



UNION INTERNATIONALE DES TÉLÉCOMMUNICATIONS

UIT-T

SECTEUR DE LA NORMALISATION
DES TÉLÉCOMMUNICATIONS
DE L'UIT

G.975

(10/2000)

SÉRIE G: SYSTÈMES ET SUPPORTS DE
TRANSMISSION, SYSTÈMES ET RÉSEAUX
NUMÉRIQUES

Sections numériques et systèmes de lignes numériques –
Systèmes sous-marins à câbles optiques

**Correction directe d'erreur pour les systèmes
sous-marins**

Recommandation UIT-T G.975

(Antérieurement Recommandation du CCITT)

RECOMMANDATIONS UIT-T DE LA SÉRIE G
SYSTÈMES ET SUPPORTS DE TRANSMISSION, SYSTÈMES ET RÉSEAUX NUMÉRIQUES

CONNEXIONS ET CIRCUITS TÉLÉPHONIQUES INTERNATIONAUX	G.100–G.199
CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES COMMUNES À TOUS LES SYSTÈMES ANALOGIQUES À COURANTS PORTEURS	G.200–G.299
CARACTÉRISTIQUES INDIVIDUELLES DES SYSTÈMES TÉLÉPHONIQUES INTERNATIONAUX À COURANTS PORTEURS SUR LIGNES MÉTALLIQUES	G.300–G.399
CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DES SYSTÈMES TÉLÉPHONIQUES INTERNATIONAUX HERTZIENS OU À SATELLITES ET INTERCONNEXION AVEC LES SYSTÈMES SUR LIGNES MÉTALLIQUES	G.400–G.449
COORDINATION DE LA RADIOTÉLÉPHONIE ET DE LA TÉLÉPHONIE SUR LIGNES EQUIPEMENTS DE TEST	G.450–G.499 G.500–G.599
CARACTÉRISTIQUES DES SUPPORTS DE TRANSMISSION EQUIPEMENTS TERMINAUX NUMÉRIQUES	G.600–G.699 G.700–G.799
RÉSEAUX NUMÉRIQUES	G.800–G.899
SECTIONS NUMÉRIQUES ET SYSTÈMES DE LIGNES NUMÉRIQUES	G.900–G.999
Généralités	G.900–G.909
Paramètres pour les systèmes à câbles optiques	G.910–G.919
Sections numériques à débits hiérarchisés multiples de 2048 kbit/s	G.920–G.929
Systèmes numériques de transmission par ligne à débits non hiérarchisés	G.930–G.939
Systèmes de transmission numérique par ligne à supports MRF	G.940–G.949
Systèmes numériques de transmission par ligne	G.950–G.959
Section numérique et systèmes de transmission numériques pour l'accès usager du RNIS	G.960–G.969
Systèmes sous-marins à câbles optiques	G.970–G.979
Systèmes de transmission par ligne optique pour les réseaux locaux et les réseaux d'accès	G.980–G.989
Réseaux d'accès	G.990–G.999

Pour plus de détails, voir la Liste des Recommandations de l'UIT-T.

Correction directe d'erreur pour les systèmes sous-marins

Résumé

La présente Recommandation traite essentiellement de l'implémentation d'une fonction de correction directe d'erreur (FEC, *forward error correction*) dans les systèmes sur câble sous-marin à fibres optiques à plusieurs gigabits par seconde. Les applications visées dans la présente Recommandation sont des systèmes à répéteurs amplifiés optiquement et des systèmes optiques sans répéteurs (décrits dans l'UIT-T G.973 [3]). L'utilisation de cette fonction FEC dans l'équipement de transmission terminal sous-marin n'est pas obligatoire.

Source

La Recommandation UIT-T G.975, révisée par la Commission d'études 15 de l'UIT-T (1997-2000), a été approuvée par l'Assemblée mondiale de normalisation des télécommunications (Montréal, 27 septembre – 6 octobre 2000).

AVANT-PROPOS

L'UIT (Union internationale des télécommunications) est une institution spécialisée des Nations Unies dans le domaine des télécommunications. L'UIT-T (Secteur de la normalisation des télécommunications) est un organe permanent de l'UIT. Il est chargé de l'étude des questions techniques, d'exploitation et de tarification, et émet à ce sujet des Recommandations en vue de la normalisation des télécommunications à l'échelle mondiale.

L'Assemblée mondiale de normalisation des télécommunications (AMNT), qui se réunit tous les quatre ans, détermine les thèmes d'étude à traiter par les Commissions d'études de l'UIT-T, lesquelles élaborent en retour des Recommandations sur ces thèmes.

L'approbation des Recommandations par les Membres de l'UIT-T s'effectue selon la procédure définie dans la Résolution 1 de l'AMNT.

Dans certains secteurs des technologies de l'information qui correspondent à la sphère de compétence de l'UIT-T, les normes nécessaires se préparent en collaboration avec l'ISO et la CEI.

NOTE

Dans la présente Recommandation, l'expression "Administration" est utilisée pour désigner de façon abrégée aussi bien une administration de télécommunications qu'une exploitation reconnue.

DROITS DE PROPRIÉTÉ INTELLECTUELLE

L'UIT attire l'attention sur la possibilité que l'application ou la mise en œuvre de la présente Recommandation puisse donner lieu à l'utilisation d'un droit de propriété intellectuelle. L'UIT ne prend pas position en ce qui concerne l'existence, la validité ou l'applicabilité des droits de propriété intellectuelle, qu'ils soient revendiqués par un Membre de l'UIT ou par une tierce partie étrangère à la procédure d'élaboration des Recommandations.

A la date d'approbation de la présente Recommandation, l'UIT avait été avisée de l'existence d'une propriété intellectuelle protégée par des brevets à acquérir pour mettre en œuvre la présente Recommandation. Toutefois, comme il ne s'agit peut-être pas de renseignements les plus récents, il est vivement recommandé aux responsables de la mise en œuvre de consulter la base de données des brevets du TSB.

© UIT 2001

Droits de reproduction réservés. Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'UIT.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
1	Domaine d'application 1
2	Références normatives 1
3	Termes et définitions 1
4	Abréviations 2
5	Caractéristiques de la fonction FEC 2
5.1	Principes généraux de la fonction FEC 2
5.2	Capacité de contrôle des erreurs 3
5.3	Intérêt de la fonction FEC pour les systèmes sous-marins 4
5.4	Canaux entre terminaux 4
6	Définition de la fonction FEC 4
6.1	Définitions 4
6.2	Algorithme de correction directe d'erreur 4
6.3	Propriétés du code RS(255,239) 5
6.4	Structure de trame FEC 5
6.4.1	Architectures du codeur et du décodeur FEC 5
6.4.2	Structure de verrouillage de trames 8
6.4.3	Embrouillage 8
6.4.4	Taux de redondance 8
7	Efficacité de la fonction FEC 9
7.1	Efficacité théorique de la fonction FEC 9
7.2	Gain de codage 10
	Appendice I – Structure (facultative) de trame FEC 11
I.1	Architecture de codeur FEC et de décodeur FEC 11
I.2	Structure de verrouillage de trames 14
I.3	Embrouillage 14
I.4	Taux de redondance 15

Recommandation UIT-T G.975

Correction directe d'erreur pour les systèmes sous-marins

1 Domaine d'application

La présente Recommandation traite essentiellement de l'implémentation d'une fonction de correction directe d'erreur (FEC) dans les systèmes sur câble sous-marin à fibres optiques à plusieurs gigabits par seconde. Les applications visées dans la présente Recommandation sont des systèmes à répéteurs amplifiés optiquement et des systèmes optiques sans répéteurs (décrits dans l'UIT-T G.973 [3]). L'utilisation de cette fonction FEC dans l'équipement de transmission terminal sous-marin ne doit pas être considérée comme obligatoire.

La présente Recommandation n'a pas pour objet de chercher à obtenir la compatibilité transversale du système. Par conséquent, la sélection des structures de trames FEC qui y sont décrites est un sujet d'ingénierie en commun.

Les débits de transmission examinés dans la présente Recommandation sont 2,5 Gbit/s STM-16 (UIT-T G.707 [1]) et des multiples entiers de 2,5 Gbit/s (affluents STM-16 entrelacés).

Le paragraphe 5 présente les principales caractéristiques de la fonction FEC implémentée dans les systèmes sous-marins, notamment le contrôle des erreurs.

