



UNION INTERNATIONALE DES TÉLÉCOMMUNICATIONS

UIT-T

SECTEUR DE LA NORMALISATION
DES TÉLÉCOMMUNICATIONS
DE L'UIT

X.141

**RÉSEAUX PUBLICS POUR DONNÉES
ASPECTS RÉSEAU**

**PRINCIPES GÉNÉRAUX DE DÉTECTION
ET DE CORRECTION DES ERREURS DANS
LES RÉSEAUX PUBLICS POUR DONNÉES**

Recommandation UIT-T X.141

(Extrait du *Livre Bleu*)

NOTES

1 La Recommandation X.141 de l'UIT-T a été publiée dans le fascicule VIII.3 du Livre Bleu. Ce fichier est un extrait du Livre Bleu. La présentation peut en être légèrement différente, mais le contenu est identique à celui du Livre Bleu et les conditions en matière de droits d'auteur restent inchangées (voir plus loin).

2 Dans la présente Recommandation, le terme «Administration» désigne indifféremment une administration de télécommunication ou une exploitation reconnue.

© UIT 1988, 1993

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.

Recommandation X.141

PRINCIPES GÉNÉRAUX DE DÉTECTION ET DE CORRECTION DES ERREURS DANS LES RÉSEAUX PUBLICS POUR DONNÉES

(Malaga-Torremolinos, 1984)

Le CCITT,

considérant

- (a) que les erreurs doivent être décelées et corrigées avec un niveau de fiabilité très élevé;
- (b) que certaines procédures de correction des erreurs peuvent être plus avantageuses que d'autres, selon les temps de transmission dans le réseau et la distribution (dans le temps) des erreurs;
- (c) que la distribution des erreurs (dans le temps) aux extrémités d'un trajet peut dépendre des procédures de correction des erreurs sans voie de retour utilisées sur une ou plusieurs sections du trajet;
- (d) que l'applicabilité de certaines procédures de correction des erreurs peut être influencée par le nombre de systèmes à satellites dans la communication, lesquels peuvent se trouver dans des liaisons nationales ou internationales, ou encore dans le service mobile maritime;
- (e) que différentes procédures de correction des erreurs peuvent être combinées dans certaines communications,

recommande à l'unanimité

que les principes généraux énoncés dans la présente Recommandation soient appliqués lors de la conception et de la mise en oeuvre des procédures de détection et de correction des erreurs dans les réseaux publics pour données.

1 Considérations générales

1.1 La présente Recommandation a pour but d'exposer les principes généraux applicables à la détection et à la correction des erreurs survenant dans les liaisons de transmission des réseaux publics pour données.

1.2 Les deux objectifs fondamentaux des procédures de protection contre les erreurs sont les suivants:

- faire en sorte que le nombre d'erreurs non décelées reste dans des limites de probabilité suffisamment faibles pour être acceptables;
- faire en sorte que les erreurs décelées soient corrigées à l'aide d'une procédure de protection contre les erreurs qui soit compatible avec le débit de données et avec les exigences de la mise en séquence applicables quand le taux d'erreur de la couche physique reste dans les limites pleinement acceptables et tolérables d'une qualité de fonctionnement spécifiée.

1.3 Dans le contexte du modèle de référence pour l'interconnexion des systèmes ouverts, il est indiqué dans la Recommandation X.200 que chaque protocole d'équivalence (N) doit comporter suffisamment d'information de commande pour permettre aux entités (N) de détecter ou de corriger les erreurs qui relèvent de ce protocole. Signaler les erreurs décelées mais non corrigées est un service que chaque couche doit assurer.

Plus particulièrement, la couche de la liaison de données a pour objet de détecter et, éventuellement, de corriger les erreurs qui peuvent survenir dans la couche physique.

