

RECOMMANDATION UIT-R BO.1211*

Systèmes numériques d'émission multiprogramme de télévision, son et données pour satellites exploités dans la gamme de fréquences 11/12 GHz**

(Question UIT-R 3/6)

(1995)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que les techniques numériques de codage de source ont progressé au point d'offrir, à des débits binaires se prêtant à une transmission efficace, divers avantages sur le plan de la qualité de l'image et du son par rapport aux techniques analogiques conventionnelles;
- b) que les techniques de multiplexage numérique offrent une très grande souplesse de répartition dynamique du débit de données total associé à chaque composante de programme (vidéo, son et données), ce qui permet de modifier le nombre des programmes transmis par le même multiplex et d'assurer des services multimédia;
- c) que par comparaison aux techniques analogiques conventionnelles, les techniques de transmission numérique peuvent offrir une meilleure efficacité d'utilisation du spectre (des débits de données compris entre environ 25 et 50 Mbit/s, avec une protection contre les erreurs adéquate, peuvent, par exemple, être envisagés dans une assignation de la Conférence administrative mondiale des radiocommunications pour la radiodiffusion par satellite (Genève, 1977) (CAMR-77) ainsi qu'une meilleure utilisation de la puissance, tout en présentant une grande souplesse de configuration quelle que soit la largeur de bande utilisée par le satellite considéré et le niveau de puissance disponible;
- d) que les émissions numériques sont moins exigeantes que les émissions analogiques en ce qui concerne la protection contre les brouillages, ce qui permet d'améliorer l'efficacité d'utilisation du spectre;
- e) que les circuits numériques à très haut degré d'intégration permettent de réduire les coûts des équipements produits en grande série;
- f) qu'il est possible de concevoir de nouveaux systèmes de télévision numérique multiprogramme exploitables dans les canaux existants des satellites utilisant les bandes 11/12 GHz;

* La Commission d'études 6 des radiocommunications a apporté des modifications rédactionnelles à cette Recommandation en 2001 conformément aux dispositions de la Résolution UIT-R 44.

** Pour les applications du service fixe par satellite (SFS), cette Recommandation sera portée à l'attention de la Commission d'études 4 des radiocommunications.

g) que l'UIT-R a entrepris des études poussées, qui devraient déboucher sur une norme universelle concernant les points suivants:

- les besoins pour les systèmes de radiodiffusion de télévision numérique par satellite;
- le concept de radiodiffusion numérique à intégration de services (RNIS), et notamment les supports qui permettent d'assurer l'acheminement des services de données et des informations de service;
- les techniques d'embrouillage communes pour l'accès conditionnel;
- la recherche du plus grand nombre possible d'éléments communs à différents systèmes d'acheminement (satellite, systèmes d'antenne collective de réception de télévision par satellite, émetteurs de Terre et câble);
- la possibilité de mettre en oeuvre le concept de récepteur de télévision intégré universel, dans l'intérêt du grand public, en proposant dans le monde entier des récepteurs à prix abordable;
- la possibilité d'une évolution future compatible avec la télévision à haute définition (TVHD);
- l'adéquation entre les diverses propositions techniques et les besoins précités;
- les simulations sur ordinateur et les essais en laboratoire et en conditions réelles des divers systèmes proposés,

considérant par ailleurs

h) que des services numériques multiprogramme par satellite sont déjà en exploitation dans certains pays, et que des services de ce type devraient être opérationnels à partir de 1995 dans un certain nombre d'autres pays;

j) que des systèmes de télévision multiprogramme par satellite sont en cours de mise au point dans de nombreuses parties du monde; plusieurs administrations, en dehors de l'Europe, continuent d'étudier ces systèmes et envisagent de prendre une décision quant à l'adoption de normes adéquates pour soumission à l'UIT-R;

k) qu'un mémorandum d'accord sur le développement de services harmonisés de radiodiffusion vidéo numérique (DVB) en Europe a été signé par plus de 150 entités – fabricants d'équipements, radiodiffuseurs, opérateurs de réseau et administrations;

l) que le projet DVB converge sur une proposition de système commun de diffusion par satellite dans la gamme de fréquences 11/12 GHz (système DVB-S), qui constitue une norme européenne de télécommunication (ETS);

m) que le système DVB-S comporte les éléments suivants, actuellement en cours de mise au point en vue d'une intégration dans les récepteurs grand public à partir de 1995:

- codage image et audio, multiplexage de transport, système d'information de service selon projet de Norme internationale ISO/CEI 13818;
- transport des données de service, système d'embrouillage commun, interfaces communes pour les équipements externes;

n) que le système DVB-S présente le maximum d'éléments communs (y compris codage de source, multiplexage et codage de sortie Reed-Solomon) avec le système DVB-C proposé pour la distribution par câble, le système DVB-CS proposé pour la distribution par antenne collective de réception de télévision par satellite et le système DVB-T en cours de mise au point pour la radiodiffusion de Terre,

recommande

1 d'envisager d'appliquer la structure de trame, le codage des canaux et les méthodes de modulation du système DVB-S spécifiés dans l'Annexe 1 dans l'élaboration par convergence d'une norme universelle pour l'introduction de services de télévision numériques multiprogramme par satellite avec liaison descendante dans la gamme de fréquences 11/12 GHz.

NOTE 1 – En réponse à cette Recommandation, un Rapporteur spécial a été désigné pour l'élaboration par convergence d'une norme universelle applicable aux systèmes numériques d'émission multiprogramme de télévision, son et données pour satellites exploités dans la gamme de fréquences 11/12 GHz. Le Rapporteur spécial étudiera le système DVB-S ainsi que les autres systèmes numériques d'émission multiprogramme par satellite existants en vue de l'élaboration par convergence d'une norme universelle.

ANNEXE 1

Systèmes numériques d'émission multiprogramme de télévision, son et données—structure de trame, codage canal et modulation pour services par satellite dans la gamme de fréquences 11/12 GHz

(Norme ETS – ETS 300 421)

TABLE DES MATIÈRES

	<i>Page</i>
1 Champ d'application	4
2 Références normatives	5
3 Symboles et abréviations	5
3.1 Symboles	5
3.2 Abréviations	6
4 Système de transmission	7
4.1 Définition du système	7
4.2 Adaptation aux caractéristiques de répéteur du satellite	8
4.3 Interfaces	8
4.4 Codage canal	8
4.4.1 Adaptation du multiplexage d'acheminement et randomisation de dispersion d'énergie	8
4.4.2 Codage externe (Reed-Solomon), entrelacement et mise en trame.....	9
4.4.3 Codage interne (convolutif).....	11
4.5 Mise en forme de la bande de base et modulation	12
5 Caractéristiques de comportement d'erreur.....	13

Appendice 1 (Normatif) – Spectre du signal en sortie de modulateur	14
Appendice 2 (Informatif) – Description théorique du système.....	16
Appendice 3 (Informatif) – Comparaison débit binaire/largeur de bande du répéteur	18
Appendice 4 (Informatif) – Exemples d'utilisation du système	21

1 Champ d'application

Le présent projet de norme européenne de télécommunication (European Telecommunication Standard (ETS)) décrit le système de modulation et de codage canal (ci-après dénommé le «système» aux fins de la présente ETS) des services de télévision (TV)/de télévision à haute définition (TVHD) numériques multiprogramme par satellite pour applications de distribution primaire et secondaire dans les bandes utilisées par le service fixe par satellite (SFS) et le service de radiodiffusion par satellite (SRS). Le système doit permettre d'offrir des services de réception directe à domicile faisant intervenir un décodeur intégré dans le récepteur et pourra également être utilisé par les antennes collectives ou les stations de tête de télévision par câble avec, en général, remodulation (voir [1]).

Le système fait intervenir une modulation par déplacement de phase quadrivalente (MDP-4) et comporte des dispositifs de protection contre les erreurs en chaîne (code convolutif et code Reed-Solomon (RS) abrégé, en série).

Le système peut être adapté à diverses largeurs de bande de répéteur de satellite.

