

Zeitschrift: Technische Mitteilungen / Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe = Bulletin technique / Entreprise des postes, téléphones et télégraphes suisses = Bollettino tecnico / Azienda delle poste, dei telefoni e dei telegrafi svizzeri

Herausgeber: Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe

Band: 56 (1978)

Heft: 10

Artikel: Progrès réalisés dans le domaine de la transmission numérique des programmes radiophoniques

Autor: Mury, Roland

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-875220>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 30.04.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Progrès réalisés dans le domaine de la transmission numérique des programmes radiophoniques

Roland MURY, Berne

621.376.56:621.391.31.037.37:621.396.74:621.396.97

Fortschritte auf dem Gebiet der digitalen Übertragung der Rundfunkprogramme

Zusammenfassung. Dieser Artikel soll zeigen, welche Verfahren am häufigsten zur digitalen Kodierung der hochwertigen Tonsignale herangezogen werden. Zuerst werden die verschiedenen auf der Momentanwert- und der Quasi-Momentanwertkompression beruhenden Kodierungsgesetze definiert. Dann werden einige der wichtigsten Merkmale dieser Quantisierungsgesetze miteinander verglichen, wobei besonders auf deren Vor- und Nachteile bei der praktischen Anwendung eingegangen wird. Auch wird vom Problem des Schutzes gegen Übertragungsfehler die Rede sein; dabei wird die Struktur der Fehler erläutert, und es werden die verschiedenen Möglichkeiten, deren subjektiven Einfluss bei der Dekodierung zu verringern, beschrieben. Ferner wird die Kompatibilität mit den Telefontormen kurz zur Sprache gebracht und nicht zuletzt ein auf einem Gesetz der Momentanwertkompression beruhendes System vorgeschlagen, bei dem ein Tonkanal hoher Güte den Platz von genau sechs Sprachkanälen in einem primären PCM-Multiplexer von 30 Kanälen zu 2048 kbit/s einnimmt. Schliesslich werden kurz die Vorteile untersucht, die diese Kompatibilität mit den Telefontormen mit sich bringt, wenn es darum geht, eine gemischte Übertragung von Rundfunk-, Telefon- und Datenkanälen vorzunehmen.

Résumé. L'objet de cet article est de montrer quels sont les principaux procédés utilisés pour le codage numérique des signaux sonores de haute qualité. On définit tout d'abord les différentes lois de codage utilisant la compression instantanée et quasi instantanée. On compare ensuite quelques-unes des principales caractéristiques de ces lois de quantification en soulignant tout particulièrement leurs avantages et inconvénients dans des conditions d'application pratique. Le problème de la protection contre les erreurs de transmission est abordé en donnant certaines informations sur la structure des erreurs et en décrivant les différentes mesures envisagées pour réduire leur influence subjective lors du décodage. On traite sommairement de la compatibilité avec les normes téléphoniques. En conclusion, on propose un système fondé sur une loi de compression instantanée dans lequel une voie son de haute qualité occupe très exactement la place de six voies téléphoniques dans un multiplex MIC primaire de 30 voies à 2048 kbit/s. On examine brièvement les avantages que procure cette compatibilité avec les normes téléphoniques lorsqu'il s'agit de réaliser une transmission mixte de voies radiophoniques, téléphoniques et de données.

I progressi realizzati nel campo della trasmissione digitale dei programmi radiofonici

Riassunto. Lo scopo principale di questo articolo consiste nell'indicare i principali procedimenti utilizzati per la codificazione digitale dei segnali musicali d'alta qualità. Dapprima vengono definite le differenti norme per la codificazione che si servono della compressione istantanea e quasi istantanea. Si confrontano in seguito alcune caratteristiche principali di queste norme di quantificazione sottolineando in particolare i loro vantaggi e inconvenienti nelle condizioni dell'applicazione pratica. Il problema della protezione contro gli errori di trasmissione viene affrontato, fornendo alcune informazioni riguardanti la struttura degli errori e descrivendo le diverse misure previste per ridurre la loro influenza soggettiva al momento della decodificazione. Si tratta sommariamente la loro compatibilità con le norme telefoniche. Per concludere si propone un sistema che si basa su una norma di compressione istantanea nel quale un circuito musicale d'alta qualità occupa esattamente il posto di 6 circuiti telefonici in un multiplex PCM primario di 30 circuiti a 2048 kbit/s. Si esaminano brevemente i vantaggi ottenuti dalla compatibilità con le norme telefoniche, se si tratta di realizzare una trasmissione mista dei circuiti radiofonici, telefonici e di dati.

1 Introduction

La numérisation du signal sonore et de télévision fait partie de ces innombrables améliorations que permet d'envisager, dans l'immédiat, le niveau actuel de la technologie. On ne saurait suffisamment insister sur les avantages économiques des systèmes numérisés par rapport aux systèmes analogues, compte tenu des facilités nouvelles qu'ils offrent sur le plan de l'exploitation (maintenance, télémessure, intégration dans les réseaux numériques existants, services nouveaux, etc.). Le moment est donc venu de se demander quels choix et quelles solutions il y a lieu de proposer sur le plan technique pour la mise en œuvre d'une norme internationale, condition essentielle d'une véritable politique audiovisuelle.

