

RAPPORT 1210

STRATEGIES DE PROTECTION CONTRE LES ERREURS POUR LES SERVICES
DE RADIODIFFUSION DE DONNEES

(1990)

1. Introduction

En raison de certaines extensions des possibilités d'affichage des services de télétexte et de sous-titrage existants (y compris les alphabets non latins et les modes d'écriture non alphabétique) [CCIR, 1986-90a] ainsi que des nouveaux services de données, dont certains sont mentionnés dans le Rapport 802 du CCIR, l'adoption de stratégies pour la correction des erreurs capables de garantir une récupération très fiable du message sans répétition inutile devient nécessaire.

Actuellement, des stratégies de décodage perfectionnées et efficaces sont réalisables grâce aux progrès de la technologie micro-électronique grand public et on peut donc les mettre en oeuvre à peu de frais dans les récepteurs du commerce. Ainsi, l'introduction d'un système de correction des erreurs directe permettra de corriger les données avant le décodage, les paquets de données étant organisés de manière à constituer un code de correction des erreurs [CCIR, 1982-86a]. A condition que la mémoire tampon soit suffisante et que l'intervalle entre les acquisitions de données permette une programmation logicielle sophistiquée, on pourra également utiliser la technique de correction des erreurs pour acquérir correctement les composantes de service [CCIR, 1986-90b].

Le § 2 contient des considérations générales sur les stratégies de protection contre les erreurs. Le § 3 signale certaines études sur les stratégies de protection contre les erreurs appliquées aux actuels systèmes de radiodiffusion de Terre. Le § 4 donne des exemples de stratégies de protection contre les erreurs pour la transmission de données utilisant des canaux de radiodiffusion par satellite.

2. Considérations générales sur les méthodes de protection contre les erreurs

La qualité d'un service de diffusion de données dépend surtout de l'influence des erreurs sur l'exactitude du message reçu et des méthodes appropriées utilisées pour la protection contre les erreurs. Il faut tenir compte des facteurs suivants:

- la nature des données à transmettre;
- la qualité du trajet de transmission;
- le caractère unidirectionnel du trajet de transmission;
- l'utilisation de stratégies communes pour l'environnement de la radiodiffusion et leur extension, si possible, à d'autres supports;
- l'efficacité de la technique de codage.

Les principales méthodes de protection contre les erreurs peuvent être divisées en plusieurs catégories:

- Contrôle de parité
- Correction d'erreur directe (CED)
- Contrôle de redondance cyclique (CRC)
- Logique majoritaire (LM)
- Variation des bits (VB)
- Dissimulation des erreurs

En général ces différentes méthodes peuvent être associées pour obtenir un taux d'erreur satisfaisant.

S'agissant des services de télétexte, dans des conditions de réception difficiles, on tolère d'ordinaire une probabilité d'erreurs résiduelles pour les systèmes d'écriture alphabétiques et syllabiques, en raison de la forte redondance dans le texte affiché. Cela vaut en particulier pour les systèmes où la synchronisation des données est assurée et la position des caractères affichés est fixe. Le décodage peut donc utiliser un simple contrôle de parité au niveau du caractère, en combinaison avec une séquence de transmission cyclique, sans désavantager la majorité du public, qui bénéficie de conditions de réception satisfaisantes. Dans d'autres systèmes, une simple CED dans chaque paquet de données améliore la réception et assure un contrôle en cas d'erreurs. On peut assurer un haut niveau de confiance en incluant un contrôle par redondance cyclique à l'échelon de la page.

Les exigences de qualité sont plus importantes pour les services de télétexte améliorés, le télélogiciel et les services de diffusion de données transparentes avec ou sans répétition cyclique. Un niveau de confiance élevé est d'importance primordiale pour ces services et, en principe, on ne peut tolérer aucune probabilité d'erreurs résiduelles en raison de l'incidence de ces erreurs sur le message décodé. On doit, pour maîtriser les erreurs, ajouter de la redondance au signal et souvent répéter les messages, afin d'obtenir une qualité de réception satisfaisante, dans des conditions difficiles. Dans ce genre de conditions, il est généralement acceptable que le temps d'accès augmente du fait de la nécessité d'acquisitions répétées du message pour obtenir l'information exacte. Il faut cependant que la stratégie de décodage soit telle que la probabilité de succès à la première tentative soit élevée pour la majorité du public.

3. Etudes fondées sur le mécanisme de transport qui découle des systèmes de télétexte du CCIR

3.1 Etudes effectuées en France

On montre [CCIR, 1986-90c] que le recours au niveau paquet du système de radiodiffusion de données DIDON à un contrôle par redondance cyclique (CRC) réduit efficacement le taux d'erreur résiduel. En simulant sur ordinateur un canal de transmission, on a étudié la logique majoritaire et la détection d'erreurs par CRC (une stratégie de la famille B) ainsi que la correction des erreurs par le CRC.

Les résultats montrent qu'on peut adapter le traitement des erreurs de façon à obtenir un TEB résiduel souhaitable pour toute une étendue de TEB à l'entrée (Tableau I).

TABLEAU I

Taux d'erreurs binaire à l'entrée	Nombre minimal de répétitions pour avoir un taux d'erreurs résiduel binaire $< x 10^{-6}$	
	Traitement par CRC	
	détection d'erreurs	correction des erreurs
1×10^{-3}	4	2
5×10^{-4}	2	2
2×10^{-4}	2	1
1×10^{-4}	2	1
5×10^{-5}	2	0
2×10^{-5}	1	0
1×10^{-5}	1	0
5×10^{-6}	1	0

3.2 Etudes effectuées en Italie

On a effectué en Italie des essais en laboratoire et en vraie grandeur [Cominetti et autres, 1986] [CCIR, 1986-90d] pour apprécier la qualité de la stratégie que met en oeuvre le système de télélogiciel mis au point par la RAI et qui a la structure du système de télétexte B du CCIR.

Cette stratégie est fondée sur l'adoption d'un code de Hamming (40,34) pour correction directe de toute erreur unique dans un bloc de 4 octets, associé à un contrôle par redondance cyclique (CRC) pour détecter les erreurs résiduelles dans chaque ligne de données. [Cominetti et Morello, 1985].

Les résultats ont conduit aux conclusions suivantes:

- Il faut au service de télélogiciel une qualité de réception plus grande qu'au service de télétexte (niveau 1), en raison de sa plus grande sensibilité aux erreurs de transmission et de la plus grande longueur des "fichiers" de données (environ 10 pages pour un fichier de télélogiciel à 10 kilooctets).
- Le recours à un code de Hamming (40,34) représente un compromis satisfaisant entre l'efficacité de la transmission (80%), les possibilités de correction/détection des erreurs et la mise en oeuvre d'un décodage économique.
- En masquant les données transmises au moyen de séquences pseudo-aléatoires, on améliore l'efficacité du code correcteur d'erreurs lorsque se présentent des structures répétitives de données critiques.

Grâce à la stratégie de protection contre les erreurs ci-dessus, il a été possible de reconstituer sans erreur un fichier d'un kilooctet dès la première acquisition avec une probabilité de succès de 85% et à un taux d'erreur binaire d'environ 1×10^{-3} .

A défaut de ladite stratégie, on n'aurait obtenu cette probabilité de succès que pour un taux d'erreur binaire de 2×10^{-5} .

3.3 Etudes effectuées en République fédérale d'Allemagne

Une technique appelée "variation des bits", a été étudiée en République fédérale d'Allemagne. Il s'agit d'un processus de commande de correction d'erreur spécialement efficace dans le cas où les conditions de réception sont mauvaises. La technique est basée sur une double transmission de données. Lorsque les valeurs binaires reçues sont différentes à la même position dans deux acquisitions d'un bloc de données, les valeurs binaires sont modifiées successivement jusqu'à ce que le contrôle des erreurs soit satisfaisant. En association avec une correction d'erreur directe (CED) à faible redondance (environ 5%) et une détection d'erreur par contrôle de redondance cyclique (CRC), une telle méthode de correction assurera une probabilité de 99,9% de réception correcte de sous-titres, de pages de télétexte et de fichiers de données de 10 koctets à des taux d'erreur binaire atteignant 5×10^{-2} [CCIR, 1986-90e].

3.4 Etudes effectuées au Japon

Les systèmes de protection contre les erreurs pour les services de radiodiffusion de données ont fait l'objet de nombreuses études au Japon depuis 1977, en vue de leur application aux services de télétexte. Grâce à des données sur les structures d'erreurs, obtenues dans des essais en vraie grandeur, on a procédé à des simulations de la performance de nombreux codes de correction d'erreurs. D'autres essais en vraie grandeur ont permis également de comparer les possibilités de correction d'erreurs de plusieurs types de codes proposés. Sur la base de ces simulations et de ces expériences, on a adopté le code cyclique différence (272, 190) pour le système de radiodiffusion de données du système D de télétexte du CCIR. Ce code a un rendement de 70% et on estime qu'il est capable de corriger 11 bits erronés dans un bloc de 272 bits [CCIR, 1982-1986b]. Il permet d'obtenir un taux d'erreur de 10^{-5} sur les blocs, pour un taux d'erreur binaire de 10^{-2} .

A côté du code (272, 190), l'utilisation d'un indice de continuité dans la transmission par paquets et l'utilisation du contrôle de redondance cyclique (CRC) au niveau du groupe de données ont permis d'obtenir pour le système un mécanisme de transport extrêmement fiable. La Figure 1 illustre les possibilités de protection contre les erreurs du code (272, 190) et du CRC.

En général, on peut s'attendre à avoir une transmission fiable si les stratégies décrites plus haut sont appliquées dans des services autres que le télétexte, que la transmission se fasse en radiodiffusion de Terre ou par satellite. On étudie actuellement l'application des stratégies de protection contre les erreurs dans divers types de services de radiodiffusion de données (Figure 2).