La compatibilité avec les services de télévision à codage MPEG-2 (Moving Pictures Experts Group-2) [2], avec structure de transmission synchronisée sur le multiplexage des paquets, est prévue. La souplesse de multiplexage permet d'appliquer la capacité de transmission à diverses configurations de service de télévision, notamment aux services multiprogramme avec son et données. Tous les éléments du service sont multiplexés par répartition dans le temps (MRT) sur une seule porteuse numérique.

Le présent projet de norme ETS est structuré comme suit:

- description générale du système pour transmission numérique par satellite de signaux de télévision;
- spécification du signal à modulation numérique pour permettre la compatibilité entre les équipements produits par divers fabricants. Description détaillée des principes de traitement du signal au niveau du modulateur, le traitement à la réception pouvant dépendre des solutions d'application. Toutefois, il est nécessaire, dans la présente Recommandation, de mentionner certains aspects de la réception;
- énumération des caractéristiques générales de fonctionnement du système, en fonction de la qualité de service demandée.

2 Références normatives

La présente norme ETS reprend, par l'intermédiaire de références datées ou non datées, certaines dispositions extraites d'autres publications. Ces références normatives sont citées dans les passages correspondants du texte, puis complétées par la liste des publications. Pour les références datées, les modifications ou révisions ultérieures des publications ne s'appliquent à la présente norme ETS que lorsqu'elles y sont incorporées par amendement ou révision. Dans le cas des références non datées, la version applicable de la publication est la plus récente.

- [1] DTVB 1110/GT V4/MOD 252/ DTVC 18, 7^e version révisée, janvier 1994: «Baseline modulation/channel coding system for digital multi-programme television by satellite» (contribution du V4/MOD-B).
- [2] Norme ISO/CEI 13818-1 [juin 1994]: «Codage des images cinématographiques et des informations audio associées».
- [3] Forney, G.D. IEEE Trans. Comm. Tech., COM-19, p. 772-781, octobre 1971: «Burst-correcting codes for the classic bursty channel».
- [4] Intelsat Earth Station Standards (IESS) N° 308, révision 6 (26 octobre 1990): «Performance characteristics for Immediate Data Rate (IDR) digital carriers».

3 Symboles et abréviations

3.1 Symboles

Les symboles suivants sont utilisés dans le présent projet de norme ETS:

α :	facteur d'amortissement
C/N :	rapport signal/bruit
d_{libre} :	distance libre de code convolutif
E_b/N_0 :	rapport de l'énergie par bit utile au double de la densité spectrale de puissance de bruit
f_N :	fréquence de Nyquist
G_1, G_2 :	générateurs de code convolutif
$g(x)$:	polynôme générateur de code RS
I :	niveau d'entrelacement (octets)
I, Q :	composantes en phase du signal à modulation de phase quadrivalente
j :	indice d'embranchement de l'entrelaceur
K :	longueur de contrainte du code convolutif
M :	niveau d'embranchement du code convolutif pour $j = 1, M = N/I$
N :	longueur de trame protégée contre les erreurs (octets)
$p(x)$:	polynôme générateur de champ RS
r_m :	ondulation dans la bande (dB)
R_s :	débit de symboles correspondant à la largeur de bande de Nyquist bilatérale du signal modulé
R_u :	débit binaire utile en sortie de multiplexeur d'acheminement MPEG-2 [2]
R'_u :	débit binaire en sortie de codeur externe RS
T :	nombre d'octets pouvant être corrigés dans un paquet à protection RS
T_s :	période symbole
X, Y :	flux di-binaire en sortie de codage convolutif au rapport 1/2

3.2 Abréviations

Les abréviations suivantes sont utilisées dans la présente norme ETS:

ATOP:	amplificateur à tube à ondes progressives
BW:	largeur de bande
CED:	correction d'erreur directe
ETS:	norme européenne de télécommunication
FI:	fréquence intermédiaire
FIFO:	premier entré, premier sorti
hex:	notation hexadécimale
HNP:	hiérarchie numérique plésiochrone
MDP:	modulation par déplacement de phase
MPEG:	Moving Pictures Experts Group
MRF:	multiplexage par répartition en fréquence
MRT:	multiplexage par répartition dans le temps
MSB:	bit de plus fort poids
MUX:	multiplex
oct:	notation octale
PRBS:	séquence binaire pseudo-aléatoire
RF:	fréquence radioélectrique
RS:	Reed-Solomon
SFS:	service fixe par satellite
SRS:	service de radiodiffusion par satellite
TEB:	taux d'erreur binaire
TV:	télévision
TVHD:	télévision à haute définition
UER:	Union européenne de radio-télévision
UIT:	Union internationale des télécommunications
UIT-T:	Secteur de la normalisation des télécommunications

4 Système de transmission

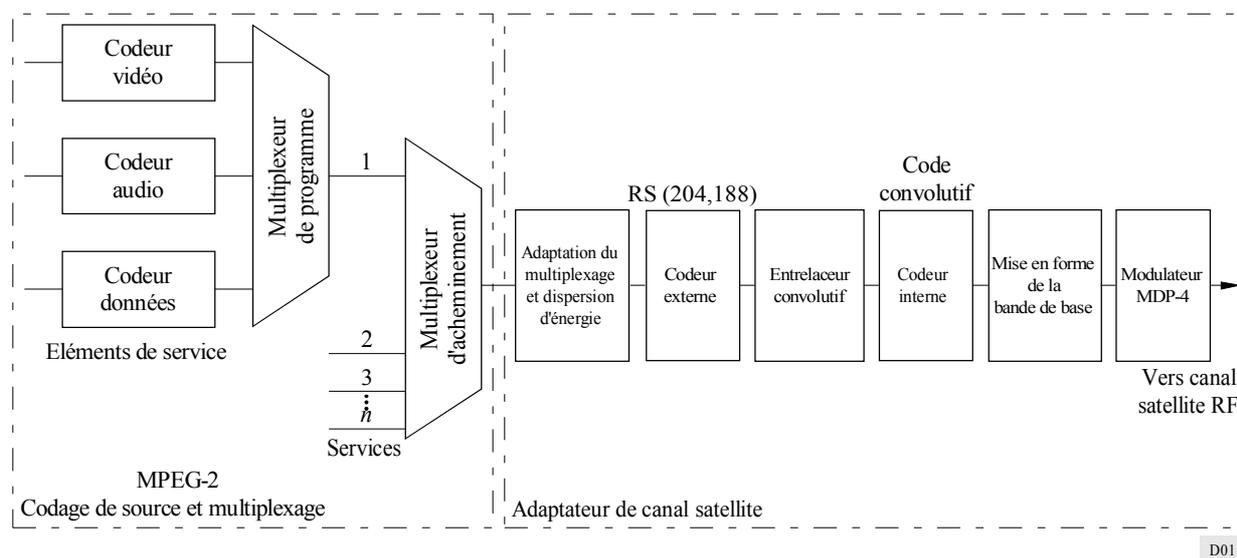
4.1 Définition du système

Le système est défini sous forme de blocs fonctionnels d'équipements assurant l'adaptation des signaux de télévision en bande de base en sortie du multiplexeur d'acheminement MPEG-2 [2], en fonction des caractéristiques du canal satellite. Le flux de données subit les opérations suivantes (voir la Fig. 1):

- adaptation du multiplexage d'acheminement et randomisation pour dispersion d'énergie,
- codage externe (par exemple, RS),
- entrelacement convolutif,
- codage interne (par exemple code convolutif discontinu),
- mise en forme de la bande de base pour modulation,
- modulation.

La description fonctionnelle du système fait l'objet de l'Appendice 2.

FIGURE 1
Diagramme fonctionnel du système



Les services pour réception directe à domicile par satellite sont particulièrement sensibles aux limitations de puissance et l'on recherchera donc avant tout une bonne résistance au bruit et aux brouillages, l'efficacité d'utilisation du spectre passant alors au second plan. Pour obtenir un excellent rendement en puissance sans pénalisation excessive au niveau de l'efficacité d'utilisation du spectre, on adoptera dans le système une modulation MDP-4 et les opérations de codage convolutif et de codage RS seront effectuées en série. Le code convolutif se prête à des configurations souples permettant d'optimiser le fonctionnement du système pour une largeur de bande de répéteur de satellite donnée (voir l'Appendice 3).

