

## SECTION 11F: MÉTHODES NUMÉRIQUES POUR LA TRANSMISSION DE LA TÉLÉVISION

## RAPPORT 629-4

## CODAGE NUMÉRIQUE DES SIGNAUX DE TÉLÉVISION COULEUR

(Question 25/11, Programmes d'études 18L/11, 25G/11, 25L/11)

(1974-1978-1982-1986-1990)

**1. Introduction**

La Commission d'études 11 a rassemblé, avant et pendant la période d'études 1982-1986, une grande quantité d'informations concernant le codage, le traitement, la transmission et l'enregistrement des signaux vidéo en composantes numériques dans le studio. Ce travail a donné lieu à la Recommandation 601 traitant du codage des signaux vidéo numériques pour studio de production et à la Recommandation 656 traitant des interfaces vidéo numériques de studio.

De plus, ces travaux ont été pris en compte dans la Recommandation relative au format numérique d'enregistrement vidéo (Recommandation 657), dans les études de la Commission d'études 11 sur la réduction du débit binaire (Rapport 1089) et dans les études de la CMTT traitant de la transmission des signaux d'image.

Le présent Rapport résume les travaux effectués sur les méthodes de codage des signaux vidéo de studio, issus de sources analogiques et numériques. Il constitue le support de la Recommandation 601 qui a trait aux paramètres de codage de télévision numérique pour studios. Il est complété par le Rapport 962 qui concerne le filtrage, l'échantillonnage et le multiplexage des signaux numériques.

**2. Les principes de base****2.1 Paramètres de codage numérique de studio pour la télévision classique**

Deux approches différentes du problème de codage ont été proposées:

- *Codage en composantes*: les signaux de luminance et de différence de couleur sont codés séparément sous forme numérique et transmis sous forme de trains binaires séparés, multiplexés dans le temps. Lorsque le signal de télévision couleur est disponible sous la forme composite (NTSC, PAL ou SECAM), il est nécessaire de séparer d'abord le signal en ses composantes de luminance et de différence de couleur.
- *Codage composite*: le signal composite couleur est codé sous sa forme composite en un train binaire unique.

La première méthode présente des avantages sur la seconde car à l'avenir il sera possible de transmettre le signal sous forme numérique depuis la source jusqu'à l'émetteur. Ce n'est qu'au niveau de l'émetteur qu'il sera nécessaire de coder le signal sous forme composite. Par conséquent, du moins en ce qui concerne les transmissions, les différences entre NTSC, PAL, SECAM disparaîtront, ce qui simplifiera les problèmes d'échange international de programmes [CCIR, 1974-78a], sauf dans le cas où les normes de balayage sont différentes (par échange international de programmes, on entend la fourniture de l'interface requise pour les magnétoscopes et de l'interface avec l'équipement de transmission). La seconde méthode présenterait des avantages lorsque la chaîne complète contient plusieurs maillons numériques et analogiques en cascade, ce qui sera vraisemblablement le cas pendant la période où les techniques numériques seront introduites dans le réseau de télévision.

La plupart des administrations conviennent maintenant qu'il serait extrêmement intéressant d'utiliser le codage des composantes pour les normes de studio. Les raisons en sont les suivantes:

- L'évolution technique récente, notamment en ce qui concerne les mémoires à semi-conducteur et l'enregistrement magnétique, a fait apparaître des possibilités nouvelles et intéressantes pour le traitement électronique de l'image et les effets spéciaux; dans le passé, il fallait recourir à des techniques cinématographiques coûteuses pour les obtenir [CCIR, 1978-82a].
- Le codage en composantes permet une norme mondiale unique, sauf pour ce qui est de la fréquence de trame. Une telle norme possède le plus grand nombre de valeurs de paramètres significatifs communes aux systèmes à 525 lignes et à 625 lignes. Elle permet aux équipements et aux méthodes d'exploitation d'avoir un maximum d'éléments communs, ce qui n'est pas possible avec des normes analogiques ou des normes composites numériques. Sauf dans le cas de la fréquence de trame (qui pourrait être commutable), les studios du monde entier utiliseraient de nombreuses parties d'équipements identiques et la production de même que l'échange des programmes seraient simplifiés de beaucoup.

Lors de la détermination de la méthode de réduction du débit binaire qui pourrait être utilisée au studio avant interconnexion avec n'importe quel système de transmission à grande distance, il est important de tenir compte des hiérarchies numériques qui sont en cours de normalisation au CCITT [CCIR, 1974-78b].

Dans le doc. [CCIR, 1978-82b], l'UER a proposé, pour faciliter l'échange international de programmes, l'utilisation d'un signal basé sur le codage séparé de la luminance et des signaux de différence de couleur. Les études entreprises par l'UER ont clairement montré l'intérêt que présente le codage numérique pour s'affranchir des limitations associées aux normes PAL et SECAM; elles ont en outre montré la possibilité d'établir une norme numérique universellement compatible [CCIR, 1978-82c]. De telles considérations, combinées avec des propositions similaires d'autres administrations, ont abouti à la Recommandation 601, dans laquelle il est suggéré que l'emploi du codage des composantes est préférable pour tout ce qui concerne les studios et les échanges internationaux.

## 2.2 Paramètres de codage numérique en studio pour la TVHD

Le GTI 11/7 a traité cette question comme le lui demandait la Décision 60 et les résultats connus en mai 1989 ont été communiqués à la Réunion extraordinaire de la Commission d'études 11 sur la TVHD [CCIR, 1986-90a].

