

RAPPORT 962-2

**FILTRAGE, ÉCHANTILLONNAGE ET MULTIPLEXAGE POUR LE
CODAGE NUMÉRIQUE DE SIGNAUX DE TÉLÉVISION COULEUR**

(Question 25/11, Programme d'études 25H/11)

(1982-1986-1990)

1. Introduction

Le Rapport 629 contient une brève introduction aux questions de largeur de bande et d'échantillonnage, en relation avec le processus de codage des composantes sous forme numérique.

Pour éviter que le débit binaire total du signal numérique soit excessif, il faut évidemment déterminer quelles largeurs de bande des signaux de luminance et de différence de couleur sont suffisantes pour obtenir des signaux de radiodiffusion de haute qualité (lesquels peuvent se trouver sous forme analogique composite). De plus, pour ce qui est du filtrage et de l'échantillonnage des composantes, il faut aussi tenir compte du fait que l'on a proposé d'utiliser ces signaux sous forme numérique à des fins pour lesquelles les exigences pourraient être plus grandes que celles de la radiodiffusion classique (voir le § 2.3). Il faut notamment être attentif aux contraintes qu'imposent les techniques modernes de production de programmes, en tenant compte de la marge de qualité requise pour répondre à la demande croissante d'opérations de traitement des images [Akrich et Zaccarian, 1981].

En ce qui concerne le choix des paramètres d'échantillonnage à appliquer aux composantes, il est évident que les fréquences d'échantillonnage sont étroitement liées aux largeurs de bande de ces composantes. Cependant, d'autres paramètres dépendent de la structure ou des structures d'échantillonnage de l'image (voir le § 3).

Le § 4 traite du nombre de bits nécessaire pour décrire chaque échantillon.

Pour traiter un seul train d'octets dans le studio lorsque le codage des composantes est utilisé, il faut un multiplexage temporel des trois trains d'octets. Quelques configurations possibles sont examinées au § 5.

2. Largeurs de bande

Cette section est divisée en trois sous-sections: les deux premières décrivent les résultats d'essais subjectifs visant à établir les largeurs de bande globales de chacun des signaux de luminance et de différence de couleur, la troisième traite de l'incidence des besoins de traitement des signaux en studio sur ces largeurs de bande.

2.1 Largeur de bande du signal de luminance

On trouve dans les doc. [CCIR, 1978-82a, b] les résultats d'essais effectués par des membres de l'UER afin de déterminer la relation entre la qualité subjective et la largeur de bande de la composante de luminance, en 625 lignes, avec une visualisation monochrome. Les essais ont été effectués selon une méthode décrite dans le Rapport 405 avec l'échelle de dégradation; les images étaient légèrement plus critiques que la moyenne, comme le demande la Recommandation 500.

La principale conclusion est que la limitation de la bande passante à 4,5 MHz (à -3 dB) au moyen d'un filtrage passe-bas à coupure raide introduit une dégradation qui est imperceptible à 50% des observateurs situés à une distance d'observation égale à 4 fois la hauteur de l'image (voir la Fig. 1a). Les résultats indiquent que l'effet du filtrage est moins marqué sur les textes synthétisés électroniquement que sur les images naturelles. Ces études n'ont pas fait apparaître l'avantage escompté de l'utilisation d'un filtre en peigne (avec échantillonnage au-dessous de la limite de Nyquist) par rapport à celle d'un filtre passe-bas avec coupure à la moitié de cette fréquence d'échantillonnage.

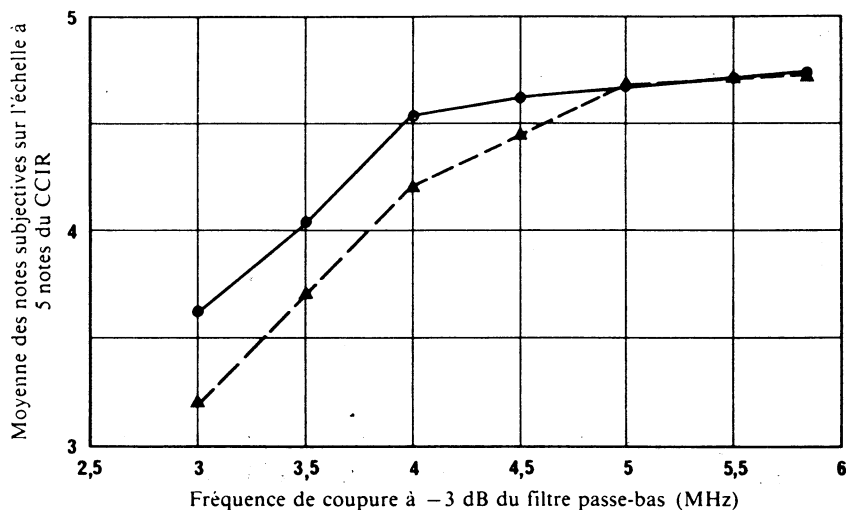


FIGURE 1a — Filtrage passe-bas.
Valeurs moyennes obtenues sur des images d'essai, en 625 lignes,
dans sept laboratoires

- observateurs placés à une distance de six fois la hauteur de l'image
- ▲— observateurs placés à une distance quatre fois la hauteur de l'image

Une analyse des essais subjectifs de l'UER, faite suivant la méthode décrite à l'Annexe III au Rapport 405, est décrite dans [CCIR, 1978-82c]. Le résultat de cette analyse est présenté à la Fig. 1b. Le même document souligne l'effet notable du choix des images d'essai et la dispersion importante des résultats que l'on risque d'obtenir en n'appliquant pas les dispositions de la Recommandation 500. Il y est également indiqué qu'un critère de dégradation de $I = 0,05$ (correspondant à la note 4,8 sur une échelle à 5 notes) est approprié et que, par conséquent, la largeur de bande minimale du signal de luminance doit être de 5,8 MHz.

Il ressort d'essais faits en République populaire de Pologne et décrits dans [CCIR, 1978-82d] que la largeur de bande du signal de luminance ne devrait pas être inférieure à 4,5 MHz dans des systèmes à 625 lignes.

