

CHAPITRE 2

NUMERISATION DU SIGNAL VIDEO

2.1. Signal analogique et signal numérique : quelles différences ?

2.1.1. Le signal analogique

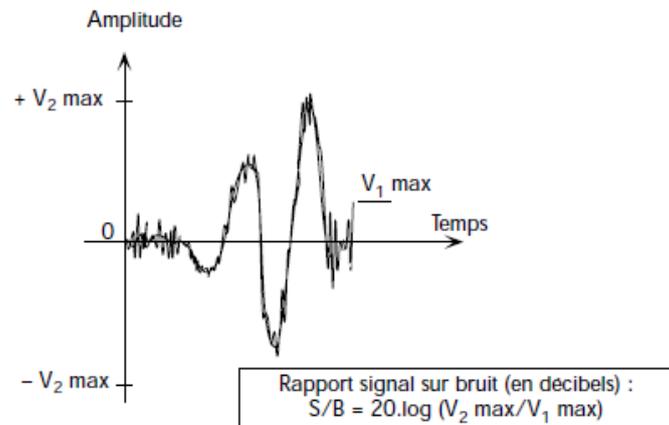


Figure 2.1. Exemple d'un signal analogique.

- Le signal analogique est un signal dont la valeur varie avec le temps de manière continue.
- Il est sujet à de la distorsion lors de son traitement et est souvent dégradé par une composante de bruit venant s'ajouter à lui au cours de son enregistrement ou de sa diffusion.
- Le signal analogique est celui qui représente le plus naturellement et le plus fidèlement les variations d'un phénomène physique.

Exemple :

1. Le microphone transforme en variations de tension les variations de pression acoustique qu'il capte.
2. La caméra fournit, quant à elle, un signal électrique issu de l'analyse séquentielle des variations d'intensité lumineuse recueillies par l'objectif.

Dans ces deux cas, une grandeur physique est traduite en un signal analogique dont l'amplitude instantanée porte l'information. Une fois généré par les capteurs adéquats, le signal analogique doit être traité avant d'être diffusé et/ou stocké.

2.1.2. Le signal Numérique

- Le signal numérique est un signal discontinu dans le temps.
- Il représente la valeur d'une grandeur physique à un instant donné.
- Le signal numérique est particulièrement stable.
- Il se prête parfaitement aux traitements les plus complexes et aux copies cumulatives au travers desquels l'information qu'il porte est totalement préservée.
- Le signal numérique n'a pas de nature physique.
- Il se présente sous la forme d'un message composé d'une suite de symboles, et est donc discontinu, le passage d'un symbole à un autre s'effectuant par une transition brutale.
- Basé sur le langage binaire, le signal numérique est constitué d'une suite de 0 et de 1, traduisant respectivement un niveau bas et un niveau haut du signal électrique.
- L'avantage fondamental du numérique réside dans le fait qu'il autorise un nombre de traitements complexes très élevé sans que soit affectée l'intégrité de l'information.

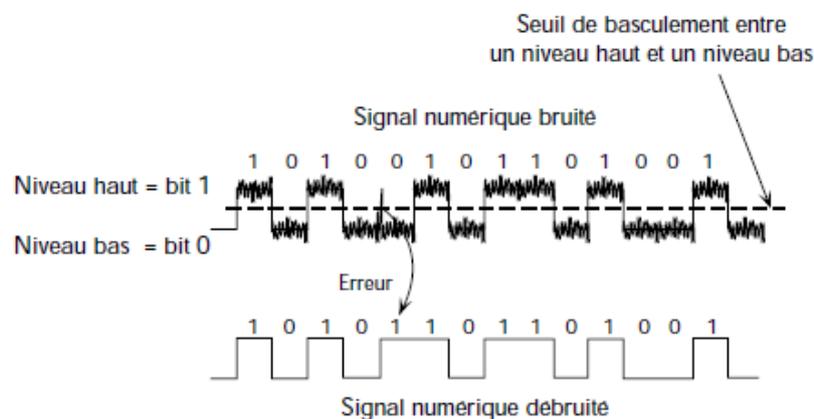


Figure 2.2. Exemple d'un signal numérique.

2.2. Principe de la conversion analogique/numérique

Les étapes principales de la conversion analogique numérique sont les suivantes :

2.2.1. Échantillonnage

L'amplitude du signal analogique est prélevée ponctuellement à des instants réguliers et suffisamment rapprochés. Les échantillons de tension ainsi récoltés décrivent la forme du signal point par point.

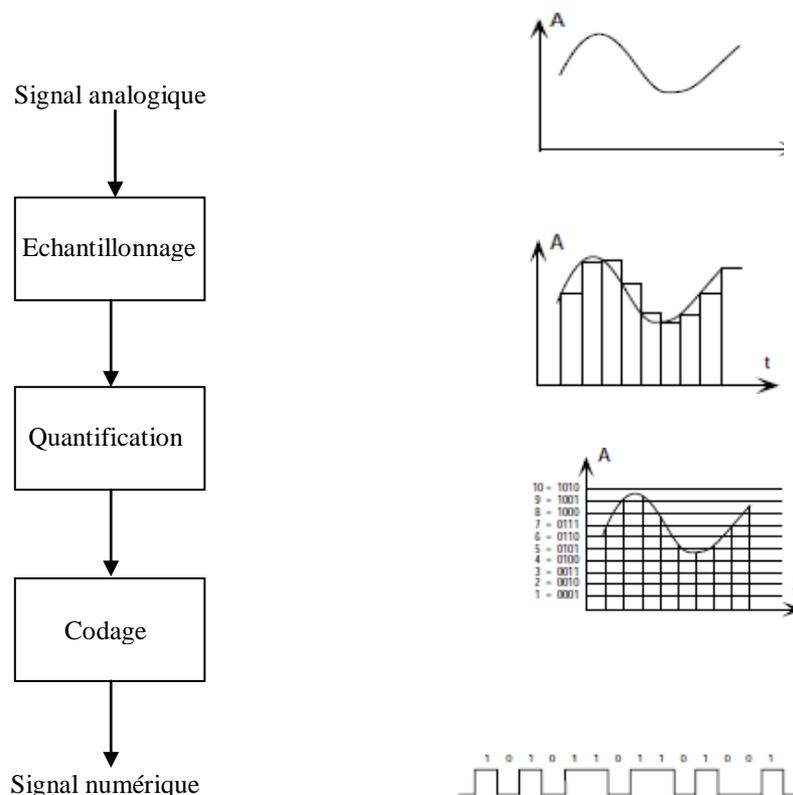


Figure 2.3. Les principales phases de la conversion analogique numérique.