Les contributions présentées traitaient des diverses approches pour parvenir à une norme de studio numérique de TVHD fondée sur un format d'image commun ou un débit de données communs.

Le GTI 11/7 poursuit l'étude de cette question et attend des contributions sur les sujets suivants:

- caractéristiques du signal numérique
  - a) niveaux du signal numérique
  - b) forme de codage
  - c) gamme dynamique
- spécifications des interfaces numériques
  - a) interfaces parallèle et série
  - b) mots de synchronisation, nombre de bits, etc.
- signaux de synchronisation numériques
- signaux d'essai numériques
- spécifications du traitement numérique de l'image
  - a) suppressions horizontale et verticale
  - b) variation des dimensions de l'image rendue possible par le montage, etc.

### 3. Méthodes de codage

Dans toutes les méthodes de codage numérique actuellement à l'étude, les deux opérations initiales sont l'échantillonnage et la quantification.

#### 3.1 Largeurs de bande et échantillonnage

L'opération d'échantillonnage est déterminée par trois facteurs fondamentaux:

- la structure d'échantillonnage, c'est-à-dire la position relative des échantillons dans l'espace et dans le temps;
- le nombre d'échantillons par ligne;
- la méthode de filtrage qui peut être à une, deux ou trois dimensions.

La structure mentionnée ci-dessus peut être répétitive ou non d'image à image. De même, le nombre d'échantillons par ligne peut être constant ou non de ligne à ligne.

Selon la théorie classique, la fréquence d'échantillonnage doit être égale ou supérieure au double de la fréquence la plus élevée du signal (échantillonnage dans les conditions de Nyquist). Des études récentes ont cependant montré que l'on pouvait utiliser en pratique des fréquences d'échantillonnage plus faibles (échantillonnage au-dessous de la limite de Nyquist) [Messerschmid, 1969].

##### 3.1.1 Signaux en composantes

L'UER [CCIR, 1974-78c] a suggéré que les pays qui appliquent le codage numérique séparé des composantes utilisent une structure d'échantillonnage répétitive d'image à image. Ces vues sont confirmées par [CCIR, 1974-78d]. Les structures d'échantillonnage répétitives peuvent être orthogonales [CCIR, 1974-78e] ou en quinconce.

Le Rapport 962 décrit de façon assez détaillée les travaux qui ont conduit au choix des paramètres d'échantillonnage figurant dans la Recommandation 601 comme base d'un codage pour studio; pour cette raison, un bref résumé est suffisant ici.

Les administrations ont étudié un certain nombre de fréquences d'échantillonnage pour le signal de luminance au niveau 4 : 2 : 2, notamment les fréquences 12 MHz, 12,5 MHz, 13 MHz, 13,5 MHz et 14,3 MHz. Les facteurs étudiés, qui sont susceptibles d'avoir une influence sur le choix de la fréquence d'échantillonnage, comprenaient la qualité de base de l'image, la qualité de l'image après traitement, les rapports coût/qualité, la capacité potentielle des magnétoscopes numériques, la réduction du débit binaire aux valeurs de la hiérarchie de transmission et la compatibilité avec des signaux composites et le codage composite.

Pendant leurs études, certaines administrations ont jugé intéressant de choisir une fréquence d'échantillonnage en rapport avec la fréquence de la sous-porteuse couleur de leur signal composite, car cela pourrait être avantageux dans une utilisation mixte, sur le plan national du codage en composantes et du codage composite. Toutefois, elles ont considéré que les avantages à retirer d'une uniformisation mondiale de la fréquence d'échantillonnage pourraient faire pencher la balance en faveur de la valeur approuvée.

Une fréquence d'échantillonnage du signal de luminance de 13,5 MHz a été adoptée comme norme mondiale. Il s'agit d'un compromis entre, d'une part, la nécessité de choisir des valeurs qui permettent de fabriquer sans difficulté des matériels économiques et, d'autre part, la nécessité de permettre un degré suffisant de traitement des images. En outre, cette fréquence est la seule dans la gamme de 12 à 14,3 MHz pour laquelle on puisse avoir un nombre entier d'échantillons par ligne à la fois pour les systèmes à 525 et à 625 lignes [CCIR, 1978-82d, e, f, g, h, i, et j]. La fréquence d'échantillonnage des signaux de différence de couleur a été fixée à la moitié de celle du signal de luminance après avoir vérifié que cela permettrait d'obtenir une qualité satisfaisante dans les traitements d'incrustation. Les interfaces numériques pour équipements de studio sont étudiées dans le Rapport 1088 intitulé: «Interfaces pour les signaux vidéo numériques dans les systèmes de télévision à 525 et 625 lignes».

On a prévu qu'il est peu probable que les applications actuelles et envisagées de la télévision soient satisfaites par un seul groupe de paramètres numériques. Pour cette raison, on a proposé une *famille extensible de normes compatibles de codage numérique* correspondant aux différentes applications [CCIR, 1978-82k, l et m].

Les niveaux de la famille sont désignés par une suite de nombres entiers, par exemple 4 : 2 : 2 ou 4 : 4 : 4. Ces nombres représentent la relation entre la fréquence d'échantillonnage du signal de luminance (le premier) et les fréquences d'échantillonnage des signaux de différence de couleur (les deux autres). Selon la convention adoptée, le nombre 4 représente la fréquence d'échantillonnage principale de 13,5 MHz (nominal). Ainsi, par exemple, le niveau 4 : 2 : 2 de la famille est caractérisé par des fréquences d'échantillonnage respectivement égales à 13,5 et 6,75 MHz pour les signaux de luminance et de différence de couleur, telles que définies dans la Recommandation 601.