Le paragraphe 6 fournit la définition de l'algorithme de correction directe d'erreur à utiliser qui est un code de Reed-Solomon (RS) et donne des indications pour l'implémentation de cet algorithme dans les équipements de transmission terminaux sous-marins (TTE, *terminal transmission equipment*).

Le paragraphe 7 est consacré à la mesure de l'efficacité de ce code de Reed-Solomon et du gain escompté en ce qui concerne le bilan de puissance de transmission optique.

2 Références normatives

La présente Recommandation se réfère à certaines dispositions des Recommandations UIT-T et textes suivants qui, de ce fait, en sont partie intégrante. Les versions indiquées étaient en vigueur au moment de la publication de la présente Recommandation. Toute Recommandation ou tout texte étant sujet à révision, les utilisateurs de la présente Recommandation sont invités à se reporter, si possible, aux versions les plus récentes des références normatives suivantes. La liste des Recommandations de l'UIT-T en vigueur est régulièrement publiée.

- [1] UIT-T G.707 (1996), *Interface de nœud de réseau pour la hiérarchie numérique synchrone*.
- [2] UIT-T G.972 (1997), *Définition des termes relatifs aux systèmes de transmission par câbles sous-marins à fibres optiques*.
- [3] UIT-T G.973 (1996), *Caractéristiques des systèmes en câbles sous-marins à fibres optiques sans répéteurs*.

3 Termes et définitions

La présente Recommandation utilise les termes suivants définis dans d'autres Recommandations:

- hiérarchie numérique synchrone (SDH, *synchronous digital hierarchy*): se reporter à l'UIT-T G.707 [1].
- module de transport synchrone (STM, *synchronous transport module*): se reporter à l'UIT-T G.707 [1];

- système sur câble sous-marin à fibres optiques: se reporter à l'UIT-T G.972 [2];
- équipement terminal de transmission (TTE, *terminal transmission equipment*): se reporter à l'UIT-T G.972 [2];
- bilan de puissance optique: se reporter à l'UIT-T G.972 [2];
- canal de service: se reporter à l'UIT-T G.972 [2];
- canal de liaison entre opérateurs: se reporter à l'UIT-T G.972 [2];
- taux d'erreur en ligne: se reporter à l'UIT-T G.972 [2];
- correction directe d'erreur (FEC): se reporter à l'UIT-T G.972 [2];
- trame FEC: se reporter à l'UIT-T G.972 [2];
- codeur FEC: se reporter à l'UIT-T G.972 [2];
- décodeur FEC: se reporter à l'UIT-T G.972 [2].

4 Abréviations

La présente Recommandation utilise les abréviations suivantes:

BER	taux d'erreur sur les bits (<i>bit error ratio</i>)
EDFA	amplificateur de fibre dopée à l'erbium (<i>erbium-doped fibre amplifier</i>)
FEC	correction directe d'erreur (<i>forward error correction</i>)
GF	champ de Gallois (<i>Galois field</i>)
RS	Reed-Solomon

5 Caractéristiques de la fonction FEC

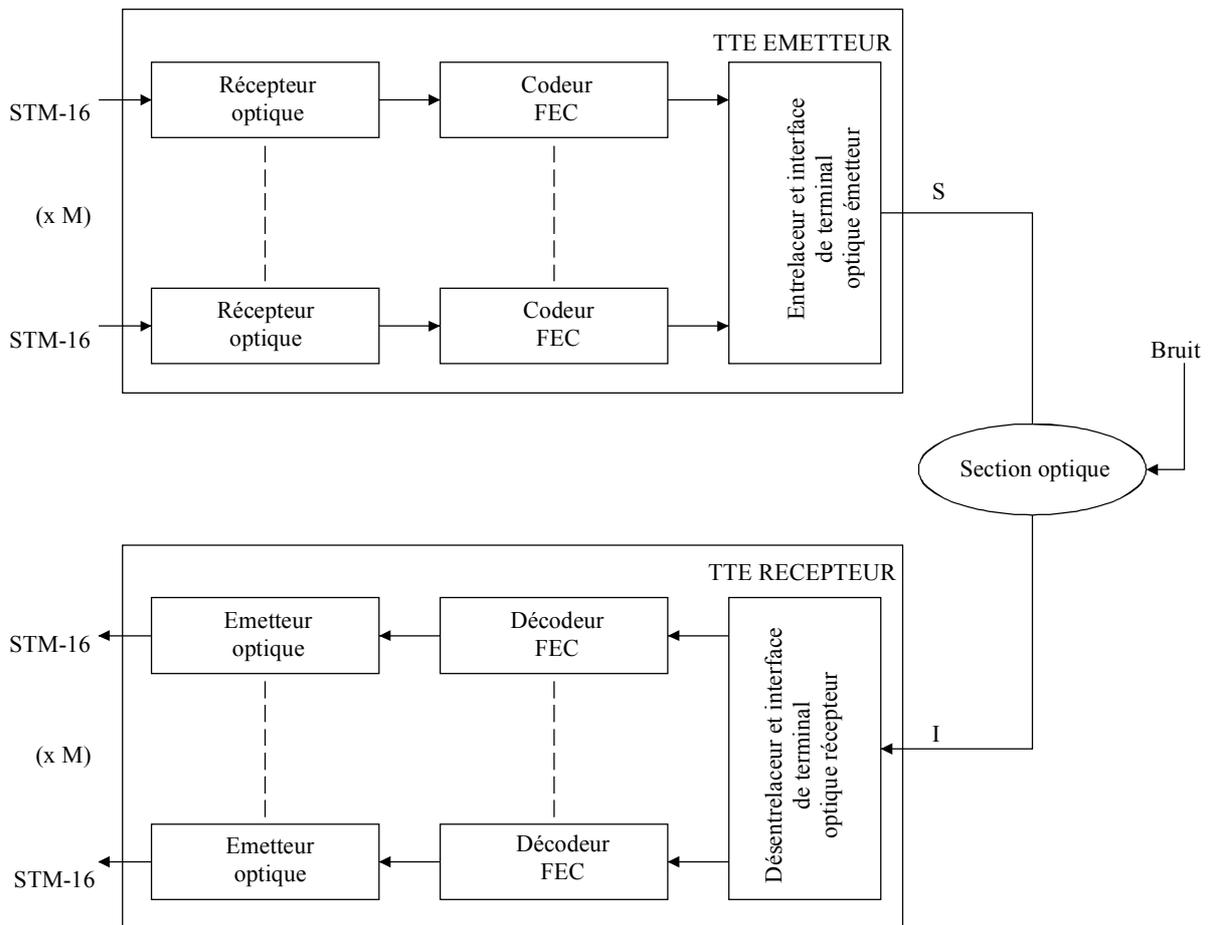
5.1 Principes généraux de la fonction FEC

La fonction FEC définie dans la présente Recommandation est fondée sur le STM-16. Lorsqu'on entrelace M (nombre entier différent de 0) signaux STM-16 pour obtenir M débits de transmission à 2,5 Gbit/s, le codage est effectué avant l'entrelacement des M affluents STM-16 et le décodage est effectué après le désentrelacement du signal de ligne optique.

La fonction FEC comprend essentiellement:

- un codeur FEC dans l'équipement terminal de transmission (TTE) émetteur qui accepte les bits d'information et ajoute des symboles redondants calculés, produisant ainsi des données codées à un débit supérieur;
- un décodeur FEC dans l'équipement terminal de transmission (TTE) récepteur qui effectue la correction d'erreur tout en extrayant la redondance pour régénérer les données qui ont été codées par le codeur FEC.

La Figure 1 met en lumière le fait que les procédures de codage et de décodage ne sont appliquées qu'au niveau de l'équipement terminal de transmission (TTE), sur les signaux électriques, et profitent à l'ensemble du système sous-marin à fibres optiques qui comprend la fibre optique et éventuellement des modules optiques tels que des amplificateurs optiques utilisant la technologie EDFA.



T1520650-96

Figure 1/G.975 – Schéma d'un système sous-marin utilisant une fonction FEC

5.2 Capacité de contrôle des erreurs

L'implémentation d'une fonction FEC permet le contrôle en ligne du taux d'erreur en ligne avant la correction ($BER_{\text{entrée}}$) du fait qu'on connaît le nombre exact de bits corrigés (BER_C). Les erreurs non corrigées après la correction directe d'erreur (BER_{sortie}) (ces erreurs subsistent lorsque le nombre d'erreurs en ligne dépasse la capacité de correction du décodeur) peuvent être considérées comme négligeables dans le calcul de $BER_{\text{entrée}}$ ($BER_{\text{entrée}} = BER_C + BER_{\text{sortie}} \approx BER_C$), pour de faibles taux d'erreur.

