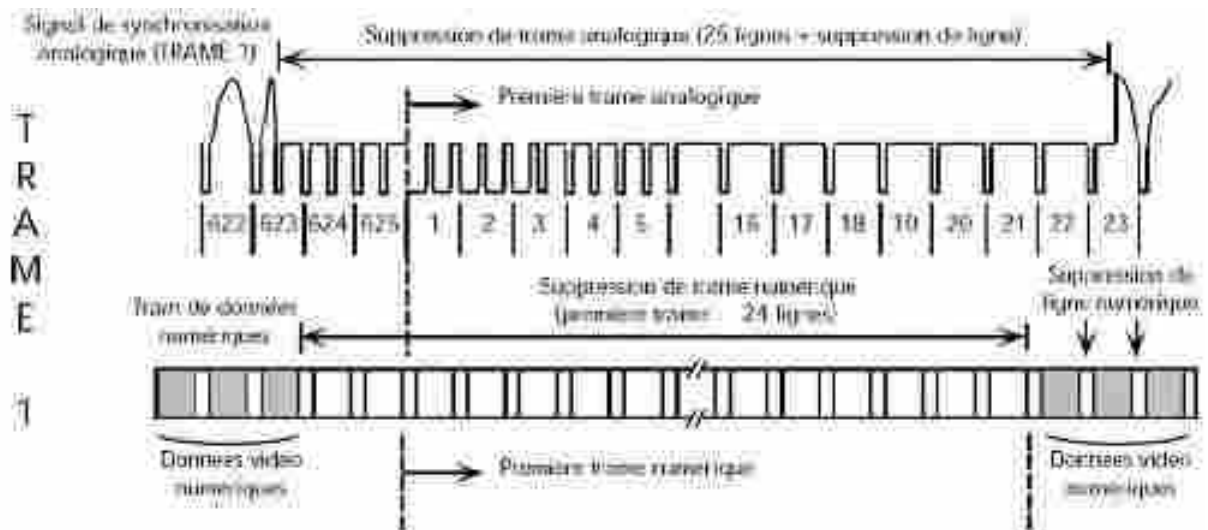
o La ligne vidéo numérique

- Une ligne active numérique renferme donc un total de 1 440 échantillons :
- 720 échantillons pour le signal de luminance
- 360 échantillons pour chaque signal de différence de couleurs.
- La référence des temps pour l'opération de conversion analogique-numérique est donnée par le front avant des impulsions de synchronisation ligne à mi-amplitude ; c'est donc à cet instant qu'apparaît le premier échantillon.



Relation temporelle entre la ligne vidéo analogique et la ligne vidéo numérique.

- o La trame vidéo numérique



- En 625/50, chaque trame active renferme ainsi un nombre entier de lignes complètes, et une image est constituée de 576 lignes utiles.
- La suppression trame numérique s'étend sur 24 lignes dans la première trame et sur 25 lignes

dans la deuxième trame.

- Trois lignes de suppression sur chaque trame sont réservées au transport de données auxiliaires, qui bénéficient ainsi d'un débit de 1,7 Mbits/s.

2.7. La norme 4:2:2

| | 625/50 | 525/60 |
|---|--|------------|
| Signaux à coder | Y, (R-Y), (B-Y) corrigés en gamma | |
| Fréquences d'échantillonnage Luminance Différence de couleurs | 13,5 MHz 6,75 MHz | |
| Bandes passantes : Luminance Différence de couleurs | 5,75 MHz 2,75 MHz | |
| Nombre d'échantillons par ligne complète Luminance Différence de couleurs | 864 432 | 858 429 |
| Nombre d'échantillons utiles par ligne Luminance Y Différence de couleurs | 720 360 | |
| Structure d'échantillonnage | Orthogonale. | |
| Quantification (8 bits) | 256 niveaux dont : 220 utiles pour Y, 225 pour Cr, Cb | |
| Quantification (10 bits) | 1 024 niveaux dont : 880 utiles pour Y, 900 pour Cr, Cb | |

Les principaux paramètres de la norme 4:2:2

| | Signal utile 720 × 576 | | Signal complet 864 × 625 | |
|-----------------------|---------------------------|-------------|-----------------------------|-------------|
| | 8 bits | 10bits | 8 bits | 10bits |
| Signal 4:2:2 | 166 Mbits/s | 207 Mbits/s | 216 Mbits/s | 270 Mbits/s |
| Signal 4:2:0 ou 4:1:1 | 124Mbits/s | | 162 Mbits/s | |

Les débits du signal vidéo

2.8. Standards et définitions de vidéo numérique

✓ La définition standard (SD, Standard Definition)

Définition standard utilisé dans la transmission numérique de la vidéo avec une résolution de 480 (NTSC) ou 576 (PAL).

Résolutions :

720 × 480, 704 × 480, 352 × 480, 352 × 240 pixels (NTSC)

720 × 576, 704 × 576, 352 × 576, 352 × 288 pixels (PAL)

En télévision on parle de la **SDTV**.

✓ La Haute Définition (HD, High Definition)

Désigne une classification d'équipements, appareils, normes de télédiffusion et vidéo. Elle est généralement associée au format d'image « large » ou 16/9.

Il représente une évolution de la qualification de définition « standard », SD (Standard Definition) ou SDTV.

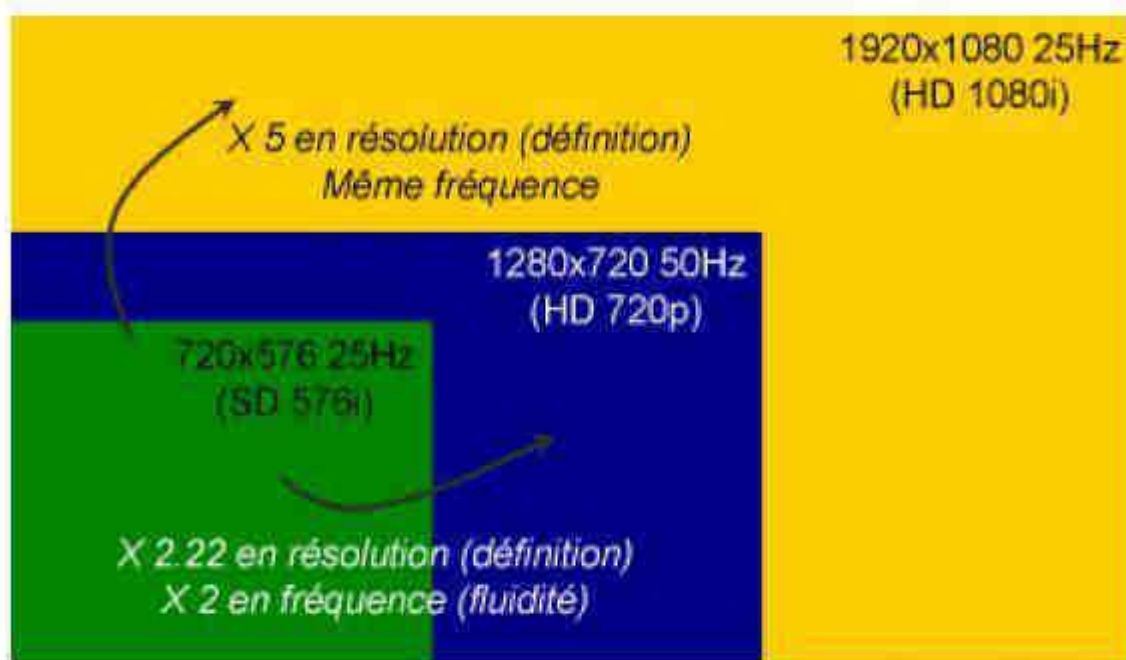
Le terme HD s'étend à l'ensemble des technologies audiovisuelles numériques tels que HDV (grand public), HDCam (professionnel), télévision à haute définition (DVB-T, DVB-S, DVB-C, *DSL TV*...) ainsi que les supports Blu-ray Disc, HD DVD, l'enregistrement multimédias sur disque dur ainsi notamment qu'au stockage de données informatiques.

❖ HD ready

On parle de HD dès que le format dépasse 720 pixels de large. On trouve les résolution :

720p : 1280 X 720 à 50 et 60 Hz en progressif (environ 0,9 mégapixels pour une image)

1080i : 1920 X 1080 à 50 et 60 Hz en entrelacé (environ 2 mégapixels pour une image).



❖ Full HD

Le nom commercial pour la première fois inventé par Sony en 2007.

1080p: 1920×1080p (environ 2 mégapixels pour une image)

2K

2K : 2048 x 1080 pixels (environ)

Utilisée dans les projecteurs (cinéma numérique)

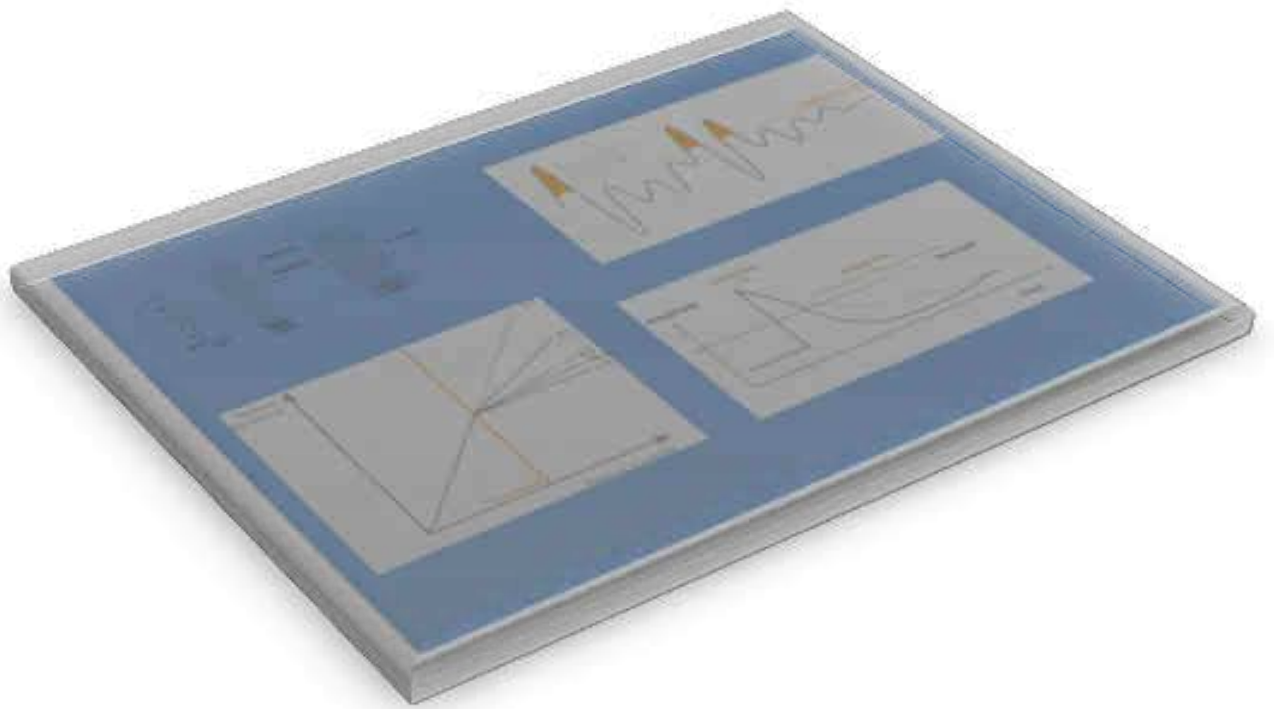
4K

3840 × 2160 pixels (télévision **UHD** : Ultra Haute Définition) ;

4096 × 2160 pixels (cinéma numérique)

CHAPITRE 3

LES TECHNIQUES DE COMPRESSION VIDÉO ET AUDIO



3.1 Introduction

Le format 4:2:2 nécessite un débit de l'ordre de 200Mb/s , donc, diffuser un signal vidéo vers un utilisateur final nécessite une bande passante au moins égale à 5 ou 6 fois celle occupée par un signal analogique PAL ou SECAM :

- Avec une technique de modulation 64-QAM (adaptée au transport sur câble, avec des symboles de 6bits) environ 40MHz seraient nécessaires ;
- Avec une modulation QPSK (adaptée au satellite, avec des symboles de 2bits), c'est une largeur d'environ 135 MHz qui serait occupée !!!!

C'est là qu'apparaît la compression, ou "codage source", étape qui vise à réduire le débit numérique à une valeur aussi faible que possible, mais compatible avec une dégradation pratiquement imperceptible du rendu de l'image télévisée en mouvement et du son associé.

3.2 Redondance spatiale et redondance temporelle

Redondances spatiales

- Exploiter la redondance spatiale présente dans toute image naturelle : pixels voisins souvent identiques ;
- Cette redondance existe dans chaque image de la séquence ;
- Exploiter le fait que l'œil est moins sensible aux détails.
 - **Compression intra-image**

Redondances temporelles

- Exploiter la redondance temporelle présente dans toute la séquence vidéo ;
- Cette redondance est souvent très importante entre 2 images consécutives ;
- Exploiter le fait que l'œil est moins sensible après un changement de scène.
 - **Compression inter-image**

3.3 Compression intra-image

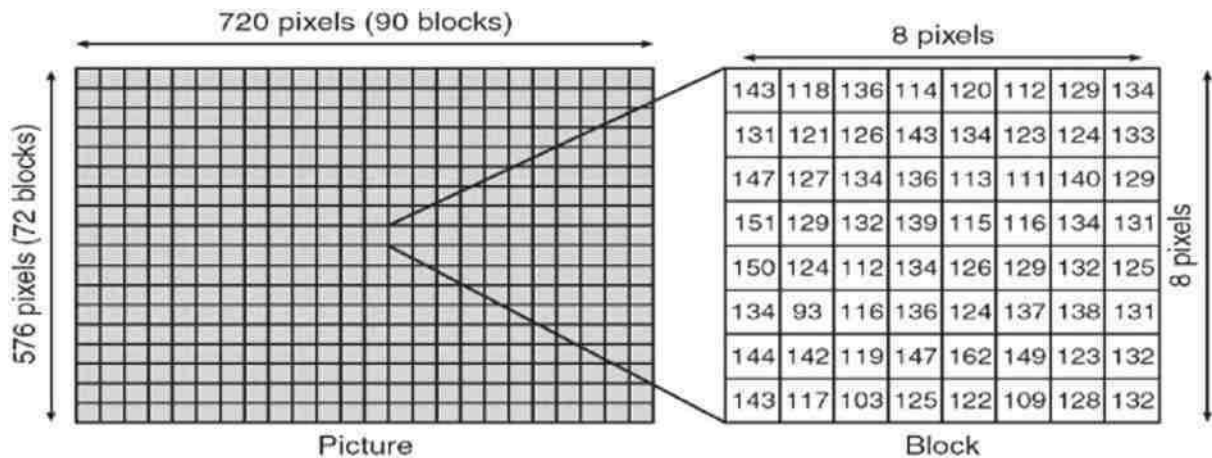
✓ La méthode JPEG

Pour réduire le nombre de bits nécessaire au codage d'images fixes, ou redondances spatiales, on applique alors la compression JPEG (Joint Photographic Expert Group).

JPEG se décompose en 6 étapes :

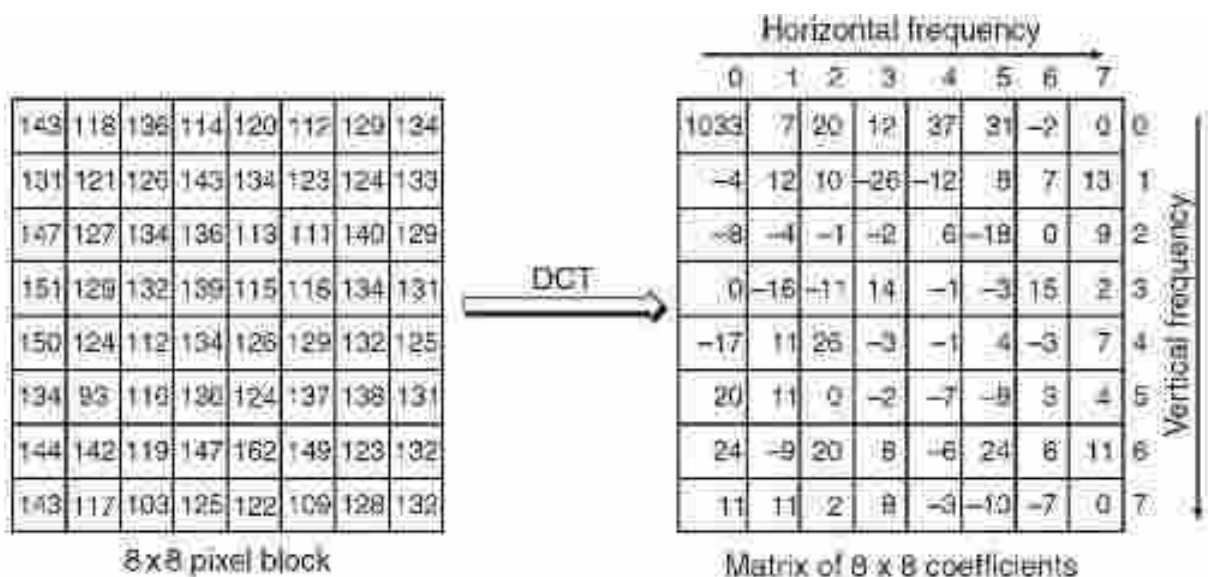
1. Décomposition en blocs

- L'image d'origine sous forme YCbCr est découpée en blocs élémentaires de 8×8 pixels. Chacun de ces blocs forme une matrice de 64 nombres :
 - 🎨 De 0 à 255 (résultat de numérisation sur 8bits) pour la luminance ;
 - 🎨 De -128 à 127 pour les composantes de Cb et Cr.
- Au format 4:2:2, une image de 720×576 contient 6480 blocs de luminance et 3240 blocs de chrominance.



2. Transformation DCT

- Cette transformée est appliquée à chacun des blocs (Y, Cb, Cr) .
- Cela produit des blocs de coefficients de composantes de fréquences spatiales de plus en plus élevées au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'origine (en haut à gauche) qui représente la composante continue (luminance moyenne) du bloc.



Transformation d'un bloc de 8×8 pixels à une matrice de 8×8 coefficients utilisant the DCT

3. Seuillage et quantification

- Cette étape tient compte des particularités de la vision humaine (l'œil ne distingue pas les détails fins au-dessous d'un certain niveau de luminance)
- Elle consiste à mettre à 0 les coefficients inférieurs à une valeur prédéterminée et à coder les coefficients restants avec une précision décroissante quand la fréquence augmente.
- A la différence des 63 autres (AC), le coefficient de fréquence nulle (DC) est codé en DPCM (Codage différentiel par rapport au bloc précédent) ce qui permet d'augmenter la précision de quantification à un nombre de bits donné.