1.4 Pour un système de détection d'erreurs donné, la probabilité de non-détection des erreurs tendra généralement à augmenter:

- à mesure que le taux d'erreur augmente;
- pour un taux d'erreur donné, à mesure que la distribution des erreurs devient moins aléatoire et que la longueur des paquets d'erreurs augmente;
- à mesure que la longueur de la trame augmente;
- éventuellement, par suite de mesures, l'application de méthodes d'embrouillage qui peuvent avoir des facteurs en commun avec le polynôme générateur utilisé pour la détection des erreurs.

1.5 Le débit des données en présence d'erreurs dépend des procédures de protection contre les erreurs qui, à leur tour, dépendent des facteurs ci-après:

- taux d'erreur;
- distribution des erreurs;
- embrouillage et/ou multiplexage, dans la mesure où ces opérations influent sur la distribution des erreurs ou sur le taux d'erreur;
- temps de propagation sur le trajet de transmission;
- débit binaire;
- longueur de la trame;
- taille de la fenêtre;
- ressources de la mémoire tampon aux extrémités émettrice et réceptrice de la liaison.

2 Types d'erreurs

Les erreurs sont généralement de trois types qui se distinguent par des distributions d'erreur caractéristiques en fonction du temps:

- erreurs aléatoires,
- erreurs par paquets,
- erreurs dues à un glissement non commandé.

Il est probable qu'un type d'erreur prédominera sur une liaison donnée, selon la nature du système de transmission employé (câble, faisceau hertzien ou satellite; présence ou absence d'une correction d'erreurs sans voie de retour).

Pour le choix des procédures de protection contre les erreurs sur une liaison, il est important de reconnaître les tendances à la prédominance de tel ou tel type d'erreurs.

3 Procédures de protection contre les erreurs

3.1 Types de procédures

Les deux types de protection contre les erreurs communément employés dans les réseaux publics pour données sont:

- la correction des erreurs sans voie de retour, méthode de codage employée afin de détecter et de corriger les erreurs dans les données reçues au lieu de demander leur retransmission;
- la méthode de demande automatique de répétition (ARQ) où l'information transmise est structurée en trames avec codage de détection des erreurs, la correction des données erronées étant assurée par la répétition automatique, sur demande à la réception, d'une trame ou de la totalité de l'information déjà transmise, en commençant par la trame demandée. La récupération de la temporisation sert de support à la procédure ARQ.

3.2 Correction d'erreurs sans voie de retour (CESR)

La correction d'erreurs sans voie de retour (CESR) n'a pas besoin d'un mécanisme de signalisation vers l'arrière pour fonctionner. Ce type de correction d'erreurs s'applique généralement à la couche physique du modèle de référence, le plus souvent dans des systèmes de transmission dont les caractéristiques d'erreur risqueraient autrement de ne pas satisfaire aux limites fixées.

Les possibilités de protection contre les erreurs offertes par les techniques CESR communément utilisées dans les réseaux publics pour données semblent limitées à la correction d'un nombre restreint d'erreurs (généralement 2 ou 3) à l'intérieur de chaque bloc d'information codée ou avec un bloc de longueur limitée. Pour cette raison, les procédures CESR sont très efficaces quand l'apparition des erreurs est à prédominance aléatoire.

Selon les dispositions prises en matière de multiplexage et, parfois, d'autres dispositions prises dans la couche physique (par exemple, embrouillage, cryptage), les erreurs non corrigées qui subsistent après l'application de la CESR ont parfois tendance à se trouver groupées en grappes ou en paquets d'erreurs. Quand le nombre d'erreurs à l'intérieur d'une trame d'information codée ou d'une longueur de code limitée dépasse les possibilités de correction de l'algorithme CESR, le nombre total d'erreurs dans la grappe ou le paquet peut se trouver augmenté et non pas réduit par le dispositif de CESR.

Généralement, il ne sera pas possible de notifier à la couche de la liaison de données les erreurs décelées mais non corrigées au moyen des dispositifs CESR de la couche physique, qui peuvent accomplir leur fonction de protection contre les erreurs au niveau du signal multivoie, multiplexé, du système de transmission.