On trouvera dans le doc. [CCIR, 1978-82m] un ensemble possible de normes correspondantes aux niveaux suivants:

- une norme «studio»;
- une norme «légère» utilisant les mêmes paramètres d'analyse, mais entraînant des débits binaires plus bas et des coûts moins élevés, qui conviennent aux applications de moindre qualité;
- une norme «haute qualité» donnant des possibilités supérieures à celles qu'offrent les normes actuelles de balayage.

Dans le doc. [CCIR 1978-82n], on propose comme code numérique universellement compatible un code en composantes comprenant un échantillonnage synchronisé à la fréquence de ligne (orthogonale), un nombre identique d'échantillons par ligne pour les systèmes à 525 et 625 lignes et l'appartenance à une famille extensible de codes numériques compatibles, avec des relations simples entre les fréquences d'échantillonnage. La définition des fréquences d'échantillonnage préférables doit faire l'objet d'un complément d'étude.

Des évaluations subjectives d'une famille extensible de systèmes de télévision numérique à codage en composantes ont été faites en 1980 et 1981 par l'UER [CCIR, 1978-82d et f], la SMPTE [CCIR, 1978-82g], et la NHK au Japon [CCIR, 1978-82o, Nishizawa et autres, 1981]. Les essais portaient sur les niveaux 4:4:4, 4:2:2 et 4:1:1 de la famille de codage avec des fréquences d'échantillonnage des signaux de luminance allant de 12 MHz à 14,3 MHz. Les résultats de ces essais sont cohérents et tendent à confirmer le choix du niveau 4:2:2 pour l'interface de studio normalisée et le choix de la fréquence d'échantillonnage de 13,5 MHz comme compromis satisfaisant entre une qualité acceptable de l'image après traitement et les conditions requises en matière de débit binaire. C'est également l'opinion exprimée dans le doc. [CCIR, 1978-82e].

La possibilité d'utiliser le niveau 4:2:2 de la Recommandation 601 avec des images de format élargi (16:9 et non 4:3) fait l'objet du [CCIR, 1986-90b], dans lequel il est souligné que la plupart des équipements de studio n'exige que de légères modifications et que la même interface que dans la Recommandation 656 peut être utilisée. Toutefois, dans de telles applications, il convient de noter que des signaux d'image à format élargi ne devraient pas être mélangés à des signaux d'image de format classique (4:3).

Le doc. [CCIR, 1978-82k] présente la description d'une famille extensible de codes numériques, fondée sur un code en composantes, dont les rapports des fréquences d'échantillonnages sont de 4:1:1 (entre la luminance et la différence de couleur). Ces codes peuvent être aisément transformés en code d'interface numérique composite NTSC et la famille peut être aisément extensible vers le haut pour s'adapter à une télévision à plus haute définition, lorsque les progrès techniques le permettront. En outre, cette famille de codes est extensible vers le bas pour s'adapter à des codes d'interface à moindre définition pour des applications particulières, par exemple le journalisme électronique.

L'UER et la SMPTE étudient actuellement le niveau 4:4:4 décrit dans l'Annexe I de la Recommandation 601. L'interface 4:4:4 s'adresse à des informations graphiques complexes et à la postproduction. L'objectif visé n'est pas de remplacer les interfaces 4:2:2 déjà spécifiées dans la Recommandation 656 étant donné qu'elles sont considérées comme étant plus que satisfaisantes pour les opérations normales en studio. Il est prévu que l'interface 4:4:4 utilise le codage MIC avec plus de 8 bits par échantillon. L'UER et la SMPTE sont convenues d'inclure l'examen du signal de clé dans le jeu des signaux fondamentaux de référence. Dans la Recommandation 601, il est maintenant question du niveau 4:4:4:4 ou 4x4. Les travaux menés actuellement consistent à incorporer les informations disponibles dans l'interface existante que décrit la Recommandation 656. Parmi les questions qui restent à l'étude, il convient de citer les effets des divers algorithmes concernant l'arrondi dynamique, en vue de réduire au minimum le nombre de bits par échantillon, ainsi que les caractéristiques de filtrage et les conditions à remplir par les signaux déclencheurs. L'arrondi dynamique est un processus consistant à dissimuler les erreurs qui se produisent lorsqu'un échantillon est réduit dans une longueur de mot, par exemple, de 10 bits à 8 bits.

Le doc. [CCIR, 1978-82p] suggère des critères de conception et une application possible d'un niveau inférieur dans une famille extensible de normes numériques compatibles. Les paramètres du système et les résultats des essais sont indiqués pour un codec expérimental fonctionnant à la moitié du débit binaire de la norme principale de studio. Ce système a pour particularité une relation non binaire entre les fréquences d'échantillonnage de luminance pour les deux niveaux considérés et un rapport 3 à 1 entre les fréquences d'échantillonnage du signal de luminance et des signaux de différence de couleur codés en séquentiel de ligne. Le doc. [CCIR, 1982-86a] décrit une évaluation subjective utilisant des images d'essai statiques correspondant à plusieurs normes possibles de niveau inférieur, incluant les effets du sous-échantillonnage avec décalage de ligne et avec décalage de trame et les effets du traitement séquentiel en ligne des signaux de différence de couleur. Le doc. [CCIR, 1982-86b] contient une étude théorique des distorsions des images constatées lors de l'utilisation de la transmission en séquentiel de ligne des signaux de différence de couleur avec un cycle à deux trames.