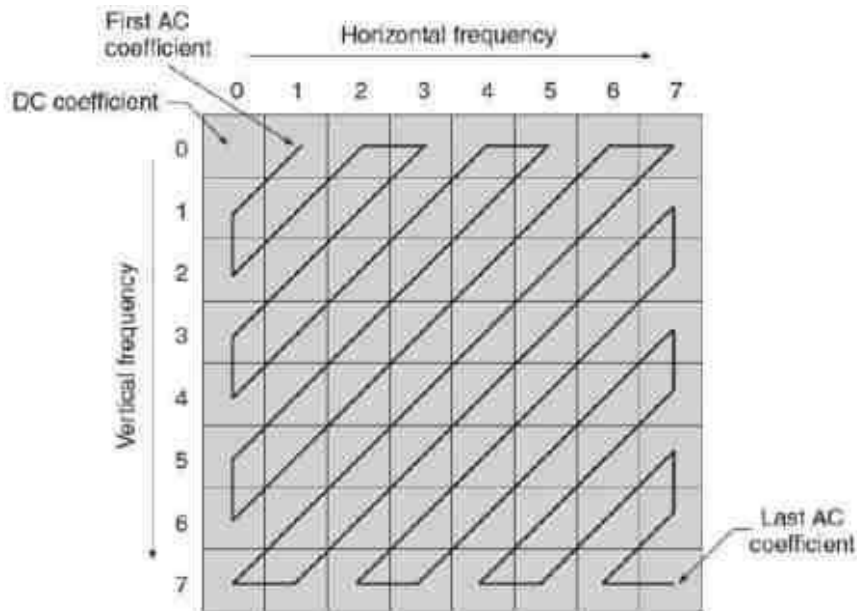
| | | | | | | | |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|
| 1033 | 7 | 20 | 12 | 37 | 31 | -2 | 0 |
| -4 | 12 | 10 | -26 | -12 | 8 | 7 | 13 |
| -8 | -4 | -1 | -2 | 6 | -18 | 0 | 9 |
| 0 | -16 | -11 | 14 | -1 | -3 | 15 | 2 |
| -17 | 11 | 26 | -3 | -1 | 4 | -3 | 7 |
| 20 | 11 | 0 | -2 | -7 | -8 | 3 | 4 |
| 24 | -9 | 20 | 8 | -6 | 24 | 6 | 11 |
| 11 | 11 | 2 | 8 | -3 | -10 | -7 | 0 |

Thresholding
+ quantization
→

| | | | | | | | |
|-----|----|---|----|----|----|---|---|
| 129 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | -1 | -1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -1 | 0 | 0 |
| 0 | -1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| -1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| -1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

4. Lecture en zigzag

- A l'exception du coefficient DC traité séparément, les 63 coefficients AC sont lus en zigzag pour transformer la matrice en flots de données série adapté aux prochaines étapes du processus (codage RLC et VLC).
- 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.



Im

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|---|---|---|----|---|---|---|---|---|----|----|----|----|---|----|
| 129 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | -1 | -1 | -1 | 2 | 1 | -1 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | -1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -1 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Coefficients du bloc DCT 8 × 8 précédent lus en zigzag

5. Codage RLC (Run Length Coding)

- Cette étape permet de profiter au maximum des suites de coefficients nuls fournis par la quantification et la lecture en zigzag,
- On code le nombre d'occurrences des coefficients nuls et la valeur du prochain non nul, ce qui réduit le nombre de données à transmettre.

| | | | | | | | | | |
|------|-----|------|-----|-----|------|------|------|------|-------|
| 0/1 | 2/1 | 0/1 | 0/1 | 0/1 | 2/-1 | 0/-1 | 0/-1 | 0/2 | 0/1 |
| 0/-1 | 3/1 | 0/-1 | 1/1 | 0/1 | 0/1 | 5/-1 | 6/1 | 18/1 | 7/EOF |

6. Codage entropique de Huffman (VLC)

- Cette dernière consiste à coder les coefficients avec une longueur d'autant plus courte qu'ils sont plus fréquents statistiquement (codage entropique)

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

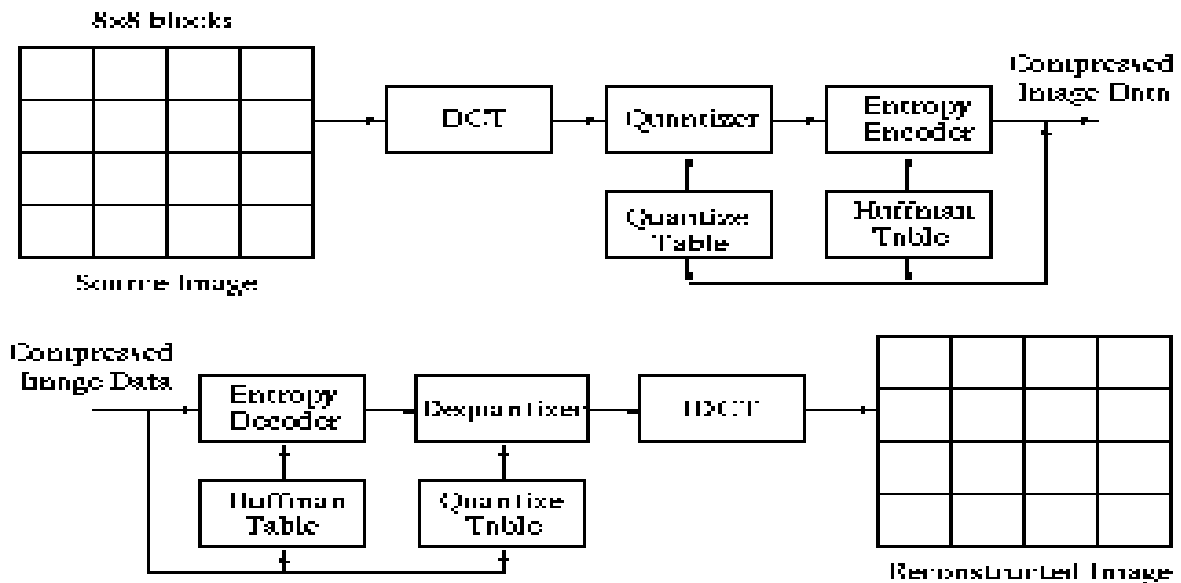


Schéma du codage JPEG

Compression MPEG

- Outre la redondance spatiale d'une image fixe utilisée dans le codage JPEG, le codage des images animées permet en effet d'exploiter la forte redondance temporelle des images successives qui constituent une séquence vidéo.
- C'est le principe du codage vidéo du MPEG 1 (Motion Pictures Experts Group) publié en 1993.

"Ne jamais transmettre un élément d'image déjà transmis"

- Le but principal était d'atteindre un débit constant total de 1,5 Mb/sec (débit d'un CDROM simple vitesse) dont 1,15 pour la partie vidéo et 0,35Mb/s restants étant utilisés pour le son (stéréo) et des données auxiliaires.
- MPEG utilise la prédiction avec compensation de mouvement pour réduire la forte corrélation temporelle entre images successives.

Compression MPEG

- Le format de départ des images sera donc le SIF (360×288@25Hz ou 360×240@30Hz).
- Les images sont accompagnées d'un son stéréophonique haute-fidélité similaire à la norme MUSICAM.
- Elle se compose de trois parties distinctes :

- MPEG system (ISO/IEC 11172-1): définit la structure du multiplexage MPEG1
- MPEG vidéo (ISO/IEC 11172-2): définit le codage vidéo MPEG1.
- MPEG audio (ISO/IEC 11172-3): définit le codage audio MPEG1.

Types d'images

MPEG définit 3 types d'images :

- **Les images I (intra)** : sont codées indépendamment d'autres images, comme en JPEG, et sont de ce fait le point d'entrée obligatoire lors de l'accès à une séquence.
- **Les images P (prédites)** : sont codées par rapport à l'image de type I ou P précédente, grâce aux techniques de prédiction avec compensation de mouvement. Le taux de compression d'une image du type P est plus important que celui d'une image de type I.
- **Les images B (Bidirectionnelles)** : sont codées par interpolation entre les deux images de type I ou P précédente et suivante qui les encadrent.

Comme elles ne sont pas utilisées pour définir d'autres images, les images B ne propagent pas donc d'erreurs de codage.

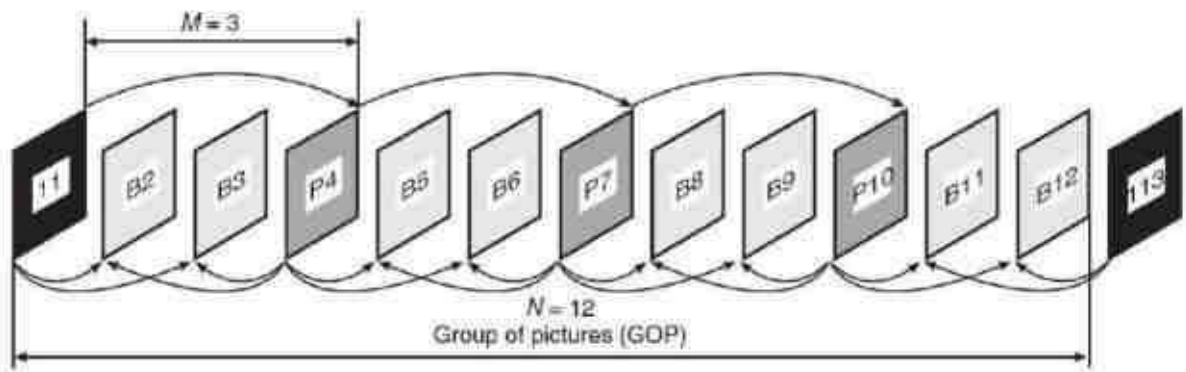
C'est le type d'images qui offre le taux de compression le plus élevé.

Deux paramètres définissent la manière dont les images I, P, et B s'enchaînent :

Types d'images

- Deux paramètres définissent la manière dont les images I, P, et B s'enchaînent:
 - **M** est la distance (en nombre d'images) entre deux images P successives;
 - **N** est la distance entre deux images I successives.
- Pour atteindre un débit vidéo de 1.15Mb/sec avec une qualité satisfaisante tout en gardant une résolution d'accès aléatoire acceptable (<0,5sec), les paramètres les plus couramment employés sont M=3 et N=12.
- Une séquence vidéo est composée de 1/12 (8,33%) d'images I, de 1/4 (0,25) d'images P, et 2/3 (66,66%) d'images B:

Le taux de compression global est favorisé par le fait que ce sont les images les plus fréquentes qui ont le taux de compression le plus élevé.



Types d'images

- Le mode de codage des images successives se traduit par la correspondance numéro (type d'image) ci-dessous:

1(I) 2(B) 3(B) 4(P) 5(B) 6(B) 7(P) 8(B) 9(B) 10(P) 11(B) 12(B) 13(I)

- Cependant, pour coder et décoder une image B, le codeur et décodeur auront besoin de l'image I ou P qui la précède ou de l'image P ou I qui la suit.
- L'ordre des images sera donc modifié avant le codage de sorte que codeur et décodeur, disposent, avant les images B, des images I et/ ou P nécessaires à leurs traitement, soit:

1(I) 4(P) 2(B) 3(B) 7(P) 5(B) 6(B) 10(P) 8(B) 9(B) 13(I) 11(B) 12(B)

Types d'images

- Le mode de codage des images successives se traduit par la correspondance numéro (type d'image) ci-dessous:

1(I) 2(B) 3(B) 4(P) 5(B) 6(B) 7(P) 8(B) 9(B) 10(P) 11(B) 12(B) 13(I)

- Cependant, pour coder et décoder une image B, le codeur et décodeur auront besoin de l'image I ou P qui la précède ou de l'image P ou I qui la suit.
- L'ordre des images sera donc modifié avant le codage de sorte que codeur et décodeur, disposent, avant les images B, des images I et/ ou P nécessaires à leurs traitement, soit:

1(I) 4(P) 2(B) 3(B) 7(P) 5(B) 6(B) 10(P) 8(B) 9(B) 13(I) 11(B) 12(B)

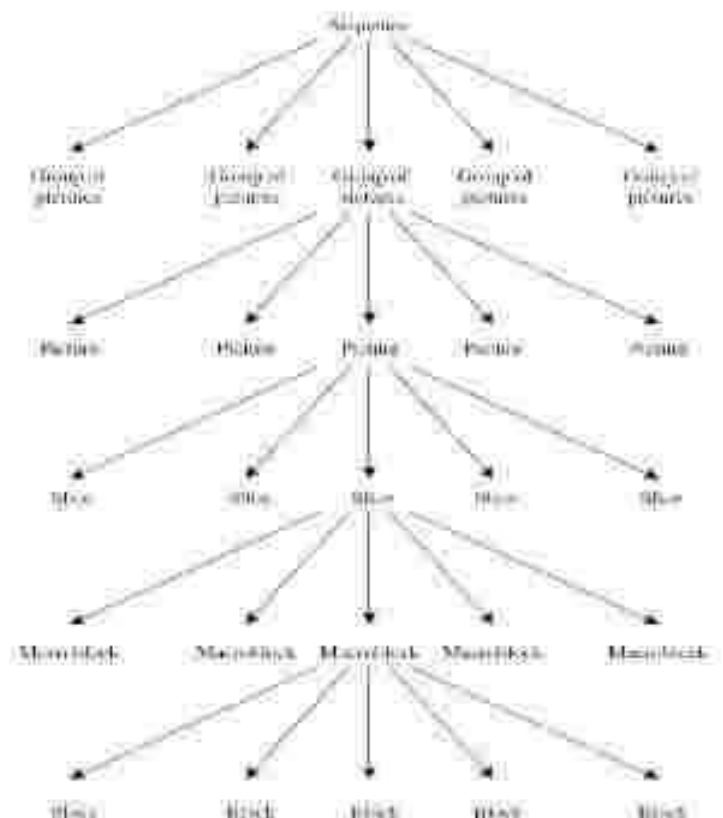
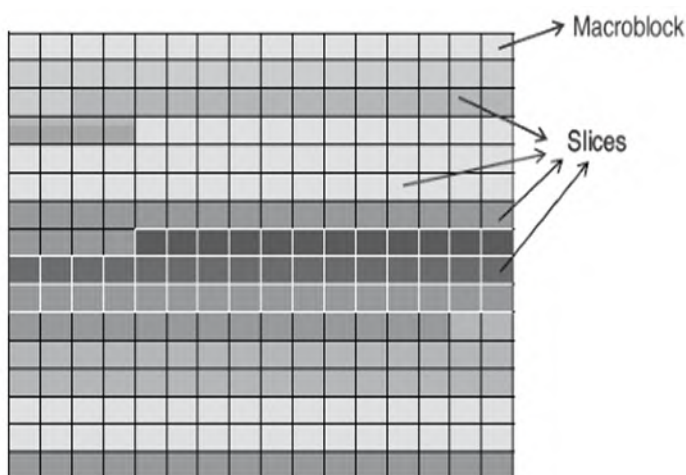
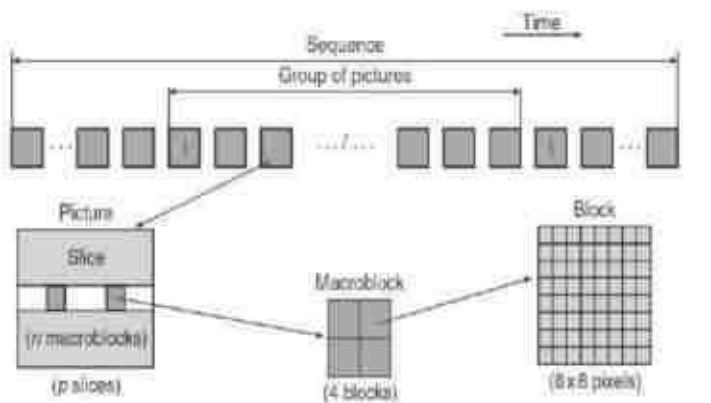
L'augmentation du taux de compression procuré par les images B se paie donc par un temps de codage/décodage plus long (durée de deux images), et une augmentation de la

taille mémoire nécessaire dans le codeur comme dans le décodeur (stockage d'une image supplémentaire).

Décomposition en couches d'images

MPEG définit également une hiérarchie de couches "layers" à l'intérieur d'une séquence d'images. On trouve en partant du niveau le plus haut :

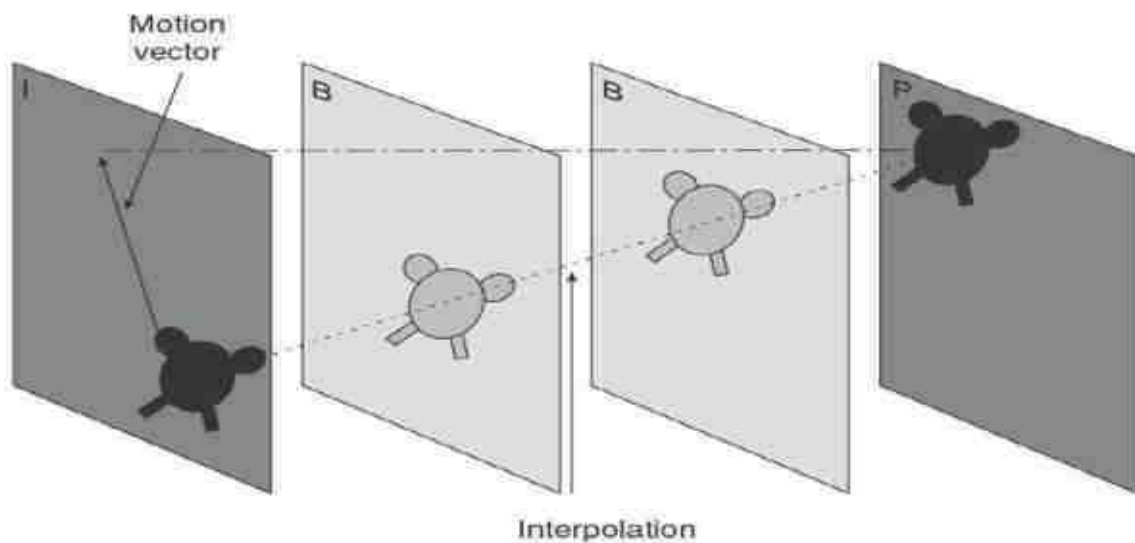
- **Séquence** : couche la plus élevée, elle détermine le contexte dans lequel cette séquence est définie (paramètres vidéo de base tels que la norme de balayage, etc.)
- **Groupe d'images (Groupe Of Pictures ou GOP)** : c'est la couche permettant d'accès aléatoire à la séquence, avec une première image de type I.
- **Image (Picture)** : de type I, P, ou B : c'est la couche d'affichage élémentaire ;
- **Tranche (slice)** : est définie comme une suite de macroblocs contigus ; l'ensemble des slices doit couvrir toute l'image, sans chevauchement entre elles.
- **Macrobloc (macrobloc)** : de taille 16×16 pixels (4 blocs de luminance et 2 blocs de chrominance $1 \times C_r$ et $1 \times C_b$, chacun de 8×8 pixels : c'est la couche où s'effectue la prédiction avec compensation de mouvement ;
- **Bloc (block)** : de taille 8×8 pixels ; c'est, comme en JPEG, la couche où s'effectue la DCT.



L'estimation et la compensation de mouvement

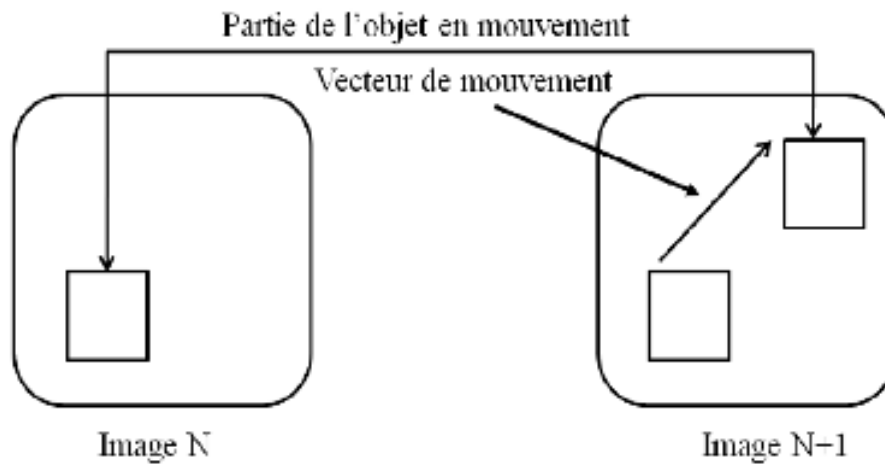
Entre deux images successives, les objets en mouvement entraînent une différence entre les zones correspondant au départ sur la première image et à l'arrivée sur la deuxième.