Pour adapter des signaux de données transmis à des débits recommandés inférieurs à 64 kbit/s aux fins de transmission à 64 kbit/s, on introduira, dans certains cas une redondance suffisante pour que la CESR soit assurée selon un principe de vote majoritaire, sans codage spécial pour cette CESR. Avec ce système, un nombre important de schémas d'erreurs différents peuvent être décelés et corrigés.

Comme variante, ou à titre complémentaire, la séquence de vérification de trame de la procédure ARQ peut également servir à établir une distinction entre une information reçue correctement et une information reçue incorrectement, dans les trains de signaux redondants.

3.3 Procédures de correction des erreurs par répétition automatique (ARQ)

3.3.1 Considérations générales

Les procédures ARQ nécessitent la présence de voies vers l'avant et vers l'arrière ayant en général la capacité de transmettre simultanément.

Les procédures ARQ pour la détection et la correction des erreurs sont incluses dans les fonctions de la couche de la liaison de données, elles peuvent également être appliquées dans les fonctions des couches supérieures du modèle de référence.

3.3.2 Détection des erreurs

3.3.2.1 Séquence de contrôle de trame (FCS)

La séquence de contrôle de trame [frame checking sequence (FCS)] à 16 bits exposée ci-après sert à détecter les erreurs dans les procédures de transfert de paquets indiquées dans les Recommandations X.25 et X.75, dans la procédure de la Recommandation Q.703 pour le système de signalisation n° 7 ainsi que dans la procédure d'accès à la liaison sur le canal D du RNIS de la Recommandation Q.921 (I.441).

C'est le même polynôme générateur qui est également employé pour le codage et la vérification dans la Recommandation V.41.

Les 16 bits de la FCS sont générés par l'émetteur. Ils sont les compléments à 1 de la somme modulo 2 du:

- 1) reste de la division (modulo 2) de $x^h (x^{15} + x^{14} + x^{13} + \dots + x^2 + x + 1)$ par le polynôme générateur $x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$, où h est le nombre d'éléments binaires contenus dans la trame existant entre (mais n'incluant pas) le dernier élément binaire du drapeau d'ouverture de trame et le premier élément binaire de la FCS, à l'exclusion des éléments binaires insérés pour la transparence; et du
- 2) reste obtenu après multiplication par x^{16} puis division (modulo 2) du contenu de la trame existant entre, mais n'incluant pas, le dernier élément binaire du drapeau d'ouverture de trame et le premier élément binaire de la FCS, à l'exclusion des éléments binaires insérés pour la transparence par le polynôme générateur $x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$.

Comme exemple de réalisation à l'émission, le reste initial est tout d'abord fixé à une série de 1 consécutifs. Il est ensuite modifié par division des champs d'adresse, de commande et d'information, par le polynôme générateur (comme décrit ci-dessus). Le complément à 1 du reste ainsi obtenu est transmis comme étant la séquence FCS de 16 éléments binaires.

A la réception, il y a contrôle de la correspondance entre les bits de contrôle et le reste de la trame. S'il n'y a pas correspondance complète, la procédure appropriée de correction d'erreur est déclenchée.

Comme exemple de réalisation à la réception, le reste initial est tout d'abord fixé à une série de 1 consécutifs. La suite des éléments binaires protégés reçus, y compris les éléments de contrôle (après élimination des éléments insérés aux fins de transparence), est multipliée par x^{16} puis divisée par le polynôme générateur et doit donner un reste de 0001110100001111 (respectivement de x^{15} à x^0) en l'absence d'erreurs de transmission.

L'appendice I contient des notes explicatives concernant la procédure FCS de détection des erreurs exposée ci-dessus.