Dans des conditions susceptibles de rendre inexact l'énoncé précédent ($BER_{\text{entrée}} > 10^{-3}$), le système entrerait dans un état de perte permanente de verrouillage de trames FEC (voir 5.4 pour la définition de la trame FEC). En fait, le taux d'erreur de 10^{-3} représente la limite au-delà de laquelle la fonction FEC devient inefficace.

Le code de correction directe d'erreur indique l'évolution des erreurs en ligne (les valeurs mesurables de $BER_{\text{entrée}}$ sont comprises entre 10^{-3} et 10^{-15}) et protège le système contre ces erreurs en les corrigeant. En conséquence, la fonction FEC peut fournir dynamiquement une évaluation des marges du système par rapport au niveau de performance requis. Si une maintenance de la ligne se révèle nécessaire, elle peut alors être envisagée avant toute dégradation effective de la transmission.

5.3 Intérêt de la fonction FEC pour les systèmes sous-marins

L'implémentation d'une fonction de correction directe d'erreur (FEC) dans les systèmes sur câble sous-marin à fibres optiques assure des gains importants dans le bilan de puissance optique global de la liaison et abaisse en même temps le seuil du BER en ligne du système (voir 7.2).

On peut alors utiliser le gain résultant de bilan de puissance optique obtenu avec la technique FEC pour améliorer:

- les paramètres de ligne:
pour les applications sous-marines sans répéteurs, on utilisera éventuellement la fonction FEC pour augmenter la longueur de section maximale.
Pour les applications sous-marines amplifiées optiquement, on utilisera éventuellement la fonction FEC pour augmenter les distances entre répéteurs ou assouplir les spécifications des composants ou des fibres de ligne optiques;
- la qualité globale des communications pour la protection contre des conditions de fonctionnement dégradées indésirables (défaillance de composant ou de câble due au vieillissement par exemple).

En contrepartie, l'utilisation de la fonction FEC dans les équipements de transmission terminaux (TTE) sous-marins introduit une augmentation du débit en ligne.

5.4 Canaux entre terminaux

Sous réserve qu'une structure de verrouillage de trames soit incluse dans la trame FEC (voir 6.4.2), il est possible de transmettre des marqueurs d'affluent pour les systèmes qui transportent plusieurs signaux STM-16 entrelacés ou pour établir des canaux de liaison entre opérateurs ou des canaux de service à l'aide des bits inutilisés de la structure de verrouillage de trames.

6 Définition de la fonction FEC

6.1 Définitions

6.1.1 code de bloc: ces codes sont caractérisés par le fait que le codeur accepte K symboles d'information provenant de la source d'information et ajoute un ensemble de R symboles redondants déduits des symboles d'information conformément à l'algorithme de codage.

6.1.2 code cyclique: un code linéaire est appelé cyclique lorsque tout décalage cyclique d'un mot de code est également un mot de code.

6.1.3 code systématique: avec ces codes, le mot d'information n'est aucunement perturbé dans le codeur et les symboles redondants sont ajoutés séparément à chaque bloc.

6.1.4 mot d'information: le mot d'information contient K symboles d'information.

6.1.5 mot de code: bloc de N symboles qui transporte K symboles d'information et R symboles redondants ($N = K + R$).

6.2 Algorithme de correction directe d'erreur

Le code de correction directe d'erreur utilisé pour protéger les informations STM-16 contre les erreurs en ligne dans les systèmes sur câble sous-marin à fibres optiques est un code de Reed-Solomon déjà spécifié dans la Recommandation CCIR 723 de la CMTT, à savoir le code RS(255,239). Ce code RS(255,239) est un code non binaire (l'algorithme FEC fonctionne sur des symboles à 8 bits) et appartient à la famille des codes de bloc cycliques linéaires systématiques.

Le polynôme générateur du code est donné par la formule:

$$G(z) = \prod_{i=0}^{15} (z - \alpha^i)$$

où α est la racine du polynôme primitif binaire $x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + 1$. Un octet de données ($d_7, d_6, \dots, d_1, d_0$) est identifié par l'élément $d_7 \cdot \alpha^7 + d_6 \cdot \alpha^6 + \dots + d_1 \cdot \alpha^1 + d_0$ dans le champ GF(256), champ fini avec 256 éléments.

6.3 Propriétés du code RS(255,239)

Compte tenu de la grande variété de codes de correction directe d'erreur, le choix d'un de ces codes consiste en partie à faire en sorte que les caractéristiques de la technique de codage répondent aux objectifs de système à atteindre.

Le choix du code de Reed-Solomon pour les systèmes sur câble sous-marin à fibres optiques est essentiellement motivé par ses propriétés suivantes:

- une capacité de correction d'erreur importante par rapport au taux de redondance appliqué au mot d'information; l'algorithme RS(255,239) peut corriger jusqu'à 8 symboles d'octet erronés dans un seul mot de code d'une longueur de 255;
- une faible complexité du codeur et du décodeur FEC;
- une structure de codage compatible avec les transmissions binaires, sous réserve qu'une opération de démultiplexage soit exécutée;
- une capacité importante de correction des erreurs en rafales. Cette propriété intrinsèque des codes de Reed-Solomon est encore renforcée par l'entrelacement de codecs RS(255,239) élémentaires. Cette technique, implémentée dans les systèmes sur câble sous-marin à fibres optiques à 2,5 Gbit/s, porte la capacité de correction d'erreur à des rafales d'une longueur maximale de 1024 bits, pour 16 codecs entrelacés.

En outre, les codes de Reed-Solomon figurent parmi les codes les plus efficaces pouvant être implémentés à l'aide du matériel et du logiciel actuellement disponibles.

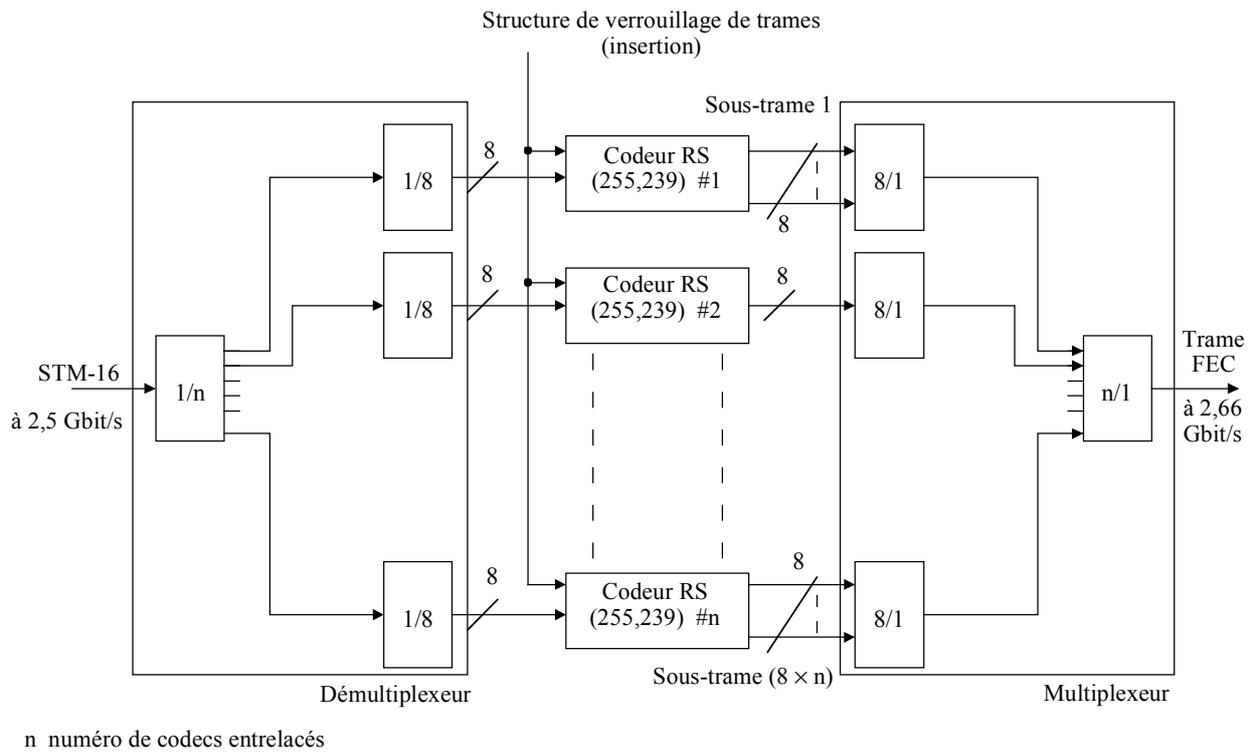
6.4 Structure de trame FEC

Une autre structure (facultative) de trame FEC est fournie dans l'Appendice I à titre d'information.

