

Le signal vidéo numérique

1) Principe de la conversion analogique/numérique	3
A) Le filtrage.....	3
B) L'échantillonnage.....	3
C) La quantification.....	3
D) Le codage.....	3
E) Transmission / enregistrement.....	4
2) Mise en pratique	5
A) Filtrage	6
B) Échantillonnage du signal vidéo.....	7
a) Cas de la luminance	8
b) Cas de la chrominance	8
c) Norme 4:2:2 (CCIR 601)	8
C) La quantification.....	10
a) Principe de base.....	10
b) Bruit de quantification.....	11
D) Codage des échantillons quantifiés.....	12
E) Transmission et enregistrement du signal	12
F) Structure de la ligne numérique	13
3) Calculs de poids et de débits	14
A) Débit total (brut).....	14
B) Débit utile (net)	14
C) Quelques valeurs à connaître.....	15

1) Principe de la conversion analogique/numérique

A) Le filtrage

Avant de passer à l'étape de l'échantillonnage, il est crucial de s'assurer que le signal est bien limité à une bande passante compatible avec la fréquence d'échantillonnage choisie. C'est une opération qui prépare le signal pour que la conversion s'effectue correctement.

On utilise un filtre passe-bas dont la réponse est linéaire avant de chuter brutalement.

B) L'échantillonnage

On prélève ponctuellement des échantillons du signal analogique à intervalles réguliers et suffisamment rapprochés conformément au théorème de Shannon. Les échantillons prélevés décrivent alors la forme du signal point par point.

Il est nécessaire de maintenir la valeur de l'échantillon le temps de procéder à son échantillonnage. Le dispositif prenant en charges ces opérations est appelé échantillonneur-bloqueur.

C) La quantification

La quantification consiste à donner la valeur la plus proche à l'échantillon par rapport au nombre de valeurs disponibles dans l'échelle de quantification.

Cette étape provoque forcément des erreurs d'approximations. C'est l'erreur de quantification, qui a pour répercussion l'apparition d'un bruit de quantification.

D) Le codage

Une fois que les échantillons sont quantifiés, qu'on leur a attribué une valeur, il reste à coder cette valeur afin de pouvoir l'exploiter facilement lors des étapes de traitement numérique.

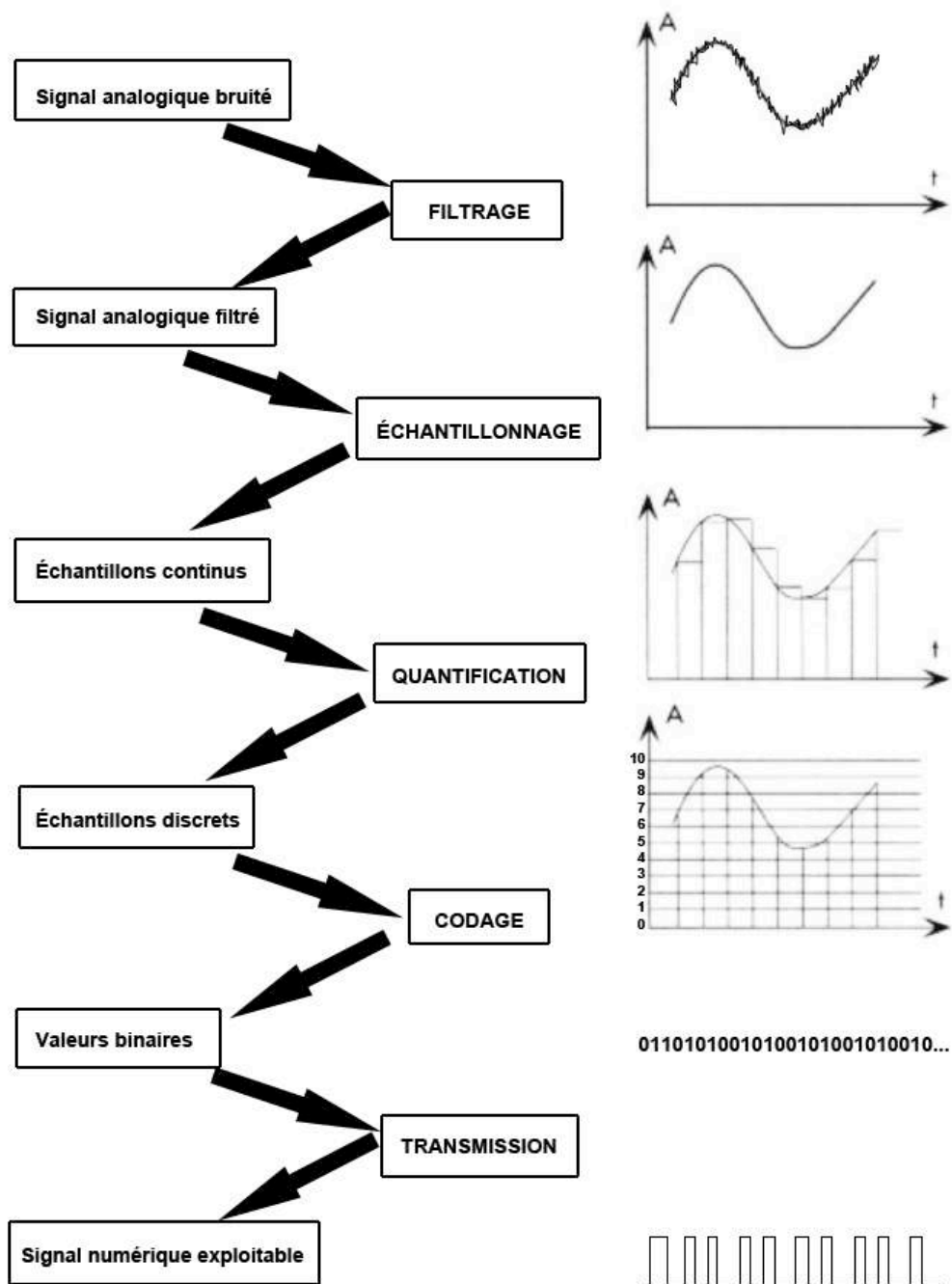
Le plus souvent le codage s'effectue sous forme binaire, mais il existe des variantes dans des cas particuliers.