Le Document [CCIR, 1986-90c] suggère des valeurs de paramètre pour un codage économique de plus bas niveau mettant en oeuvre des fréquences d'échantillonnage dans les rapports  $2 \frac{2}{3} : 1 \frac{1}{3} : 1 \frac{1}{3}$ . L'utilisation de ces dernières valeurs plutôt que 2:1:1 permet de mettre en oeuvre des filtres passe-bas à coupure lente, ce qui simplifie la conception de ces filtres.

Il semble que les niveaux les moins élevés des normes de codage numérique indiqués dans la Recommandation 601 suscitent un peu moins d'intérêt à l'avenir. A l'heure actuelle, il semble que l'on s'efforce d'atteindre les objectifs qui avaient été recensés à l'origine pour les niveaux les plus faibles de la famille, tel que le journalisme électronique et les opérations à l'extérieur, avec le niveau 4:2:2, à l'aide des techniques de réduction du débit binaire.

Rossi [1981] décrit un ensemble de filtres numériques adaptés à une famille binaire qui permet une conversion de 2 à 1 et une conversion de 1 à 2 de la fréquence de trame par interpolation faisant appel à des filtres en peigne.

Il est intéressant, du point de vue matériel, que les niveaux d'une famille contiennent des nombres d'échantillons par ligne qui soient compatibles. Les niveaux d'une famille numérique devraient être choisis en tenant compte d'autres représentations possibles des signaux de télévision, afin de limiter le nombre et la complexité des opérations de transcodage sur le parcours du signal. Le doc. [CCIR, 1982-86c] contient quelques-unes des représentations qui ont été proposées.

Les durées nominales des lignes actives pour les systèmes 525/60 et 625/50 sont légèrement différentes. Pour rapprocher les deux systèmes dans le domaine des composantes numériques, on définit une «ligne active numérique» (LAN). Celle-ci contient suffisamment d'échantillons pour couvrir la ligne active des systèmes à 525/60 lignes comme celles des systèmes à 625/50 lignes. Il y a manifestement intérêt à faire en sorte que les mémoires numériques de lignes aient exactement la même capacité et que la LAN puisse être traitée exactement de la même manière dans les deux systèmes. Le nombre d'échantillons qui se trouvent dans l'intervalle de suppression analogique est différent, mais cela n'a pas besoin d'apparaître dans le domaine des composantes numériques. La suppression propre à la norme de radiodiffusion nationale doit être introduite au point où le signal est converti sous forme analogique.

La ligne active pour les systèmes à 525 lignes est la plus longue des deux et, avec les tolérances actuelles, il faut plus de 710 échantillons pour couvrir une ligne. On a choisi la valeur de 720 échantillons pour la ligne active numérique telle qu'elle figure dans la Recommandation 601 car elle répond bien à cette nécessité.

Définition des signaux de luminance ( $E'_Y$ ) et de différence de couleur ( $E'_R - E'_Y$ ) et ( $E'_B - E'_Y$ )

Une proposition concernant la construction des signaux de luminance et de différence de couleur fait partie de la Recommandation 601; elle est indiquée ci-après:

$$E'_Y = 0,299 E'_R + 0,587 E'_G + 0,114 E'_B \quad (\text{Voir Note})$$

d'où

$$\begin{aligned} (E'_R - E'_Y) &= E'_R - 0,299 E'_R - 0,587 E'_G - 0,114 E'_B \\ &= 0,701 E'_R - 0,587 E'_G - 0,114 E'_B \end{aligned}$$

et

$$\begin{aligned} (E'_B - E'_Y) &= E'_B - 0,299 E'_R - 0,587 E'_G - 0,114 E'_B \\ &= -0,299 E'_R - 0,587 E'_G + 0,886 E'_B \end{aligned}$$

Note. — Voir le Rapport 624, Tableau II.

Si l'on considère que les valeurs des signaux sont normalisées à l'unité (par exemple, niveaux maximums de 1,0 V), les valeurs obtenues pour le blanc, le noir, les couleurs saturées primaires et leurs complémentaires sont les suivantes:

TABLEAU I

Condition	$E'_R$	$E'_G$	$E'_B$	$E'_Y$	$E'_R - E'_Y$	$E'_B - E'_Y$
Blanc	1,0	1,0	1,0	1,0	0	0
Noir	0	0	0	0	0	0
Rouge	1,0	0	0	0,299	0,701	-0,299
Vert	0	1,0	0	0,587	-0,587	-0,587
Bleu	0	0	1,0	0,114	-0,114	0,886
Jaune	1,0	1,0	0	0,886	0,114	-0,886
Cyan	0	1,0	1,0	0,701	-0,701	0,299
Magenta	1,0	0	1,0	0,413	0,587	0,587

Si les valeurs de  $E'_Y$  sont situées entre 1,0 et 0, celles de ( $E'_R - E'_Y$ ) sont situées entre +0,701 et -0,701, et celles de ( $E'_B - E'_Y$ ) entre +0,886 et -0,886. Pour ramener l'excursion des signaux de différence de couleur à l'unité (c'est-à-dire +0,5 à -0,5) on peut calculer les coefficients suivants:

$$K_R = \frac{0,5}{0,701} = 0,713; \quad K_B = \frac{0,5}{0,886} = 0,564;$$

alors

$$E'_{C_R} = 0,713 (E'_R - E'_Y) = 0,500 E'_R - 0,419 E'_G - 0,081 E'_B$$

et

$$E'_{C_B} = 0,564 (E'_B - E'_Y) = -0,169 E'_R - 0,331 E'_G + 0,500 E'_B$$

où  $E'_{C_R}$  et  $E'_{C_B}$  sont, respectivement, les signaux de différence de couleur rouge et bleu renormalisés.