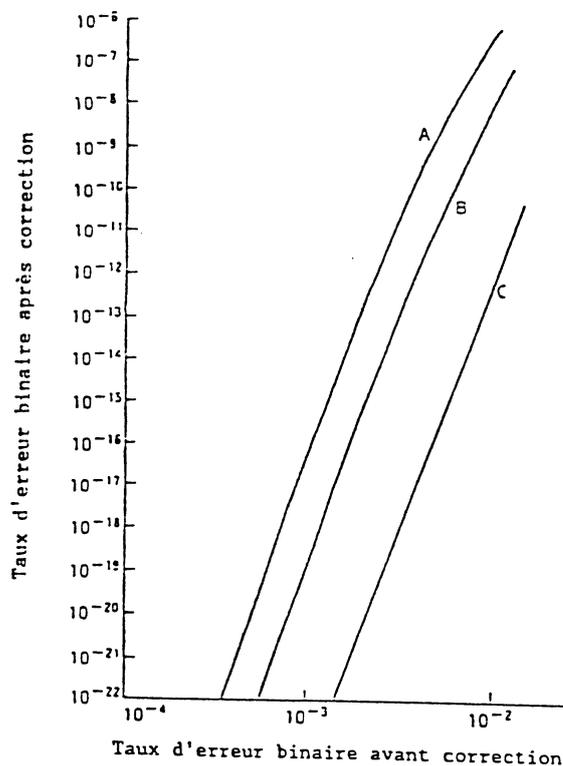


FIGURE 1 - Capacité de protection contre les erreurs du code (272,190) et du CRC

- Courbes A: capacité de correction d'erreurs du code (272,190)
B: capacité de détection d'erreurs du code (272,190)
C: capacité de détection d'erreurs du code (272,190) combiné avec le code de redondance cyclique

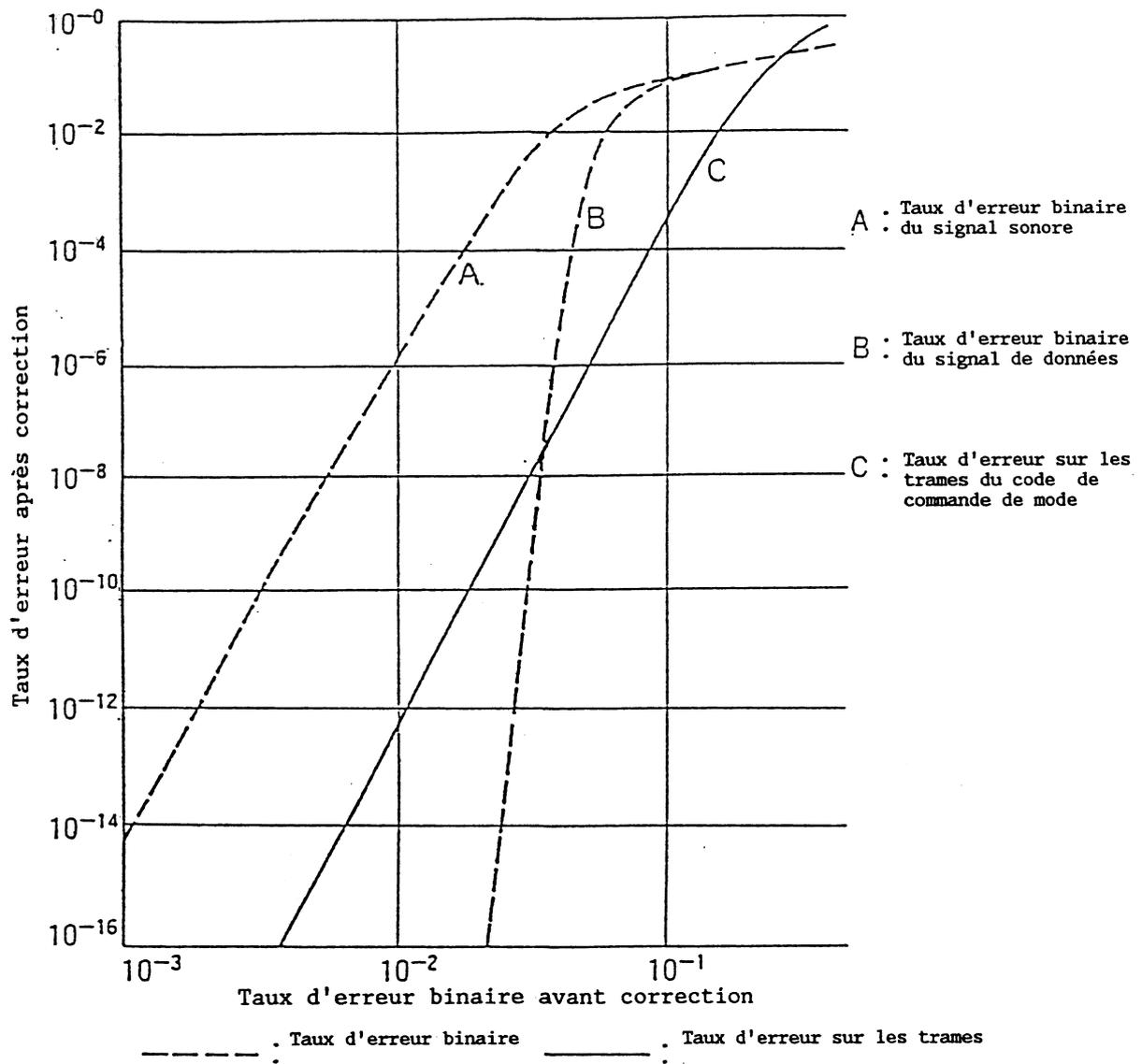


FIGURE 2

Caractéristiques de qualité de la méthode de correction d'erreurs de chaque code

4. Exemples de stratégies de protection contre les erreurs pour la radiodiffusion de données utilisant des canaux de radiodiffusion par satellite

4.1 Transmission de données dans le multiplex numérique MAC/paquets

L'UER a étudié différents procédés de protection contre les erreurs [CCIR, 1986-90f] pour la normalisation d'un mécanisme de transport convenant aux services de données que comprend le multiplex numérique de la famille des systèmes MAC/paquets [CCIR, 1982-86c, d]. Ces stratégies sont applicables à d'autres mécanismes de transport que ceux du multiplex numérique en MAC/paquets.

Deux processus de protection contre les erreurs ont été définis par l'UER [CCIR, 1986-90g] pour le transport de télétexte des systèmes A et B du CCIR dans le multiplex numérique MAC/paquets. Le premier niveau n'utilisant qu'un code de redondance cyclique est principalement destiné aux services de données cycliques où la correction d'erreur peut être assurée par utilisation de logique majoritaire ou de variation des bits au niveau du récepteur. Le deuxième niveau utilise la correction d'erreur directe - sans voie de retour - (CED) Golay (24, 12) pour assurer un niveau élevé de protection sur une seule transmission de données de télétexte.

4.1.1 Stratégies de protection contre les erreurs

On a proposé plusieurs stratégies de protection contre les erreurs [Cominetti et Morello, 1985] et [Eitz et Moell, 1988] faisant appel à un ou plusieurs des principes de traitement des erreurs principales suivants:

- contrôle par redondance cyclique (CRC);
- correction des erreurs par logique majoritaire (LM) ou par variation des bits (VB);
- correction des erreurs directe (CED).

Selon la stratégie de protection contre les erreurs adoptée pour le récepteur et pour l'émetteur, le décodeur peut se comporter différemment en présence d'erreurs, de manière à ce que son comportement dans de mauvaises conditions de réception puisse se situer entre deux extrêmes qui sont les suivants : soit un niveau de confiance élevé en un message exempt d'erreurs dès sa première acquisition, au prix d'une redondance accrue pour la correction des erreurs directe, soit une nécessité de répétition du message et d'acquisitions multiples pour obtenir une réception sans erreur.

Tandis que la détection d'erreurs peut être effectuée de manière efficace par des codes faiblement redondants, la correction des erreurs directe dans de mauvaises conditions de réception (taux d'erreur binaire supérieur à 1×10^{-3}) exige un gros volume de redondance supplémentaire.

Quand le service offert n'est pas cyclique, l'adoption de codes CED puissants permet souvent d'obtenir un meilleur taux d'erreur que les émissions multiples et la logique majoritaire [BSB, 1989] ou le décodage par variation des bits, tant qu'est maintenue constante l'efficacité de transmission. Toutefois, si le service est cyclique, la répétition n'entraîne pas de réduction de l'efficacité de transmission. Dans ce cas, il peut être plus judicieux d'utiliser la répétition du message plutôt que d'introduire des codes CED très puissants; on évite ainsi d'augmenter le temps d'accès dans les régions où les conditions de réception sont bonnes.

Il est important de noter que, quand le taux d'erreur de la voie dépasse les possibilités de correction du code, la procédure de correction directe peut parfois introduire de nouvelles erreurs. Par contre, la correction des erreurs par logique majoritaire peut fonctionner habituellement dans de telles conditions, ce qui réduit le taux d'erreur de la voie.

Ce comportement incite à combiner la logique majoritaire, ou la correction d'erreurs par variation des bits, avec la correction directe; la première réduit le taux d'erreur à un niveau acceptable pour les possibilités de correction du code, et la seconde élimine les erreurs résiduelles ; il est ainsi possible de réduire à un faible niveau la redondance supplémentaire, tout en assurant la qualité de service requise. Le choix de la stratégie de protection contre les erreurs optimale dans le récepteur est alors un compromis entre l'exploitation de la répétition cyclique des messages et l'utilisation de la correction directe des erreurs. En général, il semble nécessaire d'identifier certaines stratégies fondamentales et de comparer leurs possibilités de correction en fonction du taux d'erreur dans la voie.

4.1.2 Valeurs typiques du contenu de données

On a utilisé dans les études de l'UER les valeurs suivantes de contenu de données pour caractériser et évaluer la qualité du service:

- page de télétexte typique: 1 koctet;
- sous-titre de 2 lignes typiques: 80 octets;
- unité typique de télélogiciel: 10 koctets.

4.1.3 Critères définissant une qualité satisfaisante

On a considéré les limites suivantes, applicables à un service acheminé par multiplex numérique de la famille des systèmes MAC/paquets.

- télétexte : pour un taux d'erreur aléatoire de 3×10^{-3} , deux ou trois acquisitions permettront une visualisation sans erreur, avec une probabilité de succès dépassant 97 %
- sous-titrage : la répétition deux ou trois fois de chacun des sous-titres permettra une réception satisfaisante pour un taux d'erreur aléatoire de 3×10^{-3}
- télélogiciel : pour que la probabilité de succès dans l'acquisition d'un message du télélogiciel de 10 koctets soit satisfaisante à un taux d'erreur aléatoire de 3×10^{-3} , l'acquisition peut être répétée cinq fois.