De nombreuses commissions d'études internationales se sont penchées sur cette question fondamentale et tentent d'y apporter une réponse satisfaisante. Si les progrès techniques réalisés dans ce domaine depuis quelques années sont importants, il n'en reste pas moins que tous les efforts entrepris, en vue de réaliser un accord sur un système unique de codage, n'ont pas encore abouti. Plusieurs raisons peuvent être invoquées, en particulier le manque d'accord au sujet de l'importance relative des dégradations subjectives du signal sonore après son traitement numérique. Les mesures tra-

ditionnelles de distorsion harmonique, rapport signal sur bruit ne suffisent plus à qualifier objectivement un signal audiofréquence. En effet, il faut tenir compte de l'apparition de défauts d'un type nouveau qui ont pour origine le processus d'approximation du signal analogique à l'aide de niveaux de quantification. Cette erreur de quantification produit sur le signal sonore des défauts plus ou moins audibles qu'on ne peut apprécier qu'à l'aide d'essais subjectifs. Or personne n'ignore les difficultés qui apparaissent inévitablement lorsqu'il s'agit d'obtenir une unanimité sur la validité des essais subjectifs. Les bruits de quantification et de granulation peuvent être, en effet, plus ou moins perceptibles à un auditeur averti, selon la procédure des essais et plus particulièrement suivant le choix du niveau sonore, de la réponse amplitude-fréquence de la chaîne de reproduction et suivant le soin apporté à la sélection des séquences sonores.

La qualité des systèmes en présence étant dans la plupart des cas très proche, d'autres facteurs prennent une importance croissante. Parmi ceux-ci, le facteur économique qui est directement lié à la complexité des équipements mais aussi au choix d'une solution compatible avec les caractéristiques du réseau numérique existant. Compte tenu du caractère stochastique d'ap-

partition des erreurs, de leurs groupements et structures, il est indispensable de faire appel à des méthodes de dissimulation d'erreurs, voire même à des codes correcteurs d'erreurs, dont l'application peut indirectement influencer le choix du procédé de codage. Suivant les applications envisagées et la configuration des réseaux numériques existants ou futurs, il peut donc exister des points de divergence sur le choix d'un système optimal de transmission numérique des programmes radiophoniques. Il est toutefois nécessaire de se mettre d'accord sur les paramètres fondamentaux, en définissant d'urgence les procédures d'essais subjectifs et en fixant l'ordre d'importance à accorder à chaque paramètre.

2 Lois de codage

Les systèmes de multiplexage MIC des signaux son de haute qualité font en général appel à trois procédés de codage différents:

- codage linéaire (13...14 bit)
- codage à compression-extension instantanée (10...11 bit)
- codage à compression-extension quasi instantanée (9...10 bit)

De nombreuses expériences réalisées sous forme d'essais subjectifs ont montré qu'une résolution maximale de 14 bit par mot code, ou 13 bit avec un signal de vibration (dither) superposé, était nécessaire lorsque l'on appliquait pour des signaux de haute qualité un *codage linéaire*. L'extrême largeur de bande que requiert ce procédé a toutefois sensiblement diminué ses chances d'application pratique. Même au niveau du traitement des signaux, mixage, lignes de retard, conversion de standard, effets spéciaux et autres applications diverses dans les studios, il est préférable de recourir à une forme quelconque de compression.

Le procédé de codage à *compression instantanée* est appliqué en utilisant le plus souvent la loi dite «A» approchée par 13 segments de droite et 10 bit par mot code, ce qui correspond à une résolution minimale de 8 bit d'un codage linéaire. Certaines nouvelles propositions font également mention de lois de compression-extension à 7 et 11 segments avec une résolution minimale respectivement de 10 et 9 bit. La loi de codage «A» est définie par les relations suivantes:

$$y = \frac{1 + \ln Ax}{1 + \ln A} \text{ pour } \frac{1}{A} \leq x \leq 1$$

$$y = \frac{Ax}{1 + \ln A} \text{ pour } 0 \leq x \leq \frac{1}{A}$$

où $A=87,6$, x et y représentent respectivement les niveaux normés d'entrée et de sortie. La relation entre le facteur de compression K et le paramètre caractéristique A est la suivante:

$$K = \frac{A}{1 + \ln A}$$

K représente aussi la pente du segment central de la caractéristique de compression.

La *figure 1* illustre une moitié de la caractéristique de compression logarithmique dite $A=87,6$, approchée par 13 segments de droite avec, en abscisse, la valeur x des

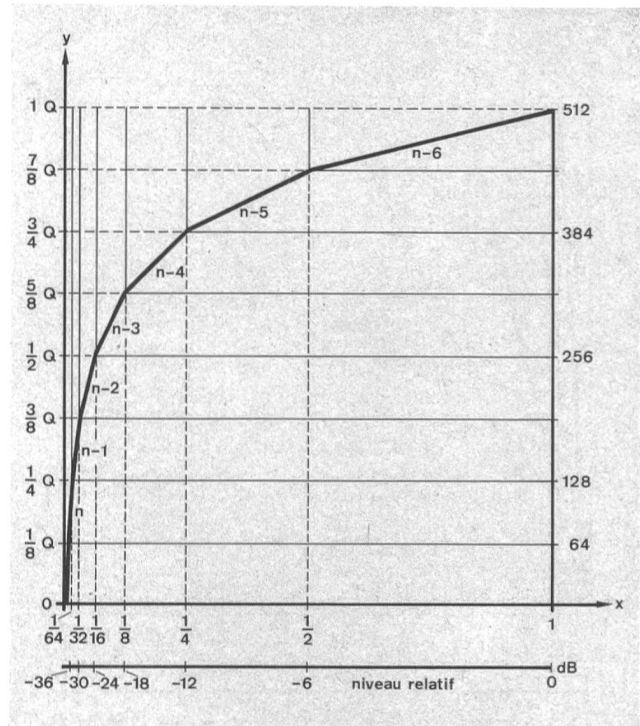


Fig. 1
Caractéristique de compression-extension à 13 segments

Q	Nombre total d'échelons de quantification contenus dans le quadrant positif
x	Amplitude normée du signal d'entrée
y	Niveau de quantification
(n-1...6)	Résolution par segment (n=14)

signaux d'entrée à compresser et, en ordonnée, la valeur y de la mesure fournie par le codeur. Dans l'intervalle de chaque segment, la hauteur des échelons élémentaires de quantification reste constante; en revanche, elle croît à partir de l'origine selon un facteur 2, à chaque passage d'un segment à l'autre. Cette loi est d'ailleurs largement appliquée pour le codage des signaux à fréquences vocales et s'est révélée, à l'expérience, être aussi efficace pour coder des signaux audiofréquences de haute qualité.