E) Transmission / enregistrement

Le signal analogique étant numérisé, il reste encore à le mettre en forme pour pouvoir utiliser l'information dans de bonnes conditions.

On ajoute un certain nombre d'informations supplémentaires qui permettront de garder les données intactes lors du décodage et de corriger les éventuelles erreurs de transmission. Ces données sont redondantes et accroissent la quantité d'informations.

Une autre étape consiste à modifier la manière dont les données sont codées pour s'adapter un mode de fonctionnement particulier (électrique, optique...).



2) Mise en pratique

Prenons cette image comme référence :



Le modèle RVB décompose chaque pixel en trois sous-pixels colorés.



Ce fonctionnement n'est pas le plus adapté en vidéo.

Il a été décidé de numériser les données communes à tous les signaux vidéo selon la décomposition luminance/chrominance.



En effet la décomposition Luminance/ Chrominance permet d'une part d'assurer une compatibilité avec les systèmes noirs et blancs et permet également de tenir compte de la sensibilité accrue de l'œil vis-à-vis de la luminance par rapport à la chrominance.

On a alors les équations caractéristiques :

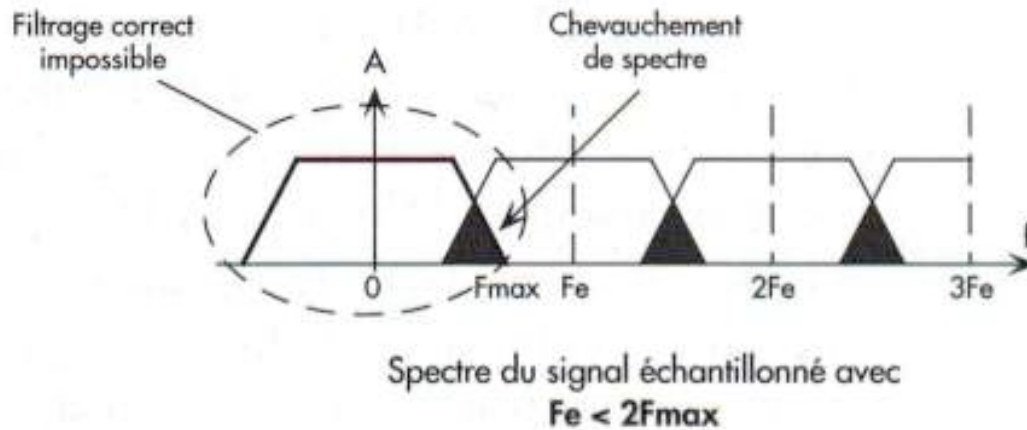
- $Y = 0,6V + 0,3R + 0,1B$
- $D_r = R - Y = 0,7R - 0,6V - 0,1B$
- $D_b = B - Y = 0,9B - 0,6V - 0,3R$

L'image est décomposée en trois plans qui subiront chacun la conversion analogique numérique de manière indépendante.