6.4.1 Architectures du codeur et du décodeur FEC

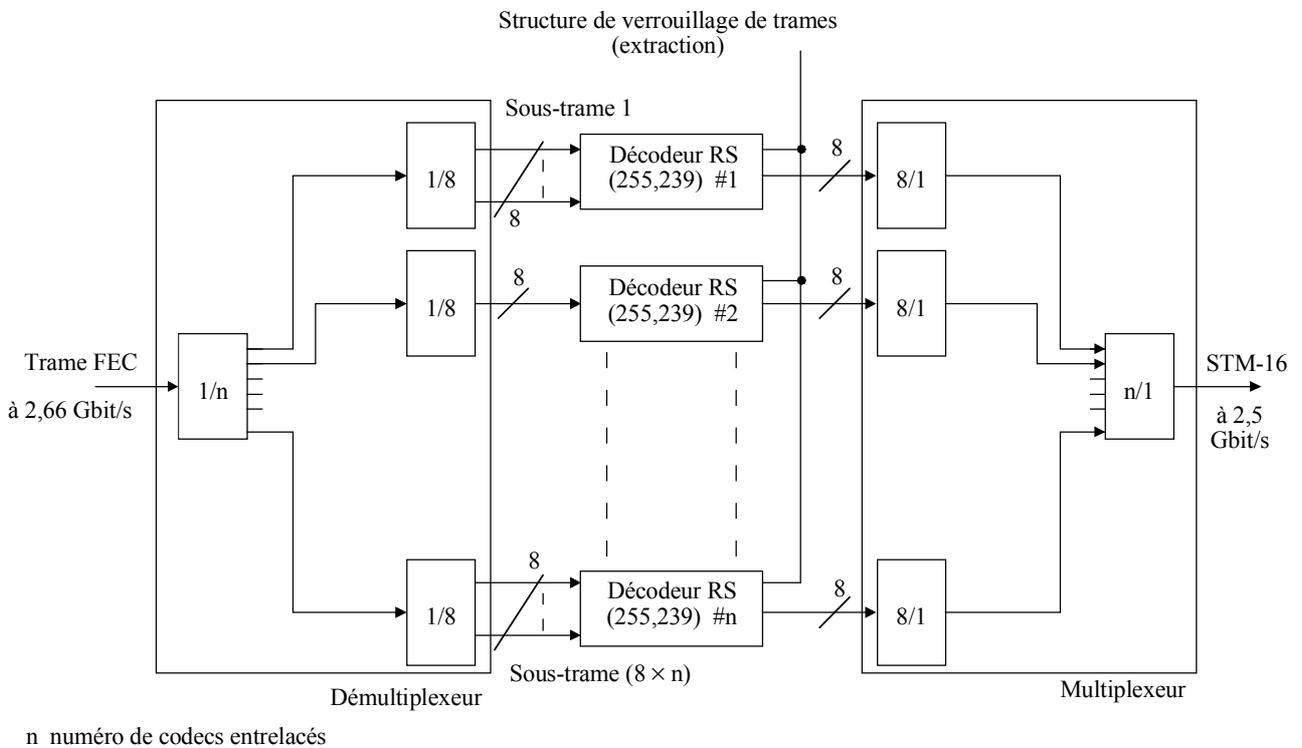
Pour renforcer l'immunité d'un système sur câble sous-marin à fibres optiques aux erreurs par paquets, plusieurs codes RS(255,239) peuvent être entrelacés. Sur les Figures 2 et 3, (n) désigne l'ordre d'entrelacement (n est un nombre entier différent de zéro).

Compte tenu de l'entrelacement à la profondeur " n " des codes RS(255,239), les architectures du codeur et du décodeur FEC sont décrites en détail respectivement sur les Figures 2 et 3.



T1520660-96

Figure 2/G.975 – Architecture de codeur FEC



T1520670-96

Figure 3/G.975 – Architecture de décodeur FEC

Pour l'intégrité des données, le multiplexeur numérique et le démultiplexeur numérique représentés sur les Figures 2 et 3 sont strictement symétriques. En outre, les mêmes multiplexeurs et démultiplexeurs numériques sont utilisés pour le codeur et le décodeur FEC.

Etant donné que chaque algorithme élémentaire de Reed-Solomon traite des informations sous forme d'octets et fonctionne donc sur 8 flux de données parallèles, les démultiplexeurs délivrent $(8 \times n)$ flux de données aux (n) codecs entrelacés alors que les multiplexeurs effectuent l'opération inverse.

Compte tenu des architectures de codeur et de décodeur, la construction de la trame FEC est décrite sur la Figure 4.

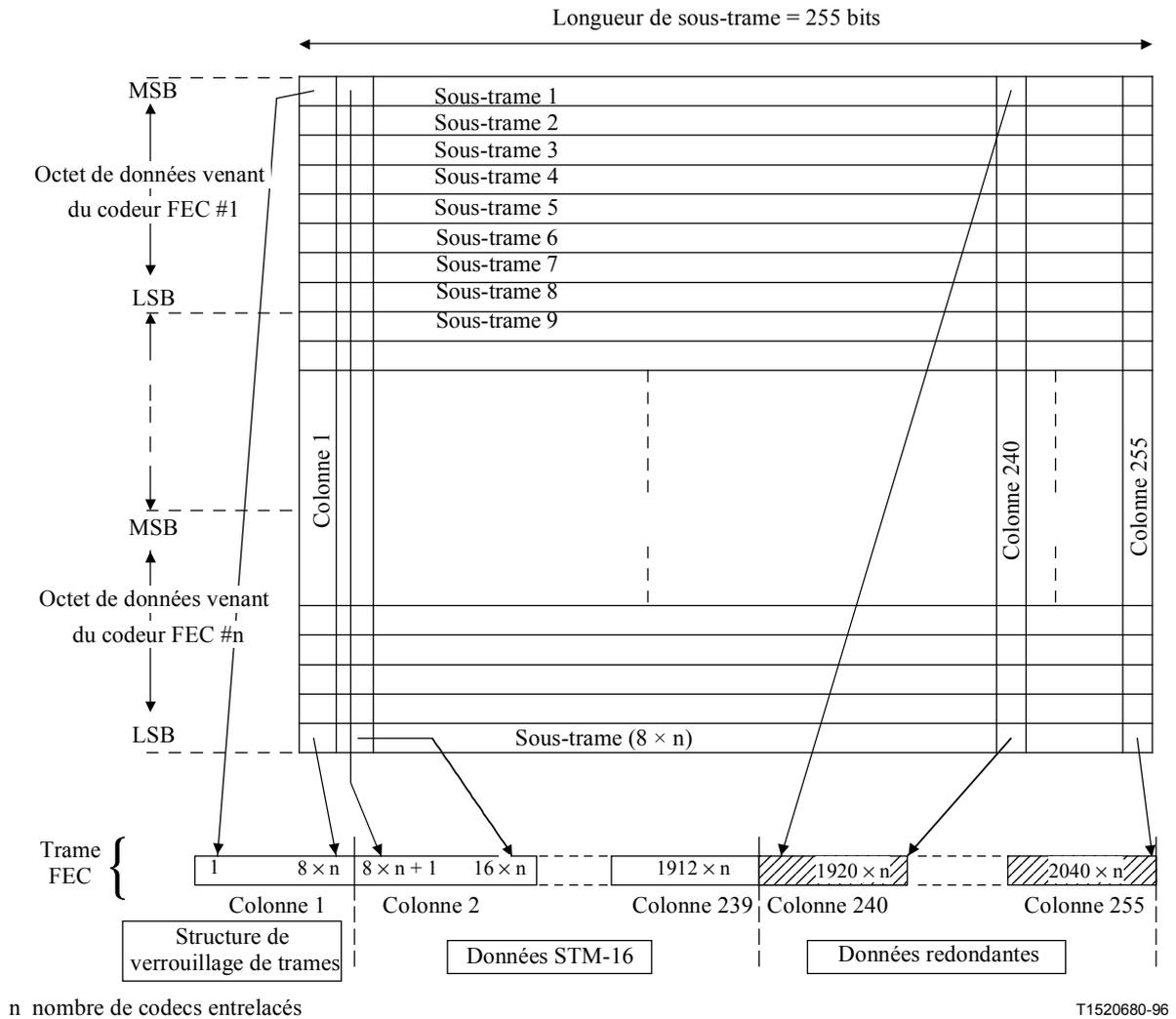


Figure 4/G.975 – Construction de la trame FEC

Compte tenu de l'entrelacement des codes RS(255,239) à la profondeur n , la trame FEC est longue de $(2040 \times n)$ bits et est constituée de $(8 \times n)$ sous-frames à entrelacement de bits.