L'hypothèse sur laquelle se fonde le principe de la loi de compression-extension numérique *quasi instantanée* est la suivante [1]: lorsque l'on observe les éléments binaires d'une succession d'échantillons numériques d'un signal audiofréquence, on s'aperçoit que les bits de poids élevé varient d'une manière plus ou moins lente suivant la nature du signal. Dans ces conditions, il est apparu avantageux de grouper périodiquement ces échantillons en un bloc dans lequel les bits n'ayant peu ou pas évolués ne seront transmis qu'une seule fois. Le procédé à appliquer est donc d'observer le signal à intervalle régulier et d'adapter chaque fois la loi de quantification à la caractéristique d'amplitude du groupe d'échantillons.

La *figure 2* définit plus précisément la loi de compression quasi instantanée à 5 gammes. Le codage selon cette loi s'effectue de la manière suivante: on code tout d'abord le signal analogique à l'aide d'un convertisseur à quantification uniforme (codage linéaire). Après avoir mis en mémoire un certain nombre d'échantillons successifs, on prend en considération l'échantillon qui possède l'amplitude maximale en valeur absolue et on détermine, sur la base de cette observation, la gamme

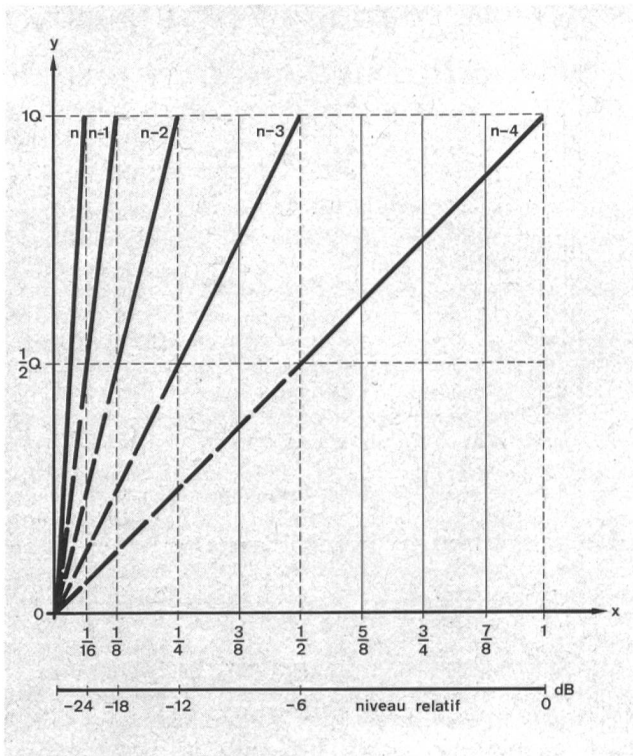


Fig. 2
Caractéristique de compression quasi instantanée à 5 gammes
 Q Nombre total d'échelons de quantification contenus dans le quadrant positif
 x Amplitude normée du signal d'entrée
 y Niveau de quantification
 (n-1...4) Résolution par gamme

appropriée sur laquelle seront codés tous les autres échantillons du groupe ou bloc considéré. Cette gamme est identifiée par un facteur d'échelle qu'il faudra transmettre avec chaque groupe d'échantillons. La valeur du facteur d'échelle désignant l'une ou l'autre des gammes est codée à l'aide de 3 bit supplémentaires ou extraits d'un bloc, grâce, par exemple, à une procédure de justification négative.

D'une manière intuitive, on peut interpréter la loi de compression quasi instantanée de la façon suivante:

- La loi de compression quasi instantanée est un procédé qui imite la *MIC adaptive*, dans laquelle la quantification est uniforme et la grandeur des échelons adaptée au niveau du signal à court terme.
- La compression quasi instantanée est une forme de compression à mi-chemin entre la compression instantanée et syllabique.
- La loi de compression quasi instantanée extrait quelques caractéristiques communes d'un groupe d'échantillons et n'en transmet qu'une pour le bloc entier.

L'analyse empirique de cette loi de compression met en évidence une performance légèrement meilleure que $(n-1)$ bit par rapport à la loi de compression semi-logarithmique.

3 Qualité intrinsèque des lois de quantification

31 Lois de compression instantanée

La figure 3 montre la caractéristique du rapport signal/bruit de quantification des lois de compression

instantanée à 11 et 13 segments. Ce rapport est défini de la manière suivante:

$$10 \log \left(\frac{S}{D} \right)_{\max} = 6n + 1,8 + g_K - C \text{ (dB)}$$

$$\text{avec } g_K = 20 \log K \text{ et } C = \frac{m-1}{2} \cdot 6 \text{ (dB)}$$

- m Nombre de segments
- n Nombre de bits
- K Facteur de compression

On constate que la loi de compression à 13 segments offre un rapport signal/bruit de quantification de 50 dB en moyenne pour des signaux sinusoïdaux de niveau élevé. L'expérience montre que la valeur minimale du rapport signal/bruit de quantification nécessaire pour obtenir une note de 4,5 sur l'échelle de dégradation à 5 notes du CCIR est d'environ 55 dB, à condition d'utiliser une préaccentuation-désaccentuation identique à celle recommandée dans l'Avis J.17 du CCITT. Compte tenu de ces éléments, on peut estimer que le système de codage avec compression instantanée, de 14...10 bit selon la loi «A» approchée par 13 segments de droite est *juste insuffisant*, surtout si l'on doit ajouter l'inévitable dégradation occasionnée par la mise en cascade de plusieurs codecs. Dans ce cas, et pour respecter les normes de qualité du CCIR, il est préférable d'adopter une loi de compression instantanée à 11 segments de 14...11 bit. Le rapport signal/bruit de quantification s'élève alors à 56 dB en moyenne (courbe b de la fig. 3). Théoriquement, il serait possible d'appliquer une compression totale de 15 à 11 bit à l'aide de la loi «A» approchée par 13 segments, mais l'expérience a montré qu'une telle précision de l'échelle de quantification sur le segment central était inutile.