Le doc. [CCIR, 1978-82e] décrit des travaux effectués en URSS et conclut qu'une largeur de bande de 6,0 MHz convient pour le signal de luminance.

Le rapport entre la qualité de l'image et la largeur de bande du signal de luminance, pour des systèmes à 525 lignes a été étudié au Japon [CCIR, 1978-82f]. Des essais ont été effectués à l'aide d'images en couleur, pour deux valeurs différentes de largeur de bande des signaux de différence de couleur; les filtres utilisés dans les canaux de luminance et de différence de couleur étaient des filtres du type Thomson (c'est-à-dire à coupure relativement lente). Les résultats des essais montrent qu'une largeur de bande de 5,6 MHz convient pour le signal de luminance.

2.2 Largeur de bande des signaux de différence de couleur

Des essais faits en République populaire de Pologne [CCIR, 1978-82d] montrent que, pour des systèmes à 625 lignes, la largeur de bande de chaque signal de différence de couleur ne doit pas être inférieure à 1,5 MHz, résultat qui concorde avec celui qui est donné dans le doc. [CCIR, 1978-82e] de l'URSS.

Les travaux décrits dans [CCIR, 1978-82f] portaient également sur des essais visant à déterminer la largeur de bande des signaux de différence de couleur pour les systèmes à 525 lignes. Le rapport entre la qualité de l'image et la largeur de bande des signaux de différence de couleur a été établi grâce à des essais faits avec des images en couleur, comportant deux valeurs différentes de la largeur de bande du signal de luminance. Il ressort des résultats que la largeur de bande des signaux de différence de couleur devrait être d'environ 2,8 MHz (Fig. 2).

Des expériences faites en France [Sabatier et Sallio, 1981; Sabatier et Chatel, 1981] donnent des résultats tout à fait analogues pour les systèmes à 625 lignes.

Des recherches visant à établir la caractéristique optimale lorsqu'il s'agit de limiter la largeur de bande de signaux de différence de couleur sont exposées dans [CCIR, 1978-82g]. Ces études ont été faites en République fédérale d'Allemagne dans l'hypothèse d'une largeur de bande maximale disponible (limite de Nyquist) de 2,0 MHz.

Des études décrites dans [CCIR, 1978-82h] ont utilisé des essais subjectifs en vue de déterminer les caractéristiques optimales d'un filtre, également avec une largeur de bande de 2,0 MHz.

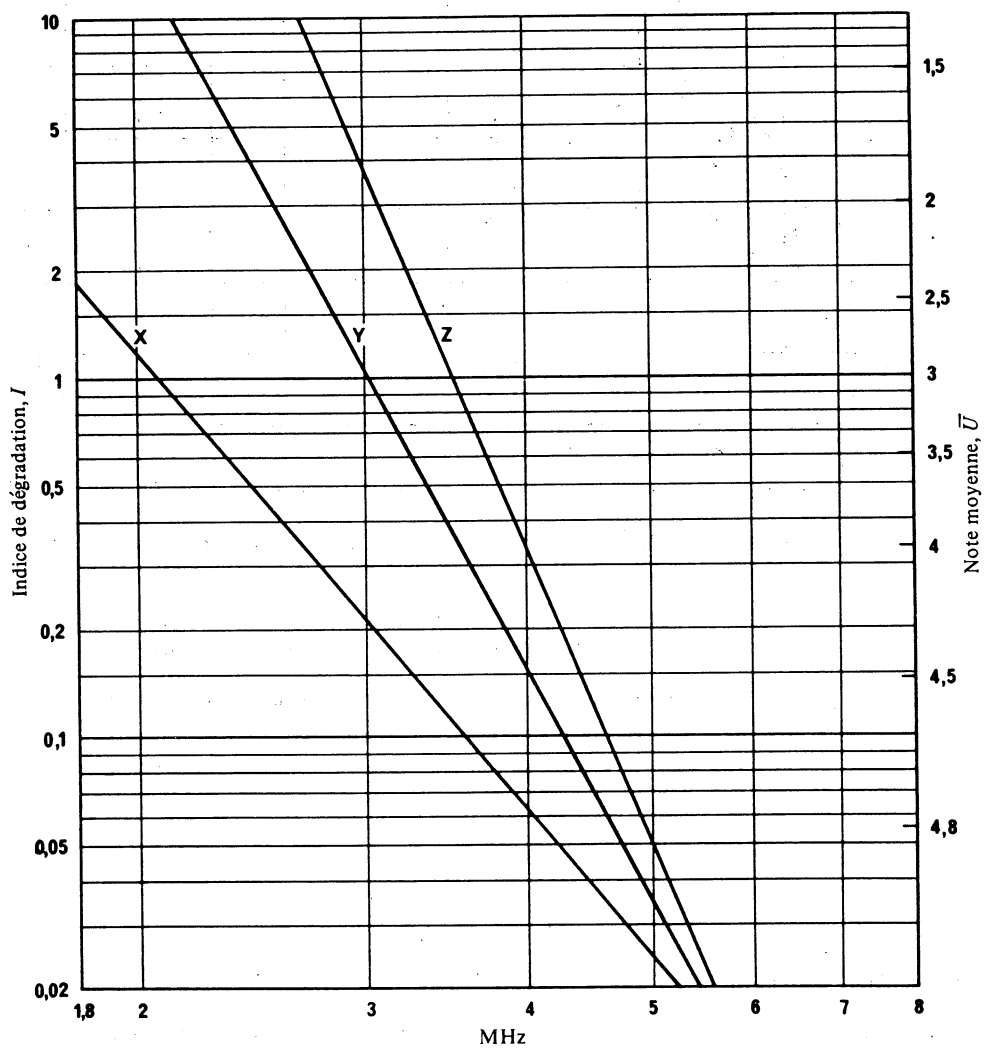


FIGURE 1 b – Caractéristiques de dégradation pour une largeur de bande réduite, d'après les expériences de l'UER: dispersion des résultats obtenus par les différents laboratoires. La distance d'observation est égale à 4 fois la hauteur de l'image

Courbes X: laboratoire A (le moins critique)
 Y: moyenne des résultats obtenus par les 7 laboratoires
 Z: laboratoire B (le plus critique)