Cette procédure permet de détecter:

- a) tous les nombres impairs d'erreurs à l'intérieur d'une trame;
- b) tout paquet d'erreurs dont la longueur ne dépasse pas 16 bits;
- c) toutes les erreurs sur deux bits, quand la longueur du code est inférieure à 32 768 bits;
- d) un grand pourcentage d'autres configurations d'erreurs (quand le nombre des erreurs est pair).

3.3.2.2 *Emploi d'embrouilleurs*

Pour l'emploi des embrouilleurs autosynchronisateurs, il convient de tenir compte des considérations suivantes:

Si l'on utilise des embrouilleurs autosynchronisateurs (c'est-à-dire des embrouilleurs qui divisent le polynôme transmis par le polynôme de l'embrouilleur à l'émission et qui multiplient le polynôme reçu par le polynôme de l'embrouilleur à la réception), il faut, pour que le système de détection des erreurs fonctionne bien, que le polynôme de l'embrouilleur et le polynôme générateur n'aient pas de facteur commun. Si cette condition ne peut être assurée, l'embrouillage doit précéder le codage pour détection des erreurs et le désembrouillage doit suivre le décodage pour détection des erreurs. Si l'on utilise des embrouilleurs de type additif (c'est-à-dire des embrouilleurs qui ne sont pas autosynchronisateurs) ou si l'embrouillage a lieu au niveau d'un signal multiplexé multivoie, il n'est pas nécessaire d'observer cette précaution.

3.3.2.3 *Intégrité de la trame*

L'intégrité du format de la trame doit être préservée afin d'assurer la bonne application de la procédure de détection des erreurs décrite au § 3.3.2.1.

Pour toutes les transmissions de données, la structure de trame est délimitée par des drapeaux d'ouverture et des drapeaux de fermeture, chacun composé d'un 0 suivi de six 1 contigus et d'un 0. Un même drapeau peut à la fois servir de drapeau de fermeture d'une trame et de drapeau d'ouverture de la suivante. Afin d'assurer que cette séquence spécifique du drapeau ne puisse être simulée, le contenu complet de la trame comprise entre deux séquences de drapeau est examiné à l'émission et un élément binaire 0 est inséré après chaque séquence de 5 éléments binaires 1 consécutifs (y compris les cinq derniers éléments binaires de la séquence FCS). A la réception, le contenu de la trame est réexaminé et tout élément binaire 0 qui suit immédiatement cinq éléments binaires 1 consécutifs est éliminé.

A la réception, un contrôle de validité de trame est effectué de façon à détecter toute trame non valable, c'est-à-dire non délimitée par deux drapeaux ou ayant moins d'éléments binaires que le nombre minimum d'éléments binaires spécifié. Les trames non valables sont traitées de la même façon que celles dans lesquelles on a détecté des erreurs.

3.3.3 *Procédures de récupération des erreurs*

Dans le système de correction des erreurs par répétition automatique (ARQ), c'est de la procédure de régulation du trafic, selon laquelle toutes les trames sont numérotées séquentiellement par ordre de transmission, de 0 jusqu'au modulo moins un (le modulo étant le modulo de la suite des numéros) que relève la récupération des erreurs. En général, ce modulo est égal à 8 ou 128, les numéros de séquence variant cycliquement par utilisation de la gamme complète des valeurs possibles.

Les trames valables reçues sans erreurs dans la séquence voulue font l'objet d'un accusé de réception dans les réponses que le récepteur envoie à l'émetteur; quant aux trames non valables et aux trames erronées, elles sont éliminées à la réception et il n'en est tenu aucun compte. La procédure de récupération des trames est déclenchée par le récepteur chaque fois qu'une trame sans erreur n'est pas accompagnée du numéro de séquence attendu. Il s'ensuit que si une ou plusieurs trames sont éliminées, soit qu'elles ne sont pas valables, soit qu'elles contiennent des erreurs, le numéro de la trame correctement reçue qui suit ne correspond plus à l'ordre séquentiel et le récepteur déclenche alors la procédure prescrite pour la récupération des trames.