- L'estimation de mouvement consiste donc à trouver un vecteur assurant la correspondance entre une zone d'arrivée sur la 2^{ème} image et une zone de départ sur la première.



L'estimation et la compensation de mouvement

- Cette recherche se fait au niveau du macrobloc (16×16 pixels), en déplaçant à l'intérieur d'une fenêtre de recherche, un macrobloc de l'image en cours au voisinage de cette position dans l'image précédente de manière à trouver le plus ressemblant (*Block Matching*), ce qui donne un vecteur de mouvement qui s'appliquera à toutes les composantes du macrobloc (Y, C_b, C_r).
- Seuls les macroblocs différents d'une image à l'autre auront ainsi besoin d'être codés, d'où une réduction significative de la quantité d'information à transmettre.



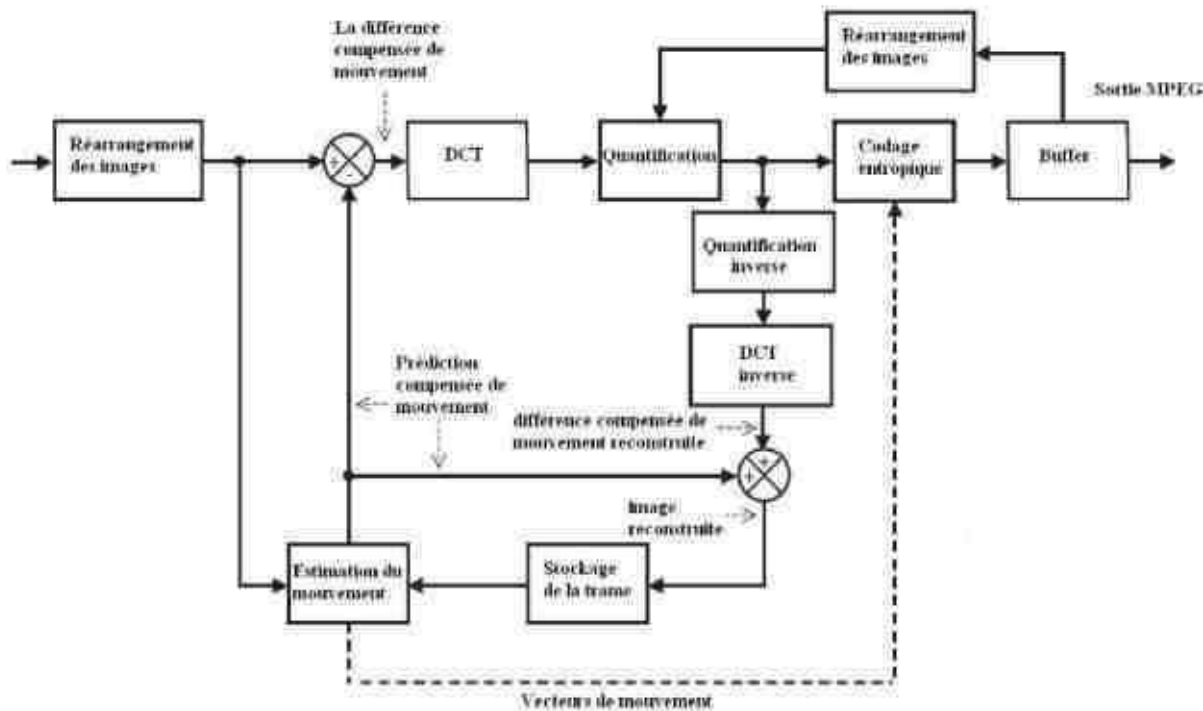
Actions :

- Calcul du vecteur de mouvement ;
- Déplacement des données de l'image N à l'aide du vecteur de mouvement pour construire l'image de prédiction N+1 ;
- Comparaison de l'image courante avec l'image de prédiction ;
- Emission du vecteur et de l'erreur de prédiction.

L'estimation et la compensation de mouvement

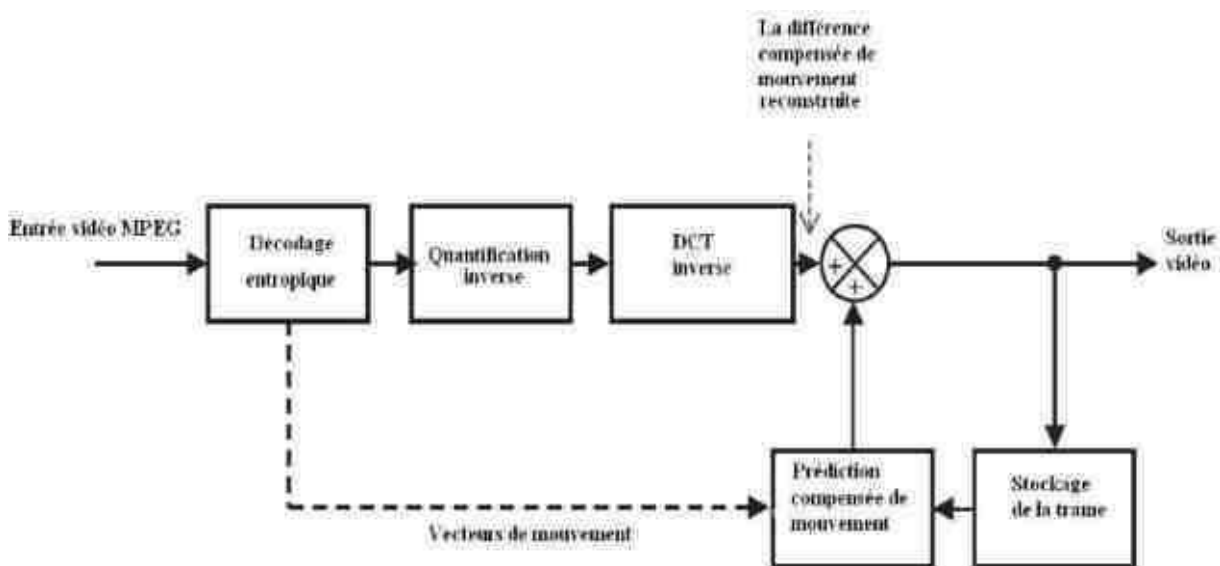
- Cette comparaison se faisant entre une image P et une image I ou deux images P.
- Pour les images B, les vecteurs intermédiaires sont obtenus par une interpolation qui tient compte de leur position temporelle entre les images I et/ou P.
- On calcule ensuite la différence entre le bloc à coder et le bloc que l'estimation de mouvement à trouver le plus proche, et cette différence est transmise après un codage similaire à celui des blocs des images I (DCT, quantification, VLC).
- Comme il y a généralement corrélation entre les vecteurs de mouvement associés à deux macroblocs contigus, d'où l'intérêt d'utiliser un codage DPCM pour transmettre ces vecteurs.

Codeur MPEG1 (partie codage)



Codeur hybride : exploitation des redondances spatiales et temporelles

Décodage MPEG1



Régulation de débit

- Pour réguler le débit en sortie du codeur, on utilise en fin de processus une mémoire tampon (FIFO) dont on surveille l'état de remplissage de manière à le maintenir entre certaines limites en jouant sur la résolution des coefficients de quantification, dont l'influence sur le débit est majeure.

- On peut maintenir un débit constant, avec une résolution qui variera en fonction du contenu de l'image (plus elle sera mouvementée, moins sera bonne sa résolution)

La norme MPEG2

Le codage vidéo MPEG2

MPEG-2 est une extension du standard MPEG-1. Il reprend tous les outils de compression en y ajoutant d'autres.

Comme MPEG 1, la norme se compose de 3 parties:

- MPEG 2 System (ISO/IEC 13818-1)
- MPEG 2 vidéo (ISO/IEC 13818-2)
- MPEG 2 audio (ISO/IEC 13818-3)

Profils et niveaux MPEG2

MPEG2 comporte 5 profils (*profiles*) qui déterminent le jeu d'outils de compression utilisé, donc le compromis entre taux de compression et coût du décodeur et 4 niveaux (*levels*) définissant la résolution de l'image, qui s'étage de la résolution SIF à la haute définition. Certaines combinaisons de profils et niveaux de peu d'intérêt ne seront pas utilisées.

- Le niveau *low* (bas) correspond à la résolution SIF utilisée en MPEG1;
- Le niveau *main* (principal) correspond à la résolution 4:2:0 "normale" (jusqu'à 720×576);
- Le niveau *high-1440* (haut-1440) est destiné à la TVHD (jusqu'à 1440×1152);
- Le niveau *high* (*haut*) est optimisé pour la TVHD (jusqu'à 1920×1152).

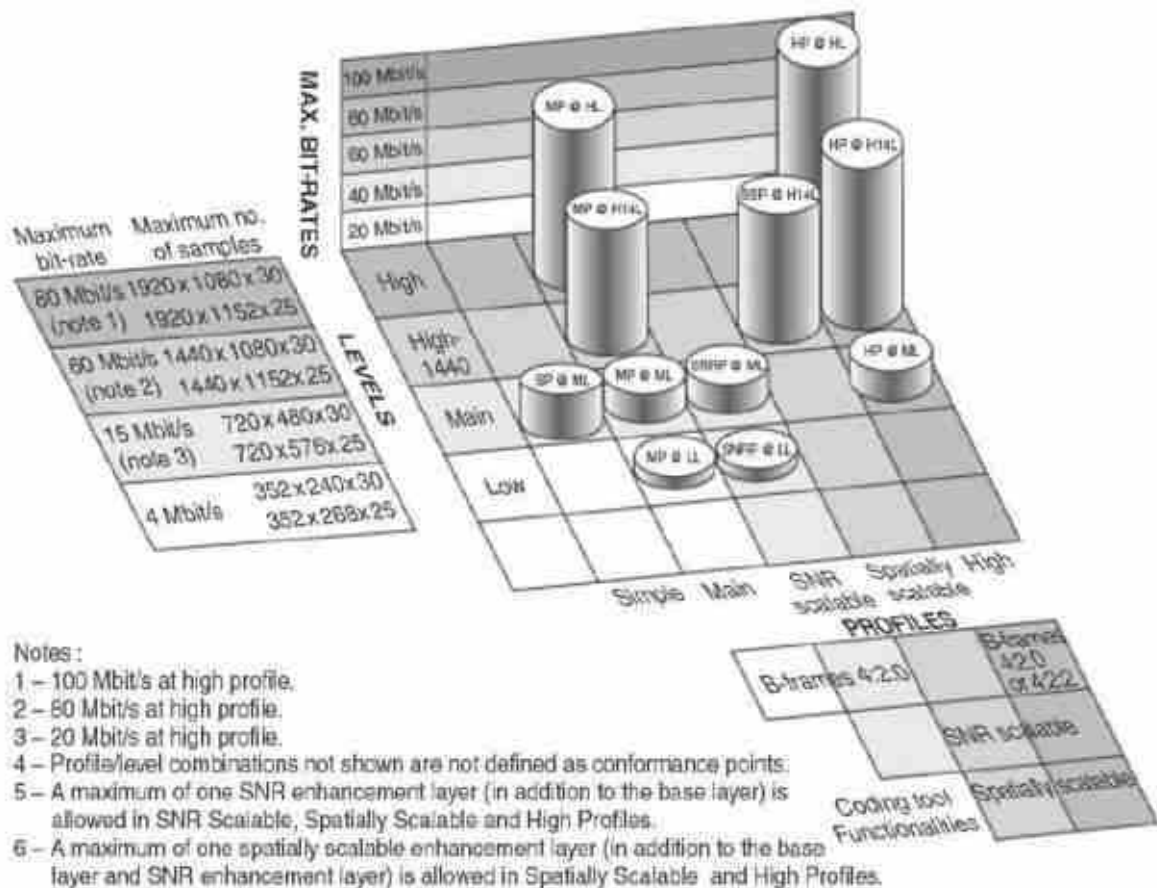
Profils

- **Le profil simple** est destiné à simplifier le codeur et le décodeur, au détriment du taux de compression, en n'utilisant pas de prédiction de type B (bidirectionnelle);
- **Le profil main** correspond actuellement au meilleur compromis qualité/taux de compression, en utilisant 3 types d'images (I, P, B), au prix d'un codeur et d'un décodeur plus complexes ;
- **Les profils scalable (codage hiérarchique)** sont prévus pour des utilisations ultérieures et permettront de transmettre une image de base (*base layer*) en termes de résolution spatiale (*spatially scalable profile*) ou de quantification (*SNR scalable profile*) ainsi que des informations supplémentaires séparées (*enhanced layer*) permettant d'améliorer ses caractéristiques.

- Le profil *high* est prévu pour des applications de télédiffusion HDTV (format 4:2:0 ou 4:2:2).

Il y a compatibilité ascendante entre les profils, et un décodeur d'un profil déterminé pourra décoder tous les profils inférieurs.

La norme MPEG2



- La combinaison la plus importante à court terme, car c'est celle retenue pour des applications de télédiffusion numérique grand public en Europe, est dite *main profile at main level* (MP@ ML).
- Elle correspond au codage d'images entrelacées au format 4:2:0, de résolution 720×480/30 Hz ou 720×576/25Hz avec une "boîte à outils" permettant le codage d'images de type I, P et B.
- Selon le compromis qualité/débit recherché et la nature des images, le débit sera compris entre 4Mb/s et 9Mb/s.
- Tout le processus de codage des images animées décrit pour MPEG1 s'applique à MPEG2.

- Une différence est à noter pour les slices : en MPEG2, elles ne couvrent pas nécessairement toute l'image, et elles doivent de plus se composer uniquement de macroblocs contigus situés sur la même ligne horizontale.

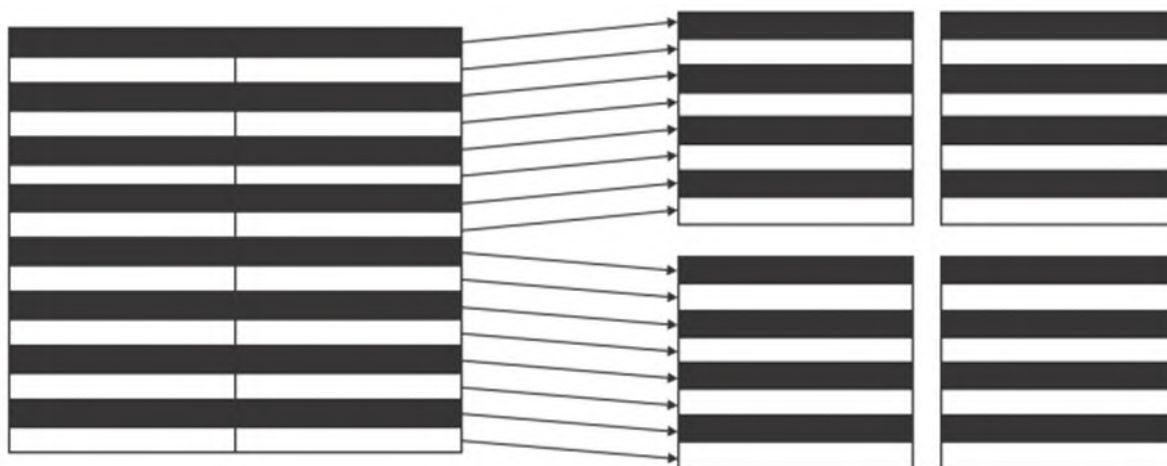
Modes de prédiction spécifiques à MPEG2

MPEG 2 permet de choisir entre deux structures d'images dites *frame* (structure image) ou *field* (structure trame) :

- **La structure image (appelée aussi "progressive")**

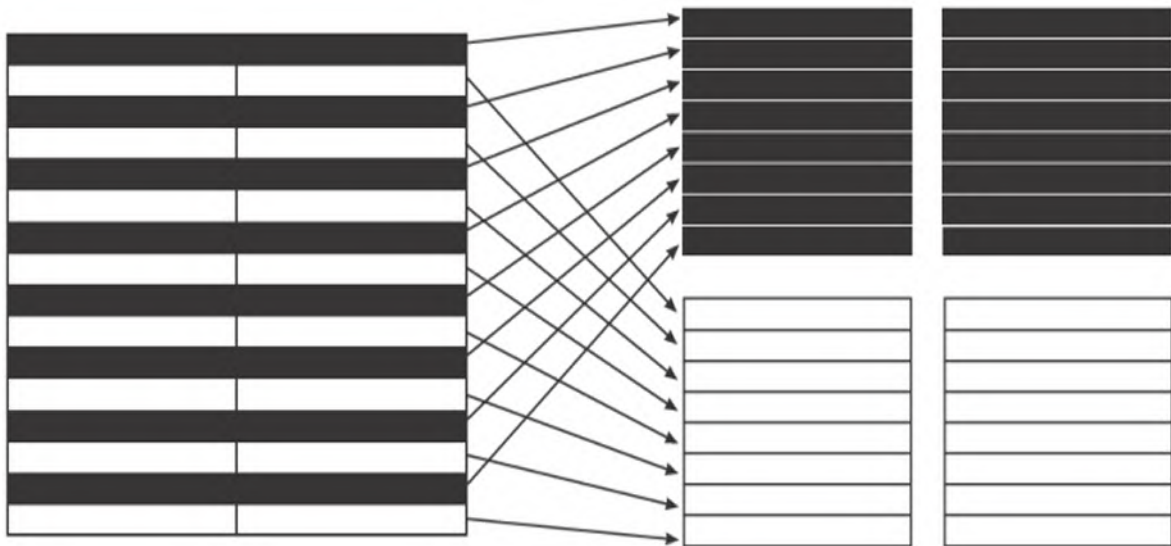
Elle est appropriée aux cas où il y a peu de mouvement entre deux trames successives. Les blocs et macroblocs sont découpés dans l'image complète, et la DCT s'effectue donc sur des points verticaux distants de 20ms dans le temps, ce qui ne pose pas de problème si les deux trames diffèrent peu.

Dans ce cas, il reste toutefois possible de coder les blocs les plus animés en mode inter-trame, c'est-à-dire en les découpant dans une trame.



- **La structure trame (appelée aussi « entrelacée »)**

Elle est préférable lorsque le mouvement est important d'une trame à l'autre: dans ce cas, afin d'éviter un contenu en fréquences verticales élevées qui réduirait l'efficacité de la compression après DCT, le découpage des macroblocs est fait en considérant chacune des trames comme une image indépendante à l'intérieur de laquelle sont pris les blocs.



Un macrobloc peut être prédit en mode *image*, *trame* ou *mixte*.

- Dans le **mode image**, un macrobloc formé dans la trame impaire sert à prédire un bloc correspondant dans la prochaine trame impaire, et de même pour les blocs de la trame paire, et la prédiction se fait donc sur une durée de 40ms (2trames)
- Dans le **mode trame**, la prédiction d'un bloc est effectuée à partir d'un bloc de la trame précédente, et les vecteurs de mouvement correspondent alors à une durée de 20ms;

Dans le **mode mixte**, les blocs sont prédits à partir de deux blocs appartenant à deux trames.

Description succincte du processus de codage MPEG2

- A partir de de l'image numérisée au format 4:2:0 (cas du *main profile*), le codeur choisit pour chaque image son type (I, P, ou B) et si elle doit être codée en mode *trame* ou *field*. Le codeur doit ensuite estimer les vecteurs de mouvement pour chaque macrobloc de 16×16 pixels. Le nombre de vecteurs dépend du type d'image et du mode de codage choisi pour chaque bloc.
- L'unité de codage de base est le macrobloc, composé de 4 blocs de luminance de 8×8 pixels et (dans le cas du format 4:2:0) de deux blocs de chrominance (un C_b et un C_r) de 8×8 pixels qui couvrent la même zone de l'image.
- Tous les macroblocs de l'image sont codés en séquence de la gauche vers la droite et du haut vers le bas, et un mode de codage est choisi indépendamment pour chacun d'eux.
- Une fois le mode de codage choisi, la prédiction avec compensation de mouvement du contenu du bloc est faite à partir de l'image de référence (I ou P) passée (cas des images P) et éventuellement futur (cas des images B). La prédiction est soustraite des données réelles du macrobloc, ce qui donne le signal d'erreur de prédiction.