Par suite de la symétrie des démultiplexeurs et des multiplexeurs numériques, de chaque côté des algorithmes de Reed-Solomon, la séquence de bits de données STM-16 dans la trame FEC est identique à celle du signal d'entrée STM-16.

6.4.2 Structure de verrouillage de trames

On ajoute une structure de verrouillage de trames dans la trame FEC afin d'insérer éventuellement un mot de verrouillage de trames FEC nécessaire pour assurer la synchronisation de la trame FEC avec la structure du décodeur FEC au niveau de l'équipement terminal de transmission récepteur (TTE).

On peut utiliser les bits de réserve restants pour transporter des marqueurs d'affluent ainsi que pour établir des canaux de liaison entre opérateurs ou des canaux de service.

La trame FEC représentée au 6.4.1 peut être divisée en $(8 \times n)$ sous-trames longues de 255 bits. Chaque sous-trame (voir la Figure 5) contient les informations suivantes:

- le bit 1 de chaque sous-trame transporte la structure de verrouillage de trames (le mot de verrouillage de trames FEC, les marqueurs d'affluent pour l'identification des flux de données STM-16 dans les systèmes qui transportent des multiples de STM-16 (s'il y a lieu), des canaux de liaison entre opérateurs ou des canaux de service pour la communication entre terminaux);
- les bits 2 à 239 de chaque sous-trame transportent les informations STM-16;
- les bits 240 à 255 de chaque sous-trame transportent les bits redondants calculés par l'algorithme RS(255,239).

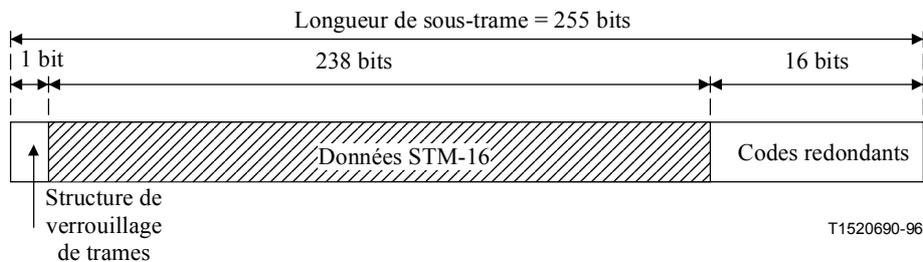


Figure 5/G.975 – Contenu des sous-trames de la trame FEC

6.4.3 Embrouillage

Les données STM-16 dans la trame FEC sont déjà embrouillées comme indiqué dans l'UIT-T G.707 [1]; le réembrouillage de la trame FEC n'est donc en général pas nécessaire.

Mais, lorsqu'il est implémenté dans l'équipement terminal de transmission (TTE) sous-marin, le dispositif d'embrouillage doit être éventuellement inhibé.

L'embrouillage de la trame FEC peut être effectué selon la procédure suivante: la trame FEC est embrouillée, à l'exception des bits de la structure de verrouillage de trames de la trame FEC par un polynôme $x^7 + x + 1$ déclenché à chaque trame sur le premier bit qui suit la structure de verrouillage de trames dans la trame FEC.

Les premiers bits de la séquence de l'embrouilleur sont 1111111. Ensuite, l'embrouilleur fonctionne de manière continue dans toute la trame FEC.

6.4.4 Taux de redondance

Le taux de redondance de la fonction FEC défini dans l'UIT-T G.975 est égal à 1/14. Les débits en ligne des systèmes sur câble sous-marin à fibres optiques qui utilisent la correction directe d'erreur sont donc les suivants:

- un affluent STM-16 transporté: $2\,488,320 \times 15/14$ Mbit/s;
- deux affluents STM-16 transportés: 2 signaux multiplexés à $2\,488,320 \times 15/14$ Mbit/s;

- M (M est un nombre entier différent de zéro) affluents STM-16 transportés: M signaux multiplexés à $2\,488,320 \times 15/14$ Mbit/s;

7 Efficacité de la fonction FEC

7.1 Efficacité théorique de la fonction FEC

L'un des critères d'évaluation de l'efficacité de correction intrinsèque du code RS(255,239) est la relation théorique entre le BER en ligne après la correction de la fonction FEC (BER_{sortie}) et le BER en ligne avant la correction de la fonction FEC ($BER_{\text{entrée}}$).

Pour les codes RS, on peut calculer mathématiquement ce critère en partant des hypothèses que les erreurs se produisent indépendamment les unes des autres et que le décodeur n'est jamais défaillant (probabilité de décodage incorrect égale à zéro):

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{UE} = \sum_{i=9}^N \frac{i}{N} \cdot \binom{N}{i} \cdot P_{SE}^i \cdot (1 - P_{SE})^{N-i} \text{ avec } N = 255 \\ BER_{\text{entrée}} = 1 - (1 - P_{SE})^{1/8} \\ BER_{\text{sortie}} = 1 - (1 - P_{UE})^{1/8} \end{array} \right.$$

avec:

- P_{UE} probabilité d'erreur non corrigible
- P_{SE} probabilité d'erreur de symbole (octet)
- N longueur de mot de code (255)

La Figure 6 et le Tableau 1 donnent une indication de l'efficacité intrinsèque théorique du code RS(255,239).

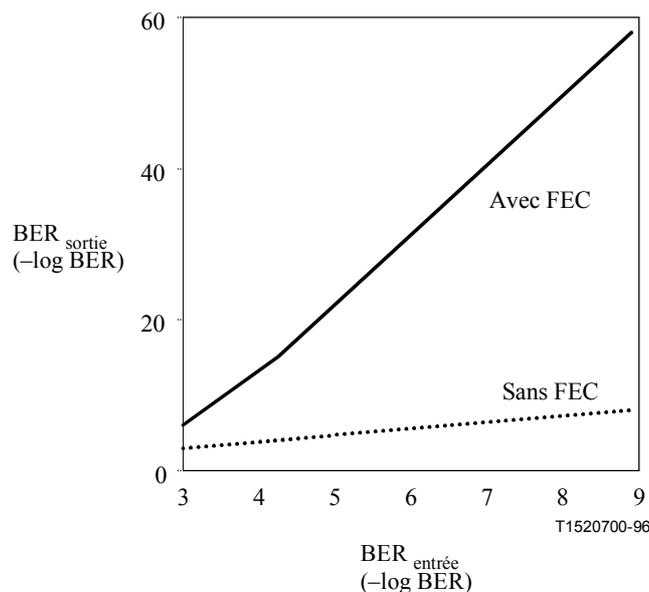


Figure 6/G.975 – BER de sortie théorique en fonction du BER d'entrée théorique

Tableau 1/G.975 – BER de sortie théorique en fonction du BER d'entrée théorique

BER_{entrée}	BER_{sortie}
10^{-4}	$5 \cdot 10^{-15}$
10^{-5}	$6,3 \cdot 10^{-24}$
10^{-6}	$6,4 \cdot 10^{-33}$

On considère généralement que l'indépendance statistique entre des erreurs consécutives est liée à la technique d'entrelacement de Reed-Solomon: avec cette méthode, un canal à erreurs par paquets est transformé en plusieurs canaux à erreurs indépendants.

Pour un BER_{entrée} supérieur à 10^{-3} , la probabilité de décodage incorrect (un décodage incorrect se produit lorsque le décodeur tente une correction mais agit incorrectement parce que le schéma d'erreur dépasse sa capacité de correction) devient non négligeable et rend imprécis le calcul précédent de BER_{sortie}. Dans ce cas, les courbes de BER_{sortie} en fonction de BER_{entrée} se situent même au-dessous de la courbe "sans FEC" sur la Figure 6.