2.2.2. Quantification

C'est la seconde étape de la numérisation du signal. Il s'agit de remplacer la valeur de chaque échantillon par un nombre entier de longueur fixe, codé en base 2. Cette base 2 est très facile à manipuler à l'aide d'un signal électrique à deux états, puisque un « 1 » peut correspondre à une tension positive de 5 V, par exemple, et un « 0 », à une tension nulle.

2.2.3. Codage

Dans cette étape le flux de données est mis en forme en vue de son stockage ou de sa transmission. Par ailleurs, pour conférer aux informations une bonne immunité face aux perturbations amenées par le support d'enregistrement ou de transmission, il est nécessaire de leur adjoindre un certain nombre de données supplémentaires qui permettront, lors du décodage, de détecter et corriger les erreurs introduites

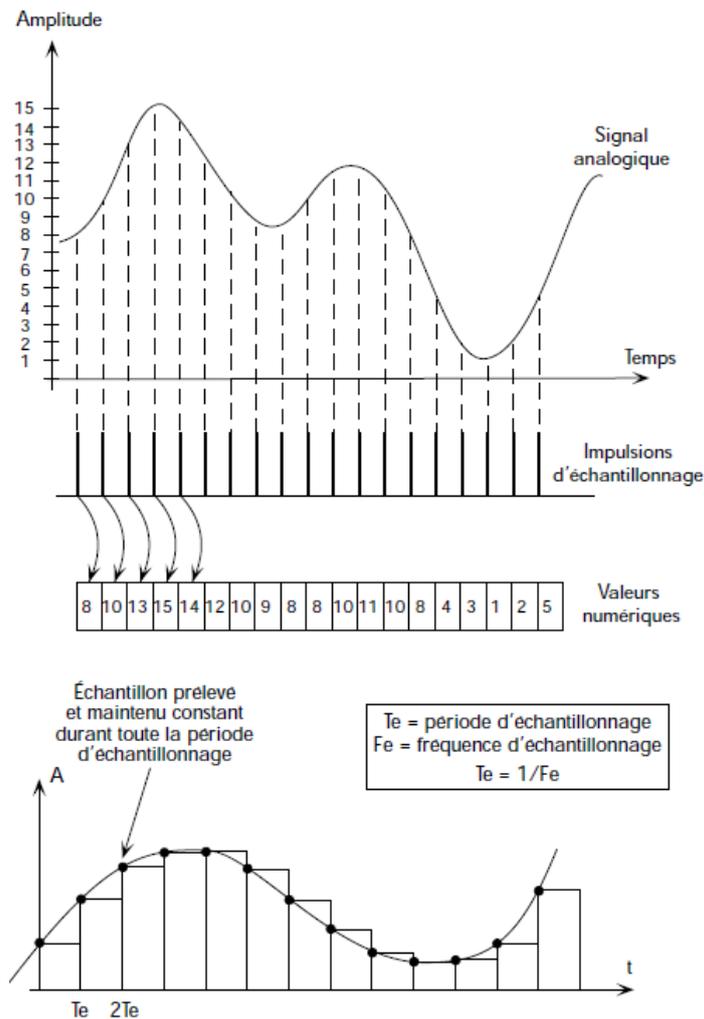


Figure 2.4. Principe d'échantillonnage d'un signal analogique.

2.3. La numérisation du signal vidéo

Pour supprimer les différents systèmes de couleurs liés aux codages composites et favoriser l'échange international des programmes, il a été décidé de numériser des données communes à tous les pays. C'est donc logiquement la numérisation des composantes Y , D_r ,

D_b qui a été retenue. Selon la convention adoptée, les composantes de couleur D_r, D_b numérisées deviennent C_r, C_b .

2.3.1. Le principe d'échantillonnage

La figure 2.4 représente le principe d'échantillonnage d'un signal analogique.

2.3.2. La loi de Shannon et Nyquist

Pour échantillonner un signal en préservant toute son information, il est nécessaire de connaître au préalable la fréquence la plus élevée à laquelle il est susceptible de varier. On admet que cette fréquence maximale est de 6 MHz pour la vidéo et 20 kHz pour l'audio.

Une loi mathématique, établie par Shannon et Nyquist, permet de déterminer la fréquence d'échantillonnage minimale à choisir pour ne pas manquer la plus petite (en termes de durée) des informations à saisir.

Un signal dont le spectre est limité à la fréquence f_{\max} est entièrement déterminé par la suite complète de ses échantillons prélevés à des intervalles de temps réguliers de valeur :

$$T_e = \frac{1}{2.f_{\max}} \quad (2.1)$$

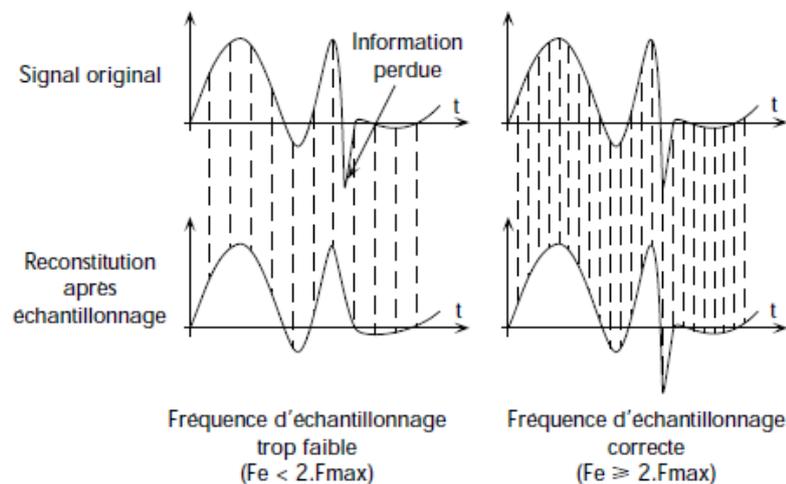


Figure 2.5. La reconstitution après échantillonnage.