Description succincte du processus de codage MPEG2 (Suite...)

- Le signal d'erreur est ensuite séparé en blocs 8×8 auxquels la DCT est appliquée. Chaque bloc de coefficients résultant est quantifié et balayer en zigzag pour former une suite de coefficients.
- L'information nécessaire au décodage pour reconstruire le bloc (mode de codage, vecteurs de mouvement,...) est codée et les coefficients quantifiés sont codés en utilisant une table VLC (codage de Huffman).
- Une unité de contrôle de débit surveille l'état de remplissage du FIFO de sortie, et utilise cette information en retour pour contrôler le nombre de bits que le codeur générera pour les blocs suivants, en jouant principalement sur les coefficients de quantification.
- Pour augmenter la qualité de l'image décodée, le codeur lui-même stocke et décode les images I et P, référence pour reconstruire d'autres images obtenues par prédiction avec compensation de mouvement dans le décodeur, et calcule le signal d'erreur qui est ajoutée au signal de prédiction.

La norme MPEG4

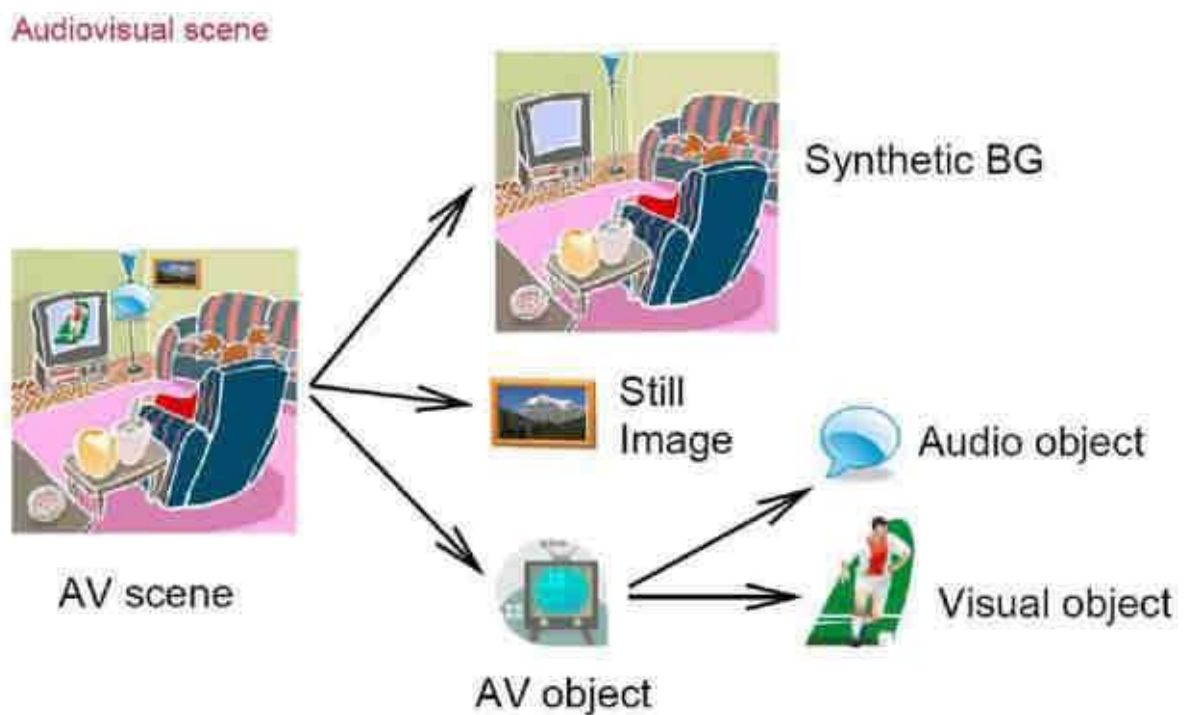
- **Développé en 1993-1998**
- **Parties du standard**
 - 5 parties principales (comme MPEG-1 et 2)
 - 18 parties supplémentaires, couvrant une variété de problèmes
 - Par ex. MPEG4/part 10 coïncide avec H.264/AVC
- **Fonctionnalités**
 - Interactivité
 - Manipulation du train binaire basée sur le contenu et sans transcoding
 - Codage hybride de données naturelles et synthétiques
 - Accès aléatoire amélioré
 - Compression
 - Performance de compression améliorée
 - Codage de flux données en parallèle (stéréo TV)
 - Accès universel

- Robustesse en environnement bruité
- Scalabilité basée objet

La compression audio

Représentation basée objet

- Une représentation basée objet est nécessaire pour atteindre les objectifs fixés;
- Audiovisual object (AVO)
 - Différents AVOs codés en trains binaires différents
 - Composé par une partie audio (mono, stéréo, synthétique, . . .) et/ou une vidéo (naturel, synthétique, . . .)
- Plusieurs AVOs composants une *AV scene*



La norme H.264/AVC

- Développé en 1998-2003
- Standard approuvé comme ITU-T Recommendation H.264 et comme ISO/IEC International Standard 14496-10
- Le standard de codage vidéo qui dépasse les performances de H.263/MPEG4-part1

- Fait partie de (MPEG-4 part 10) Advanced Video Coding (AVC).
- Codeur hybride avec prédiction temporelle et spatiale
- **But** : optimiser les performance débit-distorsion
 - Jusqu'à -60% de débit pour la même qualité par rapport à MPEG-2
- Il consiste de deux couches :
 - Une couche de codage Vidéo (Video Coding Layer, VCL) qui représente sous la forme la plus compacte possible le contenu Vidéo.
 Codage hybride : compression inter-trame et intra-trame
 - Une couche d'abstraction de réseau (network abstraction layer, NAL), qui forme la représentation VLC dans la forme la plus appropriée possible pour sa destination (stockage ou transmission)

Principe de fonctionnement

- Comme MPEG2, il supporte le codage des images entrelacées et progressives dans le format 4:2:0. Une séquence peut contenir les deux types d'images.
- L'efficacité en compression du H264 provient de :
 - Les modes de prédiction sophistiqués, qui peuvent variés à l'intérieure de la figure, et qui utilise un nombre plus important d'images successives.
 - Une DCT entière, avec des blocs de 4×4 et 8×8.
 - Un codage entropique adaptatif efficace CABAC (Context-Adaptive Binary Arithmetic Coding), CAVLC (Context-Adaptive Variable-Length Coding).
- L'utilisation de nouvelles outils PicAFF (Picture Adaptive Frame Field) et MBAFF (MacroBlock Adaptive Frame Field) qui permet l'optimisation du traitement des images entrelacées.
- Un filtre permettant de réduire l'effet de blocs (visibilité des blocs et macroblocs)

La norme High Efficiency Video Coding (HEVC)

- Joint ISO/ITU-T standard
 - MPEG-H Part 2 (ISO/IEC 23008-2)
 - ITU-T H.265

Fait partie de (MPEG-4 part 10) Advanced Video Coding (AVC).

- **Objectifs** : les mêmes que H.264, plus :
 - Très haute résolution
 - Codage parallèle

- Performances de compression améliorées
- Encore un codeur hybride avec prédiction temporelle et spatiale

La compression audio

Nécessité de la compression des signaux audio

- L'utilisation de l'audio numérique est devenue courante pour le grand public depuis l'apparition du disque compact (CD) au début des années 1980.
- Pour obtenir un signal de son de haute fidélité, une bande passante d'au moins 20 khz est nécessaire, ce qui impliquait donc une fréquence d'échantillonnage supérieure à 40khz; c'est la valeur de 44,1khz qui est finalement retenue.
- Avec une quantification sur 16 bits :

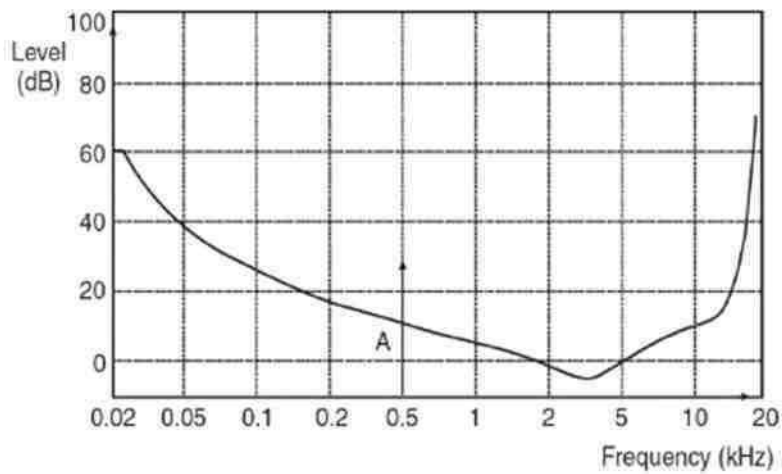
Il en résulte un débit de $44,1 \times 16 \times 2$ (stéréo) = **1411,2 kb/s** pour un signal stéréophonique.

- Ce débit est trop élevé pour l'utilisation tel qu'il en son d'accompagnement d'une image codée à la norme MPEG-1 ou MPEG-2.
 - Comme pour la vidéo, on est donc confronté au besoin de compresser les données issues de la numérisation du signal audio.

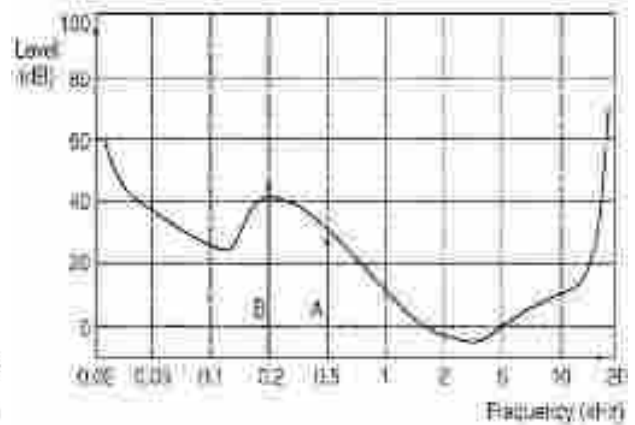
La compression audio MPEG

Introduction

- Là encore, on exploite les faiblesses de l'audition humaine pour réduire le nombre d'informations à transmettre sans détériorer de façon perceptible la qualité du signal audio.
- L'oreille représentait un maximum de sensibilité entre 1 et 5 KHz.
- Cette sensibilité est affectée par des signaux multiples.



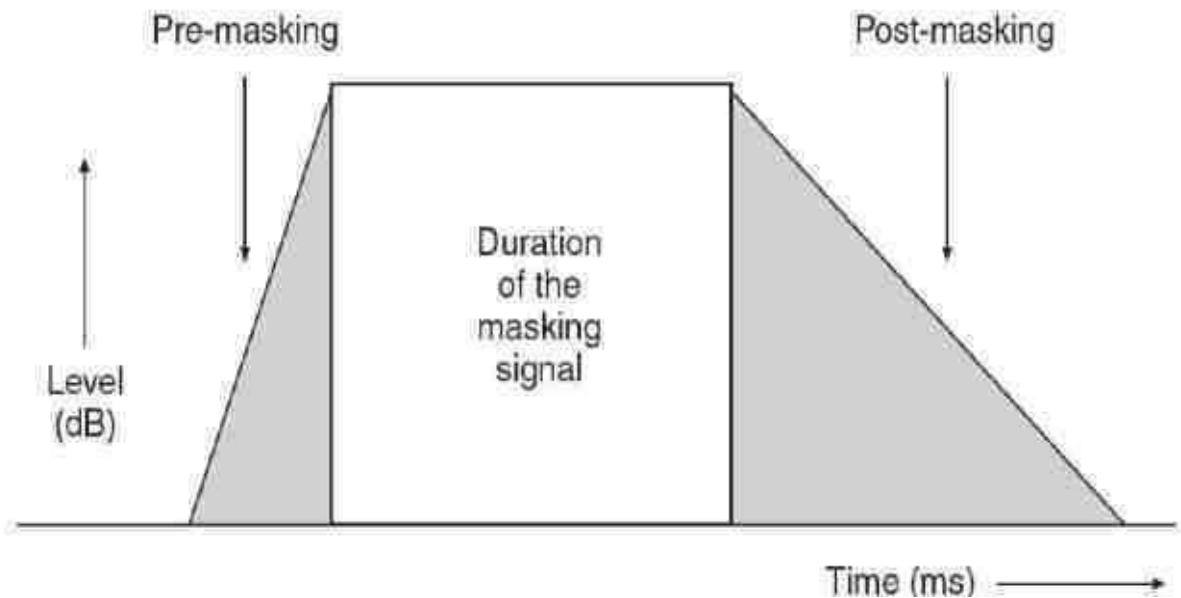
Seuil d'audibilité en fonction de la fréquence



Masquage fréquentiel :
Le signal A audible précédemment
est maintenant masqué par le signal
B voisin, plus puissant que A.

Principe (suite)

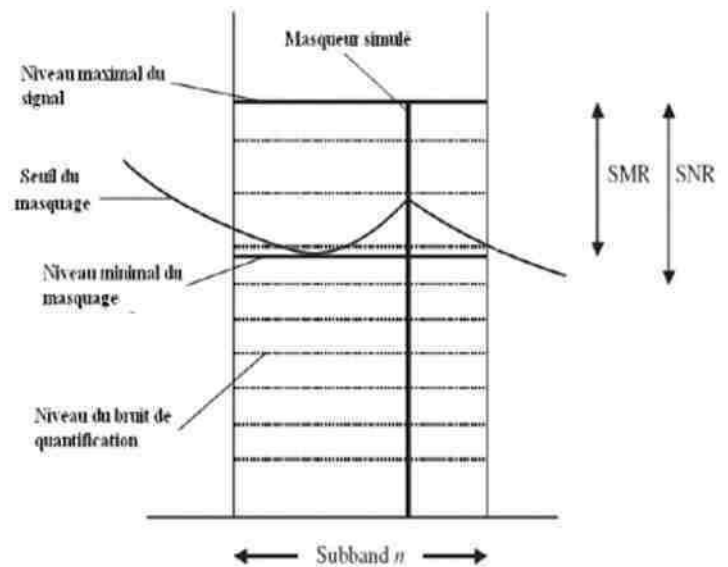
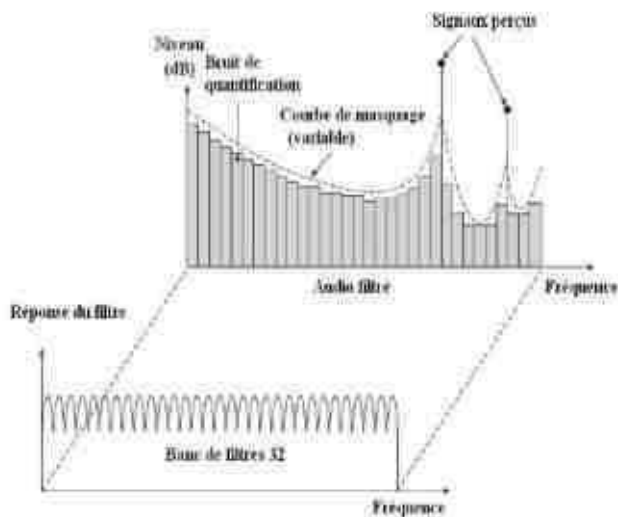
- Il existe également un effet de **masque temporel** : un son de forte amplitude masque également des sons plus faibles le suivant ou le précédent immédiatement.



Principe de codage

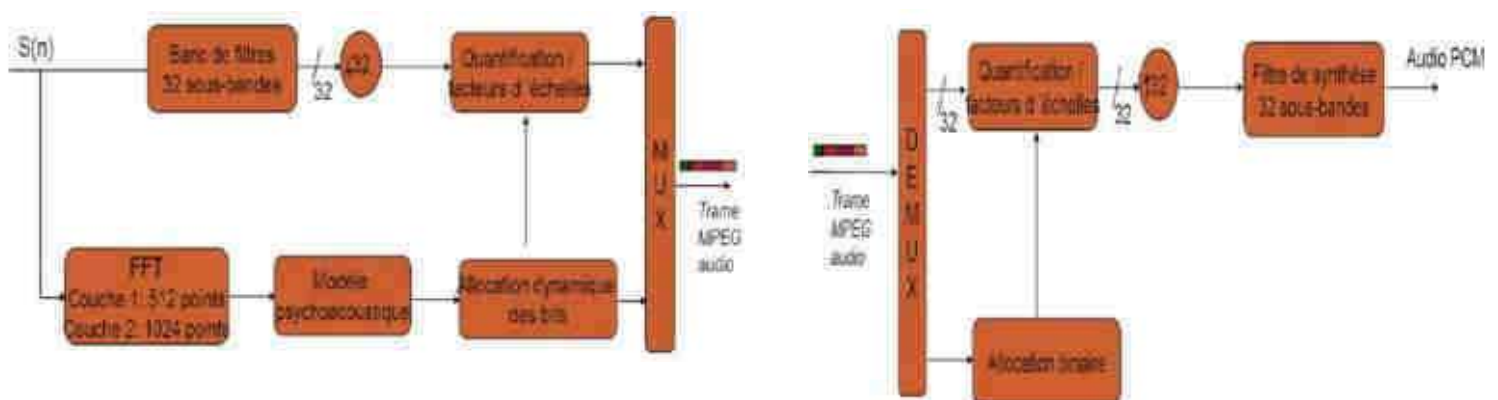
- Diviser la bande passante audio en 32 sous-bandes de largeur identiques au moyen d'un banc de filtres dits « **polyphase** ».

- Le signal de sortie d'un filtre de sous-bande, correspondant à une durée 32 échantillons PCM d'entrée appelé échantillon de sous-bande.
- Le modèle psycho-acoustique est employé pour calculer le rapport signal sur masque (SMR) pour chaque sous bande. Cette information est employée pour sélectionner le pas de quantification de chaque sous-bande qui garantit que le bruit de quantification est inaudible.



Principe de codage (suite)

- L'analyse du signal pour déterminer la courbe de masquage et la quantification se fait dans un intervalle de temps appelé "trame" dont la durée est de 12×32 échantillons PCM (MPEG1 couche I) ou 12×96 échantillons PCM (MPEG1 couche II).
- Dans cet intervalle, le codeur évalue également l'amplitude du signal le plus élevée pour définir un facteur d'échelle qui sera codé sur 6 bits (couvrant une plage dynamique de 128 dB par pas de 2dB).
- Tous les éléments nécessaires au décodage du son sont fournis au niveau de la trame, qui constitue ainsi l'unité la plus petite pour l'accès aléatoire (comparable au groupe d'image en vidéo).



Les couches du codage audio MPEG1

- Les normes MPEG audio définissent trois couches (*layers*) de codage, qui diffèrent par leur taux de compression pour une qualité audio perçue donnée.
- La norme de télévision numérique DVB prescrit pour le son l'utilisation des couches I et II de la spécification MPEG-1 audio qui prévoit quatre modes de transmission principaux:
 - **Stéréo**: les voies G et D sont codées de manière complètement indépendante;
 - **Joint stéréo**: exploitation de la redondance entre les voies gauche et droite afin de réduire le débit
 - **Dual channel**: deux voies sont indépendantes (par exemple son bilingue)
 - **Mono** : une seule voie son.

Habituellement le son stéréo est obtenu à l'aide de deux canaux (gauche et droit) diffusés par au moins deux transducteurs (haut-parleurs ou écouteurs). Le mode stéréo permet ainsi d'entendre sur un canal le piano, par exemple et la guitare sur l'autre. L'auditeur entend les sons comme dans la nature ou comme s'il était situé en face de l'orchestre lors d'un concert. Par contre, dans le mode MONO, les deux canaux diffusent exactement la même chose.