Ce calcul reste identique quel que soit le système sur câble sous-marin à fibres optiques mais ne donne aucune indication sur la dégradation induite par l'augmentation de débit en ligne par rapport aux caractéristiques de canal de transmission optique.

7.2 Gain de codage

On peut également évaluer l'efficacité de la fonction FEC par le gain de codage, c'est-à-dire la différence de puissance optique d'entrée du récepteur nécessaire pour que les opérations de codage et de décodage assurent un niveau spécifié de qualité de communication (BER = 10^{-10} sur la Figure 7).

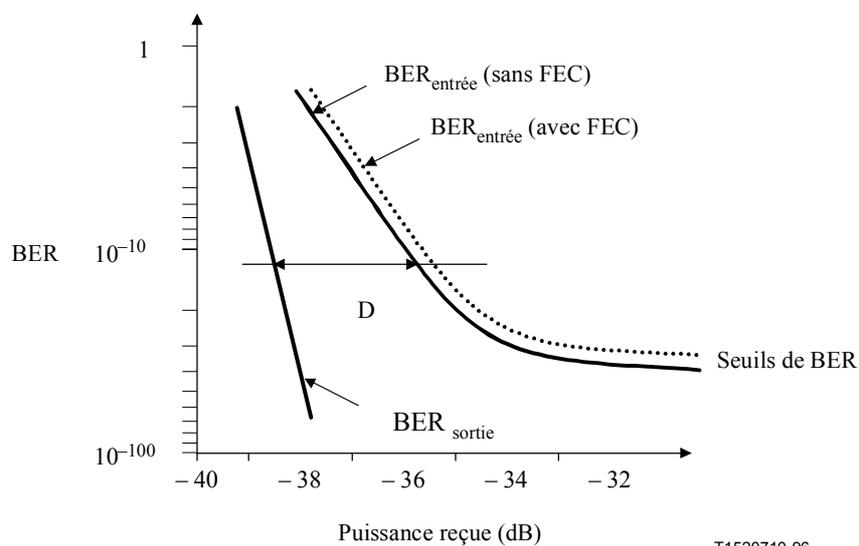


Figure 7/G.975 – Système d'évaluation du gain de codage (D)

Tout en corrigeant le BER_{entrée}, la fonction FEC confère un gain de codage positif au système. Ce gain de codage est légèrement atténué par l'effet de l'augmentation de largeur de bande du signal induite par les symboles redondants.

La valeur du gain de codage dépend intrinsèquement de la structure globale du système sur câble sous-marin à fibres optiques (notamment distance entre répéteurs, paramètres de photodétection et puissance de sortie des amplificateurs optiques).

Lorsqu'un seuil de BER en ligne pénalise le système sur câble sous-marin à fibres optiques, l'un des effets les plus appréciables de la fonction FEC est de ramener ces seuils de BER en ligne à des niveaux acceptables que le système physique ne pourrait jamais assurer sans FEC, quelle que soit la puissance d'entrée du récepteur.

Le gain de codage escompté pour les systèmes sur câble sous-marin à fibres optiques est de 4 dB à 5 dB par longueur de fibre.

APPENDICE I

Structure (facultative) de trame FEC

I.1 Architecture de codeur FEC et de décodeur FEC

Contrairement à la longueur de sous-trame de 255 bits décrite dans le corps principal, on peut utiliser 256 bits où on a ajouté un bit fictif à la sous-trame de 255 bits. La sous-trame de 256 bits ainsi obtenue peut alors être divisée par quatre. Cela permet un calcul parallèle à quatre donnant ainsi la possibilité d'utiliser un circuit intégré FEC avec un débit de 2,667 Gbit/s.

L'architecture du codeur FEC et du décodeur FEC pour STM-16 est illustrée dans les Figures I.1 et I.2, où le signal entier est calculé en utilisant un seul circuit intégré FEC IC. Pour les systèmes STM-64, les signaux sont démultiplexés en 4 groupes de signaux et chaque signal démultiplexé est traité avec un seul circuit FEC. L'architecture du codeur FEC et du décodeur FEC pour le module STM-64 est illustrée dans les Figures I.3 et I.4.