Le signal échantillonné sera la représentation exacte du signal original si la fréquence d'échantillonnage f_e est au moins supérieure à deux fois la fréquence maximale du signal :

$$f_e = 2 \cdot f_{max} \quad (2.2)$$

Si ce critère n'est pas vérifié, les composantes spectrales répétitives du signal échantillonné ne sont pas assez espacées et se chevauchent.

Si la fréquence d'échantillonnage est trop faible, les variations rapides du signal original ne sont pas représentées par la suite d'échantillons prélevés.

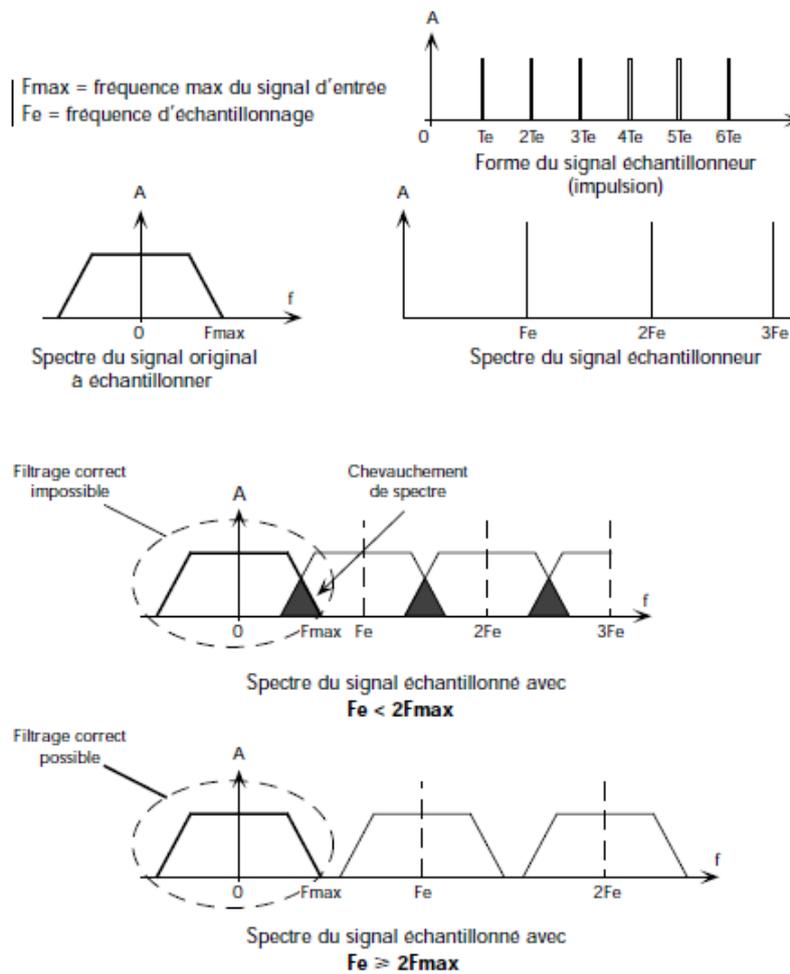


Figure 2.6. Le spectre du signal échantillonné.

Le spectre du signal échantillonné est composé d'une succession de translations du spectre original à des fréquences multiples de la fréquence d'échantillonnage ($f_e, 2f_e, 3f_e, \dots$). Pour que les répétitions spectrales soient disjointes, il faut que $f_e = 2 \cdot f_{max}$.

Le signal initial peut alors être reconstitué par un filtrage passe-bas supprimant, sur le signal échantillonné, toutes les fréquences supérieures à f_{max} .

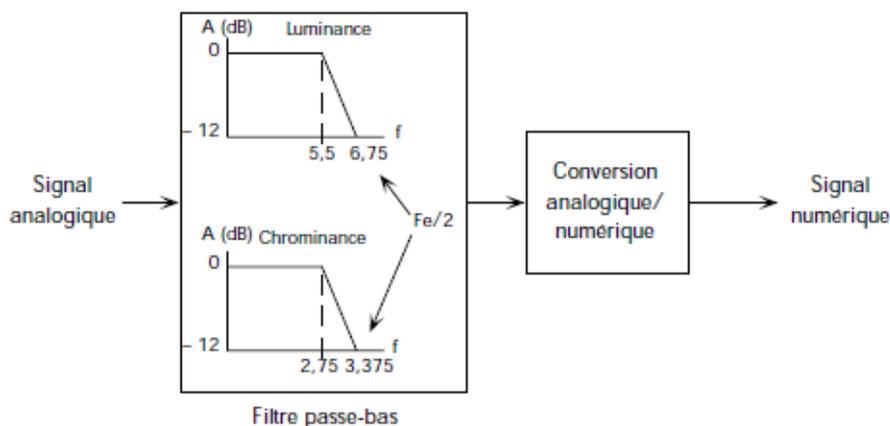


Figure 2.7. Filtrage anti-repliement.

Le filtrage anti-repliement a pour rôle de supprimer, avant l'échantillonnage, les fréquences du signal vidéo supérieures à la moitié de la fréquence d'échantillonnage.

2.3.3. Les fréquences d'échantillonnage du signal vidéo

2.3.3.1. La luminance

Les fréquences d'échantillonnage des composantes du signal vidéo ont été choisies communes aux systèmes à 625 et 525 lignes, de manière à s'affranchir définitivement des problèmes d'incompatibilité entre les différentes zones géographiques du globe.

L'information de luminance dispose d'une bande passante de 6 MHz. Celle-ci est nominalement plate jusqu'à 5,5 MHz, avec un affaiblissement d'au moins 12 dB à 6,75 MHz. La fréquence d'échantillonnage du signal vidéo doit donc, pour respecter le critère de Shannon-Nyquist, être au moins égale à 12 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, soit respectivement 15 625 Hz et 15 734,25 Hz. Plusieurs essais ont été effectués avec des fréquences allant de 12 MHz à 14,3 MHz. Les paramètres étudiés ont principalement été la qualité de l'image avant et après traitement, le rapport qualité/coût, la capacité potentielle des magnétoscopes numériques, ainsi que la réduction du débit binaire. C'est ainsi qu'a été

adoptée, comme norme mondiale, une fréquence d'échantillonnage du signal de luminance égale à :

$$f_e(Y) = 13,5 \text{ MHz}$$

Cette valeur est égale à 864 fois la fréquence ligne des systèmes à 625 lignes et à 858 fois celle des systèmes à 525 lignes. Dans les deux cas, une ligne active numérique renferme 720 échantillons de luminance.