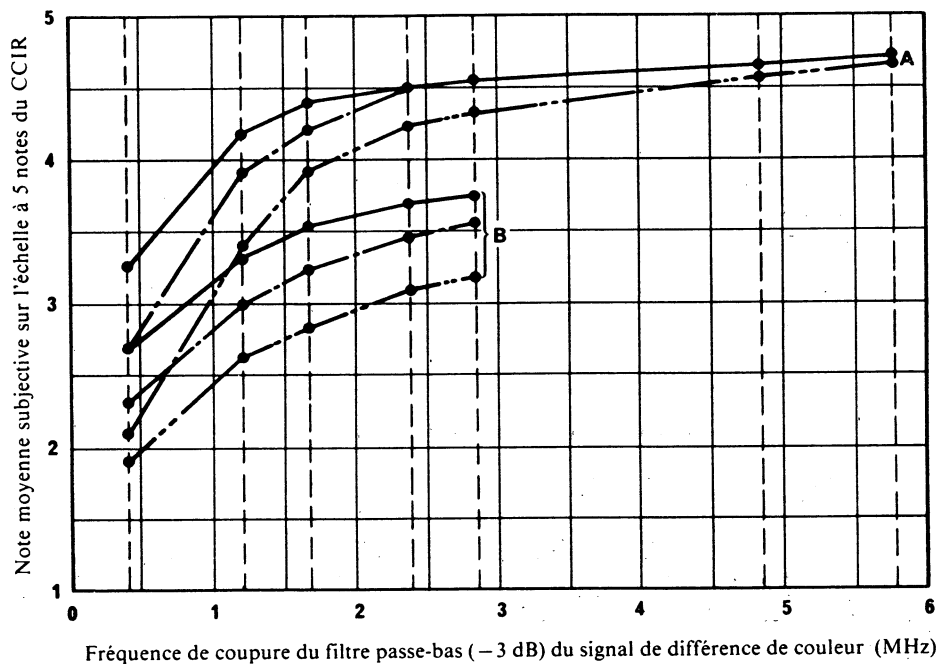


FIGURE 2 — Relation entre la largeur de bande du signal de différence de couleur et la qualité de l'image (systèmes à 525 lignes)

Courbes A: largeur de bande du signal Y 5,8 MHz (-3 dB)

B: largeur de bande du signal Y 2,9 MHz (-3 dB)

— distance d'observation égale à 6 fois la hauteur de l'image

- - - distance d'observation égale à 4 fois la hauteur de l'image

- · - · distance d'observation égale à 2,5 fois la hauteur de l'image

2.3 Largeur de bande requise pour les applications de traitement des signaux en studio

Il ne faut pas oublier que les valeurs de la largeur de bande du signal de luminance obtenues aux § 2.1 et 2.2 sont les valeurs jugées souhaitables lorsque l'on considère l'ensemble de la chaîne du signal avant l'émetteur de radiodiffusion. Le doc. [CCIR, 1978-82i] porte sur la nécessité d'accroître les largeurs de bande du signal de luminance et des signaux de différence de couleur lorsque l'on envisage le traitement des signaux en studio. Il est souligné d'abord que la largeur de bande de luminance doit être suffisante pour permettre un recadrage raisonnable des images, sans dégradation perceptible de l'image de sortie. Ce document fait valoir ensuite que les largeurs de bande des signaux de différence de couleur doivent être suffisantes pour permettre d'obtenir d'excellents résultats en incrustation. Le doc. [CCIR, 1978-82h] porte aussi sur la largeur de bande nécessaire pour les signaux de différence de couleur dans le cadre du traitement d'incrustation. Il y est dit qu'une fréquence d'échantillonnage des signaux de différence de couleur de 6 à 7 MHz (soit la moitié de celle du signal de luminance) est satisfaisante tant en ce qui concerne la qualité des images que celle des incrustations, à condition que la caractéristique de filtrage présente un affaiblissement de 12 dB à la moitié de la fréquence d'échantillonnage; en outre, le rapport entre les fréquences pour lesquelles l'affaiblissement est égal respectivement à 12 dB et 3 dB doit être 1,25 : 1.

Le problème général de la conception des filtres de limitation de bande utilisés dans le codage numérique des signaux de télévision a été étudié en Italie [CCIR, 1978-82j]. Des simulations sur ordinateur ont permis d'étudier l'influence de plusieurs paramètres sur l'amplitude de suroscillations et l'ampleur des distorsions de repliement de spectre.

Le doc. [CCIR, 1982-86a] rend compte d'essais effectués en République populaire de Pologne en vue de déterminer les caractéristiques préférées lorsqu'on utilise une bande passante du signal de luminance égale à 6 MHz pour les systèmes conventionnels à signaux composites. A la suite de ces essais, les caractéristiques ci-après sont proposées: bande passante: 6 MHz; tolérance sur l'affaiblissement d'insertion: $\pm 0,05$ dB; affaiblissement: 15 dB à 6,75 MHz et 40 dB à 7,5 MHz.

Le doc. [CCIR, 1982-86b] fait état d'études effectuées en URSS, compte tenu de ce qui précède, et d'autres considérations relatives à la conception pratique et propose une bande passante égale à 5,75 MHz, une tolérance d'affaiblissement d'insertion de 0,1 dB, un affaiblissement de 20 dB à 6,75 MHz et de 40 dB à 7,5 MHz pour le filtre du signal de luminance.

Une étude a été effectuée en Italie [CCIR, 1982-86c] à l'aide d'une simulation par ordinateur des caractéristiques de pré-filtrage et de post-filtrage fondée sur la minimisation de l'influence pondérée des suroscillations et de repliement du spectre. Cette étude a donné des résultats préliminaires appréciables qui conduisent à admettre les caractéristiques de filtre des signaux de luminance et de différence de couleur du type de celles qui sont données dans [CCIR, 1982-86d].

Une étude minutieuse des caractéristiques d'une chaîne de codecs MIC en cascade [CCIR, 1982-86e, f; Devereux, 1982] a montré qu'après avoir réduit au minimum les défauts des codecs, les dégradations les plus importantes qu'il est possible d'éviter sont imputables aux caractéristiques passe-bande en amplitude et en phase des pré-filtres et des post-filtres analogiques; des propositions relatives aux caractéristiques sont faites dans les documents ci-dessus.