Dans le cas d'un codage binaire à 8 bits à quantification uniforme, on spécifie  $2^8$ , c'est-à-dire 256 niveaux de quantification équidistants, de sorte que les nombres binaires disponibles vont de 0000 0000 à 1111 1111 (00 à FF en notation hexadécimale) soit, en expression décimale, de 0 à 255 inclus.

Dans le cas du système 4:2:2 décrit dans la Recommandation 601, les niveaux 0 et 255 sont réservés aux données de synchronisation, alors que les niveaux 1 à 254 sont disponibles pour les données vidéo.

Sachant que le signal de luminance ne doit occuper que 220 niveaux pour laisser des marges de fonctionnement et que le noir doit être au niveau 16, la valeur décimale du signal de luminance,  $\bar{Y}$ , avant quantification, est égale à:

$$\bar{Y} = 219 (E'_Y) + 16,$$

et le numéro du niveau correspondant après quantification est le nombre entier le plus proche.

De même, étant donné que les signaux de différence de couleur doivent occuper 225 niveaux et que le niveau zéro doit être au niveau 128, les valeurs décimales des signaux de différence de couleur,  $\bar{C}_R$  et  $\bar{C}_B$ , avant quantification, sont:

$$\bar{C}_R = 224 [0,713 (E'_R - E'_Y)] + 128$$

et

$$\bar{C}_B = 224 [0,564 (E'_B - E'_Y)] + 128$$

ce qui ramène à:

$$\bar{C}_R = 160 (E'_R - E'_Y) + 128$$

et

$$\bar{C}_B = 126 (E'_B - E'_Y) + 128$$

Les numéros des niveaux correspondants après quantification sont les entiers les plus proches.

Les équivalents numériques sont appelés  $Y$ ,  $C_R$  et  $C_B$ .

Le doc. [CCIR, 1982-86d] signale qu'il faut examiner plus avant la correspondance entre les niveaux du signal d'image analogique et les niveaux de quantification, eu égard aux marges actuellement nécessaires en exploitation.

*Note.* — La quantification et le codage pour la construction des composantes numériques  $Y$ ,  $C_R$ ,  $C_B$  à partir de signaux autres que les signaux de luminance et de différence de couleur sont examinés au § 2.4 de l'Annexe II à la Recommandation 601.

Le codage numérique sous la forme des signaux  $Y$ ,  $C_R$ ,  $C_B$  peut représenter un ensemble de valeurs sensiblement plus grand que celui qui peut être assuré par les gammes correspondantes de signaux  $R$ ,  $G$ ,  $B$ . Dans ces conditions, il est possible, du fait de la production électronique d'images ou du traitement des signaux, de produire des signaux  $Y$ ,  $C_R$ ,  $C_B$  qui, tout en étant valables individuellement, auraient des valeurs qui se situeraient en dehors de la gamme, dès lors qu'ils seraient convertis en signaux  $R$ ,  $G$ ,  $B$ . [Devereux, 1987] explique qu'il est à la fois plus commode et plus efficace d'empêcher cet état de choses en limitant les signaux  $Y$ ,  $C_R$ ,  $C_B$  au lieu d'attendre que ces signaux se présentent sous la forme  $R$ ,  $G$ ,  $B$ . De plus, cet auteur décrit des techniques de limitation de signaux que l'on peut appliquer de façon à maintenir les valeurs de luminance et de tonalité, en réduisant au minimum la dégradation subjective, si bien que seule la saturation est sacrifiée.

### 3.1.2 Signaux composites

On peut appliquer l'échantillonnage au-dessous de la limite de Nyquist en échantillonnant le signal composite PAL au rythme de deux fois la fréquence de la sous-porteuse [Devereux et Phillips, 1974]. Le codec numérique employant un tel échantillonnage utilise un filtrage qui introduit des pertes mineures de la résolution diagonale en luminance et de la résolution verticale en chrominance. Cependant, un autre filtrage de même nature appliqué dans toute opération ultérieure d'échantillonnage au-dessous de la limite de Nyquist ne devrait pas causer de dégradation supplémentaire de la résolution [Stott et Phillips, 1977].

Dans le cas du système M/NTSC, on observe une tendance à utiliser une fréquence d'échantillonnage égale au triple ou au quadruple de la fréquence de la sous-porteuse couleur. Le doc. [CCIR, 1974-78f] décrit toutefois des études portant sur un système de codage où la fréquence d'échantillonnage est un multiple entier de la fréquence de ligne. La technique de l'échantillonnage au-dessous de la limite de Nyquist a aussi été utilisée avec les signaux NTSC [Rossi, 1976].

Patel [1980] décrit les effets d'un filtrage passe-bas du signal composite analogique du système I/PAL. On conclut que les suroscillations de chrominance sont prépondérantes et qu'une amélioration de la correction de temps de groupe peut réduire les défauts correspondants.

### 3.1.3 Compatibilité entre signaux composites et composantes

Dans le doc. [CCIR, 1974-78c], l'UER attire l'attention sur la nécessité d'assurer la compatibilité entre les méthodes proposées pour le codage composite et le codage en composantes des signaux des systèmes à 625 lignes.