Les couches du codage audio MPEG1(suite)

La couche I ou pré-MUSICAM

- Utilise l'algorithme PASC (*Precision Adaptive Subband Coding*).
- Utilise un débit fixe parmi 14 possibles (de 32 à 488kb/s); la qualité haute-fidélité nécessite 192kb/s par voie audio (384kb/s).
- Son avantage principal est la relative simplicité d'implémentation du codeur et du décodeur.
- La trame (unité d'accès élémentaire à une séquence audio MPEG) se compose de 384 échantillons PCM.

| Header | CRC | Audio | | | AD |
|-------------------|------------------|------------------------|-----------------------|---|------------------------|
| En-tête 32bits | Parité 16bits | Allocation bits/ESB | Facteurs D'échelle | Echantillons de sous-bande (ESB) (12×32 échantillons de sous- bande) | Données Auxiliaires |

- L'en-tête de 32 bits (*header*): transporte la synchronisation.
- La parité (CRC) est d'utilisation facultative.

- Le champ « allocation de bits/ESB » (32 entiers codés sur 4 bits) définit la résolution de codage (0 à 15bits) des échantillons de chacune des 32 sous-bandes.
- Le champ « facteur d'échelle » (32 entiers codés sur 6bits) indique pour chaque sous-bande le facteur multiplicatif des échantillons ainsi quantifiés.

Les couches du codage audio MPEG1(suite)

La couche II

- Son algorithme est connu sous le nom de MUSICAM, est le standard retenu pour la radio (DAB) et la télévision (DVB) numérique européennes.
- Permet d'obtenir une qualité équivalente avec un débit moindre (réduction de 30 à 50%) que pour la couche I, au prix d'un accroissement modéré de la complexité du codeur et du décodeur.,
- Le débit, fixe, peut être choisi de 32 à 192kb/s par voie, la qualité subjective «HiFi» étant obtenue à partir de 128kb/s par voie, soit 256kb/s en stéréo.
- La trame se compose de 1152 échantillons audios. Sa durée est donc triple de celle de la couche I.

| Header | CRC | Audio | | | | AD |
|-------------------|------------------|------------------------|--------------------|-----------------------|---|------------------------|
| En-tête 32bits | Parité 16bits | Allocation bits/ESB | Sélection SCFSI | Facteurs D'échelle | Echantillons de sous- bande (ESB) (12×32 échantillons de sous-bande) | Données Auxiliaires |

- Dans ce cas, le champ « allocation de bits/ESB » (32 entiers codés sur 2 à 4bits selon la sous-bande).
- Le champ « SCFSI » (*Scale Factor Selection Information*) (32 entiers codés sur 2bits) indique si le facteur d'échelle de sous-bande s'applique à toute la trame ou s'il y a 2 ou 3 facteurs d'échelle.

Les couches du codage audio MPEG1(suite)

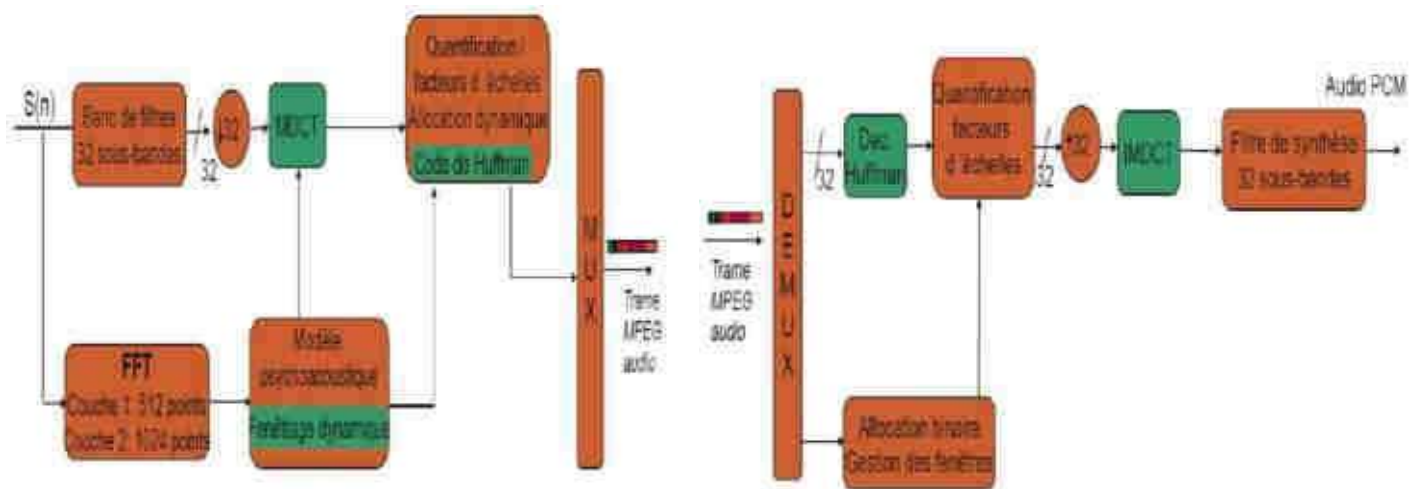
La couche III

- C'est le fameux format MP3
- Utilise un modèle psycho-acoustique différent dit « modèle 2 ».
- Utilise un codage de Huffman et une analyse du signal basée sur la MDCT.

- Utilise un débit fixe parmi 14 possibles (de 32 à 488kb/s) ; la qualité haute-fidélité nécessite 192kb/s par voie audio (384kb/s).
- Elle est principalement destinée aux applications sur réseaux à faible débit (par exemple RNIS).

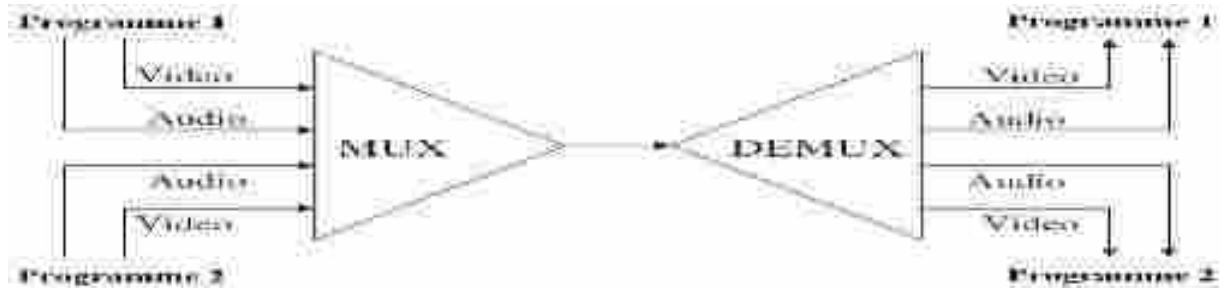
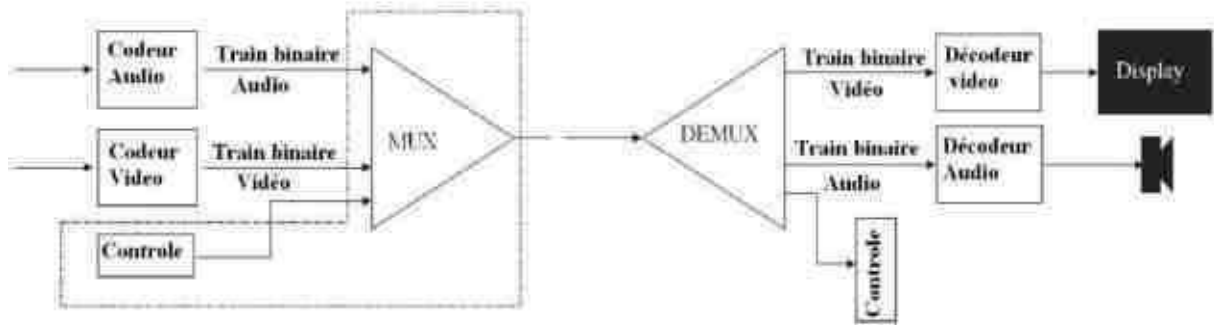
Les couches MPEG audio bénéficient d'une compatibilité ascendante entre elles, c.à.d, qu'un décodeur de la couche III pourra également décoder les couches I et II, et qu'un décodeur couche II décodera normalement la couche I.

Les couches du codage audio MPEG1(suite)



Multiplexage des signaux

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



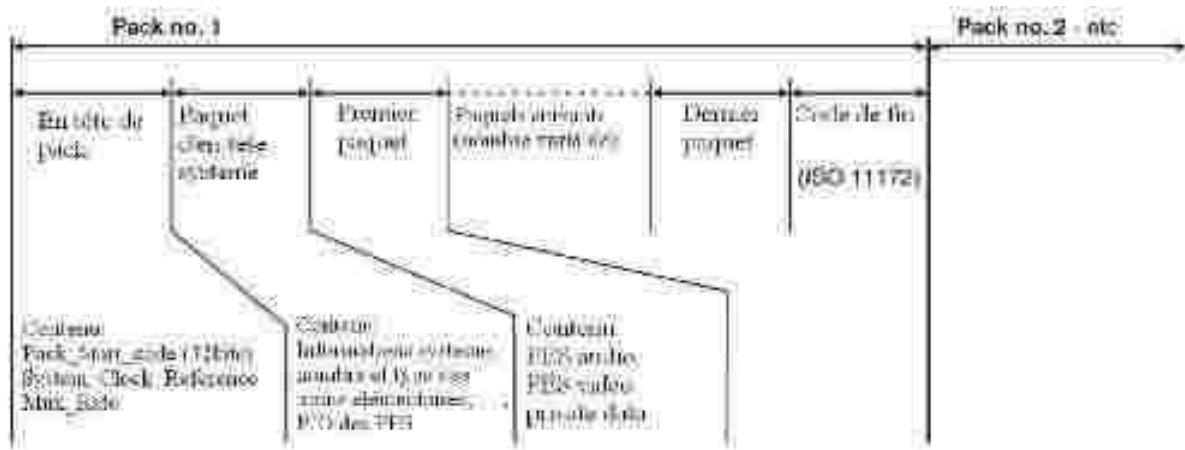
Multiplex MPEG1

Reçoit du CODEC les trains élémentaires de données (Elementary Streams) ;

- Découpe les trains élémentaires (ES) en paquets (Packetized Elementary Stream) ;
- Regroupe les paquets en packs dont l'en-tête contient les informations de temps et de débits.

Chaque pack contient :

- 0 à 16 paquets vidéo ;
- 0 à 32 paquets audio ;
- 0 à 2 paquets de données privées

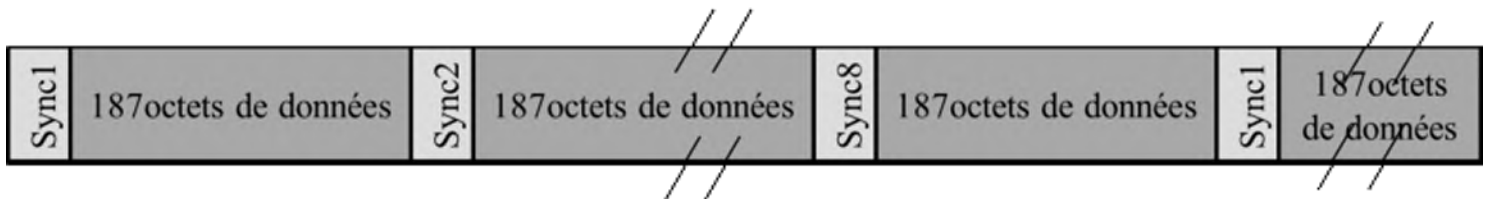


Multiplex MPEG2

- Pour le stockage des données audio/vidéo, la norme MPEG-2 reprend le multiplexage de la norme MPEG-1.
- La norme prévoit un flux de transport (Transport Stream) pour la transmission sur les média des programmes destinés à la diffusion.

Le multiplexeur :

- Découpe les flux élémentaires (ES) en paquets de 188 octets ;
- Constitue des trains de données pouvant combiner plusieurs programmes.



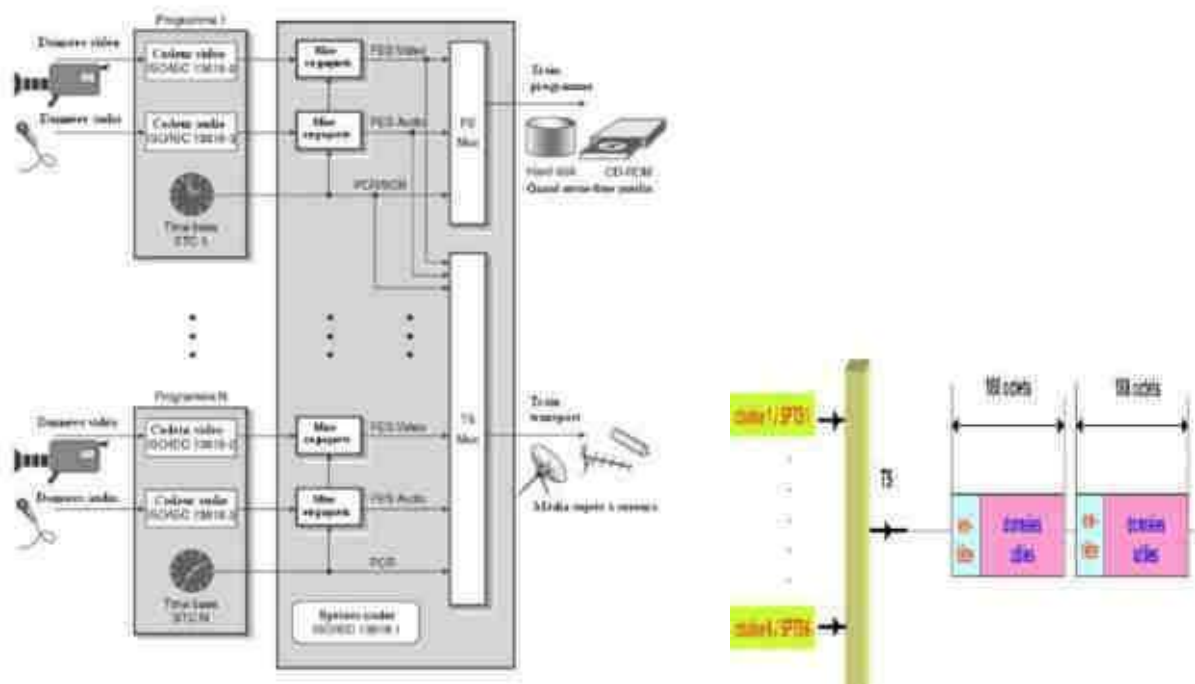


Schéma conceptuel de la génération des trains programme et transport MPEG-2

CHAPITRE 4

LES TÉLÉVISIONS NUMÉRIQUES



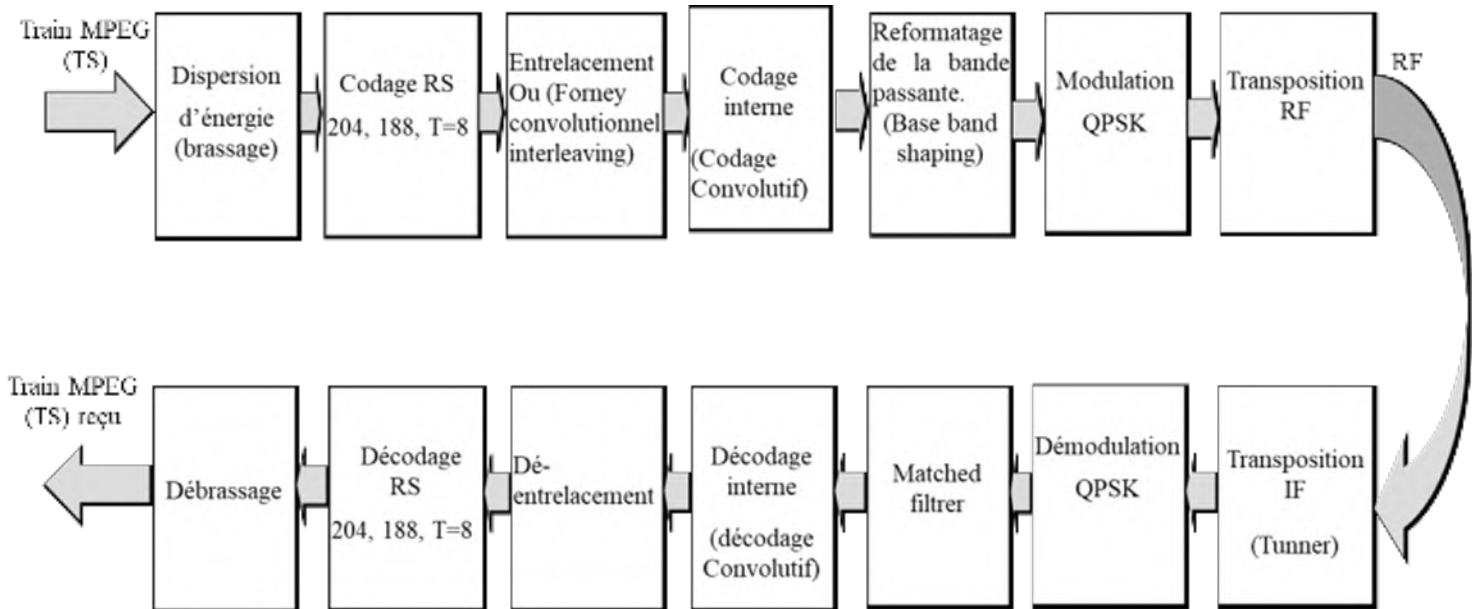
4. 4.1 Historique

- A la fin des années 80, la possibilité de diffuser des images de télévision sous la forme numérique paraissait encore très lointaine.
- **Ceci est dû au débit très important (de 108 à 270 Mbit/s pour un système TV à 525 ou 625 lignes).**
- A partir de la fin des années 80, le développement très rapide d'algorithmes de compression vidéo efficaces (norme JPEG, et MPEG) réduisant de façon très importante le débit (**de 1,5 à 30Mbit/s**) nécessaire à la transmission des images a changé radicalement cet état de fait.
- Les premières émissions numériques à destination du grand public ont démarré aux USA au milieu de l'année 1994 avec le projet Direct TV.
- En Europe, en 1993, naissance du projet DVB (*Digital Video Broadcasting*) basé sur la norme MPEG2.
- Canal+ qui a lancé les premières émissions régulières sur Astra1 en 1996 suivie de près par TPS, AB-Sat sur Eutelsat et de nombreux autres opérateurs européens.
- 2005, le 31 mars, la télévision numérique terrestre (TNT) en Mpeg2 et Mpeg4 (payante) arrive sur le territoire français.
- 2011, le 30 novembre, arrêt définitif des programmes de la télévision analogique en France.
- En Allemagne, le lancement de la TNT a commencé en novembre 2002 à Berlin.
- Au 2 avril 2007, 1702 stations de télévision sur le territoire américain (environ 98,8 % des stations) ont reçu leur permis de construire ou d'émettre en numérique. Un total de 1 603 stations diffusent déjà en format numérique.