L'OIRT [CCIR, 1982-86g] a étudié une proposition visant à utiliser une fréquence de coupure de 5,75 MHz pour le signal de luminance dans la norme numérique 4 : 2 : 2. Cette fréquence est plus proche de la fréquence de coupure de 6 MHz pour les signaux vidéo spécifiés par les normes D, K, K1 et L (voir le Rapport 624). L'adoption de la valeur de 6 MHz pour le filtre limiteur de bande est également en cours d'étude.

C'est à partir des résultats des études ci-dessus et d'une étude sur la réalisation pratique de filtres efficaces répondant aux besoins de toutes les administrations que les caractéristiques données à la Fig. 1 de l'Annexe III de la Recommandation 601 ont été établies.

On a poursuivi cette étude [CCIR, 1982-86d, f; Devereux, 1984] afin d'arrêter les spécifications des filtres des signaux de différence de couleur pour la norme de codage 4 : 2 : 2 de la Recommandation 601. A cette occasion, une attention spéciale a été accordée à ce qui suit:

- a) la nécessité d'augmenter au maximum les largeurs de bande utilisables des signaux de luminance et des signaux de différence de couleur,
- b) la nécessité de veiller à ce que les tolérances des filtres passe-bande ne donnent lieu qu'à des dégradations négligeables lorsqu'un certain nombre de paires de filtres sont insérées en tandem dans une chaîne de transmission,
- c) en plus de ce qui vient d'être dit sous b), la nécessité d'éviter des valeurs et des tolérances inutilement rigoureuses,
- d) la nécessité pour les constructeurs de respecter les spécifications des filtres tant analogiques que numériques dont les coûts de production doivent être raisonnables.

L'étude a abouti à la spécification de filtres analogiques de signaux de différence de couleur échantillonnés à 6,75 MHz qui est donnée à la Fig. 2 de l'Annexe III à la Recommandation 601. La spécification d'un filtre numérique correspondant pour la conversion du taux d'échantillonnage entre signaux échantillonnés à 13,5 MHz et signaux échantillonnés à 6,75 MHz est représentée sur la Fig. 3 de l'Annexe III à la Recommandation 601.

Certaines indications concernant la mise en œuvre pratique des filtres recommandés dans l'Annexe III à la Recommandation 601 sont données ci-après.

Dans les propositions relatives aux filtres utilisés dans le codage et dans le décodage, on a supposé que, dans les post-filtres qui sont placés après les convertisseurs numérique-analogique, la correction de la caractéristique ($\sin x/x$) est réalisée. Les tolérances dans la bande passante du filtre, plus le correcteur en ($\sin x/x$), plus la caractéristique théorique en ($\sin x/x$) devraient être les mêmes que celles données pour les filtres proprement dits. Afin d'y parvenir plus aisément, il y a lieu, lors de la conception, de traiter le filtre, le correcteur en ($\sin x/x$) et l'égalisateur du temps de propagation comme un ensemble unique.

Il faut que la somme des temps de propagation dus au filtrage et au codage des composantes de luminance et de différence de couleur soit la même. Le temps de propagation est deux fois plus grand dans le filtre de différence de couleur (Fig. 2 de l'Annexe III à la Recommandation 601) que dans celui de luminance (Fig. 1 de l'Annexe III à la Recommandation 601). Il est difficile d'égaliser ces temps de propagation en utilisant des lignes à retard analogiques sans dépasser les tolérances fixées dans la bande passante; aussi est-il recommandé que la plus grande partie de ce temps (exprimé en multiples entiers de la période d'échantillonnage) soit égalisée dans le domaine numérique. Pour la correction d'un reste éventuel, il convient de noter que le circuit d'échantillonnage et de maintien du décodeur introduit un retard uniforme égal à la moitié d'une période d'échantillonnage.

Il est reconnu que les tolérances de l'ondulation et du temps de propagation de groupe dans la bande passante sont très strictes. L'état actuel des études indique qu'il est nécessaire de les respecter afin qu'un nombre significatif d'opérations de codage et de décodage puisse être effectué en cascade sans que l'on doive sacrifier la haute qualité potentielle de la norme de codage 4 : 2 : 2. Comme les performances des instruments de mesure actuellement disponibles sont limitées, les constructeurs risquent d'éprouver des difficultés à vérifier économiquement que chacun des filtres d'une production en série satisfait bien aux tolérances. Il est néanmoins possible de concevoir des filtres tels que les caractéristiques spécifiées soient satisfaites dans la pratique et les constructeurs doivent faire tout leur possible, dans la production en série, pour aligner chaque filtre de manière qu'il respecte le gabarit correspondant.

Des évaluations subjectives du seuil de visibilité pour les oscillations parasites du signal de couleur ont été effectuées au Japon. Les résultats montrent que le seuil de visibilité est atteint à 2,5% ou moins, pour les mires et caractères synthétisés électroniquement et à 5% ou plus pour les images de type général. Compte tenu des résultats de ces évaluations, on a conçu un filtre de mise en forme du signal de couleur pour lequel la perturbation totale due aux oscillations parasites et aux distorsions de repliement du spectre était inférieure à 2,5%. Cette caractéristique peut être obtenue à l'aide d'un filtre transversal numérique [CCIR, 1982-86h].

Les spécifications données dans l'Annexe III à la Recommandation 601 étaient conçues pour préserver dans la plus large mesure possible le contenu spectral des signaux Y , C_R et C_B d'un bout à l'autre de la chaîne des signaux en composantes. Il est reconnu, toutefois, que la caractéristique spectrale de différence de couleur doit être mise en forme à l'aide d'un filtre à coupure progressive lente inséré dans les récepteurs de contrôle, ou à la fin de la chaîne des signaux en composantes.

2.4 Largeur de bande et filtrage pour la conversion entre taux d'échantillonnage différents

Le Document [CCIR, 1986-1990a] traite des caractéristiques de filtrage numérique et d'interpolation nécessaires pour établir la liaison entre les signaux 4:2:2 de la Recommandation 601 et des signaux acheminés en utilisant des fréquences d'échantillonnage inférieures; il contient des exemples de filtres, de complexité raisonnable, destinés à préserver l'information contenue dans ces signaux. Seul le filtrage horizontal est pris en considération.