Si, par suite d'une erreur de transmission, le récepteur ne reçoit pas (ou reçoit mais élimine) une trame d'information unique ou la dernière trame d'une séquence de trames d'information, l'état de mauvaise mise en séquence qui, autrement, servirait à déclencher les procédures de récupération d'erreur à la réception ne sera pas détecté. Dans ce cas, la récupération de la trame sera déclenchée par l'émetteur grâce à une procédure de temporisation, comme suit:

Aux fins de régulation du trafic, le récepteur doit envoyer à l'émetteur une réponse d'accusé de réception pour confirmer qu'il a reçu des trames valables et sans erreur. Après une période de temporisation spécifiée où les trames en suspens sont transmises et où le récepteur n'envoie pas de réponse d'accusé de réception ou de récupération de trame, une action appropriée de récupération est déclenchée par l'émetteur pour déterminer le point à partir duquel la transmission doit recommencer.

Les autres types possibles de procédures de récupération des erreurs sont les suivants:

- procédure de rejet,
- procédure de rejet sélectif,
- procédure de rejet sélectif-rejet.

Pour chacune de ces procédures, il faut prévoir, dans l'émetteur, le stockage de toutes les trames d'information déjà envoyées pour lesquelles aucun accusé de réception correct n'a été reçu.

L'efficacité de débit réalisable en fonction du taux d'erreur et de la distribution des erreurs peut dépendre beaucoup du type de procédure de récupération des erreurs, notamment pour les liaisons où les délais de transmission sont élevés (par exemple, les liaisons par satellite). La complexité des opérations de récupération des erreurs, et notamment des conditions de stockage des trames dans le récepteur, est un autre élément qui joue un rôle important dans le choix de la procédure de récupération la plus indiquée pour une situation donnée.

3.3.3.1 Procédure de rejet (REJ)

La procédure de récupération des erreurs par *rejet* est utilisée par le récepteur pour demander la retransmission des trames d'information en commençant par un numéro de séquence spécifié et, simultanément, accuser la bonne réception de toutes les trames d'information précédentes.

La trame rejetée, ainsi que toutes les trames d'information suivantes qui sont déjà en transit au moment où la réponse REJ parvient à l'émetteur, sont retransmises.

Après envoi de la réponse REJ, le récepteur élimine toutes les trames d'information entrantes jusqu'à ce que la trame perdue ait été récupérée. Cette procédure a pour effet de réduire au minimum les besoins en matière de stockage de trames dans le récepteur mais, pour les caractéristiques d'erreur marginales, elle peut se traduire par un débit médiocre selon la valeur du temps de propagation aller et retour entre l'émetteur et le récepteur.

Dans la procédure REJ de récupération des erreurs, il faut que la taille de la fenêtre permette d'accepter un nombre maximum k de trames en suspens, k étant le plus petit nombre entier non inférieur à r , calculé comme suit:

$$r = \frac{T \cdot D}{L}$$

où

T est le débit de transmission (bit/s)

D est le temps de propagation aller et retour (s)

L est la longueur de la trame d'information (bits).

3.3.3.2 Procédure de rejet sélectif

La réponse de *rejet sélectif* (SREJ) est utilisée par le récepteur pour demander la retransmission d'une seule trame d'information identifiée par son numéro de séquence et, simultanément, accuser la bonne réception de toutes les trames d'information précédentes.

Conformément à cette définition de la demande SREJ, il ne peut y avoir en suspens, à un moment donné, qu'une seule situation de SREJ. Ainsi, avec cette procédure, la possibilité de tirer pleinement parti de la couche physique décroît très rapidement à mesure que le taux d'erreur sur les trames dépasse une erreur par temps de propagation aller et retour.