Il est raisonnable de choisir un système de protection donnant une qualité "satisfaisante" du service de diffusion de données à un taux d'erreur aléatoire de 3×10^{-3} . Pour les systèmes de diffusion par satellite de la famille MAC/paquets, cette valeur correspond à une qualité du son et de l'image inférieure à la note 3 sur l'échelle du CCIR ("moyen").

4.1.4 Stratégies de décodage

Les stratégies de décodage, décrites dans l'Annexe, ne concernent que la partie significative du message (bloc de données), en supposant que toutes les informations complémentaires nécessaires pour une reconstitution exacte du message (en-tête de paquet) sont correctement récupérées par le récepteur. Dans le système MAC/paquets, ces informations sont fortement protégées par des codes de correction-avant tels que celui de Golay (23,12) et de Hamming (8,4). Comme le signalent les spécifications de la famille MAC/paquets [UER,1986], le code de Golay (23,12) est capable de corriger jusqu'à trois erreurs dans un groupe de 23 bits et la probabilité de perte d'un paquet est d'environ $7,5 \times 10^{-5}$ à un taux d'erreur binaire de 1×10^{-2} et de $4,5 \times 10^{-3}$ à un taux d'erreur binaire de 3×10^{-2} .

Un protocole proposé pour le type de composante du service MAC/paquets "données d'usage général" (GPD), [CCIR, 1986-90h], autorise l'emploi facultatif de la détection d'erreurs par CRC de segment de données, la correction facultative des erreurs par codage CED, et une extension du format pour obtenir un indice de continuité du segment de données étendu, afin de faciliter la correction des erreurs par répétition. Une étude théorique du taux d'erreur du type GPD de composante du service est proposée dans [BSB, 1989].

4.1.5 Conclusions des études de l'UER

Ces études offrent quelques indications générales quant au choix d'une stratégie efficace pour la correction des erreurs:

- Pour garantir une bonne qualité du service dans le cas de taux d'erreur élevés (jusqu'à 1×10^{-2} , il faudrait combiner des méthodes de correction d'erreurs utilisant l'acquisition multiple telle que la décision par logique majoritaire ou la variation des bits, avec une correction directe des erreurs (par exemple, code BCH) qui n'a pas à être très puissante (par exemple, un code capable de corriger une ou deux erreurs).
- Dans un tel cas, la redondance supplémentaire nécessaire pour le traitement des erreurs ne devrait pas réduire sensiblement la capacité de diffusion de données de la voie (5 % de redondance).
- Dans des conditions de réception bonnes ou moyennes, la correction directe des erreurs devrait éliminer les erreurs résiduelles à la première acquisition, ce qui réduirait le temps d'accès.
- Dans de mauvaises conditions de réception, des acquisitions supplémentaires (T = 2 ou 3) seraient nécessaires pour obtenir des messages de données exempts d'erreurs.
- Pour le sous-titrage, on peut obtenir une très forte probabilité d'affichage des lignes de texte sans erreur en diffusant deux fois chacun des sous-titres.

Le choix entre les stratégies mentionnées plus haut et leurs nombreuses variantes que l'on peut imaginer pour améliorer leurs performances est toujours à l'étude auprès de l'UER.

4.2 Transmission de données dans le système sous-porteuse numérique NTSC

Le système sous-porteuse numérique NTSC décrit dans le Rapport 1073, actuellement utilisé pour l'exploitation des services de radiodiffusion télévisuelle par satellite au Japon a la possibilité d'être employé comme voie de données de radiodiffusion par satellite.

4.2.1 Méthodes de protection contre les erreurs dans le multiplex son/données

Le multiplex son/données acheminé par la sous-porteuse numérique à 5,73 MHz a un débit binaire de 2 048 Mbit/s et une structure de trame dont la longueur est de 1 ms (c'est-à-dire 2 048 bits). La trame a une structure de matrice de 32 x 64 bits. Les bits contenus dans chaque rangée de la matrice sauf le premier bit, qui est un bit de synchronisation ou de commande, renferment le code BCH (63, 56). Etant donné que la séquence de transmission des bits dans la matrice est dans le sens colonne par colonne, les erreurs successives, qui vraisemblablement vont apparaître dans la démodulation MDPQ différentielle, n'affectent pas le processus de protection contre les erreurs avec le code BCH.

La voie de données est définie comme la zone restante de la matrice non utilisée pour la transmission du son, la commande de gamme, la synchronisation de trame, la commande de trame et la protection contre les erreurs [CCIR, 1986-90i].

4.2.2 Méthodes de protection contre les erreurs dans le processus de transmission de données

Un ensemble de neuf trames forme une super-trame qui a une structure de matrice de 288 x 64 bits. Un paquet ayant une longueur fixe de 288 bits ($32 \times 9 = 288$) est disposé dans la voie de données dans la super-trame d'une manière analogue à une configuration en dent de scie de façon que la séquence binaire du paquet soit orthogonale à la séquence de transmission binaire de même que la séquence binaire du code de correction d'erreurs donné ci-dessous. On peut ainsi éviter la concentration des erreurs sur un paquet.

Le paquet est composé d'un en-tête et d'une partie données. L'en-tête, ayant une longueur de 16 bits, est un mot de code du code BCH (16,5) qui peut corriger toutes les erreurs jusqu'à 3 bits et détecter les erreurs jusqu'à 4 bits.

Aucun processus particulier de protection contre les erreurs n'est spécifié pour la partie données; toutefois on peut appliquer un code cyclique différence décodable à logique majoritaire (272, 190). (Voir le § 4.3).

Le code de commande de trame contient cinq bits pour indiquer le mode de transmission du son et deux bits pour la suppression du son ou des données utilisés dans des transitions telles que le changement du mode son ou la commutation de la station terrienne d'émission. Le mode "canal de données" est défini par les bits qui indiquent le mode de transmission du son. Pour renforcer ces bits de commande, on spécifie une transmission répétée 36 fois dans une trame maîtresse dont la durée est de 36 ms. Un bit du code de commande est utilisé pour indiquer la période de trame maîtresse. A l'extrémité réceptrice on recommande une décision majoritaire (plus de 19 sur 36) dans la trame maîtresse.

4.2.3 Résultats d'essais expérimentaux de transmission par satellite

En utilisant le satellite BS-2b de radiodiffusion directe en exploitation, on a effectué des essais expérimentaux de transmission par paquets sur la voie de données.

Les Figures 3a) et 3b) représentent respectivement le taux d'erreur de l'en-tête et celui de la partie données. Le code cyclique (272, 190) est appliqué à la partie données. L'effet produit avec le code BCH (63, 56) est également représenté.

Un taux d'erreur sur les blocs de 10^{-3} a été obtenu avec un rapport porteuse/bruit (C/N) de 4,5 dB pour la partie en-tête et un taux d'erreur sur les blocs de 10^{-2} a été obtenu avec un même rapport C/N pour la partie données. Lorsque le rapport C/N atteint 8 dB, le taux d'erreur devient si faible qu'il peut être négligé (inférieur à 10^{-9}).

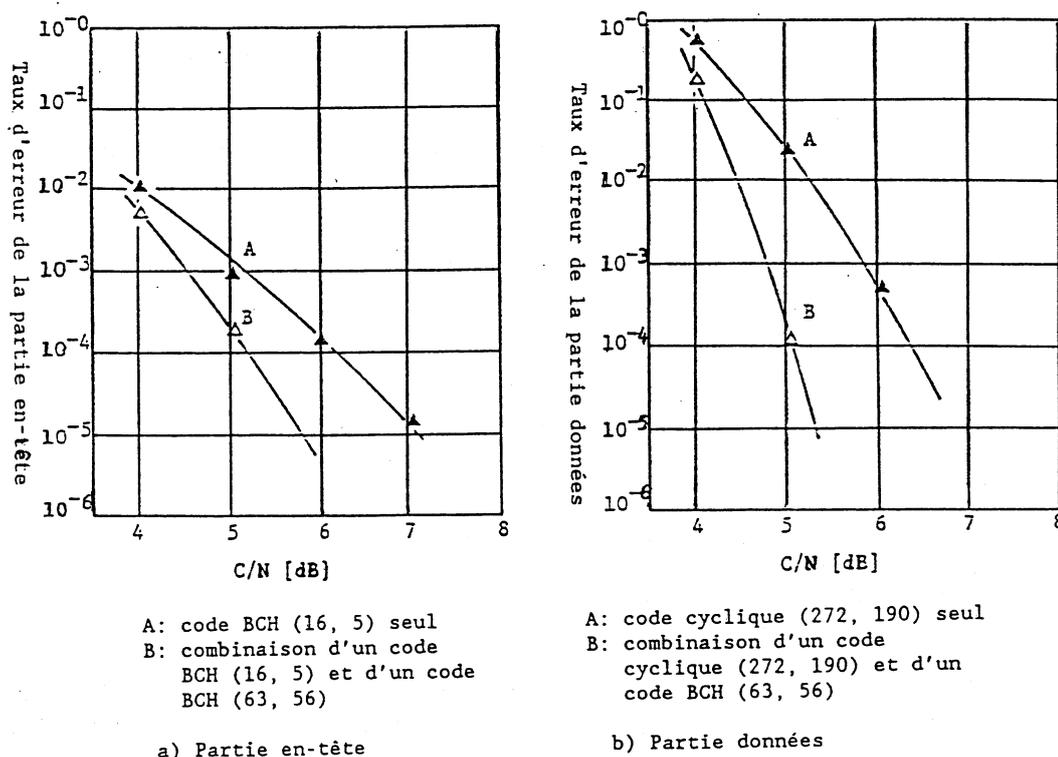


FIGURE 3

Taux d'erreur sur les blocs de l'en-tête et de la partie données des paquets émis dans une voie de données du satellite de radiodiffusion

C/N: rapport porteuse/bruit (dans 27 MHz)

4.3 Transmission de données dans le système de radiodiffusion par satellite uniquement pour le son: "DSR" (Radiodiffusion numérique par satellite)

Le système de radiodiffusion numérique par satellite, DSR, recommandé dans la Recommandation 712 et spécifié dans l'Annexe I au Rapport 215, utilisé pour la transmission de 16 voies son stéréophonique de haute qualité ou de 32 voies son monophonique, en République fédérale d'Allemagne, a la possibilité de servir pour la radiodiffusion de données par satellite [Assmus, 1989]. Chacune des 32 voies son monophonique offre 352 kbit/s de capacité de données protégées et 96 kbit/s de capacité de données non protégées. La partie protégée utilise les 11 bits de poids fort (MSB) en combinaison avec un code BCH (63, 44).