Le Document [CCIR, 1986-1990b] contient la description d'essais subjectifs effectués à l'aide des caractéristiques susmentionnées mises en oeuvre par simulation sur ordinateur. On a constaté que pour les images naturelles, les effets du sous-échantillonnage sont plus visibles dans les zones colorées, mais quelques dégradations ont été introduites par le sous-échantillonnage de la composante luminance d'images produites électroniquement. La première conclusion fait envisager l'emploi du sous-échantillonnage en quinconce pour les signaux de chrominance.

3. Paramètres d'échantillonnage

Le processus d'échantillonnage est déterminé 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,
- le processus de filtrage, qui peut s'effectuer dans une, deux ou trois dimensions.

La structure d'échantillonnage susmentionnée peut se répéter ou non d'image à image. De même, le nombre d'échantillons par ligne n'est pas nécessairement constant d'une ligne à l'autre. Dans tous les exemples donnés ci-après, les structures d'échantillonnage sont stables d'image à image.

Une étude théorique générale est donnée dans [Kretz et Sabatier, 1981].

Certaines comparaisons entre structures d'échantillonnage orthogonales et en quinconce sont données dans [CCIR, 1978-82d]: il en ressort que la structure orthogonale présente certains avantages.

3.1 *Fréquences d'échantillonnage*

L'UER a étudié les problèmes que pose la définition d'un ensemble normalisé de paramètres de codage fondamentaux pour les équipements de studios de télévision. Les quatre principaux objectifs visés étaient les suivants:

- éliminer, dans le secteur de la production, les différences entre les systèmes actuels à 625 lignes;
- assurer une qualité technique d'image au moins aussi élevée que celle que l'on peut obtenir avec des méthodes modernes au moyen des techniques analogiques;
- s'assurer que la norme est adaptée à la technologie dans son état actuel ou dans l'état qui est susceptible d'être le sien dans un proche avenir;
- définir des valeurs de paramètres tenant compte des besoins du traitement des images en studio.



Dans une première série de travaux [CCIR, 1978-82k], on a utilisé l'échantillonnage orthogonal avec des fréquences d'échantillonnage de $768 f_H$ pour le signal de luminance et de $256 f_H$ pour les signaux de différence de couleur (f_H étant la fréquence de ligne), les échantillons de différence de couleur coïncidaient dans l'espace et chaque paire d'échantillons de différence de couleur coïncidait avec un échantillon de luminance.

Ces études ont montré que de nouveaux travaux étaient nécessaires, notamment en ce qui concerne l'influence des besoins de traitement des images sur le choix des fréquences d'échantillonnage.

Les paramètres d'échantillonnage examinés dans [CCIR, 1978-82k] sont repris dans [CCIR, 1978-82l], pour évaluer dans quelle mesure ils sont adaptés à la transmission numérique à un débit de 140 Mbit/s. On pense que des signaux fondés sur ces paramètres d'échantillonnage seraient de meilleure qualité que les signaux actuellement fournis par les transmissions analogiques.

L'UER a fait une nouvelle série d'études sur les fréquences d'échantillonnage. Il s'agissait, entre autres, de faire des expériences visant à évaluer la qualité des images que l'on pouvait obtenir en utilisant plusieurs valeurs des paramètres dans la gamme 12 : 4 : 4 à 14,3 : 7,15 : 7,15, ces nombres correspondant aux fréquences d'échantillonnage (MHz) utilisées respectivement pour le signal de luminance et pour les deux signaux de différence de couleur. Outre le jeu 12 : 4 : 4, tous les jeux de paramètres évalués étaient tels que la fréquence d'échantillonnage du signal de luminance était le double de celle des signaux de différence de couleur. Le doc. [CCIR, 1978-82m] et la réf. [UER, 1981] décrivent ces travaux et analysent les résultats obtenus avec chacune des valeurs des paramètres, selon un certain nombre de critères.

En premier lieu, pour ce qui est de la qualité des images obtenue après une conversion *RGB* analogique/*YUV* numérique, les résultats montrent, d'une façon générale, que l'on perçoit une amélioration de la qualité avec le jeu de paramètres 12 : 6 : 6 par rapport au jeu 12 : 4 : 4. Cependant, ils montrent aussi que la qualité donnée par le jeu 14,3 : 7,15 : 7,15 n'est pas, à cet égard, sensiblement meilleure que la qualité obtenue avec le jeu 12 : 6 : 6.

En second lieu, pour ce qui concerne la qualité obtenue en incrustation, les résultats montrent que, si le jeu 12 : 6 : 6 donne à l'évidence une qualité meilleure que le jeu 12 : 4 : 4, on peut observer une amélioration relativement régulière de la qualité à mesure que les fréquences d'échantillonnage des signaux de luminance et de différence de couleur augmentent jusqu'à leur valeur maximale, c'est-à-dire 14,3 : 7,15 : 7,15.

En troisième lieu, on a constaté dans des essais d'expansion modérée des images dans la direction horizontale qu'aucune distorsion de repliement de spectre n'a pu être observée, avec des images d'essai naturelles (non synthétisées électroniquement) et cela, pour toutes les fréquences d'échantillonnage du signal de luminance situées dans la gamme 12 : 6 : 6 à 14,3 : 7,15 : 7,15. Toutefois, quand on utilise une mire de fréquences horizontales vobulée produite électroniquement, les distorsions de repliement de spectre diminuent lorsque la fréquence d'échantillonnage augmente; la diminution est surtout notable dans la gamme 12-13 MHz.

Enfin, pour ce qui est de la réduction du débit binaire, les études montrent qu'on peut réduire le débit d'un signal échantillonné selon la norme 14,3 : 7,15 : 7,15 de manière à ne pas dépasser 140 Mbit/s, sans que cela affecte la qualité de l'image ou la capacité potentielle de traitement par incrustation.