Le système est optimisé pour un multiplexage par répartition dans le temps sur une porteuse par répéteur, mais il se prête également à des applications à porteuses multiples avec multiplexage par répartition en fréquence.

Le système est directement compatible avec les signaux de télévision à codage MPEG-2 [2]. La trame de transmission modem est synchronisée sur les paquets d'acheminement sortant du multiplexeur MPEG-2.

Lorsque le signal reçu est supérieur aux seuils C/N et C/I , les techniques de CED adoptées dans le système permettent de respecter un objectif de niveau qualitatif «quasi exempt d'erreur», correspondant à moins d'une erreur non corrigée par heure de transmission, soit un TEB compris entre 1×10^{-10} et 1×10^{-11} à l'entrée du démultiplexeur MPEG-2.

4.2 Adaptation aux caractéristiques de répéteur du satellite

Les émissions de télévision numérique multiprogramme feront intervenir des satellites du SFS et du SRS, de sorte que le choix de la largeur de bande du répéteur dépendra du satellite utilisé et des débits de données requis dans le service considéré.

Le débit de symboles sera adapté aux caractéristiques du répéteur. On trouvera dans l'Appendice 3 des exemples établis à partir de simulations sur ordinateur pour une chaîne de système à satellite hypothétique (compte non tenu des effets des brouillages).

4.3 Interfaces

Le système défini dans le présent projet de norme ETS fait intervenir les interfaces suivantes (Tableau 1).

TABLEAU 1

Interfaces du système

Emplacement	Interface	Type d'interface	Connexion
Station d'émission	Entrée	Multiplexage d'acheminement MPEG-2 [2]	A partir du multiplexeur MPEG-2
	Sortie	Fréquences intermédiaires 70/140 MHz	Vers l'équipement RF
Installation de réception	Sortie	Multiplexage d'acheminement MPEG-2	Vers démultiplexeur MPEG-2
	Entrée	A déterminer	En sortie d'équipement RF (installation intérieure)

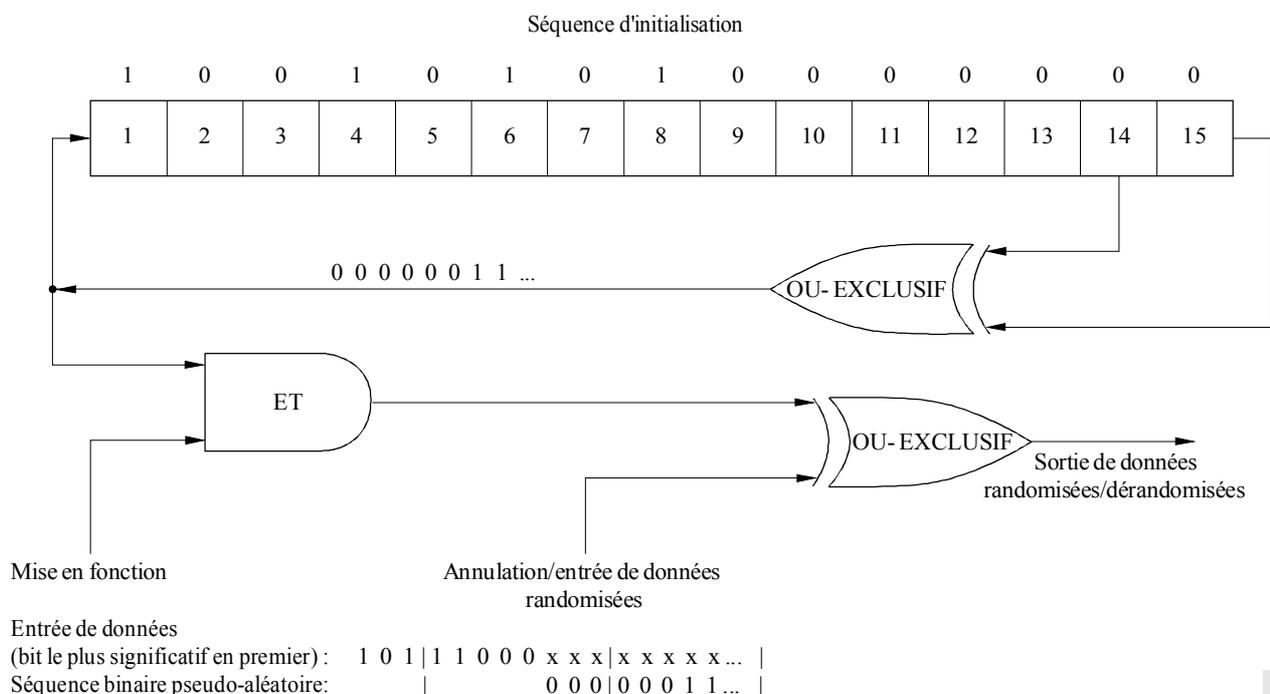
4.4 Codage canal

4.4.1 Adaptation du multiplexage d'acheminement et randomisation de dispersion d'énergie

A l'entrée du système, le flux de données est structuré en paquets de longueur fixe (voir la Fig. 3), après passage dans le multiplexeur d'acheminement MPEG-2 [2]. La longueur totale d'un paquet en sortie de multiplexage d'acheminement MPEG-2 est de 188 octets. Ce total comprend un octet de mot de synchronisation (47_{hex}). A la transmission, le traitement commence toujours par le bit le plus significatif (0) de l'octet du mot de synchronisation (01000111).

Pour respecter le Règlement des radiocommunications de l'UIT et assurer des transitions binaires adéquates, les données, à l'entrée du multiplexeur MPEG-2, doivent être randomisées conformément à la configuration illustrée à la Fig. 2.

FIGURE 2
Schéma de randomisation/dérandomisation



D02

Le polynôme générateur de séquence binaire pseudo-aléatoire est de forme:

$$1 + x^{14} + x^{15}$$

Le chargement de la séquence «100101010000000» dans les registres de mise en séquence binaire pseudo-aléatoire (Fig. 2) commence au début de chaque groupe de huit paquets d'acheminement. Le signal d'initialisation du désembrouilleur est assuré par une inversion binaire, de 47_{hex} à B8_{hex}, de l'octet de synchronisation de MPEG-2 du premier paquet d'acheminement du groupe de 8 paquets, en une opération dénommée «Adaptation de multiplexage d'acheminement».

Le premier bit en sortie du générateur de séquence binaire pseudo-aléatoire est appliqué au premier bit (c'est-à-dire au bit le plus significatif) du premier octet qui suit l'octet de synchronisation inversé MPEG-2 (soit B8_{hex}). Pour faciliter les autres fonctions de synchronisation pendant le traitement des octets de synchronisation MPEG-2 des sept paquets d'acheminement suivants, la génération pseudo-aléatoire se poursuit mais la sortie est déconnectée et ces octets ne sont donc pas randomisés. Ainsi, la période de la séquence binaire pseudo-aléatoire est de 1 503 octets.

Le processus de randomisation est également actif lorsque le flux d'entrée de modulateur n'existe pas ou ne correspond pas au format du flux d'acheminement MPEG-2 (soit 1 octet de synchronisation + 187 octets paquets). On évite ainsi d'émettre une porteuse non modulée en sortie du modulateur.

4.4.2 Codage externe (Reed-Solomon), entrelacement et mise en trame

La structure de mise en trame est fondée sur la structure de paquet d'entrée (voir la Fig. 3a)).

Un code Reed-Solomon abrégé (204,188, $T = 8$) dérivé du code initial (255,239, $T = 8$) est appliqué à chaque paquet d'acheminement randomisé (188 octets) (voir la Fig. 3b)), opération qui protège les paquets contre les erreurs (voir la Fig. 3c)). Un codage Reed-Solomon est également appliqué à l'octet de synchronisation des paquets, sous forme non inversée (47_{hex}) ou inversée (B8_{hex}).

Polynôme générateur de code: $g(x) = (x + \lambda^0) (x + \lambda^1) (x + \lambda^2) \dots (x + \lambda^{15})$, avec $\lambda = 02_{\text{hex}}$.