Ce code peut corriger deux erreurs binaires dans les limites d'un bloc de codage de 63 bits. Dans le Tableau II, la valeur mesurée du TEB avec correction d'erreur est représentée en fonction du rapport porteuse/bruit dans une voie de radiodiffusion par satellite dans la gamme des 12 GHz. La dernière entrée du tableau indique le TEB sans correction d'erreur pour un rapport signal/bruit de 12 dB.

TABLEAU II

Rapport signal/bruit (C/N) en dB	7	8	9	10	12	12 (sans correct.)
TEB	$4,3 \times 10^{-4}$	$6,0 \times 10^{-5}$	$6,6 \times 10^{-6}$	$6,9 \times 10^{-7}$	$8,1 \times 10^{-8}$	$3,6 \times 10^{-5}$

Une comparaison des TEB pour un rapport porteuse/bruit (C/N) égal à 12 dans les cas de transmissions protégée et non protégée montre l'amélioration importante du TEB dans la voie protégée d'environ 4×10^{-3} . En d'autres termes, la réduction du TEB atteinte par la méthode de codage de bloc (63, 44) correspond à une amélioration du C/N d'environ 4 dB.

5. Méthodes de protection contre les erreurs sur d'autres types de services de radiodiffusion de données multiplex MF

5.1 Systeme de radiodiffusion multiplex MF

Un système de radiodiffusion multiplex MF capable de transmettre des signaux numériques son et de données a été mis au point. Ce système multiplexe un signal numérique à 48 kbit/s et convient à une réception fixe [CCIR, 1986-90j].

Le signal multiplex numérique a une structure de trame qui consiste en un code de verrouillage de trame de 18 bits, un code de commande de mode à 16 bits et 34 blocs de code cyclique différence décodable à logique majoritaire (272, 190), (voir § 3.4).

Les signaux sonores sont protégés par le code (272, 190), tandis que les signaux de données sont protégés par le produit de deux codes (272, 190).

Le code de commande de mode qui définit le contenu de la trame est protégé par un code BCH étendu (16,7) qui a une possibilité de correction d'erreur de 2 bits et une possibilité de détection d'erreur de 3 bits dans un bloc de 16 bits. Les études entreprises recommandent de décoder ce code après une décision majoritaire effectuée sur chaque bit de 5 codes successifs de commande de mode, étant donné que le même code de commande de mode est transmis dans le même programme de radiodiffusion multiplex MF.

Les signaux sonores numériques échantillonnés sont disposés orthogonalement sur les codes de correction d'erreur et les séquences de transmission binaire de la trame pour éviter la concentration des erreurs aussi bien dans les blocs de correction d'erreur que dans les données son échantillonnées.

La qualité de la méthode de correction des erreurs utilisée dans le système est représentée à la Figure 1, comme indiqué au § 3.4.

5.2 Radiodiffusion de télécopie par multiplexage avec le système MF-MF dans le système M de télévision

Pour ce qui est du format du signal de radiodiffusion numérique de télécopie, ce système utilise un signal de type paquet qui comporte un code cyclique différence décodable raccourci à logique majoritaire (272, 190) pour la correction des erreurs. En outre, le signal est complété par un code de commande du mode à 16 bits qui permet d'identifier le contenu de la voie de transmission. Il est ensuite inséré dans une trame à 32 lignes et 288 colonnes. Lors de la lecture du signal, une méthode de transmission avec bits intercalés permet d'empêcher les signaux d'être affectés par les erreurs en salve dues à la propagation par trajets multiples.

En ce qui concerne le format du signal de contrôle pour la radiodiffusion analogique, un code cyclique différence raccourci (270, 190) est inclus [CCIR, 1986-90k].

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ASSMUS, U. [février 1989] - Distribution de données par radiodiffusion numérique par satellite (DSR) par l'intermédiaire de satellite de radiodiffusion. Revue de l'UER. Technique, N° 233.

BSB [1989] - An analysis of the effect of bit errors on MAC/packet general purpose data (GPD) services, British Satellite Broadcasting, avril 1989.

COMINETTI, M., et MORELLO, A. [septembre 1985] Telesoftware - Sistemi di protezione dagli errori di trasmissione. RAI Research Center Technical Report No. 85/10/I.

COMINETTI, M., MORELLO, A., PASTERO, N., TABONE, D. et TOSONI, N.S. [1986] Campagna di misure per l'introduzione del Telesoftware. RAI Research Centre, Technical Report No. 86/9/I.

EITZ, G. et MOELL, G. [juin 1988] - Fehlerschutzstrategien fuer die Satellitenuebertragung von Fernsehtext (Méthodes de protection contre les erreurs pour la transmission de télétexte par satellite) Rundfunktechnische Mitteilungen.

UER [Octobre 1986] Spécification des systèmes de la famille MAC/paquets, Document de l'UER /Technique) 3259.

Documents du CCIR

[1982-86]: a. 11-129 (Japon); b. 11/29 (Japon); c. 10-11S/164 (UER); d. 10-11S/165 (UER).

[1986-90]: a. GTIM 10-11/5-13 (Chine (République populaire de)); b. GTIM 10-11/5-15 (Allemagne (République fédérale d')); c. GTIM 10-11/5-11 (France); d. 11/101 (Italie); e. GTIM 10-11/5-39 (Allemagne (République fédérale d')); f. GTIM 10-11/5-7 (UER); g. GTIM 10-11/5 CP36 (UER); h. GTIM 10-11/3-117 (UKIBA); i. 11/420 (Japon); j. 10/204 (Japon); k. 11/423 (Japon).

ANNEXE I

LE CLASSEMENT ET L'EVALUATION DES STRATEGIES
POUR LA PROTECTION CONTRE LES ERREURS

La présente Annexe donne la méthode de classement des stratégies de correction d'erreur et les relations utilisées pour évaluer ces stratégies décrites au § 4.1.4.

A. Classement des stratégies de protection contre les erreurs

Comme le montre le Tableau III, les différentes stratégies de protection contre les erreurs peuvent être regroupées en trois grandes familles identifiées par le volume de redondance supplémentaire introduit au niveau du paquet.

TABLEAU III

FAMILLE	REDONDANCE	CODAGE DANS L'OCTET	APPLICATION
A	Contrôle de parité au niveau du caractère	7 + 1 bit	Télétexte et sous-titrage classiques
B	Code de redondance cyclique (16 bits)	8 bits	Télétexte amélioré des systèmes A et B, sous-titrage, télélogiciel, services de diffusion de données transparentes
C	Code de redondance cyclique (16 bits) avec correction-avant		

On admet que le comportement de la protection contre les erreurs utilisant un contrôle de parité au niveau du caractère, comme on l'utilise dans les systèmes de télétexte A et B actuels du CCIR, n'exige pas d'étude supplémentaire. L'attention se concentrera donc sur les nouvelles stratégies de protection basées sur un codage à 8 bits. On trouvera cependant, en annexe, les relations fondamentales pour le codage à 7 bits avec parité, en plus de celles pour le codage à 8 bits.

Les Figures 4 à 10 présentent les résultats pour le transport du multiplex MAC/paquets par un bloc de données de 90 octets de long. On y indique la probabilité $P(s,T)$ pour qu'une page soit correctement affichée (ou un fichier reconstitué) après T acquisitions, s signifiant succès et T nombre d'acquisitions.

a) Stratégies de la famille AStratégie (A-1)
(CONTROLE DE PARITE)

Appliquée au télétexte et au sous-titrage classiques (codage sur 7 bits + parité) et adoptée dans les systèmes de télétexte A et B du CCIR :

- La détection des erreurs est effectuée au niveau du caractère par un contrôle de parité. Si celui-ci n'est pas satisfait, un blanc apparaît dans la mémoire de page.
- La correction des erreurs est obtenue par acquisitions successives des pages en remplissant les blancs par des caractères jugés exempts d'erreurs. Ce mécanisme n'évite pas l'affichage de caractères erronés en cas d'apparition d'erreurs paires. Le niveau de confiance dans l'exactitude de la page visualisée peut être sensiblement augmenté par l'addition d'un code de détection d'erreurs (code de redondance cyclique) dans n'importe quelle rangée ou page de données.

b) Stratégies de la famille B

Dans le cas du télétexte amélioré, du sous-titrage, du télélogiciel et des services de diffusion de données transparentes (codage à 8 bits), on a identifié deux stratégies appartenant à cette famille. Chacun des paquets de données (90 octets) est protégé par un suffixe de 16 bits (code de redondance cyclique).

Stratégie (B-1)
(CRC)

On adopte la procédure de décodage suivante :

- Les blocs de données sont acceptés quand le code de redondance cyclique donne un résultat positif et sont refusés dans les autres cas.
- En présence d'erreurs dans la voie, l'élément d'information (par exemple, une page de télétexte, un sous-titre sur deux lignes, un fichier de données, etc.) est récupéré sans erreur après plusieurs acquisitions consécutives.

Comme le montre la Fig. 4, cette stratégie n'est utilisable que dans de très bonnes conditions de réception.

Stratégie (B-2)
(CRC + LM + CRC)

La procédure de décodage est la suivante :

- Les blocs de données sont admis quand le résultat du contrôle cyclique est positif et, dans le cas contraire, ils sont enregistrés dans la mémoire du récepteur pour traitement ultérieur. Les positions de mémoire réservées aux acquisitions consécutives du même bloc de données affectées d'erreurs sont différentes (pas de surécriture)
- Après 3 (ou 5) acquisitions affectées d'erreurs, le récepteur effectue une correction par logique majoritaire bit par bit.
- Une détection d'erreur finale par code de redondance cyclique permet la validation du message décodé.