Certains des résultats susmentionnés proviennent de travaux effectués au Royaume-Uni et décrits en détail dans [CCIR, 1978-82n]. Afin d'étudier les propriétés de systèmes susceptibles d'entrer, en tant que niveaux inférieurs, dans la famille des normes compatibles de codage numérique, les essais ont pris en compte deux sous-ensembles de paramètres différents. Dans l'un de ces sous-ensembles, la fréquence d'échantillonnage du signal de luminance était égale à quatre fois celle des signaux de différence de couleur.

Lors des essais subjectifs faits au cours de ces études, on a fait appel à la méthode du double stimulus décrite à l'Appendice I de la Recommandation 500. Les images de référence résultaient du codage numérique des signaux d'entrée selon la norme 14,3 : 14,3 : 14,3. Les résultats détaillés des essais subjectifs ainsi obtenus ont été analysés suivant la méthode décrite dans l'Annexe III au Rapport 405 et les résultats de cette analyse, décrits dans [CCIR, 1978-82o], sont donnés en termes d'indice de dégradation I et de note moyenne \bar{U} . Il ressort de cette analyse que, en ce qui concerne la qualité de base des images, la norme 13,5 : 6,75 : 6,75 se caractérise par un indice de dégradation I de 0,03 à 4 H (c'est-à-dire, par une note moyenne supérieure à 4,8) et que les résultats correspondants en ce qui concerne la qualité obtenue en incrustation sont $I = 0,3$ et $\bar{U} = 4,0$.

En URSS, on a examiné les paramètres d'échantillonnage appropriés aux normes D et K. Les premiers travaux portaient sur l'étude d'un système dans lequel le signal de luminance était échantillonné orthogonalement à une fréquence de $800 f_H$ (12,5 MHz) et où chacun des signaux de différence de couleur était échantillonné de même à $200 f_H$ (3,125 MHz); ces travaux sont consignés dans [CCIR, 1978-82e]. Dans les études décrites dans [CCIR, 1978-82p], les valeurs des paramètres d'échantillonnage pour les studios de télévision numérique ont été révisées, car il a été jugé souhaitable de porter les fréquences d'échantillonnage aux environs de 13 à 13,5 MHz et de 6,5 à 6,75 MHz respectivement pour les signaux de luminance et de différence de couleur.

Le doc. [CCIR, 1978-82q] rend compte des résultats d'essais subjectifs complets pour déterminer la relation entre, d'une part, la qualité de reproduction de l'image en couleur et, d'autre part, les fréquences d'échantillonnage et les structures d'échantillonnage utilisées pour les signaux de luminance et de différence de couleur.

Une norme destinée à faire partie de la famille des normes de codage numérique au-dessous du niveau recommandé comme norme principale de studio est décrite dans [CCIR, 1978-82r]. Dans cette norme, le signal de luminance est échantillonné à 10,125 MHz et la largeur de bande utile va jusqu'à 5 MHz. Les signaux de différence de couleur sont échantillonnés à une fréquence égale à 3,375 MHz et ont une largeur de bande de 1,5 MHz. Un complément d'étude est nécessaire en vue de choisir la meilleure structure d'échantillonnage pour ce système. Ce système est appelé système 3 : 1 pour deux raisons: d'une part, à cause des rapports particuliers utilisés pour calculer les fréquences d'échantillonnage à partir des fréquences recommandées pour la norme principale de studio et, d'autre part, à cause de l'utilisation d'un codage séquentiel en ligne des signaux de différence de couleur. La qualité des images obtenue avec ce système serait au moins égale à la qualité obtenue avec un codec PAL analogique traditionnel.

Un système pour le codage d'un signal de télévision à un débit binaire de 70 Mbit/s utilisant la méthode MICD (quantification repliée avec échantillon de 5 bits) est décrit dans [CCIR, 1982-86i; Wengenroth, 1982]. Les fréquences d'échantillonnage du signal de luminance et des signaux de différence de couleur sont dérivées de la norme de studio et obtenues à l'aide d'un filtre numérique qui donne une conversion de la fréquence d'échantillonnage dans le rapport 6 : 5. La transmission séquentielle en ligne est prévue pour les deux signaux de différence de couleur.

Aux Etats-Unis d'Amérique, des essais subjectifs à grande échelle ont été effectués conformément à la méthode décrite dans le Rapport 405, Annexe IV, sur des signaux utilisant le codage numérique des composantes dans le contexte de la norme à 525 lignes; ces essais font l'objet des doc. [CCIR, 1978-82s] et [SMPTEJ, 1981]. On avait choisi des fréquences d'échantillonnage du signal de luminance correspondant à 768, 864 et 912 échantillons par ligne entière. Le choix des rapports entre la largeur de bande du signal de luminance et celle des signaux de différence de couleur était le suivant: 4 : 4 : 4, 4 : 2 : 2, 4 : 1 : 1 et 2 : 1 : 1. Les essais portaient sur la qualité de base des images et la qualité obtenue avec les divers jeux de paramètres dans le contexte de divers traitements de production: expansion des images, incrustation, enregistrement numérique avec générations multiples, décodage numérique à partir des signaux couleur composites analogiques M/NTSC et vice versa.

Ces essais confirment le choix du jeu de paramètres 4 : 2 : 2 comme niveau de qualité à retenir pour une norme de studio et ont mis en évidence une qualité des images faible, mais qui augmente en fonction de la fréquence d'échantillonnage.

Des essais subjectifs avec des paramètres d'échantillonnage analogues ont été effectués au Japon [CCIR, 1978-82t]. Les essais comportaient un traitement d'incrustation numérique pour chaque jeu de paramètres; les fréquences d'échantillonnage des signaux de luminance étaient de 12,1, 13,6 et 14,3 MHz. Les deux résultats principaux peuvent être résumés comme suit: premièrement, la qualité des images diminue progressivement à mesure que diminue la fréquence d'échantillonnage des signaux de différence de couleur à partir d'une valeur égale à la valeur utilisée pour le signal de luminance, jusqu'à un quart de cette valeur; deuxièmement, la qualité des images obtenues en incrustation décroît de manière significative à mesure que diminue la fréquence d'échantillonnage utilisée pour les signaux de différence de couleur; cette diminution est plus marquée lorsque la fréquence d'échantillonnage est réduite en partant de la moitié de la fréquence utilisée pour le signal de luminance jusqu'au quart de cette valeur.