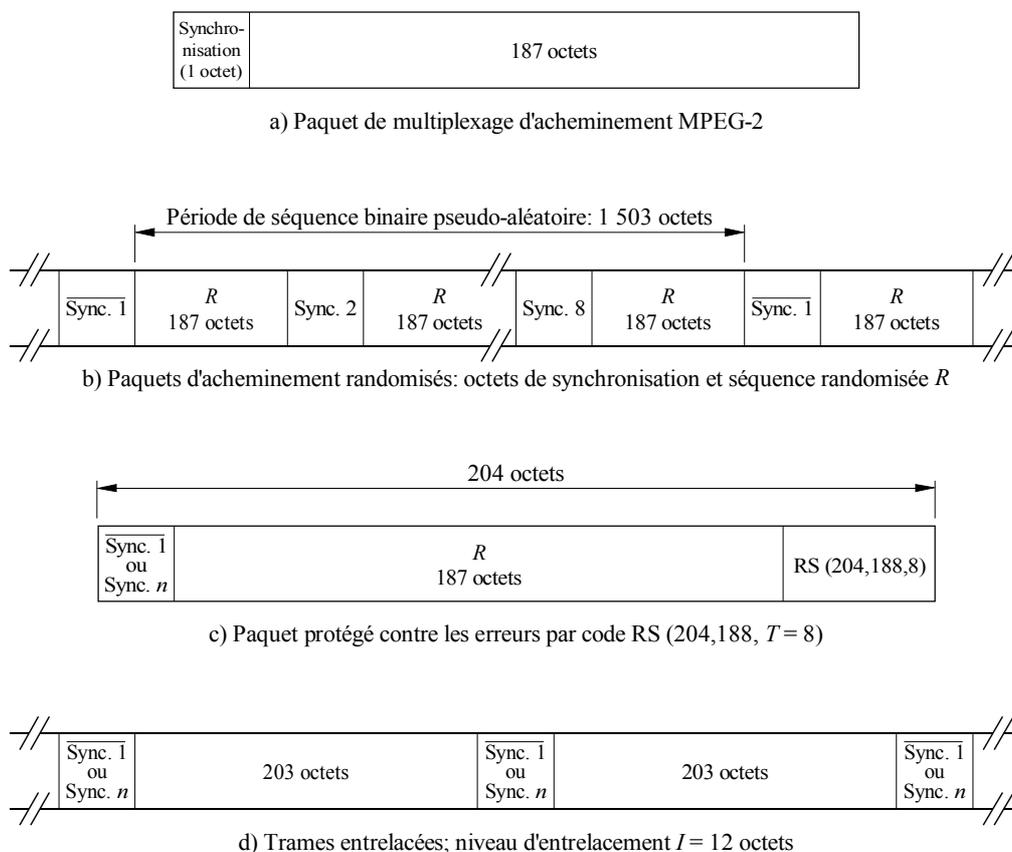
Polynôme générateur de champ: $p(x) = x^8 + x^3 + x^2 + 1$.

Le code Reed-Solomon abrégé peut être appliqué par adjonction de 51 octets, tous mis à zéro, avant les octets d'information à l'entrée d'un codeur (255,239). Après la procédure de codage RS, ces octets nuls sont éliminés.

Selon le schéma de fonctionnement théorique de la Fig. 4, un entrelacement convolutif de niveau $I = 12$ est appliqué aux paquets protégés contre les erreurs (voir la Fig. 3c)), ce qui donne une trame entrelacée (voir la Fig. 3d)).

La procédure d'entrelacement convolutif sera fondée sur l'approche de Forney (voir [3]), compatible avec l'approche Ramsey de type III, avec $I = 12$. La trame entrelacée sera composée de paquets en chevauchement, protégés contre les erreurs, et délimitée par des octets de synchronisation inversés ou non inversés MPEG-2 [2] (ce qui préserve la périodicité de 204 octets).

FIGURE 3
Structure de mise en trame



Sync. 1: octet de synchronisation sans randomisation de complément
Sync. n : octet de synchronisation non randomisé, $n = 2, 3, \dots, 8$

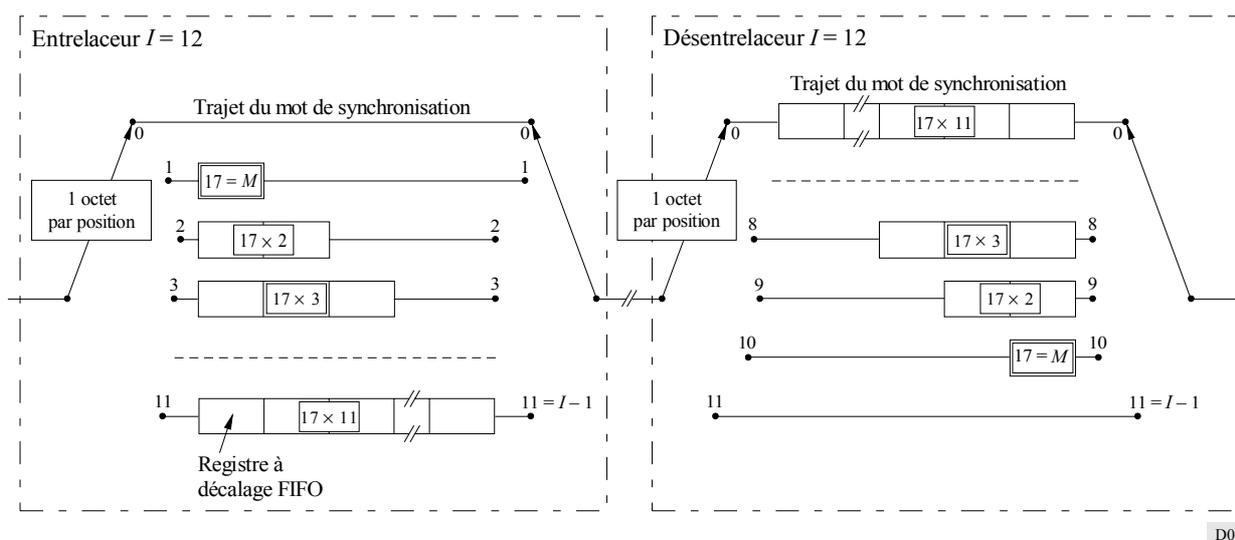
L'entrelaceur peut comporter $I = 12$ embranchements, connectés cycliquement au train d'octets d'entrée par le commutateur d'entrée. A chaque embranchement est associé un registre à décalage FIFO à cellules de niveau (M_j) (avec $M = 17 = N/I$, $N = 204 =$ longueur de trame protégée contre les erreurs, $I = 12 =$ niveau d'entrelacement, $j =$ indice d'embranchement). Les cellules du registre à décalage contiennent un octet, et les commutateurs d'entrée et de sortie sont synchronisés.

A des fins de synchronisation, les octets de synchronisation et les octets de synchronisation inversés sont toujours acheminés sur l'embranchement «0» de l'entrelaceur (ce qui correspond à un retard nul).

NOTE 1 – Le désentrelaceur est en principe similaire à l'entrelaceur, mais les indices d'embranchement sont inversés ($j = 0$ correspond au temps de propagation le plus important). La synchronisation de désentrelacement peut être assurée par acheminement du premier octet de synchronisation reconnu dans l'embranchement «0».

FIGURE 4

Diagramme théorique de l'entrelaceur et du désentrelaceur convolutifs



D04

4.4.3 Codage interne (convolutif)

Le système permettra d'adopter une gamme de codes convolutifs discontinus, sur la base d'un code convolutif à débit $1/2$ avec longueur de contrainte $K = 7$. On pourra ainsi choisir le niveau de correction d'erreur le plus approprié compte tenu du service ou du débit de données considéré. Le système offrira des débits de codage convolutif de $1/2$, $2/3$, $3/4$, $5/6$ et $7/8$.

Le code convolutif discontinu utilisé sera celui du Tableau 2 (voir également la Fig. 5).

NOTE 1 – A la réception, chaque débit de codage et configuration de discontinuité peut être essayé(e) jusqu'à l'acquisition du verrouillage. Au niveau du démodulateur, l'ambiguïté de phase π est résolue par décodage de l'octet de synchronisation MPEG-2 [2] délimitant la trame entrelacée.