2.3.3.2. La chrominance

Les signaux de différence de couleurs ont une bande passante nominalement plate jusqu'à 2,75 MHz, avec un affaiblissement d'au moins 12 dB à 3,375 MHz. Ils sont échantillonnés à une fréquence deux fois plus faible que le signal de luminance :

$$f_e(C_r) = f_e(C_b) = 6,75 \text{ MHz.}$$

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. Compte tenu des filtres réalisables, les bandes passantes équivalentes sont de 5,75 MHz pour Y et de 2,75 MHz pour C_r, C_b ; elles sont plus élevées que celles fixées des standards analogiques composites et composantes (surtout en chrominance).

2.4. Les normes

Un tel échantillonnage, qui détermine une structure fixe des échantillons par rapport à l'image à la fois d'une ligne à l'autre et d'une image à l'autre, est dit orthogonal ; les échantillons qui forment les pixels de l'image, se situent sur une grille rectangulaire.

- Le nombre de lignes utiles est 480 lignes pour le standard 525 et 576 pour le standard 625.
- La partie utile de la ligne compte 720 échantillons dans les deux standards.

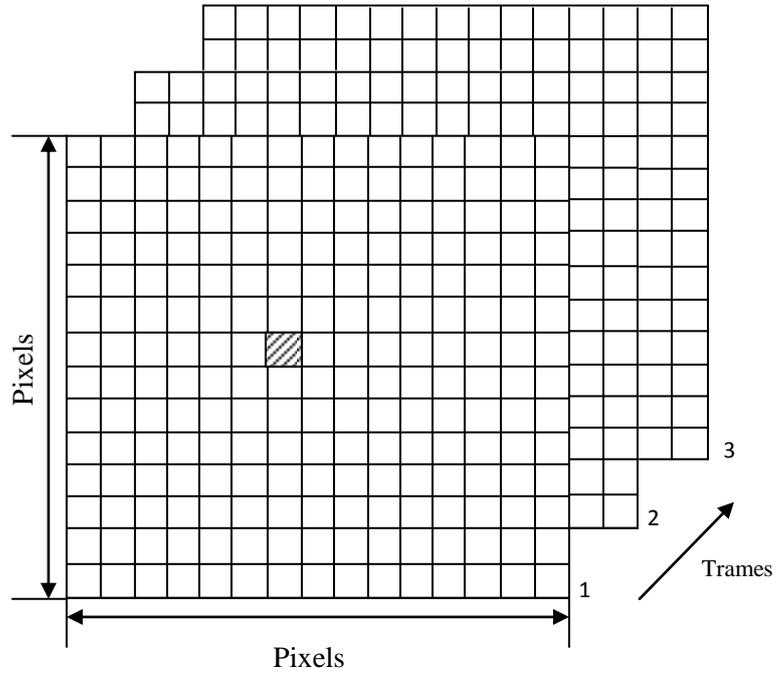


Figure 2.8. Structure d'échantillonnage rectangulaire.

2.4.1. La norme 4:2:2

La recommandation CCIR 601, établie en 1982 définit pour ces applications les conditions de numérisation des signaux vidéo, basée sur un signal YC_bC_r au format dit (4 échantillons Y pour 2 échantillons C_b et 2 échantillons C_r) avec une numérisation sur 8 bits (extension à 10 bits pour les applications les plus exigeantes)

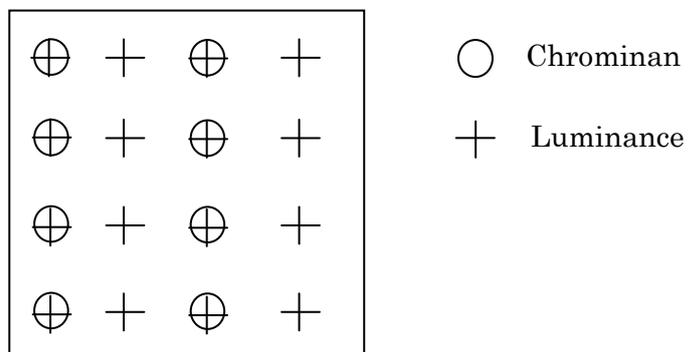


Figure 2.9. Position des échantillons dans le format 4 :2 :2.

Quel que soit le standard de balayage :

$$f_e(Y) = 13,5 \text{ MHz.}$$

$$f_e(C_r) = f_e(C_b) = 6,75 \text{ MHz.}$$

Les signaux C_b et C_r étant disponibles simultanément à chaque ligne, la définition verticale est identique pour la luminance et la chrominance.

Le débit brut résultant est donc 216 Mbits/s et le débit utile est 166 Mbits/s.

Le 4:2:2 est le niveau de codage principal de studio, utilisé dans l'ensemble des équipements numériques, ainsi que par les formats d'enregistrement haut de gamme.

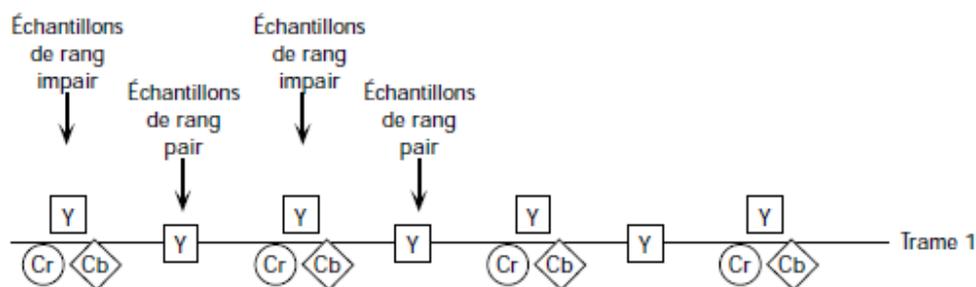


Figure 2.10. L'emplacement des échantillons dans la norme 4 :2 :2.

2.3.3. La norme 4:2:0

Pour les applications moins exigeantes en résolution, et visant des débits de transmission aussi faible que possibles, certains sous produits du format 4 :2 :2 ont été définis.

La luminance est échantillonnée à 13,5 MHz, les composantes de couleurs sont échantillonnées à 6,75 MHz, mais alternativement une ligne sur deux.