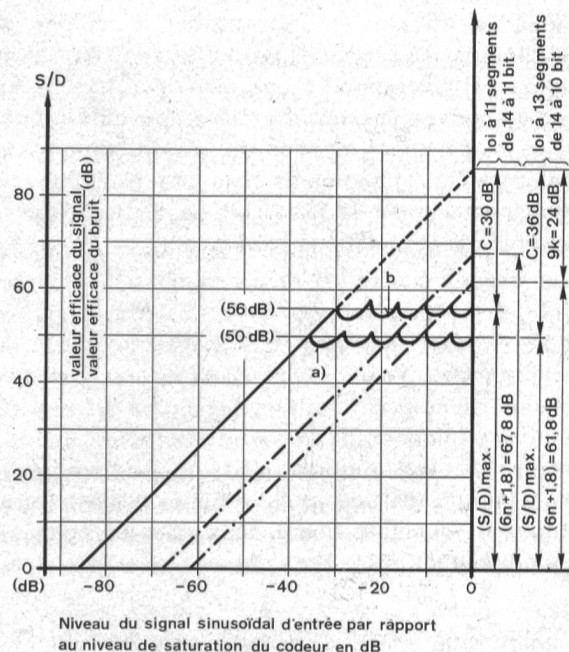


Fig. 3
 Rapport signal/bruit de quantification théorique de 2 systèmes de codage à compression instantanée pour un signal sinusoïdal continu, compte non tenu de la désaccentuation
 a) Compression instantanée à 13 segments de 14...10 bit
 b) Compression instantanée à 11 segments de 14...11 bit

32 Lois de compression quasi instantanée

A la figure 4 est indiquée la caractéristique du rapport signal/bruit de quantification pour les lois de compression quasi instantanée à 4, 5 et 6 gammes.

La pratique montre qu'avec une loi de compression quasi instantanée à 4 gammes (*courbe c*) et une exactitude correspondant à 13 bit codés d'une façon linéaire, la qualité de reproduction pour des signaux de faible niveau est tout juste insuffisante et que, subjectivement, la distorsion de quantification (effet granulaire) est nettement perceptible. On admet, en effet, qu'il est nécessaire d'utiliser une loi de quantification dont le rapport signal/bruit serait comparable à celui fourni par un codeur linéaire à 14 bit. Il est toutefois possible de masquer cette dégradation en utilisant un signal composite additionnel de vibration (dither) formé de la superposition d'un bruit blanc et d'un signal carré à fréquence moitié de la fréquence d'échantillonnage [2]. Eu égard à la perceptibilité des défauts sur les signaux de faible amplitude, ce procédé permet, en effet, de réduire de 14 à 13 le nombre de bits nécessaires dans le cas d'une quantification uniforme. Bien que cela entraîne théoriquement une diminution du rapport signal/bruit légèrement supérieure aux 6 dB correspondant à la suppression d'un bit, l'application d'un signal de vibration a pour conséquence inattendue de masquer subjectivement l'effet perturbateur du bruit de granulation.

En adoptant 5 gammes au lieu de 4 comme précédemment, on améliore le rapport signal/bruit de quantification de 6 dB (*courbe b*). En réalité, cette amélioration n'est que de 2 dB car, à débit binaire constant, il est nécessaire d'utiliser une procédure de justification négative de façon à extraire un certain nombre de bits indispensables à la transmission du facteur d'échelle et des contrôles de parité. Il s'ensuit, évidemment, une certaine dégradation de la qualité que l'on estime à 4 dB en moyenne à tous les niveaux du signal. Cette loi de compression offre, en conséquence, un rapport signal/bruit de quantification de 55 dB environ pour les signaux de fort niveau, ce qui serait suffisant; en revanche aux niveaux faibles du signal, ce rapport est inférieur de 4 dB à celui que fournit un codeur linéaire à 14 bit.

En cherchant à optimiser au maximum la loi de compression quasi instantanée, E. de Lamare propose d'utiliser une loi à 6 gammes [3]. En augmentant la longueur des blocs d'échantillons, il est possible de réaliser un certain gain sur le débit binaire de manière à obtenir une caractéristique signal/bruit de quantification comparable à celle de la *courbe a* de la figure 4 sans augmentation du débit binaire réel. De cette manière, on peut obtenir la qualité requise pour les signaux de faible niveau mais au détriment d'une légère diminution du rapport signal/bruit de quantification de 2 dB pour les signaux de grande amplitude.