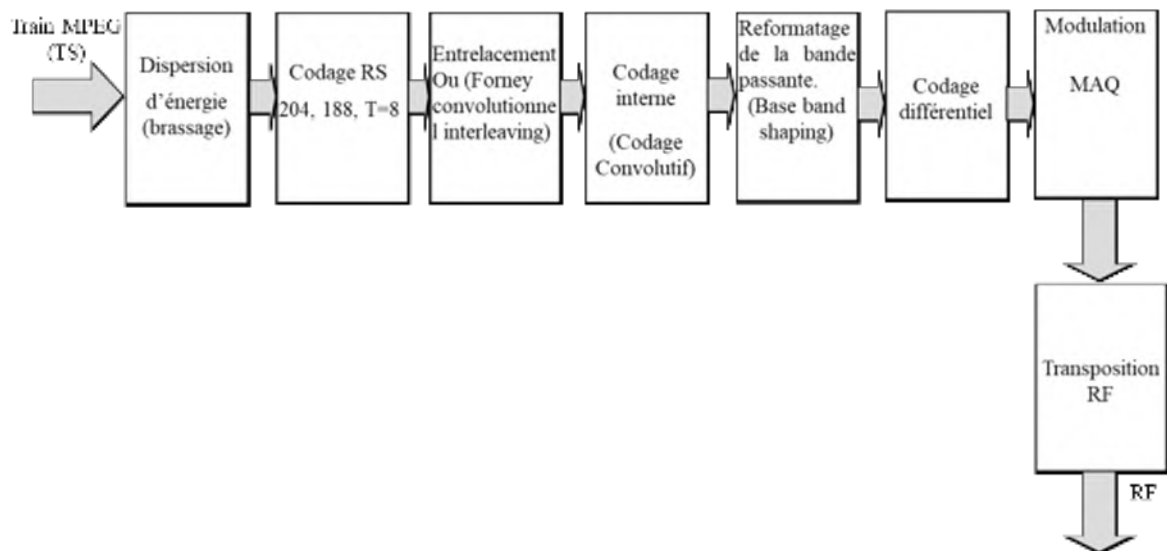
4.2 Système DVB

- 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 hertziennne. D'où les différentes appellations :
 - ❖ DVB-C,
 - ❖ DVB-S,
 - ❖ DVB-T.

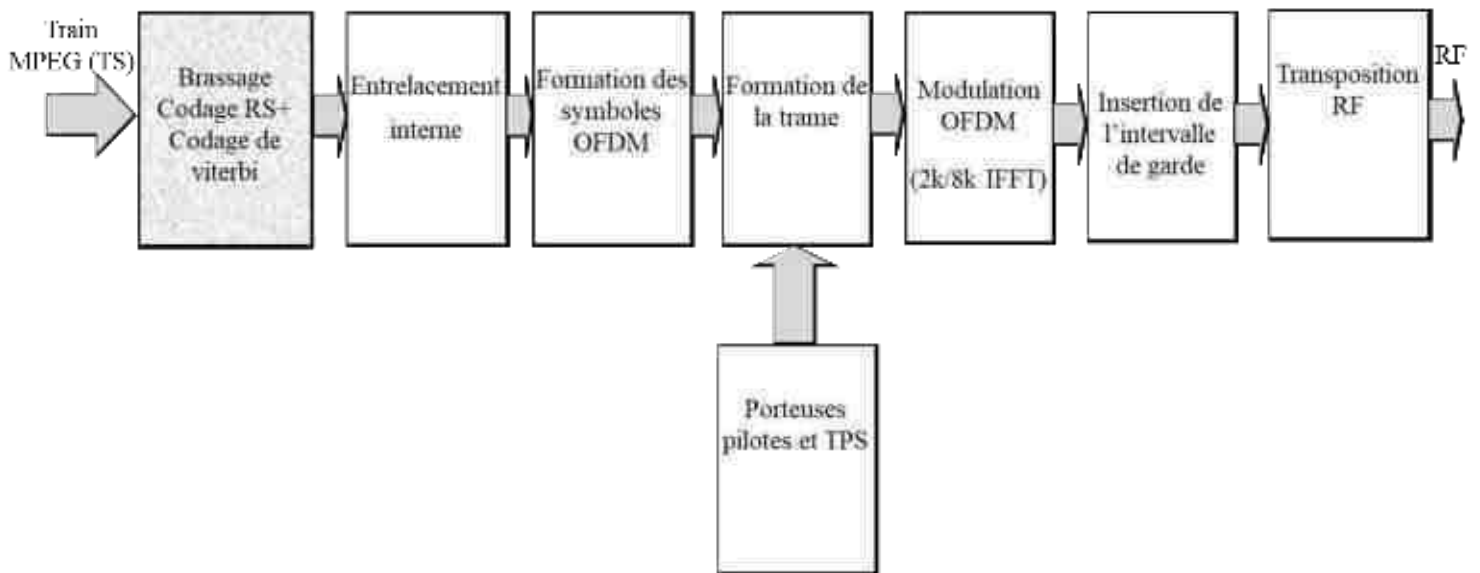
- La télévision suivant le système DVB permettra la transmission de plusieurs programmes sur un canal de transmission classique.
- La compression des signaux audio et vidéo, la constitution du multiplex (multiplexage) et l'embrouillage sont communs à tous les supports de diffusion (terrestre, câble, 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.



Schémas synoptiques (DVB-S)



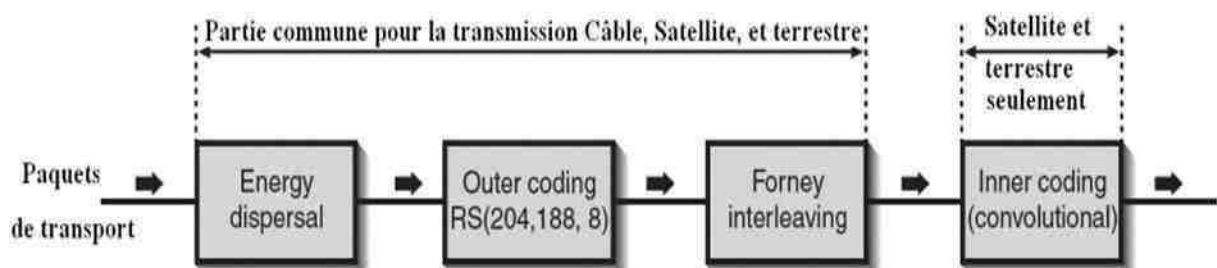
Schémas synoptiques d'une émission (DVB-C)



Schémas synoptiques d'une émission (DVB-T)

4.3 Codage de canal

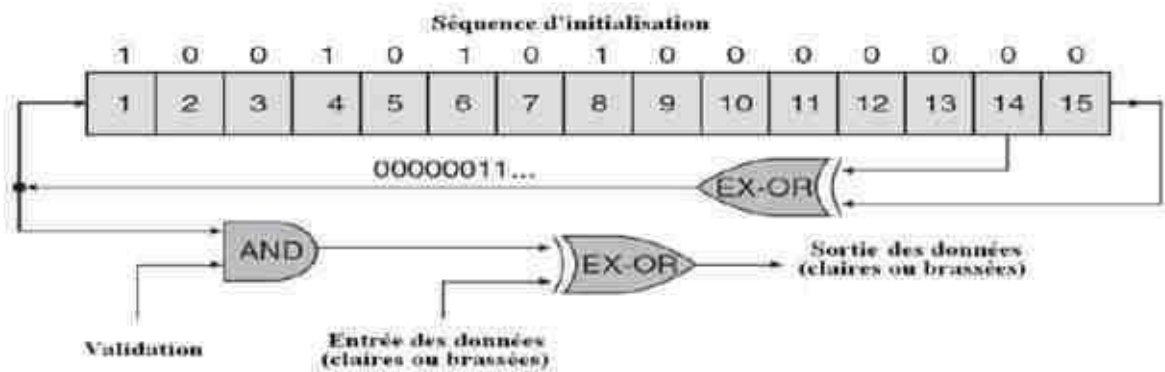
- Les canaux de transmission n'étaient malheureusement pas exempts d'erreurs, en raison de toutes sortes de perturbations qui viennent s'ajouter au signal utile (bruit, interférences, échos, ...)
- Il convient donc de prendre des mesures préventives avant modulation pour permettre la détection et la correction des erreurs dans le récepteur.
- Ces mesures sont appelées *Forward Error Correction (FEC)* constituent l'essentiel du codage de canal.



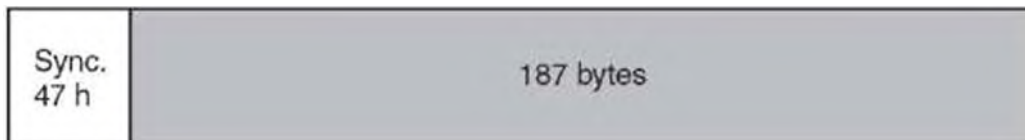
4.4 Transmission et diffusion de la télévision numérique (DVB)

4.4.1 Dispersion d'énergie

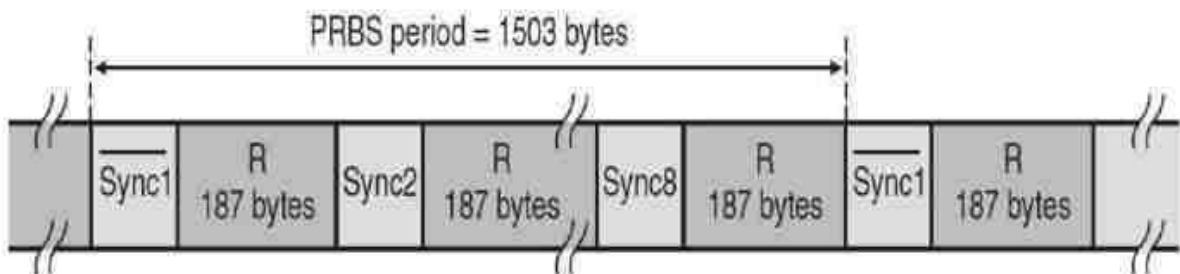
- Le brassage, qui permet d'assurer la dispersion d'énergie du spectre radiofréquence rayonné, c'est-à-dire une répartition uniforme de l'énergie dans le canal d'émission.
- Pour éviter de longues suites de 0 ou 1 le signal doit être rendu quasi aléatoire.
- Ceci est obtenu au moyen d'un embrouillage des données (ou brassage) par une séquence pseudo-aléatoire (PRSB, *Pseudo Random Binary Sequence*) de polynôme générateur $1+X^{14}+X^{15}$.



- Le générateur pseudo-aléatoire est réinitialisé tous les 8 paquets transport par le chargement de la séquence 100101010000000 dans son registre.
- Afin de pouvoir repérer le début de la séquence, l'octet de synchronisation du 1er paquet du groupe de 8 auquel s'applique l'embrouillage est inversé (47hex devient B8hex).



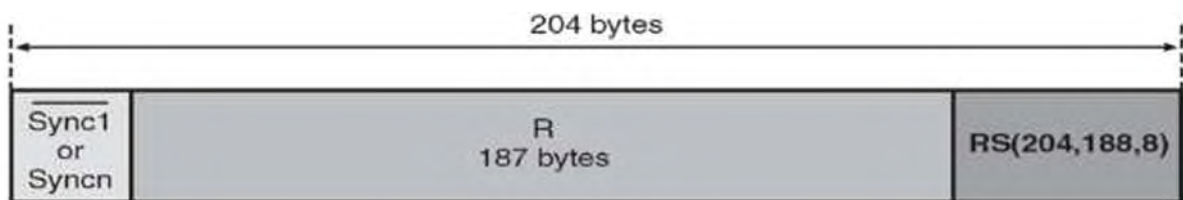
Paquet « transport » avant correction d'erreur



Paquets « transport » après correction d'erreur

4.4.2 Codage de Reed-Solomon (codage externe, outer coding)

- 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.
- Il permettra de corriger plus de 8 octets erronés.



Paquet "transport" avant correction d'erreur

Dispersion temporelle des erreurs

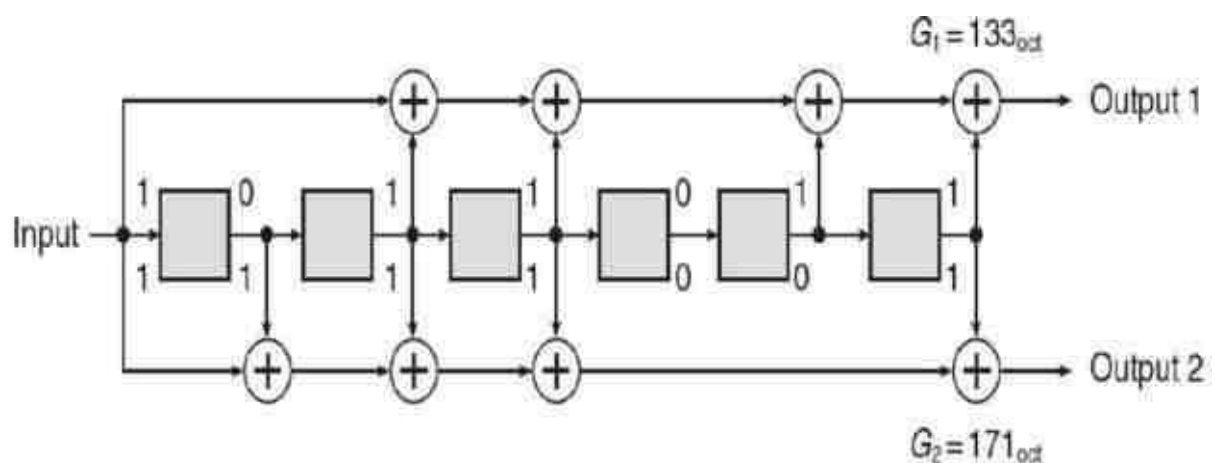
(Entrelacement ou *Forney convolutional interleaving*)

- Cette étape est destinée 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.

Codage convolutif (codage interne, *inner coding*)

- 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. 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.
- Le codage de la norme DVB est illustré ci-dessous, il est de paramètres:

$$R_c \text{ (rendement)}=1/2 ; K=7; G_1=171_{\text{oct}}, G_2=133_{\text{oct}}$$



Codage convolutif (Suite...)

- La forte redondance introduite par ce code (100%) permet une correction d'erreurs très puissante, indispensable en cas de transmission à très faible rapport signal/bruit, mais elle réduit l'efficacité spectrale du canal.
- Le codage convolutif permet cependant de ne pas transmettre tous les bits des sorties 1 et 2 en effectuant une opération dite de "poinçonnage" sur les trains de sortie réduisant ainsi la redondance du code.
- Le principe consiste à supprimer un bit d'une des 2 sorties pendant que le bit simultané de l'autre sortie est transmis.
- On obtient ainsi les valeurs poinçonnées du taux d'émission spécifiées par la norme (*punctued rate* $R_c=1/2, 3/4, 5/6$ ou $7/8$).
- Ils sont le produit du *code rate* convolutif pur ($1/2$) et du taux de poinçonnage :

Le code $2/3$ est le produit de $1/2$ (code convolutif) par $4/3$ (le poinçonnage garde 3 bits sur 4)

Modulation des signaux numériques

Les conditions techniques (rapport signal à bruit et échos principalement) sont en effet très différentes entre la réception des signaux provenant de satellites, de réseau câblé, et la réception hertzienne terrestre où les conditions peuvent être très variables :

- Le rapport signal/bruit (*Carrier to Noise Ratio*) d'une **réception satellite** est très faible (de l'ordre de 10dB), mais le signal reçu est pratiquement dépourvu d'écho ;
- à l'inverse, en **réception câble**, le rapport signal/bruit est relativement élevé (>30dB), mais le signal peut être affecté d'échos courts dus à des désadaptations d'impédance de ligne;
- En réception hertzienne terrestre, les conditions sont plus difficiles que celles sur câble (échos aggravés, interférences, variations de signal importantes)

C'est pour cela que les techniques de modulation différeront pour s'adapter aux mieux aux conditions imposées par le canal de transmission et à la cohabitation avec les émissions analogiques.

Formatage de la bande passante (baseband shaping)

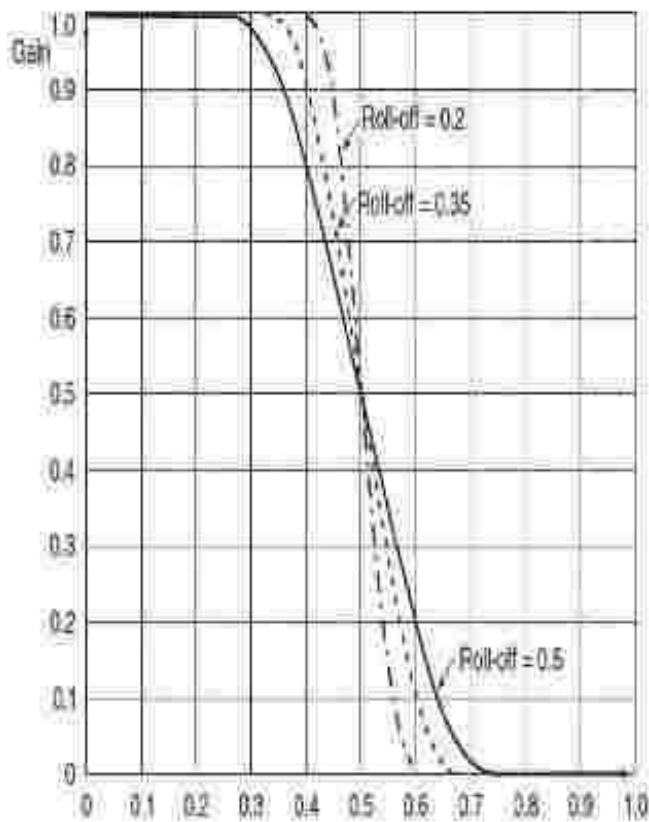
- Le spectre des signaux numériques est infini, impliquant théoriquement une bande passante infinie pour leur transmission.