Les doc. [CCIR, 1982-86j; Khleborodov, 1983] contiennent une étude théorique des distorsions de l'image dans la transmission séquentielle en ligne de signaux de différence de couleur avec un cycle de deux trames.

Le doc. [CCIR, 1982-86k] donne les résultats d'évaluations subjectives de la qualité de l'image obtenue avec les niveaux de codage 4 : 1 : 1, 4 : 2 : 0, 2 : 1 : 1 et 3 : 1 : 0, y compris les effets du sous-échantillonnage à décalage de ligne et de trame et du traitement séquentiel en ligne des signaux de différence de couleur; ces essais utilisaient des images d'essai fixes. Les résultats ont montré que la qualité de l'image pour le niveau 2 : 1 : 1 avec sous-échantillonnage à décalage de trame était supérieure à celle des autres niveaux de codage avec le même débit binaire pour la plupart des images soumises aux essais.

Le doc. [CCIR, 1982-86l] présente des essais subjectifs effectués sur un système 2 : 1 : 1 employant un sous-échantillonnage avec décalage de trame, qui conduisent à penser que les mouvements peuvent être rendus de façon satisfaisante.

3.2 *Changement de fréquence d'échantillonnage*

Le changement de fréquence d'échantillonnage est nécessaire dans de nombreuses opérations de traitement des images. Un exemple est celui de la conversion de signaux d'un niveau de la famille de normes compatibles de codage numérique à un autre. Le doc. [CCIR, 1978-82u] décrit un processus de filtrage fondé sur un filtrage en peigne de la partie supérieure du spectre du signal, ce qui permet une conversion aisée des signaux entre divers niveaux d'une famille à relation binaire (4 : 4 : 4; 4 : 2 : 2; 2 : 1 : 1). Le doc. [CCIR, 1978-82t], la réf. [Nishizawa et autres, 1981] décrivent un filtre passe-bas d'interpolation très perfectionné et destiné au même but.

Le changement de fréquence d'échantillonnage s'impose aussi lorsque la famille de normes compatibles de codage numérique n'est pas fondée sur des rapports binaires. Le doc. [CCIR, 1978-82v] montre que la conception du filtre d'interpolation ne sera pas exagérément complexe si le changement de fréquence d'échantillonnage s'effectue selon un rapport de nombres rationnels.

Le doc. [CCIR, 1982-86m] indique comment on peut utiliser des méthodes de codage à la source et des techniques de réduction du débit binaire diverses pour adapter les divers niveaux de la famille des normes de codage numérique compatible aux niveaux appropriés de la hiérarchie de transmission fondée sur un débit binaire de 2048 kbit/s.

Pour éviter des pertes de qualité dues aux conversions des fréquences d'échantillonnage et aux procédures de codage effectuées en cascade et éviter de devoir installer un équipement de transcodage à tous les nœuds du réseau de transmission fonctionnant à des débits binaires différents, il est souhaitable d'effectuer la conversion du débit binaire dans le studio de télévision, en fonction du débit binaire de la section de circuit ayant la plus petite largeur de bande.

Ainsi, les signaux transmis par une liaison point à point constituée par la connexion en cascade de sections de différentes capacités doivent être codés en fonction de la section dont la capacité est la plus faible, à moins qu'il ne soit nécessaire d'obtenir un signal de qualité supérieure en un point intermédiaire.

4. MIC à quantification uniforme

La forme fondamentale du codage numérique est la MIC à quantification uniforme dans laquelle la valeur de chaque «mot» numérique représente l'amplitude uniformément quantifiée d'un échantillon du signal de bande de base.

Dans tous les exemples susmentionnés, on propose une quantification uniforme à 8 bits par échantillon pour le signal de luminance et pour les signaux de différence de couleur [CCIR, 1978-82e, k, l et w].

5. Méthodes de multiplexage

Pour transmettre des composantes numériques sur un canal unique, il faut combiner sous la forme d'un multiplexage temporel trois signaux codés séparément, dont l'un décrit la luminance et les deux autres les différences de couleur.

Dans le doc. [CCIR, 1978-82x], deux formes de multiplexage sont comparées. Dans la première, on groupe les trois mots numériques décrivant chaque élément d'image; dans la seconde, ce sont les mots décrivant les valeurs du signal de luminance de tous les éléments d'image d'une ligne qui sont groupés et ce groupe de mots est suivi de deux autres groupes, décrivant chacun les valeurs correspondantes du signal de différence de couleur. D'après cette comparaison, la première organisation est plus économique, mais la seconde est plus pratique du point de vue du contrôle.

Dans le doc. [CCIR, 1978-82k], une méthode de multiplexage identique à la première des deux méthodes décrites ci-dessus est examinée.

Les travaux effectués en URSS sur le codage numérique des composantes et décrits dans [CCIR, 1978-82e] font état d'une configuration de multiplexage dans laquelle les signaux sont transmis dans l'ordre suivant: Y , D_R , Y , Y , D_B , Y , où Y représente une valeur du signal de luminance et D_R et D_B représentent des valeurs des signaux de différence de couleur.

Le doc. [CCIR, 1982-86n] décrit un multiplexeur qui combine deux signaux, dont chacun a un débit binaire d'environ 70 Mbit/s, afin de produire un signal au quatrième niveau de la hiérarchie, soit 139 264 kbit/s. Chaque affluent à 70 Mbit/s peut contenir un signal de télévision numérique ou deux signaux à 34 368 kbit/s. Le signal de verrouillage de trame et le débit binaire net des deux affluents sont adaptés aux besoins de la téléphonie et de la télévision. On a donc la possibilité d'adapter les signaux de télévision numériques à d'autres débits binaires hiérarchiques. L'insertion d'un signal de verrouillage de trame à l'interface entre le studio de télévision et le système de transmission faciliterait considérablement la transmission de signaux de télévision dans le «Réseau numérique à intégration de services» (RNIS).