Des expériences faites par l'UER [CCIR, 1978-82b] ont montré que l'on peut obtenir un codage et un décodage PAL analogique YUV-numérique de bonne qualité, avec un échantillonnage asservi à la fréquence de ligne, à condition d'utiliser un codec perfectionné.

La référence [Clarke, 1986] contient des détails sur les techniques numériques pour produire à partir d'une fréquence d'échantillonnage asservie à la fréquence de ligne, des signaux de sous-porteuse en quadrature pour utilisation dans les codeurs mettant en oeuvre des signaux composites et pour verrouiller ces signaux à la salve de référence entrant dans les décodeurs. Cela conduit à une qualité plus stable et mieux définie due à la mise en oeuvre de techniques numériques, dans les codeurs et les décodeurs sans qu'il soit nécessaire de convertir la fréquence d'échantillonnage. La description porte également sur les modifications nécessaires pour le fonctionnement avec des signaux NTSC.

De plus, un certain nombre de méthodes de filtrage décrites dans [Clarke, 1988] visent à obtenir une séparation de haute qualité des composantes de luminance et de chrominance d'un signal PAL, essentiellement dans le but de disposer de signaux numériques Y,  $C_R$ ,  $C_B$  à partir du signal PAL dans un studio numérique. Il y a lieu de citer notamment les filtres qui utilisent des peignes à retard de ligne relativement simples mais aussi les filtres en peigne tridimensionnel qui utilisent des retards multiples de ligne, de trame et d'image. Les résultats des essais subjectifs comparant les différentes méthodes indiquent que s'il est possible d'améliorer sensiblement la qualité de fonctionnement à l'aide d'un filtrage temporel modeste, l'utilisation plus générale de cette technique peut donner lieu à des dégradations dans les objets en mouvement.



### 3.1.4 *Changement de la fréquence d'échantillonnage*

Dans un système donné (qu'il utilise le codage composite ou en composantes séparées), il peut être nécessaire de modifier la fréquence d'échantillonnage.

Une méthode utilisable avec le système M/NTSC pour changer la fréquence d'échantillonnage de 4 à 3 fois la fréquence de sous-porteuse NTSC et inversement est décrite dans [CCIR, 1974-78g].

Dans le doc. [CCIR, 1974-78h] qui propose l'emploi éventuel de deux fréquences d'échantillonnage dans un studio PAL numérique, il est souligné qu'un signal échantillonné à  $4 f_{sc}$  peut être très facilement converti en un signal échantillonné à  $2 f_{sc}$ , et vice versa. Toutefois, quand on repasse de la fréquence d'échantillonnage  $2 f_{sc}$  à la fréquence d'échantillonnage  $4 f_{sc}$ , les faibles dégradations associées à l'échantillonnage à  $2 f_{sc}$  subsistent, leur effet sur la résolution n'est néanmoins pas cumulatif.

### 3.1.5 *Tolérances sur les fréquences d'échantillonnage*

Les fréquences d'échantillonnage utilisées doivent respecter les exigences des systèmes de télévision associés. En particulier, la tolérance sur les fréquences d'échantillonnage utilisées pour les composantes doit coïncider avec la tolérance sur la fréquence de ligne de la norme de télévision en couleur concernée [CCIR, 1982-86e, f].

Lorsque les fréquences d'échantillonnage sont émises à partir d'un signal de synchronisation de référence provenant d'un générateur principal de synchronisation éloigné, des signaux spéciaux de synchronisation centralisée contenant des paquets de fréquences de référence peuvent s'avérer utiles pour améliorer la stabilité de phase des fréquences émises [CCIR, 1986-90d].

## 3.2 *MIC linéaire*

La méthode fondamentale de codage numérique est la MIC linéaire, dans laquelle la valeur de chaque «mot» numérique représente l'amplitude uniformément quantifiée d'un échantillon du signal en bande de base [CCIR, 1970-74a et b].

Les résultats préliminaires d'une expérience utilisant 7 codecs MIC en cascade pour le codage du signal composite NTSC sont présentés dans le doc. [CCIR, 1974-78i].

Le doc. [CCIR, 1978-82q] décrit des expériences menées en vue de déterminer les dégradations de l'image consécutives à l'utilisation de 10 codecs. Des signaux composites NTSC ont été codés en utilisant divers nombres de bits par échantillon et des fréquences d'échantillonnage de  $3 f_{sc}$  et  $4 f_{sc}$ . Le rapport signal/bruit de la source était élevé.

Une étude des codecs MIC avec 8 bits par échantillon [CCIR, 1982-86g; Devereux, 1983] attire l'attention sur l'importance de la qualité de fonctionnement du codeur/décodeur de base ainsi que des circuits associés lorsqu'il s'agit de déterminer la qualité de fonctionnement d'une chaîne de codecs en cascade. Sont particulièrement importants: le préfiltre et le postfiltre; la stabilisation du niveau de suppression; la distorsion de quantification, notamment sur les signaux à faible temps de montée (ou de descente); la gigue de l'horloge; la non-linéarité aux fréquences moyennes. Dans un codec bien conçu où les éléments précités ont été pris en compte, le bruit de quantification est susceptible d'être le défaut prépondérant; il est supérieur d'environ 2 dB au bruit de quantification théorique dans les codecs essayés. On montre qu'une connexion de 8 codecs en cascade augmente le bruit de quantification d'environ 9 dB, comme prévu.