Il convient de leur appliquer un filtrage pour limiter cette bande passante;

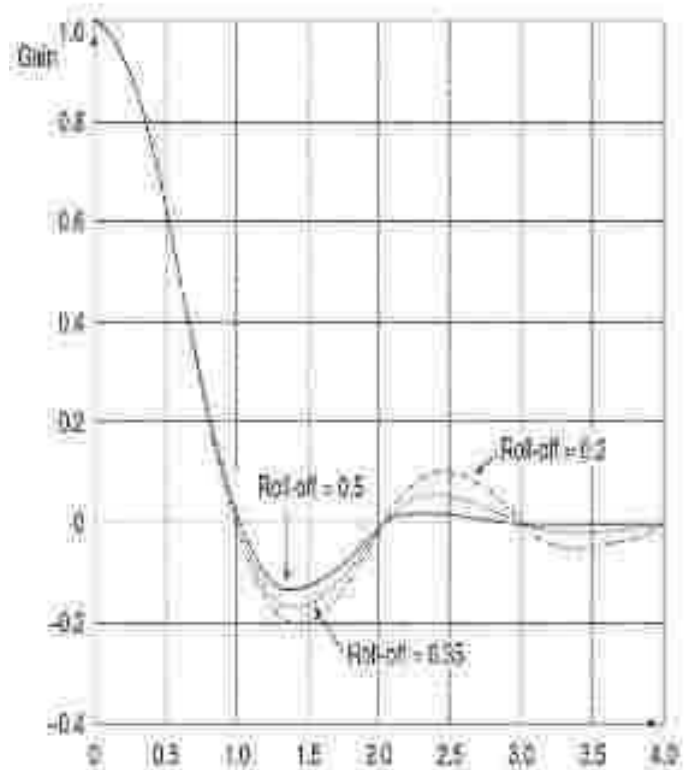
- La limitation de la bande passante se traduit par un allongement théoriquement infini de la réponse temporelle, se qui peut se traduire par des "chevauchements" entre symboles successives (interférence intersymbole), donc des erreurs de démodulation.
- Pour éviter ce problème, le filtrage doit respecter le critère de Nyquist. Le filtre le plus communément utilisé est dit en cosinus surélevé (*raised cosine filter*), plus connu sous le simple nom **filtre de Nyquist**.
- Il est caractérisé par son facteur roll-off α , qui détermine la raideur du filtre. Pour un signal de période de symbole T, la bande passante B occupée après filtrage est:

$$B=(1+\alpha)/2T$$

Reformatage de la bande passante (baseband shaping)



Caractéristique du filtre de Nyquist



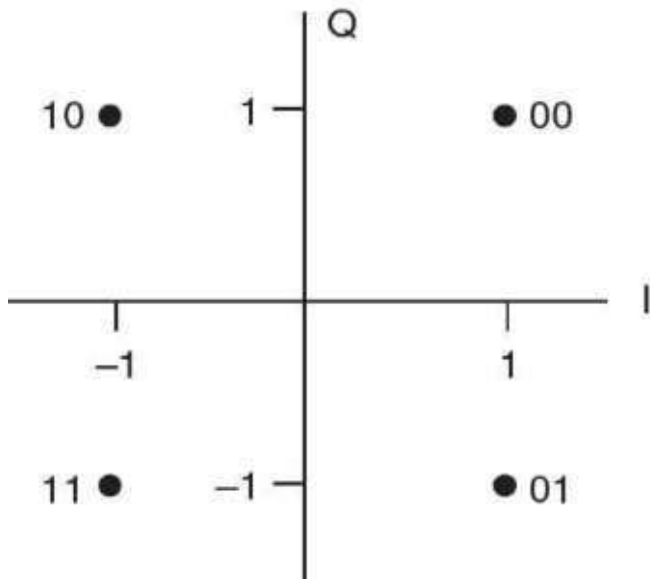
Réponse temporelle du filtre de Nyquist

Transmission par satellite

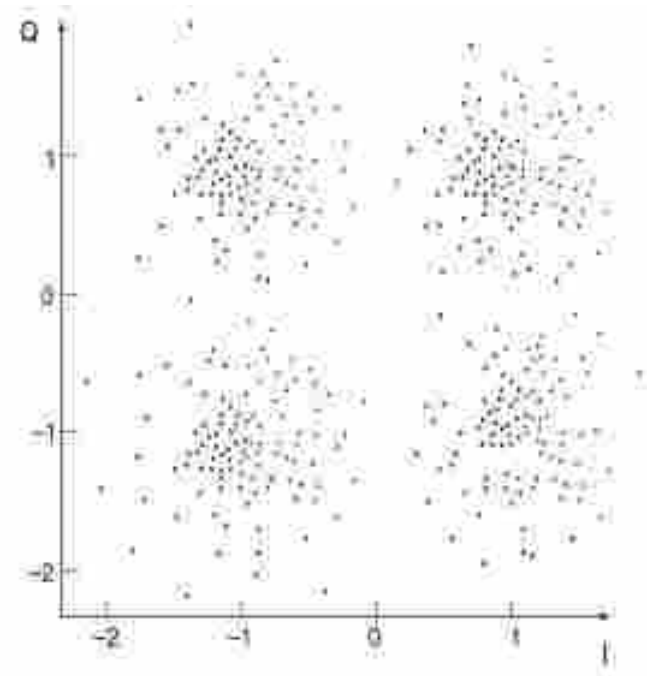
La largeur de canal disponible est fréquemment égale à 36 MHz. Un signal provenant d'un satellite subit une atténuation de plus de 200 dB. On reçoit donc un signal très faible et bruité.

Solution : On a dans ce cas choisi la modulation la moins sensible aux distorsions d'amplitude : la modulation à saut de phase en quadrature QPSK.

Les modulations numérique utilisées



Constellation en réception



Constellation en émission (faible niveau)

Transmission par 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 64 QAM.

Transmission Hertzienne (DVB-T)

Modulation OFDM

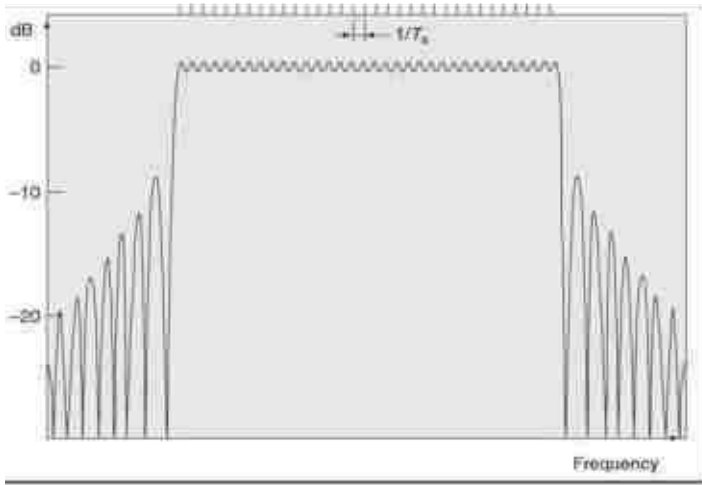
- La largeur de canal est également limitée à 8 MHz.
- Ce type de modulation, dont le principe consiste à répartir un train binaire à haut débit sur un grand nombre de porteuses « orthogonales » (plusieurs centaines à plusieurs milliers) transportant chacune un faible débit.
- Son principal avantage est son excellent comportement en cas de réception à trajets multiples, ce qui est fréquent lors de la réception terrestre mobile ou portable.
- Le retard des trajets multiples devenant dans ce cas très inférieur à la période d'un symbole.
- Le principe de la modulation COFDM (*Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) consiste à moduler (en QPSK ou QAM selon le compromis robustesse/débit recherché) un grand nombre N de porteuses par des symboles de durée T_s (égale à leur période), la fréquence de deux porteuses consécutives étant distante de $1/T_s$.

Transmission Hertzienne (DVB-T)

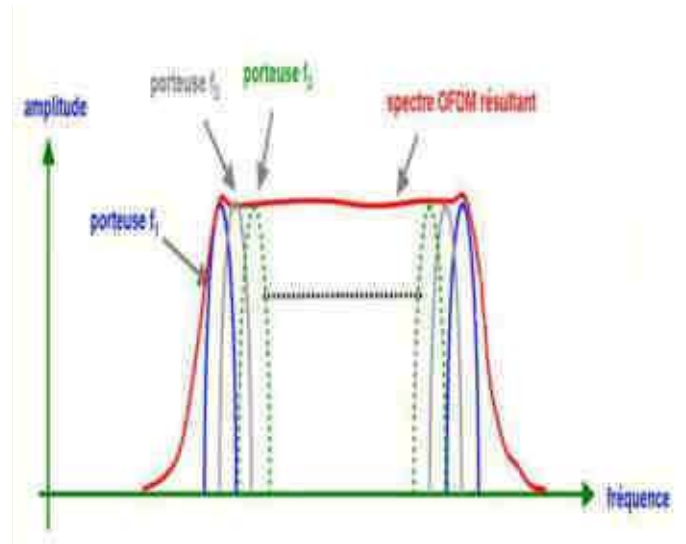
- La relation entre la fréquence f_0 de la porteuse la plus basse et celle f_k d'une porteuse de rang k (avec $0 \leq k \leq N-1$) est :

$$f_k = f_0 + k/T_s$$

- La structure très particulière de ce spectre explique sa forme quasi rectangulaire. C'est une des manières les plus efficaces d'occuper complètement un canal de largeur donnée. Ce qui entraîne un minimum d'interférences avec les canaux adjacents.



Spectre d'un signal OFDM à 32 porteurs

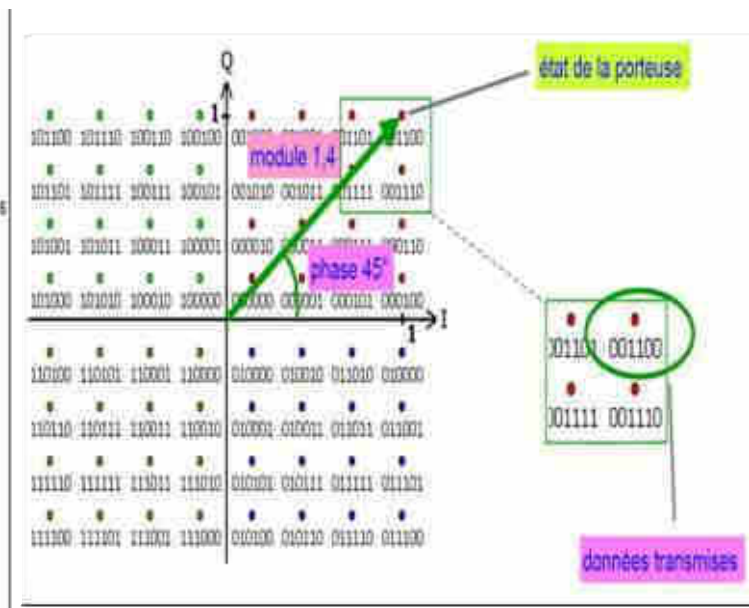
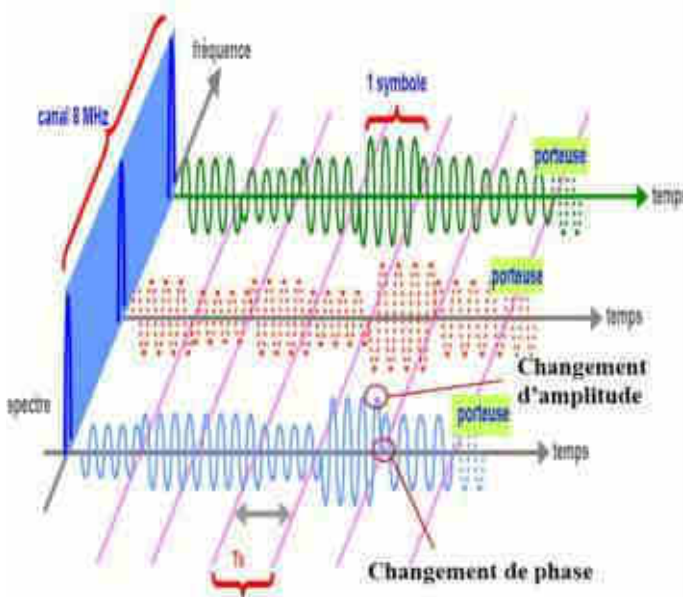


Transmission Hertzienne (DVB-T)

- La relation entre la fréquence f_0 de la porteuse la plus basse et celle f_k d'une porteuse de rang k (avec $0 \leq k \leq N-1$) est :

$$f_k = f_0 + k/T_s$$

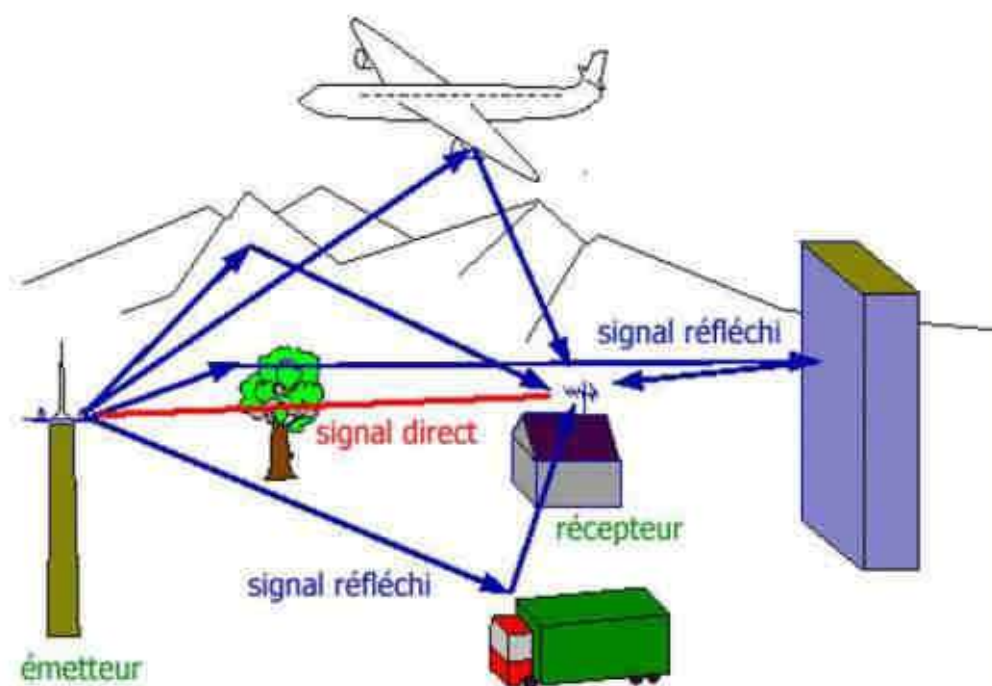
- La structure très particulière de ce spectre explique sa forme quasi rectangulaire. C'est une des manières les plus efficaces d'occuper complètement un canal de largeur donnée.



Transmission Hertzienne (DVB-T)

Effet du multi-trajet

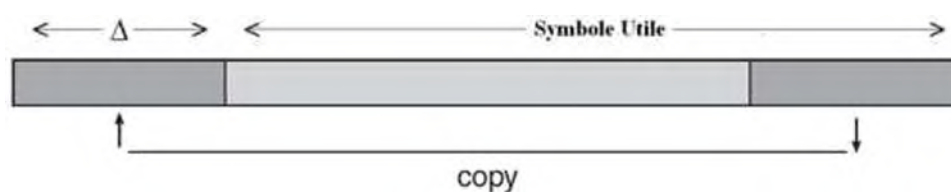
- En TNT, il est fréquent que l'antenne de réception reçoive, en plus du signal direct, les signaux issus de trajets multiples s'ajoutant au signal direct (signaux réfléchis sur des obstacles tels que les immeubles, reliefs, etc...).
- Ces signaux font que les conditions d'orthogonalité entre porteuses ne sont plus respectées, ce qui a pour conséquence la présence d'**interférence intersymbole**.

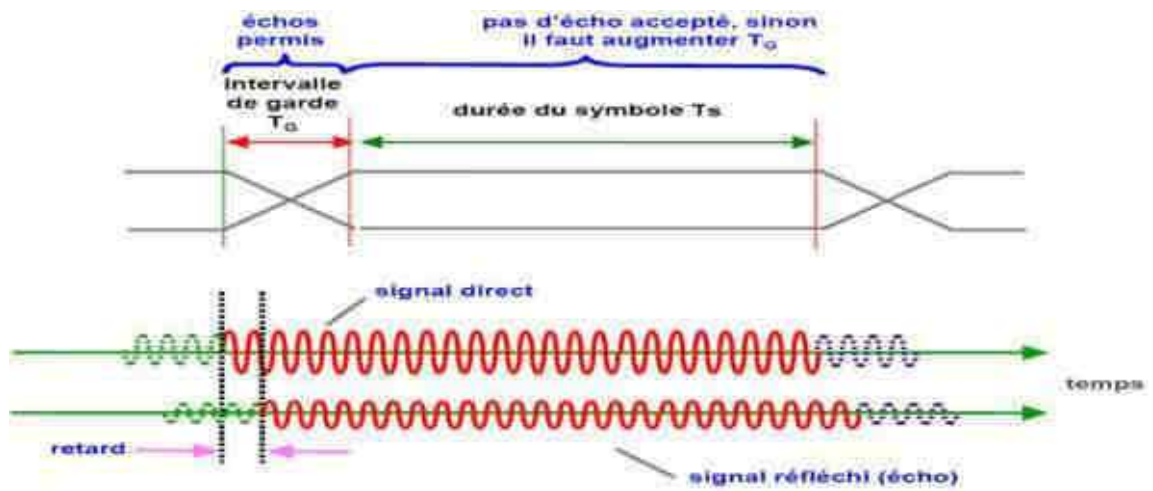


Transmission Hertzienne (DVB-T)

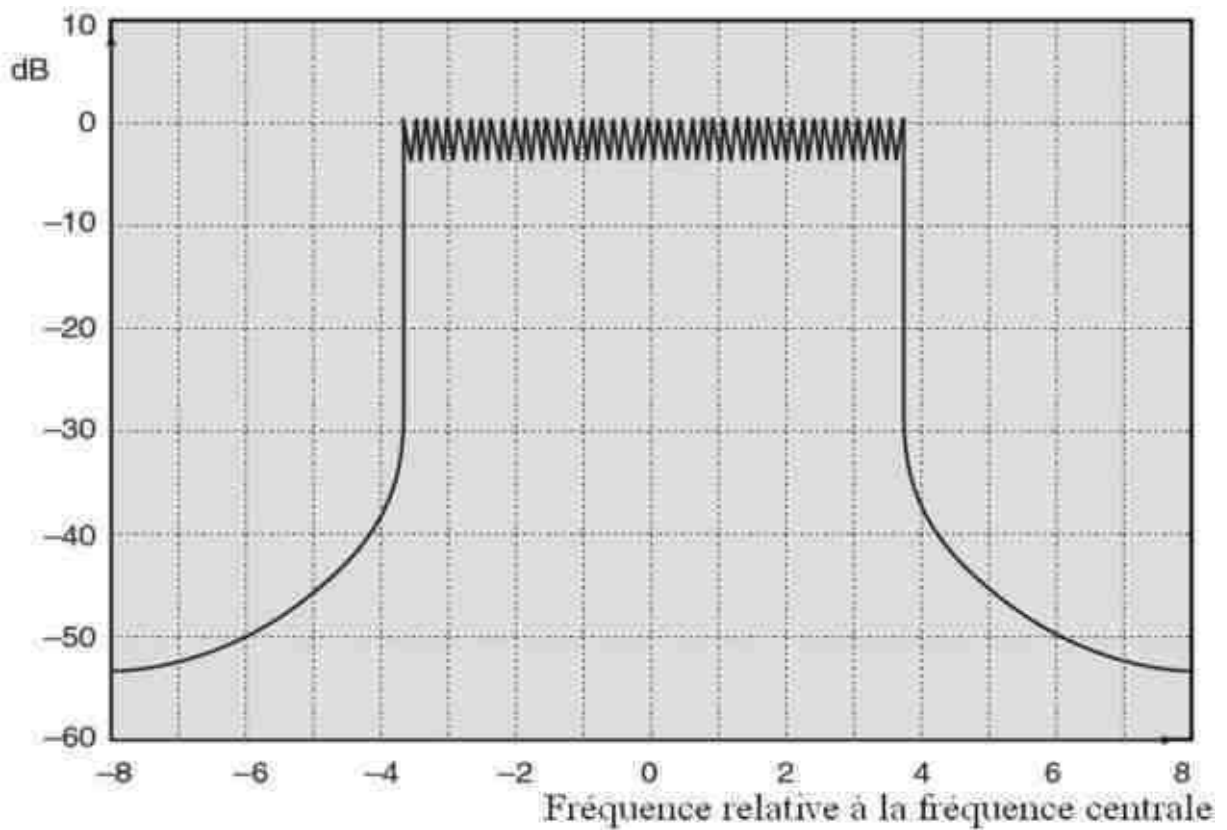
Effet du multi-trajet

- On s'affranchit de ce problème en faisant précéder la durée de symbole T_s par un intervalle de garde Δ pour obtenir une nouvelle période de symbole $T_s = T_s + \Delta$. Cet intervalle de garde est en général inférieur ou égal à $T_s/4$ et il est occupé par une copie de la fin du symbole utile.
- Pour être sûr que les signaux direct et réfléchi reçus correspondent à un même symbole, le récepteur n'essaye pas de reconnaître le symbole durant cet intervalle de garde.