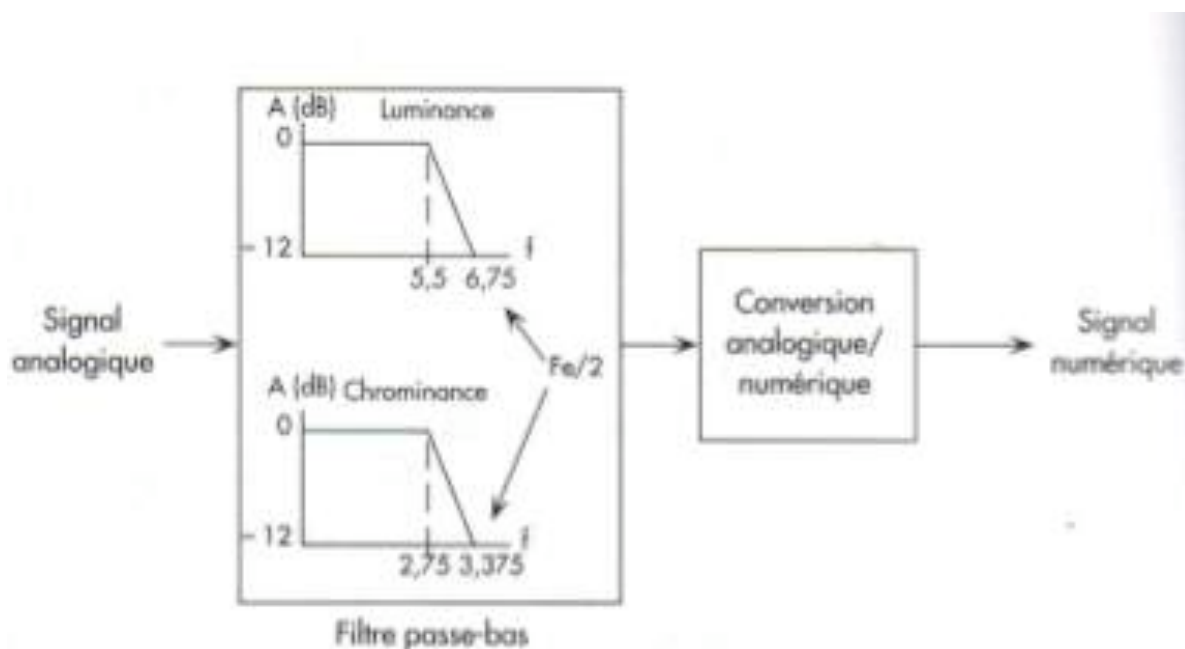
A) Filtrage

La loi de shannon nyquist indique $F_e \geq 2 \times F_{\max}$ du signal à numériser

On admet que pour la vidéo $F_{\max} = 6 \text{ MHz}$ (pour l'audio $F_{\max} = 20 \text{ KHz}$)
Si cette condition n'est pas respectée, il y a apparition de fréquences aberrantes dans le signal du fait du repliement de spectre.

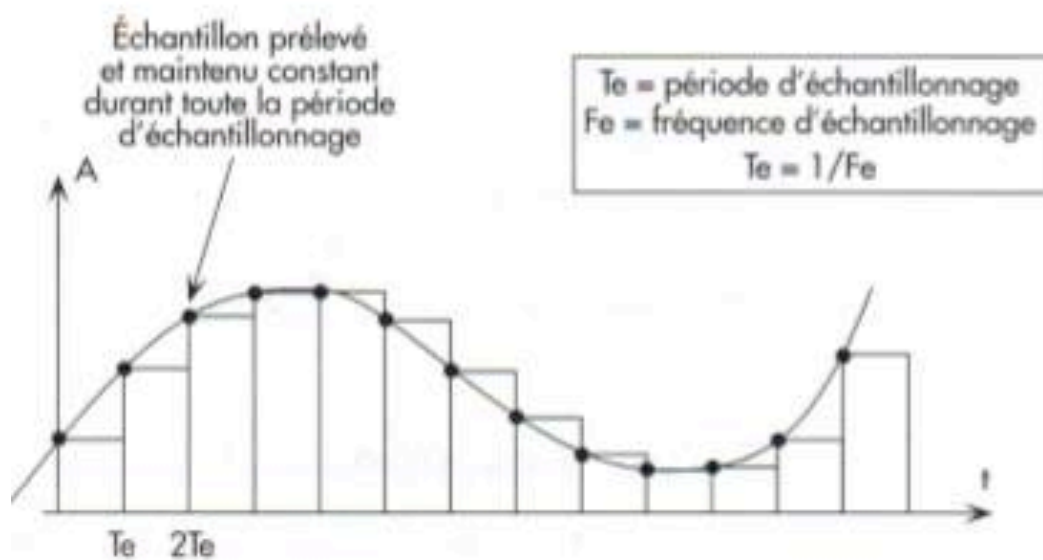
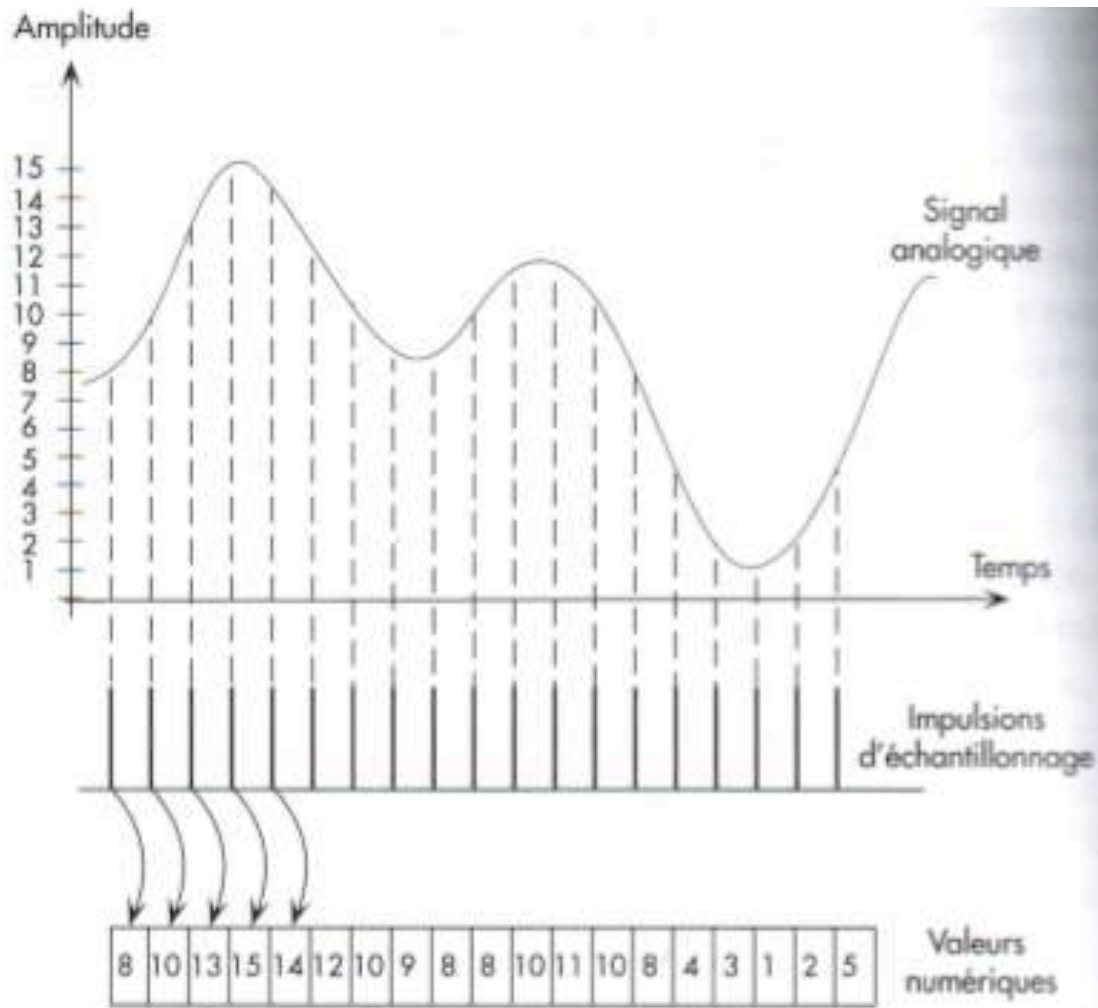