Cette stratégie qui est une amélioration de la stratégie (B-1), permet un décodage correct du message à la première tentative dans de bonnes conditions de réception, et est plus robuste en présence d'un taux d'erreur sur les bits élevé (voir Fig. 5).

On a vérifié ces résultats en laboratoire [Cominetti et Morello, 1985] au moyen d'un récepteur intelligent (voir le Tableau IV). On donne aussi les probabilités pour que l'affichage (ou la restitution du fichier) présente un TEB résiduel (c'est-à-dire avant validation finale par le CRC).

TABLEAU IV

TYPE DE SERVICES	NOMBRE DE REPETITIONS T	TAUX D'ERREUR BINAIRE MAXIMAL	P(s,T)	TAUX D'ERREUR RESIDUEL
TELETEXTE (1 KOCTET)	3 3	5×10^{-3} 1×10^{-3}	100 % 97 %	1×10^{-4}
SOUS-TITRAGE (80 OCTETS)	3 3	1×10^{-2} 3×10^{-3}	100 % 98 %	3×10^{-4}
TELELOGICIEL (10 KOCTETS)	3 5	3×10^{-4} 3×10^{-3}	97 % 97 %	0. 0.

c) Stratégies de la famille C

Dans cette série de stratégies de protection, chacun des paquets de données est protégé par un code de correction directe (code de Hamming ou BCH, par exemple) s'ajoutant au suffixe de redondance cyclique.

Stratégie (C-1) (CED + CRC)

La procédure de décodage est la suivante :

- Le récepteur assure une correction des erreurs directe grâce aux possibilités de correction du code utilisé.
- Une détection finale par redondance cyclique dans chacun des blocs de données assure le niveau de confiance nécessaire.

Selon les possibilités du code de correction directe, on peut obtenir une forte probabilité que le message des données soit exempt d'erreurs à la première acquisition, mais au prix d'une augmentation de la redondance pour le code à correction directe (voir les Fig. 6, 7 et 8).

Stratégie (C-2)
(CED + CRC) + (LM + CED + CRC)

Correction d'erreurs par logique majoritaire combinée avec la correction directe.

La procédure de décodage est la suivante :

- Les deux premières étapes sont les mêmes que dans la stratégie C-1, mais les paquets de données n'ayant pas satisfait au code de redondance cyclique sont enregistrés tels qu'ils sont reçus (sans correction directe).
- Après 3 (ou 5) acquisitions infructueuses, le récepteur procède successivement à une correction d'erreurs par logique majoritaire et à une correction directe des erreurs résiduelles.
- Une détection finale par contrôle cyclique sur chaque bloc de données permet une validation du message décodé.

Cette méthode demande un peu plus de redondance pour la correction directe que pour la stratégie B-2 ; le code correcteur d'erreurs n'a toutefois pas à être très puissant, car le taux d'erreur sur les bits résiduel après traitement à logique majoritaire est normalement faible.

Cette stratégie convient particulièrement bien pour les mauvaises conditions de réception (voir Fig. 9).

Stratégie (C-3)
(CED + CRC) + (VB + CED + CRC)

La correction directe n'est plus précédée par une décision à logique majoritaire, mais par un processus de correction d'erreurs à variation des bits dans chacune des positions d'un paquet de données, lorsque deux tentatives d'acquisitions successives donnent des résultats différents. On fait varier les valeurs des bits dans ces positions jusqu'au moment où le contrôle par redondance cyclique sur le paquet de données donne un résultat positif.

La procédure de décodage est la suivante :

- Les deux premières étapes sont les mêmes que pour la stratégie C-1, mais les paquets de données qui ne satisfont pas au contrôle par redondance cyclique sont enregistrés comme reçus (sans correction-avant).
- Le récepteur procède successivement à une variation des bits, à une correction directe et à une détection d'erreurs par code de redondance cyclique sur les paquets pour lesquels les étapes précédentes n'ont pas conduit au succès. Le bloc de données est accepté lorsque le contrôle par redondance cyclique est positif.

Comme pour la stratégie C-2, le message doit comporter une certaine redondance supplémentaire pour la correction-avant, mais contrairement au cas de la logique majoritaire, il suffit de deux tentatives d'acquisition. En ce qui concerne les limites pratiques de la puissance de calcul du décodeur, la variation des bits permettra probablement la correction de 9 ou 10 erreurs dans un paquet de données, ce qui correspond respectivement à un maximum de $2^9 - 2$ ou de $2^{10} - 2$ variations.

Cette stratégie est semblable à la stratégie C-2 et elle convient particulièrement pour les conditions de réception difficiles. Dans le cas des sous-titres notamment, la probabilité de décodage des données sans erreur peut être considérablement augmentée lorsque les paquets de données correspondants sont répétés deux fois de suite (voir Fig. 10).

Page de télétexte
(1 koctet)

Sous-titre
(80 octets)

Fichier de données
(10 koctets)

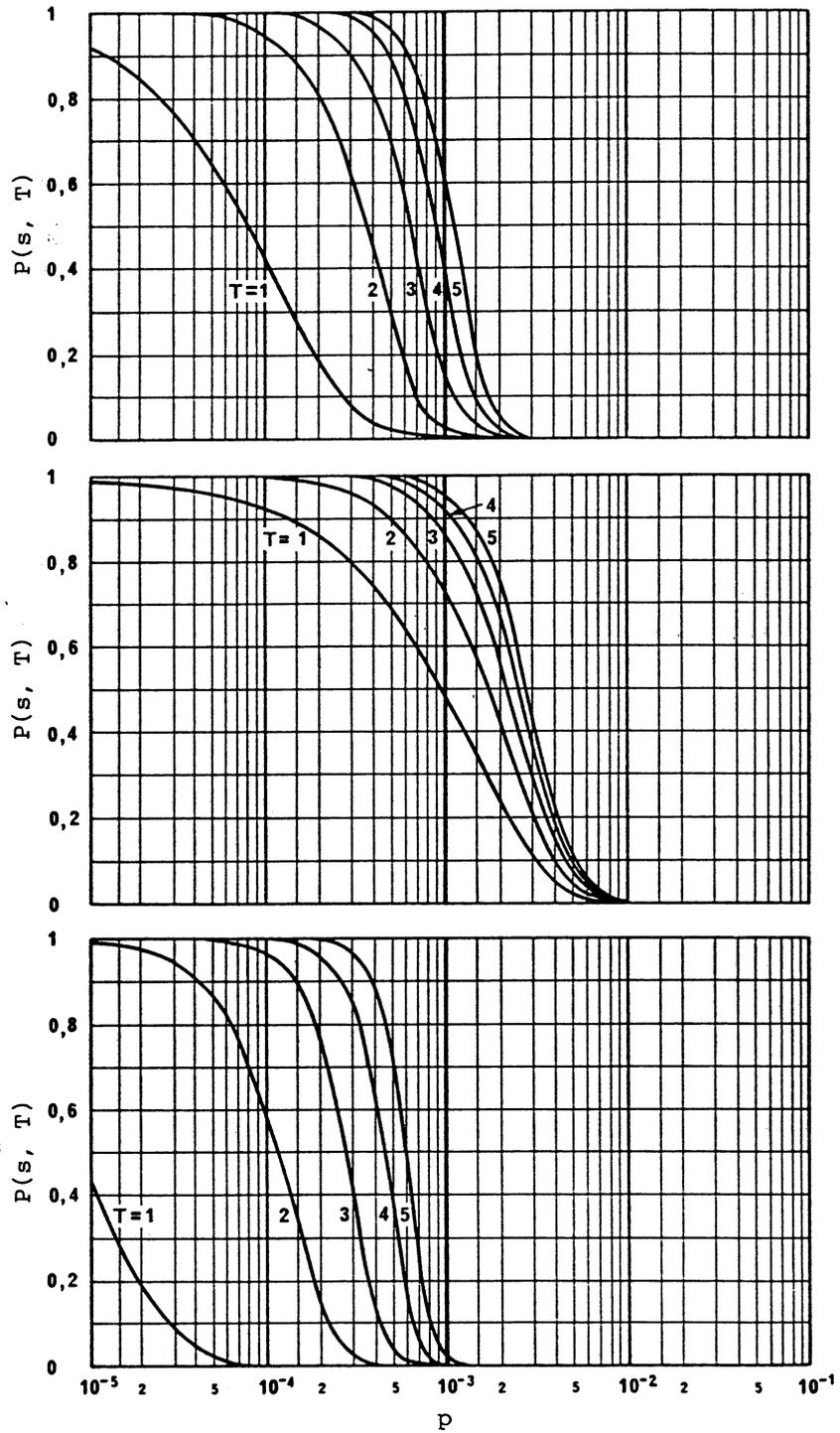


FIGURE 4

Stratégie B-1:

Probabilité d'acceptation des trois unités fondamentales d'information avec détection des erreurs par code de redondance cyclique

Longueur du bloc: 90 octets

Longueur du code de redondance cyclique: 2 octets

Page de télétexte
(1 koctet)

Sous-titre
(80 octets)

Fichier de données
(10 koctets)