L'expérience montre qu'avec un équipement de traitement de signaux MIC, il convient de retenir plus de 8 bits par échantillon pour éviter une accumulation rapide de la distorsion de quantification due aux arrondis après chaque processus arithmétique. Toutefois, la quantification à 8 bits par échantillon a été jugée satisfaisante pour les interconnexions entre les équipements utilisant des signaux numériques ( $Y$ ,  $C_R$ ,  $C_B$ ) codés conformément à la Recommandation 601, sous réserve qu'un arrondi soit effectivement appliqué lorsque l'on passe d'un nombre supérieur de bits à 8 bits à la sortie de l'équipement. [Croll, Devereux et Weston, 1987] décrivent une forme adaptée d'arrondi, appelée recyclage de l'erreur, dans le cadre de laquelle les bits de poids inférieur tronqués d'un échantillon sont ajoutés à l'échantillon suivant avant que celui-ci ne soit tronqué, ce qui revient donc à accumuler, et non à ignorer, les résidus de poids inférieur. Lorsque l'on dispose de 8 bits par échantillon, les signaux arrondis de cette manière provoquent des distorsions de quantification de fréquences plus élevées qui ne sont pas visibles, alors que des troncatures simples peuvent provoquer des effets de contours visibles.

## 4. Bibliographie

La bibliographie jointe donne une liste de quelques publications dans le domaine de la télévision numérique. Les documents explicitement mentionnés dans le texte ne sont pas répétés dans la bibliographie.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

CLARKE, C.K.P. [1986] Colour encoding and decoding techniques for line-locked sampled PAL and NTSC television signals. BBC Research Department, Report N° BBC RD 1986/2.

CLARKE, C.K.P. [1988] - PAL decoding: multi-dimensional filter design for chrominance-luminance separation. BBC Research Department Report No BBC RD 1988/11.

CROLL, M.G., DEVEREUX, V.G. et WESTON, M. [septembre 1987]. Accommodating the residue of processed or computed digital video signals within the 8 bit CCIR Recommendation 601. BBC Research Department. Rapport RD 1987/12.

DEVEREUX, V.G. et PHILLIPS, G.J. [1974] Bit-rate reduction of digital video signals using differential PCM techniques. IEE Conf. Publ., N° 119, 83-89.

DEVEREUX, V.G. [juin 1983] Performance of cascaded video PCM codecs. *Rev. de l'UER (Technique)*, 199, 114-130.

DEVEREUX, V.G. [1987] - Limiting of YUV digital video signals. BBC Research Department Report No BBC RD 1987/22.

MESSERSCHMID, U. [1969] Bandbreitenreduktion bei der Fernsehübertragung durch Verringerung der Abtastfrequenz (Réduction de la largeur de bande pour la transmission de télévision par diminution de la fréquence d'échantillonnage). *NTZ*, Vol. 22, 9, 515-521.

NISHIZAWA, T., YUYAMA, I., OKADA, K., TANAKA, Y., KUBOTA, K. et ISHIDA, J. [septembre 1981] Experimental component coding system. NHK Lab. Note 264.

PATEL, B. R. [mars 1980] Effect of sharp cut-off video-frequency filters on chrominance signal in PAL colour television. *Radio Electron. Engr.*, Vol. 50, 3, 117-121.

ROSSI, J. P. [janvier 1976] Sub-Nyquist encoded NTSC colour television. *SMPTE J*, Vol. 85, 1, 1-6.

ROSSI, J. P. [octobre 1981] Une famille simple de filtres numériques pour une hiérarchie binaire. *SMPTE J*, Vol. 90, 10, 956-959.

STOTT, J. H. et PHILLIPS, G. J. [1977] Digital video: multiple sub-Nyquist coding. BBC Research Department Report N° 1977/21.

*Documents du CCIR*

[1970-74]: a. 11/246 (Royaume-Uni); b. 11/298 (Japon).

[1974-78]: a. 11/64 (Japon); b. 11/354 (Japon); c. 11/374 (UER); d. 11/354 (France); e. 11/317 (Japon); f. 11/314 (Japon); g. 11/329 (Etats-Unis d'Amérique); h. 11/410 (Royaume-Uni); i. 11/331 (Etats-Unis d'Amérique); j. 11/409 (URSS); k. 11/65 (France); l. 11/330 (Etats-Unis d'Amérique).

[1978-82]: a. 11/36 (Royaume-Uni); b. 11/14 (UER); c. 11/15 (UER); d. 11/330 (UER); e. 11/328 (URSS); f. 11/285 (UER); g. 11/292 (Etats-Unis d'Amérique); h. 11/339 (OIRT); i. 11/342 (Canada); j. 11/344 (Japon); k. 11/31 (Etats-Unis d'Amérique); l. 11/16 (UER); m. 11/114 (France); n. 11/33 (Etats-Unis d'Amérique); o. 11/343 (Japon); p. 11/278 (Allemagne (République fédérale d')); q. 11/80 (Japon); r. 11/87 (Japon); s. 11/248 (Japon).

[1982-86]: a. 11/22 (Japon); b. 11/90 (URSS); c. 11/81 (Royaume-Uni); d. 11/23 (Japon); e. 11/46 (UER); f. 11/135 (OIRT); g. 11/65 (Royaume-Uni); h. 11/19 (Japon); i. 11/26 (Japon).

[1986-90]: a. 11/323 (Rapporteur principal du GTI 11/7); b. 11/545 (France); c. 11/185 (URSS); d. 11/86 (URSS).