Il est possible de remédier à cette difficulté en employant une autre procédure SREJ qui supprime la fonction d'accusé de réception de la demande de SREJ, permettant ainsi à une station d'envoyer une nouvelle demande de SREJ de retransmission d'une trame d'information défectueuse avant que la trame d'information envoyée en réponse à la première demande de SREJ ait été correctement reçue. Cette procédure de substitution peut être particulièrement avantageuse dans le cas de transmission à grande vitesse par satellite.

Dans cette dernière procédure, la trame de SREJ sert à demander la retransmission d'une seule trame d'information numérotée $N(R)$, les trames d'information jusqu'au numéro $N(R) - 1$ n'étant *pas* considérées comme acceptées.

Les trames d'information suivantes qui sont déjà en transit quand la réponse SREJ parvient à l'émetteur ne sont pas répétées (si elles sont reçues correctement). La réduction du débit en fonction de l'augmentation du taux d'erreur sur les trajets de transmission à temps de propagation élevé est ainsi ramenée au minimum.

La procédure SREJ permet d'obtenir cet avantage moyennant la mise en place d'une très grande capacité de mémoire pour les trames et d'une certaine capacité de traitement pour assurer le rétablissement de la séquence des trames à la réception.

Dans la procédure SREJ de récupération des erreurs, il faut que la taille de la fenêtre permette d'accepter un nombre maximum k de trames en suspens, k étant le plus petit nombre entier non inférieur à r , calculé comme suit:

$$r = 2 \frac{T \cdot D}{L}$$

3.3.3.3 Procédure de rejet sélectif-rejet

Une autre procédure de rejet sélectif-rejet a été proposée; elle est exposée ci-après:

Si le récepteur détecte la perte d'une seule trame d'information, il envoie, après avoir reçu la trame d'information suivante de manière satisfaisante, une réponse SREJ afin de récupérer la trame perdue. Toutes les trames d'information reçues correctement, et en séquence, après la trame perdue sont stockées dans le récepteur en attendant que la trame perdue ait été récupérée.

Si le récepteur détecte une perte de séquence entre deux trames d'information, il envoie une réponse REJ et élimine toutes les trames d'information qu'il reçoit ultérieurement, jusqu'à ce que la trame perdue ait été retrouvée.

Si la perte d'une autre trame d'information est détectée avant que la situation d'exception créée par le SREJ ait été rétablie, le récepteur stocke toutes les trames d'information reçues après la perte de la première trame et avant la perte de la seconde, en éliminant toutes les trames d'information suivantes jusqu'à ce que la première trame perdue ait été récupérée. Une fois cette première trame récupérée, le récepteur envoie une réponse REJ pour récupérer la deuxième trame perdue et les trames reçues par la suite mais éliminées.

Appliquée sur des trajets de transmission à long terme de propagation, la procédure SREJ-REJ donne, pour les débits en fonction du taux d'erreur, des valeurs qui sont légèrement inférieures à celles que l'on obtient avec la procédure SREJ et nettement meilleures que celles obtenues avec la procédure REJ.

Pour un taux d'erreur donné, le temps moyen d'occupation de la mémoire tampon pendant lequel les trames sont stockées dans le récepteur est, avec la procédure SREJ-REJ, sensiblement inférieur à ce qu'il est avec la procédure SREJ.

Dans la procédure SREJ-REJ de récupération des erreurs, il faut que la taille de la fenêtre permette d'accepter un nombre maximum k de trames en suspens, k étant le plus petit nombre entier non inférieur à r , calculé comme suit:

$$r = 2 \frac{T \cdot D}{L}$$

4 Combinaison des procédures de protection contre les erreurs

4.1 Combinaison des procédures CESR et des procédures ARQ

Dans les liaisons par satellite, la réduction du débit des données en fonction de l'augmentation du taux d'erreur peut être maintenue à un minimum par combinaison des procédures de correction des erreurs sans voie de retour (CESR) et des procédures de demande automatique de répétition (ARQ).