La loi de compression quasi instantanée est caractérisée par le groupement d'un certain nombre d'échantillons formant, comme on l'a vu précédemment, un bloc où tous les mots codes sont quantifiés de façon linéaire sur l'une des 4, 5 ou 6 échelles. Or, la longueur de ce bloc joue un rôle très important dans la qualité du procédé de codage. Elle doit être suffisante pour que l'on obtienne un gain réel sur le débit binaire par rapport à la

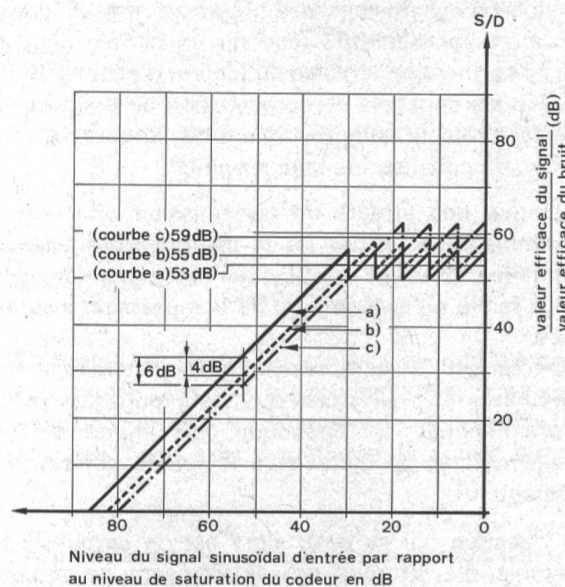


Fig. 4
Rapport signal/bruit de quantification théorique de 3 systèmes de codage à compression quasi instantanée, pour un signal sinusoïdal continu, compte non tenu de la désaccentuation
a) Compression quasi instantanée à 6 gammes de 14...9 bit
b) Compression quasi instantanée à 5 gammes et procédure de justification négative (suppression d'un bit sur deux); résolution maximale: 13...14 bit
c) Compression quasi instantanée à 4 gammes de 13...10 bit environ

compression instantanée. En revanche, si les blocs sont trop longs, on risque de percevoir les paliers du bruit de quantification dans certains cas critiques. Le choix de la longueur de chaque bloc devrait se situer, d'expérience, entre 30 et 60 échantillons.

La supériorité intrinsèque de la loi de compression quasi instantanée par rapport à la loi de compression instantanée se traduit, à qualité de codage égale, par un débit binaire sensiblement inférieur. Si l'on admet une fréquence d'échantillonnage de 32 kHz ($f_s = 32$), 10 par mot code ($n = 10$) et une longueur de bloc correspondant à 32 échantillons ($N = 32$), le débit binaire résultant d'une compression quasi instantanée sera légèrement supérieur à [4]:

$$> f_s (n - 2 + 3/N) \text{ soit } > 260 \text{ kbit/s}$$

alors qu'une loi de compression instantanée nécessite au minimum un débit binaire de 320 kbit/s. En pratique, cet avantage n'est pas aussi important que ne le laisse supposer la seule caractéristique signal/bruit. En effet, les contributions à la dégradation du signal de sortie peuvent être exprimées par la somme de trois facteurs distincts résultant respectivement de l'erreur de quantification, des erreurs de transmission et des erreurs mutuelles issues de l'interaction entre la quantification et les erreurs de transmission.

L'importance accrue que prend le facteur d'échelle d'une loi de compression quasi instantanée en cas d'erreur de transmission peut représenter un inconvénient certain. En effet, une simple erreur sur ce facteur touche tous les échantillons d'un même bloc. Il existe donc un danger certes limité, mais non négligeable, de propaga-

tion d'erreurs qui est d'autant plus élevé que la longueur des blocs d'échantillons est grande. Il est en conséquence indispensable de réserver un certain débit binaire à la protection efficace du facteur d'échelle. Si l'on compare les deux lois de compression du point de vue de l'effet subjectif que provoquent des erreurs de transmission, on constate les faits suivants:

- a) Lorsque des erreurs de transmission affectent un système basé sur une loi de compression quasi instantanée, l'énergie des claquements est en moyenne plus faible qu'avec une loi de compression instantanée.
- b) Avec une loi de compression quasi instantanée, il se produit à intervalles plus ou moins longs des « clics » dont l'énergie est beaucoup plus importante que celle qui est produite avec la loi de compression instantanée.

La question qui se pose alors est de savoir s'il est préférable d'avoir plus de claquements de moindre énergie qu'un nombre réduit de claquements de grande énergie. Le choix d'une méthode efficace de correction des erreurs est naturellement lié à ce genre de problème.

La loi de compression quasi instantanée est encore caractérisée par deux autres paramètres dont il est difficile d'estimer l'importance. Le premier est en relation avec l'effet de retard apporté à la transmission par le stockage des informations et la longueur des blocs d'échantillons. Ce retard pourrait devenir excessif dans le cas, par exemple, de plusieurs codecs en tandem. Le second paramètre a trait à l'aspect économique compte tenu de la complexité relative du codec qui nécessite des mémoires importantes.

33 Récapitulation

Les avantages et inconvénients liés à chaque loi de quantification peuvent se résumer de la manière suivante.

331 Lois de compression instantanée

Avantages:

- grande échelle dynamique
- pas de propagation des erreurs
- pas de délai de transmission
- simplicité, le codec ne nécessite, en principe, que peu ou pas de mémoire

Inconvénients:

- intrinsèquement moins performantes que les lois de compression quasi instantanée nécessitant, à qualité égale, un débit binaire légèrement supérieur

332 Lois de compression quasi instantanée

Avantages:

- très grande échelle dynamique
- plus performantes que les lois de compression instantanée se traduisant, à qualité égale, par un débit binaire légèrement inférieur

Inconvénients:

- plus ou moins grande propagation des erreurs suivant la longueur des blocs
- large mémorisation des informations nécessaires
- délai de transmission, tout spécialement dans le cas de plusieurs codecs en tandem
- relative complexité
- chaque bloc d'échantillons exige une protection très efficace du facteur d'échelle

4 Protection contre les erreurs de transmission

Dans une transmission numérique, la propagation par câbles, faisceaux hertziens, lignes aériennes, etc., est susceptible d'être le siège de nombreuses erreurs. L'existence de chemins multiples, réflexions, diaphonie, rotation de phase, différence de temps de propagation, peut provoquer des erreurs à la restitution de l'information. Cela se traduit, soit par des inversions de bits isolés ou en paquets, soit par des défauts de cadrage avec perte de la synchronisation. Les expériences faites dans ce domaine montrent que les erreurs provoquées par des chemins capacitifs d'un câble sont les plus gênantes, car les plus difficiles à éliminer. Il n'existe, d'autre part, pas de modèle mathématique satisfaisant décrivant le processus stochastique d'apparition des erreurs. La connaissance exacte d'un tel processus, bien que souhaitable, n'est toutefois pas indispensable, car les moyens dont on dispose pour la détection et la correction sont fort limités.