Le 4:2:0 utilise la même chrominance pour colorier deux lignes successives, de manière à réduire le débit et la quantité de mémoire dans les circuits de traitement tout en procurant une résolution chrominance verticale équivalente à la résolution horizontale.

Le 4:2:0 est utilisé par les systèmes de diffusion numérique, le DVD, ainsi que par le DV et le DVCAM (en 625/50).

Le débit brut est 168 Mbits/s et le débit utile est 124 Mbits/s

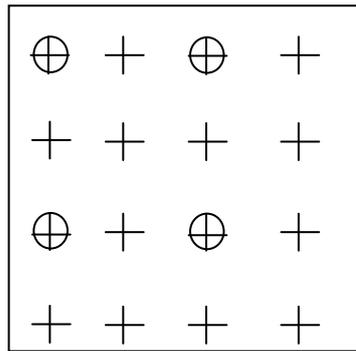


Figure 2.11. Position des échantillons dans le format 4 :2 :0.

2.3.4. La norme 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. Le 4:1:1 est notamment utilisé par le format d'enregistrement DVCPRO25.

Le débit brut est 168 Mbits/s et le débit utile est 124 Mbits/s

Le 4 :1 :1 réduit la résolution horizontale en chrominance

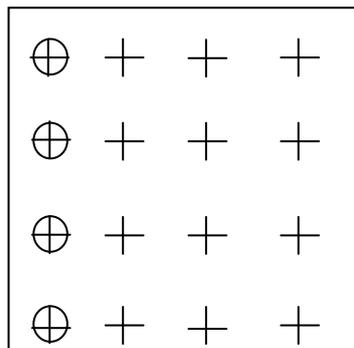


Figure 2.12. Position des échantillons dans le format 4 :1 :1.

2.3.5. La norme 4:4:4

La luminance et les composantes de couleurs sont échantillonnées à la même fréquence de 13,5 MHz, sur toutes les lignes. Le 4:4:4 notamment est utilisé par les stations informatiques de retouche et de compositing.

Le débit brut est 324 Mbits/s et le débit utile est 248,8 Mbits/s

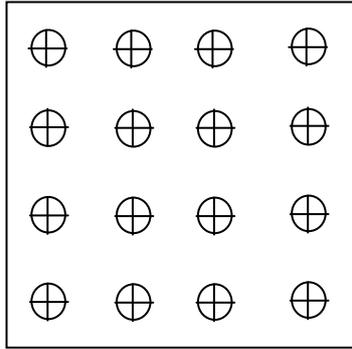


Figure 2.13. Position des échantillons dans le format 4 :4 :4.

« 4 » = 13,5 MHz

« 2 » = 6,75 MHz

« 1 » = 3,375 MHz

2.5. La quantification

2.5.1. Principe de base

- La quantification est la deuxième grande étape du processus de conversion analogique/numérique.
- Elle a pour but de faire correspondre à chaque amplitude discrète mesurée un nombre entier exprimé en base 2, dans laquelle n chiffres permettent de coder $N = 2^n$ valeurs distinctes.
- Le signal analogique, qui peut prendre une infinité de valeurs, est converti en un signal constitué d'un nombre fini (N) de valeurs numériques codées sur n bits.
- On définit une échelle constituée d'un nombre fini d'intervalles q appelés pas de quantification ou échelons de quantification, ou encore quantums.
- L'expression mathématique du quantum en fonction de l'amplitude maximale du signal d'entrée ($V_{max}-V_{min}$) et du nombre de bits de quantification n est la suivante :

$$q = \frac{V_{max} - V_{min}}{2^n} \quad (2.3)$$

- La précision de la quantification dépend de ce nombre de valeurs disponibles, c'est-à-dire du nombre de bits utilisés pour le codage des valeurs numériques : n bits donnent 2^n valeurs possibles.

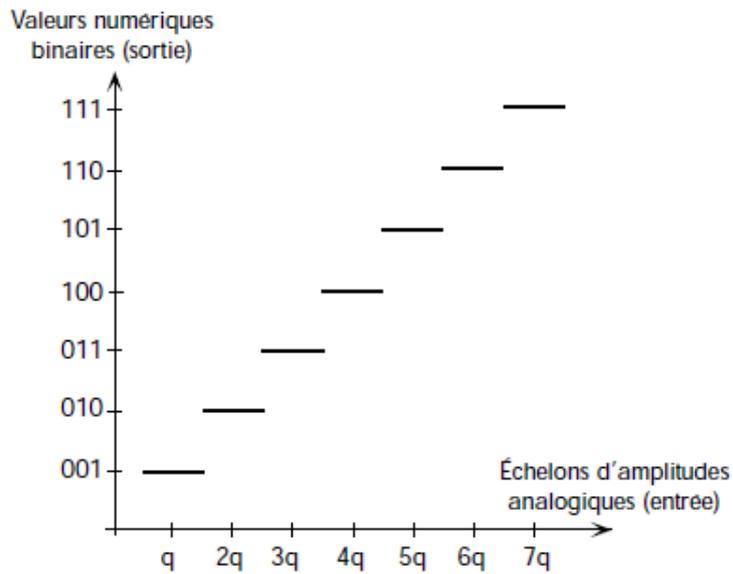


Figure 2.13. Le principe de la quantification à 3 bits.

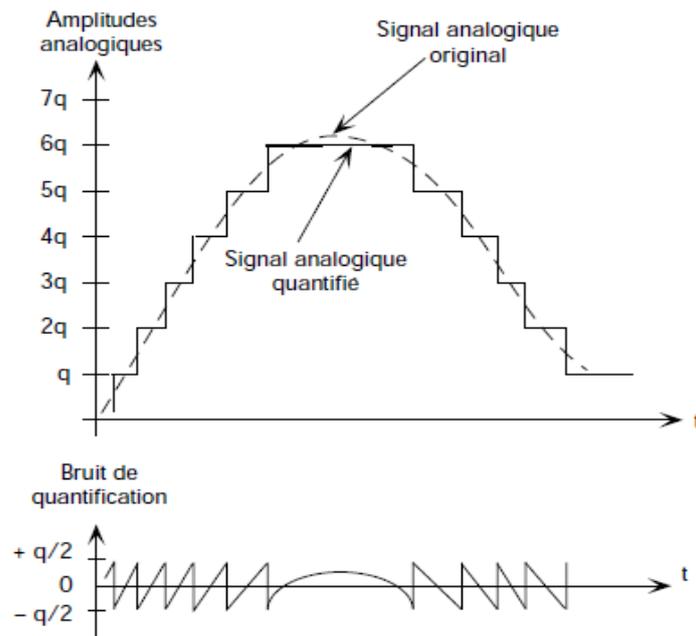


Figure 2.14. Le signal quantifié et le bruit de quantification.