Pour éviter ce problème, on utilise en amont un filtre anti-aliasing (anti-repliement) pour supprimer les fréquences indésirables supérieures à la moitié de la fréquence d'échantillonnage (bruits, parasites etc...)



B) Échantillonnage du signal vidéo

On effectue un découpage du signal analogique à intervalles régulier. La valeur obtenue est alors bloquée le temps de la quantifier.



a) Cas de la luminance

En 625 lignes et 525 lignes (correspondant aux standard analogiques PAL et NTSC), on considère une bande passante de la luminance limitée à 6MHz.

- $625 \times 625 \times 4/3 \times 25 = 13$ millions de points par seconde
- $525 \times 525 \times 4/3 \times 30 = 11$ millions de points par seconde

La fréquence d'échantillonnage standard $F_e(Y) = 13,5$ MHz a été choisie après plusieurs essais de manière à optimiser la qualité de l'échantillonnage et sa mise en œuvre.

Les fréquences lignes respectives PAL et NTSC sont 15625 Hz et 15750 Hz.

$$F_h(50\text{Hz}) = 50/2 \times 625 = 15625 \text{ Hz}$$

$$F_h(60\text{Hz}) = 60/2 \times 525 = 15750 \text{ Hz}$$

La fréquence d'échantillonnage a été définie comme 864 fois et 858 fois la fréquence de ligne. ($13,5 \text{ MHz} = 864 \times 625 \times 50/2 \text{ Hz} = 858 \times 525 \times 60/2 \text{ Hz}$)

Une ligne active numérique contient 720 échantillons. Les 144 autres sont utilisés pour la synchro.

b) Cas de la chrominance

On sous échantillonne le signal de chrominance par rapport à la luminance car l'œil est moins sensible à la couleur. On prélève typiquement deux fois moins d'échantillons de chrominance que de luminance.

La fréquence d'échantillonnage est alors de 6,75 MHz.

- soit 432 et 429 fois la fréquence ligne.

- 360 échantillons par ligne active

c) Norme 4:2:2 (CCIR 601)

Les échantillons de chrominance étant moins nombreux, on a choisi de sélectionner les échantillons de la manière suivante :

- Le premier pixel porte les valeurs de luminance et de chrominance
- Le second pixel porte seulement la valeur de luminance
- Ce motif se répète sur chaque ligne