Les analyses statistiques effectuées sur des réseaux de transmission numérique tendent à démontrer que les erreurs sont en général plus ou moins corrélées et qu'elles apparaissent le plus souvent par paquets. Cette constatation est encore renforcée par le fait que la transmission de la modulation HDB-3 entraîne une multiplication du taux d'erreurs par rapport à la modulation bipolaire ordinaire.

Une erreur isolée de transmission peut, par exemple, provoquer trois erreurs lors de la traduction binaire. Ces erreurs restent localisées dans un groupe de cinq éléments.

41 Structure des erreurs

Une certaine connaissance du groupement des erreurs peut être fort précieuse lorsqu'il s'agit de déterminer la méthode de correction la plus appropriée. A cet effet, la Division des recherches et du développement de l'Entreprise des PTT a réalisé un instrument de mesure capable de mémoriser la structure d'un paquet d'erreurs, c'est-à-dire de mesurer chaque fois la distance entre deux erreurs consécutives. Mis en service sur des lignes MIC à 2048 kbit/s (câbles et faisceaux hertziens), il a permis de recueillir de précieuses informations sur ces structures. Le *tableau 1* donne un exemple caractéristique de la fréquence d'apparition des divers groupements d'erreurs d'un circuit à 2048 kbit/s sur un câble, durant 24 heures. Les erreurs apparaissent essentiellement groupées, après traduction binaire, dans un intervalle de 7 bit et par petits paquets de moins de 5 fautes d'une durée inférieure à la seconde. L'origine de ces erreurs est à rechercher, en général, parmi les diverses opérations de signalisation des centraux à commu-

Tableau I. Groupement des erreurs d'un circuit à 2048 kbit/s sur câble. Exemple caractéristique d'un enregistrement effectué pendant 24 heures

Classe d'erreur ou distance entre deux erreurs consécutives (bit)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	0	2	4	8	16	32	64	128	256	512	1024	2048	> 4095
	1	3	7	15	31	63	127	255	511	1023	2047	4095	
Fréquence d'apparition des erreurs d'un circuit à 2048 kbit/s dans les classes 1 à 13	154 ×	59 ×	9 ×	2 ×	0 ×	3 ×	2 ×	2 ×	1 ×	0 ×	0 ×	0 ×	192 × (1)

(1) Erreurs isolées ou distance entre deux paquets d'erreurs

tation spatiale. Pour ce qui est des faisceaux hertziens, qui travaillent en général par paire, le processus d'apparition des erreurs est différent de celui qui est valable pour des câbles, car il est très souvent lié aux mécanismes de commutation des systèmes l'un sur l'autre. L'expérience montre que, si des mesures particulières ne sont pas prises, la commutation produit dans de nombreux cas, soit un grand nombre d'erreurs, soit une perte de synchronisation, voire une coupure. Vu qu'il n'est pas toujours possible d'éviter ce genre de perturbation, il faut s'attendre que la longueur des paquets d'erreurs soit notablement plus élevée pour les transmissions à faisceaux hertziens que dans le cas des câbles.

42 Systèmes de correction

Le peu de redondance disponible dans un échantillon ne permet pas d'envisager des méthodes de correction très élaborées. En revanche, il est possible d'obtenir une bonne approximation de l'échantillon correct en appliquant diverses méthodes fondées sur l'interpolation et l'extrapolation du signal numérique. Des résultats tout à fait satisfaisants ont été obtenus à l'aide de l'extrapolation d'ordre zéro qui consiste simplement à remplacer l'échantillon reconnu en erreur par l'échantillon précédent. L'interpolation du premier ordre est légèrement plus efficace, sans apporter une amélioration décisive, car la nature très variable du signal audiofréquence rend les procédés de correction plus ou moins bien adaptés. On ne peut indéfiniment appliquer une interpolation ou extrapolation lorsque les erreurs sont fortement groupées en un paquet d'une certaine longueur. Il devient indispensable en pareil cas d'interrompre brièvement le signal. Pour minimiser au maximum l'effet gênant de cette interruption, il faut que l'affaiblissement se fasse exponentiellement. Nombre d'essais effectués avec différentes sources sonores montrent que les caractéristiques suivantes de la mise à zéro du signal représentent une bonne solution:

- durée de l'interruption $t_i \leq 0,8$ ms
- durée de l'atténuation exponentielle $t_e \cong 300$ μ s

Le nombre maximal de corrections successives par interpolation ou extrapolation dépend essentiellement de la caractéristique du signal analogique. Plus le signal se compose de fréquences élevées, plus faible sera le nombre de corrections successives. En revanche, lorsque le signal est en grande partie formé de fréquences basses, il est préférable de retarder autant que possible l'application de la méthode de mise à zéro du signal.

Le *tableau II* montre le nombre maximal d'extrapolations d'ordre zéro qu'il est recommandé de ne pas dépasser pour différentes sources sonores. Au-delà, il est préférable d'appliquer la méthode de mise à zéro du signal.