2.5.2. La quantification du signal vidéo

- À l'origine, 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 sur une échelle de gris – avec une marge de réserve en dessous du noir et au-dessus du blanc.
- Si ce nombre de niveaux convenait pour la diffusion et le reportage, il s'est vite avéré insuffisant pour les applications de production et de postproduction haut de gamme.
- Un codage sur 8 bits donne un rapport S/B de 58 dB, alors que les performances des caméras ont été améliorées pour atteindre un rapport S/B supérieur à 60 dB.
- La norme 4:2:2 a donc logiquement évolué en étendant de 8 à 10 le nombre de bits par échantillon.
- Une quantification sur 10 bits permet d'accroître dans un facteur 4 la précision de la numérisation, pour une augmentation du volume d'information de seulement 25 %.
- On dispose alors de 1024 niveaux, dont 880 utiles pour traduire toutes les valeurs que peut prendre le signal vidéo analogique entre 0 et 0,7 V.
- La plupart des convertisseurs analogique/numérique, ainsi que les sources d'images numériques travaillent aujourd'hui sur 10 bits.
- Le signal de luminance est toujours positif, alors que les signaux de différence de couleurs sont bipolaires, comme le montre la figure 2.15.
- Avec 10 bits, le rapport signal sur bruit passe à 70 dB.

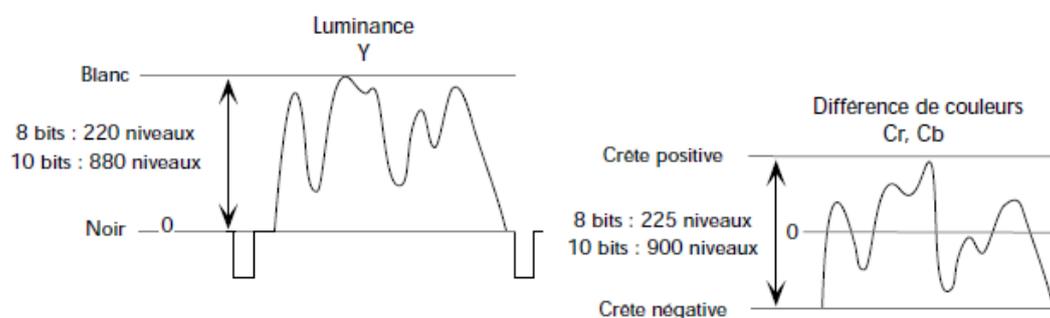


Figure 2.15. Quantification sur le signal de luminance et sur les signaux de différence de couleurs.

2.6. Le codage de mise en forme

- Le codage de mise en forme a pour but de moduler le flux de données numériques pour l'adapter aux caractéristiques du canal de transport ou d'enregistrement.
- Il existe plusieurs codes, chacun ayant ses avantages et ses inconvénients qui les rendent plus appropriés à tel ou tel type d'application : réduction de la composante continue, mais aussi recouvrement de l'horloge, distribution spectrale.

2.6.1. NRZ (Non Retour à Zéro)

C'est le plus simple de tous. Une donnée binaire « 1 » engendre un niveau haut du signal et une donnée binaire « 0 » un niveau bas. Ce code est caractérisé par une importante composante continue, ainsi que par une absence du signal d'horloge, qu'il faut donc régénérer à la réception.

2.6.2. S-NRZ (Scrambled NRZ = NRZ embrouillé)

Il s'agit d'une variante du code NRZ dans laquelle le signal est mélangé – somme modulo 2 – avec une séquence binaire pseudo-aléatoire. Cela a pour effet d'une part de générer des transitions fréquentes en brisant les longues suites de symboles identiques, et d'autre part de réduire la valeur de la composante continue, ce qui est essentiel pour le transformateur du tambour de têtes d'un magnétoscope.

2.6.3. NRZI (Non Retour à Zéro Inversé)

Un « 1 » détermine une transition au milieu de la demi-période d'horloge, un « 0 » n'a aucun effet. Ce code, qui présente l'avantage d'être insensible aux inversions de polarité, est caractérisé par une faible composante continue. Il est notamment utilisé dans les liaisons série 4:2:2.

2.6.4. Biphasé Mark

Un « 0 » provoque une transition et un maintien du niveau pendant toute la période d'horloge, tandis qu'un « 1 » entraîne une transition et un changement de niveau à la moitié de la demi-période d'horloge. Ce code présente une composante continue nulle et contient tous les fronts d'horloge – il est dit auto synchroniseur. Il est employé par le code temporel longitudinal LTC des magnétoscopes.

2.6.5. Miller, ou MFM (Modified Frequency Modulation)

Un « 1 » donne une transition au milieu de la demi-période d'horloge, un « 0 » isolé ne donne aucune transition, mais une transition se produit entre deux « 0 » consécutifs. Ce code, inventé par A. Miller, de la société Ampex, peut comporter une composante continue. Quant à l'horloge, elle est facilement extractible, le signal présentant au moins une transition tous les deux bits.

2.6.6. Miller carré (Miller2)

Il possède les mêmes caractéristiques que le code MFM, auxquelles s'ajoute la règle suivante : la dernière transition d'une suite paire de « 1 » est omise. Ce code, qui présente une composante continue très faible, est utilisé dans certains magnétoscopes numériques.