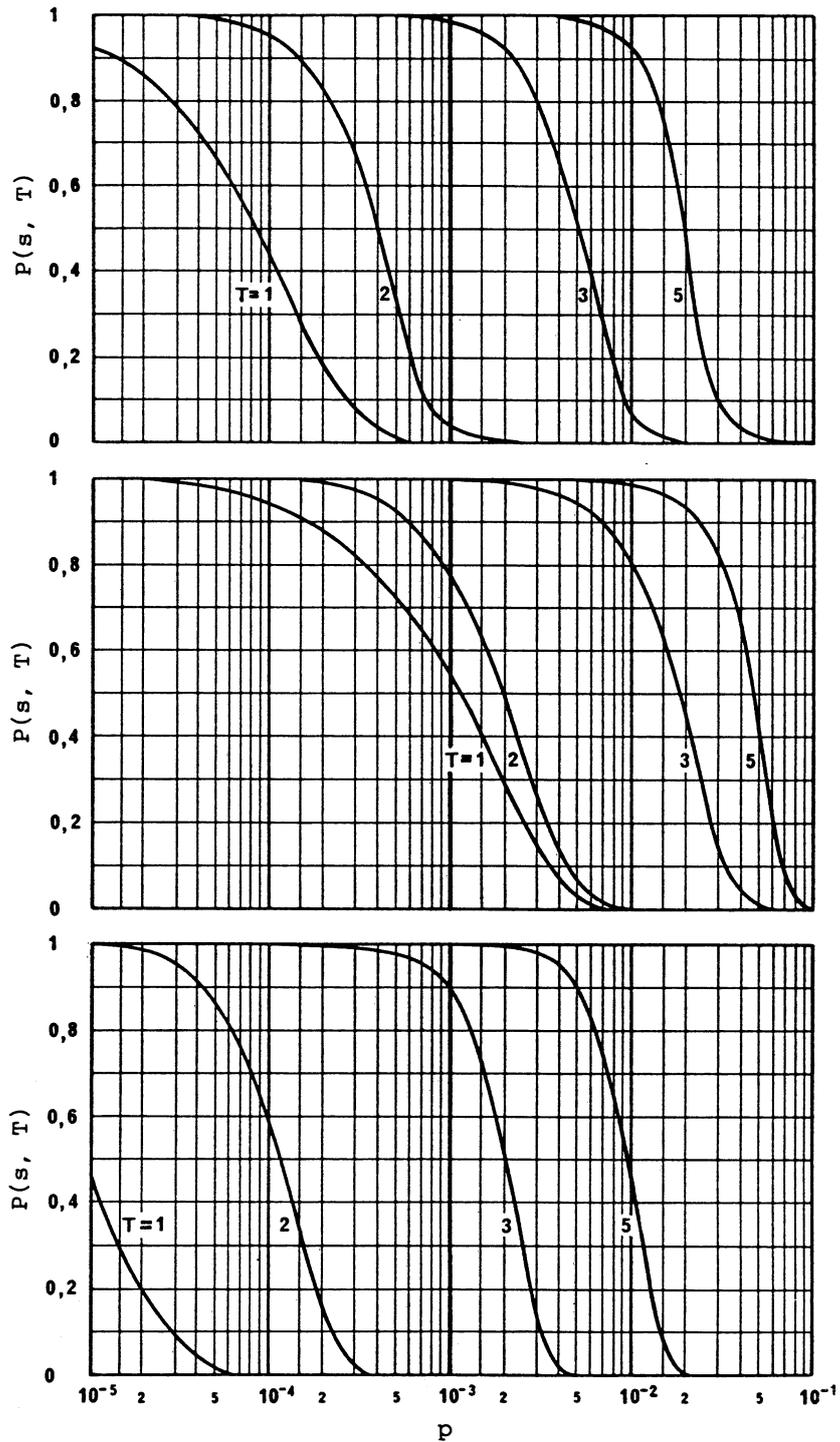


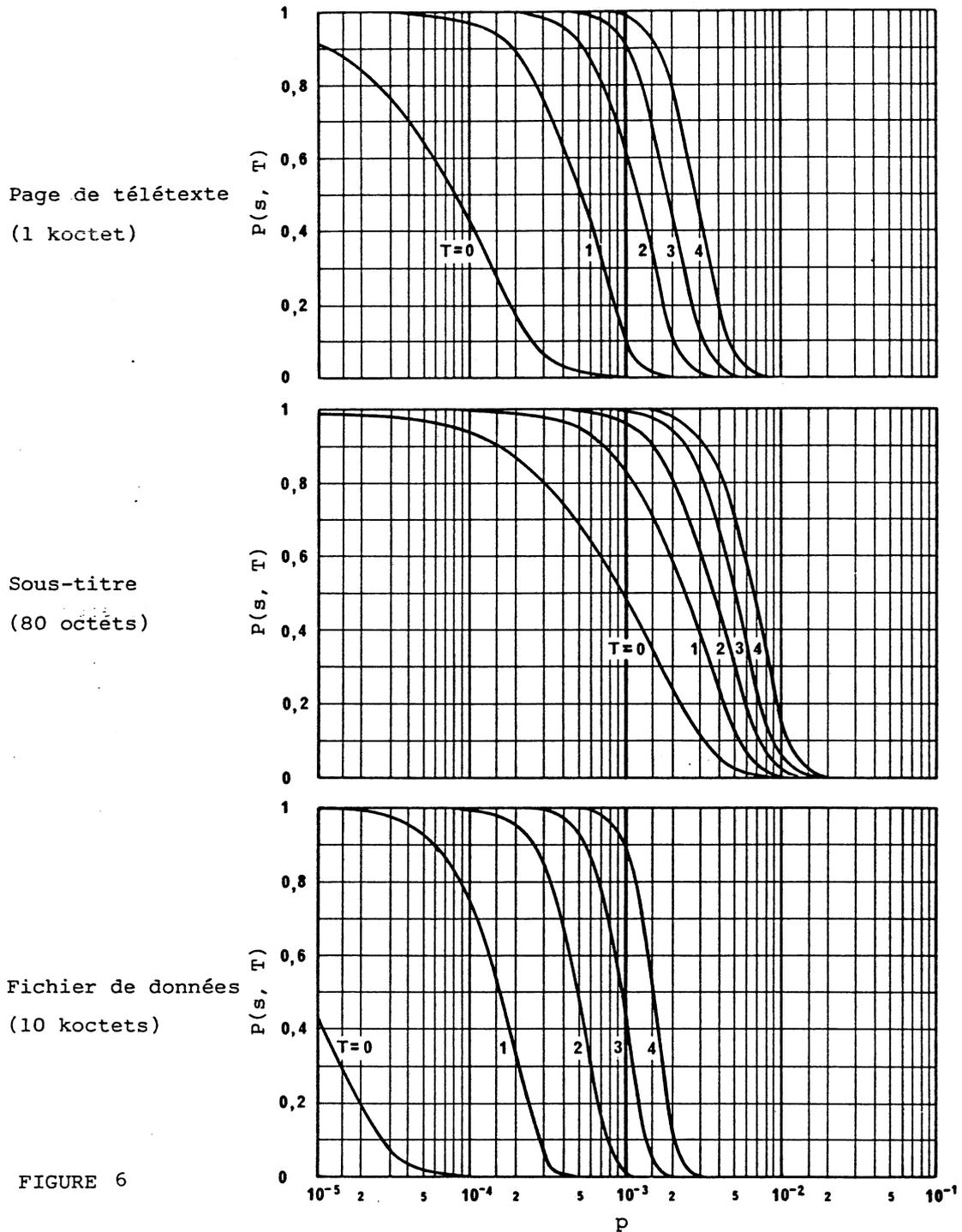
FIGURE 5

Stratégie B-2:

Probabilité d'acceptation des trois unités fondamentales d'information avec correction des erreurs par logique majoritaire après T acquisitions et détection des erreurs par code de redondance cyclique

Longueur du bloc: 90 octets

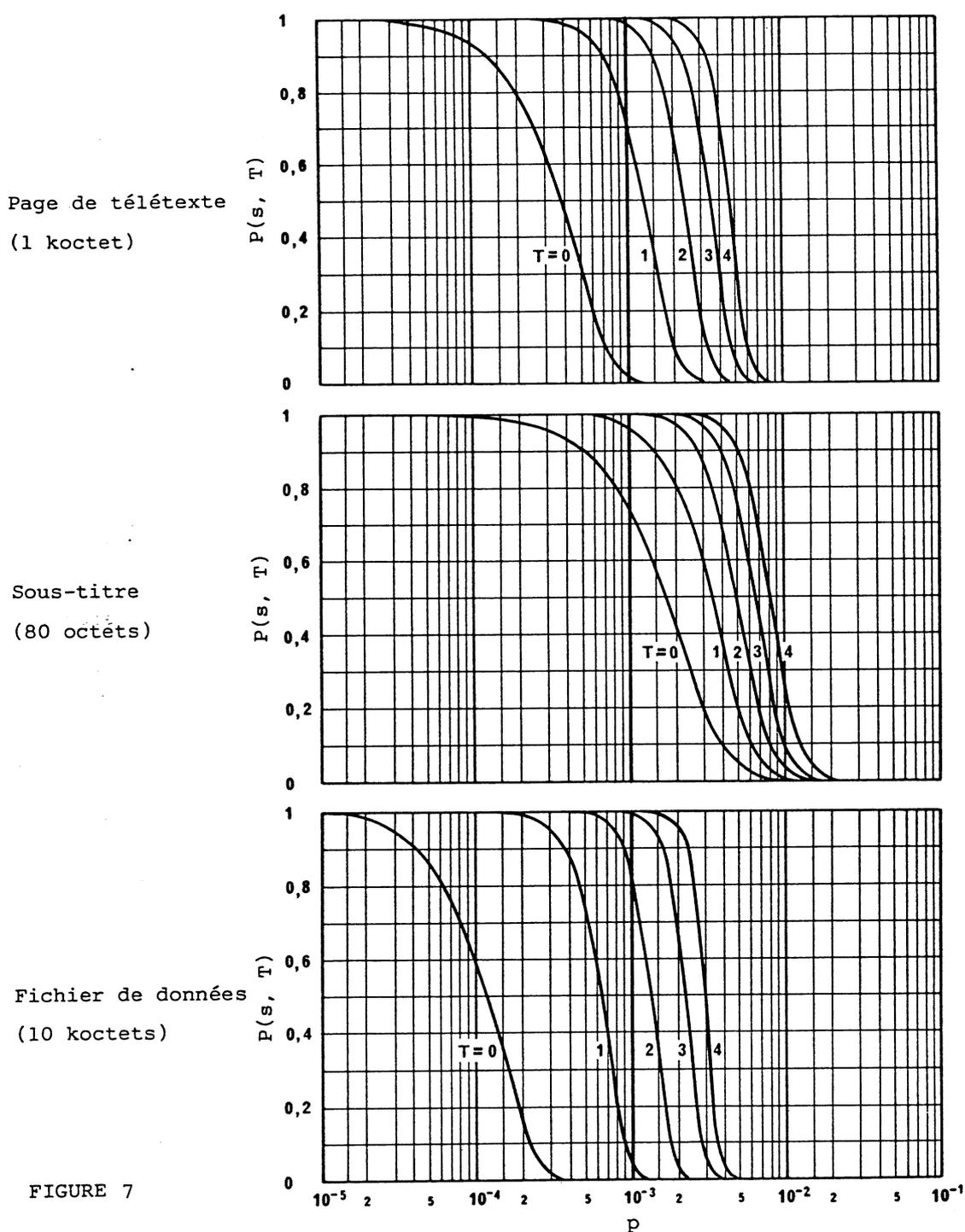
Longueur du code de redondance cyclique: 2 octets