Tableau II. Estimation subjective du nombre maximal d'extrapolations d'ordre zéro au-delà duquel il est préférable d'appliquer la méthode de mise à zéro du signal

Sources sonores	Nombre maximal d'extrapolations d'ordre zéro admissible avant la coupure du signal						
	1 ×	2 ×	3 ×	4 ×	5 ×	6 ×	> 6 ×
1. Cloche							
2. Boîte à musique							
3. Xylophone 2 ^e ré sup.							
4. Xylophone 6 ^e la							
5. Xylophone 2 ^e ré							
6. Piano rapide							
7. Piano lent							
8. Violon							
9. Clarinette							
10. Saxophone							
11. Voix féminine							
12. Voix masculine							
13. Guitare							
14. Basse électronique							
15. Orgue							
16. Trompette							

D'une manière générale, ces méthodes de masquage sont assez bien adaptées à la structure des erreurs des circuits en câble et à la caractéristique de répartition gaussienne des paquets d'erreurs. En revanche, pour les systèmes utilisant le faisceau hertzien comme support, il faut s'attendre, très rarement il est vrai, à des gros paquets d'erreurs nécessitant, dans certains cas, l'application de méthodes de correction plus évoluées, comme les codes cycliques. Ceux-ci sont particulièrement efficaces lors de brèves interruptions ou perte de synchronisation. Ces techniques impliquent toutefois l'utilisation de mémoires assez longues.

L'existence de réseaux de transmission plésiochrones peut également provoquer des erreurs d'une certaine importance. Il est alors indispensable de prévoir un moyen quelconque pour compenser les différences inévitables de rythme des horloges maîtresses. Le procédé le plus simple est d'utiliser une mémoire tampon qui, compte tenu de l'exactitude normalisée des horloges ($\Delta f = 10^{-11}$), permettrait de réduire la probabilité de perdre un intervalle de temps à une valeur négligeable. Si cette mesure se révélait toutefois insuffisante, il resterait encore la possibilité d'appliquer la technique dite du «bourrage» permettant une transmission asynchrone pratiquement sans perte d'information.

5 Compatibilité avec les normes téléphoniques

On a reconnu assez rapidement l'intérêt que pourrait représenter une solution directement compatible avec les normes téléphoniques. Ainsi, le débit numérique affecté à chaque voie son de haute qualité devrait être un multiple de 64 kbit/s, soit 320 kbit/s, voire 384 kbit/s, ce qui correspondrait très exactement à l'occupation de respectivement 5 ou 6 voies téléphoniques.

Certains organismes estiment également que les intervalles de temps 0 et 16 de la trame définie dans l'Avis G.732 du CCITT ne devraient pas être modifiés, de manière à préserver l'application ultérieure de mesures tendant à améliorer la qualité et la flexibilité du système. Par exemple, l'intervalle de temps 16 pourrait être avantageusement utilisé en partie pour transmettre certaines informations nécessaires au bourrage dans un réseau plésiochrone.

D'une manière générale, le respect des normes de compatibilité avec la téléphonie pourrait à l'avenir représenter un avantage inestimable, malgré les restrictions que cela impose du point de vue de la réduction du débit numérique global.

6 Proposition pour un système compatible avec les normes téléphoniques

La Division des recherches et du développement de l'Entreprise des PTT propose un système à compression instantanée fondé sur la loi «A» approchée par 11 segments. Une compression de 14 à 10 bit est réalisée pour tous les signaux dont l'amplitude correspondante est située sur la première moitié du segment central alors que l'ensemble des autres signaux subit une compression de 14 à 11 bit. La raison qui a prévalu pour adopter une résolution minimale légèrement supérieure à celle proposée jusqu'à présent pour le codage des signaux son est essentiellement d'ordre qualitatif. On l'a déjà fait remarquer, 10 bit par mot code obtenus à l'aide d'une loi de compression instantanée n'offrent aucune marge de sécurité quant à la perception du bruit de quantification pour certains signaux critiques de forte amplitude.

Quel que soit le niveau du signal, chaque échantillon est formé de 12 bit, dont un est destiné au contrôle de parité. L'élément binaire N° 11 (LSB) de tous les échantillons numériques situés sur la première moitié du segment central est utilisé pour la transmission de signaux annexes. La possibilité ainsi offerte de pouvoir acheminer des informations supplémentaires associées au programme radiophonique pourrait à l'avenir être particulièrement appréciée par les PTT et les organismes de radiodiffusion. Citons par exemple:

- émission de signaux de mesure et de contrôle
- enclenchement des émetteurs, réémetteurs, etc.
- identification de l'origine du programme
- données au sujet du niveau d'émission et d'enregistrement du programme
- identification du procédé de codage
- informations sur certaines caractéristiques du message sonore: monophonie, stéréophonie ou quadrophonie
- données complémentaires au programme: résumé, traduction, association d'un message graphique lentement évolutif, etc.

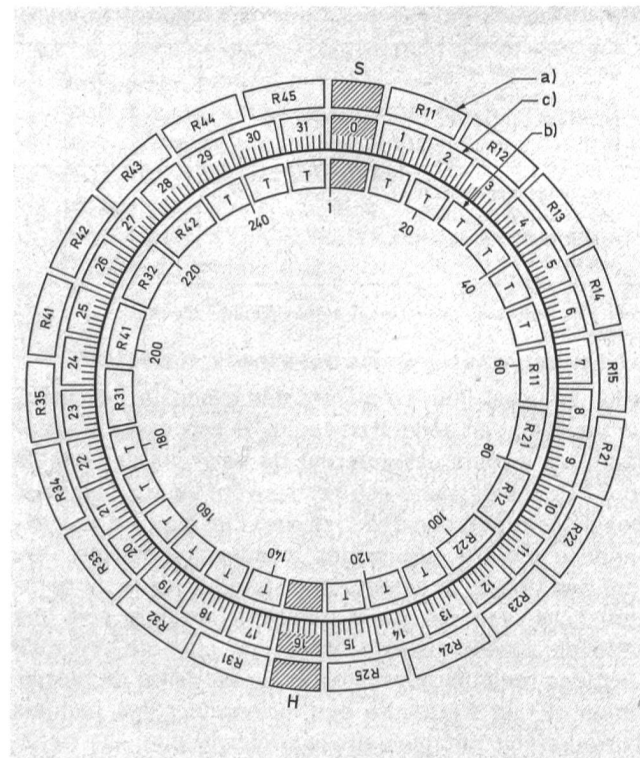


Fig. 5 Répartition des intervalles de temps dans la trame à 256 bit d'un conduit numérique à 2048 kbit/s