## BIBLIOGRAPHIE

- AKRICH, C. et ZACCARIAN, P. [juin 1981] Exigences de la production sur les systèmes de télévision numérique. *Rev. de l'UER (Technique)*, 187.
- BALDWIN, J. L. E. [septembre 1976] Sampling frequencies for digital coding of television signals. *IBA Tech. Rev.*, 9, 32-36.
- BALDWIN, J. L. E., STALLEY, A. D. et KITCHIN, H. D. [juin 1973] A standards converter using digital techniques. *IBA Tech. Rev.*, 3, 15-29.
- CLARKE, C. K. P. [6-7 février 1981] Digital decoding of PAL and NTSC signals using field delay comb filters and line-lock sampling. *Television Technology in the 80's*. SMPTE, Scarsdale, NY 10583, 200-206. 15th Annual SMPTE Television Conference, San Francisco, Etats-Unis d'Amérique.
- DAVIDOFF, F. [mars 1977] An update of digital television fundamentals. SMPTE, *Digital Video*, Vol. I.
- GRUDZINSKY, M. A., TSUKKERMANN, I. I. et SHOSTATSKY, N. N. [1978] Diskretizatsiya TV izobrazhenii pri tsifrovom kodirovanii (Echantillonnage des images de télévision avec codage numérique). *Tekhnika kino i Televideniya*, 11.
- IGNATEV, N. K. [1961] Optimalnaya diskretizatsiya drymerynykh soobshchenii (Echantillonnage optimal des communications à deux dimensions) *Radiotekhnika*, Vol. 4, 6.
- JONES, A. H. [1979] Digital video: coding techniques and trade-offs. 11th International TV Symposium, Montreux, Suisse.
- KARWOWSKA-LAMPARSKA, A. [1980] Wplyw metod próbkowania sygnału wizyjnego na jakość odtwarzanego obrazu (Influence des méthodes d'échantillonnage des signaux vidéo sur la qualité des images reproduites). *Archiwum Elektrotechniki*, 4, 865-876.
- KARWOWSKA-LAMPARSKA, A. [1984] Telewizyjne systemy cyfrowe (Systèmes de télévision numérique). Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Varsovie, Pologne (République populaire de).
- KHLEBORODOV, V. A. [1984] - Ekonomichnyi TV standard 2 2/3: 1 1/3: 1 1/3 (Norme de télévision rentable 2 2/3: 1 1/3: 1 1/3) - 1ère Conférence nationale scientifique et technique. Améliorations des moyens techniques, de la gestion et de la planification pour la radiodiffusion télévisuelle et la radiodiffusion sonore (VNIITR), Moscou, URSS.
- KRIVOCHEEV, M. I. et autres [1980] *Tsifrovoye televidenie* (Télévision numérique). Maison d'édition Sviaz, Moscou, URSS.
- LUCAS, K. [septembre 1979] Sampling frequencies for digital PAL decoding. IBA Report 104/79.
- OVCHINNIKOV, E. K., PEVSNER, B. M., ROSSELEVICH, I. A., SARDYKO, S. V., TIMOFEYEV, V. E. et TSUKKERMANN, I. I. [1976] Tsifrovoye kodirovaniye televizionnykh izobrazheniy i perspektivy ispolzovaniya yego na teletsentrakh (Le codage numérique des images de télévision et les perspectives de son utilisation aux centres de télévision). *Tekhnika sredstv svyazi* dans les séries *Tekhnika Televideniya*, 4, 20-31.
- PEVSNER, B. M. et TSUKKERMANN, I. I. [1977] O normakh na tsifrovoye kodirovaniye signalov dlya TV tsentrov chetvyortogo pokoleniya (Normes de codage numérique des signaux pour les centres de télévision de la quatrième génération). *Tekhnika kino i Televideniya*, 9, 49-51.
- PTACEK, M. [mai 1977] Digital television transmission systems. *Radio Telev. (OIRT)*, 2, 27-38.
- SABATIER, J. et KRETZ, F. [octobre 1978] Echantillonnage des composantes des signaux de télévision couleur à 625 lignes. *Rev. de l'UER (Technique)*, 171.
- SMPTE [mars 1977, mars 1979 et mars 1980] *Digital Video*, Vol. I, II et III.
- SOROKA, E. Z. et KHLEBORODOV, V. A. [1980] Trekhmernye spektry polnykh tsvetovykh videosignalov (Spectres à trois dimensions des signaux complets vidéo couleur). *Tekhnika sredstv svyazi* dans les séries *Tekhnika Televideniya*, 3, 23.
- TONGE, G. J. [1981] The sampling of television images. UKIBA experimental and development Report 112/81.
- TSUKKERMANN, I. I. et autres [1981] Tsifrovoye kodirovaniye televizionnykh izobrazheniy (Codage numérique des images télévisées). *Radio i svyaz*, Moscou, URSS.
- VILENCHIK, L. S., PALITSKY, V. M. et SOLOVEV, V. M. [1978] Tsifrovaya peredacha signalov televizionnykh programm po coedinitelnym liniyam (Transmission numérique des signaux de programme de télévision sur l'équipement), *Tekhnika kino i Televideniya*, 12.
- WENDLAND, B. [30 mai-4 juin 1981] Lines of development for future television systems. 12th International Television Symposium, Montreux, Suisse.

*Documents du CCIR*

[1974-78]: 11/147 (URSS).

[1978-82]: 11/297 (UER); 11/293 (Etats-Unis d'Amérique); 11/249 (Japon).

[1982-86]: 11/378 (Canada); 11/314 (France).