Stratégie C-1 (1):

Probabilité d'acceptation des trois unités fondamentales d'information après une acquisition avec correction directe (corrigéant 1, 2, 3, 4 erreurs) et détection des erreurs par code de redondance cyclique

Longueur du bloc: 90 octets
Correction-avant: 0, 10, 20, 30, 40 bits
Code de redondance cyclique: 2 octets



Stratégie C-1 (2):

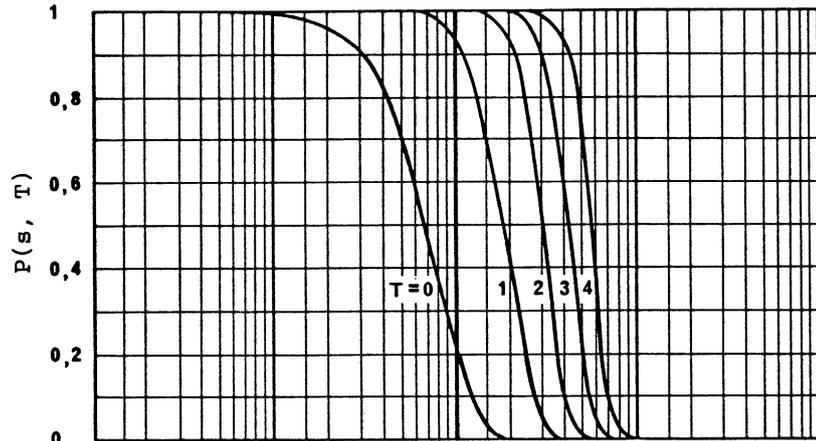
Probabilité d'acceptation des trois unités fondamentales d'information après deux acquisitions avec correction directe (corrigeant 0, 1, 2, 3 ou 4 erreurs) et détection des erreurs par code de redondance cyclique

Longueur du bloc: 90 octets

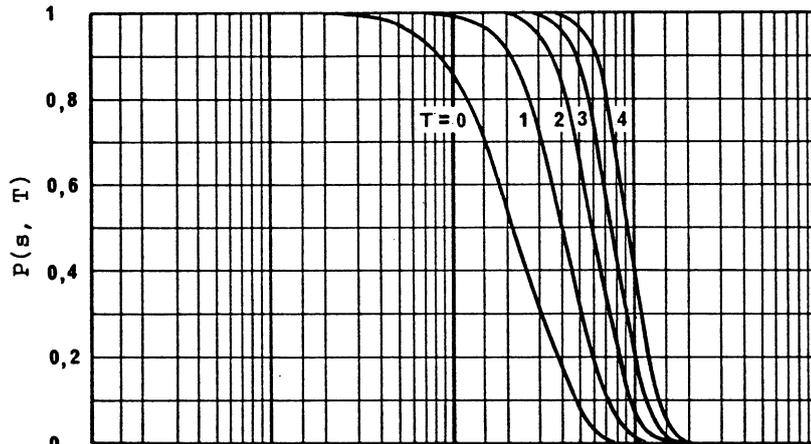
Correction-avant: 0, 10, 20, 30, 40 bits

Code de redondance cyclique: 2 octets

Page de télétexte
(1 koctet)



Sous-titre
(80 octets)



Fichier de données
(10 koctets)

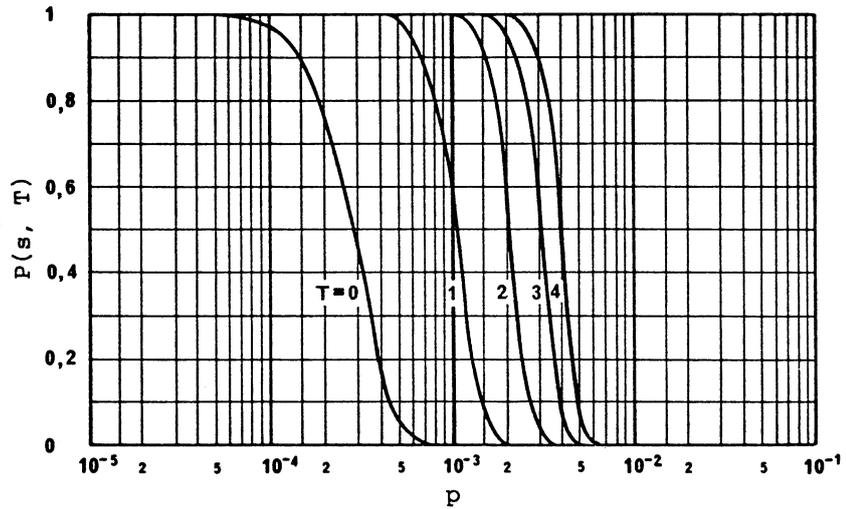


FIGURE 8

Stratégie C-1 (3):

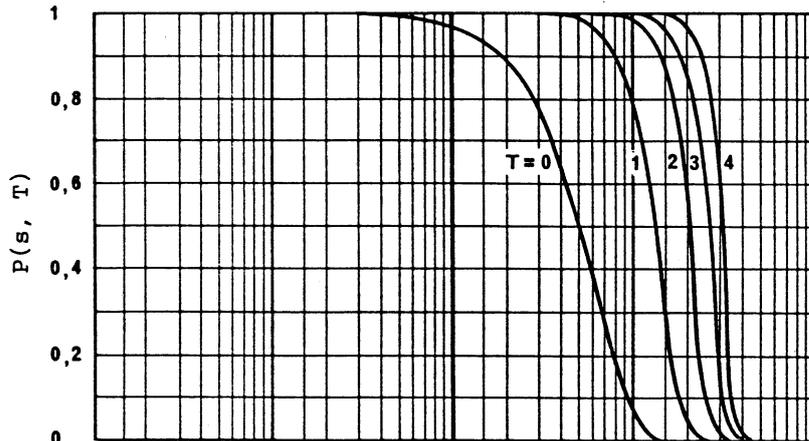
Probabilité d'acceptation des trois unités fondamentales d'information après trois acquisitions avec correction directe (corrigeant 0, 1, 2, 3 ou 4 erreurs) et détection des erreurs par code de redondance cyclique

Longueur du bloc: 90 octets

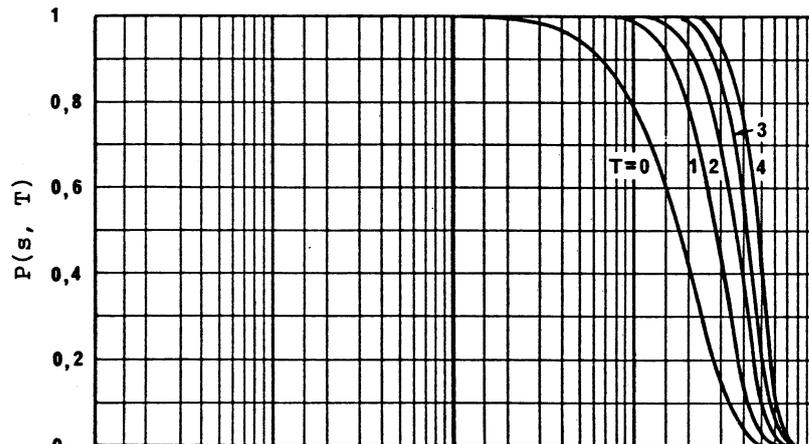
Correction-avant: 0, 10, 20, 30, 40 bits

Code de redondance cyclique: 2 octets

Page de télétexte
(1 koctet)



Sous-titre
(80 octets)



Fichier de données
(10 koctets)

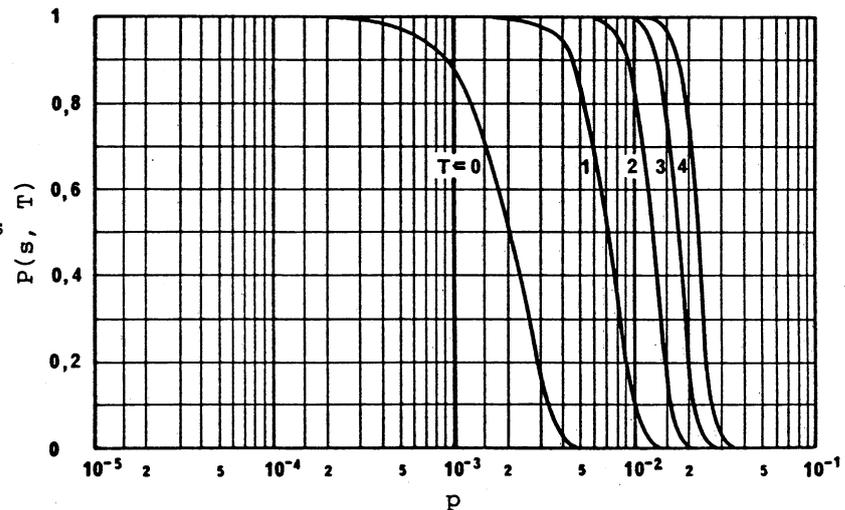


FIGURE 9

Stratégie C-2:

Probabilité d'acceptation des trois unités fondamentales d'information avec correction des erreurs par logique majoritaire, correction directe (corrigeant 0, 1, 2, 3 ou 4 erreurs) et détection des erreurs par code de redondance cyclique

Longueur du bloc: 90 octets

Correction-avant: 0, 10, 20, 30, 40 bits

Code de redondance cyclique: 2 octets

Les valeurs de $P(s, T)$ pour $T = 1$ et 2 sont données respectivement Fig. 6 et 7.