La correction des erreurs sans voie de retour ramène le débit effectif des données du support de transmission dans des conditions d'exploitation acceptables quand le taux d'erreur est faible et elle ne présente l'efficacité maximale que pendant un faible pourcentage de temps, où les caractéristiques d'erreur sont insignifiantes, le recours à une procédure ARQ plus efficace (par exemple, SREJ au lieu de REJ) peut être considéré comme une solution de remplacement possible à la combinaison des procédures CESR et ARQ.

4.2 Combinaison de procédures CESR

L'utilisation d'un codage en deux étapes pour la correction des erreurs sans voie de retour (CESR) peut améliorer très sensiblement la qualité d'une liaison par satellite. On trouvera à la figure 1/X.141 le schéma général d'un tel système de codage à combinaison de deux étapes de codage. Ce schéma comprend deux couples d'intercaleurs dont le fonctionnement est étudié ci-dessous et qui peuvent être omis dans certains cas.

Ces couples d'intercaleurs permettent de désintégrer les paquets d'erreurs et de disperser ces erreurs de façon à minimiser la probabilité qu'un long paquet d'erreurs incorrigibles se présente à l'entrée d'un décodeur. Le couple d'intercaleurs de symboles de voies peut être supprimé si l'on sait que les erreurs dans les voies sont indépendantes du point de vue statistique. Lorsqu'une erreur du décodeur interne se produit, le décodeur produira un paquet d'erreurs. En conséquence, il est nécessaire d'inclure un couple d'intercaleurs d'intercode, conçus pour transformer les éventuels paquets d'erreurs du décodeur interne et pour permettre une correction efficace de ces erreurs par le décodeur externe. Ainsi, un système de codage à combinaison bien conçu comprend des codes et des intercaleurs destinés à se compléter mutuellement. Le code interne corrige presque toutes les erreurs des voies et le code externe corrige les erreurs résiduelles provoquées par des défaillances du décodeur interne et par des erreurs.

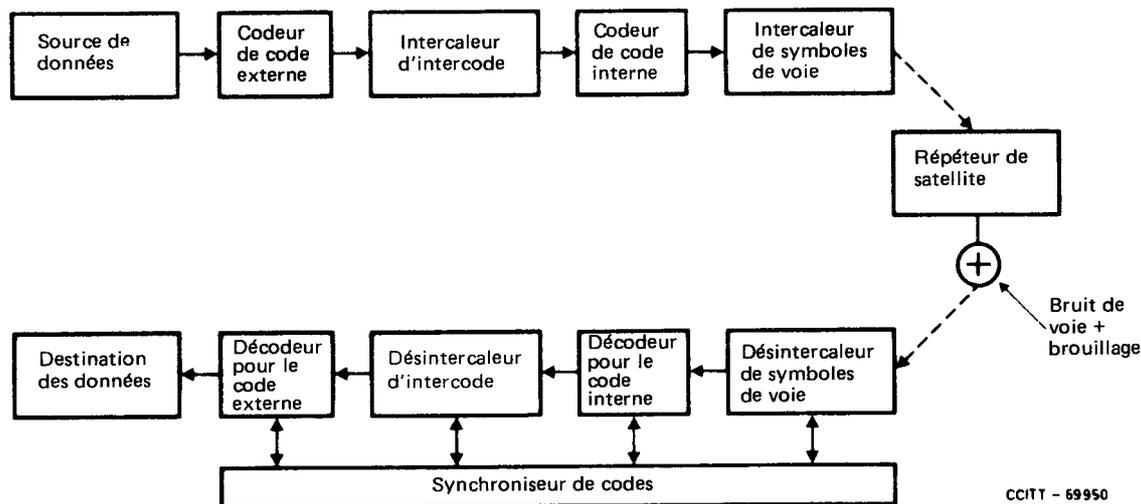


FIGURE 1/X.141

Configuration d'un système CESR avec combinaison de deux étapes de codage

Le dernier point dont il faut tenir compte pour choisir un code combiné est celui du temps de décodage et de la synchronisation. Dans la sélection des codes et des intercaleurs, il faut veiller à ce que

- 1) le retard causé par le système CESR soit petit par rapport au temps de propagation par satellite (approximativement 250 ms), et
- 2) que la perte de données provoquée par une désynchronisation soit minimale.