- a) Disposition des intervalles de temps à 12 bit pour la transmission de 5 voies radiophoniques
- b) Disposition possible des intervalles de temps lors de la transmission conjointe de 2 voies son à 384 kbit/s et 18 voies pour signaux à 64 kbit/s
- c) Trame MIC 30/32 selon recommandation G.732 du CCITT

- S Secteur de synchronisation
H Secteur de signalisation
T Voies téléphoniques ou autres signaux à 64 kbit/s
R Voies radiophoniques

La figure 5 montre la répartition des intervalles de temps à 384 kbit/s de 5 voies son dans la trame d'un système MIC primaire à 2048 kbit/s et la disposition possible des intervalles de temps dans le cas d'une transmission conjointe de 2 voies son et 18 voies téléphoniques ou de données dans cette même trame. On peut évidemment envisager d'autres arrangements des secteurs de voies en tant que le système reste directement compatible avec les normes téléphoniques.

En résumé, ce système présente les caractéristiques principales suivantes:

Avantages:

- très haute qualité aussi bien pour des signaux de niveau faible que pour les signaux critiques dont le niveau de crête est voisin du point de surcharge du système
- marge de sécurité suffisante quant à la qualité dans le cas de la mise en cascade de plusieurs codecs
- sensibilité limitée aux erreurs. La présence d'une seule erreur dans le train d'impulsions n'affecte qu'un seul échantillon. L'attribution d'un seul bit de parité par mot code se révèle encore suffisante pour des circuits MIC dont le taux d'erreurs reste inférieur à 10^{-5}
- compatibilité avec l'équipement multiplex conforme à l'Avis G.732 du CCITT

- redondance suffisante pour permettre la transmission de signaux annexes (2...32 kbit/s)
- pas de délai de transmission

Inconvénients:

- le système ne permet pas de transmettre plus de 5 voies son de haute qualité. Il est en effet possible de placer au maximum 6 voies dans un multiplexeur à 2048 kbit/s, à la condition d'utiliser une loi de compression quasi instantanée à 5 ou 6 gammes. Comme on l'a vu précédemment, cette dernière présente toutefois un certain nombre d'inconvénients majeurs.

7 Conclusions

On compte actuellement plus de cinq ou six systèmes différents ayant fait l'objet d'une proposition de normalisation. Cette diversité des solutions n'est évidemment pas faite pour faciliter le choix d'un système unique. On s'est rapidement aperçu que les principales difficultés s'élevaient par suite d'un manque d'accord sur l'importance relative des différentes dégradations liées à chacune des lois de compression. D'autres difficultés sont également apparues, quant à l'ordre d'importance à accorder à chaque paramètre. Certains pensent que les problèmes relatifs à la qualité du codage et au principe de la compatibilité avec la structure de trame correspondant à l'Avis G.732 du CCITT sont plus importants que le nombre de canaux radiophoniques à transmettre. Dans cette hypothèse, le choix de 384 kbit/s comme débit binaire unique pour une voie son offre des avantages qui compensent assez largement l'inconvénient résultant du multiplexage de 5 voies seulement sur un support numérique à 2048 kbit/s. D'autre part, la réalisation d'une trame mixte à 2048 kbit/s pour la transmission de programmes radiophoniques, de voies téléphoniques et de données est en général souhaitée. En adoptant de préférence le débit binaire à 384 kbit/s par voie son, on s'assure la possibilité d'associer au programme radio-

phonique un certain nombre d'informations complémentaires destinées soit aux organismes de radiodiffusion, soit au transmetteur pour ses besoins en signaux de mesure ou de commutation. En revanche, si le choix se porte sur un débit binaire de 320 kbit/s par voie son, il faut d'emblée admettre, quelle que soit la loi de codage, certaines restrictions en rapport avec la qualité du signal et également du point de vue des possibilités et facilités d'exploitation.

A quelle loi de compression faut-il donner la préférence? La réponse dépend, à nouveau, du degré d'importance que l'on veut bien accorder à chaque paramètre et caractéristique du système. A débit binaire égal, la loi de compression quasi instantanée est intrinsèquement plus performante que la loi de compression instantanée mais présente les mêmes inconvénients qui caractérisent très souvent les systèmes plus sophistiqués (large mémorisation, retard dans la transmission, nécessité d'appliquer des procédés de correction très efficace, coût, etc.).

Ce choix est évidemment fort difficile et une décision de normalisation ne devrait pas être prise hâtivement, car il pourrait conduire, à long terme, à une solution peu satisfaisante.

Bibliographie

- [1] *de Lamare E.* Le codage numérique des signaux sonores de haute qualité: propositions pour un système entièrement compatible avec les normes téléphoniques. Paris, Revue de radiodiffusion-télévision (1976) N° 44, p. 12...23.
- [2] *Osborne D. W. and Croll M. G.* Digital sound signals: bit-rate reduction using an experimental digital compander. London, BBC Research Department Report (1973) No 41.
- [3] – CCIR Doc. CMTT/282. France (1974–1978).
- [4] *Duttweiler D. L. and Messerschmitt D. G.* Nearly instantaneous companding for nonuniformly quantized PCM. New York, IEEE Transactions on Communications, Vol. COM-24 (August 1976) No 8, pp. 864–873.