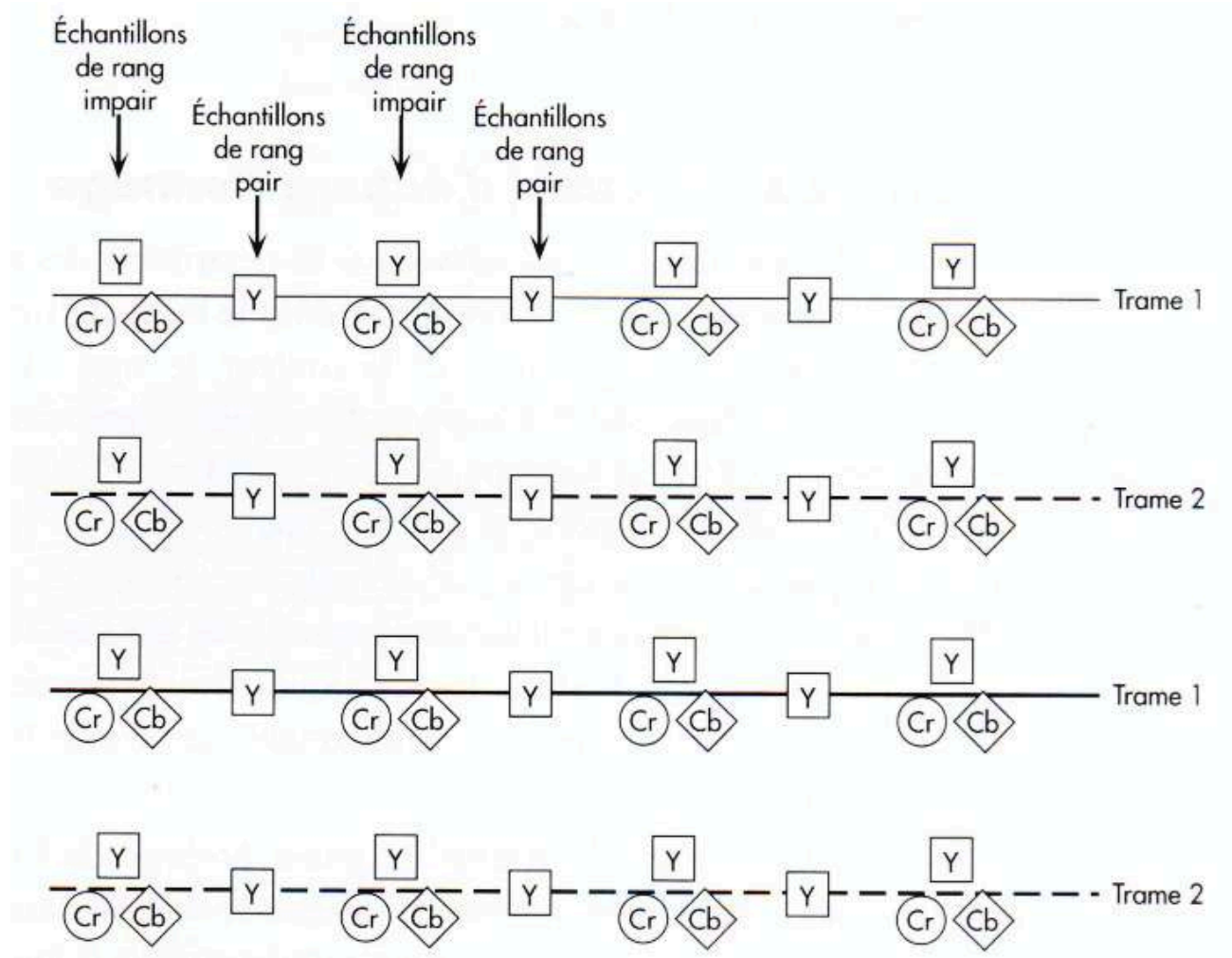
Les valeurs manquantes seront par la suite interpolées à partir des valeurs voisines lors de l'affichage.

Il existe de nombreuses autres combinaisons possibles, mais celle-ci à l'avantage de donner de bons résultats visuellement tout en étant assez simple à mettre en œuvre au niveau des convertisseurs.

Ce système est appelé norme 4:2:2 ou CCIR 601. C'est le cas le plus courant.

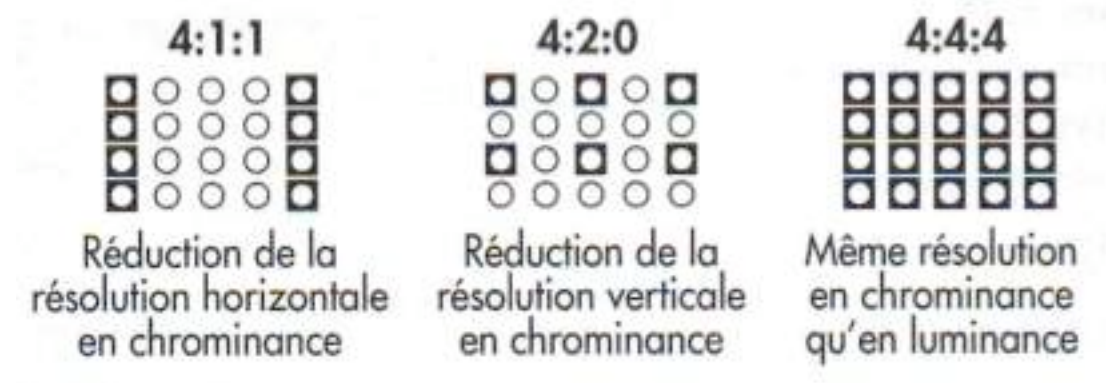


- Le premier chiffre indique la fréquence d'échantillonnage de la luminance.
- Le deuxième chiffre indique la fréquence d'échantillonnage de la chrominance sur les lignes impaires.
- Le troisième chiffre indique la fréquence d'échantillonnage de la chrominance sur les lignes paires.