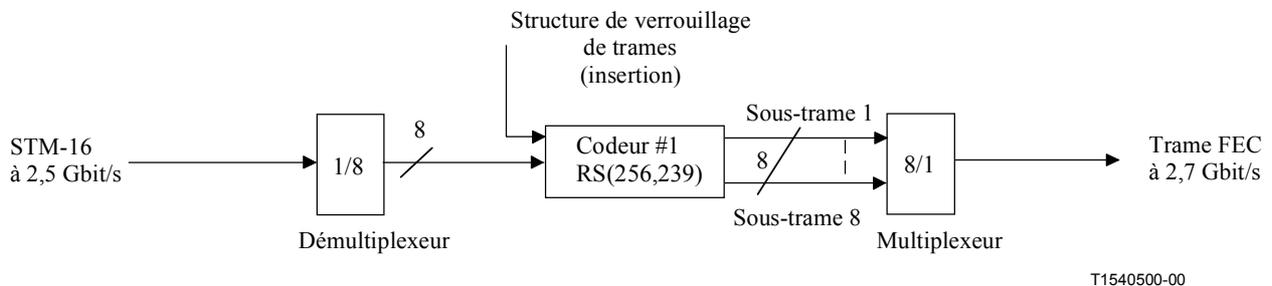


Figure I.1/G.975 – Architecture du codeur FEC pour les systèmes STM-16

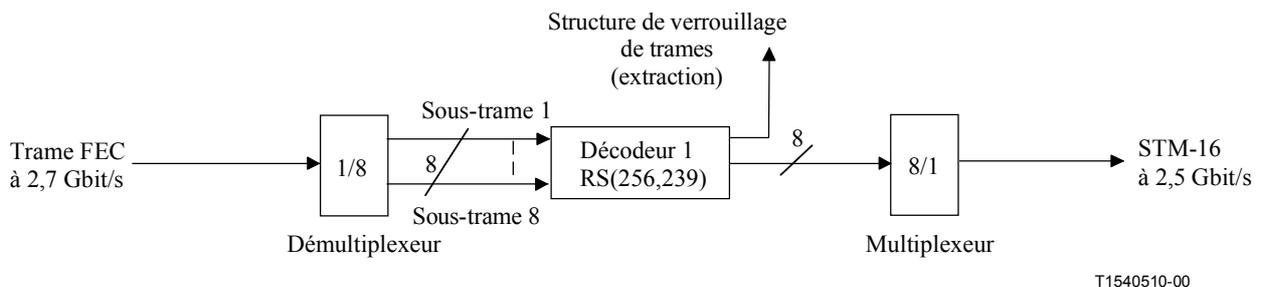


Figure I.2/G.975 – Architecture du décodeur FEC pour les systèmes STM-64

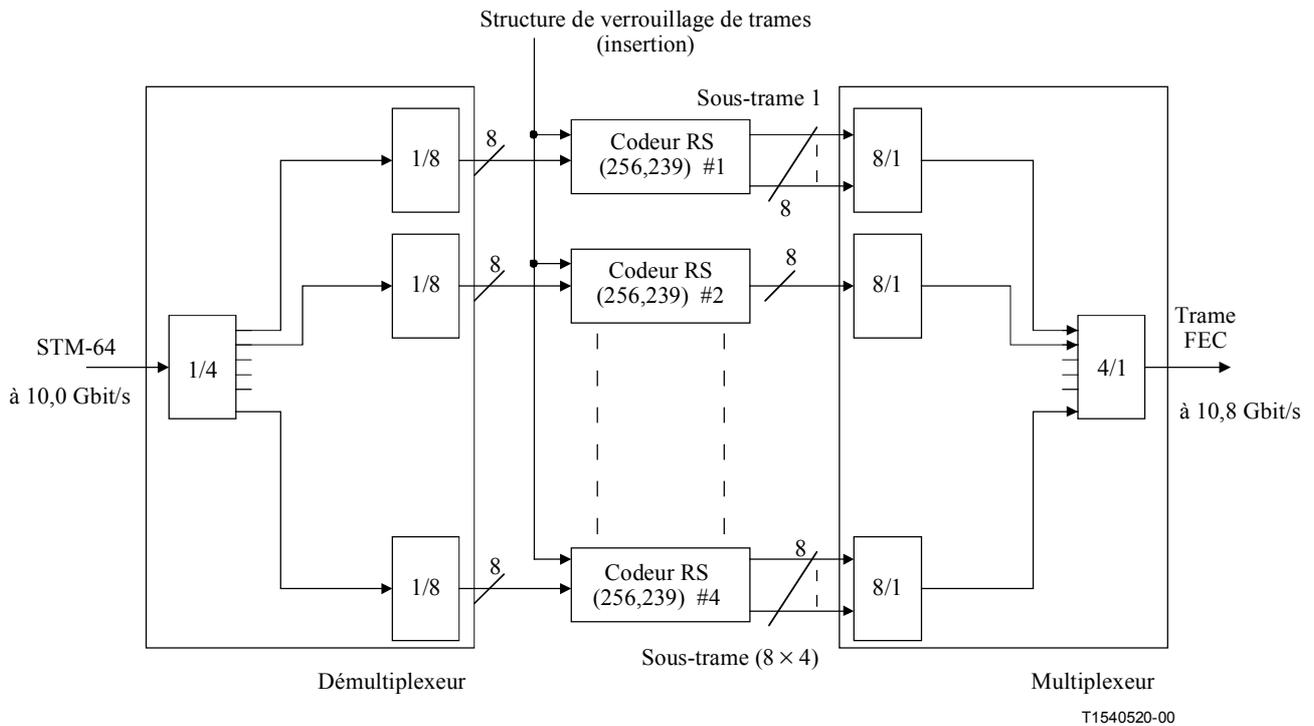


Figure I.3/G.975 – Architecture du codeur FEC pour les systèmes STM-64

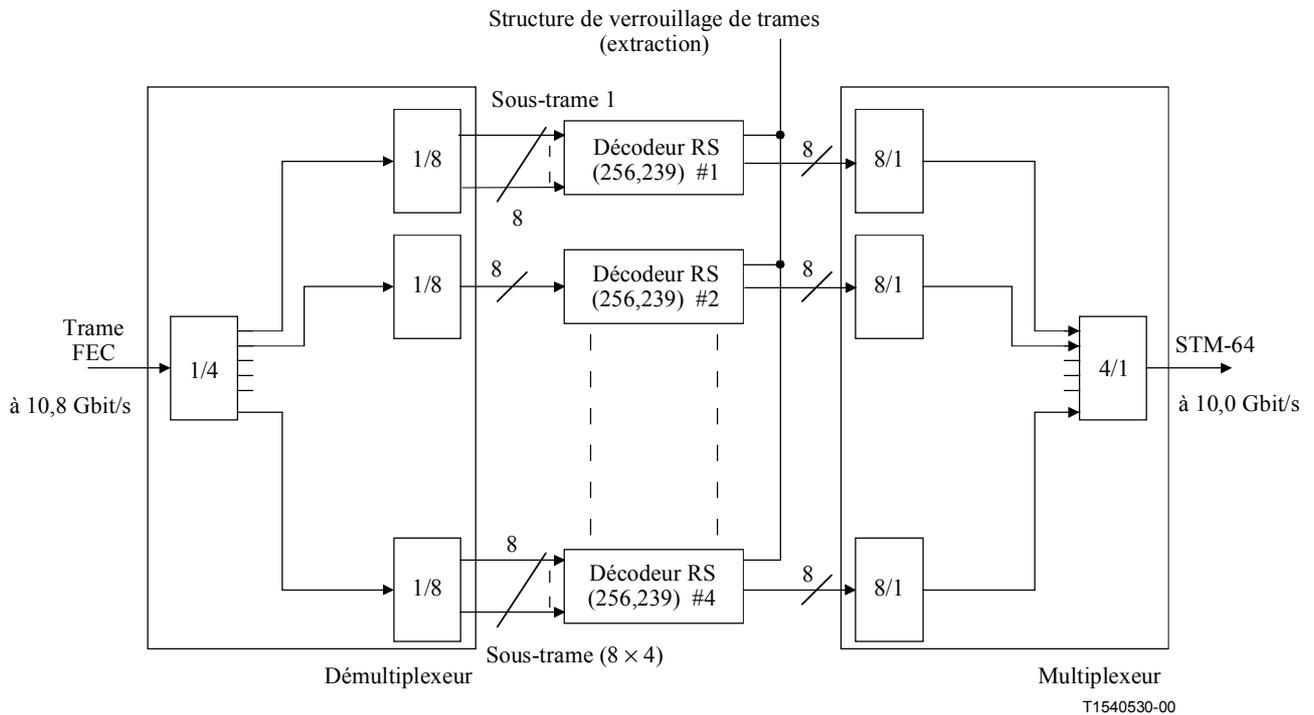


Figure I.4/G.975 – Architecture du décodeur FEC pour les systèmes STM-64

Sur la base des architectures précédentes de codeur FEC/décodeur FEC appliquées aux signaux STM-16 et STM-64, les constructions de trames FEC sont décrites respectivement dans les Figures I.5 et I.6.