APPENDICE I

(à la Recommandation X.141)

Notes explicatives concernant la séquence de contrôle de trame

Dans les notes explicatives ci-après on a employé les abréviations suivantes:

$G(x)$ est le polynôme représentant la séquence de k bits entre le drapeau d'ouverture et le début de la séquence de contrôle de trame (FCS),

$P(x)$ est le polynôme générateur: $(x^{16} + x^{12} + x^5 + 1)$,

$L(x)$ est le polynôme représentant 16 "un" consécutifs, $(x^{16} + x^{15} + x^{14} + \dots + x + 1)$,

$R(x) = \overline{\text{FCS}}$ est le reste de la division modulo 2:

$$\frac{x^{16} G(x) + x^k L(x)}{P(x)} = Q(x) + \frac{R(x)}{P(x)}$$

Dans la séquence de contrôle de trame (FCS), la multiplication de $G(x)$ par x^{16} correspond à un décalage de 16 places du $G(x)$ du message, ce qui ménage l'espace de 16 bits nécessaire au FCS.

L'addition de $x^k L(x)$ à $x^{16} G(x)$ équivaut à inverser les 16 premiers bits de $x^{16} G(x)$ et correspond à l'initialisation du premier reste à une séquence "tout en un". Cette addition est prévue pour empêcher l'oblitération des drapeaux d'ouverture, dont la détection pourrait être impossible si le premier reste était nul. La complémentation de $R(x)$ par l'émetteur, une fois la division effectuée, garantit que le message reçu sans erreur donnera dans le récepteur un reste spécifique, sans zéros. Ce reste assure une protection contre le risque de ne pouvoir détecter une oblitération des drapeaux de fermeture.

Dans l'émetteur, le FCS est ajouté à $x^{16} G(x)$, ce qui donne un message total $M(x)$ de longueur:

$$n = k + 16, \text{ où } M(x) = x^{16} G(x) + FCS$$

Dans le récepteur, le $M(x)$ entrant est multiplié par x^{16} , ajouté à $x^n L(x)$ et divisé par $P(x)$, comme indiqué ci-après:

$$\frac{x^{16} M(x) + x^n L(x)}{P(x)} = \frac{x^{16} [x^{16} G(x) + FCS + x^k L(x)]}{P(x)}$$

Les expressions qui suivent sont déduites de celles qui précèdent; on notera que, l'addition de $L(x)$ sans report d'un polynôme $R(x)$ de même longueur, équivaut à inverser $R(x)$ bit par bit et à remplacer FCS par $\overline{R(x)} = R(x) + L(x)$; en ordonnant les termes du numérateur:

$$\begin{aligned} \frac{x^{16} [x^{16} G(x) + R(x) + L(x) + x^k L(x)]}{P(x)} &= \\ \frac{x^{16} [x^{16} G(x) + x^k L(x) + R(x)] + x^{16} L(x)}{P(x)} &= Qr(x) + \frac{Rr(x)}{P(x)} \end{aligned}$$

Si la transmission a eu lieu sans erreur, le terme $[x^{16} G(x) + x^k L(x) + R(x)]$ est divisible par $P(x)$ et le reste obtenu après division est:

$$\frac{x^{16} L(x)}{P(x)},$$

soit 0001110100001111 (de x^{15} à x^0).

Si la transmission a eu lieu sans erreur et si le FCS est inversé avant la division dans le récepteur, le reste s'annule; en effet, inverser le FCS équivaut à ajouter un autre $x^{16} L(x)$ au numérateur, et

$$\frac{x^{16} L(x) + x^{16} L(x)}{P(x)} = 0.$$