Transmission Hertzienne (DVB-T)



Spectre d'un signal DVB-T avec $\Delta = T_s/4$

Transmission Hertzienne (DVB-T)

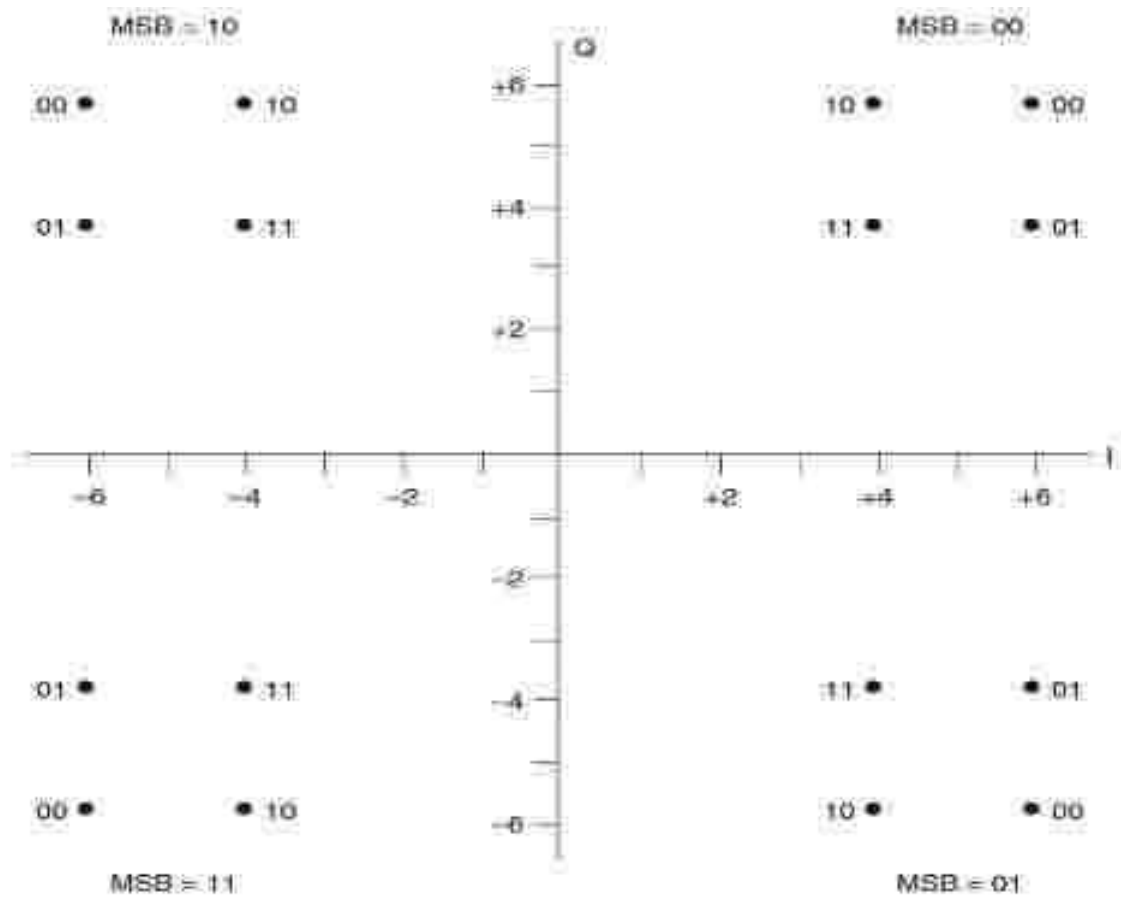
- Pour la télévision numérique terrestre, le module technique du DVB a retenu une modulation OFDM à 2048 porteuses (mode 2K en QPSK) ou 8192 porteuses (8K en 64 QAM).

- La modulation s'effectue au moyen d'une transformée IFFT sur 2048 points (2K) ou 8192 points (mode 8K) qui convertit les données complexes d'entrée du domaine temporel au domaine fréquentiel.
- Le signal OFDM inclut des porteuses qui ne sont pas modulées par le *bitstream* « utile » :
 - ❖ Les porteuses pilotes continues (*continual pilot carriers*) et les porteuses pilotes dispersées (*scattered pilot carriers*) : permettent au récepteur de se synchroniser et de faire une estimation du canal (altération de réponse en fréquence due aux trajets multiples, etc.) en vue de sa correction.
 - ❖ Les porteuses TPS (*Transmission Parameter Signaling*): transportent à faible cadence tous les paramètres de transmission au moyen d'une modulation BPSK différentielle (1bit/symbole) très robuste.

Transmission Hertzienne (DVB-T)

Codage hiérarchique

- La norme prévoit une possibilité de codage hiérarchique au moyen d'une modulation QAM non-uniforme caractérisée par une plus grande distance entre les états adjacents de la constellation.
- Les configurations de constellations non uniformes sont définies par le paramètre α (qui peut prendre les valeurs 1, 2, ou 4).
- Ceci permet la diffusion simultanée d'un *bitstream* prioritaire modulant les deux bits de poids fort d'une émission 16 ou 64-QAM, ce qui permet de la considérer à la réception comme bruitée et modulée en QPSK.
- Et d'un second moins prioritaire modulant les bits de poids faible, autorisant une démodulation QAM moins robuste (nécessitant un bon rapport C/N) mais à débit plus élevé.
- Les applications peuvent être la diffusion sur un même canal de plusieurs programmes pouvant être reçus dans des conditions de réception différentes, ou d'un même programme avec des caractéristiques de résolution différentes selon les conditions de réception.



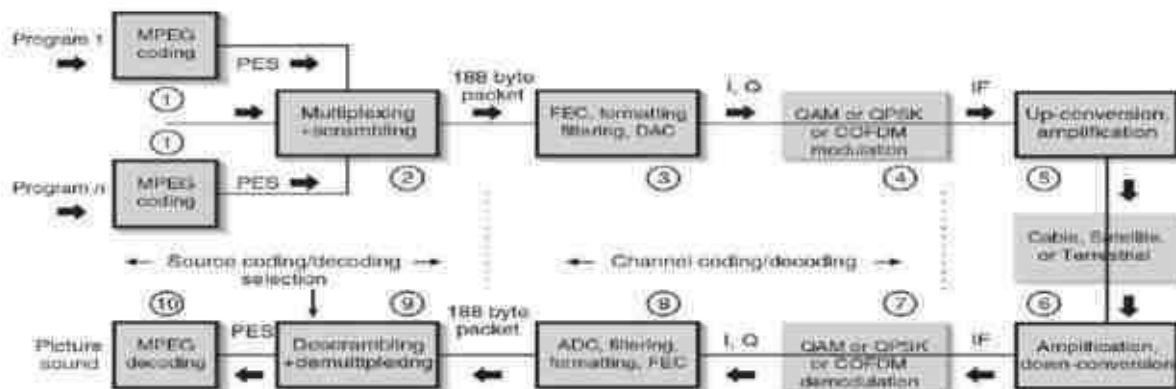
Transmission Hertzienne (DVB-T)

| Paramètres | 8k/8MHz | 8k/7MHz | 2k/8MHz | 2k/7MHz |
|--------------------------------------|--|--------------|------------------|-------------|
| Nombre total de porteuses | 6817 (de 0 à 6816) | | 1705 (0 to 1704) | |
| Porteuses utiles (données) | 6048 | | 1512 | |
| Porteuses pilotes dispersées | 524 | | 131 | |
| Porteuses pilotes continues | 177 | | 45 | |
| Porteuses de signalisation (TPS) | 68 | | 17 | |
| Durée «utile» du symbole (T_s) | 896 μ s | 1024 μ s | 224 μ s | 256 μ s |
| Espacement des porteuses ($1/T_s$) | 1116,071 Hz | 976,656 Hz | 4464,286 Hz | 3906,25 Hz |
| Ecart entre porteuses extrêmes | 7,61 MHz | 6,66 MHz | 7,61 MHz | 6,66 MHz |
| Intervalle de garde (Δ) | $T_s/4$, $T_s/8$, $T_s/16$, $T_s/32$ | | | |
| Modulation des porteuses | QPSK, 16-QAM ou 64 QAM | | | |
| Modes hiérarchiques | $\alpha=1$, ou $\alpha=2$ ou $\alpha=4$ | | | |

Principaux paramètres des signaux terrestres DVB-T (Modulation OFDM 2K ou 8K)

| Paramètre | Câble (DVB-C) | Satellite (DVB-S) | Terrestre (DVB-T) |
|------------------|---------------------------------------|---|-------------------|
| Codage vidéo | MPEG-2 (MP@ML) | | |
| Codage audio | MPEG-1 (couche II) | | |
| Embrouillage | DVB-CSA (Common Scrambling Algorithm) | | |
| Paquet transport | 188 octets (avant FEC) | | |
| Brassage | $1+X^{14}+X^{15}$ | | |
| Codage externe | Reed-Solomon (204,188, T=8) | | |
| Entrelacement | Forney, profondeur 12 | | |
| Codage interne | Absent | Convolutif, Rc=1/2, Rc=2/3, 3/4, 5/6 ou 7/8 | |
| Facteur roll-off | 15% | 35% | N. A |
| Modulation | QAM 16 à 64 | QPSK | OFDM 2K/8K |
| Largeur du canal | 6,7, ou 8MHz | 27~36MHz | 6, 7 ou 8MHz |

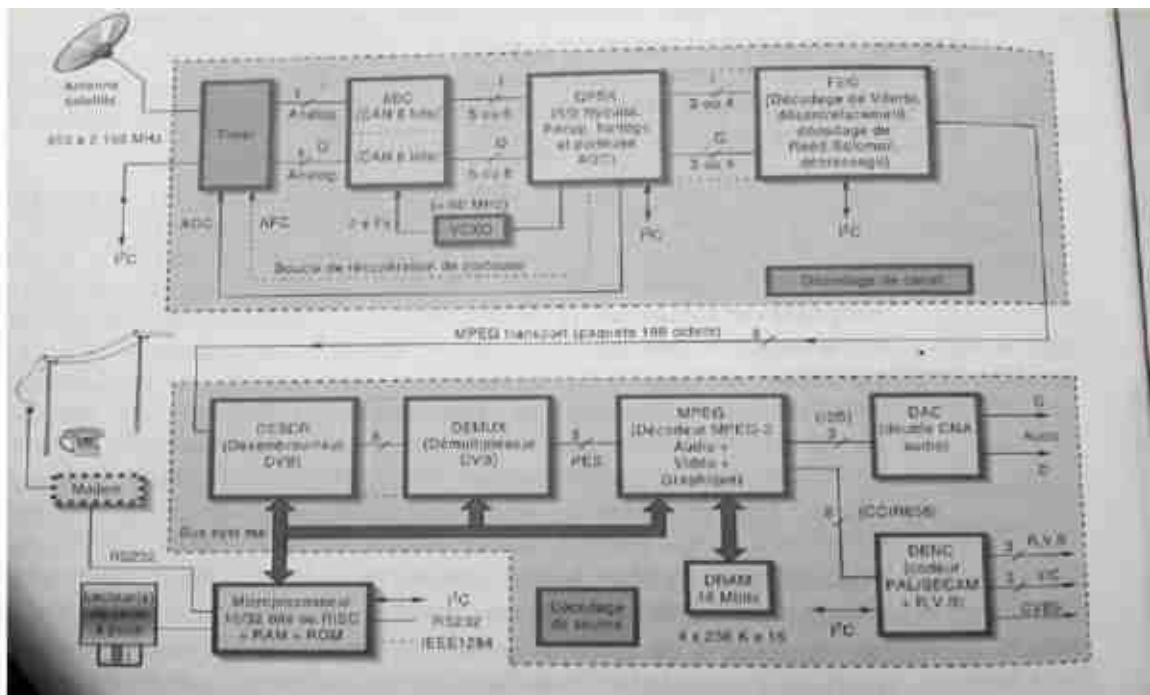
Réception de la télévision numérique



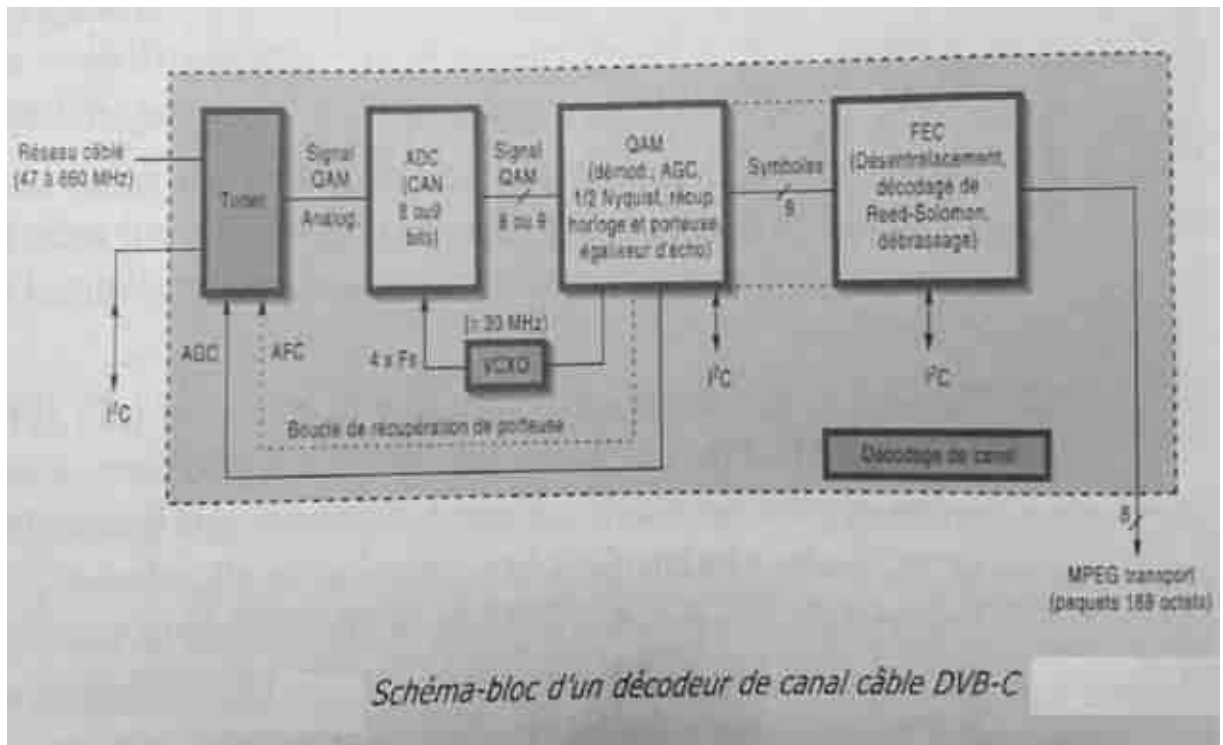
Vue d'ensemble du processus d'émission/réception

1. Les signaux vidéo et audio des programmes à transmettre attaquent autant de codeurs MPEG-2 qui fournissent les PES vidéo et audio à l'entrée du multiplexeur.
2. Ces PES sont utilisés par le multiplexeur pour former des paquets transport de 188 octets, éventuellement embrouillés ainsi que les informations des tables PAT et PMT et celles du guide de programme (EPG).
3. La correction d'erreur RS porte la longueur des paquets à 204 octets ; dans le cas du satellite, le code convolutif multiplie de plus le débit par un facteur 1,14 (rc=7/8) à 2 (rc=1/2) ; un reformatage des données suivi d'un filtrage et d'une conversion D/A fournit les signaux I et Q analogiques .

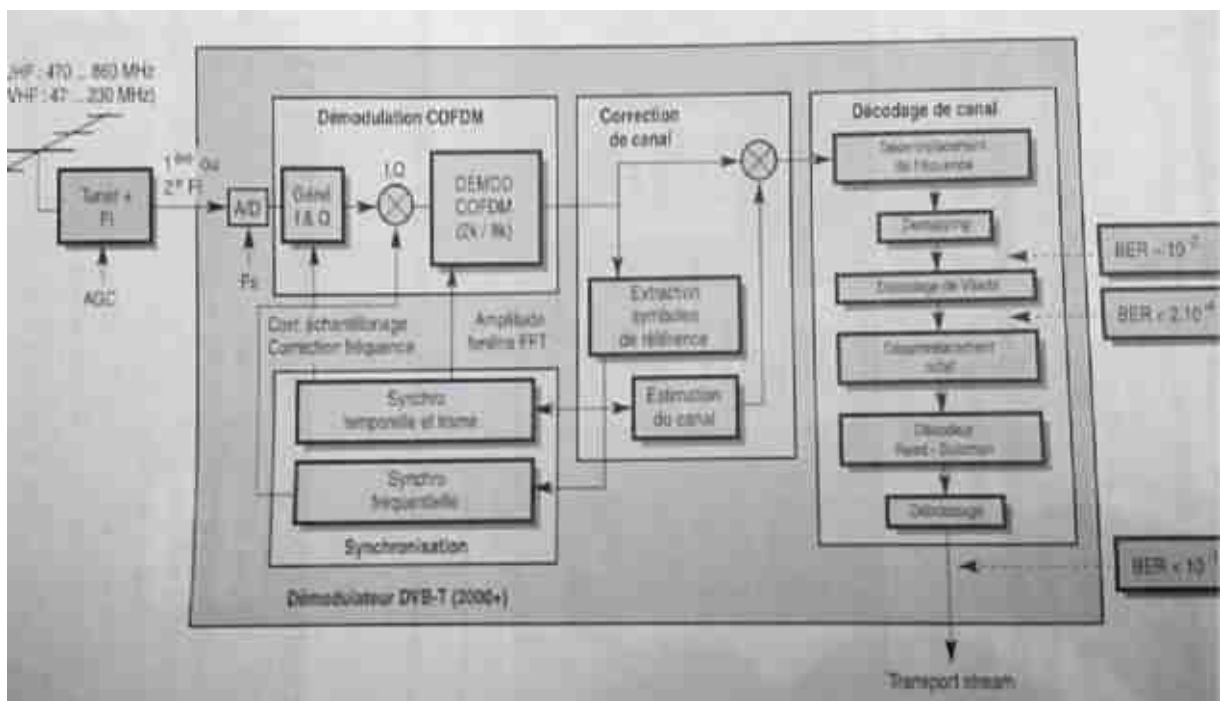
4. I et Q modulent en QPSK (satellite) ou QAM (câble) une porteuse FI (fréquence intermédiaire, en générale de 70 MHz).
5. Cette fréquence intermédiaire est transposée ensuite dans la bande de fréquence appropriée à sa transmission selon le médium utilisé.
6. En cas de réception satellite, un 1^{er} abaissement de fréquence se fait dans la tête de réception de l'antenne qui amène la fréquence du signal entre 950 et 2150 MHz (entré du récepteur), où il subit un deuxième changement de fréquence (après sélection du canal) qui l'amène en général à une FI de 480 MHz.
7. Cette FI démodulée, fournit les vecteurs I et Q analogiques.
8. Après CAN, filtrage et reformatage de I et Q, la correction d'erreurs permet de retrouver les paquets « transport » de 188 octets.
9. Le démultiplexeur sélectionne les PES correspondant au programme choisi ;



Récepteur/Décodeur DVB-S



Récepteur/Décodeur DVB-C



REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BIBLIOGRAPHIE

1. La télévision numérique hertzienne terrestre : quelle place dans la société de l'information?
Gérard POGOREL, ENST
2. DVB_TVNM: Formation Professionnelle : TELECOM PARIS, Robert VALLET
3. DVB (Digital Video Broadcasting): IRIT; Benoît ESCRIG
4. P. Clerc, P. Xavier «Principes fondamentaux des Télécommunications». Ellipses, Paris, 1998.
5. J. B. Hagen. « Comprendre et utiliser l'électronique des hautes-fréquences, De la Galène à la Radioastronomie principes et applications », Publitronelektor, 1999
6. G. Barué «Télécommunications et Infrastructure». Ellipses ,2002.
7. J.C. Joseph « Réception des hautes fréquences ». Publitronelektor. Avril 1999.

Sources Internet :

1. http://www.magoe.net/cours_system_telecom.pdf
2. <http://www.abbessi.tn/blog/wp-content/uploads/2016/10/Chapitre-2-Le-R%C3%A9seau-T%C3%A9l%C3%A9phonique-Commut%C3%A9-RTC.pdf>.
3. <https://cvaridon.fr/introduction%20aux%20telecommunications.pdf>.