Le doc. [CCIR, 1982-86o] donne les résultats d'études relatives à une méthode de transmission de bits en parallèle qui permet un transcodage facile dans les deux sens, avec un format de bits en série (débit binaire de 108 Mbit/s) utilisant deux canaux, de même qu'un transcodage dans les deux sens avec un format (débit binaire de 216 Mbit/s) utilisant un seul canal. Le doc. [CCIR, 1982-86p] fournit des renseignements sur l'interface parallèle série 2×108 Mbit/s et sur l'interface série 216 Mbit/s.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AKRICH, C. et ZACCARIAN, P. [juin 1981] Exigences de la production sur les systèmes de télévision numérique. *Rev. de l'UER (Technique)*, 187.
- DEVEREUX, V. G. [1982] Tests on eight video PCM codecs in tandem handling composite PAL and monochrome video signals. BBC Research Department Report RD 1982/19.
- DEVEREUX, V. G. [juin 1984] Filtering of the colour-difference signals in 4 : 2 : 2 YUV video coding systems. BBC Research Department Report 1984/4.
- KHLEBORODOV, V. A. [1983] Postrochnaya peradatcha tsvetraznostnykh signalov v tsifrovom televidenii (Transmission séquentielle en lignes des signaux de différence de couleur en télévision numérique). *Tekhnika kino i Televideniya*, 7, 44.
- KRETZ, F. et SABATIER, J. [mars-avril 1981] Echantillonnage des images de télévision: analyse dans le domaine spatio-temporel et dans le domaine de Fourier. *Ann. des Télécomm.*, Vol. 36, N° 3-4, 231-273.
- NISHIZAWA, T., YUYAMA, I., OKADA, K., TANAKA, Y., KUBOTA, K. et ISHIDA, J. [septembre 1981] Experimental component coding system. NHK Lab. Note 264.
- SABATIER, J. et CHATEL, J. [novembre-décembre 1981] Qualité des signaux de télévision en bande de base — II^e Partie — Evaluation des performances de diverses méthodes de décodage des signaux composites de TV couleur. *Radiodif.-Télév.*, Vol. 5/5, 70, 12-21.
- SABATIER, J. et SALLIO, P. [septembre-octobre 1981] Qualité des signaux de télévision en bande de base — I^{re} Partie — Evaluation subjective de l'effet de la limitation de largeur de bande sur les composantes du signal de télévision. *Radiodif.-Télév.*, Vol. 4/5, 69, 7-15.
- SMPTE JOURNAL [octobre 1981] Numéro spécial: A report of digital video demonstrations using component coding.
- UER [juin 1981] Numéro sur le codage numérique de la télévision. *Rev. de l'UER (Technique)*, 187.
- WENGENROTH, G. [1982] Die Codierung von Farbfernseh- und Bildfernsprechsignalen in einem digitalen optischen Teilnehmeranschlussnetz (Codage des signaux de télévision et de visiophonie en couleur dans un réseau numérique de distribution en câble à fibres optiques). *NTZ-Archiv.*, Vol. 4, 4.

Documents du CCIR

- [1978-82]: a. 11/17 (UER); b. 11/18 (UER); c. 11/289 (Royaume-Uni); d. 11/89 (Pologne (République populaire de)); e. 11/128 (URSS); f. 11/305 (Japon); g. 11/113 (Allemagne (République fédérale d')); h. 11/261 (France); i. 11/323 (Italie); j. 11/327 (Italie); k. 11/14 (UER); l. 11/112 (Allemagne (République fédérale d')); m. 11/330 (UER); n. 11/285 (Royaume-Uni); o. 11/288 (Royaume-Uni); p. 11/328 (URSS); q. 11/302 (Pologne (République populaire de)); r. 11/278 (Allemagne (République fédérale d')); s. 11/292 (Etats-Unis d'Amérique); t. 11/343 (Japon); u. 11/294 (Etats-Unis d'Amérique); v. 11/243 (Allemagne (République fédérale d')); w. 11/31 (Etats-Unis d'Amérique); x. 11/111 (Allemagne (République fédérale d')).
- [1982-86]: a. 11/393 (Pologne (République populaire de)); b. 11/327 (URSS); c. 11/348 (Italie); d. 11/292 (GTI 11/7); e. 11/65 (Royaume-Uni); f. 11/276 (Royaume-Uni); g. 11/424 (OIRT); h. 11/31 (Japon); i. 11/43 (Allemagne (République fédérale d')); j. 11/90 (URSS); k. 11/22 (Japon); l. 11/415 (Japon); m. 11/14 (Allemagne (République fédérale d')); n. 11/15 (Allemagne (République fédérale d')); o. 11/24 (Japon); p. 11/136 (OIRT).
- [1986-90]: a. GTI 11/7-138 (Royaume-Uni); b. GTI 11/7-159 (Italie).

BIBLIOGRAPHIE

- KHLEBORODOV, V. A. et CHTEINBERG, A. L. [1984] Vybór pred i postfiltróv dlya tsifrovogo TV standarta 4 : 2 : 2 (Choix des préfiltres et des postfiltres pour la télévision numérique pour le niveau 4 : 2 : 2 de la famille). *Tekhnika kino i Televideniya*, 2, 50-53.
- KHLEBORODOV, V. A. et SOROKA, E. Z. [1980] Diskretizatsiya polnykh tsvetovykh videosignalov (Echantillonnage des signaux vidéo couleur complets). *Tekhnika sredstv svyazi* dans les séries *Tekhnika Televideniya*, 3, 23.
- KRIVOCHEEV, M. I., NIKANOROV, S. I. et KHLEBORODOV, V. A. [1983] Mezhdunarodny standart tsifrovogo kodirovaniya TV signalov — Chast 1 (Norme internationale pour le codage numérique des signaux de télévision — Partie 1). *Radio i televidenie (OIRT)*, 1.
- OIRT [septembre 1983] Opredelenie kharakteristik i dopuskov vkhodnykh filtrov signala yarkosti i signalov tvetnosti, pri tsifrovom kodirovanii televizionnykh signalov (Définition des caractéristiques et des tolérances des filtres d'entrée pour les signaux de luminance et de chrominance dans le codage numérique des signaux de télévision). Document TK-III-1638 (République populaire de Pologne).