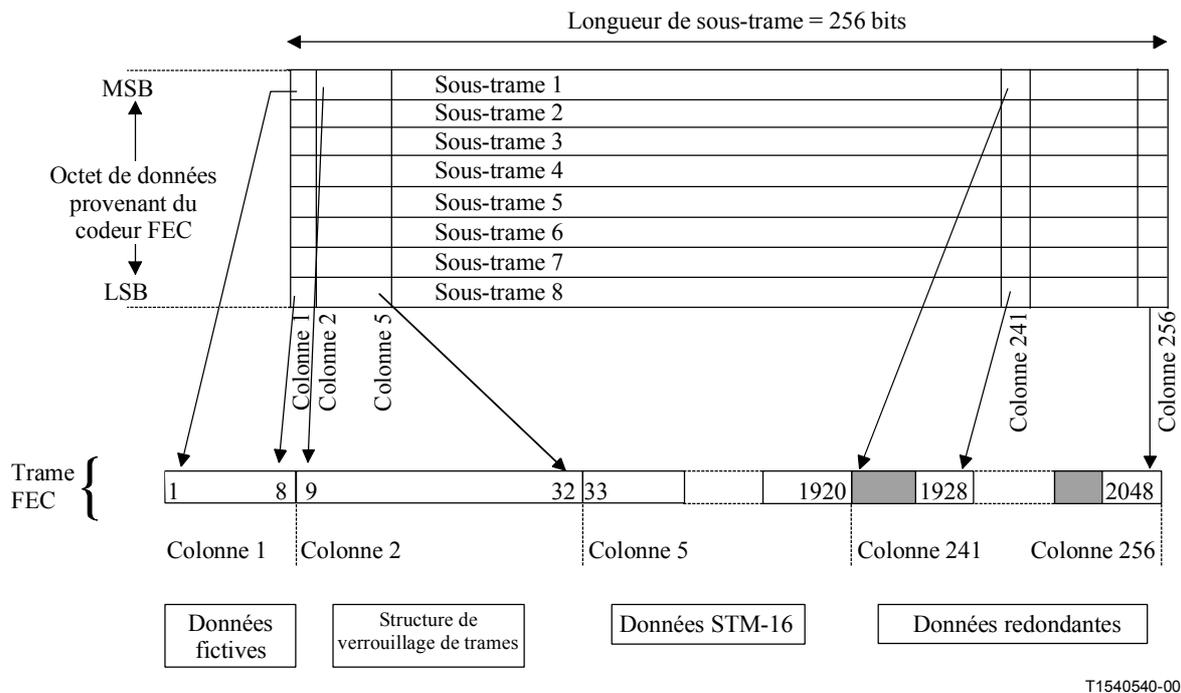


Figure I.5/G.975 – Construction de trames FEC pour les systèmes STM-16

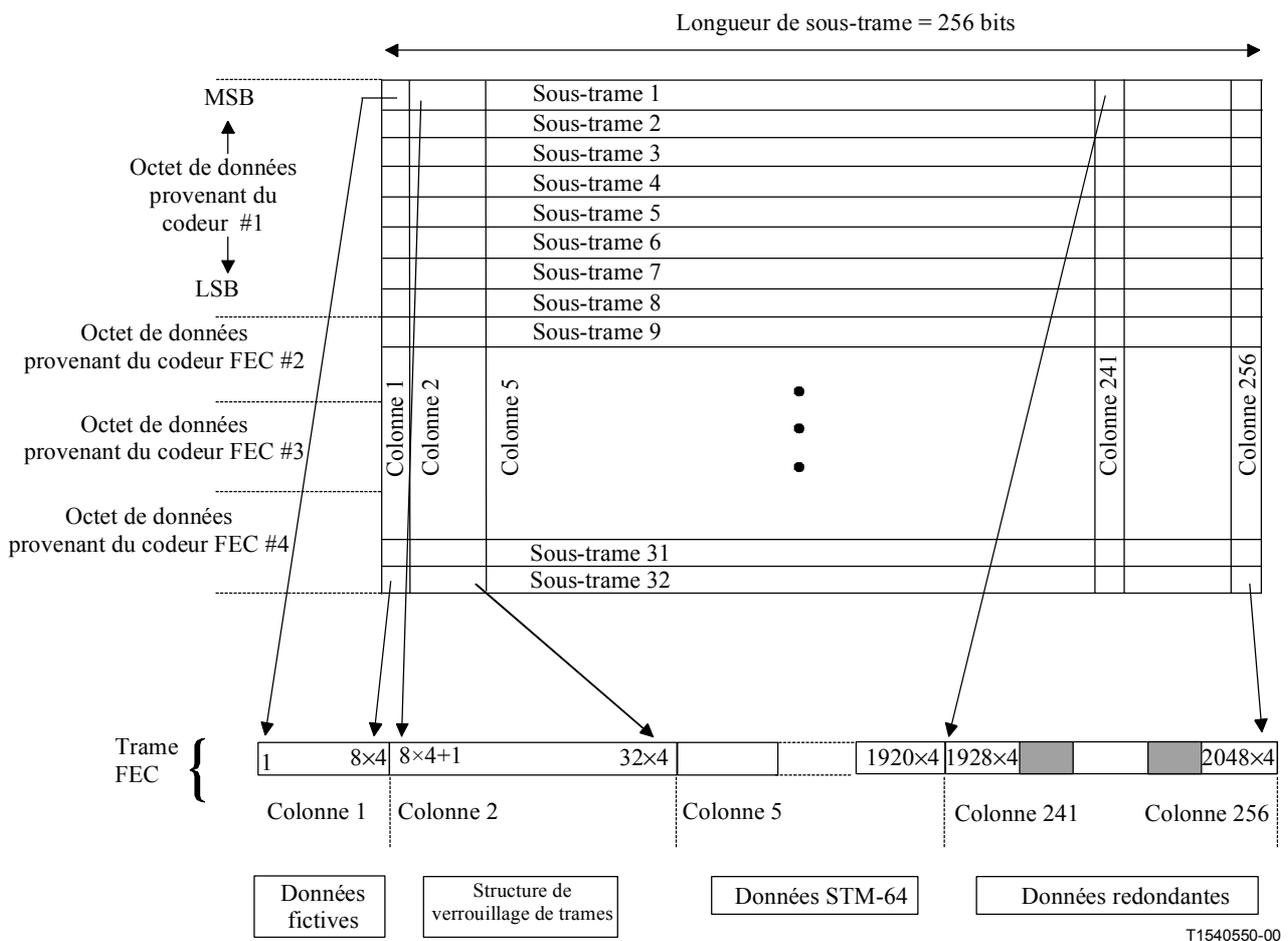


Figure I.6/G.975 – Construction de trames FEC pour les systèmes STM-64

Les trames FEC pour STM-16 et STM-64 ont des longueurs de 2048 bits et de 2048×4 bits et elles sont respectivement constituées de sous-trames entrelacées d'un seul bit et de quatre bits. Les séquences de bits de données STM-16 et STM-64 dans la trame FEC sont respectivement identiques à celles du signal d'entrée STM-16 et STM-64.

I.2 Structure de verrouillage de trames

Afin de réaliser un calcul parallèle à quatre qui permet d'utiliser un circuit intégré FEC à haut débit, un bit est ajouté à la sous-trame de 255 bits décrite en 6.4.2. Chacune des sous-trames de 256 bits ainsi obtenues contient les informations suivantes:

- le bit 1 est un bit fictif;
- les bits 2 à 4 transportent la structure de verrouillage de trames (le mot de verrouillage de trames FEC, les marqueurs d'affluent pour l'identification des flux de données STM-16 dans les systèmes qui transportent des multiples de STM-16 (s'il y a lieu), des canaux de liaison entre opérateurs ou des canaux de service pour la communication entre terminaux);
- les bits 5 à 240 de chaque sous-trame transportent les informations STM-16;
- les bits 241 à 256 de chaque sous-trame transportent les bits redondants calculés par l'algorithme RS(255,239).

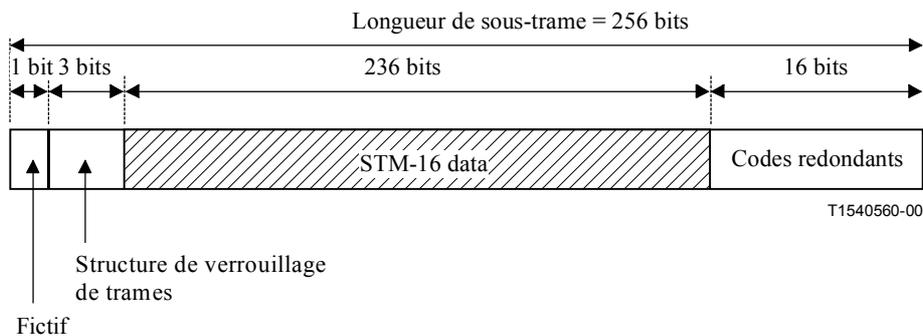


Figure I.7/G.975 – Format de sous-trame de 256 bits qui permet le calcul parallèle.

I.3 Embrouillage

Les données STM-16 dans la trame FEC sont déjà embrouillées comme indiqué dans l'UIT-T G.707 [1]; le réembrouillage de la trame FEC n'est donc en général pas nécessaire.

Mais, lorsqu'il est implémenté dans l'équipement terminal de transmission (TTE) sous-marin, le dispositif d'embrouillage doit être éventuellement inhibé.

L'embrouillage de la trame FEC peut être effectué selon la procédure suivante: la trame FEC est embrouillée, à l'exception des bits de la structure de verrouillage de trames de la trame FEC, par un polynôme $x^7 + x + 1$ déclenché à chaque trame sur le premier bit qui suit la structure de verrouillage de trames dans la trame FEC.

Les premiers bits de la séquence de l'embrouilleur sont 1111111. Ensuite, l'embrouilleur fonctionne de manière continue dans toute la trame FEC.

I.4 Taux de redondance

Le taux de redondance de la fonction FEC défini dans l'Appendice I est égal à 5/59. Les débits en ligne des systèmes sur câble sous-marin à fibres optiques qui utilisent la correction directe d'erreur sont donc les suivants:

- un affluent STM-16 transporté: $2\,488,320 \times 64/59$ Mbit/s;
- un affluent STM-64 transporté: $9\,953,280 \times 64/59$ Mbit/s.

SÉRIES DES RECOMMANDATIONS UIT-T

Série A	Organisation du travail de l'UIT-T
Série B	Moyens d'expression: définitions, symboles, classification
Série C	Statistiques générales des télécommunications
Série D	Principes généraux de tarification
Série E	Exploitation générale du réseau, service téléphonique, exploitation des services et facteurs humains
Série F	Services de télécommunication non téléphoniques
Série G	Systèmes et supports de transmission, systèmes et réseaux numériques
Série H	Systèmes audiovisuels et multimédias
Série I	Réseau numérique à intégration de services
Série J	Transmission des signaux radiophoniques, télévisuels et autres signaux multimédias
Série K	Protection contre les perturbations
Série L	Construction, installation et protection des câbles et autres éléments des installations extérieures
Série M	RGT et maintenance des réseaux: systèmes de transmission, de télégraphie, de télécopie, circuits téléphoniques et circuits loués internationaux
Série N	Maintenance: circuits internationaux de transmission radiophonique et télévisuelle
Série O	Spécifications des appareils de mesure
Série P	Qualité de transmission téléphonique, installations téléphoniques et réseaux locaux
Série Q	Commutation et signalisation
Série R	Transmission télégraphique
Série S	Equipements terminaux de télégraphie
Série T	Terminaux des services télématiques
Série U	Commutation télégraphique
Série V	Communications de données sur le réseau téléphonique
Série X	Réseaux de données et communication entre systèmes ouverts
Série Y	Infrastructure mondiale de l'information et protocole Internet
Série Z	Langages et aspects informatiques généraux des systèmes de télécommunication