On peut sous échantillonner la chrominance de manière à réduire encore la quantité d'information ou au contraire sur-échantillonner la chrominance en vue de traitements spécifiques (post-production).

On peut alors choisir une norme d'échantillonnage différente :



Cela correspond aux normes 4:2:0 (sous-échantillonnage vertical), 4:1:1 (sous-échantillonnage horizontal) et 4:4:4

Il existe également des signaux contenant un signal de découpage, c'est à dire un signal utilisé à des fins d'incrustation en chroma-key ou pour la correction colorimétrique.

On parle alors de signal 4:2:2:4 ou 4:4:4:4

De manière générale, on peut retenir que les coefficients correspondent aux fréquences d'échantillonnages suivantes :

- 4 pour 13,5 Mhz
- 2 pour 6,75 Mhz
- 1 pour 3,375 Mhz (appelée fréquence unitaire)

C) La quantification

a) Principe de base

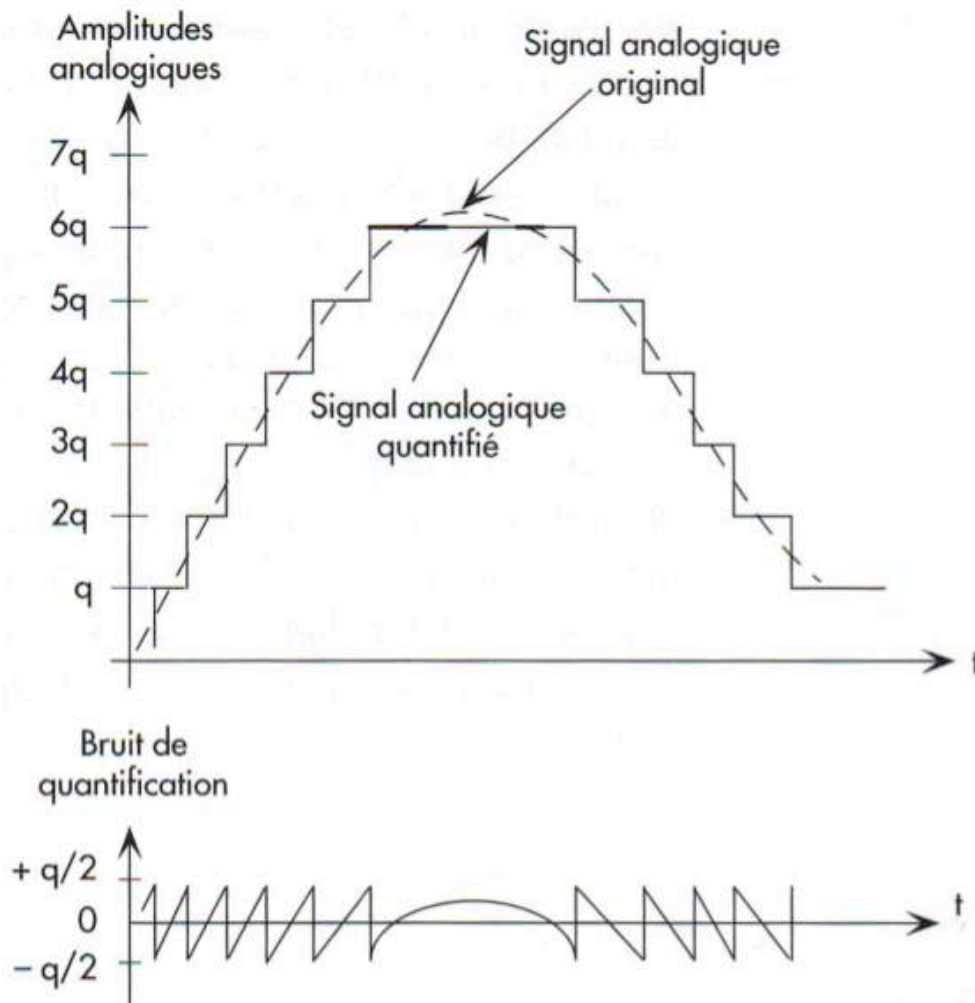
On établit une correspondance entre l'amplitude discrète mesurée lors de l'échantillonnage et la plus proche des valeurs codée sur n bits.

Rappel : en binaire on a 2^n combinaisons possibles pour un codage sur n bits.

Cela implique inévitablement des imprécisions. La précision du signal dépendra donc du nombre de bits alloués à la quantification.

Si le pas de quantification vaut q, alors l'erreur de quantification est au maximum de $q/2$ (approximation de la valeur discrète).

Ces imprécisions se traduisent par l'apparition d'un bruit de quantification.



b) Bruit de quantification

Le rapport signal sur bruit en télévision peut-être calculé de manière approximative par la relation suivante : $S/N = 6 \cdot n + 2$ (n représente la nombre de bits alloués pour le codage de l'information.)

On en déduit que chaque bit supplémentaire améliore le rapport signal/bruit de 6 dB.