TABLEAU 2

Définition du code discontinu

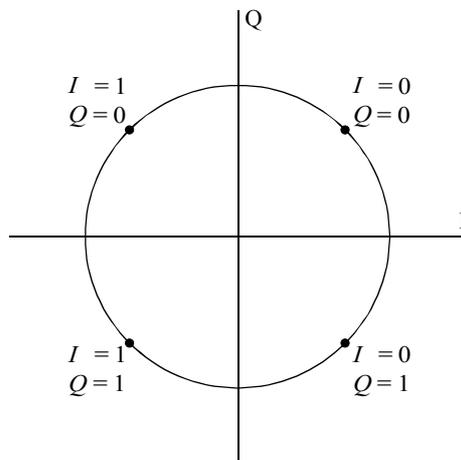
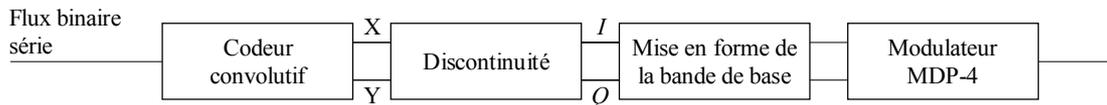
Code originel			Débits de codage									
			1/2		2/3		3/4		5/6		7/8	
<i>K</i>	<i>G</i> ₁ (<i>X</i>)	<i>G</i> ₂ (<i>Y</i>)	<i>P</i>	<i>d</i> _{libre}	<i>P</i>	<i>d</i> _{libre}	<i>P</i>	<i>d</i> _{libre}	<i>P</i>	<i>d</i> _{libre}	<i>P</i>	<i>d</i> _{libre}
7	171 _{oct}	133 _{oct}	<i>X</i> = 1 <i>Y</i> = 1	10	<i>X</i> = 10 <i>Y</i> = 11	6	<i>X</i> = 101 <i>Y</i> = 110	5	<i>X</i> = 10101 <i>Y</i> = 11010	4	<i>X</i> = 1000101 <i>Y</i> = 1111010	3
			<i>I</i> = <i>X</i> ₁ <i>Q</i> = <i>Y</i> ₁		<i>I</i> = <i>X</i> ₁ <i>Y</i> ₂ <i>Y</i> ₃ <i>Q</i> = <i>Y</i> ₁ <i>X</i> ₃ <i>Y</i> ₄		<i>I</i> = <i>X</i> ₁ <i>Y</i> ₂ <i>Q</i> = <i>Y</i> ₁ <i>X</i> ₃		<i>I</i> = <i>X</i> ₁ <i>Y</i> ₂ <i>Y</i> ₄ <i>Q</i> = <i>Y</i> ₁ <i>X</i> ₃ <i>X</i> ₅		<i>I</i> = <i>X</i> ₁ <i>Y</i> ₂ <i>Y</i> ₄ <i>Y</i> ₆ <i>Q</i> = <i>Y</i> ₁ <i>Y</i> ₃ <i>X</i> ₅ <i>X</i> ₇	

1: bit transmis
0: bit non transmis

4.5 Mise en forme de la bande de base et modulation

Le système utilisera une modulation MDP-4 à codage de Gray conventionnel avec structuration absolue (pas de codage différentiel). On utilisera dans l'espace signal une structuration des bits conforme à celle de la Fig. 5.

FIGURE 5
Constellation MDP-4



D05

Avant la modulation, les signaux *I* et *Q* (représentés mathématiquement par une suite de fonctions delta de Dirac espacées d'un temps $T_s = 1/R_s$, avec signe approprié) seront filtrés par une fonction cosinus puissance 1/2. Le facteur d'amortissement α sera de 0,35.

Le filtrage en cosinus puissance 1/2 de la bande de base aura une fonction théorique définie par l'expression suivante:

$$\begin{aligned}
 H(f) &= 1 && \text{pour } |f| < f_N(1 - \alpha) \\
 H(f) &= \left\{ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{2f_N} \left[\frac{f_N - |f|}{\alpha} \right] \right\}^{1/2} && \text{pour } f_N(1 - \alpha) \leq |f| \leq f_N(1 + \alpha) \\
 H(f) &= 0 && \text{pour } |f| > f_N(1 + \alpha)
 \end{aligned}$$

avec:

f_N : fréquence de Nyquist et

$$= \frac{1}{2T_s} = \frac{R_s}{2}$$

α : facteur d'amortissement

$$= 0,35$$

On trouvera dans l'Appendice 1 un gabarit de spectre du signal en sortie du modulateur.

5 Caractéristiques de comportement d'erreur

Le modem, connecté en boucle FI, présentera les caractéristiques TEB E_b/N_0 spécifiées dans le Tableau 3.

TABLEAU 3

Comportement de la boucle FI du système

Débit de codage interne	Rapport E_b/N_0 requis pour un TEB de 2×10^{-4} en sortie de codage de Viterbi quasi exempt d'erreur après codage Reed-Solomon
1/2	4,5
2/3	5,0
3/4	5,5
5/6	6,0
7/8	6,4

NOTE 1 – Les valeurs du rapport E_b/N_0 correspondent au débit binaire utile avant codage Reed-Solomon et tiennent compte d'une marge d'application modem de 0,8 dB ainsi que de l'augmentation de la largeur de bande de bruit due au codage externe ($10 \log 188/204 = 0,36$ dB).

NOTE 2 – L'expression «quasi exempt d'erreur» signifie moins d'une erreur non corrigée par heure, soit un TEB compris entre 1×10^{-10} et 1×10^{-11} à l'entrée du démultiplexeur MPEG-2.

Des valeurs indicatives de fonctionnement du système à satellites sont données dans l'Appendice 4.

APPENDICE 1

À L'ANNEXE 1
(Normatif)**Spectre du signal en sortie de modulateur**

La Fig. 6 illustre sous forme de gabarit le spectre du signal en sortie de modulateur.

Cette Figure représente également un masque pouvant être utilisé dans l'application matérielle du filtre de modulation de Nyquist spécifié au § 4.5. Les points A à S des Fig. 6 et 7 sont définis dans le Tableau 4. Le masque de réponse en fréquence du filtre a été établi sur l'hypothèse de signaux d'entrée répondant à une fonction delta de Dirac idéale, avec un espacement correspondant à la période symbole $T_s = 1/R_s = 1/2f_N$, tandis que, dans le cas de signaux d'entrée rectangulaires, il y a lieu d'appliquer à la réponse du filtre une correction $x/\sin x$ adéquate.

La Fig. 7 est un gabarit de temps de propagation de groupe applicable à la réalisation matérielle du filtre de modulation de Nyquist.

Les Fig. 6 et 7 sont fondées sur [4], légèrement modifiées en raison d'un amortissement différent.