Page de télétexte
(1 koctet)

Sous-titre
(80 octets)

Fichier de données
(10 koctets)

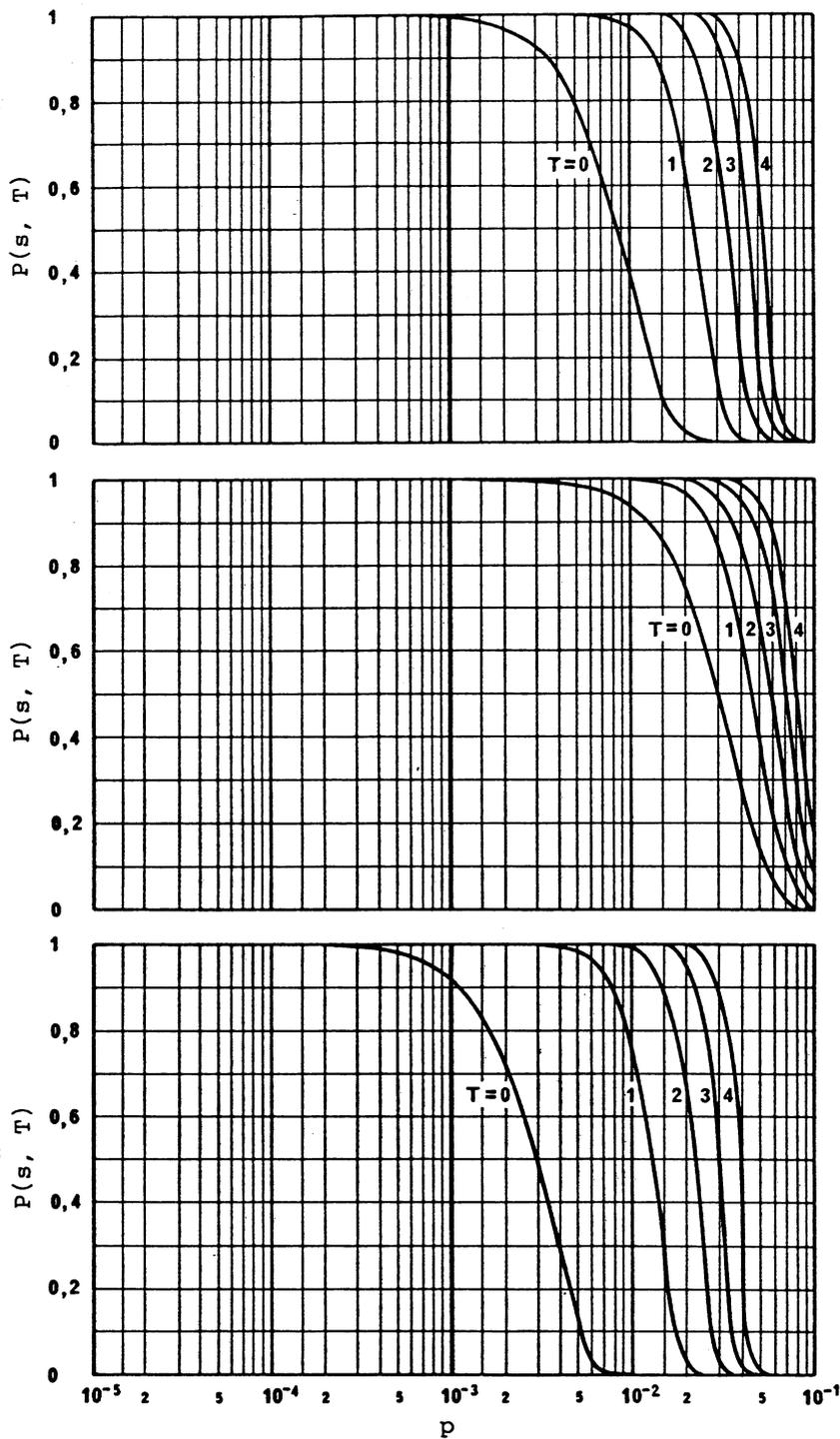


FIGURE 10

Stratégie C-3:

Probabilité d'acceptation des trois unités fondamentales d'information avec correction des erreurs par variation des bits, correction directe (corrigeant 0, 1, 2, 3 ou 4 erreurs) et détection des erreurs par code de redondance cyclique

Longueur du bloc: 90 octets

Correction-avant: 0, 10, 20, 30, 40 bits

Code de redondance cyclique: 2 octets

Les valeurs de $P(s, T)$ pour $T = 1$ sont données Fig. 6

B. Relations utilisées pour évaluer les stratégies de protection contre les erreurs

On admet que les erreurs sont statistiquement indépendantes (voie symétrique binaire sans mémoire).

Les notations utilisées sont les suivantes :

P	=	taux d'erreur dans le canal
M	=	nombre d'octets par bloc de données
R	=	nombre de blocs de données par fichier (ou par page de télétexte)
T	=	nombre de tentatives d'acquisition
P(s,T)	=	probabilité de succès (récupération correcte du fichier ou de la page de télétexte) après T tentatives.

FAMILLE (A) : BIT DE PARITE AU NIVEAU DU CARACTERE

Codage sur 7 bits avec parité : page de télétexte classique.

Stratégie (A-1)
(CONTROLE DE PARITE)

Probabilité de messages de données sans erreur, après T tentatives :

$$P(s,T) = P_n (1-P_u)$$

où :

P_n = succès du contrôle de parité sur les M octets de la page de télétexte

$$P_n = (1 - P_{oe}^T)^{MR}$$

P_{oe} = probabilité d'erreurs impaires

$$P_{oe} = 8p (1-p)^7 + 56 p^3 (1-p)^5 + 56 p^5 (1-p)^3 + 8 p^7 (1-p)$$

P_u = probabilité d'erreurs non détectées dans la page

$$P_u = 1 - (1-P_{ee})^{MR}$$

P_{ee} = probabilité d'erreurs paires

$$P_{ee} = 28 p^2 (1-p)^6 + 70 p^4 (1-p)^4 + 28 p^6 (1-p)^2 + p^8$$

FAMILLE B : CRC A 16 BITS

Codage sur 8 bits : télétexte à attributs de présentation améliorés,
télélogiciel

Stratégie (B-1)
(CRC)

$$P(s,T) = (1 - \langle 1 - (1-p)^{8M} \rangle^T)^R$$

Stratégie (B-2)
(CRC + LM + CRC)

$$P(s,T) = P(dc,T)^R$$

où :

$P(dc,T)$ = probabilité de blocs de données corrects, après T tentatives

$$P(dc,T) = P(CRC/OK) + \langle 1 - P(CRC/OK) \rangle P(ML/OK) \\ = 1 - \langle 1 - (1-p)^{8M} \rangle^T + \langle 1 - (1-p)^{8M} \rangle^T \cdot (Q_{BT})^{8M}$$

où :

Q_{BT} = probabilité de bits exempts d'erreurs après correction par logique majoritaire

$$Q_{B3} = (1-p_1)^3 + 3p_1 (1-p_1)^2$$

$$Q_{B5} = (1-p_1)^5 + 5p_1 (1-p_1)^4 + 10 (p_1)^2 (1-p_1)^3$$

où :

p_1 = taux d'erreur sur les bits sur les blocs de données à contrôle par redondance cyclique négatif

$$p_1 = p / \langle 1 - (1-p)^{8M} \rangle$$

FAMILLE C : CRC A 16 BITS + CORRECTION DES ERREURS DIRECTE

Codage sur 8 bits : télétexte à attributs de présentation améliorés,
télélogiciel.

Stratégie (C-1)
(CED + CRC)

$$P(s,T) = \langle 1 - (1-Pa)^T \rangle^R$$

où :

Pa = probabilité que les erreurs dans le paquet de données puissent être corrigées par le code (r erreurs ou moins)

$$P_a = P_0 + P_1 + \dots + P_r$$

$$P_0 = (1-p)^n$$

$$P_1 = n p (1-p)^{n-1}$$

$$P_2 = \frac{n(n-1)}{2} p^2 (1-p)^{n-2}$$

$$P_r = \frac{n!}{(n-r)! r!} p^r (1-p)^{n-r}$$

r = capacité de correction d'erreurs du code

n = nombre de bits dans le mot de code

$$\frac{\text{Stratégie (C-2)}}{(\text{CED} + \text{CRC}) + (\text{LM} + \text{CED} + \text{CRC})}$$

Probabilité de messages exempts d'erreurs, après T tentatives :

$$P(s, T) = \{ P(\text{CED} + \text{CRC}/\text{OK}) + \langle 1 - P(\text{CED} + \text{CRC}/\text{OK}) \rangle \langle P_{m0} + p_{m1} + \dots + p_{mr} \rangle \}^R$$

où :

$$P_{m0} = (1-p_m)^n$$

$$P_{m1} = n p_m (1-p_m)^{n-1}$$

$$P_{m2} = \frac{n(n-1)}{2} p_m^2 (1-p_m)^{n-2}$$

$$P_{mr} = \frac{n!}{(n-r)! r!} p_m^r (1-p_m)^{n-r}$$

avec :

$$P_m = 3 p_1^2 - 2 p_1^3 = 1 - Q_{B3}$$

$$p_1 = p / \langle 1 - P(\text{CED} + \text{CRC}/\text{OK}) \rangle = p / (1 - P_a)^T$$

$$P(\text{CED} + \text{CRC}/\text{OK}) = 1 - (1 - P_a)^T$$

$$P_a = \langle \text{voir stratégie (C-1)} \rangle$$

$$\frac{\text{Stratégie (C-3)}}{(CED + CRC) + (VB + CED + CRC)}$$

Probabilité de messages de données exempts d'erreurs, après T tentatives :

$$P(s, T) = \{P(CED + CRC/OK) + \langle 1 - P(CED + CRC/OK) \rangle (P_{b0} + P_{b1} + \dots + P_{br})\}^R$$

où :

$$P_{b0} = (1 - p_b)^n$$

$$P_{b1} = n p_b (1 - p_b)^{n-1}$$

$$P_{b2} = \frac{n(n-1)}{2} p_b^2 (1 - p_b)^{n-2}$$

$$P_{br} = \frac{n!}{(n-r)! r!} p_b^r (1 - p_b)^{n-r}$$

avec :

$$p_b = p_1^2$$

$$p_1 = p / (1 - p_a)^T$$

$$P(CED + CRC/OK) = \langle \text{voir stratégie (C-2)} \rangle$$

$$p_a = \langle \text{voir stratégie (C-1)} \rangle$$