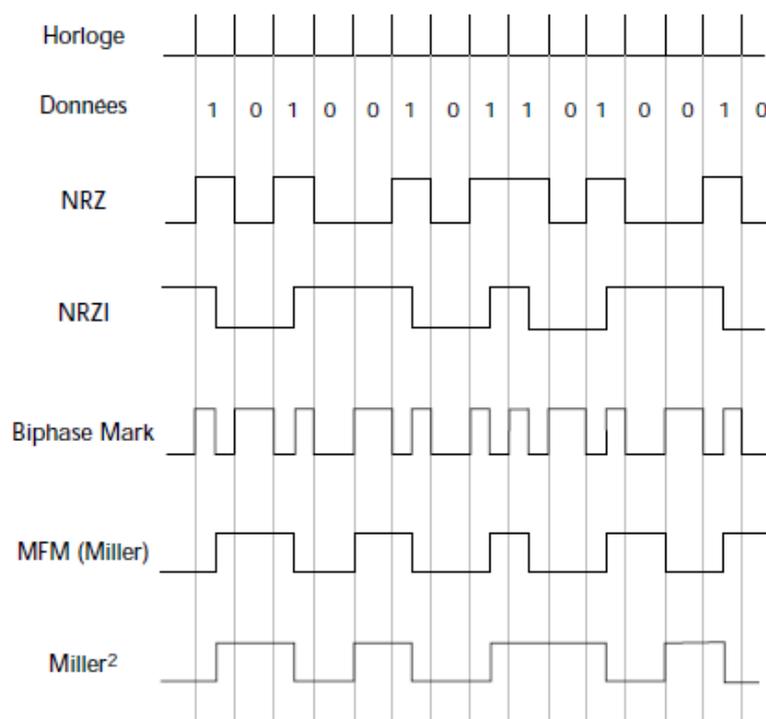


Figure 2.16. Les principaux codages de mise en forme.

2.7. La ligne vidéo numérique

- Les lignes actives analogiques des systèmes à 625 et 525 lignes sont de durées légèrement différentes.

- La ligne active numérique doit logiquement contenir un nombre suffisant d'échantillons pour couvrir la plus longue des deux, c'est-à-dire celle des systèmes à 525/60 lignes, qui en requiert 710.
- Il a finalement été choisi 720 échantillons pour le signal de luminance et 360 échantillons pour chaque signal de différence de couleurs.
- Une ligne active numérique renferme donc un total de 1 440 échantillons.
- 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.

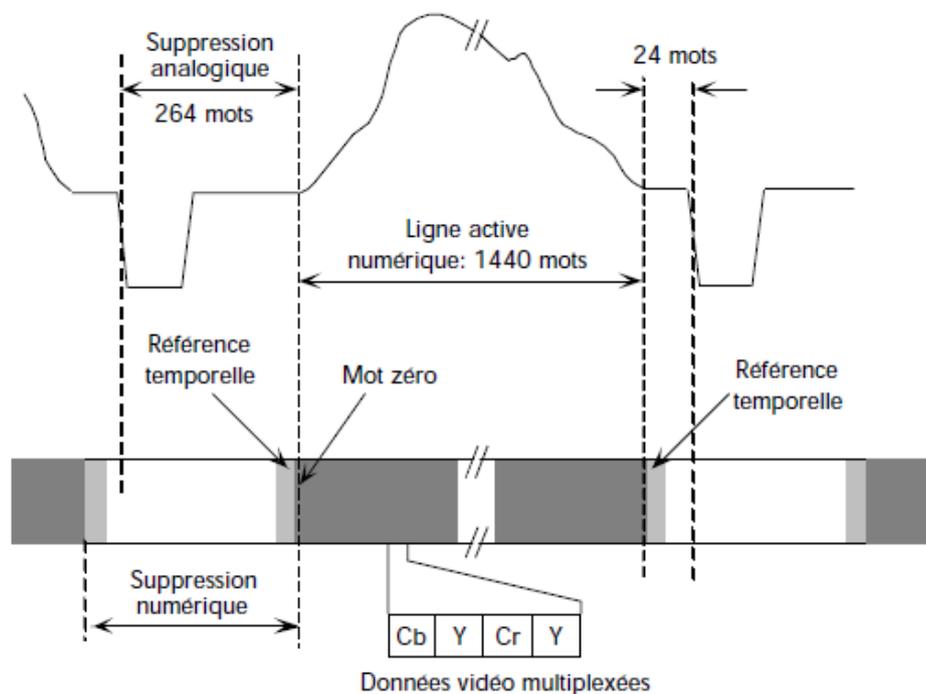


Figure 2.17. Relation temporelle entre la ligne vidéo analogique et la ligne vidéo numérique.

2.8. La trame vidéo numérique

La figure 2.18 montre les relations entre les trames numériques et les trames analogiques, ainsi que la position de l'intervalle de suppression de trame numérique pour les systèmes à 625 lignes. Pour éviter d'avoir à créer des demi-lignes numériques, les débuts et fins de suppression trame coïncident avec les débuts et fins de suppression ligne. 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.