FIGURE 6

Gabarit du masque de spectre du signal en sortie de modulateur

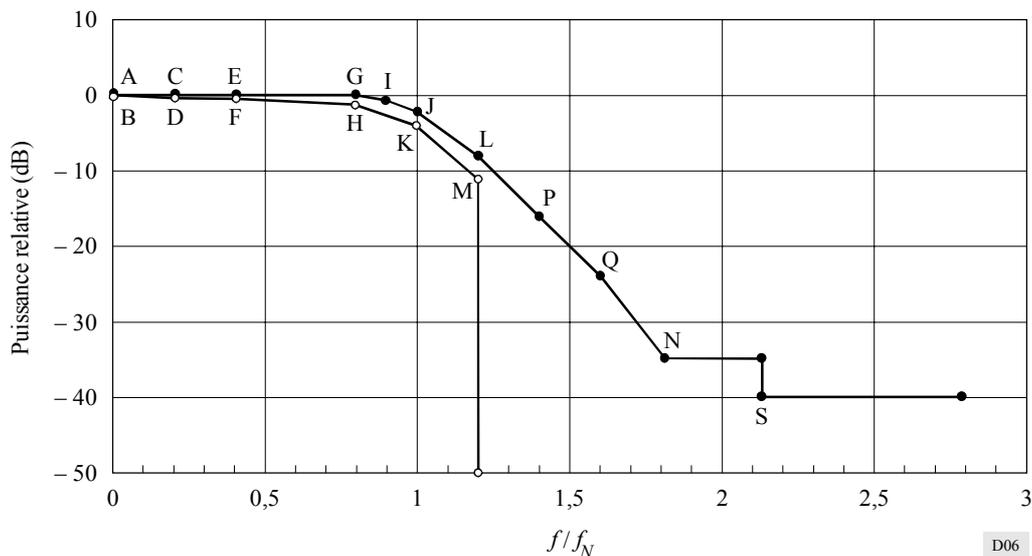


FIGURE 7

Gabarit du temps de propagation de groupe du filtre de modulateur

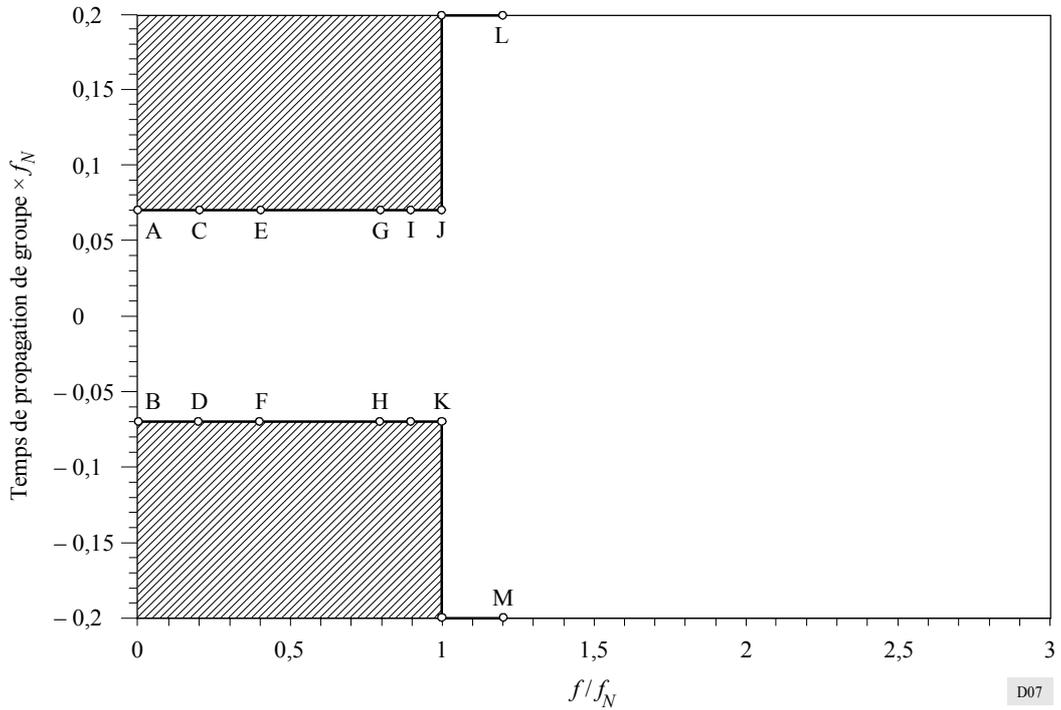


TABLEAU 4

Définition des points de la Figure 6

Point	Fréquence	Puissance relative (dB)	Temps de propagation de groupe
A	$0,0 f_N$	+0,25	$+0,07/f_N$
B	$0,0 f_N$	-0,25	$-0,07/f_N$
C	$0,2 f_N$	+0,25	$+0,07/f_N$
D	$0,2 f_N$	-0,40	$-0,07/f_N$
E	$0,4 f_N$	+0,25	$+0,07/f_N$
F	$0,4 f_N$	-0,40	$-0,07/f_N$
G	$0,8 f_N$	+0,15	$+0,07/f_N$
H	$0,8 f_N$	-1,10	$-0,07/f_N$
I	$0,9 f_N$	-0,50	$+0,07/f_N$
J	$1,0 f_N$	-2,00	$+0,07/f_N$
K	$1,0 f_N$	-4,00	$-0,07/f_N$
L	$1,2 f_N$	-8,00	-
M	$1,2 f_N$	-11,00	-
N	$1,8 f_N$	-35,00	-
P	$1,4 f_N$	-16,00	-
Q	$1,6 f_N$	-24,00	-
S	$2,12 f_N$	-40,00	-

APPENDICE 2

À L'ANNEXE 1
(Informatif)**Description théorique du système**

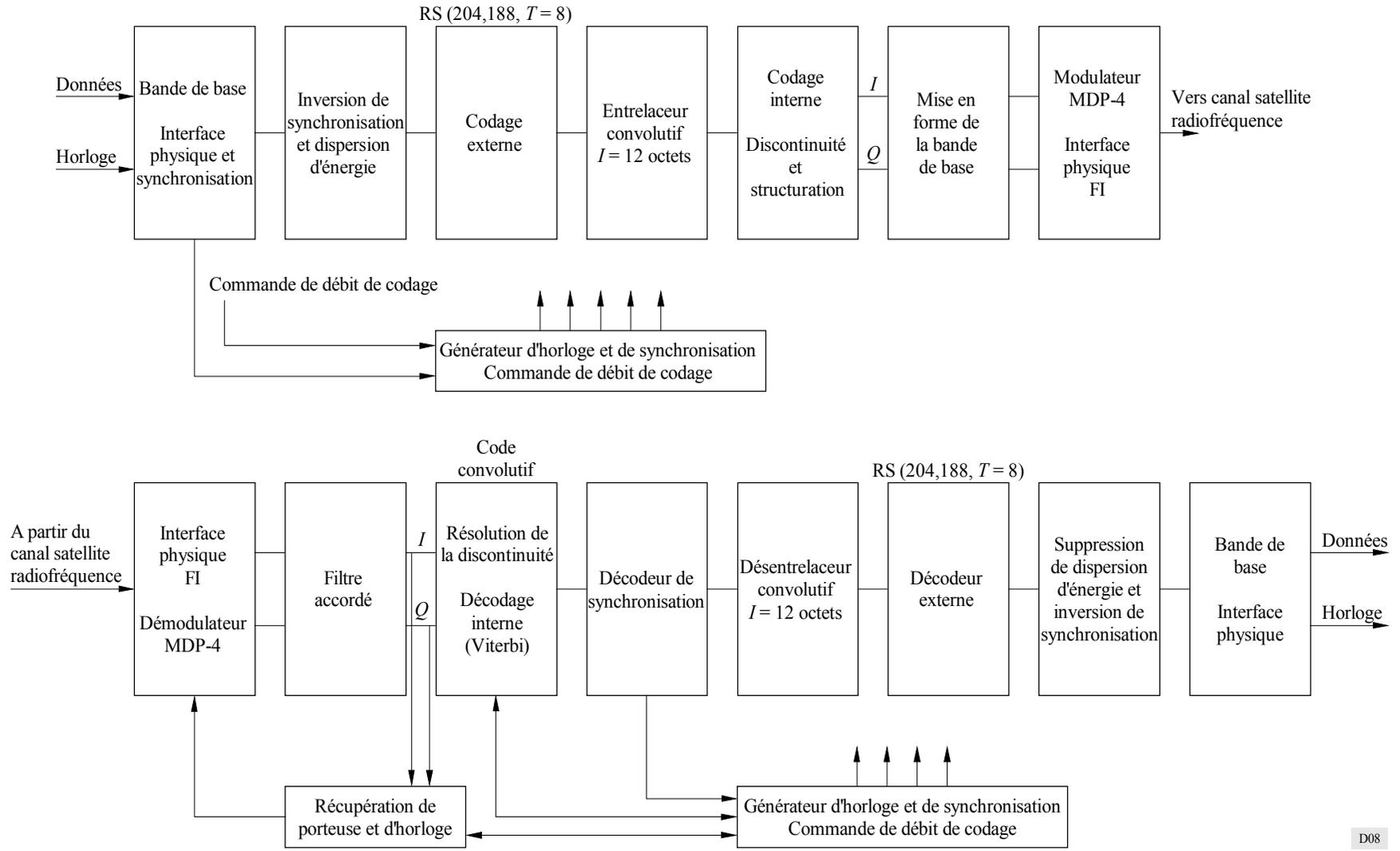
Le modulateur et le démodulateur peuvent assurer les fonctions indiquées dans les diagrammes synoptiques de la Fig. 8.