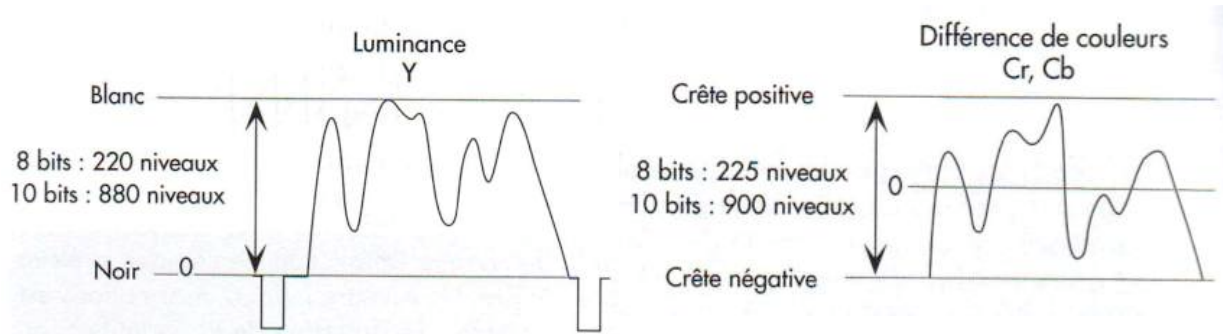
- Pour 8 bits = $6 \times 8 + 2 = 50$ dB
- Pour 10 bits = $6 \times 10 + 2 = 62$ dB

On utilisait habituellement une quantification de 8 bits soit 256 niveaux disponibles (En pratique seuls 220 niveaux sont utiles). L'œil est capable de percevoir environ 200 nuances de dégradé (dépend des conditions).

On est passé rapidement à 10 bits pour avoir un S/N adapté aux nouvelles caméras et aux exigences de tournage de studio et limiter les imprécisions successives.

On dispose alors de 1024 niveaux différents sur l'échelle de quantification (880 utiles)

On obtient un résultat 4 fois plus précis qu'en 8 bits pour seulement 25% de place en plus.



D) Codage des échantillons quantifiés

On utilise le codage binaire pour transformer les valeurs issues de la quantification. Ce codage s'appuie sur une représentation à 2 symboles, 0 ou 1 dans laquelle on associe les symboles en leur attribuant un "poids" en fonction des puissances de 2.

Cependant le codage de la chrominance ne peut se satisfaire de cette technique puisque les valeurs peuvent être négatives.

On utilise alors un codage en binaire décalé.

On ajoute une valeur fixe (2^{N-1}) au nombre qui doit être codé (ce qui rend la somme positive). Il reste alors à appliquer le principe de codage d'un entier naturel positif.

Exemple :

Le codage de 6 pour un décalage sur 4bits

Le décalage sera de 2^3 .

$$\begin{aligned} 6 + 2^3 &= 6 + 8 = 14 = 8 + 4 + 2 \\ &= 2^3 \times 1 + 2^2 \times 1 + 2^1 \times 1 + 2^0 \times 1 \end{aligned}$$

$$\text{donc } 6(10) = 1110_{(2d4)}$$

Le décalage consiste en fait à décaler le point 0 vers les valeurs négatives. Le but étant alors de manipuler uniquement des valeurs positives.

E) Transmission et enregistrement du signal

Les problèmes rencontrés sont strictement les mêmes que pour l'audio. Les techniques de corrections d'erreur, d'entrelacement des données et de codage de canal sont alors mises en œuvre de la même manière.

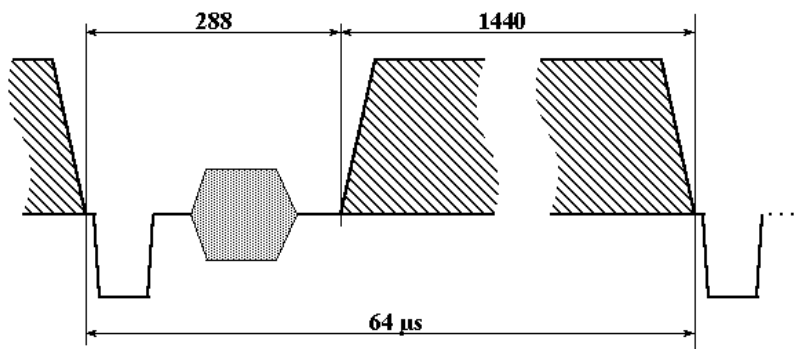
F) Structure de la ligne numérique

Les lignes analogiques des systèmes à 625 et 525 lignes sont de durées légèrement différentes. Ainsi, la capacité d'une ligne active doit être suffisante pour contenir un nombre suffisant d'échantillons afin de couvrir les lignes des deux systèmes.