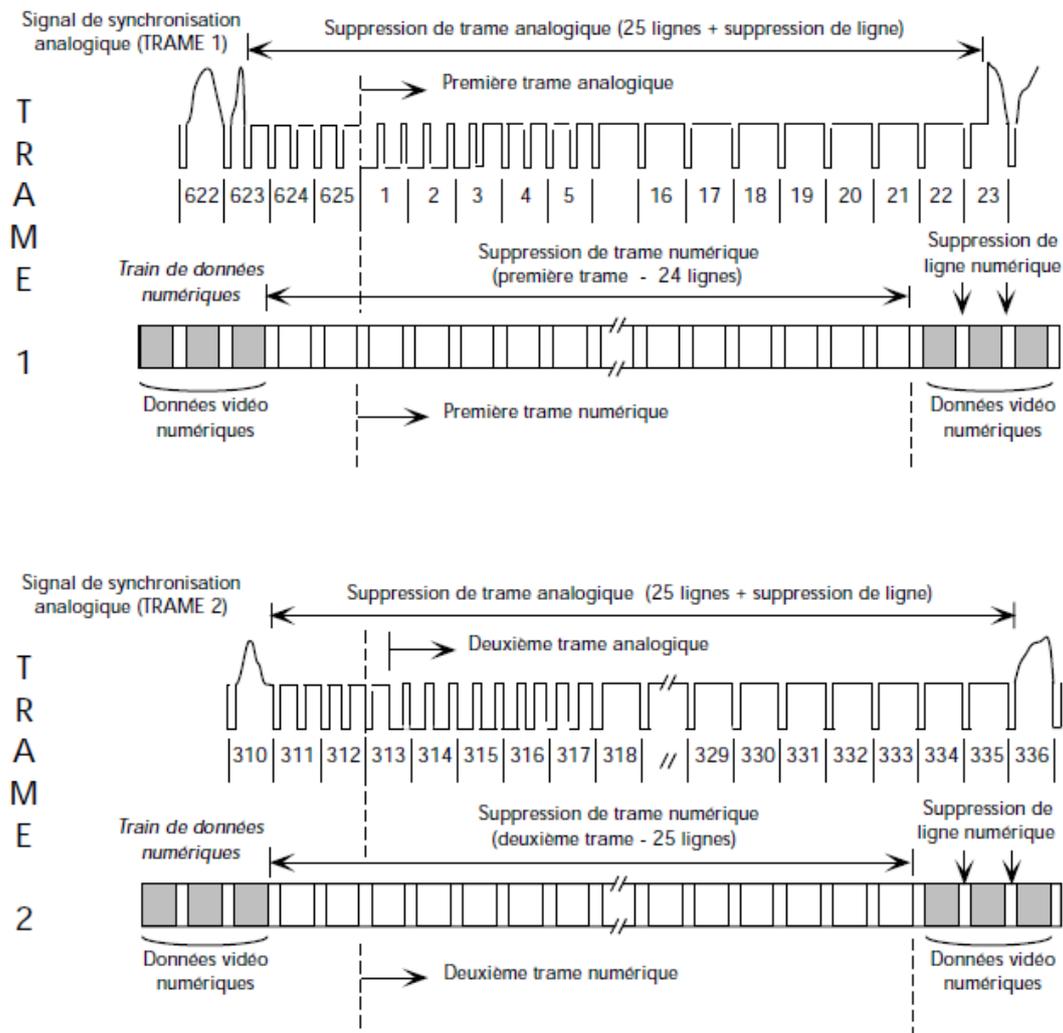


Figure 2.18. Relation entre les trames analogiques et les trames numériques.

	625/50	525/60
Signaux à coder	Y, (R-Y), (B-Y) Corrigés en gamma	
Fréquence d'échantillonnage		
Luminance	13.5 MHz	
Différence de couleurs	6.75 MHz	
Bandes passantes équivalentes		
Luminance	5.75 MHz	
Différence de couleurs	2.75 MHz	

Nombre d'échantillons par ligne complète		
Luminance	864	858
Différence de couleurs	432	429
Nombre d'échantillon utiles par ligne		
Luminance Y	720	
Différence de couleurs	360	
Structure d'échantillonnage	Orthogonale. Les échantillons de chrominance coïncident avec les échantillons impairs de luminance	
Quantification (8 bits)	256 niveaux dont : 220 utile pour Y, 225 pour Cr, Cb	
Quantification (10 bits)	1024 niveaux dont : 880 utile pour Y, 900 pour Cr, Cb	

Tableau 2.1. Les principaux paramètres de la norme 4:2:2.

	Signal utile 720x576		Signal complet 864x625	
	8 bits	10 bits	8 bits	10 bits
Signal 4 :2 :2	166 Mbits/s	207 Mbits/s	216 Mbits/s	270 Mbits/s
Signal 4 :2 :0 ou 4 :1 :1	124 Mbits/s		162 Mbits/s	

Tableau 2.2. Les débits du signal vidéo.

2.9. Les définitions de TV

SD : La définition standard de 720 x 576 pixels, c'est celle que propose les DVD.

720p : Un format intermédiaire faisant partie intégrante de la HD (Haute Définition), avec ses 1280 x 720 pixels elle est encore beaucoup utilisée par les services de VOD (vidéo à la demande) de part ses besoins en bandes passantes moins importants.

Full HD : Avec ses 1920 x 1080 pixels, c'est l'autre définition de la HD. La vraie, la pleine la totale, celle que propose tout les téléviseurs actuels. C'est aussi la définition utilisée par le Blu-ray, successeur du DVD et vainqueur de la guerre contre l'autre format HD: HD-DVD.

Quad HD - Ultra HD : 3840 x 2160 pixels, souvent faussement appelé 4K car ce dernier est un format cinéma proposant du 4096 x 2160 pixels. Le terme Quad HD est le plus juste car

cette définition propose exactement quatre fois plus de pixels que le Full HD. Mais aujourd'hui il faut utiliser le terme Ultra HD.

8K : Cette définition (7680 x 4320 pixels) propose en tout cas 16 fois plus de points que le Full HD, et quatre fois plus que l'Ultra HD.

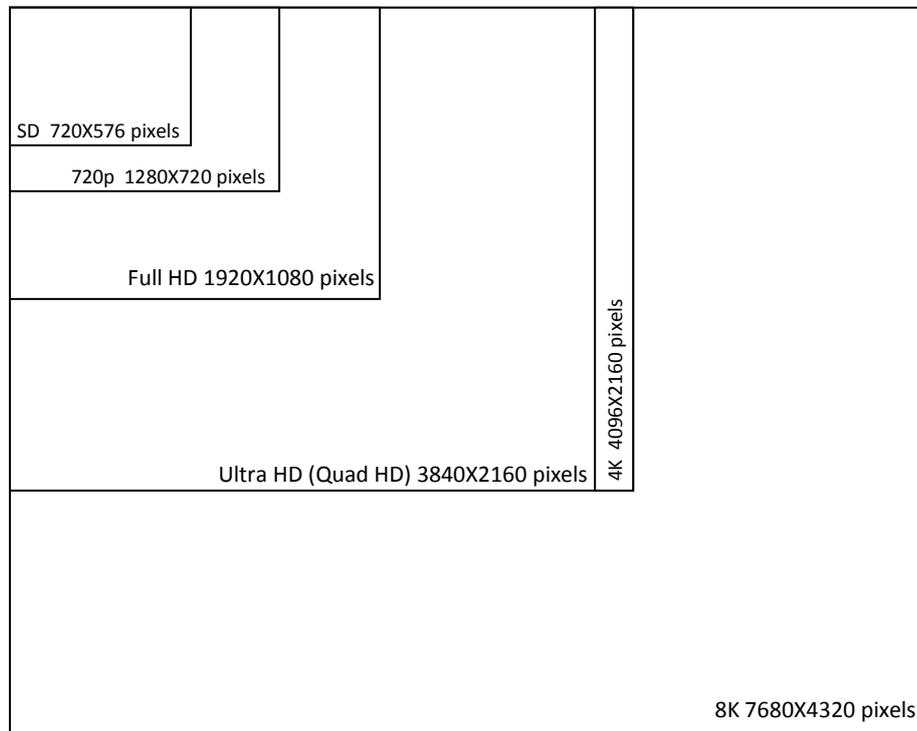


Figure 2.19. Les définitions TV.