Le diagramme synoptique du modulateur et celui du démodulateur étant similaires, seul le second est décrit ci-après:

- *Interface FI et démodulateur MDP-4*: cette unité assure la démodulation cohérente en quadrature et la conversion analogique/numérique, fournissant des informations de «décision progressive» sur les signaux I et Q au décodeur interne.
- *Filtre accordé*: cette unité assure le filtrage complémentaire de mise en forme impulsionnelle de type cosinus 1/2 en fonction de l'amortissement. L'utilisation d'un filtre numérique à réponse impulsionnelle finie permettrait d'égaliser les distorsions linéaires sur le canal.
- *Récupération porteuse/horloge*: cette unité rétablit la synchronisation de démodulation. La probabilité de dérive dans toute la gamme des valeurs du rapport C/N au niveau du démodulateur doit être très faible.
- *Décodeur interne*: cette unité assure le décodage de protection contre les erreurs de premier niveau. Il doit fonctionner à un TEB «décision nette» équivalent d'entrée compris entre 1×10^{-1} et 1×10^{-2} (selon le débit de codage adopté) et donner un TEB de sortie ne dépassant pas environ 2×10^{-4} . Ce TEB de sortie correspond à la qualité de service demandée après correction de codage externe. Il est possible que cette unité utilise des informations de «décision progressive». Cette unité peut essayer chacune des valeurs de débit de codage et des configurations de discontinuité jusqu'à l'acquisition du verrouillage. Par ailleurs, elle peut résoudre l'ambiguïté de phase de démodulation $\pi/2$.
- *Décodeur d'octet de synchronisation*: cette unité décode les octets de synchronisation MPEG-2 [2] et fournit ainsi des informations de synchronisation pour le désentrelacement. Elle peut également récupérer l'ambiguïté π du démodulateur MDP-4 (que ne peut détecter le décodeur de Viterbi).
- *Désentrelaceur convolutif*: cette unité permet de randomiser par octet les salves d'erreurs en sortie de décodeur interne afin d'améliorer la capacité de correction d'erreurs en salves du décodeur externe.
- *Décodeur externe*: cette unité assure un deuxième niveau de protection contre les erreurs. Elle peut donner une sortie quasi exempte d'erreur (soit un TEB d'environ 1×10^{-10} à 1×10^{-11}) en présence d'erreurs en salves d'entrée correspondant à un TEB d'environ 7×10^{-4} , ou meilleur, avec entrelacement d'octets infini. Dans le cas d'un niveau d'entrelacement $I = 12$, on suppose que le TEB correspondant à une sortie quasi exempte d'erreur est égal à 2×10^{-4} .

FIGURE 8

Diagramme synoptique théorique du système à l'émission et à la réception



D08

- *Suppression de dispersion d'énergie*: cette unité récupère les données d'utilisateur en extrayant la séquence de randomisation utilisée à des fins de dispersion d'énergie et remet l'octet de synchronisation inversé à sa valeur de synchronisation MPEG-2 normale.
- *Interface physique de bande de base*: cette unité adapte la structure des données au format et protocole requis par l'interface externe.

NOTE 1 – Le système MPEG-2 [2] permet de positionner le bit de marquage d'erreur dans l'en-tête de paquet lorsque la capacité de correction du codage externe est dépassée.

APPENDICE 3

À L'ANNEXE 1 (Informatif)

Comparaison débit binaire/largeur de bande du répéteur

Le débit de symboles de transmission R_s peut être adapté aux caractéristiques du répéteur en fonction de la capacité de transmission maximale compatible avec la dégradation de signal acceptable (due aux limitations de largeur de bande du répéteur). Le Tableau 5 donne des exemples de capacités de débits binaires utiles R_u envisageables sur un répéteur de satellite pour un rapport largeur de bande $BW/R_s = 1,28$.

TABLEAU 5

Exemples de débits binaires en fonction de la largeur de bande du répéteur

BW (à -3 dB) (MHz)	BW' (à -1 dB) (MHz)	R_s (pour $BW/R_s = 1,28$) (MBd)	R_u (MDP-4 + convolutif 1/2) (Mbit/s)	R_u (MDP-4 + convolutif 2/3) (Mbit/s)	R_u (MDP-4 + convolutif 3/4) (Mbit/s)	R_u (MDP-4 + convolutif 5/6) (Mbit/s)	R_u (MDP-4 + convolutif 7/8) (Mbit/s)
54	48,6	42,2	38,9	51,8	58,3	64,8	68,0
46	41,4	35,9	33,1	44,2	49,7	55,2	58,0
40	36,0	31,2	28,8	38,4	43,2	48,0	50,4
36	32,4	28,1	25,9	34,6	38,9	43,2	45,4
33	29,7	25,8	23,8	31,7	35,6	39,6	41,6
30	27,0	23,4	21,6	28,8	32,4	36,0	37,8
27	24,3	21,1	19,4	25,9	29,2	32,4	34,0
26	23,4	20,3	18,7	25,0	28,1	31,2	32,8

NOTE 1 – R_u correspond au débit binaire utile après multiplexage MPEG-2. R_s (débit de symboles) correspond à la largeur de bande à -3 dB du signal modulé.

NOTE 2 – Les chiffres du Tableau 5 correspondent à une dégradation du rapport E_b/N_0 de 1,0 dB (par rapport au canal avec bruit blanc gaussien additif) dans le cas d'un amortissement de 0,35 et d'un débit de codage de 2/3, effets du multiplexage d'entrée et de sortie et de l'ATOP compris.

D'autres valeurs de BW/R_s peuvent être adoptées pour différentes caractéristiques de service, en fonction du compromis entre la capacité de transmission et la dégradation du rapport E_b/N_0 .

Les Fig. 9 et 10 indiquent les caractéristiques de filtrage du multiplexeur d'entrée et du multiplexeur de sortie adoptées dans les simulations sur ordinateur avec une largeur de bande totale de 33 MHz (à -3 dB).