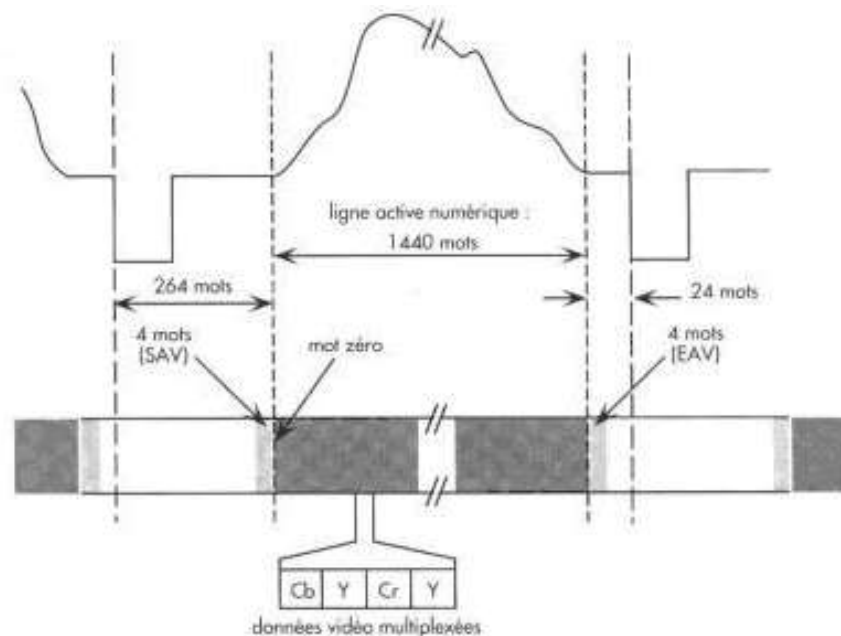
La norme prévoit 720 échantillons pour le signal de luminance et 360 pour les signaux de chrominance.

Ceci est suffisant car les lignes actives analogiques les plus longues sont celles des systèmes à 525 lignes qui nécessitent 710 échantillons pour être totalement analysées.

La ligne active 4:2:2 est donc codée sur 1 440 mots (720 + 360 + 360). Les signaux permettant de positionner la ligne active numérique sont codés respectivement sur 288 mots pour les systèmes à 625 lignes et sur 276 pour les systèmes à 525 lignes.



Le front avant des impulsions de synchronisation ligne (SAV = Start of Active Video) détermine l'arrivée du premier échantillon et la référence de temps pour la conversion analogique-numérique. Le front arrière (EAV = End of Active Video) en détermine la fin.



....00100101100101001001001010011100011010100110010....

3) Calculs de poids et de débits

Il est à présent possible de calculer le poids des informations numérisées. On considérera également le débit en le rapprochant de la durée considérée.

$$\text{Débit} = \text{Poids} / \text{Temps}$$

A) Débit total (brut)

Calculons le poids total d'une seconde de vidéo au format Pal échantillonnée en 4:2:2 sur 10 bits.

- La chrominance est échantillonnée à 13,5 Mhz, on a donc 13,5 millions d'échantillons par seconde.
- Pour la chrominance, il faut considérer chacun des signaux Dr et Db échantillonnés respectivement à 6,75 Mhz soit 13,5 millions d'échantillons par seconde pour la chrominance.
- Chacun des échantillons (luminance et chrominance) est quantifié sur 10 bits. On aura donc $(13,5 + 6,75 + 6,75) \times 10 = 270\,000\,000$ bits/s soit **270 Mb/s**

Nous venons de calculer le débit total, ou débit brut pour cette vidéo (270 Mb/s). Cela correspond à l'intégralité du signal utile pour la vidéo, pour l'audio et pour la synchronisation. C'est la quantité de données nécessaire pour transférer le signal dans de bonnes conditions.

B) Débit utile (net)

Calculons à présent le poids de la partie utile pour la vidéo.

- Les dimensions utiles de l'image sont : $720 \times 576 = 414\,720$ pixels utiles. On aura donc 414720 échantillons utiles de luminance.
- Pour Db, comme pour Dr on aura $360 \times 576 = 207\,360$ échantillons soit 414 720 échantillons utiles pour la chrominance.
- Chaque image comporte donc $414\,720 + 414\,720 = 829\,440$ échantillons utiles soit un poids de $829\,440 \times 10 = 8\,294\,400$ bits par image.
- Les images défilant à raison de 25 images par seconde, on peut calculer le poids utile pour une seconde : $8\,294\,400 \times 25 = 207\,360\,000$ bits/s soit **207 Mb/s**

Ce débit permet de calculer le poids d'un fichier débarrassé des données de synchronisation analogique qui sont remplacées par des motifs beaucoup plus court en numérique.

C) Quelques valeurs à connaître...

Suivant les recommandations de la norme 4 :2 :2 (CCIR 601)

	Luminance Y	Chrominance Cr ---Cb
Bande passante	5,75 MHz	2,75 MHz
Fréquence d'échantillonnage	13,5 MHz	6,75 MHz
Nombre d'échantillon par ligne	864	432 ---432
Nombre d'échantillons utiles par ligne	720	360 ---360
Structure d'échantillonnage	Structure orthogonale sur deux trames entrelacées	
Quantification 8 bits	220 niveaux utiles	225 niveaux utiles
Quantification 10 bits	880 niveaux utiles	900 niveaux utiles
Rapport signal sur bruit	qualité 8 bits : 58 dB qualité 10 bits : 70 dB	
Codage	Binaire	Binaire décalé
Débit brut	8 bits : 216 Mb/s 10 bits : 270 Mb/s	
Débit net	8 bits : 166 Mb/s 10 bits : 207 Mb/s	