FIGURE 9
Caractéristiques d'un filtre fictif de multiplexage d'entrée

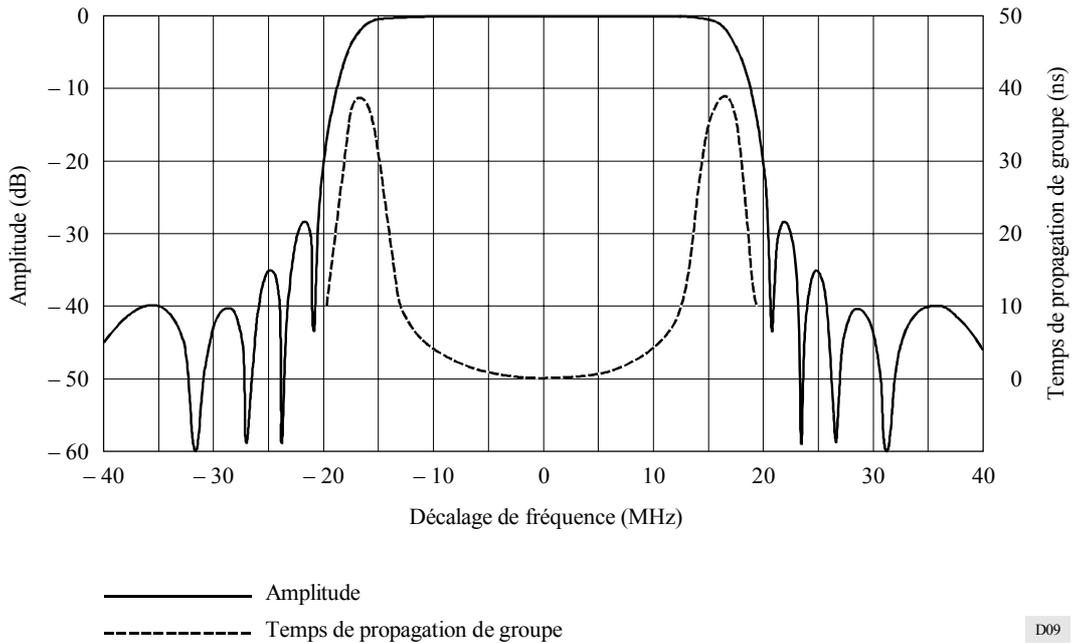
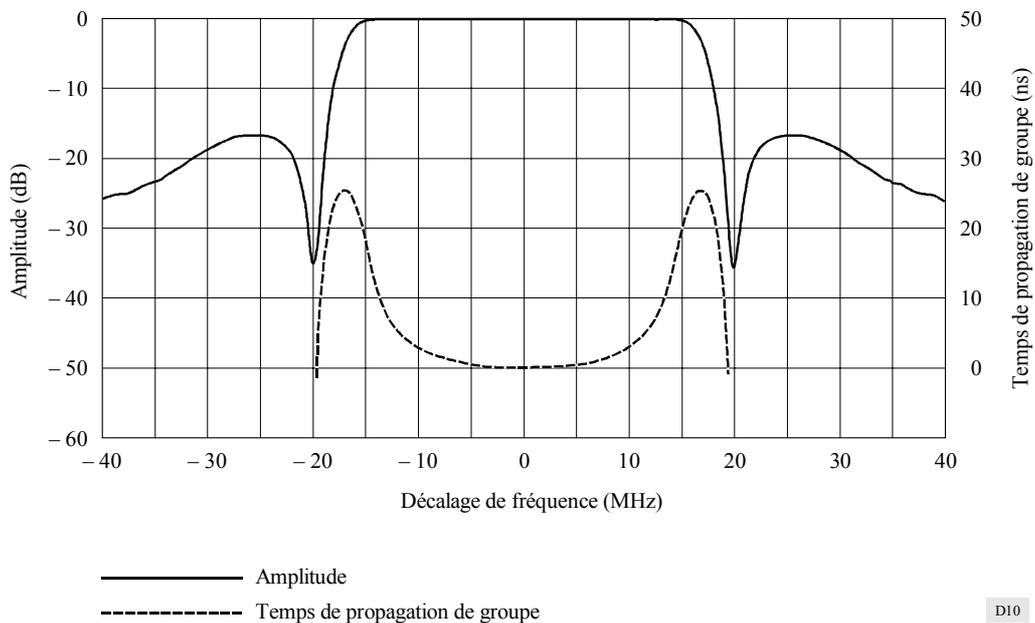


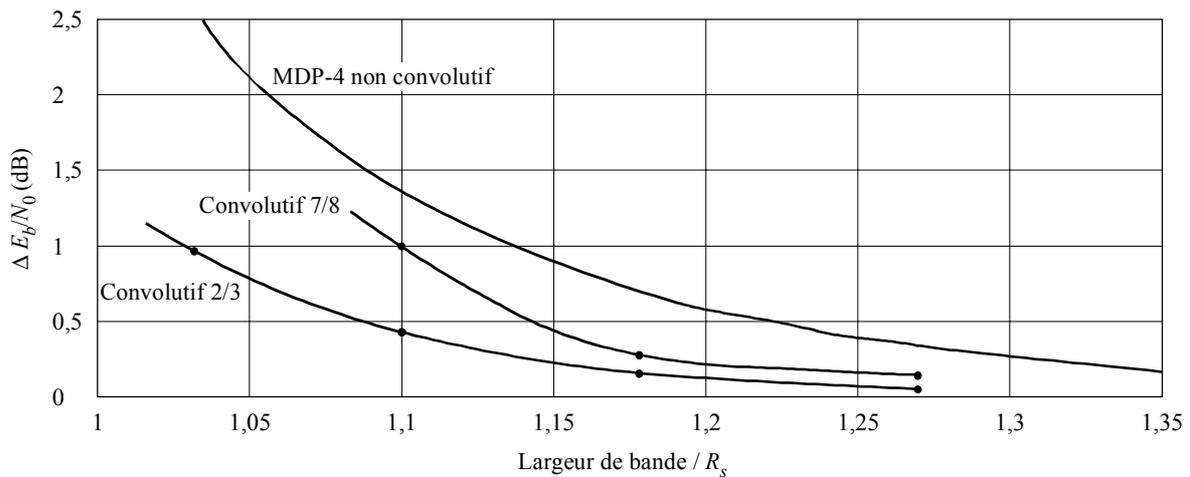
FIGURE 10
Caractéristiques d'un filtre fictif de multiplexage de sortie



La Fig. 11 donne un exemple de dégradation du rapport E_b/N_0 sur une simulation de répéteur de satellite (ATOP, recul de sortie = 0 dB) due à la limitation de largeur de bande des multiplexeurs d'entrée et de sortie (voir les Fig. 9 et 10) pour un rapport BW/R_s compris entre 1 et 1,35. La dégradation de référence à 0 dB correspond au cas d'un répéteur de satellite sans limitation de largeur de bande ($BW = \infty$, recul de sortie 0 dB). Les résultats sont obtenus par simulation sur ordinateur, avec des débits de codage interne de 2/3 et 7/8, pour un TEB de 2×10^{-4} . D'autres résultats seraient obtenus avec des caractéristiques de filtre de répéteur différentes. Si l'on utilise les résultats de la Fig. 11, il y a lieu de prévoir des marges adéquates pour tenir compte des effets thermiques et de l'instabilité des caractéristiques du répéteur due au vieillissement.

FIGURE 11

Exemple de dégradation à la limitation de la largeur de bande du récepteur



Recul / ATOP = 0,0 dB

TEB = 2×10^{-4}

D11

APPENDICE 4

À L'ANNEXE 1
(Informatif)**Exemples d'utilisation du système**

Le Tableau 6 illustre diverses utilisations possibles du système pour une largeur de bande de répéteur nominale de 33 MHz (à -3 dB). Les différents débits de codage interne sont également indiqués, avec les débits binaires correspondants.

TABLEAU 6

Exemple de caractéristiques du système avec un répéteur 33 MHz

Débit binaire R_u (après multiplexage) (Mbit/s)	Débit binaire R'_u (après codage Reed-Solomon) (Mbit/s)	Débit de symboles (MBd)	Débit de codage interne convolutif	Débit de codage externe Reed-Solomon	C/N (33 MHz) (dB)
23,754	25,776	25,776	1/2	188/204	4,1
31,672	34,368	25,776	2/3	188/204	5,8
35,631	38,664	25,776	3/4	188/204	6,8
39,590	42,960	25,776	5/6	188/204	7,8
41,570	45,108	25,776	7/8	188/204	8,4

NOTE 1 – Les chiffres du Tableau 6 correspondent à des simulations sur ordinateur effectuées avec une chaîne à satellite fictive comprenant multiplexage d'entrée, ATOP et multiplexage de sortie (voir les Fig. 9 et 10), avec un amortissement de modulation de 0,35. Les valeurs de C/N reposent sur l'hypothèse d'un décodage de Viterbi à décision progressive au niveau du récepteur. Le rapport BW/R_s est de 1,28 dans ce cas.

NOTE 2 – Les valeurs de C/N tiennent compte d'une dégradation calculée de 0,2 dB due aux limitations de largeur de bande au niveau des filtres de multiplexage d'entrée et de sortie, d'une distorsion non linéaire de 0,8 dB au niveau de l'ATOP à saturation et d'une dégradation de 0,8 dB au niveau du modem. Les chiffres correspondent à un TEB de 2×10^{-4} avant codage de Reed-Solomon (204,188), ce qui donne un fonctionnement «quasi exempt d'erreur» en sortie de codeur RS. La dégradation due aux brouillages n'est pas prise en compte.

La Fig. 12 montre que l'exemple illustré dans le Tableau 6 avec un codage interne 2/3 conviendrait pour un raccordement à un réseau de Terre à HNP à 34,368 Mbit/s, le même système de protection contre les erreurs Reed-Solomon étant utilisé dans la section à satellite.

FIGURE 12
 Exemple de connexion du système avec un réseau de Terre
 à hiérarchie numérique plésiochrone

